



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Diplomarbeit

Optimale Energieauskopplung aus Abfallverbrennungsanlagen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Haider

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Rechberger

ausgeführt am Institut für

Energietechnik und Thermodynamik E302

geleitet von Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Haider

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Roland Rauner

Mat. Nr.: 0226000

3430 Tulln

Österreich

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Haider und Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Rechberger bedanken, die diese Diplomarbeit ermöglicht haben und mir stets mit Ihrem Fachwissen zur Seite standen.

Auch meiner Freundin, Eva-Maria Aschberger, möchte ich an dieser Stelle meinen Dank für Ihre Unterstützung übermitteln.

Einen besonderen Dank möchte ich auch Herrn Lukas Nitsche für seine lebhaften Diskussionen über das Thema aussprechen.

Ebenso gilt auch Edeltraud, Albert und Johann Rauner mein Dank.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	6
2	Ziele.....	8
3	Methoden und Daten.....	8
3.1	Wirkungsgradberechnung.....	8
3.1.1	Heizwert des Mülls H_U	8
3.1.2	Brennwert des Mülls H_O	9
3.1.3	Exergie	9
3.1.4	Enthalpie	10
3.1.5	Entropie	10
3.1.6	Formelzeichen, Indizes.....	11
3.1.7	Daten der Wirkungsgradberechnung	12
3.1.8	Rauchgasverluste – Volllast.....	15
3.1.8.1	spezifische Luftmenge μ_L (H, Φ, t , Brennstoff) – Volllast.....	15
3.1.8.2	Rauchgasmenge - Volllast.....	17
3.1.8.3	Verluste durch Unverbranntes - Volllast.....	18
3.1.8.4	sonstige Kesselein- und Kesselausgänge - Volllast	19
3.1.8.5	Übersicht Dampferzeuger:	20
3.1.8.6	Kesselbilanz - Volllast:.....	21
3.1.9	Rauchgasverluste - Teillast.....	21
3.1.9.1	spezifische Luftmenge μ_L (H, Φ, t , Brennstoff) – Teillast.....	22
3.1.9.2	Rauchgasmenge - Teillast	22
3.1.9.3	Verluste durch Unverbranntes - Teillast.....	22
3.1.9.4	sonstige Kesselein- und Kesselausgänge - Teillast	23
3.1.9.5	Kesselbilanz - Teillast:	23
3.2	IPSE Pro.....	24
3.3	Kraftwerk - 100% Stromerzeugung	26
3.3.1	Anlagenbeschreibung	26
3.3.1.1	Kondensationsturbine	28
3.3.1.2	Rauchgasreinigung.....	28
3.3.2	Simulation: IPSE Pro 100% Stromerzeugung	29
3.3.3	Sankey-Diagramm Kraftwerk 100% Strom.....	30
3.3.3.1	Sankey Diagramm Energie (25°C) Kraftwerk „100% Strom“	32
3.3.3.2	Sankey Diagramm Exergie (9,78°C) Kraftwerk „100% Strom“	33
3.3.3.3	Sankey Exergie/Energie Vergleich.....	34
3.3.4	Sankey – Diagramme der Verbrauchsszenarien.....	35
3.3.4.1	Stromversorgung	35
3.3.4.2	Kühlen via mechanischer Luft - Wärmepumpe.....	35
3.3.4.3	Warmwasser via mechanischer Luft / Wasser- Wasser - Wärmepumpe 35	
3.3.4.4	Heizung via mechanischer Luft- Wärmepumpe.....	36
3.3.4.5	Heizung via mechanischer Wasser-Wasser- Wärmepumpe	36
3.3.4.6	Heizung via mechanischer Großwärmepumpe	37
3.4	Kraftwerk - Kraft Wärme Kopplung	38
3.4.1	Anlagenbeschreibung	38
3.4.1.1	Anzapfturbine	39
3.4.2	Simulation: IPSE Pro KWK stromgeführt	40

3.4.2.1	Sankey Diagramm Energie (25°C) Kraftwerk „KWK stromgeführt“	43
3.4.2.2	Sankey Diagramm Exergie (9,78°C) Kraftwerk „KWK stromgeführt“	44
3.4.2.1	Sankey Exergie/Energie Vergleich.....	45
3.4.3	Sankey – Diagramme der Verbrauchsszenarien.....	45
3.4.3.1	Großwärmepumpe.....	45
3.4.3.2	Fernwärme / Warmwasser	46
3.4.3.3	Fernwärme / Kühlung mittels Absorptionskältemaschine	46
3.4.4	Simulation: IPSE Pro „KWK wärmegeführt“	47
3.4.4.1	Sankey-Diagramm Energie (25°C) Kraftwerk „KWK wärmegeführt“	49
3.4.4.2	Sankey-Diagramm Exergie (9,78°C) Kraftwerk „KWK wärmegeführt“ ..	50
3.4.4.3	Sankey Exergie/Energie Vergleich.....	51
3.5	Klimadaten	51
3.6	Datenbeschreibung Wärmepumpe	52
3.6.1	Großwärmepumpe.....	55
3.6.2	Leistungszahl der Absorptionskälteanlagen.....	55
3.7	Datenbeschreibung „Statistik Austria“	57
3.7.1	Heizenergieverbrauch durch Gasverbrauch (Winter)	57
3.7.2	Warmwasserenergieverbrauch durch Stromverbrauch	60
3.7.3	Kühlbedarf durch Stromverbrauch ermittelt.....	62
3.7.4	Kühlbedarf aus Heizwärmemenge berechnet	65
3.7.5	Stromverbrauch pro Haushalt	65
3.7.6	Heizen - zusätzliche Verbraucher	66
3.7.7	Kühlen - zusätzliche Verbraucher	66
4	Resultate.....	68
4.1	Übersicht Durchschnittsverbrauch pro Haushalt.....	68
4.2	Übersicht Leistungszahl der Wärmepumpen.....	69
4.3	Strangwirkungsgrad.....	70
4.4	Versorgbare Haushalte	72
4.5	Vollversorgbare Haushalte.....	77
5	Fazit und Ausblick	80
6	Anhang A: Daten CASAnova.....	81
7	Abbildungsverzeichnis	84
8	Tabellenverzeichnis	85
9	Literaturverzeichnis	86

Abstract

Auf nationaler und europäischer Ebene wird aktuell über die Energieeffizienz der Müllverbrennung diskutiert.

Die vorliegende Diplomarbeit untersucht die Frage ob Strom- oder Fernwärmeproduktion bei der Abfallverbrennung effizienter ist. Dazu wird anhand von Fallbeispielen verschiedener Müllverbrennungsanlagen untersucht, mit welcher Variante das energetische Optimum erreicht werden kann.

Als Referenzanlage wird die „Hoog Rendoment Afval Verwerkings Installatie“ Müllverbrennung in Amsterdam herangezogen. Diese Anlage erzeugt zu 100% Strom. Mit Hilfe der Simulationssoftware IPSEpro wird der reale Aufbau abgebildet und detailliert simuliert. Diese Müllverbrennung wird in einem zweiten Schritt in eine vergleichbare „Kraft-Wärme-Kopplungs“ Anlage, also mit Strom- und Fernwärmeproduktion, umgebaut. Für die jeweiligen Kraftwerktypen werden die Exergie- und Energieflüsse detailliert dargestellt, wobei die Exergie den nutzbaren Anteil der Energie darstellt.

In einem weiteren Schritt wird die Nutzung des Stromes bzw. der Fernwärme im Haushalt untersucht. Hierfür werden für die Haushaltsbedarfe Heizen, Kühlen, Warmwasser und Strom 12 Versorgungsmöglichkeiten untereinander verglichen. Mittels der ermittelten durchschnittlichen Bedarfe österreichischer Haushalte kann so für das vielversprechendste Szenario eine Anzahl an versorgbaren Haushalten ermittelt werden.

Das Ergebnis dieser Arbeit besagt, dass der maximale Vorteil an vollversorgten Haushalten der „Kraft-Wärme-Kopplungs“ Anlage, gegenüber der „100% Strom“ Anlage, im Jänner rund 30% ausmacht. Dieser Vorteil geht im Sommer zurück. Die Kernaussage dieser Diplomarbeit ist, dass die Kraft-Wärme-Kopplung eine größere Anzahl an Haushalten versorgen kann und daher vorzuziehen ist.

1 Einleitung

Auf nationaler und europäischer Ebene wird aktuell über die Zukunft der Müllverbrennung diskutiert. So wurde Ende 2010 in einer Nationalratssitzung in Österreich, von der Abgeordneten Frau Mag. Christiane Brunner, ein Antrag zur Bedarfsprüfung von neuen Müllverbrennungsanlagen eingereicht.

Um eine wissenschaftliche Entscheidungshilfe für einen im Raum stehenden Neubau bereitzustellen, wurde diese Diplomarbeit initiiert. Hierbei soll anhand von Fallbeispielen verschiedener Müllverbrennungsanlagen untersucht werden, mit welcher Variante das energetische Optimum erreicht werden kann.

Mittels der Software IPSE Pro (2008) soll die zu 100% stromerzeugende Müllverbrennungsanlage „Hoog Rendoment Afval Verwerkings Installatie“ in Amsterdam simuliert werden. Diese Anlage gilt als Vorzeigeobjekt und erreicht durch technische Fortschritte einen für Müllverbrennungsanlagen richtungsweisenden Wirkungsgrad. Diese Anlage soll zusätzlich bei möglichst gleichen Betriebsfaktoren in eine „Kraft Wärme Kopplung“ umgebaut werden. Untersucht werden soll hierbei der Umbau von reiner Stromerzeugung in ein Kraftwerk, das in einer „Kraft Wärme Kopplung“ betrieben wird. „Kraft Wärme Kopplung“ bedeutet, dass gleichzeitig mechanische Energie, die in Strom umgewandelt wird und nutzbare Wärme für ein Fernwärmenetz gewonnen wird. Diese „Kraft Wärme Kopplung“ kann in zwei Varianten betrieben werden. Variante 1 soll „Kraft Wärme Kopplung stromgeführt“ sein, also mit möglichst hohem Stromoutput. Variante 2 soll „Kraft Wärme Kopplung wärmegeführt“ sein, also mit möglichst hohem Wärmeoutput.

In den folgenden Schemata wurden die Fernwärme- und Elektroströme zwischen Erzeuger und Verbraucher ihrer Größenordnung nach symbolisch eingetragen.

- 100% Strom

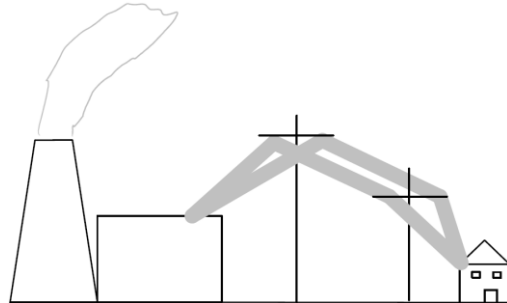


Abbildung 1: Schema "100% Strom"

- Kraft Wärme Kopplung stromgeführt

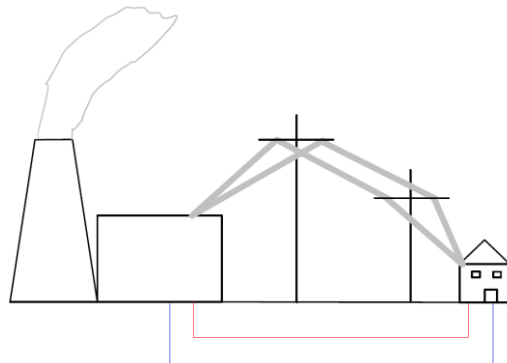


Abbildung 2: Schema Kraft "Wärme Kopplung stromgeführt"

- Kraft Wärme Kopplung wärmegeführt

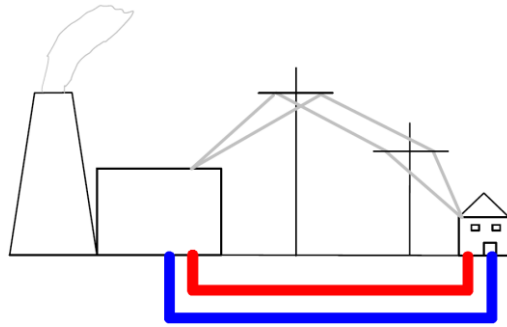


Abbildung 3: Schema "Kraft Wärme Kopplung wärmegeführt"

Für die jeweiligen Kraftwerke werden die Exergie- und Energieflüsse detailliert dargestellt, die Exergie stellt den nutzbaren Anteil der Energie dar.

Als gesuchtes Optimum wird das Maximum für die Versorgung der privaten Haushalte in Österreich gewählt. Dieses Optimum soll sowohl die Energieerzeuger, also die Kraftwerkvariante, als auch die Verbraucher, also die Deckung der österreichischen Haushaltsbedarfe, umfassen.

Der durchschnittliche Haushalt benötigt diese Energie zur Deckung seiner Heiz-, Kühl-, Warmwasser- und Strombedarfe. Der Energiebedarf der durchschnittlichen Haushalte wird mittels Daten der „STATISTIK AUSTRIA Bundesanstalt Statistik Österreich“ ermittelt.

In der Untersuchung soll auch der Energiefluss zu den Verbrauchern dargestellt werden, um die auftretenden Verluste sichtbar zu machen.

Die berücksichtigten Energieflüsse zur Deckung der Heiz-, Kühl-, Warmwasser- und Strombedarfe der privaten Haushalte sind zur Übersicht in der folgenden Tabelle aufgezählt.

Bedarf	Quelle	Umwandlung mittels
Heizen	Strom	Luft-Wärmepumpe
	Strom	Wasser-Wasser Wärmepumpe
	Strom & Kraftwerksabwärme	zentrale Großwärmepumpe
	Strom	Elektroheizung
	Fernwärme	-
Kühlen	Strom	Luftwärmepumpe im Kühlbetrieb
	Fernwärme	Absorptionskältemaschine
Warmwasser	Strom	Boiler elektrisch beheizt
	Strom	Luft-Wärmepumpe
	Strom	Wasser-Wasser Wärmepumpe
	Fernwärme	-
Strom	Strom	-

Tabelle 1: Übersicht Bedarfsversorgung

Die Fernwärme- und Stromströme müssen teilweise in den Haushalten bzw. im Kraftwerk umgewandelt werden, um den Heiz-, Kühl-, Warmwasser- und Strombedarf der privaten Haushalte zu decken.

So wird nur bei der Großwärmepumpe der Strom im Kraftwerk zentral umgewandelt und in das Fernwärmenetz eingespeist.

Alle anderen Umwandlungen finden in den Haushalten dezentral statt.

Das energetische Optimum soll die unterschiedlichen Varianten möglichst vergleichbar und einfach darstellen.

2 Ziele

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist, eine wissenschaftliche Entscheidungsgrundlage für die optimale Energieauskopplung aus Müllverbrennungsanlagen zu finden. Dieses Optimum stellt sich als versorgbare Haushalte dar und so müssen Kraftwerkoutput, Haushaltsinput und deren Umwandlung detailliert ermittelt und gegenübergestellt werden.

3 Methoden und Daten

3.1 Wirkungsgradberechnung

Bei der Wirkungsgradberechnung muss zwischen Volllast (= „100% Strom“, „Kraft Wärme Kopplung (KWK) stromgeführt“) und Teillast (= „KWK wärmegeführt“) unterschieden werden. Dieses Betriebsverhalten bezieht sich auf die Turbinen, da der Auslegungspunkt dem Volllastbetrieb entspricht. Wird die Turbine nicht im Auslegungspunkt betrieben spricht man von Teillast. Durch die Wirkungsgradberechnung werden die Kesselverluste detailliert betrachtet und den größten Verlustfaktoren zugeordnet.

Aufgrund der Druckveränderungen im Teillastbetrieb wird bei gleichen Temperaturen eine höhere Enthalpie (Begriffsdefinition siehe Kapitel 3.1.4) erreicht und es wird bei gleichbleibendem Massenstrom ein höherer Energieinput im Zwischenüberhitzer benötigt. Hierbei entsteht im Teillastbetrieb eine erhöhte Belastung für den Zwischenüberhitzer, der bei einem Kraftwerksbau noch untersucht werden muss. Die Mehrbelastung beträgt ca. 0,7%.

Im weiteren Vorgehen wird die Referenz-/Bezugstemperatur in Klammern angegeben, da die Temperatur, auf die sich die Werte beziehen von großer Bedeutung sind.

3.1.1 Heizwert des Mülls H_U

Für die Betrachtung der Energie wird der Heizwert herangezogen. Dieser Wert ist auf 25°C bezogen und beinhaltet nicht die Verdampfungsenthalpie des Wassers.

Der Heizwert des Mülls verändert sich laufend, so wurde in den 90er Jahren in Deutschland ein Heizwert von nur ca. 4500 bis 6500 kJ/kg erreicht, daher benötigte man zur vollständigen Verbrennung noch Zusatzenergie in Form von fossilen Brennstoffen. Durch die Zunahme von Kunststoffen wurde der Brennwert gesteigert und der Zusatzbrenner wird heute nur noch für das Anfahren benötigt.

In der folgenden Tabelle ist auch der regionale Unterschied des Heizwertes ersichtlich:

Land	Einheit	Heizwert
VR China	kJ/kg	3.800 bis 4.200
Süd-Korea	kJ/kg	4.400 bis 6.400
Brasilien	kJ/kg	4.500 bis 6.500
Taiwan, R.O.C.	kJ/kg	4.500 bis 7.800
Singapur	kJ/kg	4.400 bis 7.600
Japan	kJ/kg	5.200 bis 9.600
Europa	kJ/kg	7.800 bis 11.000
USA	kJ/kg	9.400 bis 12.900
Schweiz	kJ/kg	9.400 bis 15.300

Abbildung 4: weltweite Variation der Heizwerte (Thomé-Kozmiensky & Beckmann, 2005, S.242)

Für diese Diplomarbeit wurde ein, für Europa typischer, Heizwert des Mülls von 10000kJ/kg angenommen.

3.1.2 Brennwert des Mülls H_o

Im Gegensatz zum Heizwert wird beim Brennwert die Verdampfungsenthalpie mitberücksichtigt. Der Wasserdampf im Rauchgas wird also kondensiert, wodurch dieser Wert für die Exergiebetachtung herangezogen werden muss. Der Brennwert entspricht der technisch maximal nutzbaren Energie des Brennstoffes.

Durch die Aggressivität der kondensierenden Rauchgase in Müllverbrennungsanlagen wird für die Economizer (ECOs) zur Energierückgewinnung im Kondensationsbetrieb eine Teflonbeschichtung erforderlich.

3.1.3 Exergie

Laut Baehr (1965) wurde die Exergie bereits in der Jahrhundertwende von Gouy und Stodola veröffentlicht. Diese Bücher wurden von der Fachwelt fast vergessen. Erst in den dreißiger Jahren wurde dieses Thema wiederentdeckt und vertieft und erst nach dem 2. Weltkrieg mehr beachtet.

Der Name Exergie ist auf R. Plank zurückzuführen. Exergie ist jene Energie, die sich unter Mitwirkung einer vorgegebenen Umgebung vollständig in jede andere Energieform umwandeln lässt. Im Gegensatz dazu ist Anergie jene Energie, die sich nicht in Exergie umwandeln lässt.

Man unterscheidet generell in 3 Arten von Energie:

1. unbeschränkt umwandelbare Energie (=Exergie), wie z.B. mechanische Energie
2. beschränkt umwandelbare Energie, z.B. die innere Energie eines Systems oder Wärme
3. nicht in Exergie umwandelbare Energie, wie die innere Energie der Umgebung (=Anergie)

Für jede Energieform gilt die allgemeine Gleichung:

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik lautet unter Verwendung obiger Begriffe:
Bei allen Prozessen bleibt die Summe aus Exergie und Anergie konstant.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik kann folgendermaßen formuliert werden:

1. Bei allen irreversiblen Prozessen verwandelt sich Exergie in Anergie
2. Nur bei reversiblen Prozessen bleibt die Exergie konstant
3. Es ist unmöglich, Anergie in Exergie zu verwandeln

Die Exergie im Massenstrom wird nach Kriese (1971) folgendermaßen berechnet:

$$\text{spezifische Exergie} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)$$

h ... Enthalpie des Massenstroms

h_0 ... Enthalpie der Umgebung

T_0 ... Umgebungstemperatur

s ... Entropie des Massenstroms

s_0 ... Entropie der Umgebung

$$\text{EXERGIE} = \text{spezifische Exergie} \cdot \dot{m}$$

$$\text{Exergie Wärmestrom} = Q \cdot \left(\frac{T - T_0}{T} \right) = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

$$\text{Exergie Massenwärmestrom} = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

(Gasser, Wellig & Hilfiker, 2008, S.10)

3.1.4 Enthalpie

Laut Ponweiser (2009) wird die Enthalpie allgemein:

$H = U + p \cdot V$ bzw. spezifisch $h(T, p) = u + p \cdot v$ definiert.

Sie ist wie die innere Energie, ein Maß für den Energieinhalt eines Systems und wird vorzugsweise für Berechnungen bei konstantem Druck benutzt. Die Enthalpie ist eine intensive Zustandsgröße.

3.1.5 Entropie

Herwig (2007) erklärt die Entropie s folgendermaßen:

Die Entropie ist sicherlich diejenige thermodynamische Größe, die sich am wenigsten aufgrund von Alltagserfahrungen erschließt, weil sie eine Größe darstellt, die außerhalb thermodynamischer Überlegungen in der Regel nicht betrachtet wird. Somit verbindet sich mit dieser Größe auch keine „Vorerfahrung“ und ihre Bedeutung kann sich nur aus den Zusammenhängen erschließen, in denen sie eine Rolle spielt. In diesem Sinne ist die Frage, was Entropie sei, die Frage nach der Gesamtheit der Zusammenhänge, in denen sie entscheidend vorkommt. Dies dürfte erklären, warum die Frage „Was ist Entropie?“ nicht einfach und kurz zu beantworten ist.

Aus diesem Grund wird die Entropie im Folgenden zunächst als abstrakte Größe eingeführt und durch die Zusammenhänge erläutert, in denen sie als quantifizierbare Größe auftritt.

Wesentliche physikalische Zusammenhänge, in denen die Größe *Entropie* eine Rolle spielt und in denen sie zur quantitativen Beschreiben benötigt wird, sind:

- die Bewertung von Energieformen im Sinne der Möglichkeit, Energie in thermischen und/oder mechanischen Prozessen zu nutzen (z.B. um sie zu Heizzwecken einzusetzen oder mit ihr einen elektrischen Generator anzutreiben).
- die Bewertung von thermodynamischen Prozessen im Sinne der Frage nach ihrer grundsätzlichen Durchführbarkeit bzw. nach der dabei auftretenden Entwertung beteiligter Energien. Dies ist in der Regel die Frage nach Verlusten, die bei thermodynamischen Prozessen auftreten und die mit Hilfe der Größe *Entropie* quantifiziert werden können.
- die Beschreibung des thermodynamischen Stoffverhaltens im Sinne von Zustandsgleichungen für die einzelnen Stoffe (S.82, S.83).

3.1.6 Formelzeichen, Indizes

γ_i ... Brennstoff (BS, B) elementar Zusammensetzung in $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg BS}} \right]$

μ_i ... spezifische Gasmenge (Luft, Rauchgas) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg BS}} \right]$

ξ_i ... Masseanteil in $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$

V_i ... spezifische Rauchgasmenge $\left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg B}} \right]$

N_m^3 ... Normkubikmeter

$X_{\text{H}_2\text{O,LT}}$... Massenbeladung $X_{\text{H}_2\text{O}}$ $\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg trockene Luft}} \text{ oder } \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg trockenes Rauchgas}} \right]$

I ... Massenbruch des Bruttomassenstroms

$\dot{m}_{\text{Asch}}$... Massenstrom Asche, setzt sich aus Flugasche (FA) und dem Schlackenanteil zusammen

RG ... Rauchgas

L ... Luft

Für die Verbrennungsrechnung muss die Müllzusammensetzung bekannt sein, hierfür wurde unter anderem folgende Tabelle zur Übersicht herangezogen.

Physikalische Eigenschaften:		
Heizwert (unterer)		ca. 8400 kJ/kg
Anteil Brennbares		ca. 45 Gew. %
Anteil Asche		ca. 25 Gew. %
Anteil Wasser		ca. 30 Gew. %
Grobeisenmenge (bezogen auf die Gesamtmasse)	ca. 4	bis 5 %
Schüttgewicht in kg/m ³ :		
loser Müll (Sack oder Eimer)	90 bis	120
im Müllfahrzeug (gepreßt)	350 bis	550
im Müllbunker	200 bis	300

Chemische Eigenschaften (Mittelwerte in % bezogen auf TS)		
Kohlenstoff C	30 bis	40
Wasserstoff H	4 bis	5
Sauerstoff O	17 bis	30
Stickstoff N	0,3 bis	0,45
Chlor Cl ⁻	0,5 bis	1,5
Schwefel S	0,2 bis	0,7

Schwermetalle in g/kg Müll (feucht)		
Blei Pb	0,6 bis	2,0
Kupfer Cu	0,12 bis	0,78
Eisen Fe	10 bis	100
Zink Zn	0,44 bis	2,30
Zinn Sn	0,05 bis	0,32
Chrom Cr	0,02 bis	0,88
Cadmium Cd	0,003 bis	0,012
Barium Ba	0,084 bis	1,225

Zusammensetzung nach Abfallstoffgruppen (Gewichtsprozent)			
im Jahre:	1961	1975	1980
Papier, Karton	19	40	25 - 35
Küchenabfälle	57	12	15 - 30
Glas, Steine, Keramik	3	12	6,6
Metalle	2	5	5,2
Holz	1	4	--
Kunststoffe	2	4	6 - 12
Textilien	2	4	2,8
Gummi, Leder	1	2	3,1
Verschiedenes	13	17	202 - 45

Abbildung 5: Zusammensetzung und physikalisch-chemische Eigenschaften des Mülls (Reimann, 1991, S. 63)

3.1.7 Daten der Wirkungsgradberechnung

In der folgenden Datendarstellung ist zu beachten, dass in der Spalte Wert zwischen Absolutwert, Prozentsatz und Prozentfuß zu unterscheiden ist. Um Klarheit zu schaffen, worum es sich handelt ist dies in der Spalte Einheit angegeben. Beim Prozentfuß handelt es sich im Gegensatz zum Prozentsatz um die rechnerische Größe, die den Quotienten aus Prozentsatz des Grundwertes und 100 entspricht.

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit	Quelle
relative Luftfeuchtigkeit	Φ (Jahresmittel)	62	Prozentsatz %	http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm
Dampfsättigungs-Druck (ϑ)	$p_s(9,78^\circ\text{C})$ $p_s(25^\circ\text{C})$	0,0121 0,0317	bar	http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=25&THigh=25&TInc=&Digits=5&ID=C7732185&Action=Load&Type=SatP&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fkg&WUnit=m%2Fs&VisUnit=uPa%2As&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF
Brennstoff	γ_C	0,3	Prozentfuß	Reimann, 1991, S. 63
	γ_H	0,04		Reimann, 1991, S. 63
	γ_{Schwefel}	0,002		Reimann, 1991, S. 63
	γ_O	0,22		Reimann, 1991, S. 63
	γ_W	0,25		Reimann, 1991, S. 63
	γ_N	0,003		Reimann, 1991, S. 63
	γ_{Asch}	0,185		$\gamma_{\text{Asch}} = 1 - \gamma_C - \gamma_H - \gamma_s - \gamma_O - \gamma_W - \gamma_N$
Kontrolle der Müllzusammensetzung	H_u empirisch	ca. 10000	kJ/kg	lt. Boie-Formel: $H_u = 33,91 \cdot \gamma_C + 93,87 \cdot \gamma_H + 10,47 \cdot \gamma_{\text{Schwefel}} - 15,18 \cdot \gamma_O - 2,44 \cdot \gamma_W$ $H_u = 33,91 \cdot 0,3 + 93,87 \cdot 0,04 + 10,47 \cdot 0,002 - 15,18 \cdot 0,22 - 2,44 \cdot 0,25 = 9999$

Tabelle 2: Wirkungsgradberechnung Daten Teil1

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit	Quelle
Brutto (=reeller) Brennstoffmassenstrom	$\dot{m}_{Fo}$	34994	kg/h	lt. Berechnung IPSEpro = im Betriebsbereich der MVA Wandschneider, 2008, S. 133
		9,72	kg/s	
Netto-(=verbrannter) Brennstoffmassenstrom	$\dot{m}_F$	34632	kg/h	$\dot{m}_F = (1 - I_u) \cdot \dot{m}_{Fo}$ $\dot{m}_F = (1 - 0,01) \cdot 9,72 = 9,62$
		9,62	kg/s	
Brennstoffwärme + „Credits“ Laut EN 12952	$H_{u,Z,tot}$	10104	kJ/kg	$\dot{m}_F = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_{Kessel} \cdot H_{u,Z,tot}}$ $H_{u,Z,tot} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{m}_F \cdot \eta_{Kessel}} = \frac{82624}{9,62 \cdot 0,85}$ Haider, 2008, Kapitel 5, S.4
Müllverbrennung Amsterdam Luftüberschußzahl	n	1,4	-	http://www.ecoenergy.de/go_public/freigegeben/BiFuelCycle_Vivis_Maerz%202006.pdf S. 8
Kesselwirkungsgrad	η_D	85	Prozentsatz %	Wandschneider, 2008, S. 133

Tabelle 3: Wirkungsgradberechnung Daten Teil2

Bei den „Credits“ handelt es sich allgemein um externe Anteile für Luft- bzw. Brennstoff Vorwärmung und Direktentschwefelung. In diesem Fall wirkt kein „Credit“.

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit	Quelle
Flugasche	$\dot{m}_{\text{Asch, Flugasche}}$	0,032	Prozentfuß	http://www.iwa.tuwien.ac.at/htmd2264/publikat/aws-publikationen/Publikationen/1997/Bericht%20MAPE%203.pdf S.57
		$0,032 \cdot 34994 = 1120$	kg/h	
		0,311	kg/s	
Kohlenstoff in Flugasche	$\xi_{\text{C, Flugasche}}$	0,0141	Prozentfuß	http://www.iwa.tuwien.ac.at/htmd2264/publikat/aws-publikationen/Publikationen/1997/Bericht%20MAPE%203.pdf S.195
Schlackenasche	$\dot{m}_{\text{Asch, Schlacke}}$	$0,185 - 0,032 = 0,153$	Prozentfuß	$\gamma_{\text{Asch}} - \text{Flugasche}$
		$0,153 \cdot 34994 = 5354$	kg/h	
		1,49	kg/s	
Kohlenstoffgehalt der Schlacke	$\xi_{\text{C, Schlacke}}$	0,0162	Prozentfuß	http://www.iwa.tuwien.ac.at/htmd2264/publikat/aws-publikationen/Publikationen/1997/Bericht%20MAPE%203.pdf , S.60
Kohlenmonoxid in Rauchgas	ξ_{CO}	12,74	ppm	http://www.iwa.tuwien.ac.at/htmd2264/publikat/aws-publikationen/Publikationen/1997/Bericht%20MAPE%203.pdf S.127
		0,00001274	Prozentfuß	
Heizwert CO	$H_{\text{u, CO}}$	10132	kJ/kg	Haider, 2010 , Kapitel 4, S. 15
Heizwert C	H_{C}	33913	kJ/kg	Haider, 2010 Kapitel 4, S.14
Dampfstrom	$\dot{m}_{\text{D}}$	0,284	kg/s	Wandschneider, 2008, S. 133

Tabelle 4: Wirkungsgradberechnung Daten Teil3

3.1.8 Rauchgasverluste – Vollast

Das Ziel dieser Berechnung ist es, die Verluste des eingesetzten Brennstoffes für die Müllmengen der Anlage Amsterdam im Kessel in die auftretenden Verlustkategorien zuzuordnen (Haider, 2010).

