

e!MISSION.at

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

02/10/2015

Projekttitlel:

bioEPCS - Biomass Energy Performance Control System

Projektnummer: 838627

e!MISSION.at - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	1. Ausschreibung e!MISSION.at
Projektstart	03/06/2013
Projektende	30/05/2015
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	24 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	VOIGT+WIPP Industrial Research GmbH
AnsprechpartnerIn	Bernhard Kronberger
Postadresse	Märzstraße 120, 1150 Wien
Telefon	01 2350032 0
Fax	
E-mail	kronberger@voigt-wipp.com
Website	www.voigt-wipp.com

bioEPCS

Biomass Energy Performance Control System

AutorInnen:

VOIGT+WIPP Industrial Research: Bernhard Kronberger

Thomas Fellner

TU Wien – Institut für Energietechnik und Thermodynamik: Andreas Werner

Öko Energiemanagement Planung und Betriebs GmbH: Gerald Aigner

Hackschnitzel- und Heizgenossenschaft reg.Gen.m.b.H: Christian Rohrmoser

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
3.1	Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Publikationen	6
3.2	Arbeitspaket 2: KPI Definitionen und Optimierungspotential	6
3.3	Arbeitspaket 3: Visualisierung und Softwaresystem	8
3.4	Arbeitspaket 4: Modellbildung	9
3.5	Arbeitspaket 5: Optimierungs- und Regelalgorithmen	22
3.6	Arbeitspaket 6: Diagnosesystem	24
3.7	Arbeitspaket 7: Implementierung Pilotanlage	24
3.8	Arbeitspaket 8: Validierung und Dokumentation	25
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	28
5	Ausblick und Empfehlungen	31
6	Literaturverzeichnis	32
7	Anhang	Fehler! Textmarke nicht definiert.
8	Kontaktdaten	32

2 Einleitung

Ausgangssituation:

Fernwärmenetze sind nach ihrer Inbetriebnahme in der Regel einem stetigen Ausbau unterworfen. Dabei verändern sich neben dem Leistungsbedarf und der Lastcharakteristik auch verfahrenstechnische Randbedingungen und wesentliche Anlagenparameter im Heizwerke.

Die ursprüngliche Auslegung bzw. Dimensionierung bestimmter Anlagenkomponenten entspricht nicht mehr dem Optimum des ausgebauten Netzes, womit oft Verschlechterungen der Energieeffizienz einhergehen. Die Ursache dafür ist meist eine isolierte Betrachtung bei der Planung sowie dem Ausbau von Anlagenkomponenten. Erweiterungen durch zusätzliche Wärmeerzeuger, Pufferspeicher oder Nah- und Fernwärmeverbraucher werden in der Auslegung in vielen Fällen ohne Berücksichtigung der dynamischen Effekte auf Basis von einfachen Bilanzrechnungen geplant und installiert. Negative Auswirkungen auf die Effizienz, Anlagenperformance-Kriterien, Brennstoffverbrauch und Emissionen werden sehr oft erst im Betrieb, manchmal sogar gar nicht bemerkt.

Das Projekt setzt sich vorrangig mit der Regelbarkeit des Gesamtsystems auseinander. Der derzeitige Stand der Technik bei biomassebetriebenen Fernwärmenetzen beruht auf einfacher, klassischer Mess-, Steuer und Regelungstechnik, intelligente bzw. übergeordnete Regelungssysteme sind kaum vorhanden. Es soll daher die Einbindung einer modellprädiktiven Regelung untersucht werden.

Zielsetzung:

Ziel des Projekts ist die nachhaltige Effizienzsteigerung von Wärmenetzen im Verbund mit Biomasseheizkraftwerken. Der Focus des Forschungsprojektes liegt bei der integralen Betrachtung des Wärmenetz-Gesamtsystems Heizwerk-Netz-Verbraucher. Das konkrete Ziel ist die Erarbeitung eines intelligenten, modellbasierten Regelungskonzepts für Biomasse-Wärmenetze inklusive Validierung des Konzepts anhand des Biomasseheizwerk Großarl

Einordnung:

Das vorliegende Projekt befasst sich mit der Gesamtoptimierung eines Biomasseheizwerkes und ist somit den folgenden Bereichen zuordenbar: Intelligente, thermische Netze / Bioenergie und Energieeffizienz

Methodik:

Auf Basis von im Projekt erstellten physikalischen Berechnungsmodellen der einzelnen Wärmenetzteilssysteme, welche sich durch Modulbauweise an unterschiedliche Kraftwerkswärmenetze anpassen lassen, werden Regelungsstrategien für ein intelligentes Wärmemanagement entwickelt, wobei im Projekt entwickelte Key Performance Indikatoren (KPI's) ökonomische, energetische und ökologische Gesichtspunkte bewerten sollen. Auf Basis des modellbasierten Regelungskonzepts und historischen Prozessdaten werden die optimalen Netzparameter (Temperatur, Durchfluss), sowie die effizienteste Lastverteilung auf der Erzeugerseite bestimmt. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn es zu Lastspitzen kommt bei denen bilanzmäßig mehr Wärme gebraucht wird als von den Biomassekesseln zur Verfügung gestellt werden kann.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Publikationen

- Projektmanagement: Im Zuge des Projektmanagements wurden zahlreiche interne / externe Projektmeetings und interne / externe Workshops organisiert, vorbereitet sowie nachbereitet. Ein weiterer wesentlicher Punkt war das regelmäßige Berichten in unterschiedlichsten Formen sowie die stetige Fortschrittskontrolle aller Projektbeteiligten.
- Publikationen: Es wurde eine umfangreiche Recherche bezüglich Konferenzen / Publikationsmöglichkeiten von Teilen der Arbeit welche im Zuge des bioEPCS Projekts durchgeführt wurden, ausgearbeitet. Derzeit befinden sich drei Publikationen in Vorbereitung.

3.2 Arbeitspaket 2: KPI Definitionen und Optimierungspotential

Unter Einbeziehung der im ersten KPI Workshop erarbeiteten Fragestellungen bzw. Antworten wurde im Zuge des zweiten Workshops eine vollständige Liste aller Key-(Anlagen)teile des Heizwerkes Großarl erarbeitet. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Anlagenteile Thermalölkessel, ORC Modul und alle wesentlichen Wärmetauscheinheiten und Pumpen.

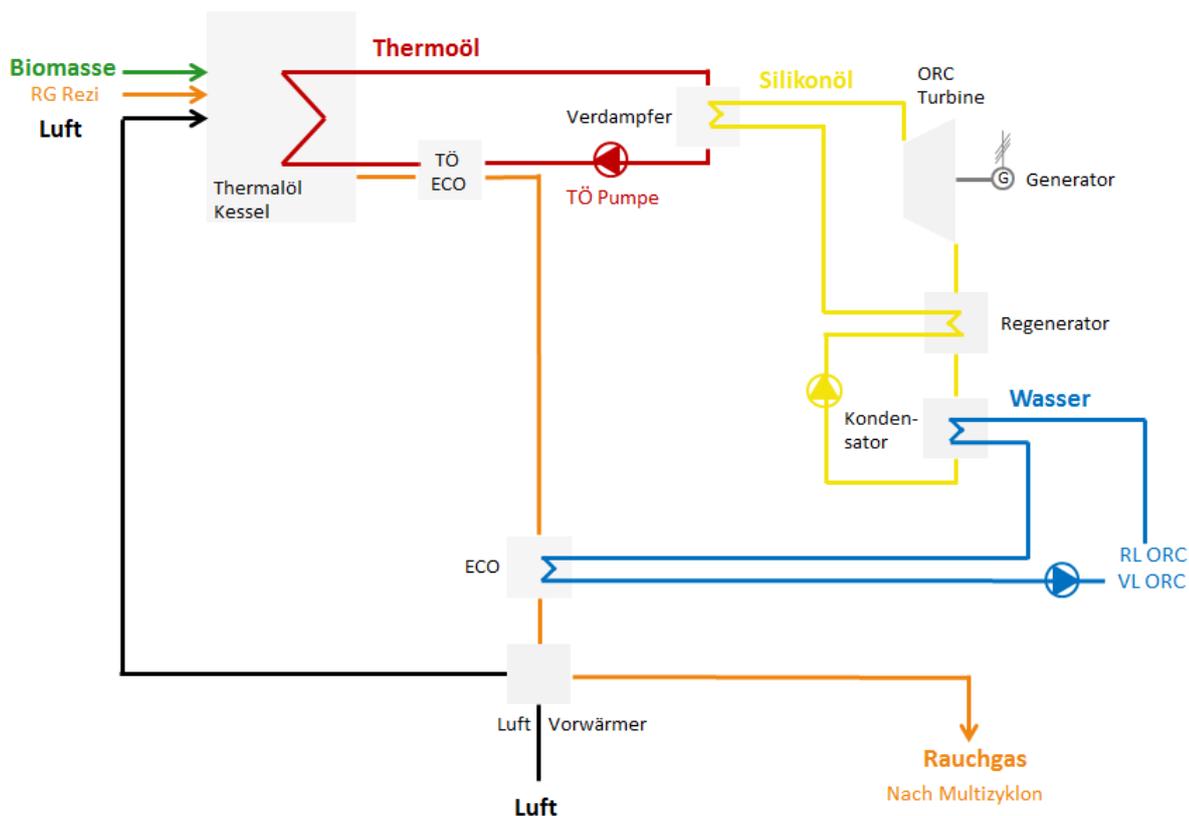


Abbildung 1: Anlagenschema Großarl Teil 1 – Thermalölkessel

Key-Anlagenteil	KPIs	KPI #
Biomasse	Biomasseheizwert volumetrisch	KPI 1

	CO/CO2 Gehalt Rauchgas	KPI 2
	Brennstofffeuchte /Wassergehalt	KPI 3
	O2 Gehalt Rauchgas	KPI 4
Warmwasserkessel	Kesselwirkungsgrad	KPI 5
	Fouling Faktor Kessel (gesamt)	KPI 6
	Falschlufteintrag	KPI 7
Thermalölkessel	Kessel Wirkungsgrad	KPI 8
	Fouling Faktor	KPI 9
	Feuerraumtemperatur	KPI 10
	Falschlufteintrag	KPI 11
Thermalöl-ECO	Fouling Faktor Kessel (gesamt)	KPI 12
	Effizienz	KPI 13
Warm-Wasser-ECO	Fouling Faktor	KPI 14
	Effizienz	KPI 15
LUVVO	Fouling Faktor	KPI 16
	Effizienz	KPI 17
	Falschlufteintrag	KPI 18
Rauchgasventilator / Saugzug	Fouling Faktor	KPI 19
	Effizienz	KPI 20
E-Filter	Relatives Abscheideverhalten	KPI 21
Rauchgaskondensation	Fouling Faktor	KPI 22
	Effizienz	KPI 23
Rezi-Gebläse	Volumenstrom	KPI 24
	Relativer Elektrischer Bedarf	KPI 25
Tischkühler ORC (auch Not-, Bilanz- oder Regelkühler)	Volumenstrom	KPI 26
	Fouling Faktor	KPI 27
	Relativer Elektrischer Bedarf	KPI 28
Sekundärluftventilatoren	Volumenstrom	KPI 29
	Relativer Elektrischer Bedarf	KPI 30
ORC Modul	Wirkungsgrad	KPI 31
	Fouling Faktor	KPI 32
	Relativer Eigenstromverbrauch	KPI 33
	Relative produzierte elektrische Energie	KPI 34
Betriebswärmetauscher ORC	Fouling Faktor	KPI 35
	Effizienz	KPI 36
Multizyklon	Relativer Druckverlust	KPI 37
	Falschlufteintritt	KPI 38
Ölkessel	Wirkungsgrad	KPI 39
	Einsatzstunden	KPI 40
Fernwärmenetz	Netzverluste (Wärme) über Jahresgang	KPI 41
	Wasserverluste (Wasser)	KPI 42
	Eigenstrombedarf je Strom- und Wärmeoutput	KPI 43
	VL- und RL-Temperatur über Jahresgang	KPI 44
Pufferspeicher	Temperaturprofil	KPI 45
	Effizienz Hydraulische Weiche	KPI 46
Saugzug	Rauchgasmenge	KPI 47

	Relativer Stromverbrauch	KPI 48
--	--------------------------	--------

Tabelle 1: vollständige Liste aller Key Performance Indikatoren

Die in Tabelle 1 aufgelisteten Key Performance Indikatoren resultieren aus einer umfangreichen Literaturrecherche und der gemeinsamen Diskussion in zwei Workshops (siehe Workshop I + II Key Performance Indikatoren).

