

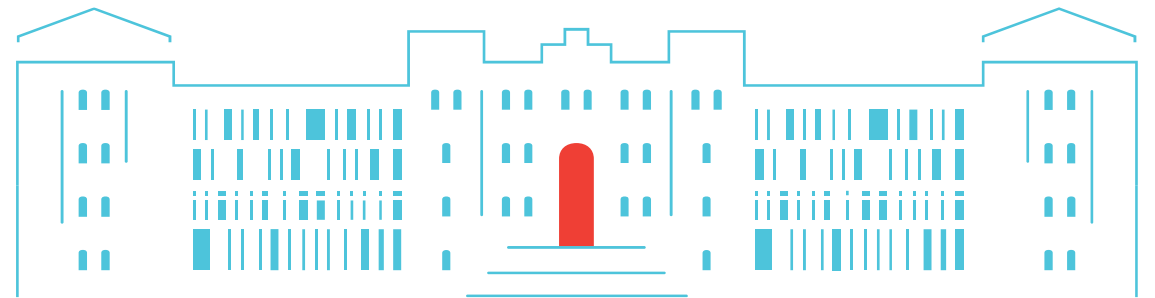
Effiziente Simulation großer Wärmenetze auf dem Weg in die Anwendung



INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMODYNAMICS

TUHH
Hamburg
University of
Technology

22/09/2026



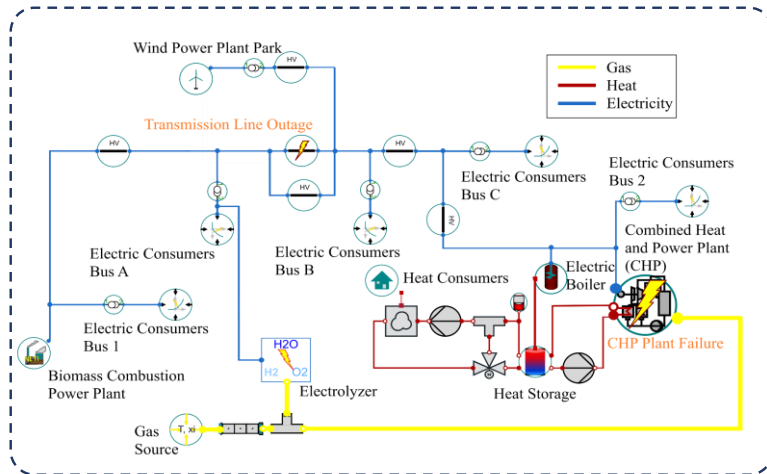
Arne Speerforck, Jan Westphal

Motivation



Bisher:

Verwendung der TransiEnt Library zur Simulation gekoppelter Energiesysteme



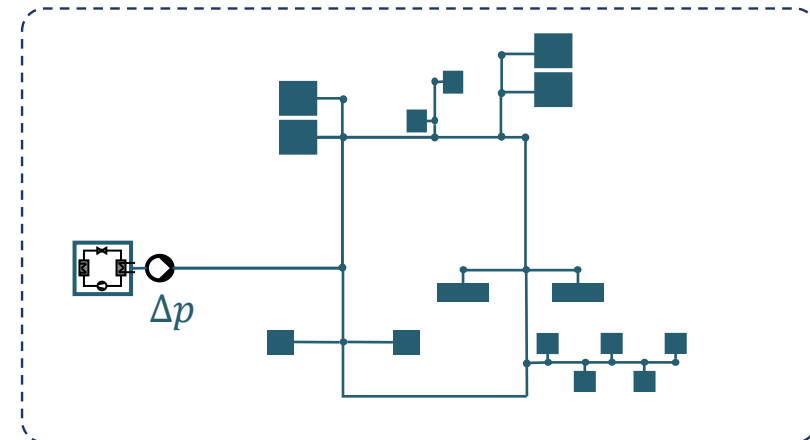
**Modelle auf Github
veröffentlicht**

Jetzt:

1. Dynamische Simulation großer, vermaschter Wärmenetze mit mehreren tausend Wärmeübergabestationen ohne Aggregation
2. Automatische Erstellung von Wärmenetzen und Wärmenetzmodellen



Simulation in OpenModelica und Dymola



Ziel:

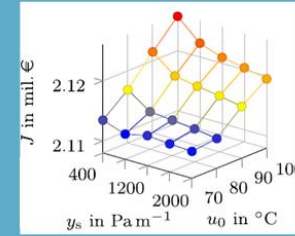
- Untersuchung der thermischen Trägheit im Hinblick auf eine Betriebsoptimierung
 - Speicherdynamik
 - Netzträgheit
- } **Peak-Shaving
Demand-Side-Management**

Existing

Work in progress



Heat Demand
Heat Cadastre
or Hotmaps

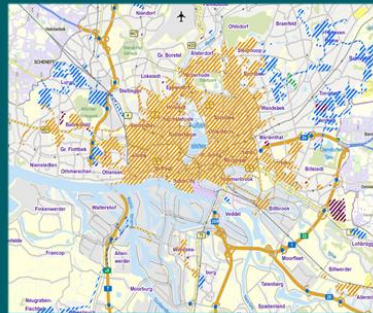


Simulation
(operation,
flexibility,
resilience)

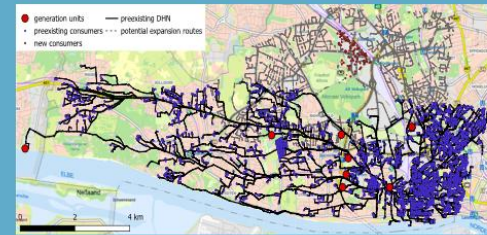


Federal heat
planning

District Heating Potential



Optimal Topology
(economics & emissions: invest &
operation)



