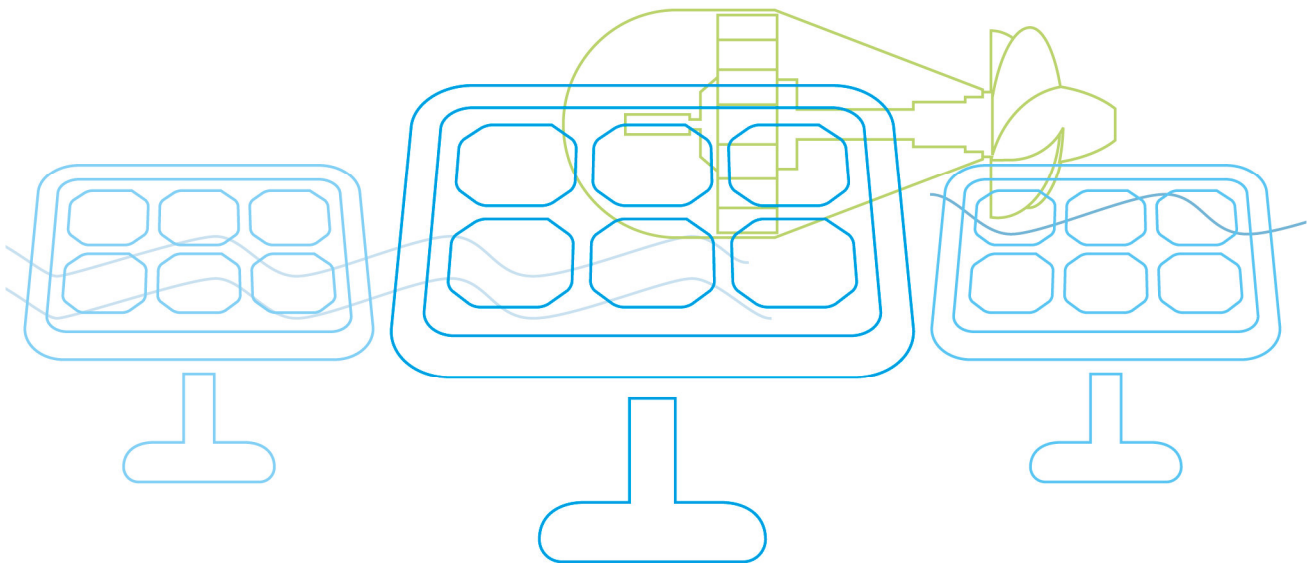




BioNetControl-Systems

Regelungs- und Optimierungssystem
für den energieeffizienten Betrieb von
Fernwärmenetzen an Biomasseanlagen



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit

1.1 Projektabriss

1.1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Der Betrieb von kleinen und mittleren dezentralen Biomasse-Kraftwerken ist oft durch einen niedrigen Automatisierungsgrad, hohe Verluste bei der Verbrennung von Biomasse und ineffizienten Betrieb der Fernwärmenetze gekennzeichnet. Kleine und mittlere Energieversorgungsanlagen werden meist mit stark vereinfachten Regelkonzepten vom Anlagenlieferanten ausgerüstet. Das macht zwar die Anschaffung und die Errichtung der Anlagen kostengünstiger, den laufenden Betrieb jedoch teuer und ineffizient. Den Betreibern fehlt es meist an Know-how zur durchgängigen ökonomischen, ökologischen und regelungstechnischen Optimierung von Kraftwerk und Energieverteilungsnetzen.

Das Ziel dieses Projekts ist geeignete Methoden zur Modellierung der einzelnen Komponenten: Kraftwerk, Fernwärmenetz und Verbrauchern zu entwickeln, sowie eine robustes Regelkonzept zu entwerfen welches eine ganzheitliche Optimierung zulässt. Zuerst müssen im Modellierungspart die wesentlichen nichtlinearen Dynamiken identifiziert und geeignete Modelltransformationen definiert werden. Wichtig ist darauf Wert zu legen den Komplexitätsgrad möglichst gering zu halten, aber dennoch die Dynamiken in der notwendigen Güte abzubilden. Für das Regelkonzept sind geeignete Kostenfunktionen zu definieren und ein geeigneter Regelansatz zu wählen. Im Regelansatz soll sowohl die Nichtlinearität in den Prozessdynamiken berücksichtigt werden als auch Robustheit gegenüber Störungen und Modellunsicherheiten.

1.1.2 Aufbau und Methodik

Das Gesamtsystem besteht grob unterteilt aus dem Biomasse-Kraftwerk, dem Fernwärmenetz, sowie den einzelnen Verbrauchern, deren Wärmebedarf als wesentliche Einflussgröße auf das Fernwärmenetz wirkt. In der Abb. 1 wird die Problemstellung für die drei Hauptkomponenten illustriert. Dies stellt natürlich nur eine sehr vereinfachte Sichtweise dar und kann als Verallgemeinerung komplexerer Strukturen angesehen werden. Diese vereinfachte Sichtweise ist jedoch eine wesentliche Voraussetzung für eine ganzheitliche Prozessoptimierung dar.

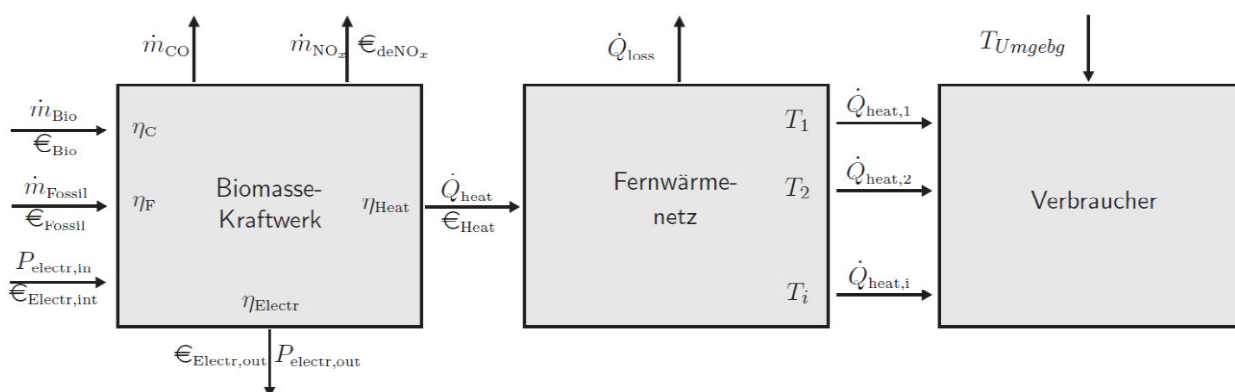


Abbildung 1: Grundsätzliche Gliederung des Gesamtsystems

1.1.2.1 Biomasse – Kraftwerk

Ein Biomassekraftwerk besteht grundsätzlich aus einer Biomasse-Rostfeuerung, Gasheizkesseln für Maximallast sowie Dampfturbinen zur Stromerzeugung. In dem *AP2 - Modellbildung Kraftwerk* wurde ein möglichst einfaches dynamisches Modell der gesamten Anlage durch eine Kombination von physikalischen Bilanzgleichungen, Grey-Box Ansätzen und mittels Expertenwissen erstellt. Um möglichst geringen Komplexitätsgrad des Kraftwerksmodells zu erreichen, wurde es auf 4 Regelgrößen und 4 Stellgrößen reduziert welche auch hinsichtlich des Reglerentwurfs als geeignet erschienen. Desweiteren werden die Nichtlinearitäten des Modells identifiziert, charakterisiert und mit Hinblick auf das *AP3 - Methodik für Modelltransformation* Betriebspunkte bzw. ein passender Partitionsraum gewählt. Optimale Betriebspunkten wurde mittels einem Achsen-orthogonalen, inkrementalen Partitionsverfahren ermittelt. In diesen Betriebspunkten wurde eine lokale lineare Modellstruktur erstellt. Im *AP5 - Methodik für Reglernetzwerk (RNW)* wurde ein Fuzzy Modellprädiktiver Regler (Fuzzy-MPC) entwickelt welcher die interpolierten lokalen linearen Modelle verwendet. Ausgehend von diesen Resultaten wurde im *AP6 - Folgeregelkreis Biomassefeuerung* der Fuzzy Modellprädiktive Regelung weiter optimiert und anhand einer Versuchsanlage in realen Bedingungen getestet

1.1.2.2 Fernwärmenetz

Die physikalische Modellierung des Fernwärmenetzes (*AP4 - Modell Fernwärmenetz und Verbraucherverhalten*) gliedert sich in eine hydraulische Komponente und einen thermische Komponente. Das hydraulische Netzwerk besteht aus Pumpen, Rohren und Ventilen und lässt sich strukturell durch diese Komponenten mit Hilfe von Massenbilanzen und Druckverlusten bzw. –steigerungen modular beschreiben. Für die thermische Modellierung werden die Energiebilanz- bzw. Energietransportgleichungen herangezogen sowie Wärmeverluste an die Umgebung berücksichtigt. Da die Energietransportgleichung eine partielle Differentialgleichung ist müssen geeignete Lösungsmethoden gewählt werden. Um geeignete Prozessmodelle für die Regler zu erhalten wurde weiteres ein datenbasierter Ansatz gewählt. Hier wurden sogenannte *bedingt parametrische Modelle* in denen die Koeffizienten Funktionen des Volumenstroms in Netz sind verwendet. Ähnlich wie beim Kraftwerksmodell wurden diese geschätzten Modelle im *AP5 - Methodik für Reglernetzwerk (RNW)* in ein Fuzzy MPC eingebettet. Für die Auslegung und Optimierung des MPC (*AP7 – Führungsregelkreis für Fernwärmenetz*) wurden Modellunsicherheiten durch geeignete Wahl der Referenztrajektorien berücksichtigt. Desweiteren wurde ein Ansatz vorgestellt, der die Referenztrajektorien optimiert um minimale operative Kosten zu gewährleisten.

1.1.2.3 Verbraucherverhalten

Die Modellierung des Verbraucherverhaltens wurde ebenfalls in den Arbeitspunkt 4 gepackt. Der variable Wärmebedarf ist die Ursache für den sich ändernden Volumenstrom in Netzwerk und die dadurch resultierenden Transportverzögerungen im Netzwerk. Daher ist eine Prognose des Wärmebedarfs zweckmäßig um zukünftigen Volumenstrom zu ermitteln, da die Koeffizienten der bedingt-parametrische Modelle vom Volumenstrom abhängen. Der Wärmebedarf der Kunden weist stark wöchentliche und tägliche Zyklen auf und hat eine hohe Korrelation mit der Außentemperatur. Deshalb werden u.a. Methoden basierend auf autoregressive Prozesse mit exogenen Variablen eingesetzt. Speziell wurde ein SARIMAX Modell vorgestellt sowie ein Strukturmodell basierend auf eine State-Space Darstellung.

1.1.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung des Projekts

Die optimale Regelung von Fernwärmenetzen ist auf Grund der zyklischen Wärmelast welches zu variablen Totzeiten im Fernwärmenetz äußerst anspruchsvoll. Es müssen sowohl diese Totzeiten bei einer Regelung beachtet werden als auch ein möglichst Effizienter Weg gefunden werden dies zu bewerkstelligen. Ähnlich komplex ist die Regelung von Biomasse Kraftwerken, da die Dynamik des Prozess wesentlich von der Wärmelast abhängt. Trotz dieser herausfordernden Aufgabenstellung wurde in diesem Projekt ein Packet von Tools und Methodiken entwickeln, die sowohl Simulation als auch optimalen Betrieb von Fernwärmenetzen an Biomassen ermöglicht. Zusammenfassend sind folgende Modelle bzw. Regler im Zuge dieses Projekts entstanden:

- Physikalisches Modell des Fernwärmenetzes unter Verwendung von Finite-Differenzen Methoden
- Black-Box Modell des Fernwärmenetzes unter Verwendung von lokalen linear Modellen
- Modellierung der Rücklauftemperatur der Kunden und erstellen eines Prognosemodells für den Wärmebedarf
- Fuzzy Modell Prädiktiver Regler für das Fernwärmenetz mit Set-Point Optimierung
- Grey-Box Modell des Biomasse Kraftwerks
- Fuzzy Modell des Biomasse Kraftwerks mit Lolimot Partitionierung
- Fuzzy Modell Prädiktiver Regler für das Biomasse Kraftwerk

Die Plausibilität der entwickelten Methoden wurde durch zahlreiche Simulationen verifiziert. Darüber hinaus wurde der Fuzzy MPC für das Kraftwerk erfolgreich in einer bestehenden Anlage in Großarl implementiert. Ebenfalls ist die Generalisierungsfähigkeit der entwickelten Methoden hervor zu heben. Bei jeglicher Regelung von nichtlinearen Prozessen kann diese Methodik Anwendung finden.

1.1.4 Ausblick und Resümee

Herausfordernd bleibt die Integration der Fuzzy Regler für Fernwärmenetz, Kraftwerk und der Wärmeprogno in ein übergeordnetes Regelkonzept. Neben der Schnittstellenproblematik ist sowohl eine robuste Konzeption für Führungsregler (Fernwärmenetz) und Folgeregler (Kraftwerk) von Nöten. Ein großer Fokus dieses Projekts lag auf datenbasierten Methoden. Die setzt natürlich voraus, dass genügend qualitativ hochwertige Daten vorhanden sind. Speziell bei lokalen Modellen sollten in jedem Betriebspunkt ausreichend Daten zur Verfügung stehen um konsistente Schätzung der Parameter gewährleisten zu können. Zwar wurde auch eine adaptive Least-Squares Schätzung vorgestellt, die es ermöglicht, online (während des Betriebs), Parameter zu schätzen, doch die Partitionierung basiert auf einen Algorithmus der derzeit nur in der offline Variante implementiert wurde. Hier könnte sich in die Zukunft ein interessantes Forschungsgebiet auf tun. Natürlich bietet das Feintuning und Optimierung der entwickelten Methoden für verschiedenste Fernwärmenetze ein spannendes zukünftiges Aufgabenspektrum. Speziell ist Erweiterung auf Heizkraftwerke in denen eine kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme stattfindet hervorzuheben.

1.2 Inhalte und Ergebnisse des Projekts

Im folgenden Abschnitt werden die Tätigkeiten in den einzelnen Arbeitspaketen beschrieben, detailliert auf die verwendete Methodik eingegangen und die Ergebnisse präsentiert.