3.3 Arbeitspaket 3: Visualisierung und Softwaresystem

Zuerst galt es die Grundlage für das System zur Visualisierung der grundlegenden Betriebsdaten zu schaffen, welche die Erfassung der Daten, deren Speicherung und Auswertung umfasst. Bezüglich der Datenerfassung mussten sämtliche relevanten Sensoren auf verschiedenste Weise in die Datenbank integriert werden. Dazu waren sowohl hardwaretechnische als auch softwaretechnische Arbeiten nötig. Hierzu wurden vor Ort z.B. Verkabelung installiert oder SPSen umprogrammiert. Eine wesentliche Rolle des Softwaresystems spielt eine zentrale Datenbank, die sowohl als Datenspeicher als auch als Datenanalysewerkzeug dient. Es musste eine Datenbankstruktur und -logik erarbeitet werden, die es erlaubt die Rechenleistung zentral auszunutzen um dem User Daten in Echtzeit zur Verfügung stellen zu können und möglichst kurze Wartezeiten zu gewährleisten. Dafür bedarf es der Nutzung diverser Möglichkeiten zur Steigerung der Performance der DB Engine und einer Vorberechnung von Daten. Die eigentliche Darstellung der Visualisierung soll dem User die Möglichkeit geben, die Oberfläche nach seinen Bedürfnissen anzupassen, und so galt es bei der Visualisierung die einzelnen Komponenten so zu gestalten, dass eine möglichst hohe Skalierungsfähigkeit und Modularität ermöglicht wurde (Siehe Abbildung 2).

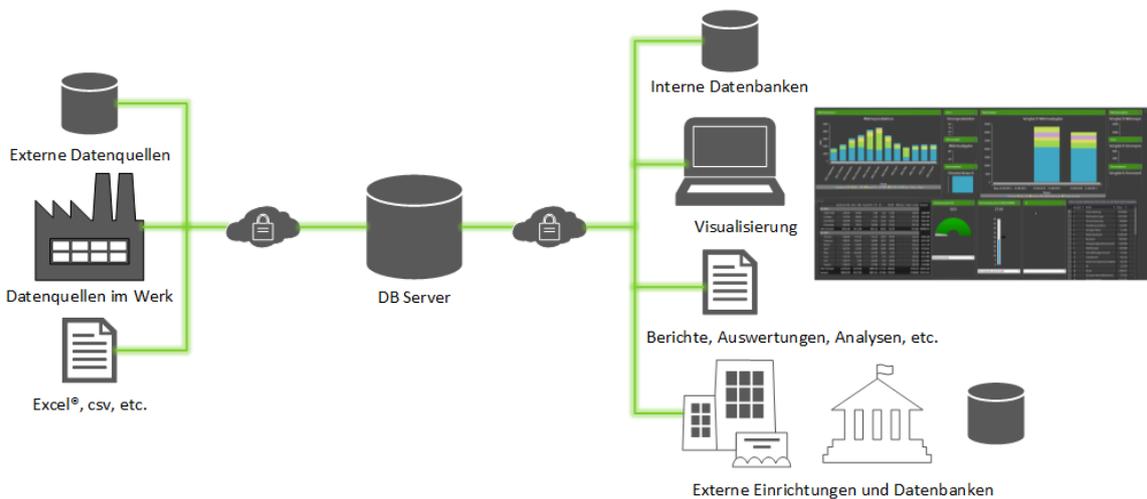


Abbildung 2: Aufbau Softwaresystem / Visualisierung

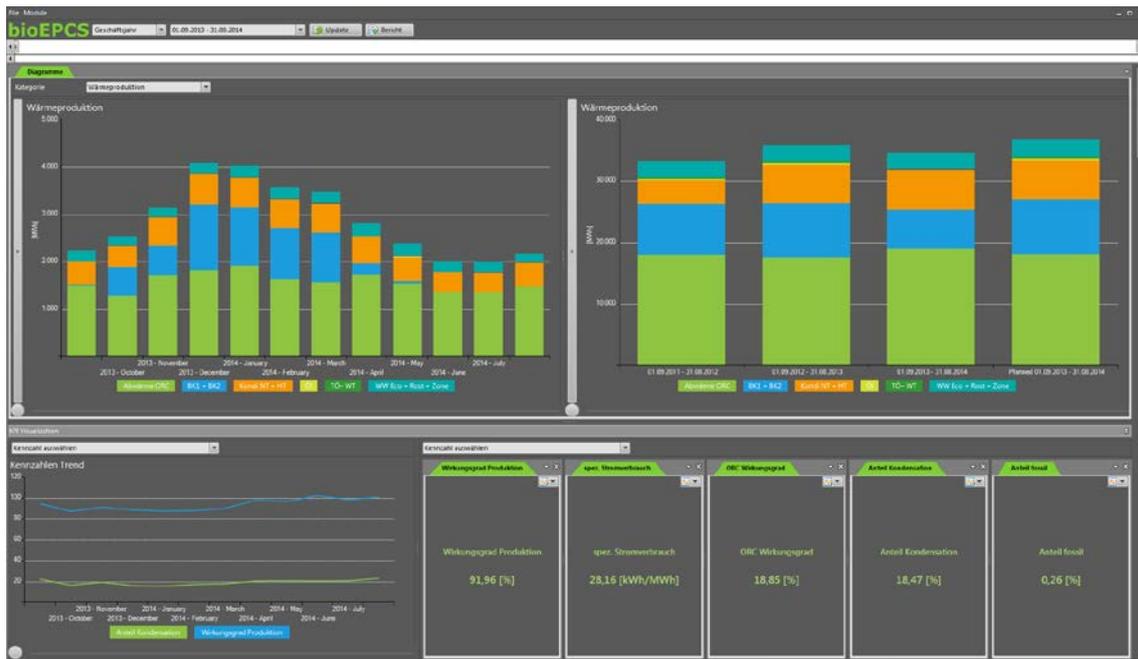


Abbildung 3: Screenshot der Performance Control Software

3.4 Arbeitspaket 4: Modellbildung

Im Zuge des Arbeitspaketes 4 wurde im Zuge eines ersten Workshops eine Liste der zu erstellenden Teilmodelle des Heizkraftwerks in Großarl, welches repräsentativ für typische Heizkraftwerke steht, erstellt:

- Feuerung und Kessel (Verbrennung, Wirkungsgrad)
- Weitere Wärmetauscher und Wärmerückgewinnung (Rauchgaskondensation, ECO, LUVO, Betriebswärmetauscher, etc.):
- Fernwärmenetz
- ORC Modul

Tabelle 2 liefert einen Überblick über die Inputs, Outputs und die Verwendungsmöglichkeit der fast fertiggestellten Modelle.

Modell	Inputs	Outputs	Verwendbar für
Kessel	Elementarzusammensetzung	Lambda	Warmwasserkessel mit verschiedenen Hölzern als Brennstoff
	Feuchtegehalt Brennstoff (Holz)	Rauchgaszusammensetzung	
	Thermische Soll-Leistung Kessel	Brennstoff Massenstrom	
	Soll Sauerstoffgehalt Rauchgas	Rauchgas Volumenstrom	
	Umgebungsbedingungen Eintritt und Austritt (Temperatur, Druck, Luft-feuchte)	Dichte Rauchgas	
	Diverse Verluste (Strahlung,	cp Rauchgas	

	Unverbranntes, Asche)		
Wärmetauscher	Wärmetauscherfläche	Temperatur Rauchgas Austritt	Alle Wärmetauscher im System, wie zum Beispiel: Warm-Wasser-ECO, LUVU, Betriebswärmetauscher ORC, Thermalöl-ECO
	Rohrdurchmesser und -länge	Temperatur Wasser Austritt	
	Anzahl der Bündel	Kondensat Massenstrom	
	Rauchgaszusammensetzung (Medium 1)	Thermische Leistung beim Wärmeübergang	
	Temperatur Rauchgas Eintritt (Medium 1)	Temperaturverteilung nach jedem Bündel	
	Temperatur Wasser Eintritt (Medium 2)		
	Massenstrom Rauchgas (Medium 1)		
	Massenstrom Wasser (Medium 2)		
Fernwärmenetz	Anzahl der Verbraucher	Erforderlicher Pumpendruck (Kraftwerksseitig)	Abbildung / Simulation eines bestehenden Wärmenetzes
	Vorlauftemperatur	Erforderliche Kesselleistung (kraftwerksseitig)	
	Schlechtpunkt (Vorlauftemperatur, Druckdifferenz)	Gesamtwirkungsgrad (für den simulierten Tag)	
	Verbraucherfunktion (Tagesgang Verbraucherleistung)	Druckdifferenz (Vor- und Rücklauf	
	Regelstrategie Verbraucher (Massenstrom durch Einstellung Rücklauftemperatur oder Temperaturspreizung)	Vor- und Rücklauftemperaturen, Temperaturspreizung	
	Rohrgeometrie	Ventilstellung	
		Massenstrom	
ORC Modul	Temperatur Thermoöl Eintritt	Leistung Pumpe	Abbildung / Simulation eines bestehenden ORC Moduls
	Temperatur Thermoöl Austritt	Verdampferleistung	
	Temperatur Wasser Eintritt	Massenstrom Silikonöl	
	Temperatur Wasser Austritt	Massenstrom Thermoöl	
	Arbeitsmedium	Leistung Turbine	
		Leistung Kondensator	
		Massenstrom Wasser	
		Kondensatordruck	
		Verdampfendruck	

Tabelle 2: Modelle und Modelleigenschaften

Modelle inkl. Diagnosesysteme

3.4.1 Rauchgaskondensationsmodell

Mithilfe des in Abbildung 4 dargestellten Simulink Diagnose-Modells für die Rauchgaskondensation, basieren auf mathematisch-physikalischen Gleichungen aus [1] und [2], kann die Leistung einer bestehenden Kondensationsanlage überprüft werden. Bei zunehmenden Abweichungen können Rückschlüsse auf den Verschmutzungsgrad der Wärmetauscherflächen gezogen werden. Des Weiteren kann der Einfluss veränderlicher Brennstofffeuchte, Eingangstemperaturen (Rauchgas und Wasser), Volumenströme und Energieflüsse quantifiziert werden.

Das Modell wurde mithilfe von Prozessdaten einer Referenzanlage am Standort Flachau validiert. Die Validierungsergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Vorhersage der Kondensationsleistung am Standort Flachau liefert relativ gute Ergebnisse. Ziel war es den relativen Fehler im Bereich zwischen $\pm 25\%$ zu begrenzen, was gut erreicht werden konnte.

Mit Hilfe dieses validierten Diagnosemodells ist es nun möglich, für beliebige Standorte und Betriebspunkte folgende Diagnose-Ausgabewerte zur Verfügung zu stellen:

- Thermische Leistung Rauchgaskondensation (mit und ohne Quench)
- Rauchgasmenge (mit und ohne Quench)

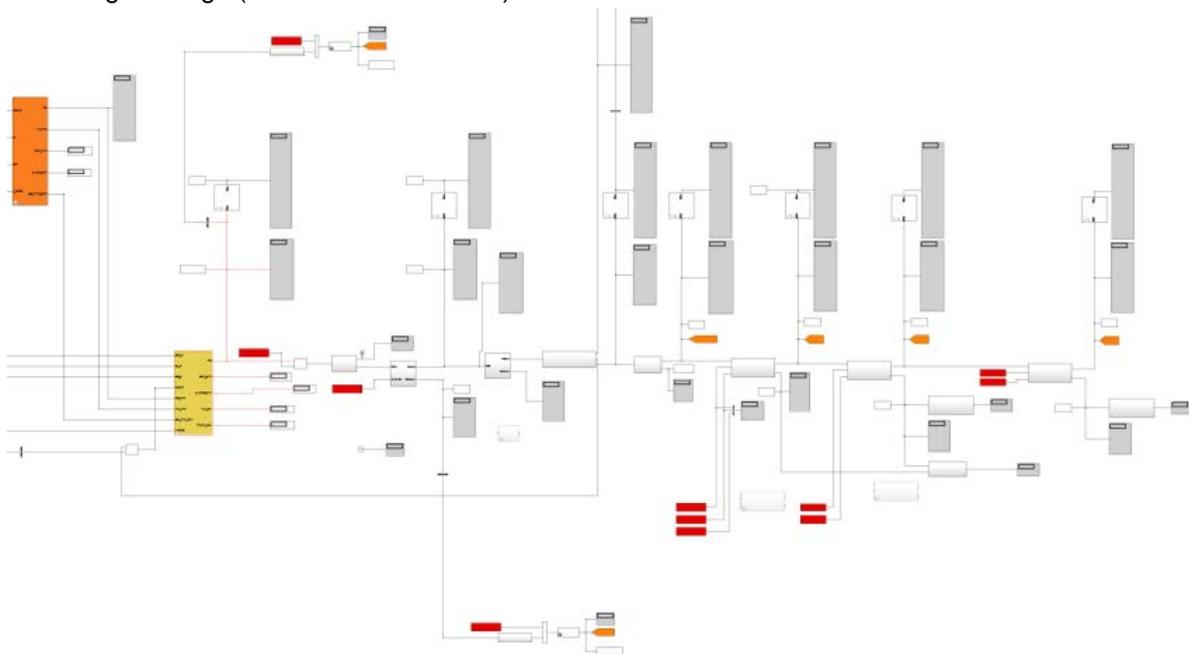


Abbildung 4: Rauchgaskondensationsmodell inkl. Diagnosesystem in Matlab/Simulink

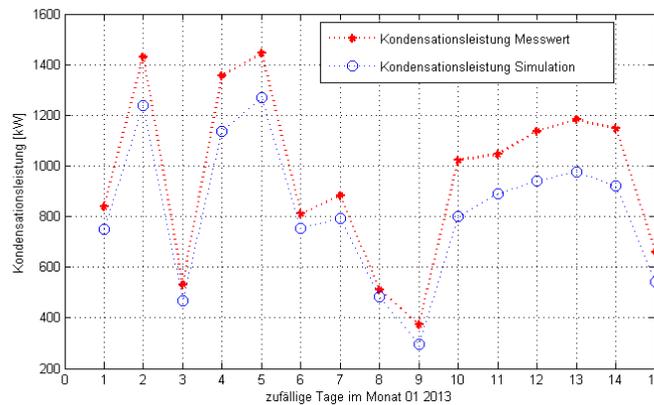


Abbildung 5: Vergleich Vorhersage Kondensationsleistung / tatsächliche Kondensationsleistung von zufälligen Stundenmittelwerten am Standort Flachau im Jänner 2013

Die Schwierigkeit ein geeignetes Modell für den Wärme- und Stoffübergang aus dem Rauchgas an den Rohrbündeln zu finden, konnte in diesem Modell zufriedenstellend gelöst werden.

