



Universität für Bodenkultur - Wien

Ökonomischer Vergleich verschiedener Energiesysteme für Haushalte am Beispiel eines Niedrigenergiehauses

MASTERARBEIT

Stockinger Stefan, B.Sc.

Wien, 2011

Ao.Univ.Prof. Dr. Oliver Meixner

Institut für Marketing und Innovation

Abstract

At the current energy market, natural gas as well as renewable energies are getting more and more important. Within this study several heating systems for households were analysed (gas boilers, heating pumps and pellet firing). After a short introduction of the ecological performance of these systems, this study focuses on their profitability.

In a first step, the heating installations had to be dimensioned for a low energy house. Afterwards, the economic calculations were done for a period of 25 years. The necessary data were gained by literature, offers from companies, expert interviews and appropriate market analysis. The applied comparison was done by use of the annuity method, which is the basic computation technique for building services engineering due to the guideline *VDI 2067*. Depending on investment, operation and consumption costs, an annuity is calculated for every year on the basis of which the different facilities can be compared. Additionally, the calculations were also done with another method called *dynamic comparison method*, which was developed within this thesis. It extends the annuity method, as opportunity costs and flexible credit periods are included. Especially the last extension makes the *dynamic comparison method* a very useful technique for practical applications.

The analytic results vary depending on the applied method. But basically it has been observed, that in all performed comparisons, heating pumps have considerably lower costs than the reference systems. The long term performance of gas boilers and pellet firing systems is almost identical. For the analysis, all calculations were done in general as well as including various subsidies. Therefore, the results allow conclusions regarding the actual system and to make suggestions about a possibly improvement of it.

The entire computation was done by use of the spreadsheet software *Open Office Calc*. Therefore, with a few modifications the calculation program can be adapted to various other energy systems. For that reason, beside the comparison of heating facilities, another analysis was done for electrical energy systems. In particular, conventionally purchased photovoltaic facilities in two operation modes, grid connected or grid parallel were analysed. Here the results were clear: Regarding austrian radiation rates, PV-systems are not competitive compared to conventional purchased electricity. However, including the current subsidies, both PV-modes can be considered to be a profitable future investment.

Kurzfassung

Am heutigen Energiemarkt gewinnen neben der fossilen Ressource Gas auch die erneuerbaren Energieträger zusehens an Bedeutung. Bei den hier betrachteten Haushaltswärmeanlagen konkurrieren dabei vorwiegend Gasheizungen mit Wärmepumpenanlagen und Pelletöfen. In dieser Arbeit wird, neben einer kurzen ökologischen Betrachtung, vor allem auf die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Systeme eingegangen.

Im ersten Schritt wurden die Heizungen für ein fiktives Niedrigenergiehaus dimensioniert und danach über einen Zeitraum von 25 Jahren ökonomisch miteinander verglichen. Die Daten für die Berechnungen sind dabei über Fachliteratur, Firmenangebote, Expertengespräche und entsprechende Marktanalysen ermittelt worden. Der Vergleich greift auf die von der Richtlinie *VDI 2067* vorgeschlagene Annuitätenmethode zurück. Mit dieser berechnet sich abhängig der Investitions-, Verbrauchs- und Betriebskosten eine jährliche Gesamtannuität, anhand welcher die Anlagen dann gegenübergestellt wurden. Zusätzlich zu dieser Methodik sind die Berechnungen noch über die hier entwickelte *dynamische Vergleichsrechnung DV* durchgeführt worden. Sie erweitert die Annuitätenmethode insofern, als dass sie Opportunitätskosten und flexible Kreditzeiträume miteinbezieht. Gerade über letztere Erweiterung stellt die *DV* somit ein an praktische Verhältnisse angepasstes Verfahren dar.

Die Analyseergebnisse variieren je nach angewandter Methodik. Grundsätzlich konnte aber festgestellt werden, dass die Wärmepumpensysteme bei allen Vergleichen immer deutlich geringere Kosten aufweisen als die Referenzsysteme. Gastherme und Pelletofen schneiden also schlechter ab als die WP-Anlagen und sind in direkter Gegenüberstellung nach 25 Jahren etwa kostengleich. Da die Berechnungen sowohl allgemein, als auch unter Berücksichtigung diverser Förderungsmodalitäten durchgeführt wurden, lassen die Ergebnisse Rückschlüsse auf das 2010 gültige Fördersystem zu und geben zusätzlich Anregungen, wie dieses möglicherweise zu verbessern wäre.

Alle Berechnungen wurden in einem speziell für diese Arbeit implementierten Tabellenkalkulationsprogramm der Software *Open Office Calc* durchgeführt. Dieses Programm ist dabei so allgemein gehalten, dass es über geringe Modifikationen auch auf andere Energiesysteme anwendbar ist. Aus diesem Grund wurde, im Anschluss an die Betrachtungen der Wärmesysteme, noch eine Analyse diverser Elektroenergiesysteme durchgeführt. Konkret handelt es sich dabei um einen Vergleich des konventionellen Strombezugs mit dem Bezug über eine Photovoltaikanlage, welche entweder netzgekoppelt oder netzparallel betrieben wird. Die Ergebnisse dieser Analyse waren eindeutig. Bei österreichischen Strahlungsverhältnissen sind die PV-Systeme derzeit noch nicht konkurrenzfähig, verglichen mit alleinigem Netzbezug. Unter Einbeziehung der derzeitigen Subventionszahlungen, stellen aber beide PV-Anlagen eine sehr lukrative Zukunftsinvestition dar.

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
BIV	Bruttoinlandsverbrauch
BK	Betriebskosten
BW	Brennwert
DV	Dynamische Vergleichsrechnung
EE ₁	Erneuerbare Energie
EE ₂	Energetischer Endverbrauch
EPI	Energiepreisindex
Erl.	Erlöse
EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FBH	Fußbodenheizung
FK	Flachkollektor
fK	fiktives Konto
GA	Gesamtausgaben
GTS	Gasthermensystem
HPS	Holzpelletsystem
HWB	Heizwärmebedarf
IK	Investitionskosten
JAZ	Jahresarbeitszahl
JK	Jahreskosten
KK	Kreditkosten
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LB	Leistungsbedarf
LSM	Logistisches Substitutionsmodell
MFH	Mehrfamilienhaus
NGO	Nichtregierungsorganisation (non-governmental organisation)
OK	Opportunitätskosten
PPI	Pelletpreisindex
PV	Photovoltaik
TK	Thermischer Kurzschluss
VA	Vakuumkollektor
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VGK	Vergleichskosten
VK	Verbrauchskosten
VLT	Vorlauftemperatur
VPI	Verbraucherpreisindex
WH	Wandheizung
WP	Wärmepumpe
WPS	Wärmepumpensystem
ZE	Zinserlöse

Vorwort

Gegenstand dieser Arbeit ist ein mikroökonomischer Vergleich verschiedener Energiesysteme für Niedrigenergiehäuser. Aufgrund der technisch-naturwissenschaftlichen Erläuterungen des zweiten Kapitels und der dem Vergleich zugrunde liegenden ökonomischen Theorie zu Beginn des vierten Kapitels, kann es bei geringem Verständnis über Analytik und Energiewirtschaft gleichermaßen von Experten, als auch von Laien gelesen werden. Fremdwörter, Abkürzungen und Fachbegriffe sind dabei immer **fett gedruckt** und werden am Ende der Arbeit im Glossar näher erläutert.

Das für die Berechnungen verwendete Programm wurde mit der Tabellenkalkulations-Software *Open Office Calc* erstellt und wird im Weiteren als *Calc-Programm* bezeichnet. Aufgrund der detaillierten Beschreibungen innerhalb dieser Arbeit und im Programm selbst, ist es sowohl für Laien als auch für Experten möglich, verschiedene Energiesysteme selbst zu parametrieren und diese anschließend ökonomisch zu vergleichen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit in verschiedenster Art und Weise unterstützt haben. Zuerst möchte ich mich bei Herrn Ao.Univ.Prof. Dr. Oliver Meixner bedanken. Er hat mir, obwohl er mich als Student nicht kannte, die Ausarbeitung dieser Analyse erst ermöglicht. Weiters gilt allen Experten aus der Technik- als auch der Finanzbranche mein Dank für die Zusammenarbeit. Danke auch den beiden Korrekturlesern Herrn Schleicher D. und Herrn Zinganell C. für ihre konstruktiven Tips zur Verbesserung dieser Arbeit. Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Eltern bedanken, die mir seit Beginn meines Studiums immer die Möglichkeit gegeben haben, mich abseits der universitären Unterrichtung auch als Mensch zu bilden und weiter zu entwickleln. Denn aus meiner Sicht, macht erst eine zum Studium parallele menschliche Bildung, einen *echten* Akademiker aus.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegendes zur österreichischen Energiewirtschaft	1
1.1	Energiebilanz Österreich	1
1.2	Import, Export & Eigenproduktion	3
1.2.1	Österreich	3
1.2.2	Fossile Rohstoffe im Zeitraster	4
1.3	Private Haushalte	5
2	Technisch naturwissenschaftliche Grundlagen	9
2.1	Energiesparhäuser	9
2.1.1	Energiespartips	9
2.1.1.1	Heizkosten sparen	9
2.1.1.2	Minimierung der Lüftungsverluste	10
2.1.1.3	Stromkosten sparen	10
2.1.1.4	Wasserbedarf beachten	10
2.1.2	Gebäudetypen	11
2.1.2.1	Niedrigenergiehaus	11
2.1.2.2	Niedrigstenergiehaus	11
2.1.2.3	Passivhaus	12
2.1.2.4	Nullenergiehaus-Plusenergiehaus	12
2.2	Wärmenutzungsanlage	13
2.2.1	Speicher	13
2.2.2	Wärmeabgabesystem	14
2.2.2.1	Fußbodenheizung (FBH)	14
2.2.2.2	Wandheizung (WH)	14
2.2.2.3	Radiatoren	14
2.3	Gasheizungssysteme	15
2.3.1	Erdgasheizkessel	16
2.3.2	Gastherme	16
2.4	Wärmepumpe	17
2.4.1	Grundprinzip	18
2.4.2	Bauarten	20
2.4.2.1	Erdreich	20
2.4.2.2	Grundwasser	22
2.4.2.3	Außenluft	23
2.4.3	Bezeichnung von Wärmepumpen	24
2.4.4	Betriebsarten	25
2.5	Holzheizungssysteme	25
2.5.1	Grundlegendes zum Rohstoff	25
2.5.2	Bereitstellung und Trocknung von Holz	26
2.5.3	Verbrennungsvorgang	28

2.5.4	Hackschnitzelfeuerung	28
2.5.5	Pelletfeuerung	28
2.6	Aktive Solarenergienutzung	30
2.6.1	Solarthermische Anlagen	31
2.6.2	Photovoltaik (PV)	32
2.6.2.1	Stand der Technik / Wirtschaftslage:	34
2.7	Mikro-Kraftwärmekopplungssysteme	35
2.7.1	Einsatzmöglichkeiten von Blockheizkraftwerken	36
2.7.2	Funktionsweise und Anlagenkonzepte	37
2.7.2.1	Verbrennungsmotor	37
2.7.2.2	Stirlingmotor	38
2.7.3	Ökonomische Betrachtungen von Mikro-KWK's	38
2.8	Ökologische Betrachtungen ausgewählter Systeme	40
2.8.1	Photovoltaik im ökologischen Vergleich mit konventionellem Strom- bezug	41
2.8.2	Wärmeenergiesysteme im ökologischen Vergleich	42
3	Dimensionierung des Niedrigenergiehauses und dessen Energiesysteme	47
3.1	Das Muster-Niedrigenergiehaus	47
3.2	Technische Auslegung	48
3.2.1	Direkte Erdkollektor-Wärmepumpe	49
3.2.2	Luft-Wärmepumpe	50
3.2.3	Gasheizungssystem	51
3.2.4	Pelletheizung	51
3.2.5	Datenübersicht der Wärmesysteme	52
3.2.6	Dimensionierung der Photovoltaik	52
4	Ökonomischer Vergleich und Modellierung	55
4.1	Verfahren der Investitionsrechnung	55
4.1.1	Die Annuitätenmethode	56
4.1.1.1	Grundlagen	56
4.1.1.2	Voraussetzungen	56
4.1.1.3	Ermittlung der Kosten	57
4.1.1.4	Spezifische Probleme der Annuitätenmethode nach VDI 2067	59
4.1.2	Dynamische Vergleichsrechnung (DV)	60
4.2	Der Muster-Kunde	62
4.2.1	Praktische Vorgehensweise bei der Angebotseinholung	62
4.3	Kostenaufteilung der einzelnen Systeme	63
4.4	Förderungsmodalitäten von Oberösterreich	66
4.5	Festlegung der Preise, Steigerungsraten & Faktoren	67
4.5.1	Inflation	68
4.5.2	Strompreis und Gaspreis	68
4.5.3	Pelletpreis	69
4.5.4	Inflationsbereinigung	70
4.5.5	Zinssätze	70
4.5.6	Eigenbedarfsfaktor der PV	71
4.6	Vergleich der Wärmesysteme	71
4.6.1	Modellierung	73
4.6.2	Wärmesystemvergleich nach VDI 2067 (Variante 1)	73

4.6.2.1	Systemvergleich nach Variante 1 ohne Förderungen . . .	73
4.6.2.2	Systemvergleich nach Variante 1 inklusive Förderungen	73
4.6.2.3	Schlussfolgerungen für Wärmesysteme (VAR1)	74
4.6.3	Wärmesystemvergleich nach DV (Variante 2)	75
4.6.3.1	Luft-Wärmepumpe versus Erdkollektor-Wärmepumpe .	75
4.6.3.2	Erdkollektor-Wärmepumpe versus Gastherme	79
4.6.3.3	Gastherme versus Pelletofen	80
4.6.3.4	Schlussfolgerungen für Wärmesysteme (VAR2)	81
4.6.3.5	Weitere Vergleichsszenarien	82
4.7	Photovoltaik versus konventionellem Strombezug	85
4.7.1	Systemvergleich	86
4.7.1.1	Photovoltaik versus konventionellem Strombezug (ohne Förderungen)	86
4.7.1.2	Photovoltaik versus konventionellem Strombezug (inklusive Förderungen)	88
4.7.1.3	Systemvergleich nach DV (Variante 2)	91
4.7.2	Schlussfolgerungen für Elektroenergiesysteme	91
5	Fazit	95
A	Berechnungen von Kapitel 3 & 4	101
	Glossar	112
	Abbildungsverzeichnis	114
	Tabellenverzeichnis	116
	Literaturverzeichnis	117
	Eidesstattliche Erklärung	125
	Lebenslauf	127

Kapitel 1

Grundlegendes zur österreichischen Energiewirtschaft

Zu Beginn dieser Arbeit sollen ein paar grundlegende Dinge der österreichischen Energiewirtschaft dargestellt werden. Wenn dabei vom *heutigen Energiebedarf* die Rede ist, so wird immer auf die letztverfügbaren Daten des Jahres 2008 Bezug genommen. Neben einem ersten Überblick beschäftigt sich dieser Teil der Arbeit vor allem mit der heimischen Import-Export-Situation und belegt die bei den meisten Energieträgern starke Abhängigkeit Österreichs vom Ausland. Nur bei den erneuerbaren Energieträgern wie Biomasse oder Wasserkraft gibt es bei hohen Erzeugungsraten auch einen nennenswerten Eigenproduktionsanteil. Am Kapitelende wird dann noch der Bereich *Private Haushalte* etwas näher betrachtet, da sich die vorliegende Arbeit hauptsächlich mit Haushaltsenergiesystemen beschäftigt.

1.1 Energiebilanz Österreich

Im Jahr 2008 setzte sich der Energiemix, gemessen am **Bruttoinlandsverbrauch BIV**, wie in [Tabelle 1.1](#) angegeben zusammen. Vergleicht man nun die Werte der beiden angegebenen Jahre, so sieht man, dass der Ölbedarf seit 1990 nicht mehr die Wachstumsraten aus den 1960er Jahren hat und der Marktanteil sogar leicht gesunken ist. Dennoch stellt Öl mit 39,4% den hierzulande dominierenden Rohstoff dar. Danach kommt mit einem Anteil von 22,1% Gas, welches von vielen Energiewirtschaftlern als der Rohstoff der Zukunft gehandelt wird. Einerseits weil es eine bessere CO₂-Bilanz aufweist als Öl und andererseits aufgrund der effizienten Nutzungsmöglichkeiten, vor allem für die Erzeugung elektrischer Energie. Die höchste Steigerungsrate des BIV seit 1990 können mit 130,6% die sonstigen erneuerbaren Energieträger aufweisen, was vor allem auf den Anstieg der Biomassenutzung zurückzuführen ist. [1], [10]

Im Vergleich zu den EU27-Ländern hat Österreich 2008 einen deutlich höheren Anteil an erneuerbaren Energieträgern. Eine Tatsache, die insbesondere auch der Wasserkraft zu verdanken ist. Während in den 1960er und 1970er Jahren in Europa viele Kernkraftwerke entstanden sind, hat man sich hierzulande für eine elektrische Versorgung hauptsächlich aus Wasserkraft entschieden. Bei der Gasnachfrage liegt Österreich etwa im Durchschnitt und der erhöhte Ölbedarf resultiert in einer geringeren Kohlenutzung. [1], [9]

Um verschiedene Energieträger bzw. die einzelnen Wirtschaftssektoren besser miteinander vergleichen zu können, wird für die weiteren Tabellen und Diagramme der **ener-**

¹Wasserkraft: inklusive Außenhandel elektrischer Energie

²Sonstige EEs: Sonstige erneuerbare Energieträger (ohne Wasserkraft)

Jahr	Kohle	Öl	Gas	Kern-energie	Wasser-kraft ²	Sonstige EEs ²
1990	16,3%	42,2%	20,8%	0%	10,6%	10,1%
2008	10,6%	39,4%	22,1%	0%	10,8%	17,1%
EU27 (2008)	18,8%	34,5%	24,6%	13,9%	1,5%	6,7%

Tabelle 1.1: Bruttoinlandsverbrauch Österreich [1]

getische Endverbrauch EE herangezogen. Im Gegensatz zum BIV berücksichtigt diese Kenngröße auch die Umwandlungsverluste der einzelnen Technologien, den Eigenverbrauch der Kraftwerke und die nichtenergetische Verwendung. Somit können Daten bereitgestellt werden, welche die dem Endverbraucher zur Verfügung stehende Energie beziffern. Da sich die Arbeit hauptsächlich mit privaten Haushalten beschäftigt, ist die Kennzahl EE für die folgenden Überlegungen optimal. [Abbildung 1.1](#) zeigt die Entwicklung des energetischen Endverbrauchs in Österreich für die Jahre 1970 bis 2008. Man sieht, dass sich dieser in den letzten 38 Jahren verdoppelt hat und allen Prognosen entsprechend auch in Zukunft weiter steigen wird. Ein Aspekt, der angesichts steigender Energiepreise neben den ökologischen Zielen auch die ökonomischen Möglichkeiten des Energiesparens unterstreicht. Eine genaue Spezifizierung der in der Abbildung verwendeten Bezeichnungen ist in [Tabelle 1.2](#) angegeben. [3]

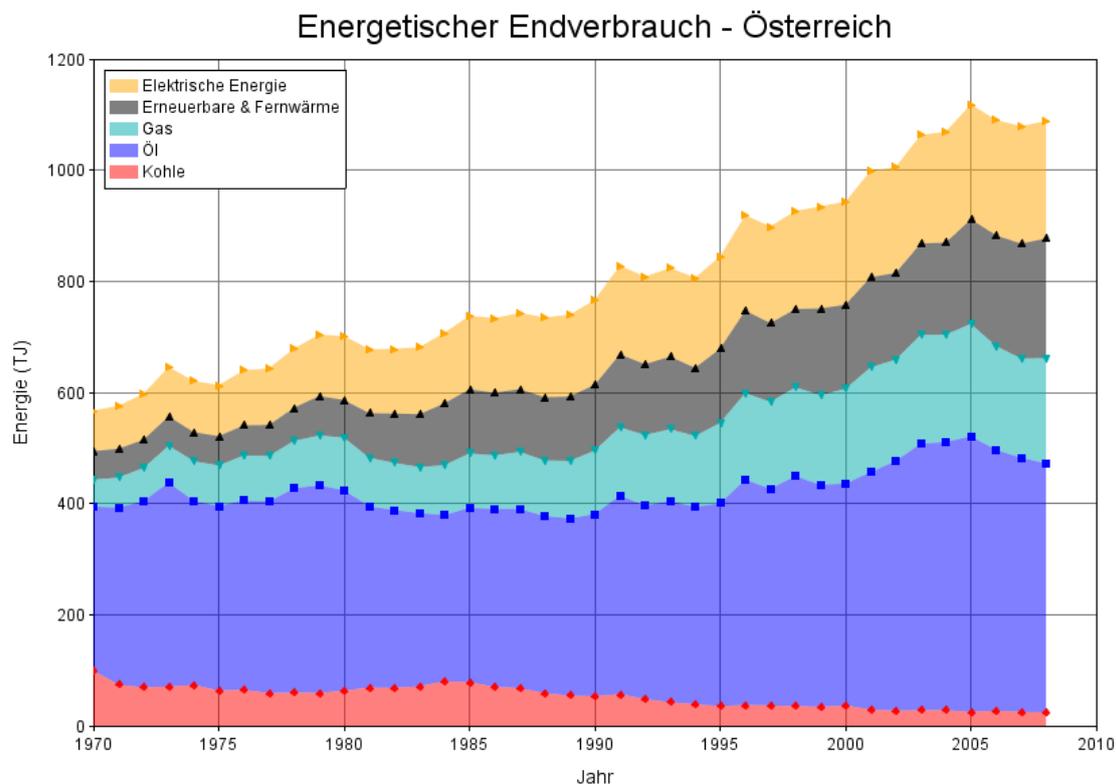


Abbildung 1.1: Energiemarkt Österreich (1970 - 2008) ³

³Das Diagramm wurde mit den Daten aus [3] und [8] erstellt.

Kohle	Steinkohle, Braunkohle, Braunkohlenbriketts, Brenntorf, Koks, Gichtgas, Kokereigas
Öl	Erdöl, Sonstiger Raffinerieeinsatz, Benzin, Petroleum, Diesel, Gasöl, Flüssiggas, Sonstige Produkte für die Ölverarbeitung, Raffinerie- Restgas
Gas	Mischgas, Naturgas, Generatorgas
Erneuerbare	Brennbare Abfälle, Brennholz, Biogas, Umgebungswärme, Wasserkraft, Windenergie & Photovoltaik

Tabelle 1.2: Energieträger im Detail

1.2 Import, Export & Eigenproduktion

1.2.1 Österreich

Wie dem *Jahresbericht 2008* der *Österreichischen Energieagentur* zu entnehmen, hängt die derzeitige Energieversorgung stark von Importen aus dem Ausland ab. Mit einer **Nettoimporttante** von 69,4% liegt Österreich damit auch deutlich über dem Durchschnitt der EU27-Länder mit 55%. Besonders hohe Importquoten finden sich vor allem bei den Ressourcen Öl und Kohle. Letztere wird beispielsweise zu 100% aus dem Ausland importiert. Aber auch bei Erdgas ist die Eigenerzeugung mit 1,4 Mrd m³ relativ gering im Vergleich zu den Importen von 9,6 Mrd m³. [1], [4]

Die inländische Erzeugung hingegen hat nur im Bereich der erneuerbaren Energien hohe Produktionsraten. 2008 deckten diese insgesamt 78,4% der heimischen Erzeugung ab. Diese Zahlen sind hauptsächlich auf Wasserkraft und Biomasse zurückzuführen und werden laut aktuellen Plänen der Energieversorger auch in Zukunft weiter ansteigen. Der Verband *Oesterreichs Energie* schätzt das außerhalb von Nationalparks und Weltkulturerben gelegene Ausbaupotential für Wasserkraft auf 13TWh oder 46,8PJ. Bei einem derzeitigen energetischen Endverbrauch von elektrischer Energie mit 211,4PJ könnte also ein Bedarfsanstieg von über 22% alleinig durch den Ausbau der Wasserkraft gedeckt werden. Daten, die auf den ersten Blick sehr gut aussehen und die Chance auf eine Minderung der Versorgungsabhängigkeit schließen lassen. Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass viele Natur- und Umweltschützer bereits bei derzeit angedachten Projekten vor den externen Kosten vieler dieser Ausbauprojekte warnen. Externe Kosten bringen einerseits monetäre, andererseits aber vor allem ökologische und gesellschaftliche Risiken mit sich. NGO's stellen hier die Frage, ob es langfristig wirklich sinnvoll ist, die letzten Fließgewässer Österreichs unter den Motiven der Eigenversorgung und des Klimawandels mit Kleinkraftwerken massiv zu beeinträchtigen. [1], [5], [6]

Das wahrscheinlich größte Ausbaupotential der inländischen Energieerzeugung sehen viele in der Wärmeabgewinnung aus erneuerbaren Energieträgern, und zwar vor allem aus Biomasse. In der österreichischen *Energiestrategie 2020* ist die Rede von einem Steigerungspotential mit bis zu 97PJ, wobei etwa die Hälfte des Zuwachses im Bereich der Biomasse und jeweils ein Viertel bei Erdwärme bzw. Solarwärme gesehen wird. Auch die Umweltbedenken sind in diesem Bereich geringer als etwa bei der Wasserkraft. Ob die hoch gesteckten Ziele der *Energiestrategie 2020* aber tatsächlich realisiert werden können, wird von vielen Parametern abhängen, vor allem aber von der Politik. [7]

1.2.2 Fossile Rohstoffe im Zeitraster

Anfang der 1960er Jahre wurde Kohle als vorherrschender Rohstoff der westlichen Welt von Öl verdrängt. Der rasant steigende Bedarf wurde später durch die beiden Ölpreisschocks 1973 und 1979 gedämpft, was auch einen immensen Preisanstieg mit sich brachte. Diese Krisen führten zu Effizienzsteigerungen in allen Sektoren der Energietechnik, zu Ausbau und verstärkter Forschung bei alternativen Energieträgern und zur Verringerung der Ölimporte der westlichen Länder. [9]

Bevor das Öl die Rohstoffmärkte dominierte, war Kohle die mit Abstand wichtigste Ressource am Markt. Die Substitution dieser durch Öl wird am Beispiel Österreich in [Abbildung 1.2](#) anschaulich dargestellt. Dieses Diagramm wurde mit der Software *LSM II* des Instituts *IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis)* für Systemanalyse in Laxenburg, Österreich erstellt. Die Punkte repräsentieren dabei die tatsächlichen Verbrauchsverhältnisse, während die Linien ein mögliches Energieszenario darstellen, das Vergangenheit und Zukunft so genau es geht abbilden soll ⁴. [3], [8]

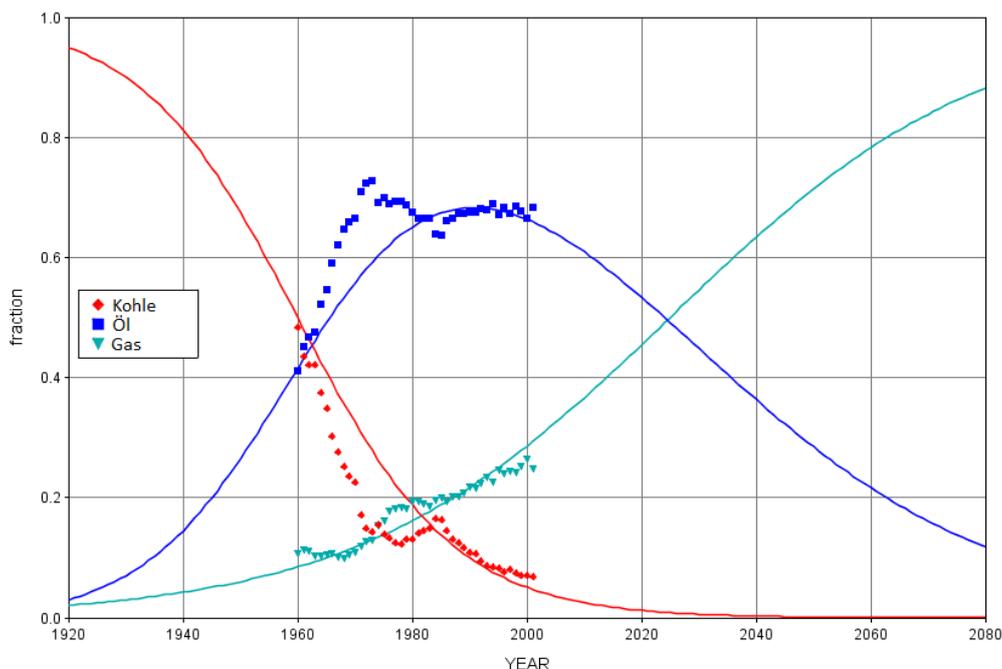


Abbildung 1.2: Kohle, Öl und Gas im Vergleich ⁵

In [Abbildung 1.2](#) sieht man ganz deutlich, dass der Einbruch des Ölbedarfs in den 1970er Jahren zu einer erhöhten Gasnachfrage führte. Außerdem wird in diesem Szenario⁶ davon ausgegangen, dass sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen und sein Ende in einer weitreichenden Substitution von Öl durch Erdgas haben wird. Praktisch gesehen steht Gas nicht unbegrenzt zur Verfügung, was in diesem Modell aber nicht berücksichtigt wird, da hier lediglich die fossilen Rohstoffverhältnisse der nächsten 30 - 40 Jahre dargestellt werden sollen.

⁴Das die Ordinate beschreibende *fraction (Bruchteil)* soll die Verhältnisse der drei Energieträger zueinander darstellen. Die Summe aus Kohle, Öl, und Gas ergibt sich also immer zu Eins.

⁵Das Diagramm wurde mit den Daten aus [3] und [8] erstellt.

⁶Mit den vorliegenden Datenpunkten lassen sich über eine Regressionsanalyse viele verschiedene Zukunftsszenarien darstellen. Laut Experten der TU Wien und entsprechender Fachliteratur ([8]) stellen obige Kurven allerdings den derzeit wahrscheinlichsten zukünftigen Verlauf dar.

Dieses fiktive Modell könnte durchaus Wirklichkeit werden, was man über folgende Fakten beschreiben kann: Zuallererst ist zu sagen, dass der im Modell beschriebene Anstieg der Gasnachfrage im letzten Jahrzehnt in vielen Ländern Europas, den USA, aber auch in aufstrebenden Volkswirtschaften wie etwa China bereits stattgefunden hat. Auch in Zukunft ist, wie am Beispiel Europas deutlich zu erkennen, hier keine Trendumkehr ersichtlich. Neben den bestehenden Leitungen sind zahlreiche neue Gas-Pipelines aus Russland bzw. Asien in Planung oder bereits im Bau. Ob nun die *Ostseepipeline* von Russland nach Deutschland, das russische *South Stream Projekt* oder die *NABUCCO* aus Zentralasien, jedes der drei Projekte soll Milliarden von Kubikmetern Gas nach Europa liefern, um die Energieversorgung des Kontinents für die Zukunft sicherzustellen. Inwieweit dies mit den wirtschaftlichen Zielen der EU konform geht, wird von vielen Experten in Frage gestellt, da man sich dadurch gleichzeitig von einem Rohstoff und einem Land stark abhängig macht ⁷. Und selbst wenn die derzeit einzige nicht-russische in Planung stehende Großpipeline *NABUCCO* wirklich gebaut wird, ist die EU an Russland und dessen mehrheitlich staatlichen Energiekonzern *Gasprom* gebunden, eine Oligopolsituation, die den marktwirtschaftlichen Regeln der EU ganz und gar nicht entspricht. Außerdem sei noch in Frage gestellt, inwieweit sich die ökologischen und klimatischen Ziele der *EU Energiestrategie 2020* mit Energie aus Erdgas umsetzen lassen. Es liegt also hauptsächlich an der Politik, ob neben oder sogar statt den riesigen Pipeline-Projekten auch alternative Energiestrategien entsprechend gefördert und umgesetzt werden. Hier stehen zwei Interessensgruppen klar gegenüber: Einerseits die Umweltlobby und viele Ökonomen der EU, die auf Diversifizierung pochen. Auf der anderen Seite die Gaslobby mit einflussreichen Persönlichkeiten wie Russlands Ministerpräsidenten Vladimir Putin, den für *Gasprom* werbenden deutschen Ex-Kanzler Gerhard Schröder, oder auch den ehemaligen deutschen Außenminister Joschka Fischer, der die Interessen für *NABUCCO* vertritt. Dass Gas der Rohstoff der nahen Zukunft sein wird ist relativ sicher, inwieweit die Energieversorgung dennoch diversifiziert werden kann, wird sich in den nächsten Jahren bis 2020 herausstellen. [10], [9]

1.3 Private Haushalte

Teilt man den energetischen Endverbrauch auf Wirtschaftssektoren auf, so ergibt sich 2008 folgendes Bild ([Abbildung 1.3](#)):

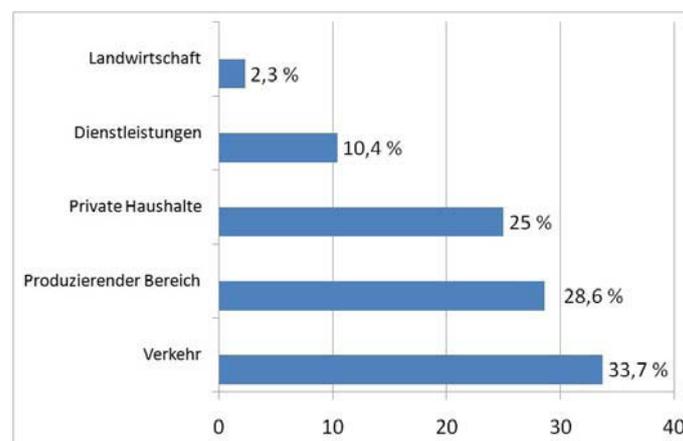


Abbildung 1.3: Wirtschaftssektoren Österreich 2008 [1]

⁷In Österreich betragen die russischen Gaseinfuhren 61,9% aller Gasimporte (Stand 2008). [1]

Es gibt also drei große Bereiche die den Endverbrauch dominieren: *Verkehr, produzierender Bereich*, und die *privaten Haushalte*. Im produzierenden Bereich zeigt sich eine hohe Bedeutung von Strom und Gas, während es im Verkehrssektor eine Dominanz von Ölprodukten gibt. Bei den in dieser Arbeit betrachteten *privaten Haushalten* gibt es nun aber eine Vielzahl an bedeutenden Rohstoffen bzw. Energiesystemen. Erneuerbare Energieträger sind hier sehr gut positioniert und etwa gleichauf mit Ölprodukten, Strom und Gas. Bei Energiesystemen wie Fernwärme oder die Versorgung über Umgebungswärme sind die *privaten Haushalte* beispielsweise Hauptabnehmer und bei Brennholz stellen sie sogar einen Anteil von über 90%. Mehr Details sind der [Tabelle 1.3](#) zu entnehmen. [1], [3]

Energieträger (EE in TJ) ⁸	2000	2004	2008
Brennholz			
privat	55383	52593	57545
gesamter EE	60171	57313	63468
privater Anteil	92 %	91,8 %	90,7 %
Umgebungswärme			
privat	2996	3659	5364
gesamter EE	5336	6531	9264
privater Anteil	56,1 %	56 %	57,9 %
Fernwärme			
privat	21235	23827	27883
gesamter EE	42320	53141	62171
privater Anteil	50,2 %	44,8 %	44,8 %
Gas			
privat	51464	51276	49688
gesamter EE	170613	192989	188777
privater Anteil	30,2 %	26,6 %	26,3 %

Tabelle 1.3: Prozentueller Anteil verschiedener Energieträger für die Haushaltsenergieerzeugung [3]

Bezogen auf den Verbrauchszweck stellt der Bereich *Raumheizung, Warmwasserbereitung und Klimatisierung* mit 29,4% den zweitgrößten Anteil am energetischen Endverbrauch 2008 dar. Hiervon haben Öl und erneuerbare Energien einen Anteil von jeweils ca. 25%, gefolgt von Gas mit 22,7% und Fernwärme mit über 17%. Da in Österreich etwa 45% der erzeugten Fernwärme aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, kann man sagen, dass im Jahr 2008 hierzulande zu fast einem Drittel aus regenerativen Quellen beheizt wird. Dieser Trend scheint sich derzeit auch fortzusetzen. Verdeutlicht werden kann dies etwa durch die Heizstruktur bewohnter Wohnungen ([Tabelle 1.4](#)). Beim Energieträger Holz hat nach Jahren der Stagnation wieder ein Boom eingesetzt (2008: +6%) und auch die Wärmepumpen- und Solarenergiesysteme verweisen mit +39% einen starken Zuwachs. Der 2-Jahresvergleich für fossile Rohstoffe hingegen weist große Rückgänge auf (Kohle -19%, Öl -9%), und auch bei der für Heizungen sowieso stark ineffizienten elektrischen Energie gab es eine Abnahme um -7%. Lediglich Gasheizungen konnten einen Zuwachs von +2% erzielen. Allerdings lassen die neuesten Pipeline-Projekte innerhalb Europas vermuten, dass es bei Gasheizungen in Zukunft noch einen viel höheren Aufschwung geben wird. Inwieweit dies die derzeit steigenden Anteile erneuerbarer Energieträger beeinflusst, ist noch nicht abzusehen. Anhand der beschriebenen Daten und auch

⁸EE ... Energetischer Endverbrauch

aufgrund von Expertenauskünften der Wirtschaft scheint aber klar zu sein, dass in Österreich Umweltenergiesysteme und Gasthermen in Zukunft die Hauptkonkurrierenden im Heizungsbereich sein werden. Die folgenden Kapitel werden sich daher speziell mit diesen Systemen beschäftigen. [1], [3]

Heizmaterial	Wohnungen in 1000	
	2006	2008
Holz, Hackschnitzel, Pellets	697,3	740,6
Kohle, Koks, Briketts	45,7	37,0
Heizöl, Flüssiggas	905,3	822,4
Elektrischer Strom	266,9	249,1
Erdgas	896,4	916,0
Fernwärme ⁹	659,0	750,1
Solar, Wärmepumpen	39,9	55,6
GESAMT	3510,4	3570,9

Tabelle 1.4: Heizstruktur bewohnter Wohnungen, Quelle: Statistik Austria (zitiert in [1])

⁹inklusive Hauszentralheizungen mit unbekanntem Brennstoff

Kapitel 2

Technisch naturwissenschaftliche Grundlagen

Für die ökonomische Modellierung ist ein grundlegendes technisches bzw. naturwissenschaftliches Verständnis der behandelten Materie unumgänglich. Nachdem sich diese Arbeit aber in erster Linie mit wirtschaftlichen Gesichtspunkten beschäftigt, sind die Beschreibungen eher kurz gehalten und beziehen sich in erster Linie auf wesentliche Aspekte bezüglich der Wirtschaftlichkeit. Das Hauptaugenmerk liegt, wie in [Kapitel 1](#) bereits erwähnt, auf Wärmebereitstellungssystemen. Da die ökonomische Modellierung von [Kapitel 4](#) aber sehr allgemein gehalten ist, kann sie auch auf elektrische Energiesysteme angewendet werden. Aus diesem Grund ist neben den Wärmeanlagen auch noch die Photovoltaik als einziges Elektrizitätserzeugendes System erläutert.

2.1 Energiesparhäuser

Bevor man sich für eine Wärmeenergieanlage entscheidet, muss natürlich erst geklärt werden, um welchen Haustyp es sich eigentlich handelt. Denn selbst das effizienteste und ökologischste System kann bei inkorrektter Planung und nicht angepassten Lebensgewohnheiten schnell ineffizient und teuer werden. Wenn beispielsweise bei einem Passivhaus mit hervorragender Lüftung die Türen und Fenster dauerhaft geöffnet sind, bringt die modernste Technik nichts und das Haus wird trotzdem zum teuren Energieverbraucher. Die folgenden Bereiche sind für effizientes Energiesparen sehr nützlich und sollten unbedingt bedacht werden.

2.1.1 Energiespartips

2.1.1.1 Heizkosten sparen

Richtiges Heizen mit tageszeitabhängigen, unterschiedlichen Temperaturen in verschiedenen genutzten Räumen, trägt erheblich zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei. Grundsätzlich können Schlafräume oder Abstellräume deutlich weniger beheizt werden als etwa die Küche, das Wohnzimmer oder die Kinderzimmer. Weiters ist eine Heizung kein statisches, sondern ein dynamisches System mit nicht immer gleichen Wärmeabgabemengen. Es macht also durchaus Sinn, moderne Raumthermostate zu verwenden, die auf Temperaturschwankungen und Raumnutzungsänderungen sofort und schnell reagieren. Diese Regelgeräte können beispielsweise so programmiert werden, dass an Arbeitstagen während des Tages die Temperatur sehr niedrig gehalten wird. Am Wochenende oder am Abend hingegen erhöhen sie die Temperatur dann wieder rechtzeitig vor Beginn der geplanten

Nutzung. Und auch wenn die Anschaffung solcher Thermostate oft teuer erscheinen mag, rechnen sie sich meist schon nach kurzer Zeit. [11]

2.1.1.2 Minimierung der Lüftungsverluste

Es gibt eine Reihe von Gründen warum jedes Wohnhaus mit frischer Luft versorgt werden muss. Gerüche und Feuchtigkeit werden an die Umgebung abtransportiert und verbrauchte Luft wird durch frische Luft ausgetauscht. Aufgrund von Undichtigkeiten der Gebäudehülle bzw. der Fenster- und Türfugen kam in früheren Zeiten der bewussten Lüftung weniger Bedeutung zu. Bei der heute aber immer stärker werdenden Relevanz des Energiehaushaltes muss das Lüftungsverhalten der Bewohner bzw. die Lüftungsanlage als wichtiger Punkt immer mitbehandelt werden, sobald das Gebäude beheizt wird.

Die erste denkbare Lösung wäre ein vollständiges Abdichten von Fenstern und Türen. Dies kann zwar lüftungsbedingte Energieverluste drastisch mindern, jedoch kommt es dann zu einem anderen Problem. Durch zu gutes Abdichten und somit zuwenig Austausch steigt auch die relative Luftfeuchtigkeit der Räume an. Dies führt zu Tauwasserbildung an den Innenoberflächen der Außenbauteile oder an sonstigen Wärmebrücken und in weiterer Folge zu Schimmelbildung. Die Lüftung kann also durchaus eine Herausforderung darstellen und muss unbedingt in die Planung bzw. die Lebensgewohnheiten einbezogen werden.

Mit einem automatischen System wie einer eigenen Lüftungsanlage findet der notwendige Luftaustausch gezielt und kontrolliert statt. Über eine zusätzliche Wärmerückgewinnung ist solch eine Anlage auch sehr energiesparend und umweltfreundlich. Allerdings sollten hier die Fenster während der Heizperiode immer geschlossen bleiben, was Lärmbelastung und Polleneintrag zwar deutlich reduziert, aber viele Benutzer und Hausbauer dennoch hemmt, derartige Anlagen zu installieren.

Beim manuellen Lüften muss darauf geachtet werden, dass die überschüssige Abluft und Feuchtigkeit aus den Räumen abtransportiert wird bei gleichzeitig minimalem Wärmeverlust. Hierfür ist Stosslüften oder Querlüften - also Lüften bei weit geöffneten gegenüberliegenden Fenstern - viel effektiver als langes Kippen der Fenster. [11]

2.1.1.3 Stromkosten sparen

In einem durchschnittlichen mitteleuropäischen Haushalt ohne elektrische Raumheizung liegt der Stromverbrauch am Gesamtenergieverbrauch bei etwa 10 bis maximal 15%¹. Trotz des bescheidenen Verbrauchs kann auch hier über eine bedachte Verwendung noch viel Energie und Geld gespart werden. Methoden zum Stromsparen sind die immer wieder publizierte Vermeidung der Stand-By-Schaltung von Geräten oder der Wechsel von normalen Leuchten gegen Energiesparlampen mit qualitativem Vorschaltgerät. [11]

2.1.1.4 Wasserbedarf beachten

Pro Kopf wird hierzulande ein Trinkwasserverbrauch von ca. 150 Liter pro Tag angenommen. Dieser teilt sich in drei etwa gleich große Bereiche:

- Duschen und Baden
- Kochen, Spülen, Putzen
- Toilettenspülung

¹Dieser Wert gilt vor allem für den derzeitigen Hausbestand. Niedrigenergiehäuser oder Passivhäuser haben hier ganz andere Werte.

Man hat nun viele verschiedene Möglichkeiten den Wasserbedarf einzuschränken. Zum Beispiel reduzieren moderne Toilettenanlagen und deren Spülungssysteme den Wasserverbrauch drastisch. Aber auch durch gezieltes Baden oder Ersetzen von Baden durch Duschen kann effizient und bewusst Energie eingespart werden. [11]

Nach dieser kurzen Einführung in die Möglichkeiten des Energiesparens in Haushalten werden im nächsten Abschnitt nun die einzelnen Gebäudetypen näher beschrieben.

2.1.2 Gebäudetypen

Beim in dieser Arbeit als *Energiesparhaus* bezeichneten Bauwerk handelt es sich um ein Gebäude, das im Vergleich zum durchschnittlichen Verbrauch bestehender Gebäude mit wesentlich weniger Energie auskommt. Um das zu erreichen, sind gute Dämmbaustoffe und auch hoch qualitative Fenster und Türen erforderlich. Die einzelnen Bauelemente werden dabei über ihre verschiedenen Wärmedurchgangseigenschaften eingeteilt. Als Maß dafür gilt der **U-Wert** (in W/m^2K). Je kleiner er ist, desto weniger Wärme wird durch den Bauteil geleitet. [12], [13]

Die heutigen gesetzlichen Baurichtlinien schreiben für Neubauten nun generell schon niedrige Verbrauchswerte vor, sodass dieser Definition entsprechend nahezu jeder Neubau als Energiesparhaus betrachtet werden kann². Erst durch spezielle Bezeichnungen können signifikante Unterschiede der einzelnen Haustypen beschrieben werden. Man muss allerdings beachten, dass diese Bezeichnungen abgesehen vom Passivhaus nicht gesetzlich geschützt sind. Für die folgenden Typen wurden die Definitionen der Seite www.energiesparhaus.at verwendet, die sich in ihren Angaben auf die oberösterreichische Wohnbauförderrichtlinie bezieht. [12], [13]

2.1.2.1 Niedrigenergiehaus

In dieser Arbeit soll jedes Gebäude, das einen spezifischen **Heizwärmebedarf HWB** von $50kWh/m^2a$ nicht überschreitet, als *Niedrigenergiehaus* bezeichnet werden. Um solche niedrigen Werte zu erzielen, ist neben einer kompakten Gebäudeform eine luftdichte und gut gedämmte Außenhülle erforderlich. Und obwohl es keine generellen Aussagen über notwendige U-Werte gibt, sind im Folgenden Anhaltspunkte für die jeweiligen Gebäudeteile angegeben [13]:

- Außenwände: ca. $0,2 W/m^2K$
- Fenster: $1,2 W/m^2K$
- Decken und Dachschrägen: ca. $0,15 W/m^2K$

Außerdem sind zum Erreichen des HWB-Wertes ein effektives Heiz- und Warmwassersystem und oft auch eine kontrollierte Lüftungsanlage notwendig. [13]

2.1.2.2 Niedrigstenergiehaus

Der Begriff *Niedrigstenergiehaus* ist an sich nur gebräuchlich, um eine ausgezeichnete thermische Gebäudequalität zu beschreiben, die den Passivhausstandard jedoch nicht ganz erreicht. Niedrigstenergiehäuser erfordern neben einer hochqualitativen Gebäudedämmung auch immer eine mechanische Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung. Als Heizwärmebedarf soll ein Wert von $30kWh/m^2a$ nicht überschritten werden. [13]

²Nach *OIB-Richtlinie 6 (Energieeinsparung und Wärmeschutz)* dürfen Neubauten ab 01.01.2010 einen maximalen Heizwärmebedarf von $66,5kWh/m^2a$ haben. [12]

2.1.2.3 Passivhaus

Dieser Gebäudetyp weist nach der zertifizierten Definition des *Passivhaus-Instituts Darmstadt (Dr. Feist)* einen HWB von maximal $15\text{kWh/m}^2\text{a}$ auf. Es ist somit so gut wärme-gedämmt und luftdicht, dass auf eine herkömmliche Heizungsanlage verzichtet werden kann. Daher auch der Name *Passivhaus*, denn hier werden keine *aktiven* Systeme zur Beheizung verwendet. Die Räume sollen rein durch innere und solare Gewinne ausreichend erwärmt werden. Bei Ersteren handelt es sich beispielsweise um Personenwärme oder Abwärme von Elektrogeräten. Solare Gewinne bezeichnen die über die Sonne aufgenommene Energie, also über die Verglasung einfallende Strahlung, die im Haus direkt in Wärme umgewandelt wird. Um damit genügend Wärme ins Haus zu bekommen, sollten Passivhäuser große, nach Süden ausgerichtete Glasflächen haben. Für wolkige Wintertage, an denen die Solargewinne nicht ausreichen, ist in Passivhäusern immer eine kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung installiert. Über derartige Anlagen kann gegebenenfalls die Zuluft erwärmt- und die fehlende Solarwärme zugeführt werden. [11], [13]

Passivhäuser sind aufgrund der erhöhten Anforderungen meist nicht ganz billig. Bessere Wanddämmung, 3-glasige Fenster, eine perfekt abgestimmte Lüftungsanlage und die exakte Planung mit Rücksicht auf Solarstrahlung oder auch Wärmebrückenfreiheit im Hausinneren, sind teuer und können ökonomisch gesehen über den Verzicht der Heizungsanlage nicht kompensiert werden. Die Mehrkosten für die Erstinvestition in den Bau betragen bis zu 20%. Allerdings können diese aufgrund der enormen Energieersparnis von bis zu minus 90% Heizenergie im Vergleich zu normalen Baustandards meist schnell ausgeglichen werden. [11], [13]

Da die hervorragenden thermischen Eigenschaften nicht durch ineffiziente Bereitstellung der notwendigen Restenergie zunichte gemacht werden sollen, werden weitere Passivhaus-Kriterien vorgegeben [13]:

- Heizlast: maximal 10 W/m^2
- Gesamt-Endenergiebedarf (inklusive aller Energiedienstleistungen): maximal $42\text{ kWh/m}^2\text{a}$
- Gesamt-Primärenergiebedarf (inklusive aller Energiedienstleistungen): maximal $120\text{ kWh/m}^2\text{a}$

2.1.2.4 Nullenergiehaus-Plusenergiehaus

Ein *Nullenergiehaus* hat eine ausgeglichene Jahresenergiebilanz. Das bedeutet, die benötigte Energie für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom wird mit aktiver und passiver Solarnutzung selbst produziert. Beim *Plusenergiehaus* wird sogar mehr Energie erzeugt als verbraucht. Das kann natürlich nur über entsprechenden Einsatz erneuerbarer Energien bei gleichzeitig höchsten Passivhausstandards erreicht werden. Der Wärme- bzw. Stromverbrauch wird dabei durch Solarkollektoren, Wärmerückgewinnung, Erdwärmeüberträger oder über Photovoltaikzellen bereitgestellt. Diese beiden Haustypen sind herausragende technische Errungenschaften, allerdings bezüglich der Erstinvestitionen derzeit noch sehr teuer. [11]

2.2 Wärmenutzungsanlage

Auch wenn im ökonomischen Vergleich dieser Arbeit die Wärmenutzungsanlage nicht eingerechnet wird, ist es sinnvoll, einen kurzen Überblick zu diesem Thema zu geben. Prinzipiell versteht man unter der Wärmenutzungsanlage im Wesentlichen die folgenden Komponenten ³ [19]:

- Puffer-, Trennspeicher oder Wasserweiche
- Wärmeabgabesystem
- Umwälzpumpe
- Rohrsystem und Anschluss-Gruppe

2.2.1 Speicher

Wenn die Wärmeenergie über einen längeren Zeitraum zur Verfügung gestellt werden soll, empfiehlt sich der Einsatz eines Speichers. Vor allem bei solarthermischen Anlagen ist die Speicherung der nur tagsüber verfügbaren Wärmemenge eine Notwendigkeit. Denn das Solarangebot stimmt in der Regel nicht mit dem Bedarf überein. Aber auch bei Wärmepumpen werden zur Überbrückung von EVU-Sperrzeiten⁴ und für eine verringerte Schalzhäufigkeit der WP oftmals Speicher verwendet. Ein weiterer Grund für einen Speicher ist die Bereitstellung von Warmwasser. Sollte das verwendete Heizsystem auch für die Warmwasserbereitung verwendet werden, so ist eine Verwendung eines Speichers bei nahezu jedem Quellensystem notwendig. Denn das Brauchwasser sollte ohne Verzögerung mit entsprechender Temperatur an den Verbraucher geliefert werden. Das erforderliche Speichervolumen v lässt sich aus der Heizleistung \dot{Q}_H , der spezifischen **Wärmekapazität** c und der Temperaturspreizung $\Delta\vartheta$ folgendermaßen berechnen:

$$v = \frac{\text{Heizleistung}}{\text{spez. Wärmekapazität} \cdot \text{Temperaturspreizung}} = \frac{\dot{Q}_H}{c \cdot \Delta\vartheta} \quad (2.1)$$

Wärmespeicher bilden eine sehr wichtige Komponente des Heizungssystems und es sollte daher eine verlustarme Type verwendet werden, da die Effizienz der Gesamtanlage in hohem Maße davon abhängt. Neben thermischen Speichern für **fühlbare Wärme** und **latente Wärme** gibt es auch noch **chemische Systeme**. Für eine genauere Betrachtung sei hier jedoch auf weiterführende Literatur verwiesen. [14], [15]

³Aufgrund des ökonomischen Arbeitsschwerpunkts werden hier nur die ersten beiden Komponenten näher betrachtet.

