

QUASI-DYNAMISCHE LASTFLUSSRECHNUNG VON WÄRMENETZEN

17. Symposium Energieinnovation 2022

Josef Steinegger

Agenda

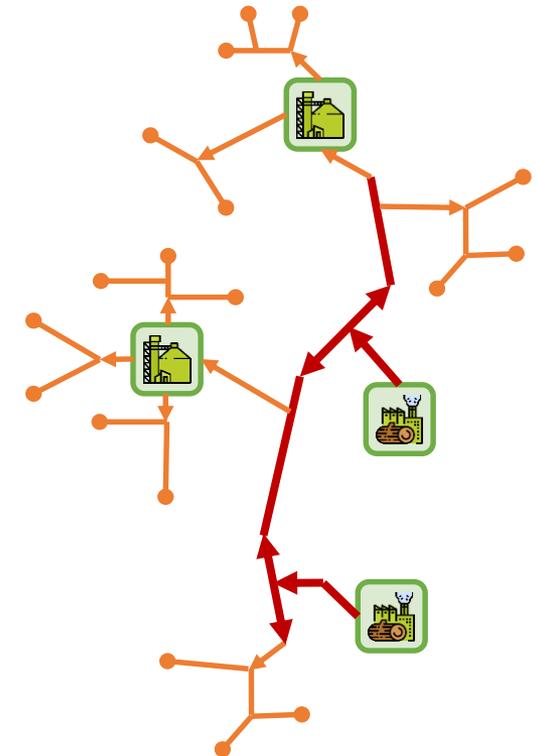
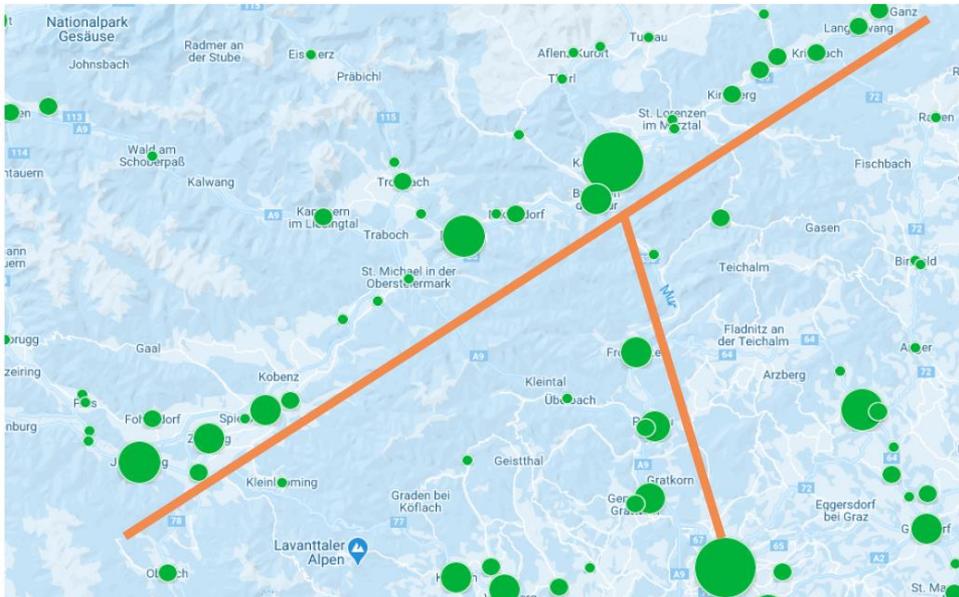
QUASI-DYNAMISCHE LASTFLUSSRECHNUNG VON WÄRMENETZEN

- Motivation
- Ziel-Lastflussrechnung (LFR)
- Überblick Lastflussrechnungsarten
- Beispiel Wärmenetz
- Lastflussrechnung
- Diskussion
- Zusammenfassung

Motivation

Heat-Highway (NEFI)

- Nutzung von industrieller Abwärme
- Überregionales Wärmenetz (Mur-Mürz-Tal-Graz)
- Techno ökonomische Analyse
- Wärmelastflussrechnung
- Aufzeigen und bewerten potenzieller Geschäftsmodelle



- Übertragungsleitung
- Wärmeleitung
- Wärmesenke
-  Dezentrale Wärmequelle
-  Zentrale Wärmequelle

Ziel-Lastflussrechnung in Wärmenetzen

- Lastflussrechnung für Vor- und Rücklauf
- Integration folgender Komponenten
 - Klassische Versorger & Verbraucher
 - Wärmepumpen
 - Druckpumpen & Drosseln
 - Wärmespeicher
 - Verzweigungsknoten
- Ergebnisse
 - Genau
 - Berücksichtigung von Temperatur- & Leistungsänderungen über die Zeit
- Rasche Berechnungszeiten