Die Basis bildet ein physikalisches Modell [2] mit einer Filmkondensation an senkrechten Rohren mit einem experimentellen Korrekturfaktorenanteil. Entscheidend bei den auftretenden Abweichungen sind die fehlende wissenschaftlichen Grundlagen für die Kondensation an waagrechten Rohren und Rauchgasatmosphäre mit hohen Wasserbeladungen, sowie der Einfluss des abfließenden Kondensates. Ebenso spielt in der waagrechten Kondensation die Filmkondensation gegenüber der Tropfenbildung eine untergeordnete Rolle. Zusammenfassend kann ein Mangel an Grundlagenforschung in diesem Bereich festgestellt werden.

3.4.2 Kesselmodell

Das Kesselmodell, basierend auf Matlab-Simulink, ist in der Lage sämtliche Biomasserostfeuerungen zu bilanzieren, dabei wird je nach Vorgabe mittels Brennstoffzufuhr auf die Kesselleistung geregelt, mittels Luftzufuhr auf den geforderten Abgasrestsauerstoff und mittels Rezirkulation auf die gewünschte adiabate Kesseltemperatur. Durch den Vergleich mit den gemessenen Anlagenwerten können Anlagenstörungen und Wartungspotentiale schnell ermittelt werden, wenn Abweichungen zum Modell auftreten. Mögliche Fehlerursachen sind schlechter Ausbrand, Falschlufansaugung, schlechter Brennstoff oder Messfehler. Vor allem Messfehler in der O₂-Messung führen zu schlechten nicht von vornherein klaren Betriebszuständen, da die O₂-Messung selten validiert oder nachkontrolliert wird. Mit diesem Modell steht die Möglichkeit der Detektion eines Regelfehlers aufgrund der schlechter werdenden O₂-Sonde zur Verfügung.

Eingabeparameter für das Kesselmodell:

- Brennstoffcharakterisierung
- Feuchtegehalt Brennstoff
- Thermische Leistung des/der Kessel
- Druck im Kessel
- Verbrennungsluft (Druck, Temperatur, Feuchte)
- Abgasaustrittstemperatur
- Temperatur des Rauchgases nach dem Kessel

- Sauerstoffgehalt im Rauchgas
- Temperatur im Feuerraum
- Diverse Verluste (Verlust in Schlacke und Flugstaub, Verlust durch Unverbranntes, Strahlungsverlust)

Output aus diesem Diagnosetool sind folgende Parameter:

- Restsauerstoffgehalt im RG (nach Rauchgas Rezirkulation)
- Rezirkulierende Rauchgasmenge
- Temperatur im Feuerraum (ohne Rauchgas Rezirkulation)
- Brennstoffbedarf
- Rauchgasmenge
- Abgasverlust
- Kesselwirkungsgrad
- Adiabate Verbrennungstemperatur

Quellen:

- ÖNORM EN 12952 - Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 15: Abnahmeversuche und
- ÖNORM EN 12953-11 Großwasserraumkessel - Teil 11: Abnahmeversuche; Deutsche Fassung EN 12953-11:2003
- Verbrennungsrechnungsvorlagen

3.4.3 Fernwärmenetz

Das betrachtete Fernwärmenetz besteht aus 250 Verbrauchern. Die Normvorlauf/Rücklauftemperatur beträgt 90 bzw. 55 °C bei einer jährlichen Gesamtwärmeleistung von ca. 20GWh. Die gesamte verlegte Rohrlänge beträgt ca. 13km mit einem maximalen Rohrdurchmesser von DN200. Für die Simulation des Fernwärmenetzes wird die Anzahl der Wärmeverbraucher durch eine im vorliegenden Projekt entwickelte Netztransformationsmethode verringert. Dadurch wird die Simulationszeit reduziert.

Druckseitig wird das Netz über die klassische Schlechtpunktregelung geregelt. Der Schlechtpunkt ist der Verbraucher, welcher die höchste Rohrlänge ausgehend vom Heizwerk aufweist (vgl. auch Abbildung 6). Die Netztransformation liefert neue Rohrdimensionen und aggregierte Verbraucherwärmebedarfe. Nach der Netztransformation wird das Netz dynamisch im Matlab/Simscape simuliert und im Rahmen des Postprocessing ausgewertet. Das Simulationsergebnis ist ein zeitabhängiges Druck- und Temperaturfeld der gesamten Rohre im Fernwärmenetz sowie der für die Netzversorgung erforderliche Kessel- und Pumpenstrombedarf.

3.4.3.1 Netztransformation

Mit der Forderung – aufgrund von Rechenkapazitäten - die Komplexität des Netzes (und damit die Anzahl der im Modell verwendeten Blöcke) zu reduzieren, um angemessene Simulationszeiten zu erreichen, wurde die Netztransformation beispielhaft am betrachteten Netz durchgeführt. Bewerkstelligt wurde dies mithilfe einer dafür erstellten Excel-Vorlage, in dem der Benutzer angibt, welche Teilbereiche des Netzes aggregiert werden sollen. Die eigentliche Netztransformation findet in Matlab statt. Ein m-File liest die benötigten Daten ein, führt die Netztransformation aus und übergibt die erhaltenen Geometriedaten und Verteilungsfaktoren wieder ins Excel. Zusätzlich beinhaltet das Excel-File alle

Geometriedaten der Netzrohre und dient somit als Geometriedatenquelle für die Simulation in Matlab/Simscape [7]. Die Transformation zwischen Excel und Matlab ist ein Kompromiss zwischen erweiterter Eingabe und professioneller Berechnung und Programmierung.

Ausgangspunkt für die Netztransformation sind Tagesdurchschnittsenergiemengen und eine angenommene primärseitige Temperaturspreizung von 40K. Die durchschnittlichen Tagesenergiemengen setzen sich aus den monatsweisen Vorjahresenergieentnahmen zusammen. Insgesamt benötigt man für die Transformation folgende Parameter:

- mittlere Dichte Wasser
- Spezifische Wärmekapazität Wasser
- Dichte Mediumrohrmaterial (Stahl)
- Spezifische Wärmekapazität Mediumrohrmaterial
- Wärmeleitfähigkeit Rohrisolierung
- mittlere Temperaturspreizung

Ausgehend vom Netzende (Cluster T01) wird die Netztransformation durchgeführt (siehe Abbildung 7). Dabei werden alle Verbrauchergruppen (bestehend aus mindestens zwei Verbrauchern), die vom Hauptstrang abzweigen zu drei äquivalenten Verbrauchern zusammengefasst.

3.4.3.2 Clusterung des Netzes

Um die Übersicht über die Rohrelemente und Verbraucher des Netzes zu wahren, wurde dieses in Cluster unterteilt. Die Netztransformation erfolgt ebenfalls clusterweise. Folgende Abbildung 6 zeigt die Unterteilung des Beispielnetzes in Teilabschnitte T01-T12:

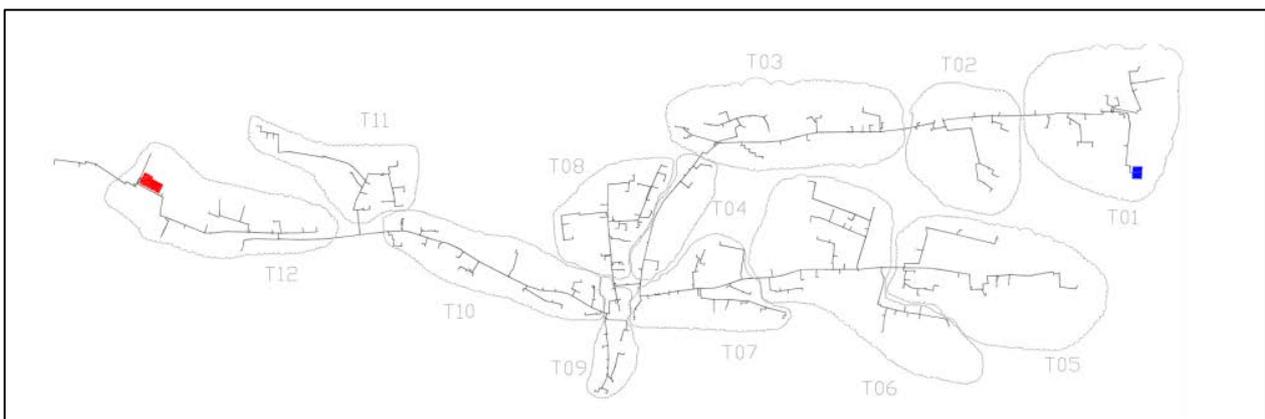


Abbildung 6: Einteilung des Fernwärmenetzes Großarl in Cluster. Rot: HW, blau: SP

3.4.3.3 Vorgehensweise

Es soll im Folgenden ein grober Überblick über die Netztransformation gegeben werden. Ausgangspunkt dafür sind Tagesdurchschnittsenergiemengen und eine angenommene vorlaufseitige Temperaturspreizung von 40K. Die Tagesdurchschnittsenergiemengen setzen sich aus den monatsweisen Vorjahresenergieentnahmen zusammen. Insgesamt benötigt man für die Transformation folgende Parameter:

- mittlere Dichte Wasser

- Spezifische Wärmekapazität Wasser
- Dichte Mediumrohrmaterial (Stahl)
- Spezifische Wärmekapazität Mediumrohrmaterial
- Wärmeleitfähigkeit Rohrisolierung
- mittlere Temperaturspreizung

Ausgehend vom Netzende (Cluster T01) wird die Netztransformation durchgeführt (siehe Abbildung 7). Dabei werden alle Verbrauchergruppen (bestehend aus mindestens zwei Verbrauchern), die vom Hauptstrang abzweigen zu drei äquivalenten Verbrauchern zusammengefasst.

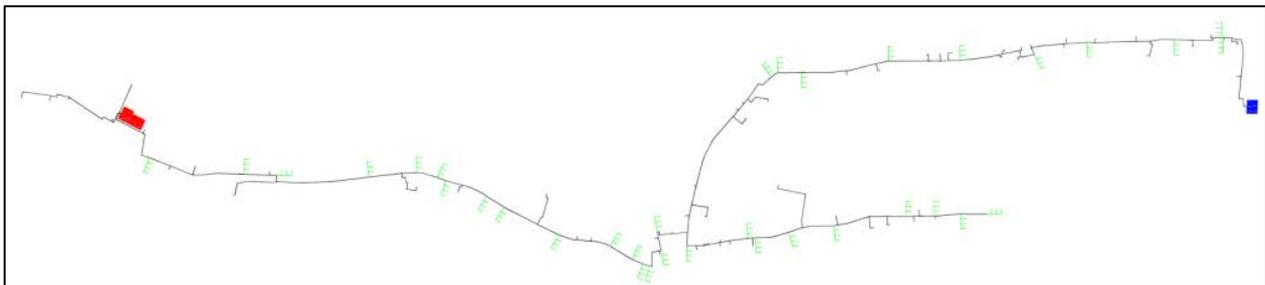


Abbildung 7: Fernwärmenetz Großarl nach der Netzvereinfachung. Rot: HW, blau: SP

3.4.3.4 Überblick Modell in Simscape

Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über das in Simscape entwickelte Fernwärmenetzmodell gegeben werden. Dabei wird nicht detailliert auf die Aufgabe der einzelnen Blöcke eingegangen, sondern grob die Funktionsweise und Verschaltung der Subsysteme erläutert. Die folgende Abbildung 8 zeigt das Simscape-Modell des Fernwärmenetzes Großarl:

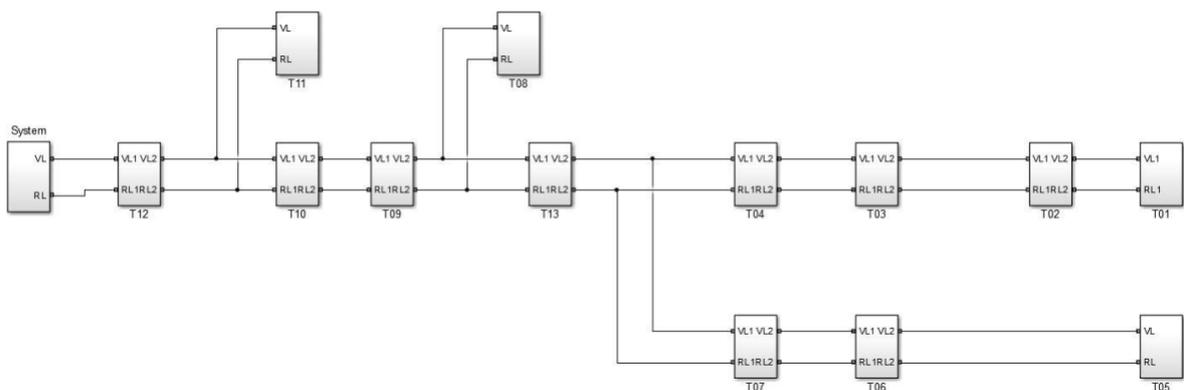


Abbildung 8: Simscape-Modell des Fernwärmenetzes Großarl

Das Modell in Simscape gliedert sich Cluster. So wurden für die Cluster 1-13 jeweils Subsysteme geschaffen, in denen die detaillierte Modellierung der Verbraucher vorgenommen wurde. Darüber hinaus verfügt das Netz noch über das Subsystem System (ganz links), welches das Heizkraftwerk mit Pumpe und Kessel darstellt.