3.1.8.1 spezifische Luftmenge μ_L (H, Φ , t, Brennstoff) – Vollast

Als druckabhängige und damit örtliche Berechnungsgrundlage wird Wien gewählt. Hierbei wird aus dem tiefsten Punkt mit 151 m.ü.A. (=Meter über Adria) und dem höchsten Punkt mit 542 m.ü.A., eine Höhe von 200 m.ü.A. angenommen.

Aus der nachstehenden Tabelle folgt, dass der Höhendruck (Pat) 0,989 [bara=Druck absolut] beträgt.

H	O	200	400	600	800	1000	<i>H..[m]; Pat..[bara]</i>
pat	1,013	0,989	0,966	0,943	0,921	0,899	

Abbildung 6: Luftdruck abhängig von geod. Höhe (Haider, 2010)

μ_{LoT} = ... spezifischer stöchiometrischer Bedarf trockener Luft

$$\mu_{LoT} = 11,5122 \cdot \gamma_C + 34,2074 \cdot \gamma_H + 4,3129 \cdot \gamma_S - 4,3212 \cdot \gamma_O \left[\frac{\text{kg}_{LoT}}{\text{kg}_B} \right]$$

$$\mu_{LoT} = 11,5122 \cdot 0,3 + 34,2074 \cdot 0,04 + 4,3129 \cdot 0,002 - 4,3212 \cdot 0,22 = 3,88$$

$$X_{H_2O,LT} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s(\vartheta)}{(P - p_s(\vartheta))} \left[\frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{LT}} \right]$$

$p_s(\vartheta)$... Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei t (aus Wasserdampf tafel)

φ ... Luftfeuchte

P_{at} ... Luftdruck für Wien (m. ü. A. 200m) $P_{at} = 0,989$ [bara]

$$X_{H_2O,LT}(9,78^\circ\text{C}) = 0,622 \cdot \frac{0,62 \cdot 0,0121}{(0,989 - 0,0121)} = 0,00478 \left[\frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{LT}} \right]$$

$$X_{H_2O,LT}(25^\circ\text{C}) = 0,622 \cdot \frac{0,62 \cdot 0,0317}{(0,989 - 0,0317)} = 0,0128 \left[\frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{LT}} \right]$$

Zur Kontrolle wird der Wassergehalt $X_{H_2O,LT}$ auch in einem h-x Diagramm ermittelt.

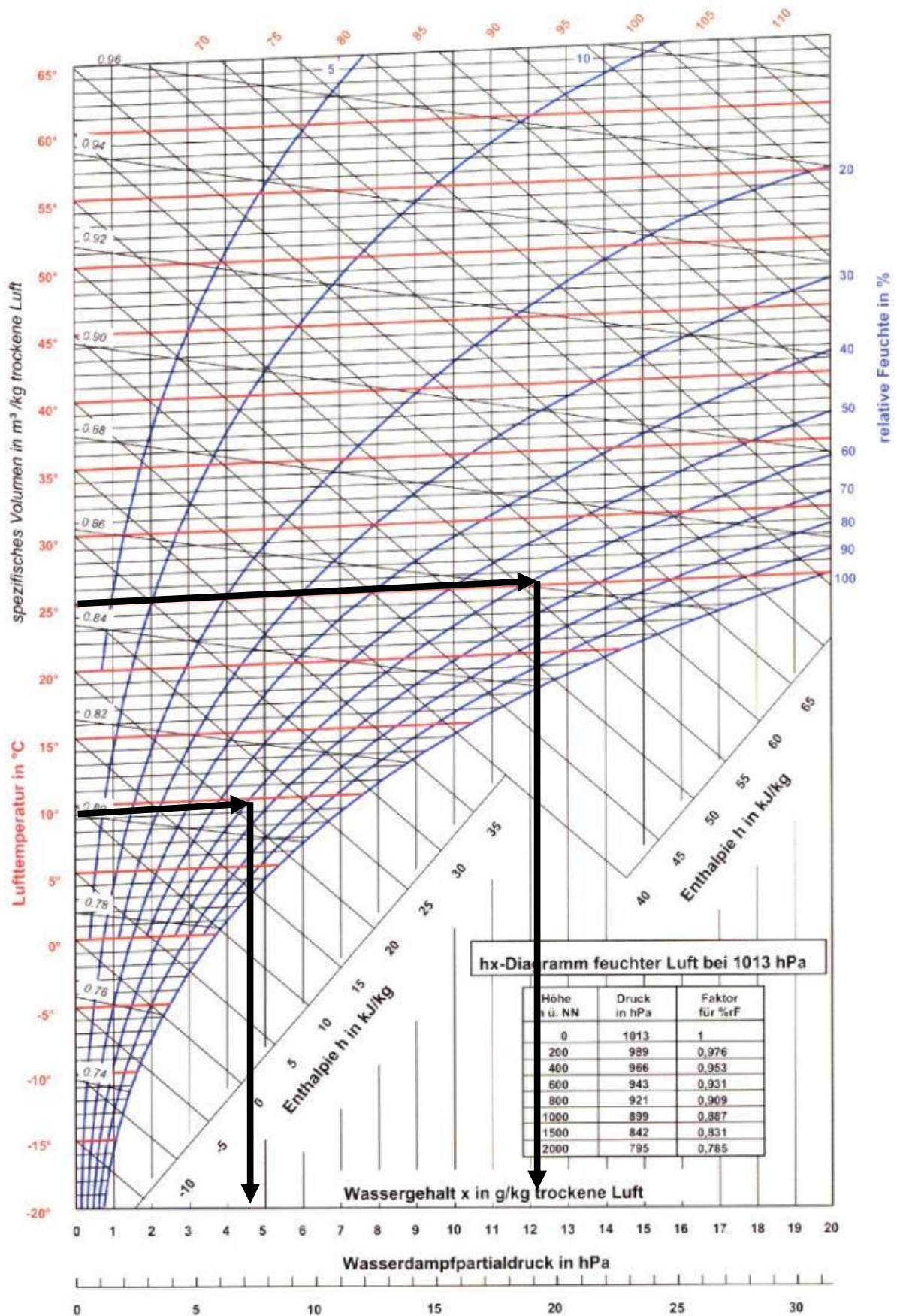


Abbildung 7: Mollier (h,x) Diagramm für feuchte Luft (http://www.nabueibelshausen.de/Rechner/feuchte_luft_enthalpie.html [16.01.2011].)

$$\begin{aligned}\mu_{L0} &= \mu_{L0T} \cdot (1 + X_{H_2O,LT}) \\ \mu_{L0}(9,78^\circ\text{C}) &= 3,88 \cdot (1 + 0,00478) = 3,9 \\ \mu_{L0}(25^\circ\text{C}) &= 3,88 \cdot (1 + 0,0128) = 3,93\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_L &= n \cdot \mu_{L0} \dots \left[\frac{\text{kg}_L}{\text{kg}_B} \right] \\ \mu_L(9,78^\circ\text{C}) &= 1,4 \cdot 3,9 = 5,46 \dots \left[\frac{\text{kg}_L}{\text{kg}_B} \right] \\ \mu_L(25^\circ\text{C}) &= 1,4 \cdot 3,93 = 5,5 \dots \left[\frac{\text{kg}_L}{\text{kg}_B} \right]\end{aligned}$$

3.1.8.2 Rauchgasmenge - Vollast

$$\begin{aligned}\mu_{CO_2} &= \frac{M_{CO_2}}{M_C} \cdot \gamma_C + X_{CO_2,LT} \cdot (1 + (n - 1)) \dots \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{kg}_B} \\ \mu_{CO_2} &= 3,6641 \cdot \gamma_C + 0,0051 \cdot \mu_{LOT} \cdot n \\ \mu_{CO_2} &= 3,6641 \cdot 0,3 + 0,0051 \cdot 3,88 \cdot 1,4 = 1,13\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{H_2O} &= \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} \cdot \gamma_H + 1 \cdot \gamma_W + X_{H_2O,LT} \cdot \mu_{LOT} \cdot (1 + (n - 1)) \dots \frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_B} \\ \mu_{H_2O} &= 8,937 \cdot \gamma_H + \gamma_W + X_{H_2O,LT} \cdot \mu_{LOT} \cdot n \\ \mu_{H_2O}(9,78^\circ\text{C}) &= 8,937 \cdot 0,04 + 0,25 + 0,00478 \cdot 3,88 \cdot 1,4 = 0,633 \\ \mu_{H_2O}(25^\circ\text{C}) &= 8,937 \cdot 0,04 + 0,25 + 0,0128 \cdot 3,88 \cdot 1,4 = 0,677\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{O_2} &= 0 + X_{O_2,LT} \cdot \mu_{LOT} \cdot (n - 1) \dots \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_B} \\ \mu_{O_2} &= 0,23142 \cdot \mu_{LOT} (n - 1) \\ \mu_{O_2} &= 0,23142 \cdot 3,88 \cdot (1,4 - 1) = 0,359\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{A_r} &= 0 + X_{A_r,LT} \cdot \mu_{LOT} \cdot (1 + (n - 1)) \dots \frac{\text{kg}_{A_r}}{\text{kg}_B} \\ \mu_{A_r} &= 0,01265 \cdot \mu_{LOT} \cdot n \\ \mu_{A_r} &= 0,01265 \cdot 3,88 \cdot 1,4 = 0,0687\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{SO_2} &= \frac{M_{SO_2}}{M_S} \cdot \gamma_{\text{Schwefel}} + 0 \dots \frac{\text{kg}_{SO_2}}{\text{kg}_B} \\ \mu_{SO_2} &= 1,9981 \cdot \gamma_{\text{Schwefel}} = 1,9981 \cdot 0,002 = 0,004\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{N_2} &= \gamma_N + X_{N_2,LT} \cdot \mu_{LOT} \cdot (1 + (n - 1)) \dots \frac{\text{kg}_{N_2}}{\text{kg}_B} \\ \mu_{N_2} &= \gamma_N + 0,755542 \cdot \mu_{LOT} \cdot n \\ \mu_{N_2} &= 0,003 + 0,755542 \cdot 3,88 \cdot 1,4 = 4,02\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_G &= \mu_{CO_2} + \mu_{H_2O} + \mu_{O_2} + \mu_{A_r} + \mu_{SO_2} + \mu_{N_2} \dots \frac{\text{kg}_G}{\text{kg}_B} \\ \mu_G(9,78^\circ\text{C}) &= 1,13 + 0,633 + 0,359 + 0,0687 + 0,004 + 4,02 = 6,21 \\ \mu_G(25^\circ\text{C}) &= 1,13 + 0,677 + 0,359 + 0,0687 + 0,004 + 4,02 = 6,26\end{aligned}$$

$$\dot{m}_{RG} = \mu_G \cdot \dot{m}_{F0}$$

$$\dot{m}_{RG}(9,78^\circ\text{C}) = 6,21 \cdot 9,72 = 60,36 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_{RG}(25^\circ\text{C}) = 6,26 \cdot 9,72 = 60,85 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$h_{RG} = \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} c_p d\vartheta = \bar{c}_p \cdot (\vartheta - \vartheta_0)$$

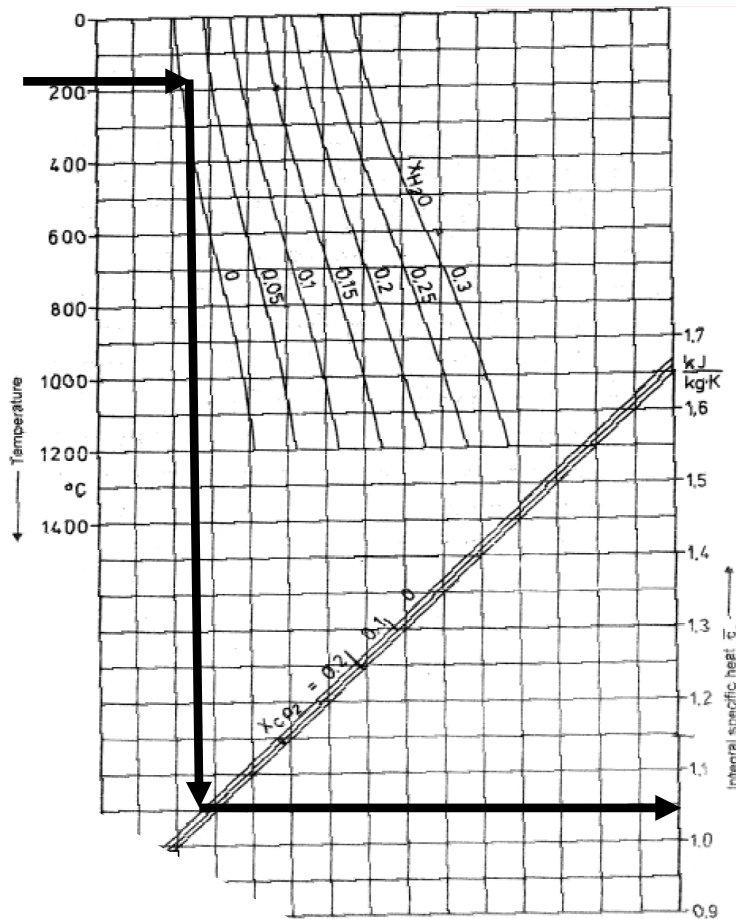


Abbildung 8: integrale isobare spezifische Wärmekapazität (Steinmüller-Pocket, 1994, nach Haider, 2010)

$$\dot{H}_{RG} = h \cdot \dot{m}_{RG} = \bar{c}_p \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \cdot \dot{m}_{RG} \text{ [kW]}$$

$\bar{c}_p$... wird aufgrund der ungenauen Erfassungsmöglichkeit in Abb. 8 für $9,78^\circ\text{C}$ und 25°C gleich angenommen

$$\dot{H}_{RG}(9,78^\circ\text{C}) = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (180^\circ\text{C} - 9,78^\circ\text{C}) \cdot 60,36 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 10788 \text{ kW}$$

$$\dot{H}_{RG}(25^\circ\text{C}) = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (180^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \cdot 60,85 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 9903 \text{ kW}$$

3.1.8.3 Verluste durch Unverbranntes - Volllast

Hierbei setzen sich die Verluste aus 3 Komponenten zusammen.

gasförmige Komponenten im Abgas:

$$I_{U,CO} = \frac{\dot{m}_F \cdot \mu_G \cdot \xi_{CO} \cdot H_{u,CO}}{\dot{m}_F \cdot H_{u,Z,tot}}$$

$$I_{U,CO} = \frac{9,62 \cdot 6,21 \cdot 0,00001274 \cdot 10132}{9,62 \cdot 10104} = 0,000079$$

festen Koks (unverbrannten Kohlenstoff) in der Ferraum Bodenasche:

$$I_{U, \text{Schlacke}} = \frac{\dot{m}_{\text{Asch, Schlacke}} \cdot \xi_{C, \text{Schlacke}} \cdot H_C}{\dot{m}_F \cdot H_{u, Z, \text{tot}}}$$

$$I_{U, \text{Schlacke}} = \frac{1,49 \cdot 0,0162 \cdot 33913}{9,62 \cdot 10104} = 0,00842$$

festen Koks in der Flugasche:

$$I_{U, \text{FA}} = \frac{\dot{m}_{\text{Asch, FA}} \cdot \xi_{C, \text{FA}} \cdot H_C}{\dot{m}_F \cdot H_{u, Z, \text{tot}}}$$

$$I_{U, \text{FA}} = \frac{0,311 \cdot 0,0141 \cdot 33913}{9,62 \cdot 10104} = 0,00153$$

$$I_U = I_{U, \text{CO}} + I_{U, \text{Schlacke}} + I_{U, \text{FA}}$$

$$I_U = 0,000079 + 0,00842 + 0,00153 = 0,01 = 1\%$$

Für die Ermittlung der Müllexergie wird der Brennwert H_o berechnet.

r ... Verdampfungsenthalpie des Wassers für Exergie auf $9,78^\circ\text{C}$ bezogen

$$r(9,78^\circ\text{C}) = h'' - h' = 2518,8 - 41,098 = 2477,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_o(9,79^\circ\text{C}) = H_u + r \cdot (9 \cdot \gamma_H + \gamma_W)$$

$$H_o(9,78^\circ\text{C}) = 10000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2477,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot (9 \cdot 0,04 + 0,25) = 11511 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Müllexergie}(9,78^\circ\text{C}) = \text{Brennstoffmenge} \cdot H_o$$

$$\text{Müllexergie}(9,78^\circ\text{C}) = 9,72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 11511 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Müllexergie}(9,78^\circ\text{C}) = 111887 \text{ kW}$$

$$\text{Müllenergie}(25^\circ\text{C}) = 97205 \text{ kW lt. Simulation IPSEpro Abbildung 12}$$

$$\text{Verluste durch Unverbranntes}(9,78^\circ\text{C}) = \text{Müllexergie} \cdot I_U = 111887 \cdot 0,01 = 1119 \text{ kW}$$

$$\text{Verluste durch Unverbranntes}(25^\circ\text{C}) = \text{Müllenergie} \cdot I_U = 97205 \cdot 0,01 = 972 \text{ kW}$$

3.1.8.4 sonstige Kesselein- und Kesselausgänge - Vollast

Die Luft hat keine Exergie, da keine Temperaturdifferenz vorhanden ist.

$$\text{Luftenergie}(25^\circ\text{C}) = \dot{m}_{F0} \cdot \mu_L \cdot h$$

$$\text{Luftenergie}(25^\circ\text{C}) = \dot{m}_{F0} \cdot \mu_L \cdot \bar{c}_p \cdot (9,78^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$\text{Luftenergie}(25^\circ\text{C}) = 9,72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 5,5 \cdot 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (9,78^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$\text{Luftenergie}(25^\circ\text{C}) = -854 \text{ kW}$$

3.1.8.5 Übersicht Dampferzeuger:

Rauchgasverluste:

$$I_{RG} = \frac{\mu_G \cdot \bar{c}_P \cdot (\vartheta_{Abgas} - \vartheta_0)}{H_{u,Z,tot}} = \frac{6,26 \cdot 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (180 - 25)\text{K}}{10104 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,1008 = 10,08\%$$

Strahlungsverluste:

$$I_{St} = I_{RC} = \frac{C \cdot Q_n^{0,7}}{\dot{m}_F \cdot H_{u,Z,tot}}$$

C...angenommen (für Braunkohle- und Wirbelschichtkessel)

Q_n ...max. Nutzleistung des Kessels ca. 100 MW

$$I_{St} = \frac{0,0315 \cdot 100^{0,7} \text{MW}}{9,62 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 10,104 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 0,00814 = 0,814\%$$

Verluste durch Unverbranntes:

$$I_U = I_{U,CO} + I_{U,S} + I_{U,FA}$$

$$I_U = 0,000079 + 0,00842 + 0,00153 = 0,01 = 1\%$$

Verlust durch Wärme und unverbrannte Asche:

$\bar{c}_{P,S}$... angenommen für Braunkohle

t_m ... wurde aus der Rauchgastemperatur und der geschätzten Schlackentemperatur angenommen

$$I_{WSF} = I_{RC} = \frac{(\dot{m}_{Asch,Flugasche} + \dot{m}_{Asch,Schlacke}) \cdot \bar{c}_{P,S} \cdot (t_m - t_0)}{\dot{m}_F \cdot H_{u,Z,tot}}$$

$$I_{WSF} = I_{RC} = \frac{(0,311 + 1,49) \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (500 - 25)\text{K}}{9,62 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 10104 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,015 = 1,5\%$$

$$\eta_D = 1 - I_G - I_{St} - I_U - I_{WSF} - I_V$$

$$0,85 = 1 - 0,1008 - 0,00814 - 0,015 - 0,01 - I_V$$

sonstige Verluste:

$$I_V = 0,016 = 1,6\%$$

3.1.8.6 Kesselbilanz - Volllast:

Aus der vorangegangenen Verbrennungsrechnung werden die ermittelten Werte in der folgenden Tabelle dargestellt. Alle Kesseleingänge haben ein positives Vorzeichen, alle Kesselausgänge haben ein negatives Vorzeichen.

Der aus IPSEpro ermittelte Dampfstrom vor und nach dem Boiler in der Müllverbrennungsanlage, gibt die vom Kessel an den Nutzdampf übertragene Energiemenge an.

	Exergie Bezugstemperatur [9,78°C]	Energie Bezugstemperatur [25°C]
Brennstoff [kW]	111887	97205
Rauchgasverlust [kW]	-10788	-9903
Verluste durch Unverbranntes [kW]	-1119	-972
Luft (Jahresdurchschnittstemperatur 9,78°C) [kW]	delta Temperatur=0 =>0	-854
Nutzwärme Dampf lt. IPSEpro	-41212	-82624
sich ergebende Strahlungs- & Konvektionsverluste und sonstige Verluste	-58768	-2852
Wirkungsgrad =(Nutzwärme Dampf)/Brennstoff	≈37%	≈85%

Tabelle 5: Übersicht Wirkungsgradberechnung Volllast

3.1.9 Rauchgasverluste - Teillast

Bei der IPSE Simulation der Teillast ergibt sich aufgrund der veränderten Drücke, durch das Kegelgesetz, eine Veränderung der Boiler-Wärmeleistung und daraus folgt eine neue Müllbrennstoffmenge um diese veränderte Boiler-Wärmeleistung zu erreichen. Durch diese neue Müllbrennstoffmenge müssen die Verluste neu berechnet werden.

Die sich veränderte Brennstoffmenge wird wie folgt ermittelt.

Müllenergie(25°C)lt. IPSEpro = Brennstoffmenge · Heizwert

$$97817(25^{\circ}\text{C}) \text{ kW} = \text{Brennstoffmenge} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 10000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Brennstoffmenge} = 9,78 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Die angepasste Verbrennungsrechnung, für Teillast, wird ab 3.1.8.1 durchgeführt. Die sich nicht veränderten Werte wurden aus der Volllastberechnung übernommen.

3.1.9.1 spezifische Luftmenge μ_L (H, Φ , t, Brennstoff) – Teillast

$$\mu_L(9,78^\circ\text{C}) = 1,4 \cdot 3,9 = 5,46 \dots \left[\frac{\text{kg}_L}{\text{kg}_B} \right]$$

$$\mu_L(25^\circ\text{C}) = 1,4 \cdot 3,93 = 5,5 \dots \left[\frac{\text{kg}_L}{\text{kg}_B} \right]$$

Die Luftüberschußzahl wird von der Volllast übernommen, da nur eine sehr geringe Abweichung der Kessellast vorliegt und daher der Verbrennungsvorgang aufgrund der Überdimensionierung des Kessels als gleichwertig angesehen wird.

$$\mu_L(9,78^\circ\text{C}) = 1,4 \cdot 4,05 = 5,67 \dots \left[\frac{\text{kg}_L}{\text{kg}_B} \right]$$

$$\mu_L(25^\circ\text{C}) = 1,4 \cdot 3,92 = 5,5 \dots \left[\frac{\text{kg}_L}{\text{kg}_B} \right]$$

3.1.9.2 Rauchgasmenge - Teillast

$$\mu_G(9,78^\circ\text{C}) = 1,13 + 0,633 + 0,359 + 0,0687 + 0,004 + 4,02 = 6,21$$

$$\mu_G(25^\circ\text{C}) = 1,13 + 0,677 + 0,359 + 0,0687 + 0,004 + 4,02 = 6,26$$

$$\dot{m}_{RG} = \mu_G \cdot \dot{m}_{F0}$$

$$\dot{m}_{RG}(9,78^\circ\text{C}) = 6,21 \cdot 9,78 = 60,73 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_{RG}(25^\circ\text{C}) = 6,26 \cdot 9,78 = 61,22 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{H}_{RG} = h \cdot \dot{m}_G = \bar{c}_p \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \cdot \dot{m}_{RG} \text{ [kW]}$$

$$\dot{H}_{RG}(9,78^\circ\text{C}) = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (180^\circ\text{C} - 9,78^\circ\text{C}) \cdot 60,73 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 10854 \text{ kW}$$

$$\dot{H}_{RG}(25^\circ\text{C}) = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (180^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \cdot 61,22 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 9964 \text{ kW}$$

3.1.9.3 Verluste durch Unverbranntes - Teillast

siehe 3.1.8.3

$$I_U = I_{U,CO} + I_{U,Schlacke} + I_{U,FA}$$

$$I_U = 0,000079 + 0,00842 + 0,00153 = 0,01 = 1\%$$

$$\text{Müllexergie}(9,78^\circ\text{C}) = \text{Menge} \cdot H_0$$

$$\text{Müllexergie}(9,78^\circ\text{C}) = 9,78 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 11511 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Müllexergie}(9,78^\circ\text{C}) = 112578 \text{ kW}$$

$$\text{Müllenergie}(25^\circ\text{C}) = 97817 \text{ kW lt. Simulation IPSEpro Abbildung 29}$$

$$\text{Verluste durch Unverbranntes}(9,78^\circ\text{C}) = \text{Müllexergie} \cdot I_U = 112578 \cdot 0,01 = 1126 \text{ kW}$$

$$\text{Verluste durch Unverbranntes}(25^\circ\text{C}) = \text{Müllenergie} \cdot I_U = 97817 \cdot 0,01 = 978 \text{ kW}$$

3.1.9.4 sonstige Kesselein- und Kesselausgänge - Teillast

Die Luft hat keine Exergie, da keine Temperaturdifferenz vorhanden ist.

$$\text{Luftenergie}(25^\circ\text{C}) = \dot{m}_{F0} \cdot \mu_L \cdot h$$

$$\text{Luftenergie}(25^\circ\text{C}) = \dot{m}_{F0} \cdot \mu_L \cdot \bar{c}_p \cdot (9,78^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$\text{Luftenergie}(25^\circ\text{C}) = 9,78 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 5,5 \cdot 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot (9,78^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$\text{Luftenergie}(25^\circ\text{C}) = -860\text{kW}$$

Der aus IPSEpro ermittelte Dampfstrom vor und nach dem Boiler, gibt die vom Kessel übertragene Energiemenge an.

3.1.9.5 Kesselbilanz - Teillast:

	Exergie [9,78°C]	Energie [25°C]
Brennstoff [kW]	112578	97817
Rauchgasverlust [kW]	-10854	-9964
Verluste durch Unverbranntes [kW]	-1126	-978
Luft (Jahresdurchschnittstemperatur 9,78°C) [kW]	Delta T=0 =>0	-860
Nutzwärme Dampf lt. IPSEpro	-41390	-83145
sich ergebende Strahlungs- & Konvektionsverluste und sonstige Verluste	-59208	-2870
Wirkungsgrad =(Nutzwärme Dampf)/Brennstoff	≈37%	≈85%

Tabelle 6: Übersicht Verbrennungsrechnung Teillast

Im Vergleich zur Volllast ändern sich nur die Absolutverluste, die Verhältnisse und der Kesselwirkungsgrad bleiben gleich.

3.2 IPSE Pro

Bei IPSE Pro handelt es sich um eine Wärmebilanz- und Prozess Simulationssoftware der Firma SimTech Technology (Version 4.0 Build 882, 2008).

Das Programm setzt sich aus mehreren Modulen zusammen:

- MDK: Model Development Kit
- IPSEpro-PSEasy
- PSE: Process Simulation Environment
- IPSEpro-PSExcel
- PSServer-On-Line Module
- PSOptimize-Optimization
- IPSEpro-PSValidate
- PSEconomy

Durch die Verwendung von bereits existierenden Modellbibliotheken kann eine Vielzahl von Apparaten einfach verwendet werden. Auch ist eine Erstellung neuer Apparatmodelle, mittels Model Development Kit, möglich.

Für die, in dieser Diplomarbeit, untersuchten Fragestellungen wird die Kraftwerksbibliothek APP-Lib verwendet und ergänzt durch einen Luftkondensator (LUKO).

Zur Berechnung der benötigten Stoffwerte wird die Homepage des National Institute of Standards and Technology's (<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>) herangezogen.

Hierbei kann die gewünschte Einheit der Zielgrößen gewählt werden.

Diese ermittelten Werte wurden mittels t-s Diagramms auf Plausibilität geprüft.

Als Betriebsfaktoren werden folgende Werte für die Berechnung verwendet:

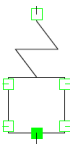
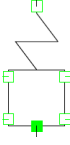
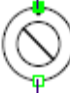
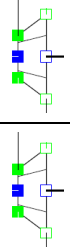
Bemerkung	Symbol	Betriebsfaktoren	Wert	Einheit
Boiler = Kessel		eta_b	ca. 85	%
		delta_p	10	bar
Zwischenüberhitzer		eta_b	ca. 85	%
		delta_p	0,2	bar
Economisers:		eta_b	100	%
ECO 2		delta_p	0,1	bar
ECO 3				
Rostkühlung		eta_s	85	%
Turbine hochdruck (HD)		eta_m	99	%
Turbine mitteldruck (MD)		eta_s	65	%
Turbine niederdruck (ND)		eta_m	98	%

Tabelle 7: Betriebsfaktoren der Müllverbrennungsanlageanteile Teil 1

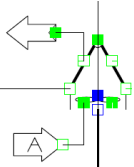
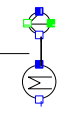
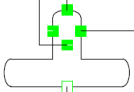
Bemerkung	Symbol	Betriebsfaktoren	Wert	Einheit
Generator		eta_el	99	%
		eta_m	99	%
Luftkondensator LUKO		Delta_p_fan berechnet aus Vergleichsobjekt	0,00147	bar
		dt_sub	0	°C
		delta_p_hot	0	bar
		delta_p_cold	0	bar
Umwelt (=Kühlluft)		p	1,013	bar
		t	9,78	°C
		phi	62	%
Pumpe		Gesamtwirkungsgrad	70	%
Vorwärmer		delta_p_hot	0,1	bar
		delta_p_cold	0,1	bar
		dt_sub	1	°C
Ventil		keine Verluste		
Entgaser		delta_p_cold	0	bar
		delta_p_hot	0	bar
Fernwärme Rücklauf		p	16	bar
		T	50	°C
Fernwärme Vorlauf		T	100	°C

Tabelle 8: Betriebsfaktoren der Müllverbrennungsanlage Teile Teil 2

3.3 Kraftwerk - 100% Stromerzeugung

3.3.1 Anlagenbeschreibung

Hierbei ist die Müllverbrennungsanlage „Hoog Rendoment Afval Verwerkings Installatie“ in Amsterdam die herangezogene Referenz. In dieser Anlage wird mit Rostfeuerung ein Nettowirkungsgrad von über 30% erreicht. Dieser Rost fördert den daraufliegenden Müll durch die Brennkammer und wird durch die zugeführte Verbrennungsluft durchströmt. Durch dieses Verfahren wird eine Vorbehandlung des Mülls, bis auf die Durchmischung im Müllbunker, umgangen. Diese Anlage nutzt einen Wasserkondensator. Als Anpassung an eine Standortunabhängigkeit wurde auf eine Rückkühlung durch Wasser verzichtet und stattdessen eine Luftrückkühlung angenommen. Dadurch wird der Nettowirkungsgrad der Müllverbrennungsanlage Amsterdam nicht erreicht.