Waste Heat Potential

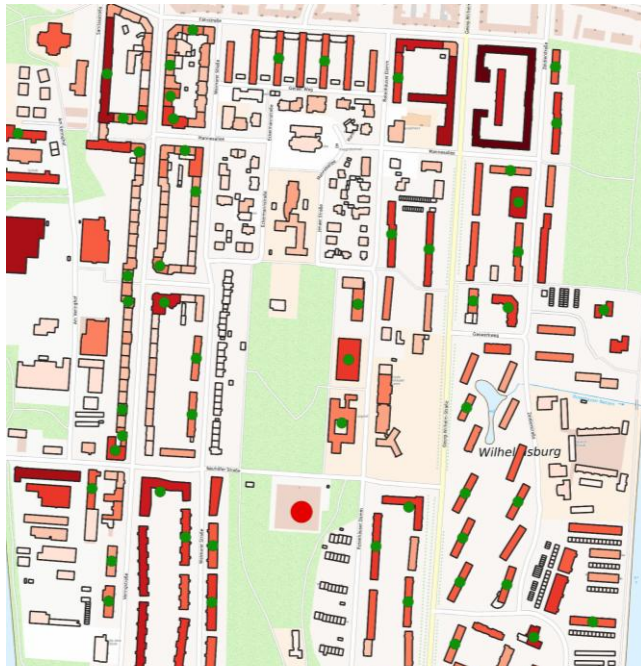


OpenStreetMap

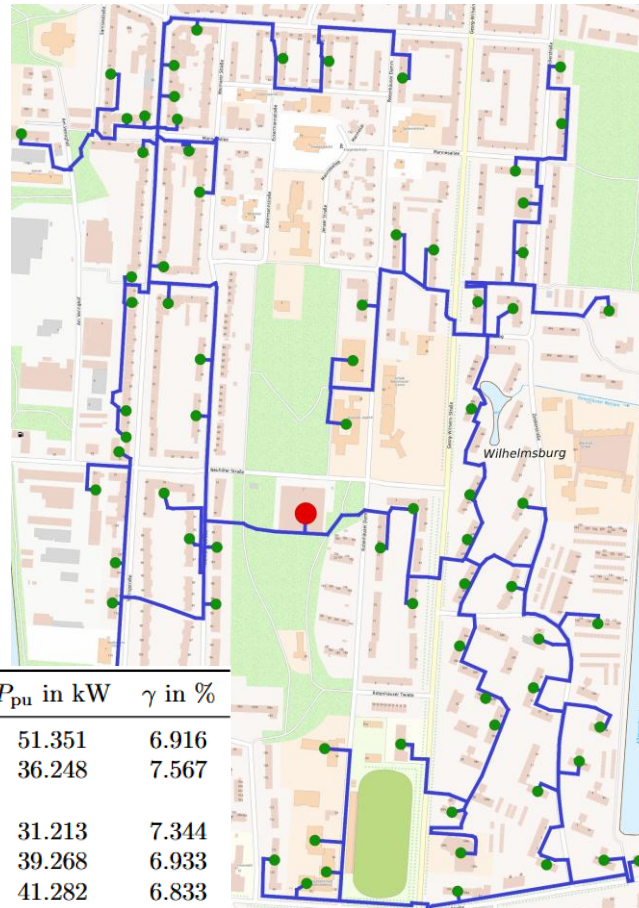
Suche nach der optimalen Topologie



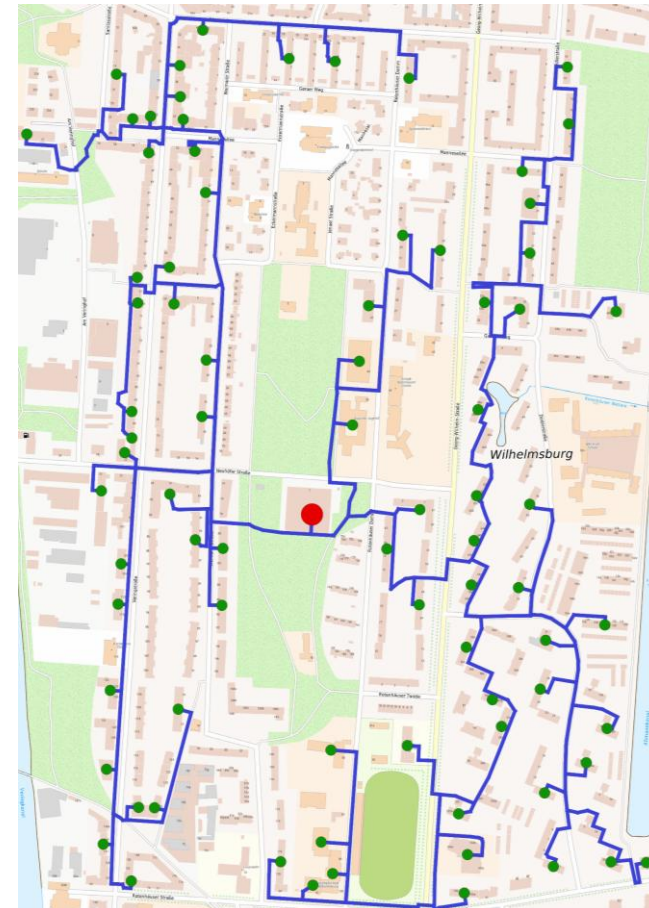
Wärmekataster



Steiner Tree



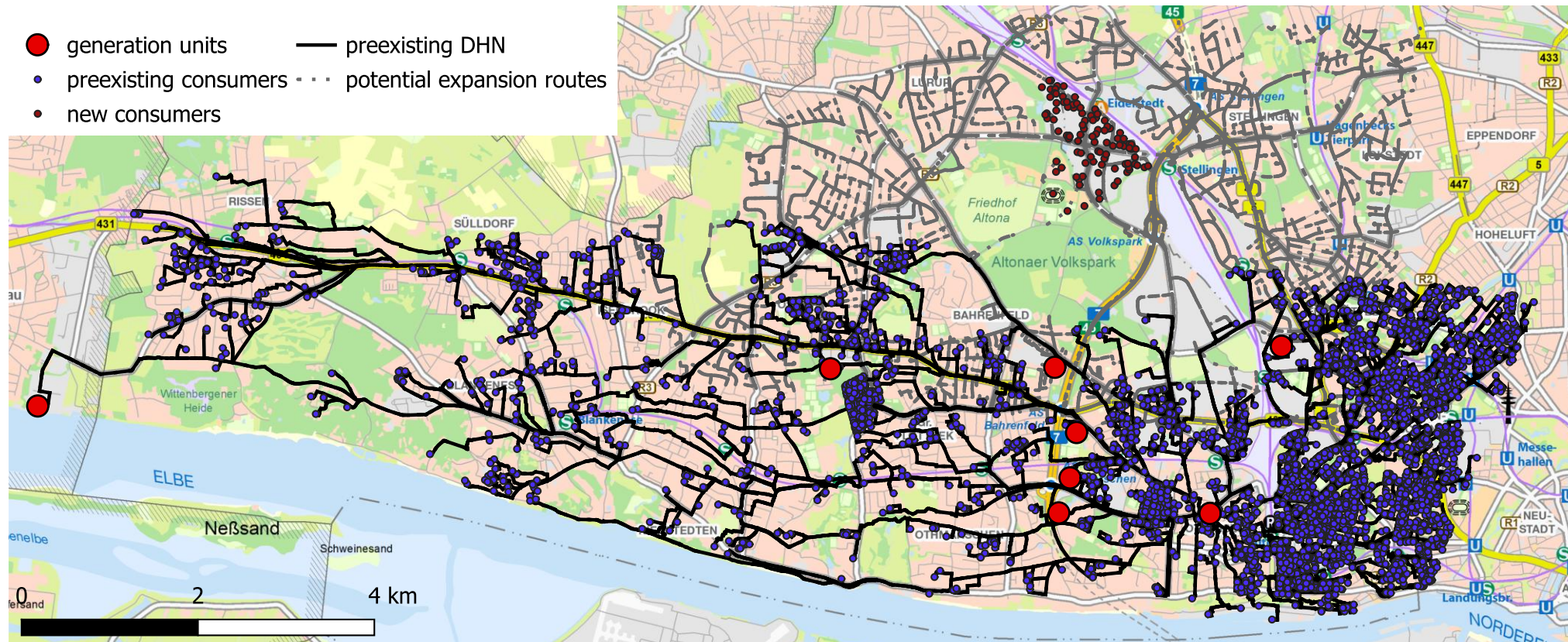
Constrained Steiner Tree



Algorithm	ℓ_{Σ} in km	ℓ_{cc} in km	t_{comp} in s	P_{pu} in kW	γ in %
Kou (<i>networkX</i>)	18.368	1.562	61.752	51.351	6.916
Shortest path	25.395	0.915	0.853	36.248	7.567
Constrained Steiner					
$\beta = 1$	23.081	0.915	108.478	31.213	7.344
$\beta = 1.25$	18.984	1.121	57.7	39.268	6.933
$\beta = 1.5$	17.865	1.315	44.668	41.282	6.833

