

## MODELLBILDUNG FÜR THERMISCHE AREALVERNETZUNG MIT IDA-ICE

Ph. Kräuchi<sup>1</sup>, M. Kolb<sup>2</sup>, Th. Gautschi<sup>2</sup>, U.-P. Menti<sup>1</sup> und M. Sulzer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Luzern – Zentrum für Integrale Gebäudetechnik, Horw, Schweiz

<sup>2</sup>Amstein+Walthert AG, Zürich, Schweiz

### KURZFASSUNG

Es wird ein Set von Bibliotheks-Bausteinen präsentiert, mit welchen sich Simulationsanwendungen für gebäudeübergreifende Energieversorgungssysteme zusammenbauen lassen (Niedertemperatur-Wärmeverbunde). Die Bausteine wurden für das Simulationsprogramm IDA-ICE entwickelt; als Programmiersprache wurde NMF (Neutral Model Format) verwendet. Folgende Hauptbausteine wurden implementiert: (1) Wärmebezüger, (2) Wärmelieferant, (3) Erdwärmespeicher, (4) Rohr und (5) Pumpe. Die Bausteine sind parametrierbar, und eine mehrfache Verwendung jedes Bausteins in der selben Simulationsanwendung ist möglich. Damit sind beliebige komplexe Versorgungssysteme modellierbar.

Die Bausteine weisen typischerweise Schnittstellen auf, welche die drei Größen Druck, Massenstrom und Temperatur beinhalten. Die gleichungsbasierte Programmierung erlaubt es, gerichtete Systeme auf einfache Weise abzubilden. Auch wechselnde Flussrichtungen lassen sich abbilden, was aber aufwändiger in der Handhabung ist. Ein Ansatz solche Systeme abzubilden wird hier für ein Beispiel mit wechselnder Flussrichtung des Erdwärmespeichers präsentiert.

Die Eingabegrößen in den hier erstellten Simulationsmodellen sind die Lastprofile der Wärmebezüger bzw. -lieferanten (Gebäude, Industrieprozesse, Umweltenergie, etc.). Als Ergebnisse können unter anderem der Wasserdruck an allen Modellknoten, die Massenströme und deren Flussrichtung, sowie die Temperaturen im Leitungsnetz und im Erdwärmespeicher dargestellt werden.

### ABSTRACT

In this paper we present a library for the simulation of low temperature heating networks with interconnected buildings, heat suppliers and heat storage in the ground. The library elements were developed for the simulation program IDA-ICE; they were programmed in the language NMF (Neutral Model Format). The following elements were implemented: (1) heat consumer, (2) heat supplier, (3) heat storage, (4) tube and (5) pump. These elements can be

interconnected. The elements are parameterized, and multiple elements of the same type are supported. This allows for a specific thermal network to quickly and easily map into a simulation model to simulate the network. The main simulation output is pressure, mass flow and temperature at all system nodes.

Implementation of one-way flow systems is straight forward. Here, we show an approach how to implement flow systems with switching flow directions. An example illustrates this approach.

### EINLEITUNG

Niedertemperatur-Wärmeverbunde<sup>1</sup> sind eine Variante der thermischen Arealvernetzung. Im Grundprinzip wird Abwärme und/oder Umweltwärme auf geringem Temperaturniveau in das Niedertemperatur-Wärmenetz eingespiesen, wiederum aus diesem Netz von Wärmebezügern bezogen und mittels Wärmepumpen auf das nötige Temperaturniveau angehoben. Das Wärmenetz weist typischerweise Temperaturen zwischen 8 °C und 18 °C auf, was einen hohen COP der Wärmepumpen ermöglicht.

Die hier präsentierten Ergebnisse haben ihren Anfang in dem an der BauSIM 2012 präsentierten Projekt (Kräuchi et al., 2012). In jenem Beitrag wurde eine Arealnetz-Simulation präsentiert, welche das gesamte Leitungsnetz in einer Komponente zusammenfasste; eine Ausnahme bildeten die Abgänge zu den Wärmebezügern und Wärmelieferanten. Für diese Abgänge wurden die sich aus den Bedarfs- und Einspeiseprofilen ergebenden Wärmeströme berechnet. Daraus wurden mit der für jeden Wärmebezüger und Wärmelieferanten vorgegebenen Temperaturdifferenz die Massenströme berechnet. Der Massenstrom durch die Erdwärmespeicher ergab sich aus der Massenbilanz und einer vorgegebenen Flussaufteilung zwischen den Erdwärmespeichern. Dank des jetzt mitmodellierten Wasserdrucks kann diese Flussaufteilung nun zu jedem Zeitpunkt berechnet werden.