1.2.1 Motivation und Zielsetzung

Der Zweck von Fernwärmenetzen ist ausreichend Wärme für die Konsumenten zur Verfügung zu stellen. Mit ausreichend Wärme ist die Kombination von passender Vorlauftemperatur des Transportmediums (meist Wasser) sowie Volumenstrom (Druck) gemeint (siehe Abb. 2). Der Vorteil von Fernwärmenetzen ist dadurch gegeben, dass die Wärmeproduktion zentral in einem Kraftwerk stattfindet und dies somit viel effizienter und emissions-schonender ist als die gleiche Wärmemengen lokal bei den einzelnen Konsumenten zu produzieren. Jedoch ist auf Grund der Komplexität des Gesamtprozesses wichtig, den gesamten Technologischen String: Produktion, Transport und Verteilung der Wärme zu betrachten (Balate, Chramcov, Navratil, & Princ, 2007). Deshalb sind Strategien die eine optimale Regelung der einzelnen Prozesse und des Gesamtprozess ermöglichen ein entscheidend für eine kostenoptimalen Betrieb.

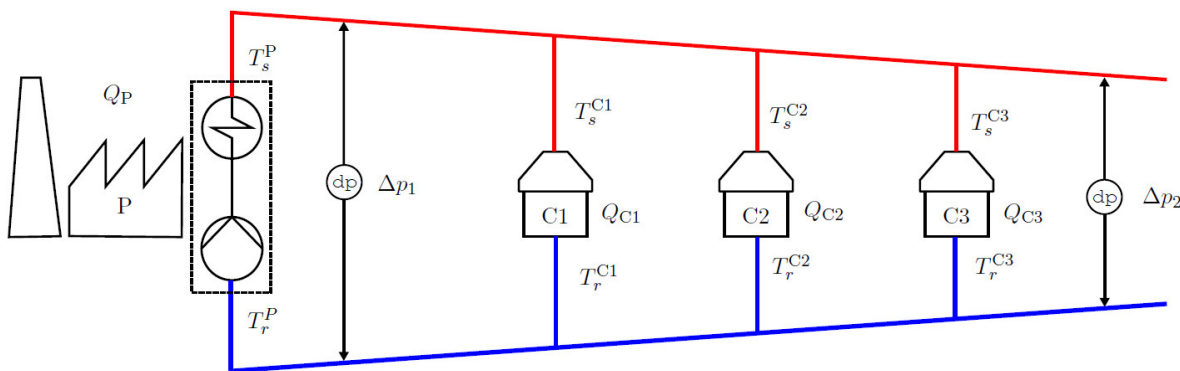


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Fernwärmenetzes mit Kraftwerk und Verbrauchern

Für die Wärmeproduktion im Kraftwerk soll ein Regler entworfen werden der robust gegen Störungen und Modellunsicherheiten agiert und dennoch die Nichtlinearitäten in geeigneter Form widerspiegeln kann. Für den Wärmetransport ist es unabdingbar eine Methode zu entwickeln die sowohl die Transportverzögerungen erfasst als auch den Wärmeverlust der durch den Transport entsteht modelliert. Der Einfluss der Konsumenten auf das Fernwärmenetz wird durch den zyklischen Wärmebedarf charakterisiert welches zu einem variablen Volumenstrom in Netz führt. Eine geeignete Regelstrategie muss dies in Betracht ziehen.

Im nächsten Abschnitt wird detailliert auf die Methodik eingegangen welche für die oben genannten Problemstellungen verwendet wurde und es werden ebenfalls die Ergebnisse präsentiert.

1.2.2 Methodik und Ergebnisse

1.2.2.1 Physikalische Modellierung Fernwärmenetz

Hydraulische Modellierung:

Ein Fernwärmenetz kann im Prinzip in die Komponenten Pumpe, Rohre und Ventile eingeteilt werden. Wobei Pumpen zu Druckerhöhungen und Rohre plus Ventile zu Druckverlusten führen. Dies steht Analogie zur Elektrotechnik mit Spannungsabfällen an elektrischen Widerständen und Potentialerhöhungen an Spannungsquellen. Desweiteren kann der Massenstrom im Fernwärmenetz als elektrischer Strom interpretiert werden. Jedoch ist zu erwähnen, dass der Druck nichtlinear vom

Massenstrom abhängt. Deshalb sind auch geeignete Lösungsansätze wie z. Bsp. Newton-Raphson Verfahren nötig (Nielsen, 1989).

Im Grunde kann das gesamte Verteilungsnetz eines Fernwärmenetzes (siehe Abb.3) als eine Summe von Rohrdifferentialelement, wie in Abb. 4 dargestellt, gesehen werden. Für die hydraulische Betrachtung wird jedes Rohrelement als Widerstand betrachtet. Der Widerstandwert kann mittels Darcy-Weisbach Gleichung bestimmt werden. Hier gehen zum überwiegenden Teil die physikalischen Eigenschaften wie Länge und Durchmesser ein aber auch die Art der Strömung (laminar, turbulent) welche durch die sogenannte Reynoldszahl inkludiert wird.

Bei komplexeren Netzwerken mit Verzweigungen muss die Massenbilanz berücksichtigt werden.



Abbildung 3: Fernwärmenetz Tannheim (Tirol)

Auf Grund der Annahme in diesem Projekt dass das Medium inkompressibel, d.h. konstante Dichte hat, können die Massenbilanzgleichungen sehr einfach mit Hilfe der so genannten Inzidenzmatrix aufgestellt werden. Die Inzidenzmatrix hat als Einträge 0,-1 oder 1 und beschreibt die Konnektivität im Netzwerk. Somit kann die Netztopologie als Diagraph betrachtet welcher eine bestimmte Anzahl von Knoten V und Kante E hat (siehe Abb. 5).

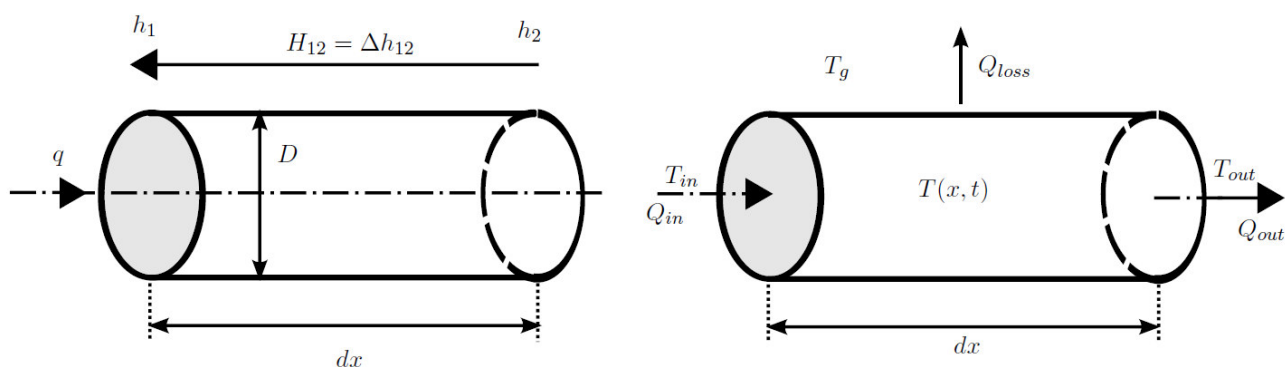


Abbildung : 4: Rohrdifferentialelement für die hydraulische Betrachtung (links) und die thermische Betrachtung des Fernwärmnetzes

Für ein komplexes Netz ergibt sich somit eine Differential Algebraische Gleichung (DAE) wobei die Differentialgleichung die Druckverlustdynamik (auch Momentenbilanz genannt) für jedes Rohrelement repräsentiert und die algebraische Gleichung die Massenbilanz umfasst (Grosswindhager et al. 2011a). In dieser Arbeit wurde der sogenannte quasi-stationäre Zugang verwendet. Das bedeutet, dass in jedem Zeitschritt nur der stationäre Volumenstrom im Netz berechnet wird und dieser für die Berechnung der Dynamik der thermischen Propagation verwendet wird. Die macht deswegen Sinn weil die hydraulischen Dynamiken, die sich mit Druckwellen

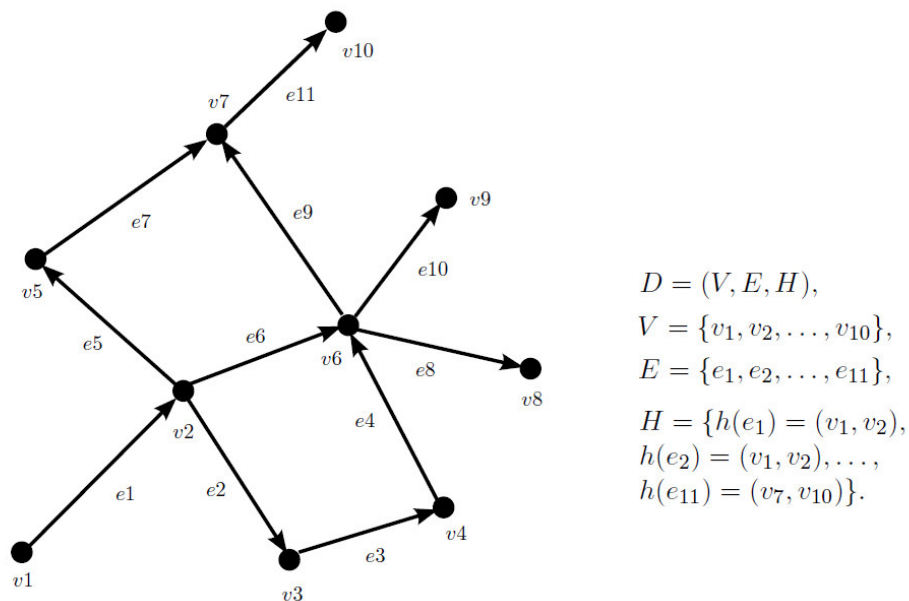


Abbildung 5: Beispiel eines Diagraphs

ausbreiten, sich im Sekundenbereich befinden und die thermischen Dynamiken Stunden dauern können. Die stationäre Flussverteilung kann sehr einfach mit iterativen Verfahren wie Newton-Raphson berechnet werden. Hier ist weiter zu erwähnen, dass im Falle einer Baumstruktur des Fernwärmenetzes, d.h. keine internen Schleifen, sich die Berechnung der Flussverteilung auf das Lösen eines linearen Gleichungssystems reduziert (Grosswindhager et al. 2011a).

Thermische Modellierung:

Die physikalische thermische Modellierung beruht auf der eindimensionalen Energietransportgleichung (auch Advektionsgleichung genannt) mit Source Term. Diese Transportgleichung ist eine Partielle Differential Gleichung (PDE), weit verbreitet und findet in vielen Bereichen Anwendungen (Sandou, 2005). Die skalare Größe ist im Fall von Fernwärmenetzen die Temperatur und der Source Term kann als Wärmeverlust an die Umgebung interpretiert werden. Dieser Wärmeverlust ist proportional zur Differenz zwischen der Temperatur im Rohr und der Umgebungstemperatur. Etwaige Wärmeübergangskoeffizienten müssen a priori ermittelt werden oder durch Modellkalibration bestimmt werden. Mathematisch lässt sich die Transportgleichung folgendermaßen anschreiben

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{4\dot{m}}{\rho D^2 \pi} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{4h}{c_p \rho D} (T - T_g) \quad (1)$$

mit geeigneten Anfangs- und Randbedingungen. Die Variablen in (1) sind D der Durchmesser des Rohrelements, ρ und c_p die Dichte und spezifische Wärmekapazität des Transportmediums (Wasser), h ein Wärmeübergangskoeffizient und T_g die Außentemperatur. Numerische Lösungsverfahren für (1)

umfassen Galerkin - Verfahren oder Finite-Differenzen Methoden. In diesem Projekt beschränken wir uns auf Grund der einfachen Struktur und algorithmischen Implementierung auf linear explizite Finite-Differenzen Methoden. Diese erlauben eine Zustandsraumdarstellung des gesamten Netzes, sodass ein Temperatur-Zeitupdate für das gesamte Netz simultan berechnet werden kann. Bei der Wahl der Finiten-Differenz Methode muss zwischen Genauigkeit und Komplexität abgewägt werden. Das *First order Upwind* Scheme ist 1. Ordnung und strikt monoton. Methoden höherer Ordnung erzielen exaktere Ergebnisse sind jedoch nicht monoton, d.h. sie verursachen unphysikalisches Überschwingen, sogenannte Wiggles in Region mit scharfen Gradienten. Hier ist das QUICKEST Verfahren (Leonard, 1979) zu erwähnen welches 3. Ordnung ist und als eines der besten Methoden für konvektiven Transport angesehen wird.

In Abb. 6 wurde ein uniformes Gitter in der räumlichen und zeitlichen Domäne illustriert, sowie der Stencil von QUICKEST S dargestellt. Anhand dieser Grafik ist ersichtlich, dass dieses Verfahren Temperaturwerte an zwei Gitterpunkten benötigt die stromaufwärts liegen und einen Gitterpunkt der sich stromabwärts befindet. Inklusiv dem zentralen Gitterpunkt ergeben sich also vier benötigte Gitterwerte welches auch die 3. Ordnung des Verfahrens nochmals widerspiegelt. Wie schon erwähnt ermöglicht die Eigenschaft der linearen expliziten Struktur der Methode die Einbettung in ein Zustandsraummodell. Somit kann in einem einzelnen Zeitschritt die Temperatur an allen Gitterpunkten im Fernwärmenetz berechnet werden. Jedoch bereiten Rohrverzweigungen im klassischen Algorithmus Schwierigkeiten, da offensichtlich zwei mögliche Gitterpunkte stromabwärts zur Verfügung stehen. Deshalb wurde eine relative intuitive Lösungsvariante vorgeschlagen indem ein aggregierter geschwindigkeits-gewichteter Gitterpunkt stromabwärts eingeführt wurde, welches durch eine einfache Modifikation des Original Algorithmus bewerkstelligt werden kann (Grosswindhager et al. 2011b). Auf ähnliche Weise wird die Berechnung der Rücklauftemperaturen durchgeführt. Auf Grund der Energiebilanz ergibt sich in jeder Rohrverzweigung ein Mischtemperatur die die sich aus der Massenfluss-gewichteten Berechnung der einzelnen Knotentemperaturen ergibt.