⁴Verschiedene Energieversorger bieten vergünstigte Tarife für Wärmepumpensysteme. Dafür gibt es sogenannte Sperrzeiten, in denen die EVU keine Energie für die WP bereitstellen.

2.2.2 Wärmeabgabesystem

Das Wärmeabgabesystem bezeichnet nun die *eigentliche Heizung*, also die Radiatoren, Fußbodenheizungen oder andere Systeme. Dabei werden zwei Begriffe unterschieden, *Strahlungswärme* und *Konvektion*. Grundsätzlich ist bei Konvektions- als auch bei Strahlungssystemen darauf zu achten, dass die Heizflächen eine möglichst niedrige Abgabetemperatur aufweisen, und zwar aus folgenden Gründen [11], [19]:

- Behaglichkeit: Niedertemperatur-Strahlungswärme wird in der Regel als angenehmer und optimal behaglich empfunden.
- Gesundheit: Heizflächen mit niedriger Abgabetemperatur führen zu einer geringeren Luftgeschwindigkeit und somit zu weniger Staubverwirbelung, was vor allem für Allergiker eine Rolle spielt.
- Wirtschaftlichkeit: Bei Niedertemperatur-Strahlungswärme erreicht man gleiche Behaglichkeit mit 2°C niedrigerer Raumtemperatur verglichen mit Radiatorenheizung.

2.2.2.1 Fußbodenheizung (FBH)

Da Strahlungswärme als besonders behaglich empfunden wird, tritt bei einer FBH bereits bei 20°C Raumtemperatur das gleiche Behaglichkeitsgefühl auf, wie in einem konventionell beheizten Raum bei 22°C. Das ist nicht nur angenehmer sondern auch gesünder, da kühlere Luft mehr Sauerstoff enthält. Außerdem spart die Temperaturabsenkung eine Menge an Heizkosten. Als Faustregel kann man sagen, dass eine Absenkung um 2°C eine Ersparnis von bis zu 10% bringt. Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass bei einer FBH die Wärme im E-Strich gespeichert wird und somit auf einen extra Speicher im Heizraum verzichtet werden kann, was einen zusätzlichen ökonomischen Nutzen darstellt ⁵. [14], [15]

Eine Fußbodenheizung ist normalerweise eine Niedertemperatur-Strahlungsheizung und sollte auf maximal 35°C Vorlauftemperatur ausgelegt werden. Seit einigen Jahren gibt es nun aber bereits Hochtemperatur-FBH's die bis ca. 55°C verwendet werden können. In jedem Fall kann eine Fußbodenheizung als alleiniges Wärmeabgabesystem nur bei guter Wärmedämmung eingesetzt werden. [14], [15]

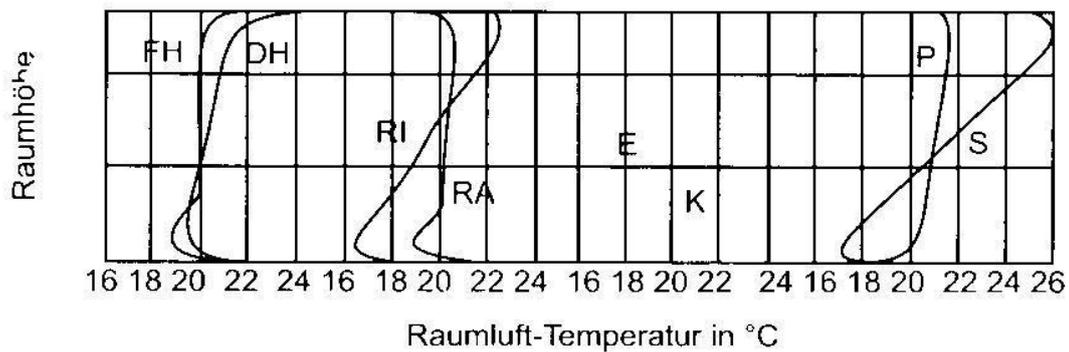
2.2.2.2 Wandheizung (WH)

Im Grunde bietet die Wandheizung die gleichen Vorteile wie eine Fußbodenheizung. Nachdem aber das Behaglichkeitsgefühl auch von der Temperatur der Innenwände abhängt, bringt sie zusätzliches Wohlbehagen. Weiters ist die Wandheizung besonders gut geeignet für ein Raumkühlungssystem. Nachteilig ist die Tatsache, dass die Wandflächen für eine optimale Funktion nicht durch große Möbelstücke verdeckt sein sollten und beim Bohren von Löchern immer besonders Acht zu geben ist. [14], [15]

2.2.2.3 Radiatoren

Radiatoren sind zwar meist billiger als FBH- oder WH-Systeme, schaffen dafür aber auch eine geringere Behaglichkeit als Erstgenannte. Dies lässt sich über die [Abbildung 2.1](#) zeigen.

⁵Der Verzicht auf den Speicher durch einen Estrich ist nur dann möglich, wenn das Wärmesystem alleinig die Heizung übernimmt, nicht aber die Warmwasserbereitung.



Charakteristische Lufttemperatur in Raummitte im Beharrungszustand, bei verschiedenen Heizungen und bei geringen Außentemperaturen.

FH =Fußbodenheizung

DH =Deckenheizung

RA =Radiator-Heizkörper an Außenwand unter Fenster

S = Schwerkraftlufltheizung mit Auslaß an Innenwand

RI = Radiator-Heizkörper an Innenwand

K = Kachelofenheizung

E = Eiserner Ofen

P = Perimeterheizung

Abbildung 2.1: Schichtung der Lufttemperatur verschiedener Heizsysteme [19]

Abbildung 2.1 zeigt die unterschiedliche Schichtung der Lufttemperatur in Abhängigkeit vom Heizsystem. Eine relativ gleichbleibende Temperatur ist dabei sehr wichtig für die Behaglichkeit einer Nutzungsanlage. Das Bild zeigt nun beispielsweise die Kennlinie einer Radiatorenheizung an einer Innenwand. Während der Fußbereich bei ca. 17°C liegt, sind es im Kopfbereich bereits 20 - 22°C. Diese unterschiedlichen Temperaturen zwischen Kopf und Fuß schaffen ein deutliches Unbehagen im Vergleich etwa zu Fußbodenheizungen, wo die Temperatur über die gesamte Raumhöhe annähernd konstant ist.

Werden Radiatoren für Wärmepumpenanlagen eingesetzt, so sind die Vorlauftemperaturen auf maximal 55°C zu begrenzen. Es müssen dann Niedertemperatur-Radiatoren verwendet werden. Generell gesprochen schaffen Radiatorheizungen von den drei hier betrachteten Systemen die geringste Behaglichkeit. Jedoch gibt es einige Anwendungsfälle, in denen sie in Kombination mit anderen Systemen sehr effizient und sinnvoll eingesetzt werden können. Bei einer thermischen Restaurierung von Altbauten ist es beispielsweise nicht immer möglich, das gesamte Gebäude auf Strahlungssysteme umzustellen. Hierfür stellen Niedertemperatur-Radiatoren eine vor allem ökonomisch reizvolle Alternative zu anderen Abgabesystemen dar. [14], [15], [19]

2.3 Gasheizungssysteme

Bei Gasheizungssystemen wird der fossile Rohstoff Gas mit Luft vermischt, in einem Brenner entzündet und in der nachfolgenden Brennkammer verbrannt. Das zu erhitzen- de Medium (meist Wasser) wird dabei über sich in der Kammer befindliche Wärmetau- scher erhitzt und anschließend an die Verbraucher weitergeleitet. Die Beliebtheit der Gas- heizung dürfte vor allem auf den hohen Bedienungskomfort zurückzuführen sein. Der Brennstoff wird über ein öffentliches Versorgungsnetz direkt ins Haus geliefert, man be- nötigt somit keinen Lagerraum und es muss auch kein Brennmaterial nachgelegt werden. Weiters sind Gasheizungen heutzutage technisch weitgehend ausgereift und es gibt eine große Produktpalette für die verschiedensten Anwendungen. Im Folgenden werden einige Grundtypen von Gasheizungssystemen vorgestellt. [27], [28]

2.3.1 Erdgasheizkessel

Den *Erdgasheizkessel* gibt es als Stand- und auch als Wandgerät. Die traditionelle Ausführung ist der *Heizwertkessel*, der den **Heizwert** des Gases nutzt und in Wärmeenergie umwandelt. Die Installation einer solchen Anlage ist relativ einfach und problemlos durchzuführen. Er ist deshalb auch das meistverwendete Gaskesselsystem in österreichischen Haushalten. [27], [28]

Im Gegensatz dazu kann bei Gasheizanlagen auch der **Brennwert** des Rohstoffs genutzt werden. Erdgas enthält neben dem Hauptbestandteil Methan (CH_4) auch noch weitere Gase wie Propan, Butan, Stickstoff etc. und auch Wasserdampf. Im *Brennwertkessel* wird nun nach der Verbrennung über spezielle Wärmetauscher auch die im Wasserdampf enthaltene Energie zur Wärmeerzeugung genutzt, die bei Heizwertkesseln über den Rauchfang entweicht. Es wird also die **Kondensationsenthalpie** des Wassers in Wärme umgewandelt. Der Taupunkt liegt bei den üblichen Druckverhältnissen im Heizkreis bei etwa 56 °C , somit sollte das Heizwasser im Interesse einer optimalen Wärmerückgewinnung auch nicht über dieser Temperatur liegen. Die Brennwerttechnik eignet sich also vor allem für Niedertemperatursysteme. Die Vorteile dieser Technologie sind geringere Betriebskosten, eine bessere Energieausbeute und niedrigere Schadstoffemissionen. Und auch wenn die Erstinvestition höher ist als beim normalen Kessel, so werden die Kosten über die Einsparungen schnell wettgemacht. Zu beachten ist allerdings, dass die Abgase von Brennwertsystemen eine Temperatur von etwa 55 °C haben und ihnen somit der Aufwind fehlt um ins Freie zu gelangen. Die Rauchfänge müssen somit immer mit Gebläsen ausgestattet sein. Ein weiteres Problem ist der im stark abgekühlten Abgas enthaltene Restwasserdampf, der an den kalten Wänden eines älteren Kamins kondensieren und ihn damit zerstören kann. Obwohl Brennwertkessel eine Effizienzsteigerung der Heizung bedeuten, können sie auch mit erheblichen Mehrinvestitionen verbunden sein. [27], [28]

2.3.2 Gastherme

Die baulich kleinere Variante des Gaskessels ist die *Gastherme*, auch *Umlaufferhitzer* genannt. Im Gegensatz zum Kessel hat dieses System einen kleineren Brennraum mit geringerem Wasserinhalt. Für erhöhte Ansprüche sind manche Umlaufferhitzer mit einem integrierten Warmwasserspeicher gekoppelt, was aber auch erhöhte Investitionskosten mit sich bringt. [Abbildung 2.2](#) zeigt das Schema eines solchen Geräts. [28]

Eine weitere Sonderform ist die sogenannte *Kombitherme*, die zwei Funktionen in sich vereint. Sie heizt das ganze Gebäude und versorgt die Bewohner zusätzlich mit Warmwasser. Um beides gleichzeitig zur Verfügung zu stellen sind allerdings relativ hohe Heizleistungen notwendig, welche die theoretische Leistung für Warmwasser und Heizkreis deutlich übersteigen. So benötigt man beispielsweise eine 18kW-Therme um 18 Liter Wasser pro Minute auf 40 °C zu erhitzen. Konstruktionsbedingt besteht hier also ein gewisses Missverhältnis. Überschlagsmäßig kann gesagt werden, dass das Minimum an Leistung für die Warmwasserbereitung mehr als ausreichend ist für die Heizwärmeversorgung eines Gebäudes. Eine Tatsache, auf die bei der technischen Auslegung bzw. der ökonomischen Modellierung weiter eingegangen wird. [28]

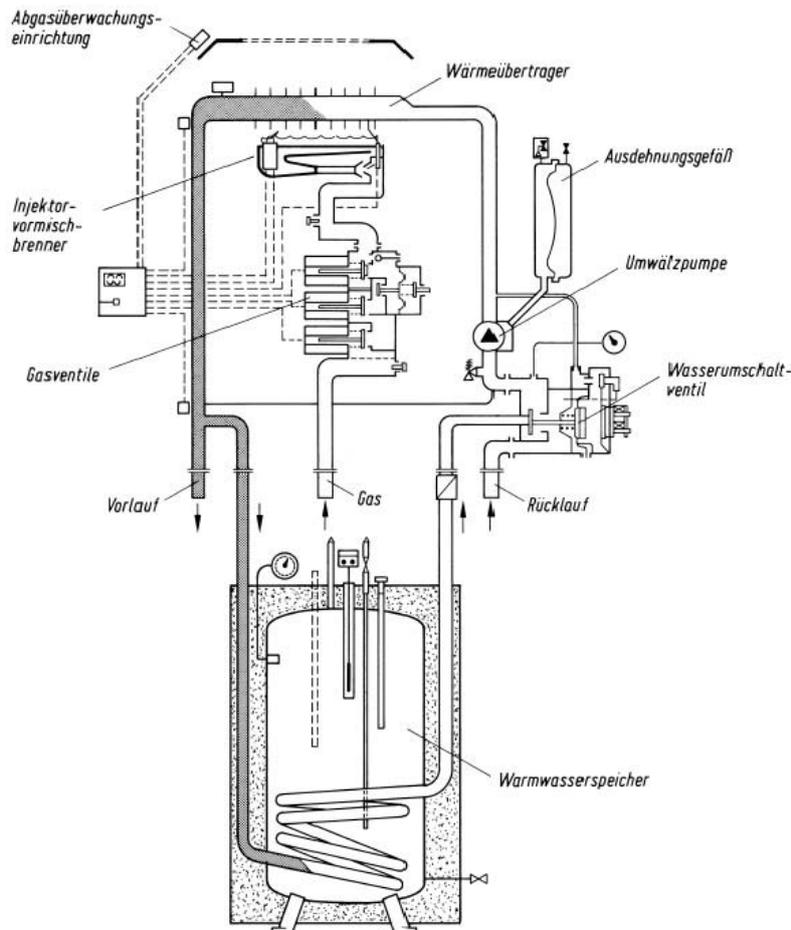


Abbildung 2.2: Schema eines Umlaufwassererhitzers mit indirekt beheiztem Warmwasserspeicher [28]

2.4 Wärmepumpe

Bei konventionellen Verbrennungsheizungen wird Heizwärme niedriger Temperatur erzeugt, indem die Energie des Brennstoffs durch Verbrennung bei sehr hoher Temperatur freigesetzt und von einer geeigneten Wärmenutzungsanlage bei wesentlich geringerer Vorlauftemperatur auf den Wohnraum verteilt wird. Mit der Umwandlung der Verbrennungswärme in Niedertemperaturwärme gehen hohe Verluste einher und weiters ist damit, thermodynamisch gesehen, eine starke Entwertung der Energie verbunden. Eine Wärmepumpe hingegen setzt die Energie deutlich rationeller ein. Um 100% Wärmemenge erzeugen zu können, benötigt ein Brennkessel durchschnittlich 120% Primärenergie. Eine Wärmepumpe hingegen kommt mit etwa 74% aus, da sie sich zum Großteil mit Erdwärme versorgt⁶. Ein weiterer Vorteil der Wärmepumpe ist die Tatsache, dass sie über kleine technische Aufrüstungen sowohl zum Heizen, als auch zum Kühlen verwendet werden kann. [29]

⁶Der Primärenergiebedarf der Wärmepumpe errechnet sich aus dem durchschnittlichen Bedarf an Primärenergieträgern zur Elektrizitätsherstellung.

2.4.1 Grundprinzip

Das Prinzip eines Wärmepumpensystems folgt im Wesentlichen einem rückwärtslaufenden Carnot-Kreisprozess wie in der folgenden [Abbildung 2.3](#) dargestellt:

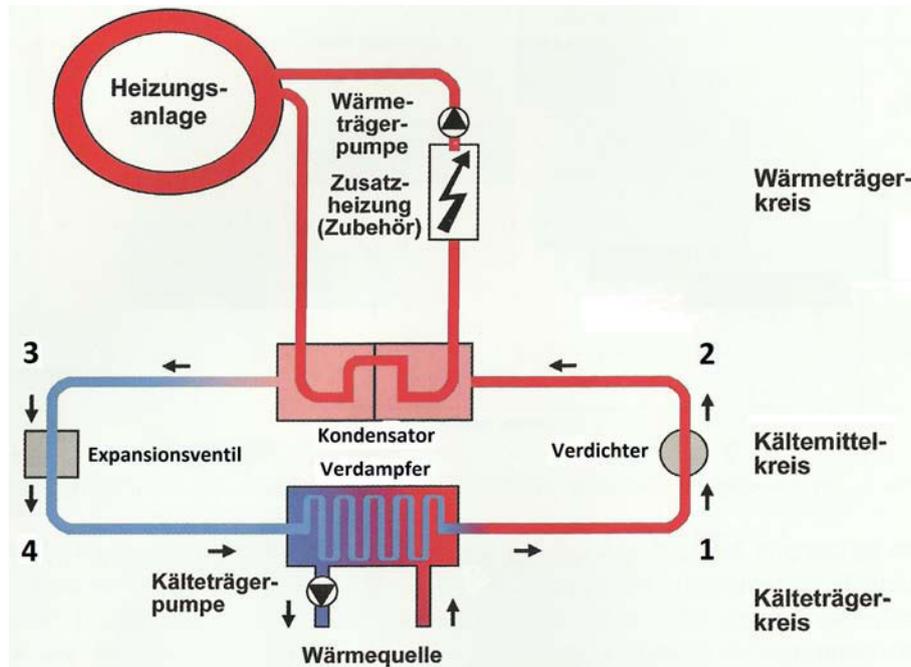


Abbildung 2.3: Schema des Wärmepumpenprozesses [29]

Der Verdampfer wird direkt an der Wärmequelle installiert. In ihm befindet sich das flüssige Arbeitsmittel bei niedrigem Druck. Die Umgebungstemperatur des Verdampfers ist dabei höher als die dem Druck entsprechende innere Siedetemperatur. Aufgrund dieses Temperaturgefälles kommt es zu einer Wärmeübertragung von der Quelle auf das Arbeitsmittel, es wird also siedend und anschließend verdampfen (4 → 1). Dieser Dampf wird unter Verwendung von Antriebsenergie ständig vom Verdichter abgesaugt und komprimiert, wodurch der Druck und auch die Temperatur des Dampfes steigen (1 → 2). Im nächsten Schritt wird der Arbeitsmitteldampf dem Kondensator zugeführt, wodurch es sich wieder verflüssigt und dabei Energie als Kondensationsenthalpie an das Wasser des Heizkreises abgibt (2 → 3). Der Kreislauf schließt sich indem das nun wieder flüssige Arbeitsmittel über ein Expansionsorgan in den Verdampfer zurückgeführt und entspannt wird (3 → 4). [Abbildung 2.4](#) zeigt das **TS-Diagramm** des Prozesses. Dabei entspricht T der Temperatur und S der **Entropie**⁷. [19], [29]

Die Leistungszahl ε stellt die abgegebene Heizleistung der aufgewendeten Antriebsleistung⁸ gegenüber. Ein ε von 3 bedeutet daher, dass das Dreifache der eingesetzten Leistung für den Verdichter in nutzbare Wärmeleistung umgewandelt wird. [19]

$$\varepsilon = \frac{\text{Heizleistung}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\text{Umweltleistung} + \text{Antriebsleistung}}{\text{Antriebsleistung}} \quad (2.2)$$

[Abbildung 2.4](#) stellt den realen Kreisprozess eines Wärmepumpensystems dar. Als Abweichung zum idealen Ablauf wird beispielsweise das Arbeitsmittel im Verdichter stark überhitzt. Dieser überhitzte Dampf kommt anschließend in den Kondensator, wo

⁷Der Kreisprozess lässt sich auch über den Druck als Funktion der Enthalpie darstellen ($p = f(h)$), allerdings ist das TS-Diagramm aus Sicht des Autors anschaulicher.

⁸Bei den in der Praxis meist verwendeten Elektrowärmepumpen wird die Antriebsleistung über elektrische Energie bereitgestellt.

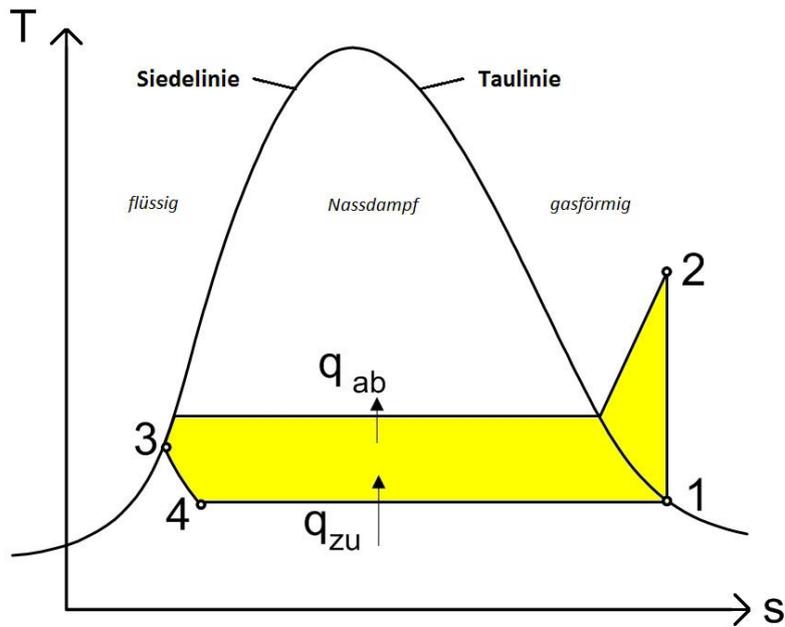


Abbildung 2.4: TS-Diagramm des Wärmepumpenkreisprozesses [32]

er erst abgekühlt werden muss, bevor es zur Aggregatzustandsänderung kommt. Und auch der Übergang $3 \rightarrow 4$ verläuft nicht ideal, da Entropie erzeugt wird.

Ein idealer, rückwärtsgerichteter Carnot-Kreisprozess verläuft über zwei isentrope und zwei isotherme Zustandsänderungen und entspricht im Kreisdiagramm einem Rechteck (Abbildung 2.5).

- $4 \rightarrow 1$: Isotherme Verdampfung
- $1 \rightarrow 2$: Isentrope Kompression
- $2 \rightarrow 3$: Isotherme Kondensation
- $3 \rightarrow 4$: Isentrope Expansion

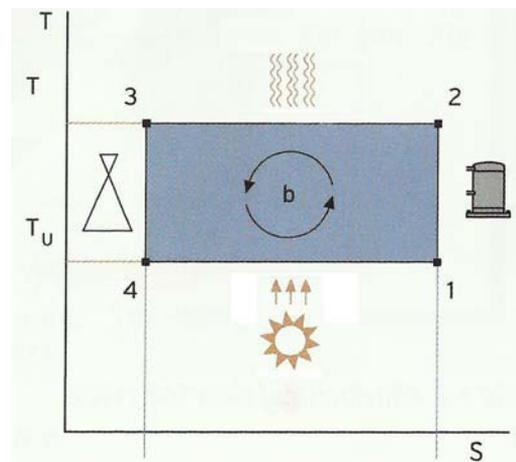


Abbildung 2.5: TS-Diagramm eines rückwärtsgerichteten Carnot-Kreisprozesses [30]

Über den idealen Kreisprozess lässt sich die Carnot-Leistungszahl ϵ_c einer Wärmepumpe durch die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Verdampfer - T_u) und Wärmenutzungsanlage (Kondensator - T) berechnen:

$$\epsilon_c = \frac{T}{T - T_u} = \frac{T}{\Delta T} \quad [T \text{ in Kelvin}] \quad (2.3)$$

Nachdem diese Berechnungen aber von idealen Prozessen ohne Verluste ausgehen, ist die tatsächliche Leistungszahl deutlich geringer als ϵ_c . Für Übersichtsrechnungen wird meist $\epsilon = 0,5 \cdot \epsilon_c$ verwendet. [19], [29]

2.4.2 Bauarten

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Anwendungsgebiete für Wärmepumpen. Sie kommen zum Einsatz bei Heizungsanlagen, zur Warmwasseraufbereitung, für Kühlzwecke, zur Wärmerückgewinnung, Gebäudeentfeuchtung, u.v.m. Dementsprechend ist auch die Liste der Bauarten sehr lang. Denn jedes der vier Hauptbauteile gibt es in den unterschiedlichsten Formen und Ausführungen. Beispielsweise kann bei Kompressionswärmepumpen der Verdichter über einen Elektromotor oder einen Verbrennungsmotor angetrieben werden, während er bei Absorptionswärmepumpen über thermische Energie gespeist wird und einen Lösungsmittelkreislauf beinhaltet. In diesem Abschnitt soll aber lediglich zwischen verschiedenen Kälte-trägerkreisen unterschieden werden (siehe [Abbildung 2.3](#)). [Abbildung 2.6](#) zeigt hierzu eine erste Einteilung bezüglich Energieeffizienz und Verfügbarkeit. [30], [31]

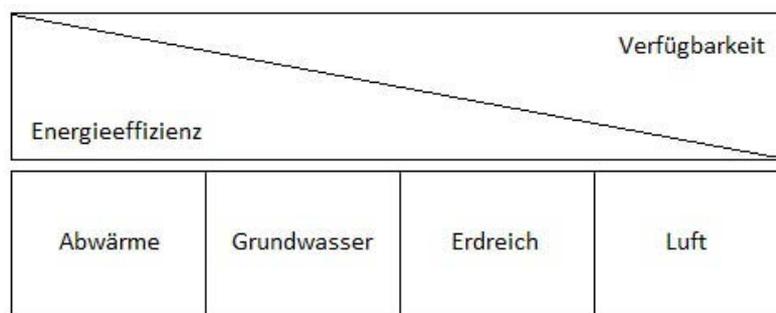


Abbildung 2.6: Energieeffizienz und Verfügbarkeit verschiedener WP-Systeme

Weiters wird zwischen direkten und indirekten Systemen unterschieden. *Indirekte Systeme* entziehen der Wärmequelle Energie und geben sie über einen Wärmetauscher an den Verdampfer der Wärmepumpe weiter. Bei *direkten Systemen* hingegen stellt die Außenanlage bereits den Verdampfer dar. Somit entfällt ein Zwischenwärmetauscher und auch die Umwälzpumpe des Quellensystems kann eingespart werden. Der apparative und energetische Aufwand ist somit geringer. Allerdings sind direkte Anlagen technisch weit schwieriger zu dimensionieren und können nicht in jedem Fall und bei jeder Bauart verwendet werden. [19], [30], [31]

2.4.2.1 Erdreich

Das Erdreich ist unter anderem wegen seiner relativ konstanten Temperatur eine sehr günstige Wärmequelle, die allerdings nicht immer in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Die für Wärmepumpensysteme relevante Erdreichwärme der oberen Bodenschicht bis ungefähr 100m ist zum einen gespeicherte Sonnenenergie, zum anderen Wärme aus dem Erdinneren. Bis ca. 10m ist der Temperaturverlauf durch die Außentemperatur geprägt, während in tieferen Gebieten geothermische Energie zum Tragen kommt ([Abbildung 2.7](#)). Die Frostgrenze liegt in mitteleuropäischen Breitengraden schon bei etwa 0,8m. Die Nutzung von Energie aus dem Erdreich kann nun grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen [29]:

- über horizontale Kollektoren
- über vertikale Erdsonden

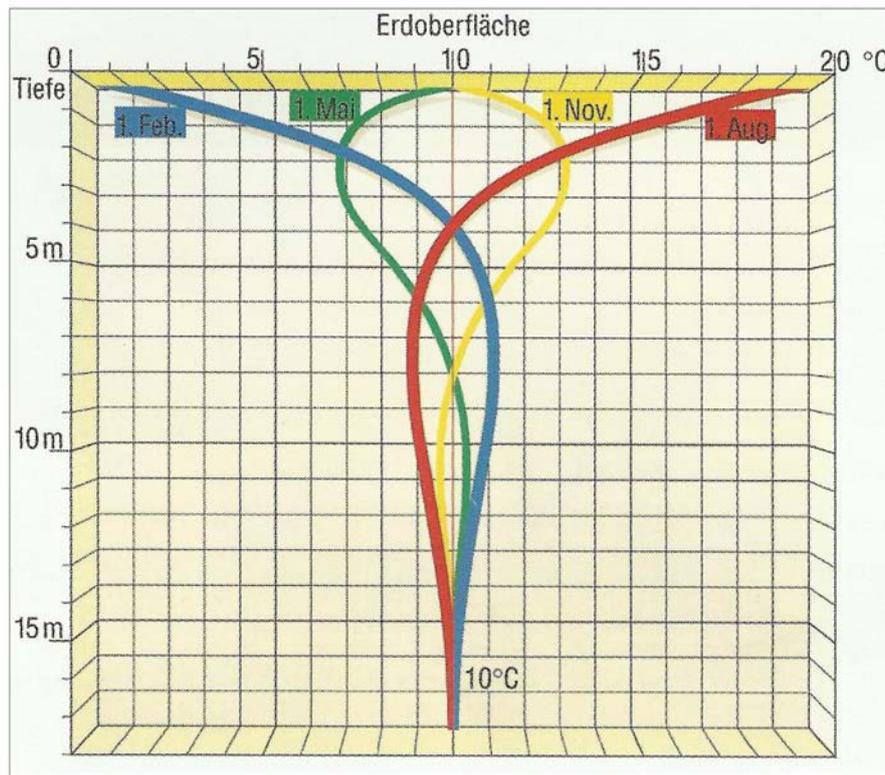


Abbildung 2.7: Erdreichtemperaturen zu verschiedenen Jahreszeiten [29]

Gerade im Bereich der Erdwärmetauscher gibt es eine Vielzahl an Sonderausführungen und Hilfsmitteln. Angefangen bei *Solarabsorbern*, um das Erdreich schneller zu regenerieren, über *Grabenkollektoren*, *radialen Bodenwärmeaustauschern* oder dem *Energiezaun* bis hin zum *CO₂-Erdwärmerohr*. Die Liste ist lang und geforscht wird in allen Bereichen. Im Folgenden seien aber nur die beiden oben genannten Grundformen näher erklärt. Für eine detailliertere Betrachtung der technischen Möglichkeiten und Systeme sei auf entsprechende Literatur verwiesen. [29], [30], [31]

Horizontale Kollektoren: Horizontalen Kollektoren können als indirekte Systeme oder auch als Direktverdampfer eingesetzt werden. Je nach Art werden die Rohre in mehreren Kreisen in 1 bis 2m Tiefe und abhängig von der Systemart und der Wärmeleitfähigkeit des Bodens⁹ in einem Abstand von etwa 0,5 bis 0,7m parallel zueinander verlegt. Die Tiefe sollte dabei immer mindestens 20cm unterhalb der örtlichen Frostgrenze liegen. Der Mindestabstand zueinander muss gewährleistet werden um in den Wintermonaten, trotz längerer Perioden ohne Sonneneinstrahlung, ausreichend Erdwärme zum Beheizen des Gebäudes verfügbar zu haben. Erfahrungswerte aus der Praxis zeigen, dass ab einer Tiefe von etwa 1,4m die Erdtemperatur im Jahresverlauf annähernd konstant ist und kaum unter 5 °C sinkt. Diese Tiefe ist auch mit Rücksicht auf die Vegetation zu empfehlen. Denn höher gelegene Kollektoren können die Vegetationsperiode der Pflanzen verschieben und sie aufgrund unzureichender Erdwärme nicht optimal gedeihen lassen. [30]

Vertikale Erdsonden: Vertikale Systeme werden immer über einen Wärmeaustausch mittels Erdwärmesonden gespeist. Im Vergleich zu den Kollektoranlagen benötigt man hier deutlich weniger Oberfläche und eine um etwa 40% reduzierte Rohrlänge. Dieses

⁹Lehmböden eignen sich sehr gut als Wärmequelle, während sandige Böden eher geringere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen.

System ist aufgrund hoher Grundstückspreise heutzutage sehr verbreitet und somit technisch bereits weit fortgeschritten. Zur Wärmeaufnahme wird die Sonde¹⁰ in Tiefen zwischen 20 und 100m verlegt. Typische Entzugsleistungen liegen derzeit bei 50 bis 60W je Meter Sondenlänge. Bei hydrologisch günstigen Bedingungen, wie etwa einer grundwasserführenden Schicht, können mittlere Sondenleistungen von bis zu 100W/m erreicht werden. Vor der Bohrung sollte eine geologische Begutachtung durchgeführt werden. In manchen Regionen ist es beispielsweise nicht erlaubt, tiefer liegende Wasserschichten anzubohren. Weiters ist für Erdsonden in jedem Fall eine wasserrechtliche Genehmigung einzuholen. [30]

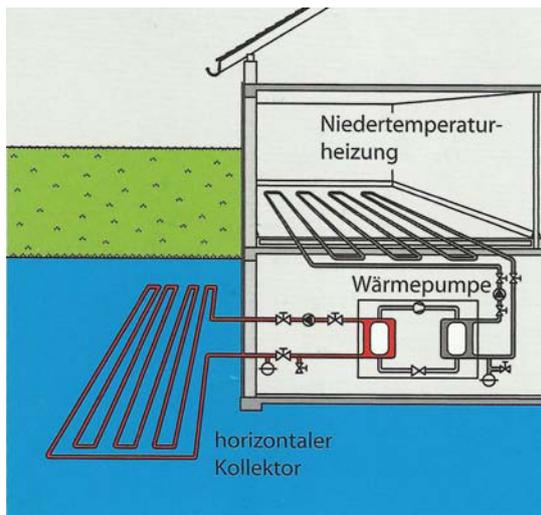


Abbildung 2.8: Kollektorsystem [20]

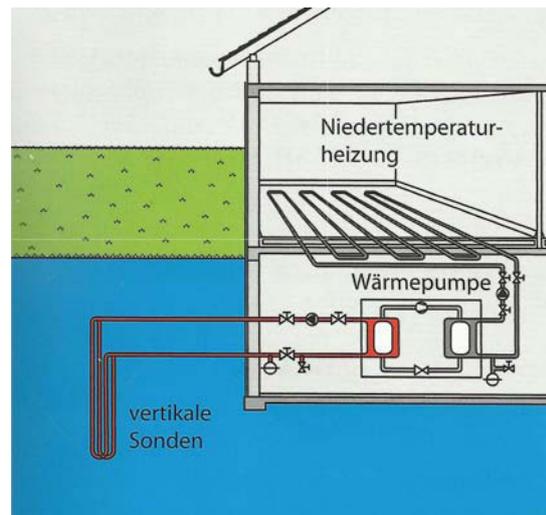


Abbildung 2.9: Erdsondensystem [20]

2.4.2.2 Grundwasser

Das Grundwasser als Wärmequelle weist eine mittlere Temperatur von 8 - 12°C auf und weicht nur in seltenen Fällen davon ab. Dies hat auch im Winter höchste Leistungszahlen der Wärmepumpe zur Folge und führt weiters zu hohen **Jahresarbeitszahlen JAZ**. [30]

Das Grundwasser wird durch einen Saugbrunnen hoch gepumpt, in der Wärmepumpe abgekühlt, und anschließend im Schluckbrunnen wieder der gleichen Grundwasserschicht zugeführt. Um einen **thermischen Kurzschluss TK** zu verhindern, muss beachtet werden, dass der Saugbrunnen in Fließrichtung vor dem Schluckbrunnen angeordnet ist. Die beiden Brunnenbohrungen sollten dabei mindestens 15 - 20m voneinander entfernt sein. Aufgrund der Anschlussleistung der Förderpumpe ist weiters zu empfehlen, für Ein- und Zweifamilienhäuser nicht tiefer als 15m zu gehen. Die benötigte Förderleistung für die Heizung eines Gebäudes schwankt je nach Grundwassertemperatur, Tiefe des Aquifers¹¹ und Wasserqualität. Aufgrund exorbitanter Unterschiede der spezifischen Förderleistungen in der Literatur wird hier auf eine genaue Angabe verzichtet. Dieser Parameter sollte demnach projektbezogen errechnet werden. [29], [30]

In den letzten Jahrzehnten sind die Grundwassertemperaturen vielerorts deutlich angestiegen. Somit ist eine Abkühlung des Grundwassers bis auf ca. 5°C über die Nutzung einer Wärmepumpe als Heizungsanlage oftmals durchaus erwünscht. Dennoch ist die Entnahme und Wiedereinleitung von Wasser an eine wasserrechtliche Genehmigung

¹⁰Das Arbeitsmittel des Kälteübertragungsmediums der Sonde wird **Sole** genannt (siehe Glossar).

¹¹Aquifer = Grundwasserleiter

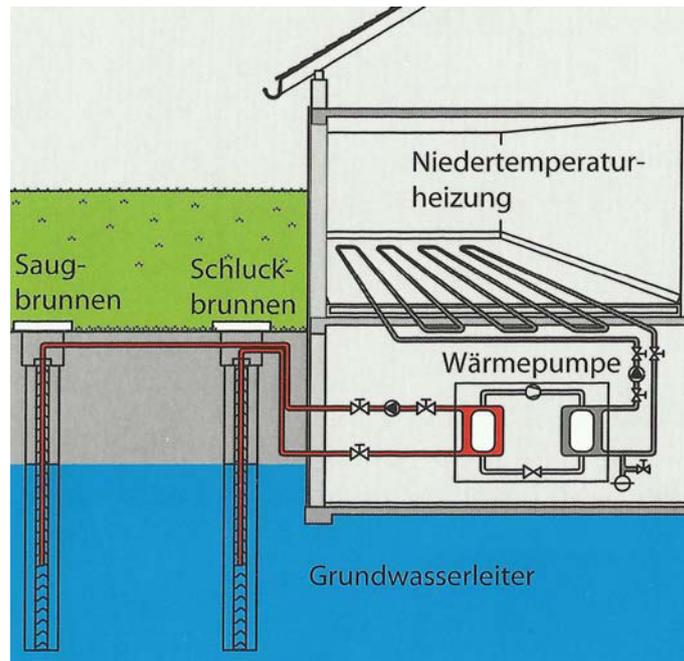


Abbildung 2.10: Grundwassersystem [20]

geknüpft und mancherorts sehr schwer zu bekommen ¹². Für die Erlaubnis der Entnahme muss unter anderem gewährleistet werden, dass:

- das genutzte Wasser in den selben Aquifer geleitet wird aus dem es entnommen wurde.
- es zu keinen Verunreinigungen kommt.
- nur solche Arbeitsmittel verwendet werden, die keine Stoffe in Konzentrationen enthalten, die bei Leckagen für Mensch und Umwelt schädlich sein könnten.
- beim Durchstoßen mehrerer Grundwasserhorizonte eine hydraulische Abdichtung gewährleistet werden kann.
- u.v.m. ¹³

Aus obigen Angaben ist ersichtlich, dass sowohl die Planung als auch der bürokratische Aufwand einer Grundwasser-Wärmepumpe beträchtlich sind. Dennoch ist sie im Betrieb die effizienteste WP-Anlage für Haushalte. [29], [30]

2.4.2.3 Außenluft

Die Wärmequelle Außenluft ist praktisch überall verfügbar. Bei entsprechender Gestaltung der Luftkühler kann sie den Bedarf an Heizleistung bei unterschiedlichen Außentemperaturen auch weitgehend decken. Für die optimale Bemessung sollten jahres- und tageszeitliche Verläufe der Lufttemperatur und auch der **Luftenthalpie** bekannt sein.

¹²Eine Grundwasserwärmepumpe als Kühlsystem wird in den meisten Fällen nicht genehmigt. [30]

¹³Es gibt noch einige zusätzliche Anforderungen, welche allerdings spezifisch von den jeweiligen geologischen Gegebenheiten abhängen und somit hier nicht weiter angeführt sind.

Die Luftwärmepumpe ist von den bisher betrachteten Systemen am ineffizientesten. Spezielle Schwierigkeiten dabei sind [30]:

- Die geringe spezifische Wärmekapazität und die kleine Dichte der Luft erfordern große Fördervolumina. Die damit verbundenen großen Apparaturen benötigen viel Energie und verursachen zudem Schallprobleme.
- Stark schwankende Außentemperaturen auch während der Heizperiode machen eine konkrete Arbeitspunkteinstellung praktisch unmöglich.
- Die Divergenz zwischen Heizleistung der WP und Heizwärmebedarf des Gebäudes führt zu großen Schwierigkeiten. Je tiefer die Außentemperatur ist, desto höher ist der Heizwärmebedarf. Somit erhöht sich die Temperaturdifferenz je größer der Bedarf ist, was natürlich mit einer geringeren Heizleistung verbunden ist (siehe Gleichung 2.3, Seite 19).
- Reif- und Kondenswasserbildung muss verhindert bzw. abgeführt werden.

2.4.3 Bezeichnung von Wärmepumpen

Üblicherweise werden Wärmepumpen nach der Art der Wärmeträger unterteilt. Abbildung 2.11 zeigt das Schema dafür [30]:

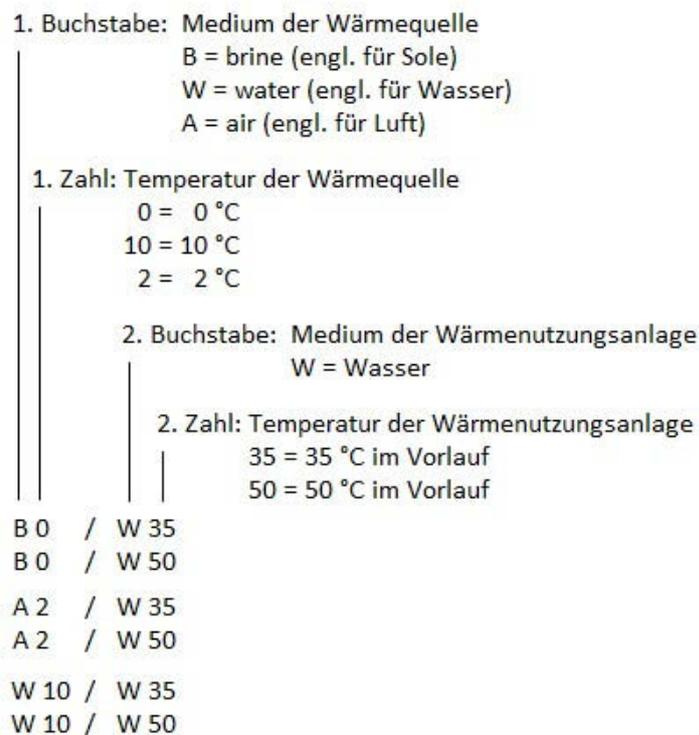


Abbildung 2.11: Bezeichnungsschema von Wärmepumpen [30]

2.4.4 Betriebsarten

Sobald die erforderliche Heizleistung der Wärmepumpe feststeht, muss geklärt werden, wie die Anlage betrieben werden soll, um technisch und ökonomisch ein gutes Ergebnis zu erzielen. Dabei werden drei Betriebsarten unterschieden [29], [30]:

- **monovalent:** Bei monovalenten Anlagen ist die Wärmepumpenanlage der alleinige Wärmeerzeuger.
- **bivalent:** Zur Erzeugung der Heizwärme wird neben dem Wärmepumpensystem noch ein zweiter Energieträger verwendet. Dieser unterstützt die WP bei sehr niedrigen Außentemperaturen. Hierfür wird meist Öl oder Gas eingesetzt.
- **monoenergetisch:** Die monoenergetische Betriebsweise folgt dem bivalenten Prinzip, nur dass die Zusatzheizung kein Öl- oder Gaskessel ist. Meist wird die fehlende Wärme über einen Elektroheizstab im Pufferspeicher erzeugt.

Beim heutigen Stand der Technik ist es problemlos möglich, für Niedertemperaturheizungen ein Wärmepumpensystem im monovalenten Betrieb zu installieren. Dieses sollte dann genau auf den kältesten Tag im Jahr ausgelegt sein, denn eine Überdimensionierung führt zu unnötig hohen Investitionskosten und ineffizientem Betriebsverhalten während des Teillastbetriebs. Bivalente Wärmepumpen hingegen kommen heutzutage fast nur mehr bei Außenluftsystemen und bei Altbauten als Unterstützung zur vorhandenen Heizanlage zum Einsatz. [29], [30]

2.5 Holzheizungssysteme

Die Eigenproduktion von Energierohstoffen gewinnt aufgrund ständig steigender Ressourcenpreise immer mehr an Bedeutung. In Österreich sind über 47% der Fläche mit Wald bedeckt. Aus diesem Grund ist Holz als Energieträger hierzulande schon seit Jahren sehr gefragt. 2008 betrug der Anteil mit Holz beheizter Wohnungen bereits über 20% der gesamt in österreichischen Haushalten installierten Heizungsanlagen. Nur Erdgas- und Heizölkessel stellen derzeit noch eine geringfügig größere Zahl an Heizungssystemen dar¹⁴. [33], [34]

Holz hat hierzulande viele Vorteile. Einerseits müssen Bäume weder bewässert noch gedüngt werden, andererseits sind die Transportstrecken sehr gering und die Lagerstätten sofort vor Ort. Holz aus Österreich ist also nahezu komplett CO₂-neutral. Je nach Lage und Güte muss in der forstlichen Produktion nur zwischen 1 und 4% der im Holz gespeicherten Energie aufgewendet werden, um diese bereitzustellen. Weiters befindet sich bei heimischen Holz die gesamte Wertschätzungskette innerhalb Österreichs, was einen beachtlichen volkswirtschaftlichen Gewinn darstellt. Und das Potential ist dabei längst noch nicht ausgeschöpft, da derzeit vom gesamten Zuwachs lediglich 2/3 wirtschaftlich genutzt werden. [33], [34]

2.5.1 Grundlegendes zum Rohstoff

Der Rohstoff Holz besteht zu 40 bis 50% aus **Zellulose**, 20 - 30% aus **Lignin**, und 20 bis 30% aus anderen Substanzen, hauptsächlich Kohlehydrate, Fette, Gerbstoffe, Mineralstoffe etc. Die Elementarzusammensetzung absolut trockenen Holzes bilden 51% Koh-

¹⁴Weiters ist zu erwähnen, dass der Bestand an Heizölkesseln zurückgeht, während er für Biomasseanlagen zunimmt.

lenstoff, 42% Sauerstoff, 6% Wasserstoff, 1% Stickstoff und mineralische Bestandteile. [33]

Holz wird in den verschiedensten Maßen angeboten, angefangen beim ganzen Stamm bis hin zu den Sägespänen. Dadurch sind viele unterschiedliche Maßeinheiten entstanden, wobei für die Forstwirtschaft die Folgenden am wichtigsten sind [33]:

- 1 Festmeter (fm): Ist die Maßeinheit für 1 Kubikmeter feste Holzmasse
- 1 Raummeter (rm): Ist die Maßeinheit für geschichtete Holzteile, die unter Einschluss der Luftzwischenräume ein Gesamtvolumen von einem Kubikmeter füllen.
- 1 Schüttraummeter (Srm): Ist die Maßeinheit für einen Raummeter geschütteter Holzteile (Hackgut, Sägespäne, Stückholz etc.)

Ein letztes wichtiges Kriterium der Energietechnik ist der spezifische Heizwert, über den unterschiedliche Rohstoffe anhand ihres Gewichts bzw. Volumens miteinander verglichen werden können. Solch einen Heizwertvergleich diverser Brennstoffe zeigt [Tabelle 2.1](#) [33]:

Brennstoff	mittlerer Heizwert
Heizöl leicht	11,5 kWh/kg
Steinkohle	7,67 kWh/kg
Erdgas	10 kWh/m ³
Holz (w ¹⁵ = 20 %)	4 kWh/kg

Tabelle 2.1: Heizwertvergleich [33]

2.5.2 Bereitstellung und Trocknung von Holz

Holzartige Biomasse fällt in einer Volkswirtschaft im Verlauf des gesamten Lebensweges der stofflichen Nutzung des Werkstoffes als Rückstand, Nebenprodukt oder Abfall an. Dieses Biomasseaufkommen ist in vielen Fällen auch für einen Einsatz als Energieträger sehr gut geeignet. Je nach Hauptnutzungsprozess und Anfallort wird zwischen Durchforstungs- und Waldrestholz, [Landschaftspflegeholz](#), [Industrierestholz](#) und [Altholz](#) unterschieden. [26]

Neben der anfallenden Biomasse wird Holz als Brennstoff aber natürlich auch direkt hergestellt. Die Brennholzerzeugung fällt dabei im Wald vielfach als Koppelprodukt bei der Nutzholzerzeugung an. Der geschlagene Rohstoff wird im Normalfall etwa einen Meter lang ausgeformt und dann oft mehrere Jahre gelagert, damit ein trockenes Brennmaterial zur Verfügung steht. Es sollte dabei ein Wassergehalt von 20% nicht überstiegen werden, was einen sonnigen und gut durchlüfteten Platz mit geneigtem Untergrund zur raschen Wasserabfuhr bei gleichzeitiger Vermeidung aufsteigender Bodenfeuchte erfordert. Die Trocknung an sich kann nun über vielerlei Methoden, *natürlich* als auch *technisch* erfolgen. Während man den Rohstoff im ersten Fall quasi sich selbst überlässt, wird bei der *technischen Trocknung* Energie aufgewendet um den Verdampfungsprozess zu beschleunigen. Hier steht der Vorteil geringerer Lagerungskosten dem Nachteil höherer Energiekosten gegenüber. Es muss also ökonomisch abgewogen werden, wie und vor allem wie lange das Holz getrocknet werden soll. [Abbildung 2.12](#) zeigt den zeitlichen Verlauf einer natürlichen Trocknung zweier frisch geschlagener Hölzer in der Klimazone Freising / Bayern. Im überdurchschnittlich warmen Jahr 2003, als auch im feuchteren

¹⁵w ... Wassergehalt

Jahr 2004, konnte die 20%-Grenze bei beiden Hölzern bereits nach 6 - 7 Monaten unterschritten werden. Bei Winterfällung kann also davon ausgegangen werden, dass sowohl Weichholz (Fichte) als auch Hartholz (Buche) bereits Ende des nächsten Sommers ein-satzbereit ist. [26], [33]

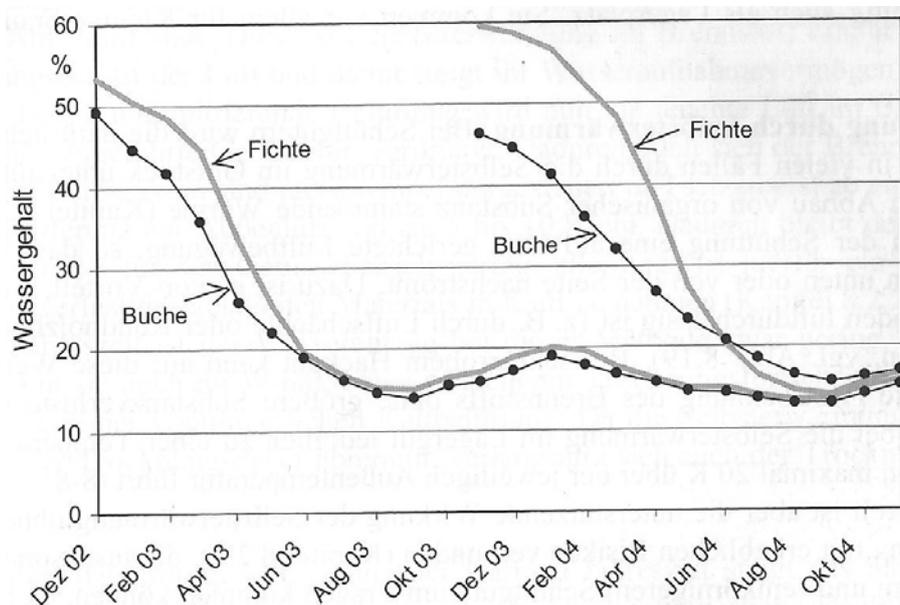


Abbildung 2.12: Beispiel für Wassergehaltsverläufe bei der Lagerung von gespaltenem, frisch geschlagenem Meterholz (Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten; Freising / Bayern) [26]

Einen gewissen Grad an Trockenheit muss jedes Holz haben, denn wenn es zu nass ist, beeinträchtigt es den Verbrennungsvorgang und vermindert aufgrund von Schimmelfahr auch die Lagerfähigkeit beim Endverbraucher. Der Wassergehalt stellt somit ein entscheidendes Qualitätsmerkmal für Brennholz dar. Die genauen Zusammenhänge sind in [Abbildung 2.13](#) dargestellt. Man sieht sehr schön, dass sich der Heizwert des Holzes fast verdoppelt, wenn sich der Wassergehalt von 50% auf 20% reduziert. [33]

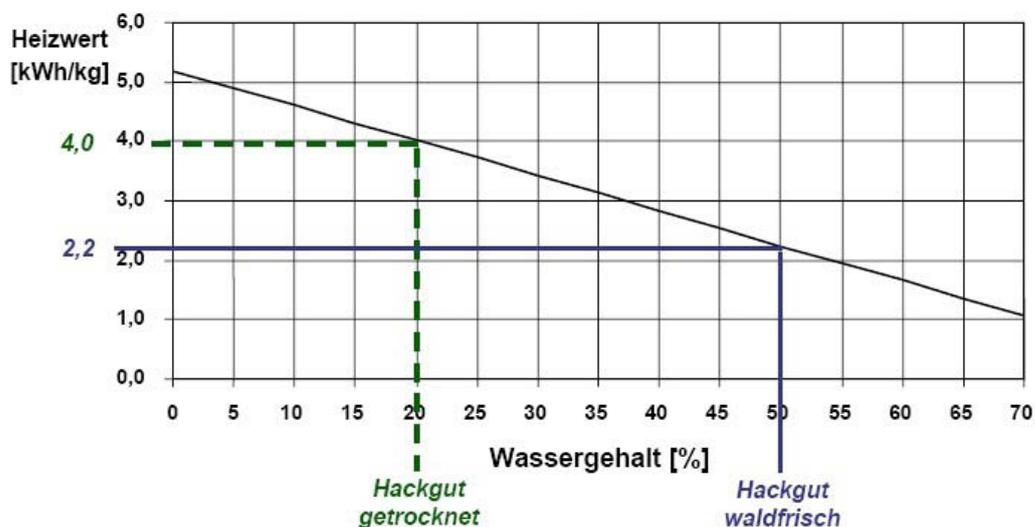


Abbildung 2.13: Heizwert von Holz in Abhängigkeit des Wassergehaltes [33]

2.5.3 Verbrennungsvorgang

Bei der Verbrennung von Holz wird die gespeicherte Sonnenenergie in Form von Wasser und Wärme wieder freigesetzt. Es reagieren der Holz-Kohlenstoff, der Holz-Sauerstoff und der Luft-Sauerstoff miteinander. Bei ausreichender Luftzufuhr verbindet sich der Kohlenstoff mit dem Sauerstoff zu Kohlendioxid (CO_2) und es wird sehr viel Wärme freigesetzt. Bei unzureichender Sauerstoffeinbindung hingegen entsteht das sehr giftige Kohlenmonoxid (CO) bei weit weniger Wärmeerzeugung. Ein Großteil der Rauchgase wird dann unverbrannt über den Rauchfang an die Umwelt abgegeben. [26]

Holz ist praktisch schwefelfrei und bietet somit beste Voraussetzungen für eine umweltfreundliche Verbrennung. Jedoch können bei zu niedrigen Temperaturen und geringer Luftzufuhr **Schmelprodukte** entstehen, deren Emission unbedingt verhindert werden muss. Dies kann durch den Einsatz geeigneter Heizgeräte, richtig platzierter Luftdüsen und einer optimierten Betriebsweise des Kessels erreicht werden. [26]

2.5.4 Hackschnitzelfeuerung

Heutzutage werden für die Beheizung von Haushalten vorrangig Hackschnitzel- und Pelletöfen verwendet. Der manuell zu beschickende Stückholzofen wird immer seltener installiert und soll somit hier nicht beschrieben werden. Als Hackgut oder auch Hackschnitzel bezeichnet man maschinell zerkleinertes Holz in einer Größenordnung von 1 bis 100mm. Stammt dieses Holz weiters aus der Urproduktion, aus dem Wald und nicht von der Sägeindustrie, so wird es als Waldhackgut bezeichnet.