Vieth et al.: District heating network topology optimization and optimal co-planning using dynamic simulation. Advances in Applied Energy. 2025

Optimale Wärmenetzerweiterungsplanung



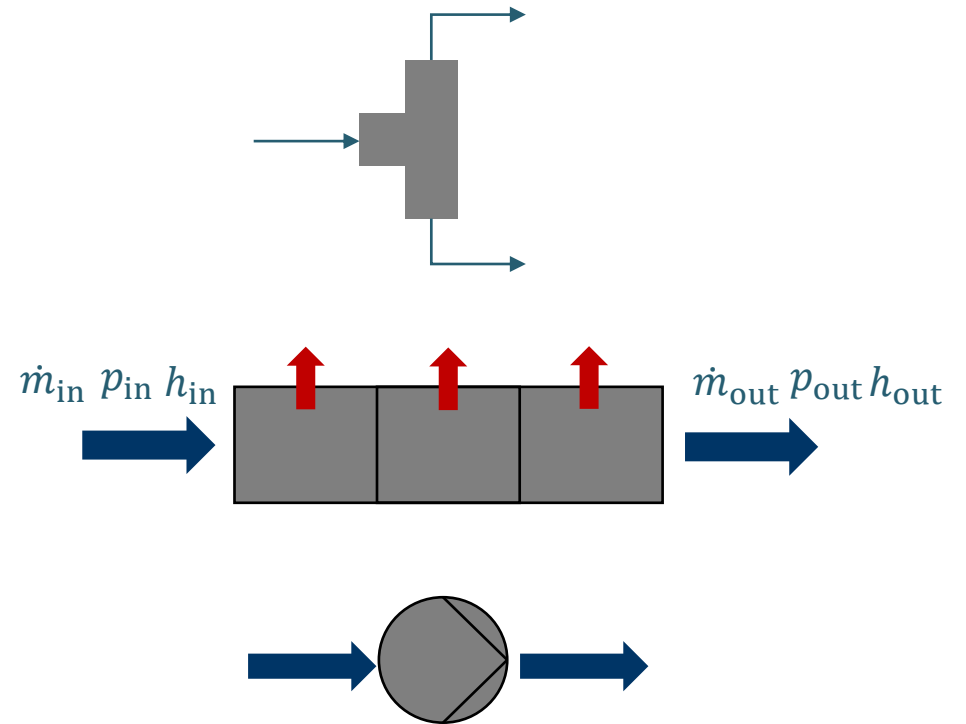


Kernpunkte:

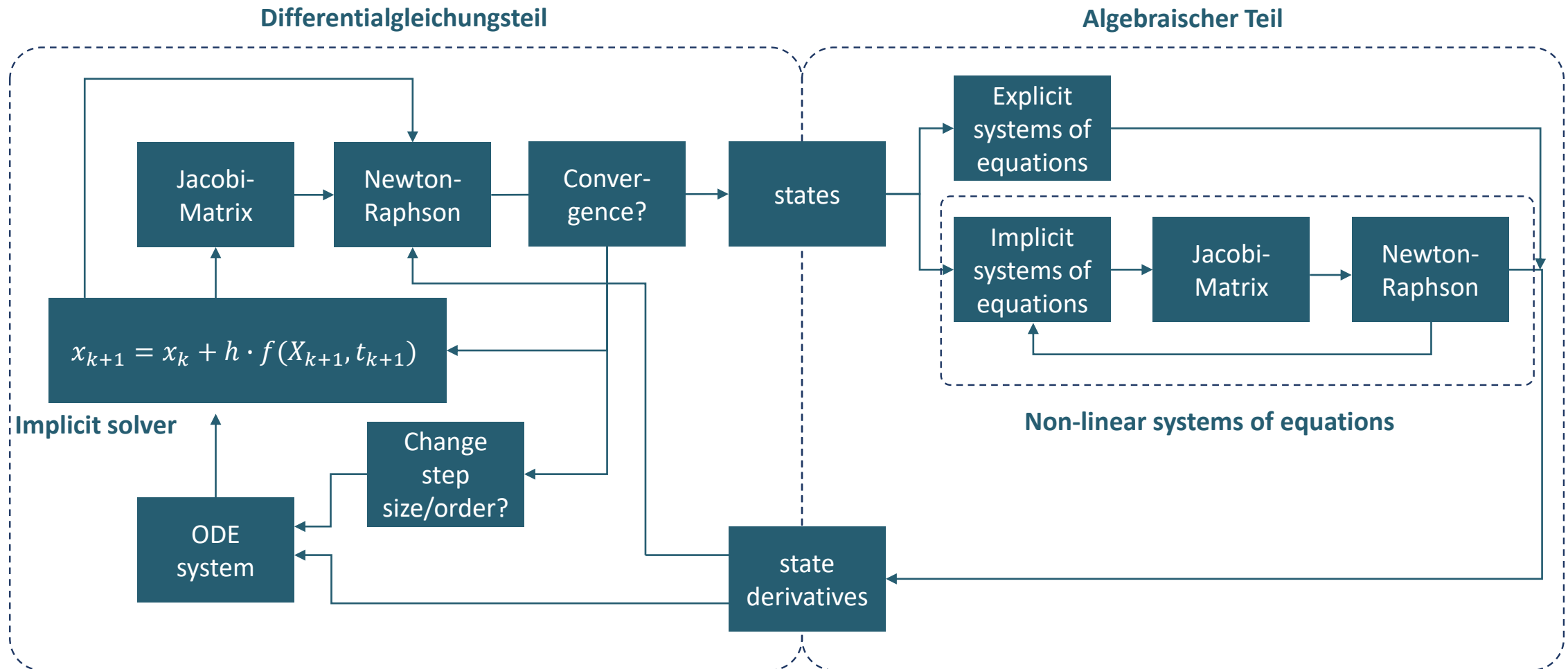
1. Vermeidung von impliziten (nicht-linearen) Gleichungssystemen [1]
2. Keine Verwendung von Fluidmodellen
3. Ausschließliche Diskretisierung der Energiebilanz zur Verwendung eines Sparse-Solvers