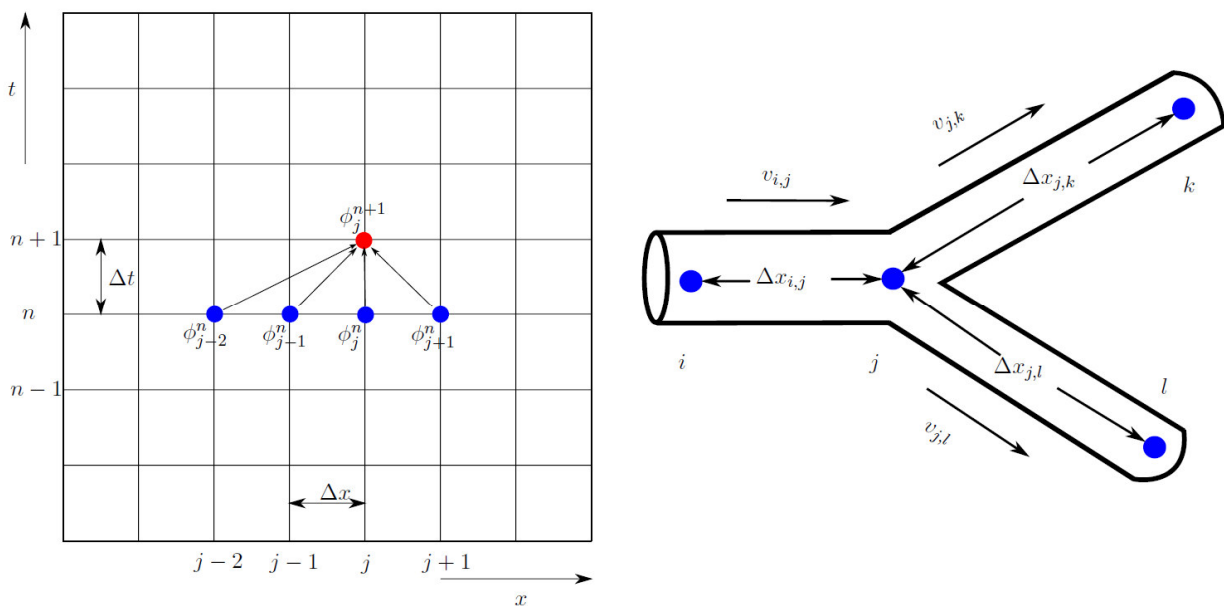


Abbildung 6: (links) Darstellung des QUICKEST Stencil in uniformen FD-Gitter; (rechts) Rohrverzweigung in Fernwärmenetzen mit unterschiedlicher räumlicher Diskretisierung

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Stabilitätsanalyse. Bei Finiten Differenz Methoden wird üblicherweise das *von Neumann* Stabilitätskriterium verwendet. Für die QUICKEST Methode kann gezeigt werden dass Stabilität für Courant Zahlen zwischen null und eins gewährleistet ist. Die Courant Zahl ist definiert als $v \Delta t / \Delta x$, wobei v die Geschwindigkeit des Mediums ist, und Δt , Δx die zeitliche bzw. räumliche Schrittweite darstellt. Dies bedeutet, dass für eine fixe räumliche Diskretisierung die zeitliche Rittschweite so zu wählen ist, damit auch für den maximalen Volumenstrom Stabilität gewährleistet werden kann.

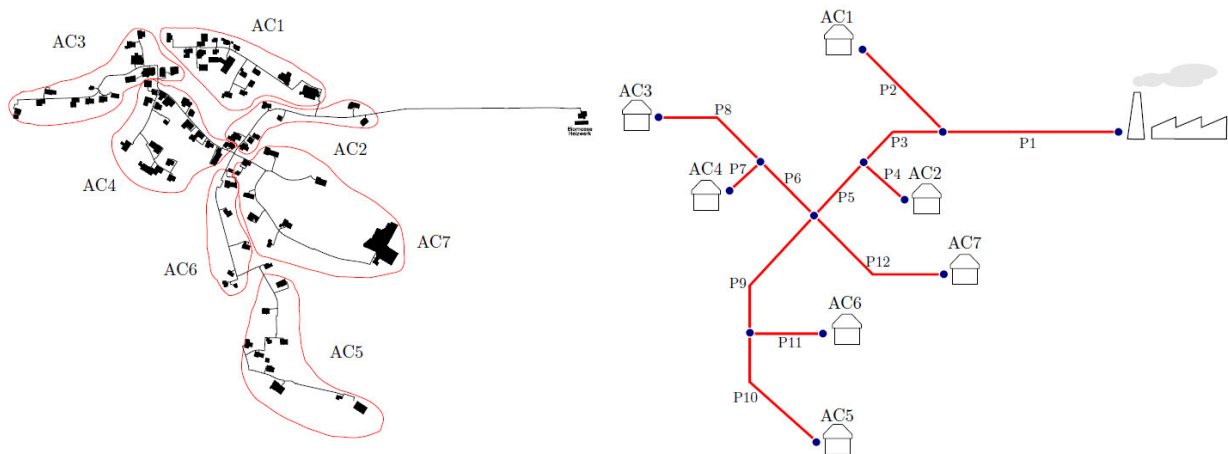


Abbildung 7: Originales und aggregiertes Fernwärmenetzwerk in Tannheim

Zur Validierung der Modelle wurden das Fernwärmenetz Tannheim (Tirol) herangezogen. Zuerst wurde um die Komplexität des Modells zu verringern Konsumenten in Clustern zusammengelegt (siehe Abb. 7). Somit wurden die Konsumenten von ursprünglich 84 auf 7 reduziert und das Netz von über 150 Rohren auf 12 verringert. Dies reduziert den Rechenaufwand enorm führt aber gleichzeitig nur zu einem geringen Fehleranstieg wie Studien belegen (Larsen, Palsson, Bohm, & Ravn, 2004). Für diese Cluster-Konsumenten wurden jeweils aggregierte Zeitreihen der gemessenen Vorlauftemperaturen, Rücklauftemperaturen sowie Wärmebedarf berechnet. Die Ergebnisse für die Simulation der Finite-Differenz Modell für die Vorlauftemperaturen ist in Abb.8 Zu sehen. Hier wurden die beiden aggregierten Kunden AC7 und AC5 herausgegriffen und 7 Tage simuliert. Man sieht das speziell für AC7 der näher am Kraftwerk liegt und auch höheren durchschnittlichen Massenstrom hat als AC5 (d.h., geringere Transportverzögerung) die Dynamiken relativ gut wiedergibt.

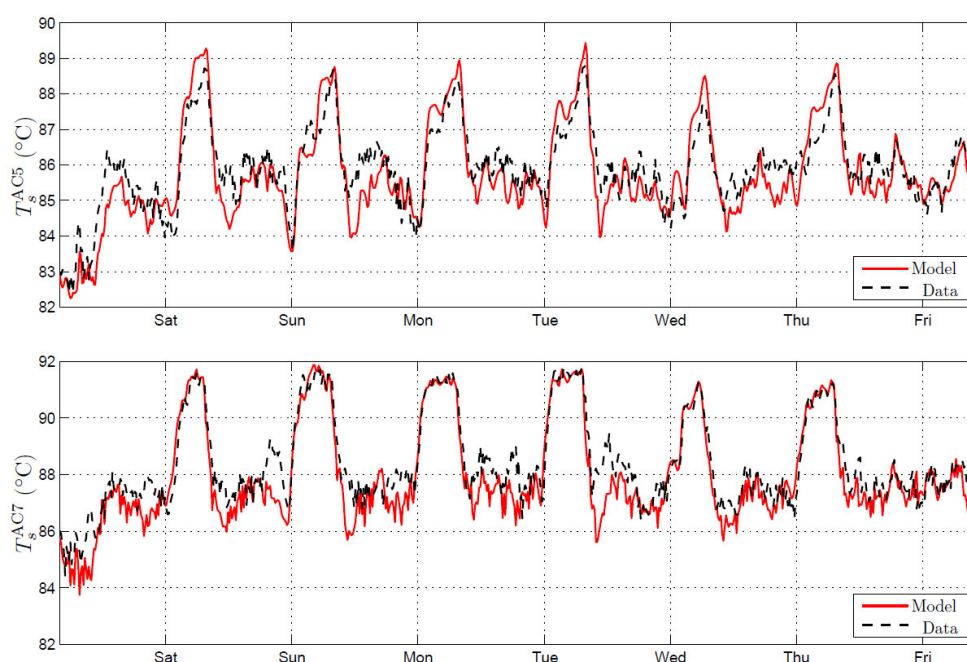


Abbildung 8: Performance des Finite-Differenz Modells für die Vorlauftemperatur bei AC5 und AC7.

Das Resultat für die Rücklauftemperatur ist in Abb. 9 präsentiert. Der augenscheinlich sehr geringe Fehler ist zu einem sicher auch darauf zurückzuführen, dass die Rücklauftemperatur wegen der Berechnung der Mischtemperaturen an den Rohrverzweigungen eine viel glattere Form aufweist.

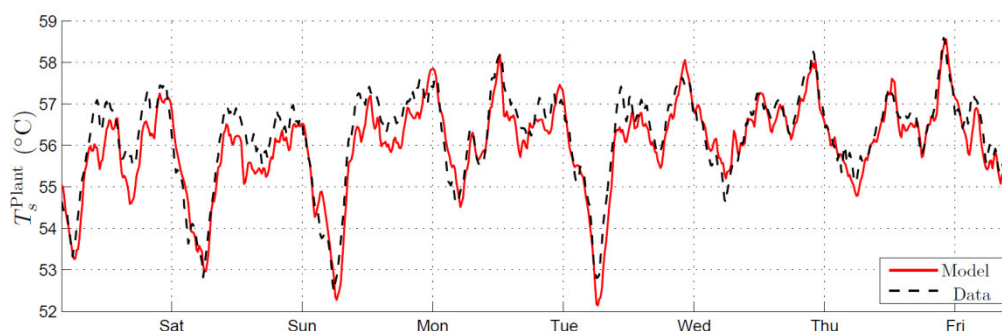


Abbildung 9: Performance des Finite-Differenz Modells für die Rücklauftemperatur beim Kraftwerk

Zusammenfassend kann behauptet werden, dass die vorgestellten Modelle in einer ausreichenden Qualität den Transportprozess beschreiben können und dies trotz des hohen Aggregationslevels.

1.2.2.1 Datengetriebene Modellierung Fernwärmenetz

Neben der physikalischen Modellierung des Fernwärmenetzes wurde auch ein datengetriebener Ansatz vorgeschlagen. Um die variablen Transportverzögerungen methodisch korrekt zu behandeln wurden sogenannte *bedingt-parametrische Modelle* verwendet (Cleveland, 1994). Die Grundidee dahinter ist ein Regressionsmodell zu verwenden bei dem Koeffizienten Funktionen von bestimmten Variablen ist. Somit wird für den Fall von Fernwärmenetzen die Koeffizienten in Abhängigkeit von vom Volumenstrom in Netz formuliert (Pinson, Nielsen, Nielsen, Poulsen, & Madsen, 2009). Speziell wurden in dieser Arbeit bedingte-ARX (cARX) und bedingte-FIR (cFIR) Modell für bestimmte Knoten im Netz (den kritischen Knoten) welche durch Expertenwissen bestimmt wurden geschätzt. Das verwendete cARX Modell hat zum Beispiel die Form:

$$T_{s,t}^{AC} = a_1(q_{t-1})T_{s,t-1}^{AC} + \sum_{j=1}^8 b_j(q_{t-1})T_{s,t-1}^{plant} + c_t(q_{t-1}) + \epsilon_t \quad (2)$$

wo $T_{s,t}^{AC}$, $T_{s,t-1}^{plant} + c_t$ die Vorlauftemperatur am kritischen Knoten bzw. am Kraftwerk bezeichnet, q_{t-1} der Volumenstrom am Kraftwerk ist und c_t ein trigonometrischer Offset mit 24h Periode. Geschätzt werden Modell in der Form (2) lokal an bestimmten Betriebspunkten des Volumenstroms mittels Gewichtetes kleinste Quadrate Verfahren. Um eine räumliche Verteilung der Betriebspunkte zu erhalten wurde ein Achsen-orthogonalen, inkrementalen Partitionsverfahren angewandt, der sogenannte LOLIMOT (Local Linear Model Tree) Algorithmus (Nelles, 2001). Dieser Algorithmus zerlegt den Betriebsraum in Achsen-orthogonale Rechtecke in denen Gaußsche Kernelfunktionen hinein gebettet werden. Neue Rechtecke werden gefunden indem man all mögliche Zerlegungen in allen Dimensionen überprüft und denjenigen mit der größten Performancegewinn tatsächlich durchführt.

Das Schema ist in Abb. 10 dargestellt. In dieser Arbeit wurden die aggregierten Konsumenten 3, 5 und 7 als kritisch angesehen. Für diese wurden jeweils mit dem LOLOMOT Algorithmus Modelle geschätzt. Das Ergebnis der Partitionierung ist in Abb. 11 anschaulich gemacht worden. Hier kann man erkennen, dass die Gausschen Kernelfunktion dichter liegen im Bereich von geringerem Volumenstrom. Dies ist zu einem darauf zurückzuführen, dass in diesem Bereich die Nichtlinearität des Prozesses am Größten ist, und zum Anderen, dass LOLIMOT quadratischen Fehler als Performance Kriterium verwendet. Dies bedeutet, dass Bereiche eher gesplittet werden wo viele Datenpunkte liegen.

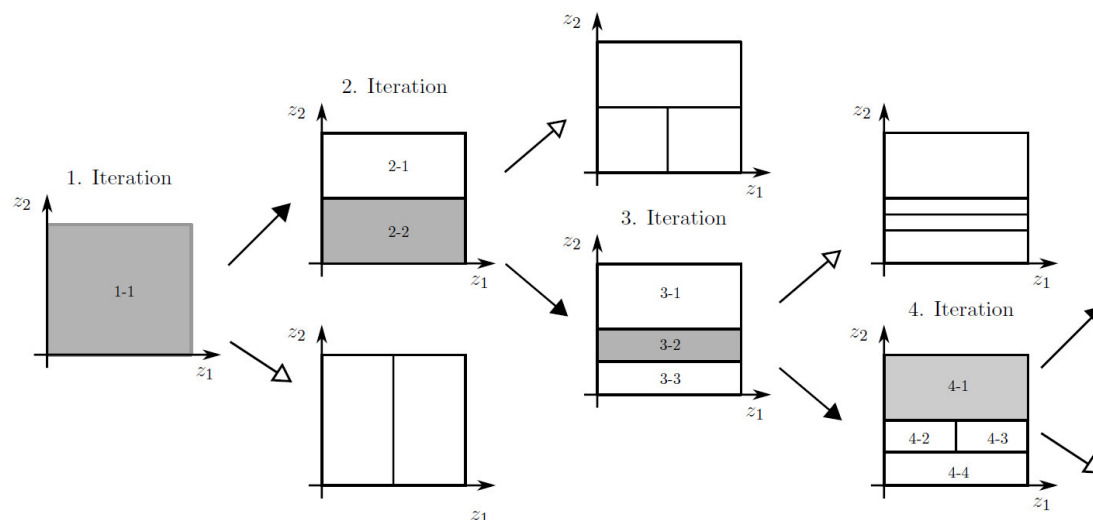


Abbildung 10: Funktionsweise des LOLIMOT Algorithmus

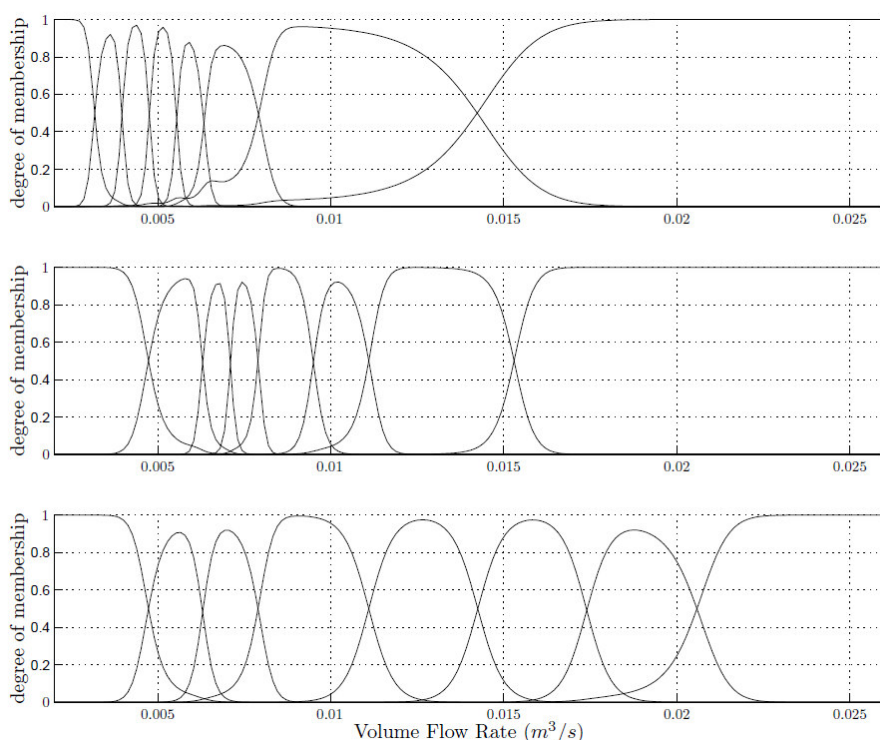


Abbildung 11: Gaußsche Kernelfunktionen für AC3, AC5 und AC7 ermittelt von LOLIMOT