	Einheit	100% Last		110% Last	
Datum	–	24.7.2007		25.7.2007	
Zeitraum	–	16:00 - 22:00		8.00 - 14:00	
Zeitdauer	h	6		6	
Ziel-Netto-Wirkungsgrad	%	≥ 30		> 30	
Messinstitut	--	Lieferfirma	KEMA (Tüv)	Lieferfirma	KEMA (Tüv)
Kessel-Wirkungsgrad	%	85,2	85,5 ±1	85,8	85,5 ±1
Anlagen-Netto-Wirkungsgrad	%	30,5 ¹⁾	30,6 ±1,6	30,8 ¹⁾	30,9 ±1,6

¹⁾ Berechnungen der Planung

Abbildung 9: Wirkungsgrad und Leistungsfahrt (Wandschneider, 2008, S. 132)

Der Kesselwirkungsgrad wurde mit 85% angenommen. Ebenfalls wird der gemessene O₂ Gehalt trocken in der Müllverbrennungsanlage Amsterdamm von 6%-6,73% mit

$$\frac{\mu_{O_2}}{\mu_G} = \frac{0,36}{6,26} \approx 6\%$$

der in 3.1.6 festgelegten Brennstoffzusammensetzung erreichen.

Parameter	Einheit	Garantiewert	Messwert ²⁾
Kesselwirkungsgrad	%	85	85,2
Verweilzeit (DLC)	s	> 2	5
Eigenverbrauch (Los 1)	kW	< 850	498
thermische Leistung (DLC)	MW	93,3	96,9 / 97,07 ¹⁾
thermische Leistung (max.)	MW	102,7	103,63 / 102,93 ¹⁾
Durchsatz (DLC)	Mg/h	33,6	34,89 / 34,94 ¹⁾
Heizwert	MJ/kg	10	9,94 / 10,26 ¹⁾
Schwankung Frischdampfmenge	%	2	-0,72 bis +1,18 / -1,57 bis +0,75
O ₂ -Gehalt (Kesselende)	%	6,5	6 - 6,73 (ø < 6,5)
CO Kesselende	mg/m ³	≤ 30	6
NO _x (Kesselende)	mg/m ³	70	66 - 68
NH ₃ (Kesselende)	mg/m ³	≤ 5	3
TOC	%	≤ 1,5	0,1 - 0,66
Dampfmenge (DLC)	kg/s	28,4	28,46 / 28,52 ¹⁾
Kesselaustrittstemperatur	°C	180 (konst.)	177,35 - 183,75
Schwankung Dampftemperatur	± K	4	3,87 / 1,92 ¹⁾

DLC = Auslegungspunkt

¹⁾ Messwert Linie 35/36

²⁾ Garantiemessung

Abbildung 10: Messwerte der Leistungsfahrt für Feuerung und Kessel (Wandschneider, 2008, S. 133)

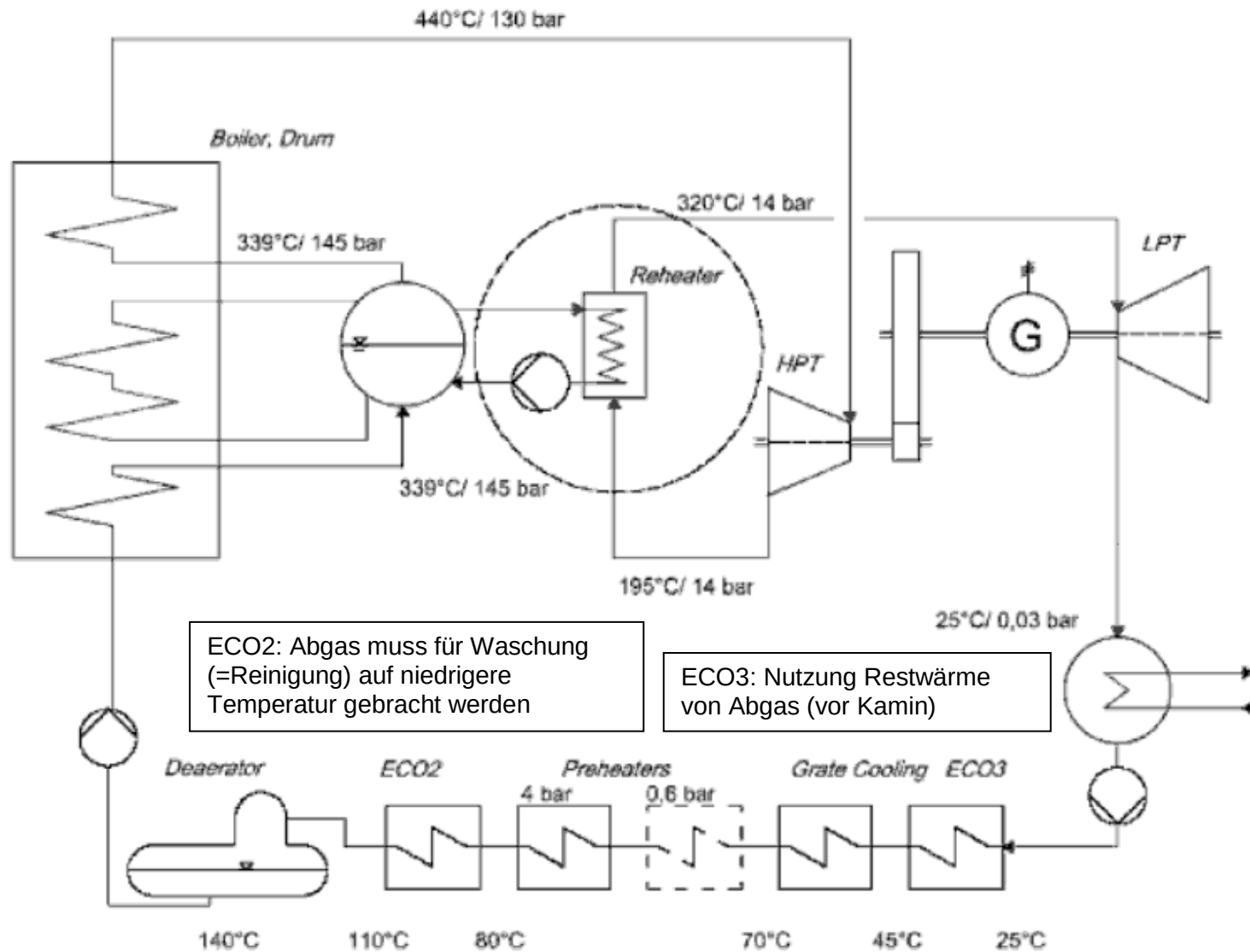


Abbildung 11: thermischer Kreislauf HR-AVI (Wandschneider, 2008, S. 131)

3.3.1.1 Kondensationsturbine

Falls es standortbedingt möglich ist einen Wasserkondensator zu verwenden, ist ein Abdampfdruck von ca. 0,03 bar bei ca. 25°C erreichbar. Hierbei ist die Problematik des höheren Wassergehaltes $x_{\max} \approx 0,9$ im Abdampf der Niederdruckturbinenstufe zu berücksichtigen.

Beim Großteil der Anlagen wird dieser Vorteil aber nicht ausnutzbar sein, da selten ein Fließgewässer verfügbar ist. Bei Verwendung eines Luftkondensators sind ca. 0,07 bar bei ca. 39°C erreichbar. Die nutzbare Enthalpiedifferenz der Turbine ist entsprechend geringer. Bei der Simulation mittels IPSEpro wurde auch ein Wasserkondensator durch Absenken des Abdampfdruckes auf 0,03 bar getestet. So ist der Wirkungsgrad durch einen Wasserkondensator im Vergleich zu dem Luftkondensator ca. 1,7% größer, bei sonst gleichbleibenden Bedingungen.

3.3.1.2 Rauchgasreinigung

Da dies nur ein Randgebiet der Diplomarbeit darstellt wird die Rauchgasreinigung mit einem fixen Betrag abhängig vom Brennstoffinput angenommen. Es wird ein interner Verbrauch von 10% des bei 100% Stromerzeugung gewonnenen Stromes angesetzt. Diese 10% umfassen die internen Verbraucher und die Rauchgasreinigung.

In der Müllverbrennungsanlage „100% Strom“ wird ein Stromoutput von 27962kWh erreicht. Davon ist der interne Verbraucher 865 kWh, daher ergibt sich ein Betrag von 1931kWh, die die Rauchgasreinigung benötigt. Dieser Betrag erhöht sich in Teillast aufgrund der höheren Brennstoffmenge um ca. 0,627%, also auf 1934kWh.

3.3.2 Simulation: IPSE Pro 100% Stromerzeugung

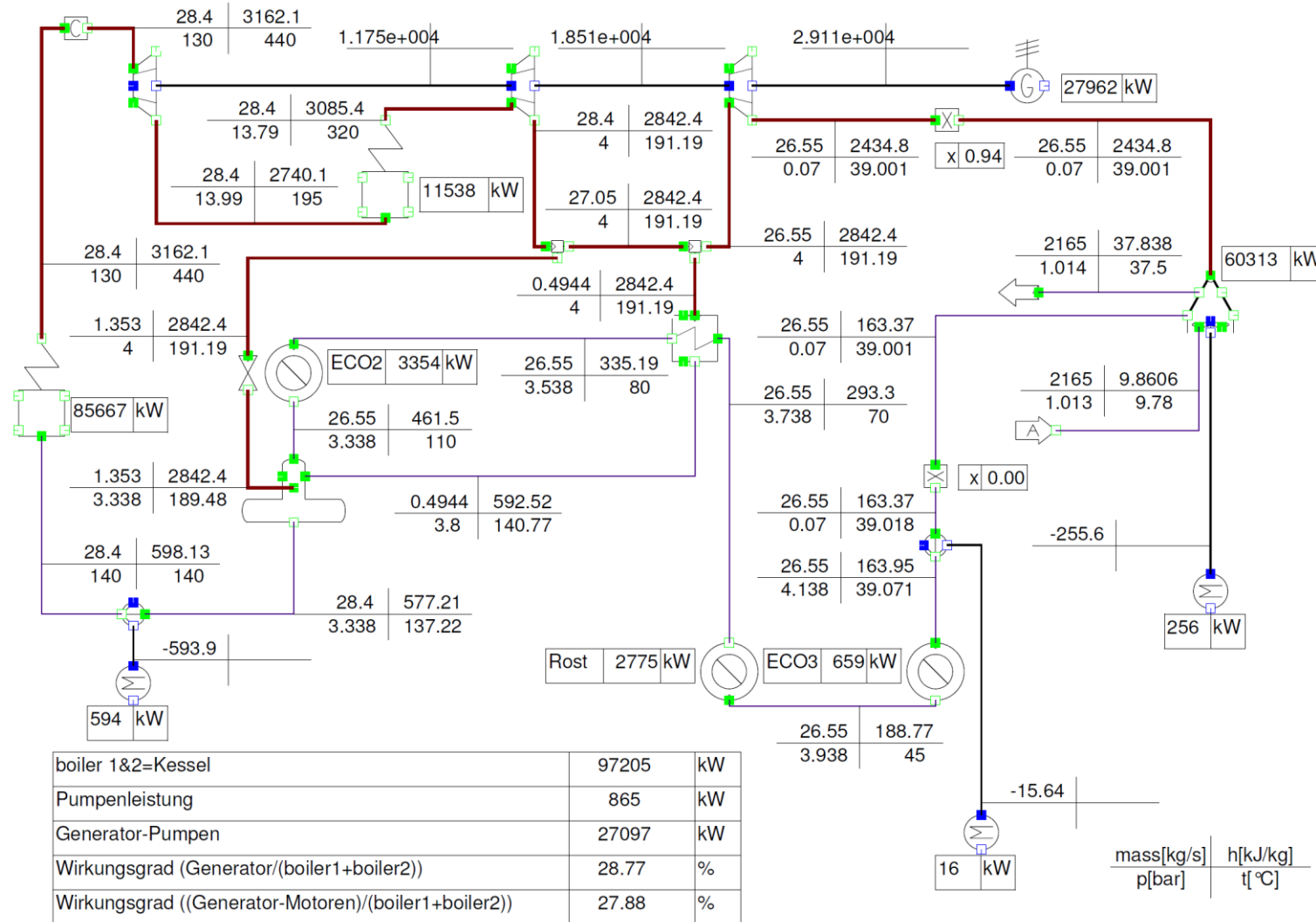


Abbildung 12: IPSE 100% Strom

3.3.3 Sankey-Diagramm Kraftwerk 100% Strom

Ein Sankey Diagramm stellt die Energiemengen proportional der Linienbreite dar. Hierbei werden Energie und Exergie schwarz dargestellt und die Anergie wird grau abgebildet. Als Einheiten der Werte wurde in allen folgenden Kraftwerkssankeydiagrammen die Energie in kW herangezogen und bei den Verbrauchssankeydiagrammen % verwendet.

Als Vorbereitung für die Erstellung der Sankey Diagramme ist für die nachfolgende Tabelle eine Darstellung der zugehörigen Leitungen durchgeführt worden.

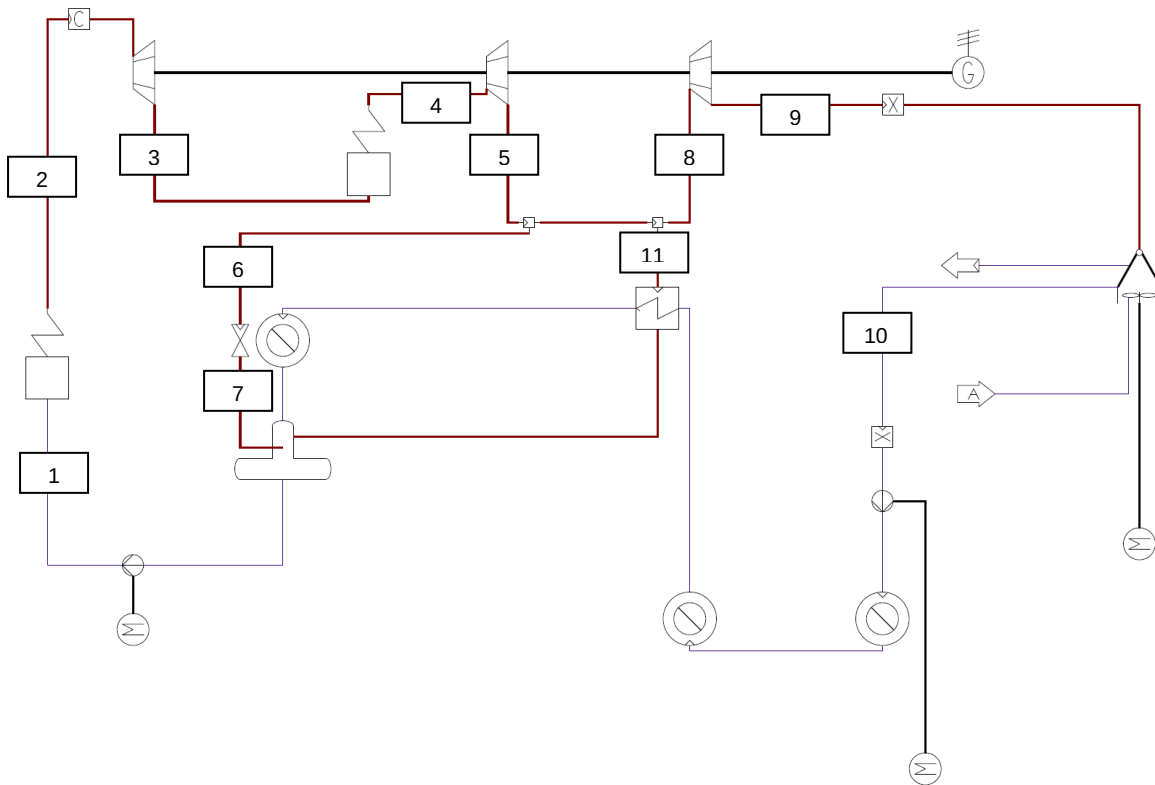


Abbildung 13: IPSE "100% Strom" Leitungsbezeichnung

Der Index 0 bezeichnet den Durchschnittsaußentemperaturzustand und die folgenden Werte fließen in die nachstehende Tabelle ein.

$$T_0 = 282,9\text{K}$$

$$h_0 = 41,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_0 = 0,148 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$h(25^\circ\text{C}) = 104,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Die Berechnung der für das Sankey – Diagramm benötigten Daten erfolgt in der folgenden Tabelle. Dieses Vorgehen bleibt bei den Berechnungen gleich. Es wurden die spezifische Enthalpie h , die spezifische Entropie s und der Massenstrom des Dampfes aus IPSEpro für die jeweilige Leitung ermittelt und mittels der Formeln aus 3.1.3 die Exergie und durch die Formel $\text{Energie}(25^\circ\text{C}) = \text{Massenstrom} \cdot h - \text{Massenstrom} \cdot h_0$ die Energie bezogen auf 25°C ermittelt.

Leitung	h [kJ/kg]	s [kJ/(kg K)]	Massen- strom [kg/s]	spezifische Exergie [kJ/kg]	Exergie [kW]	Energie Bezugs- temp. 25°C [kW]
1	598	1,73	28,40	111	3143	14010
2	3162	6,20	28,40	1407	39969	86826
3	2740	6,36	28,40	940	26705	74841
4	3085	7,04	28,40	1095	31091	84648
5	2842	7,13	28,40	825	23433	77748
6	2842	7,13	1,35	825	1116	3704
7	2842	7,21	1,35	802	1085	3704
8	2842	7,13	26,55	825	21908	72691
9	2435	7,84	26,55	219	5803	61868
10	163	0,56	26,55	6	155	1554
11	2842	7,13	0,49	825	408	1354

Tabelle 9: Daten Sankey Diagramm: Energie / Exergie "100% Strom"

3.3.3.1 Sankey Diagramm Energie (25°C) Kraftwerk „100% Strom“

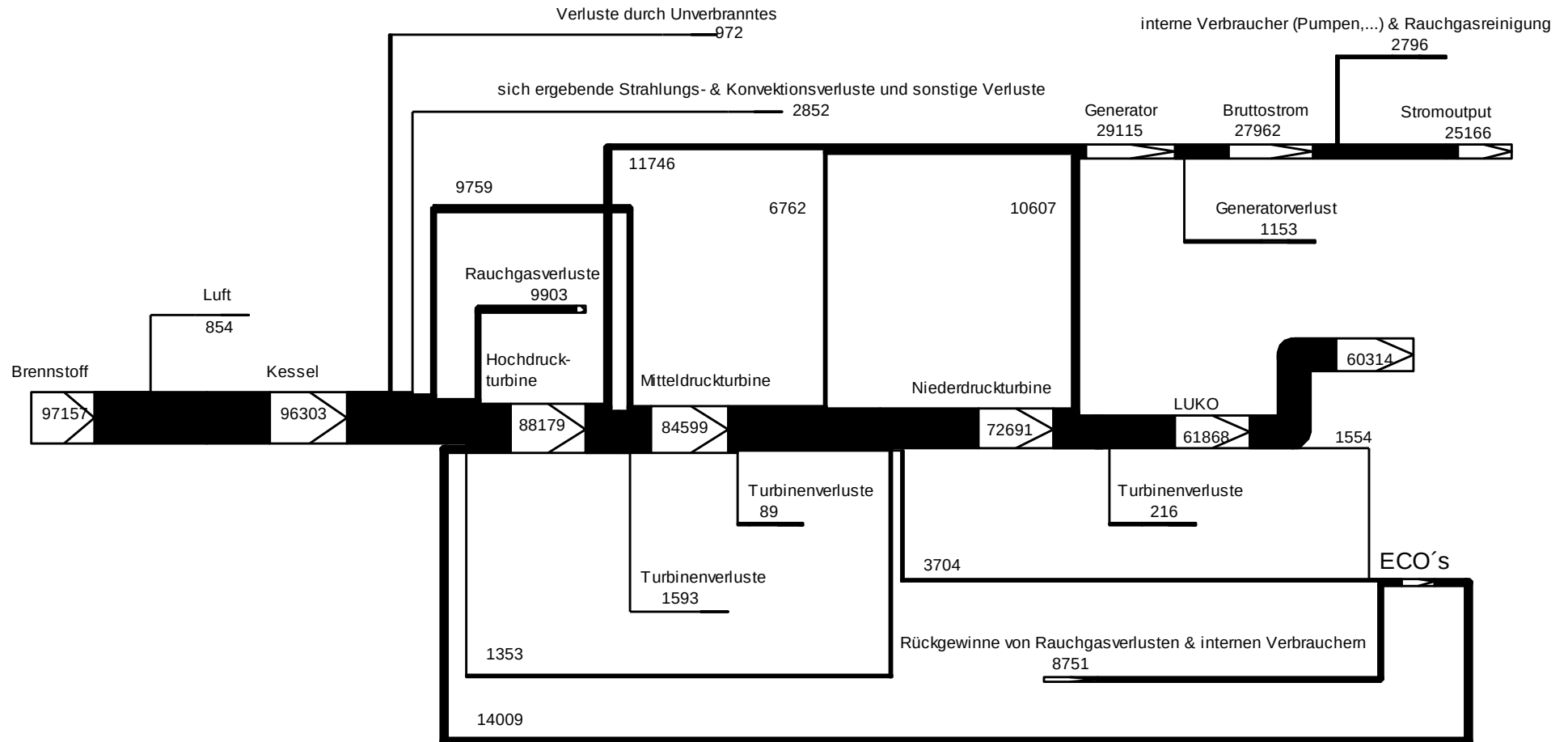


Abbildung 14: Sankey Diagramm: Energie "100% Strom"

3.3.3.2 Sankey Diagramm Exergie (9,78°C) Kraftwerk „100% Strom“

Hierbei muss anstatt des Heizwertes H_u der Brennwert H_o als Bezugsgröße herangezogen werden, da dieser der Exergie entspricht.

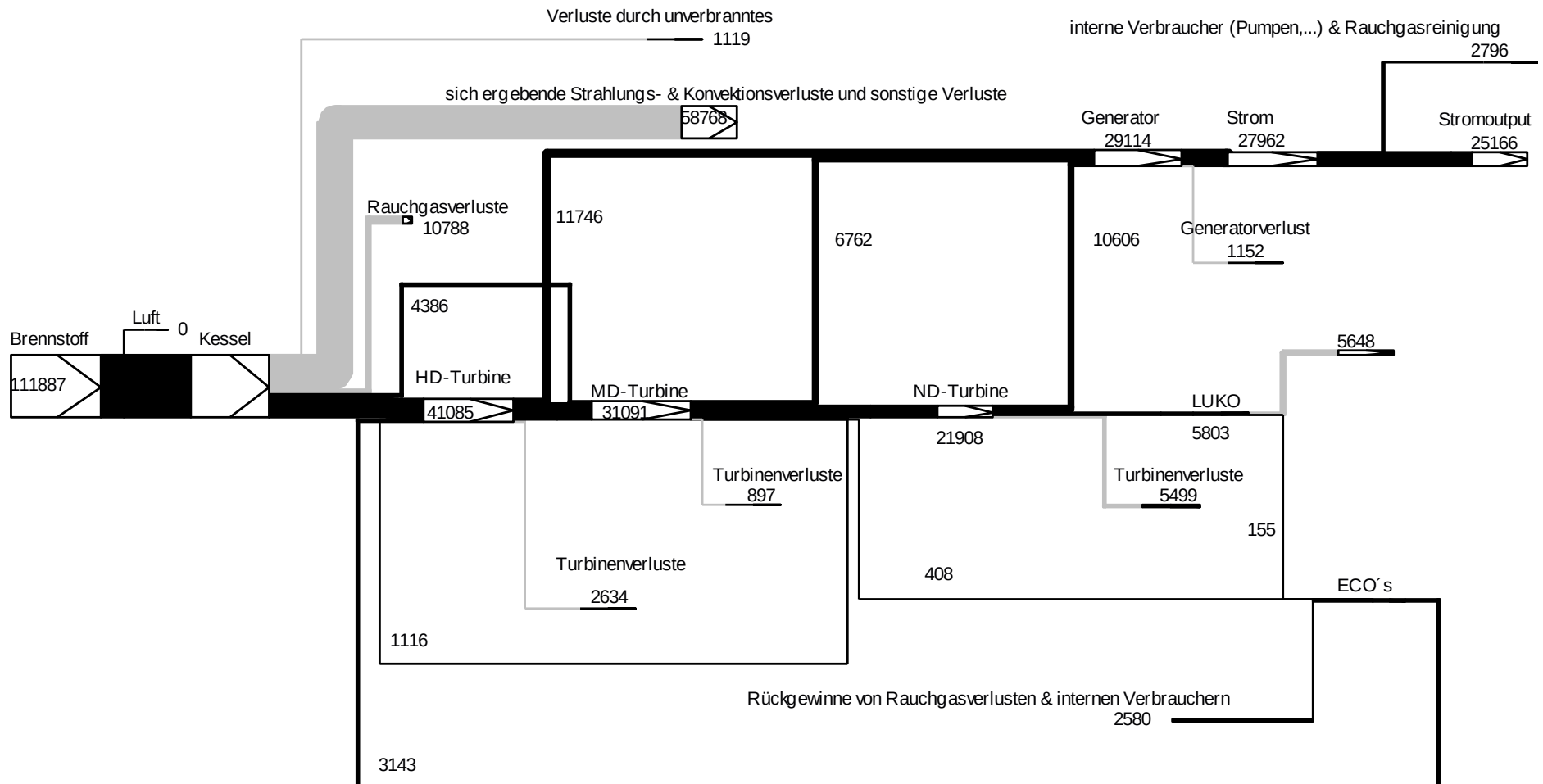


Abbildung 15: Sankey Diagramm: Exergie "100% Strom"

Im Sankey-Diagramm Energie ist die Bezugstemperatur 25°C.

Als Energiequelle wirken hierbei Luft und Müll. Die Energie der Luft resultiert aus der Differenz zur Durchschnittsjahrestemperatur mit 9,78°C und ist in diesem Fall negativ.

Im Sankey-Diagramm Exergie ist die Bezugstemperatur 9,78°C.

Als Energiequelle wirkt hierbei nur der Müll. Die Exergie der Luft ist null, da die Lufttemperatur der Umgebungstemperatur entspricht.

3.3.3.3 Sankey Exergie/Energie Vergleich

Verglichen mit dem Sankey Diagramm Exergie „100% Strom“ fällt bei den Turbinen im Sankey Diagramm Energie „100% Strom“, das sehr unterschiedliche Verhalten der Verluste der jeweiligen Nieder-, Mittel- und Hochdruckturbinen auf. Bei der Energiedarstellung ist der Verlust anteilmäßig bei jeder Turbinenstufe gleich. In der Exergiebetrachtung wird deutlich, dass im Niederdruckteil verhältnismäßig ein deutlich größerer Verlust auftritt.

Schön zu erkennen ist die große Energiemenge, die durch den luftgekühlten Kondensator (LUKO) abgeführt werden muss. Im Vergleich dazu fallen die Exergieverluste im Kondensator um ca. den Faktor 10 geringer aus. Der große Unterschied kann zum Kessel verfolgt werden. Die hohen Exergieverluste ergeben sich aufgrund der nicht umkehrbaren Vorgänge bei der Verbrennung. Auch die geringere Umlaufexergie im Vergleich zu der Energie ist deutlich zu erkennen.

Der Generatorverlust fällt bei beiden Sankey Diagrammen gleich aus, da es sich bei der Generatorwellendrehung um reine Exergie, also sehr hochwertige Energie handelt. Diese Wellendrehung hat also den gleichen Bezug und daher den gleichen Verlustfaktor.

3.3.4 Sankey – Diagramme der Verbrauchsszenarien

3.3.4.1 Stromversorgung

Die Leitungsverluste werden wie auch bei der Fernwärmeleitung mit 0 angenommen, da ohne Leitungslängen darüber keine fundierte Aussage getroffen werden kann.

3.3.4.2 Kühlen via mechanischer Luft - Wärmepumpe

Der Strombedarf ergibt sich durch die ermittelten Leistungszahlen (siehe 3.6) der mechanischen Luft - Wärmepumpe im Kühlbetrieb.

Hierbei ändert sich die Leistungszahl aufgrund der unterschiedlichen Temperatur über das Jahr betrachtet. Dargestellt wurde das folgende Sankey Diagramm mit der Jahresdurchschnittleistungszahl von 4,5 (siehe Tabelle 13).

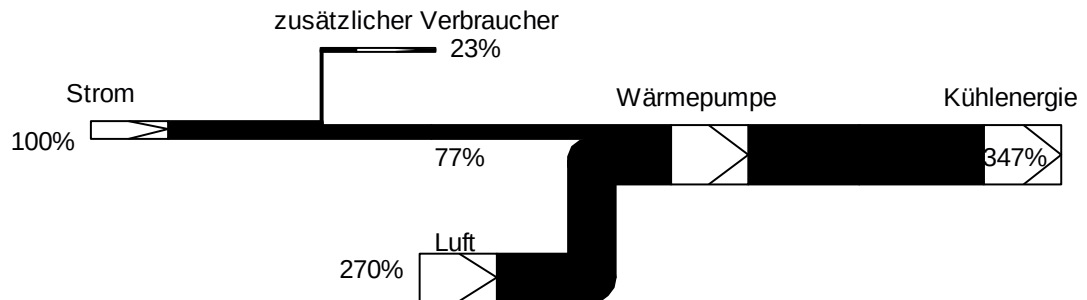


Abbildung 16: Energie Luft - Wärmepumpe Kühlen

Der zusätzliche Verbraucher beinhaltet die Ermittlung der hausinternen Verbraucher, die zum Kühlen benötigt werden. Der Wert wurde im Kapitel 3.7.7 ermittelt.

3.3.4.3 Warmwasser via mechanischer Luft / Wasser- Wasser - Wärmepumpe

Hierbei wird bei Warmwassererzeugung mittels Heizstab ein Wirkungsgrad von 100% angenommen.

Die Luft-Wärmepumpe schneidet aufgrund der hohen Sommertemperaturen mit einer höheren Leistungszahl ab als die Wasser-Wasser Wärmepumpe. Die Abweichungen der beiden Wärmepumpen liegen jedoch nur bei ca. 3% und im weiteren wird aufgrund der geringen Abweichung nur die Luft-Wärmepumpe als Sankey Diagramm abgebildet. Hierbei ändert sich die Leistungszahl aufgrund der unterschiedlichen Temperatur über das Jahr betrachtet. Dargestellt wurde das folgende Sankey Diagramm mit der Jahresdurchschnittleistungszahl von 3 (siehe Tabelle 14).