Grundlagen des Modellierungskonzepts

- Konstante Fluideigenschaften
- Verbindungselemente (h , m_{flow} , p)
- Instationäre Energiebilanz in Rohr- und Junction-Modellen
- Stationäre Impuls- und Massenbilanz + lineares Druckverlustmodell Ausgenommen: Rohrmodell $\rightarrow$ physikalisches Druckverlustmodell (Fluid dissipation) & Verwendung einer instationären Impulsbilanz

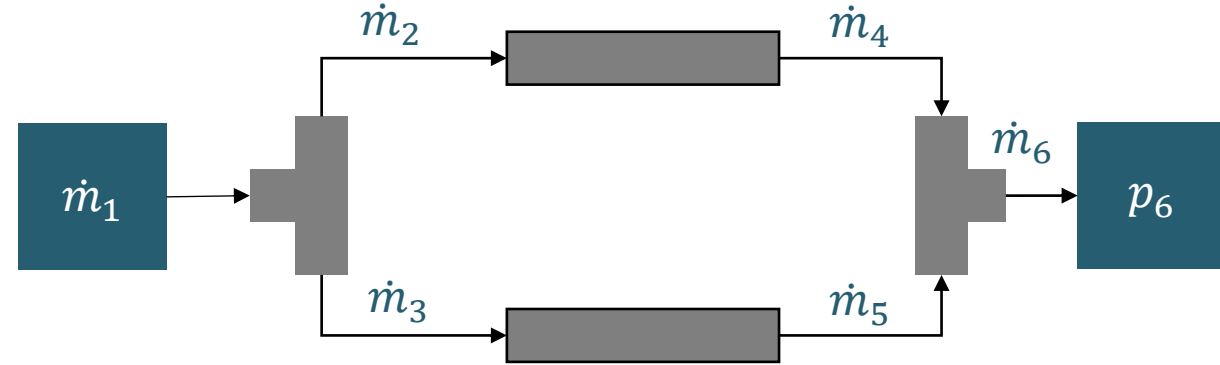


Lösungsprozess eines Modelica-Modells



Strukturgraph des Modells:

I.	$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = 0$		$\dot{m}_2$
II.	$p_1 - p_2 = \dot{m}_2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}}$		$\dot{m}_3$
III.	$p_1 - p_3 = \dot{m}_3 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}}$		$\dot{m}_4$
IV.	$\dot{m}_2 + \dot{m}_4 = 0$		$\dot{m}_5$
V.	$p_2 - p_4 = \dot{m}_2^2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}^2}$		$\dot{m}_6$
VI.	$\dot{m}_3 + \dot{m}_5 = 0$		p_1
VII.	$p_3 - p_5 = \dot{m}_3^2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}^2}$		p_2
VIII.	$\dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_6 = 0$		p_3
IX.	$p_4 - p_6 = \dot{m}_4 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}}$		p_4
X.	$p_5 - p_6 = \dot{m}_5 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}}$		p_5



Screenshot der Statistics:

Sizes of linear systems of equations: { }
 Sizes after manipulation of the linear systems: { }
 Sizes of nonlinear systems of equations: {7}
 Sizes after manipulation of the nonlinear systems: {1}
 Number of numerical Jacobians: 0

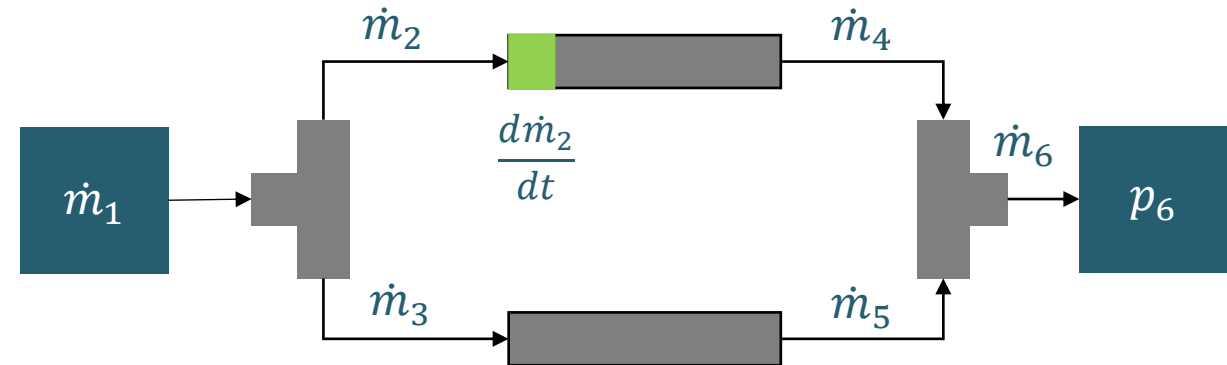
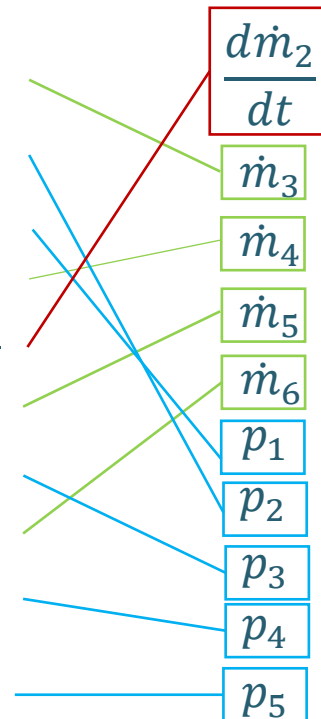


10 Gleichungen & 10 Unbekannten,
 Aber: **Implizites Gleichungssystem**

Lösung: Hinzufügen eines Massenstromzustands

Strukturgraph des Modells:

- I. $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = 0$
- II. $p_1 - p_2 = \dot{m}_2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}}$
- III. $p_1 - p_3 = \dot{m}_3 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}}$
- IV. $\dot{m}_2 + \dot{m}_4 = 0$
- V. $p_2 - p_4 = \frac{d\dot{m}_2}{dt} \cdot L + \dot{m}_2^2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}^2}$
- VI. $\dot{m}_3 + \dot{m}_5 = 0$
- VII. $p_3 - p_5 = \dot{m}_3^2 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}^2}$
- VIII. $\dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_6 = 0$
- IX. $p_4 - p_6 = \dot{m}_4 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}}$
- X. $p_5 - p_6 = \dot{m}_5 \cdot \frac{\Delta p_{\text{nom}}}{\dot{m}_{\text{nom}}}$



Screenshot der Statistics:

Sizes of linear systems of equations: { }
 Sizes after manipulation of the linear systems: { }
 Sizes of nonlinear systems of equations: { }
 Sizes after manipulation of the nonlinear systems: { }
 Number of numerical Jacobians: 0