1.2.2.2 Modellierung Verbraucherverhalten

Wärmelast:

Der zukünftige Wärmebedarf der Kunden stellt eine wichtige Größe für einen kostenoptimalen Betrieb der gesamten Biomasse Anlage da. Auf Grund der langen Transportzeiten der Wärmeenergie (reicht von Minuten zu Stunden) ist es äußerst wichtig den benötigten Wärmebedarf zu prognostizieren, damit das Biomasse – Kraftwerk rechtzeitig agieren kann. Deshalb sind exakte Forecasts unumgänglich für eine effiziente Energieproduktion. Eine zu hohe Vorlauftemperatur zum Beispiel, würde mit unnötig hohen Wärmeverlusten einhergehen und zu niedrige Vorlauftemperatur würde zu hohen Pumpenkosten wegen des größeren benötigten Massenstroms führen.

Es ist grundsätzlich anzunehmen dass der Wärmebedarf sehr zyklisch ist (tageszeitabhängig) und eine hohe Korrelation mit Wetterverhältnissen aufweist. In den Wintermonaten ist der Wärmebedarf auf Grund der Heizperiode höher und in den Sommermonaten überwiegt vor allem die Warmwasseraufbereitung. Tagesprofile für den Wärmebedarf für Sommertage und Wintertage ist in Abb. 12 zu sehen. Der „Doppelhöcker“ mit Spitzen um ca. 9 Uhr und 18 Uhr und ist in beiden Profilen deutlich zu sehen.

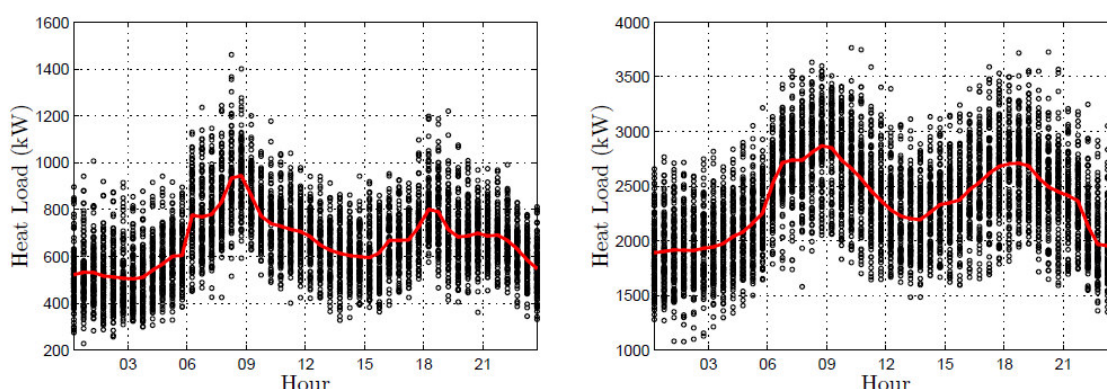


Abbildung 12: Tagesprofile des Wärmebedarfs für Sommertage (links) und Wintertage (rechts)

Eine Methode um Zeitreihen mit derartigen Zyklen zu beschreiben sind Autoregressive Integrierte Moving Average-Prozesse (SARIMA). Sie stellen eine Erweiterung der klassischen ARMA – Prozesse dar um instationäre Prozesse mit Saisonkomponenten zu beschreiben (Box, Jenkins, & Reinsel, 2008). Ebenfalls wurde die Außentemperatur als exogene Größe in das Modell inkludiert, sodass schlussendlich ein SARIMAX Modell geschätzt wurde (Grosswindhager, Voigt, & Kozek, 2009). Der Effekt der Außentemperatur wurde in diesem Fall als stückweise lineare Funktion mit 4 Knoten beschrieben (siehe Abb. 13).

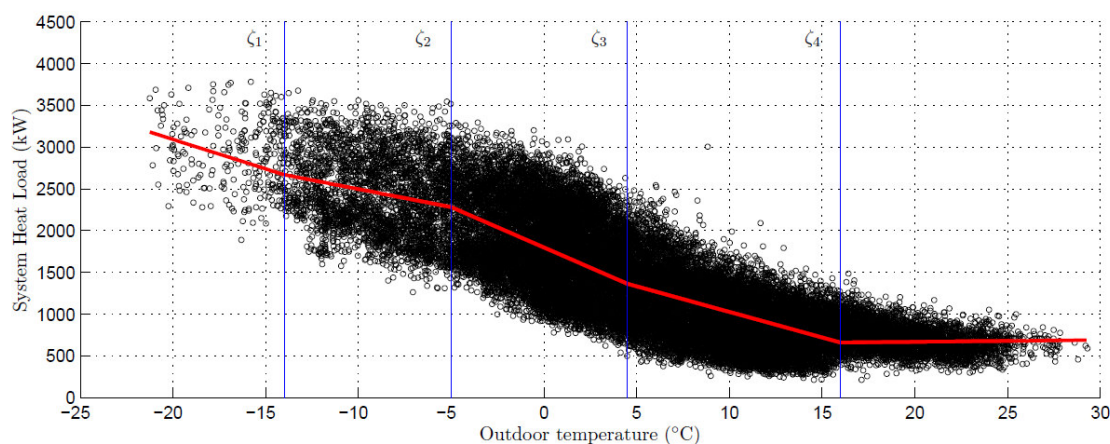


Abbildung 13: Wärmelast gegen Außentemperatur plus stückweise lineare Funktion

Neben dem SARIMAX Modell wurde auch ein Strukturmodell in Zustandsraumdarstellung identifiziert (Durbin & Koopman, 2001). Die wesentlichen Komponenten bei diesem Modell waren ein trigonometrischer Offset mit 24h Periode welcher die Saisonalität repräsentiert sowie die Temperatureffekte als stückweise lineare Funktion wie zuvor und eine Dummy -Variable die zwischen Wochentagen und Wochenenden unterscheidet (Grosswindhager, Kozek, Haffner, & Voigt, accepted). Das State-Space Strukturmodell sollte speziell für längere Prädiktionshorizonte eine Verbesserung in der Performance erzielen. Zu diesem Zweck wurden Fehlerkriterien für verschiedene Prädiktionshorizonte berechnet welches diese Annahme bestätigt hat. Wichtig ist zu beachten, dass bei der Wärmelastprognose nun auch zukünftige Temperaturdaten notwendig sind. Zu diesem Zweck wurde ein einfaches Temperaturmodell geschätzt. In der Praxis können hier exaktere Prognosen von Meteorologischen Instituten herangezogen werden. In Abb. 14 ist eine multi-step-ahead Prognose des State-Space Strukturmodell zu sehen. Man erkennt, dass der zyklische Verlauf sehr gut wiedergegeben wird.

Rücklauftemperatur:

Für die Berechnung des Volumenstroms für das physikalische Modell wird vorausgesetzt, dass die Rücklauftemperatur am Kunden bekannt ist. Diese kann grundsätzlich mittels der klassischen Wärmetauscher Theorie berechnet werden (Palsson, Larsen, Bohm, Ravn, & Zhou, 1999). Jedoch sind bei Fernwärmenetzen wo Heizen im Winter dominant ist und die Warmwasseraufbereitung im Sommer andere Kausalitäten zu beobachten. Wie in (Saarinen, 2008) geschlussfolgert wird hängt die Rücklauftemperatur hauptsächlich von der Außentemperatur und einer sozialen Komponente ab. Demnach wurde in dieser Arbeit der folgende nichtlineare Zusammenhang postuliert

$$T_r = f(T_s, T_a, c), \quad (3)$$

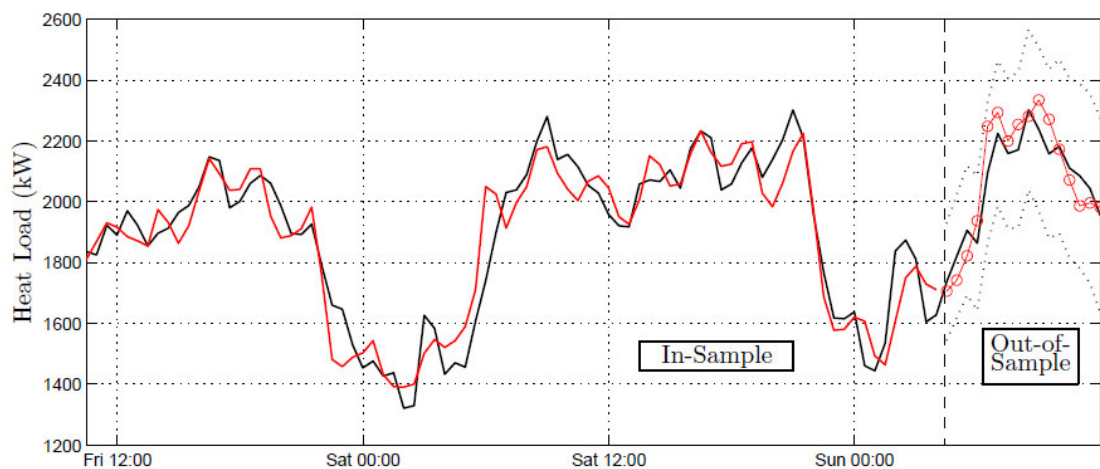


Abbildung 14: 16-step-ahead Prognose der Wärmelast inklusive 90% Konfidenz Intervall

mit Rücklauftemperatur T_r , Vorlauftemperatur T_s , Außentemperatur T_a und wo c als trigonometrischer Offset die soziale Komponente repräsentiert. Für die Schätzung von f wurde ein nichtparametrisches Verfahren verwendet, und zwar Multivariate Adaptive Regression Splines Technik (MARS) (Friedman, 1991). Die resultierende Regressionsoberfläche für den aggregierten Konsumenten 4 ist in Abb. 15 präsentiert. Man sieht sehr deutlich, dass die Rücklauftemperatur mit steigender Vorlautemperatur sinkt und gleichzeitig kann man den Einfluss der Außentemperatur klar erkennen der speziell bei Fernwärmenetzen auftritt. Genauer gesagt, bei kalten Tagen steigt die Rücklauftemperatur mit der Außentemperatur. Dieser Effekt dreht sich für warme Tage um. Hier steigt die Rücklauftemperatur mit der Außentemperatur.

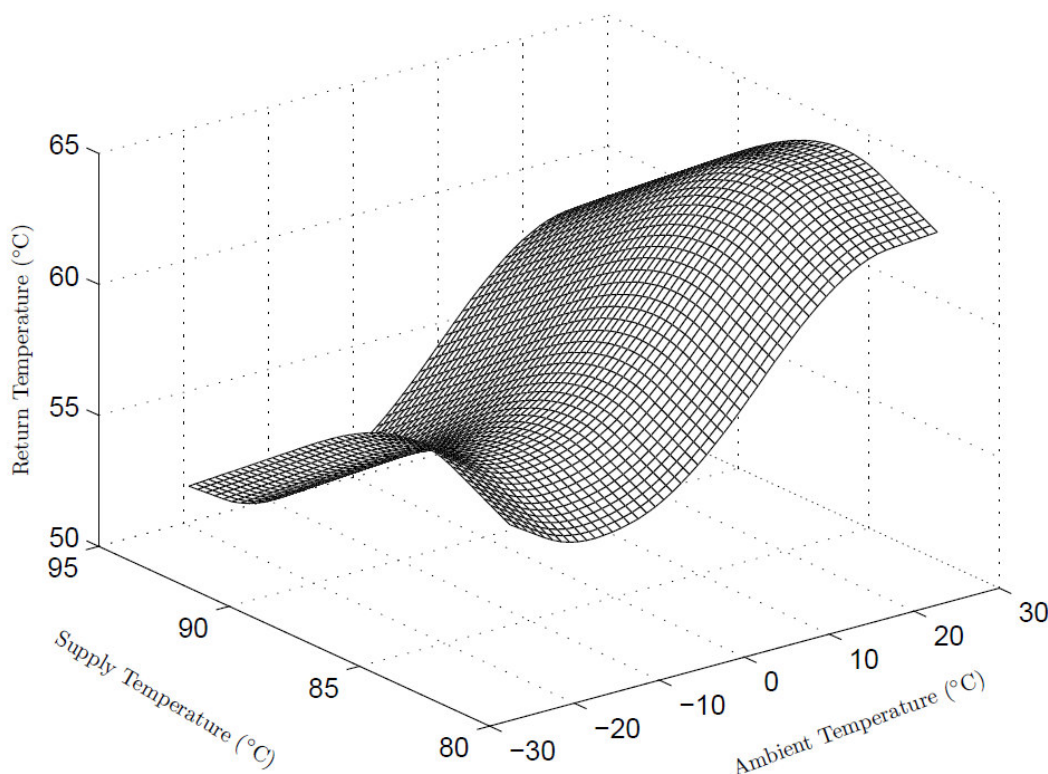


Abbildung 15: Geschätzte Regressionsoberfläche für die Rücklauftemperatur

1.2.2.3 Modellierung Kraftwerk

Physikalisches Modell:

Das Kraftwerksmodell wurde aufgrund von physikalischen Grundlagen sowie aus Erfahrungen aus der Verbrennung von Biomasse auf Schubrosten erstellt.