Die Druckregelung ist in Abbildung 9 zu sehen: Vom Benutzer können die Absolutwerte der beiden Drücke im Vor- und Rücklauf des Schlechtpunktverbrauchers (pSP1 und pSP2) vorgegeben werden. Im Zuge der Simulation wird der Ein- und Austrittsdruck der Pumpe (pPE und pPA)

ermittelt. Je nach Massenstrom in den Rohren des FWN stellen sich bestimmte Steigungen der oberen und unteren Linie und damit verbundene Pumpendrucke ein.

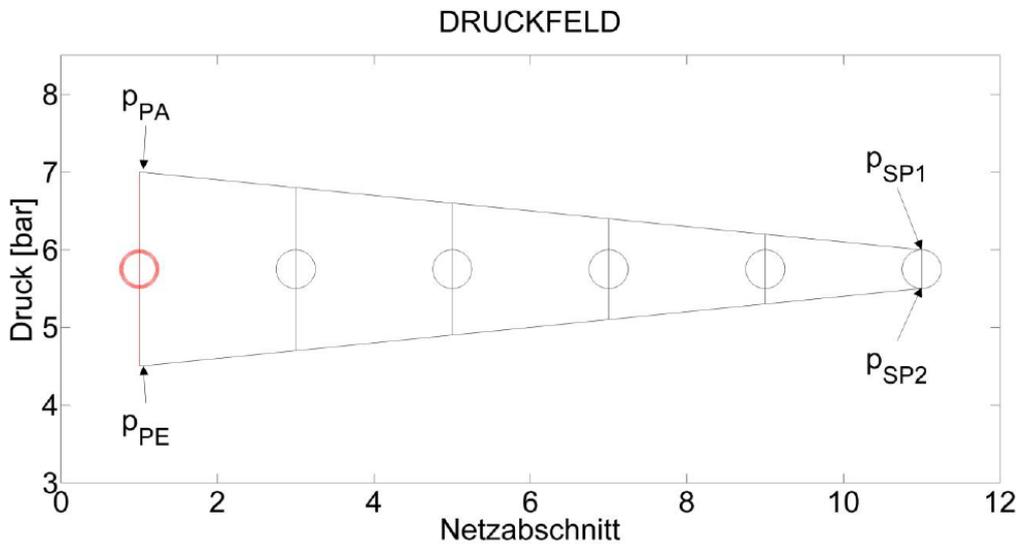


Abbildung 9 – Druckregelung

Die Modellbildung des Heizwerkes kann Abbildung 10 entnommen werden:

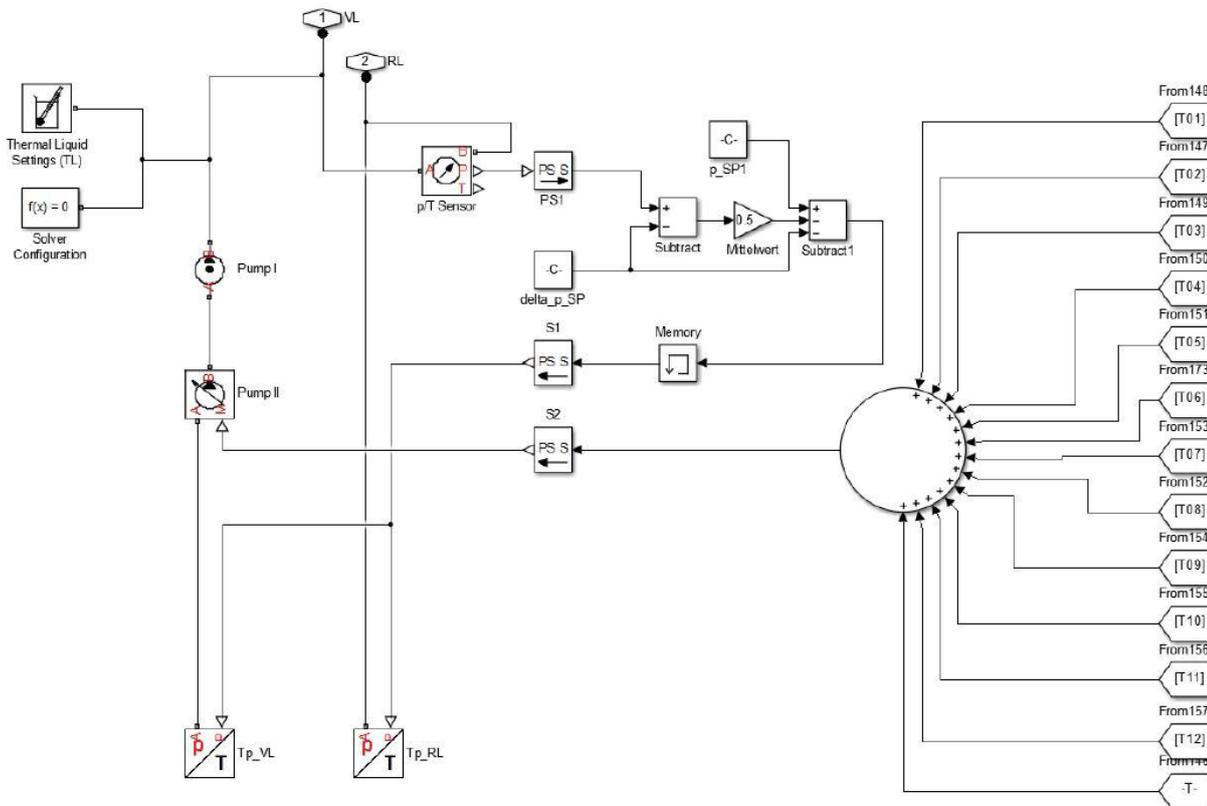


Abbildung 10 - Modellbildung des Heizwerkes

Das Wasser kommt mit einer definierten und im Block Tp_VL (unten links) eingestellten Temperatur aus dem Wärmetauscher. Die beiden Blöcke Tp_VL und Tp_RL modellieren Ein- und Ausgang des Wärmetauschers, welcher als Wärmequelle des Fernwärmenetzes fungiert. Der Vorlaufdruck nach

Pumpe (vgl. auch Abbildung 3.6 in Kap.3.4.2) wird vom Modell so berechnet, dass sich beim SP der geforderte Druck im Vorlauf einstellt. Die Berechnung des Rücklaufdruckes (Pumpeneingangsdruck) erfolgt durch die Blöcke im rechten Bereich des Subsystems System. Unter der Annahme $\Delta p_{VL} \approx \Delta p_{RL}$ folgt für Δp_{RL} :

3.4.3.5 Verbraucher

Die Verbrauchermodelle des Simscape-Netzes setzen sich aus zwei Gruppen zusammen: Erstens aus originalen Verbrauchern, welche im Rahmen der Netztransformation nicht vereinfacht wurden und zweitens aus transformierten Verbrauchern, welche transformiert wurden und deren Verbraucherfunktion sich folglich aus einer gewichteten Summe der aggregierten Verbraucher zusammensetzt. Beide Verbraucherarten unterscheiden sich nur durch ein Hausanschlussrohr, welches bei ersteren genannten vorkommt und bei letzteren im Modell, wegen der Transformationsvorgehensweise nicht modelliert wird. Abbildung 9 zeigt das Modell des originalen Verbrauchers T09_HA12:

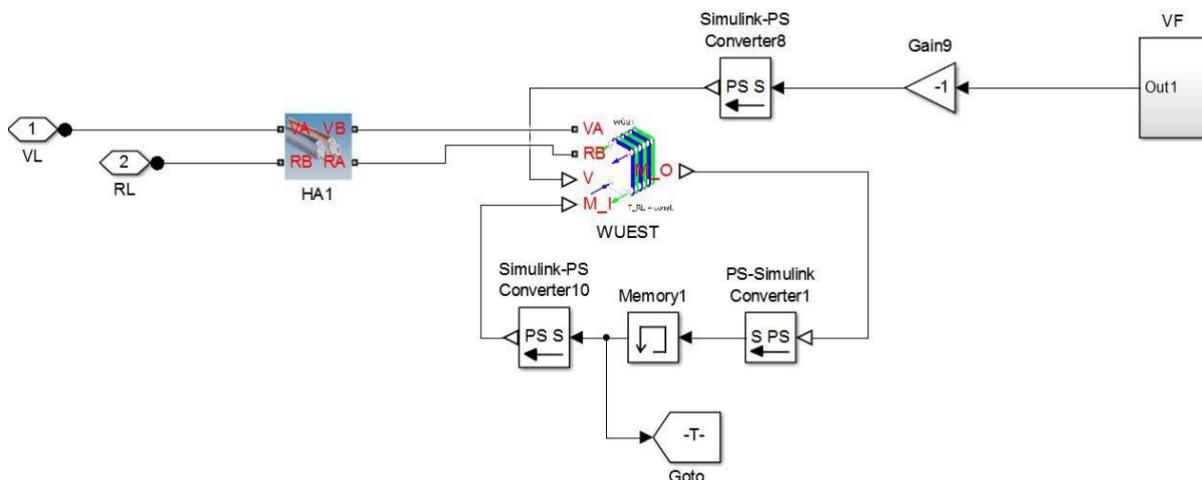


Abbildung 11: Simscape-Modell eines Fernwärmeanschlusses (Verbraucher)

Der Block WUEST bildet die Wärmeübergabestation (Plattenwärmetauscher inklusive Differenzdruckregelventil) und erhält vom Subsystem VF den zeitabhängigen Wärmebedarf. Der Block HA1 symbolisiert die Stichleitung vom Hauptrohr zur jeweiligen Wärmeübergabestation.

Der transformierte Verbraucher unterscheidet sich vom originalen Verbraucher nur durch das Fehlen der Stichleitung.

3.4.3.6 Simulation

Die in dieser Arbeit durchgeführte Fernwärmenetzsimulation gliedert sich in zwei Teilbereiche: Einem stationären Anfangsbereich (in den folgenden Simulationen 10 Stunden), bei dem die Verbraucherfunktion über die Zeit konstant gehalten wird und der eigentlichen dynamischen Netzsimulation, wo die zeitlich variablen Leistungsentnahmen der Verbraucher schlagend werden. Der stationäre Teil hat den Zweck, dass alle Variablen der Netzkomponenten (insbesondere Anfangstemperaturen der Rohre und Wärmeübergabestationen) konvergieren und die dynamische Simulation sodann direkt im Anschluss mit den sich real einstellenden Anfangswerten durchgeführt werden kann. Die stationäre Vorlaufzeit kann individuell vom Benutzer eingestellt werden, wirkt sich

jedoch nicht stark auf die Simulationsdauer aus. Die Verbraucherfunktionen haben im Allgemeinen das folgende Aussehen (Abbildung 12):

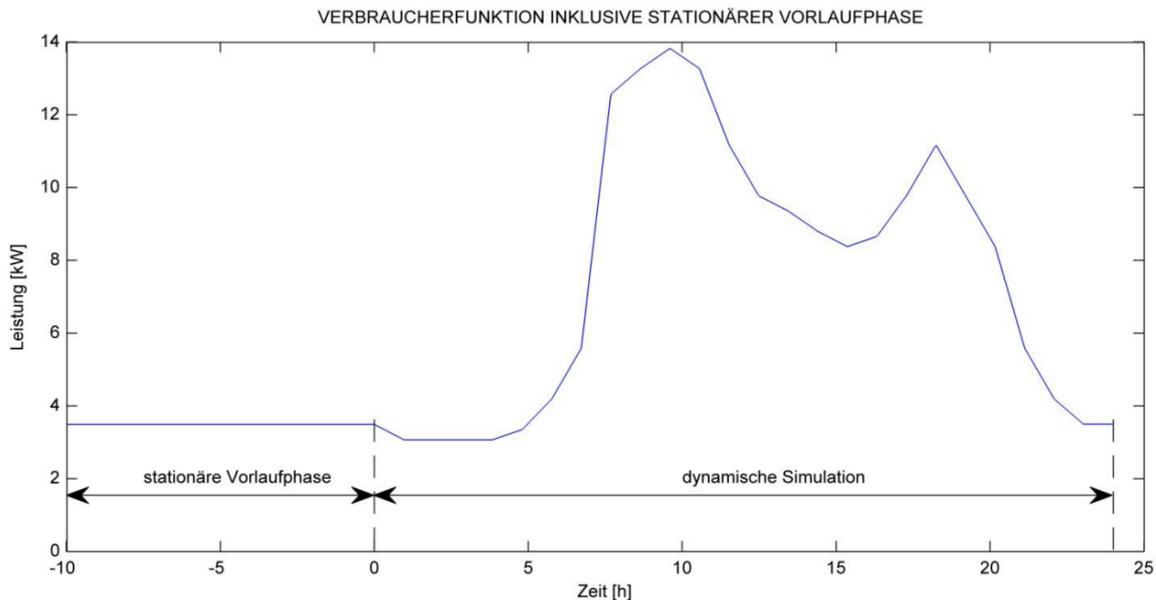


Abbildung 12: In der Simulation verwendete Verbraucherfunktion

3.4.3.7 Inputparameter

Die Folgenden Parameter können vom Benutzer innerhalb bestimmter Grenzen vorgegeben werden und dienen zur Analyse der Auswirkungen von systembestimmenden Randbedingungen auf das System.