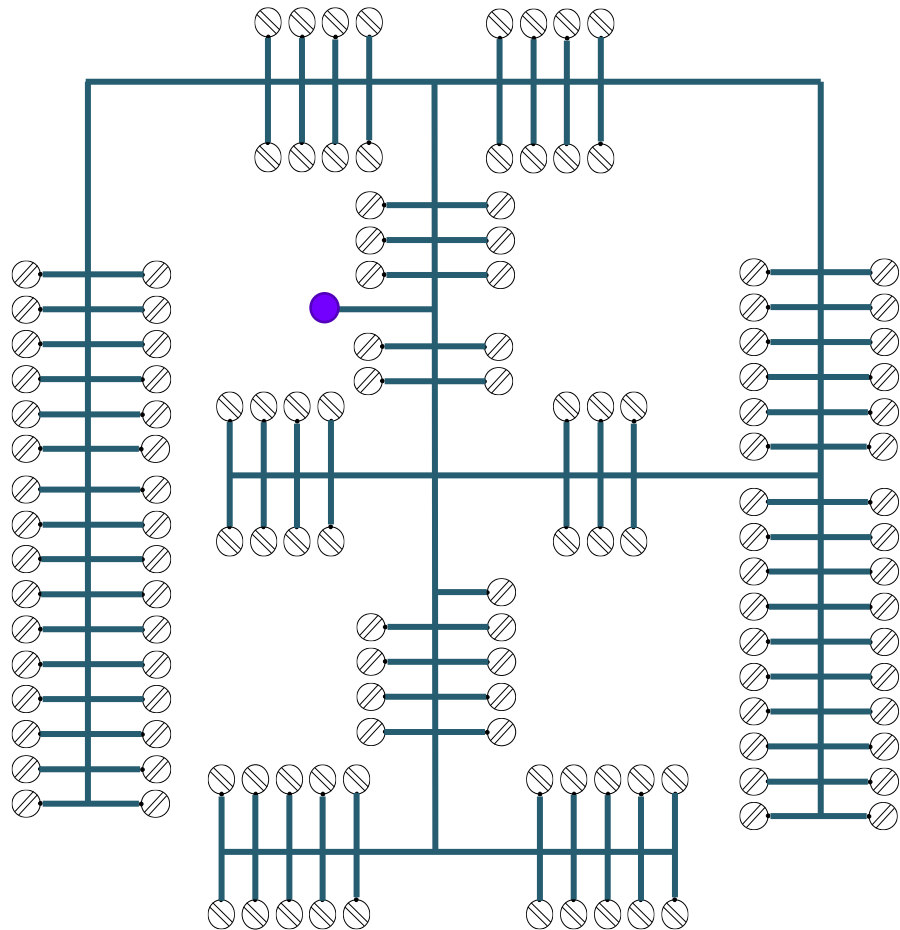


Gleichungssystem kann explizit gelöst werden

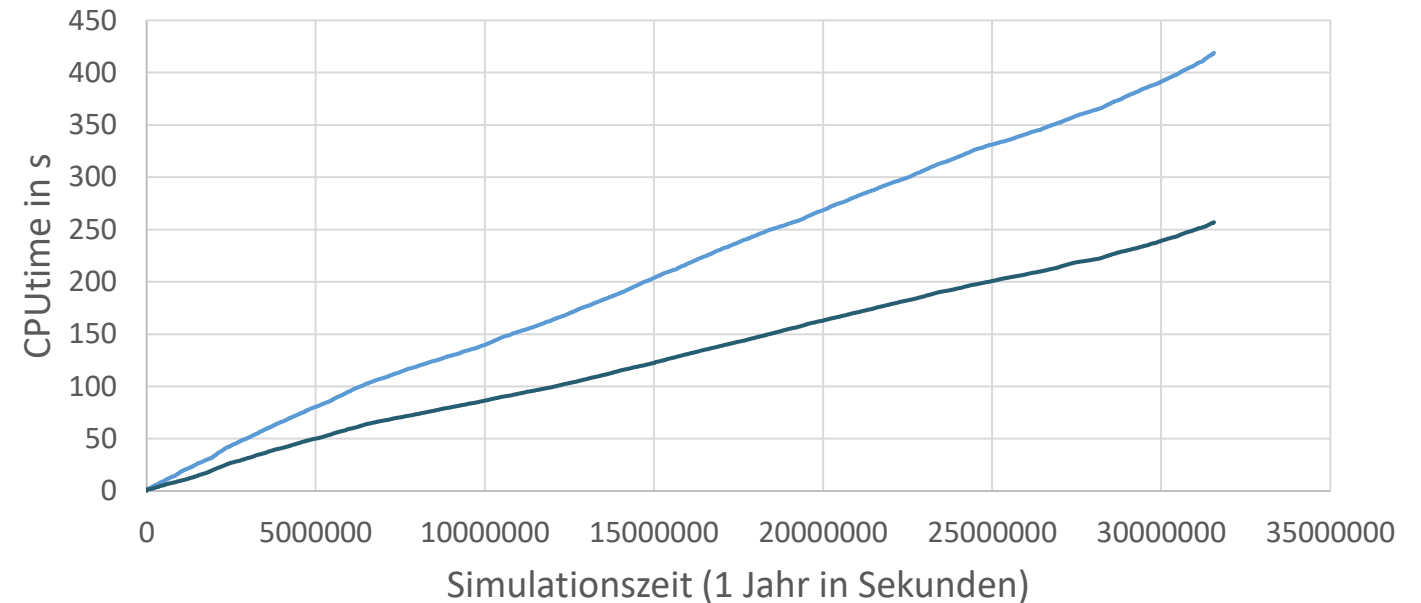
Vergleich der Simulationszeit mit und ohne Massenstromzustände