Bei *Hackgutfeuerungen* wird das Brennmaterial aus einem nahe gelegenen Lagerraum mittels Austragsschnecke über eine Rückbrandsicherung zur Stokerschnecke befördert und von dort automatisch in die Brennkammer eingeschoben. Die Verbrennungsluft wird, getrennt in Primär- und Sekundärluft, mittels eines Gebläses der Brennkammer zugeführt. Dabei dient die Primärluft der eigentlichen Verbrennung oder thermischen Zersetzung des Hackgutes und die Sekundärluft zur Nachverbrennung der Holzgase. Zusätzliche Luft wird dem Kessel nur solange zugeführt, bis die erforderliche Kesseltemperatur erreicht ist. Bei nachträglichem Unterschreiten der Solltemperatur bewirken verbliebene Glutreste in der Regel die Entzündung nachgeschobenen Hackgutes. Bei längeren Stillstandszeiten sorgt ein Heißluftgebläse oder ein Glühstab für eine automatische Wiederentzündung. Über die exakt steuerbaren Parameter wie Brennstoffnachschiebung oder Luftzufuhr ist eine Anpassung der Kesselleistung an den jeweiligen Wärmebedarf bis weit in den Teillastbereich gegeben. Somit kann der Brennstoff Holz für unterschiedlichste Leistungserfordernisse eines Haushaltes durchgehend effizient betrieben werden. [26]

Als Beschickungssystem kommt für den niedrigen Leistungsbereich eines Ein- bzw. Zweifamilienhauses nur die *Unterschubzufuhr* in Frage ([Abbildung 2.14](#)). Bei diesem System wird der Brennstoff von unten in die Feuermulde (Retorte) eingeschoben. Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft ebenfalls durch die Retorte in den Brennstoff eingeblasen. Unterschubfeuerungen eignen sich besonders für aschearme Brennstoffe, die wegen der Schneckenführung eine feinkörnige und gleichmäßige Beschaffenheit aufweisen müssen. Neben Hackgut werden sie deshalb neuerdings auch zunehmend für Pellets eingesetzt. [26], [33]

2.5.5 Pelletfeuerung

Aufgrund des reduzierten Wärmebedarfs moderner Häuser ist die Nachfrage nach Heizgeräten, die auch im kleinen Leistungsbereich effizient arbeiten können, drastisch gestiegen. Heutige *Pelletheizungen* entsprechen diesen Anforderungen. Durch die einheitliche

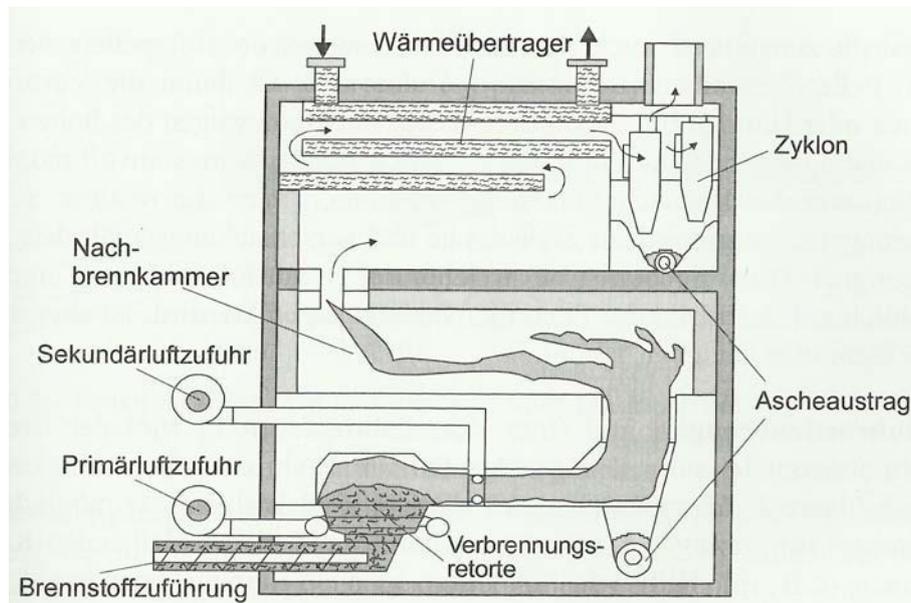


Abbildung 2.14: Schema einer Unterschubfeuerung [26]

Qualität und Größe des Brennstoffs und der damit verbundenen exakten Dosierbarkeit, ist eine Drosselung der Kessel auf ca. 2kW möglich. Das Ausgangsmaterial von Pellets sind trockene saubere Holzspäne, die ohne synthetisches Bindemittel in ihre zylindrische Endform gepresst werden. Das Endmaterial wird dann je nach Größe in verschiedene Güteklassen eingeteilt, dazu Tabelle 2.2 [33]:

Güteklasse	HP1	HP2	HP3
Durchmesser (mm)	$4 \leq D \leq 10$	$10 \leq D \leq 40$	$40 \leq D \leq 120$
Wassergehalt w		$\leq 10 \%$	
Heizwert bei w = 0 %		$\leq 5 \text{ kWh/kg}$	

Tabelle 2.2: Holzpresslinge nach ÖNORM M7135: Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde - Pellets und Briketts - Anforderungen und Prüfbestimmungen [33]

Einige wesentliche Vorteile einer solchen Pelletierung sind nun [26]:

- Erhöhung der Schüttdichte: Holzpellets haben mit 650kg/m^3 eine deutlich höhere mittlere Schüttdichte als Hackgut (250kg/m^3) oder Scheitholz (400kg/m^3). Somit ist auch die Energiedichte bedeutend größer.
- Standardisierung der Materialgröße: Eine einheitliche Größe führt zu einer kontrollierbareren Verbrennung (vor allem im Teillastbetrieb) und verbessert auch die Beschickungs- und Dosierbarkeitseigenschaften.
- Über die Pelletierung wird Staumentwicklung bei Lagerung, Nutzung und Transport vermieden und es kann zu keiner Staubexplosion kommen.

Das Verbrennungssystem einer Pelletfeuerung muss so konzipiert sein, dass es die gute Riesel- und Dosierfähigkeit des Rohstoffs nutzen kann. Zwei Grundtypen solcher Systeme stellen die Abwurffeuerng mit Schalenbrenner bzw. mit Kipprost dar. [26]

Beim *Schalenbrenner* wird über eine Förderschnecke bis hin zum Fallrohr beschickt. Von dort gelangen die Pellets in die Brennschale, wo sie über ein Heißluftgebläse oder

einen Heizstab erstentzündet werden. Die Primär- und Sekundärluftdüsen steuern die Verbrennung und ein kleiner Luftstrom aus dem Fallschacht verhindert einen Rückbrand zur Beschickungsschnecke. Die Wärmeabgabe erfolgt zum Teil über Strahlung, größtenteils aber über Konvektionsschächte. Ein Nachteil des Schalenbrenners ist die Ascheproduktion in der Brennmulde, da diese dort von Zeit zu Zeit manuell entnommen werden muss. [26]

Nach erfolgter Erstzündung fallen die Pellets beim *Kipprostbrenner* oben auf das Glutbett, das sich auf einem Kipprost befindet. Primär- und Sekundärluft werden von unten bzw. seitlich ringförmig durch entsprechende Düsen eingeleitet. Die anfallende Asche wird automatisch in den darunter liegenden Rostaschesammler abgeworfen. Um sicherzustellen, dass größere Ascheablagerungen vollständig vom Rost entfernt werden, gibt es zusätzlich noch eine motorisch betriebene Rostreinigung. Bei dieser prallt der als Lochplatte ausgeführte, heruntergeklappte Rost gegen eine Reinigungsplatte im Bereich des Aschesammlers. Die Abbildungen 2.15 und 2.16 zeigen die beiden Grundprinzipien dieser Verbrennungssysteme. [26]

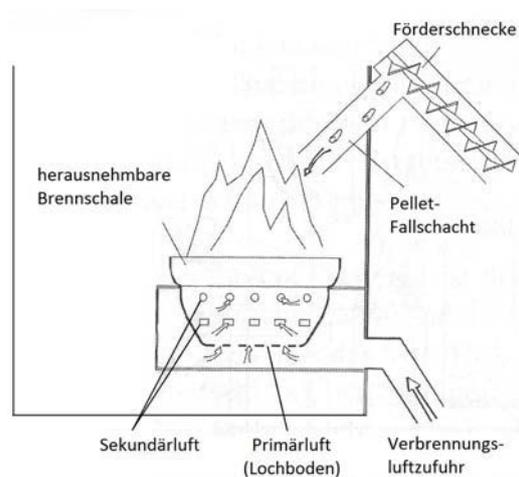


Abbildung 2.15: Schalenbrenner [26]

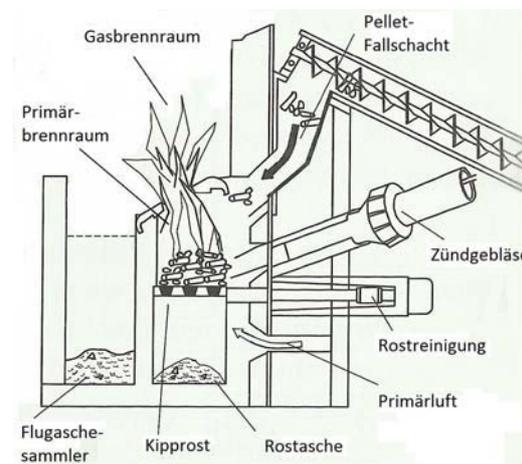


Abbildung 2.16: Kipprostbrenner [26]

2.6 Aktive Solarenergienutzung

Ganz allgemein betrachtet hängen, abgesehen von Geothermie und den Gezeiten, praktisch alle erneuerbaren Energiequellen mit der Sonne zusammen. Denn sowohl Windkraft, Wasserkraft als auch Biomasse sind Energieformen, die auf den ökologischen Prozessen basieren, welche wiederum durch solare Strahlung hervorgerufen werden. Während die zuvor genannten Energieformen indirekt mit solarer Strahlung zusammenhängen, kann Sonnenenergie aber auch direkt genutzt werden, wobei man hier wiederum zwischen passiver und aktiver Verwendung unterscheidet. Der passive Bereich wurde bereits in Abschnitt 2.1.2.3 (Seite 12) näher beschrieben. Gebäudeorientierung nach Süden, große Fensterflächen zum Erzielen hoher Strahlungsgewinne oder auch die optimale Anordnung von gebäudeinternen Speichermassen wie Decken, Wände etc. sind Beispiele dafür. Die aktive Verwendung von Solarenergie hingegen beschäftigt sich mit der direkten Nutzung der Solarstrahlung. In diesem Abschnitt wird dabei auf die Solarthermie eingegangen, also die Umwandlung von Strahlung in Wärmeenergie. Und nachdem im Gebäudesektor ausschließlich Niedertemperaturanlagen Verwendung finden, werden auch nur solche beschrieben. Der nächste Abschnitt behandelt dann die Photovoltaik, eine weitere Form der aktiven Systeme.

2.6.1 Solarthermische Anlagen

Solarthermische Gebäudeanlagen wandeln die Strahlungsenergie der Sonne in Wärme um, die dann weiter zur Gebäudebeheizung und / oder zur Warmwasserbereitung genutzt wird. In [Abbildung 2.17](#) ist das Grundprinzip einer solchen Anlage kurz skizziert. Im Solarkollektor erfolgt die Umwandlung der Strahlung in Wärme, indem kaltes Rücklaufwasser vom Verbraucher erwärmt wird. Anschließend gelangt es über den Vorlauf entweder direkt zur Anwendung in der Warmwasserbereitung beziehungsweise Heizungsunterstützung, oder wird zwischengespeichert im Pufferspeicher. [\[20\]](#)

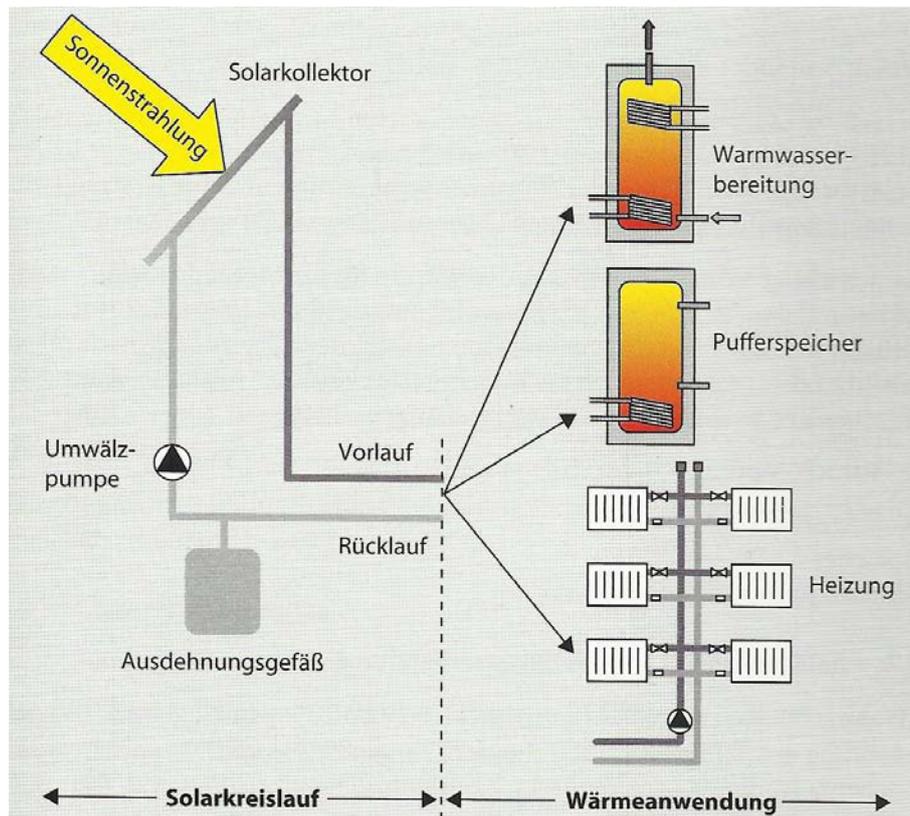


Abbildung 2.17: Grundprinzip solarthermischer Anlagen [\[20\]](#)

In Österreich ist eine ausschließliche Bereitstellung der Wärme für eine Heizungsanlage auf Basis von Solarthermie aufgrund der geringen Einstrahlung während der Wintermonate kaum möglich. Theoretisch gesehen ist solch ein System über eine riesige Kollektorfläche, ein hohes Speichervolumen und eine Abführung der anfälligen Überschussenergie zwar durchaus realisierbar, für konventionelle Haustypen als auch für Niedrig- bzw. Niedrigstenergiehäuser aber absolut unwirtschaftlich ¹⁶. Auch eine Heizungsunterstützung ist hierzulande in den meisten Fällen nicht wirtschaftlich, da zwei verschiedene Systeme benötigt und diese dann auch noch miteinander verbunden und geregelt werden müssen. Somit wird in dieser Arbeit auf eine ökonomische Modellierung von solarthermischen Heizanlagen verzichtet. [\[14\]](#), [\[15\]](#)

Dennoch ist zu sagen, dass die Solarthermie zur Trinkwassererwärmung durchaus hervorragende ökonomische Werte erzielt. Vor allem hier in Mitteleuropa findet die Technologie in diesem Jahrzehnt vermehrt Anwendung. Denn neben China sind die derzeit wichtigsten Märkte für Solarthermie Deutschland, Österreich und Japan, sowie die Mittelmeeranwohnerstaaten Griechenland, Türkei und Israel. [\[21\]](#), [\[22\]](#)

¹⁶Ausnahmen stellen hier die Passivhäuser, Nullenergie- und Plusenergiehäuser dar.

2.6.2 Photovoltaik (PV)

Bei der Photovoltaik wird solare Strahlungsenergie direkt in elektrische Energie umgewandelt, wobei die Umwandlung auf dem sogenannten photovoltaischen Effekt in Halbleitern beruht. Es kommt über die Einstrahlung von Photonen¹⁷ zum Aufbau einer inneren Gleichspannung, welche in einer aus Halbleitern bestehenden Solarzelle weiter zur Elektrizitätserzeugung genutzt werden kann. Dabei werden folgende Arten unterschieden [20]:

- Monokristalline Zellen (einheitlich orientierte Kristalle, meist aus Silizium)
- Polykristalline Zellen (unterschiedliche Struktur)
- Dünnschicht-Zellen (amorphe Struktur mit einer Dicke im Mikrometerbereich)

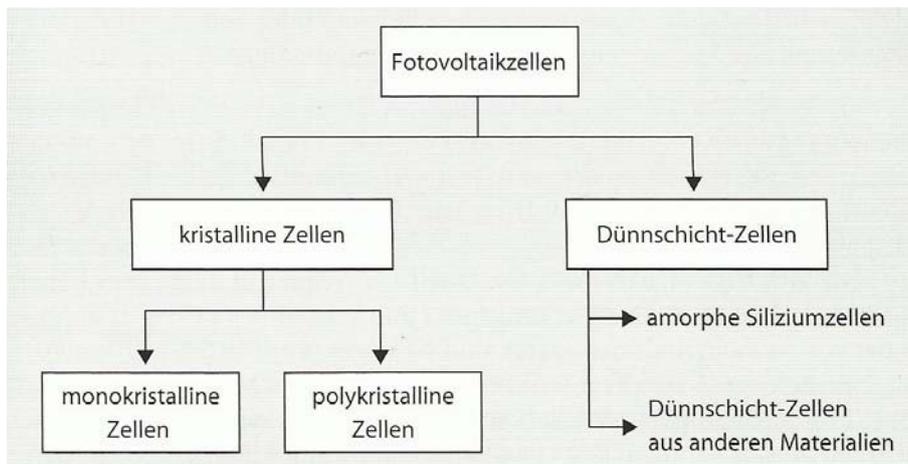


Abbildung 2.18: Zellarten [20]

Für eine genauere physikalische Erklärung sei allerdings auf entsprechende Literatur verwiesen. [20]

Photovoltaikanlagen werden entweder als Inselstation, netzgekoppelt, oder in Netzparallelschaltung betrieben. Im *Inselbetrieb* stellt die Photovoltaik die einzige Elektrizitätsversorgung dar und ist nicht mit dem Versorgungsnetz verbunden. Solche Systeme finden vor allem dort Anwendung, wo eine Netzführung aus technischen oder ökonomischen Aspekten nicht als sinnvoll erscheint. Beispiele hierfür wären abgelegene Gebäude wie Wandergaststätten oder Berghütten. Aber auch Kleinverbraucher wie Parkuhren, Wegbeleuchtungen oder Telekommunikationsanlagen werden vermehrt über PV's mit Elektrizität versorgt. [20]

Der in Österreich meist angewandte *netzgekoppelte Betrieb* einer PV ist in [Abbildung 2.19](#) dargestellt. Dabei erfolgt die Versorgung des Gebäudes aus dem öffentlichen Stromnetz, während die Energie der PV über einen Wechselrichter in das Netz eingespeist wird. Die Anlage ist dadurch mit zwei Zählern ausgestattet. Der Einspeisezähler, der die von der Photovoltaik generierte Energie misst und der normale Verbrauchszähler, den jeder Haushalt besitzt. Während nun für die im Haushalt verbrauchte Energie der vom Energieversorger festgelegte Preis je kWh zu bezahlen ist, wird der eingespeiste Strom der PV separat vergütet. Die Vergütung¹⁸ ist hier von Bundesland zu Bundesland verschieden und richtet sich außerdem nach der Anlagengröße. Nähere Details dazu werden in späteren Abschnitten bei der ökonomischen Modellierung beschrieben. [20], [22]

¹⁷ umgangssprachlich auch *Lichtteilchen* genannt

¹⁸ Vergütung in Form von Einspeisetarifen

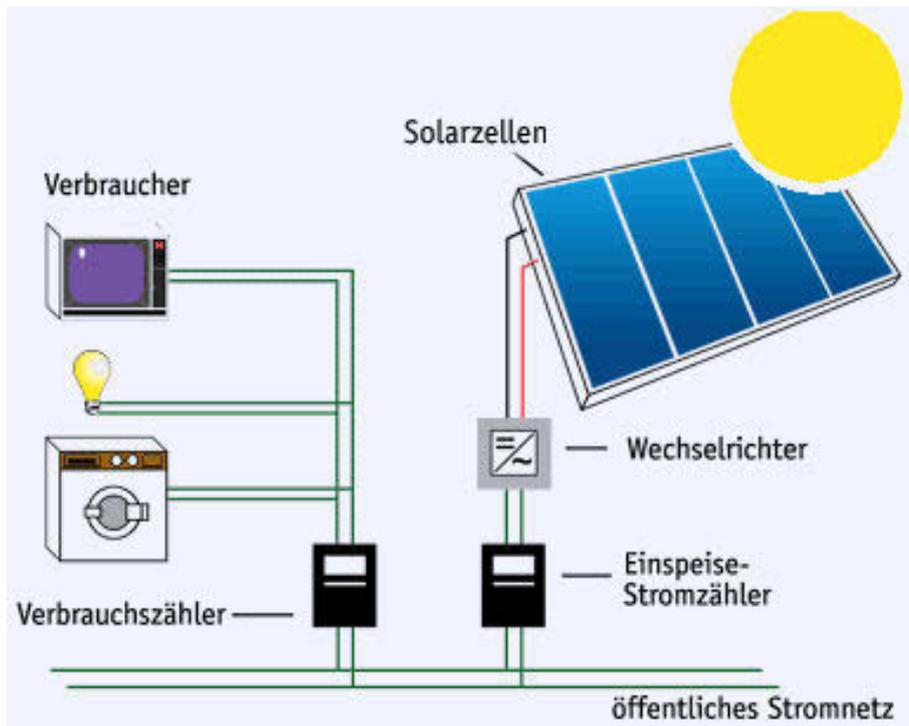


Abbildung 2.19: Photovoltaikanlage im netzgekoppelten Betrieb [23]

Die dritte Art stellt der *Netzparallelbetrieb* dar. Er ist ähnlich der netzgekoppelten Variante, nur dass die von der PV erzeugte Energie bei Bedarf auch direkt im Haus verwendet werden kann. Hier wird Energie nur dann aus dem Netz bezogen, wenn die Erzeugung der PV dafür nicht ausreicht. [20]

Abbildung 2.20 zeigt abschließend noch die mittlere jährliche Globalstrahlung für Österreich. Diese Daten sind für die Berechnung des mittleren jährlichen Energieertrags einer PV-Anlage äußerst wichtig.

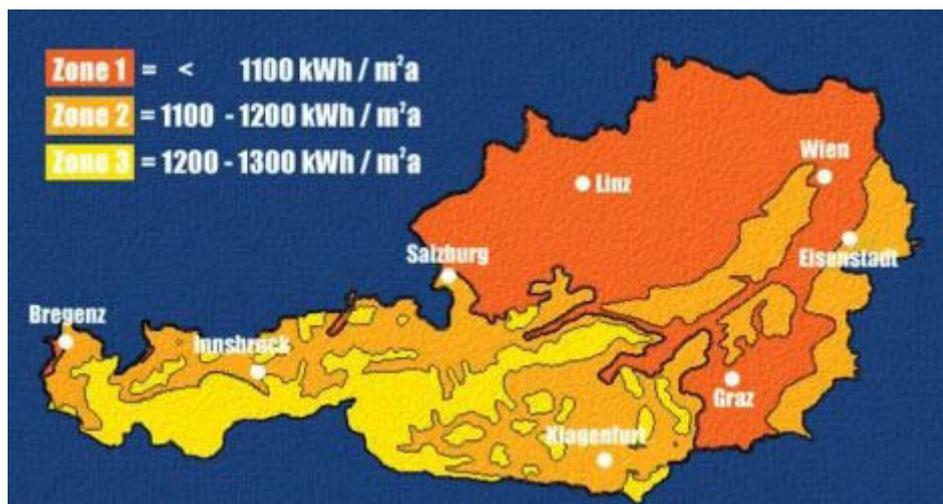


Abbildung 2.20: Mittleres jährliches Strahlungsangebot von Österreich [76]

2.6.2.1 Stand der Technik / Wirtschaftslage:

Die europäische Photovoltaik-Technologieplattform *EU-PVTP* hat im Juni 2007 eine strategische Forschungsagenda veröffentlicht, mit dem Ziel, Europas weltweite Führungsrolle in der Photovoltaik zu festigen. Diese *Strategic Research Agenda (SRA)* formulierte hierfür das siebte Rahmenprogramm für europäische als auch nationale Vorhaben. Die Botschaft dabei war eindeutig: Solarstrom kann in Südeuropa bis 2015, verglichen mit konventionellem Stromerzeugung, wettbewerbsfähig werden, bis 2020 sogar in ganz Europa. Die diesbezüglichen Berechnungen und Voraussagen gehen davon aus, dass die dafür nötigen Markteinführungsinstrumente in so vielen europäischen Ländern wie möglich eingeführt werden. Als Instrumente verstehen sich einerseits Subventionsprogramme und andererseits eine Verdopplung der Mittel für Forschung und Entwicklung, so die *EU-PVTP*. Inwieweit diese Ziele als aktuell betrachtet werden können ist allerdings fraglich, da sich die angegebene Studie auf Berechnungen und Annahmen vor der einsetzenden Wirtschaftskrise 2008 beziehen. Es ist also zu befürchten, dass viele der geplanten Vorhaben aufgrund der aktuell schwierigen wirtschaftlichen Situation nicht durchgesetzt werden (können). [25]

Derzeit liegen die Preise für schlüsselfertige PV-Anlagen zwischen 4 und 8 Euro pro Watt Leistung, abhängig vom Typ, der Größe, dem jeweiligen Land und weiteren Faktoren. Um die Produktions- und Betriebskosten weiter zu senken, wird nun stark in die Verbesserung des Wirkungsgrades, der Stabilität, und der Haltbarkeit bei gleichzeitiger Reduktion der Produktionskosten investiert. Außerdem wird auch hinsichtlich der sogenannten *Konzentratorsysteme* verstärkt geforscht. Diese bezeichnen Anlagen, in denen das Sonnenlicht mit Spiegeln oder flachen Fresnel-Linsen gebündelt und auf eine sehr kleinflächige Solarzelle gelenkt wird. Mit diesem Trick wird einerseits Material eingespart, andererseits arbeiten Solarzellen auch effektiver bei höheren Lichtintensitäten. Allerdings muss dafür gesorgt werden, dass die durch die Fokussierung entstehende Wärme abgeführt wird. [25]

Vorrangige Forschungsziele bei *kristallinem Silizium* sind die Reduzierung des Bedarfs an Solar-Silizium und Rohmaterialien für das Modul. Silizium-Solarzellen dominieren seit der breiten Nutzung der Photovoltaik klar den Markt. Sie sind gut und verlässlich verfügbar und ihre physikalischen Eigenschaften weitgehend erforscht. Das technische Know How, der Fortschritt und die ständig gestiegene Marktgröße haben die Performance von Siliziumzellen dabei immer weiter verbessert. Die Lernkurve der letzten drei Jahrzehnte zeigt, dass mit jeder Verdopplung der installierten Leistung eine Kostenreduktion um 20% stattgefunden hat. [25]

Die *Dünnschichttechnologie* hat derzeit lediglich einen Marktanteil von etwa 10%. Jedoch könnte sich dieser in den nächsten Jahren bis 2020 auf etwa 20% steigern (laut *SRA 2007*). Viele Forschungs- und Entwicklungsprogramme beschäftigen sich derzeit mit der Dünnschicht-Technologie. Ihr wird ein großes Kostensenkungspotential zugeschrieben, wenn Materialien und Fertigung durch intensive und wirksame Grundlagenforschung verbessert werden. [25]

Kristallines Silizium und Dünnschicht-Photovoltaik beherrschen heute und auch künftig den Markt. Dennoch wird auch in zahlreichen anderen Technologiebereichen Forschung betrieben, denn konventionelle Solarmodule stoßen bei etwa 25% an die Obergrenze des möglichen Wirkungsgrades. Außerdem ergeben sich oft ungeahnte Chancen aus dem sprunghaften Technologie-Wandel, die in weiterer Folge auch abseits der Photovoltaik genutzt werden können ¹⁹. Organische Photovoltaik oder die Nanotechnologie sind zwei Beispiele für PV-Forschung abseits von Silizium- und Dünnschichtproduk-

¹⁹Prominentestes Beispiel: Alufolie wurde ursprünglich nicht für die Lebensmittelindustrie entwickelt.

ten. Sie versprechen höhere theoretische Wirkungsgrade und größere Stabilität. Weiters scheint es durchaus möglich, dass ihre leistungsspezifischen Kosten jene der derzeitigen Standardtechnologien in Zukunft unterbieten könnten. [25]

Tabelle 2.3 zeigt abschließend eine Übersicht über den Stand der Technik im Photovoltaik-Bereich. Die angegebenen Zahlen können allerdings nur als ungefähre Richtwerte angenommen werden, da PV-Performancewerte in verschiedener Literatur stark streuen und es keine wirklich genauen Angaben gibt. [24], [25]

	1980	2007	2015	langfristiges Potential
Durchschnittlicher Systempreis (€/W exkl. UST)	> 30	5	2,5	0,5
Durchschnittliche Solarstromproduktionskosten in Südeuropa (€/kWh)	> 2	0,3	0,15	0,03
Durchschnittlicher Wirkungsgrad von Standardmodulen	bis 8 %	bis 15 %	bis 20 %	bis 40 %
Durchschnittlicher Wirkungsgrad von Konzentratormodulen	ca. 10 %	bis 25 %	bis 30 %	bis 60 %
Energetische Amortisation bzgl. der Herstellung / in Jahren (Südeuropa)	> 10	2	1	0,25

Tabelle 2.3: Stand der Technik bei PV-Modulen [25]

2.7 Mikro-Kraftwärmekopplungssysteme

Biogene Brennstoffe wie Holz oder auch fossile Brennstoffe wie Gas und Öl haben ein hohes **Exergie**potential. Bei Wärmeenergie bedeuten hohe Temperaturen auch eine hohe Exergie. Raumheizungen arbeiten im Niedertemperaturbereich, benötigen nur ein geringes Exergiepotential und somit wird bei reiner Wärmenutzung aus Verbrennungsanlagen ein beträchtlicher Teil der Exergie verschwendet. Um das vorhandene Potential nun besser auszunutzen ist es sinnvoll, die überschüssige Wärme zur Elektrizitätserzeugung zu verwenden. Diese gleichzeitige Erzeugung elektrischer (mechanischer) und thermischer Nutzenergie mithilfe eines thermodynamischen Prozesses bezeichnet man als *Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)* und die Anlage selbst als *Blockheizkraftwerk (BHKW)*. Die großen Vorteile einer solchen BHKW-Anlage gegenüber herkömmlichen Heizanlagen sind [36]:

- Geringerer Primärenergieverbrauch gegenüber getrennter Erzeugung von Strom und Wärme ⇒ Ressourcenschonung
- Geringere Umweltbelastung - insbesondere durch Reduktion von CO₂-Emissionen und weiteren Luftschadstoffen wie CO, NO_x - gegenüber getrennter Erzeugung.
- Verbrauchsnahe (lastnahe) Installation der Anlagen bewirkt nur geringe Übertragungsverluste bzw. Verteilernetzkosten

Zur Definition der im Kleinlastbereich verwendeten Mikro- und Mini-BHKW-Anlagen gibt es sehr unterschiedliche Angaben, wie in [Tabelle 2.4](#) dargestellt. Diese Arbeit wird aufgrund des Schwerpunkts im Kleinlastbereich alleinig die Bezeichnung *Mikro-BHKW* weiterverwenden und auf eine exakte Definition verzichten.

	OPET CHP-Studie	EU-KWK Richtlinie 1 ²⁰
Mikro-BHKW	$< 10 \text{ kW}_{el}$	$\leq 50 \text{ kW}_{el}$
Mini-BHKW	$< 500 \text{ kW}_{el}$	$\leq 1000 \text{ kW}_{el}$

Tabelle 2.4: Verschiedene Definitionen von BHKW-Anlagen [36], [37]

2.7.1 Einsatzmöglichkeiten von Blockheizkraftwerken

Ein heute bestehendes Dampfkraftwerk zur Elektrizitätserzeugung hat einen Wirkungsgrad von 40% und Heizanlagen kommen auf mittlere Kesselwirkungsgrade von etwa 85%, wie in [Abbildung 2.21](#) schematisch dargestellt. Betrachtet man nun diese getrennte Erzeugung von Strom und Wärme, so wird ein durchschnittlicher Brennstoffnutzungsgrad von nur ca. 63% errechnet. In BHKW-Anlagen hingegen können bis zu 90% der eingesetzten Primärenergie in Elektrizität und Wärme umgewandelt werden. Dieser Vorteil gilt grundsätzlich auch für Großkraftwerke im KWK-Bereich. Im Gegensatz dazu können aber Mikro-BHKWs bei entsprechender Auslegung ganzjährig die hohen Nutzungsgrade erzielen, sofern folgende Voraussetzungen erfüllt sind [36]:

- möglichst gleichzeitiger Bedarf von Wärme und Elektrizität
- möglichst ganzjährige thermische Grundlasten zur Erzielung hoher Volllaststunden
- möglichst hohe Eigennutzung des erzeugten Stroms (aufgrund schlechter bzw. fehlender Einspeisevergütungen in Österreich)

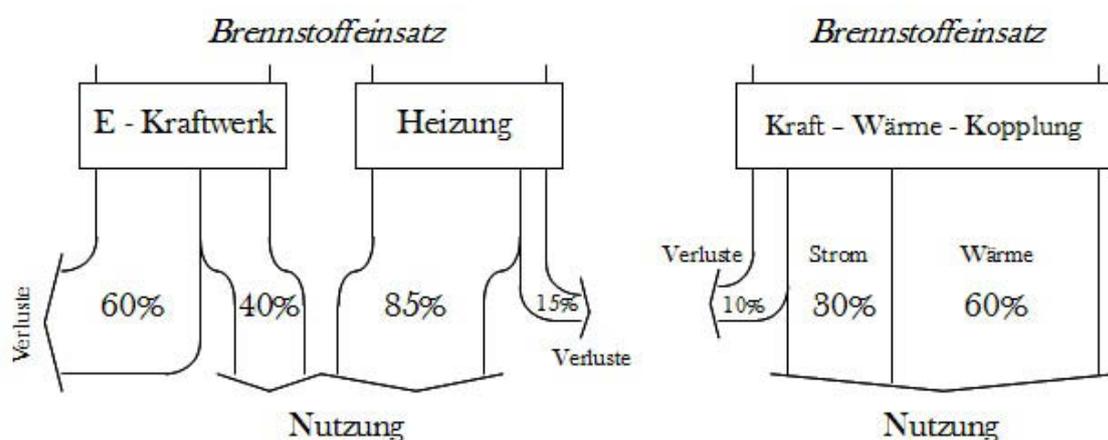


Abbildung 2.21: Energieeinsparung durch KWK, bezogen auf den Brennstoffeinsatz

Die beste Ausnutzung der eingesetzten Primärenergie wird erzielt, wenn die thermische Leistung des BHKW's nach der Höhe und Struktur des Wärmebedarfs eines Objekts

²⁰Die Richtlinie 2004/8/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten KWK benutzt die Bezeichnung *Kleinanlage* anstatt *Mikro-BHKW* und die Bezeichnung *Kleinanlage* anstatt *Mini-BHKW*. [37]

ausgelegt wird. Das BHKW ist nur in Betrieb, wenn Wärme nachgefragt wird, der erzeugte Strom wird im Objekt genutzt oder in das öffentliche Netz eingespeist. Eine derartige Auslegung erreicht die höchsten technisch möglichen Wirkungsgrade. [36]

In Österreich finden Blockheizkraftwerke vor allem dort Anwendung, wo entweder ganzjährig eine thermische Grundlast vorliegt oder die Abwärme zusätzlich für Klimatisierungszwecke verwendet werden kann. Im ersten Fall sind dies Krankenhäuser, Hotels, Pensionen und die Industrie. Für die duale Verwendung als Heizung und Klimatisierung sind die Hauptanwendungsfälle Schulen, Universitäten, Verwaltungsgebäude, Hallenbäder und Fitness-Center. Aber auch bei Wohnsiedlungen ist der Bedarf an BHKW's in den letzten Jahren gestiegen. Vor allem bei Mehrfamilienhäusern oder Reihenhausanlagen werden KWK-Systeme vermehrt nachgefragt. Obwohl hier für die Raumheizung lediglich bis zu 2000 Betriebsstunden anzusetzen sind, kann die Grundlast durch Warmwasserbereitstellung oder der Realisierung eines Nahwärmekonzepts entsprechend erhöht werden. [36]

2.7.2 Funktionsweise und Anlagenkonzepte

Bei einem Blockheizkraftwerk handelt es sich um einen Verbrennungsmotor, der einen Generator zur Erzeugung elektrischer Energie antreibt. Die Abwärme des Motors aus den Kühlkreisläufen und aus dem Abgas wird zur Bereitstellung von Heizwärme verwendet, die über Wärmeübertrager in die Heizkreisläufe des Gebäudes eingespeist wird. [Abbildung 2.22](#) zeigt das schematische Prinzip einer solchen Anlage. [36]

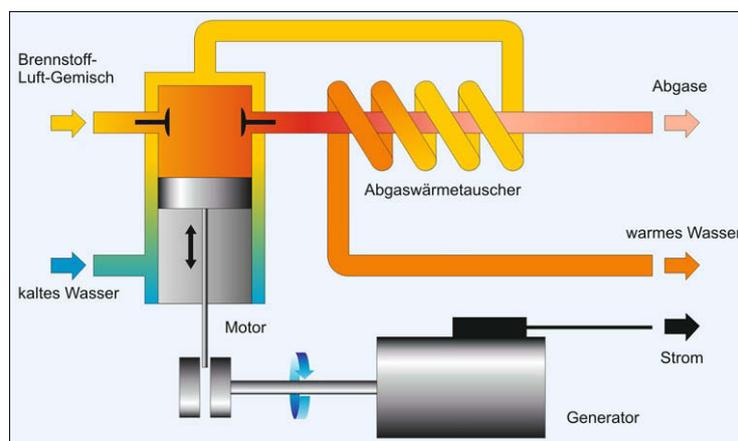


Abbildung 2.22: BHKW-Schema [38]

2.7.2.1 Verbrennungsmotor

Als Antrieb für die BHKW's werden meist klassische Verbrennungsmotoren eingesetzt. Dabei unterscheidet man zwischen *Ottomotoren*, bei denen das Brennstoff-Luft-Gemisch durch eine Zündkerze gezündet wird, und *Dieselmotoren*, wo sich das Gemisch bei ausreichender Verdichtung selbst entzündet. Je nach Motorentyp können die verschiedensten Brennstoffe verwendet werden, wobei Ottomotoren eher mit Gas- und Dieselmotoren mit Flüssigbrennstoff betrieben werden ([Tabelle 2.5](#)). Weiters ist zu erwähnen, dass bei der Verwendung von Agrogas oder Deponiegas aufgrund der niedrigeren Methangehalte oft Zündöl beim Verdichtungsschritt des Ottomotors eingespritzt wird, um den Zündvorgang zu intensivieren. [20], [36]

²¹Die Bezeichnungen *Agrogas* bzw. *Agrodiesel* wurden hier den Bezeichnungen *Biogas* bzw. *Biodiesel* bewusst vorgezogen, da diese Kraftstoffe nur selten aus biologischer Landwirtschaft stammen.

Ottomotor	Dieselmotor
Erdgas	Heizöl
Agrogas	Agrodiesel ²¹
Deponiegas	Pflanzenöl

Tabelle 2.5: Brennstoffe für Verbrennungsmotoren bei BHKWs

Aufgrund intensiver Nutzung im Fahrzeugbereich kann bei Verbrennungsmotoren auf ein hohes Entwicklungs- und Zuverlässigkeitsniveau zurückgegriffen werden. Dies betrifft allerdings hauptsächlich den Betrieb mit fossilen Energieträgern. Bei biogenen Brennstoffen sind eine Reihe neuer Probleme zu bewältigen, insbesondere [40]:

- die Beherrschung von Schadstoffemissionen aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung der Brennstoffe (Schwefeloxide, Stickoxide, Partikel).
- die Zuverlässigkeit im Betrieb, denn biogene Brennstoffe erfordern oft deutlich kürzere Wartungsintervalle, was die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigt.

Die Probleme mit Agrokraftstoffen könnten dennoch bald der Vergangenheit angehören. Denn in der EU gibt es bis 2020 sehr ambitionierte Pläne bezüglich der Verwendung und Forcierung biogener Treibstoffe für den Verkehrssektor. Hohe Ausgaben für Forschungs- und Entwicklungsprogramme werden die Effizienz biogener Kraftstoffe im Einsatz für Verbrennungsmotoren steigern und sich somit positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Vor allem bei Agro-Dieselmotoren ist der Entwicklungsstand im EU-Raum bereits weit fortgeschritten. Hier sei allerdings unbedingt auch in Frage zu stellen, inwieweit Pflanzen, die der Lebensmittelproduktion dienen, als Rohstoff für Mobilität bzw. Wärmegewinnung verwendet werden sollten. Diese Frage wird in zahlreichen Publikationen thematisiert. [40], [39]

2.7.2.2 Stirlingmotor

Beim *Stirlingmotor* wird während eines Arbeitszyklus das Arbeitsmittel (Wasserstoff, Helium, Luft etc.) vom kalten Gebiet des Verdichtungszyinders zum heißen Gebiet des Arbeitszyinders verschoben. Aus der Temperaturdifferenz entstehen Druckschwankungen die in mechanische Arbeit umgewandelt werden können. Die Antriebsenergie für den Prozess wird dabei von außen in Form von heißem Rauchgas über den Erhitzer-Wärmetauscher zugeführt. [36]

Stirlingmotoren haben ein sehr gleichmäßiges Drehmoment und sind verschleiß- und wartungsarm. Außerdem kann aufgrund der externen Verbrennung eine Vielzahl an Brennstoffen eingesetzt werden und auch der Aufwand der Kesselreinigung reduziert sich dadurch. Ein großes Marktpotenzial wird dem Stirlingmotor vor allem im Bereich der Biomasse - bzw. Holznutzung im kleinen Leistungsbereich prognostiziert. [36]

2.7.3 Ökonomische Betrachtungen von Mikro-KWK's

Wärme- und Elektrizitätserzeugung kann man nicht getrennt voneinander betrachten. Denn einerseits werden Wärmepumpen mit Strom betrieben und andererseits kann man fossile Rohstoffe und Holz auch für die Elektrizitätserzeugung verwenden. Eine Möglichkeit der gemeinsamen Produktion beider Energieformen stellt die KWK-Technologie dar, die derzeit aber hauptsächlich im höheren Leistungsbereich für den Industriesektor oder zur Speisung von Nah- bzw. Fernwärmenetzen verwendet wird. Neuere Berichte zeigen

jedoch, dass moderne Mikro-Blockheizkraftwerke auch für Anwendungen mit geringerem Energiebedarf bereits wirtschaftlich sind. Im Projekt *Innovative KWK zur Hausenergieversorgung* ([81]) etwa, werden vier verschiedene KWK-Systeme mit einem Erdgas-Heizkessel verglichen. Das betrachtete Mehrfamilienhaus mit 10 Parteien (MFH10) ist dabei für die Wärmeversorgung als auch für die Elektrizitätsabnahme der einzige Kunde. Investitions- und Tarifförderungen wurden nicht eingerechnet. Je nach verwendeter BHKW-Type konnten Gesamtkostenersparnisse von -5% bis -15% erzielt werden. Neben einer besseren Öko-Performance stellen die Anlagen also auch eine wirtschaftliche Alternative dar. Dennoch finden Mikro-KWK-Systeme für Wohnbauten oder kleine Siedlungen nur wenig Beachtung, was laut Experten vor allem an den hohen Investitionskosten liegt. Diese betragen beim MFH10 beispielsweise mehr als das Doppelte, verglichen mit dem konventionellen Heizkessel. [81], [82]

Bei Einfamilienhäusern ist die ökonomische Bilanz schlechter als die der fossilen Referenzsysteme. Geringere Stromkosten bei gleichzeitigen Erlösen für den verkauften Strom und deutlich niedrigere Verbrauchs- und Betriebskosten können hier die hohen Investitionskosten der Mikro-KWK-Anlage über die Laufzeit noch nicht wettmachen. Über entsprechende Subventionen für Forschung und Entwicklung wäre es allerdings möglich, dass sich dies schon in naher Zukunft ändert, da es vor allem bei den Herstellungskosten noch einen großen Spielraum bezüglich Kostensenkung gibt. Angesichts der sich ständig verknappenden Ressourcen erscheint die Förderung der Technologie somit auch als sinnvoll, da sie sich neben den ökonomischen Vorteilen der effizienteren Verwendung von Energieträgern auch positiv auf die Versorgungssicherheit auswirkt. Abseits der guten Gesamtwirkungsgrade bieten diese Anlagen aber noch weitere Vorteile. Wie auch bei der Photovoltaik kann über eine verstärkte dezentrale Elektrizitätserzeugung das Netz entlastet werden. Außerdem wird auch die Zuverlässigkeit der Stromversorgung erhöht. Erst ab einem gewissen Anteil an netzgekoppelten Mikro-KWK-Anlagen muss, falls keine entsprechenden technischen Maßnahmen ergriffen werden, von negativen Auswirkungen für die Stromversorgung und das Verteilernetz ausgegangen werden. Dieser kritische Mikro-KWK-Anteil liegt laut Fachexperten aber noch in weiter Ferne. Ein anderes effizienzsteigerndes Konzept über dezentrale Mikro-BHKW's ist deren informationstechnische Vernetzung über sogenannte *virtuelle Kraftwerke*. Neben weiteren Vergütungsmöglichkeiten des Stroms über Strombörsen können elektrische Lastflüsse optimiert werden, was wiederum zu geringeren Verlusten führt. Hier wären natürlich noch eine Reihe zusätzlicher Vorteile und auch Nachteile solcher virtueller Kraftwerke anzuführen. Da dies aber deutlich über die Zielsetzung der Studie hinausgeht, wird hier nicht weiter darauf eingegangen ²². Für darüber hinausführende Betrachtungen sei auf entsprechende Literatur verwiesen. [81], [82]

Wie man sieht, bieten sich über Mikro-KWK-Anlagen eine Reihe neuer Möglichkeiten, die Energieversorgung effizienter und somit auch wirtschaftlicher zu machen. Derzeit gibt es hierzulande allerdings kaum einen Absatzmarkt für diese Systeme. Ohne entsprechende Förderungen wird sich dies in Zukunft auch nicht ändern. In Österreich gibt es aktuell kein landesweites Fördergesetz für KWK-Anlagen im kleinen Leistungsbereich. Bei den Bundesländern hat lediglich Niederösterreich seit 01.01.2011 eine konkrete Investitionsförderung für Biomasse-BHKW's eingeführt, allerdings beschränkt sich diese auf ein Jahr und wird nur für maximal 30 Anlagen gewährt. Tarifförderungen für den eingespeisten Strom gibt es auch nicht und dieser muss somit zum Marktpreis in das Netz geleitet werden. Das *integrierte Energie- und Klimaprogramm (IEKP)* der deutschen Bundesregierung misst dem Mikro-KWK-Bereich schon mehr Bedeutung zu. Für Anlagen kleiner

²²Das Konzept der Vernetzung zeigt aber die Möglichkeiten der Dezentralisierung über Mikro-KWK-Anlagen auf.

50kW_{el} wird neben einer Investitionsförderung auch der erzeugte Strom über Sondertarife vergütet. Ende 2009 beträgt der KWK-Zuschlag 5,11 cent/kWh_{el} für zehn Jahre und der Investitionszuschuss für eine 10kW_{el}-Anlage ist beispielsweise mit 8750 € bemessen. Zusätzlich dazu gibt es, je nach Brennstoff, noch steuerliche Vergünstigungen. [83], [84]

2.8 Ökologische Betrachtungen ausgewählter Systeme

Aufgrund des hohen Aufwands eines konkreten mikroökonomischen Vergleichs von Energieanlagen können nicht alle zuvor beschriebenen Systeme hier auch analysiert werden. Die Betrachtungen beschränken sich dadurch auf ein paar wenige, für den österreichischen Haushaltsenergiesektor relevante, Systeme. In Bezug auf den Heiz- und Warmwasserbedarf werden dabei *Gasthermsysteme (GTS)*, *Wärmepumpensysteme (WPS)* und *Holz-Pelletheizungssysteme (HPS)* näher beschrieben. Diese drei stellen laut Experteninterviews und einiger Voranalysen derzeit, und auch in naher Zukunft, die wirtschaftlich effizienteste Möglichkeit der Wärmeversorgung dar²³. Im Fall der Elektrizität wird der *konventionelle Bezug* über das Versorgungsnetz einer am Hausdach installierten *Photovoltaikanlage* gegenübergestellt.