Das Modell umfasst die vier Modelleingänge

- Brennstoff Einschub und Rostbewegung (starr gekoppelt)
- Primärluft Menge
- Sekundärluft Menge
- Rezigas Menge

und folgende vier Modellausgänge:

- Feuerlage (Lage des Feuers auf dem Schubrost)
- Thermische Leistung
- Restsauerstoff
- Feuerraumtemperatur

In Abbildung 16 ist das Schema eines Biomasse Kraftwerks dargestellt.

Die Feuerlage FL berechnet sich aus der Masse des Brennstoffs $m_{Br,Rost}$ auf dem Rost und der Rostgeschwindigkeit v_{Rost} :

$$FL = k_{FL} \cdot m_{Br,Rost} \cdot v_{Rost} \quad (4)$$

mit dem Feuerlage Faktor k_{FL} .

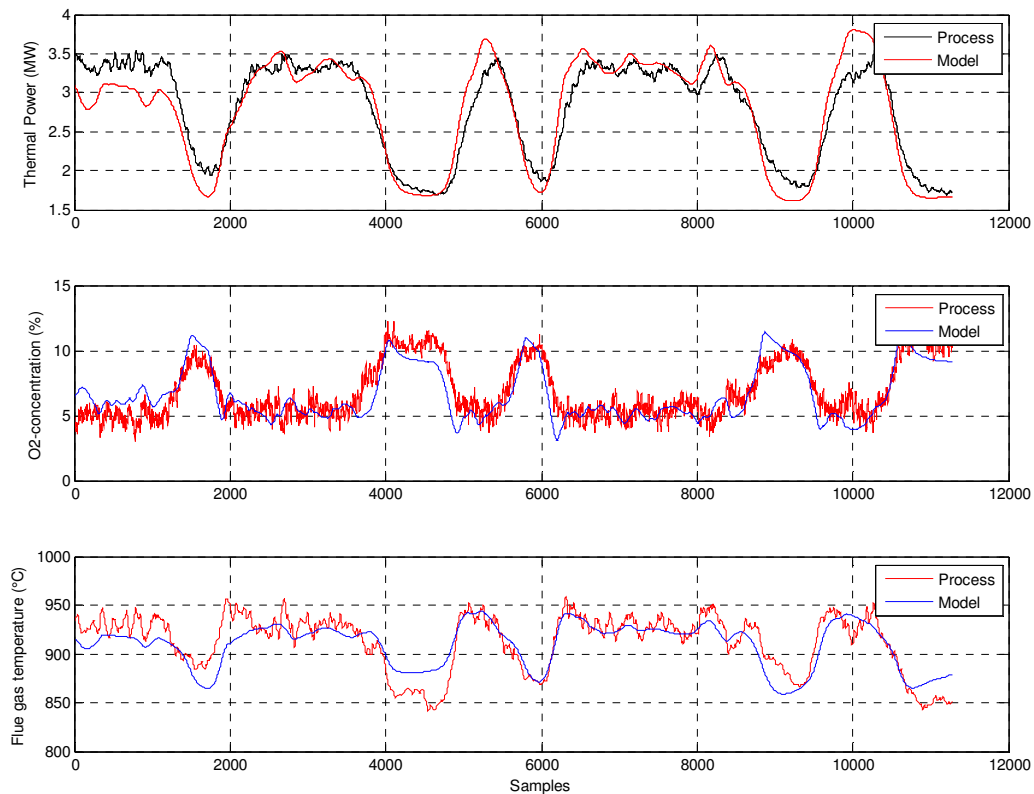


Abbildung 17: Validierung Physikalisches Modell mit Messdaten vom KW Grossarl

Fuzzy Modell:

Neben dem physikalischen Modell wurde ein datengetriebener Ansatz verfolgt mit Hinblick auf ein geeignetes Modell für das Reglerdesign. Fuzzy Modelle in Kombination mit dem

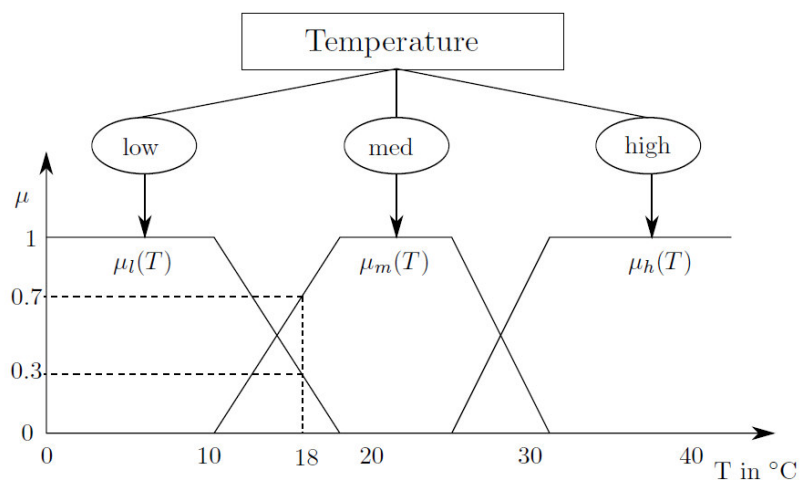


Abbildung 18: Illustration der Fuzzy Idee. Der Temperaturbereich wird in 3 Bereiche unterteilt welche durch eine Membership Funktion definiert werden

Partitionierungsverfahren Lolimot wurde als zweckmäßig angesehen. Bei Fuzzy Modellen wird ähnlich wie bei bedingt-parametrischen Modellen lokal lineare Modelle geschätzt. Die lokale Umgebung wird mittels sogenannten Kernelfunktionen definiert. In Abb. 18 soll diese Methodik anhand eines einfachen Beispiels erläutert werden. Hier wird die Temperatur durch Membershipfunktionen in drei lokale Bereiche unterteilt. Zum Beispiel wird eine Außentemperatur von 18°C mit 0.3 als Niedrig empfunden und mit 0.7 als hoch.

Speziell wurde für das Kraftwerk Fuzzy Modell folgende Modellstruktur verwendet, wobei die jeweiligen Partitionsvariablen nach dem Trennstrich vermerkt ist.

$$\begin{aligned} F_L &= f(F_L, \dot{m}_{input}, \dot{m}_{PL} | P_{th}) \\ Q_{th} &= f(Q_{th}, \dot{m}_{input}, \dot{m}_{PL} | P_{th}) \\ O_2 &= f(O_2, \dot{m}_{input}, \dot{m}_{PL}, \dot{m}_{SL} | P_{th}, O_2) \\ T_{RG} &= f(T_{RG}, \dot{m}_{input}, \dot{m}_{PL}, \dot{m}_{SL}, \dot{m}_{rec} | P_{th}, T_{RG}) \end{aligned}$$

Für die Schätzung wurde hier wiederum der adaptive Partitionierungsalgorithmus Lolimot verwendet. In der Abb. 19 wurde exemplarisch die vorgeschlagene Partitionierung für die O₂ Konzentration und Feuerraumtemperatur dargestellt. Lolimot bevorzugt Algorithmus bedingt Partitionen in Regionen wo viele Trainingsdaten liegen.

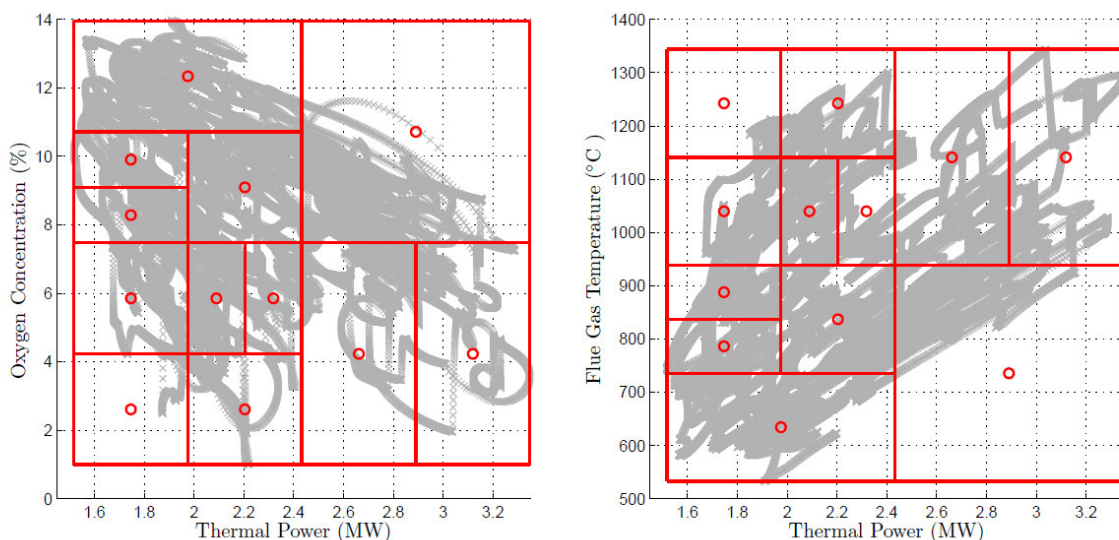


Abbildung 19: Partitionierung mittels Lolimot für Sauerstoff (links) und Rauchgastemperatur (rechts)

1.2.2.4 Regelung Fernwärmenetz

Für die prädiktive Regelung der Vorlauftemperatur wurde eine Fuzzy Modellprädiktive Regelung herangezogen (Babuska, 1998). In diesem Setup können bedingt Parametrische Modelle verwendet werden. Die Idee ist die Systemmatrizen des MPC Parameter variierend zu formulieren werden. Sodass in jedem Zeitschritt die Matrizen des MPC aktualisiert werden, abhängig vom derzeitigen und prädizierten Volumenstrom in Netzwerk (Grosswindhager, Voigt, & Kozek, 2012). Für die Konstruktion des MPC wurde State-Space Modelle verwendet. Wie in (Wang, 2009) erläutert können sowohl FIR Modelle als auch ARX Modelle in eine State-Space Struktur gebracht werden. Nehmen wir an, dass das Prozessmodell zum Zeitpunkt k durch folgendes State-Space Modell gegeben ist:

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u + E(k)d, \quad y(k) = C(k)x, \quad (11)$$

Wo $A(k)$ die Systemmatrix, $B(k)$ die Inputmatrix und $E(k)$ die Störmatrix bezeichnet, welche die ARX bzw. FIR Koeffizienten beinhaltet und jeweils vom aktuellen Volumenstrom abhängt. Um Offsetfreien Betrieb gewährleisten zu können wurde die Darstellung in den Input Inkrementen gewählt:

$$\begin{bmatrix} \xi(k+1) \\ \Delta x(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{A}(k) & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}(k)A(k) & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(k) \\ \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{B}(k) \\ \mathbf{C}B(k) \end{bmatrix} \Delta u(k), \mathcal{C} = [\mathbf{0} \quad I]. \quad (12)$$

Wobei hier $\xi(k)$ der augmentierte Zustandsvektor ist und $\mathcal{A}(k)$ und $\mathcal{B}(k)$ die augmentierten Systemmatrizen. Nun wird der Output $y(k)$ in rekursiver Weise bis zum einem Prädiktionshorizont n_p berechnet. Der geschichtete Vektor der Output Variablen ist dann gegeben durch

$$\hat{Y} = F\xi(k) + \Phi_u \Delta U \quad (13)$$

mit

$$\Delta U = [\Delta u^T(k) \quad \dots \quad \Delta u^T(k + n_c - 1)]^T,$$

$$Y = [y^T(k+1) \quad \dots \quad y^T(k + n_p)]^T,$$

n_c als Kontrollhorizont und kompatiblen Matrizen F und Φ_u . Eine typische Zielfunktion für Prädiktive Regler bestraft Abweichungen des prädizierten Outputs von einem Referenzsignal und übermäßige Kontrollaktionen:

$$\min_{\Delta U} J = (\hat{Y} - Y^{sp})^T Q (\hat{Y} - Y^{sp}) + \Delta U^T R \Delta U \quad (14)$$

$$s. t. \quad M \Delta U \leq N(k), \quad (15)$$

wo Y^{sp} die zukünftige Referenztrajektorie bezeichnet und Q , R positiv (semi) definite Gewichtsmatrizen sind die für das Tunen der Closed-Loop Performance verwendet werden. Die Gleichung (15) umfasst Nebenbedingung für die Input und Output Variablen welches beide in Form der Inkremente der Inputs formuliert werden kann. In dieser Arbeit wurden für die Referenztrajektorien zwei Ansätze vorgestellt. Beim ersten Ansatz wurden sogenannte Heizkurven verwendet welche ein statisches Mapping zwischen der Außentemperatur und der Vorlauftemperatur herstellt (siehe Abb. 20). Um die Unsicherheiten der Temperaturprognose und des cARX/cFIR Modells zu berücksichtigen wurde zusätzlich ein Sicherheitsband definiert um die Vorlauftemperatur definiert durch die Heizkurve nicht zu unterschreiten. Dies war notwendig da das Regelkriterium (14) nicht zwischen Werten über dem Referenzwert und darunter unterscheidet. Der zweite Ansatz basiert darauf die zukünftige Referenztrajektorie kostenoptimal zu bestimmen. Mit kostenoptimal ist hier gemeint die operativen Kosten welche sich aus den Kosten durch den Wärmeverlust und den Pumpenkosten zusammensetzt zu minimieren. Somit wird zunächst in jedem Zeitschritt die optimale zukünftige Referenztrajektorie berechnet und dem MPC übergeben.