- Vorlaufdruck am Schlechtpunkt (p_{SP1}): Dies ist der einstellbare Druck in bar am HA17 des Clusters T01. Im Rahmen der Schlechtpunktregelung (vgl. Kap.3.4.2) wurde diese Größe als einstellbare Randbedingung gewählt.
- Druckdifferenz am Schlechtpunkt (Δp_{SP}): Um die ordnungsgemäße Funktion der Anlagenarmaturen am Schlechtpunkt-Verbraucher sicherzustellen, wird diese Größe ebenfalls vom Benutzer vorgegeben.
- Vorlauftemperatur (T_{VL}): Dies ist die Vorlauftemperatur ab Heizwerk in K und zugleich die maximale Systemtemperatur. Die Siedetemperatur beim gewählten Druck beträgt T_s (bei 6 bar) = 158,8 °C. Der Sicherheitsabstand zwischen maximaler Systemtemperatur und Siedetemperatur ist ausreichend groß.
- Gewünschte Rücklauftemperatur (T_{RL}): Dies ist die Regelgröße in K, wonach die WÜSTen der einzelnen Hausanschlüsse den primärseitigen Wassermassenstrom regeln.
- Simulationsdatum (Date): Hier wird das zu simulierende Tagesdatum als String in der Form tt.mm oder tt/mm eingegeben.
- Tagesmitteltemperatur (T_{mittel_Tag}):
- Rohrrauigkeit (R_{Tube}): Absolute Rohrrauigkeit in m. Laut Herstellerkatalog der Rohre wurde in den folgenden Simulationen ein Wert von 20µm gewählt.
- Option für stationäre Simulation (VB_const): Beim Wert von 1 wird eine stationäre Simulation des Systems mit den Startwerten der Leistungen der einzelnen Hausanschlüsse durchgeführt. Beim Wert von 0 wird die reguläre dynamische Simulation wie hier beschrieben durchgeführt.

- Leistungskontrolle (Kontrolle): Dies ist eine Kontrollvariable und hilft bei der Überprüfung, ob die Transformation richtig ausgeführt wurde.
- Ausgeführte Transformationen (Trafo_done): Dieser Vektor enthält als Elemente alle Monatsnummern, deren Transformation bereits ausgeführt wurde. Im Sinne einer Netzsimulation mit möglichst hohem Automatisierungsgrad erkennt das Programm, ob es die Netztransformation nochmals ausführen soll oder nicht.

Bei den Ausdrücken in Klammer handelt es sich um die Variablennamen im Matlab Workspace WS. Die letzteren drei genannten Parameter (VB_const, Kontrolle und Trafo_done) sind hier der Vollständigkeit halber angeführt. Diese bilden keine Systemparameter sondern sind lediglich Simulationsoptionen oder haben lediglich Kontrollcharakter.

3.4.3.8 Simulationsergebnisse

Das im Rahmen des Projektes entwickelte Simulationswerkzeug wurde verwendet um Szenarienanalysen des Fernwärmenetzes durchzuführen. Ausgehend von einem Referenzfall wurde in 4 Szenarien die Auswirkung von geänderten Inputwerten durchgeführt.

Der Referenzfall wurde mit folgenden Randbedingungen simuliert:

- Vorlauftemperatur: 370K
- Rücklauftemperatur: 320K
- Simulationsdatum: 1.Oktober
- Mittlere Außentemperatur: 10°C
- Mittlere Erdreichtemperatur: 8°C
- Vorlaufdruck SP 6bar
- Differenzdruck am SP 0,5 bar
- Netztopologie: unvermascht.

Ausgehend vom Referenzfall wurden folgende Szenarien untersucht:

- Szenario 1: geänderte Rücklauftemperatur auf 330K
- Szenario 2: geänderte Vorlauftemperatur auf 360K
- Szenario 3: Ringschluss des Netzes zwischen Cluster 2-3 und Cluster 5-6
- Szenario 4: Senkung des gesamten Netztemperaturniveaus um 5K (VL: 365, RL:315)

Ein Auszug der Ergebnisse ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt, die detaillierten Verläufe der Simulationsergebnisse können in der im Rahmen des gegenständlichen Projektes hervorgegangenen Diplomarbeit¹ nachgelesen werden:

¹ J. Nagler. Dynamische Simulation eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simscape. Diplomarbeit, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Technische Universität Wien, 2014.

		RF	SZ1		SZ2		SZ3		SZ4	
				+/- RF		+/- RF		+/- RF		+/- RF
Pumpenarbeit	kWh	35,087	51,39	31,72%	50,07	29,93%	35,78	1,95%	34,69	-1,16%
Kesselarbeit	MWh	50,956	51,91	1,84%	50,35	-1,19%	51,26	0,59%	50,18	-1,56%
VB-Arbeit	MWh	41,460	41,46	0,00%	41,46	0,00%	41,46	0,00%	41,46	0,00%
Netzverluste	MWh	9,496	10,45	9,15%	8,89	-6,76%	9,80	3,11%	8,72	-8,96%
%Kesselarbeit		18,64%	20,13%	1,50%	17,66%	-0,97%	19,12%	0,48%	17,37%	-1,27%
Wirkungsgrad		81,31%	79,79%	-1,52%	82,25%	0,95%	80,82%	-0,48%	82,57%	1,27%

Abbildung 13 - Simulationsergebnisse tabellarisch

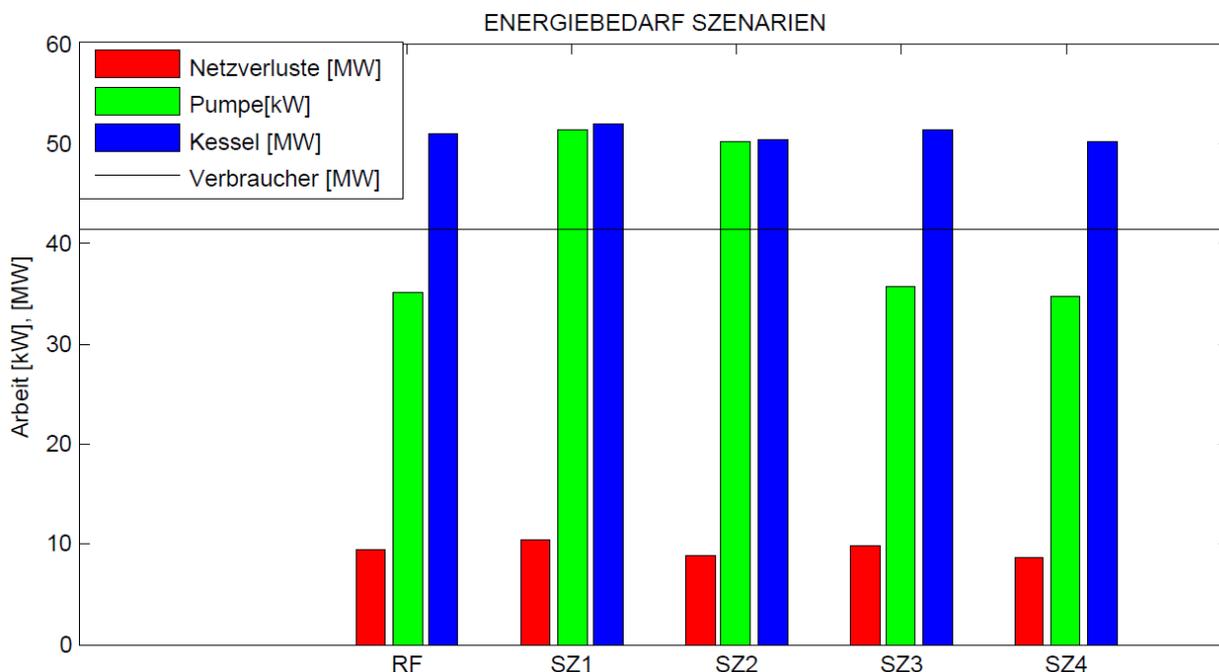


Abbildung 14 - Grafische Simulationsergebnisse

3.4.4 ORC Modul

Das ORC-Modell fußt auf einer Eigenentwicklung der Simscape Library, welche auch im Zuge des Projektes entstanden ist.

3.4.4.1 ORC Simscape Modell [6]

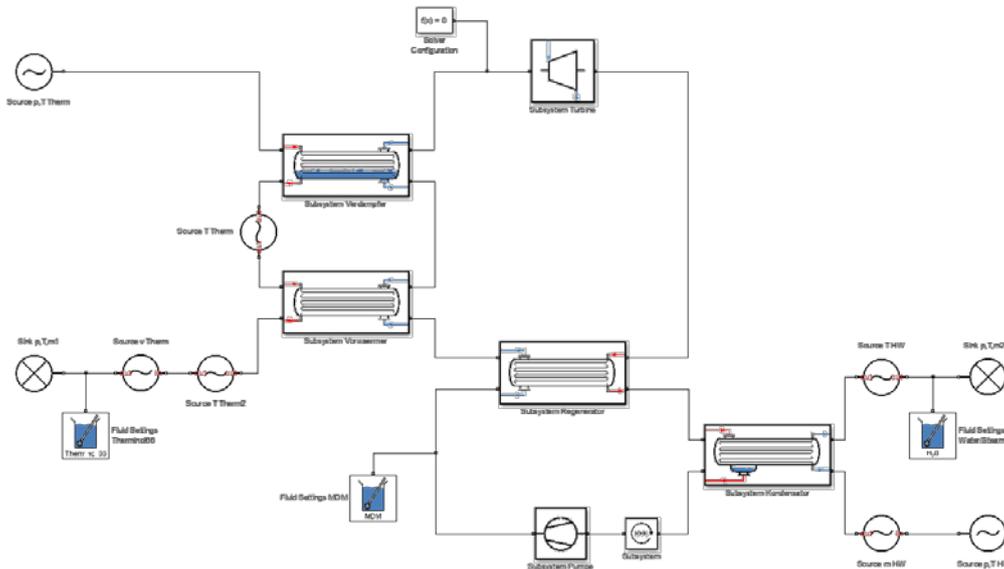


Abbildung 15: Übersicht Modellstruktur ORC Modul

Dieses Tool dient zur manuellen Überprüfung bzw. Nachrechnung einzelner Betriebspunkte der ORC Anlage. Ein- und Ausgaben für das Simulationsmodell werden über die MATLAB-Datei INPUT_ORC_Process_V4.m gesteuert.

OUTPUTS: Parameter-Übersicht aller Komponenten und T-s-Diagramm des Prozesses

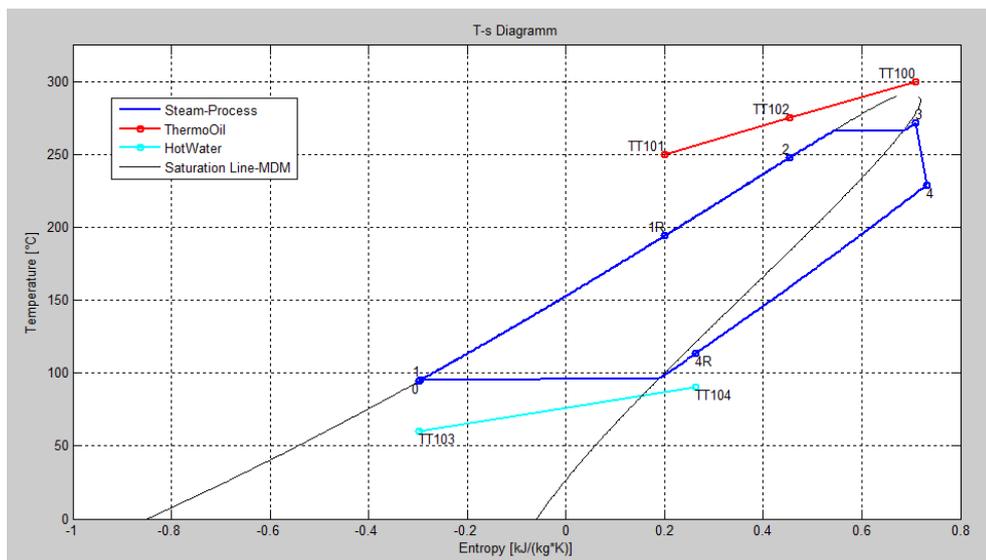


Abbildung 16: Beispielhaftes T-s Diagramm des simulierten ORC Prozesses mit bestimmtem Datensatz

INPUTS:

- 1) Diverse Messdaten (TT100, TT101, TT102, TOP, TT103, TT104)
- 2) Parameter, welche wahlweise eingegeben oder automatisch berechnet werden können (m_MDM, etha_mP, etha_sT, etha_mT, p_VERD, p_KOND, kA_Reg)

- 3) Parameter, welche eingegeben und zwingend für eine richtige Berechnung benötigt werden (etha_sP, dT_UH)
- 4) Parameter, welche zwar eingegeben werden müssen, jedoch bei Unwissenheit auf den Default-Wert belassen werden können, ohne die Simulation gravierend zu verfälschen (v_TOel, m_HW, dT_UK, dp_REGprim,...)