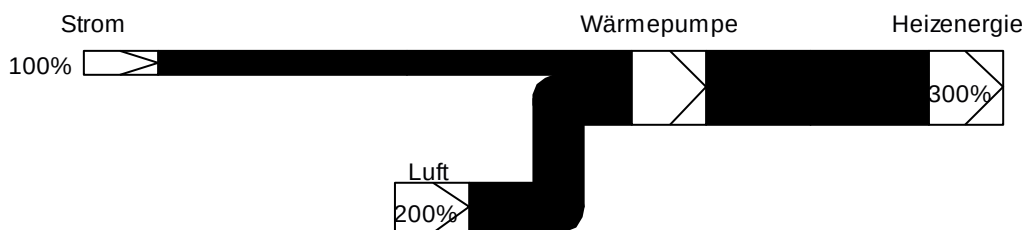


Abbildung 17: Energie Luft / Wasser - Wasser - Wärmepumpe Warmwasser

3.3.4.4 Heizung via mechanischer Luft- Wärmepumpe

Hierbei ändert sich die Leistungszahl aufgrund der unterschiedlichen Temperatur über das Jahr betrachtet. Dargestellt wurde das folgende Sankey Diagramm mit der Jahresdurchschnittleistungszahl von 4,04 (siehe Tabelle 13).

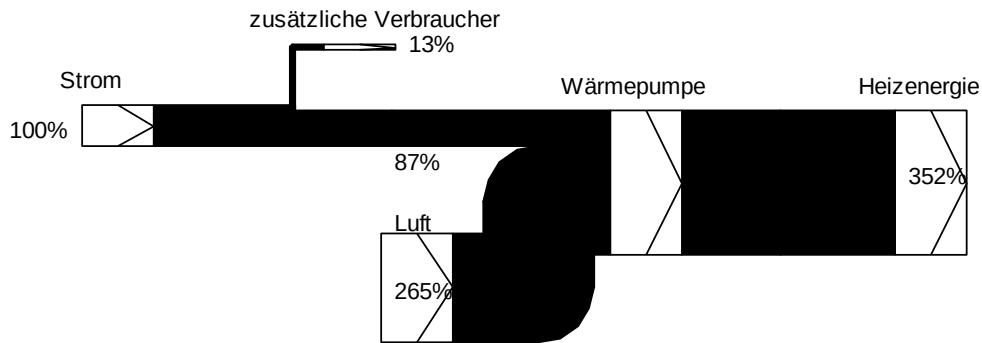


Abbildung 18: Energie Luft – Wärmepumpe Heizen

3.3.4.5 Heizung via mechanischer Wasser-Wasser- Wärmepumpe

Die Leistungszahl bleibt über das Jahr durch die konstante Brunnenwassertemperatur konstant.

Dargestellt wurde das folgende Sankey Diagramm mit der Jahresdurchschnittleistungszahl von 5,42 (siehe Tabelle 13).

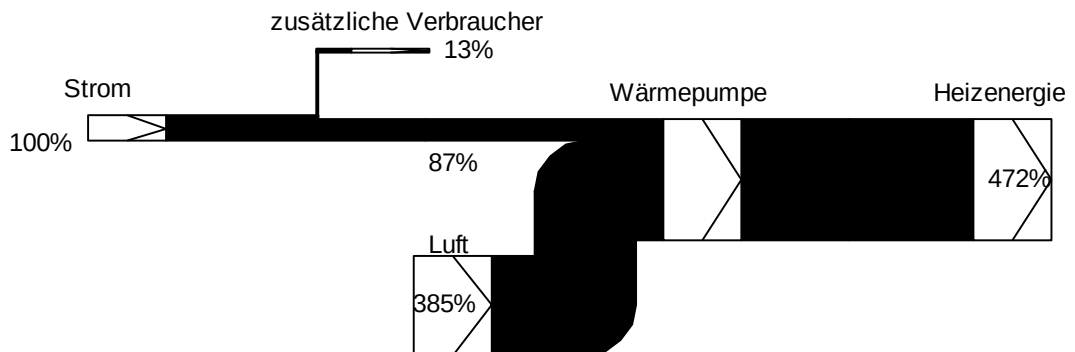


Abbildung 19: Energie Wasser - Wasser Wärmepumpe Heizen

3.3.4.6 Heizung via mechanischer Großwärmepumpe

Details zu Wärmepumpen siehe Kapitel 3.6.

Hierzu wird die Leistungszahl der Großwärmepumpe ermittelt.

$$\varepsilon_{\text{Großwärmepumpe}} = \xi_{\text{wärme}} \cdot \frac{T_{\text{warme Prozessseite [K]}}}{T_{\text{warme Prozessseite [K]}} - T_{\text{kalte Prozessseite [K]}}}$$

$$\varepsilon_{\text{Großwärmepumpe}} = 0,44 \cdot \frac{100 + 273,15}{100 + 273,15 - (37,5 + 273,15)} = 2,62$$

Bei der Verwendung der Großwärmepumpe muss für eine Einspeisung in das Fernwärmenetz eine Temperatur von 100°C erreicht werden. Die Temperatur des LUKO ist zwar mit 37,5°C deutlich höher als die Außentemperatur im Winter, jedoch ist für die Leistungszahl die Temperaturdifferenz ausschlaggebend. Da die Leistungszahl der Großwärmepumpe nur ca. halb so groß ist, wie die Luftwärmepumpenleistungszahl, ist die Großwärmepumpe für den 100% Strom Kraftwerksbetrieb nicht von Vorteil.

3.4 Kraftwerk - Kraft Wärme Kopplung

3.4.1 Anlagenbeschreibung

Hierbei wird die Anlage Amsterdam, soweit als möglich dahingehend adaptiert, dass eine Auskopplung der Fernwärme ermöglicht wird. Es wird die Schaltung mit dem maximalen regelbaren Einsatzbereich realisiert. Ein Überblick der möglichen Fernwärmeauskopplungen ist in der folgenden Abbildung zu finden. Als Betriebsweise wird ein Festdruckbetrieb nach Adrian, Quittek und Wittchow (1986) gewählt, wodurch vor der Hochdruckturbine keine Druckveränderungen zu dem „100% Strom“ Kraftwerk auftreten.

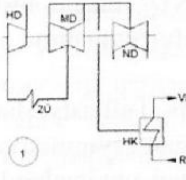
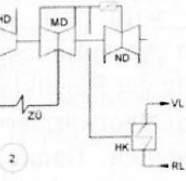
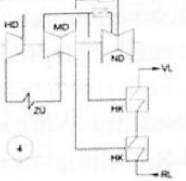
Schaltung	Vorteile	Nachteile	Strom- verlust- kenn- ziffer (9)	Ein- satz- bereich (P_{th}/P_{el})
	Geringer Bau- aufwand	Begrenzte Heizleist- ung, VL- Temp. ist von der elektr. Leistung abhängig	0,14 bis 0,21	< 0,5
	Größere Heiz- dampfent- nahme möglich, geregelte VL-Temp., Heizbetrieb weitgehend un- abhängig von Stromerzeugung	Drossel- verluste bei elektr. Teil- last	0,12 bis 0,16	>0,5
	Heizdampfent- nahme bis zum Kühldampfbe- trieb im ND-Teil möglich, größte Unabhängigkeit zwischen Heiz- wärme- und Stromerzeugung		0,10 bis 0,15	

Abbildung 20: Schaltungsmöglichkeiten bei Dampfkraftwerken (Schaumann & Schmitz, 2010, S. 138)

So wird aufgrund des Kegelgesetzes von Stodola (nach Schwarzenbach, 1987) eine Verlegung der Frischdampfzufuhr des Entgasers notwendig. Im Betriebsfall wärmegeführt, sinkt der Druck zu stark ab und die Entgasung kann nicht stattfinden.

Das Kegelgesetz sagt aus, dass im Teillastfall der Turbine der Turbineneingangsdruck aufgrund eines geringeren Massenstromes abfällt. Dieser Zusammenhang wurde als linear vorausgesetzt.

Die maximale Fernwärmeauskopplung wird dadurch beschränkt, dass der minimale Massenstrom im Niederdruckturbinenteil mit ca. 25% vom Volllastmassenstrom festgelegt wurde. Dadurch wird eine Funktionsfähigkeit der Turbine gewährleistet.

3.4.1.1 Anzapfturbine

Das Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics (2010) erklärt die Anzapfturbine folgendermaßen:

Die Funktionsweise ist ähnlich dem Prozess mit Gegendruckturbine, jedoch mit dem Unterschied, dass hier der Entnahmedampf für die Wärmeerzeugung nicht am Ende, sondern im Mittelteil der Turbine entnommen wird. Dies hat den Vorteil, dass die Strom- bzw. Wärmeproduktion den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden kann. Durch Ventile kann an der Entnahmestelle der Entnahmedruck eingestellt werden, sodass auch im Teillastbetrieb die gewünschten Dampfzustände für die Wärmeerzeugung eingehalten werden können. Dies ist der Vorteil gegenüber der Anzapfturbine, bei der die Anzapfzustände mit dem Lastpunkt variieren (S.11).

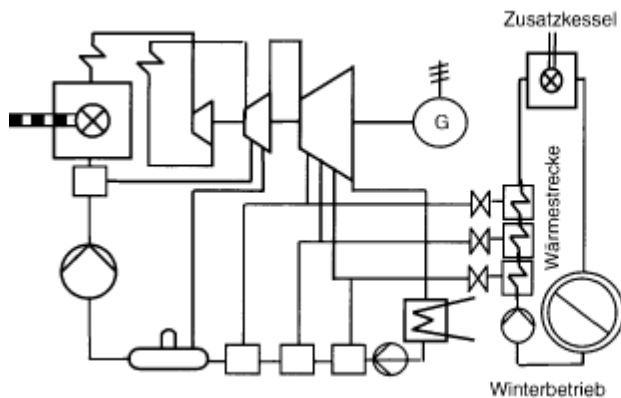
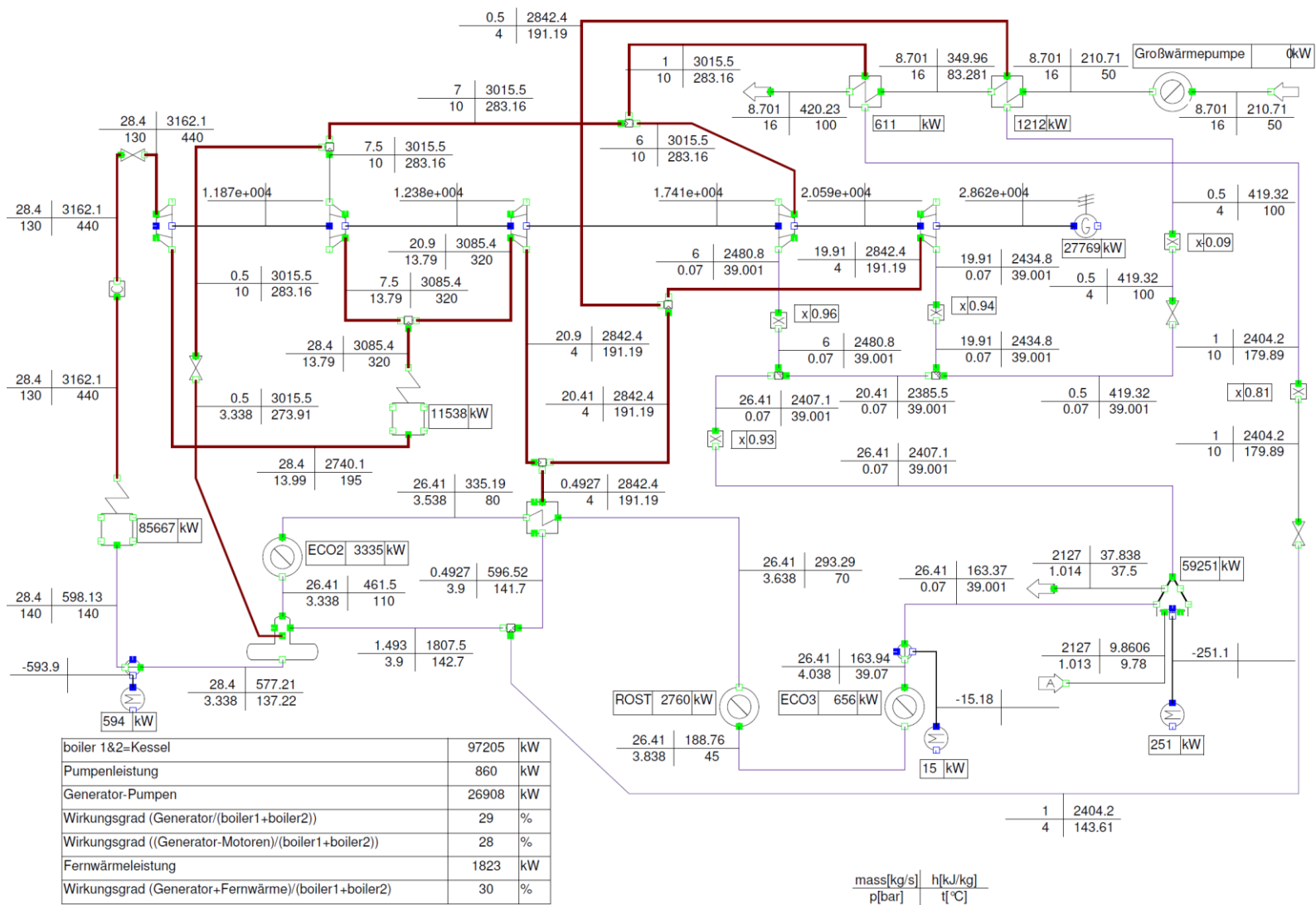


Bild 10.5:
Vereinfachter Wärmeschaltplan
eines Dampfkraftwerks mit
Wärmeauskopplung durch
Turbinenanzapfungen

Abbildung 21: Vereinfachter Wärmeschaltplan eines Dampfkraftwerks mit Wärmeauskopplung durch Turbinenanzapfung (Zahoransky, 2007, S. 199)

3.4.2 Simulation: IPSE Pro KWK stromgeführt



bbildung 22: IPSE Pro KWK stromgeführt

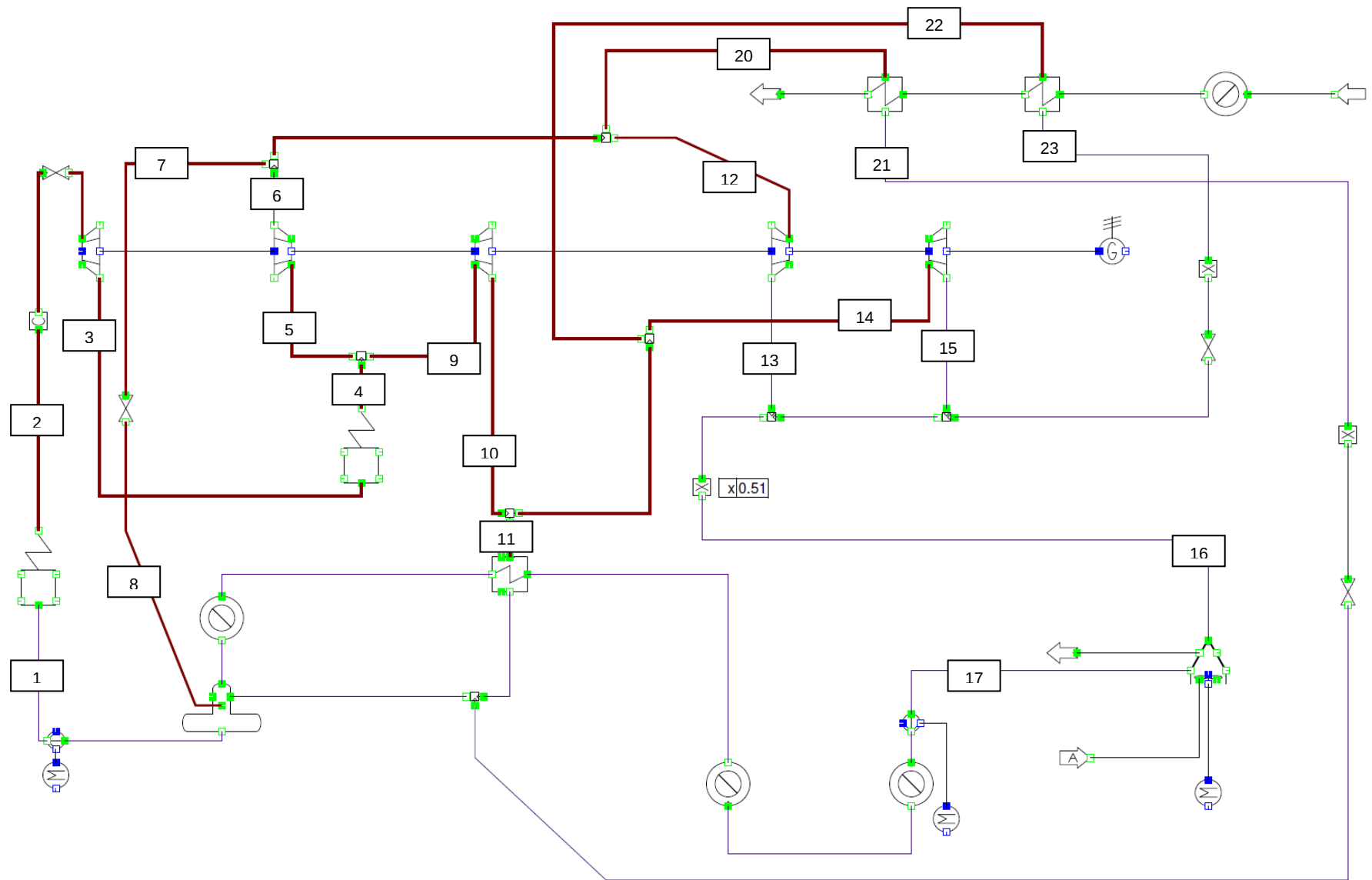


Abbildung 23: IPSE Pro KWK Leitungsbezeichnung

Diese obere Strangzuweisung gilt auch für die „KWK_wärmegeführt“.

Die Berechnung der folgenden Tabellenwerte erfolgt wie vor Tabelle 9 geschildert.

Leitung	h [kJ/kg]	s [kJ/(kg K)]	Massenstrom [kg/s]	spezifische Exergie [kJ/kg]	Exergie [kW]	Energie Bezugstemp. 25°C [kW]
1	598	1,73	28,40	111	3.143	14.010
2	3.162	6,20	28,40	1.407	39.969	86.826
3	2.740	6,36	28,40	940	26.705	74.841
4	3.085	7,04	28,40	1.095	31.091	84.648
5	3.085	7,04	7,50	1.095	8.211	22.354
6	3.016	7,06	7,50	1.019	7.639	21.830
7	3.016	7,06	0,50	1.019	509	1.455
8	2.840	7,19	1,43	806	1.151	3.905
9	3.085	7,04	20,90	1.095	22.881	62.294
10	2.842	7,13	20,90	825	17.244	57.216
11	2.840	7,13	0,49	824	408	1.353
12	3.016	7,06	6,00	1.019	6.112	17.464
13	2.481	7,98	6,00	223	1.337	14.256
14	2.842	7,13	19,91	825	16.425	54.499
15	2.435	7,84	19,91	219	4.351	46.384
16	2.407	7,75	26,41	216	5.702	60.797
17	163	0,56	26,41	6	154	1.546
20	3.016	7,06	1,00	1.019	1.019	2.911
21	2.404	5,76	1,00	775	775	2.299
22	2.842	7,13	0,50	825	413	1.369
23	419	1,31	0,50	50	25	157

Tabelle 10: Daten Sankey Diagramm: Energie/Exergie "KWK stromgeführt"

3.4.2.1 Sankey Diagramm Energie (25°C) Kraftwerk „KWK stromgeführt“

Hierbei sind die gleichen Verbrennungswerte wie im 100% Strom Energie Szenario zu verwenden.

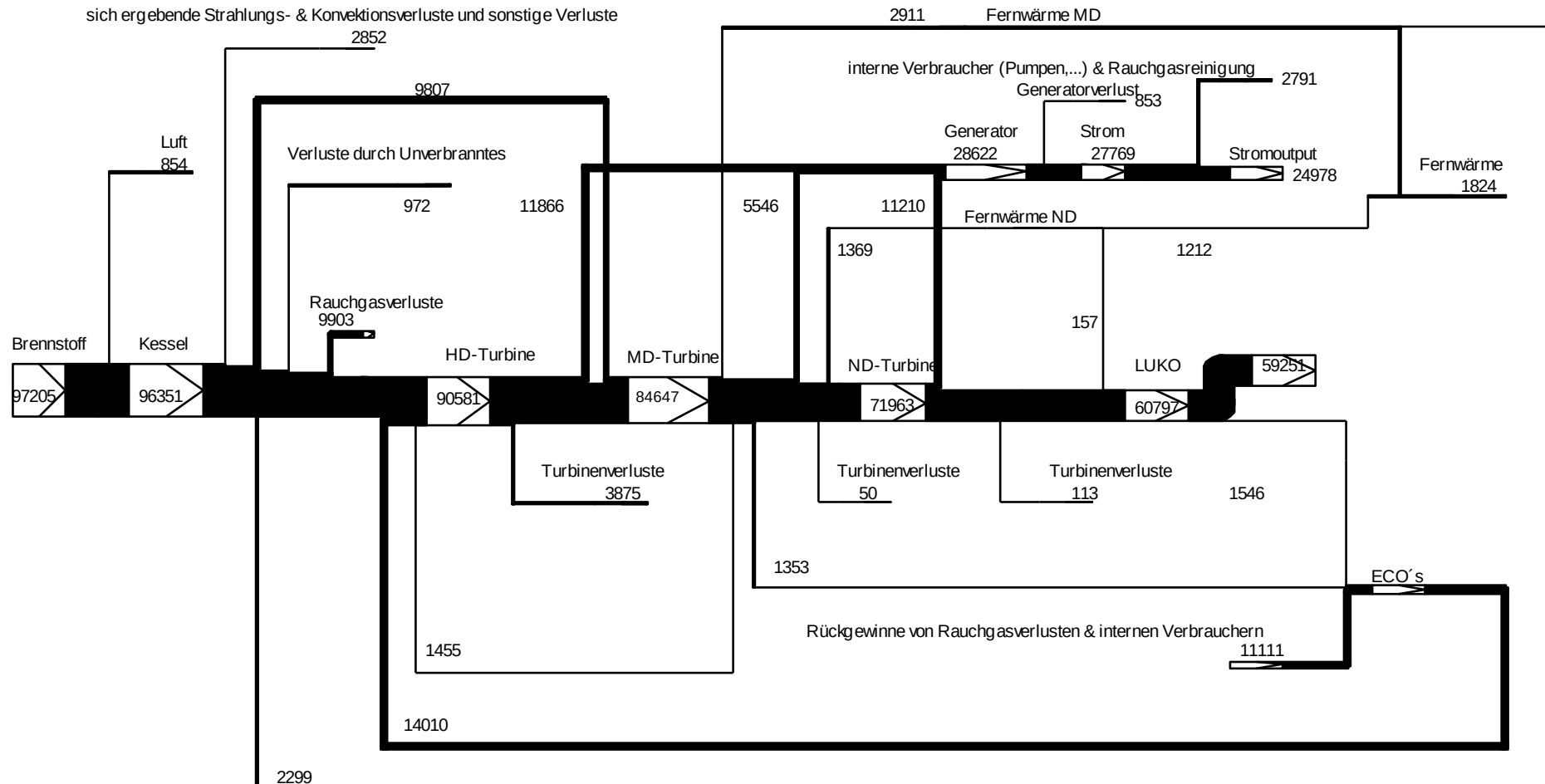


Abbildung 24: Sankey Diagramm: Energie „KWK stromgeführt“

3.4.2.2 Sankey Diagramm Exergie (9,78°C) Kraftwerk „KWK stromgeführt“

Hierbei sind die gleichen Verbrennungswerte wie im 100% Strom Exergie Szenario zu verwenden.

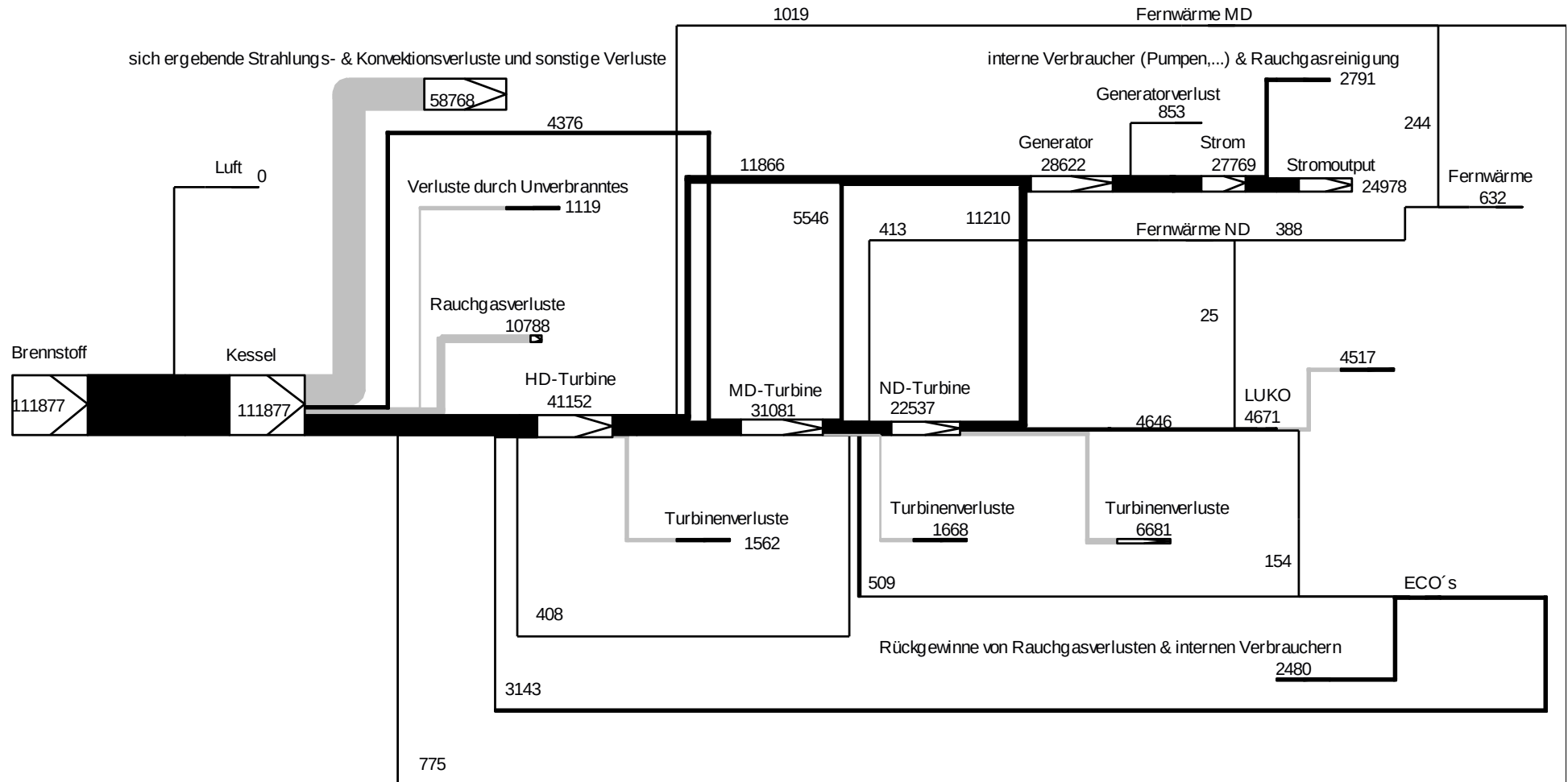


Abbildung 25: Sankey Diagramm: Energie „KWK stromgeführt“

3.4.2.1 Sankey Exergie/Energie Vergleich

Bei der Gegenüberstellung der „KWK stromgeführt“ mit dem Betriebszenario „100% Strom“ sind nur geringe Verschiebungen der Exergie- und Energieflüsse zu beobachten und der neu hinzugekommenen Fernwärmestrang. Auch der geringere interne Verbrauch durch die geringere LUKO-Ventilatorleistung ist zu erkennen.

3.4.3 Sankey – Diagramme der Verbrauchsszenarien

3.4.3.1 Großwärmepumpe

Das Verhältnis Strom zu zusätzlichem Verbraucher wird aus dem Diagramm in Abbildung 19 übernommen und der gleiche Prozentsatz wird verwendet. Die Leistungszahl ist in Tabelle 13 ersichtlich.

Details zu Wärmepumpen siehe Kapitel 3.6.

Hierzu wird die Leistungszahl der Großwärmepumpe mittels Iteration ermittelt. Dieses Vorgehen ist notwendig, da es Beschränkungen bezüglich der zur Verfügung stehenden Wärmemenge des LUKO's gibt und sich die Temperatur der warmen Prozessseite durch die sich ergebende Leistungszahl berechnet.

Nach der durchgeführten Iteration kommt man zu folgendem Ergebnis:

$$\varepsilon_{\text{Großwärmepumpe}} = \xi_{\text{wärme}} \cdot \frac{T_{\text{warme Prozessseite [K]}}}{T_{\text{warme Prozessseite [K]}} - T_{\text{kalte Prozessseite [K]}}}$$

$$\varepsilon_{\text{Großwärmepumpe}} = 0,44 \cdot \frac{73 + 273,15}{73 + 273,15 - (37,5 + 273,15)} = 4,29$$

Die maximale Luko Wärmemenge ist durch das Kraftwerk mit 26127kW beschränkt. Mittels dieser Daten wird ein Strom von ca. 8200kW für die Großwärmepumpe benötigt. Die erzielte Fernwärmeverwärmung beträgt ca. 35000kW (=> Temperatur der warmen Prozessseite ist ca. 73°C), also kann durch eine Großwärmepumpe der Fernwärmeoutput der Müllverbrennungsanlage beinahe verdoppelt werden.

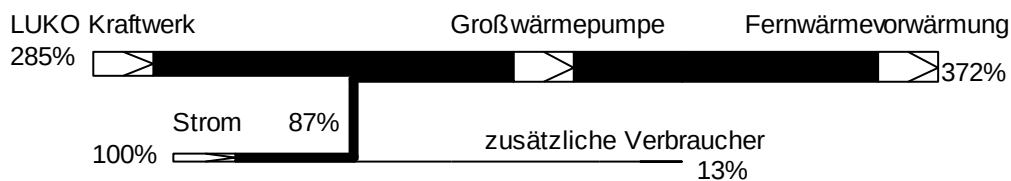


Abbildung 26: Energie Großwärmepumpe Fernwärmeeinspeisung

3.4.3.2 Fernwärme / Warmwasser

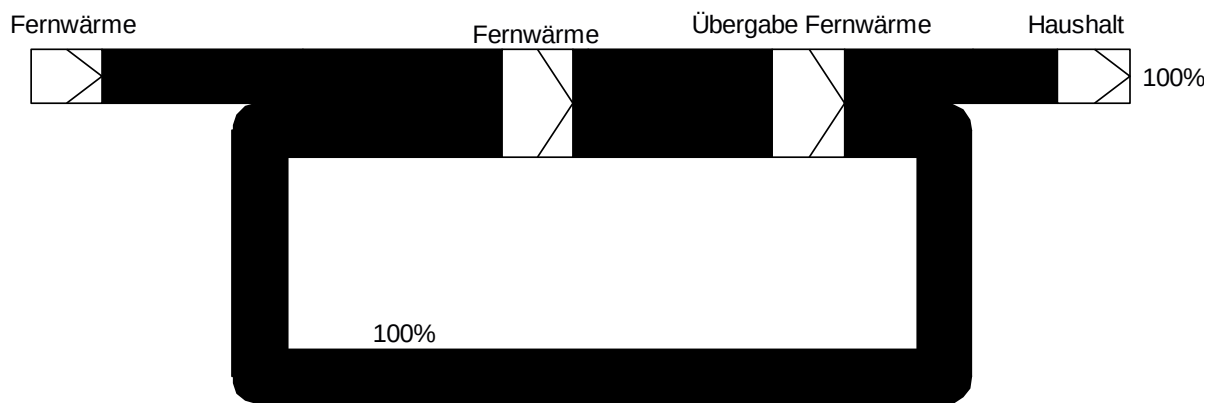


Abbildung 27: Energie Fernwärme

3.4.3.3 Fernwärme / Kühlung mittels Absorptionskältemaschine

Als Unterschied zu 100% Strom, wird bei der Kraft Wärme Kopplung, die Fernwärme mittels Absorptionskältemaschine zur Kühlung benutzt. Die Leistungszahl ist in Abbildung 34 ersichtlich.