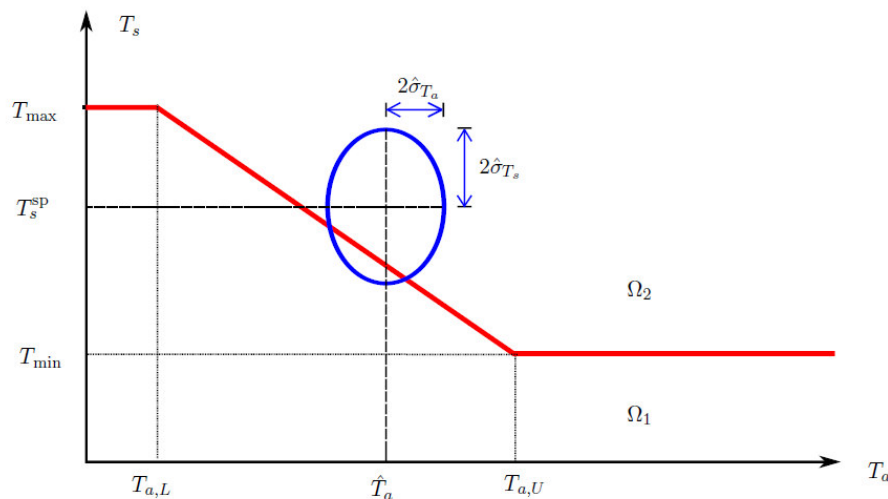


Abbildung 20: Heizkurve mit charakteristischen Knickpunkten

Das Blockdiagramm des geschlossenen Regelkreises ist in der Abb. 21. illustriert. Wie zu erkennen ist, wird parallel zum Prozess noch ein internes Modell geschaltet. Diese Methodik wird auch als Internal Control Scheme (ICM). Die Idee ist, dass bei stark nichtlinearen Prozessen ein direktes Update des Zustandsvektors des MPC durch den gemessenen Prozessoutput zu Instabilität führen kann. Stattdessen wird der Output des internen (linearen) Modells verwendet. Um Plant-Modell Diskrepanz und Modellunsicherheiten auszugleichen wird der Fehler zwischen internem Modell und Prozessoutput rückgeführt. Zusätzlich wurden die Parameter des internen Modells in jedem Zeitschritt mittels rekursiven gewichteten kleinsten Quadrate aktualisiert. Desweiteren wird, wie in Abb. 17 dargestellt, abhängig vom gemessenen Volumenstrom die Parameter des cARX/cFIR Modells berechnet, das entsprechende State-Space Modell konstruiert und die MPC Matrizen aktualisiert.

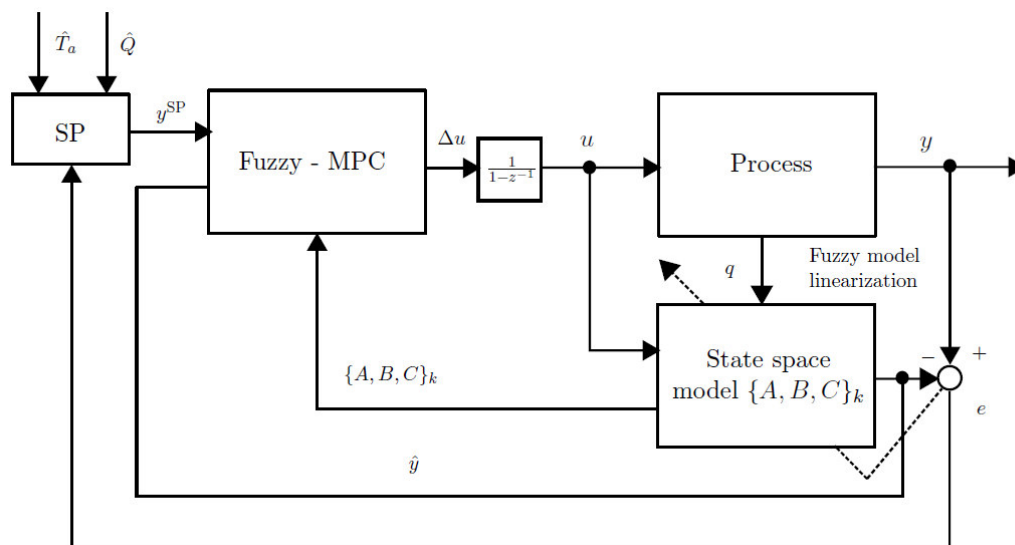


Abbildung 21: Blockdiagramm des Fuzzy MPC

Um zunächst die Performance des Fuzzy MPC mit cARX bzw. cFIR Modell und konventionellen MPC zu vergleichen wurden Führungssprünge und Störeinflüsse simuliert. Die Störeinflüsse wurden durch simultane Sprünge des Wärmebedarfs der Konsumenten realisiert wobei von geringem Bedarf zu Beginn zu hohem Wärmebedarf zu Simulationsende ausgegangen wird. Somit ergibt sich auch ein dementsprechendes Profil im Volumenstrom. Desweiteren ist zu erwähnen, dass für die Auslegung

des konventionellen MPC der durchschnittliche Volumenstrom verwendet wurde. Das Resultat ist in der Abb. 22 zu sehen. Man kann deutlich wahrnehmen, dass die Performance für den klassischen MPC für kleine Volumenströme nicht akzeptabel ist. Es treten starke Oszillationen auf, die darauf zurückzuführen sind, dass der MPC die langen Totzeiten durch den geringen Volumenstrom nicht beherrschen kann.

Bei der zweiten Simulation wurden die Heizkurven für die Generierung der Referenztrajektorien verwendet. Es wurden 10 Tage echte Messdaten von Wärmebedarf der Kunden und Außentemperatur genommen und für diesen Zeitraum die optimale Vorlauftemperatur mittels Fuzzy MPC berechnet. Grundsätzlich stellt sich hier das Problem, dass zwar 3 kritische Knoten geregelt werden sollen, doch nur ein Kraftwerk zur Verfügung steht. Um dieses Dilemma zu beheben wurde in dieser Arbeit das Konzept der aktiven kritischen Knoten eingeführt. Der aktive kritische Knoten ist so definiert, dass bei diesem die Wahrscheinlichkeit der Unterschreitung der durch die Heizkurven gegebenen Vorlauftemperatur am höchsten ist. Mathematisch kann dies so gehandhabt werden dass die Gewichtungsmatrix Q in (7) dementsprechend angepasst wird. Somit ist nur für den aktiven

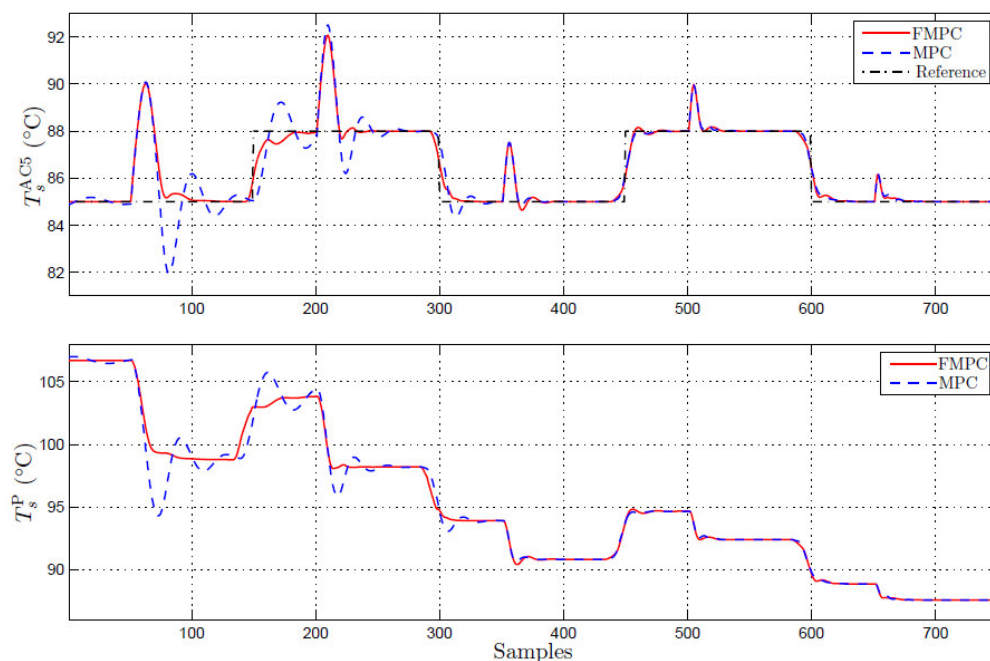


Abbildung 22: Vergleich Fuzzy MPC mit konventionellen MPC für das cFIR Model an AC5

kritischen Knoten der dazugehörige Eintrag in Q eins, und für alle anderen Knoten 0. Das Ergebnis dieser Simulation ist in Abb. 23 illustriert. Die entsprechenden aktiven kritischen Knoten sind farbig hinterlegt. Wie zu erkennen ist sind die aggregierten Konsumenten 3 und 5 sehr oft „aktiv“, was natürlich an den Heizkurven liegt aber auch daran, dass für diese Konsument sehr hohe Wärmeverlust auftreten. Desweiteren ist festzustellen, dass die Maxima der Vorlauftemperatur immer während der Nacht, also wenn die Temperatur am geringsten ist, auftreten. Vom einem kostenminimalen Standpunkt aus gesehen mag dies nicht die beste Lösung sein.

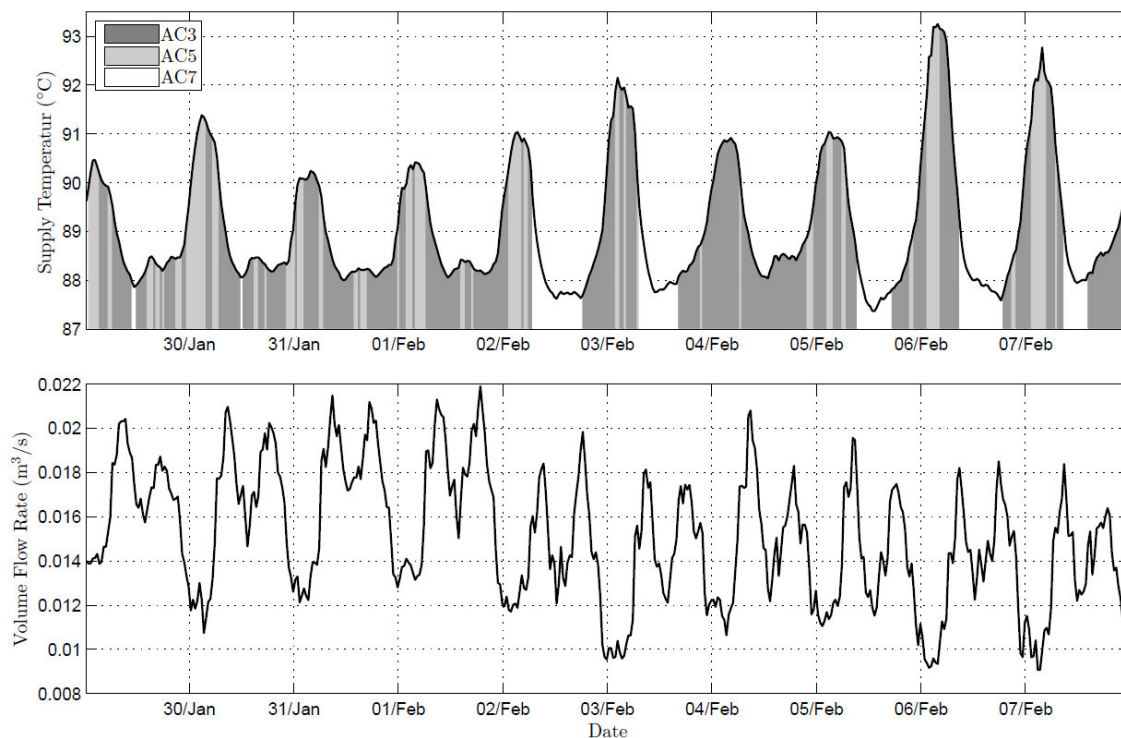


Abbildung 23: Resultat der Simulation mit Heizkurven

Deshalb wurde in weiterer Folge versucht durch geeignete Wahl der Referenztrajektorie die operativen Kosten zu minimieren. Die operativen Kosten im Fernwärmenetze können folgendermaßen definiert werden:

$$\min J = c_{fuel} Q_{loss} + c_{elec} P_{pump}. \quad (16)$$

Der Wärmeverlust ist proportional zur Vorlauftemperatur. Dieser hängt aber auch indirekt vom Volumenstrom Netz ab, da dieser die Transportverzögerungen im Netz bestimmt. Der Trade-Off zwischen Vorlauftemperatur auf der einen Seite und Volumenstrom auf der anderen Seite muss für eine optimale Regelung in Betracht gezogen werden. In dieser Arbeit wurde die Kostenfunktion minimiert um eine geeignete zukünftige Referenztemperatur am kritischen Kunden zu bekommen. Der entscheidende Part hier ist eine exakte Prognose des Wärmebedarfs zu haben da dieser in die Optimierung mit eingeht. Das Modell welches in AP4 entwickelt wurde wird hier verwendet. Bei der

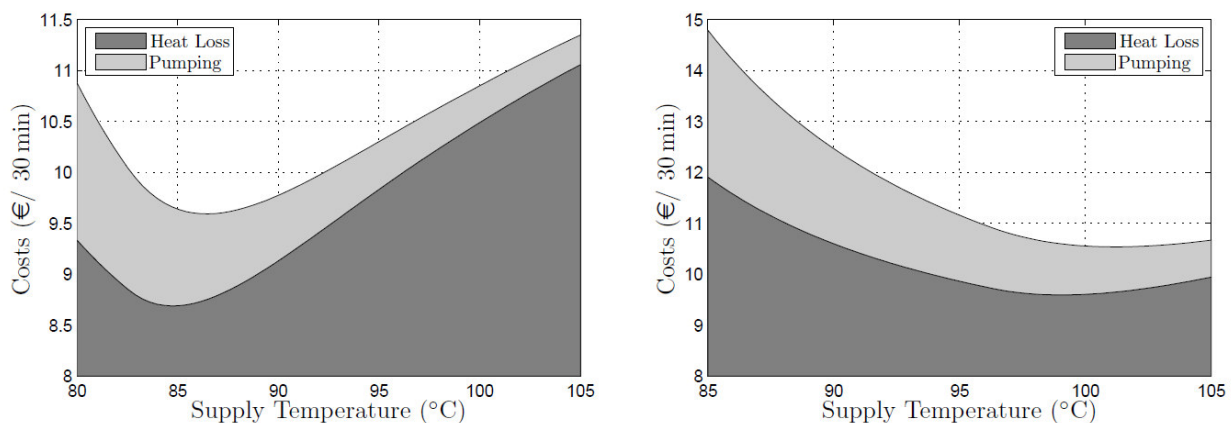


Abbildung 17: Kostenkurven bei einer Heizlast von 2MW links und 3MW (rechts)

Optimierung muss in jedem Schritt basierend auf der aktuellen Vorlauftemperatur und dem prognostizierten Wärmebedarf des Volumenstroms berechnet werden, der wiederum dazu verwendet wird, um Transportverzögerung und Pumpenkosten zu bestimmen. Der Kostenverlauf für Wärmeverlustkosten und Pumpenkosten ist in Abb. 24 dargestellt. Die Pumpenkosten sind am höchsten für geringere Vorlauftemperatur, da sich hier stationär ein hoher Volumenstrom bei konstanter Wärmelast ergibt. Interessant ist jedoch der Verlauf der Wärmeverlustkosten, die sowohl von der Vorlauftemperatur als auch vom Volumenstrom (durch die Transportverzögerungen) abhängt. Wie man erkennen kann, ist es vom Kostenstandpunkt vorteilhaft, bei höheren Wärmelasten höhere Vorlauftemperaturen zu fahren als bei niedrigerer Wärmelast. Wie sehr schön zu sehen ist, ergibt sich in beiden Fällen ein Kostenminimum, welches durch einen geeigneten Minimierungsalgorithmus gefunden werden kann. In Abb. 25 sind Resultate für eine Simulation, wo die Referenztrajektorie mittels Heizkurven bestimmt wurde, und für eine Simulation, wo die Referenztrajektorie mittels eines Optimierungsalgorithmus gefunden wurde. Interessant ist, dass die Optimierung eine viel aktivere Regelung der Vorlauftemperatur vorsieht, die, wie zu vermuten war, sich mit der Charakteristik der Wärmelast speziell für dieses Szenario ergibt. Folgende Kosten für das Heizkurven – Setup: 482.3 Euro / Tag (449.6 Euro / Tag Wärmeverlustkosten und 32.7 Euro / Tag Pumpenkosten) und für die Set-Point Optimierung: 465.2 Euro / Tag (433.6 Euro / Tag Wärmeverlustkosten und 31.6 Euro / Tag Pumpenkosten) Euro / Tag. Dies entspricht einer Kosteneinsparung von 3.6%!