<sup>1</sup> In der Schweiz werden solche Netze oft auch als Anergienetze bezeichnet. Die Referenz an den physikalischen Begriff „Anergie“ ist darin begründet, dass Wärmepumpen notwendig sind, um die Wärmeenergie in den Verbundleitungen für Heizzwecke zu verwenden.

## KOMPONENTENMODELLE

Die Bibliothekselemente sollen insbesondere ermöglichen, 2-Leiter Systeme mit wechselnder Fließrichtung im Netz und im Erdwärmespeicher zu simulieren. Typischerweise sind in solchen Systemen die Förderpumpen dezentral bei den Wärmebezügern und Wärmelieferanten angeordnet. Der Erdwärmespeicher dient in diesem Fall als hydraulischer Ausgleich der Massenströme zwischen den beiden Leitern.

Für die Entwicklungsarbeiten der einzelnen Komponenten wurde eine schrittweise Detaillierung der Elemente gewählt. So konnte nach jedem Entwicklungsschritt ein Gesamtsystem modelliert und auf dessen Plausibilität geprüft werden.

### **Komponente Wärmebezügler**

Die Wärmebezügler im Niedertemperatur-Wärmeverbund werden mittels der Komponente „Heizzentrale“ („HZ“) modelliert. In der „HZ“ können verschiedene „Gebäude“ und deren Bedarfsprofile für Raumheizung und Warmwasser aggregiert werden. Jedem „Gebäude“ ist der Jahresbedarf sowie ein Zeitprofil für Raumheizung und Warmwasser vorzugeben. Damit werden die Lastkurven für Raumheizung und Warmwasser generiert. Alternativ können auch (1) Zeitreihen für Lastkurven eingelesen werden, welche z.B. durch andere Simulationsberechnungen erstellt wurden oder es können (2) Lastwerte eingelesen werden, welche durch verlinkte Modelle berechnet werden (mit beliebiger zeitlicher Auflösung; auch variable Zeitschritte sind möglich). Basierend auf der vorgegebenen Vorlauftemperatur und der berechneten Netztemperatur werden die COPs der Wärmepumpen für die Bereitstellung der Nutzenergie (Raumheizung sowie Warmwasser) dynamisch berechnet. Damit können Aussagen zur Energieeffizienz hergeleitet werden.

### **Komponente Wärmelieferant**

Die Komponente „Wärmelieferant“ ist analog zur Komponente „Wärmebezügler (HZ)“ aufgebaut. Wobei die Wärmeinspeisung direkt mittels Wärmetauscher erfolgt, d.h. ohne Wärmepumpe/Kältemaschine.

### **Komponente Erdwärmespeicher**

Die Komponente „Erdwärmespeicher“ beinhaltet die Berechnung der Temperaturänderung im Erdwärmespeicher. Die Berechnung des Druckverlusts wird mittels eines Standard-Bibliothekselements realisiert, welches den Druckverlust bei turbulenter Strömung in einem rauen Rohr berechnet.

Die Komponente Erdwärmespeicher hat Modelle unterschiedlicher Komplexität implementiert. Über einen Konfigurationsparameter kann der gewünschte

Komplexitäts-Modus gewählt werden. Es sind folgende Modi wählbar:

- a) einfach: ein unendlich grosser Erdwärmespeicher mit unendlich grossem Wärmeübergang,
- b) mittel: ein Erdwärmespeicher beschränkter Grösse mit unendlich grossem Wärmeübergang,
- c) hoch: ein Erdwärmespeicher mit beschränkter Grösse mit Wärmeübergang proportional zur Temperaturdifferenz Wasser-Erdreich und proportional zur Grösse der Austauschfläche (gesamte Erdsonden-Oberfläche).