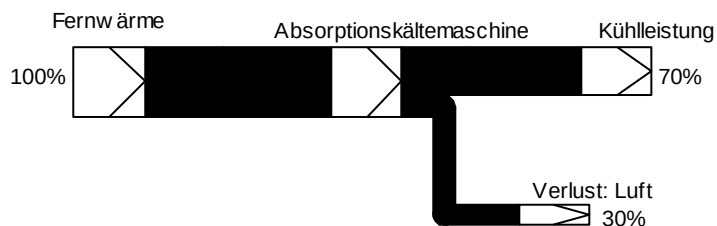


Abbildung 28: Energie Absorptionskältemaschine

3.4.4 Simulation: IPSE Pro „KWK wärmegeführt“

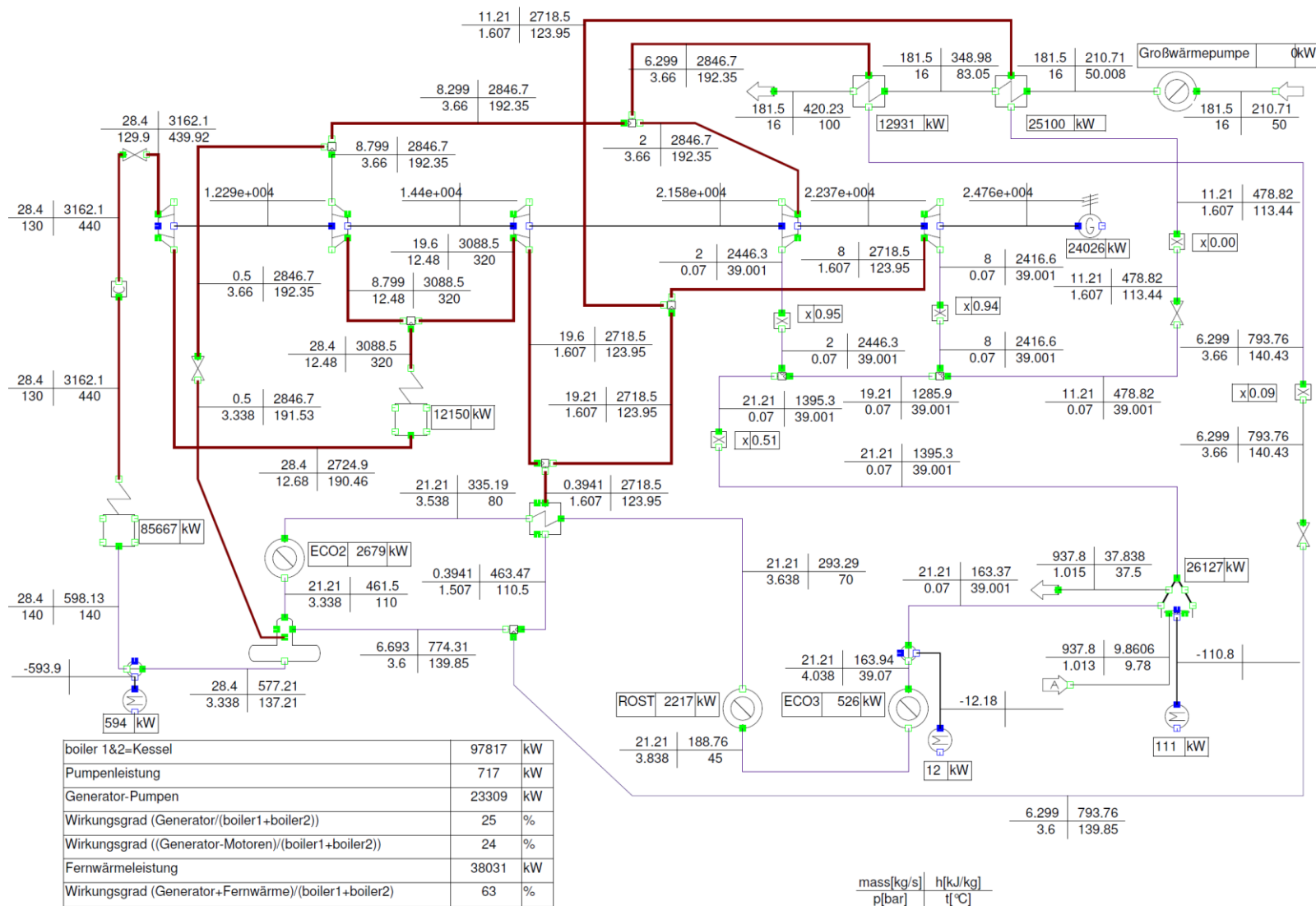


Abbildung 29: IPSE Pro „KWK wärmegeführt“

Die Berechnung der folgenden Tabellenwerte erfolgt wie vor Tabelle 9 geschildert.

Zustand	h [kJ/kg]	s [kJ/(kg K)]	Massenstrom [kg/s]	spezifische EXERGIE [kJ/kg]	Exergie [kW]	Energie Bezugstemp. 25°C [kW]
1	598	1,73	28,40	111	3.143	14.010
2	3.162	6,21	28,40	1.407	39.966	86.826
3	2.725	6,37	28,40	923	26.212	74.410
4	3.089	7,09	28,40	1.084	30.779	84.738
5	3.089	7,09	8,80	1.084	9.536	26.253
6	2.847	7,18	8,80	815	7.175	24.125
7	2.847	7,18	0,50	815	408	1.371
8	2.847	7,22	0,50	804	402	1.371
9	3.089	7,09	19,60	1.084	21.243	58.484
10	2.718	7,26	19,60	666	13.056	51.230
11	2.718	7,26	0,39	666	262	1.030
12	2.847	7,18	2,00	815	1.631	5.484
13	2.446	7,87	2,00	220	439	4.683
14	2.718	7,26	8,00	666	5.329	20.909
15	2.417	7,78	8,00	217	1.735	18.494
16	1.395	4,51	21,21	121	2.571	27.368
17	163	0,56	26,41	6	154	1.546
20	2.847	7,18	6,30	815	5.136	17.271
21	794	2,23	6,30	162	1.023	4.339
22	2.718	7,26	11,21	666	7.465	29.291
23	479	1,46	11,21	65	732	4.191

Tabelle 11: Daten Sankey Diagramm: Energie/Exergie „KWK wärmegeführt“

3.4.4.1 Sankey-Diagramm Energie (25°C) Kraftwerk „KWK wärmegeführt“

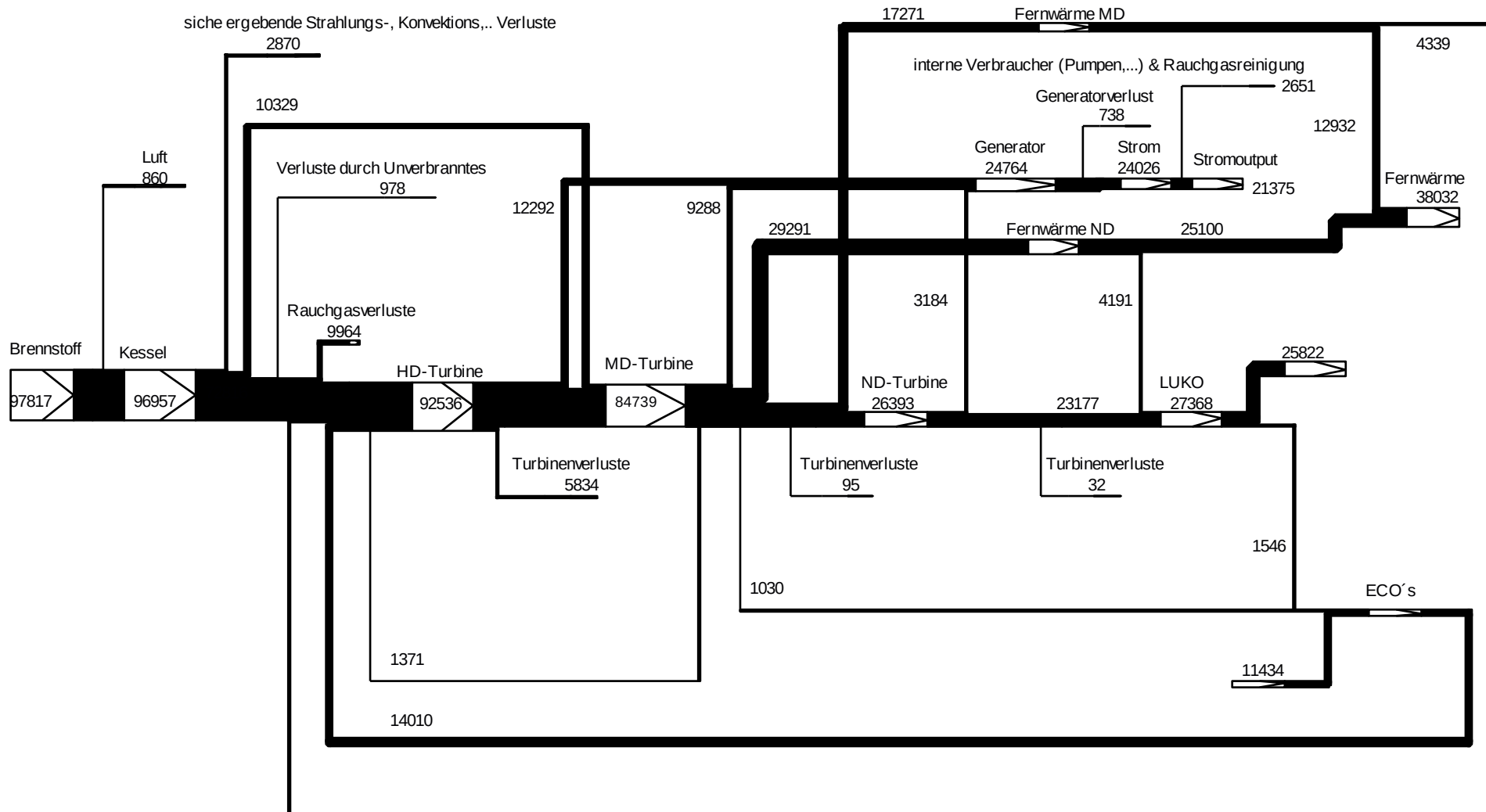


Abbildung 30: Sankey Diagramm: Energie „KWK wärmegeführt“

3.4.4.2 Sankey-Diagramm Exergie (9,78°C) Kraftwerk „KWK wärmegeführt“

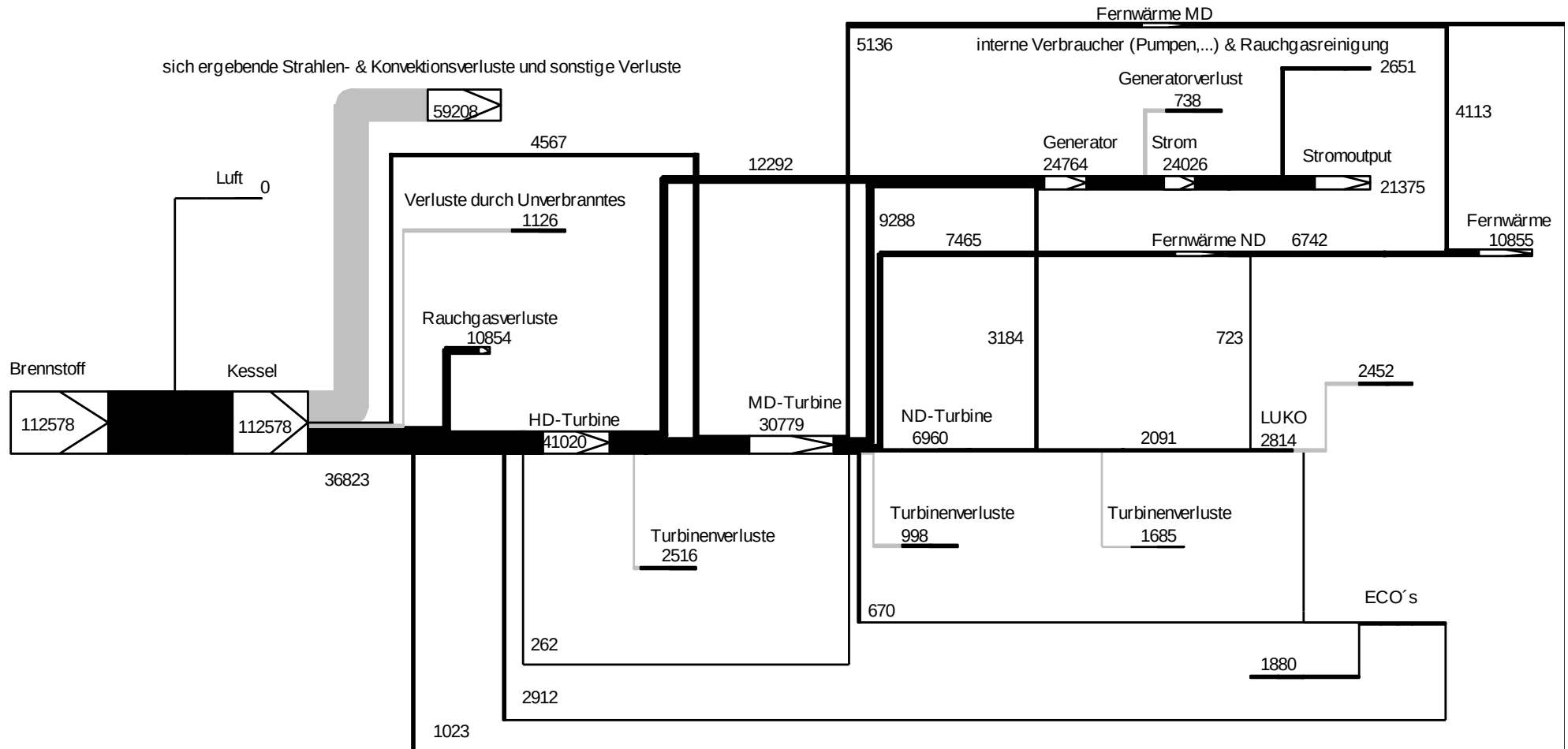


Abbildung 31: Synkey Diagramm: Exergie "KWK wärmegeführt"

3.4.4.3 Sankey Exergie/Energie Vergleich

Hierbei ist aufbauend auf die bereits getroffenen Vergleiche in 3.3.3.3 und 3.4.2.1 zu erkennen, dass die internen Verbraucher, der durch den LUKO abgeführten Energie / Exergie und der Umlauf bei der „KWK wärmegeführt“, am geringsten ausfallen. Der Anteil an der Fernwärme nimmt deutlich zu.

3.5 Klimadaten

Als repräsentativer Ort wird Wien gewählt. Dieser Ort ist besonders geeignet, da hier die Bevölkerungsdichte in Österreich am höchsten ist.

Die Daten wurden von dem Softwareprogramm CASAnova der Universität Siegen (Version 3.3.07, 2007), zur Berechnung von Heizwärme- und Kühlbedarf von Gebäuden verwendet.

Die detaillierte Berechnung laut CASAnova ist Anhang A zu entnehmen.

Die Klimadaten liegen für ein Jahr im Stundenintervall vor und umfassen neben der Außenlufttemperatur auch die Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche und die Diffusstrahlung auf eine horizontale Fläche. Diese Daten stammen von einer frühen Version der Meteonorm-Datenbank.

Diese Daten sind vor allem für den ausgewählten Luftkondensator von besonderem Interesse. Dieser ist maßgeblich für den Wirkungsgrad des Kraftwerkes von Bedeutung, da dieser durch den Abdampfdruck der Niederdruckturbine sehr stark beeinflusst wird.

Der Mittelwert aller Stundentemperaturwerte beträgt 9,78°C und wurde auch für die Berechnung durch IPSEpro herangezogen.

Monat	Monatsdurchschnitt [°C]
Jänner	-1,14
Februar	0,61
März	5,62
April	9,91
Mai	14,56
Juni	17,89
Juli	20,17
August	20,16
September	16,35
Oktober	10,73
November	5,27
Dezember	0,55
Jahresdurchschnitt	9,78

Tabelle 12: Klimadaten CASAnova

3.6 Datenbeschreibung Wärmepumpe

Hierbei wurden folgende Annahmen getroffen:

- $\xi_{\text{wärme}} = 0,44$
- $\xi_{\text{kälte}} = 0,2$
- ξ wird als konstant angenommen
- Brunnenwassertemperatur 10°C
- Heizen mittels Fußbodenheizung 35°C
- Warmwassertemperatur 60°C
- Absorptionskältemaschine $\varepsilon=0,7$ konstant
- Kältenetz: Vorlauf 6°C – Rücklauf 12°C

Um das Minimum und das Maximum der möglichen erzielbaren Heizleistung zu erreichen wird eine Luft - Wärmepumpe und eine Wasser-Wasser Wärmepumpe herangezogen.

Hierbei beschreibt der Vorsatz das Betriebsmedium der Wärmepumpe.

Für die Wasser-Wasser Wärmepumpe ist laut Bonin (2009) eine Brunnenwassertemperatur von 10°C als Normtemperatur vorzusehen.

Als Heizungssystem wird eine Fußbodenheizung gewählt. Dies ermöglicht, durch die geringe Temperaturdifferenz, eine hohe Leistungszahl. Die Fußbodenheizungstemperatur wird mit 35°C festgelegt.

Für das Warmwasser wurde eine Temperatur von 60°C festgelegt.

Name	Berechnung / Bedeutung	Aussage
Leistungszahl ε	Das momentane Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu aufgenommener elektrischer Antriebsleistung, bezogen auf einen bestimmten Anlagenumfang gemäß DIN EN 255, für einen bestimmten Arbeitspunkt (Temperaturverhältnis); im englischen Sprachgebrauch COP (Coefficient of Performance)	Effizienz einer Elektro-Wärmepumpe
Jahresarbeitszahl β_a	Das Verhältnis aus jährlich gelieferter Wärme zu jährlich aufgenommener elektrischer Antriebsenergie, bezogen auf einen bestimmten Anlagenumfang gemäß VDI 2067; im englischen Sprachgebrauch SPF (Seasonal Performance Factor)	Effizienz einer Wärmepumpenanlage mit Elektro-Wärmepumpe
Heizzahl ζ	Das momentane Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu aufgenommener Brennstoffleistung, bezogen auf einen bestimmten Anlagenumfang gemäß VDI 2067, für einen bestimmten Arbeitspunkt (Temperaturverhältnis)	Effizienz einer primärenergetisch betriebenen Wärmepumpe ⁽¹⁾
Jahresheizzahl ζ_a	Das Verhältnis aus jährlich gelieferter Wärme zu jährlich aufgenommener Brennstoffenergie, bezogen auf einen bestimmten Anlagenumfang gemäß VDI 2067	Effizienz einer Wärmepumpenanlage mit primärenergetisch betriebenen Wärmepumpe ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Verbrennungsmotorisch angetriebene Kompressionswärmepumpe oder mit Primärenergie betriebene Absorptionswärmepumpe

Abbildung 32: Gegenüberstellung der Leistungszahlen von Wärmepumpen (www.ubeg.de/downloads/WP.pdf [14.2.2011])

Hierbei wird die Leistungszahl (ϵ) berücksichtigt. Diese Zahl gibt das Verhältnis zwischen der Wärmeleistung (kW), die an das Heiznetz abgegeben wird und der aufgenommenen elektrischen Leistung der Wärmepumpe (kW) an.

Die nicht unmittelbar zum Wärmepumpen-Prozess gehörenden Verbraucher bleiben unberücksichtigt (etwa Heizungsumwälzpumpen, Grundwasser-Förderpumpen).

Diese zusätzlichen Verbraucher wurden in Kapitel 3.7.6 und 3.7.7 berücksichtigt.

Die Anpassung der Leistungszahl (mechanische Wärmepumpe) an Außentemperatur erfolgt via:

$$\epsilon_{\text{Wärmepumpe}} = \xi_{\text{wärme}} \frac{T_{\text{warme Prozessseite [K]}}}{T_{\text{warme Prozessseite [K]}} - T_{\text{kalte Prozessseite [K]}}}$$

$$\epsilon_{\text{Kältemaschine}} = \xi_{\text{kälte}} \frac{T_{\text{kalte Prozessseite [K]}}}{T_{\text{warme Prozessseite [K]}} - T_{\text{kalte Prozessseite [K]}}}$$

Das Verhältnis der realen Leistungszahl zu der Carnot-Leistungszahl wird als exergetischer Wirkungsgrad (ξ) bezeichnet.

Monat	Temp. [°C]	Leistungszahl Heizen Luft - Wärmepumpe	Leistungszahl Heizen Wasser-Wasser Wärmepumpe	Leistungszahl Kühlen Luft - Wärmepumpe	Leistungszahl Zentrale Wärmepumpe
1	-1,14	2,98	5,42		5,21
2	0,61	3,14	5,42		5,27
3	5,62	3,67	5,42		5,24
4	9,91	4,30	5,42		5,35
5	14,56	5,28	5,42		5,87
6	17,89	6,30	5,42	4,70	8,02
7	20,17	7,27	5,42	3,94	7,02
8	20,16	7,27	5,42	3,94	7,05
9	16,35	5,78	5,42	5,40	6,04
10	10,73	4,44	5,42		5,30
11	5,27	3,63	5,42		5,29
12	0,55	3,13	5,42		5,21
Ø		4,04	5,42	4,5	5,42

Tabelle 13: Leistungszahl mechanische Wärmepumpe (Heizen/Kühlen)

Diese Werte des exergetischen Wirkungsgrades wurden aus Datenblätter der Wärmepumpe für die Modell LI 11TER+, der Firma Dimplex, ermittelt:

Für den Heizfall wird eine Außentemperatur von 10°C und eine Warmwassertemperatur von 35°C angenommen, mit diesen Betriebsbedingungen wird eine Leistungszahl von 4,1 erreicht.

Hierbei wurde für die Heizen Wärmepumpe ein exergetischer Wirkungsgrad ($\xi_{\text{wärme}}$) von 0,44 errechnet.

Für den Kühlfall wird eine Außentemperatur von 35°C und eine Kühlttemperatur von 8°C angenommen, mit diesen Betriebsbedingungen wird eine Leistungszahl von 2,1 erreicht. Dies entsprechen den gängigen Werten und wurde für alle dezentralen Wärmepumpen linear über den Temperaturbereich angenommen.

Für die Kühl – Wärmepumpe wurde ein exergetischer Wirkungsgrad ($\xi_{\text{kälte}}$) von 0,2 errechnet.

Monat	exergetischer Wirkungsgrad	Außentemp. [°C]	Warmwassertemperatur [°C]	Leistungszahl Warmwasser Luft – Wärmepumpe	Leistungszahl Warmwasser Wasser-Wasser Wärmepumpe
1	0,44	-1,14	60,00	2,40	2,93
2	0,44	0,61	60,00	2,47	2,93
3	0,44	5,62	60,00	2,70	2,93
4	0,44	9,91	60,00	2,93	2,93
5	0,44	14,56	60,00	3,23	2,93
6	0,44	17,89	60,00	3,48	2,93
7	0,44	20,17	60,00	3,68	2,93
8	0,44	20,16	60,00	3,68	2,93
9	0,44	16,35	60,00	3,36	2,93
10	0,44	10,73	60,00	2,97	2,93
11	0,44	5,27	60,00	2,68	2,93
12	0,44	0,55	60,00	2,47	2,93
Ø				3,00	2,93

Tabelle 14: Leistungszahl mechanische Wärmepumpe (Warmwassererzeugung)

Eine Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlage besteht nach Ponweiser (2009) aus vier Wärmetauschern:

- **Austreiber/ Kocher:** Im Austreiber befindet sich eine mit Wasser verdünnte LiBr-Lösung. Durch erhöhte Temperaturen (70°C - 100°C) wird das Wasser aus der Lösung ausgetrieben bzw. verdampft. Der entstandene Wasserdampf (Kältemitteldampf) strömt zum zweiten Wärmetauscher.
- **Kondensator/ Verflüssiger:** Im Kondensator wird der Kältemitteldampf durch Druck verflüssigt. Die entstehende Kondensationswärme wird abgeführt. Das unter Druck entstandene Kondensat (Wasser) wird über ein Drosselventil zum dritten Wärmetauscher zugeführt.
- **Verdampfer:** Aufgrund des im Verdampfer bestehenden Niederdrucks (8,2 mbar) verdampft das Wasser bei niedrigen Temperaturen. Dabei wird durch einen Verbraucher Wärme abgegeben (Kühlung/ Klimatisierung). Der Niederdruckdampf strömt nun zum letzten Wärmetauscher.
- **Absorber:** Im Absorber wird die verbleibende stark hygroskopische LiBr-Lösung aus dem Kocher eingesprüht und saugt das Wasser des Niederdruckdampfes auf (Absorption). Die entstehende Absorptionswärme wird abgeführt. Die verdünnte LiBr-Lösung wird über eine Pumpe in den Austreiber rückgeführt.

Hierbei wird das Kaltfernwärmenetz normalerweise mit 6°C im Kaltwasservorlauf und 12°C im Kaltwasserrücklauf, also mit einer Temperaturdifferenz von ca. 6K betrieben.

	Kompressionskälteanlage KKA	Absorptionskälteanlage AKA mit NH ₃	Absorptionskälteanlage AKA mit LiBr	Adsorptionskälteanlage AdKA	DEC ¹⁾ -Anlage
physikalischer Kühlungs-Effekt	Verdampfen des Kältemittels (Kaldampfprozess)				Verdunsten des Kältemittels
Verdichtungsprinzip	mechanische Verdichtung	thermisch, Absorptionslösungs-kreislauf		thermisch, Adsorption von Wasserdampf	sorptive Entfeuchtung
Antriebsenergie	Elektroenergie	Wärmeenergie 85 – 120 – 180 °C	Wärmeenergie 85 – 180 °C	Wärmeenergie 55 – 95 °C	Wärmeenergie 50 – 100 °C
Kältemittel	chlorierte oder chlorfreie Kohlenwasserstoffe	Wasser mit NH ₃ als Absorptionsmittel	Wasser mit LiBr als Absorptionsmittel	Wasser mit Feststoff als Adsorptionsmittel (SILICA-Gel)	Wasser
spezifischer Primärenergieverbrauch ²⁾	1,3 – 1,65	0,6 – 1,0	0,6 – 1,0	0,4 – 0,6	0,3
Leistungszahl / COP ³⁾	3 – 5	0,3 – 0,55 – 0,7	(1-st) 0,6 – 0,75 (2-st) 1,0 – 1,3	0,4 – 0,6	0,5 – 0,7 je nach Luftzustand
Kältetemperatur	– 50 – 15 °C	– 50 – – 10 – 5 °C	5 – 15 °C	6 – 15 °C	4 – 8 K Entfeuchtung
Kälteleistung	50 – 5000 kW	150 – 1100 – 5500 kW	15 – 400 – 5000 kW	50 – 450 kW	20 – 350 kW
spezif. Modulpreis	75 – 125 €/kW	400 – 600 – 1800 €/kW	100 – 220 – 1000 €/kW	250 – 350 €/kW	325 – 675 €/kW

¹⁾ desiccative and evaporative cooling (Kühlung durch Trocknung und Verdunstung / "sorptive Kühlung")

Stand 2007

²⁾ Kältemenge zur primärenergetisch bewerteten, eingesetzten thermischen bzw. elektrischen Energie

³⁾ coefficient of performance

Quellen: Mattes, York, colibri, HKW-Infozentrum, HLH 09/2001, ZAE, Internet, etc

Abbildung 34: Kältemaschinen Übersicht der Technik (Schäfer & Negele, 2008, S. 28)

Aufgrund des geringen Kühlbedarfes eines Haushaltes und den möglichen Antriebstemperaturen wird eine Absorptionskälteanlage AKA mit LiBr gewählt. Und die Leistungszahl wird mit 0,7 angenommen. Diese bleibt konstant, da die Umgebungsbedingungen, die Fernwärmetemperatur und die Kühlaustrittstemperatur, gleich bleiben.

$$\varepsilon_{\text{Absorptionskältemaschine}} = \frac{Q_{\text{Kühlleistung}}}{Q_{\text{Fernwärme}}}$$

3.7 Datenbeschreibung „Statistik Austria“

Die Daten wurden, im Jahr 2008, durch die STATISTIK AUSTRIA Bundesanstalt Statistik Österreich erhoben.

Hierfür wurden Fragebögen an repräsentative Haushalte versendet. Als Aufwandsentschädigung wurden 100 Euro in Aussicht gestellt. Dadurch wurden 254 (=51%) der angeschriebenen Haushalte motiviert teilzunehmen.

Als Teil der Fragebögen wurden folgende Daten ermittelt:

In Aktivitätswochen wurde täglich der Zählerstand abgelesen, also im Winter (Februar/März) beziehungsweise Sommer (Juli-August) zur Abbildung des Nutzerverhaltens in der Heizperiode, in dieser Woche wurden jeden Tag (24 Stunden) folgende Daten festgehalten:

- tägliches Ablesen des Strom- und Gaszählerstands
- Angaben zu Heizverhalten und Warmwasserverbrauch
- Auflistung von Aktivitäten (z.B. Kochen, Waschen, Staubsaugen)
- Angaben zur Nutzung von Büro-, Unterhaltungselektronik, Beleuchtung
- Ein Messfragebogen (April - August) zur Messung des spezifischen Verbrauchs von relevanten Geräten durch die Haushalte.
- Angeschlossen wurde auch ein internationaler Verhaltensfragebogen: REMODECE (Juni - August).

