



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Optimierung Heizwerk Köstendorf

Integration unterschiedlicher Wärmeerzeuger zur ganzjährigen Wärmeversorgung

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Physikalische Energie- und Messtechnik

eingereicht von

David Hechinger, BSc.

Matrikelnummer 1329134

Ausgeführt am Institut für

Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische
Biowissenschaften der Technischen Universität Wien

Betreuung

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Hofbauer

Wien, 13. November 2018

Unterschrift Verfasser

Unterschrift Betreuer

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit untersucht das Zusammenspiel verschiedener Erzeuger zur gemeinsamen Versorgung in einem Wärmenetz. Ziel ist es, den Wärmeverbund aus Biomassekessel und Wärmepumpe zur ganzjährigen Wärmeversorgung näher zu beleuchten und dabei auch die Situation im regionalen Stromnetz zu berücksichtigen. Dazu wird das bestehende Biomasseheizwerk Köstendorf im Bundesland Salzburg untersucht, die Umbauarbeiten zur Integration einer Wärmepumpe und eines Pufferspeichers beschrieben und ein Konzept für die regelungstechnische Verbindung der bestehenden Infrastruktur mit den neu eingebauten Komponenten erarbeitet. Weiters wird beschrieben, wie das entwickelte Konzept programmiertechnisch umgesetzt und die Regelung an den einzelnen Komponenten und an der Gesamtanlage implementiert werden.

Als besondere Herausforderung erwiesen sich das automatisierungstechnische Netzwerk aus mehreren Steuerungen und die vielen Protokolle, die für die Kommunikation mit den Sensoren erforderlich waren. Außerdem führte der, bisher nicht vorgesehene, Betrieb des Wärmenetzes im Sommer zu einigem Anpassungsaufwand an den Übergabestationen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination von Biomassekessel und Wärmepumpe gut geeignet ist, ein Wärmenetz ganzjährig mit Energie aus erneuerbaren Quellen zu versorgen. Über den Beobachtungszeitraum von einem halben Jahr lag der Anteil des Spitzenlastkessels an der gesamten Wärmegestehung bei unter 5% und konnte damit deutlich gesenkt werden. Durch den Einsatz der Wärmepumpe in den Sommermonaten ist es möglich, vermehrt Strom aus regionalen Photovoltaikanlagen für die Wärmeherzeugung zu nutzen, jedoch war der Beobachtungszeitraum im Rahmen dieser Arbeit zu kurz, um diese Beobachtung zu quantifizieren.

Abstract

The present thesis investigates the combination of different producers for common supply in a district heating grid. The goal is to analyse combined year-round heat supply from biomass boilers and heat pumps. Also taking into account the situation in the regional electricity grid. For this purpose, the existing biomass heating plant Köstendorf in the province of Salzburg is examined. Furthermore the modification work for the integration of a heat pump and a buffer storage are described and a control concept for the connection of the existing infrastructure with the newly installed components developed. Last but not least will be the description of the implementation of the developed concept into the existing system.

A major challenge was the complexity of the automation network of multiple controllers and the communication protocols required. In addition, the operation of the heating network in summer led to some adjustment efforts at the transfer stations.

The results show that the combination of biomass boiler and heat pump is well suited to supply a district heating grid with renewable energy throughout the year. Further, the share of the peak load boiler could be reduced. In the total heat production over the observation period of half a year, it was less than 5%. The use of the heat pump during the summer months makes it possible to use more electricity from regional photovoltaic panels for heat generation, but the observation period in this work was too short to quantify this observation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	3
3	Theoretische Grundlagen	4
3.1	Biomassefeuerung	5
3.1.1	Ablauf der Verbrennung	5
3.1.2	Schadstoffbildungsmechanismen	7
3.1.3	Aufbau und Funktionsweise	12
3.1.4	Einsatz der Biomasseverbrennung im Wärmenetz	17
3.2	Wärmepumpe	19
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise	19
3.2.2	Wärmequellen für Wärmepumpen	21
3.2.3	Einsatz von Wärmepumpen im Fernwärmenetz	24
3.3	Wärmenetz	25
3.3.1	Aufbau und Komponenten eines Wärmenetzes	26
3.3.2	Entwicklung und Ausblick	31
4	Ausgangssituation	34
4.1	Beschreibung der Anlage	35
4.1.1	Biomassekessel	35
4.1.2	Spitzenlastkessel	37

4.1.3	Fernwärmenetz	38
4.2	Untersuchung der Betriebszustände	40
4.2.1	Winterbetrieb	42
4.2.2	Sommerbetrieb	43
4.2.3	Übergangsbetrieb	44
5	Projektumsetzung	45
5.1	Hydraulische Umbaumaßnahmen	46
5.1.1	Biomassekessel	46
5.1.2	Industriewärmepumpe	48
5.1.3	Pufferspeicher	50
5.2	Automatisierungstechnische Einbindung	52
5.2.1	Sensoren	53
5.2.2	Aktoren	56
5.2.3	Kommunikation zu anderen Steuerungen	58
5.3	Konzeptentwicklung für den automatischen Betrieb	59
5.3.1	Sommerbetrieb	60
5.3.2	Winterbetrieb	61
5.3.3	Power to Heat - Netzüberwachung	65
5.4	Programmierung	65
5.4.1	Beschreibung des Hauptprogramms	65
5.4.2	Webvisualisierung, Parametrierebene	68
5.5	Inbetriebnahme	70
5.5.1	Signalaustausch, Kommunikationstest	71
5.5.2	Test der Einzelkomponenten	75
5.5.3	Start des Gesamtsystems	76

6	Ergebnisse	78
6.1	Sommerbetrieb	81
6.2	Winterbetrieb	82
6.2.1	Leistungsprofil	83
6.2.2	Leistungsprädiktion	84
6.2.3	Leistungsvorgabe Biomassekessel	86
6.3	Übergangsbetrieb	87
6.3.1	Tagesprofil	88
6.3.2	Versorgung und Wärmepumpenleistung	90
6.4	Zusammenfassung	90
	Literatur	92
	Abbildungsverzeichnis	96
	Tabellenverzeichnis	97
A	Hydraulikschema	98

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
4GDH	4th generation district heating
AI	Analog Input
AO	Analog Output
BACnet	Building Automation and Control network
BMK	Biomassekessel
COP	Coefficient of performance
DI	Digital Input
DO	Digital Output
FU	Frequenzumrichter
HVAC	Heating, ventilating and and air-conditioning
IP	Internet protocol
M-BUS	Meter-Bus
n.g.	nicht getestet
PV	Photovoltaik
RJ	Registered jack
RL	Rücklauf (Zulauf zum Wärmeerzeuger)
SLK	Spitzenlastkessel
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
ST	Strukturierter Text
UDP	User datagramm protocol
VL	Vorlauf (Ablauf vom Wärmeerzeuger)
WG	Wassergehalt
WMZ	Wärmemengenzähler
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser

Nomenklatur

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	-	Verdichterverlustfaktor
CH_4	ppm, mg/m ³	Methan
C_xH_y	ppm, mg/m ³	Kohlenwasserstoffe
CO	ppm, mg/m ³	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	ppm, g/m ³	Kohlenstoffdioxid
c_p	J/kgK	spezifische Wärmespeicherkapazität
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H_2	ppm, mg/m ³	Wasserstoff
H_2O	ppm, mg/m ³	Wasser, Wasserdampf
KCl	ppm, mg/m ³	Kaliumchlorid
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
MAX	-	Maximalwert
$MEAN$	-	Mittelwert
MED	-	Median (50% aller Werte darunter)
MIN	-	Minimalwert
NO	ppm, mg/m ³	Stickstoffmonoxid
NO_2	ppm, mg/m ³	Stickstoffdioxid
NO_x	ppm, mg/m ³	Stickstoffoxid
N_2O	ppm, mg/m ³	Distickstoffoxid (Lachgas)
P_{el}	kW	elektrische Leistung
Q	J, kWh	Wärmeenergie
\dot{Q}	J/s, W	Wärmestrom
$Q - 25$	-	25%-Quantil (25% aller Werte darunter)
$Q - 75$	-	75%-Quantil (75% aller Werte darunter)
\dot{Q}_{HK}	W	Wärmestrom Heizkreis
\dot{Q}_{WQ}	W	Wärmestrom Wärmequelle
T	s	Zeit

(wird fortgesetzt)

Zeichen	Einheit	Bedeutung
STD	-	Standardabweichung
T_{RL}	$^{\circ}\text{C}$	Rücklauftemperatur
T_{VL}	$^{\circ}\text{C}$	Vorlauftemperatur
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
ϵ_{WP}	%	Leistungszahl
ρ	kg/m^3	Dichte
θ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur

Kapitel 1

Einleitung

Diese Arbeit befasst sich mit einer regelungstechnischen Optimierung des Nahwärmesystems der Gemeinde Köstendorf im Land Salzburg. In den folgenden fünf Kapitel werden die Aufgabenstellung, theoretische Grundlagen, die Ausgangssituation, die Umsetzung und die Ergebnisse des Projektes beschrieben.

Das Kapitel zu den theoretischen Grundlagen widmet sich den zur Energiebereitstellung und -verteilung eingesetzten Technologien. Beschrieben werden die Grundlagen der Biomasseverbrennung und dabei potentiell entstehende Emissionen, sowie der eingesetzte Feuerungstyp und dessen Vor- und Nachteile beim Einsatz in Wärmenetzen. Außerdem werden die wichtigsten Komponenten einer Wärmepumpe und des Wärmenetzes erläutert und verschiedene Arten von Wärmepumpen diskutiert. Weiters werden bisherige und zukünftige Entwicklungen in Bezug auf Wärmenetze und die Funktion von Wärmespeichern beschrieben.

In der Ausgangssituation wird eine Beschreibung der Anlage vor dem Projektstart durchgeführt und die unterschiedlichen auftretenden Zustände der Wärmeversorgung im betrachteten Wärmenetz analysiert. In der Gemeinde Köstendorf wird ein Nahwärmenetz betrieben, welches von einem Biomassekessel mit Wärme versorgt wird. Zur Spitzenlastabdeckung kommt ein Ölkessel zum Einsatz, in den Sommermonaten wird das Netz stillgelegt und die Verbraucher werden dezentral elektrisch mit Warmwasser versorgt.

Im Hauptteil der Arbeit, der Projektumsetzung, werden zu Beginn die hydraulischen Umbaumaßnahmen, sowie die automatisierungstechnische Einbindung von Sensoren und Aktoren, welche im Zuge des Einbaus von Wärmepumpe und Pufferspeicher ergänzt werden, umrissen, jedoch ist deren Planung und Umsetzung nicht Teil dieser Arbeit. Im Fokus steht die Konzeptentwicklung für eine optimale Leistungsverteilung der Wärmeerzeuger Biomassekessel, Wärmepumpe und

Spitzenlastkessel unter Berücksichtigung von Wärmebedarf im Fernwärmenetz, Füllstand des Pufferspeichers und Strombedarf im Stromnetz. Dabei werden je nach Betriebsart und Jahreszeit verschiedene Betriebsfälle zu unterscheiden sein. Im weiteren Verlauf wird das entwickelte Konzept programmtechnisch umgesetzt und eine Leistungsvorgabe für alle Wärmeerzeuger errechnet. Die Leistungsvorgabe wird über eine Kommunikationsschnittstelle an die Teilnehmer übertragen. Die Programmierung erfolgt auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) des Herstellers Beckhoff Automation. Programmiert wird in strukturier-tem Text nach EN 61131.

Zwar wird in der vorliegenden Arbeit die Leistungsvorgabe errechnet und als entsprechendes Signal zur Verfügung gestellt, jedoch kann die Erreichung der vorgegebenen Leistung nicht beeinflusst werden, da die Regelung der Wärmeerzeuger in herstellereigenen Steuereinheiten umgesetzt ist.

Der letzte Abschnitt befasst sich mit den Ergebnissen des vorgestellten Opti-mierungsprojektes. Dabei sollen Veränderungen im Anlagenbetrieb dargestellt, analysiert und bewertet werden und den Zielsetzungen gegenübergestellt werden. Die Ergebnisse werden dabei nach jahreszeitlich unterschiedlichen Betriebsweisen differenziert betrachtet.

Kapitel 2

Aufgabenstellung

Dieses umfassende Optimierungsprojekt wird angestrebt, um die Wärmeversorgung ganzjährig und nachhaltig sicherzustellen, und diese unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren. Folgende Zielsetzungen werden in diesem Projekt verfolgt:

- Ganzjährige Wärmeversorgung des Wärmenetzes
- Senkung des Verbrauchs von Energieträgern aus fossilen Quellen
- Reduktion der Emissionen und des Brennstoffeinsatzes des Biomassekessels
- Unterstützung des regionalen Stromnetzes mithilfe einer zusätzlich im Wärmenetz eingebauten Wärmepumpe

Im Fokus dieser Arbeit steht die Konzeptentwicklung für eine optimale Lastverteilung des zu versorgenden Wärmenetzes auf die Wärmeerzeuger Biomassekessel, Wärmepumpe und Spitzenlastkessel unter Berücksichtigung des Pufferspeicherfüllstands und der Situation im lokalen Stromnetz. Entscheidend ist hierbei, je nach Jahreszeit und Wärmeabnahme, verschiedene Betriebsfälle zu identifizieren und im Konzept abzubilden. Die zweite Aufgabe ist es, das entwickelte Konzept zu programmieren und es auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) umzusetzen, sodass eine Leistungsvorgabe bzw. Anforderung an alle Wärmeerzeuger übertragen werden kann.

Nach erfolgter Inbetriebnahme sollen die Betriebsdaten aufgezeichnet, analysiert und bewertet werden. Dabei gilt es, die gesetzten Ziele zu evaluieren, sowie einen Vorher-Nachher-Vergleich der Anlagenperformance anzustellen. Außerdem sollen Probleme und Schwierigkeiten während der Inbetriebnahmephase besprochen und deren Lösungen aufgezeigt werden.

Kapitel 3

Theoretische Grundlagen

In dieser Arbeit werden die Optimierungsmaßnahmen in einem Fernwärmenetz, welches mit einem Biomassekessel und künftig zusätzlich mit einer Wärmepumpe versorgt wird, beschrieben. Als Energiespeicher wird außerdem ein Pufferspeicher installiert.

Zum Verständnis der Arbeit ist es sinnvoll, sich zuvor mit den verwendeten Techniken auseinanderzusetzen, um die Zusammenhänge und Rückschlüsse nachvollziehen zu können. In diesem Kapitel werden daher Grundlagen zum Biomassekessel, zur Wärmepumpe, zum Wärmenetz und zu Pufferspeichern dargestellt, auf welchen die vorliegende Arbeit aufbaut.

Ein Biomassekessel wandelt die chemisch in biogenen Brennstoffen gespeicherte Energie in Wärmeenergie um, und stellt sie in Form von heißem Wasser bereit. Wärmepumpen „pumpen“ Wärmeenergie von einem Niveau auf ein höheres, um beispielsweise mit Hilfe von Umgebungswärme Heizungswasser zu erwärmen. Im Fernwärmenetz wird zentral zur Verfügung gestellte Wärme über ein Rohrleitungssystem auf dezentrale Verbraucher verteilt und diese so mit Heizungsenergie und Warmwasser versorgt. Ein Pufferspeicher ist ein mit Wasser gefüllter Behälter, welcher zum Zwischenspeichern von Wärmeenergie eingesetzt wird.

Zur besseren Einordnung der geplanten Optimierungsmaßnahmen wird außerdem ein Blick auf bisherige und mögliche zukünftige Entwicklungen im Bereich der Fernwärmenetze gemacht.

3.1 Biomassefeuerung

Im untersuchten Heizwerk in Köstendorf wird Holz als Primärenergieträger eingesetzt und in einer Vorschubrostfeuerung verbrannt, um die in Wärme umgewandelte Energie in das Fernwärmenetz einzuspeisen.

„Für biogene Festbrennstoffe (z. B. Holz, Stroh) hat die direkte Verbrennung in Feuerungen bis heute die weitaus größte Bedeutung unter den Energiewandlungsprozessen und -verfahren. Verbrennungsanlagen werden eingesetzt zur Produktion von Wärme, die genutzt werden kann als Sekundärenergie (z. B. Dampf, der dann weiter in elektrische Energie umgewandelt werden kann), als Endenergie (z. B. Fernwärme) oder als Nutzenergie (z. B. Strahlungswärme eines Kachelofens). Unter einer Verbrennung wird dabei hier die Oxidation eines Brennstoffs unter Energiefreisetzung verstanden. Dabei entstehen Abgase und Asche.“ (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 463).

In diesem Unterkapitel wird der Aufbau einer Biomasserostfeuerung beschrieben, die Physik und Chemie der Verbrennung umrissen und die Entstehungsmechanismen von Emissionen, sowie das Ascheerweichungsverhalten skizziert. Weiters sollen spezifische Vor- und Nachteile für den Einsatz von Biomassefeuerungen in Fernwärmenetzen aufgezeigt werden.

3.1.1 Ablauf der Verbrennung

Die Verbrennung von Biomasse stellt einen komplexen Ablauf chemischer Reaktionen dar, welche bereits sehr genau untersucht und beschrieben wurden. Die folgende Ausführung basiert auf der Darstellung von Van Loo und Koppejan in „The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing“, (vgl. Van Loo und Koppejan 2008, S. 7-11):

„The combustion process can be divided into several general processes: drying, pyrolysis, gasification and combustion. [...] Drying and pyrolysis/gasification will always be the first steps in a solid fuel combustion process. The relative importance of these steps will vary, depending on the combustion technology implemented, the fuel properties and the combustion process conditions. A separation of drying/pyrolysis/gasification and gas and char combustion, as in staged-air combustion, may be utilized. In large-scale biomass combustion

applications with continuous fuel feeding, such as moving grates, these processes will occur in various sections of the grate.“ (Van Loo und Koppejan 2008, S. 8).

Die Stufen der Verbrennung Trocknung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung laufen also hintereinander ab, wobei die Wichtigkeit der einzelnen Stufe von der eingesetzten Art der Feuerung abhängig ist. In einer Rostfeuerung wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, laufen die Verbrennungstufen in verschiedenen Rostzonen ab.

Die Verbrennung beginnt mit der Trocknung, während der das im Holz enthaltene Wasser verdampft. Dies geschieht bei relativ niedrigen Temperaturen von etwa 100-150°C. Die für die Verdampfung benötigte Energie wird der Brennkammer entzogen und kühlt damit den Brennraum.

Die darauffolgende Pyrolyse ist die thermische Zersetzung der Biomasse. Sie läuft in einem Temperaturbereich zwischen 200-600°C ab. Die pyrolytische Zersetzung ist ein thermo-chemischer Umwandlungsprozess, bei dem die organische Substanz durch Erwärmung umgewandelt wird, ohne dass Oxidationsreaktionen eine Rolle spielen. Sie läuft somit theoretisch ohne Vorhandensein von Sauerstoff ab. Dabei werden die langkettigen organischen Verbindungen der Biomasse in kürzerkettige, meist flüssige oder gasförmige Produkte umgewandelt. Die flüchtigen Produkte, die bei dieser Umwandlung entstehen, sind in der Brennkammer weiteren Umwandlungsprozessen unterworfen.

Im Gegensatz zur Pyrolyse ist die Vergasung eine Zersetzung unter externer Sauerstoffzufuhr. Das heißt, die flüchtigen Produkte aus der Pyrolyse sowie der verbleibende feste Kohlenstoff (Holzkohle) reagieren bei hoher Temperatur (ca. 800-1100°C) zu einem Gas aus hauptsächlich CO , CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4 und anderen Kohlenwasserstoffen.

Die abschließende Verbrennung stellt idealerweise die vollständige Oxidation der Biomasse bzw. deren bereits zersetzten Bestandteile dar. Die Reaktion läuft mit Luftüberschuss ab, das heißt, es steht mehr Sauerstoff zur Verfügung, als für die vollständige Reaktion zu CO_2 und H_2O benötigt wird.

Als Produkt der Verbrennung entsteht neben den oxidierten Gasen Wärme, welche entweder direkt, oder nach weiteren Umwandlungsschritten zu anderen Energieträgern einer Verwendung zugeführt werden kann.

3.1.2 Schadstoffbildungsmechanismen

Bei der Verbrennung biogener Brennstoffe entstehen neben den „gewünschten“ Stoffen der vollständigen Verbrennung CO_2 , H_2O auch Stoffe, welche die Umwelt belasten und solche, die den Betrieb der Feuerungsanlage negativ beeinflussen.

Zu ersteren zählen unter anderem Kohlenmonoxid (CO), höhere Kohlenwasserstoffe (C_xH_y), Stickoxide (NO_x) und Partikelemissionen. Zur zweiten Gruppe zählen vor allem korrosive Stoffe, welche metallische Bauteile in der Feuerungsanlage angreifen, sowie Stoffe, die zur Erweichung der Asche und somit zu Verschlackung führen.

Die sehr umfangreiche Thematik der Emissionen bei der Verbrennung von Biomasse kann hier nicht vollständig erörtert werden. Es wird daher versucht, Phänomene abzubilden, welche für den Betrieb der Anlage eine große Bedeutung haben. Die in diesem Kapitel beschriebenen Mechanismen beruhen auf „Energie aus Biomasse“, (vgl. Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 407-437).

Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe

Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoff entstehen bei unvollständiger Verbrennung von Biomasse:

„Bei einer unvollständigen Umsetzung der Biomasse kann un- oder teilverbrannter Brennstoff mit der Asche und dem Abgas ausgetragen werden. Beides führt zu einer Verminderung des Wirkungs- bzw. Nutzungsgrades und zu unerwünschten Emissionen von Schadstoffen. Deshalb sind durch eine gute Verbrennungsführung unverbrannte Stoffe sowohl im Abgas als auch in der Asche möglichst weitgehend zu minimieren. [...] Zumindest bei Festbettfeuerungen sind die Ausbrandqualitäten von Rostasche und Abgas weitgehend unabhängig voneinander. So sind auch bei einer vollständigen Umsetzung des Brennstoffs im Glutbett hohe Emissionen an Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffen möglich, wenn z. B. die freigesetzten Gase nur unzureichend mit Sekundärluft vermischt oder die notwendigen Verbrennungstemperaturen nicht erreicht werden.“ (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 409-410).

Es müssen somit bei der Verbrennung sowohl für den Ausbrand auf dem Rost, als auch für die Verbrennung des Abgases günstige Bedingungen geschaffen werden, um eine unvollständige Verbrennung bestmöglich zu vermeiden.

Für den Ascheausbrand auf dem Rost sind die wichtigsten Faktoren eine ausreichende Aufenthaltsdauer des Brennstoffes, eine hohe Temperatur in der Zone des Ausbrandes und eine gute Luftverteilung. Ähnlich sind die wichtigsten Parameter für den Ausbrand der Verbrennungsgase beschrieben. Auch hier sind Temperatur, Verweilzeit und ein ausreichendes Sauerstoffangebot für alle Gaspartikel entscheidend:

„Die beschriebenen feuerungstechnischen Anforderungen für die Gasphasenoxidation werden gelegentlich als sogenannte „3-T-Regel“ für die Feuerungskonstruktion zusammengefasst („Time–Temperature–Turbulence“); d. h. dass Verweilzeit, Verbrennungstemperatur und Durchmischungsintensität die wesentlichen zu optimierenden Bestimmungsgrößen darstellen. Das gilt insbesondere für biogene Festbrennstoffe mit ihrem hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen [...].“ (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 465)

Es kann also festgehalten werden, dass für eine vollständige Verbrennung ausreichend Temperatur, ausreichend Zeit und das Vorhandensein und die Verteilung (Durchmischung) von genügend Sauerstoff für jedes Brennstoffmolekül entscheidend sind.

Den Zusammenhang zwischen Emissionen von Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffen verdeutlicht die Grafik in Abbildung 3.1. Im rechten Bildbereich mit den stark ansteigenden Linien ist das 3-T-Kriterium nur unzureichend erfüllt.

Hier zeigt sich eine starke Kopplung der Emissionen von Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffen, unabhängig von der untersuchten Feuerungsart.

Dies deutet darauf hin, dass durch ein Herstellen idealer Bedingungen für die oben beschriebene vollständige Verbrennung, sowohl CO - als auch C_xH_y -Emissionen weitgehend verhindert bzw. minimiert werden können.

Stickstoffoxide

Wie die zuvor beschriebenen Kohlenstoffmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen sind auch Stickoxide unerwünschte Produkte bei der Verbrennung von biogenen Brennstoffen und sollten weitestgehend vermieden werden:

„Stickstoffoxide NO und NO_2 (zusammengefasst NO_x ; umgangssprachlich oft als Stickoxide bezeichnet), in besonderen Fällen auch N_2O , werden bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen gebildet. Sie tragen zur Bildung von bodennahem Ozon und Nie-

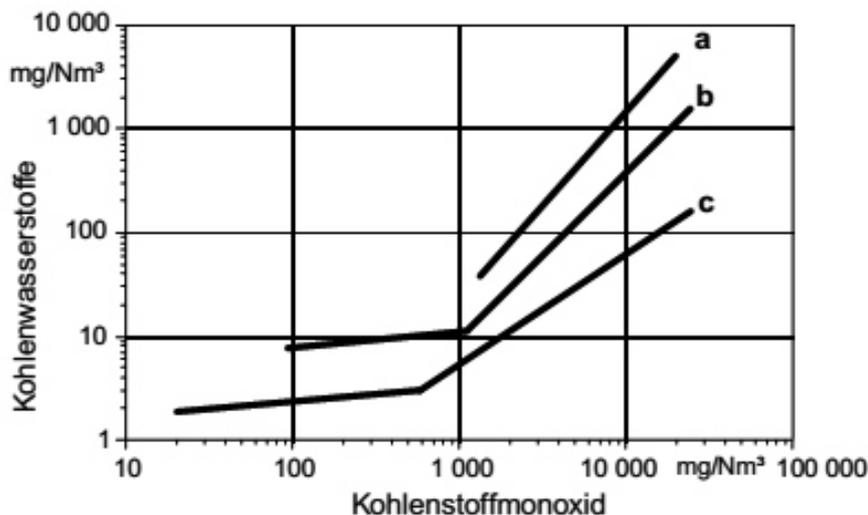


Abbildung 3.1: Kohlenwasserstoff- und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen in Holzfeuerungen bei 11 Vol.-% Sauerstoff im Abgas (a Kaminofen geschlossen, b Stückholzkessel mit unterem Abbrand, c Unterschubfeuerung) (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 411).

derschlagen mit versauernder Wirkung bei. Quelle des Stickstoffs sind der molekulare Stickstoff aus der Verbrennungsluft sowie der im Brennstoff gebundene Stickstoff.“ (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 417).

Bei der Entstehung können thermische und prompte Stickstoffoxide, die aus Luftstickstoff und Sauerstoff gebildet werden, sowie Stickstoffoxide aus Stickstoff, welcher im Brennstoff chemisch gebunden vorliegt, unterschieden werden. In Abbildung 3.2 sind die drei Arten der Stickstoffoxidbildung in Abhängigkeit der Temperatur gegenübergestellt.

Daraus ist ersichtlich, dass für Biomassefeuerungen thermisches sowie promptes NO_x bei üblichen Betriebsbedingungen, also bei Temperaturen zwischen 800-1300°C, keine Rolle spielen und somit die Stickoxide aus Brennstoffstickstoff für das überwiegende Ausmaß an Stickoxidemissionen entscheidend sind. Um diese zu beeinflussen, können maßgeblich zwei Parameter verändert werden. Starke Einfluss hat der Stickstoffgehalt des Brennstoffes, wobei ein höherer Stickstoffgehalt auch zu höheren Stickoxidemissionen führt. Der zweite wichtige Parameter ist der Sauerstoffgehalt in der Ausbrandzone der Brennkammer. Ein höheres Angebot an Sauerstoff führt hier zu erhöhter Oxidation und somit vermehrten Stickoxidemissionen.

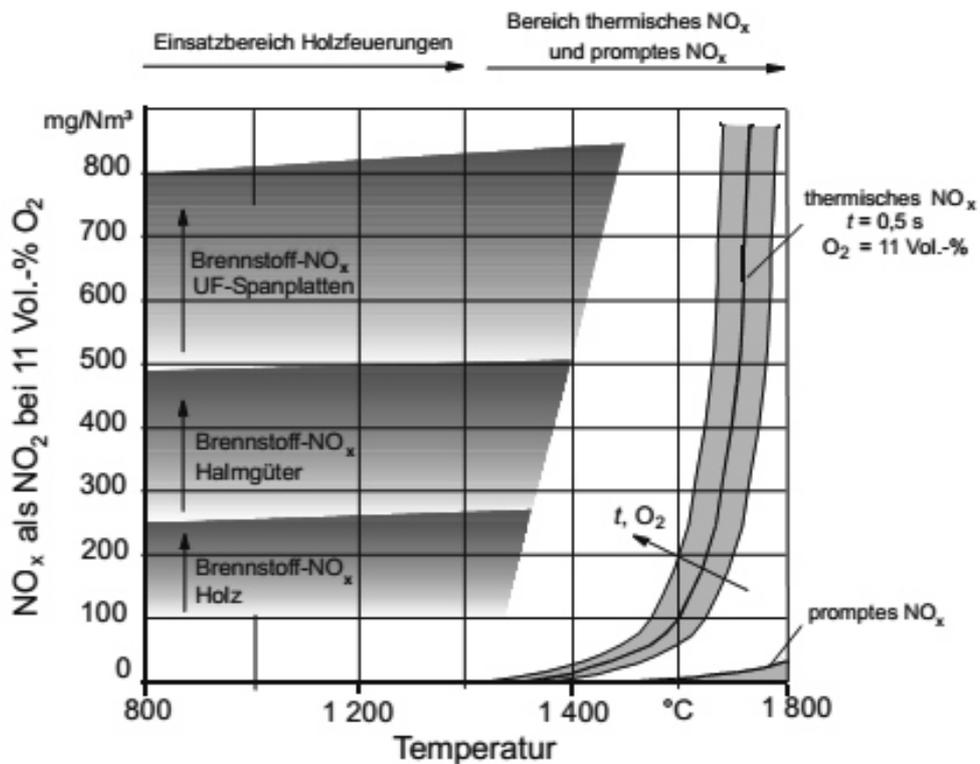


Abbildung 3.2: Bildung von Brennstoff- NO_x , thermischem NO_x und promptem NO_x in Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur mit typischen Bereichen für Holz, Halmgüter und UF-Spanplatten (Richtwerte) (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 419).

Somit können die NO_x -Emissionen, bei festgelegtem Brennstoff, durch gestufte Verbrennung mit einem in der Primärzone niedrigem Sauerstoffangebot maßgeblich beeinflusst werden.

Partikelemissionen

Bei der Biomasseverbrennung entstehen neben unerwünschten chemischen Verbindungen auch feine Staub- und Flüssigkeitspartikel im Abgas:

„Das bei der thermo-chemischen Umsetzung biogener Festbrennstoffe entstehende Abgas besteht nicht nur aus gasförmigen Komponenten, sondern erhält[sic!] auch flüssige und feste Bestandteile; es handelt sich also um ein Aerosol. Die Konsistenz dieses Aerosols hängt u. a. von der Temperatur, den Partialdrücken der Inhaltsstoffe und dem Alter des Aerosols ab.“ (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009,

S. 430).

Diese festen und flüssigen Partikel mit einer Größe von etwa 1nm bis $10\mu m$ können eine negative Auswirkung auf Klima, Pflanzen, Mensch und Tier haben. In der Atmosphäre wirken sie sich durch Reflexion und Verschattung des Sonnenlichts und als Kondensationskeime für Regentropfen auf das Klima aus. Die Teilchen können sich an Pflanzen anlagern und sie so schädigen. Auf Tiere und Menschen wirken sich vor allem lungengängige Partikel negativ aus, welche über Einatmen in den Körper gelangen und dort reizend, toxisch und mutagen wirken können. Unterschieden werden Aerosole dabei nach ihrer Herkunft aus dem Verbrennungsprozess. Bei hohen Luftgeschwindigkeiten der Primärluft, können aus der Brennkammer kleine Teilchen des Brennstoffes und der Asche ausgetragen werden. Aus einer unvollständigen Verbrennung können Aerosole in Form von Kohlenstoffverbindungen entstehen, die nicht fertig ausgebrannt wurden. Aerosole aus vollständiger Verbrennung sind vor allem Ascheverbindungen, das heißt schwerflüchtige, mineralische Verbindungen und Schwermetalle.

Zur Vermeidung von Aerosol- und Staubemissionen können Primär- und Sekundärmaßnahmen unterschieden werden. Primärmaßnahmen wirken direkt in der Verbrennung und sind etwa eine ruhige Fahrweise ohne schnelle Lastwechsel, der Einsatz eines geeigneten, nicht zu nassen Brennstoffes, sowie eine möglichst vollständige Verbrennung. Zu den Sekundärmaßnahmen zählen verschiedene Abscheideverfahren außerhalb der Brennkammer, wie Zyklone und Filter.

Korrosion und Ascheerweichung

Bei der Untersuchung von Schwefel-, Chlor- und Kaliumverbindungen bei der Verbrennung biogener Brennstoffe, erweist sich vor allem der Kaliumgehalt als entscheidend für Korrosion und Ascheerweichung:

„Kalium ist eine Schlüsselkomponente im Zusammenhang mit der Verschlackung und der Bildung von Ablagerungen und Korrosion in Feststofffeuerungen. Es liegt im Abgas vor allem in Form von Salzen vor (d. h. KCl , K_2SO_4);[...]“ (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 427).