In allen Modi wird eine unendlich grosse Wärmeleitung angenommen; das heisst im gesamten Erdreich herrscht jeweils dieselbe Temperatur. Im Modus a) resultiert infolge der unendlich grossen Speicherkapazität keine Temperaturänderung im Erdreich. Infolge des unendlich grossen Wärmeübergangs entspricht dann die Wasserausflusstemperatur der Erdreichtemperatur. In einem aus den Komponenten aufgebauten Wärmeverbund-Modell sind die Modi a) und b) insbesondere nützlich als Grenzszenario und zur Plausibilitätsprüfung des korrekten Funktionierens des Modells.

Im gezeigten Beispiel wird der Modus b) verwendet.

### **Komponente Rohr**

Modelliert wird die thermische Speicherfähigkeit der Wassermasse im Rohr. Es wird dazu ein perfekt durchmischter Wasserspeicher angenommen, welcher das Innenvolumen des Rohres repräsentiert. Die Berechnung des Druckverlusts wird mittels eines Standard-Bibliothekselements realisiert.

### **Komponente Pumpe**

Diese Komponente berechnet für eine resultierende Druckdifferenz im Netz die nötige mechanische und elektrische Leistung.

## SIMULATION

### **Modellbildung der Anwendung**

Die Komponenten werden nachfolgend beispielhaft für ein Netz bestehend aus zwei Wärmebezügern (HZ), einem Erdwärmespeicher und zwei Wärmelieferanten angewendet. Im Erdwärmespeicher kann sich je nach Bezugs- und Einspeisungsprofil ein Fluss in die eine oder andere Richtung einstellen (Abbildung 1 und Abbildung 2).

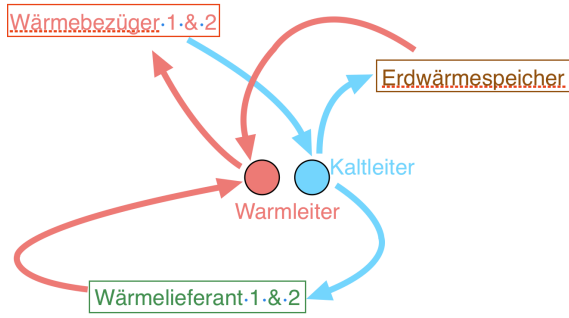


Abbildung 1: Wasserflüsse, sofern der Wärmebezug der Heizzentralen grösser ist als die Wärmelieferung der Wärmelieferanten<sup>2</sup>

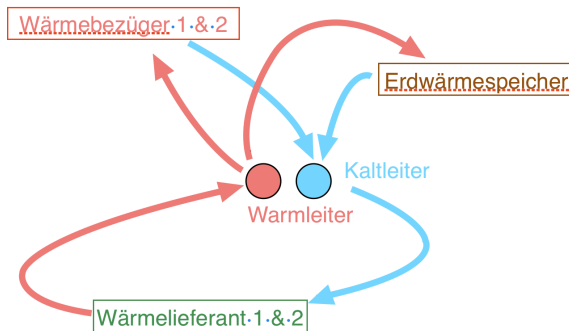


Abbildung 2: Wasserflüsse, sofern der Wärmebezug der Heizzentralen kleiner ist als die Wärmelieferung der Wärmelieferanten<sup>3</sup>