3.7.1 Heizenergieverbrauch durch Gasverbrauch (Winter)

	Alle Haushalte1)			Beitragende Haushalte2)		
	Anzahl	Mittelwert in kWh	Median in kWh	Anzahl	Mittelwert in kWh	Median in kWh
Stromverbrauch, Durchschnittstag						
Gesamtstromverbrauch 2008	3.548.352	14,40	10,99	3.548.352	14,40	10,99
Herd, Backrohr	3.548.352	1,06	0,88	3.261.920	1,15	0,98
Waschmaschine	3.548.352	0,50	0,44	3.006.776	0,59	0,51
Trockner	3.548.352	0,26	0,00	817.801	1,12	0,68
Geschirrspüler	3.548.352	0,51	0,39	2.330.854	0,78	0,71
Küchen- und Haushaltsgeräte	3.548.352	0,47	0,38	3.504.837	0,47	0,39
Bürogeräte	3.548.352	0,29	0,10	2.614.735	0,40	0,22
Unterhaltungselektronik	3.548.352	0,57	0,45	3.483.163	0,58	0,45
Ladegeräte	3.548.352	0,05	0,01	3.102.458	0,05	0,01
Sonstige relevante Stromverbraucher (inkl. Ventilator, Klimagerät, Zusatzheizung)	3.548.352	0,65	0,13	2.790.669	0,82	0,19
Standby Bürogeräte	3.548.352	0,04	0,00	1.277.179	0,11	0,04
Standby Unterhaltungselektronik	3.548.352	0,40	0,28	2.836.486	0,50	0,38
Beleuchtung,	3.548.352	1,49	1,11	3.548.352	1,49	1,11
Umwälzpumpe	3.548.352	1,02	0,83	2.061.632	1,75	1,63
Heizen	3.548.352	3,83	0,91	1.992.424	6,82	1,26
Gasverbrauch, Durchschnittstag						
Gas	3.548.352	2,00	0,00	1.057.434	6,71	5,61

Q: STATISTIK AUSTRIA, Energiestatistik: Strom- und Gastagebuch 2008. Erstellt am: 11.02.2009. Hinweis: erste Abschätzungen! Aufgrund geringer Stichprobengröße erheben diese keinen Anspruch auf Repräsentativität in allen Untergruppen! 1) „Alle Haushalte“ beinhaltet alle teilnehmenden Haushalte, unabhängig davon, ob sie tatsächlich Eintragungen in der entsprechenden Auswertungsposition hatten oder nicht. 2) „Beitragende Haushalte“ beinhaltet jene Haushalte, die in der Erhebung tatsächlich Eintragungen zu der betreffenden Position gemacht haben.

Tabelle 15: Strom- und Gasverbrauch 2008 WINTER (www.statistik.at)

Hierbei wird vom mittleren Verbrauch für die Warmwassererzeugung der Mittelwert für das Kochen abgezogen (=Vorgehen lt. Statistik Austria, Wegscheider-Pichler, 2009).

$$6,71 \text{ Bm}^3 - 0,97 \text{ Bm}^3 = 5,74 \text{ Bm}^3$$

Bm³ bedeutet Betriebskubikmeter, also das Erdgasvolumen zu den Rahmenbedingungen (Temperatur, Luftdruck, Gasüberdruck) am Zählerstandort. Dieser Wert muss noch in Normkubikmeter Nm³ umgerechnet werden.

Die Umrechnung wird laut ÖVWG Richtlinie G177 wie folgt durchgeführt.

Die Zustandszahl z lautet laut: <http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/gas/dokumente/pdfs/umrechnung-m3-auf-kwh.pdf>

$$z = \frac{V_{\text{Norm}}}{V_{\text{Betrieb}}} = \frac{T_{\text{Norm}} \cdot p_{\text{Betrieb}}}{T_{\text{Betrieb}} \cdot p_{\text{Norm}}} = \frac{T_{\text{Norm}} \cdot (p_{\text{Luftdruck}} + p_{\text{Überdruck am Gaszähler}})}{T_{\text{Betrieb}} \cdot p_{\text{Norm}}}$$

$$z = \frac{273,15 \text{ K} \cdot ((1,016 \text{ bar} - 0,12 \text{ bar/m} \cdot 200 \text{ m}) + 0,022 \text{ bar})}{(15 + 273,25) \text{ K} \cdot 1,01325 \text{ bar}} = 0,971$$

Die 15°C ergeben sich aufgrund eines angenommenen innenmontierten Gaszählers.

Die Meereshöhe von Wien ist mit durchschnittlich 200m angenommen.

Der Verrechnungsbrennwert ist in der Österreich Ost-Regelzone ein Umrechnungsfaktor von 11,19kWh je Normkubikmeter festgelegt.

$$5,74 \cdot 0,971 = 5,57 \text{ Nm}^3$$

$$5,57 \text{ Nm}^3/\text{Tag} \cdot 11,19 \text{ kWh/Nm}^3 = 62,3 \text{ kWh/Tag}$$

Die Heizperiode erstreckt sich vom 1.10. bis 31.5. (siehe Ermittlung der Heizganglinie), also 8 Monate.

$$62,3 \text{ kWh/Tag} \cdot 8 \text{ Monate} \cdot 30,5 \text{ Tage} = 15201 \text{ kWh pro Haushalt und Jahr}$$

Da nicht 100% der im Gas enthaltenen Energie in Heizenergie umgewandelt wird, muss ein Jahresnutzungsgrad eines „Standardgaskessels“ eingerechnet werden. Die Wirkungsgrade für Gaskessel betragen 0,77, für Gasthermen 0,81 und für Gas-Brennwertkessel 0,89 bis 0,96 (abhängig von der Vorlauftemperatur).

(<http://www.energiesparhaus.at/fachbegriffe/nutzungsgrad.htm> [22.01.2011])

Für die weiteren Berechnungen wird ein Wirkungsgrad des Gaskessels von 0,81 festgelegt. Daraus kann der Wärmebedarf wie folgt errechnet werden.

$$15201 \text{ kWh/Haushalt im Jahr} \cdot (1 + (1 - 0,81)) = 18089 \text{ kWh}_{\text{thermisch}}/\text{Haushalt im Jahr benötigte Wärmemenge}$$

Für die folgende Heizganglinie wurden die Differenzen der Monatsdurchschnittstemperaturen zu 15°C berechnet und aus dieser Differenz wurde ein Faktor aus der Gesamtdifferenz zur Monatsdifferenz gebildet. Diese Heiztage sind mit unter 15°C definiert.

Der Wirkungsgrad der elektrischen Heizenergieerzeugung wurde mit 100% angenommen die Leistungszahl der mechanischen Wärmepumpe wurde bereits in Tabelle 13 angegeben und dadurch konnte der Heizenergiebedarf in der nachfolgenden Tabelle ermittelt werden.

Monat	Temperatur [°C]	Differenz von 15°C ("KEIN" Heiztag) [°C]	Gewichtungsfaktor [%] = Abweichung von "KEIN" Heiztag	Wärmebedarf pro Haushalt= Gewichtungsfaktor*Gesamtheizleistung [kWh _{thermisch}]	Strombedarf pro Haushalt ELEKTROHEIZUNG= Gewichtungsfaktor*Gesamtheizleistung [kWh _{elektrisch}]	Strombedarf pro Haushalt Luft-WÄRMEPUMPE= Gewichtungsfaktor*Gesamtheizleistung/Leistungszahl [kWh _{elektrisch}]	Strombedarf pro Haushalt GROßWÄRMEPUMPE= Gewichtungsfaktor*Gesamtheizleistung/Leistungszahl [kWh _{elektrisch}]	Strombedarf pro Haushalt Wasser-Wasser Wärmepumpe= Gewichtungsfaktor*Gesamtheizleistung/Leistungszahl [kWh _{elektrisch}]
1	-1,14	16,1	21,8	3952	3952	1054	759	729
2	0,61	14,4	19,5	3522	3522	893	668	649
3	5,62	9,4	12,7	2295	2295	497	438	423
4	9,91	5,1	6,9	1246	1246	231	233	230
5	14,56	0,4	0,6	107	107	16	18	20
6	17,89	keine Heiztage, da Temp. >=15°C		0	0			
7	20,17			0	0			
8	20,16			0	0			
9	16,35			0	0	0	0	0
10	10,73	4,3	5,8	1046	1046	187	197	193
11	5,27	9,7	13,2	2382	2382	522	451	439
12	0,55	14,5	19,6	3538	3538	899	679	652
Σ		73,9	100,0	18089	18089	4300	3443	3335

Tabelle 16: Heizenergieverbrauch pro Haushalt im Jahr

3.7.2 Warmwasserenergieverbrauch durch Stromverbrauch

Hierbei wird der Stromverbrauch herangezogen. Die Ergebnisse würden bei Heranziehen des Gasverbrauches verfälscht werden, weil der Warmwasserenergieverbrauch auch das benötigte Gas zum Kochen und Backen enthält. Auch wird so die Umrechnung des „Standardgaskessels“ als weitere Unsicherheit umgangen.

Durchschnittstag (keine Winter-Sommergliederung)	Alle Haushalte1)			Beitragende Haushalte2)		
	Anzahl	Mittelwert in kWh	Median in kWh	Anzahl	Mittelwert in kWh	Median in kWh
Kühlschrank	3.548.352	0,85	0,72	3.548.352	0,85	0,72
Gefriergerät	3.548.352	0,63	0,44	2.104.174	1,07	0,90
Kommunikationsgeräte	3.548.352	0,08	0,10	1.942.356	0,14	0,10
Standby Herd und Backrohr	3.548.352	0,04	0,00	1.308.080	0,11	0,14
Standby Küchen- und Haushaltsgeräte	3.548.352	0,09	0,08	1.845.658	0,16	0,10
Warmwasser	3.548.352	2,16	0,00	1.423.228	5,38	4,61

Q: STATISTIK AUSTRIA, Energiestatistik: Strom- und Gastagebuch 2008. Erstellt am: 11.02.2009. Hinweis: erste Abschätzungen! Aufgrund geringer Stichprobengröße erheben diese keinen Anspruch auf Repräsentativität in allen Untergruppen! 1) „Alle Haushalte“ beinhaltet alle teilnehmenden Haushalte, unabhängig davon, ob sie tatsächlich Eintragungen in der entsprechenden Auswertungsposition hatten oder nicht. 2) „Beitragende Haushalte“ beinhaltet jene Haushalte, die in der Erhebung tatsächlich Eintragungen zu der betreffenden Position gemacht haben.

Tabelle 17: Durchschnittlicher Stromverbrauch der Haushalte 2008 (keine Winter- Sommergliederung) (www.statistik.at)

Laut Statistik Austria (Wegscheider-Pichler, 2009) beträgt der Stromverbrauch für die Warmwasseraufbereitung 5,38 kWh / Tag * 350 Tage = 1883kWh elektrisch pro Jahr und Haushalt = 1883 kWh_{thermisch} pro Jahr und Haushalt.

Die 350 Tage ergeben sich, aufgrund der Unterlagen von Statistik Austria, als „Gesamtnutzungsdauer“ für Stromgeräte.

Warmwasserganglinie pro Haushalt im Jahr				
Monat	Wärmebedarf pro Haushalt= Gewichtungsfaktor*Gesamtheizleistung [kWh _{thermisch}]	Strombedarf pro Haushalt= Gewichtungsfaktor*Gesamtheizleistung [kWh _{elektrisch}]	Strombedarf pro Haushalt Luftwärmepumpe [kWh _{elektrisch}]	Strombedarf pro Haushalt Wasser- Wasser Wärmepumpe [kWh _{elektrisch}]
Jänner	157	157	65	54
Februar	157	157	64	54
März	157	157	58	54
April	157	157	54	54
Mai	157	157	49	54
Juni	157	157	45	54
Juli	157	157	43	54
August	157	157	43	54
September	157	157	47	54
Oktober	157	157	53	54
November	157	157	59	54
Dezember	157	157	64	54
Summe	1883	1883	642	648

Tabelle 18: Warmwasserganglinie pro Haushalt im Jahr

Zur Kontrolle auf Plausibilität wurde aus dieser Wärmemenge pro Haushalt und Jahr die damit erzielbare Warmwassermenge ermittelt.

D 50 Thermodynamik – 12 Anhang D: Diagramme und Tabellen

Anh. D 11 Tabelle 2. Stoffwerte von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen

	ϑ °C	ρ kg/m ³	c_p J/kgK	λ W/Km	$a \cdot 10^6$ m ² /s	$\eta \cdot 10^6$ Pa · s	Pr
<i>Flüssigkeiten und Gase bei einem Druck von 1 bar</i>							
Quecksilber	20	13600	139	8000	4,2	1550	0,027
Natrium	100	927	1390	8600	67	710	0,0114
Blei	400	10600	147	15100	9,7	2100	0,02
Wasser	0	999,8	4217	0,562	0,133	1791,8	13,44
	5	1000	4202	0,572	0,136	1519,6	11,16
	20	998,3	4183	0,5996	0,144	1002,6	6,99
	99,3	958,4	4215	0,6773	0,168	283,3	1,76

Abbildung 35: Stoffwerte von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen (Grote & Feldhusen, 2007, S. D50)

Für diese überschlägige Berechnung wurde eine spezifische isobare Wärmekapazität c_p von 4200J/kgK angesetzt.

Angenommen wird eine Wassererwärmung von 10°C auf ca. 45°C

Daraus ergibt sich, dass 147kJ nötig sind um 1kg Wasser um ca. 35K zu erwärmen.

Es werden 6778800kJ pro Haushalt im Jahr/147kJ =46114kg=46114l um ca. 35K erwärmt

46114l / Jahr = 126l/Tag und Haushalt

Dieser Wert ist laut <http://de.wikipedia.org/wiki/Verbrauch> ein plausibler Warmwasser-Verbrauch, da dort 10–15 m³ pro Person im Jahr = 27 bis 41 l pro Person am Tag angegeben wird.

Bei einem 3 Personenhaushalt erscheint dieser Wert realistisch.

3.7.3 Kühlbedarf durch Stromverbrauch ermittelt

Laut Statistik Austria wurde für die Gerätegruppen „Kühl- und Klimageräte, Zusatzheizgeräte“ der Bestand sowie Zusatzinformationen wie maximale Leistung in Watt, Energieklasse (sofern verfügbar) und beheizte Fläche erhoben. Nur ein geringer Teil der Haushalte ist mit Kühlgeräten (ohne Kälteerzeugung) oder mit Klimageräten (mit Kälteerzeugung, „Air Condition“) ausgestattet. Daher wurde diese Klasse zusammengefasst in „Sonstige relevante Stromverbraucher (inkl. Ventilator, Klimagerät, Zusatzheizung)“. Deren Zusammensetzung ist in der folgenden Abbildung ersichtlich.

Abbildung 5.5 (a/b): Ausstattung mit Kühl- und Klimageräten sowie Zusatzheizgeräten (alle Haushalte)

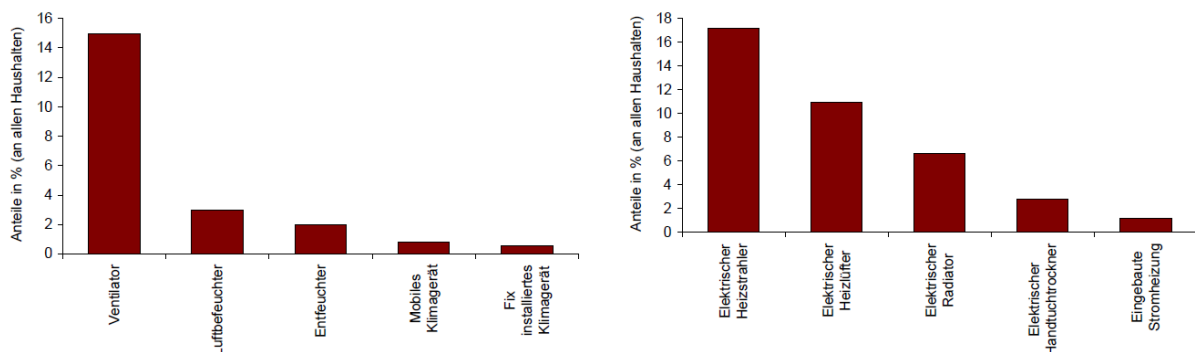


Abbildung 36: Ausstattung mit Kühl- und Klimageräten sowie Zusatzheizgeräten (aller Haushalte) (www.statistik.at)

	Alle Haushalte1)			Beitragende Haushalte2)		
	Anzahl	Mittelwert in kWh	Median in kWh	Anzahl	Mittelwert in kWh	Median in kWh
Stromverbrauch, Durchschnittstag						
Gesamtstromverbrauch 2008	3.548.352	9,66	8,34	3.548.352	9,66	8,34
Herd, Backrohr	3.548.352	0,89	0,65	3.083.316	1,02	0,76
Waschmaschine	3.548.352	0,52	0,41	2.964.861	0,62	0,54
Trockner	3.548.352	0,15	0,00	628.748	0,84	0,59
Geschirrspüler	3.548.352	0,49	0,36	2.305.989	0,76	0,65
Küchen- und Haushaltsgeräte	3.548.352	0,43	0,36	3.492.507	0,44	0,36
Bürogeräte	3.548.352	0,26	0,09	2.476.671	0,37	0,17
Unterhaltungselektronik	3.548.352	0,48	0,37	3.472.021	0,49	0,37
Ladegeräte	3.548.352	0,05	0,01	3.102.101	0,06	0,01
Sonstige relevante Stromverbraucher (inkl. Ventilator, Klimagerät, Zusatzheizung)	3.548.352	0,27	0,06	2.521.675	0,39	0,14
Standby Bürogeräte	3.548.352	0,03	0,00	1.235.106	0,10	0,04
Standby Unterhaltungselektronik	3.548.352	0,33	0,14	2.436.837	0,49	0,38
Beleuchtung,	3.548.352	0,69	0,52	3.488.827	0,70	0,54
Umwälzpumpe	3.548.352	0,22	0,13	2.051.083	0,37	0,24
Gasverbrauch, Durchschnittstag	Anzahl	Mittelwert in Bm ³	Median in Bm ³	Anzahl	Mittelwert in Bm ³	Median in Bm ³
Gas	3.548.352	0,24	0,00	871.858	0,97	0,66

Q: STATISTIK AUSTRIA, Energiestatistik: Strom- und Gastagebuch 2008. Erstellt am: 11.02.2009. Hinweis: erste Abschätzungen! Aufgrund geringer Stichprobengröße erheben diese keinen Anspruch auf Repräsentativität in allen Untergruppen! 1) „Alle Haushalte“ beinhaltet alle teilnehmenden Haushalte, unabhängig davon, ob sie tatsächlich Eintragungen in der entsprechenden Auswertungsposition hatten oder nicht. 2) „Beitragende Haushalte“ beinhaltet jene Haushalte, die in der Erhebung tatsächlich Eintragungen zu der betreffenden Position gemacht haben.

Tabelle 19: Durchschnittlicher Strom- und Gasverbrauch der Haushalte 2008 SOMMER nach Verbrauchskategorien (www.statistik.at)

Die Anteile für mobile und fix installierte Klimageräte liegen bei ca. 1% und lassen damit aufgrund der Stichprobengröße keine zuverlässigen Aussagen für den zugehörigen Stromverbrauch zu.

Der Stromverbrauch für Ventilatoren, Luftent- und Befeuchter sowie Klimageräte ist ca. 0,39kWh/Tag. Hierbei ist zu beachten, dass der Wert nicht nur für die Untersuchung relevanter Klimageräte gilt, sondern auch für Ventilatoren, Luftent- und Befeuchter. 629Kühlstunden (lt. CASAnova) / 24h = 26 Tage

Die Werte aus den Tabellen ergeben für den Jahreskälteverbrauch umgerechnet 0,39kWh/Tag *26 Tage = 10,14kWh_{elektrisch} pro Haushalt.

Dieser Wert wurde mittels der Jahresganglinie von CASnova auf die Kühlmonate umgelegt. Weiters wurden die Werte noch umgerechnet um die notwendige Wärmemenge einer Absorbtionskältemaschine für selbige Kühlleistung zu erfassen.

Optimale Energieauskopplung aus Müllverbrennungsanlagen

errechneter Wärmebedarf durch errechneten Kühlbedarf von CASAnova pro Haushalt							errechneter Wärmebedarf bei Kühlung mit Strom pro Haushalt im Jahr					
Monat	Kühlbedarf lt. CASnova [kWh _{thermisch} /m ²]	Kühlbedarf * Nutzfläche [kWh _{thermisch}]	Absorptionskältemaschine LEISTUNGSZAHL	Wärmebedarf für Kühlbedarf der Absorptionskältemaschine [kWh _{thermisch}]	mechanisches Klimagerät LEISTUNGSZAHL	mechanisches Klimagerät [kWh _{elektrisch}]	Verteilung lt. CASAnova [%]	Sommerstrombedarf * Verteilung [kWh _{elektrisch}]	mechanisches Klimagerät LEISTUNGSZAHL	Kältebedarf =(Sommerstrombedarf*Verteilung) / (mechanisches Klimagerät Leistungszahl) [kWh _{thermisch}]	Kältebedarf * Absorptionskältemaschine Leistungszahl [kWh _{thermisch}]	Strombedarf [kWh _{elektrisch}]
Jänner	0	0	0,7				0	0,0		0,00	0,00	0,00
Februar	0	0	0,7				0	0,0		0,00	0,00	0,00
März	0	0	0,7				0	0,0		0,00	0,00	0,00
April	0	0	0,7				0	0,0	14,3	0,00	0,00	0,00
Mai	0	0	0,7				0	0,0	6,5	0,00	0,00	0,00
Juni	0,5	56	0,7	79	4,7	11,7	10,9	1,1	4,7	0,23	0,31	1,10
Juli	1,8	198	0,7	283	3,9	50,3	39,1	4,0	3,9	1,01	1,31	3,97
August	1,7	187	0,7	268	3,9	47,5	37,0	3,7	3,9	0,95	1,24	3,75
September	0,6	66	0,7	94	5,4	12,3	13,0	1,3	5,4	0,00	0,00	1,32
Oktober	0	0	0,7				0	0,0	11,8	0,00	0,00	0,00
November	0	0	0,7				0	0,0		0,00	0,00	0,00
Dezember	0	0	0,7				0	0,0		0,00	0,00	0,00
Summe	4,6	507		724		122	100	10,1			2,85	10,14
							Sommerstrombedarf 2008 lt. Statistik Austria [kWh/Jahr]				10,14	

Tabelle 20: errechneter Wärmebedarf bei Kühlung mit Strom pro Haushalt im Jahr

Der Einfluss der ungenauen Abgrenzung des Stromverbrauches (inkl. Ventilatoren,...) ist gravierend, da die Abweichung zwischen CASAnova und Statistik Austria bei ca. 1000% liegt. Daher werden im weiteren die Werte von CASAnova zu den Berechnungen herangezogen und es wird angenommen, dass jeder Haushalt ein Klimagerät betreibt.

3.7.4 Kühlbedarf aus Heizwärmemenge berechnet

Hierfür wurde der Heizbedarf eines Hauses aus dem Jahre 2008 für den ermittelten Durchschnittswärmebedarf [kWh pro Haushalt und Jahr] in CASnova nachgebildet. Die Heizdaten von Statistik Austria ergeben nach CASAnova eine Nutzfläche von 110,2m². Die Kühllast ergibt 4,6 kWh/(a*m²) und somit 110,2m² * 4,6 kWh/(a*m²) = 507 kWh pro Jahr und Haushalt (siehe Tabelle 20).

3.7.5 Stromverbrauch pro Haushalt

Die Datengrundlage des Stromverbrauches ergibt sich aus Tabellen der Statistik Austria. Es wird der gesamte Stromverbrauch der Mittelwerte der beitragenden Haushalte um die Werte der Heizung und Kühlung reduziert. Die abgezogenen Werte sind bereits in den obigen Kapiteln ermittelt.

	Alle Haushalte1)		Beitragende Haushalte2)			Mittelwert Stromverbrauch [kW] -Warmwasser -Heizung -Kühlung
	Mittelwert in kWh	Median in kWh	Anzahl	Mittelwert in kWh	Median in kWh	
Stromverbrauch Summe (Zählerablesung)	4.417	3.765	3.548.352	4.417	3.765	4.417
Kühl- und Gefriergeräte						
Kühlgeräte	310	263	3.548.352	310	263	
Gefriergeräte	232	162	2.104.174	391	329	
Haushaltsgroßgeräte						
Herd, Backrohr	341	271	3.287.639	368	291	
Waschmaschine	179	163	3.144.140	202	175	
Wäschetrockner	71	0	840.484	301	178	
Geschirrspüler	176	141	2.457.191	254	222	
Weitere Küchen- und Haushaltsgeräte	157	135	3.548.352	157	135	
Kühl- und Klimageräte, Zusatzheizung						
Ventilatoren, Luftent- und Befeuchter, Klimageräte	4	0	397.422	33	7	-33
Zusatzheizung	58	0	729.627	280	41	-280
Büro- und Unterhaltungsgeräte, Kommunikation						
Bürogeräte (PC, Laptop & Co)	97	39	2.680.159	128	68	
Unterhaltungsgeräte (Fernseher etc.)	184	153	3.514.068	186	154	
Kommunikationsgeräte	28	35	1.942.356	51	35	
Sonstige relevante Energieverbraucher						
Ladegeräte	17	3	3.303.368	19	4	
Sonstige relevante Stromverbraucher	100	30	2.870.881	124	42	
Stand-by Verbrauch						
Bürogeräte (PC, Laptop & Co)	13	0	1.679.900	27	10	
Unterhaltungsgeräte (Fernseher etc.)	128	78	3.036.530	150	109	
Herd, Backrohr	15	0	1.308.080	41	52	
Küchen- und Haushaltsgeräte	31	29	1.845.658	60	35	
Beleuchtung	380	298	3.548.352	380	298	
Warmwasserbereitung	756	0	1.423.228	1.884	1.612	
Heizung						
Umwälzpumpe	237	216	2.092.954	402	347	
Heizung inklusive Hilfsenergie	670	160	1.992.424	1.194	220	-1.194
Diffuser Stromverbrauch3)	231	-	-	-	-	
Q: STATISTIK AUSTRIA, Energiestatistik: Strom- und Gastagebuch 2008. Erstellt am: 11.02.2009. 1) „Alle Haushalte“ beinhaltet alle teilnehmenden Haushalte, unabhängig davon, ob sie tatsächlich Eintragungen in der entsprechenden Auswertungsposition hatten oder nicht. 2) "Beitragende Haushalte" beinhaltet jene Haushalte, die in der Erhebung tatsächlich Eintragungen zu der betreffenden Position gemacht haben. 3) Diffuser Stromverbrauch: den Verbrauchskategorien nicht zuordenbarer Stromverbrauch.						Summe: 2.910

Tabelle 21: Durchschnittlicher Stromverbrauch der Haushalte 2008 nach Verbrauchskategorien (www.statisti.at)

Der Warmwasserstromverbrauch wurde nicht abgezogen, da ein Verbrauch von nur ca. 1000 kWh als unrealistisch erscheint. Laut Statistik Austria (Wegscheider-Pichler, 2009), wird der Stromverbrauch als zu gering ermittelt angesehen.

Der Wert Von ca. 2900 kWh pro Haushalt und Jahr erscheint realistisch.

Der Stromverbrauch pro Haushalt im Jahr beträgt 2910 kWh.

Laut Statistik Austria (2010, S.16) fluktuiert der Strombedarf abhängig von der Jahreszeit. Dieser Bereich liegt im Winter bei 14,9 kWh pro Tag und Haushalt und im Sommer bei 9,9 kWh pro Tag und Haushalt. Um diesen Bereich möglichst real abzubilden, wurde ein Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Stromverbrauch angenommen. Dies beinhaltet die Überlegung, dass die Sonnenscheindauer mit der Außentemperatur zusammenhängt. Daher wurden die Grenzwerte den jeweiligen minimalen und maximalen Temperaturwerten zugeordnet und mittels eines Umrechnungsfaktors angepasst (siehe Tabelle 22).

Zusätzlich zu dem Stromverbrauch sind noch die Verbraucher, die nicht in der Leistungszahl enthalten sind, zu ermitteln.

3.7.6 Heizen - zusätzliche Verbraucher

Im Fall der Heizlast ist die benötigte Umwälzpumpenleistung aus der Tabelle 15 „Strom- und Gasverbrauch 2008 WINTER“ der Statistik Austria mit 1,75kWh/Tag ersichtlich.

Aus CASAnova ist eine Heizstundenanzahl von 5801 Stunden bekannt, dies entspricht 242 Heiztagen.

$242 \text{ Heiztage} * 1,75 \text{ kWh/Tag} = 740 \text{ kWh Heiz-Umwälzpumpenleistung}$

3.7.7 Kühlen - zusätzliche Verbraucher

Die Kühlleistungsumwälzpumpenleistung wird mit 629 Kühlstunden = 26,2 Tage (lt. CASAnova) berechnet.

$26,2 \text{ Kühltag} * 1,75 \text{ kWh/Tag} = 45,9 \text{ kWh Kühl-Umwälzpumpenleistung}$

Die Werte der zusätzlichen Verbraucher werden über die bereits ermittelten Heiz- und Kühlverteilungsfaktoren auf die jeweiligen Monate umgelegt.

In der folgenden Tabelle sind die elektrischen Verbraucher der Haushalte ersichtlich.

Strombedarf kWh _{elektrisch} /(Jahr und Haushalt)												
Monat	Heizung Luft Wärmepumpe	Heizung Großwärmepumpe	Heizen Wasser-Wasser Wärmepumpe	Warmwasser Luft Wärmepumpe	Warmwasser Wasser-Wasser Wärmepumpe	Kühlung lt. Statistik CASA nova	Außentemperatur [°C]	Anteil der Differenz 14,9 kWh zu 9,9 kWh	elektr. Verbrauch pro Haushalt und Jahr [kWh/(Haushalt pro Jahr)]	Umwälzpumpe heizen	Umwälzpumpe kühlen	
1	1054	759	729	65	54	0	-1,14	0,00	299	162	0	
2	893	668	649	64	54	0	0,61	0,08	282	144	0	
3	497	438	423	58	54	0	5,62	0,32	267	94	0	
4	231	233	230	54	54	0	9,91	0,52	239	51	0	
5	16	18	20	49	54	0	14,56	0,74	224	4	0	
6	0	0	0	45	54	12	17,89	0,89	202	0	5	
7	0	0	0	43	54	50	20,17	1,00	198	0	18	
8	0	0	0	43	54	48	20,16	1,00	198	0	17	
9	0	0	0	47	54	12	16,35	0,82	209	0	6	
10	187	197	193	53	54	0	10,73	0,56	243	43	0	
11	522	451	439	59	54	0	5,27	0,30	260	97	0	
12	899	679	652	64	54	0	0,55	0,08	291	145	0	
Σ	4300	3443	3335	642	642	122			2910	740	46	

Tabelle 22: Übersicht Strombedarf pro Haushalt

4 Resultate

4.1 Übersicht Durchschnittsverbrauch pro Haushalt

Um einen Vergleich der Größenordnungen des jeweiligen Energiebedarfes zu ermöglichen, werden die errechneten Durchschnittsbedarfswerte der österreichischen Haushalte in den folgenden Diagrammen gegenübergestellt. Hierbei werden für den Heiz-, Kühl-, Warmwasser- und Strombedarf die Jahresganglinien aufgetragen. Die Jahresganglinien geben Auskunft über den monatlichen Energiebedarf über das gesamte Jahr.