Es bilden sich in der Asche Eutektika aus Kalium und anderen Aschekomponenten, die sich durch einen niedrigen Schmelzpunkt auszeichnen, welcher unter jenem der Komponenten in Reinform liegt. Die Schmelztemperatur von Kaliumchlorid liegt bei $760^\circ C$, jene des Gemisches von KCl und Kaliumsulfat bei nur $690^\circ C$. Diese Temperaturen werden in der Verbrennung deutlich überschritten,

was zum Schmelzen dieser Kaliumverbindungen und somit zu einer Erweichung der Asche führt. Dies trägt wiederum zu Anbackungen, Verschlackung und Korrosion im Feuerraum und den anschließenden Anlagenkomponenten bei. Jedoch liegt der Kaliumgehalt bei naturbelassenem Holz sehr niedrig (0,1-0,35%), sodass derartige Emissionen von untergeordneter Bedeutung sind. Beachtet werden müssen sie vor allem bei der Verbrennung von halmgutartiger Biomasse, wie Stroh oder Gras, da diese wesentlich höhere Kaliumgehalte von $>1\%$, bei Sonnenblumenstroh bis zu 5% aufweisen.

3.1.3 Aufbau und Funktionsweise

Hier soll ein kurzer Überblick über die am häufigsten eingesetzten Biomasseverbrennungsanlagen gegeben werden. Außerdem wird die Vorschubrostfeuerung genauer beschrieben, da dieser Feuerungstyp an der untersuchten Anlage zum Einsatz kommt. Aufgrund des Projektgegenstandes werden nachstehend nur Feuerungsarten behandelt, welche in industriellen Anwendungen und Fernwärmenetzen ihren Einsatz finden. Dazu werden Beschreibungen von Van Loo und Koppejan in „The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing“ herangezogen, (vgl. Van Loo und Koppejan 2008, S. 134-155).

Überblick Feuerungssysteme

Für die Verbrennung von Biomasse, vor allem für Holz, gibt es eine Vielzahl von Feuerungssystemen. Nach dem Fluidisierungsgrad des Brennstoffbettes kann zwischen Festbettfeuerung, stationärer Wirbelschichtfeuerung, zirkulierender Wirbelschichtfeuerung und Flugstromverbrennung (Staubfeuerung) unterschieden werden.

Zu den Festbettfeuerungen zählen Unterschubfeuerungen und Rostfeuerungen. Das wesentliche Merkmal der Festbettfeuerung ist das stationäre Brennstoffbett, das von Primärluft durchströmt wird und in welchem die Stufen der Verbrennung nacheinander ablaufen (siehe Kapitel 3.1.1). Nachfolgend werden die Gase in einer Sekundärzone mit separater Luftzuführung fertig verbrannt. In Abbildung 3.3 ist eine Unterschubfeuerung dargestellt.

Hauptunterschied zur Rostfeuerung, welche im nachfolgenden Kapitel detaillierter beschrieben wird, ist, dass der Brennstoff von unten über die Verbrennungsröhre eingeschoben wird und dieser nicht über bewegliche Rostelemente weiterbewegt wird. Die Verbrennung erfolgt gestuft über getrennte Primär- und

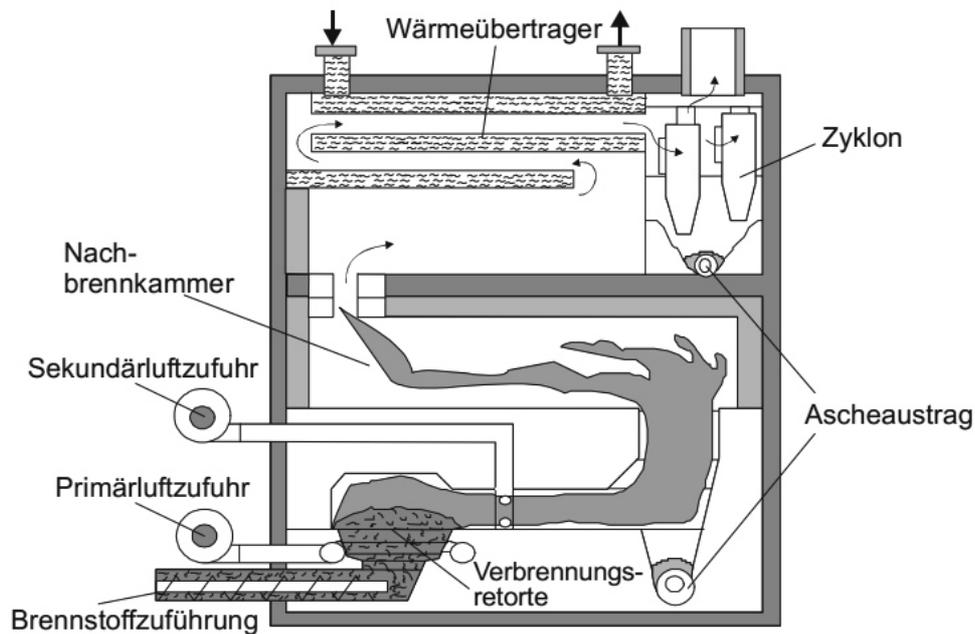


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung
(Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 503).

Sekundärluftgebläse. Über den Ascheaustrag wird die Asche automatisch abgeführt.

Festbettfeuerungen können für unterschiedliche Brennstoffe eingesetzt werden und zeichnen sich durch niedrige Investitions- und Betriebskosten aus.

Im Unterschied zu den Festbettfeuerungen wird das Brennstoffbett bei Wirbelschichtfeuerungen zusammen mit einem Bettmaterial, welches nicht an der Verbrennung teilnimmt, von der Primärluft fluidisiert. Das heißt, dass die Luftgeschwindigkeit ausreicht, um die Brennstoffpartikel und das Bettmaterial vom Rost abzuheben. Bei stationären Wirbelschichten wird ein Wirbelbett mit nahezu konstanter Höhe erzeugt, dieses verbleibt jedoch stets stationär in der Brennkammer. In zirkulierenden Wirbelschichten hingegen ist die Luftgeschwindigkeit der Primärluft so hoch, dass Teile des Bettmaterials aus der Brennkammer ausge tragen werden. In Abbildung 3.4 ist eine zirkulierende Wirbelschicht abgebildet.

Das ausge tragene Bettmaterial wird über einen Hochtemperaturzyklon (Rückführzyklon) aus dem Rauchgasstrom abgeschieden und in die Brennkammer zurückgeführt. Es entsteht also eine Bettzirkulation mit hoher Dynamik und Luftdurchmischung. Über die Wärmeübertrager wird aus dem Abgasstrom und aus dem Bettmaterial (Fließbettkühler) Wärme entnommen und an ein Trägermedium (Wasser, Dampf) übertragen.

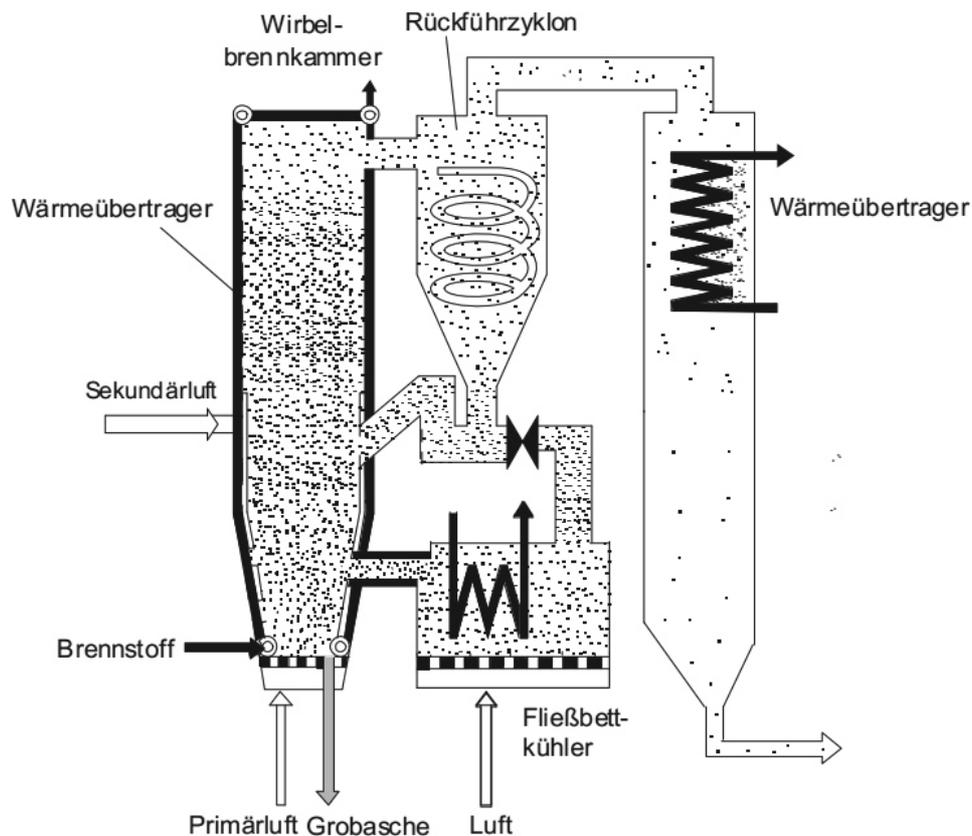


Abbildung 3.4: Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 520).

Wirbelschichtfeuerungen können für verschiedene und stark schwankende Brennstoffqualitäten eingesetzt werden und erreichen hohe Wirkungsgrade bei der Verbrennung. Jedoch sind schnelle Lastwechsel aufgrund der hohen Wärmekapazität des Bettmaterials kaum möglich. Auch aufgrund der höheren Kosten im Vergleich mit Festbettfeuerungen, werden sie verstärkt im Leistungsbereich ab 20MW thermischer Leistung eingesetzt.

Bei der Flugstromverbrennung wird der feine Brennstoff mit Partikelgrößen kleiner als maximal 20mm gemeinsam mit der Verbrennungsluft (Primärluft) pneumatisch in die Brennkammer eingebracht und verbrennt im Flug, wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist. Der Zündbrenner dient lediglich für Anfahrvorgänge und wird mit Gas oder Heizöl betrieben. Damit der eingeblasene Brennstoff automatisch zündet, muss der Wassergehalt unter 20% liegen.

Auch bei dieser Einblasfeuerung wird in einer zweiten Zone Sekundärluft hinzugefügt, um eine gestufte Verbrennung zu erreichen. Die besondere Schwierigkeit liegt hier in der erforderlichen gleichmäßigen Brennstoffzufuhr und Beschaffenheit, damit während des Betriebs eine konstante Leistung und gleichbleibende

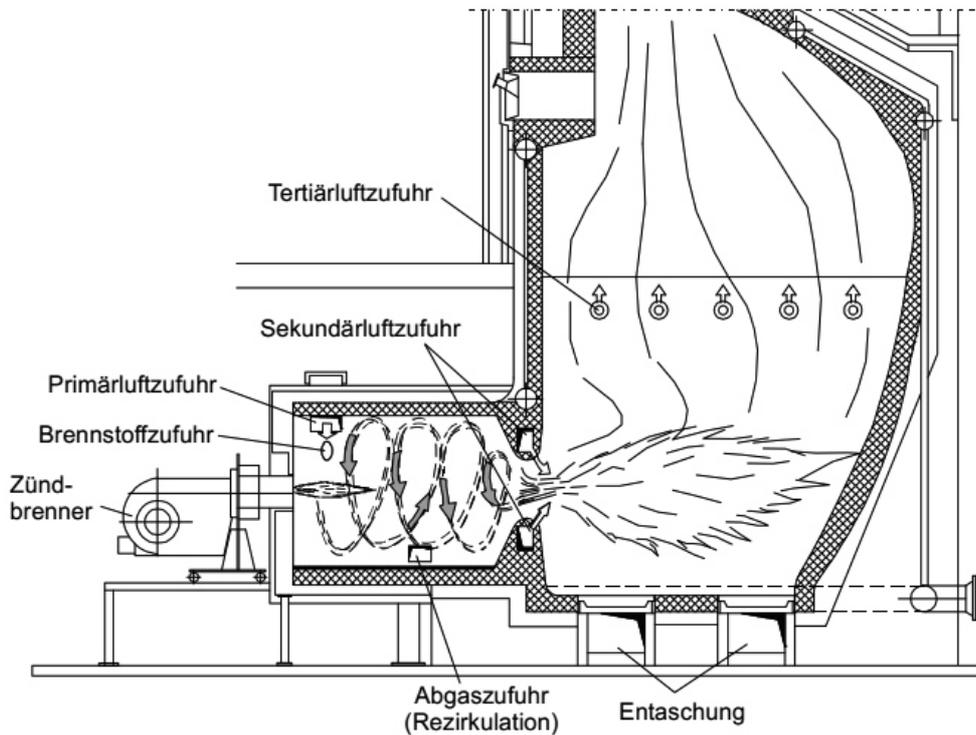


Abbildung 3.5: Muffeleinblasfeuerung (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 521).

Bedingungen in der Brennkammer sichergestellt werden können. Staubfeuerungen zeichnen sich durch die Möglichkeit schneller Lastwechsel aus, sind jedoch durch die Einschränkungen bei Brennstoffwassergehalt und Partikelgröße in ihrer Anwendung begrenzt.

Vorschubrostfeuerung

Nach diesem Überblick über die verschiedenen automatisch beschickten Feuerungen wird nun auf die Funktionsweise einer Vorschubrostfeuerung genauer eingegangen, da im untersuchten Heizwerk in Köstendorf eine solche Feuerung zum Einsatz kommt.

In einer Vorschubrostfeuerung wird der Brennstoff auf einen Rost aufgebracht und durch Vor- und Rückwärtsbewegungen der einzelnen Rostelemente in der Brennkammer weiter transportiert. Während des Transportes findet die Verbrennung statt, die nicht brennbaren Bestandteile des Brennstoffes gelangen am Ende des Rostes als Asche in die Ascheaustragung. In Abbildung 3.6 ist eine Vorschubrostfeuerung dargestellt.

Die Primärluftzufuhr erfolgt unter dem Rost, wodurch die Verbrennung gesteuert

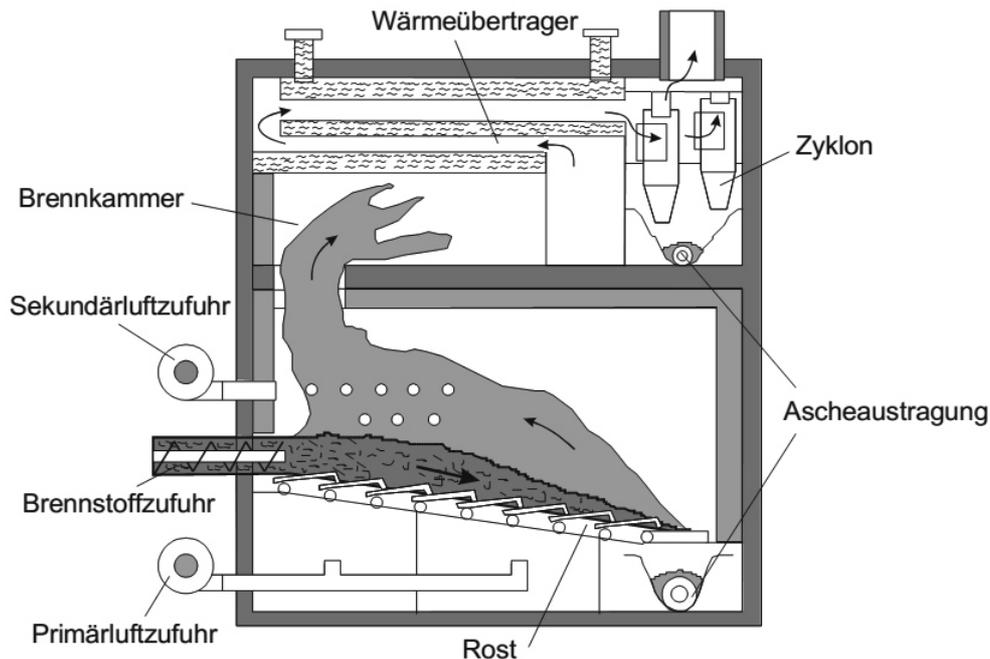


Abbildung 3.6: Vorschubrostfeuerung (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 504).

werden kann und die Stufen der Verbrennung, Trocknung, Pyrolyse und Ascheausbrand hintereinander ablaufen. Oberhalb des Rostes wird ebenfalls Luft in Form von Sekundärluft eingebracht, mit dem Ziel, den Ausbrand der flüchtigen Bestandteile zu gewährleisten und somit eine vollständige Verbrennung zu erreichen. Durch diese Luftstufung kann außerdem eine unterstöchiometrische, also unter Sauerstoffmangel betriebene, Verbrennung auf dem Rost stattfinden, wodurch die Stickstoffemissionen reduziert werden können, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben. Die bei der Verbrennung entstehenden heißen Gase werden über einen Wärmeüberträger geführt und von einem Abluftgebläse in den Kamin gefördert. Die Energiemenge im Abgas ist dabei der größte Verlustanteil bei der Verbrennung. Der Zyklon in Abbildung 3.6 dient der Staubabscheidung aus dem Abgas, die Ascheaustragung fördert die anfallende Asche regelmäßig aus der Brennkammer.

Rostfeuerungen sind in Bezug auf den eingesetzten Brennstoff sehr vielseitig. Holzbrennstoffe mit stark variierenden Eigenschaften in Bezug auf Stückigkeit, Wassergehalt und Aschegehalt können verfeuert werden. Lediglich bei halmar-tigen Brennstoffen sind der Rostfeuerung aufgrund der niedrigen Ascheschmelzpunkte engere Grenzen gesetzt. Aufgrund niedriger Primärluftgeschwindigkeiten zeichnen sie sich durch geringe Staubfrachten im Abgas aus, dafür ist die Brennstoff- und Luftdurchmischung schlechter als bei Staub- und Wirbelschicht-

feuerungen. Durch diese schlechtere Durchmischung im Rauchgas ist in Rostfeuerungen für eine vollständige Verbrennung ein höherer Luftüberschuss erforderlich, was wiederum zu erhöhten Abgasverlusten führt. Weitere Nachteile sind die bei dynamischen Lastwechseln entstehenden Emissionsspitzen und die begrenzte Teillastfähigkeit, die dadurch begründet ist, dass der große Feuerraum bei zu geringer Last auskühlt und die notwendigen Temperaturen für vollständige Verbrennung nicht mehr erreicht werden.

3.1.4 Einsatz der Biomasseverbrennung im Wärmenetz

Vergleicht man die Eigenschaften der beschriebenen Biomasseverbrennungsanlage mit den Anforderungen eines Fernwärmenetzes (siehe Kapitel 3.3) an dessen Wärmeerzeuger, so ergeben sich spezifische Vor- und Nachteile für den Einsatz einer Biomasserostfeuerung in einem Wärmenetz. Nachstehend sind wichtige Anforderungen eines Fernwärmenetzes an die Energieerzeuger angeführt und den entsprechenden Eigenschaften einer Biomassefeuerung gegenüber gestellt.

Ein Fernwärmenetz beliefert seine Abnehmer ganzjährig und rund um die Uhr mit Wärme. Ein Biomassekessel ist für den dauerhaften Betrieb konzipiert, An- und Abfahrvorgänge stellen für den gemauerten Brennraum aufgrund der Temperaturänderungen ungünstige Betriebszustände dar. Bis auf wenige Wartungsstillstände kann ein Biomassekessel auf dem Stand der Technik vollautomatisch durchlaufen und kann dadurch mehr als 8000 Betriebsstunden pro Jahr erreichen.

Lastwechsel mit Spitzen und Tälern in der Abnahme ergeben sich in einem Fernwärmenetz durch Effekte der Gleichzeitigkeit, wie beispielsweise die gemeinsame Nachtabsenkung der Heizung vieler Abnehmer, oder morgendliches Duschen. In der Verbrennung führen schnelle Lastwechsel allerdings zu erhöhten Emissionen, wie bereits bei den Eigenschaften von Rostfeuerungen beschrieben. Eine Rostfeuerung ist somit nur bedingt für schnelles Auf- und Abfahren geeignet. Ein Pufferspeicher kann eingesetzt werden, um kurze Lastspitzen abzufedern und so die Kombination aus Biomassekessel und Fernwärmenetz zu verbessern.

Große jahreszeitliche Unterschiede, wie sie in Abbildung 3.15 gezeigt werden, und die zuvor beschriebenen Lastwechsel führen dazu, dass Wärmeerzeuger für ein Wärmenetz oft im Teillastbetrieb laufen müssen. Eine Biomassefeuerung kann dauerhaft in Teillast betrieben werden, jedoch ist darauf zu achten, dass stets eine Brennraumtemperatur von größer gleich 800°C eingehalten wird, damit auch in der Teillast eine vollständige Verbrennung erreicht wird. Die Teillastfähigkeit liegt bei etwa 20-30% der Nennlast, daher ist es wichtig, die Dimensionierung der

3.1. BIOMASSEFEUERUNG

Biomassefeuerung gut auf die Abnahmeleistung im Wärmenetz abzustimmen.

Aus rein technischer Sicht weist ein Biomassekessel also Vor- und Nachteile im Bezug auf den Einsatz in einem Fernwärmenetz auf. Jedoch gibt es aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht einige Vorzüge von Biomasseanlagen im Vergleich zu fossilen Wärmeerzeugern.

Im Unterschied zu fossilen Brennstoffen ist Biomasse ein nachwachsender Rohstoff. Das bei der Verbrennung freigesetzte CO_2 wird zuvor beim Pflanzenwachstum aus der Atmosphäre aufgenommen. Für die Bewertung der Treibhausgasemissionen werden daher lediglich die Emissionen, die bei der Ernte und Verarbeitung entstehen, berücksichtigt. Weiters ist Biomasse in vielen Gebieten verfügbar und schafft damit eine regionale Wertschöpfung und Arbeitsplätze. Auch der Preis von Biomasse, wie etwa bei Holzhackschnittel liegt deutlich unter jenen der fossilen Energieträgern, wie die Grafik in Abbildung 3.7 illustriert. Der Preis der Holzhackschnittel ist hier für einen Wassergehalt von 35% (WG 35) angegeben.

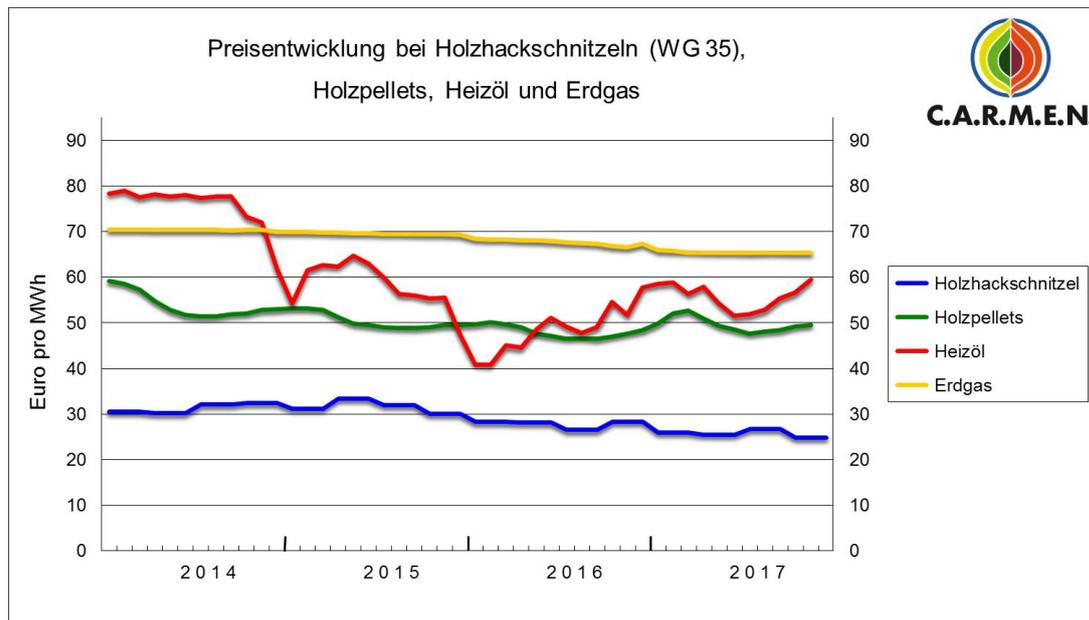


Abbildung 3.7: Preisentwicklung bei Holzhackschnitteln, Holzpellets, Heizöl und Erdgas 2014 bis 2017 (C.A.R.M.E.N. e.V. 2017).

Vergleicht man die Preise für Holzhackschnittel (blaue Linie), mit jenen für Heizöl (rot) bzw. Erdgas (gelb), so ist erkennbar, dass die gleiche Energiemenge aus Hackschnittel im Durchschnitt der letzten vier Jahre etwa halb so viel kosteten wie aus den fossilen Brennstoffen Heizöl und Erdgas.

3.2 Wärmepumpe

In diesem Kapitel werden Funktion und Aufbau der mittels mechanischem Verdichter angetriebenen Wärmepumpe (Kompressionswärmepumpe) beschrieben und die verschiedenen Typen von Wärmequellen gegenübergestellt und diskutiert. Außerdem wird auf die besonderen Merkmale von Wärmepumpen in Bezug auf den Einsatz in Wärmenetzen eingegangen.

„Die Wärmepumpe ist ein Aggregat, welches einen Wärmestrom auf einem bestimmten Temperaturniveau aufnimmt (kalte Seite) und diesen durch Zufuhr exergetisch höherwertiger Energie gemeinsam mit der zugeführten Energie auf einem höheren Temperaturniveau wieder abgibt (warme Seite).“ (Kaltschmitt und Streicher 2009, S. 240).

Wärmepumpen können also dazu eingesetzt werden, mithilfe von Umgebungswärme aus der Luft oder dem Erdreich ein Heizungssystem zu betreiben. Dazu wird diese Umgebungswärme mithilfe der Wärmepumpe auf das Temperaturniveau des Heizungssystems gepumpt.

3.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Dieses Pumpen der Wärme bei Kompressionswärmepumpen erfordert mehrere Schritte, die in einem Kreisprozess nacheinander durchlaufen werden: Verdampfen, Verdichten, Kondensieren, Entspannen. Die folgende Beschreibung ist aufgebaut auf der Darstellung in „Regenerative Energietechnik“, (vgl. Wesselak und Schabbach 2009, S. 270-281).

„Wärmepumpen sind im thermodynamischen Sinn Arbeitsmaschinen, die in einem linkslaufenden Kreisprozess Wärmeströme von niedrigem Temperaturniveau mit Hilfe zugeführter mechanischer Arbeit auf ein höheres Temperaturniveau transformieren. Das Arbeitsmittel wird als Kältemittel bezeichnet, da Wärmepumpen auf Basis der Kältemaschinenteknik entwickelt wurden.“ (Wesselak und Schabbach 2009, S. 270).

Eine Wärmepumpe ist also eine Kältemaschine, wie etwa ein Kühlschrank, mit umgekehrtem Ziel. Hier wird die Wärme dem Prozess zugeführt und nicht aus dem Prozess entzogen. In Abbildung 3.8 ist das Funktionsschema einer Kompressionswärmepumpe dargestellt. Der Rücklauf (RL) bezeichnet darin jeweils die kalte und Vorlauf (VL) die warme Seite der dargestellten Wärmetauscher.

3.2. WÄRMEPUMPE

Die vier wichtigsten Bauteile Verdampfer, Verdichter, Verflüssiger (Kondensator) und Drossel werden nachfolgend beschrieben.

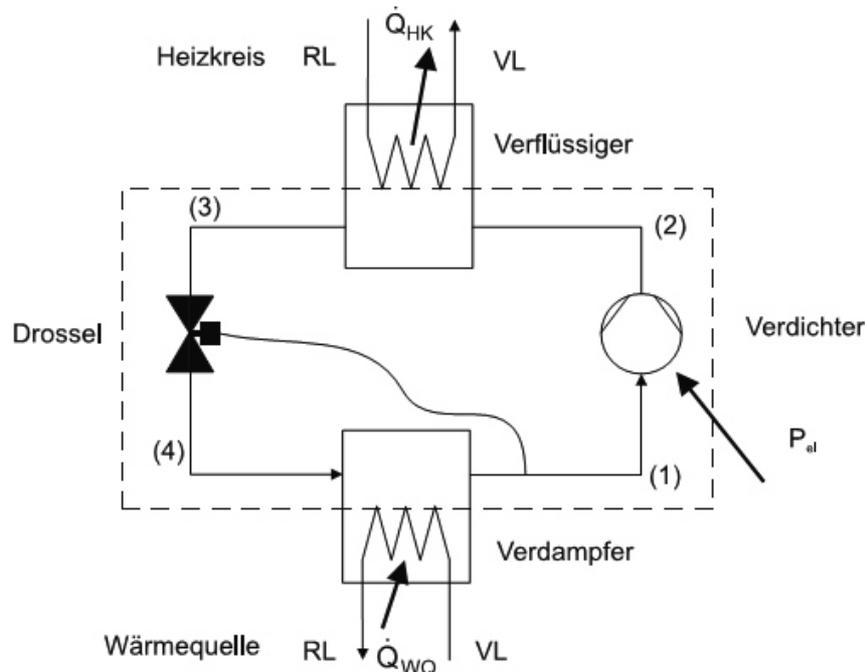


Abbildung 3.8: Grafische Darstellung des Systems Wärmepumpe mit den Komponenten Verdichter, Verflüssiger, Drossel und Verdampfer. (Wesselak und Schabbach 2009, S. 271).

Der Verdampfer ist ein Wärmeübertrager, welcher Wärme von der Quelle auf das Arbeitsmedium überträgt. Das entspannte flüssige Kältemittel wird bei niedrigem Druck verdampft und entzieht dabei der Umgebung Wärme, die aus der Wärmequelle zugeführt wird. Die Verdampfungstemperatur des Kältemittels muss also unter der Temperatur der Wärmequelle liegen, damit der Wärmestrom fließen kann. Als Wärmequellen werden in Heizungsanwendungen häufig Außenluft, Grundwasser oder das umgebende Erdreich benutzt. Diese werden in Kapitel 3.2.2 diskutiert. Entscheidend im Verdampfer ist, dass das Arbeitsmedium vollständig verdampft wird (1), damit keine Schäden am Verdichter auftreten.

Im Verdichter wird das gasförmige Kältemittel verdichtet, wobei mechanische Arbeit zugeführt wird. Der Enddruck des Verdichters ergibt sich aus der gewünschten Temperatur, bei der die Wärme abgegeben werden soll (2). Je höher die zugeführte Verdichterenergie, desto geringer ist die Effizienz der Wärmepumpe. Aus der Leistungsbilanz

$$\dot{Q}_{HK} = \dot{Q}_{WQ} + a * P_{el} \quad (3.1)$$

ist ersichtlich, dass sich die gesamte abgegebene Wärmemenge \dot{Q}_{HK} in den Heizkreislauf (HK) aus der zugeführten Wärmeleistung \dot{Q}_{WQ} aus der Wärmequelle (WQ) und um den Verdichterverlustfaktor a reduzierten elektrischen Antriebsleistung zusammensetzt. Der Verdichterverlustfaktor beinhaltet Wärmeverluste und Irreversibilitäten im inneren des Verdichters und erreicht bei hermetischen Verdichtern einen Wert von $a = 0,9$.

Die Effizienz der Wärmepumpe wird als Leistungszahl ϵ_{WP} oder englisch als coefficient of performance (*COP*) bezeichnet. Sie berechnet sich aus der gesamt abgegebenen Wärmemenge \dot{Q}_{HK} und der zugeführten elektrischen Energie P_{el} des Verdichters inklusive Hilfsantriebe (z.B. Primärkreispumpe, etc.) nach

$$\epsilon_{WP} = COP = \frac{\dot{Q}_{HK}}{P_{el}} = 1 + \frac{\dot{Q}_{WQ}}{P_{el}}. \quad (3.2)$$

Sie ist ein wichtiger Vergleichswert für den Betrieb von Wärmepumpen und hängt stark von den Temperaturniveaus der Wärmequelle und Wärmesenke ab, da diese Niveaus die erforderliche Druckerhöhung im Verdichter bestimmen.

Die Wärmesenke ist an den Verflüssiger gekoppelt und in Abbildung 3.8 als Heizkreis bezeichnet. Im Verflüssiger wird das verdichtete Gas des Kältemittels durch das zu beheizende Medium abgekühlt und kondensiert. Die an den Heizkreis abgegebene Wärmemenge \dot{Q}_{HK} ist dabei die in der Quelle aufgenommene Energie plus der in Form von Arbeit hinzugefügten elektrischen Energie des Verdichters.

Das nun zum größten Teil verflüssigte Kältemittel (3) gelangt zur Drossel, welche auch als Expansionsventil bezeichnet wird. Dort findet die Entspannung auf das untere Druckniveau (vor Verdichter) statt, gleichzeitig wird durch die Öffnung des Ventils der Volumenstrom des Kältemittels im Kreislauf bestimmt. Dieser wird so geregelt, dass die vollständige Verdampfung des Arbeitsmittels im Verdampfer sichergestellt ist (4).

3.2.2 Wärmequellen für Wärmepumpen

Nach der Beschreibung der Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe sollen nun verschiedene Arten von Wärmequellen gegenübergestellt werden und

deren Vor- und Nachteile diskutiert werden. Die Unterscheidung erfolgt ist angelehnt an die Beschreibung in „Regenerative Energien in Österreich“, (vgl. Kaltschmitt und Streicher 2009, S. 240-250). Verglichen werden die Wärmequellen Außenluft, (Grund-)Wasser und Erdwärme.

Der einfachste Aufbau einer Wärmepumpe ergibt sich bei der Verwendung von Außenluft als Wärmequelle, da auf der Quellenseite keine zusätzlichen Grab- und Verlegearbeiten erforderlich sind:

„Luft steht überall und uneingeschränkt als Wärmequelle zur Verfügung. Sie besitzt allerdings im Vergleich zu Wasser eine wesentlich geringere Dichte [...], so dass i. Allg. sehr große Luftmengen ventilatorisch bewegt werden müssen.“ (Kaltschmitt und Streicher 2009, S. 249).