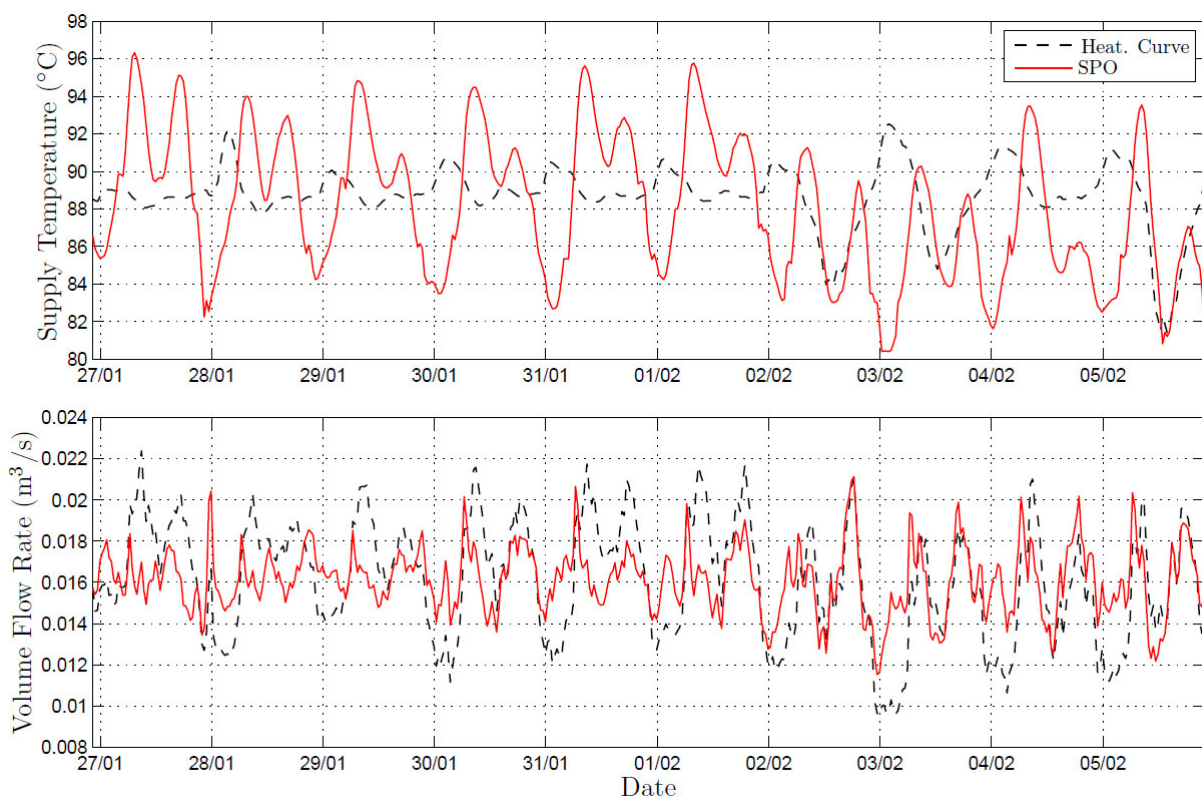


Abbildung 18: Simulationsergebnis mit Heizkurven als Referenztrajektorie und Referenztrajektorie durch Set-Point Optimierung

1.2.2.5 Regelung Kraftwerk

Bei der Regelung des Kraftwerks wurde ein Fuzzy MPC verwendet. Um Modellunsicherheiten und Plant-Model Mismatch auszugleichen wurde die Verwendung des Internal Model Control Scheme (IMC) angewandt. Die Idee ist, wie schon zuvor erwähnt, nicht direkt den Prozessoutput für das Update des Zustands des Reglers zu verwenden, sondern den Output des internen Modells.

Zur Validierung der Performance des Fuzzy MPC wurden offline Simulationen in Matlab durchgeführt. Für die Gewichtung hat sich folgendes Setup als geeignet herausgestellt: $Q = \text{diag}(0.01, 1, 0.2, 0.00005)$ und $R = \text{diag}(1, 1, 1, 1)$. Bezüglich der Wahl der Gewichte ist zu erwähnen, dass für den Eingang normierte Größen (in %) verwendet wurde und für den Ausgang nicht. Desweiteren wurde für den Prognosehorizont 180 gewählt und für den Kontrollhorizont 20. In Abb. 26 ist das Ergebnis der Simulationen zu sehen. Hier wurden Führungssprünge für die Feuerlage, Thermisch Leistung und Feuerraumtemperatur auferlegt. Wie ersichtlich kann der Fuzzy MPC das System an die vorgegeben Referenztrajektorien bringen.

Der entwickelte Fuzzy MPC wurde auch in Grossarl in einer bestehenden Anlage implementiert. Dies stellte sicher ein Highlight dieses Projekts dar. Leider blieben aber auf Grund Schwierigkeiten in der Herstellung der Schnittstellen zwischen der Anlage und dem PC wenig Zeit den Regler länger in Betrieb zu haben. Jedoch wurde beschlossen eine 2te Implementierungswoche durchzuführen, um den Fuzzy MPC über eine längere Laufzeit und bei verschiedenen Betriebspunkten zu validieren.

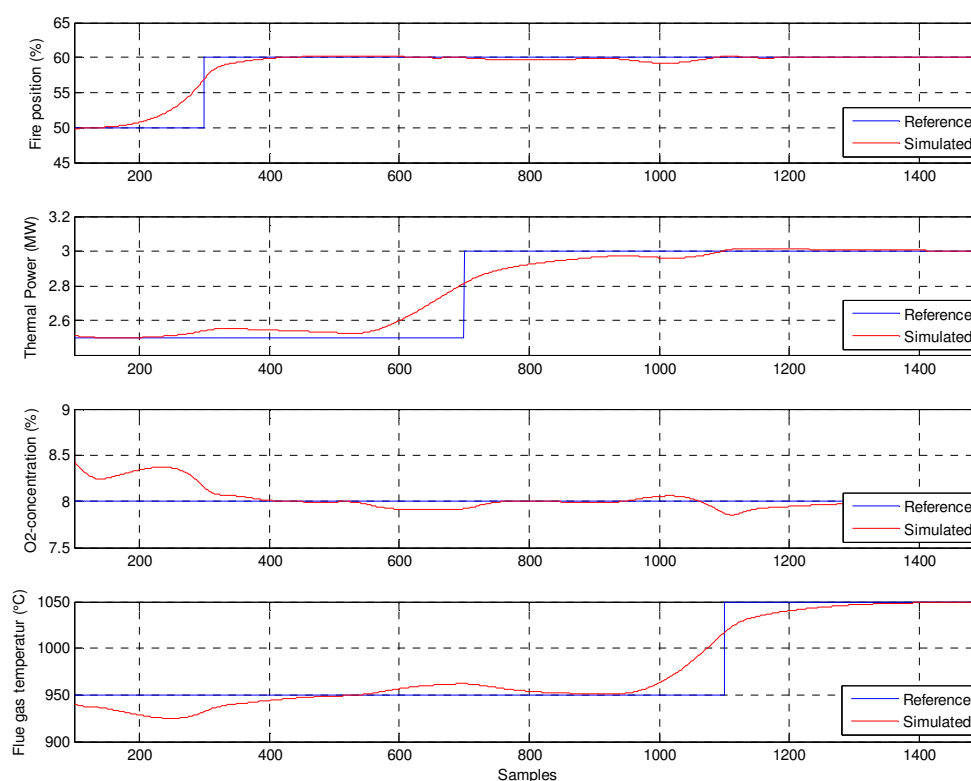


Abbildung 19: Offline - Simulation Fuzzy MPC Kraftwerk

1.3 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Die Ergebnisse dieses Projekts lassen sich grundsätzlich in zwei Bereiche unterteilen: *Modellierung* und *Regelung*. Die Modellierung umfasst die Komponenten Kraftwerk, Fernwärmenetz und Verbraucher. Für Kraftwerk und Fernwärmenetz wurden sowohl physikalische Modelle erstellt als auch datengetriebene Modelle. Konsumenten wurden rein durch Black-Box Modelle dargestellt, da hier eine exakte Modellierung für eine global optimale Regelung nicht zielführend war. Die Regelung

basiert auf dem Konzept der Fuzzy Modellprädiktiven Regelung welche aus den Erkenntnissen der datengetriebenen Modellierung abgeleitet wurde

Im speziellen wurde für das Fernwärmenetz zur physikalischen Modellierung eine Finite-Differenzen Methode verwendet. Zu einem sollte das physikalische Modell geringen Komplexitätsgrad haben als auch mit ausreichender Genauigkeit den Energietransport mit ausreichender Genauigkeit wiedergeben können. Da die Finite-Differenzen Methode auf einer Diskretisierung des Netzes basiert die sowohl Gitterpunkte stromaufwärts als auch stromabwärts verwendet, sind Probleme bei Rohrverzweigungen aufgetreten. Hier ist nicht klar welche Gitterpunkte verwendet werden sollten. In dieser Arbeit wurde vorgeschlagen Geschwindigkeitsgewichtete Knotenpunkte zu verwenden. Dies hat bei diversen Simulationen gut funktioniert, dennoch fehlt eine fundierte theoretische Analyse dieses Vorgehens. Dies könnte in einem zukünftigen Projekt noch behandeln werden. Desweiteren wurde um die Komplexität des Prozessmodells zu verringern das originale Fernwärmenetz aggregiert. Hier wurde ein Weg vorgestellt wie dies anhand der Netztopologie geschehen kann.

Für die datengetriebenen Modellierung wurde das Konzept der kritischen Knoten eingeführt. Grundsätzlich können diese kritischen Knoten durch Expertenwissen (zum Beispiel größter Abnehmer) definiert werden. Hier ist es natürlich wichtig dass ausreichend Datenmaterial (min 1 Jahr) zu Verfügung steht. In manchen Fernwärmenetzen sind nur für bestimmte Netzwerkknoten Daten aufgezeichnet. Diese könnten dann als kritische Knoten fungieren.

Die Konsumenten am Fernwärmenetz können grundsätzlich als Wärmetauscher modelliert werden. Jedoch ist die klassische Wärmetauschertheorie hier mit Vorsicht zu genießen, da manche kausale Zusammenhänge bei Fernwärmenetzen nicht gegeben sind. Wie in dieser Arbeit gezeigt worden ist, kann die Rücklauftemperatur am Kunden durch die Vorlauftemperatur, Außentemperatur und einer sozialen Komponente (trigonometrischer Term) dargestellt werden. Bei genauerer Kenntnis der Sekundärseite des Wärmetauschers könnten sicher noch bessere Ergebnisse produziert werden.

Bei dem Kraftwerksmodell war es wichtig, nicht alle komplexen physikalischen Vorgänge bis ins Detail zu modellieren. Deshalb wurden die wesentlichen Größen (4 Inputs und 4 Outputs) identifiziert und damit ein Grey-Box Modell konstruiert. Für exakte Verbrennungssimulationen oder ähnliches sind natürlich komplexere Modelle zum Beispiel CFD – Simulationen nötig. Für modellprädiktive Regelung sind solche Modelle mit vielen Input und Output Variablen aber nicht geeignet. Bei der Parametrierung des Modells wurde Wert gelegt, dass eine einfache Adaption an bestehenden Anlagen möglich ist. Somit kann mit relativ wenig Aufwand und wenig Messdaten das Kraftwerksmodell validiert werden. Für den Regler wurde das Input- Output Verhalten des Grey-Box Modells durch ein Fuzzy Modell approximiert. Die Fuzzy Variablen (Partitionierungsvariablen) wurden mittels Expertenwissen bestimmt. Hier spielt die Thermische Leistung die wesentlichste Rolle. Die Partitionierung wurde mittels Lolimot bestimmt. Wichtig ist, dass bei den Trainingsdaten alle Betriebspunkte ausreichend abgedeckt werden. Ebenfalls ist bei der Anzahl der lokalen Partitionierungen darauf zu achten, die Trainingsdaten nicht über zu fitten. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde kann das Fuzzy Modell die Nichtlinearitäten des Grey-Box Modells sehr gut wiedergeben.