3.5 Arbeitspaket 5: Optimierungs- und Regelalgorithmen

Im Zuge eines internen Workshops am 23.05.2014, und auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche, wurde definiert welche Größen zur Regelung zur Verfügung stehen. Dazu gehören beim Fernwärmenetz die Vorlauftemperatur, der Umlauf, die Möglichkeit auf einen Zugriff auf die Übergabestationen, die Pufferladung primär und sekundärseitig, die Nachtabenkung sowie die Netzteile mit anderer VL Temperatur. Das ORC Modul bietet keine Möglichkeit auf ein Eingreifen von außen. Lediglich die Eintrittstemperatur des Thermalöls in den Verdampfer, sowie die Eintrittstemperatur des Wassers in den Kondensator kann geregelt werden. Das restliche Heizwerk, zu dem die Kessel, die Rauchgasreinigung, die Kondensationsanlage sowie der Pufferspeicher gehören, kann ohne Einschränkungen angeregt werden.

3.5.1 Implementierung eines Last- und Pufferspeichermanagements

3.5.1.1 Maßnahmen

- Lastvorgabe aller Erzeuger (Kessel 1-3, Spitzenlastkessel)
- Lastvorgabe Platzheizung / Fernwärmeeinspeisung
- Umsetzung durch eine übergeordnete Regelung auf Basis der entwickelten Modelle

3.5.1.2 Ziele

- Optimale Betriebsweise des Puffers (Be- und Entladung)
- Max. Auslastung des ORC-Moduls
- Vermeidung von Gluterhaltungsbetrieb
- Bestmöglicher Einschaltzeitpunkt von K1 und K2
- Dynamische Netzvorlauftemperaturregelung
- Umschaltung Platzheizung / Fernwärmeeinspeisung

3.5.2 Identifizierte Einsparpotentiale der Biomasseanlage Großarl

- Wirtschaftlichkeitsanalyse des Tischkühler behandelte die Frage ab welchem Brennstoffpreis ein stromgeführter Betrieb aus ökonomischer Sicht sinnvoll sein kann
 - Wirtschaftlicher Betrieb nur wenn der ORC Anlagenwirkungsgrad über 14,7 % ist
 - Wirkungsgrad ist abhängig von der ORC Rücklauftemperatur und der ORC-Leistung
 - Online Wirtschaftlichkeitsberechnung des ORC Modell wird in einem nächsten Schritt in das Modell implementiert und kann anschließend im EPCS angezeigt werden

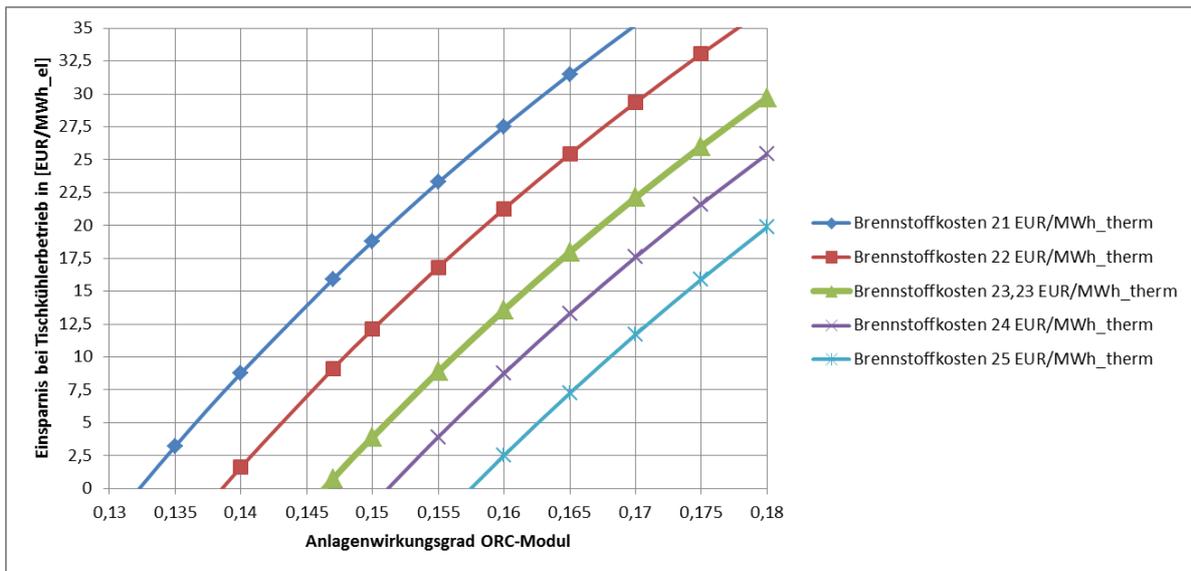


Abbildung 17: Wirtschaftlichkeitsanalyse Tischkühler

- Einsparung Biomassekessel 1:

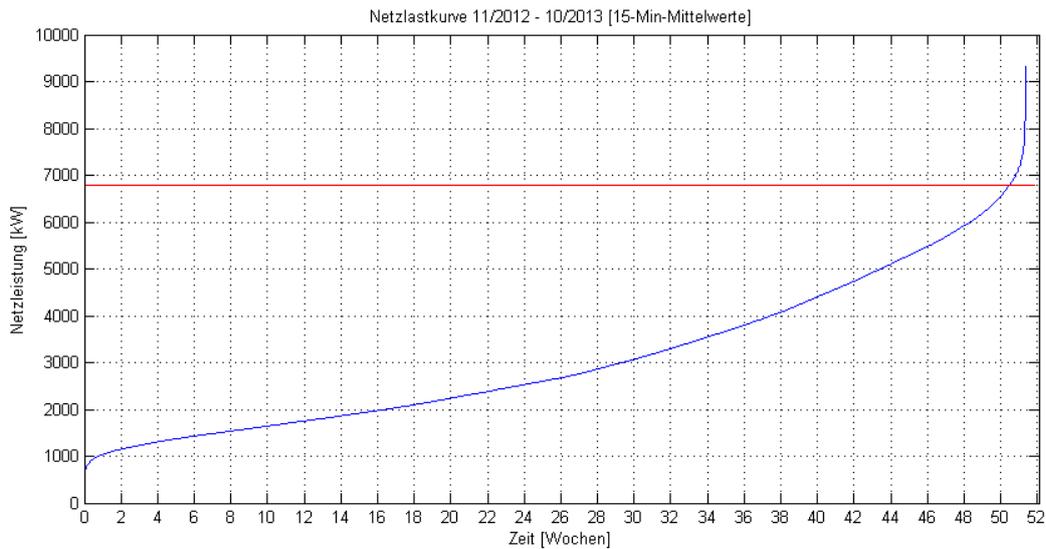


Abbildung 18: Netzlastkurve Fernwärme + Trockenkammern NORD und SÜD

- 150 Betriebsstunden über 6775 kW (entsprechen ca. 56 MWh)
- Ohne Biomassekessel 1: Bereitstellung von max. 6776 kW
- Pufferspeicher (Nutzvolumen 40 m³) – Fahrweise ohne Biomassekessel 1
 - Optimale Pufferbewirtschaftung des Bestandpuffers
 - Max. Auslastung des ORC Moduls / Lastvorgabe Spitzenlastkessel (Leistungsstufung)
 - Ölverbrauch kann durch regelungstechnische Maßnahmen und einen Hydraulikumbau fast vollständig genutzt werden
 - Öleinsatz mit Pufferspeichermanagement: 31 MWh

3.6 Arbeitspaket 6: Diagnosesystem

Wie bereits in AP4 beschrieben, wurden sämtliche Modelle neben Großarl auch noch an anderen Anlagen validiert.

- Diagnose Kessel:
 - Iterative Berechnung der Luftüberschusses und der Menge an Rauchgas die rezirkuliert wird um einen gewünschten Sauerstoffanteil im Rauchgas zu erreichen
 - Iterative Berechnung der zugeführten Brennstoffmenge (mit fixiertem Brennstoff-Wassergehalt) auf Basis der Kesselleistung
- Diagnose Wärmetauscher (beispielhaft am Anlagenteil Rauchgaskondensation):
 - Algorithmus zur Einhaltung physikalisch festgelegter Grenzen der Temperaturen im Wärmetauscher
- Diagnose ORC Modul:
 - Streuung der Messungen und Reduzierung der Messfehler um Anlagenverhalten besser zu Verstehen zu können
 - Modell soll als Sollwertmodell für den laufenden Betrieb dienen
 - Folgende Auswirkungen der verschiedenen Einflüsse sollen diagnostiziert werden:
 - Verdampferdruck zu Turbinenleistung
 - Kondensatordruck zu Turbinenleistung
 - Abhängigkeitsanalyse wichtiger Parameter um einfachere Modelle auf Basis der online Messdaten auf einer Steuerung mitlaufen lassen zu können.
- Diagnose Fernwärmenetz:
 - Kopplung mit Modell und Bibliotheksbildung
 - Ringschlussproblematik
 - Diagnostische Betrachtung der Verbraucherseite
 - Definition von Verbraucherkurven und Gleichzeitigkeitsfaktoren
 - Identifikation von Verbrauchsgängen von Hotels
 - Reduzierung der Rechenzeit für 24-Stunden um später auf SPS die Modelle für einen MPC bereit stellen zu können.
- Diagnose Kessel:
Umsetzung des Formelwerkes nach
 - ÖNORM EN 12952 - Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 15: Abnahmeversuche und
 - ÖNORM EN 12953-11 Großwasserraumkessel - Teil 11: Abnahmeversuche; Deutsche Fassung EN 12953-11:2003
 - Für die spätere Implementierung auf einer SPS
 - Definition Messdatenerfordernis

3.7 Arbeitspaket 7: Implementierung Pilotanlage

Im Zuge des Projektes wurde teilweise die geforderte Kessel- und ORC Sensorik für einen optimalen Regelbetrieb installiert soweit dies im laufenden Betrieb möglich war, und für den Probetrieb aktiviert, Sensoren die einen aufwendigeren Umbau erfordern, wird der Einbau, für die nächste Revision im Mai 2016 geplant.

Weiters wurden die Messgeräte in die bestehende Bachmann-SPS eingebunden und getestet, dadurch war es möglich die erschaffenen Modelle teilweise online eingebunden.

Erste Tests wurden durchgeführt, und die Datenbankkommunikation auf Funktionsfähigkeit geprüft, auf welcher alle Messwerte und Rechenwerte gespeichert werden.

Messgeräteliste zur Implementierung			
Anlage	Wirkung	eingebaut	geplant (bei Revision)
ORC / Thermalöl			
Temperatur nach Regenerator	Bilanzierung und Wirkungsgradbestimmung		x
Temperaturen nach Pumpe	Bilanzierung und Wirkungsgradbestimmung		x
Temperatur im Bypass als Überwachung	Bypassklappe prüfen		x
Druckmessung vor der Turbine	Bilanzierung und Wirkungsgradbestimmung		x
Druckmessung nach der Turbine ist wichtiger	Druckverlust		x
US-Messung (Silikonöl, Thermalöl)	Umlaufbestimmung		x
Gasdetektor an der Vakuumpumpe	Sicherheit		x
Thermalölniveaumessung im Ausgleichsbehälter	Sicherheitsaspekt: vgl. Installation Altenmarkt		x
Kavitationsdruckmessung an der Thermalpumpe (Druckmessung vor und nach Pumpe)	Sicherheit		x
Stromzähler an der Pumpe	Eigenstromverbrauch-Bilanzierung	x	
Füllstandsmessung am Verdampfer ist nachrüstbar (Differenzdruckmessung wie am Kondensator)	Teillastoptimierung		x
BK3			
Lichtschranken versetzen als Überfüllungsdetektor:	Überfüllung		
IR-Temperatur (optris) im Feuerraum aktivieren, als Vergleichsmessung	Feuerraumüberwachung	x	
O2_Messung Lamtec	Bilanzierung und Optimierung	x	
O2_trocken Messung aktivieren	Bilanzierung und Optimierung	x	
CO, CO2 Messschrank aktivieren (Wartung, Kalibrierung)	Bilanzierung und Optimierung		x
Luft- und Rauchgasvolumenstrommessung (zB Venturi PL, SL, Rezi)	Bilanzierung und Optimierung		x
Kondensation			
Feuchtesensor Kamin (=nach Entschwadungsluftgebläse)	Optimierung der Entschwadung		x
Feuchtesensor Umgebung	Optimierung der Entschwadung		x
Kondensatwassermengenzähler	Optimierung der Entschwadung	x	

3.8 Arbeitspaket 8: Validierung und Dokumentation

Nach der Installation auf PCs vor Ort wurde das ORC-Modell Anfang 2015 in Betrieb genommen und bis Ende März erfolgte die online-Simulation, dadurch konnte ein lange Periode mit vielen verschiedenen Lastfällen beobachtet werden und die Modellreaktion analysiert werden.