Beispieltopologie eines vermaschten Wärmenetzes



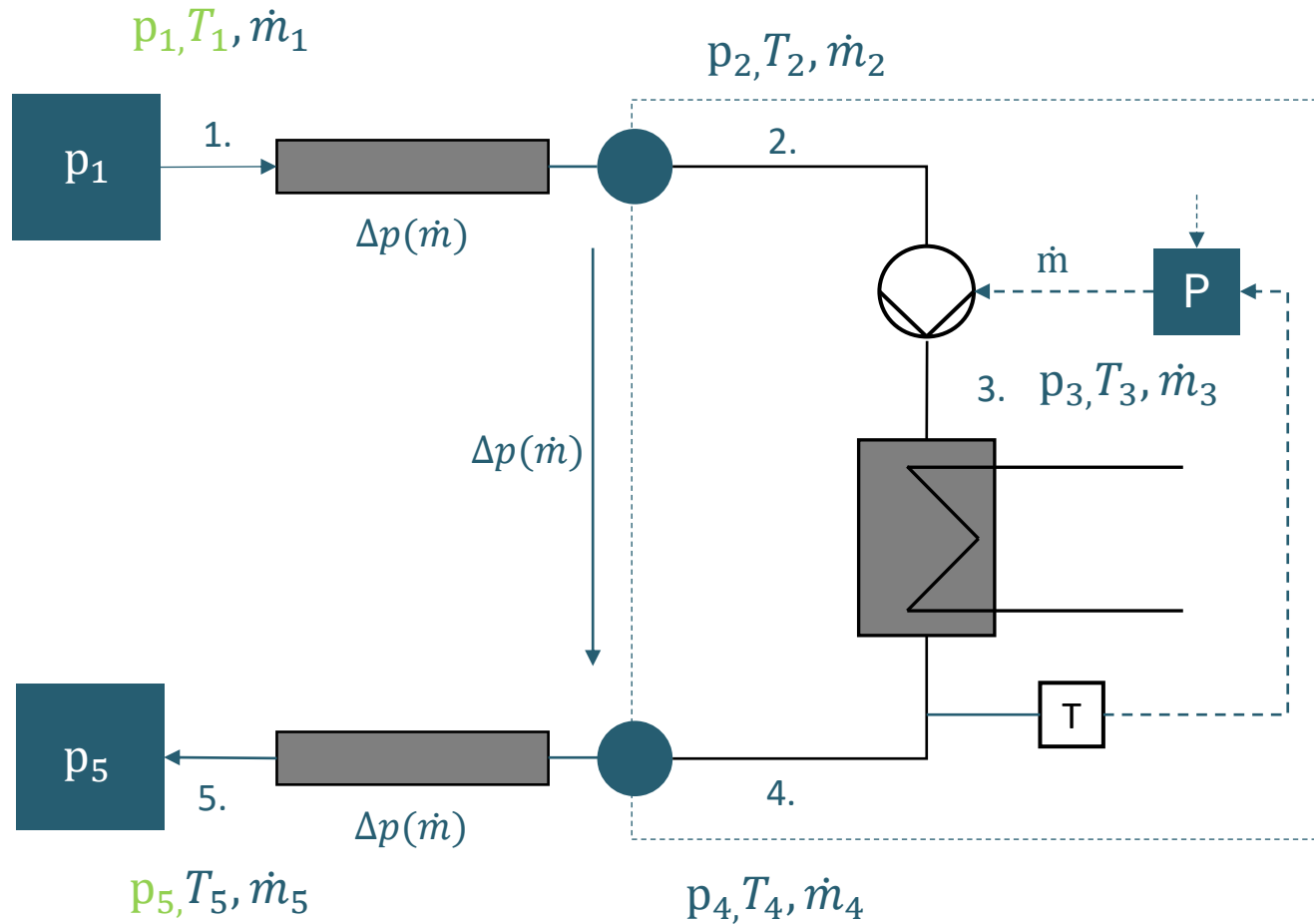
Rechenzeitvergleich mit und ohne Massenstromzustände



Bei Verwendung von Massenstromzuständen sinkt die Rechenzeit um 38,6 %. (Löser: Dassi)

Achtung: Der eingefügte Zustand darf die Schrittweite nicht maßgeblich beschränken.

Modellierung der Wärmeübergabestationen



Gleichungssystem:

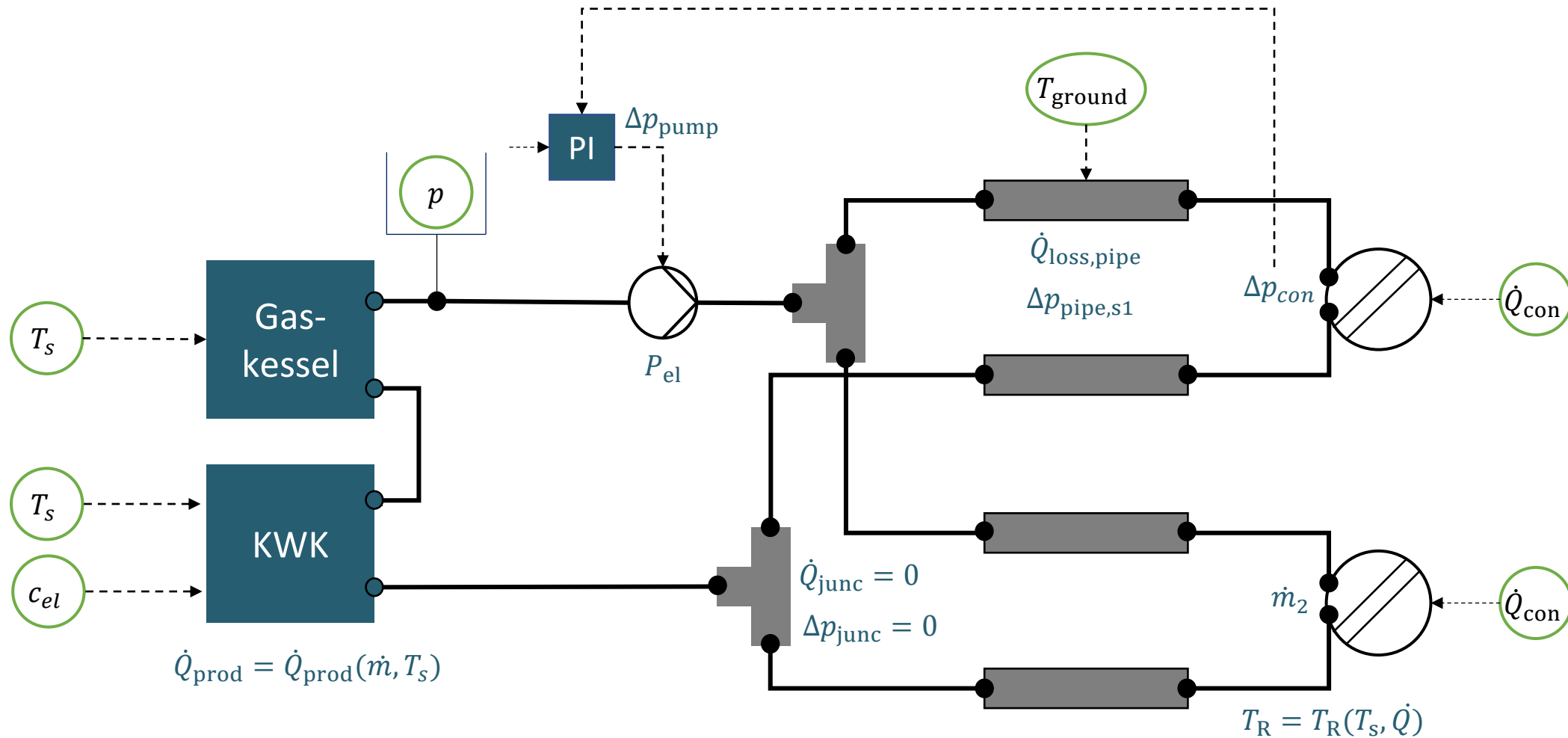
- I. $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 0$
- II. $T_1 = T_2$
- III. $p_1 - p_2 = \Delta p(\dot{m}_1^2)$
- IV. $T_2 = T_3$
- V. $\dot{m}_2 = K_p \cdot (T_4 - T_{4,set})$
- VI. $T_{4,set} = a \cdot T_1 + b$
- VII. $\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = 0$
- VIII. $p_3 = p_4$
- IX. $\dot{m}_3 + \dot{m}_4 = 0$
- X. $\dot{m}_4 + \dot{m}_5 = 0$
- XI. $V \cdot \rho \cdot c_f \cdot \frac{dT_4}{dt} = \dot{m}_3 \cdot (T_3 - T_4) - \dot{Q}_{dem}$
- XII. $p_5 - p_4 = \Delta p(\dot{m}_4^2)$
- XIII. $T_4 = T_5$