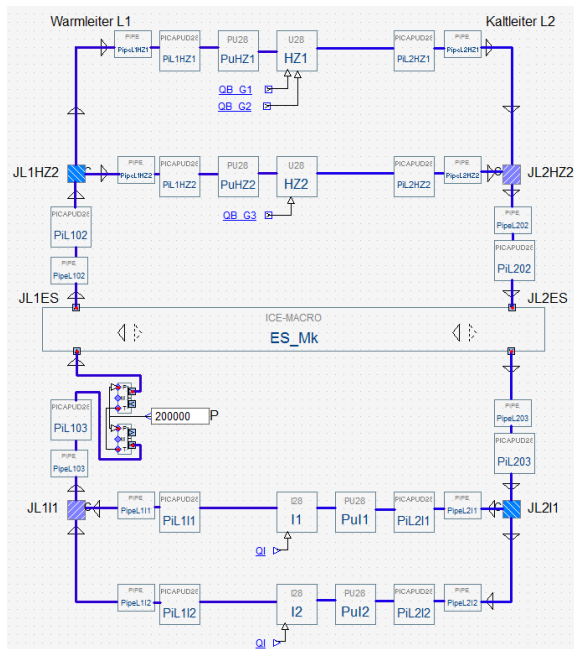


Abbildung 3: Schema der Beispielanwendung in IDA-ICE

<sup>2, 3</sup> Diese Bedingungen beziehen sich auf betragsmäßig gleiche Temperaturänderungen in den Abgängen.

Wie das Anwendungsbeispiel in ICA-ICE implementiert aussehen kann, ist in Abbildung 3 gezeigt. Es wird darin folgende Nomenklatur verwendet:

- Pipe Rohr („pipe“): Druckverlust
- Pi.. Rohr, inkl. Wärmespeicherung
- Pu.. Pumpe
- HZ.. Wärmebezüger (Heizzentrale)
- J.. Abzweigung („Junction“)
- ES.. Erdwärmespeicher
- I.. Wärmelieferant („Industry“)

Der Erdwärmespeicher wurde mittels eines Makros modelliert (Abbildung 4). Der Fluss durch den Erdwärmespeicher kann im Modell in beide Richtungen erfolgen; für jede Richtung gibt es separate Leitungen. Es wird dabei sichergestellt, dass zu jedem Zeitpunkt nur eine dieser Leitungen durchströmt werden kann, d.h. aktiv ist.

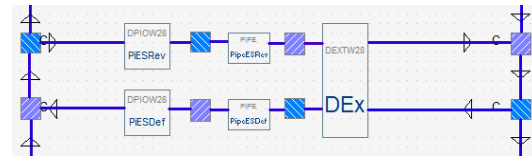


Abbildung 4: Schema des Erdwärmespeichers in der Beispielanwendung (geöffnetes Makro „Es\_Mk“)

Die Elemente im Erdwärmespeicher sind:

- 1) Zwei Rohre „PiESDef“ und „PiESRev“, welche sicherstellen, dass jeweils nur einer der beiden Flüsse aktiv ist. Es gibt in diesem Rohrtyp eine bevorzugte Fließrichtung, das heisst in der Gegenrichtung würde ein um Größenordnungen tieferer Massenfluss resultieren (bei betragsmäßig gleicher Druckdifferenz). Die Fließrichtung ist im Schema durch Pfeil-Symbole gekennzeichnet.
- 2) Zwei Rohre „PipeESDef“ und „PipeESRev“ die den Druckabfall im Erdwärmespeicher modellieren. Es handelt sich hier um das Standard-Rohrmodell aus IDA-ICE (turbulente Strömung in rauen Rohren). Umgeben sind diese beiden Rohre jeweils von zwei Elementen (WatMerge, WaterSplit), welche hier lediglich eine Division beziehungsweise Multiplikation des Erdwärmespeicher-Massenstroms mit der Sondenanzahl durchführen. So kann zur Berechnung des Druckabfalls eine einzelne Sonde des Erdwärmespeichers verwendet werden. Es wird angenommen, dass alle Sonden des Erdwärmespeichers gleich konstruiert sind und somit die gleichen hydraulischen und thermodynamischen Eigenschaften aufweisen.
- 3) Die Komponente „DEX“ beinhaltet den Wärmeaustausch mit dem Erdreich. Sie weist gleichzeitig zwei (virtuelle) gegenläufige Erdsondenfelder auf. Zu jedem Zeitpunkt ist jeweils eines ohne

Wirkung, da der Massenfluss dort nahezu null ist. Beide Erdsondenfelder wirken auf dasselbe Erdreich. So ergibt sich in der Funktionalität ein bidirektionaler Erdwärmespeicher.

Die Rohrverzweigungen sind mit den Standard-Bibliothekselementen aus IDA-ICE ausgeführt („WatSplit“ und „WatMerge“, als blau bzw. lila schraffierte Elemente erkennbar). Das Bibliothekselement „WatSplit“ teilt einen bestimmten Wasserstrom in mehrere ausfließende Teilströme auf. Die Temperatur der ausfließenden Wasserströme wird gleichgesetzt mit der Temperatur des einfließenden Wasserstroms. Das Bibliothekselement „WatMerge“ führt mehrere einfließende Teilströme zu einem bestimmten ausfließenden Wasserstrom zusammen. Es wird dabei für den ausfließenden Wasserstrom die massenstromabhängige Mischtemperatur berechnet. Bei diesen beiden Bibliothekselementen gilt: sobald einer der Wasserströme die Fliessrichtung wechselt, erfolgt die Temperaturberechnung nicht mehr korrekt. Deshalb ist in der Anwendung sicherzustellen, dass diese Bibliothekselemente immer in derselben Richtung durchströmt sind. Dies kann erreicht werden, indem die Erdwärmespeicher-Leitung im Modell virtuell doppelt geführt wird, d.h. für jede Fliessrichtung je eine Leitung modelliert wird.

Der gerichtete Massenfluss durch den Erdwärmespeicher ist aus den entsprechenden Variablen für die doppelt geführte Erdwärmespeicher-Leitung zu gewinnen. Dazu ist eine Ausgabevariable aufzusetzen, welche zu jedem Zeitpunkt den Massenfluss der dann aktiven Erdwärmespeicher-Leitung liefert.

Zusammenfassend ergibt sich für die Abbildung des bidirektional durchströmten Erdwärmespeichers folgender zusätzliche Modellierungsaufwand:

- 1) Die Erdwärmespeicher-Leitung ist doppelt abzubilden, wobei mit einem speziellen Rohrmodell sichergestellt wird, dass jede Leitung eine bevorzugte Fliessrichtung hat.
- 2) Weitere Komponenten des Erdwärmespeichers sind entweder doppelt zu verwenden oder speziell zu programmieren. Ersteres wurde für die Rohrstücke (Druckabfall), letzteres für die Komponente „DEX“ (Wärmetausch mit Erdreich) gewählt.
- 3) Zusätzliche Ausgabevariablen sind zu programmieren. Dies erfolgt durch Fallunterscheidung und Zugriff auf die entsprechenden Variablen der doppelt geführten Erdwärmespeicher-Leitung.

## Parametrierung der Anwendung

Die Parametrierung der Beispielanwendung ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Die Heizzentrale HZ1 deckt den Wärmebedarf der Gebäude G1 und G2 ab; die Heizzentrale HZ2 jenen des Gebäudes G3. Der Bedarf der Raumheizung ist bei den Gebäuden G1 und G2 über ein Lastprofil vorgegeben, welches mit einer IDA-Gebäudesimulation erstellt wurde. Beim Gebäude G3 wird innerhalb der Anwendung ein Profil nach Heizgradstunden berechnet.

Tabelle 1:  
Parameterwerte, verwendet in der Simulation

TYP KOMPO- NENTE	PARAMETER	WERT
Gebäude	Wärmebezug für Heizung, jährlich	<sup>4</sup> B1: 4359 MWh/a B2: 3471 MWh/a B3: 2615 MWh/a
	Vorlauftemperatur Heizsystem	40 °Celsius
	Wärmebezug für Warmwasser, jährlich	<sup>5</sup> B1: 2347 MWh/a B2: 1869 MWh/a B3: 1408 MWh/a
	Vorlauftemperatur Speicherwassererwärmung	55 °Celsius
	Temperaturabsenkung in Abgängen	4 °Celsius
Abwärmelieferant	Wärmelieferung, jährlich	<sup>6</sup> I1: 6750 MWh/a I2: 6000 MWh/a
	Temperaturerhöhung in Abgängen	4 °Celsius
Erdwärmespeicher <sup>7</sup>	Volumen Erdreich	1'000'000 m <sup>3</sup>
	Dichte Erdreich	2000 kg/m <sup>3</sup>
	Spezifische Wärmekapazität	1500 J/(kg K)
	Anzahl Sonden	150
	Bohrtiefe	250 m
	Innendurchmesser	0.050 m
Hauptleiter <sup>8</sup>	Rauhigkeit	0.045 * 10 <sup>-3</sup> m
	Länge	800 m (PiL102, PiL202); 1000 m (PiL103, PiL203)
	Innendurchmesser	0.5 m
Abgänge von Warm- und Kaltleiter <sup>9</sup>	Rauhigkeit	0.45 * 10 <sup>-3</sup> m
	Länge	150 m (je Rohr im Modell)
	Innendurchmesser	0.4 m
	Rauhigkeit	0.45 * 10 <sup>-3</sup> m