Die Luft wird dem Verdampfer über Ventilatoren zugeführt. Darin wird die Energie der Luft an das Arbeitsmedium übertragen. Dem Vorteil des einfachen Aufbaus und damit geringer Investitionskosten stehen jedoch gravierende Nachteile, vor allem für ganzjährigen Betrieb, gegenüber. Durch die großen Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschiede der Außenluft ergeben sich sehr unterschiedliche Betriebsbedingungen. Hinzu kommt, dass im Winter bei der größten Nachfrage nach Raumwärme, die niedrigsten Temperaturen bei der Außenluft herrschen und damit der erforderliche Temperaturhub in der Wärmepumpe ansteigt. Dies führt wiederum zu einer Verschlechterung des COP und damit der Systemeffizienz.

Bei der Verwendung von Wasser als Wärmequelle kann je nach Verfügbarkeit sowohl Oberflächenwasser als auch Grundwasser verwendet werden. Das Wasser muss von der Quelle zum Verdampfer gepumpt werden, damit dort die Wärmeübertragung stattfinden kann. Zusätzlich muss das abgekühlte Wasser zurückgeführt werden, was bei Grundwasser einen Schluckbrunnen erfordert. In Abbildung 3.9 ist eine Wärmepumpenanlage mit Förder- und Schluckbrunnen dargestellt.

Die Tonsperre, welche oberhalb der Kiesschüttung eingebracht ist, verhindert den Eintritt von Luft und Sickerwasser. Es ist zu beachten, dass Entnahme- und Schluckbrunnen in ausreichender Entfernung voneinander erstellt werden, damit ein hydraulischer oder thermischer Kurzschluss vermieden wird. Der Vorteil von Wasser als Wärmequelle ist zum Einen die meist sehr konstante Temperatur der Wärmequelle und zum Anderen die hohe spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgers. Als Nachteil sind die, im Vergleich zu Luftwärmepumpen, höheren Investitionskosten und die wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren zu nennen.

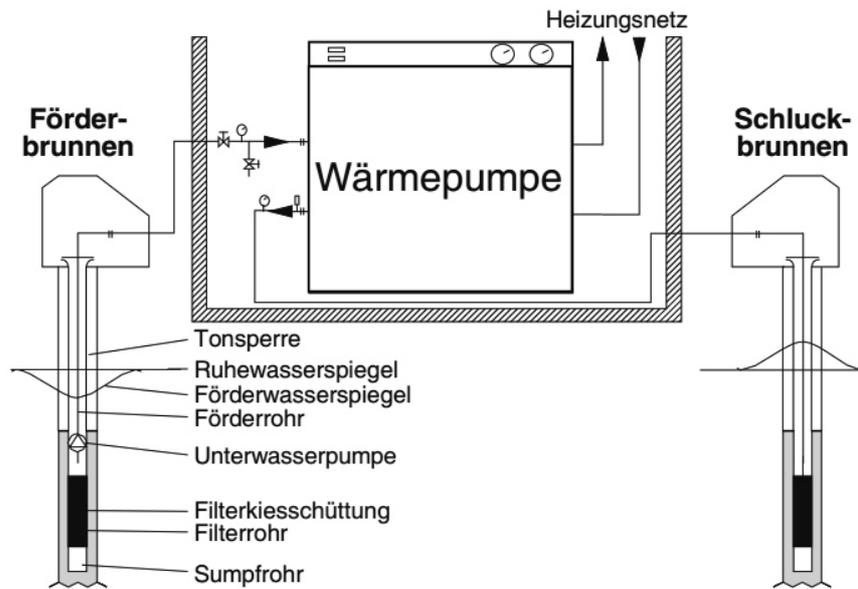


Abbildung 3.9: Prinzip einer Grundwasser-Wärmepumpenanlage (Kaltschmitt, Streicher und Wiese 2013, S. 650).

Erdreichwärmepumpen verwenden Wärme aus oberflächennahen Erdschichten als Wärmequelle. Um diese Energiequelle nutzen zu können, muss die Wärme dem Erdreich über eigene Wärmeübertrager entzogen werden. Diese können als Kollektoren verschiedenster Art oder in einem Graben im Boden horizontal verlegt werden, wie in Abbildung 3.10 dargestellt ist. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Wärme über vertikal eingeschlagene oder gebohrte Sonden zu entnehmen, siehe Abbildung 3.11.

Durch den Wärmeaustauscher im Boden wird ein Wasser-Salz-Gemisch (Sole) gepumpt, welche die Energie aus dem Erdreich aufnimmt und am Verdampfer in der Wärmepumpe an das Kältemittel abgibt. Dabei wird die Sole wieder abgekühlt und kann erneut Wärme aus dem Boden entziehen. Bei der Auslegung der Größe des Erd-Sole-Wärmetauschers sind die regionalen maximal möglichen und zulässigen Entzugsleistungen aus dem Erdreich zu beachten, welche je nach Beschaffenheit des Bodens unterschiedlich sind.

Durch die Vielzahl an möglichen Erdwärmetauschern zeichnen sich diese Wärmepumpen dadurch aus, dass sie fast überall eingesetzt werden können. Die konstante Temperatur des Erdreichs kann außerdem eine gleichmäßige und hohe Systemeffizienz im Vergleich zu Luftwärmepumpe erreicht werden. Nachteilig sind der komplexe Anlagenaufbau und die damit verbundenen, in diesem Vergleich, höchsten Kosten von allen drei vorgestellten Wärmequellentypen.

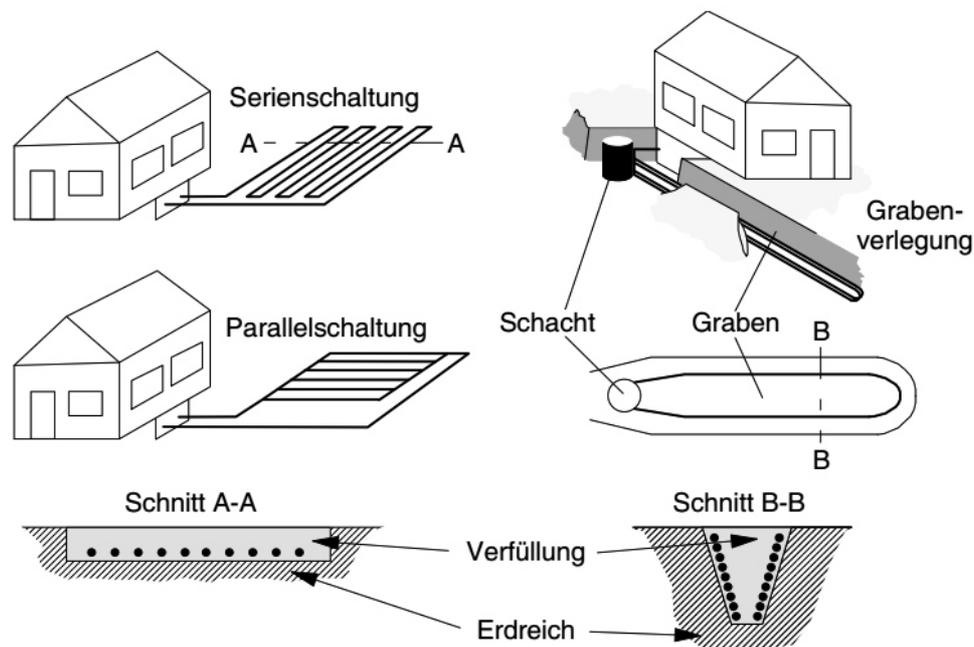


Abbildung 3.10: Verlegemuster horizontaler Wärmeübertrager (Kaltschnitt, Streicher und Wiese 2013, S. 642).

3.2.3 Einsatz von Wärmepumpen im Fernwärmenetz

Wärmepumpen eignen sich vor allem für Heizungsanwendungen, in denen der erforderliche Temperaturhub zwischen Quelle und Senke gering ist. Im Heizwerk in Köstendorf wird eine Wärmepumpe eingesetzt, welche als Wärmequelle Außenluft nutzt und diese in den Rücklauf des Heizkreislaufs einspeist. Aus den vorherigen Beschreibung können für diesen Einsatzzweck einige Vor- und Nachteile abgeleitet werden.

In Bezug auf An- und Abfahren sind Wärmepumpen unempfindlich, sie können schnell gestartet und gestoppt werden. Die Teillastfähigkeit ist gut, jedoch steigen in der Teillast anteilig die Verluste des Verdichters, da dieser auf Nennlast ausgelegt ist. Das in Köstendorf eingesetzte Wärmepumpensystem besteht aus insgesamt acht Wärmepumpen, sodass in der Teillast einzelne Wärmepumpen weggeschaltet werden können.

Eine Wärmepumpe ist für den dauerhaften Einsatz ausgelegt, jedoch ergeben sich bei Außenluftwärmepumpen aus den starken Temperaturschwankungen große Unterschiede zwischen Sommer und Winter. Im Sommer ist der Betrieb besonders günstig, da die Außentemperatur hoch liegt und die Netztemperatur aufgrund der geringen Abnahmeleistung üblicherweise abgesenkt wird. Im Winter ist die Situation gerade umgekehrt. Bei hoher Leistung im Wärmenetz wird auch

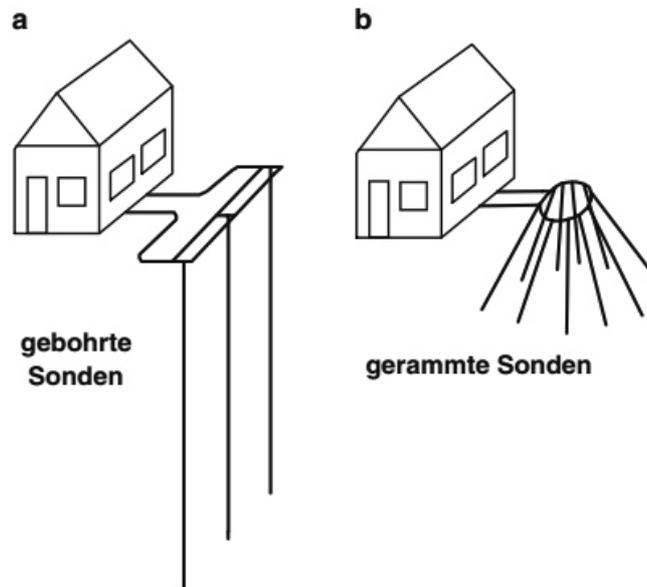


Abbildung 3.11: Anordnungsvarianten von vertikal verlegten gebohrten (a) und gerammten (b) Erdreichwärmeübertragern (Kaltschmitt, Streicher und Wiese 2013, S. 644).

eine hohe Vorlauftemperatur benötigt, dabei ist die Außentemperatur besonders niedrig und der erforderliche Temperaturhub in der Wärmepumpe steigt stark an. Hier ist es günstig, die Wärmepumpe zur Beheizung des Netzurücklaufes zu verwenden und die restliche Leistung über einen zweiten Wärmeerzeuger, etwa dem Biomassekessel, bereitzustellen.

Um die Wärmepumpe möglichst effizient betreiben zu können, wird in diesem Projekt versucht, die Wärmepumpe größtenteils im Sommer einzusetzen und idealerweise mit Überschussstrom aus den Photovoltaikmodulen zu betreiben, welcher gerade im Sommer zur Verfügung steht.

3.3 Wärmenetz

Wärmenetze existieren in verschiedensten Formen und Größen. Eine allgemeingültige Definition ist daher nicht einfach, doch können die wichtigsten Eigenschaften wie folgt zusammengefasst werden:

„District heating comprises a network of pipes connecting the buildings in a neighbourhood, town centre or whole city, so that they can be served from centralised plants or a number of distributed heat producing units.“(Lund u. a. 2014)

Wichtig ist also, dass es sich um ein Netzwerk aus Rohren handelt, welches dezentrale Wärmekonsumenten aus zentralen Erzeugeranlagen versorgt. Die Art der Wärmeerzeugung und Verwendungszweck der Verbraucher ist jedoch nicht festgelegt und hängt stark von der regionalen Struktur der Abnehmer und dem vorhandenen Angebot an verfügbarer Wärmeenergie ab. Die Begriffe Nahwärme und Fernwärme werden in dieser Arbeit nicht differenziert und gleichbedeutend verwendet, da die Unterscheidungsmerkmale auch in der Literatur nicht klar definiert sind.

3.3.1 Aufbau und Komponenten eines Wärmenetzes

Hier soll der Aufbau eines Fernwärmenetzes mit seinen wesentlichen Komponenten beschrieben werden. Die Beschreibung ist angelehnt an das „Praxisbuch Energiewirtschaft“ (vgl. Konstantin 2007, S. 365-381).

In Abbildung 3.12 ist der grundlegende Aufbau einer Fernwärmeversorgung dargestellt. Die zentrale Versorgungseinheit ist darin als Kraftwärmekopplung dargestellt, sodass die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme in das Wärmenetz eingespeist wird. Es sind aber auch andere Wärmeerzeuger denkbar. Als Verbraucher sind hier schematisch Häuser abgebildet, die jedoch auch kommunale und industrielle Abnehmer symbolisieren können.

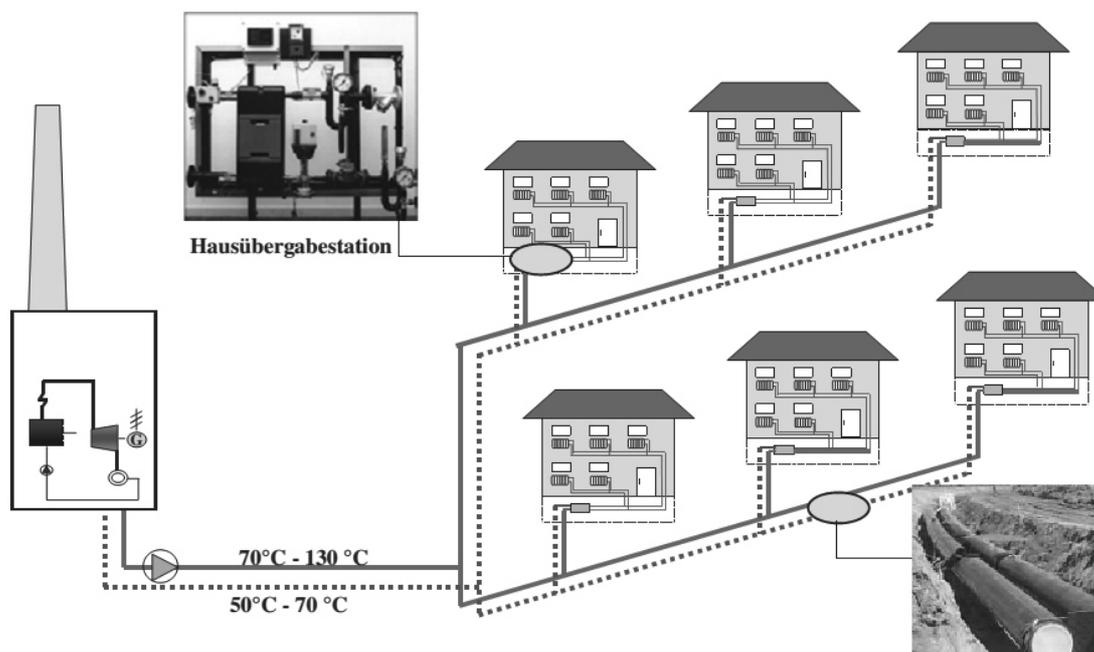


Abbildung 3.12: Aufbau einer Fernwärmeversorgung (Konstantin 2007, S. 366).

Ein großer Vorteil der Fernwärmeversorgung im Vergleich zu dezentraler Versorgung, ist die effiziente Energiebereitstellung durch die Möglichkeiten von Abwärmenutzung, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und den Wirkungsgradvorteil großer Anlagen. Positiv kann auch die deutliche Verbesserung der Luftemissionen im Vergleich zu Einzelfeuerungen erwähnt werden. Als größte Nachteile lassen sich technisch die hohen Verluste und wirtschaftlich die hohen Kosten der langen Leitungssysteme identifizieren. Nachfolgend werden die wichtigsten Komponenten aus Abbildung 3.12 beschrieben.

Rohrleitungssystem

Das Rohrleitungssystem in einem Wärmenetz dient der Verbindung von Erzeuger und Verbraucher und ist meist aus zwei Leitungen aufgebaut. Die Vorlaufleitung mit heißem Wasser ist für den Transport der Wärmeenergie zum Konsumenten zuständig. Die Rücklaufleitung dient dem Rücktransport des abgekühlten Wassers zur Heizzentrale. Eine Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklaufleitung ermöglicht, dass Heizungswasser über ein Ventil und den Wärmetauscher der Übergabestation in den Rücklauf fließt und dadurch den Verbraucher mit Wärme versorgt. Die Druckdifferenz wird von einer Pumpstation, bzw. den Netzpumpen aufrechterhalten.

Heute werden als Fernwärmeleitungen hauptsächlich Kunststoffmantelrohre eingesetzt und diese in Trassen in der Erde verlegt, wie in Abbildung 3.13 gezeigt wird. Je nach Einsatzzweck sind auch andere Rohrkonstruktionen in Verwendung.

Beim Kunststoffmantelrohr besteht das Mediumsrohr im Zentrum aus Stahl und ist von einer Dämmschicht umgeben. Als Schutzhülle gegen äußere Beschädigung und sonstige Einflüsse dient ein Kunststoffmantel. In größeren Netzen werden an den Rohrleitungen Sensoren angebracht, um Leckagen zu erkennen.

Pumpstation und Druckhalteanlage

Die Pumpstation in einem Wärmenetz dient dazu, alle Verbraucher zu jeder Zeit mit der benötigten Wärmemenge zu versorgen. Sie hält den Wasserkreislauf bis zur entferntesten Übergabestation aufrecht und stellt sicher, dass auch für diese Station noch eine Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf vorhanden ist. Sinkt die Druckdifferenz auf Null, kann an dieser Stelle keine Wärme mehr entnommen werden und der Anschlusspunkt bleibt unversorgt. Die Netzpumpen



Abbildung 3.13: Verlegung einer Fernwärmeleitung (vgl. Konstantin 2007, S. 371).

überwinden also den Druckverlust im Leitungssystem, der durch den Strömungswiderstand entsteht.

Die Aufgabe der Druckhaltenlage ist es, im gesamten Rohrverbund einen Mindestsystemdruck zu halten. Dieser Druck ist entscheidend, damit an keiner Stelle des Netzes ein Verdampfen des Netzwassers auftritt. Vor allem geodätische Höhenunterschiede im Netz müssen durch Anpassen des Systemdruckes so ausgeglichen werden, dass auch an der höchsten Stelle im Netz der Dampfdruck nicht unterschritten wird.

Übergabestation

An der Übergabestation wird die Wärmemenge vom Netz in das Objekt des Wärmekunden übergeben. Zu diesem Zweck befindet sich darin auch ein Wärmemengenzähler, um die abgenommene Energiemenge bestimmen und abrechnen zu können.

„Die Hausübergabestation [...] ist das Bindeglied zwischen dem Fernwärmenetz und dem Heizungsnetz der Hausanlage. Sie umfasst die Anschlüsse zum Fernwärmenetz und dem Hausnetz, Absperrarmaturen, Wärmemengenzähler, Wassermengenbegrenzer und Sicherheitsorgane.“ (Konstantin 2007).

Es wird zwischen direkten und indirekten Übergabestationen unterschieden, wobei bei der direkten Hausübergabe das Hausnetz hydraulisch nicht vom Fernwärmenetz getrennt ist. Bei indirekten Übergabestationen wird die Energie über einen Wärmetauscher vom Hauptnetz in das Heizungsnetz des Hauses übertragen. Bevorzugt wird der indirekte Anschluss verwendet, da hier kein zusätzliches Leckagerisiko für das Fernwärmenetz, durch die Leitungen im Haus, besteht. In Abbildung 3.14 ist eine indirekte Übergabestation abgebildet.

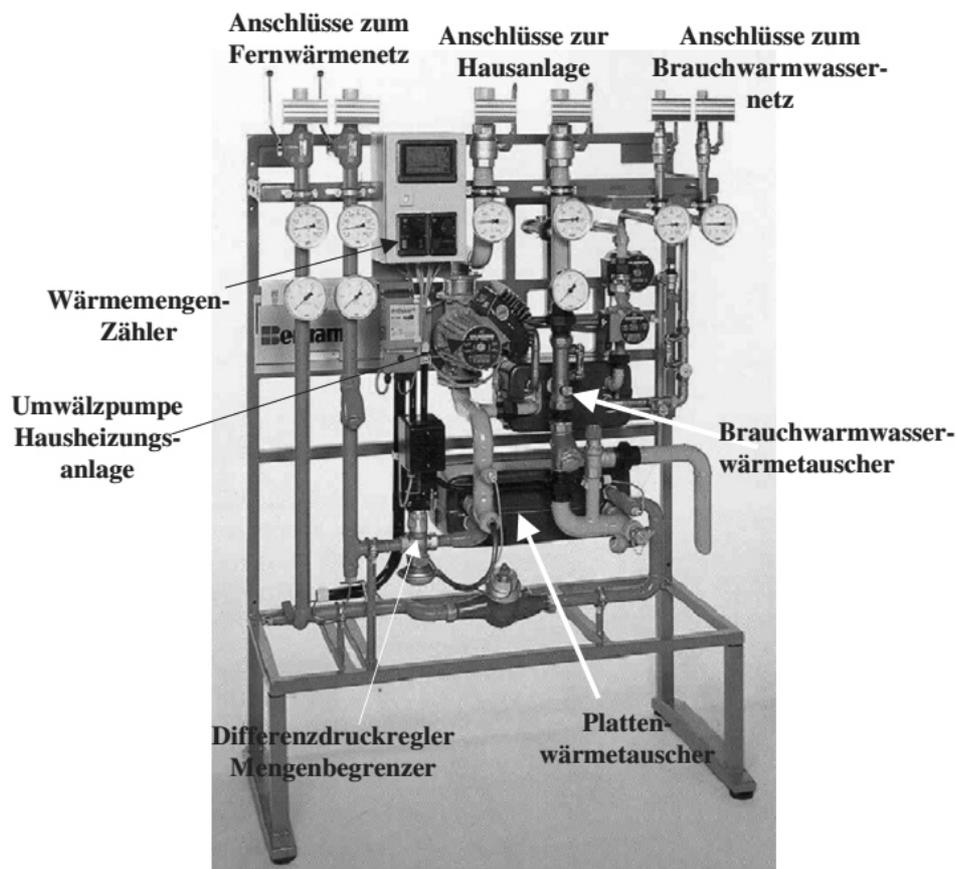


Abbildung 3.14: Vorgefertigte indirekte Hausübergabestation (Konstantin 2007, S. 376).

Diese enthält neben den bereits beschriebenen Komponenten zusätzlich einen Plattenwärmetauscher für die Brauchwasserbereitung, einen Differenzdruckregler mit Mengenbegrenzer, der die Wassermenge aus dem Fernwärmenetz über den Plattenwärmetauscher regelt, sowie die Umwälzpumpe für den Heizkreislauf des Hauses. Die dargestellte Übergabestation ersetzt somit alle Funktionen einer Heizungsanlage eines Wohnhauses.

Erzeugungsanlage

Die Erzeugungsanlage eines Wärmenetzes muss die im Netz verbrauchte Wärmeleistung zu jeder Zeit erbringen, um die Versorgung der Abnehmer zu gewährleisten. Üblicherweise befinden sich auch Pumpstation und Druckhalteanlage am gleichen Standort wie die Erzeugungsanlage.

Sie kann aus vielen verschiedenen Wärmeerzeugern und/oder Abwärmequellen bestehen. Kleine Heizwerke, wie etwa die untersuchte Anlage in Köstendorf, verwenden häufig eine Kombination aus einem Biomassekessel für die Grundlastabdeckung und einem fossil befeuerten Spitzenlastkessel. Die Grundlast ist dabei jene Last, die einen Großteil des Jahres ausreicht, um das gesamte Netz zu versorgen. In Spitzenzeiten an Wintertagen ist jedoch ein zweiter Erzeuger notwendig, um die zusätzlich erforderliche Leistung abzudecken. In Abbildung 3.15 ist eine solche Aufteilung beispielhaft dargestellt.

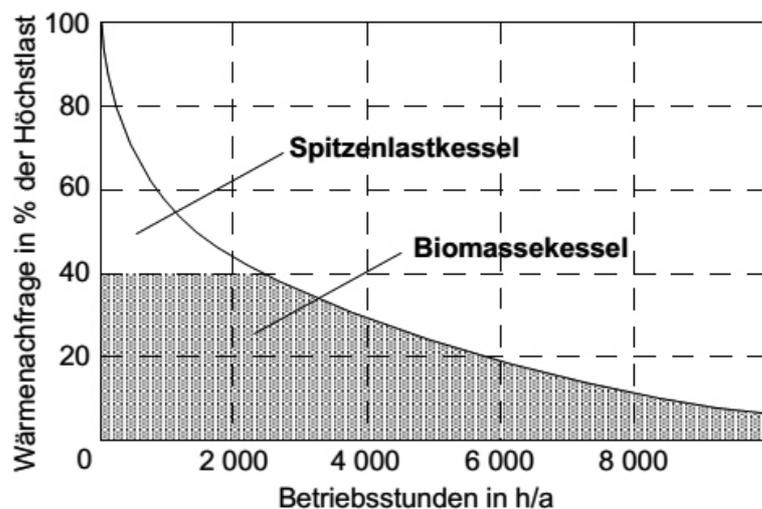


Abbildung 3.15: Beispiel einer Jahresdauerlinie eines ganzjährig betriebenen Fernwärmenetzes sowie mögliche Einsatzweise eines Biomassekessels (Kaltschmitt und Streicher 2009, S. 384).

Die gezeichnete Jahresdauerlinie wird erzeugt, indem die Netzleistungen eines ganzen Jahres der Höhe nach sortiert über den Jahresstunden aufgetragen werden. Sie ist charakterisiert durch den steilen Abfall links im Bild und den stetig sinkenden Verlauf. Die Jahresdauerlinie zeigt, in wie vielen Stunden im Jahr, welche Wärmemenge abgenommen wird. Es ist die auch die Differenz zwischen Minimal- und Maximalleistung der Wärmeabnahme erkennbar. Wie in der Grafik ersichtlich, kann der Biomassekessel mit einer Nennleistung von lediglich 40% der maximalen Netzleistung einen Großteil der gesamten erforderlichen Wärmemenge bereitstellen, diese entspricht der Fläche unter der Kurve.

Jahreszeitliche sehr starke Leistungsunterschiede und die Leistungsunterschiede eines Tages stellen große Herausforderungen an die Erzeugeranlage. Außerdem wirken sich starke Lastwechsel, die beispielsweise durch die gleichzeitige automatische Umschaltung vieler Hausanlagen von Nachtabsenkung in den Heizungsbetrieb verursacht werden, negativ auf die Erzeugeranlage aus. Hier kann mit intelligenten Regelkonzepten und dem Einsatz von Pufferspeichern eine wesentliche Verbesserung erreicht werden.

3.3.2 Entwicklung und Ausblick

Fernwärmenetze gibt es seit Ende des 19. Jahrhunderts und haben sich seither stetig weiterentwickelt. Wurden zu Beginn noch Dampfnetze und Hochtemperaturheizkörper eingesetzt, wird es in Zukunft immer mehr Niedertemperaturnetze mit Flächenheizsystemen geben. So beschreibt das Paper „4th Generation District Heating“ die bisherige Entwicklung der Fernwärmesysteme in drei Generationen und gibt in der vierten Generation einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen, (vgl. Lund u. a. 2014, S. 1-5). In Tabelle 3.2 ist diese Entwicklung der Fernwärmesysteme detailliert dargestellt.

Hauptziel dieser Entwicklungen ist dabei stets die Steigerung der Energieeffizienz. In den letzten Jahrzehnten spielt jedoch auch verstärkt die Reduktion von Treibhausgas- und anderen schädlichen Emissionen eine immer größere Rolle. Das Ziel einer europa- und weltweit nachhaltigen Energieversorgung ist spätestens seit dem Pariser Klimaabkommen klar vorgegeben, der Weg dorthin jedoch noch nicht. Neben den bisherigen Vorschlägen zur nachhaltigen Energieversorgung Europas wird in „Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system“ ein Alternativszenario mit verstärktem Einsatz von Fernwärme vorgeschlagen:

„The results indicate that with district heating, the EU energy system will be able to achieve the same reductions in primary energy supply and carbon dioxide emissions as the existing alternatives proposed. However, with district heating these goals can be achieved at a lower cost, with heating and cooling costs reduced by approximately 15%.“ (Conolly u. a. 2014, S. 1).

Hier zeigt sich, wie viel Potential im Ausbau und der Optimierung von Fernwärmesystemen steckt. Auch in dem Paper „4th Generation District Heating“ kommt dem Einsatz von Wärme- und Kältenetzen eine bedeutende Rolle zu,

	1st Generation	2nd Generation	3rd Generation	4th Generation
Label	Steam	In situ	Prefabricated	4GDH
Period of best available technology	1880-1930	1930-1980	1980-2020	2020-2050
Heat carrier	Steam	Pressurised hot water mostly over 100°C	Pressurised hot water often below 100°C	Low-temperature water 30-70°C
Pipes	In situ insulated steel pipes	In situ insulated steel pipes	Pre-insulated steel pipes	Pre-insulated flexible (possible twin) pipes
Circulation systems	Steam pressure	Central pumps	Central pumps	Central and decentralised pumps
Substations heat exchanger	No	Tube-and-shell heat exchangers	Without or with plate heat exchangers	Probably mostly with plate heat exchangers Introduction of flat-stations (decentralised supply of hot water in new buildings)
Buildings	Apartment and service sector buildings in the city	Apartment and service sector buildings 200-300 kWh/m ²	Apartment and service sector buildings (and some single-family houses) 100-200 kWh/m ²	New buildings: <25 kWh/m ² Existing buildings: 50 - 150 kWh/m ²
Metering	Condensate meters in order to measure the amount of steam used.	Initially only flow meters in substations, later replaced by heat meters. Annual or monthly readings. Sometimes use of allocation meters on radiators for internal distribution of heat costs.	Heat meters and sometimes additional metering of flow in order to compensate for high return temperatures.	Wireless readings introduced for more frequent readings. As earlier but continuous reading used for continuous commissioning of customer heating system.
Radiators	High-temperature radiators (+90 °C) using steam or water.	High-temperature radiator (90 °C) using district heating water directly or indirectly.	Medium-temperature radiators (70 °C) using district heating water directly or indirectly. Floor heating	Floor heating. Low-temperature radiators (50 °C). Indirect system.
Hot water	Hot water tanks heated directly with steam or from a secondary water circuit.	DHW tank heated to 60 °C. Circulation at 55 °C when needed.	Heat exchanger heating DHW to 50 °C. Domestic hot tank heated to 60 °C. Circulation at 55 °C when needed.	Very efficient local heat exchanger heating DHW to 50-40 °C. In district heating systems with supply temperature of 30 °C, a heat exchanger preheats DHW and a heat pump with buffer tank and heat exchanger increases DHW temperature to 40 °C by cooling down the return temperature.

Tabelle 3.2: Vergleich 4 Generationen von Fernwärmesystemen - Distribution and demand (Lund u. a. 2014, S. 5).

wobei vor allem die Weiterentwicklung der Netze im Fokus steht:

„The basic assumption is that district heating and cooling has an important role to play in future sustainable energy systems - including 100 percent renewable energy systems - but the present generation of district heating and cooling technologies will have to be developed further into a new generation in order to play such a role.“ (Lund u. a. 2014, S. 1).

Als sinnvolle und notwendige Weiterentwicklungen werden hier vor allem der Einsatz von saisonalen und kurzzeitigen Energiespeichern in Netzen und die Verknüpfung der verschiedenen Energieverteilungsnetze, sei es Strom, Gas oder Wärme gefordert.

Der Einsatz eines Pufferspeichers, sowie die Verbindung von Strom- und Wärmenetz spielen auch in dem vorliegenden Optimierungsprojekt eine wichtige Rolle. Dieses Projekt kann somit als Schritt in Richtung eines Fernwärmenetzes der vierten Generation gesehen werden.

Kapitel 4

Ausgangssituation

Um den Ausgangszustand der Anlage vor Projektbeginn zu erheben, wurde im Jahr 2016 eine Voruntersuchung mit dem Titel „Energiecheck Köstendorf“ durchgeführt, (vgl. Ohnmacht 2016).

„Ziel dieser Untersuchung ist die Erhebung des energetischen Optimierungspotentials der Bioenergie-Nahwärmeversorgung in Köstendorf. Weitere Ziele sind das Auffinden und Quantifizieren von Verbesserungsmöglichkeiten, im Speziellen bezüglich der Netz- und Kesselregelung, sowie die energetische vergleichende Bewertung von Alternativszenarios für den Sommer- und Übergangsbetrieb (Power2heat mit zentraler Wärmepumpe und Pufferspeicher).“ (Ohnmacht 2016, S. 3).

Der nachfolgend dargestellte Ausgangszustand basiert zum Teil auf dieser Voruntersuchung und wurde für die vorliegende Arbeit entsprechend ergänzt und erweitert. Es werden sowohl die Erzeuger- als auch die Verbraucherseite betrachtet und deren Betriebsverhalten beschrieben. Aus diesen werden unterschiedliche Lastfälle abgeleitet, welche die jahreszeitlichen Witterungsunterschiede berücksichtigen und eine Abgrenzung der verschiedenen Betriebsweisen und Zustände ermöglichen.