In der Berechnung der Kondensatorleistung wurde ein kleiner unterschätzender Fehler festgestellt:

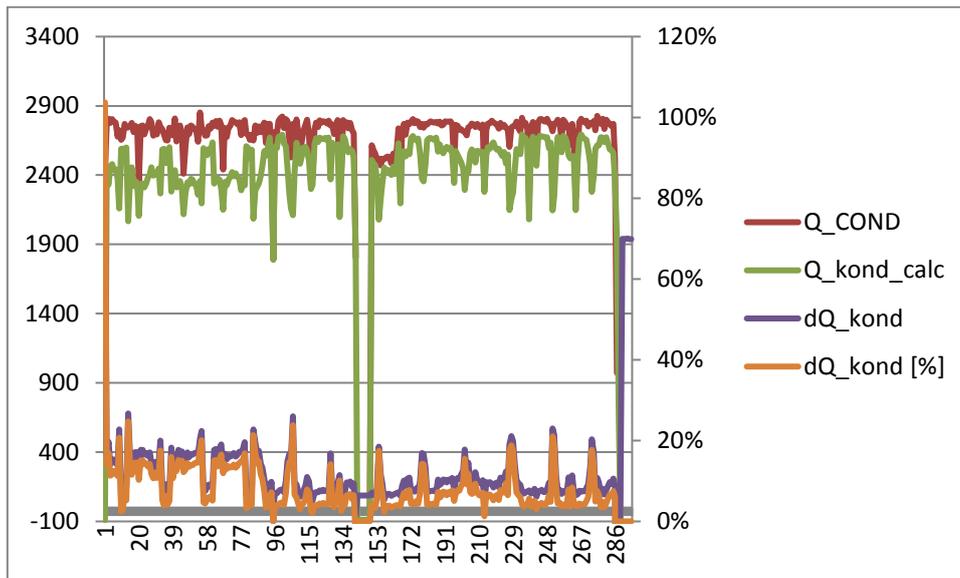


Abbildung 19

Bei der gewandelten Turbinenleistung musste ein zunehmender Fehler zum berechneten Potential festgestellt werden. Verantwortlich dafür ist eine Veränderung des Verschmutzungsgrades am Wärmetauscher. Dieses Ergebnis zeigt auch wie das Diagnosetool eingesetzt werden und interpretiert werden kann.

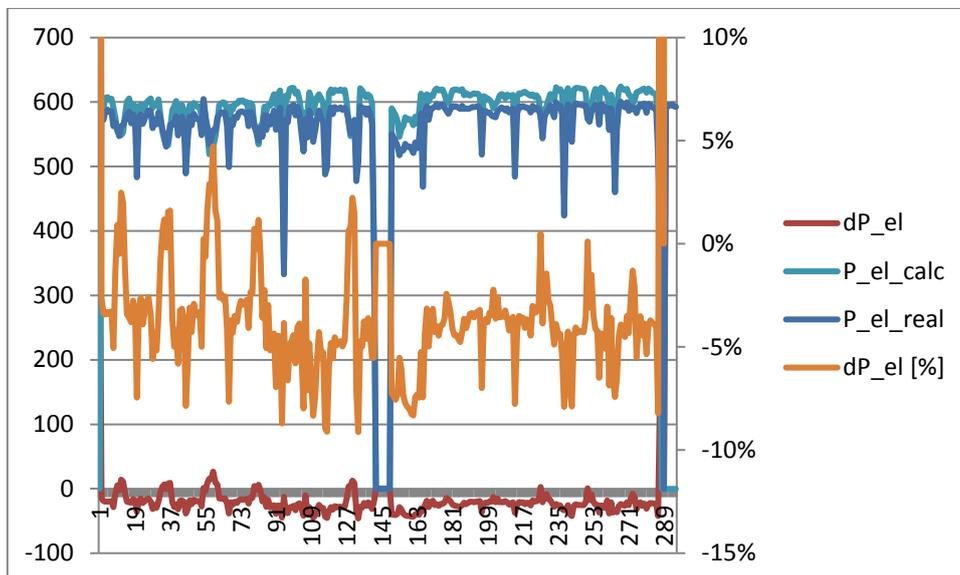
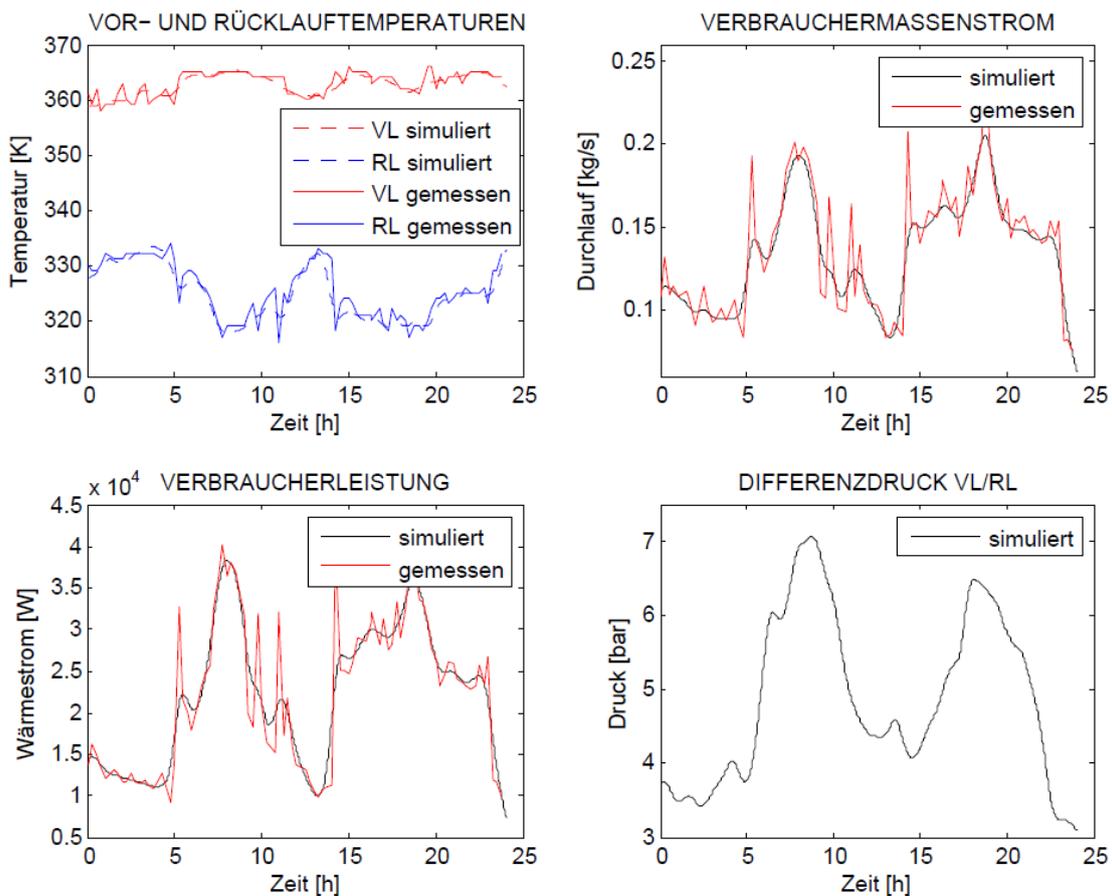


Abbildung 20

Im Laufe der Validierungsphase wurde auch das Kesselberechnungsmodell kurzzeitig getestet, und es konnte gezeigt werden dass die vorhandene Lambdasonde Ungenauigkeiten in der Messung aufweist, bei weiterer Betrachtung konnte durch die Simulation des Kessels ein Falschlufteintritt diagnostiziert werden, bei genauerer Nachmessung wurden ein Lufteintritt im ECO-Turm festgestellt, welche nicht nur einen Mehrverbrauch an Rauchgasventilatorenergie darstellen, sondern zusätzlich auch die Rauchgaskondensation negativ beeinflussen.

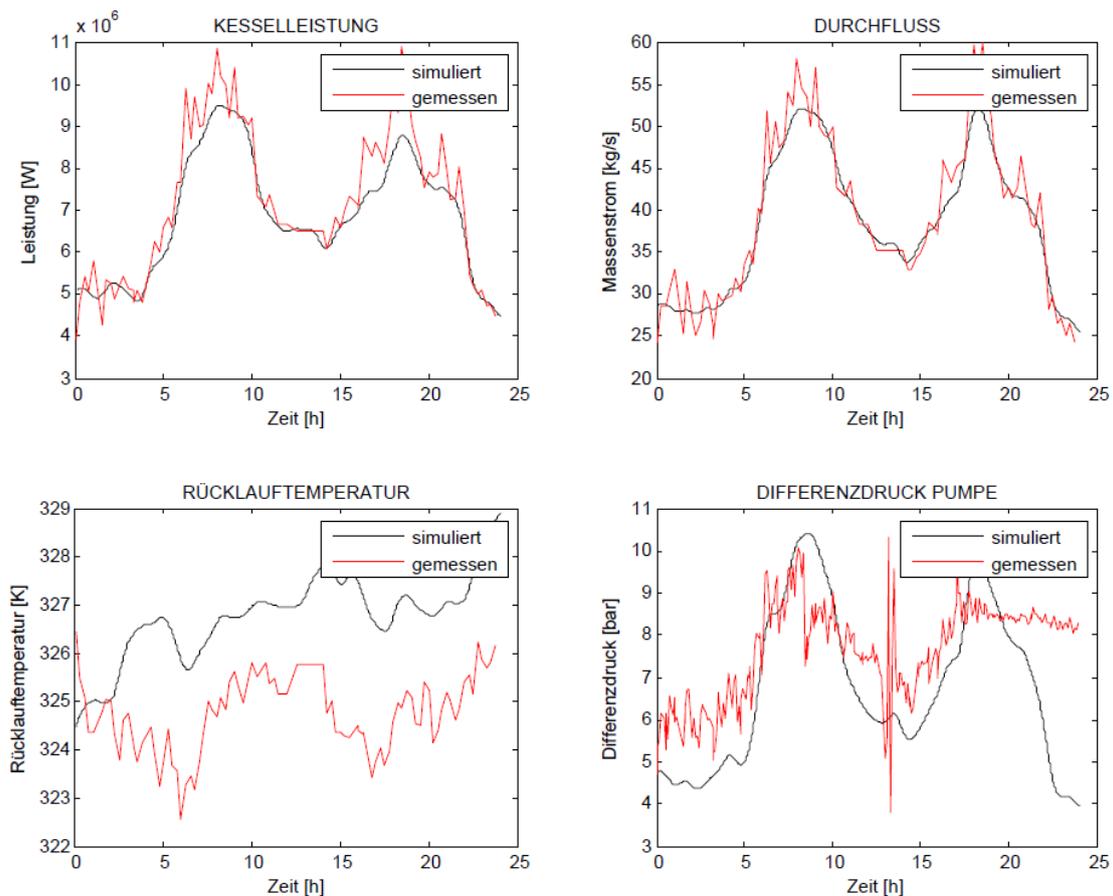
Auch das Netzsimulationsmodell wurde einer Validierung unterzogen. Diese Validierung wurde jedoch an einem anderen Fernwärmenetz durchgeführt aufgrund der Tatsache, dass die dafür benötigte Online-Erfassung der Wärmeübergabestationen der Kunden dort bereits realisiert wurde. Im FWN Großarl wird derzeit nur das Verhalten einzelner Großverbraucher erfasst.

Input für die Netzvalidierung waren Messwerte der Wärmeverbräuche und konsumierten primärseitigen Wassermassenströme der Wärmeverbraucher sowie Messwerte der Wassertemperatur ab Heizwerk. Für einen Simulationszeitraum von 24 Stunden ergaben sich an einem beispielhaften Wärmeverbraucher folgende Ergebnisse:



Anmerkung: Für den Differenzdruck zwischen primärseitigem Vor- und Rücklauf an den Verbrauchern lagen keine Druckmessungen vor.

Für die Heizwerkdaten Kesselleistungs-, Pumpenstrom-, Temperatur- und Pumpendifferenzdruckverlauf wurden folgende Simulationsergebnisse erzielt:



Der relativ große Fehler in der Rücklauftemperatur ist auf eine mangelhafte Zuordnung der Verbraucherstandorte mit den Messdaten zurückzuführen.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Publikationen

Eine regelmäßige Projektfortschrittskontrolle und ein durchdachtes Projektmanagement lieferten einen guten Überblick über Erreichtes und Nicht-Erreichtes, den Ist-Zustand und ließen etwaige Engpässe, etwaige Sackgassen und andere Probleme erkennen und ermöglichte ein Gegensteuern.