Vor allem im Energiesektor spielt neben der Wirtschaftlichkeit aber auch die ökologische Performance eine große Rolle. Auf eine Berechnung der Emissionen und ökosozialen Auswirkungen unter Berücksichtigung der gesamten Produktionskette muss hier allerdings verzichtet werden, da dies eine eigene Arbeit füllen würde. Es sollen aber einige wesentliche Ergebnisse einiger Studien präsentiert werden, die sich genau mit diesem Themengebiet beschäftigt haben.

Die hier betrachteten Studien wurden alle unter Verwendung des *Global Emissions Modell Integrierter Systeme (GEMIS)* durchgeführt. Diese Software wurde vom *Öko-Institut Freiburg* und der *Gesamthochschule Kassel (GhK)* in den Jahren 1987 - 1989 entwickelt und seither kontinuierlich fortentwickelt und aktualisiert. Seit 1996 ist *GEMIS* als *public domain Software* kostenlos erhältlich und darf uneingeschränkt kopiert und weitergegeben werden. [41]

Die folgende ökologische Bewertung bezieht sich auf die gesamte Produktionskette *exklusive* Transport- und Verteilverluste, und beinhaltet die Schadstoffemissionen **SO₂** und **NO_x**, sowie die Treibhausgasemissionen in **CO₂-Äquivalent**. Es wird allerdings darauf verzichtet, die Umweltauswirkungen der einzelnen Systeme konkret zu quantifizieren, da zahlreiche Studien gefunden wurden, die allesamt sehr unterschiedliche Zahlenwerte präsentieren. Das hängt vor allem damit zusammen, dass jeder Studie andere Ausgangssituationen für die Berechnungen zugrunde liegen. Am Beispiel der Wärmepumpen sei dies am einfachsten erklärt. Nach der Herstellung der Anlagen hängt die ökologische Performance von Wärmepumpensystemen vor allem von deren Jahresarbeitszahlen und dem verwendeten **Strommix** ab. Luft-Wärmepumpen haben eine andere JAZ als Erdkollektor-Wärmepumpen. Und auch innerhalb der verschiedenen Bauarten (Luft, Erde, Wasser etc.) gibt es je nach Herstellertyp und Qualität noch zusätzlich deutliche Unterschiede. Hinzu kommt dann noch der Strommix. Einige wenige Studien verwenden den tatsächlichen Strommix des jeweiligen Landes, andere spezifizieren eine fiktive Erzeugung über zwei oder maximal drei verschiedene Kraftwerkstypen. Wieder andere gehen davon aus, dass jede zusätzliche Wärmepumpe hauptsächlich mit Strom aus kalorischen Gaskraftwerken betrieben wird. Diese Vielzahl an Parametern macht eine zahlenmäßige Quantifizierung der Gesamtemissionen im Rahmen dieser Arbeit wenig sinnvoll. Im Weiteren werden so-

²³Natürlich wäre auch noch die *Fernwärme* zu nennen. Da dessen Installation aber standortabhängig ist, wird sie hier nicht betrachtet.

mit nur die qualitativen Ergebnisse und Vergleichswerte beschrieben, da diese bei allen verwendeten Studien in etwa ident sind.

Für die Emissionsvergleiche wurden viele verschiedene Quellen herangezogen, wobei sich die dargestellten Daten hauptsächlich auf das Excel-Berechnungstool *g46-results-aug2010daten1* ([45]) vom *Öko-Institut* beziehen²⁴. Die Daten hinsichtlich der Elektrizitätserzeugung sind dabei aus dem Jahr 2005, für die Wärmeenergiesysteme ist bereits ein Datensatz von 2010 verfügbar. [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48]

2.8.1 Photovoltaik im ökologischen Vergleich mit konventionellem Strombezug

Da einige Heizungssysteme mit elektrischer Energie betrieben werden, wird zuerst auf die ökologischen Parameter der Elektrizitätserzeugung eingegangen. Dies gestaltet sich insofern schwierig, als jedes Land einen anderen Strommix hat. Eine genaue Analyse des heimischen Stromverbrauchs müsste neben der inländischen Erzeugung auch die Importe und Exporte an elektrischer Energie beziffern. Durch die von Land zu Land stark unterschiedliche Zusammensetzung erzeugter Energie, wird auf eine spezifische Import-Export-Analyse aber in den meisten Fällen verzichtet. Es wurde beispielsweise keine einzige österreichische Statistik zum Strommix gefunden, in denen ein Atomstromanteil vermerkt war²⁵. Laut *E-Control* und verschiedener NGO's gibt es aber hierzulande einige Unternehmen, in deren Strommix auch Atomstrom enthalten ist. Anstatt also den konventionellen Strombezug als Ganzes zu betrachten, soll hier die Ökobilanz von den wesentlichen Erzeugungstechnologien im Speziellen beschrieben werden. [1], [73]

Schwefeldioxid: Bei SO₂ schneiden Windenergieanlagen und Wasserkraftwerke²⁶ mit Abstand am Besten ab, dicht gefolgt von modernen Gaskraftwerken²⁷. Mit etwas Abstand, aber dennoch sehr geringen Emissionswerten, kommen danach Atomkraft, Photovoltaik und Biomasseanlagen. Den größten SO₂-Ausstoß findet man bei Kohle- und Ölkraftwerken. Im Vergleich zu Wasserkraft und Windanlagen liegen hier die Werte bei modernen Kohleanlagen um das 50fache, bei Ölkraftwerken um mehr als das 100fache höher. [43], [44], [45]

Stickoxide: Bei NO_x findet man ein ähnliches Bild wie zuvor. Windkraft und Wasserkraft emittieren deutlich weniger als alle anderen Technologien, dahinter folgt unmittelbar die Atomkraft und danach die Photovoltaik. Biomasse- und Erdgasanlagen liegen hier weit abgeschlagen und sind etwa gleichauf mit Kohle und Öl. Die Emissionswerte dieser Erzeugungstechnologien liegen dabei um das 15-20fache höher als die der Windkraft. [43], [44], [45]

Treibhausgase: Bei den Treibhausgasen (in CO₂-Äquivalent) schneiden erneut die Windparks am Besten ab. Sie emittieren mehr als die Hälfte weniger Treibhausgase als Wasser- und Atomkraftwerke. Die Emissionswerte von Gaskraftwerken liegen um das 20-30fache

²⁴In Absprache mit dem Hauptverantwortlichen des Berechnungsprogramms, Herrn Fritsche U. vom *Öko-Institut Darmstadt*, wurde dieses file auf <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm> gefunden.

²⁵In den gefundenen österreichischen Studien ist der Strommix immer gleichbedeutend mit der inländischen Stromerzeugung.

²⁶Hierbei ist zu beachten, dass sich die Aussagen über Wasserkraftwerke und Windenergieanlagen auf Großkraftwerke mit hohen Leistungen beziehen.

²⁷Wenn nicht anders angegeben, stimmt die Reihenfolge, in der die Technologien genannt werden, mit der Reihenfolge der Emissionswerte überein.

höher als die der Windkraft, Ölkraftwerke (bis zu 40x höher), und das Schlusslicht bilden Kohlekraftwerke mit Emissionswerten, die bis über 50x höher sind als die von Windkraftwerken²⁸.

Biomasseanlagen und die Photovoltaik liegen bei den Treibhausgasen nicht im Spitzenfeld und haben gegenüber den Spitzenreitern deutlich höhere Werte. Je nach Technologie lagen die Emissionen der PV um das 5-8fache höher als jene der Windkraft, da der Herstellungsaufwand von PV-Modulen (Lichtbogen!) sehr CO₂-intensiv ist. Viele Experten sind aber der Meinung, dass sich der CO₂-Ausstoß in den folgenden Jahren aus Kostengründen und durch neue Herstellungstechnologien deutlich verringern wird. [43], [44], [45], [46], [47]

Obigen Daten ist noch anzufügen, dass sie sich auf die Elektrizitätserzeugung ohne Kraft-Wärme-Kopplung beziehen. Werden kalorische Kraftwerke in der Nähe von Industriegebieten oder großen Wohngebieten gebaut, so kann man die Abwärme nutzen und die spezifischen Emissionen deutlich reduzieren. Vor allem bei Biomasseanlagen oder modernen GuD-Kraftwerken (Gas- und Dampf-Kombikraftwerk) kann die Treibhausgasbilanz über den KWK-Prozess bedeutend gesenkt werden.

Photovoltaikanlagen schneiden ökologisch gesehen deutlich besser ab als fossile Kraftwerke. Lediglich bei Schwefeldioxid sind die Emissionswerte etwas höher als die der Gaskraftwerke, aber trotzdem weit geringer als bei den Rohstoffen Öl und Kohle. Im Vergleich mit Wind- oder Wasserkraft liegt die PV dennoch etwas zurück, auch wenn sich die Performance aufgrund neuer Herstellungstechnologien noch weiter verbessern wird (siehe [Tabelle 2.3](#) (Seite 35)). Außerdem können PV-Dachanlagen dezentral betrieben werden und liefern den Strom ohne Netzverluste ins Haus, was die Bilanz gegenüber zentralen Technologien nochmal steigert. [43], [45]

2.8.2 Wärmeenergiesysteme im ökologischen Vergleich

Auch wenn in vorliegender Arbeit auf eine genauere Betrachtung von Ölkesseln und Elektroheizungen verzichtet wurde, werden sie in diesem Abschnitt mitberücksichtigt. Es soll damit gezeigt werden, wie groß die Unterschiede zwischen diesen beiden Heizungsvarianten und den hier betrachteten Systemen *GTS*, *WPS* und *HPS*, sind.

Wie schon anfangs erwähnt, ist eine genaue ökologische Analyse von Elektrowärmepumpen äußerst schwierig. Die Performance hängt hier in hohem Maße mit dem verwendeten Strommix zusammen. Für die folgenden Betrachtungen wurde der Strommix Deutschlands aus dem Jahr 2010 herangezogen. Die deutsche Elektrizitätsversorgung unterscheidet sich technologisch gesehen zwar stark von der österreichischen, welche zu einem Großteil durch Wasserkraft gedeckt wird. Aber auch Deutschland hat mit etwa 20% regenerativen Energieträgern und über 20% Atomkraft einen hohen Anteil an Erzeugungstechnologien mit niedrigen Emissionswerten²⁹. Die Daten können vorerst also durchaus als Richtwerte für Österreich herangezogen werden. Diese Thematik wird dann am Ende dieses Abschnitts noch genauer betrachtet. [43], [44], [45], [46], [47], [48]

Schwefeldioxid: Die mit Abstand geringsten SO₂-Werte haben Gasheizungen. Dahinter folgen mit den 5-7fachen Werten die Wärmepumpen und danach die Pelletheizungen.

²⁸Grobe Unterschiede zwischen Steinkohle und Braunkohle waren nicht festzustellen und wurden somit auch nicht getrennt angegeben.

²⁹Trotz der niedrigen Emissionswerte ist die ökologische Performance von Atomkraftwerken ein sehr komplexes Thema. Hier wäre eigentlich noch das Risiko eines Supergaus zu berücksichtigen und auch die ökologischen Langzeitfolgen der Endlagerung sind in den meisten Bewertungen nicht eingerechnet.

Ölkessel und Elektroheizungen schneiden hier am schlechtesten ab. Sie emittieren etwa 15-20 mal mehr Schwefeldioxid als Gasheizungen. [43], [45]

Stickoxide: Beim Ausstoß von Stickoxiden liegen Wärmepumpenanlagen, Gasheizungen und auch Ölheizungen in etwa gleich auf. Die Emissionwerte dieser drei Systeme sind von allen betrachteten am geringsten und unterscheiden sich nur marginal voneinander. Mit ca. 50% höheren Emissionswerten folgt dahinter die Pelletheizung. Den größten Schadstoffausstoß haben wie schon zuvor die Elektroheizungen, mit Werten, die etwa dreimal so hoch sind wie die der Wärmepumpen. [43], [45]

Treibhausgase: Bei den für diese Arbeit relevanten Systemen (*WPS, GTS, HPS*) liegen die Emissionwerte aller Anlagen bezüglich Schwefeldioxid und den Stickoxiden weit unter den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten. Für den Treibhausgasausstoß gibt es derzeit noch keine gesetzlichen Grenzwerte. Aufgrund des Kyoto-Protokolls ist aber jedes involvierte Land verpflichtet, bei Überschreitung der als Ziel gesetzten Emissionen, Ausgleichszahlungen zu tätigen. Neben den ökologischen Aspekten haben die Treibhausgase also auch eine ökonomische Relevanz und werden im Weiteren etwas genauer betrachtet. [43], [45], [48]

Tabelle 2.6 zeigt ausgewählte Daten zum deutschen Treibhausgasausstoß von Heizsystemen aus dem Jahr 2010. Die Werte stammen vom *Öko-Institut* und wurden mit dem Excel-Berechnungstools *g46-results-aug2010daten1* berechnet. Folgende Liste dient als Legende für Tabelle 2.6. [45]

- Holz-Pellets: Heizung für Holzpellets (aus Sägewerksreststoffen)
- Fernwärme Holz-Wald-HKW: Fernwärme aus Holz-Waldhackschnitzel-HKW mit Gaskessel inkl. Wärmenetz
- E-WP-Boden: Elektro-WP, Wärmequelle Boden, Strom aus Kraftwerksmix
- E-WP-Luft: Elektro-WP, Wärmequelle Umgebungsluft, Strom aus Kraftwerksmix
- Gas BW: Brennwert-Zentralheizung für Erdgas
- Fernwärme mix: Mix von Fernwärme aus Heizkraft- und Heizwerken inkl. FW-Netz
- Heizöl BW: Brennwert-Zentralheizung für leichtes Heizöl
- Elektro-SPmix: Elektro-Nachtspeicher-Heizung, Strom aus deutschem Kraftwerkmix
- Solar-Warmwasser FK: Warmwasser aus Solarenergie mit Flachkollektor inklusive Pumpe und Speicher
- Solar-Warmwasser VA: Warmwasser aus Solarenergie mit Vakuumkollektor inklusive Pumpe und Speicher

Bei den klimarelevanten Treibhausgasen ist die Pelletheizung der mit Abstand geringste Emittent. Die Werte liegen hier deutlich niedriger als die von allen anderen Systemen. Lediglich die Waldhackschnitzel-Fernwärme zeigt eine annähernd gute Öko-Performance. Auch die Wärmepumpensysteme haben bereits einen durchschnittlich etwa siebenfach höheren Ausstoß als die Pelletheizung. Bezüglich der Treibhausgasbilanz ist das Holzheizungssystem unter den sogenannten Umweltsystemen also die mit Abstand klimafreundlichste Technologie. Systeme, die fossile Energieträger zur Beheizung verwenden, weisen ebenso wie die Elektroheizung einen sehr hohen Schadstoffausstoß auf.

System	CO ₂ -Äquivalent (g/kWh)	Vergleich zu Holz-Pellets
Holz-Pellets	25	1
Fernwärme Holz-Wald-HKW	65	2,60x
E-WP-Boden	172	6,88x
E-WP-Luft	186	7,44x
Gas BW	251	10,04x
Fernwärme mix	254	10,16x
Heizöl BW	327	13,08x
Elektro-SPmix	614	24,56x
<i>Solar-Warmwasser FK</i>	44	1,76x
<i>Solar-Warmwasser VA</i>	24	0,96x

Tabelle 2.6: Treibhausgase von Heizenergiesystemen am Beispiel Deutschlands 2010 [45]

Selbst die gemischten Fernwärmesysteme, die mit anderen Energieträgern beschickt werden als Holz, haben relativ hohe Emissionswerte. [43], [45], [48]

Bezüglich der Treibhausgasbilanz von Gasheizungen und Wärmepumpensystemen sei noch Folgendes zu erwähnen: Beim hier betrachteten deutschen Strommix stellt eine Wärmepumpe nur einen vergleichsweise geringen ökologischen Vorteil gegenüber Gasheizungen dar. Für den österreichischen Markt sieht dies aufgrund des hohen Wasserkraftanteils bei einer Gesamtbetrachtung schon etwas besser aus. Aber ist solch eine Gesamtbetrachtung des Strommixes bei Wärmesystemen überhaupt sinnvoll? Jede zusätzliche Elektro-Wärmepumpenheizung muss über zusätzliche elektrische Energie gespeist werden. Wenn also über WP-Systeme ein ökologisches Ziel erreicht werden soll, dann kann dies nur über neue Elektrizitätskraftwerke mit entsprechend niedrigen Emissionen geschehen. Die tatsächliche Öko-Performance von Wärmepumpen hängt also nicht mit dem aktuellen Strommix zusammen, sondern davon, wie die Elektrizitätsversorgung in Zukunft ausgebaut wird. Es würde aus ökologischer Sicht beispielsweise wenig Sinn machen, die gesamten Haushalte auf Wärmepumpenheizungen umzustellen, und diese dann über neue Gaskraftwerke mit Strom zu versorgen. Denn selbst modernste GuD-Kraftwerke erreichen einen elektrischen Wirkungsgrad von maximal 55 - 60%, wobei die Umspann- und Netzverluste noch nicht eingerechnet sind. Eine Brennwert-Gasheizung hat dagegen Wirkungsgrade von ca. 95% (siehe 3.2.3 (Seite 51)). Die direkte Benutzung von Erdgas zu Heizungszwecken ist somit weit effizienter als die vorherige Umwandlung in elektrische Energie und anschließende Speisung der Wärmepumpen. Lediglich Gaskraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung erreichen höhere Gesamtwirkungsgrade von bis zu 85%. Allerdings sinkt hier der elektrische Wirkungsgrad auf maximal 40%, da der Heißdampf statt für die Dampfturbine in ein Fernwärmenetz eingespeist wird³⁰. [1], [48], [49]

Dass Holzsysteme derzeit die ökologisch sinnvollste Heizvariante darstellen, wird von Experten kaum in Frage gestellt³¹. Das Heizen über Wärmepumpen ist bezüglich der Umweltthematik jedoch ein sehr komplexes Thema. Wird eine Wärmepumpe ausschließlich aus Strom von erneuerbaren Energieträgern wie Wasserkraft oder Wind gespeist, so liegen die Emissionswerte teilweise sogar noch unter denen einer Pelletheizung. Bei Speisung über ein Gaskraftwerk erhöht sich der Ausstoß aber bereits auf mehr als das 10fache. Und

³⁰Die Wirkungsgrade beziehen sich hier stets auf den Primärenergieeinsatz mit Rücksicht auf den neuesten Stand der Technik.

³¹Holzheizungen haben ökologisch gesehen gegenüber anderen Systemen lediglich beim Feinstaub einen klaren Nachteil. Die Emissionswerte von Hackschnitzel- oder Scheitholzesseln liegen hier weit über denen anderer Heizsysteme. Beim Pelletofen hält sich der Feinstaubausstoß allerdings in Grenzen und liegt nur geringfügig über den Werten der anderen, in dieser Arbeit betrachteten Anlagen.

auch eine Gas-Wärmepumpe zeigt gegenüber der elektrischen Variante keine nennenswerten Vorteile. Um über Wärmepumpen also ökologisch etwas bewirken zu können, muss die Wärmewirtschaft Hand in Hand mit den Elektrizitätsversorgern agieren. [48]

Kapitel 3

Dimensionierung des Niedrigenergiehauses und dessen Energiesysteme

In den nächsten beiden Kapiteln sollen die für die Analyse gewählten Energiesysteme technisch dimensioniert, und anschließend ökonomisch näher betrachtet werden. Um die unterschiedlichen Systeme miteinander zu vergleichen, wurde mit der Software *Open Office Calc* ein Programm entwickelt, mit dem sowohl die technische Auslegung der Anlagen, als auch deren Wirtschaftlichkeit berechnet werden kann. Es ist so allgemein gehalten, dass es über geringe Veränderungen der Modellparameter prinzipiell für jedes Haushaltsenergiesystem anwendbar ist.

3.1 Das Muster-Niedrigenergiehaus

Das für die Berechnungen verwendete Muster-Niedrigenergiehaus hat seinen fiktiven Standort in 4540 Pfarrkirchen bei Bad Hall. Für diese Region gibt es Übersichtspläne für leerstehende Baugründe, der Untergrund besteht aus lehmigen Boden und ist für Flächenkollektoren perfekt geeignet, der Ort hat einen zentralen Gasanschluss und die Solarstrahlung im Jahresmittel ist in etwa bekannt. Somit sind alle Voraussetzungen gegeben, um verbindliche Angebote bei Firmen aus der Umgebung einzuholen. Die wärmespezifischen Daten des Musterhauses sind dabei wie folgt:

- Bauort: 4540 Pfarrkirchen (bei Bad Hall) / OÖ - Lehm Boden
- Wohnfläche: 130 m² (2 Stöcke mit je 2,7m Lichthöhe)
- Kellerfläche: ca. 30 m² beheizt
- Heizwärmebedarf: 50 kWh/m²a (bei 1800 Betriebsstunden pro Jahr)
- spez. Leistungsbedarf: 50 kWh/m²a / 1800 h/a \approx 28 W/m²
- Leistungsbedarf (LB) Heizung: 28 W/m² · 160 m² \approx 4500 W
- LB Brauchwasser (Erfahrungswert): 2000 W
- Wärmenutzungsanlage: Fußbodenheizung (Wandheizung) oder Niedertemperatur-Radiatoren

- Heizwärmebedarf pro Jahr: $50 \text{ kWh/m}^2\text{a} \cdot 160 \text{ m}^2 = 8000 \text{ kWh/a}$
- Wärmebedarf Brauchwasser: 3500 kWh/a (Erfahrungswert) - 31 % des Gesamtbedarfs

Trotz der angegebenen Wärmenutzungsanlage werden die Angebote allein für die Investitionskosten der Quellenanlage eingeholt. Wärmegewinne aus sonnenorientierter Bauweise sind nicht in die Leistungsdaten eingerechnet, da sich der Vergleich rein auf die energetischen Systeme bezieht.

Für die Photovoltaikanlage wird angenommen, dass die verwendete Dachfläche optimal südlich orientiert ist. Der elektrische Energiebedarf des Musterhauses wird weiter hinten in Abschnitt 3.2.6 berechnet.

3.2 Technische Auslegung

Über Expertengespräche und entsprechende Voranalysen wurden die Systeme *Brennwert-Gastherme*, *direkte Erdkollektor-Wärmepumpe*, *Luft-Wärmepumpe* und die *Brennwert-Pelletheizung* für eine weitere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ausgewählt. Diese Anlagen sind für den geringen Energiebedarf des Niedrigenergiehauses aus ökonomischer Sicht am besten geeignet.

Wärmepumpen mit Tiefenbohrung stellen zwar ein hocheffizientes System dar, sind aber auch bedeutend kostenintensiver als die ausgewählten Anlagen. *Wasserwärmepumpen mit Brunnen* können je nach Lage oftmals mit den Preisen mithalten. Jedoch benötigt ihr Bau eine wasserrechtliche Genehmigung, die nur für spezielle Fälle gewährt wird, meist für Baugründe in Fluß- oder Seenähe. Somit werden sie für den allgemein gehaltenen Vergleich dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. *Hackschnitzelheizungen* setzt man vor allem in ländlichen Gegenden ein. Überall dort wo die Hauseigentümer auch ein Waldstück besitzen, macht die Verwendung von Hackschnitzeln Sinn. Nachdem die Anlagenleistungen aber erst bei 10kW aufwärts beginnen, sind sie eher für Betriebe, Mehrfamiliengebäude oder große Land- und Bauernhäuser geeignet. Für ein Einfamilien-Niedrigenergiehaus, wie hier beschrieben, wäre ein solches System bei weitem überdimensioniert. Die *Solarthermie* ist eine sehr sinnvolle und effiziente Methode zur Warmwassererzeugung. Plant man also eine Anlage mit getrennter Heiz- und Brauchwassererhitzung, so stellt die aktiv genutzte Sonnenwärme eine perfekte Alternative zu herkömmlichen Wassersystemen wie Gas- oder Elektroboilern dar. Für die Heizung allein ist sie in mitteleuropäischen Breiten allerdings nicht geeignet. Selbst wenn man die gesamte südliche Dachfläche des Hauses mit Solarkollektoren versieht, könnte der Heizbedarf nicht einmal zu zwei Drittel gedeckt werden. Nachdem sich diese Arbeit ausschließlich mit gemeinsamen Systemen für Heiz- und Brauchwasser beschäftigt, wird auch die Solarthermie von der genauen Analyse ausgeschlossen. Das *Blockheizkraftwerk* ist ähnlich der Hackschnitzelanlage vor allem für einen größeren Leistungsbedarf geeignet und wird somit ebenfalls technisch nicht dimensioniert.

In den folgenden Abschnitten werden die vier genannten Wärmeenergiesysteme und die Photovoltaikanlage technisch spezifiziert. Die Berechnungen sind dabei sehr allgemein gehalten und nur so weit ausgeführt, als es für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen notwendig ist. Die Heizsysteme werden so ausgelegt, dass sie im monovalenten Betrieb die gesamte benötigte Heizlast inklusive Warmwasser liefern können. Bei allen betrachteten Anlagen wird eine Fußbodenheizung als Nutzungssystem angenommen, wobei die WP-Anlage eine Vorlauftemperatur von 35°C hat und für die Gastherme und die Pelletheizung eine Hochtemperatur-FBH mit 55°C herangezogen wird. [Tabelle 3.1](#) zeigt noch einmal die wichtigsten bereits berechneten Daten.

Leistungsbedarf Heizung	4500 W
HWB pro Jahr	8000 kWh/a
Leistungsbedarf Brauchwasser	2000 W
WB Brauchwasser pro Jahr	3500 kWh/a

Tabelle 3.1: Wichtige technische Daten des Hauses

3.2.1 Direkte Erdkollektor-Wärmepumpe

1. Wärmequelle: Erdreich
2. Wärmenutzung: Fußbodenheizung (VLT 35°C)
3. Type: 7 kW Wärmepumpe: W0 / W35 (monovalent)
4. Elektrischer Antrieb: Carnot Leistungszahl $\epsilon_c = \frac{T}{T-T_u} = \frac{308K}{308K-273K} = 8,8$

Leistungszahl $\epsilon = 0,5 \cdot \epsilon_c \approx 4,4$

Mit der Wärmepumpenleistung von 6500W errechnet sich somit eine elektrische Antriebsleistung von:

$$P_{Antrieb} = \frac{P_{WP}}{\epsilon} = \frac{6,5kW}{4,4} \approx 1,5 \text{ kW}$$

5. Speicher: Nachdem als Wärmenutzungsanlage eine Fußbodenheizung gewählt wurde, kann aufgrund der Speicherwirkung vom Estrich laut [31] (Seite 150) ein Reduktionsfaktor F von maximal 0,25 angenommen werden. Bei einer maximalen Temperaturspreizung von 6K (35°C / 29°C) ergibt sich das entsprechende Speichervolumen zu:

$$m = \frac{\dot{Q}_H}{c \cdot \Delta\vartheta} \cdot 0,25 = \frac{6500W}{1,163Wh/kgK \cdot 6K} \cdot 0,25 = 233 \text{ l}$$

Gewählt wird ein Speichervolumen von 300l. Auch für die anderen Anlagen wird dieses Speichervolumen herangezogen und folglich nicht jedesmal neu berechnet.

6. Elektrischer Gesamtbedarf pro Jahr: Um den elektrischen Gesamtbedarf zu bestimmen, muss zuerst die Jahresarbeitszahl (JAZ) des Wärmepumpensystems ermittelt werden. Für die Berechnung der JAZ wurde der JAZ-Rechner des Internetportals <http://www.waermepumpe.de> verwendet. Dieser bezieht sich auf die VDI 4650 und es ist laut verschiedener Studien und Fachbücher ein genaueres Ergebnis zu erwarten als bei der Berechnung mittels Handmethode. Nachdem die Jahresarbeitszahlen je nach Hersteller etwas variieren, wurde der Mittelwert der sechs betrachteten Typen für die endgültige Berechnung gewählt. Tabelle 3.2 zeigt die Ergebnisse der Analyse. [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56]

Hersteller	Type	Nennleistung	JAZ-Heizen	JAZ-Warmwasser
Vaillant	VWS 81/3	7,8 kW	4,99	4,26
Roth	Terra Compact	8 kW	4,6	3,92
Ochsner	GMSW 7 plus	7,2 kW	4,33	3,69
Dimplex	SIKH 9TE	9,4 kW	4,81	4,1
Elco	Aquatop T08C	8,2 kW	4,27	3,64
Tecalor	TTF 7 eco / SW	7,8 kW	4,65	3,96
Stockinger	Type EK1	7 kW	4,6	4

Tabelle 3.2: JAZ-Berechnung für die Erdkollektoranlage [57]

Mit den berechneten Jahresarbeitszahlen ergibt sich eine Gesamt-JAZ von 4,5 und ein elektrischer Energiebedarf des Verflüssigers von:

$$E_{Antrieb} = \frac{8000\text{kWh/a}}{4,6} + \frac{3500\text{kWh/a}}{4} = 2614 \text{ kWh/a}$$

Inklusive Regel-, Steuer- und Sicherheitseinrichtungen erhöht sich der gesamte Energiebedarf der Wärmepumpe noch zusätzlich. Laut Fachbüchern, Richtlinien und Expertenaussagen liegt dieser Mehrbedarf bei etwa 3% ($f_{MB} = 1,03$). Somit ergibt sich der Gesamtbedarf an elektrischer Energie zu [50], [30]:

$$E_{ges} = E_{Antrieb} \cdot 1,03 = 2692 \text{ kWh/a}$$

3.2.2 Luft-Wärmepumpe

1. Wärmequelle: Außenluft (Normaußentemperatur -14°C)
2. Wärmenutzung: Fußbodenheizung (VLT 35°C)
3. Type: 8 kW Wärmepumpe: A0 / W35 (monovalent)
4. Die Berechnung der Leistungszahlen für Luftwärmepumpen ist komplexer als die für Erdkollektortypen und wird hier nicht weiter beschrieben, da es für die Berechnung der JAZ über <http://www.waermepumpe.de> nicht notwendig ist. [Tabelle 3.3](#) zeigt die Ergebnisse der JAZ-Analyse. [51], [52], [53], [54], [55], [56]

Hersteller	Type	Nennleistung	JAZ-Heizen	JAZ-Warmwasser
Vaillant	VWL 81/3	7,4 kW	4,08	4,3
Roth	Aura Modul 8KW E	8 kW	3,36	3,56
Ochsner	GMSLW 9 plus	8,6 kW	4,1	4,3
Dimplex	LA 11 TAS	7,3 kW	3,24	3,38
Elco	Aerotop T10C	8 kW	3,38	3,57
Tecalor	TTL 13 E / LW	6,6 kW	3,55	3,71
Stockinger	Type L1	8 kW	3,6	3,8

Tabelle 3.3: JAZ-Berechnung für die Luftwärmepumpenanlage [57]

Mit den berechneten Jahresarbeitszahlen ergibt sich eine Gesamt-JAZ von 3,65. Die Luftwärmepumpe wurde mit 8kW etwas höher dimensioniert als die WP der Erdkollektoranlage, da sie eine stärkere Abhängigkeit zur Außentemperatur aufweist. Laut Praxisberichten kann es in kalten Wintern vorkommen, dass aufgrund extrem niedriger Temperaturen die Leistung der Wärmepumpe zur Beheizung des Hauses nicht mehr ausreicht. Als Abhilfe könnte diesbezüglich eine bivalente Wärmepumpe oder ein Speicher mit Elektroheizstab herangezogen werden. Da dies aber ökonomisch sehr schwierig zu spezifizieren ist, wird eine Wärmepumpe mit höherer Leistung gewählt, die an sehr kalten Tagen mit niedrigen Leistungsziffern arbeitet. In den Berechnungen ist dies über einen erhöhten Mehrbedarf von 10%, statt wie zuvor 3% realisiert:

$$E_{Antrieb} = \frac{8000\text{kWh/a}}{3,6} + \frac{3500\text{kWh/a}}{3,8} = 3143 \text{ kWh/a}$$

$$E_{ges} = E_{Antrieb} \cdot 1,10 = 3457 \text{ kWh/a}$$

3.2.3 Gasheizungssystem

1. Wärmequelle: Gasanschlussleitung
2. Wärmenutzung: Hochtemperatur-Fußbodenheizung (VLT 55°C)
3. Type: In der Regel werden Gasheizungen weit höher dimensioniert als dem errechneten Leistungsbedarf entsprechend. Einerseits, weil dadurch die erwünschte Wassertemperatur schneller erreicht werden kann, andererseits, da viele Hersteller aus Kostengründen lieber hohe Stückzahlen einer Type, als geringe Stückzahlen vieler Typen erzeugen. Und da Gasheizungen über weite Leistungsbereiche mit konstantem Wirkungsgrad arbeiten können, stellt dies auch kein großes Effizienzproblem dar. Aus diesen Gründen wurden folgende Typen für die weiteren Betrachtungen ausgewählt:

- Brenntwerttherme - 15 kW
- Heizwerttherme - 15 kW

4. Wirkungsgrad: Ähnlich wie für die Jahresarbeitszahlen bei Wärmepumpen gibt es auch bei Gassystemen je nach Hersteller sehr unterschiedliche Wirkungsgrade. Für die Berechnungen wurden die laut VDI 2067 vorgeschlagenen mittleren Jahresbetriebswirkungsgrade verwendet. Der Wirkungsgrad für Brennwertsysteme wurde im Vergleich zu Heizwertsystemen um 5% höher gewählt. [28], [66], [67]

$$\eta_{\text{Brennwert}} = 95 \%$$

$$\eta_{\text{Heizwert}} = 90 \%$$

5. Energetischer Gesamtbedarf:

$$E_{\text{ges}/\text{BW}} = \frac{11500\text{kWh}}{0,95} = 12105 \text{ kWh/a}$$

$$E_{\text{ges}/\text{HW}} = \frac{11500\text{kWh}}{0,90} = 12777 \text{ kWh/a}$$

6. Betriebsenergie: Im Gegensatz zu den Wärmepumpen muss für Gasheizungssysteme der Bedarf an elektrischer Hilfsenergie separat erfolgen. Denn der energetische Gesamtbedarf wird über den Gaspreis vergütet, der Bedarf an Betriebsenergie jedoch über den Strompreis. Der Mehrbedarf aufgrund von Hilfskomponenten liegt bei Gasheizungssystemen laut Literatur und Expertenangaben bei etwa 3%. [28]

$$E_{\text{Betrieb}/\text{BW}} = 12105\text{kWh} \cdot (1,03 - 1) = 363 \text{ kWh/a}$$

$$E_{\text{Betrieb}/\text{HW}} = 12777\text{kWh} \cdot (1,03 - 1) = 383 \text{ kWh/a}$$

3.2.4 Pelletheizung

1. Wärmequelle: Pelletlager
2. Wärmenutzung: Hochtemperatur-Fußbodenheizung (VLT 55°C)
3. Type: Auch bei den Pelletöfen unterscheidet man zwischen Heizwert- und Brenntwerttechnologie. Des Weiteren können bei manchen Herstellern für Kleinanlagen die Komponenten Ofen, Speicher und zusätzliche Hilfseinrichtungen separat, als auch in einer Anlage kombiniert ausgeführt sein. Für die durchzuführenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist dies aber ohne Belang und es wird eine fiktive Type im 8kW-Bereich gewählt.

- Brenntwertkessel - 8 kW
 - Heizwertkessel - 8 kW
4. Wirkungsgrad und Mehrbedarfsfaktor: Für Pelletanlagen schlägt die *VDI 2067* einen Jahresbetriebswirkungsgrad von 81% vor. Auch hier wurde der Wirkungsgrad für Brennwertechnologien um 5% höher gewählt. Der Mehrbedarfsfaktor kann laut Experten ebenfalls mit 3 - 4% angenommen werden. Da er aber etwas höher liegt als der von Gasheizungssystemen wurden 4% gewählt. [66], [67]

$$\eta_{\text{Brennwert}} = 86 \%$$

$$\eta_{\text{Heizwert}} = 81 \%$$

5. Energetischer Gesamtbedarf:

$$E_{\text{ges}/\text{BW}} = \frac{11500\text{kWh}}{0,86} = 13372 \text{ kWh/a}$$

$$E_{\text{ges}/\text{HW}} = \frac{11500\text{kWh}}{0,81} = 14197 \text{ kWh/a}$$

6. Betriebsenergie:

$$E_{\text{Betrieb}/\text{BW}} = 13372\text{kWh} \cdot (1,04 - 1) = 534 \text{ kWh/a}$$

$$E_{\text{Betrieb}/\text{HW}} = 14197\text{kWh} \cdot (1,04 - 1) = 567 \text{ kWh/a}$$

3.2.5 Datenübersicht der Wärmesysteme

In [Tabelle 3.4](#) sind nochmal die wichtigsten Daten zusammengefasst.

System	JAZ / η	Mehrbedarfsfaktor
Erdkollektor-WP	4,6(H), 4(WW)	1,03
Luft-WP	3,6(H), 3,8(WW)	1,10
BW-Gastherme	95 %	1,03
BW-Pelletofen	86 %	1,04

Tabelle 3.4: Technische Daten der Energiesysteme

3.2.6 Dimensionierung der Photovoltaik

1. Energiequelle: Sonne (Dachflächenneigung optimal: 30° nach Süden)
2. Energienutzung: Für den ökonomischen Vergleich werden zwei verschiedene Nutzungsmöglichkeiten der elektrischen Energie aus der Photovoltaikanlage betrachtet:
 - Netzgekoppelter Betrieb: Hier wird der gesamte PV-Strom in das Netz eingespeist und der für das Haus benötigte Energiebedarf ausschließlich vom Netz bezogen.
 - Netzparallelbetrieb: Soweit möglich stellt die Photovoltaikanlage die Energie zur Verfügung. Strom vom Netz wird nur dann bezogen, wenn die PV keine oder weniger Energie liefert als benötigt. Bei Nullbedarf an Energie speist die PV den gesamten Ertrag in das Netz ein.

3. Kollektorfläche: Zur Berechnung der Kollektorfläche der hier betrachteten 5kW-peak - Anlage sind neben dem Modulwirkungsgrad auch die Verluste des Wechselrichters zu berücksichtigen. Laut Literatur liegen die Wirkungsgrade von standardmäßig eingesetzten monokristallinen Zellen zwischen 0,1 und 0,18 - und die der Wechselrichter zwischen 0,90 und 0,97. Die in einem der Firmenangebote verwendeten Komponenten haben beide Wirkungsgrade, die im Mittel in etwa bei den angegebenen Werten liegen ¹. Aus diesem Grund wurden die Mittelwerte $\eta_{Mod} = 0,14$ und $\eta_{WR} = 0,935$ gewählt. Mit einer durchschnittlichen Strahlungsleistung für Österreich² von $1000\text{W}/\text{m}^2$ ergibt sich nun eine Kollektorfläche von [20], [75]:

$$A_{Mod} = \frac{P_{peak}}{\dot{s} \cdot \eta_{Mod} \cdot \eta_{WR}} = \frac{5000\text{W}_{peak}}{1000\text{W}/\text{m}^2 \cdot 0,14 \cdot 0,935} = 38,2\text{m}^2 \quad (3.1)$$

4. Elektrischer Energieertrag: Zur genauen Bestimmung des Energieertrags müssen nun die Jahresnutzungsgrade der jeweiligen Komponenten bekannt sein. Hier wird allerdings, ebenso wie in der verwendeten Fachliteratur, angenommen, dass die Jahresnutzungsgrade den Wirkungsgraden entsprechen. Somit ergibt sich eine jährliche elektrische Nutzenergie von [20]:

$$E_{el} = A_{Mod} \cdot s_a \cdot \eta_{a,Mod} \cdot \eta_{a,WR} \quad (3.2)$$

$$\implies E_{el} = 38,2\text{m}^2 \cdot 1100\text{kWh}/\text{m}^2\text{a} \cdot 0,14 \cdot 0,935 = 5500 \text{ kWh/a}$$

5. Gewählte Komponenten:

- Solarmodul: monokristalline Module mit $P_{ges} = 5\text{kW}_{peak}$, $\eta_{Mod} = 0,14$
- Wechselrichter: 5500W , $\eta_{WR} = 0,935$

6. Elektrischer Energiebedarf: Laut www.e-control.at hat ein Einfamilienhaus mit 4 - 5 Bewohnern einen durchschnittlichen Energiebedarf von ca. 5000kWh/a . [73]

¹Nur ein einziges Angebot beinhaltete auch die technischen Angaben der verwendeten Module bzw. des Wechselrichters.

²Das jährliche Strahlungsangebot für Österreich im Bereich Pfarrkirchen liegt bei etwa $1100\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$. Mit einer Sonnenstundenzahl von 1100h pro Jahr ergibt sich die Strahlungsleistung \dot{s} zu $1000\text{W}/\text{m}^2$. Siehe [Abbildung 2.20](#) (Seite 33)

Kapitel 4

Ökonomischer Vergleich und Modellierung

Die Wirtschaftlichkeit eines Energiesystems hängt mit vielen verschiedenen Parametern zusammen. Am Beispiel der Wärmepumpe soll dies kurz gezeigt werden. Wählt man ein Wärmepumpensystem, so kann man zwischen Oberflächen-Erdwärme, Tiefen-Erdwärme, Luft oder dem Grundwasser als Wärmequelle wählen. In weiteren Schritten muss geklärt werden, ob ein monovalenter Betrieb möglich ist oder nicht, welche Nutzungsanlage vorliegt, ob man die WP alleinig für die Heizung hernimmt oder auch für die Brauchwassererwärmung, u.v.m. Allein bei Wärmepumpenanlagen gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, die zu unterschiedlichen Investitions- und Betriebskosten führen. Da es aus wissenschaftlicher Sicht aber nicht wirklich sinnvoll ist, alle in der Praxis existierenden Systemvarianten miteinander zu vergleichen, werden hier ausschließlich die vier zuvor dimensionierten Energiesysteme in ihren Standardausführungen weiter betrachtet (+ Photovoltaik). Im Weiteren wird dann mittels Schätzungen überprüft, inwieweit die ökonomischen Ergebnisse auch für andere Systemvarianten Gültigkeit haben. Sollte aber doch eine konkretere Analyse erwünscht sein, so kann diese über die Änderung einiger weniger Parameter mit dem *Calc-Programm* selbst durchgeführt werden. Vor der Wirtschaftlichkeitsanalyse muss neben der Definition einiger ökonomischer Parameter auch die theoretische Grundlage der verwendeten Modellierung geklärt werden. Dies erfolgt im nächsten Abschnitt.

4.1 Verfahren der Investitionsrechnung

Das Grundkonzept der hier anzuwendenden ökonomischen Modellierung bildet die Investitionsrechnung. Neben der Erstinvestition beinhaltet sie auch die jährlichen Betriebs- und Verbrauchskosten und ist somit perfekt geeignet für wirtschaftliche Vergleiche von Energiesystemen. Prinzipiell unterscheidet man bei Wirtschaftsanalysen zwei Methoden. *Statische Verfahren* sind dadurch charakterisiert, dass sie zeitliche Unterschiede eingehender oder ausgehender Zahlungen allenfalls über eine Durchschnittsbetrachtung (fiktive Durchschnittsperiode) berücksichtigen. Das macht sie einerseits zwar einfach handhabbar, andererseits aber auch ungenau und für langfristige Betrachtungen unbrauchbar. Bei den *dynamischen Verfahren* hingegen werden alle Ein- und Auszahlungen während der gesamten Nutzungsdauer exakt in derjenigen Periode erfasst, in der sie anfallen. Durch Abzinsung oder Aufzinsung auf einen einheitlichen Bezugspunkt wird zeitlichen Unterschieden zwischen den einzelnen Zahlungen Rechnung getragen. [15], [62]

Für beide Verfahren gibt es eine Vielzahl an Berechnungsmethoden. Für den ökonomischen Vergleich der einzelnen Anlagen miteinander wird aus Gründen der Genauigkeit

ein dynamisches Verfahren gewählt. Zur Auswahl stehen hier die *Kapitalwertmethode*, die *Kalkulationsrechnung mit internem Zinssatz* und die *Annuitätenmethode*. Die Richtlinie VDI 2067 (*Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen*) nennt für Kostenvergleiche von Energiesystemen die Annuitätenmethode als übliches Verfahren. Sie wird auch in Fachbüchern und vom Gesetzgeber als in diesem Bereich anzuwendendes Berechnungsschema genannt und somit hier verwendet. [15], [62]

4.1.1 Die Annuitätenmethode

Dieser Abschnitt beschreibt die *VDI-Richtlinie 2067*. Aus diesem Grund wird im Weiteren nicht jeder Absatz mit einem Quellenverweis versehen. Nur wenn das Geschriebene von der *VDI 2067* abweicht, wird dies vermerkt.

4.1.1.1 Grundlagen

Bei der Annuitätenmethode wird der **Kapitalwert** einer Investition auf die Nutzungsdauer so verteilt, dass die Zahlungsfolge aus Einzahlungen und Auszahlungen in die sogenannte Annuität umgewandelt wird. Im Gegensatz zum Kapitalwert wird ein Zielwert pro Periode ermittelt. Somit können Erweiterungs- und Ersatzinvestitionen im Sinne der Einkommensmaximierung beurteilt werden. [8]

Die Jahresfestkosten (Annuität A in €/a) ergeben sich nach [Gleichung 4.1](#) zu:

$$A = I_s \cdot a + BK \quad (4.1)$$

wobei a den Annuitätenfaktor darstellt und wie folgt berechnet wird:

$$a = q^T \cdot \frac{q - 1}{q^T - 1} \quad (4.2)$$

Über den jährlichen Systemenergieertrag können dann die Ertragskosten berechnet werden, welche eine erste Effizienzbeurteilung der Anlage erlauben. [8]

$$k = \frac{A}{Q} \quad (4.3)$$

q	Zinsfuß der Sollzinsen [1] ¹
I_s	Systeminvestitionskosten [€]
T	Nutzungsdauer [a]
BK	jährliche Betriebskosten [€]
k	spezifische Energieertragskosten [€/kWh]
Q	Systemenergieertrag [kWh/a]

4.1.1.2 Voraussetzungen

Das für diese Arbeit verwendete Berechnungsverfahren hält sich über weite Strecken an die in der *VDI-Richtlinie 2067* beschriebene Annuitätenmethode für gebäudetechnische Anlagen. Die *VDI 2067* enthält dabei Angaben, mit denen sich selbst der Tausch von

¹Wie bei technisch naturwissenschaftlichen Arbeiten so üblich, werden eckige Klammern sowohl für Literaturverweise, als auch für die Einheitendimensionierung verwendet. Im Anschluß an eine Variablen-deklaration beschreibt die Bezeichnung [1] aber immer die Einheit der Variable und steht nicht für einen Literaturverweis.

Regel-, Steuer- oder Hilfseinrichtungen ökonomisch bewerten ließe. Derartiges Zubehör wird allerdings für alle betrachteten Energiesysteme annähernd gleichermaßen benötigt. Außerdem ist es praktisch unmöglich dessen Preisentwicklung für die nächsten Jahrzehnte vorauszubestimmen und wird daher nicht berücksichtigt. Aus diesen Gründen werden Zubehörteile lediglich in die Erstinvestition eingerechnet und deren Umtausch nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer wird nur für kostenintensive Teile in den Kalkulationen weiter berücksichtigt.

Anhand dieser Einschränkungen sind nun folgende Voraussetzungen zu erfüllen, um realistische Ergebnisse zu erhalten:

- **Bezugszeitraum:** Die Kosten werden auf einen Zeitraum von zwölf Monaten bezogen.
- **Berechnungsdaten:** Die angegebenen Preise und Kosten beziehen sich allesamt auf Anfragen bei Branchenverbänden bzw. Firmen im Jahr 2010, bzw. Anfang 2011.
- **Zukünftige Kosten:** Für zukünftige Kostenanalysen sind Zins- und Preisentwicklungen anzunehmen. Hierfür werden die Änderungsraten der letzten Jahre herangezogen. Prinzipiell könnte man für Investition, Instandhaltung, Personal und Energie unterschiedliche Änderungsraten ansetzen. Da solche Prognosen aber wiederum sehr willkürlich sind, werden neben einer allgemeinen Preissteigerungsrate einzig die jeweiligen Energiepreise mit unterschiedlichen Änderungsraten versehen.

4.1.1.3 Ermittlung der Kosten

Bei der Ermittlung der Kosten werden drei verschiedene Gruppen berücksichtigt. Die vierte Gruppe der *sonstigen Kosten* wie etwa für Versicherungen und Steuern werden nicht beachtet. Die wesentlichen Steuern sind bereits in die anderen Kostengruppen eingerechnet und die Einbindung einer Versicherung macht für die jeweiligen Systeme im Vergleich keinen großen Unterschied. Somit sind nur die folgenden drei Kostengruppen zu unterscheiden:

- Kapitalgebundene Kosten
- Verbrauchsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene Kosten

Kapitalgebundene Auszahlungen: Als Betrachtungszeitraum verwendet man die Nutzungsdauer der jeweiligen Anlagen. Für den Tausch von kapitalintensiven Anlagenkomponenten muss ein entsprechender Restwert ermittelt werden. Die Annuität aus kapitalgebundenen Auszahlungen errechnet sich dann mit [Gleichung 4.4](#) zu:

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_N - R_W) \cdot a + \frac{f_K}{100} \cdot A_0 \cdot ba_{IN} \quad (4.4)$$

$A_{N,K}$	Annuität [€/a]
A_0	Investitionsbetrag [€]
$A_{1,2,\dots,N}$	Barwert der ersten, zweiten, ..., N-ten Ersatzbeschaffung [€]
R_W	Restwert [€]
a	Annuitätsfaktor [1]
f_K	Faktor für die Instandsetzung des Investitionsbetrags im Jahr [%]
ba_{IN}	Preisdynamischer Annuitätsfaktor für Instandsetzungszahlungen [1]

Die Barwerte der Ersatzbeschaffungen ergeben sich aus [Gleichung 4.5](#):

$$A_N = A_0 \cdot \frac{r^{n \cdot T_N}}{q^{n \cdot T_N}} \quad (4.5)$$

Der Restwert wird durch lineare Abschreibung des Investitionsbetrags bis zum Ende des Betrachtungszeitraums und Abzinsung auf dessen Beginn ermittelt:

$$R_W = \underbrace{A_0 \cdot r^{n \cdot T_N}}_a \cdot \underbrace{\frac{(n+1) \cdot T_N - T}{T_N}}_b \cdot \underbrace{\frac{1}{q^T}}_c \quad (4.6)$$

- a. Preis zum Beschaffungszeitpunkt
- b. lineare Abschreibung
- c. Abzinsung auf den Abschaffungszeitpunkt
- T_N Benutzungsdauer der Anlagenkomponenten [a]
- T Betrachtungszeitraum [a]
- r Preisänderungsfaktor [1]
- n Anzahl der Ersatzbeschaffungen [1]

Wenn man davon ausgeht, dass sich bei den laufenden Auszahlungen für die Instandhaltung Preisänderungen ergeben, so sind die Zahlungen mit dem preisdynamischen Annuitätsfaktor zu multiplizieren ([Gleichung 4.7](#)). Der preisdynamische Annuitätsfaktor ba_{IN} errechnet sich, indem die Annuität des Barwertfaktors b ermittelt wird² ([Gleichung 4.8](#)).

$$ba_{IN} = b_{IN} \cdot a \quad (4.7)$$

$$b = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^T}{q - r}, \text{ für } r = q \text{ gilt: } b = \frac{T}{q} \quad (4.8)$$

Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor wären die Kosten für die Wartung der Systeme. Laut Experten und *VDI 2067* sind diese aber bei allen hier betrachteten Anlagen etwa gleich und davon abgesehen auch sehr gering, verglichen mit den anderen Kosten. Auf eine Einrechnung von Wartungskosten wird somit verzichtet.

Verbrauchsgebundene- und betriebsgebundene Auszahlungen: Für diese beiden Kostentypen errechnen sich die Annuitäten über die beiden Gleichungen:

$$A_{N,V} = A_{V1} \cdot ba_V \quad (4.9)$$

$$A_{N,B} = A_{B1} \cdot ba_B \quad (4.10)$$

- $A_{N,V}$ Annuität der verbrauchsgebundenen Zahlungen [1]
- A_{V1} verbrauchsgebundene Zahlungen im ersten Jahr [€]
- ba_V preisdynamischer Annuitätsfaktor für verbrauchsgebundene Zahlungen [1]
- $A_{N,B}$ Annuität der betriebsgebundenen Zahlungen [1]
- A_{B1} betriebsgebundene Zahlungen im ersten Jahr [€]
- ba_B preisdynamischer Annuitätsfaktor für betriebsgebundene Zahlungen [1]

²Für die Instandhaltung ist die Bezeichnung für den Barwertfaktor b_{IN} .