Weiters sind in diesem Kapitel ungünstige Betriebsfälle aufgezeigt und Potentiale, die sich daraus ableiten lassen, qualitativ bewertet.

4.1 Beschreibung der Anlage

Das Heizwerk Köstendorf besteht aus einem 700kW Biomassekessel und einem ölbefeuerten Spitzenlastkessel mit einer Nennleistung von 1MW. Versorgt wird ein Fernwärmenetz mit insgesamt zwölf Abnehmern, darunter öffentliche Gebäude und Gebäude wie etwa Schulen, Gemeindeamt oder das Sportheim.

Nachfolgend werden die Erzeuger einzeln beschrieben und das Fernwärmenetz genauer dargestellt.

4.1.1 Biomassekessel

Der Biomassekessel dient zur Grundlastversorgung und liefert übers Jahr gesehen die meiste Wärmemenge ins Netz. Er ist so groß dimensioniert, dass auch im Winter fast die gesamte Wärmeabnahme damit abgedeckt werden kann. Nur bei Ausfällen oder kurzfristigen hohen Leistungsspitzen wird der Spitzenlastkessel aktiviert. Bei dem eingesetzten Biomassekessel handelt es sich um eine Vorschubrostfeuerung der Firma Agro Forst & Energietechnik GmbH, wie in Abbildung 4.1 dargestellt. Der Ablauf der Verbrennung ist in Kapitel 3.1 detailliert erläutert.

Die Feuerung besteht aus einem Vorschubrost mit hydraulischem Materialein Schub. Die Feuerbox ist schamottiert ausgeführt und wird als wärmeisoliert betrachtet, darin werden die Verbrennungsgase durch ein Gewölbe einmal umgelenkt, wie man in der Schnittdarstellung in Abbildung 4.2 erkennen kann.

Die Wärmeübertragung erfolgt im darauf liegenden Warmwasser-Rauchrohrkessel mit zwei Zügen. Verbrennungsluft wird über zwei Gebläse eingebracht. Die Primärluft wird vollständig unter dem Rost eingebracht, die Sekundärluft oberhalb des Rostes über Düsen in der Schamottierung im Bereich der Umlenkung (in Abbildung 4.2 blau markiert). Da beim Biomassekessel keine Rauchgasrezirkulation vorgesehen wurde, muss auch die Feuerraumkühlung über Luft aus Primär- und Sekundärzone erfolgen. Die gesamte Verbrennungsluft wird über einen sogenannten Abgasventilator durch alle Gewerke in den Kamin gefördert, wobei die gesamte Anlage bis unmittelbar vor dem Kamin im Unterdruck betrieben wird. Auf dem Typenschild sind die technischen Daten wie in Tabelle 4.1 dargestellt.

Die angegebene Nennwärmeleistung von 700kW reicht in den meisten Fällen aus, um das Netz auch an kalten Wintertagen mit hoher Abnahme vollständig zu versorgen. Jedoch ergibt sich daraus auch eine Mindestleistung für den Kessel für einen emissionsgerechten Betrieb, welche in etwa ein Drittel bis ein Viertel der



Abbildung 4.1: Biomassekessel (Ohnmacht 2016, S. 5).

Nennleistung, also ca. 200kW, beträgt. Diese Mindestleistung wird im angeschlossenen Netz in Köstendorf oft unterschritten, wie in Kapitel 4.2 beschrieben ist. Ist dies der Fall, so wird die eingestellte Vorlauftemperatur überschritten und es kommt zur Gebläseabschaltung der Primärluft, dem sogenannten Gluterhaltungsbetrieb, mit verminderter Materialeinbringung. Im Gluterhaltungsbetrieb kühlt der Feuerraum ab, dadurch kommt es zu unvollständiger Verbrennung und erhöhten CO - Emissionen, vergleiche dazu Kapitel 3.1. Diese Betriebsart zeichnet sich weiters durch einen schlechten Wirkungsgrad aus. Außerdem führen häufige Wechsel zwischen Last- und Gluterhaltungsbetrieb zu starken Temperaturschwankungen und somit zu erhöhten Rost- und Feuerraumbelastungen und Beeinträchtigung der vorgesehenen Lebensdauer.

In Bezug auf den Biomassekessel liegt das Hauptaugenmerk der Optimierung somit darin, Betriebszeiten mit geringer Last und damit auch Gluterhaltungsbe-



Abbildung 4.2: Querschnitt einer Flachschrubrostfeuerung (Viessmann 2018).

trieb gezielt zu vermeiden. Dies vermindert unerwünschte Emissionen und erhöht die Effizienz der Verbrennung bzw. des Kessels.

4.1.2 Spitzenlastkessel

Der Spitzenlastkessel wird zur Abdeckung von Lastspitzen oder als Ausfallreserve für den Biomassekessel eingesetzt. Als Spitzenlastkessel wird im Heizwerk Köstendorf ein ölbefuerter Warmwasserkessel der Fa. Hoval eingesetzt. In Abbildung 4.3 ist der Kessel mit angeflanschem Brennermodul ersichtlich.

Der Ölkessel hat eine Nennleistung von 1MW, jedoch kann er vor Ort auf Teillastbetrieb geschaltet werden, wodurch sich die Leistung auf 400kW reduziert. Er kann elektronisch automatisiert gestartet werden, eine eigene Steuerung übernimmt bei Aktivierung die Regelung des Ölkessels. Somit muss eine bestehende Unterversorgung des Fernwärmenetzes oder eine andere Implikation zum Start

Kesseltype	USTK 700.32
Baujahr	2001
Kessel Nennwärmeleistung	700kW
Zul. Sicherheitstemp. max.	110°C
Zul. Vorlauftemp. max.	99°C
Zul. Rücklauftemp. min.	85°C
Zul. Betriebsdruck	3.5bar
Kaltwasser - Prüfdruck	5.3bar
Wasserinhalt	1900 l
Brennstoff	Holz naturbelassen

Tabelle 4.1: Technische Daten Biomassekessel, (vgl. Ohnmacht 2016, S. 5).

des Spitzenlastkessels automatisch erkannt werden, damit der Kessel bei Bedarf auch angefordert wird. Da das Fernwärmenetz im Winter fast immer durch den Biomassekessel alleine versorgt werden kann, fallen die meisten Betriebszeiten des Spitzenlastkessels in die Jahreszeiten mit geringer Abnahmeleistung. Wenn die Mindestleistung des Biomassekessels bereits höher liegt als die Abnahmeleistung des Fernwärmenetzes, wird dieser abgestellt. Mehrmals am Tag wird dann der Spitzenlastkessel im Teillastbetrieb gestartet und versorgt die Abnehmer bei Bedarf. Diese als Übergangszeiten bezeichnete Perioden des Jahres sind in Kapitel 4.2 genauer beschrieben.

Ziel des Optimierungsprojektes ist es, die Betriebszeiten des Spitzenlastkessels zu minimieren oder den zuvor beschriebenen Fall gänzlich zu vermeiden. Dies verringert den Einsatz fossiler Brennstoffe und somit die Emission klimawirksamer Treibhausgase. Außerdem bringt es, aufgrund der höheren Brennstoffkosten des Brennstoffes Heizöl extraleicht, monetäre Einsparungen im Betrieb.

4.1.3 Fernwärmenetz

Das Fernwärmenetz in der Gemeinde Köstendorf besteht aus vier Hauptnetzsträngen. Insgesamt sind zwölf Abnehmer angeschlossen, wie in Abbildung 4.4 dargestellt. Mit der Nummer eins ist im Plan zusätzlich das Heizhaus verzeichnet.

Derzeit wird das Fernwärmenetz nicht durchgehend betrieben, da in den Sommermonaten durch die sehr geringe Abnahme der Betrieb nicht wirtschaftlich wäre. In Zeiten von Netzausschaltungen wird die Warmwasserbereitung für die Wärmeabnehmer dezentral elektrisch bereitgestellt, das heißt durch elektrische Heizstäbe in den lokalen Warmwasserboiler in den einzelnen Objekten. Betracht-



Abbildung 4.3: Spitzenlastkessel mit Brenner (eigene Aufnahme)

tet man die Abnahmedaten des Fernwärmenetzes übers Jahr, so sind die großen Verbrauchsunterschiede gut erkennbar, wie in Abbildung 4.5 dargestellt. Aufgetragen sind hier die Energieverbräuche nach Abnehmer und Monat in gestapelten Säulen. Zusätzlich sind die produzierten Wärmemengen nach Erzeuger als Linien dargestellt.

Betrachtet man die Daten eingehend, so wird erkennbar, dass kein Wärmeerzeuger das ganze Jahr über betrieben wird. Es zeigen sich Perioden mit alleiniger Biomassenutzung (E_BMK) und andere mit elektrischer Warmwasserbereitung (WW) als einziger Wärmequelle. Zudem gibt es Zeiten mit erhöhtem Spitzenlastanteil (E_SLK). Im folgenden Kapitel 4.2 werden daher die verschiedenen Lastbereiche des Jahres genauer untersucht, mit dem Ziel, eine sinnvolle Einteil-

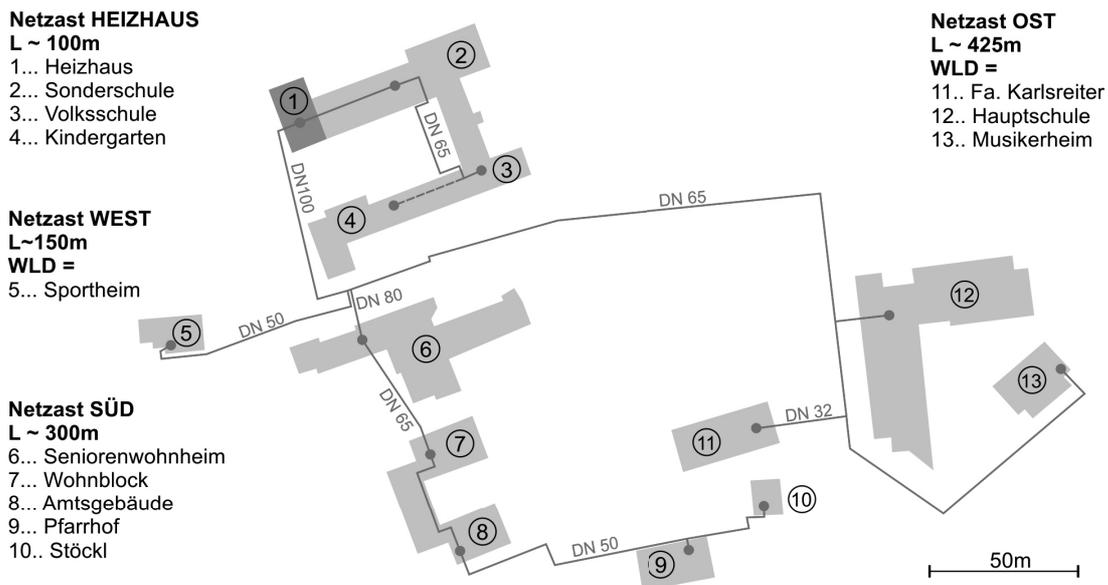


Abbildung 4.4: Maßstäbliche Darstellung des Fernwärmenetzes (Ohnmacht 2016, S. 7).

lung der Betriebszustände vornehmen zu können.

4.2 Untersuchung der Betriebszustände

Dazu wird noch einmal detailliert die erbrachte Energiemenge auf die verschiedenen Erzeuger aufgeteilt betrachtet, wie in Abbildung 4.6 ersichtlich ist. Aufgetragen sind die mittleren monatlichen Leistungen für Biomassekessel (grün), Ölkessel (rot) und elektrische Wärmeerzeugung (weiß), wobei hier nur der Stromverbrauch der dezentralen Heizregister eingerechnet ist, ohne Hilfsenergie für Pumpen, Antriebe etc. zu berücksichtigen. Die rechte Achse stellt die mittlere monatliche Leistung ins Verhältnis zur Nennleistung des Biomassekessels. Interessant ist, dass selbst im kältesten Monat Dezember der Biomassekessel im Monatsmittel nur knapp 50% seiner Nennleistung erbringt. Dies liegt an den starken tageszeitlichen Unterschieden in der Erzeugung, die in Abbildung 4.7 dargestellt sind.

Übers Jahr zeigen sich deutlich drei verschiedene Bereiche. Bereich (1) zeichnet sich durch die höchste Gesamtleistung aus, welche fast ausschließlich vom Biomassekessel erbracht wird. Bereich (2) mit der niedrigsten Leistung, die vollständig bei den einzelnen Wärmeabnehmern elektrisch erzeugt wird. Und schließlich Bereich (3), welcher durch mittlere Gesamtleistung und den Betrieb aller Wärmeerzeuger charakterisiert ist. Aus diesem Grund wird das Jahr hinsichtlich des

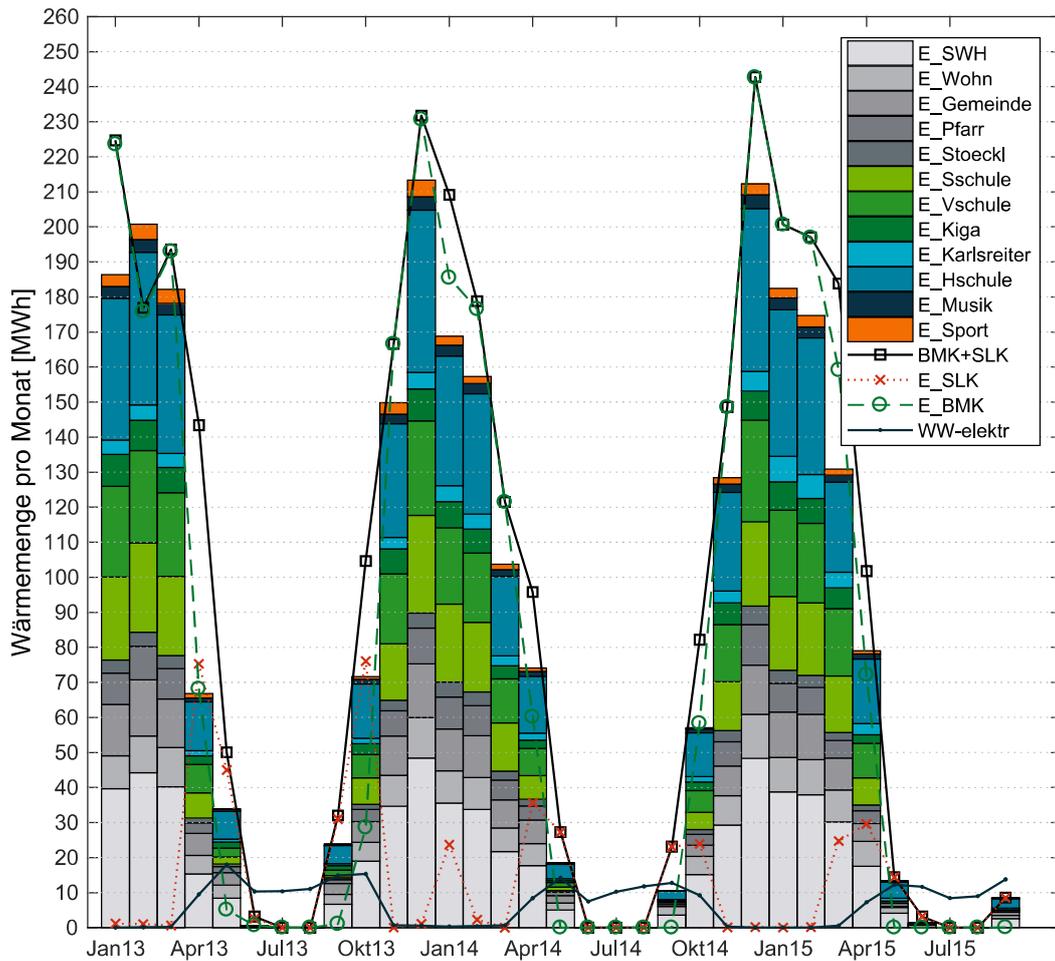


Abbildung 4.5: Wärmeverbrauch und Wärmegestehung nach Monaten
(Ohnmacht 2016, S. 8).

Wärmebedarfes in drei Lastklassen eingeteilt. Die höchste Lastklasse (1) ist dabei der nachfolgend als „Winterbetrieb“ bezeichnete Zeitraum, welcher die kältesten Monate November bis März umfasst und primär durch Biomassebetrieb gekennzeichnet ist. Die Lastklasse für die wärmste Jahreszeit, mit elektrischer Wärme-
produktion, wird „Sommerbetrieb“ (2) genannt und gilt für den Zeitraum von Juni bis August. Die Zeiträume zwischen Sommer- und Winterbetrieb werden als „Übergangszeit“ (3) bezeichnet. Diese umfasst somit typischerweise die Monate April, Mai, sowie September und Oktober. Im Rahmen der Analyse zeigen sich in jeder Lastklasse spezifische Schwierigkeiten bei der Wärmeversorgung. In der Folge werden diese Gegebenheiten beschrieben und die vorhandenen Potentiale, die durch Optimierungsmaßnahmen ausgeschöpft werden können, qualitativ bewertet.

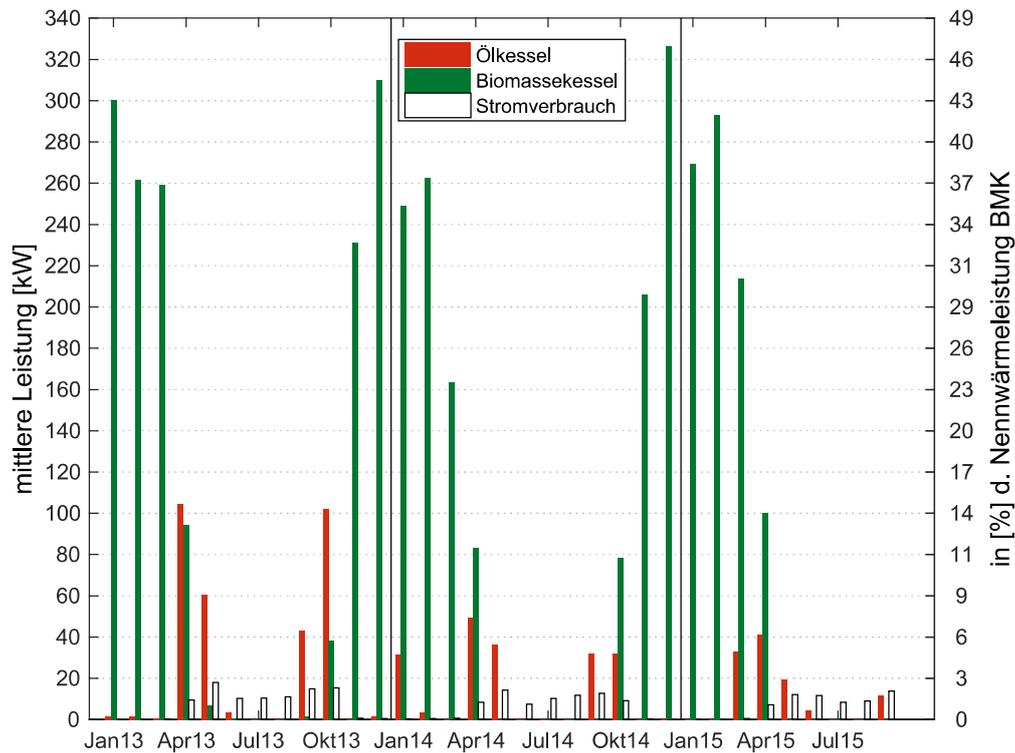


Abbildung 4.6: Wärmemenge nach Wärmeerzeuger (Ohnmacht 2016, S. 9).

4.2.1 Winterbetrieb

Der Winterbetrieb zeichnet sich durch hohe Leistungen im Fernwärmenetz aus, die fast zur Gänze durch den Biomassekessel abgedeckt werden können. Auch wenn die mittlere Leistung des Biomassekessels im verbrauchsstärksten Monat Dezember bei etwa 300kW liegt und damit niedriger als 50% seiner Nennleistung ist, gibt es meist am Morgen eine Leistungsspitze, die den Kessel an seine Leistungsgrenze bringt. Ein Merkmal eines typischen Wintertages sind die starken Lastschwankungen über den Tag mit hoher Leistung am Morgen und niedriger Abnahme während der Nacht. Ein typischer Tagesverlauf der Biomassekesselleistung ist in Abbildung 4.7 gezeigt.

Einzelne Leistungsspitzen, wie sie speziell am Morgen auftreten können, führen zu teilweisem Einsatz des Spitzenlastkessels, wenn der Biomassekessel das Netz nicht mehr vollständig versorgen kann. Gelangt der Biomassekessel an seine untere Leistungsgrenze, besteht die Gefahr von erhöhten Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) durch Schwachlastbetrieb und den damit verbundenen niedrigen Temperaturen in der Brennkammer bzw. Gluterhaltungsbetrieb.

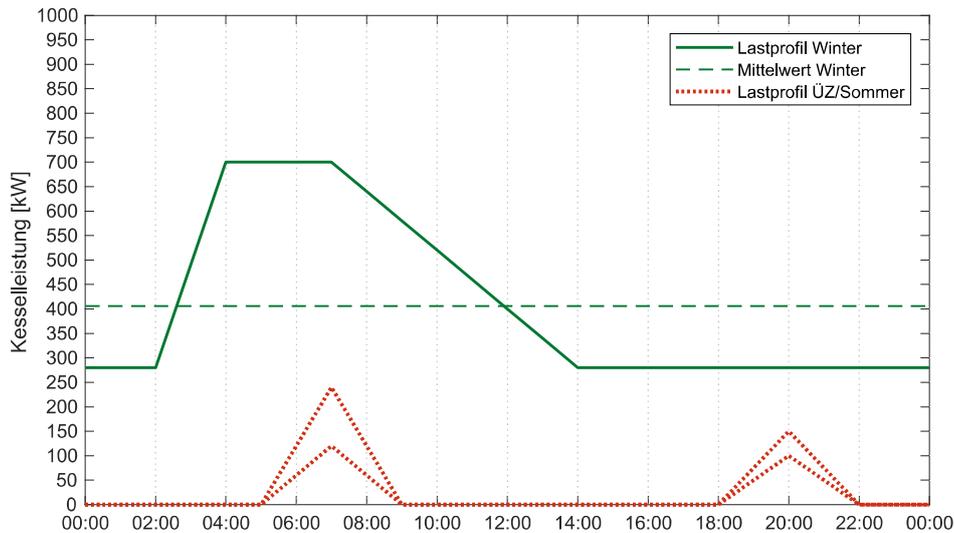


Abbildung 4.7: Lastprofil eines Tages (Ohnmacht 2016, S. 9).

Der Einbau eines Pufferspeichers entkoppelt die Netzleistung und die Erzeugerleistung. Im Winterbetrieb könnten dadurch sowohl Leistungsspitzen als auch kurze Schwachlastzeiten abgepuffert und deren negative Auswirkungen auf den Kessel und die Umwelt vermieden werden. Dies würde vor allem Öleinsatz und CO-Emissionen vermindern.

4.2.2 Sommerbetrieb

Während der Sommermonate ist die Abnahme im Netz gering. Die Objekte werden in dieser Zeit nicht beheizt, Wärmeenergie wird nur zur Beheizung von Brauchwasser benötigt. Aufgrund dieser niedrigen Abnahme wird das Fernwärmenetz abgeschaltet und die Verbraucher im Netz dezentral über Stromheizungen mit Wärme versorgt. Dies führt zu einem sehr hohen Stromverbrauch in dieser Zeit und ist daher ökologisch wie auch wirtschaftlich negativ zu bewerten, da Strom ein energetisch hochwertiger Energieträger ist, welcher zum Teil aus fossilen Quellen unter hohen Verlusten und in Verbindung mit klimaschädlichen Emissionen erzeugt werden muss. Hier könnte ein zusätzlicher Wärmeerzeuger, etwa eine Wärmepumpe, eingesetzt werden, um die Wärme zentral zu erzeugen und über das Fernwärmenetz zu verteilen. Eine Wärmepumpe kann auch mehrmals pro Tag problemlos ein- und ausgeschaltet werden, was bei einem mit Schamotte ausgemauerten Biomassekessel nicht möglich ist. Somit könnte durch den Einsatz einer Wärmepumpe die benötigte elektrische Energie deutlich redu-

ziert werden.

4.2.3 Übergangsbetrieb

Die Übergangszeit stellt für den Betrieb des Fernwärmenetzes die schwierigste Jahreszeit dar, da die Leistung infolge der Außentemperatur stark schwankt und zwar deutlich höher liegt als im Sommer, jedoch für den Betrieb des Biomassekessels immer noch zu gering ist.

„In der Übergangszeit, wenn das Tagesleistungsmittel unter 100 - 200 kW fällt [...], erreicht der Biomassekessel in den lastschwachen Stunden mit 15-20% seiner Nennlast die untere Leistungsgrenze. Ein Absinken der Abgastemperatur führt in weiterer Folge zu einer Betriebsstörung und der Zuschaltung des Ölkessels. In weiterer Folge wird der Biomassekessel deaktiviert und der morgendliche und tlw.[Anm.: teilweise] abendliche Wärmebedarf wird manuell mit dem Ölkessel bereitgestellt.“ (Ohnmacht 2016, S. 10).

Hier sind große Potentiale für eine Optimierung vorhanden. Ein kleinerer Wärmeerzeuger könnte die Abnahme im Netz versorgen, über einen Pufferspeicher könnten zusätzlich die Netzschwankungen abgedeckt werden. Erreicht wäre damit eine Einsparung von Öl, Strom und Biomasse, sowie eine Reduktion der Emissionen des Biomassekessels, welche in der Schwachlast verstärkt auftreten.

Insgesamt zeigen sich in allen Betriebszeiten deutliche Verbesserungsmöglichkeiten, die durch den Einbau eines Pufferspeichers und den gezielten Einsatz von Wärmepumpen erreicht werden sollen. Neben wirtschaftlichen Einsparungen kann vor allem der Einsatz fossiler Brennstoffe verringert und die Emission von Treibhausgasen deutlich reduziert werden.

Kapitel 5

Projektumsetzung

Ziel der Umsetzung ist es, die in Kapitel 4 beschriebenen Verbesserungsmöglichkeiten zu verwirklichen. Das sind die Einsparung von Öl, Strom und Biomasse, sowie die Reduktion von klimaschädlichen Abgasen und Emissionen aus der Verbrennung. Außerdem soll für den Betrieb der Wärmepumpenanlage der Zustand im lokalen Stromnetz berücksichtigt werden.

Die Umsetzung des Gesamtprojektes wird in drei Teilen durchgeführt. Zuerst erfolgt der Einbau der neuen Komponenten (Wärmepumpen, Pufferspeicher) und des damit notwendigen Umbaus des Hydrauliksystems, dann werden die neu eingebauten Komponenten automatisierungstechnisch eingebunden und zuletzt ein übergeordnetes Regelsystem installiert.

Um eine Entkopplung von Wärmeerzeugung und Wärmeabnahme zu erreichen, wird ein Pufferspeicher in das hydraulische System eingebunden. Der Pufferspeicher verhindert eine Übertragung von Leistungsschwingungen im Netz auf die Erzeuger und bietet außerdem eine Energiereserve, um Netzspitzen abzupuffern bzw. Überschussenergie zwischenzuspeichern. Zusätzlich wird eine Wärmepumpe eingesetzt, die im Sommerbetrieb und im Übergangsbetrieb, das heißt in Zeiten geringer Abnahme, die Wärmeversorgung für das Netz übernehmen und damit Strom- und Öleinsatz verringern soll. Eine Besonderheit ist, dass der Betrieb der Wärmepumpe nicht rein wärmegeführt erfolgt, sondern die Situation im örtlichen Stromnetz berücksichtigt wird. Gibt es Überschussstrom durch die in Köstendorf installierten Photovoltaikanlagen im Netz, soll dieser Strom genutzt werden, um in der Wärmepumpe effizient Wärme zu “pumpen“ (Power-to-Heat). Im gegenteiligen Fall, bei Abnahmespitzen im Stromnetz, wird der Betrieb der Wärmepumpe gesperrt und so das lokale Stromnetz entlastet.

Diese Überlegungen münden in ein regelungstechnisches Gesamtkonzept, dass, je

nach Jahreszeit, die Wärmeerzeuger Biomassekessel, Wärmepumpe und Ölkessel bestmöglich einsetzt, um die im Wärmenetz benötigte Leistung bereitzustellen. Als zentrale Steuereinheit und Kommunikationsschnittstelle wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) eingesetzt. Alle wichtigen Informationen aus dem Erzeugerverbund und dem Wärmenetz werden hier gesammelt und ausgewertet. Außerdem wird die Logik für die Leistungsverteilung und -regelung darauf programmiert und wieder an die Wärmeerzeuger verteilt.

Der Hydraulikumbau und die Automatisierung der Komponenten sind wichtige Bestandteile des Projektes. Diese werden von Projektpartnern und daher außerhalb der vorliegenden Arbeit umgesetzt. Deren tiefgehendes Verständnis ist allerdings erforderlich, um eine Regelstrategie für das Gesamtsystem erfolgreich implementieren zu können. Daher werden diese Projektbausteine zuerst detailliert beschrieben. Danach wird auf das Konzept und die Programmierung der übergeordneten Regelung eingegangen.

5.1 Hydraulische Umbaumaßnahmen

Das Fernwärmenetz Köstendorf wird im Rahmen der Optimierung hydraulisch umgebaut, um die zusätzlichen Komponenten sinnvoll einbinden zu können. Die Umbaumaßnahmen sind im Hydraulikschema dargestellt, dieses befindet sich in Anhang A. Alle neu eingebundenen Komponenten sind darin hervorgehoben. Der Einbau der Wärmepumpen erfordert zusätzliche Pumpen und Klappen im Wasserkreislauf, um in den Wärmepumpen die nötige Durchströmung sicherzustellen. Weiters kommt ein Dreiwegeventil zum Einsatz, um den Vorlauf der Wärmepumpen entweder in den Pufferspeicher zu leiten oder als Rücklaufanhebung für den Biomassekessel nutzen zu können.

Der Pufferspeicher ersetzt die im alten System vorhandene hydraulische Weiche, und entkoppelt hydraulisch gesehen Erzeuger und Verbraucher.

5.1.1 Biomassekessel

Der bereits vorhandene Biomassekessel bleibt hydraulisch unverändert, jedoch erhält die bestehende Rücklaufanhebung einen neuen Antrieb, welcher über ein Analogsignal angesteuert werden kann und eine Positionsrückmeldung ausgibt. In Abbildung 5.1 ist die Rücklaufanhebung als Ausschnitt aus dem Hydraulikschema dargestellt.

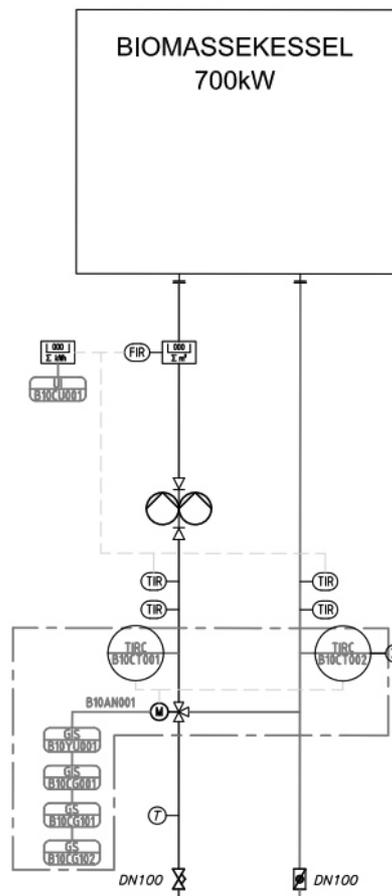


Abbildung 5.1: Beimischung Biomassekessel (Anhang A, Zeichnungsbereich C-E/3-4)

Das Dreiwegeventil ermöglicht es, die Rücklauftemperatur auf die vom Kesselhersteller geforderte Mindesttemperatur von 75°C anzuheben. Außerdem kann durch weitere Anhebung der Rücklauftemperatur die Kesselleistung gedrosselt werden. Dies ist möglich, da die Kesselkreispumpe starr bei konstantem Durchfluss läuft (50Hz) und die Regelung der Feuerung eine einstellbare Vorlauftemperatur als Leistungsvorgabe verwendet und stets versucht, diese Temperatur zu erreichen. So kann über die Anhebung der Rücklauftemperatur mittels Dreiwegeventil die gewünschte Kesselleistung vorgegeben werden. Die erforderliche Rücklauftemperatur ergibt sich aus

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{VL} - T_{RL}) \quad (5.1)$$

zu

$$T_{RL} = T_{VL} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_p}. \quad (5.2)$$

Wobei sich der Massenstrom aus dem Volumenstrom mit

$$\dot{m} = \rho\dot{V} \quad (5.3)$$

errechnen lässt.

5.1.2 Industrierärmepumpe

Insgesamt kommen in diesem Projekt acht Wärmepumpen mit einer Nennleistung von je 25kW zum Einsatz. In den Abbildungen 5.2 und 5.3 sind die acht Wärmepumpen und die dazugehörigen vier Außeneinheiten mit den Verdampfern dargestellt. Es handelt sich um Luft-Wasser-Wärmepumpen, welche über die Außeneinheiten Wärme aus der Außenluft der Umgebung aufnehmen und diese auf höherem Temperaturniveau in den Rücklauf aus dem Fernwärmenetz und/oder dem Pufferspeicher einspeisen.



Abbildung 5.2: Wärmepumpe Inneneinheiten

Es sind jeweils zwei Wärmepumpen in Serie geschaltet sind, sodass die hohe erforderliche Vorlauftemperatur von maximal 80°C in zwei Stufen erreicht wird.