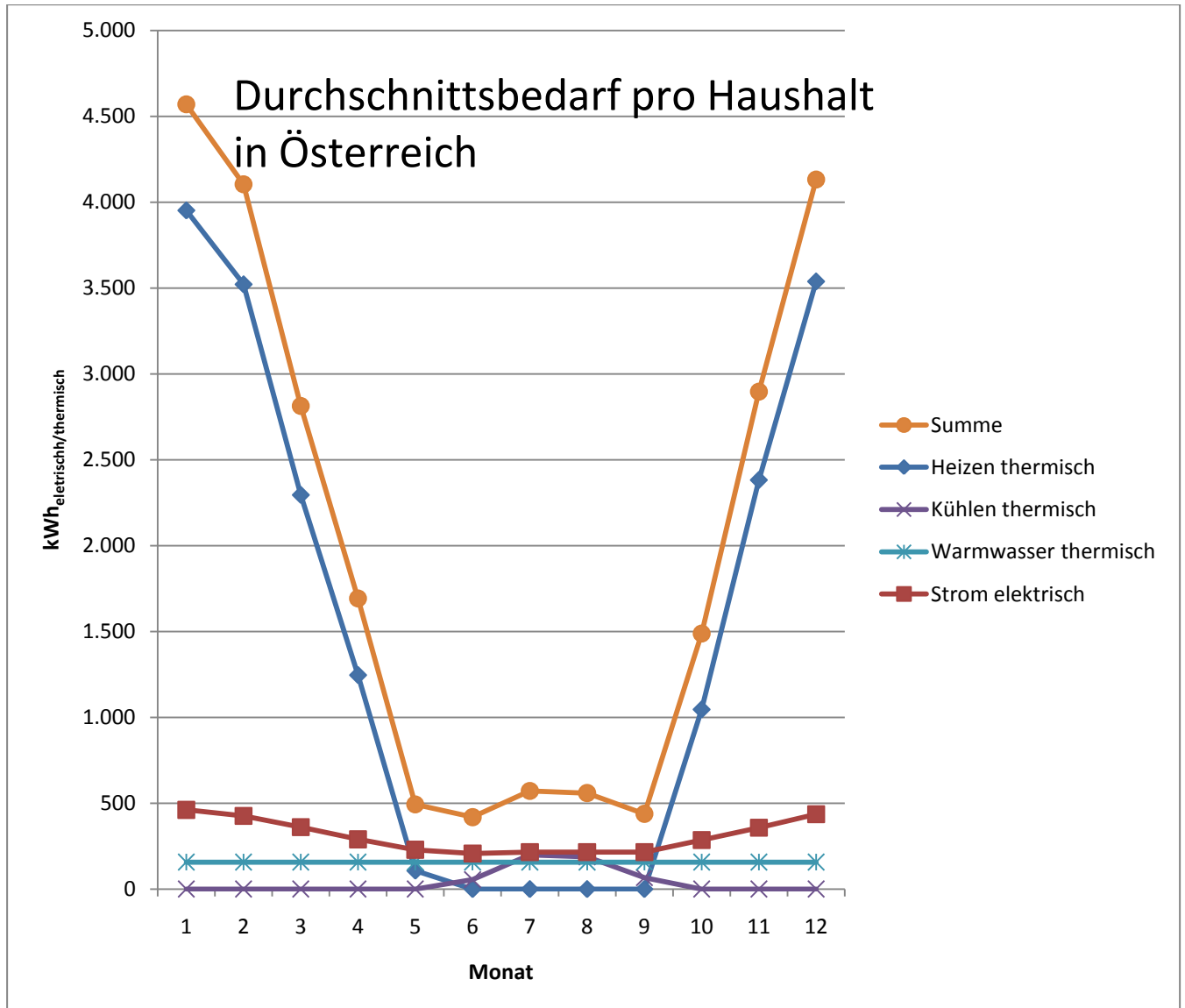


Abbildung 37: Energiebedarfsjahresganglinien österreichischer Haushalte

Wie in Abbildung 37 ersichtlich wird der Großteil der jährlich benötigten Haushaltsenergie für das Heizen aufgewendet. Dieser Heizverbrauch fluktuiert durch die Außentemperatur sehr stark und geht in den Sommermonaten auf Null zurück.

In den Sommermonaten nimmt die Kühlleistung zu, jedoch beträgt diese von der jährlichen Gesamthaushaltsenergie nur einen geringen Anteil. Daher wird in der vorliegenden Arbeit auf den Kühlbedarf bei der Untersuchung der eventuell besseren Wasser – Wasser Wärmepumpe nicht weiter eingegangen.

Zudem ist gut ersichtlich, dass sich eine sehr hohe Differenz zwischen Sommer- und Wintergesamtennergieverbrauch ergibt.

4.2 Übersicht Leistungszahl der Wärmepumpen

Um den in Abbildung 37 ersichtlichen Wärmebedarf der Verbrauchskategorien zu decken, ist bei Verwendung von Wärmepumpen die Leistungszahl als Umwandlungsfaktor des Stromes zu berücksichtigen. Diese Leistungszahl entspricht dem Umwandlungsfaktor des Stromes in nutzbare Wärmeenergie. Da Strom eine sehr hochwertige Energie darstellt und mittels Wärmepumpe eine Quellenergie auf einen höheren Energielevel gepumpt wird, ist eine Leistungszahl von über 1 möglich, dies entspricht einem „Wirkungsgrad“ der Wärmepumpe von über 100%.

In Abbildung 38 ist erkennbar, dass das Betriebsoptimum zu verschiedenen Jahreszeiten durch unterschiedliche Wärmepumpen erreicht wird. Diese zeitlich bedingten Leistungszahlverschiebungen für die Energiebedarfe Heizen, Warmwasseraufbereitung und Kühlen sind in diesem Diagramm dargestellt. Die Leistungszahl der Wärmepumpe erfährt bei der Nutzung der Luft als Wärmequelle eine Außentemperaturbedingte Schwankung. Die Wassertemperatur der Wasser – Wasser Wärmepumpe ist hingegen konstant. So ist über das Jahr gesehen kein eindeutiger Vorteil für eine Luft bzw. Wasser Wärmepumpe zu erkennen.

Weiters ist auch der Leistungszahlunterschied der Heiz- und Warmwasserpumpen erkennbar. Diese höhere Temperaturdifferenz, bei Warmwassererzeugung, ergibt die schlechtere Leistungszahl der Warmwasserwärmepumpe.

Laut bereits vorangegangener Festlegung liefern die Heizungssysteme 35°C an die Fußbodenheizung, wohingegen Warmwasser auf 60°C aufgeheizt werden muss.

Die Leistungszahlen der Heiz-Wärmepumpen sind nur für die Wintermonate repräsentativ, da im Sommer keine Heizenergie benötigt wird.

Die Leistungszahlen der Kühl-Wärmepumpen sind nur für die Sommermonate aussagekräftig.

Die Warmwassererzeugungsleistungszahlen sind für das gesamten Jahr relevant.

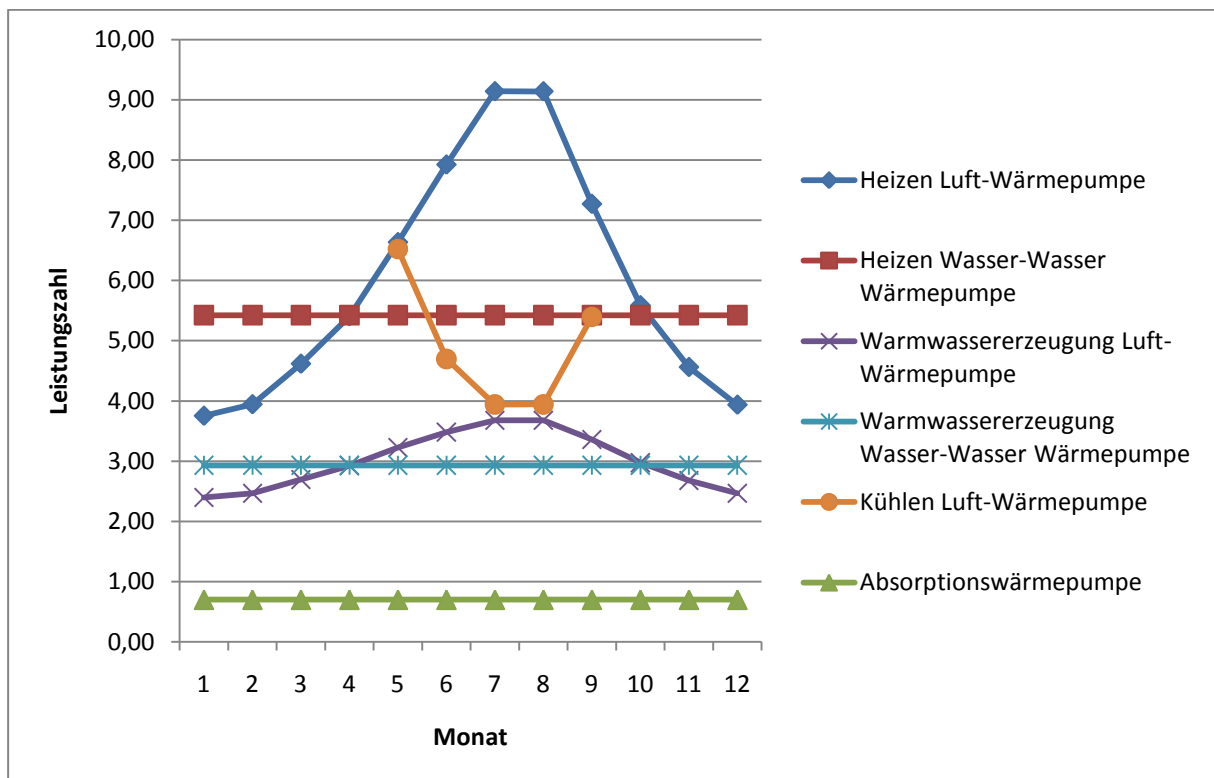


Abbildung 38: Übersicht Leistungszahlen der Wärmepumpenarten

Diese Leistungszahl muss noch in Verbindung mit dem Wärmebedarf der Haushalte gebracht werden.

4.3 Strangwirkungsgrad

Es soll der Nutzen der unterschiedlichen Energiewege im Haushalt gegenübergestellt werden und untersucht werden, ob die „Kraft Wärme Kopplung“ oder die reine Stromerzeugung vorzuziehen ist.

Dies ist erforderlich, da eine geringere Stromproduktion bei „Kraft Wärme Kopplung“ auftritt und geklärt werden muss, ob der Vorteil der zusätzlichen Fernwärmeauskopplung diese Differenz der Stromproduktion ausgleicht.

In der folgenden Abbildung ist für den Heiz-, Kühl-, Warmwasser- und Stromfall der Energieweg und deren Strangwirkungsgrad ersichtlich.

Der Strang beginnt seinen Weg beim Brennstoff, der für jeden Strang mit 100% festgelegt ist. Der Weg führt weiter in das Kraftwerk und ergibt schließlich durch Umwandlung im Haushalt die als Stranggesamtwirkungsgrad nutzbare Energie. Dadurch kann der optimale Strang für jeden Haushaltsbedarf ermittelt werden.

In dieser Betrachtung wird der zusätzliche Kühl- und zusätzliche Heizbedarf nicht berücksichtigt, da dies für den jeweiligen Bedarf keinen Einfluss auf die Differenzergebnisse hat.

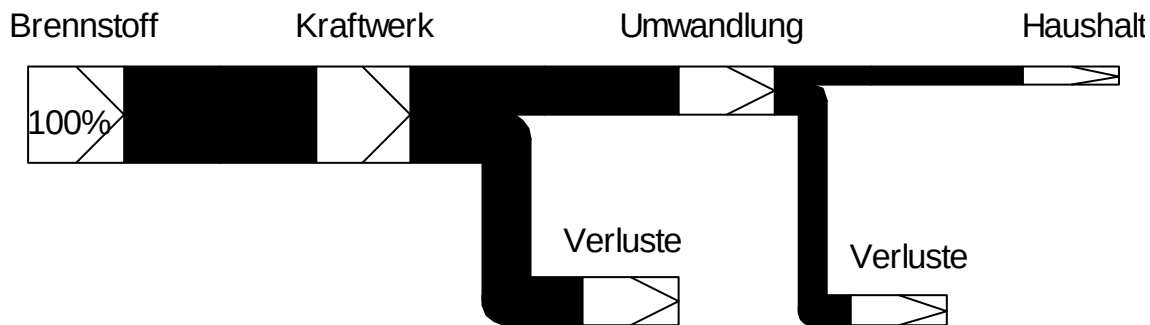


Abbildung 39: Strangdarstellung

In Tabelle 23 sind die unterschiedlichen Bedarfe der Haushalte angegeben, welche durch zwei unterschiedliche Kraftwerkstypen erzeugt werden können.

Es wird ein „100% Strom“ Kraftwerk und ein Kraftwerk mit „Kraft Wärme Kopplung“ (KWK) behandelt. Das Kraftwerk „100% Strom“ hat als Output nur Strom und daher den höheren Stromoutput. Das Kraftwerk „KWK“ hat zusätzlich zu dem Stromoutput auch einen Fernwärmeoutput, durch welchen der Stromoutput gegenüber dem „100% Strom“ Kraftwerk reduziert ist. Darüber hinaus wird der Stromoutput weiters um die internen Verbraucher und den benötigten Strom für die Rauchgasreinigung reduziert. Diese Reduzierung ist bereits im Kraftwerkswirkungsgrad berücksichtigt.

Der Kraftwerkswirkungsgrad entspricht dem Verhältnis von Strom- bzw. Fernwärmeoutput zu eingesetztem Brennstoff. Eine Unterscheidung der höherwertigen Stromenergie wird hier nicht vorgenommen.

Der Umwandlungsfaktor bei Stromumwandlung in Wärme entspricht der Leistungszahl der Wärmepumpe. Das Thema Leistungszahl wurde bereits in Kapitel 4.2 besprochen. Der von – bis Bereich der Umwandlungsfaktoren in Tabelle 23 ergibt sich aufgrund der außentemperaturabhängigen Leistungszahl der Luft- Wärmepumpen.

Der Stranggesamtwirkungsgrad ergibt sich schließlich aus Kraftwerkswirkungsgrad und Umwandlungsfaktor.

In der letzten rechten Spalte dieser Tabelle ist die Differenz des Stranggesamtwirkungsgrades der Kraftwerkstypen (100% Strom - KWK) ersichtlich.

Optimale Energieauskopplung aus Müllverbrennungsanlagen

Bedarf	Kraftwerk		Umwandlung			Stranggesamt- wirkungsgrad		Differenz Stranggesamtwirkungsgrad: "100% Strom" - "KWK wärmegeführt"	
			Umwandlung via	Umwandlungs- faktor					
	Energie	Wirkungsgrad			von	bis	von	bis	von
Heizen	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	Luft - Wärmepumpe	375,0%	727,0%	81,94%	158,85%	15,2%	29,4%
	Strom "100% Strom"	25,9%				97,13%	188,29%		
	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	Wasser-Wasser Wärmepumpe	542,0%		118,43%		22,0%	
	Strom "100% Strom"	25,9%				140,38%			
	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	Großwärmepumpe	408,0%		89,15%		21,3%	
	Strom "100% Strom"	25,9%		262,0%		67,86%			
	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	Elektroheizung	100,0%		21,85%		4,1%	
Strom "100% Strom"	25,9%			25,90%					
	Fernwärme	38,9%	-	100,0%		38,90%		-	
Kühlen	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	Luft - Wärmepumpe	394,0%	470,0%	86,09%	102,70%	16,0%	19,0%
	Strom "100% Strom"	25,9%				102,05%	121,73%		
		Fernwärme	38,9%	Absorptionskältemaschine	70,0%		27,23%		-
Warm- wasser	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	Elektroheizstab	100,0%		21,85%		4,1%	
	Strom "100% Strom"	25,9%				25,90%			
	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	Luft - Wärmepumpe	240,0%	368,0%	52,44%	80,41%	9,7%	14,9%
	Strom "100% Strom"	25,9%				62,16%	95,31%		
	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	Wasser-Wasser Wärmepumpe	293,0%		64,02%		11,9%	
	Strom "100% Strom"	25,9%				75,89%			
	Fernwärme	38,9%	-	100,0%		38,90%		-	
Strom	Strom "KWK wärmegeführt"	21,9%	-			21,85%		4,1%	
	Strom "100% Strom"	25,9%				25,90%			

Tabelle 23: Übersicht Gesamteffizienz

Bei der Betrachtung der Stranggesamtwirkungsgrade ist ersichtlich, dass der Heizstranggesamtwirkungsgrad mit jeder Zeile abnimmt und die Großwärmepumpe nur im „KWK“ – Betrieb bei sehr tiefen Temperaturen geringfügig besser abschneidet als eine Luft – Wärmepumpe. Die Wasser – Wasser Wärmepumpe jedoch ist der Großwärmepumpe deutlich überlegen.

Bei Gegenüberstellung der Differenzen, der Stranggesamtwirkungsgrade, für die Bedarfsfälle ergibt sich, dass der Verlust durch den Betrieb als „KWK“, gegenüber „100% Strom“, im Haushalt geringer ist, als der Gewinn durch die Fernwärmeauskopplung.

Das bedeutet, dass bei dem Bedarfsfall Heizen mit Luftwärmepumpe die 4,1% Differenz beim Stromstrang der Kraftwerkstypen sich beim Heizstrang auf bis zu 29,4% auswirken können. Dieses Defizit der „KWK“ von ca. 29% steht jedoch dem Gewinn von 39% des Fernwärmestranges gegenüber. Betrachtet man die anderen Bedarfsszenarien sieht man, dass die „KWK“ immer besser und somit für den Heiz- und Warmwasserstrang vorzuziehen ist, nicht jedoch bei dem Strombedarfsstrang.

Als ein erstes Ergebnis kann also vereinfacht festgehalten werden, dass bei den Bedarfen Heizen, Kühlen und Warmwasser die höhere Strommenge des „100% Strom“ Kraftwerks nicht das Mehr an Fernwärme-Energie der „KWK“ ausgleichen kann.

Um diese Aussage besser zu quantifizieren muss untersucht werden, ob für den Strombedarf die „KWK“ vorteilhaft ist. Durch eine Gesamtbetrachtung soll das in den folgenden Kapiteln vorgenommen werden.

4.4 Versorgbare Haushalte

Die Abbildung 40 stellt die unterschiedlichen Kraftwerkstypen gegenüber, mit der maximalen Anzahl an versorgbaren Haushalten.

Der Bedarf der Haushalte wird wie folgt gedeckt:

- Heizbedarf mit Luft - Wärmepumpe
- Kühlbedarf mit Luft - Wärmepumpe
- Warmwasserbedarf mit Luft - Wärmepumpe
- Strombedarf mit Strom aus Kraftwerk

Die Müllverbrennungsanlage „Kraft Wärme Kopplung (KWK)_wärmegeführt“ wird so betrieben, dass zusätzlich zum Strom auch Fernwärme ausgekoppelt wird. Der Zusatz wärmegeführt bedeutet, dass das Maximum an Fernwärme ausgekoppelt wird.

Die Fernwärme deckt folgende Verbraucher:

- Heizbedarf mit Fernwärme
- Kühlbedarf mit Absorptionskältemaschine Antrieb durch Fernwärme
- Warmwasserbedarf mit Fernwärme

Der Strom deckt folgende Verbraucher:

- Strombedarf mit Strom aus Kraftwerk

Optimale Energieauskopplung aus Müllverbrennungsanlagen

	Kraft Wärme Kopplung wärmegeführt											100% Strom thermische Wärmeenergie mittels Luft - Wärmepumpe									
	thermisch [kWh _{thermisch}]					elektrisch [kWh _{elektrisch}]					elektrisch [kWh _{elektrisch}]										
Monat	Bedarf pro Haushalt Heizung	Bedarf pro Haushalt Warmwasser	Bedarf pro Haushalt Kühlung lt. CASAnova	Bedarf pro Haushalt: Summe	Müllverbrennungsanlage Output [kW _{thermisch} pro Monat]	Anzahl Haushalte vollversorgt = MVA / Summe	Elektrischer Verbrauch pro Haushalt	Bedarf pro Haushalt Zusatzbedarf Heizen	Bedarf pro Haushalt Zusatzbedarf Kühlen	Bedarf pro Haushalt: Summe	Müllverbrennungsanlage [kW _{elektrisch} pro Monat]	Anzahl Haushalte vollversorgt = MVA / Summe	Bedarf pro Haushalt Heizung	Bedarf pro Haushalt Warmwasser	Bedarfo pro Haushalt Kühlung lt. CASAnova Luft- Wärmepumpe	Stromverbrauch pro Haushalt	Bedarf pro Haushalt Zusatzbedarf Heizen	Bedarf pro Haushalt Zusatzbedarf Kühlen	Müllverbrennungsanlage [kW _{elektrisch} pro Monat]	Bedarf pro Haushalt: Summe	Anzahl Haushalte vollversorgt = MVA / Summe
1	3.952	157	0	4.109	28.295.064	6.886	299	162	0	461	16.200.600	35.142	1054	65	0	299	162	0	18723504	1580	11850
2	3.522	157	0	3.678	27.382.320	7.444	282	144	0	426	15.678.000	36.837	893	64	0	282	144	0	18119520	1382	13109
3	2.295	157	0	2.452	28.295.064	11.539	267	94	0	361	16.200.600	44.889	497	58	0	267	94	0	18723504	916	20431
4	1.246	157	0	1.403	27.382.320	19.517	239	51	0	290	15.678.000	54.144	231	54	0	239	51	0	18119520	574	31580
5	107	157	0	264	28.295.064	107.080	224	4	0	229	16.200.600	70.833	16	49	0	224	4	0	18723504	294	63787
6	0	157	79	236	27.382.320	116.209	202	0	5	207	15.678.000	75.846	0	45	12	202	0	5	18119520	264	68760
7	0	157	283	440	28.295.064	64.265	198	0	18	216	16.200.600	75.169	0	43	50	198	0	18	18723504	308	60693
8	0	157	268	425	28.295.064	66.648	198	0	17	215	16.200.600	75.516	0	43	48	198	0	17	18723504	305	61448
9	0	157	94	251	27.382.320	108.931	209	0	6	215	15.678.000	72.982	0	47	12	209	0	6	18119520	274	66177
10	1.046	157	0	1.203	28.295.064	23.521	243	43	0	285	16.200.600	56.759	187	53	0	243	43	0	18723504	525	35634
11	2.382	157	0	2.539	27.382.320	10.784	260	97	0	357	15.678.000	43.855	522	59	0	260	97	0	18119520	938	19307
12	3.538	157	0	3.695	28.295.064	7.657	291	145	0	436	16.200.600	37.157	899	64	0	291	145	0	18723504	1399	13385
Σ Ø	18.089	1.883	724	1.725	27.914.754	45.873	2.910	740	46	3696	15.982.850	56.594	4300	642	122	2.910	740	46	18471844	730	38847

Tabelle 24: Berechnung versorgbare Haushalte „100% Strom“, „KWK wärmegeführt“

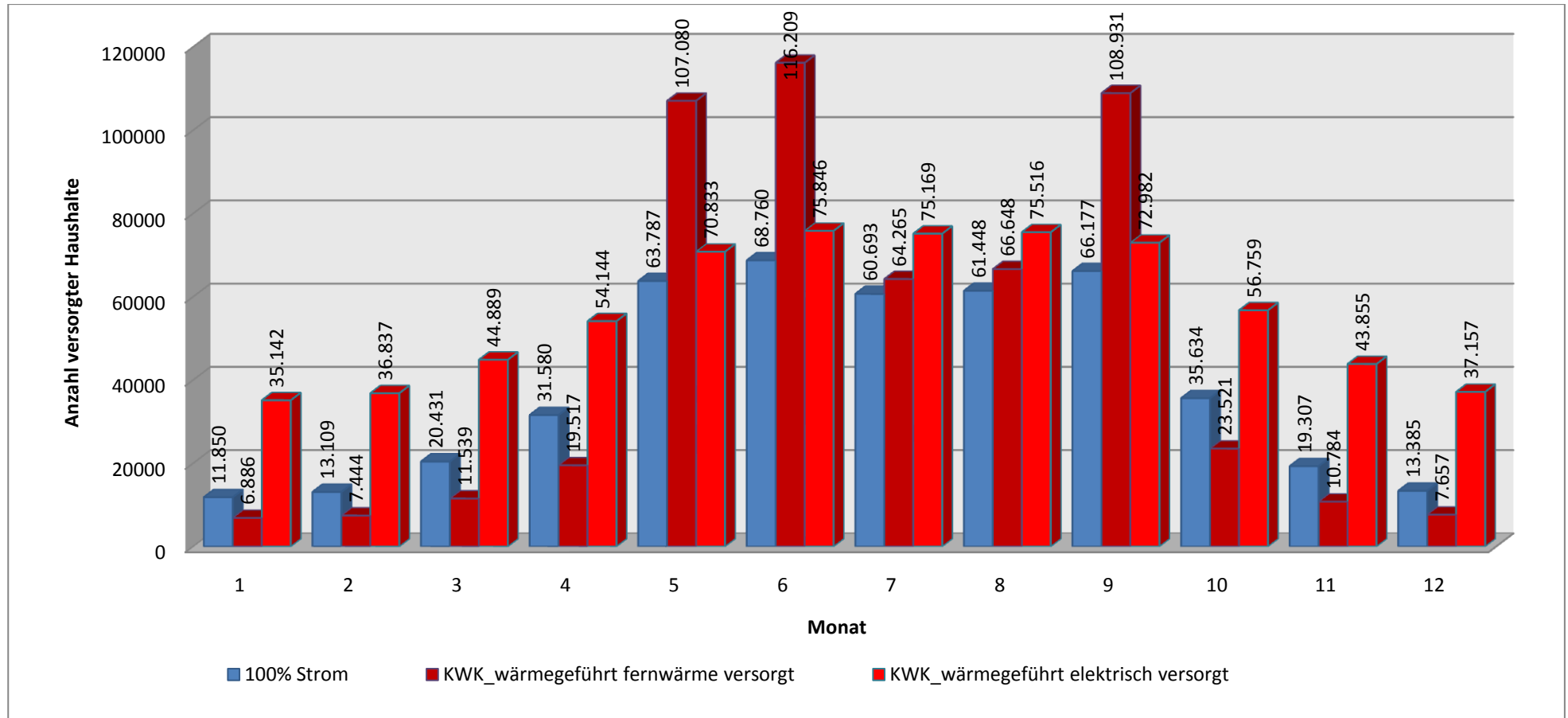


Abbildung 40: versorgbare Haushalte „100% Strom“, „KWK“ wärmegeführt

Wie in Abbildung 40 ersichtlich, ist der anfallende thermische Output der „KWK wärmegeführt“ in den Monaten Mai, Juni und September in der Lage eine höhere Anzahl an Haushalten zu versorgen. Der Stromoutput der „KWK wärmegeführt“ kann in diesen Monaten eine geringe Anzahl an Haushalten versorgen. Da eine Umwandlung der thermischen Energie für diese Monate nicht möglich ist und bereits alle vorhandenen thermischen Bedarfswege verwendet werden, wurde das Kraftwerk in den betroffenen Monaten als stromgeführte Kraft Wärme Kopplung betrieben. Dies ist in Abbildung 41 ersichtlich.

Optimale Energieauskopplung aus Müllverbrennungsanlagen

Monat	thermisch [kWh _{thermisch}]						elektrisch [kWh _{elektrisch}]					
	Bedarf pro Haushalt Heizung Fernwärme	Bedarf pro Haushalt Warmwasser Fernwärme	Bedarf pro Haushalt Kühlungt. CASAnova Absorptionskältemaschine	Bedarf pro Haushalt: Summe	Müllverbrennungsanlage [kW _{thermisch} pro Monat]	Anzahl Haushalte vollversorgt = MVA / Summe	Elektrischer Verbrauch pro Haushalt	Bedarf pro Haushalt Zusatzbedarf Heizen	Bedarf pro Haushalt Zusatzbedarf Kühlen	Bedarf pro Haushalt: Summe	Müllverbrennungsanlage [kW _{elektrisch} pro Monat]	Anzahl Haushalte vollversorgt = MVA / Summe
1	3.952	157	0	4.606	28.295.064	6.886	299	162	0	461	15.903.000	34.497
2	3.522	157	0	4.121	27.382.320	7.444	282	144	0	426	15.390.000	36.160
3	2.295	157	0	2.741	28.295.064	11.539	267	94	0	361	15.903.000	44.064
4	1.246	157	0	1.560	27.382.320	19.517	239	51	0	290	15.390.000	53.149
5	107	157	0	278	1.357.056	5.136	224	4	0	229	18.583.632	81.253
6	0	157	79	229	1.313.280	5.573	202	0	5	207	17.984.160	87.003
7	0	157	283	415	27.382.320	62.192	198	0	18	216	15.903.000	73.788
8	0	157	268	400	28.295.064	66.648	198	0	17	215	15.903.000	74.128
9	0	157	94	243	1.313.280	5.224	209	0	6	215	17.984.160	83.717
10	1.046	157	0	1.334	28.295.064	23.521	243	43	0	285	15.903.000	55.716
11	2.382	157	0	2.839	27.382.320	10.784	260	97	0	357	15.390.000	43.050
12	3.538	157	0	4.140	28.295.064	7.657	291	145	0	436	15.903.000	36.474
Σ Ø	18.089	1.883	724	22.905	21.249.018	19.343	2.910	740	46	3696	16.344.996	58.583

Tabelle 25: Berechnung versorgbare Haushalte „KWK strom- & wärmegeführt“

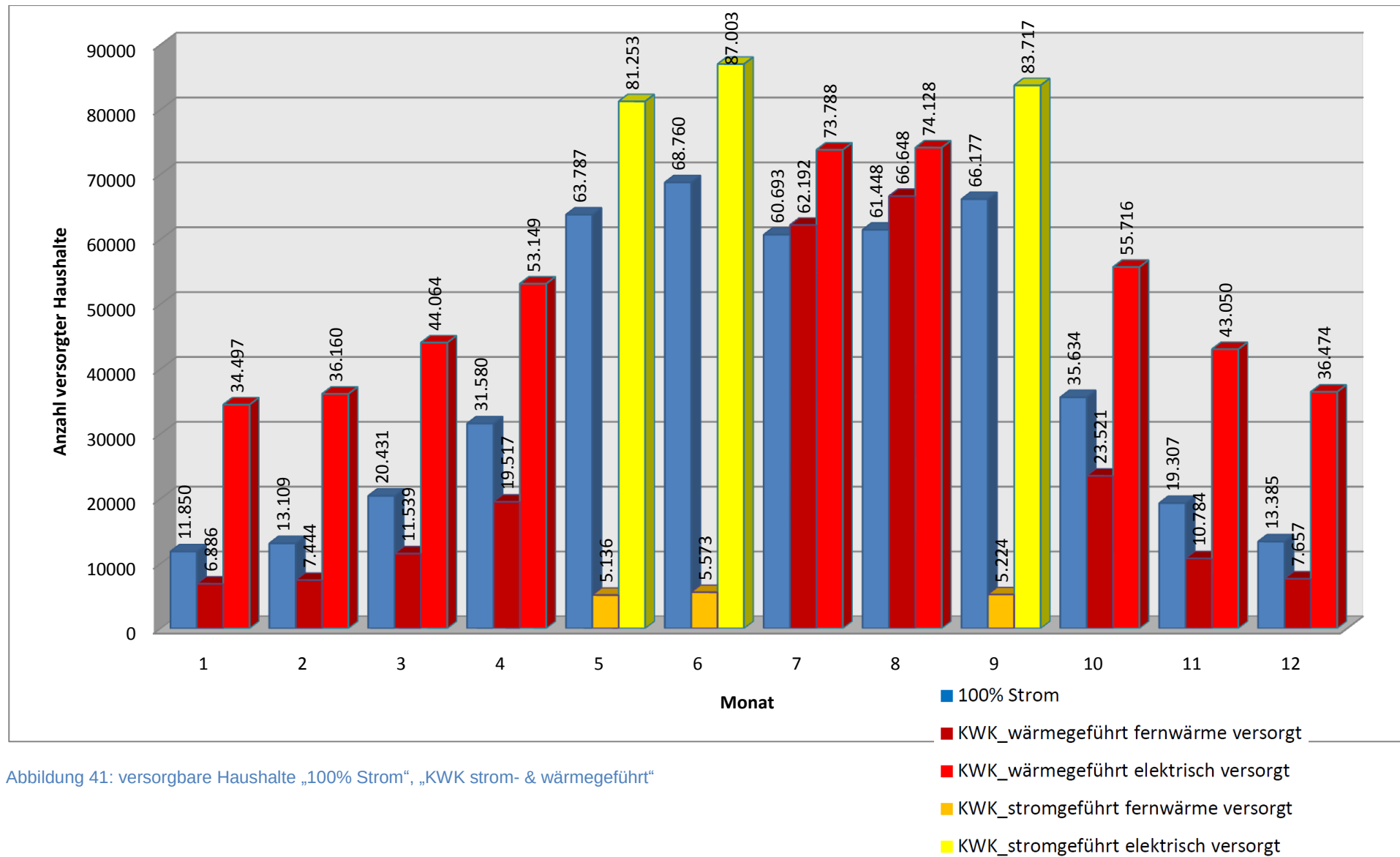
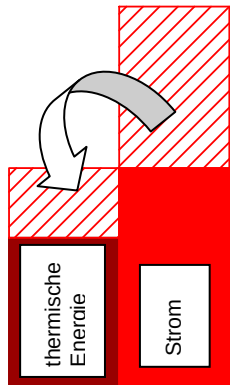


Abbildung 41: versorgbare Haushalte „100% Strom“, „KWK strom- & wärmegeführt“

Bei „100% Strom“ ist nur eine versorgbare Haushaltszahl und bei „Kraft Wärme Kopplung“ für die thermische und elektrische Versorgung jeweils eine eigene versorgbare Haushaltsanzahl mit großen Differenzen vorhanden. So ist mittels „Kraft Wärme Kopplung“ eine deutlich höhere Anzahl an Haushalten elektrisch versorgbar, da der größte Anteil der benötigten Haushaltsenergie mit der Fernwärme versorgt wird. Um die beiden Kraftwerkstypen bzgl. der versorgbaren Haushalte vergleichen zu können ist für die beiden KWK-Werte eine entsprechende Umwandlung vorzunehmen, welche dann dem 100%-Stromwert gegenübergestellt werden kann.