Einzahlungen: Einzahlungen (Erlöse) können betreiberabhängig in gleicher Art wie die zuvor behandelten Kosten entstehen. Dies gilt für kapitalgebundene, verbrauchsgebundene und betriebsgebundene Einzahlungen in gleicher Weise wie für deren äquivalente Auszahlungen. Entsprechend sind die gleichen Formeln zu verwenden, wobei $A_{N,E}$ die Einzahlungsannuität bedeutet.

Annuität der Jahresgesamtzahlungen: Die Gesamtannuität A_N ergibt sich nun aus der Differenz der Einzahlungs- und der Auszahlungsannuitäten zu:

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B}) \quad (4.11)$$

Bei deren Betrachtung sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Anlagen, bei denen durch Verkauf von Wärme oder Strom Gewinn erwirtschaftet werden soll.
2. Anlagen, bei denen keine Einzahlungen auftreten (zB.: Heizungsanlagen in Einfamilienhäusern).

Im ersten Fall muss $A_N > 0$ sein, damit die Anlage als wirtschaftlich betrachtet werden kann. Beim Vergleich mehrerer Anlagen ist diejenige vorzuziehen, für die eine größere Gesamtannuität errechnet wird. Im zweiten Fall ist $A_N < 0$, wobei die günstigste Anlage dann die mit den wenigsten Auszahlungen ist.

Für den Vergleich der Wärmesysteme ist immer der zweite Fall anzuwenden. Dadurch wird bei den Ergebnissen in weiterer Folge auf das Minuszeichen verzichtet und bei jeglichen Berechnungen nur die Beträge der Annuitäten angegeben.

4.1.1.4 Spezifische Probleme der Annuitätenmethode nach VDI 2067

Der Annuitätenmethode nach *VDI 2067* lasten für die hier benötigte ökonomische Vergleichsrechnung drei konkrete Probleme an. Das *erste Problem* ist nicht genereller Natur, sondern bezieht sich im Speziellen auf die für diese Arbeit empirisch erhobenen Daten. Wie in späteren Abschnitten noch genauer erläutert, wurden die Investitionskosten über Angebote von Firmen erhoben, wobei diese bereits immer auch Montage- und Inbetriebnahmekosten beinhalteten. Die Annuitätenberechnung nach *VDI 2067* sieht jedoch vor, die Kosten für Montage- und Inbetriebnahme vom Anschaffungspreis zu trennen und über einen Instandsetzungsfaktor f_K separat zu berücksichtigen. Wärmepumpensysteme haben laut *VDI 2067* ein $f_K = 3\%$, während Gasheizungen und Pelletöfen bei $f_K = 2\%$ liegen³. Nachdem die Angebote einen Gesamtsystempreis darstellen, wurde in den Berechnungen ein $f_K = 0\%$ gewählt, da die Kosten für die Instandsetzung ja bereits integriert sind. Eine Faktoranalyse macht nur dann Sinn, wenn zwei oder auch mehrere verschiedene Angebote direkt miteinander verglichen werden. Sind die Preise jeglicher Komponenten wie Haupteinheit, Pumpen, Leitungen, Dämmungen, Regler etc. bekannt, so gibt die Analyse mit Einbeziehung der verschiedenen f_K 's optimal Auskunft über die Annuitäten der verschiedenen angebotenen Systeme. Nachdem in dieser Arbeit die jeweiligen Angebote aber nicht einzeln berücksichtigt werden, sondern ein Mittelwert für jedes System gebildet wird⁴, erscheint es aussagekräftiger, die tatsächlichen Instandsetzungspreise zu

³Wärmepumpensysteme erfordern neben der Haupteinheit auch immer die Installation von Nebeneinheiten, sei dies die Montage des Außenluftgeräts, die Verlegung der Kollektoranlage oder der Einbau der Erdsonde. → Dies ist einer der Hauptgründe warum der Instandsetzungsfaktor auch höher liegt.

⁴Aus allen eingegangenen Angeboten wurde für die Systeme Luft-WP, Erd-WP, BW-Gassystem, BW-Pelletofen und PV-Anlage jeweils ein repräsentativer Systempreis über eine Mittelwertbildung errechnet.

verwenden, anstatt nur einen Faktor einzurechnen. Denn erstens enthalten nur manche Angebote eine Aufschlüsselung in Material- und Montagekosten, und zweitens variieren diese dann auch noch zu stark um konkrete Berechnungen durchführen zu können. Weiters ist noch zu erwähnen, dass für drei Angebote stichprobenartig eine solche Aufschlüsselung durchgeführt wurde und dies an den Ergebnissen nichts wesentlich geändert hat. Um den Leser aber nicht weiter zu verwirren, wird diese Analyse in der Arbeit nicht konkret beschrieben. Mit dem vorliegenden *Calc-Programm* können die Berechnungen ohnehin leicht selbst überprüft werden.

Das *zweite Problem* ist die rein theoretische Anschauungsweise des Parameters Betrachtungszeitraum. Dieser stellt in der Annuitätenmethode die Grundlage jeglicher zeitlichen Berechnungen dar. Bedenkt man jedoch, dass die Gesamtannuität auch dafür stehen soll, wieviel das betrachtete System unter gegebenem Kreditzinssatz jährlich kostet, so stellt sich folgende Frage: Ist es sinnvoll bei kleinen Energiesystemen eine Kreditlaufzeit in Höhe der Nutzungsdauer zu wählen? Die Nutzungsdauer eines Wärmesystems für ein Niedrigenergiehaus liegt durchaus bei 20 bis 25 Jahren. Niemand der ökonomisch denkt, wird aber solange einen Kredit abzahlen. Dieses Problem schränkt zwar die Vergleichbarkeit der Rechenmethode nicht ein und auch die Verbrauchs- bzw. Betriebsannuitäten stellen einen guten Mittelwert für die jährlich anfallenden Kosten dar. Dennoch ist es ein Anliegen, den ökonomischen Vergleich auch mit Kreditlaufzeiten durchzuführen, die tatsächlich für die Anschaffung solcher Systeme gewählt werden würden.

Das *dritte Problem* der VDI-Methode ist die Tatsache, dass Opportunitätskosten komplett unberücksichtigt bleiben. Hier werden Gesamtannuitäten für jedes System berechnet und diese erst zum Schluss miteinander verglichen. Nun entstehen aber aufgrund unterschiedlicher Kapital-, Betriebs- und Verbrauchskosten auch Opportunitätskosten der Systeme untereinander. Um diese ebenfalls einzubeziehen, wurde das *Calc-Programm* um die im Folgenden als *dynamische Vergleichsrechnung (DV)* bezeichnete Methode erweitert. Außerdem kann der ökonomische Vergleich über folgendes Rechenverfahren mittels Diagrammen anschaulich dargestellt werden, während die Ausgabe der Annuitätenmethode lediglich einen Wert bietet, der rein linear gegen den Endwert nach T Jahren konvergiert.

4.1.2 Dynamische Vergleichsrechnung (DV)

Die *dynamische Vergleichsrechnung (DV)* stellt immer zwei Systeme gegenüber. Es wird zuerst eine Annuität A_{IK} für die Investitionskosten errechnet. Diese Annuität stellt den Betrag dar, der jährlich zurückzuzahlen ist, um die Investitionskosten im Kreditzeitraum zu tilgen. Wichtig dabei ist, dass der Kreditzeitraum T_K unabhängig vom Betrachtungszeitraum T gewählt werden kann. A_{IK} ist wie jede Annuität ein fixer Wert, der sich über die Zeit hinweg nicht ändert. Die Kosten für Betrieb (K_B) und Verbrauch (K_V) werden aber entgegen der Annuitätenmethode nach *VDI 2067* hier in einem Tabellenkalkulationsprogramm jedes Jahr neu berechnet. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Steigerungsraten ändern sich somit die laufenden Gesamtkosten K_{Ges} über die Jahre hinweg.

$$K_{Ges} = T_K \cdot A_{IK} + \sum_{n=1}^T (K_{n,B} + K_{n,V}); A_{IK} = \text{const.} \quad (4.12)$$

Führt man nun jedes Jahr diese Berechnungen für beide betrachtete Systeme S1 und S2 durch, so ergeben sich Jahr für Jahr unterschiedliche Differenzkosten. Die Formel für die jährlich sich ergebenden Differenzkosten K_{Diff} lautet:

$$K_{Diff} = (A_{S1,IK} + K_{S1,B} + K_{S1,V}) - (A_{S2,IK} + K_{S2,B} + K_{S2,V}) \quad (4.13)$$

Diese Differenzkosten stellen aber auch Opportunitätskosten dar. Denn der Differenzbetrag ist quasi die Ersparnis des einen Systems gegenüber dem anderen. Und diese Ersparnis kann natürlich in weiterer Folge ebenso zu einem Habenzinssatz q_H auf einem fiktiven Konto fK veranlagt werden, wie in die Investitionskosten ein Sollzinssatz eingerechnet wird. Die Summe der entgangenen Zinserlöse ZE (Opportunitätskosten OK) und der Differenzkosten der Systeme werden als *Vergleichskosten* VGK bezeichnet.

$$ZE_{T=1} = ZE_1 = (K_{1,Diff} \cdot q_H) - K_{1,Diff} \quad (4.14)$$

$$VGK_{T=1} = VGK_1 = K_{1,Diff} + ZE_1 \quad (4.15)$$

Mit obigen Überlegungen ergeben sich somit in den ersten Jahren folgende Vergleichskosten:

$$VGK_1 = K_{1,Diff} \cdot q_H \quad (4.16)$$

$$VGK_2 = (VGK_1 + K_{2,Diff}) \cdot q_H \quad (4.17)$$

$$VGK_3 = [(K_{1,Diff} \cdot q_H + K_{2,Diff}) \cdot q_H + K_{3,Diff}] \cdot q_H \quad (4.18)$$

$$\Rightarrow VGK_3 = K_{1,Diff} \cdot q_H^3 + K_{2,Diff} \cdot q_H^2 + K_{3,Diff} \cdot q_H \quad (4.19)$$

Summiert man nun jährlich die Differenzkosten auf und verzinst sie neu, so ergeben sich am Ende des Betrachtungszeitraums die gesamten Vergleichskosten VGK . Über die obigen Gleichungen lassen sich diese auch einfach als Summenformel darstellen:

$$\text{Vergleichskosten } VGK_{Ges} = \sum_{n=1}^T K_{n,Diff} \cdot q_H^{T-(n-1)} \quad (4.20)$$

Diese Vergleichskosten stellen nun den preislichen Unterschied der beiden Systeme am Ende des Betrachtungszeitraums dar. Aufgrund der jährlich erneuten Berechnung aller Kosten inklusive Steigerungsraten, lässt sich der Systemvergleich hier auch über zeitliche Verlaufsdiagramme anschaulich darstellen. Was in weiterer Folge die Analyse der Relevanz von unterschiedlichen Kostenanteilen erleichtert.

Es gibt aber auch die Möglichkeit, dass ein System aufgrund unterschiedlicher Steigerungsraten der Rohstoffpreise erst im Laufe der Zeit teurer wird als das andere. In solch einem Fall wechseln die Differenzkosten während des Betrachtungszeitraums das Vorzeichen und es müssen zwei Kostenkurven berechnet werden. Folgendes Beispiel soll diese Problemstellung weiter erläutern:

Beispiel: Nehmen Wir an, es gibt zwei Systeme S1 und S2. System S1 ist billig in der Anschaffung, aber teuer im Betrieb. S2 hingegen hat hohe Investitionskosten, dafür sehr geringe Betriebs- und Verbrauchskosten. Somit hat System S1 also eine viel geringere Kapitalannuität $A_{S1,IK}$ als S2, während es bei den Verbrauchs- und Betriebskosten genau umgekehrt ist. Weiters nehmen Wir an, dass die laufenden Kosten von S1 schneller steigen als die von S2, die Steigerungsrate von S1 also höher ist als die von S2. Weiters kann es vorkommen, dass sich in den ersten Jahren aufgrund der besonders niedrigen Investitionskosten von System 1 auch Vergleichskosten für S1 ergeben. Es gilt also $K_{S1,Ges} < K_{S2,Ges}$, woraus sich $VGK_{S1,T=1} = K_{1,Diff} \cdot q_H$ ergibt. In den nächsten Jahren erhöhen sich die Vergleichskosten von S1 in beschriebener Weise weiter bis der Unterschied in den

Verbrauchs- und Betriebskosten so groß wird, dass diese in Summe eine höhere Gewichtung erlangen als die Investitionskosten und es zu $K_{S1,Ges} > K_{S2,Ges}$ kommt. Ab diesem Zeitpunkt ergeben sich nun Vergleichskosten für das System S2, die sich bis zum Ende der Nutzungsdauer jährlich um die Differenzkosten inklusive Zinssatz steigern. Wichtig ist auch zu erwähnen, dass die Vergleichskosten für S1 zwar nicht mehr um den Differenzbetrag, sehr wohl aber um den Zinssatz erhöht werden. Nachdem in den Vergleichskosten sowohl Investitionskosten als auch Verbrauchs- und Betriebskosten integriert sind, ist am Ende des Betrachtungszeitraums lediglich die Differenz der beiden Vergleichskosten zu bilden, um zu erfahren, welches der Systeme in Summe wirtschaftlicher ist.

$$\text{Systemkostenunterschied nach 25 Jahren} = VGK_{S1,Ges} - VGK_{S2,Ges} \quad (4.21)$$

4.2 Der Muster-Kunde

Spätestens seit der letzten Finanzkrise weiß man, dass das Prinzip des *Homo oeconomicus* in unserem Wirtschaftssystem nur bedingt anwendbar ist. Menschen entscheiden nicht nur nach rationalen Prinzipien, sondern sind auch durch Emotionen oder deren Tagesverfassung geleitet. Ausgegebene Kreditzinssätze und Angebote können je nach Einstellung, Vergangenheit oder emotionaler Stimmungslage der einzelnen Personen variieren. Und auch das Auftreten des Kunden kann oft entscheidend sein und diverse Werte stark beeinflussen.

Neben den irrationalen Parametern spielen aber auch rationale Dinge eine große Rolle. Für das vorliegende Projekt ist das insbesondere beim Umgang mit Firmen bzw. Finanzinstituten der Fall. Bei Letzteren ist dies sehr einfach erklärt. Ein Bankier legt die Höhe der Kreditzinsen anhand der Sicherheiten und des Gehalts des Kunden fest. Ein durchschnittlich verdienender Arbeiter ohne Rücklagen zahlt somit in der Regel einen höheren Zinssatz, als ein wohlhabender Unternehmer der sein Zweithaus baut. Und auch bei Firmen spielen diese Tatsachen eine Rolle. In nahezu jedem Verkaufsgespräch, das im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurde, ist die Frage nach Familien- und Berufsstand gefallen. Und im Interview mit einem Verkaufsleiter hat dieser auch preisgegeben, dass einem wohlhabenden Kunden durchaus qualitativ höhere Produkte mit größerer Gewinnspanne angeboten werden als einem Kunden, der mehr auf seine Finanzen achten muss. Auch wenn beide ein durchschnittlich teures Produkt nachfragen.

Aus diesen Gründen wird für das Projekt eine Art Musterkunde definiert. Neben rationalen Daten wie Familienstand, Herkunft und Beruf wird auch die Länge des Bartes und die Kleidung festgelegt. [Tabelle 4.1](#) zeigt eine genaue Auflistung.

4.2.1 Praktische Vorgehensweise bei der Angebotseinholung

Das letzte Kapitel definierte das Projekt inklusive seiner Energiesysteme. Mit diesen Daten und der Identität des Musterkunden wurden anschließend genaue Preisinformationen für die einzelnen Anlagen nachgefragt. Hierbei wurden neben den Auskünften der Branchenvertretungen auch Angebote bei Firmen eingeholt. Zum einen um etwas Einsicht in die Praxis zu bekommen, zum anderen um konkrete Preisangaben zu erhalten. Außerdem boten manche Angebotstabellen der Firmen eine sehr detaillierte Beschreibung und Preisspezifizierung der einzelnen Komponenten bzw. Montgearbeiten. Zuletzt wurden dann die eingeholten Informationen noch mit Experten der Branche besprochen und auch mit ähnlichen Studien verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die hier verwendeten

Parameter	Wert
Name	Bsc. Stockinger Stefan
Geburtsdatum	30.07.1982
Familiensituation	Einzelkind
Grundausbildung	Technische Höhere Lehranstalt (HTL)
Studium	Umweltökonomie
Beruf	Immobilienverwalter
Gehalt	3.000 € brutto
Familienstand	in Partnerschaft
Kinder	Keine, aber 2 - 3 in Planung
Wohnort	Wien, allerdings mit Eltern in OÖ
Sicherheiten	Elternhaus
Auftreten	Rasiert, rotes Hemd, graubraune Hose, Sneakers

Tabelle 4.1: Daten des Muster-Kunden

Daten für die Investitions-, Betriebs- und Verbrauchskosten mit jenen der Vergleichsstudien sehr gut übereinstimmen. Die verwendeten Vergleichsstudien dafür finden sich unter: [66], [67], [68], [69]

Weiters ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Einholung spezifischer Firmenangebote für das vorliegende Musterhaus sich als mit Abstand schwierigster Teil der Arbeit gestaltete. Zuerst wurde auf ehrliche Weise versucht, Daten für ein wissenschaftliches Projekt zu erhalten. Auf diese Art konnten jedoch lediglich drei Angebote eingeholt werden. Aus diesem Grund wurde hier die Taktik nach monatelangem Warten und Hoffen geändert. Im zweiten Schritt gab sich der Projektverantwortliche als tatsächlicher *Häuslbauer* aus. Mit der Identität des Musterkunden konnten dann auch echte Angebote eingeholt werden. Außerdem wurden zahlreiche Verkaufsgespräche geführt und Musterhäuser besucht. Und obwohl am Ende doch noch sehr viele praktische Einblicke gewährt wurden, sei an dieser Stelle angemerkt, dass es der Autor sehr bedenklich findet, eine Scheinidentität annehmen zu müssen, um an Daten zu kommen, die für eine wissenschaftliche Arbeit benötigt werden.

4.3 Kostenaufteilung der einzelnen Systeme

Wie bereits zuvor erklärt, gestaltete sich das Einholen exakter Preise für die jeweiligen Anlagensysteme als außerordentlich schwierig. Dennoch konnten durch die Angaben der Branchenvertretungen und Firmenangebote, sowie über die Aussagen von Facharbeitern, relativ genaue Preisangaben gemacht werden. Diese wurden anschließend gemittelt, um sie weiters für die Modellierung verwenden zu können.

Branchenvertretungen: Bei den Branchenvertretungen war es lediglich möglich telefonische Auskünfte zu erhalten, wovon wiederum nur drei zu gebrauchen waren.

1. *Österreichischer Biomasse-Verband:* Der Biomasseverband verwies auf einen im Oktober 2010 durchgeführten Heizkostenvergleich nach *VDI 2067*, worin die Fernwärme mit Erdgas-, Heizöl- und Pelletöfen verglichen wurde. Da die Berechnungen aber für einen Leistungsbedarf von 160kW durchgeführt wurden, konnten die Preisangaben für diese Arbeit nicht verwendet werden. Allerdings half die genaue Angabe der Hilfsenergiekosten im Vergleich zu den Jahresarbeitskosten bei der Spezifizierung der Mehrbedarfsfaktoren. [66], [63]

2. *Bundesverband Wärmepumpe Austria*: Der Wärmepumpenverband verwies auf die Internetseite <http://www.klima-innovativ.de>. Dort wurde ein im Jänner 2011 durchgeführter Heizkosten- und Investitionsvergleich für Einfamilienhäuser ausgestellt. Da es sich beim betrachteten Objekt aber nicht um ein Niedrigenergiehaus handelte, konnten auch diese Werte nur eingeschränkt für die anschließenden Berechnungen verwendet werden. [68], [64]
3. *Photovoltaic Austria Federal Association*: Die Interessensvertretung der österreichischen Photovoltaikindustrie konnte keine genauen Preisangaben machen, half aber bei der Spezifizierung des Eigenbedarfsfaktors $f_{E,PV}$ im Netzparallelbetrieb. Mehr dazu später in Abschnitt 4.5.6. [65]

Firmenangebote: Abgesehen von drei Unternehmen wurde, wie bereits erwähnt, niemand in die Tatsache eingeweiht, dass es sich bei den eingeholten Angeboten um eine Datenerhebung zum Zwecke einer wissenschaftlichen Arbeit handelte. Somit sollen die beteiligten Unternehmen hier auch anonym bleiben und sind namentlich nicht vermerkt. [Tabelle 4.2](#) zeigt die Angebotspreise der einzelnen Firmen.

Firma ⁵	Luft-WP	Erd-WP	BW-Gassystem	BW-Pelletofen	PV-Anlage
W1/E1	13.207 €		7.131 €	14.359 €	17.254 €
W2		16.055 €		15.456 €	
W3	16.230 €		7.570 €		
W4				14.501 €	
W5	14.437 €	15.124 €			
W6	14.020 €		6.980 €		
W7		15.452 €			
E2					17.972 €
E3					18.735 €

Tabelle 4.2: Angebotspreise der einzelnen Firmen

Bei der PV-Anlage sind die Preise exklusive Wechselrichter gegeben, da dieser nach etwa 13 Jahren ausgewechselt werden muss und somit eine zu berücksichtigende Ersatzbeschaffung darstellt. Für die Wärmequellenanlage sind die Gesamtpreise inklusive aller Hilfseinrichtungen wie Pump-, Speicher-, Mess- und Regelgeräte gegeben. Weiters inbegriffen sind alle vom Heizungs- bzw. Elektroinstallateur durchzuführenden Montagearbeiten. Preislich relevante Zusatzarbeiten wie der Aushub für den Erdkollektor, Kaminarbeiten oder das Erstellen eines Gasanschlusses wurden separat ermittelt:

- Grabarbeiten und Sandhinterfüllung (Erdkollektor): ca. 2.500 €
- Kaminkosten für eine dachseitig ausgeführte Gasheizung: ca. 1.000 €
- Kosten für den Gasanschluss inklusive Gaszähler & Zubehör: ca. 1.500 €
- Kaminkosten für einen Pelletofen: ca. 2.500 €

⁵W steht für Heizungsinstallateure bzw. Firmen, die Wärmesysteme anbieten. E steht für Elektroinstallationsunternehmen.

- Zusatzkosten für Pelletlagerraum: max. 500 € (Das hier betrachtete Niedrigenergiehaus benötigt aufgrund der niedrigen Heizleistung nur einen sehr kleinen Pelletlagerraum, sodass kaum Zusatzkosten dadurch anfallen ⁶.)
- PV-Wechselrichterpreis: ca. 1.400 €

Inklusive aller Zusatzkosten und auf die Hunderterstelle gerundet, ergeben sich die in [Tabelle 4.3](#) angeführten Investitionskosten für die einzelnen Systeme:

Luft-WP	Erd-WP	BW-Gassystem	BW-Pelletofen	PV-Anlage
14.500 €	15.500 €	7.200 €	14.800 €	18.000 €
	2.500 €	2.500 €	3.000 €	1.400 €
14.500 €	18.000 €	9.700 €	17.800 €	19.400 €

Tabelle 4.3: Investitionskosten der einzelnen Systeme

Expertengespräche: Die berechneten Investitionskosten wurden anschließend mit führenden Angestellten verschiedener Firmen besprochen und auf dessen Repräsentativität geprüft. Laut ihren Angaben gibt es in Oberösterreich im Bereich Heizungsanlagen als auch im Elektrizitätsgewerbe eine große Konkurrenz. Der Markt ist dicht mit Firmen besiedelt und es ist kaum möglich, die Produkt- bzw. Installationspreise großartig zu variieren. Lediglich im sogenannten *High-Quality-Sektor* sind die Preisspannen etwas größer. Da sich die Angebote aber auf Standardprodukte beziehen, können sie als durchaus repräsentativ erachtet werden, so die Aussagen der Experten ⁷.

- Experte EW1: Hr. Nagel, Firma Voltarix GmbH (4481 Asten), Spezialist für Wärmepumpensysteme
- Experte EW2: Hr. Ing. Altmüller, Xolar Altmüller GmbH & Co KG (4501 Neuhofer), Spezialist für Wärmesysteme aller Art
- Experte EW3: Hr. Stelzer, Firma M-TEC Mittermayr (4122 Arnreit), Spezialist für Wärmepumpensysteme
- Experte EW4: Hr. Dipl. Ing. Rödhammer, Firma AMiP - Industrial Engineering GmbH (2372 Gießhübl), Spezialist für Energiesysteme und Energiewirtschaft
- Experte EW5a: ... möchte anonym bleiben ...
- Experte EE1: Hr. Dipl. Ing. Stockinger, E-TEC Stockinger GmbH (4481 Asten), Spezialist für den Elektrizitätsmarkt
- Experte EE2: Hr. Steinecker, E-TEC Stockinger GmbH (4481 Asten), Spezialist für Photovoltaik
- Experte EE3a: ... möchte anonym bleiben ...
- Experte EF1a, EF2a: ... möchten anonym bleiben ...

⁶Viele Hersteller bieten für kleine Heizleistungen bereits fertige Silos an, die nur mehr neben den Pelletofen gestellt werden müssen. Die einzige bauliche Veränderung am Haus stellt dann eine Öffnung für die Rohstoffzufuhr dar.

⁷EW steht für *Experte - Wärmemarkt*; EE steht für *Experte - Elektrizitätsmarkt*; EF steht für *Experte - Finanzmarkt*; a steht für *anonym*.

4.4 Förderungsmodalitäten von Oberösterreich

In Österreich sind die Förderungen zur Nutzung erneuerbarer Energien von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich geregelt. Nachdem sich das fiktive Projekt in Oberösterreich befindet, sollen auch die Förderstrukturen dieser Region aufgelistet werden. Die genauen Modalitäten sind auf <http://www.land-oberoesterreich.gv.at> nachzulesen [58]:

Wärmeerzeuger	Förderhöhe	Anforderungen ⁸
Wärmepumpe (W/S), JAZ > 4	1.000 €	1. PV mit mindestens 1 kW _{peak}
Luftwärmepumpe, JAZ > 3,5	1.000 €	2. Solarthermie mit 4 m ² für WW
Wärmepumpe (W/S), JAZ > 4,5	1.700 €	3. Strom zu 100 % aus EEs
Pelletsheizung	1.700 €	- Biomasse als einzige Heizquelle

Tabelle 4.4: Förderungen des Landes Oberösterreich [58]

Wärmepumpe: Neben dem Investitionskostenzuschuss gibt es für Wärmepumpen bei den meisten Energieversorgungsunternehmen zusätzlich noch einen geförderten Stromtarif. Hierfür muss die Wärmepumpe an einen eigenen Zähler angeschlossen werden. Außerdem sind Sperrzeiten definiert, in denen der WP keine Elektrizität zur Verfügung gestellt wird. Für das Projekt wurden die Daten des oberösterreichischen Versorgers *Energie AG* herangezogen. Sie bietet einen WP-Spartarif mit einer Sperrzeit zwischen 11:00 und 12:00 und separate Tarife für Tag und Nacht ⁹. Für die Modellierung wird hier der Tag- und Nachttarif gemittelt zu 12,5 cent/kWh. [59]

Solarthermie: Solarthermische Anlagen für die Warmwasserbereitung oder als Übergangsheizung erhalten 1.100 € als Sockelbetrag und 75 € je m² Standard-Kollektorfläche. Vakuum-Kollektoren werden mit 110 €/m² gefördert. Dabei muss weiters eine Mindestkollektorfläche von 4m² bei Standardtypen bzw. 3m² bei Vakuum-Kollektoren eingehalten werden. Der maximale Förderbetrag ist mit 3.000 € begrenzt. [58]

Photovoltaik: Die österreichische *Ökostromverordnung 2010* sieht für netzverbundene Photovoltaik-Dachanlagen folgende Fördersysteme vor. Bis zu einer Leistung von 5kW_{peak} gibt es einen Investitionszuschuss von 1.700 €/kW, unter der Voraussetzung, dass keine Tarifförderung in Anspruch genommen wird. Für Anlagen größer 5kW_{peak} entfällt die Investitionsförderung. Der eingespeiste Strom wird dann 13 Jahre lang mit 38 cent/kWh gefördert. Die in diesem Projekt verwendete PV-Anlage hat eine Leistung von 5kW_{peak}. Beim ökonomischen Vergleich können hier also beide Fördermodelle optimal gegenübergestellt werden. [60], [61]

⁸Bei den Wärmepumpensystemen ist natürlich nur eine der drei aufgelisteten Anforderungen zu erfüllen.

⁹Nachdem es sich um eine Sperrzeit von lediglich einer Stunde handelt, wurde diese in den Berechnungen nicht weiter berücksichtigt, da sie im vorliegenden Fall nur die Speichergröße beeinflussen würde. Und diese ist mit 300l so oder so ausreichend.

4.5 Festlegung der Preise, Steigerungsraten & Faktoren

Im Folgenden werden die Preissteigerungsraten für Elektrizität, Gas und Pellets festgelegt. [Abbildung 4.1](#)¹⁰ zeigt die Schwankungen der Energiepreise in den letzten Jahrzehnten. Ereignisse wie die beiden Ölpreisschocks der 1970er Jahre oder auch die aktuelle Wirtschaftskrise hatten bzw. haben sehr starken Einfluss auf die Verbraucherpreise und machen eine Prognose für die Zukunft äußerst schwierig. Es sei also an dieser Stelle angemerkt, dass die folgenden Annahmen den wahrscheinlich größten Unsicherheitsfaktor dieser Arbeit darstellen. Denn zukünftige Preissteigerungen korrelieren unter anderem mit technischen, ökonomischen als auch politischen Parametern.

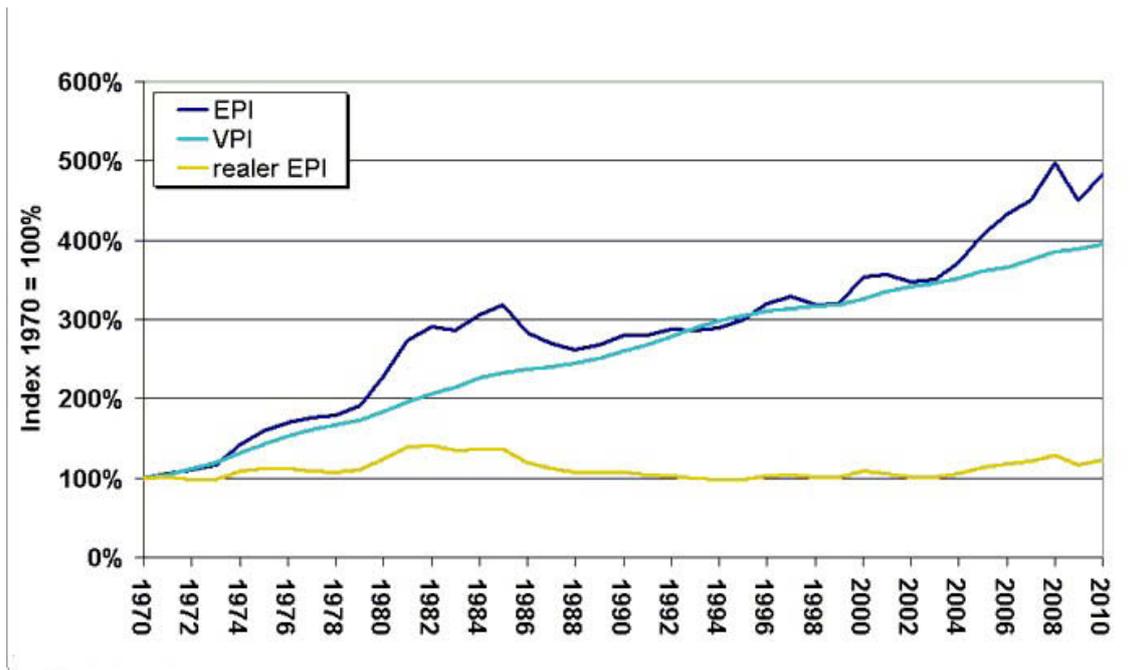


Abbildung 4.1: Entwicklung der Energiepreise (Haushaltsenergie), 1970 - 2010 [70]

Ehe konkrete Steigerungsraten ermittelt werden können, muss geklärt werden, welches Bezugsjahr als Basis für die Berechnungen heranzuziehen ist. Über den **Verbraucherpreisindex VPI** stehen nun verschiedene Basisjahre zur Auswahl. Ein langer Bezugszeitraum berücksichtigt langfristige Trends, lässt allerdings neuere Marktentwicklungen eher unbeachtet. Ein spätes Bezugsjahr hingegen gibt genauere Auskunft über die aktuelle Wirtschaftslage, ist aber für Zukunftsprognosen nur bedingt geeignet. Da die Steigerungsraten mitunter zu den wichtigsten Parametern der ökonomischen Analyse gehören, wurden die Berechnungen unter Berücksichtigung vieler verschiedener Betrachtungszeiträume durchgeführt und erst anschließend in Abstimmung mit Experten das am besten geeignete Bezugsjahr gewählt. Folgende Überlegungen waren dabei für die Entscheidungsfindung ausschlaggebend:

- *VPI 86*: Da für die ökonomische Analyse ein zukünftiger Betrachtungszeitraum von 25 Jahren gewählt wird, macht es prinzipiell auch Sinn die Änderungsraten der letzten 25 Jahre als Bezugsgröße herzunehmen. Der *VPI 86* berücksichtigt die Preisentwicklungen der letzten 24 Jahre und wäre somit optimal geeignet für die Berechnungen. Jedoch hat sich der Energiemarkt in den letzten Jahrzehnten stark verändert und alle befragten Experten schätzen die Steigerungsraten der Zukunft weit höher ein als die über den *VPI 86* berechneten Werte.

¹⁰EPI - Energiepreisindex, VPI - Verbraucherpreisindex, realer EPI - EPI inflationsbereinigt

- *VPI 2000*: Eine weitere Möglichkeit wäre es den *VPI 2000* zu verwenden. Allerdings weisen vor allem fossile Energieträger zuletzt hohe Preissteigerungen auf und es ist schwierig abzuschätzen, ob sich derartig hohe Raten auch in Zukunft fortsetzen. Obwohl die meisten der befragten Experten die über den *VPI 2000* berechneten Steigerungsraten als plausibel erachten, wurde dieser nicht als Basis gewählt, da damit die relativen Preissteigerungen der nächsten Jahrzehnte wahrscheinlich als zu hoch angenommen werden.
- *VPI 96*: Der *VPI 96* stellt mit einem Betrachtungszeitraum von 14 Jahren den Mittelweg aus den beiden oben genannten Datensätzen dar. Hier werden die teilweise sogar nominal sinkenden Energiepreise der späten 1980er Jahre nicht berücksichtigt und auch die hohen Steigerungsraten des letzten Jahrzehnts sind nicht überrepräsentiert. Somit scheint dies der für die ökonomische Analyse am besten geeignete Index zu sein.

Für die weiteren Berechnungen wird somit 1996 als Bezugsjahr gewählt. Die Daten des *VPI 86* und des *VPI 2000* werden aber dennoch angegeben, um einen anschaulichen Vergleich der unterschiedlichen Werte bereitzustellen.

4.5.1 Inflation

[Tabelle 4.5](#) zeigt die Entwicklung verschiedener Verbraucherpreisindizes. Beim *VPI 96* ist der Index seit dem Basisjahr auf 127,4 angestiegen, was eine mittlere Preissteigerungsrate (Inflationsrate) von $i = 1,75\%$ ergibt. [72]

$$\text{Inflation } I = \left(\frac{VPI_n}{VPI_{Basis}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{127,4}{100} \right)^{\frac{1}{14}} = \left(\frac{166,6}{130,8} \right)^{\frac{1}{14}} = 1,01745 \quad (4.22)$$

Jahr	1986	1990	1996	2000	2005	2010
VPI 96			100	105,2	116,4	127,4
VPI 86	100	109,5	130,8	137,6	152,2	166,6
VPI 2000				100	110,6	121,1

Tabelle 4.5: VPI 96, VPI 86 und VPI 2000 [72]

4.5.2 Strompreis und Gaspreis

Die Preisänderungen für die Energieträger Strom und Gas wurden der Homepage der *österreichischen Energieagentur* (www.energyagency.at) entnommen. In [Tabelle 4.6](#) sind die Veränderungen der einzelnen Komponenten des im *VPI* enthaltenen Energiepreisindexes *EPI* seit 1986 abgebildet. Interessant ist dabei vor allem die Entwicklung des Gaspreises. Im Gegensatz zur Elektrizität ist der Gaspreis nach dem Jahr 1986 stark zurückgegangen und auch während der 1990er auf vergleichsweise niedrigem Niveau geblieben. Erst vor etwa zehn Jahren kam es zur rasanten Steigerung der Preise. Aus den Tabellendaten errechnen sich auf Basis der letzten 14 Jahre nun wiederum die Werte für die mittleren Steigerungsraten r für Strom zu $r_{S,n} = 1,88\%$ und für Gas zu $r_{G,n} = 3,38\%$ ¹¹. [71]

$$\text{Indexsteigerung } IS_{Strom} = \left(\frac{143,9}{110,9} \right)^{\frac{1}{14}} = 1,01878 \quad (4.23)$$

¹¹ $r_{S,n}$ und $r_{G,n}$ bedeuten *nominale Strom- und Gaspreis-Steigerungsrate*.

Jahr	1986	1990	1996	2000	2005	2010
Strom	100	98,7	110,9	112,3	119	143,9
Gas	100	80,8	90,9	95,9	120,1	144,8

Tabelle 4.6: Preisindizes von Strom und Gas [71]

$$\text{Indexsteigerung } IS_{\text{Gas}} = \left(\frac{144,8}{90,9} \right)^{\frac{1}{14}} = 1,03382 \quad (4.24)$$

Die für die Analyse verwendeten Strom- und Gaspreise wurden dem Tarifikkulator der österreichischen Homepage www.e-control.at entnommen. Zeitpunkt der Abfrage war der 16. Februar 2011.

Laut Tarifikkulator ist der billigste Anbieter für Erdgas im Bereich Bad Hall die *Linz Gas Vertrieb GmbH & CoKG* mit einem Gesamtpreis von 7,55 cent/kWh. Für den allgemeinen Strompreis wurde das österreichische Unternehmen *Verbund* herangezogen. Für den Standort 4540 Pfarrkirchen ist es unter allen atomstromfreien Anbietern am günstigsten. Der Preis für eine Kilowattstunde beträgt hier 19,15 cent. Der günstigste Öko-Stromtarif mit Einspeisung zu 100% aus erneuerbaren Energieträgern ist jener der Firma *oekostrom Vertriebs GmbH* und beläuft sich auf 19,6 cent/kWh. Der Tarif für eine nicht geförderte Einspeisung einer Photovoltaikanlage beträgt beim *Verbund* 10 cent/kWh, der geförderte Tarif 38 cent/kWh. Der Wärmepumpen-Stromtarif wurde, wie bereits in Abschnitt 4.4 angegeben, beim Unternehmen *Energie AG* gewählt und beträgt 12,5 cent/kWh. [73]

4.5.3 Pelletpreis

Da die Pellettechnologie eine vergleichsweise junge Technologie ist, sind auch die Pelletpreise noch nicht sehr lange verfügbar. Ein von der Interessensvertretung *proPellets Austria* berechneter Preisindex existiert erst seit 2006 (*PPI 06*).

Die Pelletpreise sind im letzten Jahrzehnt sehr stark geschwankt, wie auch die in [Tabelle 4.7](#) dargestellte Preisliste der Firma *RZ Pellets GmbH* zeigt. Laut dieser Liste errechnet sich eine 10Jahres-Steigerungsrate zu 1,43%, während man mit dem *PPI 06* einen Wert von 3,64% erhält. Aufgrund dieser doch erheblichen Schwankungen und vor allem wegen der Tatsache, dass alle anderen Werte über einen Bezugszeitraum von 14 Jahren betrachtet wurden, wurde für die Steigerungsrate des Pelletpreises der im *EPI* enthaltene Index für Brennholz herangezogen. Dieser zeigt im Gegensatz zu den anderen beiden Datensätzen eine kontinuierlichere Steigerungskennlinie und ist somit für Zukunftsprognosen besser geeignet. Mit einem Anfangswert von 105 und einem Endwert von 144,5 ergibt sich für Holzpellets somit ein $r_{H,n}$ von 2,31%, was in etwa in der Mitte zwischen den oben berechneten Steigerungsraten liegt ¹². Die Preiserhebung laut *proPellets Austria* ergab im Februar 2011 einen Durchschnittspreis von 4,71 cent/kWh. [71], [74]

Jahr	2000	2002	2004	2006	2007	2008	2009	2010
RZ Preis (€/t)	178,05	207,12	193	180	261	192	200	205,17
PPI 06				100	146,52	107,72	112,51	115,4

Tabelle 4.7: PPI 06, Preisliste der Firma *RZ Pellets GmbH* [74], [79]

¹²Der Mittelwert aus der 10Jahres-Steigerungsrate und der 4Jahres-Steigerungsrate beträgt 2,54% und ist dem gewählten Wert somit sehr nahe.

4.5.4 Inflationsbereinigung

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Steigerungsraten sind allesamt nominal. Um sie für die ökonomischen Zukunftsbetrachtungen heranziehen zu können, werden sie nun mittels der Inflationsrate in reale Werte umgerechnet. Die Analyse könnte natürlich auch nominal durchgeführt werden, denn an den Verhältnissen der verschiedenen Systeme zueinander würde sich dabei ja nichts ändern. Eine Betrachtung mit realen Werten hat aber den Vorteil, dass zukünftige Preisunterschiede und Kosten dem heutigen Preisniveau entsprechen. Wenn also beispielsweise bei zwei Systemen nach 25 Jahren ein Kostenunterschied von 1.000 € berechnet wird, so entsprechen diese 1.000 € dem heutigen Wert des Geldes ¹³. [80]

Folgende Formeln zeigen das Umrechnungsprinzip anhand des Strompreises. Die daran anschließende [Tabelle 4.8](#) gibt eine Auflistung aller realen Steigerungsraten:

$$\text{reale Steigerungsrate Strom } r_S = \left(\frac{IS_{Strom}}{I} - 1 \right) \cdot 100 \quad (4.25)$$

$$\text{reale Steigerungsrate Strom } r_S = \left(\frac{1,01878}{1,01745} - 1 \right) \cdot 100 = 0,13 \%$$

Energieträger	aktueller Preis/Tarif	mittlere Steigerungsrate (real)
VPI	/	1,75 %
Strom	19,15 cent/kWh	0,13 %
Strom EE	19,6 cent/kWh	0,13 %
Strom WP	12,5 cent/kWh	0,13 %
Strom PV gefördert	38 cent/kWh (13J)	/
Strom PV	10 cent/kWh	/
Gas	7,55 cent/kWh	1,61 %
Pellets	4,71 cent/kWh	0,56 %

Tabelle 4.8: Ökonomische Daten der Energieträger

4.5.5 Zinssätze

Soll- und Habenzinssatz wurden anhand vergleichbarer Studien in Abstimmung mit den Expertenauskünften der Banken abgeklärt. Dabei ist als Kreditzinssatz ein Wert von 6% üblich, während für den Habenzinssatz hier eine risikoarme Variante mit 2,5% gewählt wird. Spargbücher haben etwas niedrigere Zinssätze, während beispielsweise Staatsanleihen meist etwas darüber liegen. Die gewählten 2,5% stellen also einen repräsentativen Mittelwert dar. Inflationsbereinigt bekommt man einen Sollzinssatz von 4,18% und einen Habenzinssatz von 0,74%.

WICHTIG: Bei der Bestimmung der kapitalgebundenen Annuität wird zur Berechnung von ba_{iN} für die Variable r in [Gleichung 4.8](#) (Seite 58) der Preisänderungsfaktor und für q der Sollzinsfuß eingesetzt. Somit wäre der Nominalzins und nicht der Realzins zu verwenden. Wie in [Abschnitt 4.1.1.4](#) beschrieben, wird aber aufgrund der hier vorliegenden Angebote der Instandsetzungsfaktor zu null gewählt ($f_K = 0\%$). Der Einfluss

¹³Bei nominaler Berechnung würde ein Unterschied von 1000 € nach 25 Jahren dem heutigen Wert von $1000/(1,0175)^{25} = 648,1$ € entsprechen. Vor allem die Fachmänner aus der Praxis hielten eine sofortige Berechnung mit realen Werten aber für anschaulicher und zweckmäßiger, was die Wahl der inflationsbereinigten Analysevariante zusätzlich bestätigte.

von ba_{IN} verschwindet somit und es können die Realwerte für die gesamte Modellierung verwendet werden, ohne zusätzliche Variablen bzw. Formeln zu definieren.

Die Unterscheidung zwischen Nominal- und Realzins wäre auch beim Restwert R_W von Ersatzbeschaffungen zu beachten. Bei den Wärmesystemen gibt es keine Ersatzbeschaffungen beim ökonomischen Vergleich. Bei der PV-Anlage hingegen wurde die Erneuerung des Wechselrichters in den *Calc-Berechnungen* berücksichtigt und der Unterschied zwischen Realzins und Nominalzins entsprechend implementiert.

4.5.6 Eigenbedarfsfaktor der PV

Der Eigenbedarfsfaktor $f_{E,PV}$ beschreibt das Verhältnis von selbst verbrauchter Energie zu eingespeister Energie der PV im Netzparallelbetrieb. Dieses Verhältnis hängt natürlich stark von der Größe des Haushaltes und auch der peak-Leistung der Photovoltaikanlage ab. Für ein Standard-Einfamilienhaus finden sich in der Literatur Werte zwischen 30 und 50%. Expertenauskünften zufolge ist eine Bandbreite von 20 bis 50% anzunehmen, da dieser Faktor starken haushaltsabhängigen Schwankungen unterworfen ist. Hier wird im Weiteren mit $f_{E,PV} = 0,35$ gerechnet, was bedeutet, dass von der jährlich eingespeisten Energie von 5500kWh/a etwa 1925kWh/a vom Haushalt selbst benutzt werden. Der Rest wird ins Netz weitergeleitet. [77], [78], [65]

4.6 Vergleich der Wärmesysteme

Nachdem alle notwendigen Parameter festgelegt sind, kann mit dem ökonomischen Vergleich begonnen werden. Die Modellierung der Wärmesysteme behandelt dabei zwei Varianten. *Variante 1 (VAR1)* bezieht sich auf die *VDI 2067* und berechnet für jede Anlage eine jährliche Annuität bei einer Laufzeit von 25 Jahren. Anhand dieser kann anschließend das ökonomisch sinnvollste System bestimmt werden. *Variante 2 (VAR2)* bedient sich der *dynamischen Vergleichsrechnung* und stellt immer zwei Energiesysteme gegenüber. Dabei können neben einer anschaulichen Darstellung der Kostenverläufe auch die Opportunitätskosten miteinbezogen werden. Weiters wird in *Variante 2* eine vom Betrachtungszeitraum unterschiedliche Kreditlaufzeit angenommen. Übliche Rückzahlungszeiträume für Kredite im Haustechniksektor liegen laut Bankexperten zwischen 5 und 15 Jahren. Für die Arbeit wird ein Wert von zehn Jahren gewählt.

Die [Tabelle 4.9](#) zeigt nochmals eine Gesamtübersicht aller für den Vergleich der Wärmesysteme relevanten Daten.

In den meisten Bundesländern Österreichs werden die Investitionszuschüsse für die Errichtung erneuerbarer Energieanlagen nur unter bestimmten Voraussetzungen gewährt. Diese Voraussetzungen sind oft an ökonomische Zusatzausgaben gebunden, wie [Tabelle 4.4](#) (Seite 66) für Wärmepumpenanlagen in Oberösterreich deutlich zeigt. Auch ein eigener Stromtarif für Wärmepumpen ist nicht gesetzlich vorgeschrieben und hängt somit alleinig vom jeweiligen Energieversorger ab. Zusätzlich ist es auch schwer abzuschätzen, wie lange derartige Spezialtarife noch gewährt werden. Aus diesen Gründen sollen die weiteren Berechnungen ohne Rücksicht auf jegliche Förderungsmodalitäten durchgeführt werden. Erst zum Schluss des jeweiligen Abschnitts wird zusätzlich noch auf die ökonomische Performance inklusive finanzieller Unterstützungsleistungen eingegangen.

Leistungsbedarf Heizung	4500 W
Heizwärmebedarf	8000 kWh/a
Leistungsbedarf Warmwasser	2000 W
Wärmebedarf - Warmwasser	3500 kWh/a
Erdkollektor - WP	Type \approx 7 kW
JAZ - Heizen	4,6
JAZ - Warmwasser	4,0
Mehrbedarfsfaktor	$f_{MB} = 1,03$
Energiebedarf	2692 kWh/a
Luft - WP	Type \approx 8 kW
JAZ - Heizen	3,6
JAZ - Warmwasser	3,8
Mehrbedarfsfaktor	$f_{MB} = 1,10$
Energiebedarf	3457 kWh/a
BW - Gasterme	Type \approx 15 kW
Wirkungsgrad	$\eta = 95 \%$
Mehrbedarfsfaktor	$f_{MB} = 1,03$
Energiebedarf - Verbrauch	12105 kWh/a
Energiebedarf - Betrieb	363 kWh/a
BW - Pelletofen	Type \approx 8 kW
Wirkungsgrad	$\eta = 86 \%$
Mehrbedarfsfaktor	$f_{MB} = 1,04$
Energiebedarf - Verbrauch	13372 kWh/a
Energiebedarf - Betrieb	534 kWh/a
Erdkollektor - WP	18.000 €
Luft - WP	14.500 €
BW - Gasterme	9.700 €
BW - Pelletofen	17.800 €
Gaspreis	7,55 cent/kWh
Steigerungsrate - Gas	1,61 %/a
Strompreis	19,15 cent/kWh
<i>Strompreis - WP</i>	<i>12,5 cent/kWh</i>
Steigerungsrate - Strom	0,13 %/a
Pelletpreis	4,71 cent/kWh
Steigerungsrate - Pellets	0,56 %/a
Sollzinssatz	4,18 %
Habenzinssatz	0,74 %
Inflation	1,75 %
Betrachtungszeitraum	25 Jahre
Kreditlaufzeit <i>VAR1</i>	25 Jahre
Kreditlaufzeit <i>VAR2</i>	10 Jahre

Tabelle 4.9: Daten für die Modellierung der Wärmesysteme

4.6.1 Modellierung

Modelliert werden die Vergleiche, wie schon erwähnt, in einem *Calc-Programm*. Die Berechnungen darin sind exakt anhand den zuvor beschriebenen Theorien implementiert. Die genaue Programmierung und das Interface des Programms sollen hier aber nicht dargestellt werden. Eine Übersicht über einzelne Programmteile ist zum Schluss im Anhang angegeben.

4.6.2 Wärmesystemvergleich nach VDI 2067 (Variante 1)

4.6.2.1 Systemvergleich nach Variante 1 ohne Förderungen

Die Berechnung der jährlichen Annuitäten nach *VDI 2067* ergibt die in [Tabelle 4.10](#) dargestellten Ergebnisse. Das Luft-Wärmepumpensystem schneidet aufgrund der niedrigen jährlichen Verbrauchskosten (*VK*) und Betriebskosten (*BK*) am besten ab. Dahinter folgt die Erdkollektor-Wärmepumpe, die trotz der hohen Investitionskosten (*IK*) im Gesamtvergleich noch vor dem Gasthermensystem liegt. Die großen jährlichen Verbrauchsausgaben und die vergleichsweise stark steigenden Gaspreise machen den Vorteil der geringen Investitionen der Gastherme über 25 Jahre betrachtet weg. Nur die Pelletheizung ist noch teurer als die fossile Heizungsanlage.

Bezüglich der jährlichen Verbrauchs- und Betriebskosten liegt die Gastherme weit hinter den anderen drei Systemen. Hier ist die Erdkollektor-WP mit Abstand die billigste Anlage.

	Luft - WPS	Erd - WPS	GTS	HPS
Annuität - Kapital	946 €	1.174 €	633 €	1.161 €
Annuität - VK&BK	671 €	522 €	1.148 €	770 €
Gesamtannuität	1.617 €	1.696 €	1.781 €	1.931 €
Kosten nach 25 Jahren	40.425 €	42.400 €	44.525 €	48.275 €

Tabelle 4.10: Systemvergleich nach VAR1

4.6.2.2 Systemvergleich nach Variante 1 inklusive Förderungen

Dieser Abschnitt zeigt die Ergebnisse der Berechnungen nach *Variante 1* inklusive aller Förderungen, die nicht an ökonomische Zusatzausgaben hinsichtlich der Erstinvestition gebunden sind. Für Oberösterreich bedeutet das, dass für Wärmepumpen mit 12,5 cent/kWh ein spezieller Stromtarif verwendet werden kann. Bei der Pelletheizung wird ein Investitionszuschuss von 1.700 € miteinkalkuliert. Die Ergebnisse sind in [Tabelle 4.11](#) dargestellt.