Abbildung 5.3: Wärmepumpe Außeneinheiten

Die kleinste Einheit besteht somit aus zwei in Serie geschalteten Wärmepumpen, welche für sich genommen die benötigte Temperaturspreizung für das Fernwärmenetz erreichen. Da jedoch jeweils vier Wärmepumpen hydraulisch zusammengefasst sind und von einer gemeinsamen Hydraulikpumpe mit Wasser aus dem Heizkreis versorgt werden, können die Wärmepumpen lediglich in zwei Gruppen unterteilt werden. Bei Bedarf müssen deshalb zumindest vier Wärmepumpen gleichzeitig gestartet werden.

Die Betriebsweise der Wärmepumpen unterscheidet sich stark, je nach Wärmeabnahme und somit nach Außentemperatur und Jahreszeit. In den Sommermonaten bei geringer Wärmeabnahme wird die gesamte Wärmeversorgung allein durch die Wärmepumpen sichergestellt. Das Drei-Wege-Ventil ist dabei in Richtung Puf-

ferspeicher und Netzvorlauf (nach unten) gestellt, um mit den Wärmepumpen in das Netz bzw. in den Puffer einspeisen zu können. In Abbildung 5.4 ist der Ausschnitt aus dem Hydraulikschema vergrößert dargestellt.

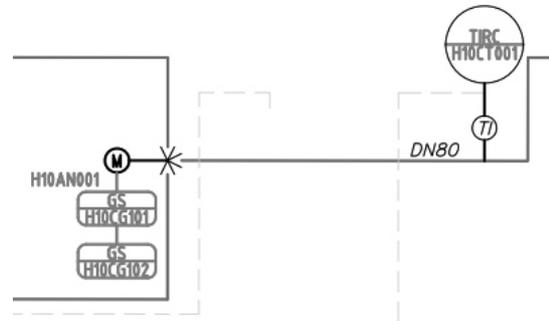


Abbildung 5.4: Drei-Wege-Ventil Wärmepumpen (Anhang A, Zeichnungsbereich A/7)

Dabei ist zu beachten, dass die benötigte Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz von mindestens 70°C eingehalten werden muss. Dies führt zu hohen Wärmeverlusten im Netz, ist jedoch erforderlich, um die dezentralen Warmwasserboiler der Kundenanlagen beladen zu können. Eine weitere Herausforderung ist die hohe solare Einstrahlung zu dieser Zeit, wodurch die Photovoltaikmodule viel elektrischen Strom bereitstellen, welcher möglichst gut für eine wirtschaftlich und ökologisch optimale Wärmeerzeugung genutzt werden soll.

Im Winterbetrieb werden die Wärmepumpen als Unterstützung für den Biomassekessel genutzt. Bei sehr hoher Netzlast im Fernwärmenetz können die Wärmepumpen zugeschaltet werden, um Netzspitzen möglichst ohne Einsatz des Spitzenlastkessels abdecken zu können. Weiters soll auch im Winter bei hoher solarer Einstrahlung der Strom zur Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen genutzt werden. Bei parallelem Betrieb der Wärmepumpen zum Biomassekessel werden die Wärmepumpen zur Rücklaufanhebung für den Biomassekessel eingesetzt, um einen möglichst effizienten Betrieb der Wärmepumpen zu gewährleisten. Das Drei-Wege-Ventil im Hydraulikschema (Abbildung 5.4) ist dann in Richtung Rücklaufanhebung (nach oben) gestellt.

5.1.3 Pufferspeicher

Als Pufferspeicher werden zylindrische Stahlbehälter eingesetzt, welche mit Heizungswasser gefüllt und außen mit einer etwa 15cm dicken Schicht thermisch gedämmt sind, (siehe Abbildung 5.5).



Abbildung 5.5: Pufferspeicher

Die zwei verwendeten Pufferspeicher werden hydraulisch in Serie verschaltet, sodass sie thermodynamisch einem einzelnen Pufferspeicher mit doppelter Höhe entsprechen, (siehe Abbildung 5.6).

Daher wird in dieser Arbeit auf „den“ Pufferspeicher verwiesen und die beiden Pufferspeicher als einer betrachtet. Der Pufferspeicher ersetzt die zuvor vorhandene hydraulische Weiche, um die beiden Hydraulikkreise Fernwärmenetz und Erzeugerkreis zu entkoppeln. Der Erzeugerkreis beinhaltet den Biomassekessel, den ölbefeuerten Spitzenlastkessel und die Wärmepumpen. Das Volumen des Pufferspeichers beträgt in Summe $17,6\text{m}^3$. Die darin speicherbare Energiemenge ist abhängig vom Temperaturunterschied zwischen dem kalten Netzurücklauf und der heißen Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger und errechnet sich aus

$$Q = mc_p(T_{VL} - T_{RL}). \quad (5.4)$$

Neben der hydraulischen Entkopplung übernimmt der Pufferspeicher also eine wesentliche Funktion als Wärmespeicher. Dadurch kann im Sommerbetrieb die Wärmepumpe gezielt zu Zeiten günstiger Betriebsvoraussetzungen betrieben werden, um den Puffer zu beladen. Im Winterbetrieb dient der Puffer maßgeblich dazu, Verbrauchsspitzen im Netz abzufuffern und einen gleichmäßigen Betrieb

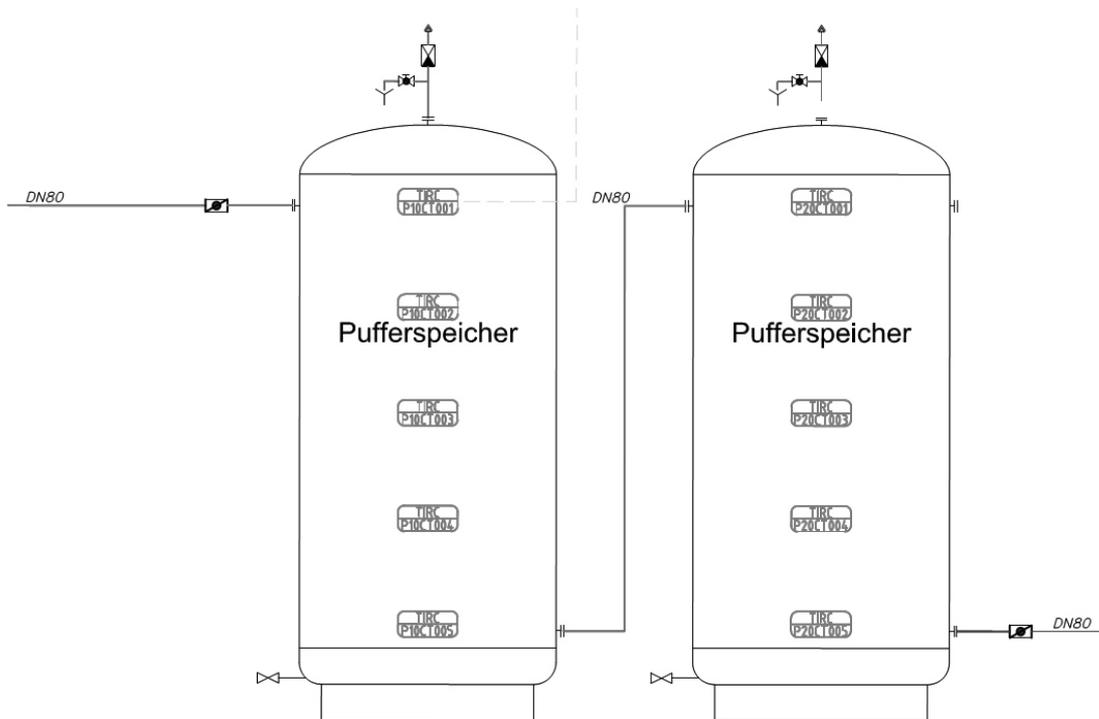


Abbildung 5.6: Einbindung Pufferspeicher (Anhang A, Zeichnungsbereich B-D/5-7)

des Biomassekessels zu ermöglichen. Damit werden sowohl Gluterhaltungszeiten in der Schwachlast, als auch Einsatz des Spitzenlastkessels bei Vollast vermindert.

5.2 Automatisierungstechnische Einbindung

Auch aus automatisierungstechnischer Sicht bietet dieses Projekt einige Herausforderungen, da viele verschiedene Schnittstellen vorhanden sind und neu dazu kommen. Neben der Ansteuerung von Sensorik und Aktorik über Digital- und Analog-, Ein- und Ausgangskarten, werden auch diverse Busschnittstellen und serielle Schnittstellenprotokolle eingesetzt.

Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) vom Typ CX 5120 (Hersteller Beckhoff) kommuniziert mit den neu eingebauten Sensoren und Aktoren. Zusätzlich erfolgt ein Datenaustausch zur Wärmepumpensteuerung, sowie zur SPS der Netzregelung (Siemens). In Tabelle 5.1 ist eine Übersicht über die Kommunikation der regelungstechnisch relevanten Schnittstellen dargestellt.

Name	Erläuterung	Schnittstelle
B10CG001	Stellrückmeldung Dreiwegeventil BMK	AI (Analog IN)
B10CT001	Rücklauf temperaturfühler BMK	AI
B10CT002	Vorlauf temperaturfühler BMK	AI
B10CU001	Wärmemengenzähler BMK	M-BUS
B10YU001	Vorgabe Dreiwegeventil BMK	AO (Analog OUT)
B10CP001	Leistung Einstrahlungssensor	AI
H10CG101, H10CG102	Endlagenschalter Dreiwegeventil WP	DI (Digital IN)
H10CT001	Vorlauf temperaturfühler WP	AI
H10CU001	Wärmemengenzähler WP	M-BUS
H10YG101, H10YG102	Ansteuerung Dreiwegeventil WP	DO (Digital OUT)
N10CT001	Vorlauf temperaturfühler Netz	AI
N10CU001	Wärmemengenzähler Netz	M-BUS
O10CU001	Wärmemengenzähler SLK	M-BUS
P10CT001- P20CT005	Temperaturfühler Pufferspeicher (10 Stk.)	AI
KOM WP	Kommunikationsschnittstelle SPS WP	BAC-NET IP
KOM WP	Kommunikationsschnittstelle SPS Netz	BAC-NET IP

Tabelle 5.1: Übersicht Schnittstellen CX 5120

5.2.1 Sensoren

Um den Anlagenzustand in der SPS erfassen zu können, werden Sensoren eingesetzt, welche über verschiedene Schnittstellen ihre Signale zur Verfügung stellen. Das steuerungstechnische Abbild der Anlage ist also stets nur so gut und detailliert, wie die eingesetzten Sensoren dies darstellen können. In diesem Kapitel werden die verwendeten Sensoren aus Tabelle 5.1 und ihre Messprinzipien erläutert.

Temperatursensoren PT100

Zur Messung der Temperaturen im Pufferspeicher, sowie im Vorlauf und Rücklauf der Wärmepumpe und anderen Temperaturen im Hydraulikkreis werden

Widerstandsthermometer vom Typ PT100 - A eingesetzt. Diese werden an eine Analogeingangskarte der SPS angeschlossen.

Das Messprinzip von Widerstandsthermometern wie dem PT100 beruht darauf, dass sich mit der Temperatur der elektrische Widerstand ändert. Die angelegte Messspannung bewirkt, dass diese Änderung in eine Änderung des Messstromes transformiert wird, welcher von der SPS erfasst wird. Widerstandsthermometer eignen sich zur Messung von Temperaturen bis zu 600°C, (vgl. Endress+Hauser 2018).

Wärmemengenzähler

Um Leistungen und Durchflüsse im hydraulischen System bestimmen zu können, werden Wärmemengenzähler eingesetzt. Im vorliegenden Projekt werden vier Zähler verwendet. Erfasst werden die Daten des Fernwärmenetzes und der drei Wärmeerzeuger Wärmepumpe, Biomassekessel und Spitzenlastkessel. Gemessen werden in den Wärmemengenzählern nur die Temperaturen mittels eingebauten PT100 Messelementen, sowie die auftretenden Volumenströme mittels Ultraschallmessung. Alle weiteren Ausgabewerte werden im geräteinternen Rechenwerk aus den Messgrößen berechnet.

Die Ultraschallmessung beruht auf dem Prinzip des Laufzeit-Differenzverfahrens. Eine Ultraschallwelle breitet sich in Fließrichtung des Mediums schneller aus als in die entgegengesetzte Richtung. Die Sensoren werden auf dem Rohr schräg gegenüber angeordnet und tauschen Ultraschallsignale aus. Sobald das Medium im Rohr zu strömen beginnt, werden die Signale in Flussrichtung schneller, jene gegen die Flussrichtung langsamer übertragen. Die Zeitdifferenz ist proportional zur Fließgeschwindigkeit des Mediums, (vgl. KROHNE 2018).

Der Anschluss der verwendeten Geräte erfolgt über eine M-Bus-Schnittstelle, welche speziell für das Ablesen von Verbrauchsdaten entwickelt wurde:

„The M-Bus (Meter Bus) was developed to fill the need for a system for the networking and remote reading of utility meters, for example to measure the consumption of gas or water in the home. This bus fulfills the special requirements of remotely powered or battery driven systems, including consumer utility meters. When interrogated, the meters deliver the data they have collected to a common master, which can, for example, be a hand-held computer, connected at periodic intervals to read all utility meters of a building. An alternative

method of collecting data centrally is to transmit meter readings via a modem.“ (Zieger 1998).

Die Daten des Zählwerkes müssen also aktiv über den Bus abgefragt werden, was in diesem Fall von der SPS gemacht wird, die als Master in dem System agiert. Die Daten des Wärmemengenzählers stehen damit für die Verwendung im Programm zur Verfügung.

Einstrahlungssensor

Ein Einstrahlungssensor dient zur Erfassung der Intensität der momentan eintreffenden Sonnenstrahlung. Daraus kann auf die produzierte elektrische Leistung aus den örtlich installierten Photovoltaikanlagen geschlossen werden. Der Einstrahlungssensor wurde auf dem Dach der Anlage installiert, wie in Abbildung 5.7 dargestellt.



Abbildung 5.7: Montage Einstrahlungssensor

Dabei ist das Referenzpaneel nach Süden ausgerichtet und in einem Winkel von 30° zur Waagrechten montiert. Dies entspricht der Ausrichtung mit dem höchsten Jahresertrag für eine Photovoltaikanlage. Der Sensor wird an der SPS an den Eingang einer Analogeingangskarte für 4-20mA angeschlossen.

Der Einstrahlungssensor besteht aus einer Siliziumzelle und liefert eine Spannung, die proportional zur eingestrahlten solaren Leistung ist. Diese wird in ein Stromsignal umgewandelt und steht am Eingang der SPS zur Verfügung (0-1500W/m² entsprechen 4-20mA), (vgl. TRITEC 2018).

Stromzähler

Zur Erfassung der elektrischen Zustandsgrößen des Stromnetzes und der Wärmepumpe wird ein Stromzähler eingesetzt. Dieser ermittelt Strom- und Spannungswerte der einzelnen Phasen der Dreiphasenansteuerung und kann somit auch Leistungsdaten bereitstellen. Angeschlossen ist der Zähler an der Anspeisung der Wärmepumpen, somit wird die Stromaufnahme der gesamten Wärmepumpenanlage inklusive der Hilfsaggregate registriert. Aus den Strom- und Spannungswerten lässt sich die elektrische Leistung der Wärmepumpen berechnen und die aufgenommene Energiemenge ermitteln. Zusammen mit den Daten der Wärmemengenzähler kann damit die Leistungsziffer der Wärmepumpen ermittelt werden, (siehe Kapitel 3.2).

Zusätzlich kann über den ermittelten Spannungswert die Netzspannung des Verteilnetzes überwacht werden. Bei Absinken dieses Wertes unter einen definierten Schwellwert, werden die Wärmepumpen abgeschaltet bzw. gegen Einschalten verriegelt, wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben.

Die Kommunikation zwischen SPS und dem Stromzähler erfolgt über ein Ethernet-Protokoll, worüber Strom-, Spannungs- und Leistungsdaten für alle drei Netzphasen übertragen werden können.

Wegen technischen Schwierigkeiten konnte diese Kommunikation bis zum Abschluss der vorliegenden Arbeit nicht realisiert werden. Es fehlen daher Daten für die Analyse der Effizienz des Wärmepumpenbetriebs.

5.2.2 Aktoren

Um den Anlagenzustand aktiv beeinflussen zu können, werden Aktoren benötigt, die Steuerungsbefehle in physikalische Zustandsänderungen umwandeln können. Diese Steuerungsbefehle werden entweder als analoge oder digitale Outputs, oder über spezielle Kommunikationsschnittstellen übermittelt, wie in Tabelle 5.1 am Anfang dieses Kapitels ersichtlich ist. Im Folgenden werden die neu eingebauten Aktoren beschrieben und deren Wirkungsweise in der Anlage skizziert.

Dreiwegeventil mit Stellwertvorgabe

Die Rücklaufanhebung für den Biomassekessel erfolgt über eine Beimischung des Vorlaufs in den Rücklauf. Bisher wurde diese Rücklauftemperatur auf einen starren Wert geregelt, der Regler gab bei Abweichung der eingestellten Temperatur dem Ventil einen kurzen Öffnen- oder Schließen-Impuls. Um eine aktive Leistungsregelung über gezielte Rücklaufanhebung realisieren zu können, wird im Rahmen des Projektes ein neuer Antrieb mit Stellwertvorgabe für das vorhandene Dreiwegeventil eingebaut. Dieses wird direkt aus der SPS über einen 4-20 mA Ausgang angesteuert, wobei der Stromwert proportional der Stellwertvorgabe ist, also

$$0\% \cong 4mA \quad (5.5)$$

und

$$100\% \cong 20mA. \quad (5.6)$$

Die Rücklauftemperatur wird aus der Leistungsvorgabe errechnet, wie bereits in Kapitel 5.1.1 erläutert.

Dreiwegeventil mit digitaler Ansteuerung

Die erzeugte Leistung der Wärmepumpen kann je nach Bedarf entweder zur Versorgung des Netzes bzw. zur Ladung des Pufferspeichers, oder aber zur Rücklaufanhebung für den Biomassekessel verwendet werden. Um diese Auswahl realisieren zu können, wird ein Dreiwegeventil eingesetzt, welches das von den Wärmepumpen erhitzte Wasser entweder in Richtung Pufferspeicher oder in Richtung Biomassekessel durchlässt. Somit werden nur die beiden Endpositionen angefahren, in denen entweder der eine oder der andere Weg offen ist. Das Dreiwegeventil ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Angesteuert wird das Ventil über zwei Digitalausgänge der SPS, welche „auf“ bzw. „zu“ bedeuten. Die Ansteuerung erfolgt solange, bis die zugehörige Endlage erreicht wird, und dies an den jeweiligen Digitaleingang der SPS rückgemeldet wird.

Pumpen, Klappen Wärmepumpe

Sobald die Wärmepumpe über die Kommunikationsschnittstelle Bac-Net (siehe Kapitel 5.2.3) zum Betrieb angefordert wird, muss die Durchströmung mit Wasser sichergestellt werden. Dafür werden die Pumpen für den jeweiligen Hydraulikkreis gestartet und die zugehörige Klappe geöffnet, siehe Anhang A (Zeichnungsbereich B-C/9,11). Wird die Strömung während des Betriebs unterbrochen, so stoppen die Wärmepumpen ihren Betrieb. Die Ansteuerung der Pumpen und Klappen erfolgt jeweils über einen Digitalausgang der Steuerung.

5.2.3 Kommunikation zu anderen Steuerungen

Die Kommunikation mit Sensoren und Aktoren, die nicht direkt mit der SPS CX-5120 verbunden sind, erfolgt über andere SPSen, die im Heizwerk in Köstendorf installiert sind. Damit auch Werte dieser Sensoren verwendet werden können und deren Aktoren angesteuert werden können, wird zu diesen SPSen eine Kommunikation über BACnet/IP hergestellt.

„BACnet is a communications protocol for Building Automation and Control (BAC) networks that leverage the ASHRAE, ANSI, and ISO 16484-5 standard protocol.

BACnet was designed to allow communication of building automation and control systems for applications such as heating, ventilating, and air-conditioning control (HVAC), lighting control, access control, and fire detection systems and their associated equipment. The BACnet protocol provides mechanisms for computerized building automation devices to exchange information, regardless of the particular building service they perform.“ (Wikipedia 2017).

BACnet wurde für die Regelungstechnik und Automatisierung entwickelt und bildet in diesem Bereich einen Kommunikationsstandard. Die Teilnehmer im BACnet/IP verwenden eindeutige IP-Adressen. Die Verkabelung und der Anschluss erfolgt über Netzwerkkabel (RJ45), wie in der IT üblich. Es können Switches und Router eingesetzt werden. Als darunterliegendes Protokoll wird UDP (User Datagram Protocol) verwendet, (vgl. BACnet 2018).

In dem realisierten BACnet an der Anlage in Köstendorf werden Informationen zwischen der übergeordneten Regelung (CX-5120) und den Steuerungen der Wärmepumpe und des Fernwärmenetzes ausgetauscht. Von den Wärmepumpen

werden Statusinformationen und Temperaturwerte empfangen und Betriebsanforderungen, sowie Sollwerte für die Vorlauftemperaturen an die Wärmepumpen gesendet. An die Netzsteuerung werden die Informationen der Wärmemengenzähler übertragen, außerdem kann der Spitzenlastkessel angefordert werden.

Diese umfassende Kommunikation mit den Aktoren und Sensoren im Erzeugerverbund in Köstendorf ermöglicht es, in der übergeordneten Steuerungs-SPS die Leistungen, Durchflüsse, Temperaturen der Wärmeerzeuger und auch die Sonneneinstrahlung und die Netzspannung im Stromnetz für die Regelstrategie zu verwenden. Weiterführend können dann gezielt Erzeuger angefordert werden, dem Biomassekessel kann zusätzlich über die Rücklaufanhebung eine Leistungsanforderung gegeben werden. Diese Möglichkeiten können nun in ein übergeordnetes Regelungskonzept eingearbeitet werden.

5.3 Konzeptentwicklung für den automatischen Betrieb

Um die Potentiale der Erzeugeranlage Köstendorf, mit den neu eingebundenen Komponenten Pufferspeicher und Wärmepumpe, nutzen zu können, soll ein Konzept entwickelt werden, welches in jedem Betriebsfall die wirtschaftlich und ökologisch bestmögliche Wärmebereitstellung sicherstellt.

Die bisherige Betriebsweise war einfach und robust und wird in vielen Biomasseheizwerken eingesetzt. Durch die hydraulische Kopplung von Erzeugern und Verbrauchern gibt dabei der Verbrauch im Fernwärmenetz die momentane Leistungsanforderung für die Erzeuger vor. Der Biomassekessel, als einziger "regulärer" Wärmeerzeuger für erneuerbare Wärme, muss diese Leistung bereitstellen. Kann die Leistung zu einem Zeitpunkt nicht erbracht werden, sinkt die Vorlauftemperatur im Netz ab und die Verbraucher können nicht mehr versorgt werden. Dann wird der Spitzenlastkessel aktiviert und stellt die zusätzlich benötigte Wärme bereit.

Durch die nunmehrige Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch durch den Pufferspeicher funktioniert dieses Konzept nicht mehr. Hinzu kommt, dass nun zwei "reguläre" Wärmeerzeuger für die erneuerbare Wärmebereitstellung eingesetzt werden, nämlich der Biomassekessel und die Wärmepumpen. Lediglich der Betrieb des Spitzenlastkessels funktioniert weiterhin wie gehabt, er wird aktiviert, wenn eine Versorgungslücke im Fernwärmenetz besteht, was durch ein Absinken der Vorlauftemperatur erkennbar ist.

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, wurde das Jahr in drei Betriebsfälle unterteilt, Sommerbetrieb, Winterbetrieb und Übergangsbetrieb. Der Übergangsbetrieb zeigt dabei eine Mischung aus verschiedenen Betriebszuständen. Teilweise wird das Netz mit dem Biomassekessel versorgt, an anderen Tagen mit dem Spitzenlastkessel oder die Versorgung erfolgt dezentral über Stromheizungen. Im zukünftigen Betrieb fällt die dezentrale Variante weg, das Wärmenetz soll das ganze Jahr betrieben werden. Auch eine alleinige Versorgung mit dem Spitzenlastkessel ist nur bei Ausfällen der anderen Erzeuger geplant. Daher wird die Hauptunterscheidung der zukünftigen Betriebszustände der Anlage sein, ob der Biomassekessel in Betrieb ist oder nicht.

Um das Konzept, die Umsetzung und später den Betrieb, einfacher und übersichtlicher zu gestalten, wird deshalb auf den Übergangsbetrieb verzichtet und das Jahr in Abhängigkeit vom Betrieb des Biomassekessels in Sommer- und Winterbetrieb aufgeteilt. Im Winterbetrieb ist der Biomassekessel aktiv, im Sommerbetrieb inaktiv.

Zusätzlich wird eine Netzüberwachung für das Stromnetz und eine Vorrangschaltung für die Wärmepumpen bei hoher Leistung der örtlichen Photovoltaikanlagen eingeführt. Diese ist unabhängig von der Jahreszeit und vom sonstigen Betriebszustand immer aktiv, siehe Kapitel 5.3.3.

5.3.1 Sommerbetrieb

Im Sommerbetrieb ist der Biomassekessel ausgeschaltet, die gesamte Wärmeverversorgung wird von den Wärmepumpen abgedeckt. Diese können entweder dauerhaft eingeschaltet werden, wobei stets die maximal mögliche Leistung produziert wird, oder es wird der pufferfüllstandsgeführte Betrieb aktiviert. In dieser Betriebsart wird eine Hysterese aus zwei Pufferfüllständen definiert, bei welcher die Wärmepumpen ein- bzw. ausgeschaltet wird. In Abbildung 5.8 ist die Eingabemaske der Füllstandshysterese dargestellt.

Alle zwei Stunden kann ein neuer Ein- bzw. Ausschaltzeitpunkt für die Wärmepumpen definiert werden. So ist es möglich, die tageszeitlichen Unterschiede der Außentemperatur zu berücksichtigen, um den bestmöglichen COP der Wärmepumpe zu erreichen.

Außerdem werden die Wärmepumpen über die Funktion „Power to Heat“ aktiviert, wenn eine entsprechend hohe solare Einstrahlungsleistung gemessen wird. Bei Spannungsabfall im Stromnetz werden die Wärmepumpen automatisch de-

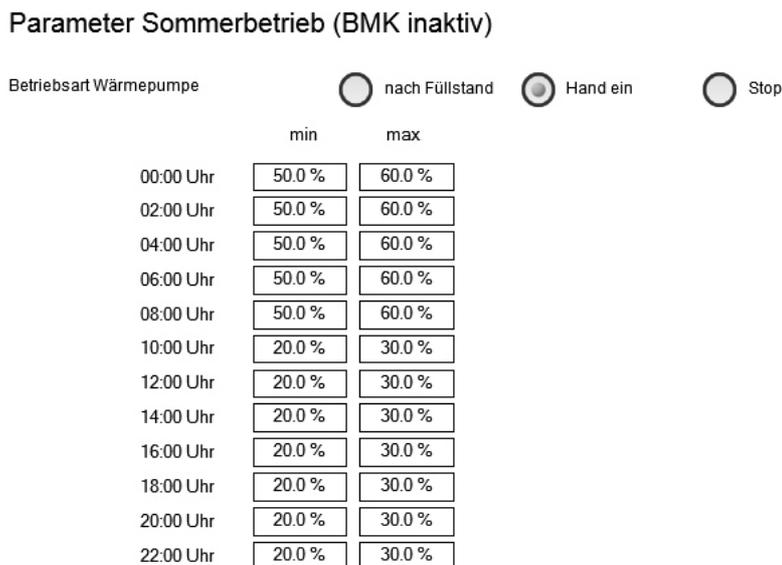


Abbildung 5.8: Eingabe Hysterese Sommerbetrieb

aktiviert. Diese beiden Funktionen sind stets aktiv und werden in Kapitel 5.3.3 erläutert.

5.3.2 Winterbetrieb

Im Winterbetrieb wird ein Großteil der Wärmemenge mit dem Biomassekessel produziert. Dies ist möglich, da Lastspitzen im Netz aus dem Pufferspeicher abgedeckt werden und in Tageszeiten geringerer Last die überschüssige Wärme in den Puffer geladen wird. Überschreitet die errechnete Leistungsvorgabe die Maximalleistung des Biomassekessels, so wird zusätzlich die Wärmepumpe angefordert. Die Leistungsvorgabe wird dabei wie folgt errechnet: Über eine Lastprädiktion für das Wärmenetz wird zuerst die momentan erforderliche Last berechnet und danach noch mittels Vergleichswerten vom Vortag und dem Pufferfüllstand korrigiert. Die exakte Vorgehensweise wird in diesem Kapitel erläutert.

Leistungsprädiktion

Dabei wird fortlaufend aus den vergangenen Verbrauchsdaten die derzeit notwendige Erzeugerleistung ermittelt. Zentrales Element für die Leistungsvorgabe ist die Leistung im Fernwärmenetz der letzten 27 Stunden. Diese 27 Stunden sind der gesamte letzte Tag und weitere drei Stunden, um einen Vergleich der letzten drei Stunden zum Vortag anstellen zu können. Die Leistungsprädiktion

stellt also eine Funktion der Netzlast dar und setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen, wie in Abbildung 5.9 dargestellt.

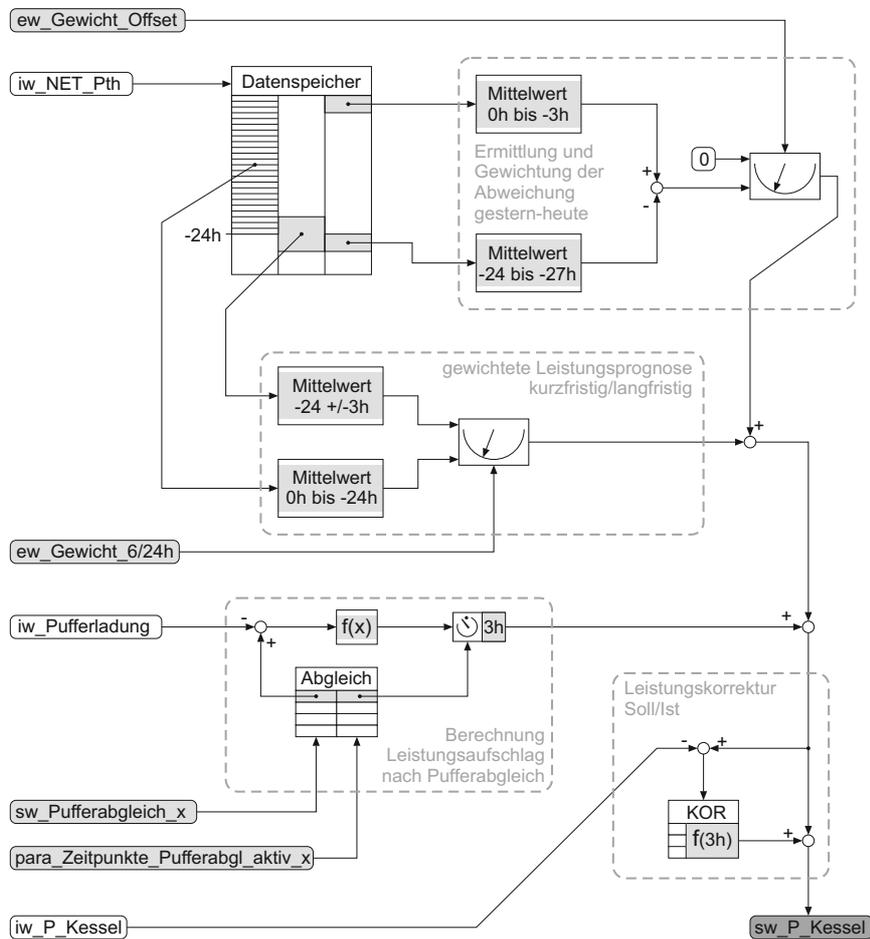


Abbildung 5.9: Berechnung Lastvorgabe aus Netzleistung

Um den Verlauf der Leistung im Fernwärmenetz zu modellieren, wird der Mittelwert des letzten Tages mit dem Mittelwert von +/- drei Stunden vom Momentzeitpunkt überlagert (Gewichtungsfaktor `ew_Gewicht_6/24h`). Da die Daten der zukünftigen Netzleistung nicht vorliegen, werden sie durch die Leistung vom Vortag ersetzt. Dies impliziert die Annahme, dass sich der qualitative Leistungsverlauf im Vergleich zum Vortag nicht oder nur geringfügig verändert hat.

Um die quantitativen Leistungsänderungen zum Vortag zu berücksichtigen, wird im nächsten Schritt die errechnete Leistung korrigiert. Dazu wird die Leistung der letzten beiden Stunden mit der Leistung der gleichen Zeitperiode des Vortages verglichen. Die Abweichung wird mit einem Faktor gewichtet (`ew_Gewicht_Offset`) und als additiver Korrekturwert auf den vorher berechneten Wert aufgeschlagen.

Der errechnete Leistungssollwert ist also eine berechnete Größe aus den Verbrauchsdaten des Fernwärmenetzes der letzten 27 Stunden. Diese Berechnung

beruht bis hierher nur auf vergangenen Daten des Wärmenetzes. Um sicherzustellen, dass erzeugte und verbrauchte Wärmemenge übereinstimmen, wird einmal am Tag ein Abgleich des Pufferfüllstands durchgeführt. Weicht der Energieinhalt des Pufferspeichers ab, so wird die Differenzenergiemenge zum Zeitpunkt des Abgleichs auf die folgenden drei Stunden verteilt als Leistungskorrektur auf den Sollwert addiert.

Als Gesamtleistungsvorgabe ergibt sich daraus ein aus vier Anteilen bestehender Sollwert, wie in Tabelle 5.2 veranschaulicht.