4.5 Vollversorgbare Haushalte

Die Umrechnung ist im folgenden dargestellt. Die neu versorgbare Anzahl an vollversorgbaren Haushalten (HH) ergibt sich aus:



$$HH_{\text{vollversorgt}} = HH_{\text{elektrisch versorgt}} + HH_{\text{thermisch versorgt}}$$

$$HH_{\text{elektrisch versorgt}} = \frac{\text{Kraftwerksoutput}_{\text{elektrisch}} - HH_{\text{thermisch versorgt}} \cdot (HH_{\text{Strombedarf}})}{HH_{\text{Heizen Wp elektrisch}} + HH_{\text{Warmwasser Wp elektrisch}} + HH_{\text{Strombedarf}} + HH_{\text{Kühlen Luft - Wp elektrisch}}}$$

Wp ... Wärmepumpe

$HH_{\text{Strombedarf}}$ beinhaltet den Strombedarf der zusätzlichen Heiz – und Kühlbedarfe

Abbildung 42: Darstellung der Umrechnung

Um einen Vergleich der Kraftwerkstypen zu ermöglichen wird der überschüssige Strom mittels Wärmepumpen in thermische Energie umgewandelt. Dies wurde in der obigen Abbildung 42 grafisch dargestellt.

Dieses Vorgehen wurde sowohl für die Luft - Wärmepumpe als auch für die Wasser-Wasser Wärmepumpe durchgeführt, um die Unterschiede der Wärmepumpen darzustellen.

Aufgrund dieser Umrechnung kann nun die vorangegangenen Darstellung der versorgbare Haushalte in der Abbildungen 41 neu abgebildet werden.

Zusätzlich zur Abbildung 41 ist nun in Abbildung 43 auch die Heiz- und Warmwasserversorgung mittels Wasser-Wasser Wärmepumpe dargestellt, um eine möglichst umfassende Übersicht zu erhalten. Diese Wasser-Wasser Wärmepumpe ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

100% Strom thermische Wärmeenergie mittels Wasser - Wasser Wärmepumpe									
elektrisch [kWh _{elektrisch}]									
Monat	Bedarf pro Haushalt Heizung	Bedarf pro Haushalt Warmwasser	Bedarf pro Haushalt Kühlung lt. CASanova	Elektrischer Verbrauch pro Haushalt	Bedarf pro Haushalt Zusatzbedarf Heizen	Bedarf pro Haushalt Zusatzbedarf Kühlen Luft - Wärmepumpe	Müllverbrennungsanlage [kWh _{elektrisch} pro Monat]	Bedarf pro Haushalt: Summe	Anzahl Haushalte vollversorgt = MVA / Summe
1	729	54	0	299	162	0	18723504	1243	15060
2	649	54	0	282	144	0	18119520	1128	16057
3	423	54	0	267	94	0	18723504	838	22353
4	230	54	0	239	51	0	18119520	573	31631
5	20	54	0	224	4	0	18723504	302	61993
6	0	54	12	202	0	5	18119520	272	66625
7	0	54	50	198	0	18	18723504	319	58625
8	0	54	48	198	0	17	18723504	316	59330
9	0	54	12	209	0	6	18119520	281	64574
10	193	54	0	243	43	0	18723504	532	35206
11	439	54	0	260	97	0	18119520	850	21310
12	652	54	0	291	145	0	18723504	1142	16396
Σ Ø	3335	648	122	2.910	740	46	18471844	650	39097

Tabelle 26: Berechnung versorgbare Haushalte „100% Strom“

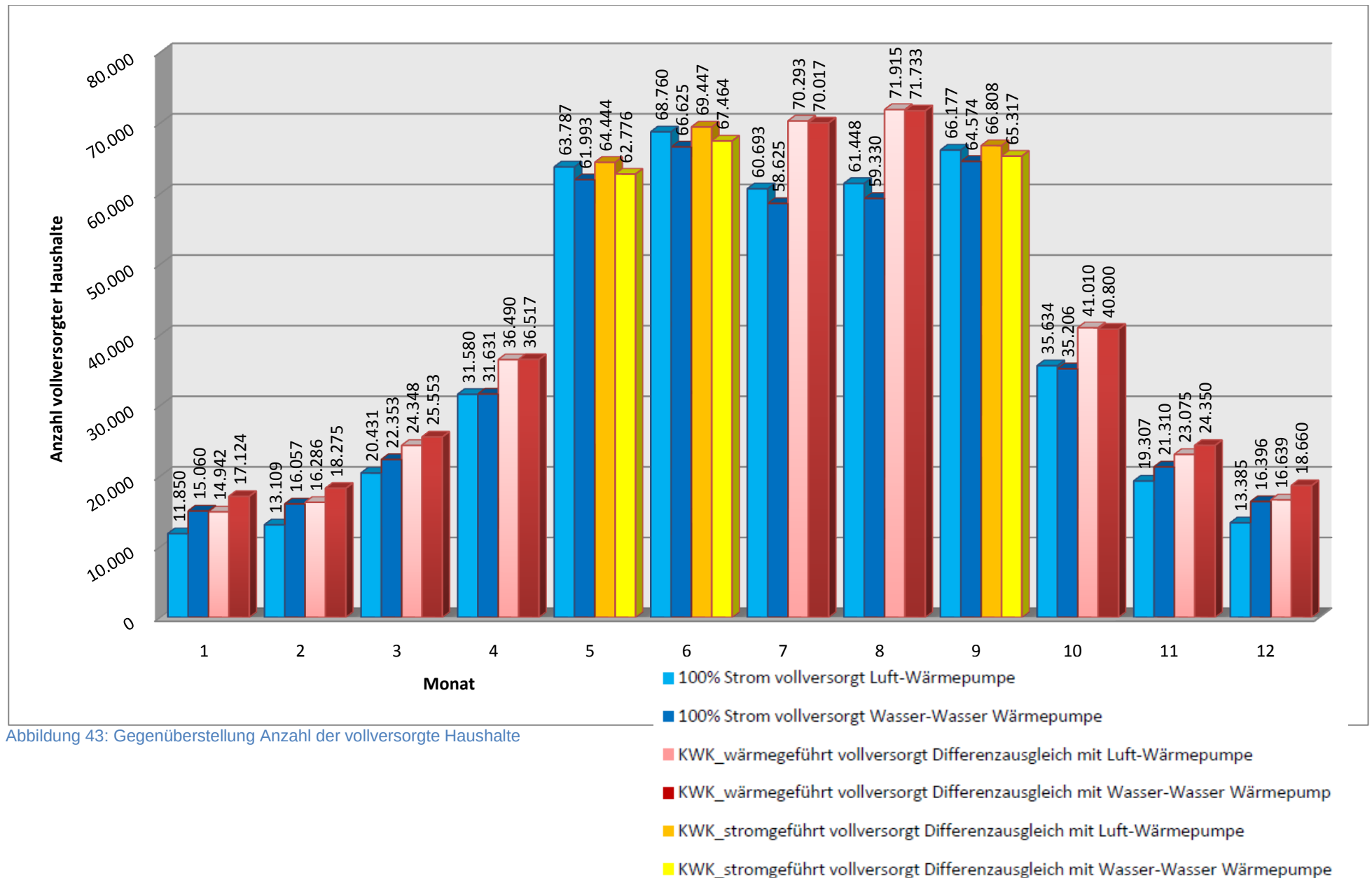


Abbildung 43: Gegenüberstellung Anzahl der vollversorgte Haushalte

Es ist ersichtlich, dass sich der Verlauf der Anzahl der vollversorgbaren Haushalten über das gesamte Jahr mit dem in Kapitel 4.2 angegebenen Verlauf der Leistungszahlen deckt.

Aus dieser Ähnlichkeit des Leistungszahlenverlaufes (siehe Abbildung 38) folgt der Umstand, dass es über das Jahr gesehen kein Betriebsoptimum gibt.

In den Sommermonaten mit „Kraft Wärme Kopplung stromgeführt“ ist ein kaum ersichtlicher Vorteil gegenüber der Betriebsweise „100% Strom erkennbar. Dieser Unterschied ergibt sich aufgrund der geringeren Fernwärmeauskopplung.

In den Wintermonaten ist eine teils deutlich höhere Anzahl an Haushalten mittels Wasser-Wasser Wärmepumpen versorgbar. Dieser Vorteil wird in den Sommermonaten zu einem schwächer ausgeprägten Nachteil.

Die Kombination Wasser - Wasser Wärmepumpe und KWK deckt in den Wintermonaten die höchste Anzahl an Haushalten ab.

In den Sommermonaten kann durch den geringeren Bedarf an Energie (siehe Abbildung 37) eine deutlich große Anzahl an Haushalten vollversorgt werden.

Generell ist mittels Kraft Wärme Kopplung immer eine größere Anzahl an Haushalten vollversorgbar. Daher ist festzuhalten, dass immer eine Kraft Wärme Kopplung vorzuziehen ist.

5 Fazit und Ausblick

Aufgrund der vorliegenden Untersuchung ist der „Kraft Wärme Kopplung“ Vorrang zu geben, da sie das energetische Optimum darstellt.

Der Vergleich der Wärmepumpentypen führte leider zu keiner über das gesamte Jahr effizienteren Wärmepumpenart.

Das Optimum einer der beiden Wärmepumpentypen könnte sich aufgrund der mit einzubeziehenden Kosten ergeben. Diese Kostenuntersuchung würde allerdings den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen und kann daher nicht behandelt werden.

Ebenso konnte durch die Standortunabhängigkeit kein Fernwärme- und Stromverlust der Transportleitung vom Kraftwerk zum Haushalt berücksichtigt werden. Dies kann erst durch eine detaillierte Standortfestlegung und eine festgelegte Haushaltsanzahl erfolgen.

Durch die detaillierte Darstellung der Energie- und Exergieflüsse der simulierten Kraftwerkstypen und Umwandlungen im Haushalt, wäre ein nächsten Schritt die weitere Optimierung des hier dargestellten Ergebnisses. Weiters könnte man durch die umfangreiche vorhandene Simulation für die Sommermonate, Mai, Juni und September, die Anzahl der vollversorgten Haushalte maximieren in dem man den Stromumwandlungsanteil verringert.

Es besteht also weiterhin Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

6 Anhang A: Daten CASAnova

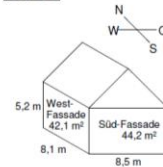
Datenblatt (Teil 2):

Datenblatt (Teil 1):

Geometrie:

Länge der Nord- und Südfassade:	8,5 m
Länge der Ost- und Westfassade:	8,1 m
Höhe (ohne Dach):	5,2 m
Anzahl Geschosse:	2
Südatweichung (gegen Westen positiv):	0 °
Nutzfläche:	110,2 m ²
Luftvolumen:	286,4 m ³
Gebäudehüllfläche/Volumen (A/V-Verhältnis):	0,87 1/m
Fassadenfläche: Nord bzw. Süd	44,2 m ²
Fassadenfläche: Ost bzw. West	42,1 m ²

Skizze:



Dämmung:

U-Werte der Wände:	
Nord:	0,80 W/(m ² K)
Süd:	0,80 W/(m ² K)
Ost:	0,80 W/(m ² K)
West:	0,80 W/(m ² K)
Absorptionskoeffizient der Wände:	0,5
Obere Geschoßdecke gegen:	Außen oder nicht gedämmtes Dach
U-Wert der oberen Geschoßdecke:	0,20 W/(m ² K)
Untere Geschoßdecke gegen:	Unbeheizter Keller (mit Perimeterdämmung)
U-Wert der unteren Geschoßdecke:	0,20 W/(m ² K)
Türfläche (Standard Nord):	0,0 m ²
U-Wert der Tür:	1,50 W/(m ² K)
Wärmehücken:	U-Werte aller Umfassungsflächen um 0,10 W/(m ² K) erhöhen (möglichst wärmebrückenfreie Konstruktion)

Gebäude:

Soll-Raumlufttemperatur:	20,0 °C
Überwärmung ab einer Raumlufttemperatur über:	27,0 °C
Freie Lüftung:	0,60 1/h
Mechanische Lüftung:	0,00 1/h
Wärmerückgewinnung (nur mech. Lüftung):	0 %
Effizienzfaktor Klimaanlage:	2,5 kWh(kühl)/kWh(Strom)
Interne Gewinne:	25,0 kWh/(m ² a)
Art der Außenwände:	Mittelschwere Bauweise
Art der Innenwände:	Mittelschwere Bauweise

Klima:

Klimadaten:	Wien (Österreich)
-------------	-------------------

Fenster

Nord:

Fensterfläche:	2,2 m ²
Fensteranteil der Fassade:	5,0 %
Fensterart:	Doppelverglasung
U-Wert Glas:	3,00 W/(m ² K)
U-Wert Rahmen:	2,80 W/(m ² K)
g-Wert Glas:	0,80
Rahmenanteil:	20,0 %
Verschattung:	20,0 %

Süd:

Fensterfläche:	17,7 m ²
Fensteranteil der Fassade:	40,0 %
Fensterart:	Doppelverglasung
U-Wert Glas:	3,00 W/(m ² K)
U-Wert Rahmen:	2,80 W/(m ² K)
g-Wert Glas:	0,80
Rahmenanteil:	20,0 %
Verschattung:	20,0 %

Ost:

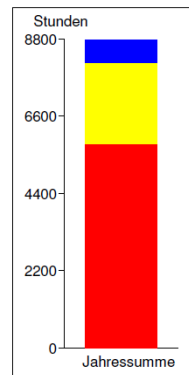
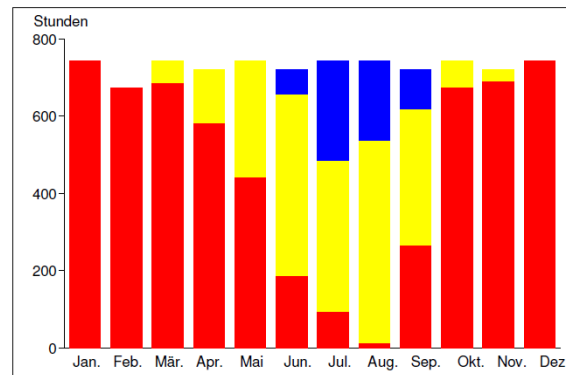
Fensterfläche:	2,1 m ²
Fensteranteil der Fassade:	5,0 %
Fensterart:	Doppelverglasung
U-Wert Glas:	3,00 W/(m ² K)
U-Wert Rahmen:	2,80 W/(m ² K)
g-Wert Glas:	0,80
Rahmenanteil:	20,0 %
Verschattung:	20,0 %

West:

Fensterfläche:	2,1 m ²
Fensteranteil der Fassade:	5,0 %
Fensterart:	Doppelverglasung
U-Wert Glas:	3,00 W/(m ² K)
U-Wert Rahmen:	2,80 W/(m ² K)
g-Wert Glas:	0,80
Rahmenanteil:	20,0 %
Verschattung:	20,0 %

Ausgabe: Heiz- und Kühlstunden

	Heiz- stunden in h	Nullenergie- stunden in h	Kühl- stunden in h
Januar	744	0	0
Februar	672	0	0
März	687	57	0
April	582	138	0
Mai	442	302	0
Juni	188	469	63
Juli	95	391	258
August	14	523	207
September	267	352	101
Oktober	676	68	0
November	690	30	0
Dezember	744	0	0
Summe in h	5801	2330	629
Summe in %	66,2	26,6	7,2

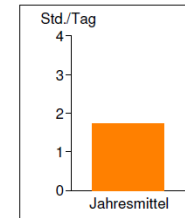
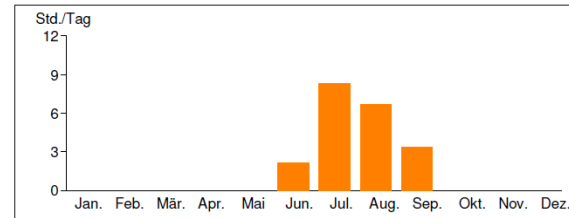
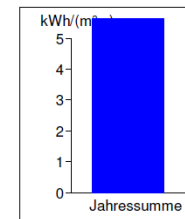
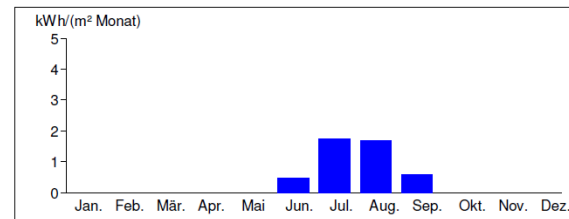


Legende:

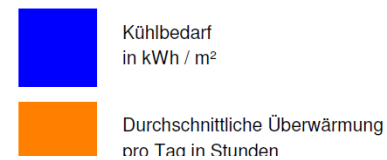


Ausgabe: Kühlbilanz

	Kühlbedarf in kWh/m²	Überwärmung (Anzahl Stunden pro Tag)	Kühlgradstunden in Kh
Januar	0,0	0,0	0,0
Februar	0,0	0,0	0,0
März	0,0	0,0	0,0
April	0,0	0,0	0,0
Mai	0,0	0,0	0,0
Juni	0,5	2,1	63,9
Juli	1,8	8,3	418,5
August	1,7	6,7	440,7
September	0,6	3,4	105,5
Oktober	0,0	0,0	0,0
November	0,0	0,0	0,0
Dezember	0,0	0,0	0,0
Jahresmittel / Jahressumme	4,5	0,1	1028,6



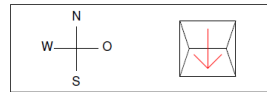
Legende:



Ausgabe: Fensterbilanz

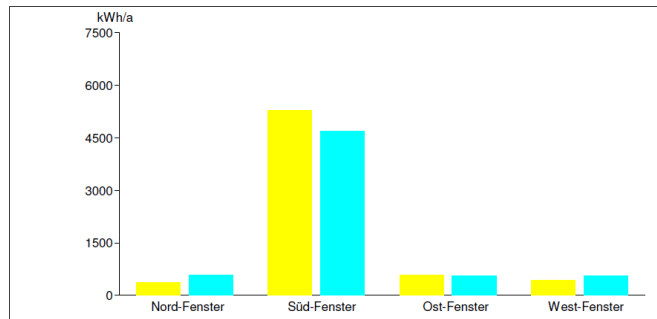
Orientierung:

Südbabweichung: 0 °



Gewinne / Verluste:

	Nord in kWh/a	Süd in kWh/a	Ost in kWh/a	West in kWh/a	Gesamt in kWh/a
Nutzbare solare Gewinne	366,8	5269,2	585,2	422,6	6643,8
Transmissionsverluste durch Fenster	585,5	4683,8	557,9	557,9	6385,2
Bilanz	-218,7	585,4	27,3	-135,3	258,6



Legende:

Solare Gewinne Transmissionsverluste durch Fenster

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema "100% Strom"	6
Abbildung 2: Schema Kraft "Wärme Kopplung stromgeführt"	6
Abbildung 3: Schema "Kraft Wärme Kopplung wärmegeführt"	7
Abbildung 4: weltweite Variation der Heizwerte (Thomé-Kozmiensky & Beckmann, 2005, S.242)	8
Abbildung 5: Zusammensetzung und physikalisch-chemische Eigenschaften des Mülls (Reimann, 1991, S. 63)	11
Abbildung 6: Luftdruck abhängig von geod. Höhe (Haider, 2010)	15
Abbildung 7: Mollier (h,x) Diagramm für feuchte Luft (http://www.nabueibelshausen.de/Rechner/feuchte_luft_enthalpie.html [16.01.2011].)	16
Abbildung 8: integrale isobare spezifische Wärmekapazität (Steinmüller-Pocket, 1994, nach Haider, 2010)	18
Abbildung 9: Wirkungsgrad und Leistungsfahrt (Wandschneider, 2008, S. 132)	26
Abbildung 10: Messwerte der Leistungsfahrt für Feuerung und Kessel (Wandschneider, 2008, S. 133)	26
Abbildung 11: thermischer Kreislauf HR-AVI (Wandschneider, 2008, S. 131)	27
Abbildung 12: IPSE 100% Strom	29
Abbildung 13: IPSE "100% Strom" Leitungsbezeichnung	30
Abbildung 14: Sankey Diagramm: Energie "100% Strom"	32
Abbildung 15: Sankey Diagramm: Exergie "100% Strom"	33
Abbildung 16: Energie Luft - Wärmepumpe Kühlen	35
Abbildung 17: Energie Luft / Wasser - Wasser - Wärmepumpe Warmwasser	35
Abbildung 18: Energie Luft – Wärmepumpe Heizen	36
Abbildung 19: Energie Wasser - Wasser Wärmepumpe Heizen	36
Abbildung 20: Schaltungsmöglichkeiten bei Dampfkraftwerken (Schaumann & Schmitz, 2010, S. 138)	38
Abbildung 21: Vereinfachter Wärmeschaltplan eines Dampfkraftwerks mit Wärmeauskopplung durch Turbinenanzapfung (Zahoransky, 2007, S. 199)	39
Abbildung 22: IPSE Pro KWK stromgeführt	40
Abbildung 23: IPSE Pro KWK Leitungsbezeichnung	41
Abbildung 24: Sankey Diagramm: Energie „KWK stromgeführt“	43
Abbildung 25: Sankey Diagramm: Energie „KWK stromgeführt“	44
Abbildung 26: Energie Großwärmepumpe Fernwärmeeinspeisung	45
Abbildung 27: Energie Fernwärme	46
Abbildung 28: Energie Absorptionskältemaschine	46
Abbildung 29: IPSE Pro „KWK wärmegeführt“	47
Abbildung 30: Sankey Diagramm: Energie „KWK wärmegeführt“	49
Abbildung 31: Synkey Diagramm: Exergie "KWK wärmegeführt"	50
Abbildung 32: Gegenüberstellung der Leistungszahlen von Wärmepumpen (www.ubeg.de/downloads/WP.pdf [14.2.2011])	52
Abbildung 33: Schema Absorptionskälteanlage (Ponweiser, 2009)	55
Abbildung 34: Kältemaschinen Übersicht der Technik (Schäfer & Negele, 2008, S. 28)	56
Abbildung 35: Stoffwerte von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen (Grote & Feldhusen, 2007, S. D50)	61
Abbildung 36: Ausstattung mit Kühl- und Klimageräten sowie Zusatzheizgeräten (aller Haushalte) (www.statistik.at)	62
Abbildung 37: Energiebedarfsjahresganglinien österreichischer Haushalte	68
Abbildung 38: Übersicht Leistungszahlen der Wärmepumpenarten	69
Abbildung 39: Strangdarstellung	70
Abbildung 40: versorgbare Haushalte „100% Strom“, „KWK“ wärmegeführt	74
Abbildung 41: versorgbare Haushalte „100% Strom“, „KWK strom- & wärmegeführt“	76
Abbildung 42: Darstellung der Umrechnung	77
Abbildung 43: Gegenüberstellung Anzahl der vollversorgte Haushalte	79

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Bedarfsversorgung.....	7
Tabelle 2: Wirkungsgradberechnung Daten Teil1	12
Tabelle 3: Wirkungsgradberechnung Daten Teil2	13
Tabelle 4: Wirkungsgradberechnung Daten Teil3	14
Tabelle 5: Übersicht Wirkungsgradberechnung Volllast.....	21
Tabelle 6: Übersicht Verbrennungsrechnung Teillast	23
Tabelle 7: Betriebsfaktoren der Müllverbrennungsanlagenteile Teil 1.....	24
Tabelle 8: Betriebsfaktoren der Müllverbrennungsanlagenteile Teil 2.....	25
Tabelle 9: Daten Sankey Diagramm: Energie / Exergie "100% Strom"	31
Tabelle 10: Daten Sankey Diagramm: Energie/Exergie "KWK stromgeführt"	42
Tabelle 11: Daten Sankey Diagramm: Energie/Exergie „KWK wärmegeführt“	48
Tabelle 12: Klimadaten CASAnova.....	51
Tabelle 13: Leistungszahl mechanische Wärmepumpe (Heizen/Kühlen).....	53
Tabelle 14: Leistungszahl mechanische Wärmepumpe (Warmwassererzeugung)	54
Tabelle 15: Strom- und Gasverbrauch 2008 WINTER (www.statistik.at)	57
Tabelle 16: Heizenergieverbrauch pro Haushalt im Jahr	59
Tabelle 17: Durchschnittlicher Stromverbrauch der Haushalte 2008 (keine Winter- Sommergliederung) (www.statistik.at)	60
Tabelle 18: Warmwasserganglinie pro Haushalt im Jahr	61
Tabelle 19: Durchschnittlicher Strom- und Gasverbrauch der Haushalte 2008 SOMMER nach Verbrauchskategorien (www.statistik.at).....	63
Tabelle 20: errechneter Wärmebedarf bei Kühlung mit Strom pro Haushalt im Jahr.....	64
Tabelle 21: Durchschnittlicher Stromverbrauch der Haushalte 2008 nach Verbrauchskategorien (www.statistik.at)	65
Tabelle 22: Übersicht Strombedarf pro Haushalt	67
Tabelle 23: Übersicht Gesamteffizienz	71
Tabelle 24: Berechnung versorgbare Haushalte „100% Strom“, „KWK wärmegeführt“	73
Tabelle 25: Berechnung versorgbare Haushalte „KWK strom- & wärmegeführt“.....	75
Tabelle 26: Berechnung versorgbare Haushalte „100% Strom“	78

9 Literaturverzeichnis

Adrian, F., Quittek, C. & Wittchow, E. (1986). *Fossil beheizte Dampfkraftwerke*. Gräfelfing: Technischer Verlag Resch; Köln: Verlag TÜV Rheinland.

Baehr, H. D. (1965). *Energie, Exergie, Anergie*. In VDI Fachgruppe (Hrsg.). Düsseldorf: Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure.

Bonin, J. (2009). *Handbuch Wärmepumpen*. Wien: Beuth Verlag GmbH.

CASAnova (2007). CASAnova Version 3.3.07. Lernprogramm zum Heizwärme- und Kühlbedarf sowie dem Temperaturverhalten in Gebäuden. Siegen: Universität Siegen.

Gasser, L., Wellig, B. & Hilfiker, K. (2008). *WEXA: Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen*. Hochschule Luzern – Technik & Architektur. Verfügbar unter <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000009668.pdf&name=00000280033.pdf> [22.11.2010].

Grote, K. H. & Feldhusen, J. (2007). (Hrsg.). *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Auflage. Berlin: Springer-Verlag.

Haider, M. (2010). *Wärmetechnische Anlagen*. Wien: TU Wien.

Herwig, H. & Kautz, C. H. (2007). *Technische Thermodynamik*. München: Pearson Studium.

Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics & Graz University of Technology (2010). *Technologie Portrait Kraft-Wärme-Kopplung*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung: 34/2010. Verfügbar unter http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/1034_technologieportrait_kwk.pdf [17.01.2011].

IPSEpro (2008). IPSEpro-PSE Version 4.0. Build 882. SimTech GmbH.

Kriese, S. (1971). *Exergie in der Kraftwerkstechnik*. Essen: Vulkan Verlag.

Mollier h,x Diagramm feuchte Luft (2011). Verfügbar unter http://www.nabueibelshausen.de/Rechner/feuchte_luft_enthalpie.html [16.01.2011].

Ponweiser, K. (2009). *Thermodynamik für WI-MB*. Österreich: TU-Wien VU Unterlagen.

Reimann, D. O. (1991). *Rostfeuerungen zur Abfallverbrennung*. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH.

Sanner, B. (o. J.). *Wärmepumpen*. Verfügbar unter www.ubeg.de/downloads/WP.pdf [14.2.2011].

Schäfer, V. & Negele, B. (2008). *Absorptionskältemaschinen-Anwendungsbeispiele*. Verfügbar unter http://imperia.mivlag.de/imperia/md/upload/article/26_31_wissen_schaefer.pdf [01.10.2010].

Schaumann, G. & Schmitz, K. W. (2010). *Kraft-Wärme-Kopplung*. Berlin: Springer.

Schwarzenbach, A. (1987). Dampfturbinen. In Technischer Verlag Resch (Hrsg). *Konzeption und Aufbau von Dampfkraftwerken*. Köln: Verlag TÜB Rheinland.

Statistik Austria (2010). *Standard-Dokumentation Metainformationen zum Strom- und Gastagebuch 2008* (Bearbeitungsstand: 10.02.2010). Verfügbar unter www.statistik.at/web_de/wcmsprod/groups/gd/documents/stdok/043743.pdf#pagemode=bookmark [05.01.2011].

Thomé-Kozmiensky, K. J. & Beckmann, M. (2005). *Optimierung der Abfallverbrennung 2*. Neuruppin TK Verlag Karl. Thomé-Kozmiensky.

Wandschneider, J. (2008). Energieeffizienz in der AVA Amsterdam Erste Betriebserfahrungen. In Bilitewski, B. , Urban, A. I. & Faustich, M. (Hrsg.) (2008). *13. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung*. Universität Kassel: Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik.

Wegscheider-Pichler, A. (2009). *Strom- und Gastagebuch 2008*. Projektbericht. Wien: Statistik Austria, Direktion Raumwirtschaft, Energie.

Zahoransky, R. A. (2007). *Energietechnik*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlag GmbH.