	Luft - WPS	Erd - WPS	GTS	HPS
Annuität - Kapital	946 €	1.174 €	633 €	1.050 €
Annuität - VK&BK	438 €	341 €	1.148 €	770 €
Gesamtannuität	1.384 €	1.515 €	1.781 €	1.820 €
Kosten nach 25 Jahren	34.600 €	37.875 €	44.525 €	45.500 €

Tabelle 4.11: Systemvergleich nach VAR1 inklusive Förderungen

Die Wärmepumpensysteme schneiden aufgrund des stark geförderten Stromtarifs hier nochmal besser ab als im Abschnitt zuvor. Die Luft-Wärmepumpe ist mit jährlichen Gesamtkosten von 1.384 € das mit Abstand billigste System, dicht gefolgt von der Erdkollektoranlage mit einer Annuität von 1.515 € im Jahr. Dann gibt es einen beträchtlichen

Kostensprung zu den beiden anderen Systemen *GTS* und *HPS*. Deutlich zu sehen ist auch, dass unter Berücksichtigung der Förderungsmodalitäten der jährliche Kostenunterschied zwischen Gastherme und Pelletofen viel geringer ausfällt als im Abschnitt zuvor. Er beträgt hier lediglich noch 39 €/a, was im Vergleich zu den 150 €/a ohne eingerechnete Förderung einen starken Rückgang bedeutet.

Im Hinblick auf die Verbrauchs- und Betriebskosten ist die Erdkollektor-Wärmepumpe wieder am billigsten. Die Kosten hierfür betragen 28,4 € pro Monat. Im Vergleich dazu muss für eine Gastherme monatlich 95,7 € für den Verbrauch und Betrieb ausgegeben werden.

Um das oberösterreichische Förderungssystem genauer analysieren zu können, sollen der Vollständigkeit halber nun abschließend noch die Investitionsförderungen für Wärmepumpen genauer betrachtet werden. Die Zuschüsse für Wärmepumpensysteme sind dabei an die in [Tabelle 4.4](#) (Seite 66) erwähnten Anforderungen gebunden. Da für die ersten beiden Anforderungspunkte keine Angebote vorliegen, soll hier lediglich der dritte Punkt berechnet werden. Dafür muss die Wärmepumpe zu 100% aus erneuerbaren Energien versorgt werden, was einem erhöhten Stromtarif von 19,6 cent/kWh entspricht. Die Kostenzuschüsse betragen dann 1.000 € für Luft-Wärmepumpen und 1.700 € für Erdkollektor-Wärmepumpen.

	Luft - WPS (EE)	Erd - WPS (EE)
Annuität - Kapital	881 €	1.063 €
Annuität - VK&BK	687 €	535 €
Gesamtannuität	1.568 €	1.598 €
Kosten nach 25 Jahren	39.200 €	39.950 €

Tabelle 4.12: Wärmepumpenvergleich nach VAR1 inklusive Investitionsförderungen und Öko-Stromtarif

Die Investitionszuschüsse führen zu keinen wirklich neuen Ergebnissen. Die WP-Anlagen sind zwar in Summe etwas teurer als mit dem geförderten Wärmepumpentarif, haben im Kostenvergleich aber immer noch weit geringere jährliche Annuitäten als die Gastherme oder der Pelletofen.

4.6.2.3 Schlussfolgerungen für Wärmesysteme (VAR1)

Die Kostenberechnungen nach *Variante 1* führen, unabhängig von allen Förderungen, immer zu folgender Reihung der Wärmesysteme: Die Luft-Wärmepumpe ist die kostengünstigste Anlage, gefolgt von der Erdkollektor-WP und dem Gasthermensystem. Der Pelletofen weist bei allen Berechnungen die höchste jährliche Annuität auf, wobei der Kostenunterschied zur Gastherme beim geförderten Pelletsystem nur mehr geringfügig ist. Die Verbrauchs- und Betriebskosten betreffend ist die Erdkollektor-Wärmepumpe in allen Fällen¹⁴ klar die günstigste Variante. Sie liegt vor der Luft-Wärmepumpe und dem Pelletofen. Die Gastherme ist an letzter Stelle. Ihre Verbrauchs- und Betriebskosten betragen selbst im ungeförderten Fall mehr als das Doppelte, verglichen mit der Erdkollektor-WP.

Bezüglich der Marktsituation der letzten Jahre kann Folgendes festgestellt werden: Die Wärmepumpensysteme haben zuletzt ihren Marktanteil stark ausbauen können. Dies zeigt auch die Statistik aus [Kapitel 1 - Tabelle 1.4](#) (Seite 7). Der Zuwachs bei Solar- und Wärmepumpenanlagen für Haushalte betrug zwischen 2006 und 2008 etwa 39%. Laut

¹⁴Die einzelnen Fälle beziehen sich hier auf die Berechnungen mit und ohne Förderungen.

Expertenauskünften ist dies im Falle Oberösterreichs durchaus auf die hohen und vielseitigen Förderungsmöglichkeiten von WP-Systemen zurückzuführen. Laut den Experten sind die Wärmepumpen heutzutage aber auch ohne Förderungen schon konkurrenzfähig, was über die vorigen Berechnungen auch deutlich bestätigt wird. Aus ökologischer Sicht wäre es weiters überlegenswert, die Wärmepumpenförderungen generell an einen erneuerbaren Stromtarif zu binden. Denn solange sich die marktwirtschaftlichen Verhältnisse nicht gravierend ändern, stellen die hier zugrunde liegenden 0,45 cent je kWh an Zusatzkosten für Öko-Strom, in Summe keine großen Mehrausgaben dar. Ökonomisch würden die Wärmepumpen also immer noch deutlich besser abschneiden als die anderen Systeme. Im Hinblick auf die Öko-Performance, könnten sie dann auch mit den niedrigen Treibhausgasemissionen der Pelletheizungen konkurrieren.

Die Haushaltsheizungen auf Holzbasis stiegen von 2006 bis 2008 um ca. 6%, nachdem diese in den Jahren zuvor ständig auf gleichem Niveau blieben. Bei den Pelletöfen waren die dauernd schwankenden Pelletpreise einer der Hauptgründe für die Stagnation. Die Zukunft der Pelletheizungen wird von den Experten sehr unterschiedlich eingeschätzt, da die hohen Investitionskosten und auch die starken Preisschwankungen der Vergangenheit viele Kunden hier noch abschrecken. Mit der oberösterreichischen Investitionsförderung besteht ein Anreiz, den Pelletofen dem Gasthermensystem vorzuziehen. Allerdings ist dieser Zuschuss für Erd- bzw. Wasserwärmepumpen gleich groß und stellt gegenüber den gesamt gesehen deutlich billigeren Wärmepumpen somit keinen Vorteil dar. Bedenkt man nun die niedrigen Treibhausgasemissionen von Pelletheizungen, so wäre zur Erreichung ökologischer Ziele eine Erhöhung des Investitionszuschusses durchaus sinnvoll. Außerdem könnte schon über eine geringfügige Erhöhung des Investitionszuschusses die Gastherme bezüglich jährlicher Gesamtkosten unterboten werden. Um beispielsweise die Gesamtannuität des Gassystems von 1.781 € zu erreichen, müsste bei den hier gegebenen Parametern die Förderung für Pelletheizungen, lediglich um 600 € auf 2.300 € angehoben werden.

4.6.3 Wärmesystemvergleich nach DV (Variante 2)

In *Variante 2* werden nun immer zwei Heizungsanlagen gegenübergestellt. Würde man nun jede Systemvariante mit jeder anderen in Vergleich setzen, so ergäben sich unter Einbeziehung aller Förderungsmodalitäten eine Vielzahl an möglichen Berechnungsvarianten ¹⁵. Es werden im Weiteren aber nur wenige Berechnungen durchgeführt, da bei geeigneter Wahl der Zweiervergleiche eine ausreichend genaue Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Anlagen getätigt werden kann.

Diese Variante des Vergleichs ist mitunter dadurch entstanden, dass für viele Kunden in der Praxis nur zwei oder drei verschiedene Energieanlagen in Frage kommen. Mit der *DV* können diese dann bei unterschiedlichen Kreditlaufzeiten und unter Einbindung der Opportunitätskosten direkt gegenübergestellt, und die jeweiligen Vor- und Nachteile der Anlagen genau analysiert werden.

4.6.3.1 Luft-Wärmepumpe versus Erdkollektor-Wärmepumpe

Die Berechnungen des vorgigen Abschnitts über *Variante 1* ergaben für die beiden Wärmepumpensysteme die niedrigsten Gesamtkosten. Somit werden sie in diesem Abschnitt

¹⁵ 4 ungeforderte Systeme, 2 WPS mit gefördertem Stromtarif, und 3 Systeme mit Investitionszuschuss (2 WPS + 1 HPS) ergeben 9 Systemvarianten, die laut Kombinatorik zu 36 verschiedenen Zweiervergleichen führen. $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \binom{9}{2} = \frac{9!}{2!(9-2)!} = 36$

über die *DV* als erstes gegenübergestellt. [Tabelle 4.13](#) zeigt einen Auszug der berechneten Daten:

- **VK&BK:** Verbrauchs- und Betriebskosten pro Jahr
- **Konto:** Entspricht den kumulierten Vergleichskosten (fiktiver Kontostand *fK*).
- **Gesamtausg.:** Die Gesamtausgaben **ohne** Berücksichtigung der Opportunitätskosten ¹⁶
- **KK:** Die jährlichen Kreditkosten bei einer Laufzeit von zehn Jahren.
- **ZE 25:** Die gesamten Zinserträge des fiktiven Kontos nach 25 Jahren.

Jahr	Erdkollektor-Wärmepumpe			Luft-Wärmepumpe		
	VK&BK	Konto	Gesamtausg.	VK&BK	Konto	Gesamtausg.
1	515,6 €	0 €	2754,8 €	662,0 €	291,1 €	2465,8 €
2	516,3 €	0 €	5510,3 €	662,9 €	584,2 €	4932,5 €
10	521,7 €	0 €	27578,2 €	669,8 €	3001,5 €	24696,8 €
11	522,4 €	149,4 €	28100,6 €	670,7 €	3023,7 €	25367,4 €
25	531,95 €	2382,1 €	35485,4 €	683,0 €	3352,5 €	34848,9 €
<i>KK</i>		2239,2 €/a			1803,8 €/a	
<i>ZE 25</i>		137,1 €			471,0 €	

Tabelle 4.13: VAR2: Genauer Datenauszug von Luft-Wärmepumpe versus Erdkollektor-Wärmepumpe zur Erklärung der theoretischen Zusammenhänge

Tabellenberechnungen: Zum Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Tabellendaten soll hier auf die Berechnungen der *DV* nochmals näher eingegangen werden.

Die Gesamtausgaben der Systeme werden wie folgt berechnet:

$$\text{Erdkollektor-WPS: } K_{1,Ges} = 515,6 + 2239,2 = 2754,8 \text{ €}$$

$$K_{2,Ges} = 2754,8 + 516,3 + 2239,2 = 5510,3 \text{ €, usw.}$$

$$\text{Luft-WPS: } K_{1,Ges} = 662,0 + 1803,8 = 2465,8 \text{ €}$$

$$K_{2,Ges} = 2465,8 + 662,9 + 1803,8 = 4932,5 \text{ €, usw.}$$

Die Luft-Wärmepumpe hat niedrigere Gesamtausgaben und es ergeben sich somit Differenzkosten für dieses System. Im ersten Jahr betragen sie:

$$K_{1,Diff} = 2754,8 - 2465,8 = 289,0 \text{ €}$$

Mit dem Habenzinssatz berechnen sich dann die Vergleichskosten in Jahr 1 zu:

$$VGK_{1,Luft} = 289,0 \cdot 1,0074 = 291,1 \text{ €}$$

¹⁶Um Missverständnisse besser vermeiden zu können, wurde bei den Analysen über *Variante 2* die Bezeichnung *Gesamtausgaben* der Bezeichnung *Gesamtkosten* vorgezogen. Die Gesamtausgaben stehen für alle zu tätigen Ausgaben für das jeweilige System. Die Gesamtkosten beziehen zusätzlich noch die Opportunitätskosten mit ein.

Diese 291,1 € werden dem fiktiven Konto des Luft-Wärmepumpensystems gutgeschrieben. Im darauffolgenden Jahr werden analog zur obigen Vorgehensweise die Differenzkosten berechnet, mit dem fiktiven Kontostand addiert, und anschließend erneut verzinst. Die kumulierten Vergleichskosten nach zwei Jahren ergeben sich dann zu:

$$VGK_{2,Luft} = [291,1 + (516,3 + 2239,2) - (662,9 + 1803,8)] \cdot 1,0074 = 584,2 \text{ €}$$

Ab dem Jahr 11 sind die Kredite für beide Systeme abbezahlt. Aufgrund der niedrigeren Verbrauchs- und Betriebskosten des Erdkollektorsystems ergeben sich nun die Differenzkosten zugunsten dieser Anlage.

$$VGK_{11,Erd} = |(0 + 522,4 - 670,7)| \cdot 1,0074 = 149,4 \text{ €}$$

Der fiktive Kontostand des Luft-Wärmepumpensystems wird ab diesem Zeitpunkt nur mehr um den Betrag der Zinsen erhöht.

$$VGK_{11,Luft} = 3001,5 \cdot 1,0074 = 3023,7 \text{ €}$$

Der gesamte Kostenunterschied der beiden Systeme kann aus der Differenz der Vergleichskosten am Ende des Betrachtungszeitraums ermittelt werden.

$$VGK_{25,Luft} - VGK_{25,Erd} = 3352,5 - 2382,1 \approx 971 \text{ €}$$

Analyse: Für die nachfolgende Analyse sind die wichtigsten Daten nochmals in [Tabelle 4.14](#) angeführt. Der Anschaulichkeit halber sind die Werte auf die Einerstelle gerundet. Die [Abbildung 4.2](#) zeigt den Verlauf der Kosten über den gesamten Betrachtungszeitraum.

Jahr	Erdkollektor-Wärmepumpe			Luft-Wärmepumpe		
	VK&BK	Konto	Gesamtausg.	VK&BK	Konto	Gesamtausg.
1	516 €	0 €	2.755 €	662 €	291 €	2.466 €
10	522 €	0 €	27.578 €	670 €	3.002 €	24.697 €
25	532 €	2.382 €	35.485 €	683 €	3.353 €	34.849 €
KK		2.239 €/a			1.804 €/a	
ZE 25		137 €			471 €	

Tabelle 4.14: VAR2: Daten von Luft-Wärmepumpe versus Erdkollektor-Wärmepumpe

Die Gesamtkosten der Luft-Wärmepumpe liegen am Ende des Betrachtungszeitraums unter denen der Erdkollektor-WP und kommen wie folgt zustande: Nach zehn Jahren ergibt sich ein Gesamtausgabenunterschied der beiden Systeme von 2.881 €. Unter Berücksichtigung der Opportunitätskosten beträgt dieser Unterschied 3.002 €, welcher auch am fiktiven Konto *fK* verbucht ist (siehe [Abbildung 4.2](#)). Ab dem elften Jahr sind beide Kredite vollständig getilgt und es sind jährlich nur mehr die Zahlungen für Verbrauch und Betrieb zu tätigen. Diese sind beim Erdkollektor-System geringer und führen somit zu einer Schmälerung der Kostendifferenz am Ende des Betrachtungszeitraums. Nach 25 Jahren beträgt der Gesamtunterschied inklusive Opportunitätskosten nur noch 971 €.

Die Opportunitätskosten wirken sich hier positiv für die Luftwärmepumpe aus. Denn in den 25 Jahren steigern sich die Erträge des fiktiven Kontos vom Luft-WPS stärker, als es die Erträge des Erdkollektor-Systems in den letzten 15 Jahren tun. Am Ende betragen die zusätzlichen Zinserträge für die Luft-Wärmepumpe 471 €. Für die Erdkollektor-Wärmepumpe sind es nur 137 €.

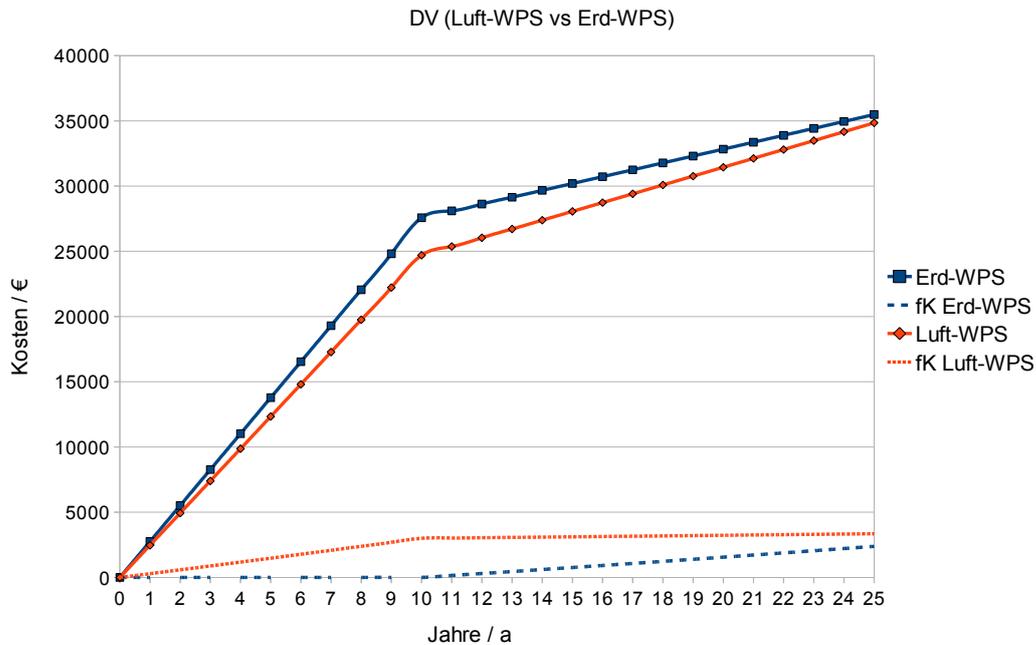


Abbildung 4.2: VAR2: Luft-Wärmepumpe versus Erdkollektor-Wärmepumpe

In *Variante 1* berechnete sich ohne Opportunität zwischen diesen beiden Systemen eine Gesamtausgabendifferenz von 1.975 € (siehe [Tabelle 4.10](#) (Seite 73)). In *Variante 2* sind es nur noch 636 € (35.485 € - 34.849 €). Nachdem sich die Opportunitätskosten positiv für die Luft-Wärmepumpe auswirken, zeigt die geringere Kreditlaufzeit einen Vorteil für das investitionsintensivere System. Je kürzer also der Kreditzeitraum gewählt werden kann, desto günstiger wird die Erdkollektor-WP im Vergleich zur Luft-WP, da die Gewichtung der Verbrauchs- und Betriebskosten dann stärker wird gegenüber den Investitionskosten.

WPS inklusive Förderungen: Bei geförderten Stromtarifen erhöht sich die Kostendifferenz der Luft-WP gegenüber der Erdkollektor-WP etwas, da dann die höheren Investitionskosten des Erdwärmesystems wieder stärker in die Gesamtkosten nach 25 Jahren einfließen. Die Investitionsförderungen der WP-Systeme führt zu keinen neuen Ergebnissen. Lediglich die Endkosten können etwas gesenkt werden.

WICHTIG: Dieser erste Vergleich wurde quantitativ sehr ausführlich beschrieben. Die vielen verschiedenen Parameter der *DV* ermöglichen dabei eine sehr detaillierte Analyse der ökonomisch wichtigen Faktoren. Bei den folgenden Gegenüberstellungen werden nur noch die qualitativen Ergebnisse erläutert, da nach diesem Abschnitt die Grundlage zur eigenständigen Berechnung und Analyse geschaffen wurde. Außerdem wurde in diesem Abschnitt immer zwischen einer Kostendifferenz mit und ohne Opportunitätskosten unterschieden. Die folgenden Berechnungen bedienen sich den Gleichungen der *DV* aus Abschnitt 4.1.2 (Seite 60). Sie beinhalten somit immer auch die Opportunitätskosten.

4.6.3.2 Erdkolektor-Wärmepumpe versus Gastherme

Die niedrigen jährlichen Rückzahlungsraten für den Gasthermenkredit führen nach zehn Jahren zu einer Differenz von 5.198 €, verglichen mit dem Erdwärmesystem (Tabelle 4.15 und Abbildung 4.3). Aufgrund der stark unterschiedlichen Verbrauchs- und Betriebskosten zugunsten der Wärmepumpe sind die beiden Systeme aber bereits nach etwa 18 Jahren wieder kostengleich. Am Ende des Betrachtungszeitraums beträgt der Unterschied 6.027 €. Langfristig gesehen ist die Erdkolektor-WP damit deutlich günstiger als die Gastherme, was vor allem an ihren geringen VK- und BK's liegt. Diese liegen nach 25 Jahren beim *GTS* um mehr als zweieinhalb mal höher (1.413 €/a gegenüber 532 €/a).

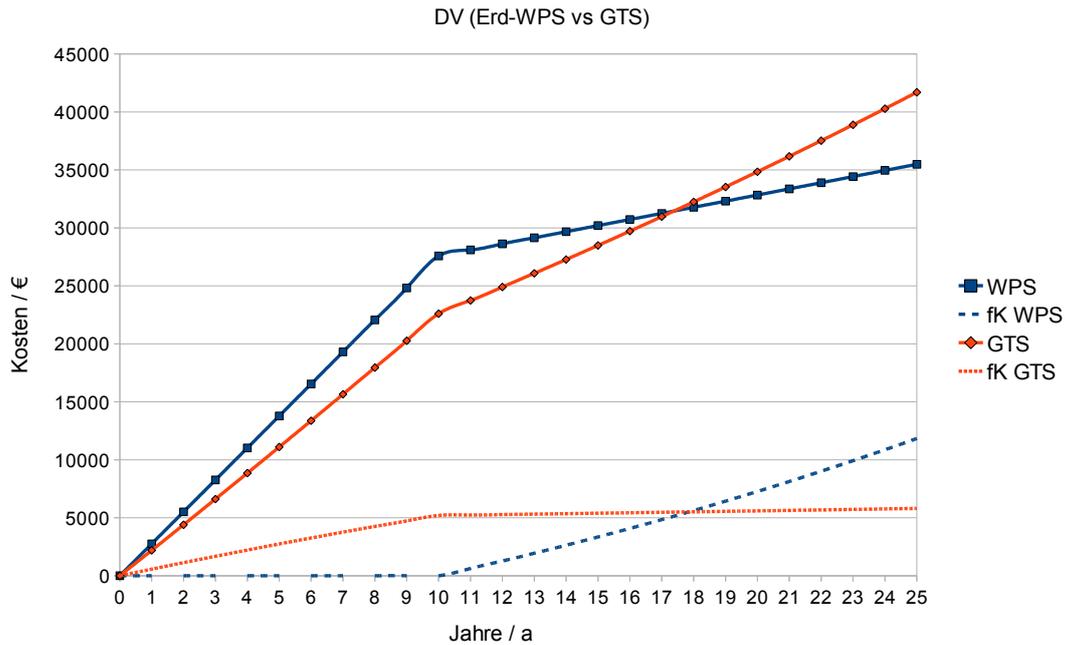


Abbildung 4.3: VAR2: Erdkolektor-Wärmepumpe versus Gastherme

Jahr	Erdkolektor-Wärmepumpe			Gastherme		
	VK&BK	Konto	Gesamtausg.	VK&BK	Konto	Gesamtausg.
1	516 €	0 €	2.755 €	983 €	569 €	2.190 €
10	522 €	0 €	27.578 €	1.126 €	5.198 €	22.597 €
25	532 €	11.833 €	35.485 €	1.413 €	5.806 €	41.692 €
<i>KK</i>		2.239 €/a			1.207 €/a	
<i>ZE 25</i>		645 €			825 €	

Tabelle 4.15: VAR2: Daten von Erdkolektor-Wärmepumpe versus Gastherme

WPS mit gefördertem Stromtarif: Berechnet man obigen Vergleich mit Rücksicht auf einen geförderten WP-Stromtarif von 12,5 cent/kWh, so fällt der Kostenunterschied noch deutlicher zugunsten des Erdwärmesystems aus. Der kummulierte Kostenunterschied nach 25 Jahren beträgt dann 11.036 €, wobei die Erdkolektor-WP bereits nach 14 Jahren günstiger ist als die Gastherme. Auf eine genaue Darstellung dieser Ergebnisse wird hier aber verzichtet.

4.6.3.3 Gastherme versus Pelletofen

Abbildung 4.4 zeigt ein ähnliches Bild wie schon die beiden zuvor. Die Anlage mit den niedrigeren Investitionskosten vergrößert jährlich ihre Kostendifferenz zum Vergleichssystem. Nach Ablauf der Kreditlaufzeit sind die Investitionskosten vollständig getilgt. Die Verbrauchs- und Betriebskosten bestimmen ab diesem Zeitpunkt den Verlauf und reduzieren den Unterschied wieder zugunsten des von da an billigeren Systems. Im Gegensatz zum vorigen Abschnitt kann bei den hier betrachteten Anlagen der Pelletofen die Gastherme allerdings nicht mehr unterbieten. Nach 25 Jahren ergibt sich ein knapper Kostenvorteil für die fossile Heizung.

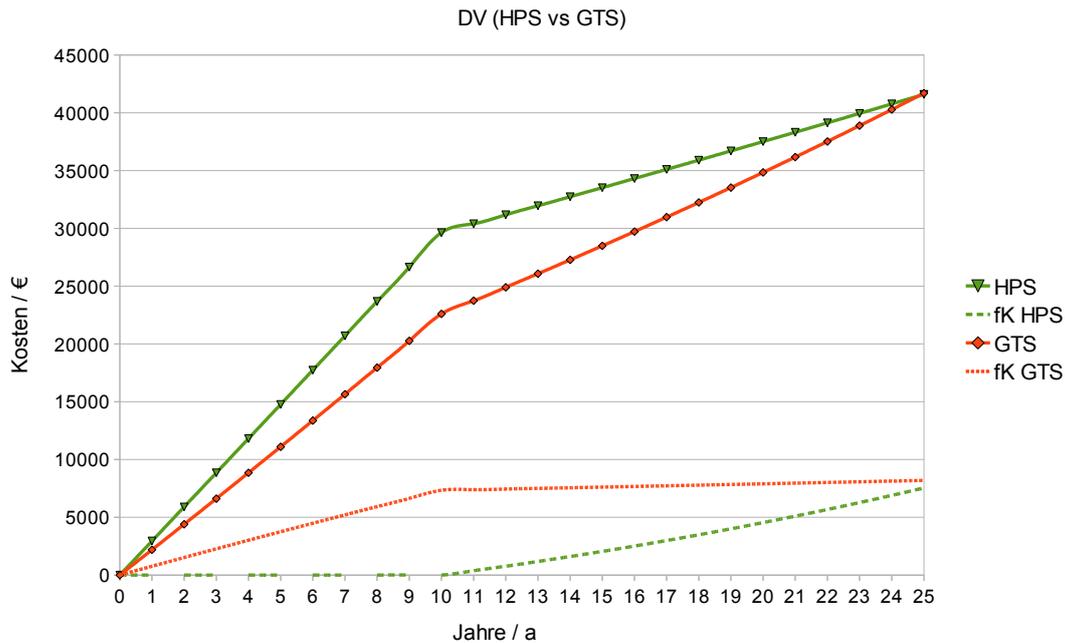


Abbildung 4.4: VAR2: Gastherme versus Holzpelletsystem

Interessant bei diesem Beispiel ist die Tatsache, dass die Gesamtausgaben der Gastherme eigentlich über jenen der Pelletheizung liegen. Aufgrund der Opportunitätskosten ergibt sich aber dennoch ein Kostenvorteil der Gastherme von 657 € (Tabelle 4.16).

Jahr	Gastherme			Holzpelletsystem		
	VK&BK	Konto	Gesamtausg.	VK&BK	Konto	Gesamtausg.
1	983 €	762 €	2.190 €	732 €	0 €	2.947 €
10	1.126 €	7.336 €	22.597 €	766 €	0 €	29.633 €
25	1.413 €	8.194 €	41.692 €	826 €	7.537 €	41.595 €
KK		1.207 €/a			2.214 €/a	
ZE 25		1.158 €			404 €	

Tabelle 4.16: VAR2: Daten von Gastherme versus Holzpelletsystem

Pelletofen mit Investitionsförderung: Der mit 1.700 € investitionsgeförderte Pelletofen unterbietet die Kosten der Gastherme nach 22 Jahren. Durch die Förderung werden die Verbrauchs- und Betriebskosten stärker gewichtet als die Investitionszahlungen. Die Pelletheizung lukriert somit einen Gesamtkostenunterschied von 1.804 € (Abbildung 4.5).

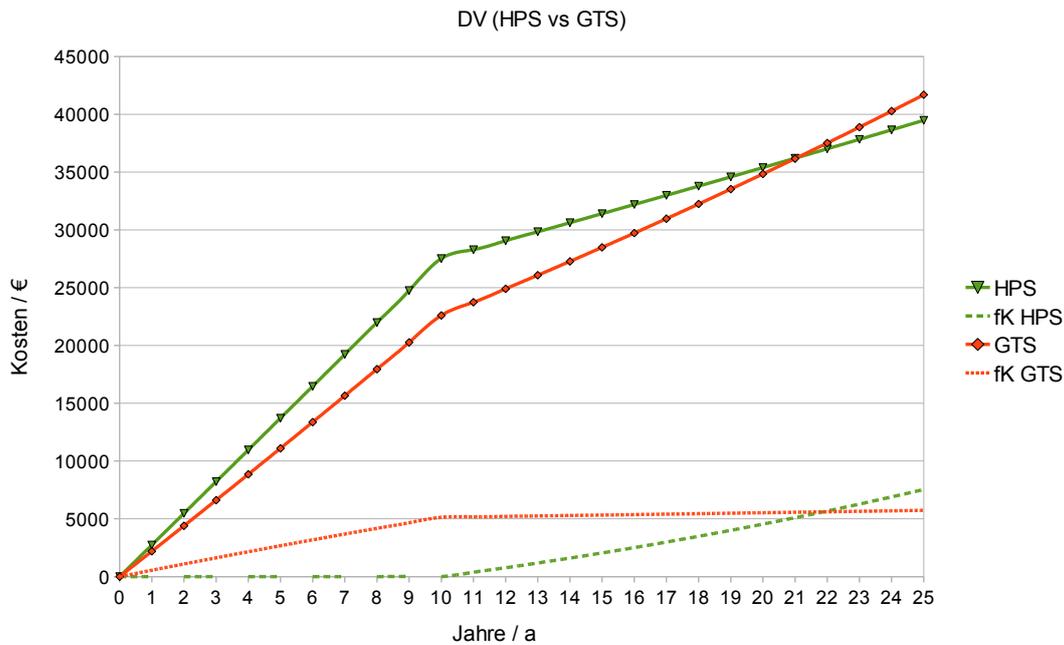


Abbildung 4.5: VAR2: Gastherme versus gefördertes Holzpelletsystem

Vergleich von VAR2 und VAR1: Im Gegensatz zu *Variante 1* ist die geförderte Pelletheizung hier in *Variante 2* kostengünstiger als die Gastherme. Aufgrund dessen sollen die verschiedenen Parameter der beiden Berechnungsmethoden hier etwas genauer analysiert werden.

Der erste Unterschied liegt in der Berücksichtigung von Opportunitätskosten bei *Variante 2*. Von allen bisherigen Gegenüberstellungen liefert der Vergleich Gastherme versus Pelletofen (unsubventioniert) die größten Zinserlöse. Sie liegen nach 25 Jahren bei 754 €. Die Auswirkung der Opportunitätskosten auf die Systemvergleiche ist somit äußerst gering.

$$ZE_{25_{Gas}} - ZE_{25_{Pellets}} = 1158 - 404 = 754 \text{ €}$$

Die geringere Kreditlaufzeit der *Variante 2* führt da schon zu weit höheren Differenzen der beiden Berechnungsmethoden. Mit dem um 15 Jahre verkürzten Kreditzeitraum kann der Pelletofen im Vergleich zur Gastherme 3.653 € an Ausgaben einsparen. Dieser Parameter geht also viel stärker in die Analyse ein als die Opportunitätskosten ¹⁷.

$$\begin{aligned} & (GA_{VAR1, Gas} - GA_{VAR1, Pellets}) - (GA_{VAR2, Gas} - GA_{VAR2, Pellets}) \\ &= (48.275 - 44.525) - (41.692 - 41.595) = 3653 \text{ €} \end{aligned}$$

4.6.3.4 Schlussfolgerungen für Wärmesysteme (VAR2)

Aus den vorherigen Berechnungen über *Variante 2* lassen sich bezüglich der Kostenreihung der Energieanlagen nun folgende Aussagen machen: Die beiden Wärmepumpensysteme stellen, wie schon in *Variante 1* berechnet, mit und ohne Förderungen die günstigsten Anlagen dar. Die Luft-WP liegt hierbei auch unter Berücksichtigung der einzelnen Förderungen immer vor der Erdkollektor-WP. Bei den anderen Systemen gibt es allerdings eine

¹⁷GA. steht in den Berechnungen für *Gesamtausgaben*

Verschiebung: Während der ungeforderte Pelletofen zwar noch knapp hinter der Gastherme liegt, schneidet er im subventionierten Fall besser ab als das fossile Heizungssystem. [Tabelle 4.17](#) zeigt nochmals die ermittelten Reihungen nach *Variante 2*.

	Variante 2 (VAR2)	VAR2 inklusive Förderungen
1.	Luft-Wärmepumpe	Luft-Wärmepumpe
2.	Erdkollektor-Wärmepumpe	Erdkollektor-Wärmepumpe
3.	BW-Gastherme	BW-Pelletofen
4.	BW-Pelletofen	BW-Gastherme

Tabelle 4.17: Reihung der Wärmesysteme nach den kummulierten Gesamtkosten

Die durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, dass sich die Ergebnisse der *DV* durchaus von jenen der *Variante 1* nach *VDI 2067* unterscheiden. Bezüglich der Kostenreihung sind hier nur die Gastherme und der Pelletofen betroffen. Aber auch der Unterschied der Systeme untereinander wird deutlich verändert. Bei Luft-Wärmepumpe und Erdkollektor-Wärmepumpe beispielweise verringert sich die Kostendifferenz der Anlagen bei *VAR2* nach 25 Jahren um mehr als das Doppelte im Vergleich zu *VAR1*.

Die kürzere Kreditlaufzeit der *dynamischen Vergleichsrechnung* führt zu einer stärkeren Gewichtung der Verbrauchs- und Betriebskosten. Die Auswirkungen der Opportunitätskosten sind im Vergleich dazu eher gering (siehe [4.6.3.3](#)).

4.6.3.5 Weitere Vergleichsszenarien

Hier sollen abschließend noch zwei Gegenüberstellungen betrachtet werden, die aus Sicht der befragten Experten eine nicht unwesentliche praktische Relevanz für die Zukunft darstellen könnten. Einerseits sind manche Experten der Meinung, dass auch die Strompreise in Zukunft stärker steigen könnten als hier angenommen. Andererseits wird die Option Gastherme inklusive Solarthermie als zukunftsträchtiges Kombinationsheizsystem gesehen, da es aufgrund der Sonnenkollektoren zur Brauchwassererwärmung ökologisch besser abschneidet als die fossile Wärmeenergieanlage alleine (siehe [Tabelle 2.6](#) (Seite 44)).

WPS versus GTS bei veränderter Strompreis-Steigerungsrate: Die niedrigen Strompreisänderungen der letzten Jahrzehnte hängen in Österreich unter anderem damit zusammen, dass ein hoher Anteil der Elektrizitätsnachfrage über Großwasserkraftwerke gedeckt wird, die sich schon seit längerem amortisiert haben. Der ständige Mehrbedarf an elektrischer Energie kann in Zukunft aber nicht alleinig über Wasserkraft bereitgestellt werden, da das Potential für Wasserkraftwerke im hohen Leistungsbereich nicht mehr entsprechend ausbaubar ist. Der ungenutzte Pegelunterschied der Donau reicht beispielsweise nur noch für zwei weitere Kraftwerke ¹⁸. Somit muss zur Sicherung der Stromversorgung in Zukunft auch weiter verstärkt auf andere Technologien zurückgegriffen werden. Eine der derzeit vielversprechendsten und effizientesten Technologien sind die in [Abschnitt 2.8](#) (Seite 40) bereits erwähnten GuD-Kraftwerke. Diese werden mit Erdgas betrieben, womit die Kosten der Stromerzeugung dann direkt an den Gaspreis gekoppelt sind. [8]

Inwieweit obige Überlegungen Einfluss auf den Strompreis haben werden, ist schwer abzuschätzen. Eine Erhöhung der realen Strompreis-Steigerungsrate auf den halben Wert der Gaspreis-Steigerungsrate erscheint laut Experten aber als durchaus wahrscheinlich und wird den folgenden Berechnungen zugrunde gelegt. Für den Vergleich gilt damit $r_s = 0,81\%$. Für das Wärmepumpensystem wird eine Luft-Wärmepumpe gewählt, da diese

¹⁸Eines dieser zwei möglichen Projekte wäre ein Kraftwerksbau in den Donauauen bei Hainburg, der aufgrund der 1984 stattgefundenen *Besetzung der Hainburger Au* aber kaum durchführbar ist.

höhere Verbrauchs- und Betriebskosten hat als das Erdkollektorsystem und die Kosten damit stärker an den Strompreis gebunden sind.

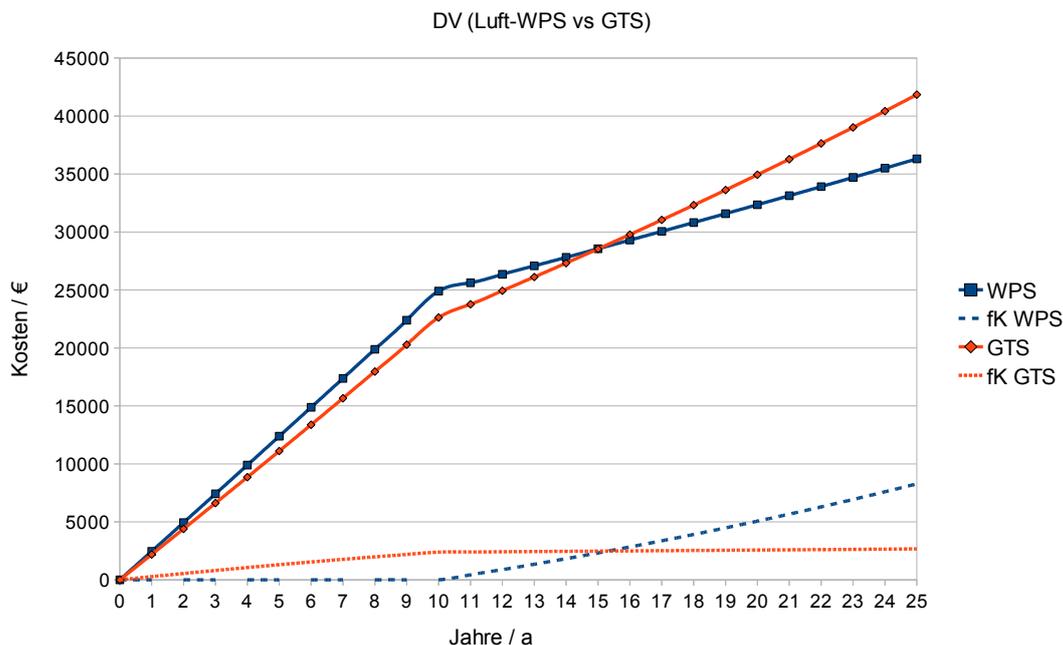


Abbildung 4.6: VAR2: Gastherme versus Luft-Wärmepumpe bei veränderter Strompreis-Steigerungsrate ($r_S = 0,81\%$)

Abbildung 4.6 zeigt den Kostenverlauf über 25 Jahre. Obwohl der Unterschied der Kennliniensteigungen nun geringer ist als mit der ursprünglichen Rate von 0,13%, ergibt sich ein deutlicher Kostenvorteil der Wärmepumpe gegenüber der Gastherme. Die Differenz der Gesamtkosten beträgt am Ende des Betrachtungszeitraums 5.609 €.

Selbst bei gleicher Steigerungsrate von Strom und Gas übersteigen die Kosten der Gastherme immer die der Wärmepumpensysteme. Tabelle 4.18 liefert hierfür eine Zusammenstellung der einzelnen Berechnungsergebnisse für beide WP-Systeme. Interessant ist vor allem die letzte Zeile mit $r_S = r_G = 1,61\%$. Hier ist der Unterschied zwischen Erdkollektor-Wärmepumpe und Gastherme schon fast so groß wie zwischen Luft-Wärmepumpe und Gastherme. Dies zeigt, dass bei hohen zukünftigen Steigerungsraten, das Erdwärmesystem in Summe auch durchaus günstiger werden kann als die Luft-Wärmepumpe.

r_S	Luft-WPS vs GTS	Erd-WPS vs GTS
0,13 %	6.994 €	6.027 €
0,81 %	5.609 €	4.984 €
1,61 %	3.784 €	3.610 €

Tabelle 4.18: Gesamtkostenunterschied nach 25 Jahren zwischen WPS und GTS bei unterschiedlichen Strompreis-Steigerungsraten r_S

Gastherme inklusive Solarthermie: Zwei der in Tabelle 4.2 (Seite 64) angeführten Angebote beinhalten neben den Kosten für das Gasthermensystem auch einen Kostenvoranschlag für eine mit dem GTS gekoppelte 8m² Solaranlage zur Brauchwassererwärmung. Der Durchschnitt der beiden Angebotspreise inklusive Mehrwertsteuer liegt hier bei 7.100 €. Die Gesamtkosten für das Kombi-System erhöhen sich damit auf 16.800 €. Unter Anspruchnahme der oberösterreichischen Förderungen für Solarthermie reduziert

sich dieser Preis bei 8m² Standard-Kollektoren noch um 1.700 €. Die Investitionskosten inklusive Subvention betragen dann 15.100 €.

Laut Literatur und Experten können über eine Solarthermie zur Warmwasserbereitung etwa 350kWh/m²a eingespart werden. Bei einer 8m²-Anlage ergibt das 2800kWh/a. Der Energiebedarf für den Verbrauch der Gastherme reduziert sich somit zu 9305kWh/a, der Betriebsbedarf zu 279kWh/a. [14], [15]

Die ökonomische Analyse führt auf die Ergebnisse abgebildet in [Tabelle 4.19](#). Das Kombi-System schneidet in allen betrachteten Vergleichen immer schlechter ab als die Referenzanlage. Bei den Wärmepumpen ist der Unterschied sehr hoch, egal ob diese nun über einen speziellen Stromtarif gefördert werden oder nicht. Ökonomisch gesehen stellt das Kombi-System also keine Verbesserung gegenüber der Stand-alone-Gastherme dar. Hier liegt es selbst im ungeforderten Fall hinter dem Pelletofen.

	Kostenunterschied
Luft-WPS (WP-Stromtarif) vs Kombi-System (gefördert)	13.733 €
Erd-WPS (WP-Stromtarif) vs Kombi-System (gefördert)	11.342 €
Luft-WPS vs Kombi-System (gefördert)	7.301 €
Erd-WPS vs Kombi-System (gefördert)	6.334 €
HPS vs Kombi-System	2.110 €
HPS vs Kombi-System (beide gefördert)	2.110 €

Tabelle 4.19: Gesamtkostenunterschied nach 25 Jahren zwischen den einzelnen Systemen und einem Kombi-System aus GTS und Solarthermie

Abschließend soll hier noch auf die ökologische Performance der solarunterstützten Gastherme eingegangen werden. Vergleicht man die Emissionswerte aus [Tabelle 2.6](#) (Seite 44), so liegen die der Gastherme höher als die von allen anderen hier betrachteten Systemen. Unter Berücksichtigung eines Kombi-Systems reduzieren sich die Werte allerdings. Bei Vernachlässigung der ohnehin nur geringfügig unterschiedlichen Betriebskosten der einzelnen Anlagen, hat jedes System einen Wärmeenergiebedarf von 11500kWh/a. Jährlich ergeben sich damit folgende Emissionen in Kilogramm CO₂-Äquivalent ¹⁹:

$$\text{Holz-Pellets: } 25g/kWh \cdot 11500kWh = 288kg$$

$$\text{E-WP-Boden: } 172g/kWh \cdot 11500kWh = 1978kg$$

$$\text{E-WP-Luft: } 186g/kWh \cdot 11500kWh = 2139kg$$

$$\text{Gas BW: } 251g/kWh \cdot 11500kWh = 2887kg$$

Kombi-System FK:

$$44g/kWh \cdot 2800kWh + 251g/kWh \cdot (11500kWh - 2800kWh) = 2307kg$$

Kombi-System VA:

$$24g/kWh \cdot 2800kWh + 251g/kWh \cdot (11500kWh - 2800kWh) = 2251kg$$

Die solar unterstützte Gastherme kann ihre Treibhausgase zwar reduzieren, bleibt aber selbst bei Verwendung eines Vakuumkollektors (VA) immer noch hinter den anderen Systemen zurück. Bedenkt man, dass obige Emissionen den deutschen Strommix als Grundlage haben, so fallen die Werte für Wärmepumpen im österreichischen Fall nochmal niedriger aus. Das Kombi-System stellt also auch ökologisch gesehen keine Alternative zu Wärmepumpe oder Pelletofen dar.

¹⁹Bei den Berechnungen der Kombi-Systeme bedeutet die Bezeichnung FK, dass das Solarsystem einen Flachkollektor als Absorber benutzt. VA steht für einen Vakuumkollektor.

4.7 Photovoltaik versus konventionellem Strombezug

In diesem Abschnitt werden drei verschiedene Möglichkeiten der Elektrizitätsversorgung von Haushalten miteinander verglichen. Zur Auswahl stehen dabei der *konventionelle Strombezug* und der Mischbezug über das Netz und eine zusätzliche 5kW - Photovoltaikanlage im *Netzparallelbetrieb (PV1)*, bzw. im *netzgekoppelten Betrieb (PV2)*. Die Kosten für den elektrischen Hausanschluss wurden dabei zu Null gewählt. In allen drei Varianten wäre dafür gleichviel zu bezahlen, und die Analyse der Systeme untereinander ändert sich aufgrund dessen nur geringfügig. Die Tabellen 4.20 und 4.21 zeigen nochmals eine Übersicht aller für die Modellierung relevanten Daten.

Konventioneller Bezug	Bezeichnet den Strombezug vom Verteilernetz über ein Energieversorgungsunternehmen.
PV - netzgekoppelt	Hier wird der gesamte PV-Strom in das Netz eingespeist und der für das Haus benötigte Energiebedarf ausschließlich vom Netz bezogen.
PV - netzparallel	Soweit möglich stellt die Photovoltaikanlage die Energie zur Verfügung. Strom vom Netz wird nur dann bezogen, wenn die PV keine oder weniger Energie liefert als benötigt. Verbraucht der Haushalt weniger Energie als die PV erzeugt, so speist diese die überschüssige Strommenge in das Netz ein.

Tabelle 4.20: Drei verschiedene Arten des Strombezugs für Haushalte

Elektrischer Energiebedarf	5000 kWh/a
PV-Anlagenleistung	5000 W _{peak}
Solarmodule	$\eta = 14 \%$, A = 38,2 m ²
Wechselrichter	$\eta = 93,5 \%$, Tausch nach 13a
PV-Ertrag	5500 kWh/a
Eigenverwendung PV-netzparallel	1925 kWh/a
Strompreis	19,15 cent/kWh
Steigerungsrate - Strom	0,13 %/a
Investitionskosten PV (gesamt)	19.400 €
davon Wechselrichter	1.400 €
<i>Förderung für PV-netzparallel</i>	8.500 €
<i>Stromtarif für PV-netzparallel</i>	10,00 cent/kWh
<i>Stromtarif für PV-netzgekoppelt</i>	38,00 cent/kWh (13a)
<i>Steigerungsrate - Tarife</i>	0 %/a
Sollzinssatz	4,18 %
Habenzinssatz	0,74 %
Inflation	1,75 %
Betrachtungszeitraum	25 Jahre
Kreditlaufzeit VAR1	25 Jahre
Kreditlaufzeit VAR2	10 Jahre

Tabelle 4.21: Datenübersicht für die Modellierung der Elektrizitätserzeugung

4.7.1 Systemvergleich

Bei der Analyse der Systeme über die *DV (VAR2)* ändert sich nichts verglichen mit den Wärmesystemen. Bei Variante 1 muss Folgendes beachtet werden: Für den netzgekoppelten Betrieb der Photovoltaikanlage ändern sich die verbrauchsgebundenen Einzahlungen nach 13 Jahren, da der Einspeisetarif dann von 38 cent/kWh auf 10 cent/kWh zurückfällt. Die jährlichen Annuitäten für den Verbrauch lassen sich dadurch nicht über die Formeln aus Abschnitt 4.1.1.3 (Seite 58) berechnen. Die folgenden Vergleichsrechnungen nach Variante 1 wurden dadurch iterativ in einem *Calc-Programm* implementiert. Die Kosten bzw. Erlöse für Betrieb und Verbrauch werden dabei unter Berücksichtigung der Tarife und Steigerungsraten jährlich neu berechnet. Die Ermittlung der Kapitalannuitäten entspricht exakt dem gewohnten Verfahren nach *VDI 2067*.

4.7.1.1 Photovoltaik versus konventionellem Strombezug (ohne Förderungen)

Das Diagramm in [Abbildung 4.7](#) zeigt die Entwicklung der geförderten Einspeisetarife für Ökostrom und des Marktpreises ab dem Jahr 2003. Von 2007 bis 2009 ist der Marktpreis aufgrund der Wirtschaftskrise sehr stark geschwankt. Die Entwicklung der nächsten Jahre ist dadurch äußerst schwierig abzuschätzen. Für die Berechnungen wird ein Mittelwert aus den letzten drei verfügbaren Preisen gebildet²⁰. Dieser gemittelte Preis von 5,5 cent/kWh entspricht hier jenem Tarif, den eine ungeforderte Photovoltaikanlage bei Netzeinspeisung bekommen würde. Wie beim konventionellen Strompreis gilt für diesen ungeforderten PV-Einspeisetarif auch die Steigerungsrate von 0,13%/a. Zum Vergleich sind die folgenden Berechnungen, wie schon bei den Wärmesystemen, noch mit höheren Strompreis-Steigerungsraten durchgeführt worden.

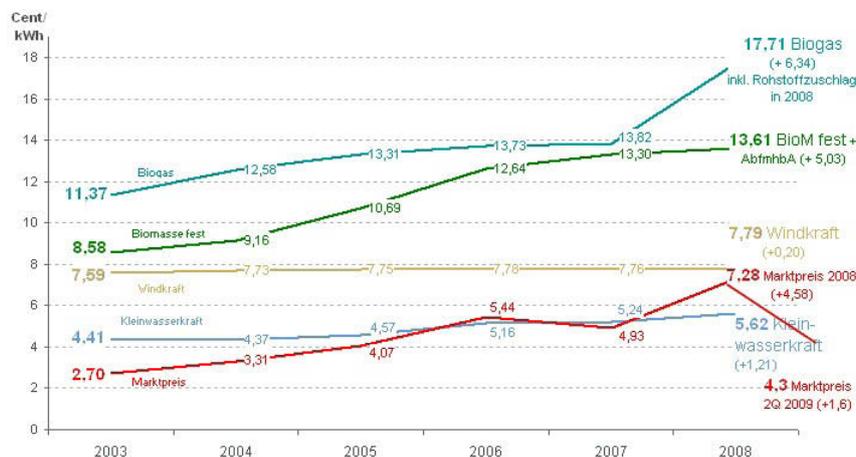


Abbildung 4.7: Entwicklung der Durchschnittsvergütungen im Vergleich zu den Marktpreisen [60]

[Tabelle 4.22](#) zeigt die Gesamtkosten der drei Systeme bei unterschiedlichen Strompreis-Steigerungsraten. Bei österreichischen Strahlungsverhältnissen ist im ungeforderten Fall der Strom vom Energieversorgungsunternehmen derzeit also noch deutlich billiger als eine Mischvariante aus Photovoltaik und Netzbezug. Bei der für die letzten 15 Jahre gemittelten Steigerungsrate von 0,13% liegen die Kosten beider PV-Varianten ca. doppelt so hoch wie der konventionelle Strombezug. Bei höheren Steigerungsraten kann die Differenz zwar etwas verringert werden, bleibt aber dennoch auf hohem Niveau.

²⁰Mittlerer Marktpreis: $\frac{4,93+7,28+4,30}{3} = 5,5$ cent/kWh

r_S	konventionell	PV-netzparallel	PV-netzgekoppelt
0,13 %	24.315 €	43.354 €	50.027 €
0,81 %	26.415 €	44.214 €	51.464 €
1,61 %	29.187 €	45.350 €	53.360 €

Tabelle 4.22: Gesamtkosten der einzelnen Systeme nach 25 Jahren bei unterschiedlichen Strompreis-Steigerungsraten r_S (Kreditkosten: 1.266 €/a)

Abbildung 4.8 zeigt die Verhältnisse im Zeitraster. Der Sprung bei den PV-Systemen kommt daher, dass durch den Wechselrichtertausch nach 13 Jahren eine Ersatzbeschaffung eingerechnet werden muss²¹.