Unbekannte

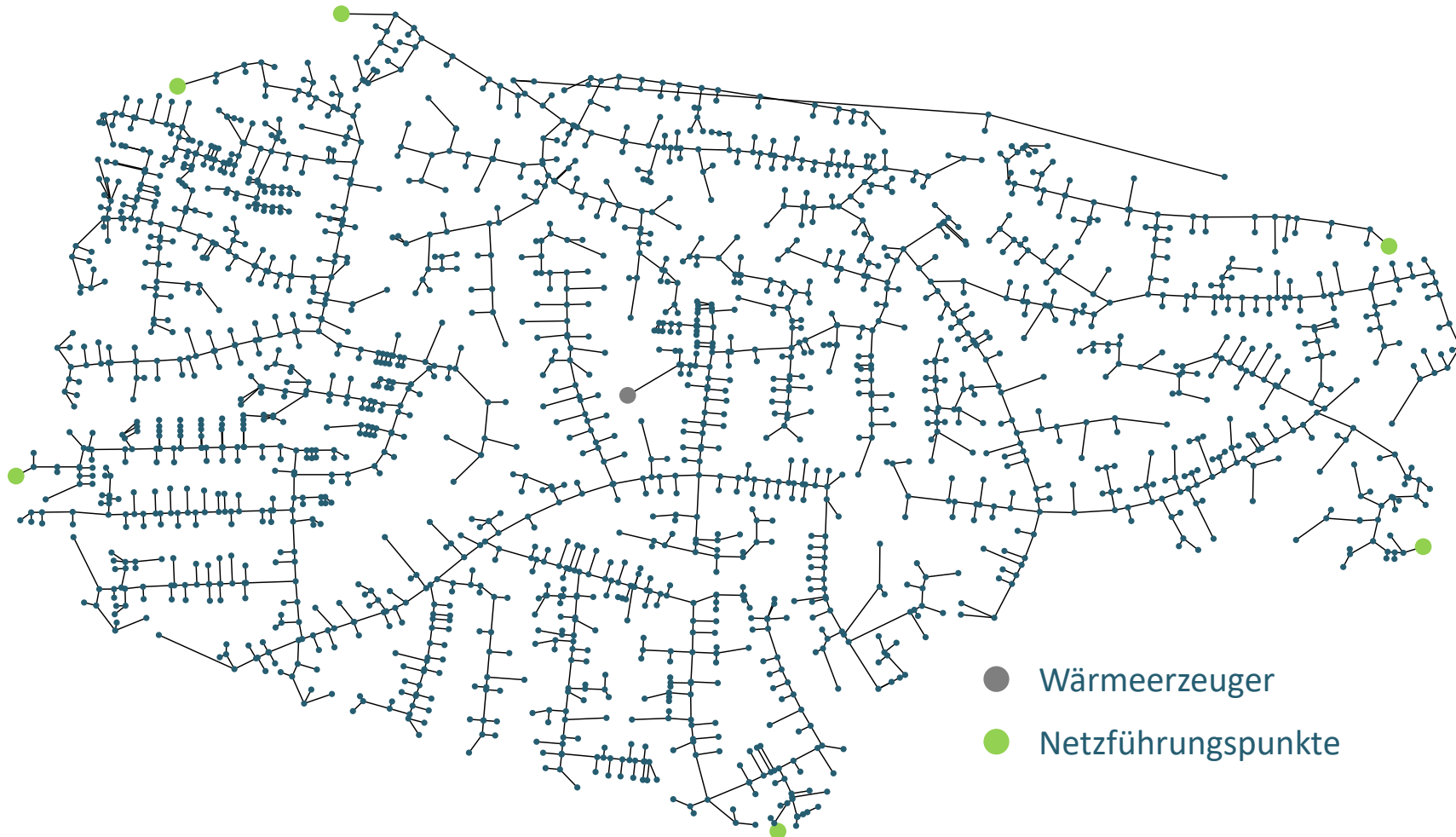
~~$\dot{m}_1$~~	2.
$\dot{m}_2$	1.
~~T_2~~	1.
~~p_2~~	3.
~~T_3~~	2.
p_3	5.
~~$\dot{m}_3$~~	2.
~~p_4~~	4.
~~$\dot{m}_4$~~	3.
~~$T_{4,set}$~~	1.
~~$\dot{m}_5$~~	4.
~~T_5~~	1.
~~$\frac{dT_4}{dt}$~~	3.

Der Massenstrom hängt ausschließlich von den thermischen Variablen ab.

Das Gleichungssystem lässt sich explizit lösen.



Generiertes Wärmenetz für einen Hamburger Vorort



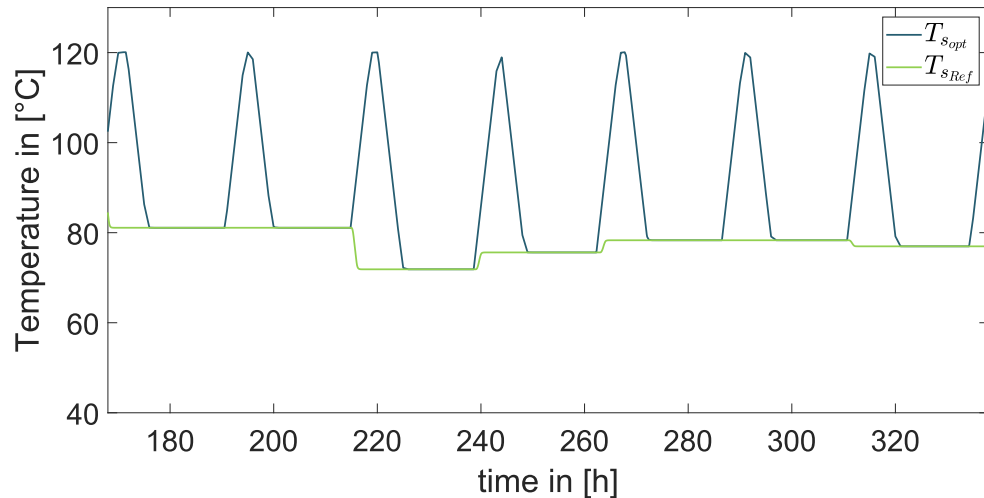
Wärmenetzgenerierung:

- Generiertes Wärmenetz auf Basis des Straßennetzes und des Wärmekatasters
- Erstellt für einen Vorort von Hamburg

Wärmenetzdaten:

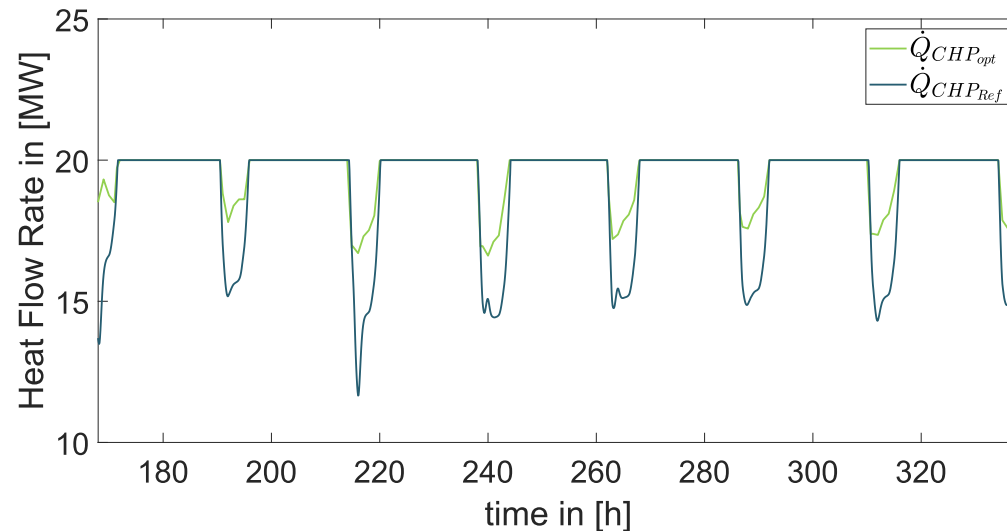
- Wärmenetzlänge: 96,298 km
- Max. Wärmelast: 34,14 MW
- Simulationszeit (1 Jahr): **≈ 4 Stunden**
- Anzahl der Verbraucher: **1050**
- Nicht-triviale Gleichungen: 189 193

Vorlauftemperatur und Wärmeerzeugung der KWK-Anlage

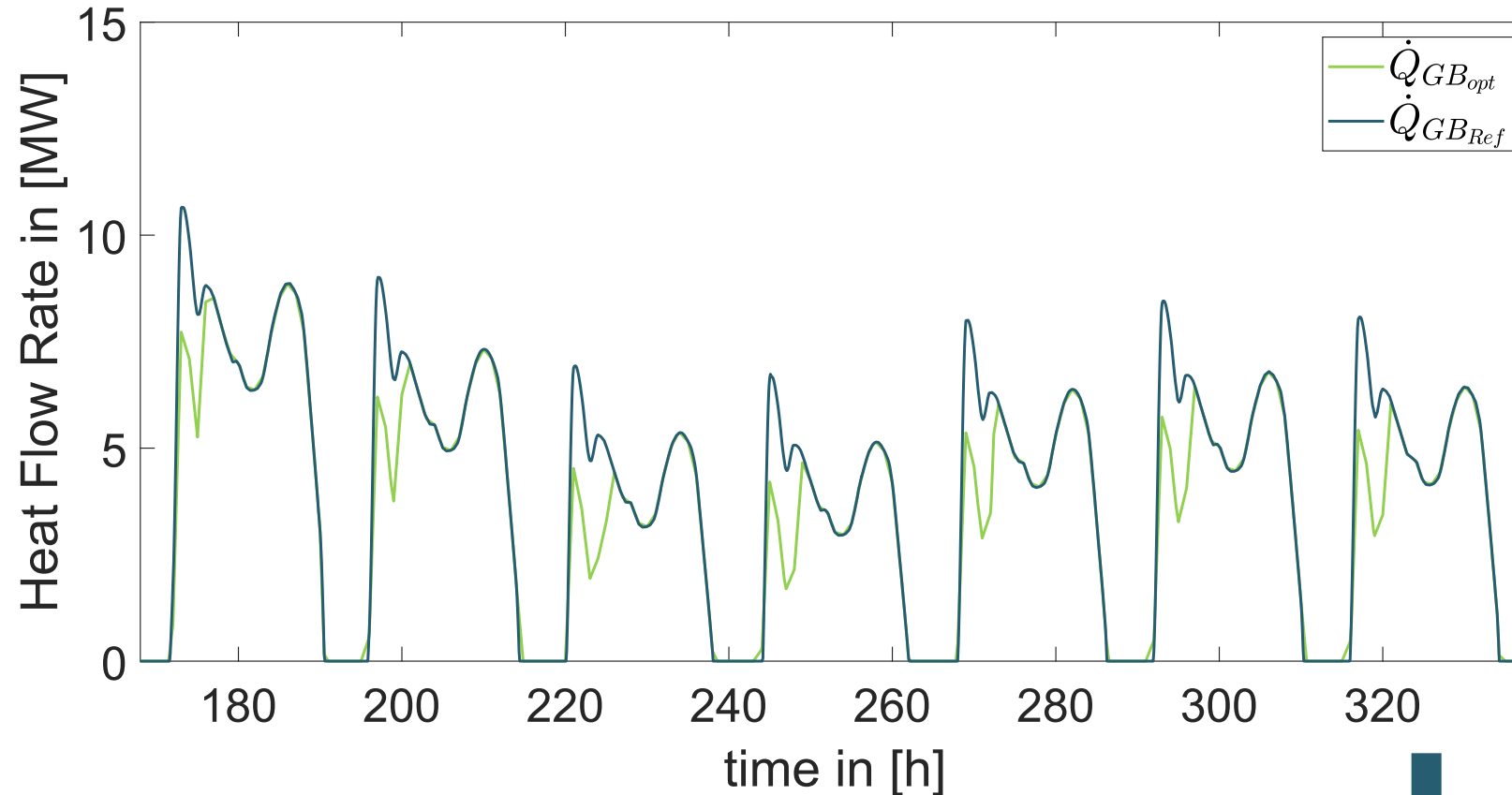


- Vorlauftemperatur für zwei Szenarien (Ref und opt)
- Erhöhung der Vorlauftemperatur zur vorübergehenden Speicherung von Energie im Fernwärmenetz

Aber: Eine höhere Vorlauftemperatur führt zu höheren Wärmeverlusten



- Wärmeerzeugung der KWK-Anlage für zwei Szenarien
- Erhöhte Wärmeerzeugung der KWK-Anlage im optimierten Szenario im Gegenzug für eine geringere Spitzenwärmeerzeugung



- Wärmeleistung des Gaskessels (Spitzenleistung) für zwei Szenarien
- Nutzung des Wärmenetzes als Kurzzeitspeicher
- Optimierung der Vorlauftemperatur zur Reduzierung der Spitzenleistung des Gaskessels zugunsten einer höheren Wärmeproduktion der KWK-Anlage



Reduktion der Spitzenlasterzeugung um 9,5 %

Zusammenfassung und Ausblick



- Modellierungskonzept für die Simulation eines unaggregierten Wärmenetzes mit **1050** Wärmeübergabestationen
- Durch Verwendung von Massenstromzuständen kann die Simulationszeit um ungefähr **38 %** reduziert werden
- Automatische Generierung und Parametrisierung von Wärmenetztopologien und Simulationsmodellen
- Die Optimierung der Vorlauftemperatur ermöglicht eine Lastverschiebung zur Reduzierung der kostspieligen Spitzenwärmeerzeugung
- Reduktion der Spitzenerzeugung um **9,5 %** für das untersuchte Wärmenetz



Ende



TUHH
Hamburg
University of
Technology

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

tuhh.de/itt