Für den modellprädiktiven Regler musste ein Konzept entworfen werden welches die Fuzzy-Modelle und bedingt parametrischen Modelle in geeigneter Form in Betracht ziehen kann. Um dies zu erzielen wurde der klassische MPC Formulierung die zeitinvarianten Systemmatrizen durch zeitvariante ersetzt. Die Idee ist in jedem Zeitschritt abhängig von der Partitionsvariablen die

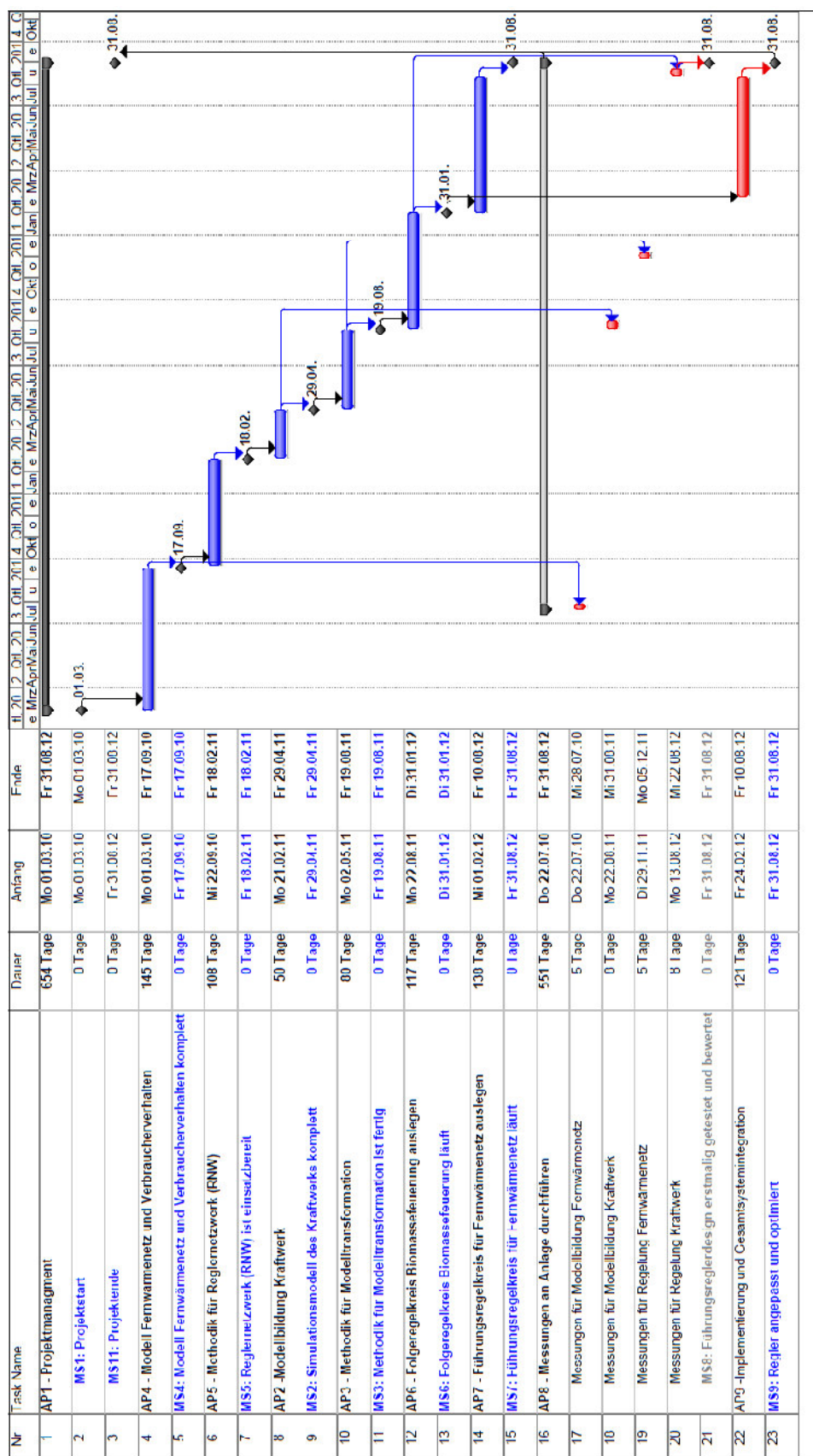
Systemmatrizen für den MPC zu generieren. Dieses sogenannte Fuzzy Linearisierung kann in jedem Zeitschritt bis zum Ende des Prognosehorizont durchgeführt werden. In der Praxis hat sich herausgestellt, dass dies nur Sinn macht falls sich die Partitionsvariablen über den Prognosehorizont signifikant ändern. In der Regel ist es daher ausreichend konstante Systemmatrizen über den Prognosehorizont zu betrachten und nur in jedem Zeitschritt eine Fuzzy Linearisierung mit dem aktuellen Wert der Partitionsvariablen durchzuführen. Desweiteren wurde das Internal Model Control (IMC) Scheme verwendet. Zuerst wurde der Zustandsvektor des Fuzzy MPC direkt mit den Prozessoutput des physikalischen Kraftwerks besetzt, was aber zu Instabilität geführt hat. Im IMC wird stattdessen der Zustandsvektor durch ein internes Fuzzy Model besetzt und der Fehler zwischen Prozess und internem Modell rückgeführt. Dieses Konzept wurde sowohl für den Fuzzy MPC des Fernwärmenetzes und des Kraftwerks verwendet.

Für den Fuzzy MPC des Fernwärmenetzes wurde desweiteren eine Methodik für die Optimierung der Referenztrajektorie entwickelt. In der Praxis ist es gängig die Referenztemperatur an kritischen Knoten im Netz durch Heizkurven zu bestimmen. Jedoch ist diese statische Beziehung zwischen Außentemperatur und Vorlauftemperatur von einem operativen Standpunkt aus gesehen nicht kosteneffizient. Intelligentere Strategien könnten Rücklauftemperatur Niveaus oder operative Kosten heranziehen. Letzteres wurde in dieser Arbeit behandelt. Unter vereinfachten Annahmen wurde gezeigt, dass die operativen Kosten durch diese Strategie um bis zu 4% gesenkt werden konnten. Die Implementierung und Entwicklung anderer Strategien bleibt ein spannendes zukünftiges Forschungsgebiet.

1.4 Arbeits- und Zeitplan

Es ist zu einer Umschichtung der Arbeitspakete gekommen. Im Speziellen wurden die AP2 – *Modellbildung Kraftwerk* und AP3-*Methodik für Modelltransformation* zeitlich nach dem AP3 eingereiht. Dies wird damit begründet, dass ein starker synergetischer Effekt zwischen diesem Projekt und dem Projekt BioReg FFG-Projektnummer 819008 vorhanden ist, und bei Letzterem der Projektabschluss erst später als geplant erfolgt war. Ein entsprechender Änderungsantrag wurde mit dem Zwischenbericht eingereicht. Teilweise ist es zu Überschneidungen der Arbeitspakete gekommen und die Messungen wurden aus organisatorischen Gründen nicht wie laut Projektantrag am Ende des jeweiligen Arbeitspakets durchgeführt.

Der tatsächliche chronologische Ablauf der Arbeitspakete ist folgenden Gantt-Chart zu entnehmen:



2 Kosten

2.1 Kostentabelle für die gesamte Projektlaufzeit

Alle Angaben sind in EURO.

Kostenkategorie	Förderbare Gesamt- kosten lt. Vertrag	Kumulierte Kosten in der Projektlaufzeit Summe Kosten im Konsortium*	Antragsteller Kosten in der Projektlaufzeit von - bis	Partner 1 Kosten in der Projektlaufzeit von - bis
Personalkosten	273.629	263.674	157.020	106.653
Investitionen	3.667	2.869	1.155	1.714
Reisekosten	14.160	6.668	4.274	2.393
Sach- Materialkosten	11.667	9.589	5	9.584
Drittkosten	0	0	0	0
Total	303.123	282.799	162.455	120.345

* Summe der angefallenen Kosten / Kostenkategorie des Antragstellers und aller Partner

2.2 Kostenbeschreibung für die gesamte Projektlaufzeit

Die Kosten für den Antragsteller (TU-Wien) im Berichtszeitraum teilen sich in Personalkosten, Einrichtung von Computerarbeitsplätzen, die Kosten für die Teilnahme an vier Konferenzen und zwei Implementierungsrunden.

Die Kosten für den Projektpartner (VOIGT+WIPP) setzen sich aus den Personalkosten, Einrichtung von Computerarbeitsplätzen, Kosten für Implementierungsfahrten und Hardwarekosten der Implementierung zusammen.

2.3 Kostenumschichtungen

- Im Projekt ist es zu keiner Kostenumschichtung gekommen.

3 Verwertung

3.1.1 Projektworkshops

Workshop AP4:

Vom 7.3.2011 – 8.3.2011 fand ein Workshop bei VOIGT+WIPP Engineers GmbH, Märzstrasse 120, 1150 Wien. Der erste Tag stand im Zeichen von physikalischer Modellbildung der hydraulischen und thermischen Komponenten des Fernwärmenetzes. Am zweiten Tag wurden existierende Lastprognosemodelle diskutiert und deren Anwendbarkeit auf unsere Problemstellung evaluiert. Workshops dieser Art stellen sicher, dass der Wissenstransfer und Wissensaustausch zwischen den Projektpartnern stattfindet. Zusätzlich wurden seit Projektstart alle zwei Wochen JourFixe abgehalten.

Workshop AP6:

Desweiteren wurde im Zuge der Implementierung des Fuzzy MPC Reglers in Großarl (13.08. – 22.08.2012) eine ausführliche Projektworkshop zum Thema Modellprädiktive Regler durchgeführt. Es wurde sowohl auf das Konzept der Prädiktiven Regelung als auch die Methodik der Fuzzy Modellprädiktiven Regelung eingehend eingegangen.

3.1.2 Publikation

1. (Grosswindhager, Voigt, & Kozek, Efficient Physical Modelling of District Heating Networks)
In dieser Publikation wurden die physikalische Modellbildung des Fernwärmenetzes Tannheim mittels Rohr Widerständen für den hydraulischen Part und der Node – Methode für den Energietransport erläutert und simuliert.
2. (Grosswindhager, Voigt, & Kozek, Online Short-Term Forecast of System Heat Load in District Heating Networks, 2011)
In dieser Publikation wurde ein SARIMA Modell für die Prognose des Wärmebedarfs vorgestellt, sowie die Möglichkeit der Einbettung in die State Space Methodologie.
3. (Grosswindhager, Voigt, & Kozek, Linear Finite Difference Schemes for 2011)
In dieser Publikation wurden verschiedenste Finite Differenz Methoden zur Lösung der Energietransportgleichung behandelt. Desweiteren wurde eine Modifikation des QUICKEST Algorithmus speziell für die Anwendung in Fernwärmenetzen vorgestellt.
4. (Grosswindhager, Voigt, & Kozek, Predictive control of district heating network using fuzzy DMC, 2012)
In dieser Publikation wurde der Fuzzy Modellprädiktive Regler für das Fernwärmenetz basierend auf bedingt-parametrische Modelle vorgestellt
5. Grosswindhager, S., Kozek, M., Haffner, L., & Voigt, A. (accepted). Fuzzy Predictive Control of District Heating Network. *International Journal of Modelling, Identification and Control* .
Erweiterung des Fuzzy DMC für das Fernwärmenetz inklusive Behandlung Referenztrajektorien generierung mittels Heizkurven

3.1.3 Marktvision

Durch die steigenden Brennstoffpreise müssen Kraftwerks- und Netzwerk-Betreiber immer genauer auf den Wirkungsgrad ihrer Anlage achten.

Die Nachfrage nach intelligenten Lösungen für die Regelung von Fernwärme Netzen und dem Zusammenspiel mit Verbrauchern und Kraftwerken ist daher sehr stark vorhanden.

Ziel ist es aus diesen intelligenten Regelkonzepten und Simulationen ein Produkt zu entwickeln, das universell für viele Fernwärme Netze eingesetzt werden kann. Damit kann der Gesamtwirkungsgrad verbessert und somit Biomasse und CO₂-Emissionen eingespart werden.

3.1.4 Dissertation

Im Zuge des Projekts wird eine Dissertation von DI Stefan Grosswindhager an der TU-Wien Institut für Mechanik und Mechatronik verfasst. Die Dissertation befindet sich gerade im Endstadium.

4 Ausblick

Im Folgenden sollen die in diesem Projekt gewonnenen Ergebnisse verfeinert und verbessert werden. Ziel ist eine konsequente Entwicklung der Simulation und Regelung von Fernwärmenetzwerken und Kraftwerken für den produktiven Einsatz.

Das Hauptaugenmerk liegt auf der Einsparung von Biomasse und CO₂ in den Fernwärmenetzen.

5 Bibliographie

- Babuska, R. (1998). Fuzzy modeling for control. *Springer* .
- Balate, J., Chramcov, B., Navratil, P., & Princ, M. (2007). Strategy evolution of control of extensive district heating systems. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* , S. 678–683.
- Box, G., Jenkins, G., & Reinsel, G. (2008). Time series analysis: forecasting and control. *Wiley Series in Probability and Statistics* .
- Cleveland, W. (1994). Coplots, nonparametric regression, and conditionally parametric fits. *Lecture Notes-Monograph Series* , S. 21--36.
- Durbin, J., & Koopman, S. (2001). Time series analysis by state space methods. *Oxford University Press* .
- Friedman, J. (1991). Multivariate adaptive regression splines. *The annals of statistics* .
- Grosswindhager, S., Kozek, M., Haffner, L., & Voigt, A. (accepted). Fuzzy Predictive Control of District Heating Network. *International Journal of Modelling, Identification and Control* .

- Grosswindhager, S., Voigt, A., & Kozek, M. (2011). Efficient Physical Modelling of District Heating Networks. *Modelling and Simulation*. Calgary: ACTA Press.
- Grosswindhager, S., Voigt, A., & Kozek, M. (2011). Linear Finite-Difference Schemes for Energy Transport in District Heating Networks.
- Grosswindhager, S., Voigt, A., & Kozek, M. (2009). Online Short-Term Forecast of System Heat Load in District Heating Networks. *Proceedings of the 31st Annual International Symposium on Forecasting*.
- Grosswindhager, S., Voigt, A., & Kozek, M. (2012). Predictive control of district heating network using fuzzy DMC. *Proceedings of International Conference on Modelling, Identification \& Control (ICMIC)*, S. 241--246.
- Larsen, H., Palsson, H., Bohm, B., & Ravn, H. (2004). A comparison of aggregated models for simulation and operational optimisation of district heating networks. *Energy conversion and management*, S. 1119-1139.
- Leonard, B. (1979). A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, S. 59-98.
- Nelles, O. (2001). Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models. *Springer Verlag*.
- Nielsen, H. (1989). Methods for analyzing pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Palsson, H., Larsen, H., Bohm, B., Ravn, H., & Zhou, J. (1999). Equivalent models of district heating systems: for on-line minimization of operational costs of the complete district heating system. *ENS Journal*.
- Pinson, P., Nielsen, T., Nielsen, H., Poulsen, N., & Madsen, H. (2009). Temperature prediction at critical points in district heating systems. *European Journal of Operational Research*, S. 163--176.
- Saarinen, L. (2008). Modelling and control of a district heating system. *Uppsala University*.
- Sandou, G. a. (2005). Predictive Control of a Complex District Heating Network. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*, S. 7372-7377.
- Wang, L. (2009). Model predictive control system design and implementation using MATLAB. *Springer Verlag*.

6 Unterschrift

Ich bestätige, dass der Bericht vollinhaltlich durch die Partner des Projektes akzeptiert wurde.

Ort, Datum

Unterschrift und Stampiglie des Antragstellers (Koordinators)

IMPRESSUM

Verfasser

TU-Wien – Institut für Mechanik und
Mechatronik, Abteilung für
Regelungstechnik und
Prozessautomatisierung

Getreidemarkt 9 /E325/A5
1060 Wien

Tel: +43 1 58801 32505

Fax: +43 1 58801 30399

E-Mail: martin.kozek@tuwien.ac.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die
Weiternutzung der hier enthaltenen
Informationen verantwortlich.

Projektpartner

- VOIGT+WIPP Engineers GmbH
- Ingenieurbüro für Verfahrenstechnik und
Maschinenbau

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien

E-Mail: office@klimafonds.gv.at

Web: www.klimafonds.gv.at