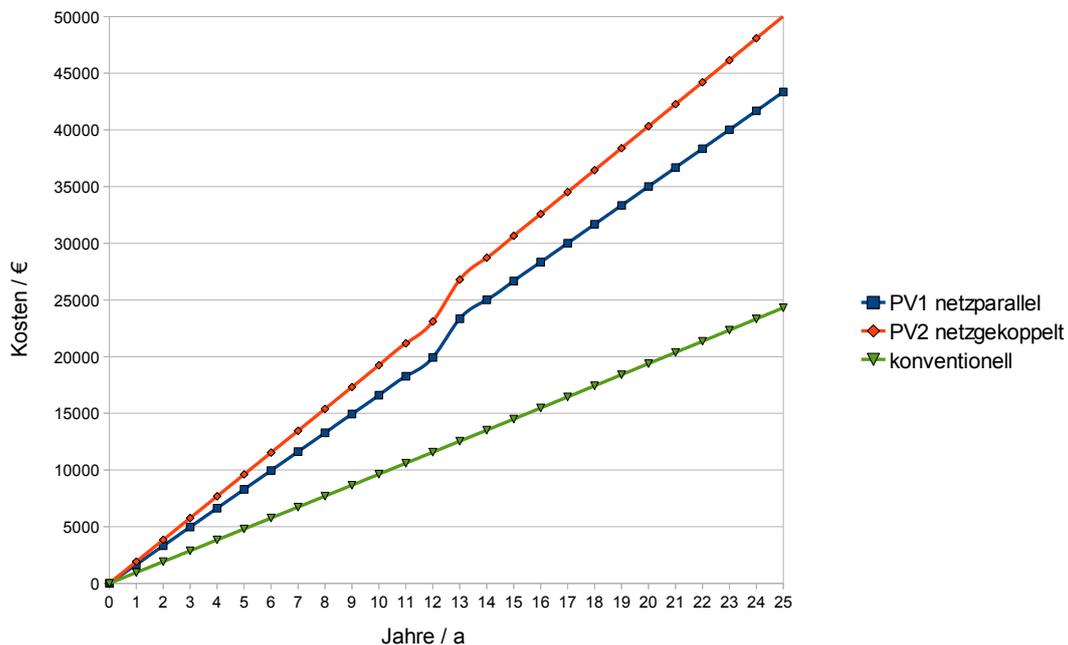


Abbildung 4.8: Vergleich der drei Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung nach Variante 1 ($r_S = 0,13\%$)

Analyse bei verändertem Kreditzeitraum: Wie bereits die Analyse der Wärmesysteme gezeigt hat, stehen die Gesamtkosten in starker Verbindung mit der gewählten Kreditlaufzeit. Aus diesem Grund soll hier eine weitere *Berechnungsvariante* auf den Vergleich der drei Systeme angewendet werden. Dazu wird bei den Kapitalkosten nun eine verringerte Kreditlaufzeit von zehn Jahren gewählt. Der Restbetrag des Wechselrichters wird unter Berücksichtigung der Inflation nach 13 Jahren hinzugerechnet. Die Ergebnisse des hierfür implementierten *Calc-Programms* zeigt [Tabelle 4.23](#) und [Abbildung 4.9](#).

Aufgrund der verkürzten Kreditlaufzeit sind die Kostenunterschiede stark zurückgegangen. Bei $r_S = 0,13\%$ beträgt die Differenz zwischen konventionellem Bezug und der Variante mit netzparalleler PV nur noch 11.533 €, im Gegensatz zu 19.039 € bei $T_K = 25$. Der konventionelle Bezug von Strom ist aber dennoch weit billiger als die ungeförderten PV-Varianten.

²¹Mit einer Inflation von 1,75% betragen die Kosten für den Wechselrichter nach 13 Jahren 1.754 €.

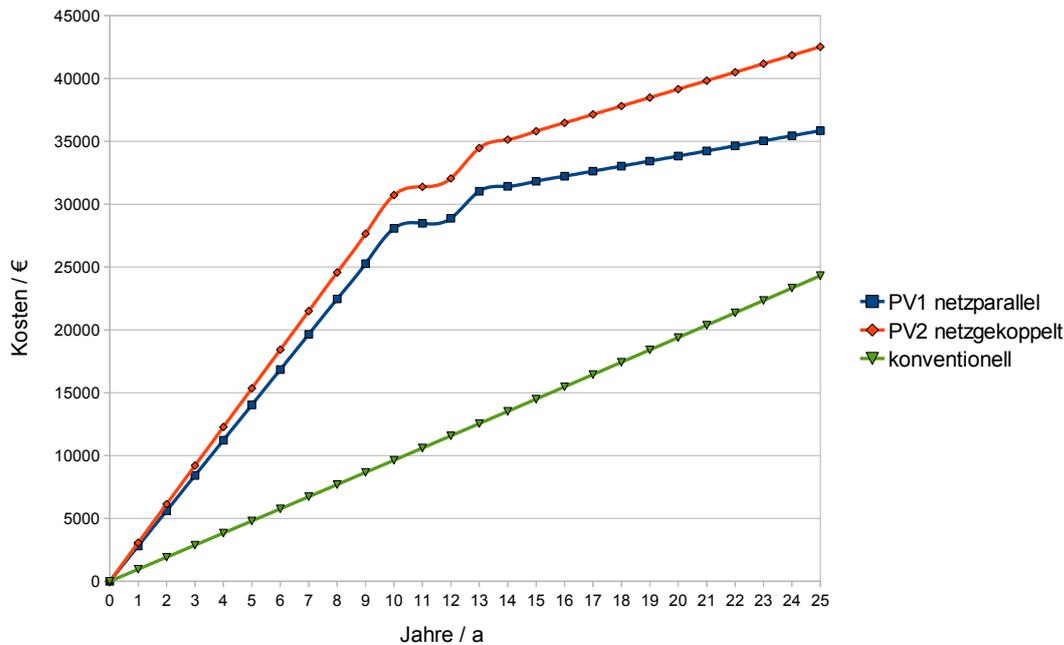


Abbildung 4.9: Vergleich der drei Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung mit einer veränderten Kreditlaufzeit von zehn Jahren ($r_S = 0,13\%$)

r_S	konventionell	PV-netzparallel	PV-netzgekoppelt
0,13 %	24.315 €	35.848 €	42.520 €
0,81 %	26.415 €	36.708 €	43.958 €
1,61 %	29.187 €	37.844 €	45.854 €

Tabelle 4.23: Gesamtkosten der einzelnen Systeme nach 25 Jahren, bei einer Kreditlaufzeit von zehn Jahren und unterschiedlichen Strompreis-Steigerungsraten r_S (Kreditkosten: 2.413 €/a)

4.7.1.2 Photovoltaik versus konventionellem Strombezug (inklusive Förderungen)

Im geförderten Fall liegen die Gesamtkosten aller drei Systeme am Ende des Betrachtungszeitraums relativ nahe beisammen. Die netzgekoppelte Anlage hat aufgrund der anfangs hohen Erlöse aus dem Stromverkauf auch zu Ende hin noch einen geringen Kostenvorteil. Sie stellt somit die günstigste Variante des Strombezugs dar.

Die Summe aus Stromkosten, Kreditkosten und Verkaufserlösen ist bei der netzparallelen Photovoltaikanlage fast exakt gleich den jährlichen Ausgaben bei konventionellem Strombezug. Die beiden Kennlinien in [Abbildung 4.10](#) unterscheiden sich kaum in ihrer Steigung, lediglich die Zusatzinvestition des neuen Wechselrichters nach 13 Jahren macht die PV-Anlage teurer als den Bezug über das Netz ²².

konventionell	PV-netzparallel	PV-netzgekoppelt
24.315 €	25.547 €	23.938 €

Tabelle 4.24: Gesamtkosten der einzelnen Systeme nach 25 Jahren bei Berücksichtigung aller Förderungen (Kreditkosten PV1: 711 €/a, Kreditkosten PV2: 1.266 €/a)

²²Da die geförderten PV-Einspeisetarife unabhängig der Strompreis-Steigerungsrate sind, wirkt sich r_S auf den Gesamtkostenunterschied nochmal weniger aus als zuvor. Auf eine Darstellung der Differenzkosten bei unterschiedlichen Steigerungsraten wird im Folgenden daher verzichtet.

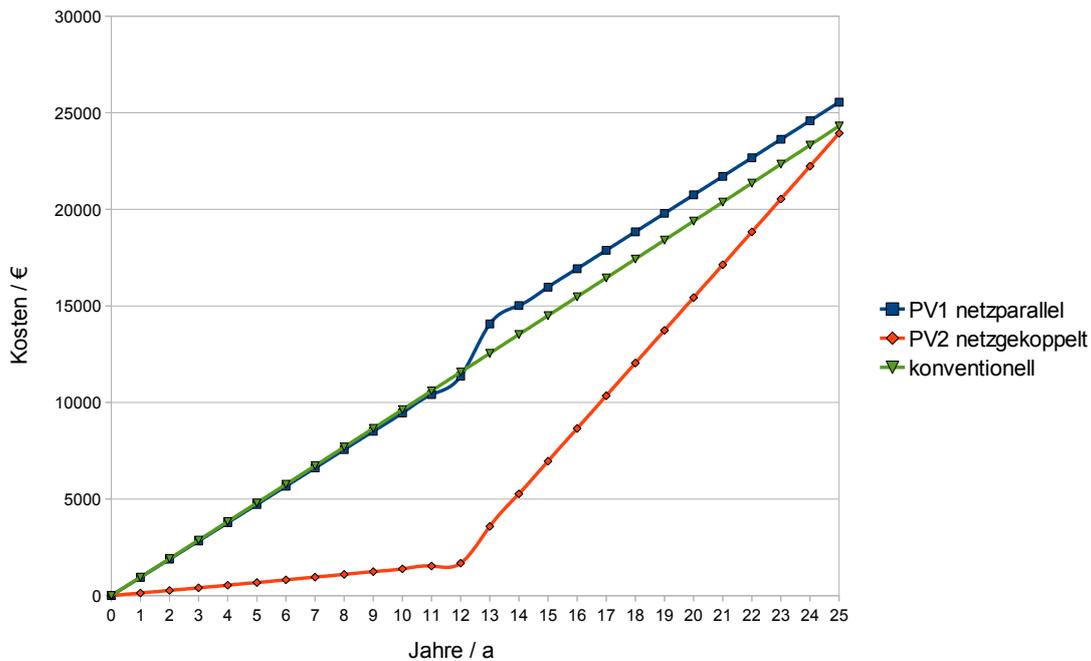


Abbildung 4.10: Vergleich der drei Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung nach Variante 1 und unter Berücksichtigung aller Förderungen

Analyse bei verändertem Kreditzeitraum: Der letzte hier betrachtete Fall einer PV-Anlage inklusive Förderungen und geringerer Kreditlaufzeit ist stark an die Praxis angelehnt. Laut den Fachmännern kauft derzeit so gut wie niemand eine PV-Anlage für sein/ihr Haus, ohne dafür Förderungen zu beziehen. Und auch der verkürzte Kreditzeitraum von zehn Jahren ist laut Bankexperten in der Praxis durchaus üblich.

Die kürzere Laufzeit führt zu vollkommen anderen Ergebnissen als zuvor. Beide PV-Varianten haben jetzt aufgrund der in Summe geringeren Kreditausgaben nun einen deutlichen Kostenvorteil gegenüber dem konventionellen Strombezug. Nach 25 Jahren beträgt die Differenz bei der netzparallelen PV 2.985 €, die netzgekoppelte PV ist um 7.883 € billiger als reiner Netzbezug. [Abbildung 4.11](#) und [Tabelle 4.25](#) zeigen die Analyseergebnisse der Systeme, wobei folgende Bezeichnungen der Systeme gelten:

- Erl. 1-13: Die Erlöse aus dem Stromverkauf in den Jahren 1 - 13.
- Erl. 14-25: Die Erlöse aus dem Stromverkauf in den Jahren 14 - 25.
- JK: Bezeichnet die Jahreskosten der jeweiligen Systeme und beinhaltet die Stromkosten, Kreditkosten und Verkaufserlöse.

In den ersten zehn Jahren sind für die PV-Anlagen Kreditkosten zu bezahlen, womit die gesamten Jahreskosten dieser Systeme um einiges höher liegen als die Stromkosten. Ab dem elften Jahr fällt die Kreditrückzahlung weg und die Jahreskosten reduzieren sich stark. Die netzgekoppelte Anlage kann die Gesamtausgaben des konventionellen Strombezugs dann bereits nach zwölf Jahren unterbieten, da sie Einnahmen lukriert und ihre Kosten in Summe sogar fallen (Die Erlöse des Stromverkaufs übersteigen hier die jährlichen Stromkosten ²³). Nach 13 Jahren muss der Wechselrichter getauscht werden, außerdem reduziert sich der Einspeisetarif der netzgekoppelten PV in diesem Jahr auf 10

²³PV-netzgekoppelt: Im elften Jahr stehen 2.090 € an Erlösen den Ausgaben von 970 € gegenüber. Die Differenz gibt die Jahreskosten von -1.120 €.

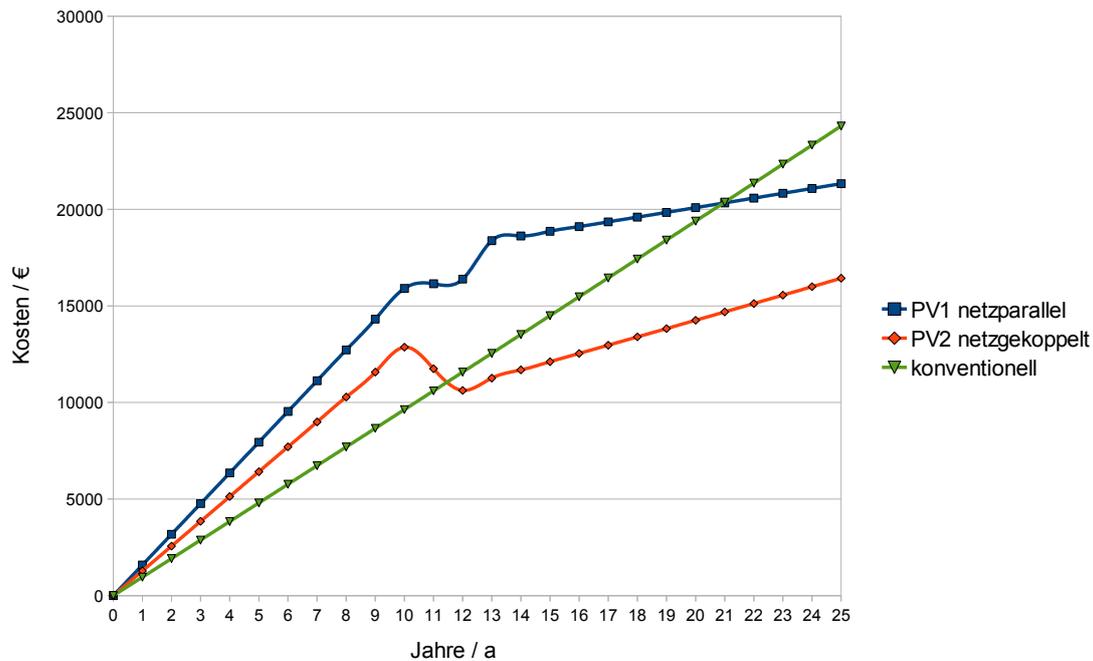


Abbildung 4.11: Vergleich der drei Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung, bei Berücksichtigung aller Förderungen und mit einer veränderten Kreditlaufzeit von zehn Jahren

cent/kWh. Von nun an bleiben die Zusatzkosten bzw.- erlöse gleich. Die Kostenkurven haben jetzt wieder einen linear steigenden Verlauf bis zum Endzeitpunkt. Nach 21 Jahren unterbietet letztendlich auch das zweite PV-System die kumulierten Netzstromkosten.

Jahr	konventionell		PV netzparallel		PV netzgekoppelt	
	JK	Gesamtausg.	JK	Gesamtausg.	JK	Gesamtausg.
1	958 €	958 €	1.587 €	1.587 €	1.281 €	1.281 €
10	969 €	9.631 €	1.594 €	15.908 €	1.292 €	12.865 €
11	970 €	10.601 €	239 €	16.147 €	-1.120 €	11.745 €
13	973 €	12.545 €	1.995 €	18.381 €	637 €	11.263 €
25	988 €	24.315 €	250 €	21.330 €	438 €	16.432 €
<i>KK</i>			<i>1.266 €/a</i>		<i>2.413 €/a</i>	
<i>Erl. 1-13</i>			<i>358 €/a</i>		<i>2.090 €/a</i>	
<i>Erl. 14-25</i>			<i>358 €/a</i>		<i>550 €/a</i>	

Tabelle 4.25: Daten der drei Elektro-Systemvarianten

Obwohl die Kreditkosten der netzgekoppelten PV deutlich höher liegen als beim netzparallelen System, ist sie von Anfang an, gesamt gesehen billiger als das zweite System. Erst ab dem Jahr 14 hat die netzparallele PV die niedrigsten Jahreskosten. Der Unterschied zur anderen PV-Anlage ist da aber bereits zu groß, um sie innerhalb des Betrachtungszeitraums noch zu kompensieren. Weiters erwähnenswert ist, dass die netzgekoppelte PV in Summe weniger Kosten verursacht als sie Investitionskosten hat. Die 19.400 € für die Erstinvestition stehen hier 16.432 € an kumulierten Kosten nach 25 Jahren gegenüber. Neben praktisch kostenlosem Strombezug lukriert man über die PV2 also noch zusätzlichen Gewinn. Die netzgekoppelte Photovoltaikanlage stellt bei den aktuellen Fördermechanismen somit ein sehr lukratives Energiesystem dar.

4.7.1.3 Systemvergleich nach DV (Variante 2)

Die Gegenüberstellungen von jeweils zwei Energiesystemen bei verändertem Kreditzeitraum und unter Einbeziehung der Opportunitätskosten soll im Folgenden kurz beschrieben werden. Da die Systeme aber bereits zuvor mit verringerter Kreditlaufzeit von zehn Jahren miteinander verglichen wurden, unterscheiden sich die Ergebnisse der DV hier nur mehr in den unterschiedlichen Zinserlösen der Systeme zueinander. Wie schon bei den Wärmesystemen, fallen diese auch für die Elektrosysteme in den meisten Fällen sehr gering aus und können fast immer vernachlässigt werden.

Vergleich nach DV (ohne Förderungen): Im ungeförderten Fall führt eine Gegenüberstellung der beiden PV-Systeme zu keinen neuen Erkenntnissen. Die Ergebnisse bleiben auch quantitativ fast gleich wie bei den Berechnungen nach *Variante 1*. Beim Vergleich des konventionellen Strombezugs mit den PV-Anlagen ergeben sich in beiden Fällen hohe Zinserlöse zugunsten des Netzbezugs. Unter Einrechnung der Opportunitätskosten schneiden die PV-Anlagen also nochmal schlechter ab als bei der Analyse nach *Variante 1*.

Vergleich nach DV (inklusive Förderungen): Mit der für die DV bereits verkürzten Kreditlaufzeit von zehn Jahren ergibt die Einbeziehung von Opportunitätskosten keine wirklich neuen Ergebnisse. In allen drei möglichen Gegenüberstellungen sind die Zinserlöse vernachlässigbar klein und betragen nie über 1.000 €. Wie schon in Abschnitt 4.7.1.2 berechnet, ist die netzgekoppelte PV kostengünstiger als die netzparallele PV und der konventionelle Strombezug ist am teuersten.

4.7.2 Schlussfolgerungen für Elektroenergiesysteme

Unabhängig vom Kreditzeitraum, ist bei österreichischen Strahlungsverhältnissen der netzgekoppelte bzw. netzparallele Strombezug über eine Photovoltaikanlage bei weitem unwirtschaftlicher als der konventionelle Bezug über ein Energieversorgungsunternehmen. Bei Inanspruchnahme der österreichischen Förderungsmodalitäten ändert sich dies aber. Während die Kosten der drei Systemvarianten bei längeren Kreditlaufzeiten noch nahe beieinander liegen, werden die PV-Anlagen bei jeder Verkürzung von T_K immer günstiger. Mit einer Laufzeit von zehn Jahren ergeben sich deutliche Kostenvorteile der PV-Anlagen gegenüber dem konventionellen Strombezug. Dabei stellt die netzgekoppelte PV-Anlage das mit Abstand billigste Energiesystem dar, was angesichts der tatsächlichen Marktsituation nicht ganz unproblematisch scheint. Denn im ungeförderten Fall ist die netzparallele Ausführung das günstigere System der beiden PV-Varianten. Welches der beiden PV-Systeme aber insgesamt volkswirtschaftlich sinnvoller ist, ist schwer zu sagen, denn bei beiden Möglichkeiten stehen verschiedene Vor- und Nachteile einander gegenüber.

Die netzgekoppelte PV hat den Vorteil, dass das zuständige Versorgungsunternehmen je nach Wetterlage genau abschätzen kann, wieviel Energie von der PV in das Netz eingespeist wird ²⁴. Jedoch muss diese Energie dann über Leitungen zu den Verbrauchern gebracht werden, was mit Verteilungsverlusten einhergeht. Bei der netzparallelen PV wird ein gewisser Teil für den Eigenverbrauch verwendet und der Rest in das Netz gespeist, wodurch das Netz entlastet und die Verteilungsverluste reduziert werden. Allerdings kann das Versorgerunternehmen, welches die PV-Energie aufnimmt, aufgrund eines

²⁴In Österreich sind die Energieversorger verpflichtet, Strom aus PV-Anlagen in das Netz einspeisen zu lassen und entsprechend zu vergüten.

kurzfristig unvorhersehbaren Mehrbedarfs des Verbrauchers nicht genau abschätzen, wieviel Energie tatsächlich geliefert wird. Bei Haushalten als Verbraucher kann aufgrund der geringen Leistungen und wegen der **Gleichzeitigkeiten** das Auftreten eines problematischen Mehrbedarfs aber praktisch ausgeschlossen werden.

Es obliegen also beiden Varianten Vor- und Nachteile, wozu aber eine genauere Analyse des Stromnetzes notwendig wäre, um ein gesamt gesehen *besseres System* zu identifizieren. Eines sei allerdings gesagt. Dass ab einer gewissen Anlagenleistung nur mehr Netzkopplung sinnvoll ist, erscheint logisch, da solche Photovoltaikanlagen dann als PV-Kraftwerke ausgeführt sind und nur noch einen verschwindend kleinen Eigenbedarf an Energie haben. Dennoch scheint die Grenze von 5kW für den Netzparallelbetrieb sehr niedrig gewählt, da beispielsweise größere Haushalte oder Kleinunternehmen schnell über die 5kW-Marke kommen. Und der unvorhersehbare Mehrbedarf lässt sich bei solchen Verbrauchern auch weitgehend genau abschätzen, sofern der Einsatz von Großmaschinen ausgeschlossen werden kann.

Es ist durchaus wahrscheinlich, dass die Strompreise in Zukunft stärker steigen werden als die hier angenommenen 0,13%. Dies würde zu zusätzlichen Kostenvorteilen der PV-Anlagen führen, und auch der Stand der Technik ist bei Photovoltaikmodulen noch lange nicht ausgereift. Wie in [Tabelle 2.3](#) (Seite 35) angegeben, gehen Experten davon aus, die Wirkungsgrade von Standardmodulen bis 2015 auf durchschnittlich 20% steigern zu können. Bei gleichbleibenden Kosten würden PV-Module mit derartig hohen Wirkungsgraden auch bei österreichischen Strahlungsverhältnissen eine ökonomisch sinnvolle Alternative zum konventionellen Strombezug sein.

[Abbildung 4.12](#) zeigt einen Vergleich unter Annahme höherer Modulwirkungsgrade von 20%, bei gleichem Eigenbedarf von 1925kWh/a, gleichen Gesamtpreisen, gleichbleibender Kollektorfläche und der daraus resultierenden Erhöhung der Anlagenleistung auf 7200W. Beide PV-Anlagen speisen zu leicht geförderten 10 cent/kWh in das Netz ein. Auf jegliche Investitionsförderungen wurde verzichtet. Als Ergebnis erhält man eine PV im Netzparallelbetrieb, die für dieses Szenario bereits annähernd die selben Kosten hat, wie ein ausschließlicher Strombezug aus dem Netz. Außerdem ist ersichtlich, dass bei weiterer Erhöhung der Wirkungsgrade bzw. bei sinkenden Herstellungskosten, die Photovoltaik bei Einhaltung aller Prognosen in absehbarer Zukunft auch ungefördert am Markt bestehen kann.

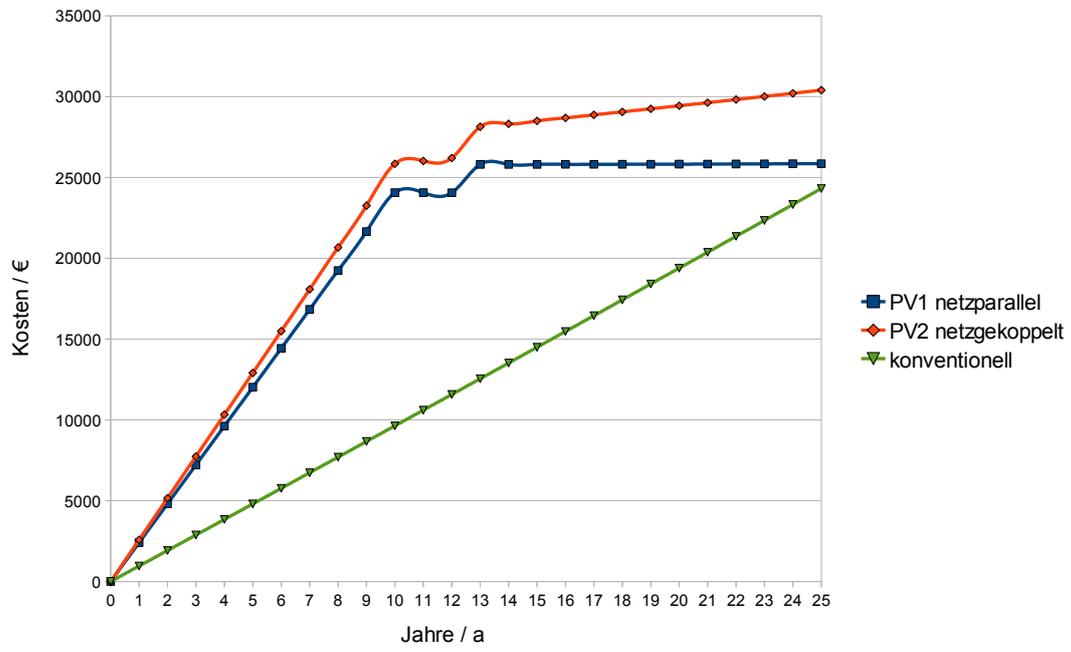


Abbildung 4.12: Mögliches Zukunftsszenario für PV-Systeme

Kapitel 5

Fazit

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der ökonomischen Analyse von Wärmeenergiesystemen für Haushalte. Das anschließende Fazit behandelt somit in erster Linie diese Thematik. Nachdem im vorigen Kapitel aber auch Photovoltaiksysteme betrachtet wurden, wird auch dies am Ende des Kapitels kurz diskutiert.

Hauptziel dieser Arbeit war es herauszufinden, welche Haushaltswärmesysteme im Langzeitvergleich derzeit am kostengünstigsten sind. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die Berechnungen an einem Niedrigenergiehaus durchgeführt wurden und die quantitativen Ergebnisse somit lediglich für diese konkret definierte Umgebung Gültigkeit haben. Mit dem entwickelten Kalkulationsprogramm wurden, in Abstimmung mit Fachexperten, anschließend aber auch noch andere Umgebungen wie Niedrigstenergiehäuser, Reihenhäuser oder Neubauten mit standardmäßigen HWB geprüft.

Für Gebäude mit ähnlichem Energiebedarf konnte dabei Folgendes festgestellt werden: Die Wärmepumpensysteme schneiden im Vergleich über 25 Jahre immer deutlich besser ab als die Referenzsysteme, wobei die Luft-Wärmepumpe noch vor dem Erdkollektorsystem liegt. Gastherme und Pelletofen liegen in direkter Gegenüberstellung etwa gleich. Da die Investitionskosten der Anlagen aber nicht linear mit dem Energiebedarf steigen, muss für Gebäude mit höherem Energiebedarf eine eigene Analyse durchgeführt werden, um eine derartige Kostenreihung zu erhalten. Dies liegt unter anderem daran, dass die Systemkosten bei Gasheizungsanlagen bis in hohe Leistungsbereiche annähernd konstant bleiben und die Investitionskosten inklusive Montage somit auch nur geringfügig steigen. Bei den anderen Systemen hingegen, führen höhere Leistungen auch zu deutlich höheren Kapitalkosten. Das hier gewählte Niedrigenergiehaus hat beispielsweise einen Leistungsbedarf von 6500W, wofür eine Gastherme von 15kW Nennleistung gewählt wurde, während die drei weiteren Systeme maximale Nennleistungen von 8kW haben. Die 15kW-Gastherme könnte, bei gleichbleibenden Investitionskosten, auch für ein Gebäude mit doppeltem Leistungsbedarf verwendet werden. Für die anderen Systeme müsste man dafür jedoch eine Type mit gesteigerter Nennleistung wählen, was mit deutlich höheren Kosten einhergeht. Vor allem bei Wärmepumpen führt eine Leistungserhöhung zu erheblichen Mehrkosten, da sich nicht nur die im Haus aufgestellte Innenanlage ändert, sondern auch die Außenkomponenten größere Dimensionen aufweisen.

Gebäudetypen mit höherem Leistungsbedarf als Einfamilienhäuser wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht geprüft. Es kann also nicht gesagt werden, bis zu welchem Gebäudeenergiebedarf die vorliegende Analyse ihre qualitative Gültigkeit behält. Größere Gebäude erfordern zwar, je nach System, höhere Investitionskosten, aber auch die Verbrauchs- und Betriebskosten steigen dementsprechend. Wie sich die Gewichtung der unterschiedlichen Kostenarten dabei ändert, kann nur über genaue Berechnungen fest-

gestellt werden. Neben den hier verwendeten technischen Parametern sind beispielsweise bei Geschäftsgebäuden oder Wohnbauten zusätzlich noch Gleichzeitigkeiten, Faktoren für den Wärmeaustausch der Gebäuderegionen untereinander, Oberflächen-Volumsverhältnisse und viele andere Parameter einzurechnen. Kennt man diese jedoch und sind auch die geänderten Investitionskosten bekannt, so kann man eine Kostenanalyse über das in dieser Arbeit erstellte *Calc-Programm* problemlos durchführen. Denn abgesehen von den eventuell unterschiedlichen Förderungszahlungen, gibt es bei den sonstigen ökonomischen Parametern keine weiteren Änderungen.

Im Allgemeinen bietet diese Arbeit einen anschaulichen Wirtschaftlichkeitsvergleich für Fachunternehmen und Leute, die gerade im Begriff sind, ein eigenes Haus zu bauen. Es wird dabei in erster Linie über die Gesamtkosten der einzelnen Systeme im Niedrigleistungsbereich Auskunft gegeben. Zusätzlich wurden auch die aktuellen oberösterreichischen Fördermodalitäten miteingerechnet und konnten somit ökonomisch näher analysiert werden. Es wurde etwa gezeigt, dass Wärmepumpen auch ohne jegliche Förderungen deutlich kostengünstiger sind als die Referenzsysteme. Oder dass der Pelletofen unter Berücksichtigung der oberösterreichischen Investitionsförderung bei einem gegenüber der Betrachtungszeit verkürztem Kreditzeitraum billiger ist als die Gastherme.

Vergleichbare, konkrete Analyseergebnisse sind den Käufern von Wärmesystemen in den meisten Fällen nicht bekannt. Viele Kunden informieren sich über Freunde und Bekannte, entsprechende Messen und das Internet. Hierbei stoßen sie dann auf viele und zumeist sehr unterschiedliche, teilweise auch widersprüchliche Informationen. Für branchenferne Käufer ist es dabei äußerst schwierig festzustellen, was für das von ihnen geplante Haus das ökonomisch günstigste System wäre. Dies lässt vermuten, dass sie nicht nur nach determinierten und rationalen Gesichtspunkten auswählen, sondern sich auch durch ihr Gefühl leiten lassen. Wie und vor allem wie stark nun Investitionskosten, laufende Kosten, ökologische Aspekte und andere, irrationale Werte in die Kaufentscheidung einfließen, wurde in dieser Arbeit nicht behandelt. Es erscheint allerdings sehr sinnvoll, genau in dieser Richtung weiterzuforschen. Denn mit spezifischen Daten über die Einflussparameter der Kaufentscheidung, könnte in Verbindung mit den hier erhaltenen, rein ökonomischen Ergebnissen darüber Auskunft gegeben werden, wie die aktuellen Fördermodalitäten zu verbessern wären, um einzelne Systeme spezifisch zu fördern und ökologische Ziele zu erreichen.

Unterzieht man die Energieanlagen dann noch einer makroökonomischen Analyse, so können die Subventionsstrukturen, einen entsprechenden politischen Willen vorausgesetzt, auf den höchstmöglichen makroökonomischen Gewinn ausgerichtet werden. Theoretisch würde dies bedeuten, dass bei Berücksichtigung aller Externalitäten die Produzenten- als auch die Konsumentenrente maximiert würden.

Die vorliegende Arbeit stellt im engeren Sinn aber lediglich eine mikroökonomische Analyse für Haushaltsenergiesysteme dar. Sie ist sehr nahe an der Praxis orientiert und bietet daher hauptsächlich Ergebnisse und Schlussfolgerungen für Kunden bzw. Unternehmen, die im Installationsbereich tätig sind. Mit zwei weiteren Studien über die Einflussparameter bei der Kaufentscheidung und einer makroökonomischen Analyse über die realistischen Ausbaupotentiale und die entstehenden externen Effekte, könnten aber auch Politiker und andere Entscheidungsträger erreicht werden. Das vorliegende Arbeitsfeld könnte damit umfassend analysiert werden. Dadurch wäre es möglich, derzeitige Fördermodalitäten näher zu untersuchen und zu verbessern. Weiters könnten über entsprechende Subventionen, Regulierungen oder sonstige Steuerungsinstrumente Impulse gegeben werden, die mithelfen, die gesamte Energiewirtschaft in eine neue Richtung zu bewegen.

Es sei hier nochmals eindringlich darauf hingewiesen, dass alleinig auf Basis der eruierten mikroökonomischen Resultate, keinesfalls Entscheidungen getroffen werden sollten. Die in der Arbeit abgeleiteten Schlussfolgerungen bezüglich der Förderungsmodalitäten sind also nur als Anregung zu verstehen und bedürfen für eine Umsetzung weiterer makroökonomischer Analysen. Sie stellen lediglich einen einzigen Blickwinkel der ökonomischen Gesamtbilanz des Arbeitsfeldes dar. Würde man beispielsweise aufgrund der vorliegenden Ergebnisse stark erhöhte WP-Förderungen einführen, sodass zukünftig fast nur noch Wärmepumpen für die Heizungen von Einfamilien- und Reihenhäusern verwendet werden, hätte das den Effekt einer rasant ansteigenden Stromnachfrage. Um diese decken zu können, müsste man zahlreiche neue Kraftwerke bauen, was zu erhöhten Strompreisen führt. Wenn innerhalb kurzer Zeit neue Kraftwerke entstehen sollen, ist weiters zu bedenken, dass diese auch billig in der Anschaffung sein müssen. Wie aber vorliegende Arbeit am Beispiel der Gasheizungen lehrt, gibt es Energieerzeugungstechnologien, die zwar geringe Investitionskosten haben, allerdings teuer im Betrieb und Verbrauch sind. Der Bau solcher zusätzlichen Anlagen würde also erneut die Stromkosten erhöhen und der angenommene Vorteil von Wärmepumpen gegenüber den anderen Systemen mindert sich bereits nach kurzer Zeit ¹. Außerdem basieren die kurzfristig als billig anzusehenden Stromerzeugungstechnologien noch hauptsächlich auf fossilen Energieträgern. Diese haben aber bei direkter Verbrennung einen deutlich höheren Wirkungsgrad als bei vorheriger Umwandlung in elektrische Energie. Mit weiterem Einbezug der Verteilungsverluste kommt es also noch zusätzlich zu hohen Effizienzverlusten.

Auch beim Pelletofen, der laut dieser Studie verglichen mit den WP-Anlagen ökonomisch eher schlecht abschneidet, kann man ein ähnliches Gedankenexperiment vollziehen: Der hauptsächlichliche Kauf von Wärmepumpen würde zum Einbruch der Pelletnachfrage führen. Viele österreichische Arbeitsplätze gingen verloren. Ob diese über den Wärmepumpenmarkt wieder alle ersetzt werden könnten ist fraglich. Denn erstens beinhaltet der österreichische Pelletmarkt auch die Erzeugung des Rohstoffs und somit zahlreiche Stellen in der Forstwirtschaft und zweitens liegen österreichische Hersteller bei der Pellettechnologie im absoluten Spitzenfeld. Auch bei den Wärmepumpen sind die heimischen Unternehmen stark vertreten, allerdings gibt es hier schon eine deutlich größere ausländische Konkurrenz am Markt. Neben der Arbeitsplatzthematik ist auch die Diversifizierung zu bedenken. Je weniger verschiedene Energieträger bzw. Marktteilnehmer es gibt, desto stärker steigen die Preise. Der Rückgang des Rohstoffs Holz als Energieträger würde also wiederum die Stromnachfrage erhöhen. Diese kann zwar über unterschiedliche Technologien auch diversifiziert werden, es braucht aber Zeit um das im langfristigen Rahmen auf ökonomisch sinnvolle Weise durchzuführen ². Auch dies unterstreicht die Bedeutung einer gemeinsamen Vorgehensweise bei der Wärme- und Elektroenergieerzeugung. Neben den genannten Parametern ist noch zu erwähnen, dass der Pelletofen bezüglich der Öko-Performance am besten abschneidet. Externe Kosten aufgrund von Umwelt- bzw. Gesundheitsschäden anderer Technologien sind somit auch noch einzurechnen und verschlechtern das Gesamtergebnis der ökonomischen Maßnahme einer alleinigen WP-Förderung noch weiter.

An diesen Beispielen sieht man sehr deutlich, dass eine wirtschaftliche Gesamtbeurteilung der hier behandelten Haushaltsenergiesysteme viel zusätzliche Informationen beinhalten muss, die weit über das in dieser Arbeit Gesagte hinausgehen. Erst unter Be-

¹Solch drastisch geänderte Gegebenheiten würden eine komplette Neuberechnung der Systemanalyse erfordern. Es ist somit erkennbar, dass aufgrund der vorliegenden Ergebnisse getroffene Entscheidungen zu Marktveränderungen führen, welche dann wiederum auf die mikroökonomische Analyse rückwirken.

²Die Begründung dafür ist die Gleiche wie am Ende des vorigen Absatzes.

rücksichtigung weiterführender makroökonomischer Untersuchungen können demnach Gesamtaussagen über das Arbeitsfeld gemacht und entsprechende Entscheidungen bezüglich der Verbesserung des Subventionssystems gefällt werden.

Ein weiterer diskussionswürdiger Punkt dieser Arbeit ist die Zukunftsanalyse. Um konkrete Berechnungsergebnisse zu erhalten, musste für den vorliegenden Langzeitvergleich auch die zukünftige Wirtschaftsentwicklung prognostiziert werden. Da diese neben den ökonomischen und technischen auch noch von einer Vielzahl an politischen Parametern abhängt, stellen die verwendeten Preissteigerungsraten vermutlich den größten Unsicherheitsfaktor dar. Alle zeitlich veränderlichen Variablen wurden anhand der Daten der letzten 14 Jahre festgelegt. Als Berechnungsgrundlage diente der Verbraucherpreisindex von 1996 (VPI 96) und der darin enthaltene Energiepreisindex (EPI 96), der in verschiedene Rohstoffpreise aufgeschlüsselt werden kann. Die Energiepreise haben sich im letzten Jahrzehnt aber stärker geändert als in den Jahren zuvor und die Steigerungsraten der Zukunft könnten laut Experteneinschätzungen sogar noch höher liegen. Diese Tatsachen können bei den Berechnungen aber kaum beachtet werden, wodurch zwei konkrete Verbesserungsvorschläge zu formulieren sind:

1. Zur Betrachtung verschiedener Zukunftsmodelle sollten die Berechnungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Steigerungsraten durchgeführt werden. Dies wurde über die für manche Analysen veränderte Strompreis-Steigerungsrate auch beachtet, jedoch handelte es sich dabei immer um eine reine *Ceteris - Paribus* - Veränderung. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Variablen miteinander korrelieren. Nimmt man also einen steigenden Strompreis an, so ergibt sich in der Regel auch eine Steigerung der anderen Energiepreise. Denn erhöht sich der Preis einer Ressource, so vergrößert sich dementsprechend die Nachfrage nach einer anderen Ressource, wodurch sich deren Preis wieder erhöht. Über eine ökonometrische Regressionsanalyse der vergangenen Preis- und Nachfragefunktionen lassen sich dann Preis- und Nachfrageelastizitäten berechnen, über die man in weiterer Folge auf die Korrelation der Variablen schließen kann. Erst über solche mathematisch-dynamischen Beziehungen der Veränderlichen untereinander lassen sich, abseits einer Festlegung über vergangene Preisänderungen mittels VPI, weitere Zukunftsmodelle erstellen, die wissenschaftlichen Ansprüchen genügen.
2. Ein zweiter Verbesserungsvorschlag bezieht sich auf die Einbindung einmaliger Ereignisse wie etwa die Ölpreisschocks der 1970er Jahre oder Wirtschafts- und Finanzkrisen. In solchen Fällen kommt es meist zu un stetigen Preisänderungen, die ebenfalls in eigenen Zukunftsszenarien zu berücksichtigen wären. Für die Quantifizierung solcher Ereignisse müsste man Energieexperten aus dem Bereich der Wirtschaftswissenschaften befragen und deren Prognosen in entsprechenden Modellen ausgewerten.

Um die mikroökonomische Analyse zu vervollständigen, wäre es also weiters notwendig, anhand der beiden zuvor genannten Verbesserungen, Zukunftsszenarien zu definieren und diese dann erneut im *Calc-Programm* zu berechnen³. Derzeit orientiert sich diese Arbeit nur an einem Zukunftsmodell, welches mit Bezug auf die Vergangenheit, aufgrund von Expertenaussagen und nach Einschätzung des Autors auf Basis der umfassenden Literaturanalyse auch ein durchaus wahrscheinliches Szenario darstellt. Obgleich die Steigerungsraten mit Bezug auf die derzeit aktuellen Werte durchaus niedrig gewählt wurden

³Der Einfluss von einmaligen *Schockereignissen* kann im *Calc-Programm* derzeit noch nicht berechnet werden. Die Implementierung würde aber keine große Änderung bedeuten und ist in kurzer Zeit zu bewerkstelligen.

und auch Schockereignisse wie etwa die Wirtschaftskrise von 2008 keine Beachtung fanden. Es wäre somit durchaus sinnvoll, zusätzlich zu den hier gewählten Annahmen noch andere Szenarien zu entwickeln. Diese könnten, unter Einschätzung der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens, hilfreiche Erkenntnisse für die Zukunft des Energiemarkts liefern.

Bei den Photovoltaikanlagen konnte festgestellt werden, dass diese unter österreichischen Strahlungsverhältnissen derzeit noch nicht konkurrenzfähig sind, verglichen mit konventionellem Strombezug. Beide geltenden Fördervarianten machen die PV-Systeme aber unabhängig ihrer Netzanbindung zur lukrativen Zukunftsinvestition. Aus einschlägigen Studien ist ebenfalls bekannt, dass die in Österreich praktisch ungeforderten Mikro-KWK-Anlagen für Einfamilienhäuser derzeit noch keine wirtschaftliche Alternative zu den anderen hier betrachteten Heizsystemen darstellen⁴. Wie auch bei den Photovoltaikanlagen, könnte die Stromeinspeisung über solche Anlagen bis zu einem gewissen Grad der Dezentralisierung aber viele Vorteile mit sich bringen. Hierfür wäre es sinnvoll, eine technische Analyse der Auswirkungen auf das Verteilernetz durchzuführen. Um Subventionssysteme zu verbessern, oder im Falle der Mikro-BHKW's überhaupt erst einzuführen, sei aber auch hier auf die Notwendigkeit einer makroökonomischen Studie verwiesen.

Insgesamt liegt mit dieser Arbeit ein im Hinblick auf die mikroökonomische Betrachtung recht umfassende Analyse diverser Haushaltsenergiesysteme vor. Durch entsprechende weiterführende Studien wäre es daher möglich, einen ausführlichen Gesamtüberblick des Arbeitsfeldes zu bekommen.

⁴Lediglich Niederösterreich hat seit 01.01.2011 ein konkretes Förderungssystem für Biomasse-BHKW's (siehe Abschnitt 2.7.3 (Seite 38))

Anhang A

Berechnungen von Kapitel 3 & 4

Die folgenden Abbildungen zeigen Ausschnitte aus dem für diese Arbeit programmierten *Calc-Programm*. Es wird hier aber lediglich auf den Vergleich der Wärmesysteme eingegangen, da die Benutzeroberfläche für die Elektrizitätssysteme derer der Wärmesysteme über weite Strecken gleicht.

Übersicht: Der Tabellenreiter *Übersicht* beschreibt das Niedrigenergiehaus ansich. Hier können über den Button *Projektdatein eingeben* die Parameter des Niedrigenergiehauses berechnet werden.

Projektdatein eingeben	Wirtschaftlichkeitsberechnung	
Das vorliegende Programm soll die Energiesysteme Gaskessel, Holzsysteme, und verschiedene Wärmepumpenanlagen miteinander vergleichen. Der Vergleich kann für verschiedenen Haustypen durchgeführt werden. Auf dieser ersten Seite kann der entsprechende Haustyp definiert werden. Zur Auswahl steht ein Niedrigenergiehaus, ein Niedrigstenergiehaus & ein Passivhaus mit dem jeweiligen spezifischen Heizwärmebedarf!		
Projektname:	Masterarbeit	
Kundenname:	Stockinger Stefan	
Adresse:	1090 Wien	
Aktuelles Datum:	20.04.11	
Haustyp auswählen :	Niedrigenergiehaus	
spezifischer Heizbedarf :	50,0	kWh/m ² a
Wohnfläche :	160,0	m ²
Betriebsdauer :	1800,0	h/a
Heizwärmebedarf pro Jahr :	8000,0	kWh/a
spez. Leistungsbedarf :	27,8	W/m ²
Leistungsbedarf des Hauses : (inklusive 2000W für Brauchwasser)	6444,4	W
Wärmebedarf für Brauchwasser :	3500,0	kWh/a

Abbildung A.1: Darstellung des Tabellenreiters *Übersicht*

[Abbildung A.2](#) zeigt die Eingabeoberfläche, die über den Button *Projektdatein eingeben* aufgerufen wird. Zusätzlich zur Auswahl des jeweiligen Haustyps kann der spezifische Heizwert auch manuell eingegeben werden.

Auf den folgenden Seiten sind alle weiteren Reiter und Eingabeoberflächen für den Wärmesystemvergleich dargestellt. Sie werden aber hier nicht weiter beschrieben, da die Bedienung des Programms über die Theorie der vorliegenden Masterarbeit ohnehin klar sein müsste. Eines sei allerdings noch gesagt, bei jeglicher Veränderung der ökonomi-

schen Daten, muss im Anschluss der Button *Tabelle berechnen* gedrückt werden, um die neuen Analyseergebnisse und Kennlinien zu erhalten.