	24h Mittelwert	* $(1-ew_Gewicht_6/24h)$
+	6h Mittelwert	* $ew_Gewicht_6/24h$
+/-	Korrektur zum Vortag	* $ew_Gewicht_Offset$
+/-	Pufferabgleich	
+/-	Leistungskorrektur Soll/Ist	
=	Leistungsvorgabe gesamt	(sw_P_Kessel)

Tabelle 5.2: Leistungsvorgabe aus Lastprädiktion

Der vierte Teil dieser Berechnung ist eine Leistungskorrektur, die bei Nichterfüllung der berechneten Vorgabe durch die Erzeuger, die Vorgabe nach oben oder unten korrigiert. Dieser Leistungssollwert ist der Ausgangswert für die Leistungsvorgabe an die Wärmeerzeuger.

Leistungsverteilung

Die gesamte errechnete Leistungsvorgabe wird nun an die Wärmeerzeuger Wärmepumpe und Biomassekessel aufgeteilt, mit dem Ziel, wirtschaftlich und ökologisch den bestmöglichen Energiemix bereitzustellen. In Tabelle 5.3 sind daher noch einmal die wichtigsten Rahmenbedingungen zusammengefasst, welche zu einem besonders günstigen bzw. ungünstigen Betriebsfall eines Wärmeerzeugers führen. Der Spitzenlastkessel wird dabei nicht berücksichtigt, da er nur dann eingesetzt wird, wenn die Versorgung des Fernwärmenetzes nicht mehr anders gewährleistet werden kann, was möglichst vermieden werden soll.

Für den Biomassekessel wird eine Mindestleistung von $P_{min} = 200\text{kW}$ definiert, welche dieser ohne Gluterhaltungsbetrieb, also dem Ausschalten der Verbrennungsluft durch den Rost, erreichen kann. Diese Mindestleistung wird daher bei der Leistungsvorgabe nicht unterschritten. Bei geringer durchschnittlicher Leistung im Fernwärmenetz werden die Wärmepumpen also nicht angefordert, solan-

Erzeuger	Rahmenbedingung	Auswirkung
Wärmepumpe	hohe Außentemperatur	⊕ hoher COP
Wärmepumpe	niedrige Außentemperatur	⊖ niedriger COP
Wärmepumpe	überschüssige PV-Produktion	⊕ Strom günstig verfügbar
Biomassekessel	Leistung $\leq 200\text{kW}$	⊖ Gluterhaltungsbetrieb

Tabelle 5.3: Rahmenbedingungen für die Wärmeerzeuger

ge der Biomassekessel in Betrieb ist. Dies entspricht in etwa der Übergangszeit, wo die Wärmepumpen alleine nicht mehr für den Betrieb ausreichen.

Sinkt die Außentemperatur und steigt damit die Leistung, so wird der Betrieb der Wärmepumpe immer ungünstiger, da der erforderliche Temperaturhub zunimmt. Aus diesem Grund scheint es sinnvoll, die Wärmepumpe auch bei höherer Leistung im Winter nicht zu verwenden, sondern die Last mit dem Biomassekessel abzudecken, solange dies möglich ist. Lediglich bei Überschreitung der möglichen Maximalleistung bzw. seiner Nennleistung wird die Wärmepumpe im Winter zugeschaltet.

Zusammenfassend heißt das, dass im Winterbetrieb die Wärmepumpe nur dann aktiviert wird, wenn der Biomassekessel die erforderliche Leistung nicht mehr erbringen kann, oder mehr Strom aus Photovoltaikanlagen vorhanden ist, als im Stromnetz verbraucht werden kann, wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben ist.

Leistungsregelung

Bei der Leistungsregelung unterscheiden sich Biomassekessel und Wärmepumpe erheblich. Die Wärmepumpen sind mit einem einstellbaren Sollwert für die Vorlauftemperatur versehen und die Pumpen für den Wasserdurchfluss laufen mit konstanter Drehzahl, liefern daher stets nahezu die gleiche Wassermenge. Auch die Rücklauftemperatur aus dem Fernwärmenetz ergibt sich aus der Abnahme und sollte sich auch im Winter nur geringfügig ändern. Daraus ergibt sich eine konstante Leistung, welche pro Wärmepumpengruppe geliefert werden kann. Die Wärmepumpen werden daher von der Regelung nur ein- bzw. ausgeschaltet und liefern im Betrieb stets die derzeit mögliche maximale Leistung.

Im Gegensatz dazu wird der Sollwert für die Vorlauftemperatur des Biomassekessels vom Operator eingestellt und die Rücklauftemperatur kann über ein Dreiwegeventil aus Netzzrücklauf und eigenem Vorlauf gemischt werden. Dies ergibt die Möglichkeit einer Leistungsregelung. In Abhängigkeit vom eingestellten

Sollwert für die Vorlauftemperatur wird entsprechend der jeweils gewünschten Leistung auf eine Rücklauftemperatur geregelt, welche diese Leistung ergibt. Die Berechnung der Rücklauftemperatur ist aus Formel (5.2) ersichtlich.

5.3.3 Power to Heat - Netzüberwachung

Unabhängig von Sommer- oder Winterbetrieb wird die Versorgungssituation im lokalen Stromnetz berücksichtigt. Bei einem Überschuss an Photovoltaikstrom wird dieser in Wärme umgewandelt, bei zu starker Beanspruchung des Stromnetzes wird die Wärmepumpe gezielt abgeschaltet.

Für die Ermittlung eines Stromüberschusses wird die gemessene solare Einstrahlung mit der in Köstendorf installierten Photovoltaikleistung multipliziert und dem derzeitigen Stromverbrauch aus bekannten Lastprofilen gegenübergestellt. Ergibt sich daraus ein Überschuss, so wird die Wärmepumpe aktiviert und somit ein Teil dieses Überschusses effizient in Wärme umgewandelt.

Weiters kann über die installierte Spannungsmessung ein Abfall der Netzspannung im Niederspannungsnetz erkannt werden. Dieser deutet auf eine erhöhte Abnahme im lokalen Stromnetz hin. Um solche Verbrauchsspitzen abzufedern, werden bei einem Spannungsabfall unter einen definierten Grenzwert die Wärmepumpen in zwei Stufen abgeschaltet, falls sie gerade in Betrieb sind, oder ihre Aktivierung gesperrt, wenn sie inaktiv sind.

5.4 Programmierung

Die programmiertechnische Umsetzung des vorgestellten Konzeptes erfordert die gedankliche Zerlegung dieses komplexen Systems in seine Einzelteile. Zur besseren Gliederung und einfacheren Handhabung werden Funktion, Funktionsblöcke und Unterprogramme verwendet. Damit die im Programm verwendeten Parameter beschrieben bzw. verändert werden können, ohne direkt den Quellcode zu verändern, wird eine Parametrierebene aufgebaut. Diese ermöglicht zusätzlich einen guten Überblick des Anlagenbetriebs auch über einen Fernzugriff.

5.4.1 Beschreibung des Hauptprogramms

Das Steuerungsprogramm wird in Strukturiertem Text (ST) geschrieben. Diese Sprache ist übersichtlich und eignet sich gut für komplexe Programmieraufgaben:

„Der Strukturierte Text besteht aus einer Reihe von Anweisungen, die wie in Hochsprachen bedingt („IF..THEN..ELSE“) oder in Schleifen (WHILE..DO) ausgeführt werden können. [...] Wie der Name schon sagt, ist der Strukturierte Text auf strukturiertes Programmieren ausgelegt, d.h. für bestimmte häufig benutzte Konstrukte, wie etwa Schleifen, bietet ST vorgegebene Strukturen zur Programmierung. Dies hat die Vorteile geringerer Fehlerwahrscheinlichkeit und größerer Übersichtlichkeit des Programms.“ (Beckhoff 2018).

Um die Übersichtlichkeit weiter zu verbessern, wird der Programmcode in Unterprogramme gegliedert. Diese enthalten jeweils einen Teil des Codes und werden nacheinander aufgerufen. Die Reihenfolge des Aufrufs ergibt damit den Ablauf des Codes in der SPS. Nachfolgend ist der Aufruf der Unterprogramme im Hauptprogramm (MAIN) von Köstendorf dargestellt:

```
Analogwerte (); //PT-100-Fuehler Puffer und Netz , WP, 3WV BMK
Kommunikation_CX8091 (); //Kommunikationsaufbau TC2 fuer BACNet
MBus_WMZ(); //Leistungen und Durchfluesse Erzeuger und Netz
Pufferladung (); //Pufferbeladungswerte
Betriebsbereitschaft (); //Betriebsbereitschaft feststellen
Forecast_Sollwert (); //Netzforecast , Leistungssollwert
Leistungsverteilung (); //Leistungsverteilung auf BMK, WP
Leistungsregelung (); //Leistungsregelung mittels PID
SLK_Anforderung (); //Anforderung Spitzenlastkessel
Stoerungen (); //Stoerungen verarbeiten
Ueberwachung (); //Energieberechnung aus WMZ-Daten
Datenlogger (); //Daten in csv schreiben
```

Die ersten Programmteile Analogwerte, Kommunikation_CX8091 und MBus_WMZ dienen der Analogwertverarbeitung und der Kommunikation zu anderen Steuerungen, welche in Kapitel 5.2 thematisiert sind. In „Pufferladung“ wird aus den Werten der Temperaturfühler des Pufferspeichers eine Pufferladung in % und der Energieinhalt berechnet. In der „Betriebsbereitschaft“ wird über die Momentanleistung des Biomassekessels ermittelt, ob dieser in Betrieb ist, da keine Betriebsmeldung als Bit zur Verfügung steht. Die folgenden drei Unterprogramme dienen der Netzforecast-Berechnung, der Leistungsverteilung auf die Wärmeerzeuger und der Leistungsregelung des Biomassekessels, ihr Inhalt ist in Kapitel 5.3.2 beschrieben. Der Programmteil „SLK_Anforderung“ beinhaltet die Bedingungen für die Anforderung des Spitzenlastkesselbetriebs. In den letzten drei Programmteilen werden zusätzliche Informationen über den Status und den Betriebsmodus der Anlage generiert, gespeichert und dem Benutzer in Form von grafischen Anzeigen in der Parametrierebene zur Verfügung gestellt, (siehe Ka-

pitel 5.4.2).

In der SPS wird das Hauptprogramm (Main) als eigener Task abgehandelt und ist mit einer Priorität zur Abarbeitung hinterlegt. Es wird in jedem Zyklus mit einer Zykluszeit von 10 ms einmal aufgerufen und von oben nach unten durchlaufen. Somit bestimmt die Anordnung der Unterprogramme im Hauptprogramm auch deren Reihenfolge bei der Abarbeitung.

Häufig verwendete Funktionen oder Programmteile können in Funktionsblöcke verpackt und damit ausgelagert werden. Diese können dann mehrmals im Programm verwendet werden, ohne jeweils den gesamten Code einfügen zu müssen. So wird der Programmcode übersichtlicher und leichter lesbar. Außerdem kann ein Fehler im Funktionsblock korrigiert werden und wird damit gleichzeitig an allen Stellen ausgebessert. Die Verwendung eines Funktionsblocks wird anhand des Blocks Lineare Rampe (Lin_Rmp) veranschaulicht:

```

Linrmp_ssw_K1_Pth(           // Aufruf des Funktionsblockes
    Rmp:= TRUE,              // True bedeutet, die Rampe ist aktiv
    in:= LIMIT(lu_K1_Pth, ssw_K1_Pth, lo_K1_Pth), //Eingang
    KR:= 1.0,                //Rampensteigung aufwaerts
    KF:= 1.0);              //Rampensteigung abwaerts
// hier ist der Funktionsblock abgeschlossen!
ssw_K1_Pth:= Linrmp_ssw_K1_Pth.out; //Zuweisung des Rampenausgangs

```

Der Funktionsblock dient dazu, Werteänderungen für den Sollwert des Biomassekessels zu limitieren. Die vier Zeilen nach dem Funktionsaufruf sind die Eingänge des Funktionsblockes und können entweder mit Werten oder Variablen beschrieben werden. „Rmp“ kann mit „TRUE“ oder „FALSE“ beschrieben werden und bestimmt, ob die Rampenfunktion aktiv oder inaktiv ist. „KR“ und „KF“ sind Parameter für die maximale Steigung beim Ansteigen bzw. Abfallen der Eingangsvariable. Am Eingang „in“ wird die Variable zugewiesen, welche durch die Rampenfunktion beeinflusst werden soll. In diesem Beispiel ist es die Variable „ssw_K1_Pth“, der Sollwert für die Biomassekesselleistung. Zusätzlich wird die Variable durch eine Limit-Funktion auf ihre zulässigen Grenzwerte limitiert. Sie kann also „lu_K1_Pth“ nicht unterschreiten und „lo_K1_Pth“ nicht übersteigen. Nachdem der Funktionsblock durch Klammer und Strichpunkt abgeschlossen wurde, wird in der letzten Zeile des Codebeispiels der Ausgang des Rampenblocks wieder der Variable „ssw_K1_Pth“ zugewiesen.

Die Anwendung von Funktionsblöcken funktioniert immer gleich. Ein Block kann theoretisch aus beliebig vielen Ein- und Ausgängen bestehen.

5.4.2 Webvisualisierung, Parametrierebene

Um die wichtigsten Prozessgrößen stets beobachten zu können und Parameter für die Prozessführung zu verändern, wird eine Webvisualisierung aufgebaut, welche von einem beliebigen Computer im Netzwerk der SPS in einem Webbrowser aufgerufen werden kann. Die Webvisualisierung läuft direkt auf dem Rechenchip der SPS und enthält neben einer Startseite für die Benutzerverwaltung, eine Übersichtsseite zur Anzeige der wichtigsten Prozessgrößen, sowie zwei Seiten zur Eingabe aller relevanter Parameter.

Übersichtsseite

Die Übersichtsseite spielt eine zentrale Rolle im Betrieb, um auf einen Blick die wichtigsten Informationen über den Anlagenzustand zu erhalten. Diese Übersichtsseite ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

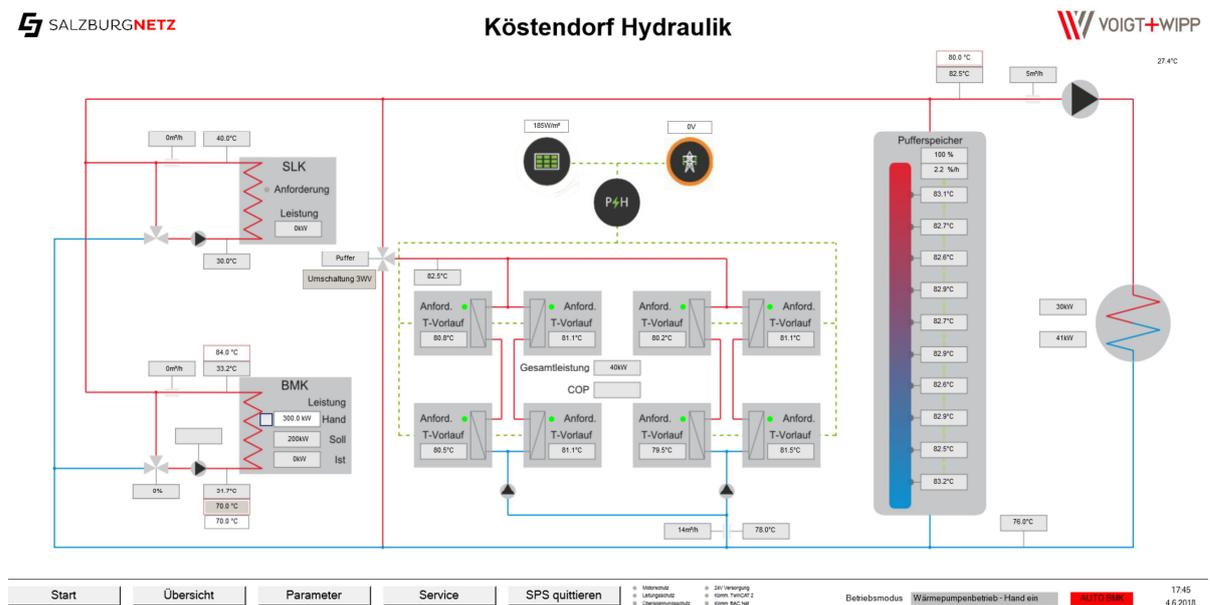


Abbildung 5.10: Übersichtsseite Hydraulik

Darauf ist das Hydraulikschema der Anlage in Köstendorf vereinfacht dargestellt. Angezeigt werden neben den Durchflüssen und Leistungen der Erzeuger und Verbraucher auch alle verfügbaren Temperaturmessungen. Im oberen Bereich der Anzeige finden sich relevante Größen des Stromnetzes und errechnete Größen wie der Pufferfüllstand oder die Pufferlade- bzw. Entladegeschwindigkeit.

Parameterseite

Die Parameterseite ist in vier Abschnitte unterteilt. Die Betriebsparameter für den Winter- und den Sommerbetrieb können im ersten und zweiten Abschnitt getrennt eingegeben werden. Der dritte Bereich ist für die Einstellungen der Stromnetzüberwachung reserviert. Im vierten Bereich befindet sich eine Übersicht über die monatlich produzierten Wärmemengen aufgeteilt auf die Wärmeerzeuger. In Abbildung 5.11 ist die Eingabemaske für die Parameter, die den Winterbetrieb betreffen, dargestellt.

Parameter Winterbetrieb (BMK aktiv)

Einstellungen Forecast-Berechnung

Eingabe einer Uhrzeit, wann der Pufferabgleich erfolgt (HH:MM . HH...0-24; MM...0-60)

02:00

Pufferfüllstand für Tagesabgleich, 0-100%

Leistungsverteilung Puffergrenzen

Grenze für Aktivierung Maximalleistung aller Kessel

untere obere

Grenze für Aktivierung Mindestleistung bei Pufferüberfüllung

Aktivierung Ölkessel

Ein-Ausschalttemperatur (Netzvorlauf) für Aktivierung Ölkessel

SLK ein SLK aus

Einschaltverzögerung bei Betrieb Wärmepumpen

Abbildung 5.11: Parameterseite Winterbetrieb

Oben können der Zeitpunkt und der gewünschte Füllstand für den täglichen Pufferfüllstandsabgleich parametrisiert werden (wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben), sowie die Füllstandsgrenzen des Pufferspeichers, bei der die Leistung automatisch angehoben (Untergrenze) bzw. abgesenkt (Obergrenze) wird. Außerdem können die Ein- und Ausschaltgrenze für die Aktivierung des Ölkessels in Abhängigkeit der Netzvorlauftemperatur eingegeben werden.

Die Eingabeseite der Betriebsparameter für den Sommerbetrieb, bei inaktivem Biomassekessel, sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Dort kann die Betriebsweise der Wärmepumpen parametrisiert werden, wie in Kapitel 5.3.1 erläutert wird.

Die Einstellungen für die Stromnetzüberwachung und den Verbrauch von Strom aus lokalen Photovoltaikanlagen lassen sich ebenfalls auf der Parameterseite einstellen. Abbildung 5.12 zeigt die Eingabefelder dafür.

Hier können die Ein- und Ausschaltgrenzen der Einstrahlungsleistung definiert werden, bei welchen die Wärmepumpen automatisch gestartet bzw. gestoppt werden. Außerdem können die Grenzwerte für die Netzspannung festgelegt werden,

Parameter Stromnetzeinstellungen

Aktivierung Wärmepumpe Power to Heat

Einschalthysterese Wärmepumpe Sommerbetrieb (Wärmepumpe Solobetrieb)
 Einschalthysterese Wärmepumpe Winterbetrieb (Parallelbetrieb Biomassekessel)

WP aus	WP ein
700 W/m ²	800 W/m ²
800 W/m ²	900 W/m ²

Abschaltung Wärmepumpe Netzschutz

Ausschalthysterese Wärmepumpe bei Spannungsabfall
 Verzögerung Ausschaltung 2. WP-Gruppe, bzw. Einschaltung 1. Gruppe

WP aus	WP ein
364 V	374 V
2.0 min	

Abbildung 5.12: Parameterseite Stromnetzeinstellungen

bei denen der Betrieb der Wärmepumpen nicht gestattet wird.

Eine zusätzliche Information zur Betriebsweise der Gesamtanlage liefert die Übersicht über die produzierten Wärmemengen, welche in Abbildung 5.13 dargestellt ist. Die produzierten Wärmemengen der Erzeuger Biomassekessel, Wärmepumpen und Ölkessel sind jenen der abgenommenen Leistung im Wärmenetz gegenübergestellt. Die Energiemengen sind dabei in Balkenform aufgetragen und in Monate unterteilt. Zusätzlich werden die momentanen Zählerstände der Wärmemengenzähler angezeigt.

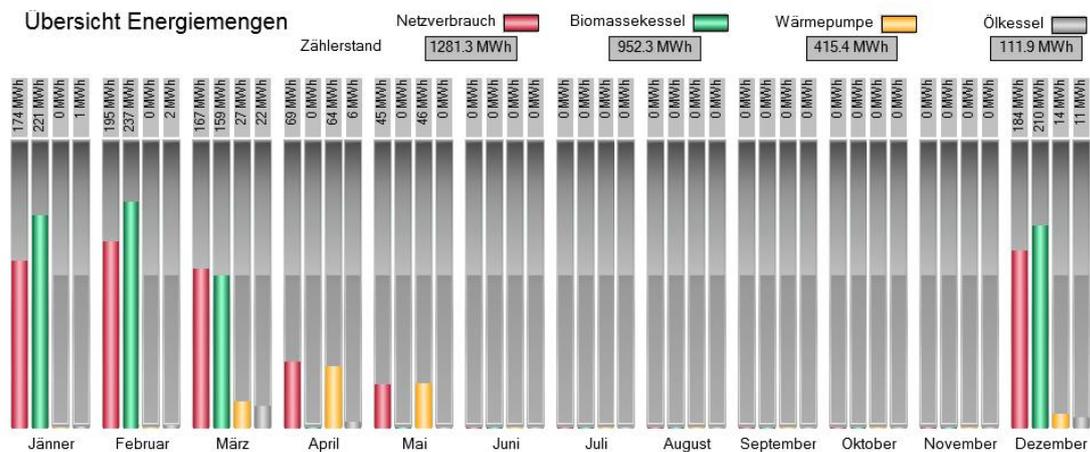


Abbildung 5.13: Parameterseite Übersicht Wärmemengen 2017-2018

5.5 Inbetriebnahme

Nach dem Einbau und der Installation aller neuer Komponenten im Heizwerk von Köstendorf bildet die Inbetriebnahme den letzten Schritt in der Umsetzung des Projektes. Zuerst wird dafür die Kommunikation zwischen Steuerung (SPS)

und den beteiligten Sensoren und Aktoren getestet. Sodann erfolgt ein Test abgeschlossener funktionaler Einheiten, der sogenannten Komponenten. Abschließend wird das Gesamtsystem getestet und geprüft, ob alle Mechanismen wie gewünscht und beschrieben funktionieren.

In diesem Kapitel sind die einzelnen Schritte der Inbetriebnahme beschrieben und dokumentiert. Außerdem werden Probleme und Fehler beschrieben, die in deren Verlauf aufgetreten sind.

5.5.1 Signalaustausch, Kommunikationstest

Im ersten Schritt werden alle ausgetauschten Signale überprüft und getestet. Dies betrifft sowohl die über digitale und analoge Schnittstellenkarten angeschlossene Sensoren und Aktoren, als auch alle über Bus- und serielle Schnittstellen gesendeten und empfangenen Werte anderer Steuerungen (SPSen).

Temperaturen beispielsweise können auf Plausibilität geprüft und mit einem externen Messgerät nachgemessen werden. Der Datenaustausch mit anderen SPSen wird getestet, indem gezielt klar unterscheidbare Werte auf die Ausgänge geschrieben und diese mit den Eingängen der anderen SPS verglichen werden. Erst wenn alle Signale erfolgreich getestet wurden, kann die entsprechende Systemkomponente und später das Gesamtsystem in Betrieb genommen werden. In Tabelle 5.4 sind die ein-, in Tabelle 5.5 die ausgehenden getesteten Signale aufgelistet.

Variable	Typ	Bedeutung	Test
iw_WP_T_RL	REAL	Rücklauftemperatur Wärmepumpe	OK
iw_WP_T_VL	REAL	Vorlauftemperatur Wärmepumpe	OK
iw_SOL_Pth_Einstrahlung	REAL	solare Einstrahlung	OK
iw_NETZ_U_Spannung	REAL	Spannung Stromnetz	n.g.
iw_NETZ_I_Strom1	REAL	Stromstärke Stromnetz Phase 1	n.g.
iw_NETZ_I_Strom2	REAL	Stromstärke Stromnetz Phase 2	n.g.
iw_NETZ_I_Strom3	REAL	Stromstärke Stromnetz Phase 3	n.g.
iw_K1_T_RL	REAL	Rücklauftemperatur Biomassekessel	OK
iw_K1_T_VL	REAL	Vorlauftemperatur Biomassekessel	OK
iw_K1_y_3WV	REAL	Position Dreiwegeventil Biomassekessel	OK
iw_K1_Pth	REAL	thermische Leistung Biomassekessel	OK

(wird fortgesetzt)

5.5. INBETRIEBNAHME

Variable	Typ	Bedeutung	Test
iw_SLK_Pth	REAL	thermische Leistung Spitzenlastkessel	OK
iw_NET_Pth	REAL	thermische Leistung Wärmenetz	OK
iw_WP_Pth	REAL	thermische Leistung Wärmepumpen	OK
iw_K1_Vp	REAL	Durchfluss Biomassekessel	OK
iw_SLK_Vp	REAL	Durchfluss Spitzenlastkessel	OK
iw_NET_Vp	REAL	Durchfluss Wärmenetz	OK
iw_WP_Vp	REAL	Durchfluss Wärmepumpen	OK
iw_PSP1_T1	REAL	Temperatur 1 Pufferspeicher 1	OK
iw_PSP1_T2	REAL	Temperatur 2 Pufferspeicher 1	OK
iw_PSP1_T3	REAL	Temperatur 3 Pufferspeicher 1	OK
iw_PSP1_T4	REAL	Temperatur 4 Pufferspeicher 1	OK
iw_PSP1_T5	REAL	Temperatur 5 Pufferspeicher 1	OK
iw_PSP2_T1	REAL	Temperatur 1 Pufferspeicher 2	OK
iw_PSP2_T2	REAL	Temperatur 2 Pufferspeicher 2	OK
iw_PSP2_T3	REAL	Temperatur 3 Pufferspeicher 2	OK
iw_PSP2_T4	REAL	Temperatur 4 Pufferspeicher 2	OK
iw_PSP2_T5	REAL	Temperatur 5 Pufferspeicher 2	OK
iw_NET_T_RL	REAL	Rücklauftemperatur Wärmenetz	OK
iw_NET_T_VL	REAL	Vorlauftemperatur Wärmenetz	OK
iw_UMG_T_aussen	REAL	Umgebungstemperatur	OK
iw_SLK_T_VL	REAL	Vorlauftemperatur Spitzenlastkessel	OK
iw_SLK_T_RL	REAL	Rücklauftemperatur Spitzenlastkessel	OK
USS_OK	BOOL	Überspannungsschutz fehlerfrei	OK
Steuerspannung_OK	BOOL	Steuerspannung fehlerfrei	OK
HydrPu_WP_1_run	BOOL	Laufmeldung Wasserpumpe 1	OK
HydrPu_WP_1_error	BOOL	Fehler Wasserpumpe 1	OK
HydrPu_WP_2_run	BOOL	Laufmeldung Wasserpumpe 2	OK
HydrPu_WP_2_error	BOOL	Fehler Wasserpumpe 2	OK
Anford_PU1_v_WP1	BOOL	Anforderung Wasserpumpe 1	OK
Anford_PU2_v_WP2	BOOL	Anforderung Wasserpumpe 2	OK
MSS_HydraulikPu_WP_1	BOOL	Motorschutz Wasserpumpe 1 fehlerfrei	OK

(wird fortgesetzt)

Variable	Typ	Bedeutung	Test
LSS_WMZ_WP_OK	BOOL	Leitungsschutz WMZ Wärmepumpen fehlerfrei	OK
LSS_WMZ_Biomassekessel_OK	BOOL	Leitungsschutz WMZ Biomassekessel fehlerfrei	OK
LSS_WMZ_Netzabgang_OK	BOOL	Leitungsschutz WMZ Wärmenetz fehlerfrei	OK
LSS_WMZ_Oelkessel_OK	BOOL	Leitungsschutz WMZ Spitzenlastkessel fehlerfrei	OK
MSS_HydraulikPu_WP_2	BOOL	Motorschutz Wasserpumpe 2 fehlerfrei	OK
LSS_Heizband_Kondensablauf_OK	BOOL	Leitungsschutz Kondensatablauf fehlerfrei	OK
LSS_Datamanagement_Server_WP_OK	BOOL	Leitungsschutz hydraulische Data-managementserver fehlerfrei	OK
LSS_Klappe_WP_1_OK	BOOL	Leitungsschutz hydraulische Klappe 1 fehlerfrei	OK
LSS_Klappe_WP_2_OK	BOOL	Leitungsschutz hydraulische Klappe 2 fehlerfrei	OK
LSS_Klappe_WP_3_OK	BOOL	Leitungsschutz hydraulische Klappe 3 fehlerfrei	OK
LSS_Klappe_WP_4_OK	BOOL	Leitungsschutz hydraulische Klappe 4 fehlerfrei	OK
LSS_Pufferladeventil_OK	BOOL	Leitungsschutz Pufferladeventil fehlerfrei	OK
WP_Serviceschalter_Heizhaus	BOOL	Serviceschalter Wärmepumpen am Heizhauseingang	OK
WP_Serviceschalter_Schaltschrank	BOOL	Serviceschalter Wärmepumpen	OK
Pufferladeventil_offen	BOOL	Rückmeldung Pufferladeventil geöffnet	OK
Pufferladeventil_geschlossen	BOOL	Rückmeldung Pufferladeventil geschlossen	OK
DI_Quittierbutton	BOOL	Quittierbutton Schaltschrank	n.g.

Tabelle 5.4: Signalliste Kommunikationstest Eingang (IN)

5.5. INBETRIEBNAHME

Variable	Typ	Bedeutung	Test
ssw_K1_y_3WV	REAL	Vorgabe Position Dreiwegeventil Biomassekessel	OK
O_WP1_BOOL_ein	BOOL	Anforderung Wärmepumpe Gruppe 1	OK
O_WP2_BOOL_ein	BOOL	Anforderung Wärmepumpe Gruppe 2	OK
LED_Stoerung	BOOL	Störungsled Spitzenlastkessel	OK
FRG_Oelkessel	BOOL	Anforderung Spitzenlastkessel	OK
LED_Servicesch_HH	BOOL	Led Serviceschalter am Heizhaus- eingang	OK
LED_Servicesch_Schrank	BOOL	Led Serviceschalter Wärmepumpen	OK
HydraulikPu_WP_1_EIN	BOOL	Startbit Hydraulikpumpe 1 Wärme- pumpen	OK
HydraulikPu_WP_2_EIN	BOOL	Startbit Hydraulikpumpe 2 Wärme- pumpen	OK
FRG_HydraulikPu_WP_1	BOOL	Freigabebit Hydraulikpumpe 1 Wärmepumpen	OK
FRG_HydraulikPu_WP_2	BOOL	Freigabebit Hydraulikpumpe 2 Wärmepumpen	OK
FRG_Heizband_Kondens- wasser	BOOL	Freigabebit Heizungsband Kondens- satwasserrinne	OK
Absperrklappe_WP_1 _Auf	BOOL	Hydraulikklappe 1 Wärmepumpen öffnen	OK
Absperrklappe_WP_2 _Auf	BOOL	Hydraulikklappe 2 Wärmepumpen öffnen	OK
Absperrklappe_WP_3 _Auf	BOOL	Hydraulikklappe 3 Wärmepumpen öffnen	OK
Absperrklappe_WP_4 _Auf	BOOL	Hydraulikklappe 4 Wärmepumpen öffnen	OK
Pufferladeventil_Auf	BOOL	Pufferladeventil öffnen	OK
Pufferladeventil_Zu	BOOL	Pufferladeventil schließen	OK

Tabelle 5.5: Signalliste Kommunikationstest Ausgang (OUT)

Die mit n.g. (nicht getestet) gekennzeichneten Signale konnten während der Inbetriebnahme nicht getestet werden. Der Strom- und Spannungszähler konnte nicht getestet werden, da keine Kommunikation zwischen dem Zähler und der

SPS aufgebaut werden konnte. Der Quittierbutton am Schaltschrank wurde nicht installiert, da dieser für die Funktion der Anlage nicht erforderlich ist. Die Quittierung der Wärmepumpenanlage erfolgt über die Parametrierebene.

5.5.2 Test der Einzelkomponenten

Bevor das gesamte Regelungskonzept in Betrieb genommen wird, macht es Sinn, zuerst abgeschlossene Teilsysteme und Einzelkomponenten zu testen. Einzeltests werden für die Wärmepumpen, das Dreiwegeventil im Vorlauf der Wärmepumpen und für die Rücklaufanhebung des Biomassekessels durchgeführt.

Wärmepumpen

Die Wärmepumpen werden gesammelt in zwei Gruppen zu je vier Wärmepumpen angefordert und deren Betrieb verfolgt. Es wird das automatische Öffnen der hydraulischen Klappe und die dazugehörige Pumpe pro Gruppe überprüft. Im Betrieb wird außerdem der Volumenstrom überwacht und gemessen, ob die eingestellte Vorlauftemperatur erreicht wird.