Arbeitspaket 2: KPI Definitionen und Optimierungspotential

Das Erarbeiten von KPIs hat sich, im Bezug auf praktische und aussagekräftige Kennzahlen, als anspruchsvolle Aufgabe dargestellt. Eine sinnvolle Auswahl benötigt sowohl ein gewisses Maß an wirtschaftlicher Erfahrung im Betrieb von Wärmenetzen, als auch einen wissenschaftlichen Ansatz, um den ökologischen und ressourcenbezogenen Argumenten Rechnung zu tragen.

Arbeitspaket 3: Visualisierung und Softwaresystem

Mit Hilfe der Visualisierung relevanter KPIs und verschiedener Input- und Outputgrößen eines Heizkraftwerkes gelang es einen zentralen Überblick über den Zustand des Werkes zu erlangen. Das Softwaresystem erlaubt es dabei verschiedenste Größen in Zusammenhang zu stellen und KPIs auch über einen variablen Zeitraum je nach Aufzeichnungshistorie miteinander zu vergleichen. Dabei hat sich

gezeigt, dass eine Erfassung aus verschiedenen Datenquellen dabei die größten Herausforderungen beinhaltet aber zugleich auch großes Potential. Einerseits mussten unterschiedlichste Datenquellen miteinander kombiniert werden und andererseits galt es einen optimalen Diskretisierungsgrad zu finden. Denn ein hoher Auflösungsgrad bietet sehr gute Möglichkeiten der Analyse, erfordert jedoch auch große Datenspeicher und Rechnerressourcen. Daher galt es, speziell in der Datenaufbereitung Lösungen und Konzepte zu finden, die mit großen Datenmengen und hoher zeitlicher Auflösung effizient umgehen können.

Arbeitspaket 4: Modellbildung

Am Beginn eines Modells steht immer ein theoretische Abstraktion des Prozesse und eine Vorstellung der Ergebnisse, welchen das endgültige Modell nie ins Detail gerecht wird, da sich im Zuge der Modellbildung Problemstellungen ergeben, welche zu Beginn noch nicht abschätzbar waren. Nach der Fertigstellung und dem Testen des Teilmodelles „Fernwärmenetz“ erfolgte eine erfolgreiche Validierung des Modells (Simulationssoftware Matlab) mit Hilfe von Messdaten eines anderen Fernwärmenetzes welche alle Kundendaten in Echtzeit online erfasst. Eine automatisierte Netzaggregation des Fernwärmenetzes mittels Excel, so wie eine automatisierte Rücktransformation sind ebenfalls im Zuge von Diplomarbeiten an am Institut für Energietechnik – TU Wien gelungen. Zusätzlich wurden auch die Teilmodelle ORC Modell, Rauchgaskondensationsmodell und Kesselmodell abgeschlossen und getestet.

Arbeitspaket 5: Optimierungs- und Regelalgorithmen

Im Zuge der Modellbildung des Systems wurden zahlreiche Optimierungspunkte aufgezeigt, anlagentechnische sowie in der zusammengefassten Gesamtsteuerung des Anlagen.

Für die modellprädiktive Regelung des Netzes fehlten schlussendlich der Ausbau der Endkunden mit Echtzeit Kundenstationen und eine bidirektionale Kommunikation. In der erweiterten Optimierung des ORC Modules, muss aufgrund von Exklusivrechten der Firma Turboden auf den Austausch der SPS gewartet werden.

Die Regelalgorithmen wurden auf Basis der Modell entworfen, und sind mehr simulationsgetrieben.

Arbeitspaket 6: Diagnosesystem

Mit dem Diagnosetool für die ORC-Analyse in Matlab/Simscape steht eine statische Simulation zur Verfügung, welche nach Eingabe der Kühl- und Heizkreistemperaturen, sowie des Wärmemengenzählerstands des Kühlkreises die Idealleistung, die Wärmetauscherbeschaffenheit und den Wirkungsgrad der Anlage berechnet. Die online-Diagnose wurde für die Implementierung im Projekt mithilfe eines PC ermöglicht, eine Kompilierung auf die lokale Steuerung ist möglich. Weitere entwickelte Module:

- Fertigstellung Diagnosetool FW (Pumpenstrom, Netzverluste, Rücklaufemperaturpotential)
- Kesselberechnungstool (Falschlufteintritt, Feuchtegehalt)
- Fertigstellung Diagnosetool Rauchgaskondensation in einer Grobbilanz. Die Berechnung basierend auf den Wärmeübergängen war auf Grund der unterschiedlichen Phasen des Wassers (flüssig, dampf) nicht zielführend.

Arbeitspaket 7: Implementierung Pilotanlage

Zuerst erfolgte eine Bedarfsanalyse zusätzlicher Messtechnik, sowie eine Beurteilung deren optimalen Positionierung. Anschließend wurden ausgewählte Messsensoren an der Anlage implementiert. Des Weiteren wurden in diesem Arbeitspaket die wesentliche vorhandenen sowie die neu hinzugekommenen Messwerte an das Energy Performance Control System [bioEPCS] online angebunden.

Arbeitspaket 8: Validierung und Dokumentation

Nach der Implementierung der Messtechnik und der Installation der Simulationswerkzeuge der in Arbeitspaket 4 entwickelten Modelle wurde durch das Sammeln von Erfahrungsdaten aus speziellen Betriebsfällen die Robustheit getestet und dokumentiert. Die Implementierung des, auf den KPIs basierenden, Energy Performance Control Systems, des auf den verfahrenstechnischen Modellen basierenden Diagnosesystem sowie der darauf aufbauenden Optimierungs- und Diagnosealgorithmen sollen zu einer Performance-Steigerung der Gesamtanlage in Großarl führen.

4.1.1 Netz

Ein Netzsimulationsmodell für strangförmige und leicht vermaschte Fernwärmenetze liegt vor und kann für vergleichbare Netzsimulationen herangezogen werden. Es könnte als Grundlage für eine etwaige Online-Implementierung für neuartige Netzregelungen dienen. Für eine fortgeschrittene Netzregelung, jenseits von der Schlechtpunktregelung, wird ein hoher Grad an Vernetzung der Kunden vorausgesetzt. Dafür werden Wärmeübergabestationen mit bidirektionaler Kommunikation benötigt um Verbrauch und Bedarf sowie Wärmetauscherdiagnose zum Heizwerk zuzusenden sowie um Stellgrößen für den aktuellen Netzbetrieb an die Kundenstation zu übermitteln. Die zukünftige Nutzung des Netzmodells hängt von der Entwicklung der gegenwärtigen Netze und deren Kommunikation ab, darüber hinaus wird es zur einfachen Reglerauslegung von bestehenden Netzen, sowie zur Planung von neuartigen Netzen (low-temperature und sequentielle Netzabschaltung) ausgebaut werden.

4.1.2 ORC

Für eine Regelung und detaillierte Diagnose des IST-Zustandes wurde vom Lieferanten das Modul mit zu geringer Sensorik ausgestattet, es erlaubt keine Messung des für Kreisprozesse so wichtigen Umlaufes und somit keine Bestimmung von absoluten Größen im Silikonölsystem. Dadurch ist die Bestimmung der Turbinengüte auf Regressionen der historischen Daten abhängig, welche treffsicher Aussagen sehr schwer machen. Deshalb muss als Voraussetzung unbedingt eine US-Messung empfohlen werden.

Die Weiterverwendung des Modells wird derzeit geprüft in Richtung Wasserdampfprozesse und auch für die Modellierung von Großwärmepumpen, welche auf eine immer stärker werdende Nachfrage stoßen. Im Heizwerkbereich spielen sie in der Niedertemperaturnutzung der Rauchgaskondensation eine wesentliche Rolle den Brennstoffwirkungsgrad noch weiter Richtung Brennwert zu steigern.

4.1.3 Kessel

Bei der Bilanzierung des Kessels wird immer deutlich dass durch die ungenaue Aussage über die Brennstoffmenge und Zusammensetzung (Wassergehalt) sowie aufgrund der geringen Rauchgasmesssensoren (trockene und feuchte O₂-Messung) die genaue Bilanzierung sehr schwer

möglich ist. Trotzdem ist das Kesselmodell für eine Sollwertberechnung für sämtliche Heizwerke interessant.

4.1.4 RGK

Die Modellierung der Kondensation gestaltete sich am schwierigsten, da zur Rauchgaskondensation an horizontalen Rohren kaum wissenschaftliche Abhandlungen existieren. An dieser Stelle muss die Notwendigkeit von Grundlagenprojekten bezüglich dieses Themas herausgestrichen werden.

Im Laufe dieses Projektes sind 3 Ansätze entstanden welche vom rein datengetriebenen Modell (Neural Networks) über ein semi-experimentelles Modell zum Versuch des rein physikalischen Modelles führen.

Jedes dieser Modelle besitzt einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich, die Herausforderung liegt in der Berechnung des Wärme- und des Stoffübergangskoeffizienten von Wasserdampf und Rauchgas, und in weiterer Folge der resultierenden Wärmefreisetzung des Rauchgases.

Hier wird gemeinsam mit dem IET eine weiterführende Betrachtung der Grundlagen derzeit diskutiert.

4.1.5 Regelalgorithmen

Die Kompilierung der Matlab - Modelle in ein für SPS verwertbares C-Modell ist prinzipiell möglich, jedoch unter den gegebenen Umständen von schnellen Zykluszeiten eine Herausforderung an den Programmierer.

4.1.6 Gesamtanlage:

Es muss nach dem Projekt an der Grundintention für das Projekt festgehalten werden, viele der vorhandenen Heiz(-kraft-)werke, werden nicht mit ausreichend hoher Effizienz betrieben, die Gründe dafür sind Vielfältig und meist eine Kombination aus verbesserungsfähigen und fehlender Anlagentechnik, sowie einer zu robusten und sicheren Regelung von Seiten des Kessellieferanten um Gewährleistungsvorgaben sicherer zu erfüllen.

Die Absicht von bioEPCS nach einer Installation eines EPCS-Systems die notwendigen Regler aufgrund von mitlaufenden Simulationen schnell zu verbessern, kann auch nach dem Projekt noch nicht so schnell als erwartet erfüllt werden und dadurch können aus Kostengründen für das Engineering vor allem Kleinanlagen nicht bedient werden.

Auch wird für die Bedienung und Parametrierung der einzelnen Modelle für den jeweiligen Anwendungsfall noch viel Zeit benötigt. Aus diesem Grund wurde am IET, abseits vom vorliegenden Projekt ein teilautomatischer Netzimport entwickelt, welcher auf Basis von 2D-CAD Plänen und den hinterlegten Informationen versucht diese in ein Excel-File zu laden. Weiters erfolgt in diesem Excel durch eine entsprechende Einteilung die Aggregation und anschließend, werden diese Cluster automatisch in Simscape geladen. Dieser Automatismus verringert die Netzabbildung von einem 300 Kundennetz von 2 Wochen auf 2 Tage.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die Erfahrungen aus diesem Projekt zeigten die Potentiale und Grenzen einer verbesserten Regelbarkeit von diesen Heizwerken, aufgrund von automatisierungs- und vertragsrechtlichen Hürden sowie den erforderlichen Kosten der hierfür notwendigen Umrüstungen der Übergabestationen.

Um das volle Potential der Optimierungsmaßnahmen nutzen zu können sind folglich weiterführende Entwicklungs- und Umsetzungsprojekte notwendig. Im Falle des Heizwerks Großarl, wird derzeit die Planung für einen größeren hydraulischen Umbau vorgenommen, welcher im Jahr 2016 umgesetzt werden soll. Darin fließen wesentliche Ergebnisse des Projektes bioEPCS ein, welche speziell im Falle des Automatisierungsumbaus die Voraussetzungen für Folgeprojekte schaffen sollen. Aufbauend auf der übergreifenden Regelstrategie und den entwickelten Modellen und Diagnosealgorithmen wird im Zuge des Umbaus die Umsetzung der im Projekt erforschten Optimierungslösung angestrebt.

6 Literaturverzeichnis

- [1] VDI, VDI-Wärmeatlas, 2006.
- [2] K. Jeong, Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger, 53 Hrsg., International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, pp. 2361 - 2368.
- [3] F. Brandt, Wärmeübertragung in Dampferzeugern und Wärmeaustauschern, Deutschland: Vulkan Verlag - FDBR-Fachbuchreihe, 1995.
- [4] M. K. H. B. E. L. Kwangkook Jeong, „Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger,“ International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010.
- [5] J. Nagler, Diplomarbeit; Dynamische Simulation eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simscape, Wien: Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, 2014.
- [6] F. Jäger, Diplomarbeit; Erstellen eines Simulations- und Diagnose - Tools für bestehende ORC - Anlagen, Wien: Technische Universität Wien, Institut für Thermodynamik und Energietechnik, 2014.
- [7] H. V. Larsen, H. Pálsson, B. Bøhm und H. F. Ravn. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. Energy Conversion and Management, 43, Nr. 8, S. 995–1019, 2002.

7 Kontaktdaten

Projektleiter: Bernhard Kronberger

Institut/Unternehmen: VOIGT+WIPP Industrial Research GmbH

Postadresse	Märzstraße 120, 1150 Wien
Telefon	01 2350032 0
E-mail	kronberger@voigt-wipp.com
Website	www.voigt-wipp.com

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen