



Digitale Zwillinge von Wärmenetzen und deren Einsatz in der Praxis

Markus Rabensteiner (4ward Energy Research GmbH)

Günther Holzer (Prozess Optimal CAP GmbH)

Ziad Aoun (GEF Ingenieur AG)



Agenda

- I Grundlagen der Wärmenetzsimulation
- II Modellaufbau
- III Modellvalidierung
- IV Konkreter Anwendungsfall
- V Modellerweiterungen

Grundbegriffe

- I ■ Numerische und analytische Ansätze
- II ■ Dynamische und statische Modelle
- III ■ Stationäre, instationäre und quasistationäre Systeme
- IV
- V

Vorteile von Digitalen Zwillingen

- I ■ Zeitersparnis
- II ■ Kostenersparnis
- III ■ Reproduzierbarkeit
- IV ■ Risikofreiheit
- V ■ Änderung von Systemparametern

Verwendetes Modell

- I
- II
- III
- IV
- V

- Dynamisches Modell
- Knotenmethode

Programm	Programmiersprache	Entwickler	Anwendung	Graphische Benutzeroberfläche	Benutzerdefinierte Funktion	Optimierung	Simulation	Lizenz
TRNSYS	Fortran	University of Wisconsin	Simulation instationärer Energiesysteme	✓	✓		✓	Gebührenpflichtig
EnergyPlan	Delphi Pascal	Aalborg University, EMD A/S und PlanEnergi	Optimierung von energetischen, ökologischen, und wirtschaftlichen Einwirkungen auf Energiesysteme	✓	✓	✓	✓	kostenlos
RetScreen	Excel basiert	Natural Resources of Canada	Auswertung von Energieerzeugung, Lebenszykluskosten und Treibhausgasemissionen von erneuerbaren Energiequellen		✓	✓		kostenlos
Homer	C++	National Renewable Energy Agency in USA	Simulation und Optimierung von alleinstehenden und verbundenen Energiequellen	✓		✓	✓	gebührenpflichtig
MODEST	Pascal	Optensys	Kostenoptimierung von Energieerzeugung	✓	✓	✓	✓	gebührenpflichtig
energyPro		Energianalys EMD International	Modellierung von Kraft-Wärme-Kopplung-Kraftwerken und andere komplexe Energiesysteme	✓	✓	✓	✓	gebührenpflichtig
NetSim		Vitec	Netzsimulationsprogramm für Fernwärme und Fernkältesysteme	✓	✓	✓	✓	gebührenpflichtig
TERMIS		Schneider Electric	Echtzeit Planung und Optimierung von Fernwärmenetzen	✓	✓	✓	✓	gebührenpflichtig
LEAP	Visual Basics, C oder Java	Community of Energy, Environment and Development	Energiepolitik Anwendung und Klimawandelanalyse				✓	kostenlos
MiniCam	Fortran	Pacific Northwest National Laboratory	Langzeit und großtechnischer Wandel von globalen und lokalen Energiesystemen		✓		✓	kostenlos
Nems	Fortran	EIA	Energie, Wirtschaft und Umwelt vom U.S. Energiemarkt		✓		✓	gebührenpflichtig
PRIMES	GAMS	National Technical University of Athens	Simulation von Energieangebot und Energienachfrage		✓		✓	gebührenpflichtig
SimREN	ModL	Institute of Sustainable Solutions and Innovations	Modellierung von Energieangebot und Energienachfrage		✓		✓	gebührenpflichtig
MATLAB/Simulink	Fortran	The Mathworks	Numerische Berechnung und Visualisierung	✓	✓		✓	gebührenpflichtig
msisHYD		Bentley	Hydraulische und Thermische Simulation von Fernwärme- und Fernkältesystemen	✓			✓	gebührenpflichtig
Comsol Multiphysics	Java	Comsol	Simulation und Optimierung von spezifischen Bauteilen	✓	✓	✓	✓	gebührenpflichtig
Dymola	Modelica	Dassault Systèmes	Simulation komplexer Systeme	✓	✓	✓	✓	gebührenpflichtig
RAMSES	Excel, u. Visual Basic	Danish Energy Agency	Simulation von Elektrizität und Fernwärme		✓	✓	✓	gebührenpflichtig

Quelle:

Pietruszka, W.D., 2014. MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis. 4., überarb., aktualisierte u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-06420-4

Brück, D., 2017. Dymola Referential

COMSOL, 2018. COMSOL Multiphysics

Lund, H., et al., 2014. 4th Generation District Heating (4GDH)“. Energy 68, 1–11

Homer Energy, 2018. HOMER Pro Features

Henning, D., 1997. MODEST—An energy-system optimisation model applicable to local utilities and countries. Energy 22.12, 1135–1150

Heaps, C., 2018. LEAP.

BTS, 2018. U.S. Transportation Models Forecasting Greenhouse Gas Emissions: An Evaluation from a User’s Perspective | Bureau of Transportation Statistics

U.S. Department of Energy, 2013. Integrating Module of the National Energy Modeling System: Model Documentation 2013

ISUSI, 2018. ISUSI Institute for Sustainable Solutions and Innovations

ENS, 2018. Models

Hydraulische Modellierung

- I
- II
- III
- IV
- V

$$\sum_{i=1}^{nodes} \dot{V}_{ext,i} = 0 \rightarrow \rho = \text{konstant} \rightarrow \sum_{i=1}^{nodes} \dot{m}_{ext,i} = 0$$

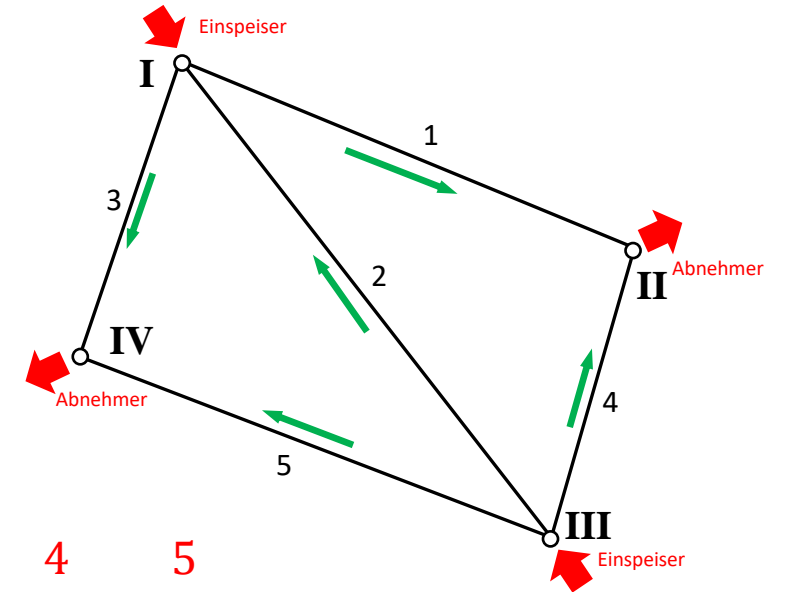
$$\underline{\underline{M}} \cdot \underline{\underline{\dot{m}_{int}}} = \underline{\underline{\dot{m}_{ext}}}$$

$$\underline{\underline{M}}^T \cdot (\underline{\underline{p}} + \rho \cdot g \cdot \underline{\underline{h}}) = \underline{\underline{\Delta p}}$$

$$\underline{\underline{R}} \cdot \underline{\underline{\dot{m}_{int}}}^2 = \underline{\underline{\Delta p}}$$

$$R = \frac{8}{d^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \zeta \right)$$

	1	2	3	4	5
I	1	1	1	0	0
II	-1	0	0	-1	0
III	0	-1	0	1	1
IV	0	0	-1	0	-1



Hydraulisches Gleichungssystem

- I
- II
- III
- IV
- V

1. $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_I$

2. $-\dot{m}_1 - \dot{m}_4 = -\dot{m}_{II}$

3. $-\dot{m}_2 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 = \dot{m}_{III}$

4. $-\dot{m}_3 - \dot{m}_5 = -\dot{m}_{IV}$

5. $p_I - p_{II} + \rho \cdot g \cdot (h_I - h_{II}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_1^2}{d_1^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_1 \cdot \frac{L_1}{d_1} + \sum_1 \zeta \right)$

6. $-p_I + p_{III} + \rho \cdot g \cdot (-h_I + h_{III}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_2^2}{d_2^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_2 \cdot \frac{L_2}{d_2} + \sum_2 \zeta \right)$

7. $p_I - p_{IV} + \rho \cdot g \cdot (h_I - h_{IV}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_3^2}{d_3^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_3 \cdot \frac{L_3}{d_3} + \sum_3 \zeta \right)$

8. $-p_{II} + p_{III} + \rho \cdot g \cdot (-h_{II} + h_{III}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_4^2}{d_4^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_4 \cdot \frac{L_4}{d_4} + \sum_4 \zeta \right)$

9. $p_{III} - p_{IV} + \rho \cdot g \cdot (h_{III} - h_{IV}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_5^2}{d_5^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_5 \cdot \frac{L_5}{d_5} + \sum_5 \zeta \right)$

10. $\dot{m}_I - \dot{m}_{II} + \dot{m}_{III} - \dot{m}_{IV} = 0$

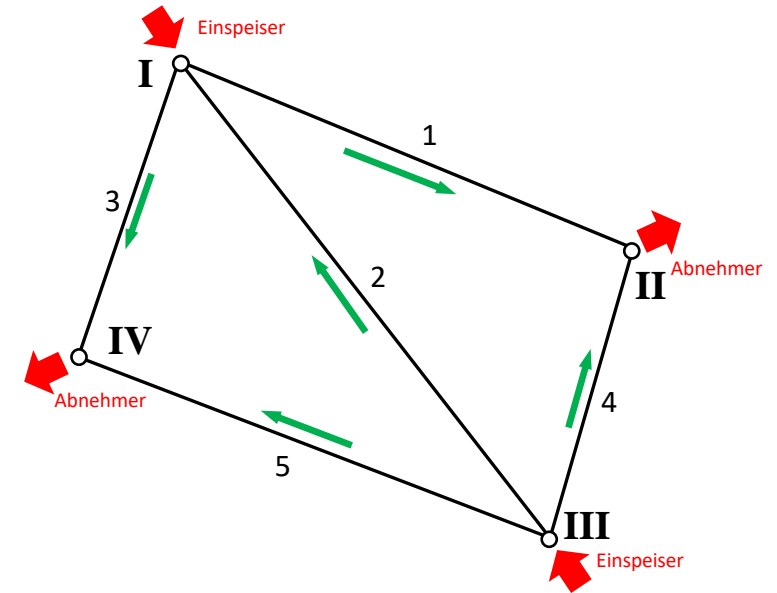
$\underline{M} \cdot \underline{\dot{m}}_{int} = \underline{\dot{m}}_{ext}$

$\underline{M}^T \cdot (\underline{p} + \rho \cdot g \cdot \underline{h}) = \underline{\Delta p}$

$\underline{R} \cdot \underline{\dot{m}}_{int}^2 = \underline{\Delta p}$

$R = \frac{8}{d^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \zeta \right)$

$\sum_{i=1}^{nodes} \dot{m}_{ext,i} = 0$



- 10 Gleichungen
- 10 Unbekannte ($\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_4, \dot{m}_5, p_{II}, p_{III}, p_{IV}, \dot{m}_{II}, \dot{m}_{IV}$)

Hydraulisches Gleichungssystem

- I
- II
- III
- IV
- V

1. $\dot{m}_1 = \dot{m}_I$

2. $-\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = -\dot{m}_{II}$

3. $-\dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_5 = 0$

4. $-\dot{m}_3 + \dot{m}_4 = -\dot{m}_{IV}$

5. $-\dot{m}_4 = -\dot{m}_V$

6. $-\dot{m}_5 + \dot{m}_6 = -\dot{m}_{VI}$

7. $-\dot{m}_6 = -\dot{m}_{VII}$

8. $p_I - p_{II} + \rho \cdot g \cdot (h_I - h_{II}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_1^2}{d_1^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_1 \cdot \frac{L_1}{d_1} + \sum_1 \zeta \right)$

9. $p_{II} - p_{III} + \rho \cdot g \cdot (h_{II} - h_{III}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_2^2}{d_2^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_2 \cdot \frac{L_2}{d_2} + \sum_2 \zeta \right)$

10. $p_{III} - p_{IV} + \rho \cdot g \cdot (h_{III} - h_{IV}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_3^2}{d_3^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_3 \cdot \frac{L_3}{d_3} + \sum_3 \zeta \right)$

11. $p_{IV} - p_V + \rho \cdot g \cdot (h_{IV} + h_V) = \frac{8 \cdot \dot{m}_4^2}{d_4^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_4 \cdot \frac{L_4}{d_4} + \sum_4 \zeta \right)$

12. $p_{III} - p_{VI} + \rho \cdot g \cdot (h_{III} - h_{VI}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_5^2}{d_5^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_5 \cdot \frac{L_5}{d_5} + \sum_5 \zeta \right)$

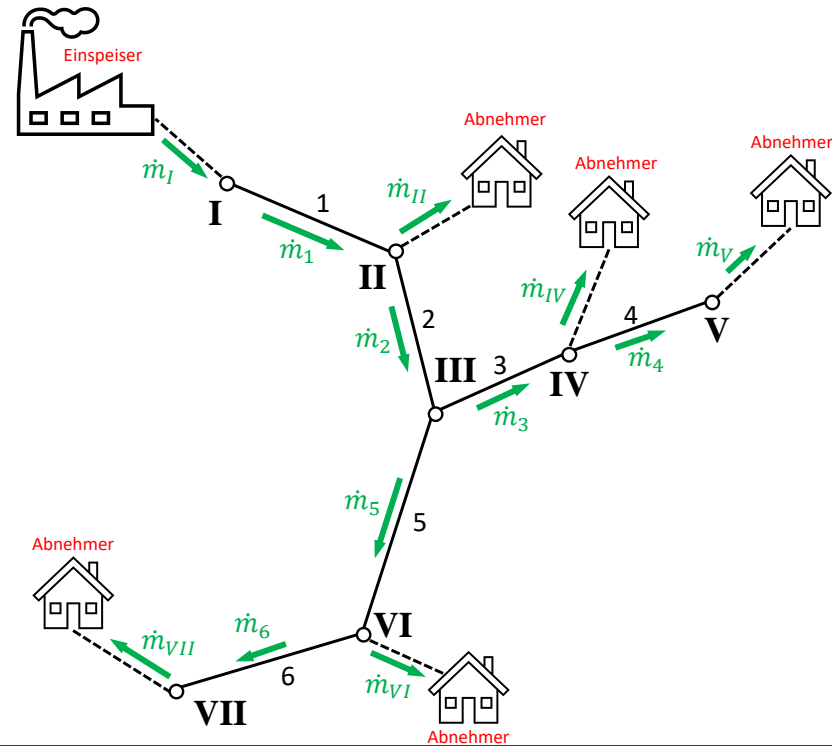
13. $p_{VI} - p_{VII} + \rho \cdot g \cdot (h_{VI} - h_{VII}) = \frac{8 \cdot \dot{m}_6^2}{d_6^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda_6 \cdot \frac{L_6}{d_6} + \sum_6 \zeta \right)$

$\underline{\underline{M}} \cdot \underline{\underline{\dot{m}}}_{int} = \underline{\underline{\dot{m}}}_{ext}$

$\underline{\underline{M}}^T \cdot (\underline{\underline{p}} + \rho \cdot \underline{\underline{g}} \cdot \underline{\underline{h}}) = \underline{\underline{\Delta p}}$

$\underline{\underline{R}} \cdot \underline{\underline{\dot{m}}}_{int}^2 = \underline{\underline{\Delta p}}$

$R = \frac{8}{d^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \zeta \right)$



- 13 Gleichungen
- 13 Unbekannte ($\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_4, \dot{m}_5, \dot{m}_6, p_{II}, p_{III}, p_{IV}, p_V, p_{VI}, p_{VII}, \dot{m}_I$)

Thermische Modellierung (transient)

I

II

III

IV

V

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\dot{q} \cdot d \cdot \pi \cdot \Delta x + \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{i-1} - T_i)}{\rho \cdot c_p \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \Delta x}$$

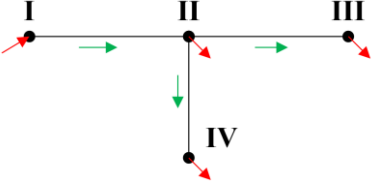
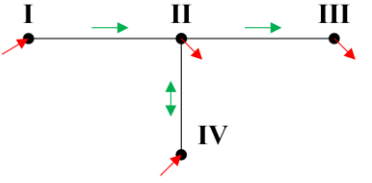
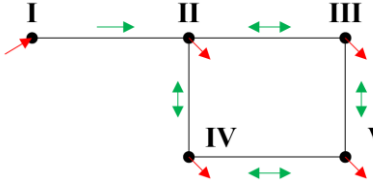
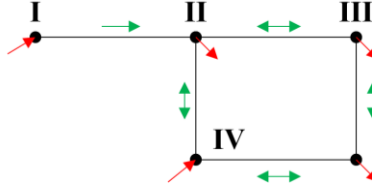
$$\dot{q} = k \cdot (T_U - T_i)$$

\dot{q} ... Wärmestromdichte [W/m²]

Δx ... Länge eines Knotenpunktes [m]

Vorgangsweise

- I
- II
- III
- IV
- V

Fall 1: Reines Strahlennetz ohne dezentrale Einspeiser	Fall 2: Reines Strahlennetz mit einem dezentralen Einspeiser	Fall 3: Ring-/Maschennetz ohne dezentrale Einspeiser	Fall 4: Ring-/Maschennetz mit einem dezentralen Einspeiser
			
<ol style="list-style-type: none"> 1) Fließrichtungen können wahllos angenommen werden. 2) $\underline{M} \cdot \underline{\dot{m}}_{int} = \underline{\dot{m}}_{ext}$ lösen \rightarrow Fließrichtungen sind nun bekannt 3) \underline{M} neu berechnen. 4) $\underline{M}^T \cdot (\underline{p} + \rho \cdot g \cdot \underline{h}) = \underline{\Delta p}$ und $\underline{R} \cdot \underline{\dot{m}}_{int}^2 = \underline{\Delta p}$ verwenden, um Drücke in den Knoten zu berechnen 5) Thermische Berechnung 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Fließrichtungen in Leitungen, in denen man die Fließrichtung bereits kennt, sollen richtig angegeben werden. In Leitungen, in denen man die Fließrichtung nicht kennt, kann die Richtung wahllos angenommen werden. 2) Formeln für $\underline{M} \cdot \underline{\dot{m}}_{int} = \underline{\dot{m}}_{ext}$, $\underline{M}^T \cdot (\underline{p} + \rho \cdot g \cdot \underline{h}) = \underline{\Delta p}$, $\underline{R} \cdot \underline{\dot{m}}_{int}^2 = \underline{\Delta p}$ und $\sum \dot{m}_{ext,i} = 0$ aufstellen und lösen 3) Kontrolle, ob ein interner Massenstrom negativ ist. Wenn ja, dann Schritte 4 bis 6 ausführen. 4) Fließrichtungen den berechneten Fließrichtungen anpassen und \underline{M} neu berechnen 5) Formeln für $\underline{M} \cdot \underline{\dot{m}}_{int} = \underline{\dot{m}}_{ext}$, $\underline{M}^T \cdot (\underline{p} + \rho \cdot g \cdot \underline{h}) = \underline{\Delta p}$, $\underline{R} \cdot \underline{\dot{m}}_{int}^2 = \underline{\Delta p}$ und $\sum \dot{m}_{ext,i} = 0$ aufstellen und lösen 6) Schritte 3 bis 5 so lange wiederholen, bis alle Massenströme positiv sind. 7) Thermische Berechnung 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Fließrichtungen in Leitungen, in denen man die Fließrichtung bereits kennt, sollen richtig angegeben werden. In Leitungen, in denen man die Fließrichtung nicht kennt, kann die Richtung wahllos angenommen werden. 2) Formeln für $\underline{M} \cdot \underline{\dot{m}}_{int} = \underline{\dot{m}}_{ext}$, $\underline{M}^T \cdot (\underline{p} + \rho \cdot g \cdot \underline{h}) = \underline{\Delta p}$ und $\underline{R} \cdot \underline{\dot{m}}_{int}^2 = \underline{\Delta p}$ aufstellen und lösen 3) Kontrolle, ob ein interner Massenstrom negativ ist. Wenn ja, dann Schritte 4 bis 6 ausführen. 4) Fließrichtungen den berechneten Fließrichtungen anpassen und \underline{M} neu berechnen 5) Formeln für $\underline{M} \cdot \underline{\dot{m}}_{int} = \underline{\dot{m}}_{ext}$, $\underline{M}^T \cdot (\underline{p} + \rho \cdot g \cdot \underline{h}) = \underline{\Delta p}$ und $\underline{R} \cdot \underline{\dot{m}}_{int}^2 = \underline{\Delta p}$ aufstellen und lösen 6) Schritte 3 bis 5 so lange wiederholen, bis alle Massenströme positiv sind. 7) Thermische Berechnung 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Fließrichtungen in Leitungen, in denen man die Fließrichtung bereits kennt, sollen richtig angegeben werden. In Leitungen, in denen man die Fließrichtung nicht kennt, kann die Richtung wahllos angenommen werden. 2) Formeln für $\underline{M} \cdot \underline{\dot{m}}_{int} = \underline{\dot{m}}_{ext}$, $\underline{M}^T \cdot (\underline{p} + \rho \cdot g \cdot \underline{h}) = \underline{\Delta p}$, $\underline{R} \cdot \underline{\dot{m}}_{int}^2 = \underline{\Delta p}$ und $\sum \dot{m}_{ext,i} = 0$ aufstellen und lösen 3) Kontrolle, ob ein interner Massenstrom negativ ist. Wenn ja, dann Schritte 4 bis 6 ausführen. 4) Fließrichtungen den berechneten Fließrichtungen anpassen und \underline{M} neu berechnen 5) Formeln für $\underline{M} \cdot \underline{\dot{m}}_{int} = \underline{\dot{m}}_{ext}$, $\underline{M}^T \cdot (\underline{p} + \rho \cdot g \cdot \underline{h}) = \underline{\Delta p}$, $\underline{R} \cdot \underline{\dot{m}}_{int}^2 = \underline{\Delta p}$ und $\sum \dot{m}_{ext,i} = 0$ aufstellen und lösen 6) Schritte 3 bis 5 so lange wiederholen, bis alle Massenströme positiv sind. 7) Thermische Berechnung

Benutzeroberfläche

- I
- II
- III
- IV
- V

- Eingabe über Microsoft-Excel (GIS-Daten umwandeln)
- Tabellenblatt für Knoten

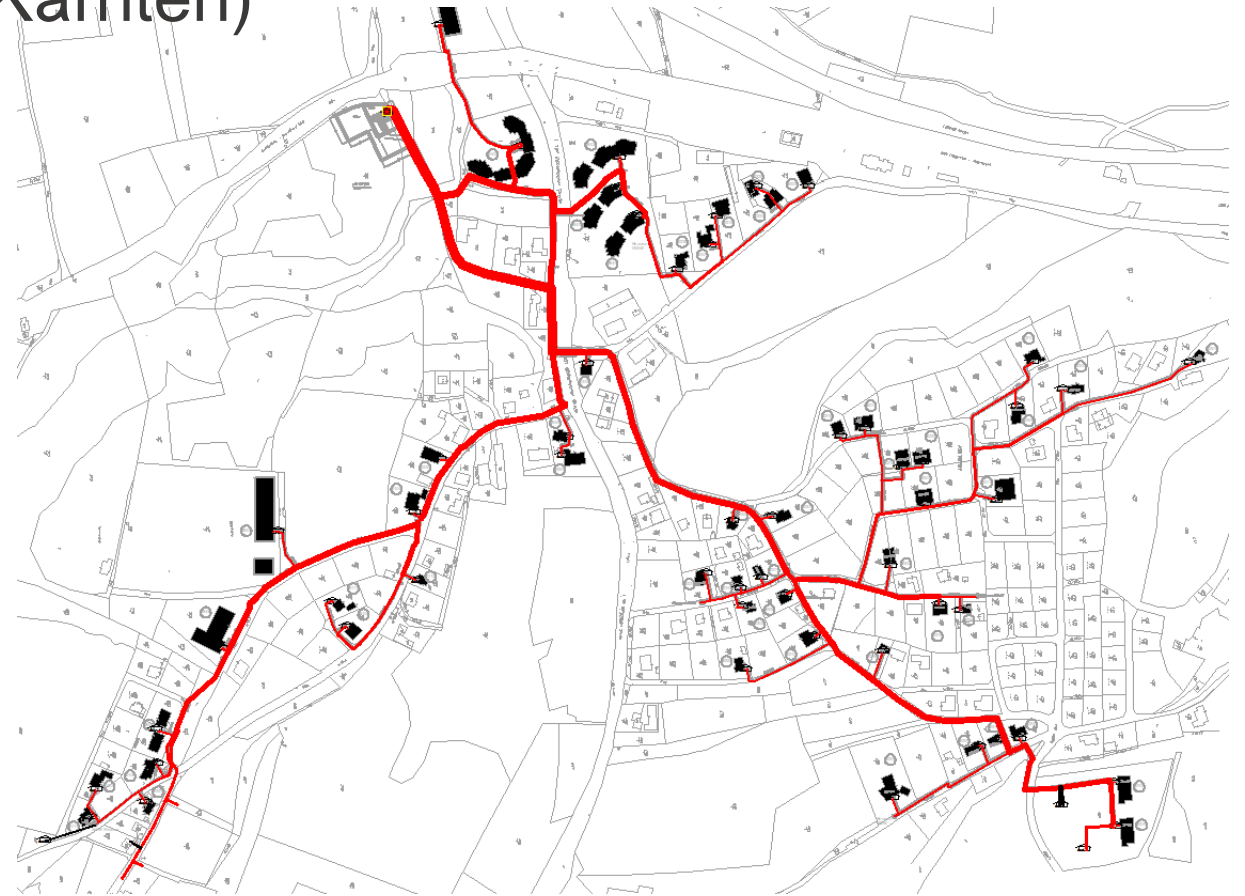
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Nr.	aktiv	X	Y	h [m]	Verteiler	p_ref	Einspeiser	Abnehmer	[kW]	[kWh/a]	[m³/a]	Gebäude	CSV	Netzplan ID	Inbetriebnahme
2	I	ja	316	705	514,84			1								
3	II	ja	433	631	517,40	x										
4	III	ja	440	671	519,59	x										
5	IV	ja	365	784	521,99				0424	60		2532		v. 25001		26.04.2021
6	V	ja	470	609	519,68	x										
7	VI	ja	534	647	519,84	x										
8	VII	ja	532	660	520,00				0375	130,0		7013		v. 25002		26.04.2021
9	VIII	ja	537	630	519,95	x										
10	IX	ja	533	631	519,46				0376	100,0				v. 25003		26.04.2021
11	X	ja	554	604	520,57	x										

- Tabellenblatt für Leitungen

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Nr.	aktiv	Anfangsknoten	Endknoten	Länge der Leitung [m]	Durchmesser der Leitung [mm]	Rohrreibungszahl der Leitung [-]	Summe der Druckverlustbeiwerte der Leitung [-]	U-Wert der Leitung [W/mK]
2	1	ja	I	II	178,5895337	90	0,024	0	0,1989
3	2	ja	II	III	47,80736972	50	0,024	0	0,1514
4	3	ja	III	IV	155,5262193	40	0,024	0	0,1468
5	4	ja	II	V	53,10577083	90	0,024	0	0,1989
6	5	ja	V	VI	77,58134845	63	0,024	0	0,1712
7	6	ja	VI	VII	13,47399312	40	0,024	0	0,1468
8	7	ja	VI	VIII	15,87410636	63	0,024	0	0,1712
9	8	ja	VIII	IX	3,302525992	32	0,024	0	0,1405
10	9	ja	VIII	X	35,2392539	50	0,024	0	0,1514
11	10	ja	X	XI	76,2154523	40	0,024	0	0,1468
12	11	ja	XI	XII	5,663344842	25	0,024	0	0,1121

Referenznetz

- I
- II
- III
- IV
- V
- Fernwärmenetz im Maria Rain (Kärnten)
- Inbetriebnahme: 2011
- Kessel:
 - Biomassekessel mit 1.200 kW
 - Backup-Kessel (Öl)
 - RGKA
- Temperaturniveau: 80/50° C
- Pufferspeicher: 17.000 L
- Netzlänge: >7.000 lfm
- Hausanschlüsse: 65



Berechnungsschema

I
II
III
IV
V

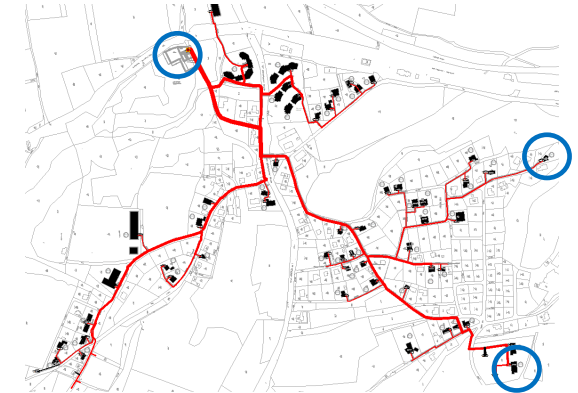
Eingelesene Werte:

- Volumenströme und Leistungen der ÜGS
- Druck am VL und RL an einem der Netzschlechtepunkte
- VL-Temperatur am Heizwerk

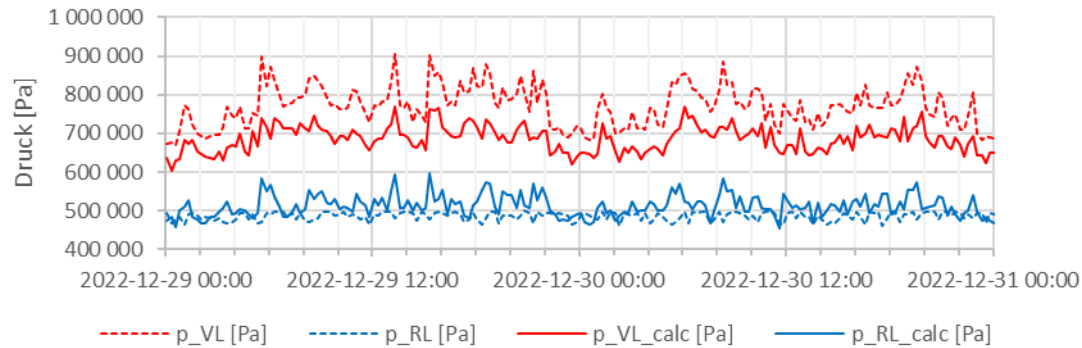
Hydraulischer Abgleich

I
II
III
IV
V

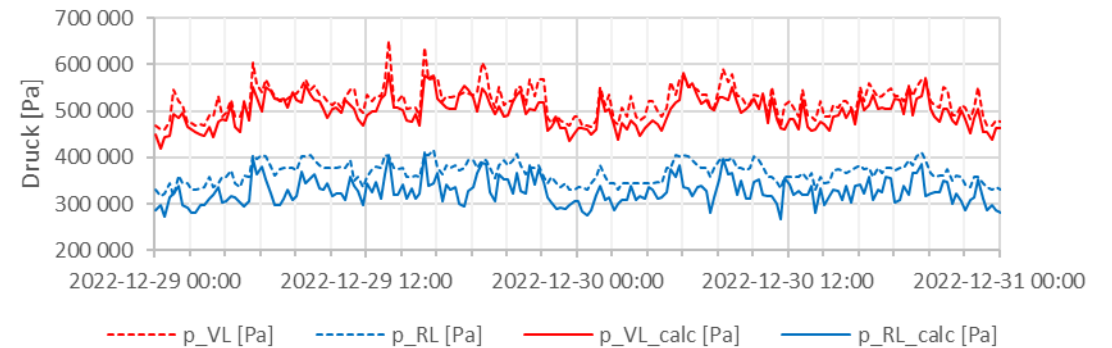
- Weitere gemessene Drücke werden mit berechneten Drücken gegenübergestellt
 - Heizwerk
 - Weitere Netzschlechtpunkte



Drücke am Heizwerk



Drücke am anderen Netzschlechtpunkt



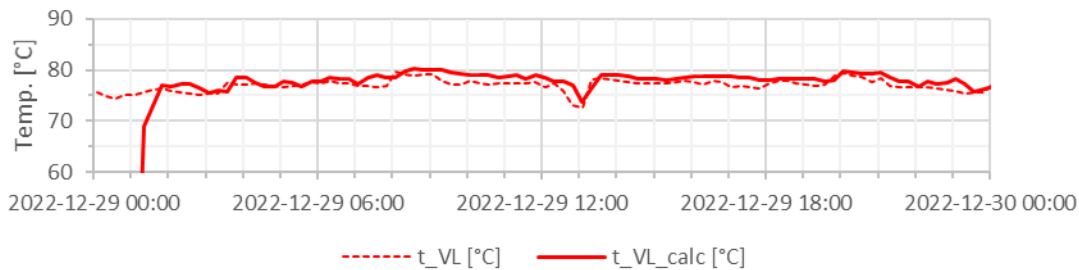
- Anpassung von λ und $\sum \zeta$ für jede Leitung (manuell oder automatisch)

Thermischer Abgleich VL

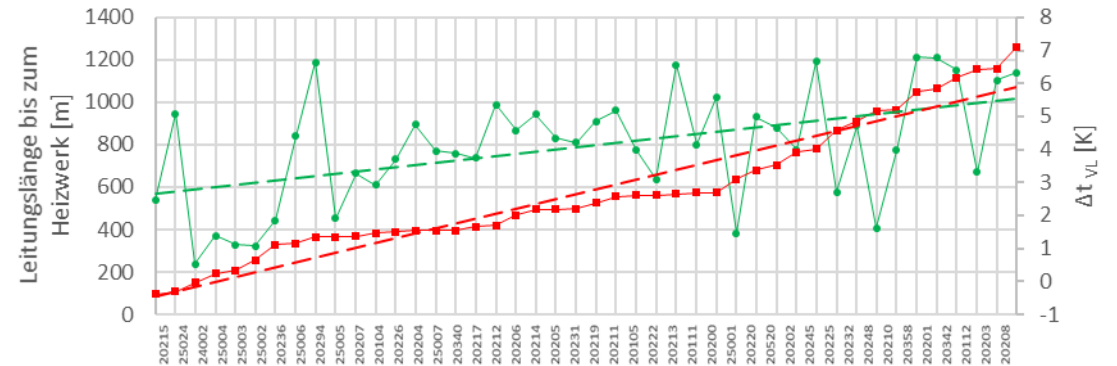
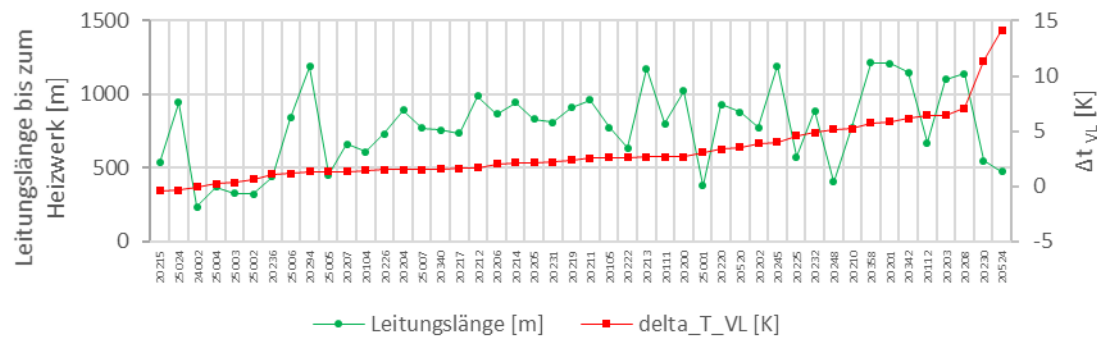
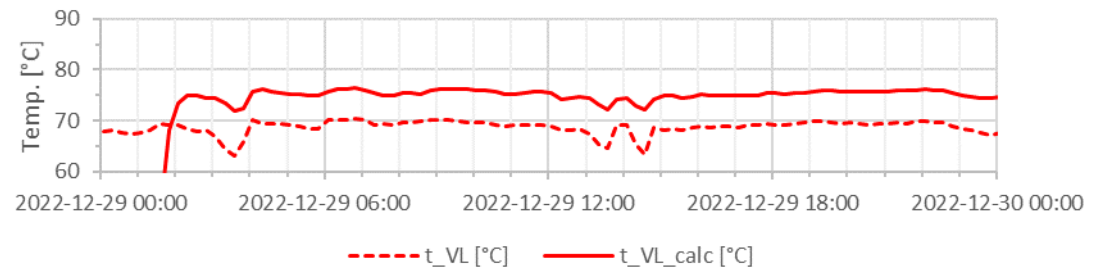
- I
- II
- III
- IV
- V

- Vergleich zwischen gemessener und berechneter VL-Temperatur für jede ÜGS

ÜGS-Nr. 26422



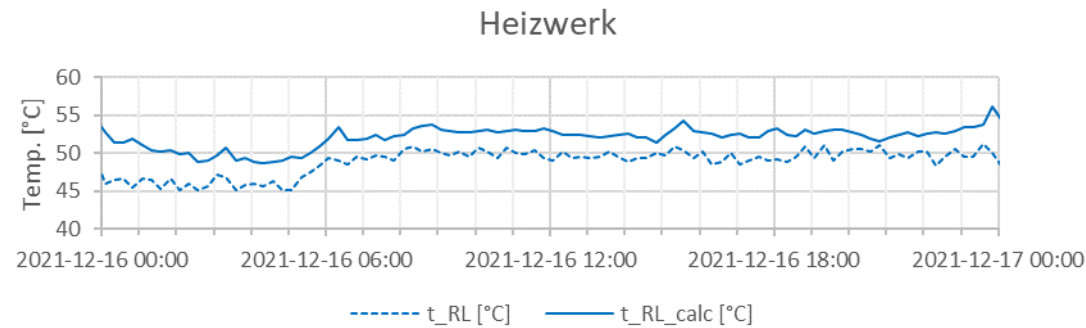
ÜGS-Nr. 20208



- Anpassung U-Wert für jede Leitung (manuell oder automatisch)

Thermische Abgleich RL

- I
- II
- III
- IV
- V
- Vergleich zwischen gemessener und berechneter RL-Temperatur am Heizwerk

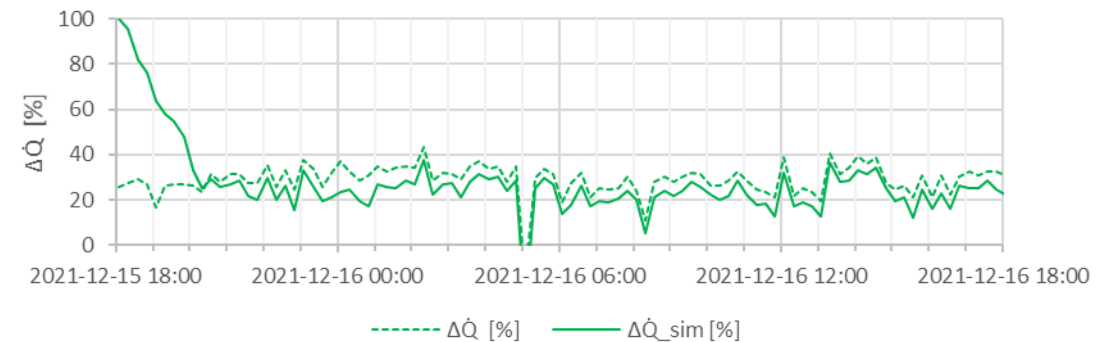
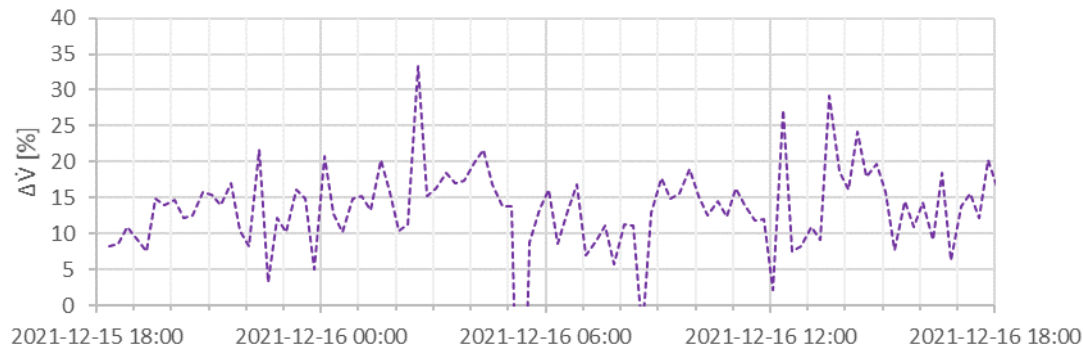


Messausfälle

I
II
III
IV
V

Messlücken füllen durch:

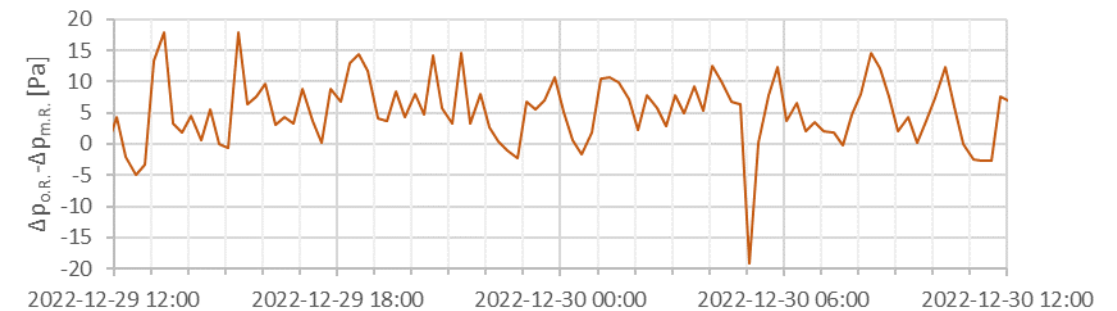
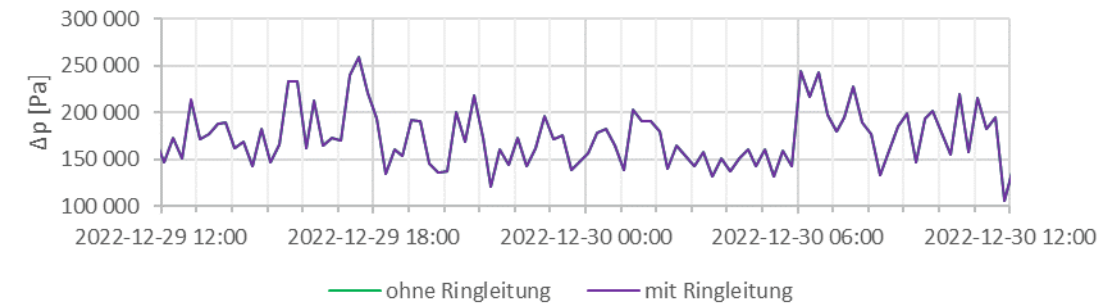
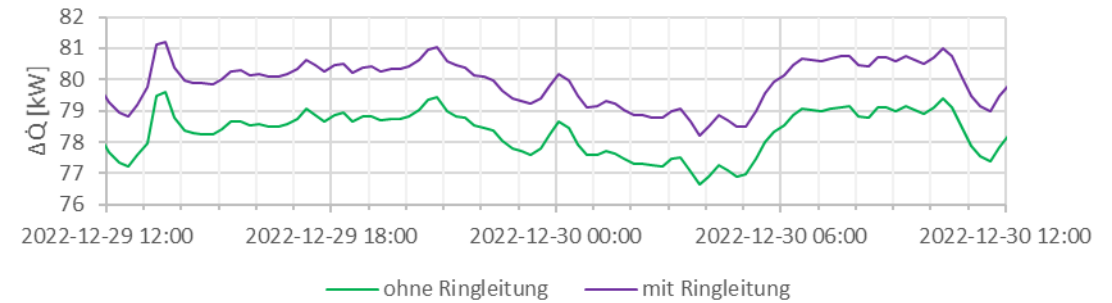
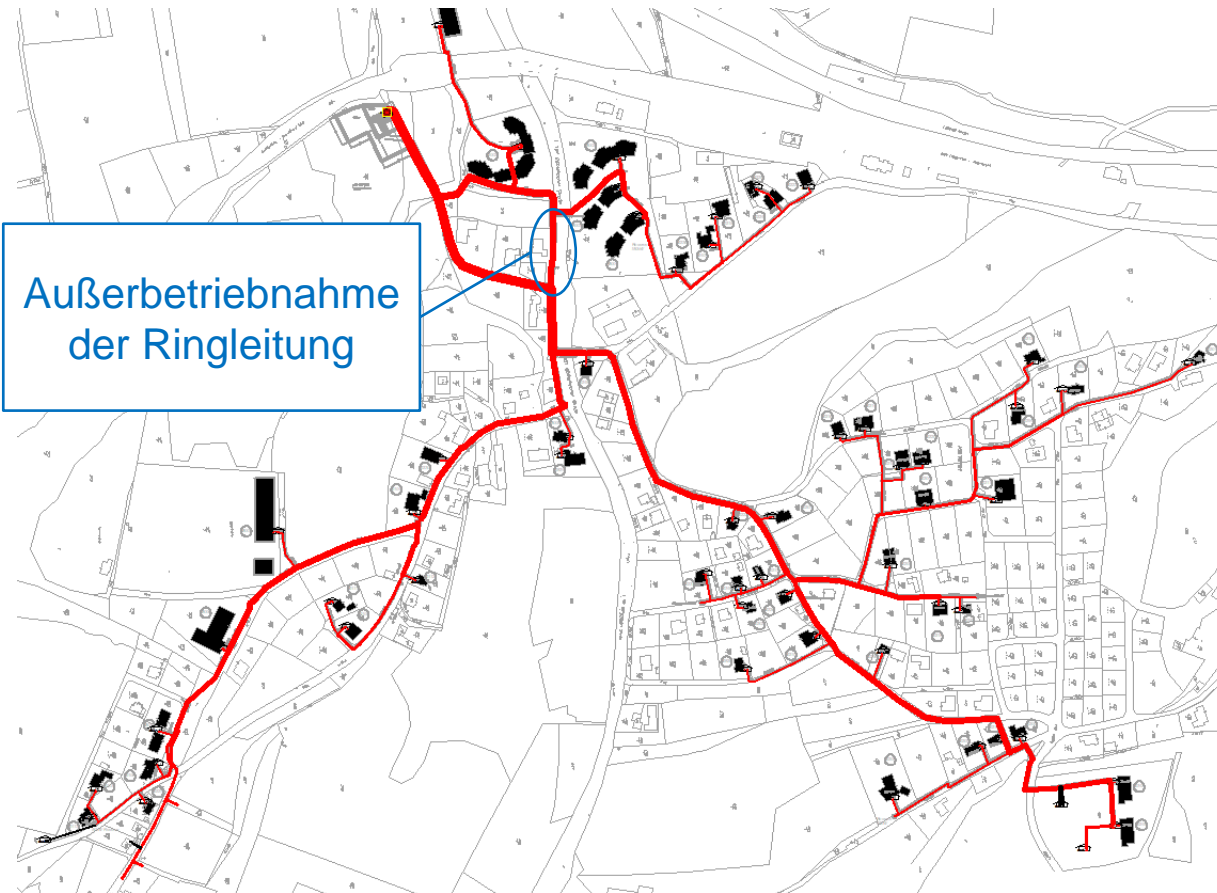
- Bilanzierung (Volumenstrom, Energie)



- Standardlastgänge
- KI-Methoden

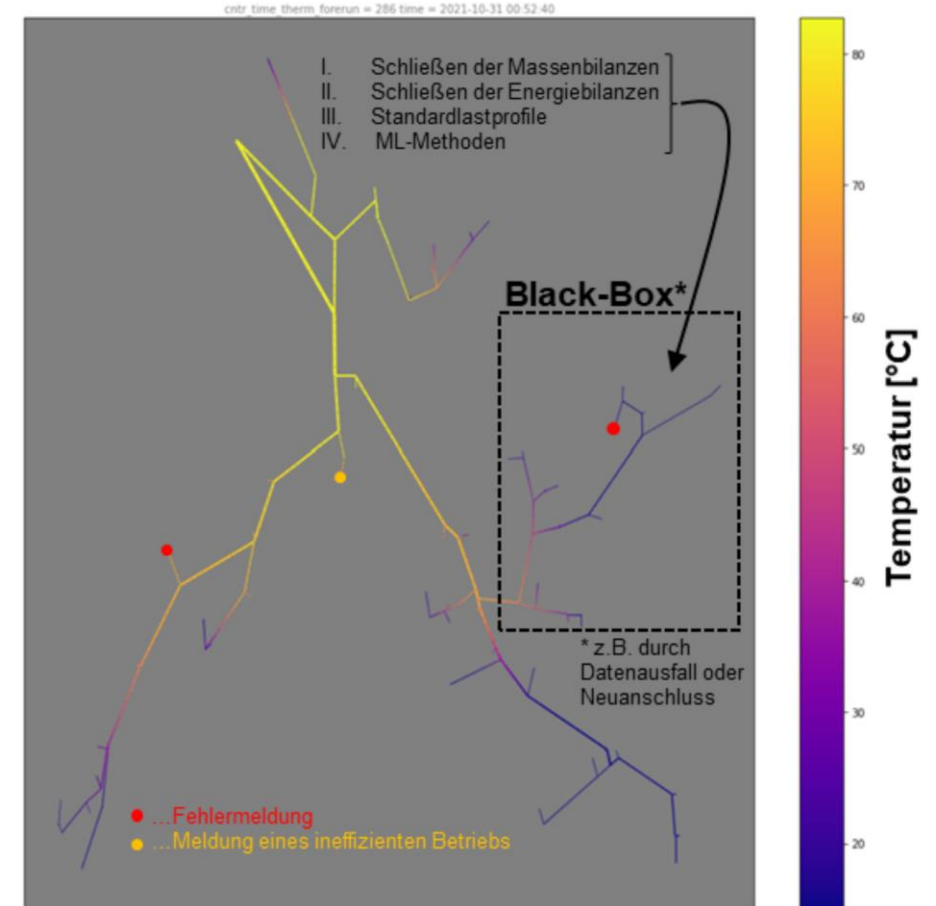
Außerbetriebnahme der Ringleitung

- I
- II
- III
- IV
- V



Weitere Anwendungsfälle

- I
- II
- III
- IV
- V
- Echtzeitsimulation von Wärmenetzen
 - Schnittstelle mit Server einrichten
- Simulation einer Black-Box
 - Netzsimulation trotz schlechter Datenlage
 - Grundsatz: „Bestmöglich mit den vorhandenen Daten rechnen“
- Fehleranalyse
 - Ev. Einsatz von KI-Methoden



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Markus Rabensteiner

4ward Energy Research GmbH

Reininghausstraße 13A

A-8020 Graz

e: markus.rabensteiner@4wardenergy.at

t: +43 664 88 251 1830

w: www.4wardenergy.at