Bei Anforderung der Wärmepumpen zeigte sich der ein erster Bedarf zum Nachjustieren: Da das Öffnen der hydraulischen Klappen gleichzeitig mit dem Einschalten der Wasserpumpen gestartet wurde, förderten die Pumpen kurze Zeit gegen die noch geschlossenen Klappen, was zu einer erhöhten Stromaufnahme und damit zu einer Abschaltung der Pumpen führte. Das Programm wurde dahingehend geändert, dass die Pumpen erst nach einer Verzögerung von zwölf Sekunden nach dem Öffnen der Klappen gestartet werden. Umgekehrt werden beim Ausschalten zuerst die Pumpen gestoppt und die Klappen fünf Sekunden danach geschlossen.

Im Betrieb der Wärmepumpen wurde ein zweiter Änderungsbedarf sichtbar: Die Gesamtmenge, die durch den hydraulischen Kreis der Wärmepumpen gefördert wurde, betrug nur $9\text{m}^3/\text{h}$ anstatt den geplanten $14\text{m}^3/\text{h}$. Durch einen Tausch der Pumpen werden nun insgesamt $14\text{m}^3/\text{h}$ durch das System der Wärmepumpen gefördert.

Pufferladeventil

Während des Betriebs der Wärmepumpen wird die Ansteuerung des Pufferladeventils getestet. Dazu werden beide Endlagen angefahren und jeweils geprüft, ob

diese erreicht werden und die Flussrichtung korrekt ist. Da der Test bei abgeschaltetem Biomassekessel erfolgte, zeigte sich auch hier eine ähnliche Schwierigkeit, wie bei den Wärmepumpen: Das geschlossene Ventil der Rücklaufanhebung des Biomassekessels führte dazu, dass der hydraulische Pfad in Richtung Biomassekessel verschlossen war. Dadurch baute sich ein Gegendruck für die Pumpen der Wärmepumpen auf, was wiederum zu einer Abschaltung der Pumpen führte. Um dies zu verhindern, darf das Pufferladeventil im Vorlauf der Wärmepumpen nur bei Betrieb des Biomassekessels in dessen Richtung geschaltet werden. Bei einem Stillstand des Biomassekessels ist das Ventil in Richtung Pufferspeicher zu stellen.

Dreiwegeventil Biomassekessel

Der dritte Funktionstest erfolgt für die Rücklaufanhebung des Biomassekessels. Dabei ist zu prüfen, ob die Wirkrichtung des Reglers richtig eingestellt ist und das Beimischen des Vorlaufes in den Rücklauf in korrekter Weise umgesetzt wird. Beim Test ergaben sich keine nennenswerten Schwierigkeiten.

5.5.3 Start des Gesamtsystems

Da in weiterer Folge alle für den Betrieb wesentlichen Komponenten getestet wurden, kann das Gesamtsystem gestartet werden und die Ansteuerung der Komponenten übernehmen. Die Inbetriebnahme erfolgt getrennt für den Winter- und den Sommerbetrieb, da jeweils andere Rahmenbedingungen und Zielsetzungen gegeben sind.

Winterbetrieb

Im Winterbetrieb wird die Lastvorgabe und die Regelung des Biomassekessels überprüft. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf einer fehlerfreien Lastprädiktion und auf der Regelung der Rücklauftemperatur des Biomassekessels.

Gleich zu Beginn des Betriebes zeigte sich, dass das Wärmenetz trotz geringer Last nicht durch den Biomassekessel versorgt werden konnte und oft der Spitzenlastkessel aktiviert werden musste. Durch den Wärmemengenzähler konnte der Fehler schnell identifiziert werden: Der Durchfluss durch den Biomassekessel betrug $10\text{m}^3/\text{h}$ anstatt der benötigten $45\text{m}^3/\text{h}$. Da keine geschlossenen Ventile

oder andere Hindernisse die Strömung blockierten, wurde eine defekte Kesselkreispumpe als Ursache identifiziert. Nach dem Tausch konnte der erforderliche Durchfluss wieder erreicht werden.

Sommerbetrieb

Im Sommerbetrieb übernimmt die Wärmepumpe die gesamte Versorgung des Fernwärmenetzes und wird automatisch je nach Tageszeit und Pufferfüllstand gestartet und gestoppt. Beim ersten Start der Wärmepumpen im Sommer 2017 zeigten sich folgende Schwierigkeiten:

Auch bei niedriger Leistung im Wärmenetz von unter 100kW stellte sich ein Durchfluss ein, der über 20m³/h und damit über dem Durchfluss der Wärmepumpen lag. Dadurch wurde zu den 14m³/h aus den Wärmepumpen stets ein Teilstrom aus dem Pufferspeicher ins Fernwärmenetz gefördert und die Vorlauf-temperatur der Wärmepumpen abgesenkt. Oft reichte diese Temperatur für die Versorgung nicht mehr aus und der Spitzenlastkessel wurde angefordert, obwohl die Nennleistung der Wärmepumpen noch nicht erreicht wurde.

Die Lösung dieses Problems erfordert einen Umbau bzw. eine Einregulierung der Übergabestationen bei den angeschlossenen Wärmeabnehmern. Dieser wurde im Frühjahr 2018 durchgeführt. Im Zuge dieses Umbaus wurde auch die Netzpumpe und deren Regelung überprüft. In den Auswertung von April 2018 (siehe Kapitel 6.3) sind bereits Auswirkungen der Umbaumaßnahmen im Netzdurchfluss ersichtlich.

Kapitel 6

Ergebnisse

Nach der erfolgten Umsetzung der beschriebenen Maßnahmen sollen in diesem Kapitel die daraus resultierenden Ergebnisse gezeigt und diskutiert werden. Die Zielsetzungen des Projektes aus Kapitel 2 dienen als Grundlage für die Diskussion. Diese sind:

- Ganzjährige Wärmeversorgung des Wärmenetzes
- Senkung des Verbrauchs von Energieträgern aus fossilen Quellen
- Reduktion der Emissionen und des Brennstoffeinsatzes des Biomassekessels
- Unterstützung des regionalen Stromnetzes mithilfe einer zusätzlich im Wärmenetz eingebauten Wärmepumpe

Der Anlagenbetrieb wird anhand von grafischen Auswertungen analysiert und mit dem Betriebsverhalten vor der Projektumsetzung verglichen. Die Daten im Betrieb werden derzeit im Sekundentakt aufgezeichnet. Die Schwierigkeit liegt darin, dass vor dem Optimierungsprojekt keine Datenaufzeichnung durchgeführt wurde. Als Grundlage für den Vergleich dienen daher die Daten und Abbildungen aus Kapitel 4. In Abbildung 4.6 sind die mittleren monatlichen Leistungen der Wärmeerzeuger über drei Jahre von 2013 bis 2015 dargestellt. Die erzeugten Wärmemengen von diesem Vergleichszeitraum werden mit den Daten nach der Projektumsetzung verglichen. Bis jetzt liegen Aufzeichnungen über sechs Monate vor, von Dezember 2017 bis Mai 2018. In Abbildung 6.1 sind die gesamt produzierten Wärmemengen von Dezember bis Mai der Jahre 2012/13, 2013/14, 2014/15 und 2017/18 gegenübergestellt. Der Balken Stromheizung/Wärmepumpe steht in den Jahren vor dem Optimierungsprojekt für die dezentralen Stromheizungen bei den Kundenstationen und nach der Projektumsetzung für die produzierte Energiemenge der Wärmepumpen.

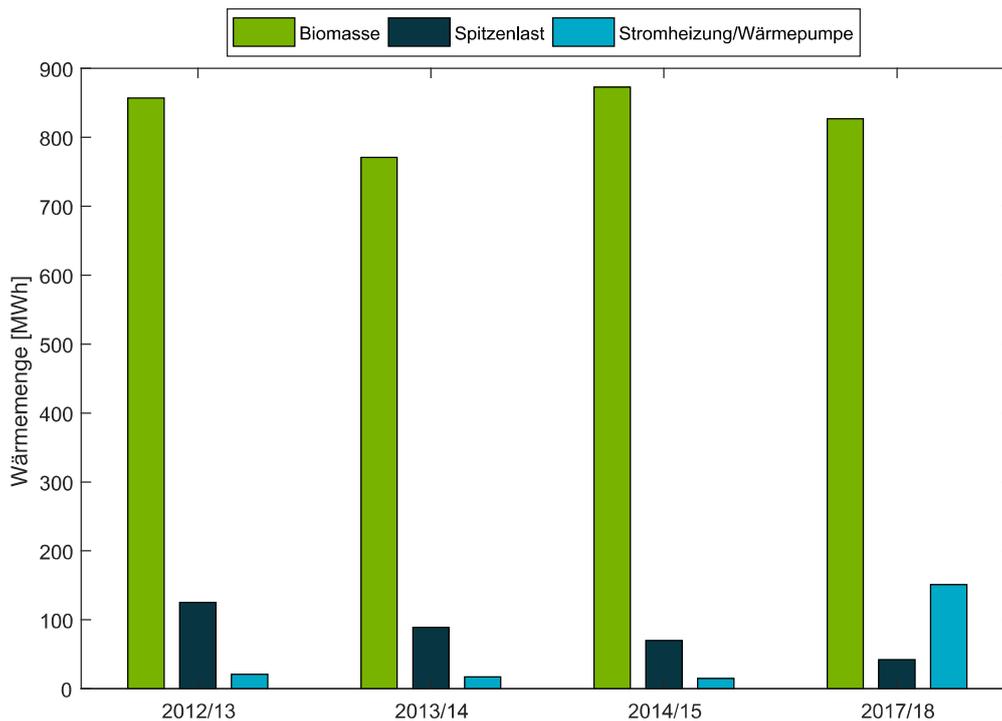


Abbildung 6.1: Vergleich der produzierten Wärmemengen von Dezember bis Mai

Hier zeigt sich, dass der Spitzenlastkessel nach der Projektumsetzung weniger Energie erzeugt hat als in den Jahren zuvor und damit eine Reduktion der Energiebereitstellung aus fossilen Quellen erreicht werden konnte. Außerdem ist erkennbar, dass der Biomassekessel im Betrachtungszeitraum den weitaus größten Anteil der Energiemenge produziert und dass die gesamte produzierte Wärmemenge im Betrachtungszeitraum, jeweils die Summe der drei Balken, relativ konstant ist. Diese geringen Unterschiede sind hauptsächlich durch unterschiedliche Witterungsbedingungen in den verschiedenen Jahren zu erklären.

Weiters ist zu beobachten, dass die Wärmepumpen deutlich mehr Wärme produzierten, als die Stromheizungen im Vergleichszeitraum 2013-2015. Dies beruht darauf, dass die Wärmepumpen bereits in der Übergangszeit betrieben werden und in dieser Zeit die Wärme bereitstellen, die in den Jahren davor vom Biomassekessel in starker Teillast oder vom Spitzenlastkessel abgedeckt werden musste.

Um die Unterschiede in der Energieproduktion der einzelnen Erzeuger zu verdeutlichen, sind in Abbildung 6.2 die Energiemengen in Prozent der Gesamtproduktion und nach Erzeuger sortiert aufgetragen.

Obwohl die gesamt produzierte Energie des Biomassekessels nahezu gleich blieb, zeigt sich, dass der Anteil der vom Biomassekessel und vom Spitzenlastkessel

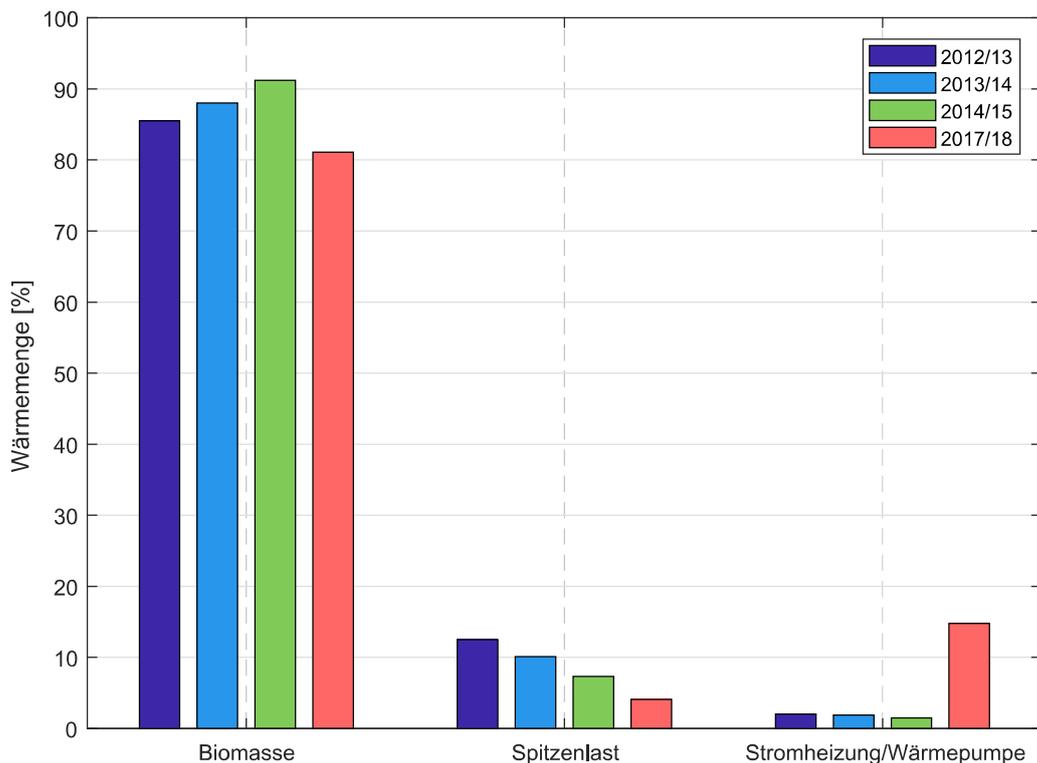


Abbildung 6.2: Vergleich der produzierten Wärmemengen nach Erzeuger in Prozent

erzeugten Energiemenge reduziert und zu den Wärmepumpen verschoben wurde. Dies lässt darauf schließen, dass Betriebszeiten des Biomassekessels mit geringer Last und potenziell erhöhten Gluterhaltungszeiten verringert wurden und damit auch die Emissionen reduziert werden konnten. Aufgrund der nicht vorhandenen dauerhaften Emissionsmessung kann der Nachweis dafür nicht erbracht werden.

Die ganzjährige Wärmeversorgung, ein wesentliches Projektziel, ist nun durch die Kombination aus Biomassekessel, Wärmepumpe und den Spitzenlastkessel zur Absicherung, realisiert. Die Analyse der drei jahreszeitlich getrennten Betriebsarten Sommerbetrieb, Winterbetrieb und Übergangsbetrieb wird in den folgenden Kapitel durchgeführt. Dabei wird auf die jeweils spezifischen Anforderungen eingegangen und einige Betriebsfälle detailliert dargestellt. Der Sommerbetrieb im Jahr 2017 während der Inbetriebnahme kann nur als Testbetrieb bewertet werden, die Datenaufzeichnung wurde erst danach installiert.

6.1 Sommerbetrieb

Vor der Projektumsetzung war das Fernwärmenetz im Sommerbetrieb nicht aktiv, die Verbraucher wurden dezentral durch strombeheizte Boiler mit Warmwasser versorgt. Somit wurde die gesamte verbrauchte Wärmeenergie aus elektrischer Energie bereitgestellt.

Das Ziel für den Sommerbetrieb in den Monaten Juni bis August ist die vollständige Wärmeversorgung des Fernwärmenetzes durch die installierten Wärmepumpen. Dabei soll eine möglichst hohe Systemeffizienz erreicht und Überschussstrom aus den installierten PV-Modulen verwendet werden. Da der Stromzähler zur Ermittlung der Leistungsaufnahme der Wärmepumpen noch nicht installiert war und der Einstrahlungssensor zur Erfassung der solaren Einstrahlungsstärke erst am Ende des Jahres 2017 eingebaut wurde, kann über die Systemeffizienz und die Verwendung von PV-Strom im Sommer zu diesem Zeitpunkt, das heißt in dieser Diplomarbeit, keine qualifizierte Aussage getroffen werden.

Der durchgehende Betrieb des Fernwärmenetzes konnte gewährleistet werden, jedoch offenbarte der Betrieb im Sommer auch Schwierigkeiten. Da die Übergabestationen bei den Kunden nicht für den Sommerbetrieb konzipiert waren, stellte sich ein zu hoher Durchfluss im Wärmenetz ein, dieser war höher als der Durchfluss durch die Wärmepumpen. Dadurch konnte der Pufferspeicher nicht beladen werden, sondern es erfolgte eine stetige Durchströmung des Pufferspeichers von unten nach oben. Dies führte weiters dazu, dass stets ein Teilstrom aus dem Pufferspeicher in den Vorlauf des Fernwärmenetzes beigemischt wurde und dieser dadurch absank. Als Folge kam es zu Zuschaltungen des Spitzenlastkessels, die aufgrund der geringen Leistung im Netz nicht erforderlich gewesen wären.

Im ersten Schritt wurden daher die Hydraulikpumpen der Wärmepumpen getauscht, da diese den vorgesehenen Volumenstrom von $14\text{m}^3/\text{h}$ nicht erreichten. Außerdem wurde die Überprüfung und die Einregulierung der Übergabestationen im Fernwärmenetz gestartet, um in der nächsten Sommerbetriebsperiode die gewünschte Versorgung gewährleisten zu können. In der nächsten Sommerperiode sollten diese Probleme damit nicht mehr auftreten.

Eine weitere systembedingte Schwierigkeit bei der Wärmeversorgung im Sommer stellen die relativ hohen Wärmeverluste im Netz dar, die nicht wesentlich niedriger sind als im Winter, jedoch bei deutlich reduzierter gelieferter Wärmemenge. Dadurch ist die Energieeffizienz des Wärmenetzes im Sommer deutlich niedriger als im Winter und die höhere Effizienz der zentralen Wärmepumpen im Vergleich zu dezentralen Heizstäben zum Teil wieder geschmälert.

6.2 Winterbetrieb

Für die Analyse des Winterbetriebes wird die Zeit vom 15. Februar bis zum 28. Februar 2018 herangezogen. Dieser Zeitraum enthält typische kalte Wintertage, in denen eine hohe Leistung im Fernwärmenetz bezogen wird. In Abbildung 6.3 ist die Netzleistung und darunter die Außentemperatur der kälteren der beiden Wochen aufgetragen. Der Mittelwert (MEAN) der Netzleistung liegt bei nur 351,9kW, was der Hälfte der Nennleistung des Biomassekessels beträgt. Und das, obwohl die Außentemperatur fast ausschließlich unter 0°C ist.

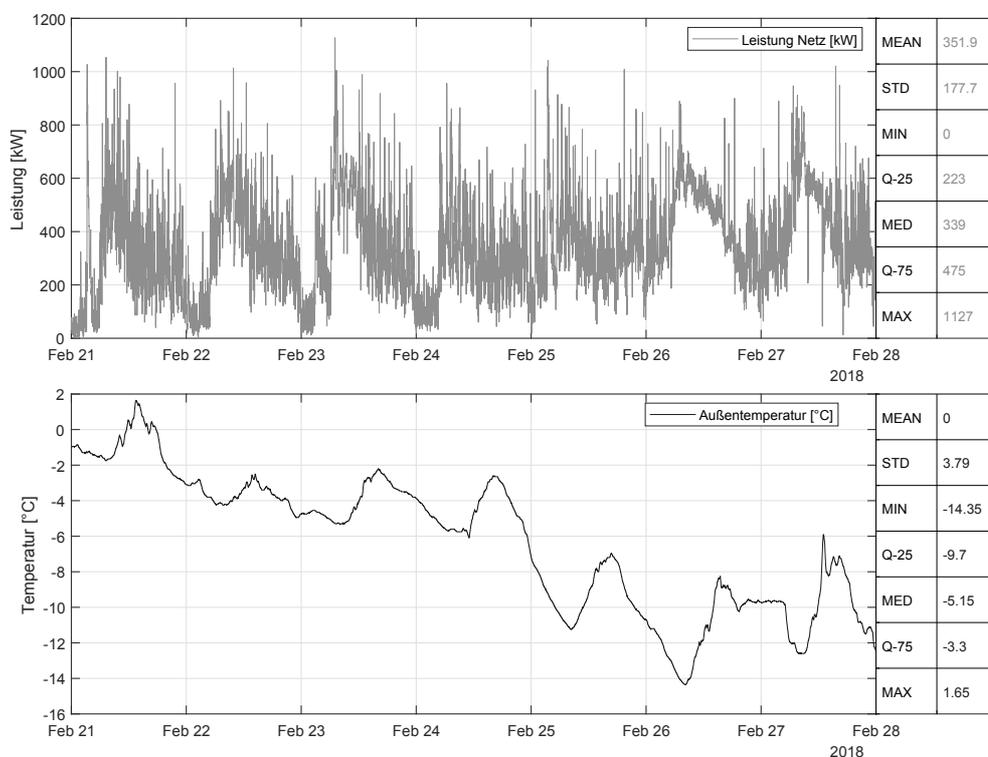


Abbildung 6.3: Leistung und Außentemperatur, Februar 2018

Ein Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Netzleistung lässt sich aus dieser Grafik erahnen. Um diesen Zusammenhang deutlicher zu machen, wird eine Korrelation zwischen Außentemperatur und Netzleistung über den gesamten Betrachtungszeitraum, 15. bis 28. Februar, durchgeführt. In Abbildung 6.4 ist jeder Leistungswert der jeweiligen Außentemperatur zu diesem Zeitpunkt zugeordnet. Jeder Punkt entspricht einem Minutenmittelwert von Leistung und Temperatur.

Mithilfe von Matlab kann nun eine lineare Regression berechnet werden. Diese Regressionslinie zeigt eine deutlich steigende Leistung bei sinkender Außentem-

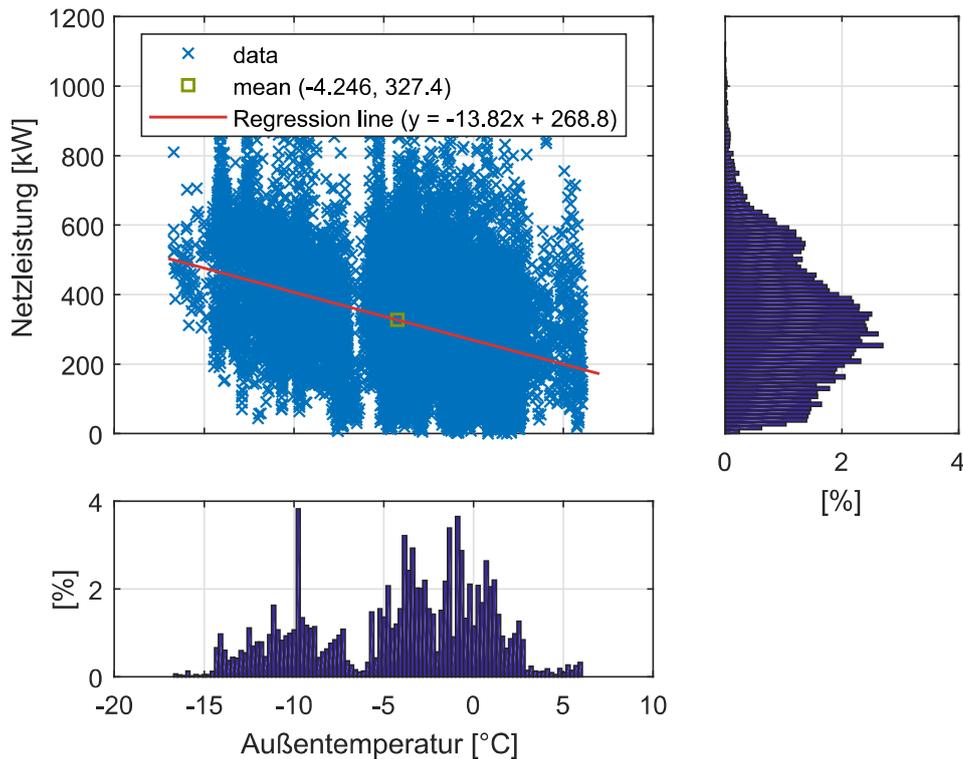


Abbildung 6.4: Korrelation zwischen Leistung und Außentemperatur

peratur. Ein weiterer interessanter Aspekt dieser Auswertung ist die prozentuale Verteilung der Leistungswerte im rechten oberen Bild. Hier wird deutlich, dass ab einer Leistung von 600 kW nach oben hin die Anzahl der Werte deutlich abnimmt und über 800 kW nur mehr vereinzelte Werte auftauchen.

6.2.1 Leistungsprofil

Zur weiteren Analyse wird nun ein einzelner, sehr kalter Wintertag, der 26.02.2018 herangezogen, um die tageszeitlichen Schwankungen besser herausarbeiten zu können. Der Winterbetrieb in Köstendorf zeichnet sich durch eine große morgendliche Verbrauchsspitze aus, welche um etwa 6:30 Uhr beginnt. Ab der Leistungsspitze am Morgen sinkt die Leistung über den Tag stetig ab. Am Abend und in der Nacht ist die Leistung am geringsten, wie in Abbildung 6.5 ersichtlich ist. Auch an diesem sehr kalten Wintertag bleibt der Mittelwert der Netzleistung deutlich unter der Nennleistung des Biomassekessels.

Dieses Profil der Abnahmeleistung im Wärmenetz stimmt in etwa mit dem abgeschätzten Profil aus der Voruntersuchung überein, welchen in Abbildung 4.7

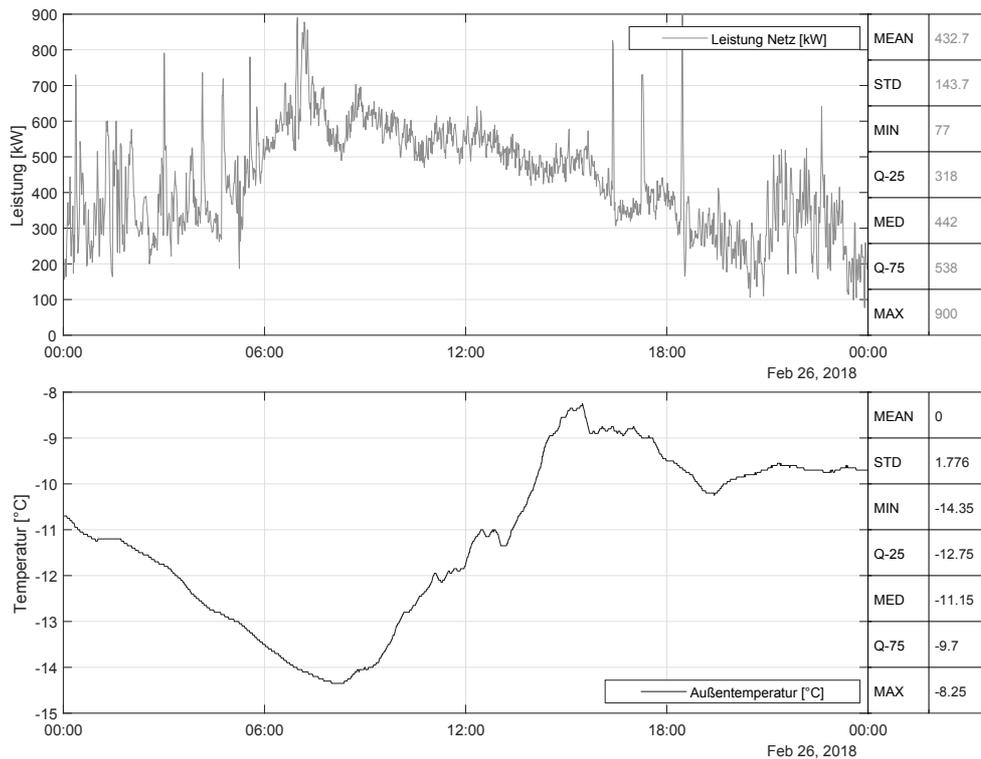


Abbildung 6.5: Lastprofil Winter, Februar 2018

dargestellt ist.

6.2.2 Leistungsprädiktion

Um die definierten Ziele des Optimierungsprojektes für den Winterbetrieb, die Vermeidung des Einsatzes von Energie aus fossilen Quellen, sowie die Vermeidung von Gluterhaltungszeiten des Biomassekessels, zu erreichen, ist es erforderlich, den Pufferspeicher zu nutzen, um Lastspitzen im Netz abdecken zu können und bei geringer Last die überschüssige Energie in diesem speichern zu können. Dafür wurde eine Leistungsprädiktion entwickelt, welche aus der Netzleistung der Vergangenheit und dem aktuellen Pufferfüllstand eine Vorgabeleistung für den Biomassekessel errechnet. Diese Leistung wird in eine Rücklauftemperatur umgerechnet, und die Rücklauftemperatur mittels des Beimischventils geregelt. Zur Beurteilung der Qualität von Leistungsberechnung, Leistungsvorgabe und Rücklauftemperaturanhebung werden aus den aufgezeichneten Daten Trends erstellt, welche auf den folgenden Seiten diskutiert werden.

Die Leistungsprädiktion ist detailliert in Kapitel 5.3.2 beschrieben. In Abbildung

6.6 ist die Vorgabeleistung aus dem Modell mit der tatsächlichen Netzlast gegenüber gestellt. Im oberen der beiden Plots ist außerdem die Vorgabeleistung an den Biomassekessel dargestellt. Der untere Plot zeigt die Pufferladung.

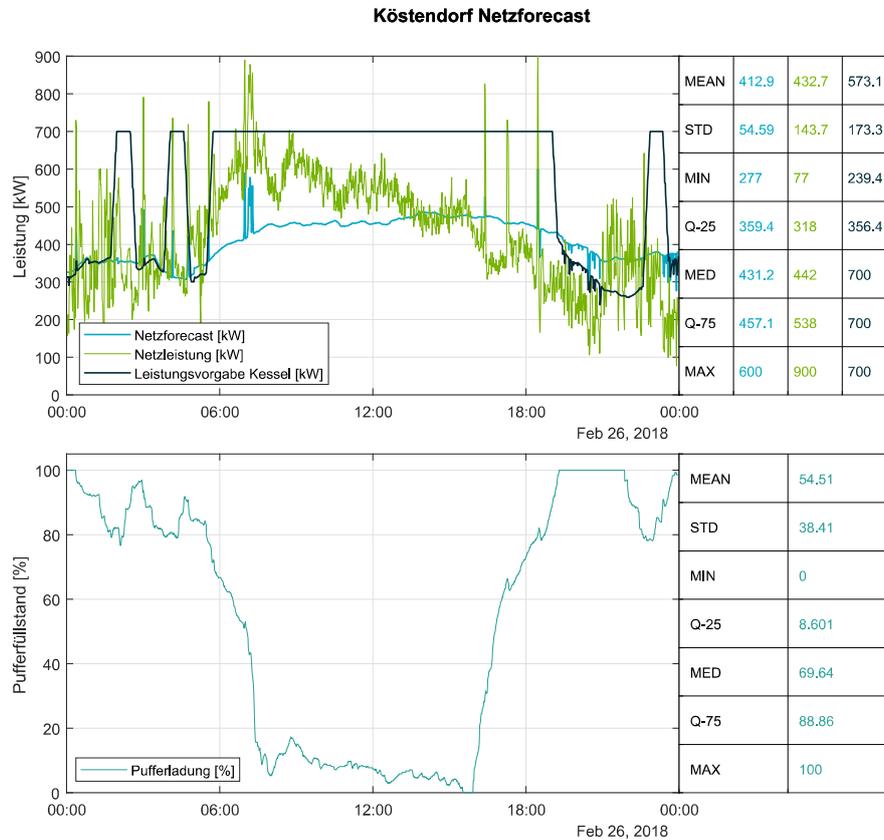


Abbildung 6.6: Validierung Forecastmodell

Aufgrund der niedrigen Außentemperatur und der Gefahr einer Unterversorgung im Netz, wurde vom Operator der minimale Pufferfüllstand mit 85% eingestellt. Sinkt der tatsächliche Füllstand unter diesen Wert, so wird dem Kessel die Maximalleistung vorgegeben, unabhängig vom derzeit ausgegebenen Forecastergebnis.

Bei tiefen Temperaturen und damit einhergehender hoher Netzleistung erweist sich diese Einstellung als sinnvoll, da selbst bei gefülltem Pufferspeicher die Netzlast zu jeder Zeit ausreicht, damit der Biomassekessel nicht im Gluterhaltungsbetrieb laufen muss. In dieser Zeit hilft es, den Pufferspeicher möglichst befüllt zu halten, damit der Einsatz des Spitzenlastkessels auf ein Minimum reduziert werden kann. In Abbildung 6.7 wird dies noch einmal verdeutlicht. In der Woche von 21.02. bis 28.02.2018 wurde der Spitzenlastkessel im Mittel mit 12,66kW betrieben, was bezogen auf die Netzleistung einem Anteil von ca. 3% entspricht. Dieser Wert ergibt sich daraus, dass der Spitzenlastkessel zumeist abgestellt war und nur dreimal kurz betrieben werden musste.