<sup>4</sup> B1, B2: Zeitliche Verteilung aus Gebäudesimulation  
B3: Zeitliche Verteilung nach Heizgradtagen (Außentemperatur nach „SMA\_dry\_normal“)

<sup>5</sup> Zeitliche Gleichverteilung

<sup>6</sup> Identische zeitliche Gleichverteilung mit saisonalem Sprung am 1. April und 30. September

<sup>7, 8</sup> Alle Wassertemperaturen, wie auch die Erdreichtemperatur, werden bei Simulationsstart auf 14 °C gesetzt.

<sup>9</sup> Der Druck an der Abzweigung des Erdwärmespeicher-Abgangs im Warmleiter wird auf konstant 200'000 Pa (2 bar) gesetzt

## Ergebnisse

Die simulierten Wärmebezüge sind identisch mit den in Kräuchi et al. (2012), S. 5, gezeigten Bezügen, weil dieselben Lastprofile verwendet wurden. Die von den beiden Heizzentralen gelieferte Endenergie ist in Abbildung 5 dargestellt.

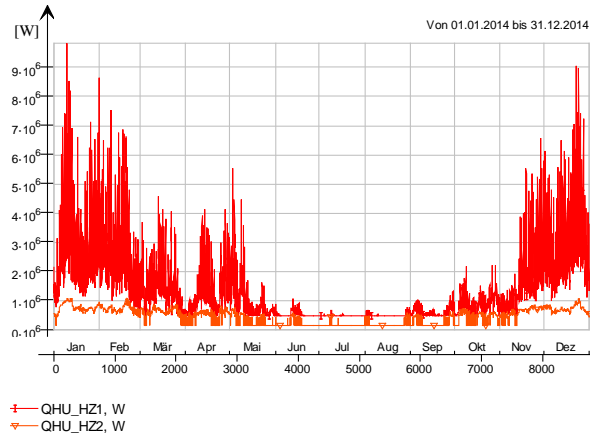


Abbildung 5: Endenergie, welche von den beiden Heizzentralen bereitgestellt wird.

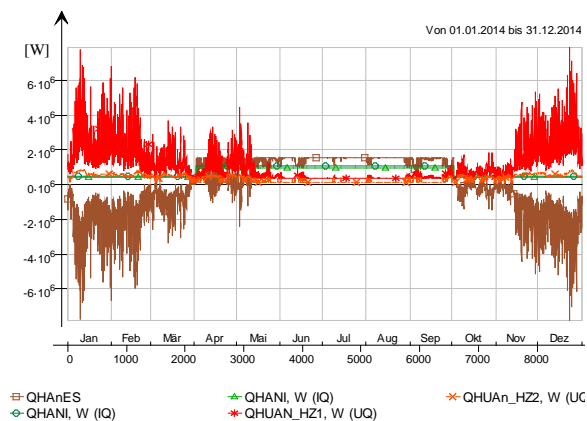


Abbildung 6: Wärmebezug und Wärmelieferung (Bezüge: positiv; Lieferung: negativ; Heizzentralen: rot; Erdwärmespeicher: braun; Wärmelieferanten: grün)

Der Wärmebezug aus dem bzw. die Wärmelieferung in den Wärmeverbund sind in Abbildung 6 dargestellt. Der errechnete COP der Wärmepumpen beider Heizzentralen ist in Abbildung 7 dargestellt.

Abbildung 8 zeigt die Zufluss- und Ausflusstemperaturen des Erdwärmespeichers. Auffällig sind die schnellen Temperaturwechsel im Zufluss. Diese sind eine Folge der Flussrichtungswchsel im Erdwärmespeicher (siehe Abbildung 9): In einem Fall erfolgt der Zufluss aus dem Kaltleiter, im anderen Fall aus dem Warmleiter.

Der Durchfluss im Wärmeverbund ist in Abbildung 9 exemplarisch für alle Abgänge dargestellt. Gut erkennbar sind die Flussrichtungswchsel im Erdwärmespeicher.

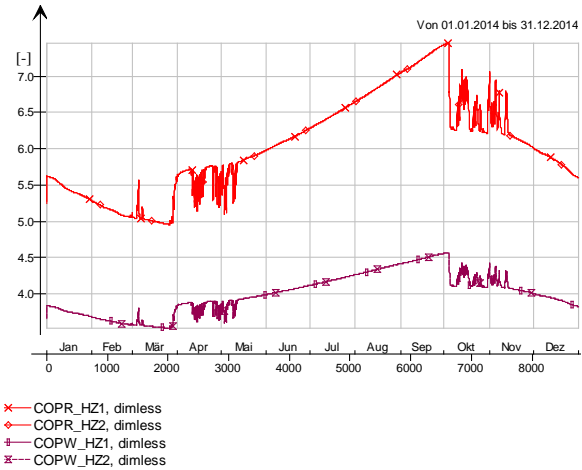


Abbildung 7: COP der Wärmepumpen beider Heizzentralen (Raumheizung: rot; Brauchwarmwasser: weinrot)

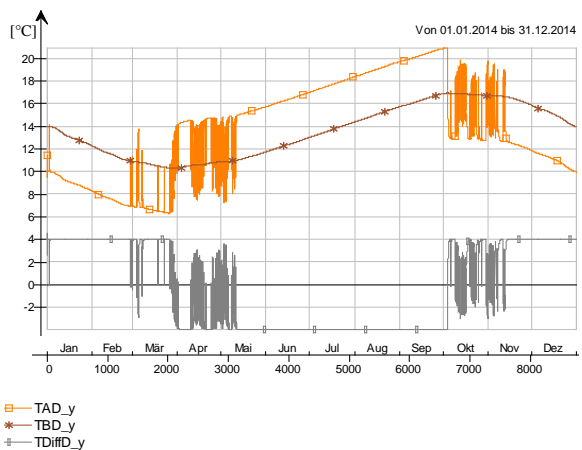


Abbildung 8: Zufluss- (orange) und Ausflusstemperatur (braun) des Erdwärmespeichers; Temperaturdifferenz (grau) beider Temperaturen

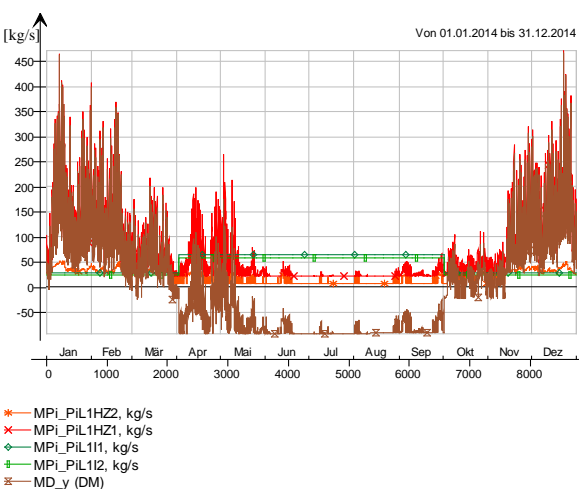


Abbildung 9: Massenströme in allen Abgängen (Strömungsrichtungen sind positiv für die in Abbildung 1 gezeigte Flussituation)

Die Druckdifferenzen sind in Abbildung 10 wiedergegeben. Die beiden Abgänge der Heizzentralen weisen dieselbe Druckdifferenz auf, weil sie an denselben Stellen der Hauptleitung abgenommen werden.

Eine ausgeglichene Drucksituation wird durch die Pumpen erreicht. Die an den Pumpen resultierende Druckdifferenz ist in Abbildung 11 gezeigt.

Die Massenströme und Druckdifferenzen zeigen teilweise hohe Werte und starke kurzzeitige Änderungen. Beides ist eine Folge davon, dass die Bedarfsprofile in der Simulation zwingend gedeckt werden. Im realen System kann eine Unterdeckung von Spitzen in Kauf genommen werden und es resultieren leicht geglättete Bedarfsprofile. Die Massenströme und Drücke im realen Netz sind folglich weniger volatil als in der Simulation dargestellt. Dies hat insbesondere kleinere Druckdifferenzspitzen zur Folge, welche von den Pumpen gedeckt werden müssen.

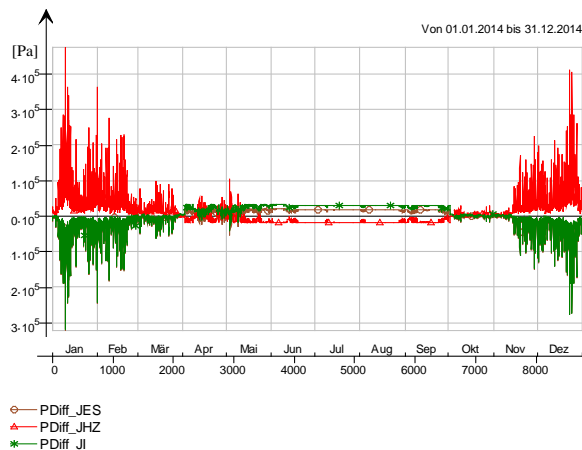


Abbildung 10: Druckdifferenz für alle Abgänge (Heizzentralen: rot; Erdwärmespeicher: braun; Wärmelieferanten: grün; Richtungen nach Abbildung 1)

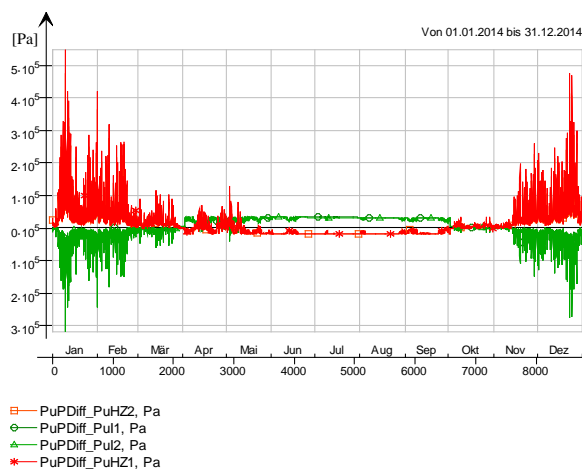


Abbildung 11: Druckdifferenz, welche die Pumpen überwinden müssen (Richtungen nach Abbildung 1)

## DISKUSSION

Basierend auf dem 1-Knotenmodell in Kräuchi et al. (2012) sind die vergleichbaren Ergebnisse deckungsgleich. Kleinste Unterschiede in den Temperaturverläufen dürften durch die detailliertere Systemabbildung bedingt sein.

Die neu verfügbaren Ergebnisse (Druck, Massenstrom und Temperatur für alle Abzweigungsstellen und Pumpen) erscheinen plausibel.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Schritt vom 1-Knoten-Modell der Hauptleiter zu segmentierten Hauptleitern konnte erfolgreich durchgeführt werden. Dies eröffnet vielfältige Perspektiven für die zukünftige Weiterentwicklung der Simulation von thermischen Netzen.

Massenströme, welche nicht ausschliesslich aus den Bedarfprofilen resultieren, sind dank dem modellierten Wasserdruck nun berechenbar.

Mit den vorliegenden Komponenten kann auf einfache Weise ein bidirektionaler Niedertemperatur-Wärmeverbund projektspezifisch modelliert und simuliert werden.

## DANKSAGUNG

Unser Dank gebührt Amstein+Walthert AG für die finanzielle Unterstützung und Thomas Gautschi sowie Matthias Kolb für die fachlichen Anregungen.

## LITERATUR

Sahlin, P., Bring, A., 1996-1. The Neutral Model Format for Building Simulation, Version 3.02, Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden.

Sahlin, P., Bring, A., 1996-2. NMF Handbook. An Introduction to the Neutral Model Format. NMF version 3.02, Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden.

Kräuchi, Ph., Kolb, M., 2012. Simulation thermischer Arealvernetzung mit IDA-ICE, BauSIM 2012, Berlin Deutschland.