Projektname :

Kundenname :

Adresse :

Wohnfläche : m²

Betriebsdauer : h/a

Wärmebedarf für Brauchwasser : kWh/a

spezifischer Heizwert - manuelle Eingabe : kWh/m²a

Abbildung A.2: Eingabeoberfläche des Tabellenreiters *Übersicht*

Ökonomische Daten eingeben	Ökonomische Daten			
Hier werden die ökonomischen Randdaten wie Nutzungsdauer, Preise, Zinssätze, Steigerungsraten, etc. eingegeben.				
Betrachtungszeitraum n:	<input type="text" value="25 Jahre"/>			
Energie- & Rohstoffpreise:				
Gaspreis aktuell :	0,0755	€/kWh	7,55	cent/kWh
Steigerungsrate :	1,61	%		
Strompreis aktuell (WP) :	0,1250	€/kWh	12,50	cent/kWh
Steigerungsrate :	0,13	%		
Holzpreis / Pelletspreis aktuell :	0,0471	€/kWh	4,71	cent/kWh
Steigerungsrate :	0,56	%		
Sollzinsen für Kredit – q (in %) :	4,18	%		
Habenzinsen – qh (in %) :	0,74	%		
allgemeine Preissteigerungsrate :	1,75	%		
Strompreis für Betriebsmittel :	0,1915	€/kWh	19,15	cent/kWh

Abbildung A.3: Darstellung des Tabellenreiters *Ökonomie*

Ökonomische Daten eingeben

Geben Sie den aktuellen Gaspreis an : cent/kWh

mittlere jährliche Steigerungsrate (Gas) : %

Geben Sie den aktuellen Strompreis an (WP) : cent/kWh

mittlere jährliche Steigerungsrate (Strom) : %

Geben Sie den aktuellen Holzpreis an : cent/kWh

mittlere jährliche Steigerungsrate (Holz) : %

Kreditzinssatz q (Sollzinsen) : %

Habenzinsen : %

allgemeine Preissteigerungsrate : %

Strompreis der Betriebsmittel : cent/kWh

Abbildung A.4: Eingabeoberfläche des Tabellenreiters *Ökonomie*

Technische Daten festlegen		Technische Daten			
In dieser Tabelle können die einzelnen technischen Komponenten des Wärmepumpensystems, Holzsystems, als auch die Daten des Gaskessels definiert und berechnet werden.					
WP:					
Wärmequelle :	Erdkollektor				
Wärmenutzungsanlage :	Fußbodenheizung				
Energiebedarf :	11500	kWh/a			
Jahresarbeitszahl Heizung :	4,6		1		
Jahresarbeitszahl Warmwasser :	4		1		
Elektrischer Gesamtbedarf :	2614,1	kWh/a		Mehrbedarfs - Faktor f_{MB} :	1,03 E / W
Gesamtbedarf (Eel * f) :	2692,6	kWh/a			1,1 Luft
Solarthermische Unterstützung WP :	0,0	kWh/a		Energiebedarf WP-Sol :	2692,6 kWh/a
Prozentual :	0	%			
GT:					
Gastherme - Gesamtbedarf :	11500,0	kWh/a			
Wirkungsgrad :	95	%			
Systembedarf (E / n) :	12105,3	kWh/a		Mehrbedarfs - Faktor $f_{G_{MB}}$:	1,03 Gas allg.
Solarthermische Unterstützung GT :	0,0	kWh/a		Elektr. Energie für Betrieb (fG) :	363,2 kWh/a
Prozentual :	0	%		Energiebedarf GT-Sol :	12105,3 kWh/a
Holz:					
Holzsystem - Gesamtbedarf :	11500,0	kWh/a			
Wirkungsgrad :	86	%			
Systembedarf (E / n) :	13372,1	kWh/a		Mehrbedarfs - Faktor $f_{H_{MB}}$:	1,04 Holz allg.
Solarthermische Unterstützung Holz :	0,0	kWh/a		Elektr. Energie für Betrieb (fH) :	534,9 kWh/a
Prozentual :	0	%		Energiebedarf Holz-Sol :	13372,1 kWh/a

Abbildung A.5: Darstellung des Tabellenreiters *Technik*

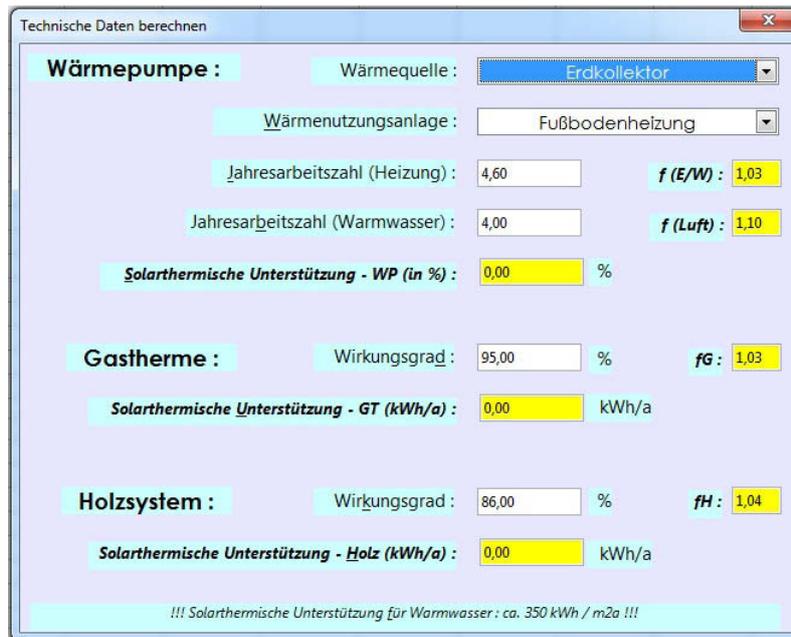


Abbildung A.6: Eingabeoberfläche des Tabellenreiter *Technik*

```

mycell = mysheet.getCellRangeByName("$E$15") ' Faktoren beschreiben
dlg.GetControl ("NumericField8").setValue(mycell.value)

mycell = mysheet.getCellRangeByName("$E$16")
dlg.GetControl ("NumericField9").setValue(mycell.value)

mycell = mysheet.getCellRangeByName("$E$26")
dlg.GetControl ("NumericField10").setValue(mycell.value)

mycell = mysheet.getCellRangeByName("$E$35")
dlg.GetControl ("NumericField11").setValue(mycell.value)

dlg.Execute()

mycell = mysheet.getCellRangeByName("$B$12")
mycell.value = (dlg.GetControl ("NumericField1").getValue()) ' JAZ Heizung
JH = mycell.value
if JH <= 0 then
    JH = 1
    MsgBox "Die Jahresarbeitszahl (Heizung) muss größer 0 sein -> JH wird auf 1 gesetzt !"
    mycell.value = JH
End if

mycell = mysheet.getCellRangeByName("$B$13")
mycell.value = (dlg.GetControl ("NumericField2").getValue()) ' JAZ WW
JW = mycell.value
if JW <= 0 then
    JW = 1
    MsgBox "Die Jahresarbeitszahl (Warmwasser) muss größer 0 sein -> JW wird auf 1 gesetzt !"
    mycell.value = JW
End if

mycell = mysheet.getCellRangeByName("$B$7")
mycell.string = (dlg.GetControl ("ListBox1").SelectedItem())
if mycell.string = "Luft" then
    mycell = mysheet.getCellRangeByName("$E$16")
    mycell.value = (dlg.GetControl ("NumericField9").getValue())
    f = mycell.value
Else
    mycell = mysheet.getCellRangeByName("$E$15")
    mycell.value = (dlg.GetControl ("NumericField8").getValue())
    f = mycell.value
End if

```

Abbildung A.7: Ausschnitt eines Programmteils, der im Tabellenreiter *Technik* hinterlegten Makro-Programmierung

Eingabe	Tabellen berechnen	Kreditlaufzeit berechnen (WP)	Berechnung
In dieser Tabelle werden nun die eigentlichen Berechnungen durchgeführt.			
Wärmepumpensystem		Gastherme (vgl. WP)	
IVK – Wärmepumpensystem :	18000 €	IVK – Gastherme :	9700 €
IVK – Förderung :	0 €	IVK – Förderung :	0 €
VK & BK Jahr 1 :	336,6 €/a	Verbrauchskosten Jahr 1 :	913,9 €/a
		Betriebskosten Jahr 1 :	69,5 €/a
Instandsetzungs – Faktor fK :	0 1	Instandsetzungs – Faktor fK :	0 1
Annuitätsfaktor a :	0,065 1	Annuitätsfaktor a :	0,065 1
Annuität – Kapital – A (K) :	1174,2 €	Annuität – Kapital – A (K) :	632,8 €
Annuität – V & B – A (V & B) :	340,9 €	Annuität – V & B – A (V & B) :	1147,9 €
gesamte Annuität A (N) :	-1515,2 €	gesamte Annuität A (N) :	-1780,7 €
Gesamtkapital des Kunden :	0 €	Restkapital des Kunden :	0 €
Kredithöhe :	18000 €	Kredithöhe :	9700 €
Kredit (in % der IVK) :	100 %	Kredit (in % der IVK) :	100 %
Laufzeit :	10 a	Laufzeit :	10 a
Rückzahlungsfaktor :	0,124 1	Rückzahlungsfaktor :	0,124 1
Rückzahlung pro Jahr :	2239,17 €	Rückzahlung pro Jahr :	1206,66 €
Kreditkosten KK		Kreditkosten KK	
monatliche Zahlung – Kredit :	186,6 €/m	monatliche Zahlung – Kredit :	100,56 €/m
monatl. Gesamtkosten – Jahr 1 :	214,6 €/m	monatl. Gesamtkosten – Jahr 1 :	182,5 €/m
Barwertfaktor – Kapital b (IN) :	18,34 1	Barwertfaktor – Kapital b (IN) :	18,34 1
Barwertfaktor – b (V & B) :	15,53 1	Barwertfaktor – bV :	18,07 1
		Barwertfaktor – bB :	15,53 1
preisdynamische Annuitätsfaktoren :		preisdynamische Annuitätsfaktoren :	
ba (IN) :	1,2 1	ba (IN) :	1,2 1
ba (V & B) :	1,01 1	baV :	1,18 1
		baB :	1,01 1
Strompreis WP – Jahr 1 :	0,1250 €/kWh	Gaspreis – Jahr 1 :	0,0755 €/kWh
Steigerungsrate Strom r(S) :	1,0013 1	Steigerungsrate Gas r(G) :	1,0161 1
VK – Wärmepumpe :	2692,6 kWh/a	VK – Gastherme :	12105,3 kWh/a
BK – Wärmepumpe :	/ kWh/a	BK – Gastherme :	363,2 kWh/a
Steigerungsrate Preise r :	1,0175 1		
Zinsfaktor q :	1,0418 1		
Betrachtungszeitraum T :	25 a		
Habenzinsfaktor qh :	1,0074 1		
Strompreis BM – Jahr 1 :	0,1915 €/kWh		

Abbildung A.8: Ausschnitt des Tabellenreiters *Berechnung*

Endgültige Berechnung

zur Verfügung stehendes Kapital des Kunden : €
(danach richtet sich der benötigte Kreditbetrag)

Wärmepumpensystem :		Gastherme :	
Investitionskosten - Wärmepumpensystem :	<input type="text" value="18000,00"/> €	IVK - Gastherme :	<input type="text" value="9700,00"/> €
Investitionsförderung WPS : (inklusive Solarthermie)	<input type="text" value="0,00"/> €	(IF Solarthermie) :	<input type="text" value="0,00"/> €
Instandsetzungsfaktor fK - WP (VDI) :	<input type="text" value="0,00"/> 1	fK - GT (VDI) :	<input type="text" value="0,00"/> 1
Laufzeit des Kredits - WP :	<input type="text" value="10,00"/> a	LZ Kredit - GT :	<input type="text" value="10,00"/> a

Abbildung A.9: Ausschnitt der Eingabeoberfläche des Tabellenreiters *Berechnung*

Dynamische Analyse (HPS – GTS)

Gastherme								
n	Jahr	Gaspreis €/kWh	BK&VK / Jahr €/a	KK / Jahr €/a	Kontostand vor Z (€)	Kontostand nach Z (€)	Zins-Ertrag (€/a)	Gesamt - kosten (€)
0					0	0	0	0,00
1	2011	0,076	983,49	1206,66	756,39	761,99	5,60	2190,15
2	2012	0,077	998,30	1206,66	1507,23	1518,38	11,15	4395,11
3	2013	0,078	1013,34	1206,66	2252,27	2268,93	16,67	6615,12
4	2014	0,079	1028,62	1206,66	2991,23	3013,37	22,14	8850,40
5	2015	0,080	1044,15	1206,66	3723,86	3751,42	27,56	11101,21
6	2016	0,082	1059,93	1206,66	4449,87	4482,80	32,93	13367,80
7	2017	0,083	1075,95	1206,66	5168,99	5207,24	38,25	15650,42
8	2018	0,084	1092,24	1206,66	5880,93	5924,45	43,52	17949,32
9	2019	0,086	1108,79	1206,66	6585,39	6634,12	48,73	20264,77
10	2020	0,087	1125,60	1206,66	7282,07	7335,96	53,89	22597,03
11	2021	0,089	1142,68	1206,66	7982,07	8035,96	58,95	25000,00
12	2022	0,090	1160,03	1206,66	8682,07	8735,96	64,01	27499,74
13	2023	0,091	1177,67	1206,66	9382,07	9435,96	69,07	30000,00
14	2024	0,093	1195,58	1206,66	10082,07	10135,96	74,13	32500,00
15	2025	0,094	1213,78	1206,66	10782,07	10835,96	79,19	35000,00
16	2026	0,096	1232,28	1206,66	11482,07	11535,96	84,25	37500,00
17	2027	0,097	1251,07	1206,66	12182,07	12235,96	89,31	40000,00
18	2028	0,099	1270,16	1206,66	12882,07	12935,96	94,37	42500,00
19	2029	0,101	1289,55	1206,66	13582,07	13635,96	99,43	45000,00
20	2030	0,102	1309,26	1206,66	14282,07	14335,96	104,49	47500,00
21	2031	0,104	1329,29	1206,66	14982,07	15035,96	109,55	50000,00
22	2032	0,106	1349,63	1206,66	15682,07	15735,96	114,61	52500,00
23	2033	0,107	1370,30	1206,66	16382,07	16435,96	119,67	55000,00
24	2034	0,109	1391,31	1206,66	17082,07	17135,96	124,73	57500,00
25	2035	0,111	1412,65	1206,66	17782,07	17835,96	129,79	60000,00
							1158,28	

Abbildung A.10: Ausschnitt des Tabellenreiters *Dynamische Analyse HPS - GTS - Teil 1*

Differenzkosten HS - GT (€/a)	Vergleichskosten € gesamt	n
	0	25
756,39	909,48	24
745,24	889,5	23
733,88	869,5	22
722,3	849,49	21
710,49	829,47	20
698,46	809,43	19
686,19	789,37	18
673,68	769,29	17
660,94	749,2	16
647,95	729,08	15
-372,91	-416,52	14
-386,4	-428,42	13
-400,15	-440,4	12
-414,16	-452,47	11
-428,43	-464,62	10
-442,97	-476,87	9
-457,79	-489,2	8
-472,89	-501,62	7
-488,27	-514,14	6
-503,95	-526,74	5
-519,91	-539,44	4
-536,18	-552,23	3
-552,75	-565,11	2
-569,62	-578,09	1
-586,82	-591,16	0
	-656,81	

Abbildung A.11: Ausschnitt des Tabellenreiters *Dynamische Analyse HPS - GTS* - Teil 2

Wirtschaftlicher Vergleich – Ausgabeblatt						
Projektname:	Masterarbeit		WPS:			
Kundenname:	Stockinger Stefan					
Adresse:	1090 Wien		VK & BK (Jahr 1): 337 €/a			
Aktuelles Datum:	20.04.11		Kredithöhe: 18000 €			
			Laufzeit: 10 a			
			monatliche Kreditkosten: 187 €/m			
Haustyp:	Niedrigenergiehaus		GTS:			
spezifischer Heizbedarf:	50	kWh/m²a				
Wohnfläche:	160	m²				
Heizwärmebedarf pro Jahr:	8000	kWh/a	VK & BK (Jahr 1): 914 €/a			
Leistungsbedarf des Hauses:	6444,44	W	Kredithöhe: 9700 €			
Bedarf für Brauchwasser:	3500	kWh/a	Laufzeit: 10 a			
			monatliche Kreditkosten: 101 €/m			
Gaspreis aktuell:	7,55	cent/kWh	HS:			
Strompreis aktuell:	12,5	cent/kWh				
Holzpreis aktuell:	4,71	cent/kWh				
Sollzinsen:	4,18	%				
Habenzinsen:	0,74	%	VK & BK (Jahr 1): 630 €/a			
Wärmepumpensystem WPS:	2692,55	kWh/a	Kredithöhe: 17800 €			
Solarthermische Unterstützung:	0	%	Laufzeit: 10 a			
Gasthermensystem GTS:	12105,26	kWh/a	monatliche Kreditkosten: 185 €/m			
Solarthermische Unterstützung:	0	%	Vergleich – Annuitätenmethode:			
Holzsystem HS:	13372,09	kWh/a	WPS – Kosten nach 25J: 30938 €			
Solarthermische Unterstützung:	0	%	GTS – Kosten nach 25J: 41692 €			
Kosten WPS:	18000	€	HS – Kosten nach 25J: 41595 €			
Kosten GTS:	9700	€				
Kosten HS:	17800	€	DV inkl. Opportunität:			
Gesamtkapital des Kunden:	0	€				
			Ersparnis WPS → GTS (nach 25J): € 11.036 WPS!			
			Ersparnis HS → GTS (nach 25J): -€ 657 GTS!			

Abbildung A.12: Ausschnitt des Tabellenreiters *Ausgabe*

Glossar

Altholz	Die Definition von Altholz und insbesondere die Abgrenzung zu Industrierestholz ist nicht immer einfach. Meist wird als Altholz (oder auch Gebrauchtholz) bezeichnet, was bereits als Endprodukt im Einsatz war, am Ende seiner technischen Lebensdauer steht und somit entsorgt werden muss. Bei Altholz lässt sich also immer eine Abfalleigenschaft erkennen. [26] - Seite 26
BIV	Der Bruttoinlandsverbrauch BIV bezeichnet den ganzen Energiebedarf eines Landes oder einer sonstigen definierten Region. Darin enthalten sind die Eigenerzeugung von Rohenergie, die Salden des Außenhandels sowie die Lagerveränderungen. Einfach ausgedrückt bezeichnet der BIV den gesamten Energiebedarf vor der Umwandlung in Kraftwerken, Heizwerken, KWK-Anlagen, Raffinerien etc. [2] - Seite 1
Brennwert	Der Brennwert ist die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs freigesetzte Wärmemenge, die verfügbar wird, wenn auch die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfes nutzbar gemacht wird. [26] - Seite 16
chemische Systeme	Sogenannte thermochemische Energiespeicher speichern Wärme durch endotherme Reaktionen und geben sie durch exotherme Reaktionen wieder ab. Voraussetzung für eine ausreichende Speicherfunktion ist es, dass die zugrunde liegenden Prozesse theoretisch reversibel ablaufen. [17] - Seite 13
CO ₂ -Äquivalent	Neben CO ₂ gibt es noch eine Vielzahl an weiteren Treibhausgasen. Bei ökologischen Vergleichen werden dabei meist die Gase CO ₂ , CH ₄ und das Stickoxid Lachgas (N ₂ O) betrachtet und deren Treibhauswirksamkeit in CO ₂ -Äquivalente umgerechnet. [16] - Seite 40
EE	Der energetische Endverbrauch EE bezeichnet jene Energiemengen, die dem Verbraucher tatsächlich für die Umsetzung in Nutzenergie zur Verfügung stehen. Dies ist beispielsweise Benzin für das Autofahren, elektrische Energie für Elektrogeräte oder auch Gas für die Raumwärme etc. Der EE umfasst somit alle umgewandelten Energieformen. Der wesentliche mengenmäßige Unterschied zum BIV sind die Umwandlungsverluste. [2] - Seite 2
Entropie	Die Entropie S ist eine der Energie verwandte Größe und wird in der Thermodynamik vor allem zum Bilanzieren verwendet.

	<p>Sie kann gespeichert, transportiert und produziert werden. Körper reagieren auf eine Entropiezufuhr mit einer Temperaturerhöhung, Volumensänderung oder einer Aggregatzustandsänderung (zB. flüssig ↔ fest). Da der Begriff sehr komplex ist, wird für weitere Erläuterungen auf entsprechende Literatur verwiesen. [17] - Seite 18</p>
Exergie	<p>Energie lässt sich in wandelbare und nicht wandelbare Teile aufteilen. Die thermodynamische Größe Exergie beschreibt, vereinfacht gesprochen, die Arbeitsfähigkeit eines Energieträgers, d.h. inwieweit der Energieträger in jede andere Energieform umgewandelt werden kann. Die Anergie hingegen bezeichnet den nicht wandelbaren Teil. [17] - Seite 35</p>
fühlbare Wärme	<p>Unter fühlbarer Wärme versteht man thermische Energie, die sich bei Zufuhr oder Abfuhr unmittelbar in eine Temperaturänderung äußert und somit direkt messbar bzw. fühlbar ist. [17] - Seite 13</p>
Gleichzeitigkeiten	<p>Über das Konzept des Gleichzeitigkeitsfaktors GZK kann, trotz kurzfristigen Mehrbedarfs ein oder mehrerer Verbraucher, der mittlere Energieverbrauch relativ genau abgeschätzt werden. Der GZK definiert also das Verhältnis aus tatsächlich benötigter Leistung einer Gruppe von Verbrauchern zur Summe der maximal benötigten Einzelleistungen. Sein Wert wird empirisch ermittelt. Analoges gilt natürlich auch für mehrere Erzeuger. - Seite 92</p>
Heizwert	<p>Unter dem Heizwert wird die Wärmemenge verstanden, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme des im Abgas befindlichen Wasserdampfes freigesetzt wird. [26] - Seite 16</p>
HWB	<p>Der Heizwärmebedarf HWB eines Gebäudes gibt an, wieviel Energie das Gebäude pro Quadratmeter innerhalb eines Jahres benötigt, um beheizt werden zu können. Seine Einheit ist kWh/m²a. [18] - Seite 11</p>
Industrierestholz	<p>Diese Art von Holz stellt meist den Verschleiß oder die Rückstände eines Produktionsvorgangs dar. Die Abgrenzung zu Altholz ist dennoch schwierig und muss von Fall zu Fall genau geprüft werden. [26] - Seite 26</p>
JAZ	<p>Die Jahresarbeitszahl JAZ einer Wärmepumpe beschreibt die im Laufe einer gesamten Heizperiode gelieferte Nutzenergie im Verhältnis zu der zugeführten Antriebsenergie. [19] - Seite 22</p>
Kapitalwert	<p>Der Kapitalwert (Barwert aller Zahlungen) ist eine betriebswirtschaftliche Kennziffer der dynamischen Investitionsrechnung. Durch Abzinsung auf den Beginn der Investition werden Zahlungen, die zu beliebigen Zeitpunkten anfallen, vergleichbar gemacht. [8] - Seite 56</p>

Kondensationsenthalpie	Die Kondensationsenthalpie oder auch Kondensationswärme ist jene Energie, die frei wird, wenn eine bestimmte Menge eines Stoffes isotherm und isobar vom gasförmigen in den flüssigen Zustand übergeht. [17] - Seite 16
Konvektion	Konvektion beschreibt die Wärmeübertragung über die Luft. Im Gegensatz zur Strahlungswärme ist Konvektion immer mit einer Luftströmung verbunden, die Teilchen befördert. - Seite 14
Landschaftspflegeholz	Holz, das bei Pflegearbeiten und Baumschnittaktivitäten in der Land- und Gartenbauwirtschaft anfällt. [26] - Seite 26
latente Wärme	Als latente Wärme bezeichnet man die bei einem Phasenübergang erster Ordnung aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge. Phasenübergänge erster Ordnung sind beispielsweise die Verdampfung, Kondensation, Schmelzung etc. [17] - Seite 13
Lignin	Lignin ist eine dreidimensional vernetzte Kohlenwasserstoffverbindung, die in die pflanzlichen Zellwände eingelagert wird und dort die Verholzung der Zelle bewirkt. [16] - Seite 25
Luftenthalpie	Die Luftenthalpie ist, bezogen auf die Außenluft, das Produkt aus Masse, Wärmekapazität und Temperatur. $H = m \cdot c \cdot T$, [17] - Seite 23
Nettoimporttangente	Die Nettoimporttangente ist der Quotient aus Importsaldo und Bruttoinlandsverbrauch. [1] - Seite 3
NO _x	NO _x ist die Summenformel für Stickstoffoxide wie NO, NO ₂ etc. Stickstoffoxide schädigen die Atmungsorgane und sind mitverantwortlich für Smogbildung und sauren Regen. Außerdem stellen die meisten NO _x -Verbindungen hochwirksame Treibhausgase dar. [16] - Seite 40
Schwelprodukte	Die Schwelung ist die Umwandlung bituminöser Substanzen bei niedrigen Temperaturen und geringer Luftzufuhr. Dabei entstehen flüssige und gasförmige Produkte wie Schwelgas, Schwelteer, Schwelöl oder das feste Schwelkoks. [35] - Seite 28
SO ₂	SO ₂ ist die Summenformel für Schwefeldioxid, welches ein farbloses, schleimhautreizendes und giftiges Gas ist. [16] - Seite 40
Sole	Sole wird verwendet, um ein Gefrieren des Arbeitsmittels im Kältekreis zu verhindern. Der Name ansich bezeichnet eine Wasser-Salz-Lösung und rührt daher, dass früher als Frostschutzmittel Salze verwendet wurden. Aufgrund von Korrosionsgefahr werden dem Wasser heutzutage aber überwiegend andere Stoffe beigemischt. [16] - Seite 22
spez. Wärmekapazität	Die Wärmekapazität gibt an, wieviel thermische Energie ein Körper abhängig der Temperaturänderung speichern kann. Die spezifische Wärmekapazität c bezieht diesen Wert dann weiters auf die Masse des Körpers. Die Einheit ist J/kgK. Wasser hat beispielsweise ein c von 4190J/kgK. Das bedeutet, um 1kg Wasser um 1°C zu erwärmen, werden 4190J benötigt. [16] - Seite 13

Strommix	Als Strommix bezeichnet man den prozentuellen Anteil der Energieträger, aus denen jener Strom erzeugt wird, den die Anbieter an die Verbraucher verkaufen. Der Strommix bezieht sich dabei nicht nur auf die im Inland erzeugte Energie, sondern auch auf die von ausländischen Anbietern zugekaufte Energie. - Seite 40
TK	Ein thermischer Kurzschluss ist eine direkte Verbindung zweier unterschiedlich warmer Regionen. - Seite 22
TS-Diagramm	Das TS-Diagramm ist neben dem pv-Diagramm das in der Thermodynamik gebräuchlichste Zustandsdiagramm zur Darstellung von Prozessen. Im TS entspricht die Fläche unter der Verlaufskurve bei reversiblen Prozessen der über die Systemgrenze zu bzw. abgeführten Wärme. Somit lässt sich der Wirkungsgrad des idealen Carnot-Prozesses (rechteckiger Prozessverlauf) direkt aus dem Flächenverhältnis ableiten. [17] - Seite 18
U-Wert	Der U-Wert ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstands. Er gibt an, welche Wärmemenge innerhalb einer Sekunde durch einen Quadratmeter eines Bauteils hindurchgeht, bei einem Temperaturunterschied von einem Kelvin. Seine Einheit ist W/m^2K . [18] - Seite 11
VPI	Der Verbraucherpreisindex <i>VPI</i> ist ein Maßstab für allgemeine Preisentwicklungen und somit auch für die Inflation in Österreich. Beim <i>VPI 86</i> wird das Jahr 1986 als Basisjahr gewählt und der Index dieses Jahres mit dem Wert 100 versehen. - Seite 67
Zellulose	Zellulose ist ein Polymer, genauer ein Polysaccharid oder Vielfachzucker. Sie ist der Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden und damit die häufigste organische Verbindung. [16] - Seite 25

Abbildungsverzeichnis

1.1	Energiemarkt Österreich (1970 - 2008) ³	2
1.2	Kohle, Öl und Gas im Vergleich ⁵	4
1.3	Wirtschaftssektoren Österreich 2008 [1]	5
2.1	Schichtung der Lufttemperatur verschiedener Heizsysteme [19]	15
2.2	Schema eines Umlaufwassererhitzers mit indirekt beheiztem Warmwasserspeicher [28]	17
2.3	Schema des Wärmepumpenprozesses [29]	18
2.4	TS-Diagramm des Wärmepumpenkreisprozesses [32]	19
2.5	TS-Diagramm eines rückwärtsgerichteten Carnot-Kreisprozesses [30]	19
2.6	Energieeffizienz und Verfügbarkeit verschiedener WP-Systeme	20
2.7	Erdreichtemperaturen zu verschiedenen Jahreszeiten [29]	21
2.8	Kollektorsystem [20]	22
2.9	Erdsondensystem [20]	22
2.10	Grundwassersystem [20]	23
2.11	Bezeichnungsschema von Wärmepumpen [30]	24
2.12	Beispiel für Wassergehaltsverläufe bei der Lagerung von gespaltenem, frisch geschlagenem Meterholz (Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten; Freising / Bayern) [26]	27
2.13	Heizwert von Holz in Abhängigkeit des Wassergehaltes [33]	27
2.14	Schema einer Unterschubfeuerung [26]	29
2.15	Schalensbrenner [26]	30
2.16	Kipprostbrenner [26]	30
2.17	Grundprinzip solarthermischer Anlagen [20]	31
2.18	Zellarten [20]	32
2.19	Photovoltaikanlage im netzgekoppelten Betrieb [23]	33
2.20	Mittleres jährliches Strahlungsangebot von Österreich [76]	33
2.21	Energieeinsparung durch KWK, bezogen auf den Brennstoffeinsatz	36
2.22	BHKW-Schema [38]	37
4.1	Entwicklung der Energiepreise (Haushaltsenergie), 1970 - 2010 [70]	67
4.2	VAR2: Luft-Wärmepumpe versus Erdkollektor-Wärmepumpe	78
4.3	VAR2: Erdkollektor-Wärmepumpe versus Gastherme	79
4.4	VAR2: Gastherme versus Holzpelletsystem	80
4.5	VAR2: Gastherme versus gefördertes Holzpelletsystem	81
4.6	VAR2: Gastherme versus Luft-Wärmepumpe bei veränderter Strompreissteigerungsrate ($r_S = 0,81\%$)	83
4.7	Entwicklung der Durchschnittsvergütungen im Vergleich zu den Marktpreisen [60]	86
4.8	Vergleich der drei Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung nach Variante 1 ($r_S = 0,13\%$)	87

4.9	Vergleich der drei Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung mit einer veränderten Kreditlaufzeit von zehn Jahren ($r_S = 0,13\%$)	88
4.10	Vergleich der drei Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung nach Variante 1 und unter Berücksichtigung aller Förderungen	89
4.11	Vergleich der drei Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung, bei Berücksichtigung aller Förderungen und mit einer veränderten Kreditlaufzeit von zehn Jahren	90
4.12	Mögliches Zukunftsszenario für PV-Systeme	93
A.1	Darstellung des Tabellenreiters <i>Übersicht</i>	101
A.2	Eingabeoberfläche des Tabellenreiters <i>Übersicht</i>	102
A.3	Darstellung des Tabellenreiters <i>Ökonomie</i>	102
A.4	Eingabeoberfläche des Tabellenreiters <i>Ökonomie</i>	103
A.5	Darstellung des Tabellenreiters <i>Technik</i>	103
A.6	Eingabeoberfläche des Tabellenreiters <i>Technik</i>	104
A.7	Ausschnitt eines Programmteils, der im Tabellenreiter <i>Technik</i> hinterlegten Makro-Programmierung	104
A.8	Ausschnitt des Tabellenreiters <i>Berechnung</i>	105
A.9	Ausschnitt der Eingabeoberfläche des Tabellenreiters <i>Berechnung</i>	106
A.10	Ausschnitt des Tabellenreiters <i>Dynamische Analyse HPS - GTS - Teil 1</i>	106
A.11	Ausschnitt des Tabellenreiters <i>Dynamische Analyse HPS - GTS - Teil 2</i>	107
A.12	Ausschnitt des Tabellenreiters <i>Ausgabe</i>	107

Tabellenverzeichnis

1.1	Bruttoinlandsverbrauch Österreich [1]	2
1.2	Energieträger im Detail	3
1.3	Prozentueller Anteil verschiedener Energieträger für die Haushaltsenergieerzeugung [3]	6
1.4	Heizstruktur bewohnter Wohnungen, Quelle: Statistik Austria (zitiert in [1])	7
2.1	Heizwertvergleich [33]	26
2.2	Holzpresslinge nach ÖNORM M7135: Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde - Pellets und Briketts - Anforderungen und Prüfbestimmungen [33]	29
2.3	Stand der Technik bei PV-Modulen [25]	35
2.4	Verschiedene Definitionen von BHKW-Anlagen [36], [37]	36
2.5	Brennstoffe für Verbrennungsmotoren bei BHKWs	38
2.6	Treibhausgase von Heizenergiesystemen am Beispiel Deutschlands 2010 [45]	44
3.1	Wichtige technische Daten des Hauses	49
3.2	JAZ-Berechnung für die Erdkollektoranlage [57]	49
3.3	JAZ-Berechnung für die Luftwärmepumpenanlage [57]	50
3.4	Technische Daten der Energiesysteme	52
4.1	Daten des Muster-Kunden	63
4.2	Angebotspreise der einzelnen Firmen	64
4.3	Investitionskosten der einzelnen Systeme	65
4.4	Förderungen des Landes Oberösterreich [58]	66
4.5	VPI 96, VPI 86 und VPI 2000 [72]	68
4.6	Preisindizes von Strom und Gas [71]	69
4.7	PPI 06, Preisliste der Firma <i>RZ Pellets GmbH</i> [74], [79]	69
4.8	Ökonomische Daten der Energieträger	70
4.9	Daten für die Modellierung der Wärmesysteme	72
4.10	Systemvergleich nach VAR1	73
4.11	Systemvergleich nach VAR1 inklusive Förderungen	73
4.12	Wärmepumpenvergleich nach VAR1 inklusive Investitionsförderungen und Öko-Stromtarif	74
4.13	VAR2: Genauer Datenauszug von Luft-Wärmepumpe versus Erdkollektor-Wärmepumpe zur Erklärung der theoretischen Zusammenhänge	76
4.14	VAR2: Daten von Luft-Wärmepumpe versus Erdkollektor-Wärmepumpe	77
4.15	VAR2: Daten von Erdkollektor-Wärmepumpe versus Gastherme	79
4.16	VAR2: Daten von Gastherme versus Holzpelletsystem	80
4.17	Reihung der Wärmesysteme nach den kumulierten Gesamtkosten	82

4.18	Gesamtkostenunterschied nach 25 Jahren zwischen WPS und GTS bei unterschiedlichen Strompreis-Steigerungsraten r_S	83
4.19	Gesamtkostenunterschied nach 25 Jahren zwischen den einzelnen Systemen und einem Kombi-System aus GTS und Solarthermie	84
4.20	Drei verschiedene Arten des Strombezugs für Haushalte	85
4.21	Datenübersicht für die Modellierung der Elektrizitätserzeugung	85
4.22	Gesamtkosten der einzelnen Systeme nach 25 Jahren bei unterschiedlichen Strompreis-Steigerungsraten r_S (Kreditkosten: 1.266 €/a)	87
4.23	Gesamtkosten der einzelnen Systeme nach 25 Jahren, bei einer Kreditlaufzeit von zehn Jahren und unterschiedlichen Strompreis-Steigerungsraten r_S (Kreditkosten: 2.413 €/a)	88
4.24	Gesamtkosten der einzelnen Systeme nach 25 Jahren bei Berücksichtigung aller Förderungen (Kreditkosten PV1: 711 €/a, Kreditkosten PV2: 1.266 €/a)	88
4.25	Daten der drei Elektro-Systemvarianten	90

Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, FAMILIE UND JUGEND, SEKTION IV-ENERGIE UND BERGBAU (2010): *Energiestatus Österreich 2010 - Stand März 2010*. Wien; at <http://www.bmwfj.gv.at/EnergieUndBergbau/Energiebericht/Seiten/default.aspx> (08.11.2010)
- [2] E-CONTROL GmbH (2007): *Modul 2, Wege des Stroms, Aktuelle Daten, Begriffe, Marktakteure*. Wien; at http://www2.e-control.at/portal/page/portal/PEE_HOME/UNTERRICHT/UNT_WEGSTROM/UNT_WEGSTROM_VERTINFOS1/MODUL2_PDF_22.pdf (09.11.2010)
- [3] STATISTIK AUSTRIA - BUNDESANSTALT STATISTIK ÖSTERREICH (s.a.): *Energiebilanzen Österreich 1970-2008*. Wien; at http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html (16.11.2010)
- [4] AUSTRIAN ENERGY AGENCY (s.a.-A): *Jahresbericht 2008*. Wien; at <http://www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/publikationen/jahresberichte/jahresbericht-2008.pdf> (12.11.2010)
- [5] OESTERREICHS ENERGIE (s.a.): *Masterplan Wasserkraft*. Wien; at <http://oesterreichsenergie.at/masterplan-wasserkraft.html> (16.11.2010)
- [6] UMWELTDACHVERBAND (2007): *Positionspapier Wasserkraft des Umweltdachverbandes - Wasserkraft nicht um jeden Preis*. Wien; at http://www.umweltdachverband.at/fileadmin/user_upload/pdfs/Positionspapiere/wasserkraft07.pdf (16.11.2010)
- [7] LIEBEL, G. und SCHUSTER M. (2009): *Erneuerbare Energie 2020 - Potenziale und Verwendung in Österreich*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft BMLFUW; Wien: Selbstverlag
- [8] NAKICENOVIC, N. und HAAS, R. (2010): *Skriptum zur Vorlesung mit Übung: Energiemodelle und Analysen*. Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Energy Economics Group, TU Wien; Wien: Selbstverlag
- [9] HEINBERG, R. (2008): *Öl - Ende (The Party's over)*. Riemann Verlag München; München
- [10] PÖRZGEN, G. (2008): *Gasprom - Die Macht aus der Pipeline*. Europäische Verlagsanstalt EVA; Hamburg
- [11] NAUMER, W. (2008): *Energiesparend bauen und modernisieren*. Rudolf Haufe Verlag GmbH & Co. KG; München

- [12] N.N. (s.a.): *Österreich, OIB Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz*. s.l.; at http://www.bauordnung.at/oesterreich/oib_richtlinie6.php (01.12.2010)
- [13] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.energiesparhaus.at/fachbegriffe/> (01.12.2010)
- [14] SCHULZ, H. (1995): *Wärme aus Sonne und Erde*. ökobuch Verlag
- [15] SPÄTE F. und LADENER H. (2008): *Solaranlagen - Handbuch der thermischen Solarenergienutzung*. ökobuch Verlag
- [16] MORTIMER, C.E. und MÜLLER, U. (2007): *Chemie - Das Basiswissen der Chemie*. 9. Auflage; Thieme Verlag; Stuttgart
- [17] BAEHR, H.D. und KABELAC, S. (2009): *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen*. 14. Auflage; Springer Verlag Berlin; Berlin
- [18] TREBERSPURG, M. (2006): *Ressourcenorientiertes Bauen*. 2. Auflage; Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien; Wien: Selbstverlag
- [19] OCHSNER, K. (2007): *Wärmepumpen in der Heizungstechnik - Praxis-handbuch für Installateure und Planer*. C.F. Müller Verlag
- [20] KRIMMLING, J. (2009): *Erneuerbare Energie (Einsatzmöglichkeiten - Technologien - Wirtschaftlichkeit)*. Vertragsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG; Köln
- [21] JAIN, C.P. und GOSWAMI, D.Y. (2007): *2007 Survey of Energy Resources*. World Energy Council; London
- [22] NEUDORFER, B. (2008): *Diplomarbeit - Perspektiven der Solarenergie*. A157 Internationale Betriebswirtschaft - Universität Wien; Wien
- [23] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.solar-k.de/typo3/index.php?id=7> (05.12.2010)
- [24] N.N. (s.a.): *Solar-Report 11/2007*. Bearbeitung und Übersetzung: Hug, R.; s.l.; at http://www.solarserver.de/solarmagazin/solar-report_1107.html (06.12.2010)
- [25] WIM C.S. (2007): *A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology*. PhotoVoltaic Technology Platform
- [26] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. und HOFBAUER, H. (2009): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage; Springer Verlag Heidelberg - Dordrecht - London - New York; Leipzig - Hamburg - Straubing - Wien
- [27] MÜLLER, W. (2009): *Heizen und Warmwasser*. Verein für Konsumenteninformation (VKI); Wien: Selbstverlag
- [28] CERBE, G. (2008): *Grundlagen der Gastechnik (Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung)*. 7. Auflage; Carl Hanser Verlag; München - Wien

- [29] BAUMANN, M.; LAUE, H-J. und MÜLLER, P. (2007): *Wärmepumpen - Heizen mit Umweltenergie*. 4. Auflage; Verlag Solarpraxis AG; Karlsruhe
- [30] SOBOTA, S. (2008): *Praxis Wärmepumpe (Technik - Planung - Installation)*. Verlag Solarpraxis AG; Berlin
- [31] TIATOR, I. und SCHENKER, M. (2007): *Wärmepumpen - Wärmepumpen-anlagen*. Vogel Buchverlag; Glachau
- [32] N.N. (s.a.): *Academic dictionaries and encyclopedias*. s.l.; at <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/268703> (10.12.2010)
- [33] JONAS, A.; HANEDER, H. und FURTNER, K. (2005): *Energie aus Holz - Informationsbroschüre der Landwirtschaftskammer Oberösterreich*. Verlag Landwirtschaftskammer Niederösterreich
- [34] WALDVERBAND-ÖSTERREICH (2010): *Forstwirtschaft in Österreich*. Wien; at http://www.waldverband.at/downloads/cms_uploaded/forstwirtschaft_in_oesterreich_wv_oesterreich_4c91f33e02816.pdf (13.12.2010)
- [35] N.N. (s.a.): *Schwelung*. s.l.; <http://www.enzyklo.de/Begriff/Schwelung> (23.12.2010)
- [36] SIMADER, G.R.; RITTER, H.; BENKE, G. und PINTER, H. (2004): *Mikro- und Mini-KWK-Anlagen in Österreich*. Austrian Energy Agency (Energieverwertungsagentur EVA); Wien: Selbstverlag
- [37] N.N. (2004): *RICHTLINIE 2004/8/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES - vom 11. Februar 2004*. Amtsblatt der Europäischen Union; s.l.
- [38] N.N. (s.a.): s.l.; <http://www.kneifel-haustechnik.de/bhkw-technik.htm> (22.12.2010)
- [39] HEES, W.; MÜLLER, O. und SCHÜTH, M. (2007): *Volle Tanks - leere Teller*; Lambertus Verlag; s.l.
- [40] GEITMANN, S. (2008): *Alternative Kraftstoffe*. Hydrogeit Verlag; s.l.
- [41] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm> (07.04.2011)
- [42] FRITSCH, U.; RAUSCH, L. und SIMON, K.-H. (1989): *Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)*. Öko-Institut, Büro Darmstadt; Gesamthochschule Kassel, Wissenschaftliches Zentrum III; Darmstadt / Kassel: Selbstverlag
- [43] FRITSCH, U.; BUCHERT M.; HOCHFELD, C.; JENSEIT, W.; MATTES, F.C., RAUSCH, L.; STAHL, H. und WITT, J. (1998): *GEMIS - Ein Computer-Instrument zur Umwelt- und Kostenanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen - Xmas Edition 1998*. Öko-Institut; Darmstadt, Freiburg, Berlin: Selbstverlag

- [44] FRITSCH, U.; RAUSCH, L. und SCHMIDT, K. (2007): *Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung*. Öko-Institut; Darmstadt: Selbstverlag
- [45] N.N. (s.a.): *Ergebnisdaten aus GEMIS 4.6 - EXCEL-Blatt: g46-results-aug2010daten1*. Öko-Institut; s.l.; at <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm> (09.04.2011)
- [46] PÖLZ, W. (2010): *Chancen und Grenzen eines Bewertungssystems auf Basis der Primärenergie*. Umweltbundesamt Österreich; Graz; at <http://www.aee-intec.at/Uploads/dateien719.pdf> (08.04.2011)
- [47] FRITSCH, U. and LIM, S.-S. (2006): *Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective - updates version*. Öko-Institut; Darmstadt: Selbstverlag
- [48] HEIDELCK, R. (s.a.): *Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen von modernen Wärmepumpen*. IZW e.V. - Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik; Hannover: Selbstverlag
- [49] KEHLHOFER, R.; HANNEMANN, F.; STIRNIMANN, F. and RUKES, B. (2009): *Combined-Cycle Gas and Steam Turbine Power Plants - 3rd Edition*. PennWell Corporation; Tulsa, Oklahoma (USA)
- [50] HARTMANN, S. (2009): *Vergleich der wichtigsten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen*. Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg / Energieinstitut Vorarlberg; Dornbirn, Rottenburg
- [51] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.vaillant.de/Produkte/Waermepumpe/> (20.01.2011)
- [52] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.roth-werke.de/roth-ger/waermepumpensysteme.htm> (20.01.2011)
- [53] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.ochsner.de/produkte/produkte-heizen/> (20.01.2011)
- [54] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.dimplex.de/waermepumpe.html> (20.01.2011)
- [55] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.elco.de/produkte/waermepumpen.html> (20.01.2011)
- [56] N.N. (s.a.): s.l.; at <http://www.tecalor.de/Kunden-Portal/Waermepumpen-Systeme.html> (20.01.2011)
- [57] BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP) (s.a.): Berlin; at <http://www.waermepumpe.de/fachpartner/jaz-rechner.html> (20.01.2011)
- [58] OÖ LANDESREGIERUNG (s.a.): *Förderung von thermischen Solaranlagen und Wärmepumpen*. Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Soziales und Gesundheit, Abteilung Wohnbauförderung; Linz; at <http://www.land-oberoesterreich.gv.at/cps/rde/xchg/>

SID-FC79DD0F-9B09DE68/ooe/hs.xsl/13877_DEU_HTML.htm
(20.01.2010)

- [59] ENERGIE AG (2011): *Preisangebote für Privatkunden*. Linz; at http://www.energieag.at/eag_at/resources/339536908088248262_701339534162247600_b9AamS1N.pdf (20.01.2011)
- [60] E-CONTROL GmbH (2010): *Einspeisetarife für neue Ökostromanlagen 2010*. Wien; at http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/oeko-energie/dokumente/pdfs/uebersicht-einspeisetarife_2010.pdf (21.01.2011)
- [61] OÖ LANDESREGIERUNG (2010): *Leitfaden 2010 für die Förderung von Photovoltaikanlagen in Oberösterreich*. Amt der Oö. Landesregierung - Abteilung Umweltschutz Linz; at http://www.land-oberoesterreich.gv.at/cps/rde/xbcr/SID-5A67393A-CDCEB228/ooe/Photovoltaik_Leitfaden_2010_3.pdf (21.01.2011)
- [62] N.N. (2000): *VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen*. Verein deutscher Ingenieure; Düsseldorf: Selbstverlag
- [63] ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (s.a.): Wien; at <http://www.biomasseverband.at/> (24.02.2011)
- [64] BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE AUSTRIA (s.a.): Wien; at <http://www.bwp.at/> (24.02.2011)
- [65] PHOTOVOLTAIC AUSTRIA FEDERAL ASSOCIATION (s.a.-A): Wien; <http://www.pvaustria.at> (24.02.2011)
- [66] AG FERNWÄRME INFO (2010): *Heizkostenvergleich nach VDI 2067 - Stichtag 31.10.2010 - Vergleich der Vollkosten von Heizungssystemen*. AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.; Frankfurt am Main; at http://www.fernwaerme-info.com/fileadmin/Redakteure/dokumente/HKV_2010_10_01_Portal.pdf (15.02.2011)
- [67] AGFW (2010): *Heizkostenvergleich nach VDI 2067 - Musterrechnung: Stichtag 01.10.2010*. AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.; Frankfurt am Main; at http://www.agfw.de/fileadmin/agfw/content/linkes_menue/wirtschaft_und_markt/markt_und_preise/Heizkosten/Versand%20HKV%2010-2010%20Internet.pdf (15.02.2011)
- [68] KLIMA INNOVATIV (2011): *Heizkostenvergleich und Investitionskostenvergleich Wärmepumpen - Ölheizung - Gasheizung - Pelletheizung*. Türkenfeld; at <http://www.klima-innovativ.de/pages/kosten.html> (13.02.2011)
- [69] SCHNAUER (2010): *Anlagengegenüberstellung - Erdwärmepumpe mit anderen Heizsystemen*; Schnauer Energie,- Solar,- und Umwelttechnik GmbH & Co KG; Krems a.d. Donau; at http://www.schnauer.at/SCHNAUER-ESU/material/Anlagengegenueberstellung_2010-01-21.pdf (23.02.2011)

- [70] AUSTRIAN ENERGY AGENCY (s.a.-B): *Entwicklung der Energiepreise (Haushaltsenergie), 1970 - 2010*. Originalquelle: Statistik Austria; Berechnung: Österreichische Energieagentur; Wien; at <http://www.energyagency.at/energien-in-zahlen/energiepreisindex/entwicklung-ab-1970.html> (14.02.2011)
- [71] AUSTRIAN ENERGY AGENCY (s.a.-C): *Energiepreisindex (EPI) - Jahresentwicklungen*. Österreichische Energieagentur; Wien; at <http://www.energyagency.at/energien-in-zahlen/energiepreisindex/epi-jahresberichte.html> (14.02.2011)
- [72] VERWALTUNG STEIERMARK (s.a.): *Verbraucherpreisindex 1986, Basis: 1986 = 100*. Originalquelle: Statistik Austria; Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 1C, Dokumentation, Öffentlichkeitsarbeit und Perspektiven; Graz; at http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/10005243_97911/fe89a5d2/vpi86.pdf (15.02.2011)
- [73] E-CONTROL GmbH (s.a.): *E-Control Tarifkalkulator*. Wien; at <http://www.e-control.at/de/konsumenten/service-und-beratung/TarifkalkulatorApplication> (15.02.2011)
- [74] PROPELLETS AUSTRIA (2011): *Energieträger im Vergleich in Cent/kWh*. proPellets Austria, Netzwerk zur Förderung der Verbreitung von Pelletsheizungen; Wolfsgraben; at http://www.propellets.at/images/content/pdfs/201102_etiv.pdf (16.02.2011)
- [75] STEINECKER, W. (2010): *5kW Photovoltaikanlage inkl. Angebotserstellung - Abschlussarbeit zur Erlangung der Berufsbezeichnung Werkmeister*. Wirtschaftsförderungsinstitut WIFI OÖ GmbH; Linz: Selbstverlag
- [76] PHOTOVOLTAIC AUSTRIA FEDERAL ASSOCIATION (s.a.-B): *Globalstrahlung in Österreich*. Wien; <http://www.pvaustria.at/content/page.asp?id=62> (17.02.2011)
- [77] CRAMER, G.; ENGEL, B.; ROTHERT, M.; WACHENFELD, V.; WASGINDT, V. und KEVER, F. (s.a.): *Anforderungen an die PV-Systemtechnik der Zukunft und Lösungen von SMA*. SMA Solar Technology AG; s.l.; at <http://www.sma.de/fileadmin/fm-dam/knowhow/PV-SystemtechnikderZukunft2.pdf> (04.03.2011)
- [78] KALAB, O. (s.a.): *Standardisierte Lastprofile*. Wirtschaftskammer OÖ; Linz; at http://portal.wko.at/wk/dok_detail_file.wk?AngID=1&DocID=603304&StID=289986 (04.03.2011)
- [79] RZ PELLETS GMBH (s.a.): Ybbs; at <http://www.rz-pellets.at/index.html> (06.04.2011)
- [80] PERMAN, R.; MA, Y.; MC.GILVRAY, J. and COMMON, M. (2003): *Natural Resource and Environmental Economics - 3rd Edition*. Pearson Education Limited; Edinburgh (UK)

- [81] ARNDT, U.; VON ROON, S.; KRAUS, D.; MAUCH, W.; MÜHLBACHER, H.; GEIGER, B. und TZSCHEUTSCHLER, P. (2007): *Innovative KWK-Systeme zur Haushaltsenergieversorgung - Messtechnische Untersuchungen, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Systemvergleich und Optimierung*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) - München
- [82] KRAWINKLER, R. (2006): *DIPLOMARBEIT - Mini- und Mikro-Blockheizkraftwerke*. E302 Institut für Thermodynamik und Energiewandlung - Technische Universität Wien; Wien
- [83] VON ROON, S. (2009): *Mikro-KWK und virtuelle Kraftwerke*. greenbuilding 12/2009 - Nachhaltig planen, bauen und betreiben; Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin
- [84] AUSTRIAN ENERGY AGENCY (s.a.-D): *Förderungen*. Österreichische Energieagentur; Wien; at <http://www.energyagency.at/foerderungen.html> (18.05.2011)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht veröffentlicht und noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Wien, im Mai 2011.

Lebenslauf

PERSÖNLICHE ANGABEN

Name: Stefan Stockinger
geboren am: 30. Juli 1982 in Linz
Eltern: Edith und Johann Stockinger

KURZPROFIL

HTL für Energietechnik und Leistungselektronik
1 1/2 Jahre vollzeitbeschäftigt als Konstrukteur in der Automatisierung
1/2 Jahr vollzeitbeschäftigt als SPS-Programmierer
Bakkalaureatsstudium der Elektrotechnik und Informationstechnik
Masterstudium für Umwelttechnologie und Umweltwirtschaft
Insgesamt ca. 1 1/2 Jahre im Ausland verbracht

STUDIUM

2003 - 2007: Technische Universität Wien
Bakkalaureatsstudium der Elektrotechnik und Informationstechnik
Thema der Bachelor Thesis
1) Energieanalyse einer magnetischen Schwebeeinrichtung
2) Energie- und Temperaturverhalten beim GMI-Effekt
Abschluss: Bachelor of Science (B.Sc.)

SS 2006: Tutor für das Fach *Signale und Systeme 2* am Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik - TU Wien

WS 2006: Auslandssemester an der Middlesex University London

WS 2007: Werkstudent für eine Studie über Marketingstrategien für Photovoltaikanlagen am Institut für Energieökonomie - TU Wien

2008 - 2011: Universität für Bodenkultur - Wien
Masterstudium für Umwelttechnologie und Umweltökonomie
(Environmental Technology and related Economy - 25% in foreign language)
Schwerpunkt: Energiewirtschaft
Masterarbeit: Ökonomischer Vergleich verschiedener Energiesysteme für Haushalte am Beispiel eines Niedrigenergiehauses
Abschluss: Diplomingenieur (DI) bzw. Master of Science (M.Sc.)

Studienjahr 08/09: Leistungsstipendium an der Universität für Bodenkultur - Wien

AUSSERUNIVERSITÄRE SEMINARE

- 2008: Holzler 'scher Permakulturworkshop im Ökodorf Tamera - Portugal
- 2010: 5-tägiges Seminar für Gewaltfreie Kommunikation bei Katharina Ossko

AUSSERUNIVERSITÄRE BERUFSERFAHRUNG

- Sommer 97/98: tätig als Elektroinstallateur: Firma *Stockinger* - Asten
- Sommer 99: tätig im Verteilerbau: Firma *Mehler* - Wolfers
- Sommer 00/01: tätig als Elektroplanzeichner für Porsche Asten: Firma *Stockinger* - Asten
- Sommer 01: tätig als Nachhilfelehrer für Elektrotechnik, Chemie und Physik am *Schülerhilfeinstitut Enns*
- 10.2001 - 01.2003: Vollzeitanstellung als Elektrokonstrukteur für automatisierte Recyclingmaschinen bei der Firma *Erema* - Ansfelden
- 02.2003 - 08.2003: Vollzeitanstellung als Programmierer bei der Firma *SPS-Technik* - St. Valentin
- 2003 - 2011: Teilzeitbeschäftigt als Elektrokonstrukteur und Projektunterstützer bei *E-TEC Stockinger G.m.b.H.* - Asten
- 04.2007 - 06.2007: Nachhilfelehrer für Mathematik und Physik bei *team - plus!* - Wien
- 04.2007 - 06.2007: Technischer Berater bei einer Marktstudie für Drehgeber *Interconnection Consulting* - Wien
- 04.2008 - 05.2009: Barkeeper in der Club-Bar *Die Dondrine* - Wien
- 02.2010 - 12.2010: Mathematiklehrer für Migrantinnen und Migranten beim Kurs *Hauptschulabschluss* an der *VHS Meidling*
- 11.2010 - 05.2011: Barkeeper im *Cafe Strom* - Kulturverein *Stadtwerkstatt Linz*

PERSÖNLICHER WERDEGANG

- 2007 - 2010: Längere *Entdeckungsreisen* nach China, Guatemala, Indien, Marokko, Mexiko, Mongolei, Portugal, Russland und Spanien. Neben dem Reisen ansich wurden zahlreiche Ökodörfer besucht und an Agrarworkshops teilgenommen.
- 01.2008 - 07.2009: Obmann (und Gründer) des Kulturvereins *tHurnverein - tH* (Der tH sieht seine Hauptaufgabe darin, mittels einer Kombination von Musik- & Kulturveranstaltungen das soziale und ökologische Gewissen seiner Gäste und Mitglieder anzusprechen und auszubauen.)

BESONDERE KENNTNISSE

IT-Kenntnisse:

MS Office Paket, Open Office Paket
AutoCad, PSpice, LabView
MatLab, Mathematica
FEMM, VHDL
VenSim
LaTex

EPLAN 5.30, 5.40
Simovis für Frequenzumrichter
Siemens Simatic S7

Fremdsprachen:

Englisch - sehr gut
Spanisch - solo un poco

Wien, im Mai 2011.