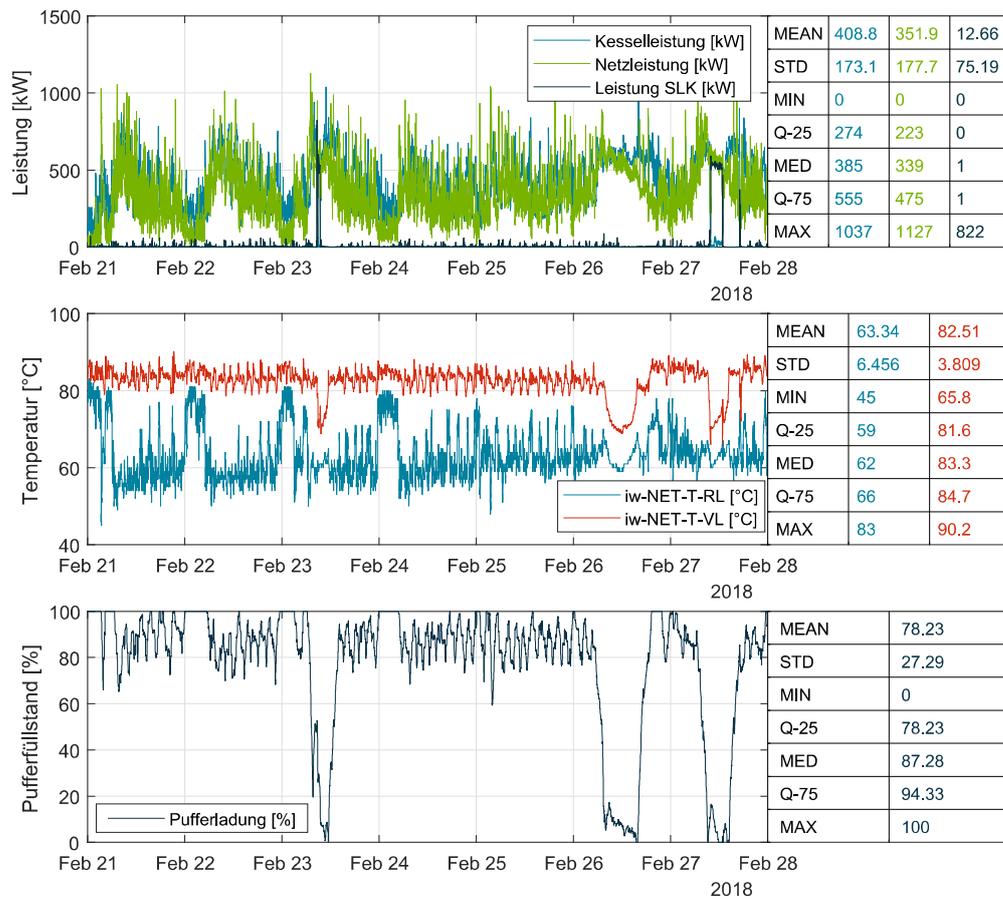


Abbildung 6.7: Gegenüberstellung Erzeuger und Verbraucher

Der Ölkessel muss erst aktiviert werden, wenn der Puffer entleert ist, siehe unterster Trend, und infolge die Vorlauftemperatur ins Fernwärmenetz unter einen definierten Grenzwert absinkt. Dies passiert, wenn die Netzleistung über längere Zeitdauer über der Maximalleistung des Biomassekessels bleibt, oder der Biomassekessel eine Störung aufweist.

6.2.3 Leistungsvorgabe Biomassekessel

Die errechnete Leistungsvorgabe für den Biomassekessel muss nun an den Biomassekessel übergeben werden und sollte von diesem möglichst gut erbracht werden. Um vom Kessel die gewünschte Leistung zu erhalten, wird bei stets konstantem Kesseldurchfluss und fest eingestellter Vorlauftemperatur die Rücklauftemperatur entsprechend verändert, wie in Kapitel 5.1.1 erläutert.

In Abbildung 6.8 werden Leistungsvorgabe an den Kessel und die tatsächliche

Kesselleistung gegenübergestellt (oberer Plot). Weiters sind Rücklauftemperaturvorgabe und tatsächliche Rücklauftemperatur abgebildet (mittlerer Plot), sowie im unteren Graphen die Position des Dreiwegeventils und deren Vorgabe. Es zeigt sich, dass die vorgegebene Kesselleistung gut vom Kessel erbracht werden kann. Jedoch wird die geforderte Kesselnennleistung von 700kW nicht dauerhaft erreicht.

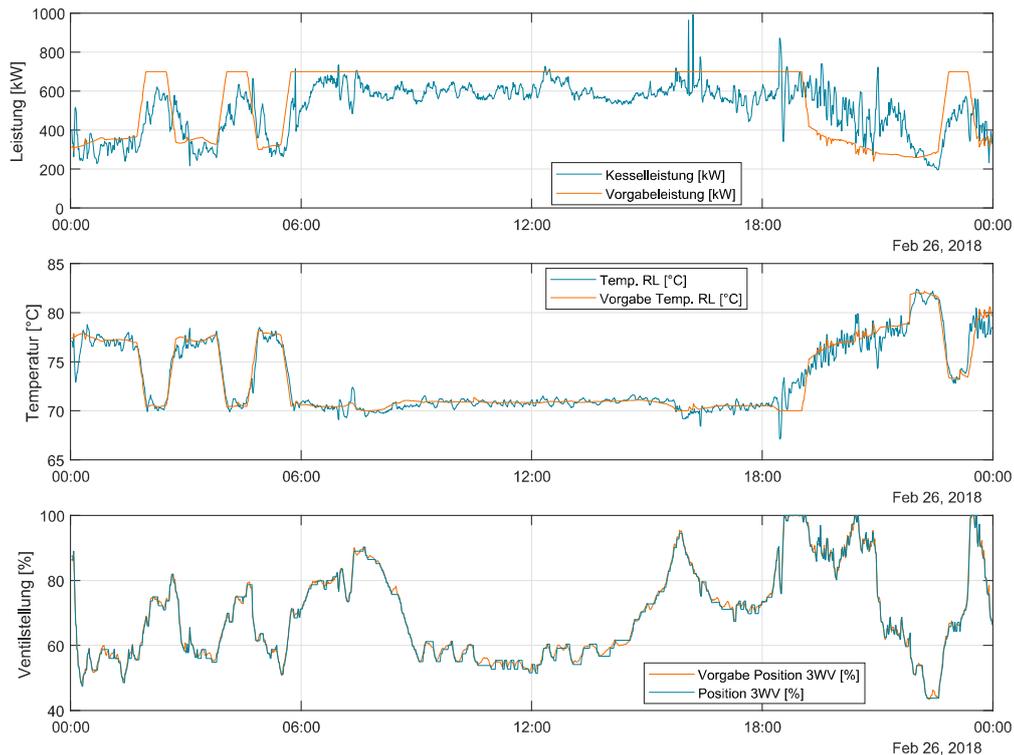


Abbildung 6.8: Umsetzung Forecastmodell

Außerdem ist zu erkennen, dass die Rücklauftemperatur über die installierte Rücklaufanhebung sehr gut zu regeln ist und zwischen Soll- und Ist-wert nur sehr geringe Abweichungen bestehen.

Ein weiterer Punkt, der hervorgehoben werden soll, ist der schwingungsfreie Betrieb des Dreiwegeventils, welches auch bei starken Auslenkungen nur geringe Überschwingungen zeigt.

6.3 Übergangsbetrieb

Als Übergangsbetrieb wird jene Betriebsphase des Erzeugerverbundes bezeichnet, in welcher der Biomassekessel nicht mehr durchgehend betrieben werden

6.3. ÜBERGANGSBETRIEB

kann, da das Leistungsniveau im Wärmenetz dafür zu gering ist. Die Schwierigkeit der Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpe liegt in dieser Zeit darin, dass an manchen Tagen noch hohe Morgenspitzen auftreten und durch Temperaturen unter 10°C Abtauvorgänge an den Verdampferregistern der Luftwärmepumpen erforderlich sind.

Für eine detaillierte Betrachtung wird als Referenzzeitraum die Woche vom 12. bis zum 19. April 2018 herangezogen. In Abbildung 6.9 sind Netzleistung, solare Einstrahlung und Außentemperatur in dieser Zeitperiode eingetragen. Hier zeigt sich, dass bereits zu dieser Jahreszeit hohe Einstrahlungsleistungen von bis zu 1000W/m² erreicht werden, was den Einsatz der Wärmepumpen aufgrund des erhöhten lokal verfügbaren Ökostroms aus Photovoltaikanlagen begünstigt.

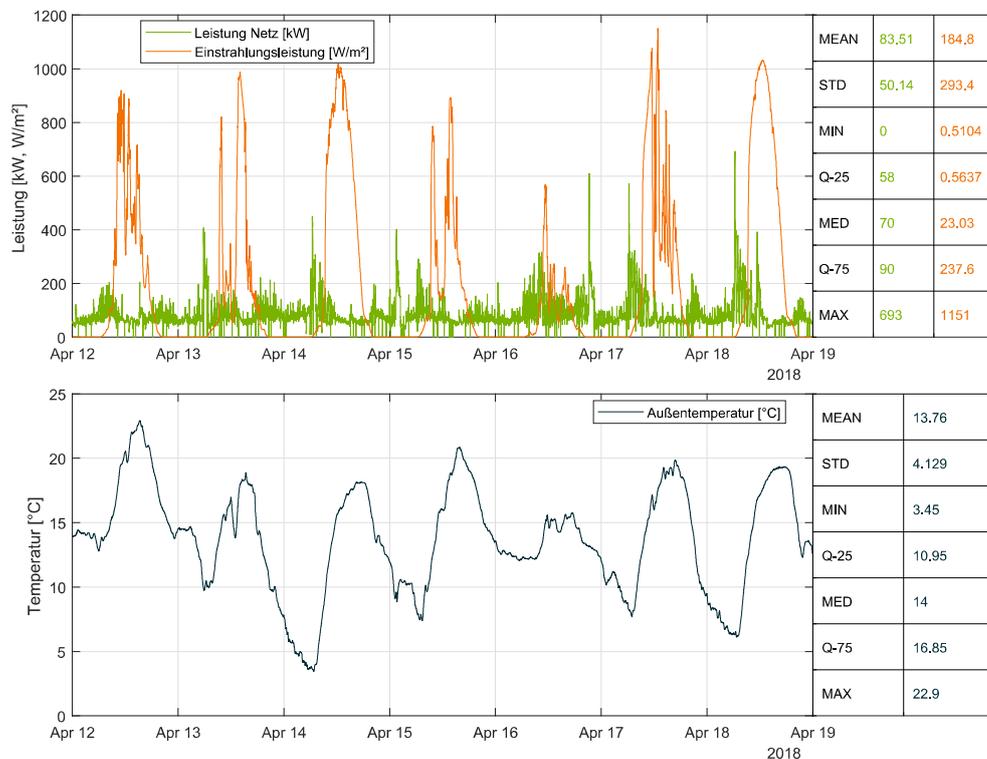


Abbildung 6.9: Vergleichszeitraum Übergangsbetrieb

6.3.1 Tagesprofil

Betrachtet man einen Tag genauer, fällt auf, dass die Einstrahlung zuerst steil ansteigt, den Höhepunkt kurz nach 12:00 Uhr mittags erreicht und danach kontinuierlich wieder abfällt, wie in Abbildung 6.10 dargestellt ist. Die Außentemperatur

eilt diesem Verlauf nach. Das Temperaturmaximum erreicht seinen Höhepunkt erst später am Nachmittag und fällt erst deutlich ab, wenn die Einstrahlung bereits fast auf Null gesunken ist.

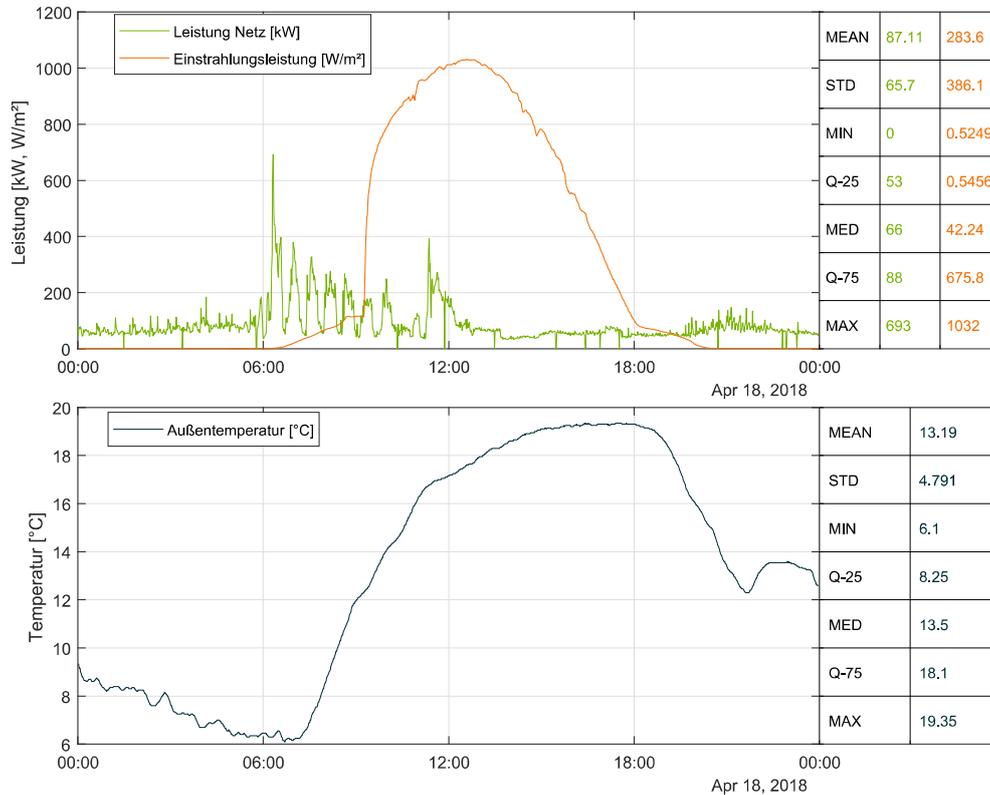


Abbildung 6.10: Einstrahlung, Außentemperatur und Netzleistung im Tagesverlauf am 18. April 2018

In Bezug auf den Betrieb der Wärmepumpen hat dies mehrere Auswirkungen. Hohe Einstrahlung bringt ein erhöhtes Angebot an Photovoltaikstrom und damit günstige Bedingungen für den Betrieb der Wärmepumpen. Eine hohe Außentemperatur begünstigt den Betrieb durch den geringeren benötigten Temperaturhub und damit bessere Leistungszahlen. Jedoch kommt hierbei noch ein dritter Aspekt zum Tragen. Betrachtet man die Netzleistung, ist zu erkennen, dass die meiste Energie in den Morgenstunden gebraucht wird und damit zu einer Zeit, in der weder Einstrahlung noch hohe Außentemperaturen vorherrschen. Will man diese Morgenspitze aus dem Pufferspeicher abdecken und somit Öleinsatz verhindern, muss der Puffer in der Nacht gefüllt werden. Somit kann beim Betrieb der Wärmepumpen in der Übergangszeit nicht auf Einstrahlung und Außentemperatur Rücksicht genommen werden und der Versorgungssicherheit wird die höchste Priorität eingeräumt.

6.3.2 Versorgung und Wärmepumpenleistung

Die Wärmepumpen laufen daher in der Übergangszeit im Dauerbetrieb und produzieren die im Netz benötigte Leistung. In Abbildung 6.11 ist die Versorgungssituation an einem für die Übergangszeit typischen Tag dargestellt. Der Trend ganz unten zeigt die hydraulischen Durchflüsse in Wärmenetz und durch die Wärmepumpen, sowie die Außentemperatur. Der mittlere Trend zeigt Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpen und die Pufferladung. In der obersten Grafik sind die Leistungen von Netz, Wärmepumpen und Spitzenlastkessel gegenübergestellt. Dabei ist gut zu erkennen, wie in der Morgenspitze der Pufferspeicher stückweise entleert wird und die Wärmepumpen in dieser Zeit ihre Nennleistung von 200kW nicht erreichen, obwohl sich ihre Vorlauftemperaturen unter dem eingestellten Sollwert von 80°C bewegen. Jedoch ist die gespeicherte Energiemenge im Pufferspeicher ausreichend, sodass kein Spitzenlastkesselseinsatz erforderlich ist. Nach dem Absinken der Netzleistung wurde der Puffer wieder gefüllt und kann somit eine neuerliche Leistungsspitze abpuffern.

Betrachtet man die Durchflüsse im Fernwärmenetz, fällt auf, dass diese starken Schwankungen und Sprüngen unterliegen, was auf unstetes bzw. sprunghaftes Verhalten der Übergabestationen hinweist. Diese müssen im Rahmen der weiteren Optimierung für den Sommerbetrieb und die geringen Lasten angepasst werden.

6.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die wichtigsten Projektziele erreicht wurden.

- Ganzjährige Wärmeversorgung des Wärmenetzes
- Senkung des Verbrauchs von Energieträgern aus fossilen Quellen von durchschnittlich 10% auf unter 3% im Vergleichszeitraum
- Reduktion der Emissionen und des Brennstoffeinsatzes des Biomassekessels durch Reduktion der Schwachlastzeiten in der Übergangszeit
- Unterstützung des regionalen Stromnetzes mithilfe einer zusätzlich im Wärmenetz eingebauten Wärmepumpe

Durch die Parametrierebene und die sekundliche Datenaufzeichnung wird mehr Information bereitgestellt, die für zukünftige Entscheidungen herangezogen wer-

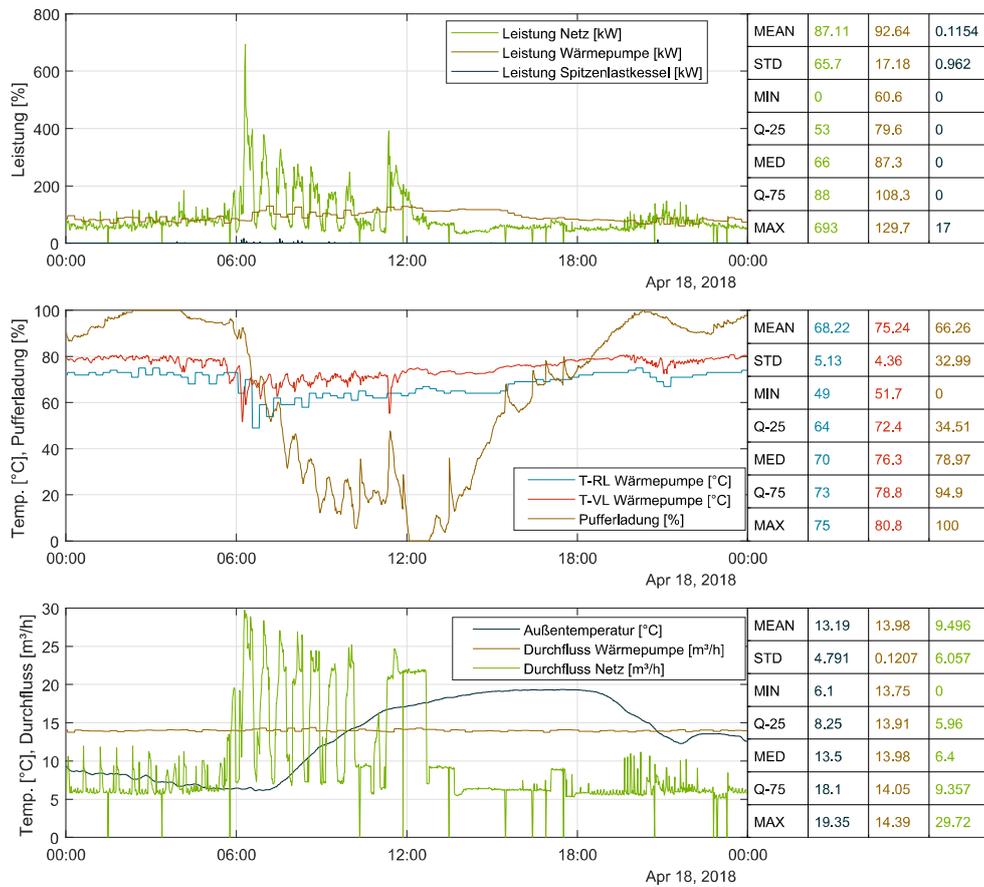


Abbildung 6.11: Übergangsbetrieb im Tagesverlauf am 18. April 2018

den kann. Jedoch konnten manche Ziele nur zum Teil erfüllt werden. So konnten die Lastschwankungen des Biomassekessels nicht vollständig eliminiert werden und auch der Einsatz der Wärmepumpen erfolgt noch nicht zielgerichtet nach Zustand des örtlichen Stromnetzes. Hier fehlt zum Einen die Information über Strom- und Spannungszustand des Netzes und zum Anderen wird es noch einige Betriebszeit und Beobachtung brauchen, um den Pufferspeicher bestmöglich auszunutzen und den idealen Zeitpunkt für die Aktivierung der Wärmepumpen zu finden.

Insgesamt zeigt dieses Projekt, wie durch die Kombination mehrerer Wärmeerzeuger die Stärken verschiedener erneuerbarer Energieträger ideal verbunden werden und dabei eine effiziente ganzjährige Wärmeversorgung sichergestellt werden kann. Im Sommer erzielt eine Wärmepumpe höchste Wirkungsgrade und nutzt zudem den verfügbaren Strom aus Sonnenenergie. Im Winter, bei fehlendem Angebot an Strom aus Wasserkraft und Photovoltaik, kann die im Holz gespeicherte Sonnenenergie für die Wärmeversorgung genutzt werden.

Literatur

BACnet ASHRAE (2018). *BACnet/IP - Some basic design criteria...* URL: <http://www.bacnet.org/Tutorial/BACnetIP/sld002.html> (besucht am 11. 01. 2018).

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG (2018). *Strukturierter Text (ST)*. URL: <https://infosys.beckhoff.com/index.htm> (besucht am 12. 01. 2018).

Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (2017). *Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln - der Energieholz-Index*. URL: <https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel> (besucht am 03. 01. 2018).

Conolly, D. u. a. (2014). "Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system". In: *Energy Policy* 65, S. 475–489.

Endress+Hauser Management AG (2018). *RTD - Widerstandsthermometer: Messprinzip*. URL: <https://www.at.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/Temperaturmesstechnik-thermometer-transmitter/Hochtemperatur-Thermometer> (besucht am 09. 01. 2018).

Kaltschmitt, Martin, Hans Hartmann und Hermann Hofbauer (2009). *Energie aus Biomasse*. Heidelberg: Springer.

Kaltschmitt, Martin und Wolfgang Streicher (2009). *Regenerative Energien in Österreich*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Kaltschmitt, Martin, Wolfgang Streicher und Andreas Wiese (2013). *Erneuerbare Energien*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Konstantin, Panos (2007). *Praxisbuch Energiewirtschaft*. Berlin: Springer.

- KROHNE Messtechnik GmbH (2018). *Ultraschall-Durchflussmessgeräte – Messprinzip*. URL: <https://us.krohne.com/de/produkte/durchflussmessung/ultrasonic-flowmeters/messprinzip/> (besucht am 10.01.2018).
- Lund, Henrik u. a. (2014). “4th Generation District Heating (4GDH)”. In: *Energy* 68, S. 1–11. URL: <http://www.elsevier.com/locate/energy>.
- Ohnmacht, Ralf (2016). *Energiecheck Köstendorf*. Techn. Ber. VOIGT+WIPP Engineers.
- TRITEC Services AG (2018). *Spektron Einstrahlungssensoren*. URL: <http://www.tritec-energy.com/de/kontroll-und-messgeraete/spektron-einstrahlungssensoren-c-66/> (besucht am 10.01.2018).
- Van Loo, Sjaak und Jaap Koppejan (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London: Earthscan.
- Viessmann Gesellschaft m.b.H. (2018). *Vitoflex 300-FSB - Holzfeuerungsanlage mit Flachschrubrostfeuerung*. URL: <https://www.viessmann.at/de/gewerbe/Festbrennstoffkessel/holzfeuerungsanlagen/vitoflex-300-fsb.html> (besucht am 04.01.2018).
- Wesselak, Viktor und Thomas Schabbach (2009). *Regenerative Energietechnik*. Heidelberg: Springer.
- WIKIPEDIA The Free Encyclopedia (2017). *BACnet*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/BACnet> (besucht am 11.01.2018).
- Zieger, Horst (1998). *The M-Bus: A Documentation*. URL: <http://www.m-bus.com/mbusdoc/md1.php> (besucht am 09.01.2018).

Abbildungsverzeichnis

3.1	Kohlenwasserstoff- und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen in Holzfeuerungen bei 11 Vol.-% Sauerstoff im Abgas (a Kaminofen geschlossen, b Stückholzkessel mit unterem Abbrand, c Unterschubfeuerung) (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 411).	9
3.2	Bildung von Brennstoff- NO_x , thermischem NO_x und promptem NO_x in Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur mit typischen Bereichen für Holz, Halmgüter und UF-Spanplatten (Richtwerte) (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 419).	10
3.3	Schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 503).	13
3.4	Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 520).	14
3.5	Muffeleinblasfeuerung (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 521).	15
3.6	Vorschubrostfeuerung (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 504).	16
3.7	Preisentwicklung bei Holzhackschnitzeln, Holzpellets, Heizöl und Erdgas 2014 bis 2017 (C.A.R.M.E.N. e.V. 2017).	18
3.8	Grafische Darstellung des Systems Wärmepumpe mit den Komponenten Verdichter, Verflüssiger, Drossel und Verdampfer. (Wesselak und Schabbach 2009, S. 271).	20
3.9	Prinzip einer Grundwasser-Wärmepumpenanlage (Kaltschmitt, Streicher und Wiese 2013, S. 650).	23
3.10	Verlegemuster horizontaler Wärmeübertrager (Kaltschmitt, Streicher und Wiese 2013, S. 642).	24

3.11	Anordnungsvarianten von vertikal verlegten gebohrten (a) und gerammten (b) Erdreichwärmeübertragern (Kaltschmitt, Streicher und Wiese 2013, S. 644).	25
3.12	Aufbau einer Fernwärmeversorgung (Konstantin 2007, S. 366). . .	26
3.13	Verlegung einer Fernwärmeleitung (vgl. Konstantin 2007, S. 371).	28
3.14	Vorgefertigte indirekte Hausübergabestation (Konstantin 2007, S. 376).	29
3.15	Beispiel einer Jahresdauerlinie eines ganzjährig betriebenen Fernwärmenetzes sowie mögliche Einsatzweise eines Biomassekessels (Kaltschmitt und Streicher 2009, S. 384).	30
4.1	Biomassekessel (Ohnmacht 2016, S. 5).	36
4.2	Querschnitt einer Flachschrubrostfeuerung (Viessmann 2018). . . .	37
4.3	Spitzenlastkessel mit Brenner (eigene Aufnahme)	39
4.4	Maßstäbliche Darstellung des Fernwärmenetzes (Ohnmacht 2016, S. 7).	40
4.5	Wärmeverbrauch und Wärmegebarung nach Monaten (Ohnmacht 2016, S. 8).	41
4.6	Wärmemenge nach Wärmeerzeuger (Ohnmacht 2016, S. 9).	42
4.7	Lastprofil eines Tages (Ohnmacht 2016, S. 9).	43
5.1	Beimischung Biomassekessel (Anhang A, Zeichnungsbereich C-E/3-4	47
5.2	Wärmepumpe Inneneinheiten	48
5.3	Wärmepumpe Außeneinheiten	49
5.4	Drei-Wege-Ventil Wärmepumpen (Anhang A, Zeichnungsbereich A/7	50
5.5	Pufferspeicher	51
5.6	Einbindung Pufferspeicher (Anhang A, Zeichnungsbereich B-D/5-7)	52
5.7	Montage Einstrahlungssensor	55
5.8	Eingabe Hysterese Sommerbetrieb	61
5.9	Berechnung Lastvorgabe aus Netzleistung	62

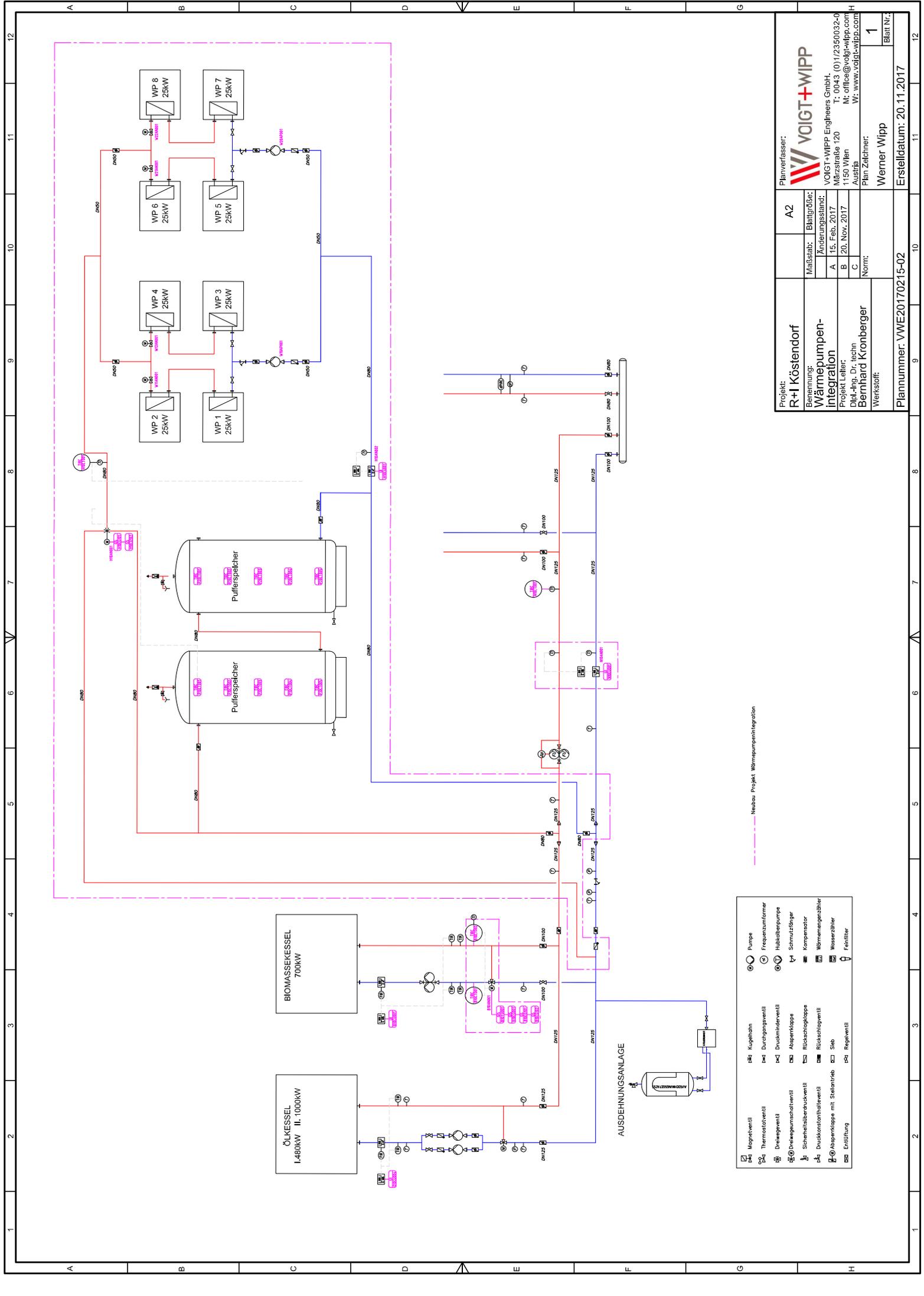
5.10	Übersichtsseite Hydraulik	68
5.11	Parameterseite Winterbetrieb	69
5.12	Parameterseite Stromnetzeinstellungen	70
5.13	Parameterseite Übersicht Wärmemengen 2017-2018	70
6.1	Vergleich der produzierten Wärmemengen von Dezember bis Mai .	79
6.2	Vergleich der produzierten Wärmemengen nach Erzeuger in Prozent	80
6.3	Leistung und Außentemperatur, Februar 2018	82
6.4	Korrelation zwischen Leistung und Außentemperatur	83
6.5	Lastprofil Winter, Februar 2018	84
6.6	Validierung Forecastmodell	85
6.7	Gegenüberstellung Erzeuger und Verbraucher	86
6.8	Umsetzung Forecastmodell	87
6.9	Vergleichszeitraum Übergangsbetrieb	88
6.10	Einstrahlung, Außentemperatur und Netzleistung im Tagesverlauf am 18. April 2018	89
6.11	Übergangsbetrieb im Tagesverlauf am 18. April 2018	91

Tabellenverzeichnis

3.2	Vergleich 4 Generationen von Fernwärmesystemen - Distribution and demand (Lund u. a. 2014, S. 5).	32
4.1	Technische Daten Biomassekessel, (vgl. Ohnmacht 2016, S. 5). . .	38
5.1	Übersicht Schnittstellen CX 5120	53
5.2	Leistungsvorgabe aus Lastprädiktion	63
5.3	Rahmenbedingungen für die Wärmeerzeuger	64
5.4	Signalliste Kommunikationstest Eingang (IN)	73
5.5	Signalliste Kommunikationstest Ausgang (OUT)	74

Anhang A

Hydraulikschemata



- | | | | | | |
|--|------------------------------|--|-------------------|--|-------------------|
| | Magnetventil | | Kugelhahn | | Pumpe |
| | Thermostatventil | | Durchgangsventil | | Frequenzumformer |
| | Druckventil | | Druckminderventil | | Hubkolbenpumpe |
| | Druckbegrenzventil | | Absperrklappe | | Schmutzfluger |
| | Sicherheitsüberdruckventil | | Rückschlagklappe | | Komperator |
| | Druckkonstantenventil | | Rückschlagventil | | Wärmemengenzähler |
| | Absperrklappe mit Stelltrieb | | Sieb | | Wasserszähler |
| | Entlüftung | | PS Reglerventil | | Feiltrichter |

--- Neubau Projekt Wärmepumpenintegration

Projekt: R+I Köstendorf		Planverfasser: VOIGT+WIPP	
Benennung: Wärmepumpenintegration		Maßstab: A2	Blattgröße: A
Projekt Leiter: Bernhard Kronberger		VOIGT+WIPP Engineers GmbH. Märzstraße 120 1150 Wien Austria T: 0043 (0)112350032-0 M: office@voigt-wipp.com W: www.voigt-wipp.com	
Verstoffs:		Blatt Nr.: 1	
Plannummer: VWE20170215-02		Erstelldatum: 20.11.2017	