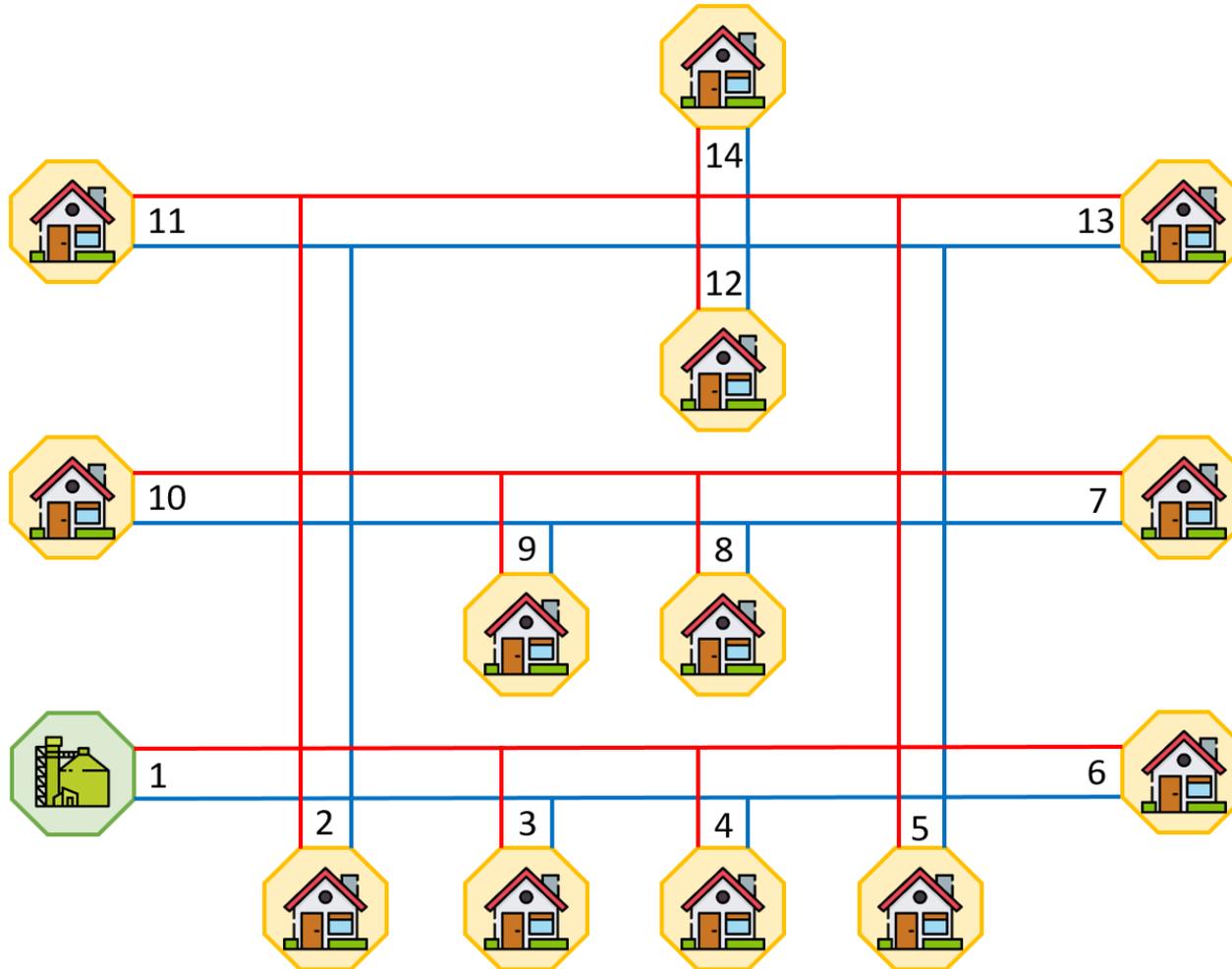
Überblick Lastflussrechnungsarten

in Wärmenetzen

	Steady-State	Quasi-dynamisch	Dynamische
LFR für Vor- und Rücklauf	✓	✓	✓
Integration aller Komponenten	✓	✓	✓
Genaue Ergebnisse	✓	✓	✓
Berücksichtigung von Temperatur- & Leistungsänderungen über die Zeit	✗	✓	✓
Rasche Berechnungszeiten	✓	✓	✗

Wärmenetz

Beispiel



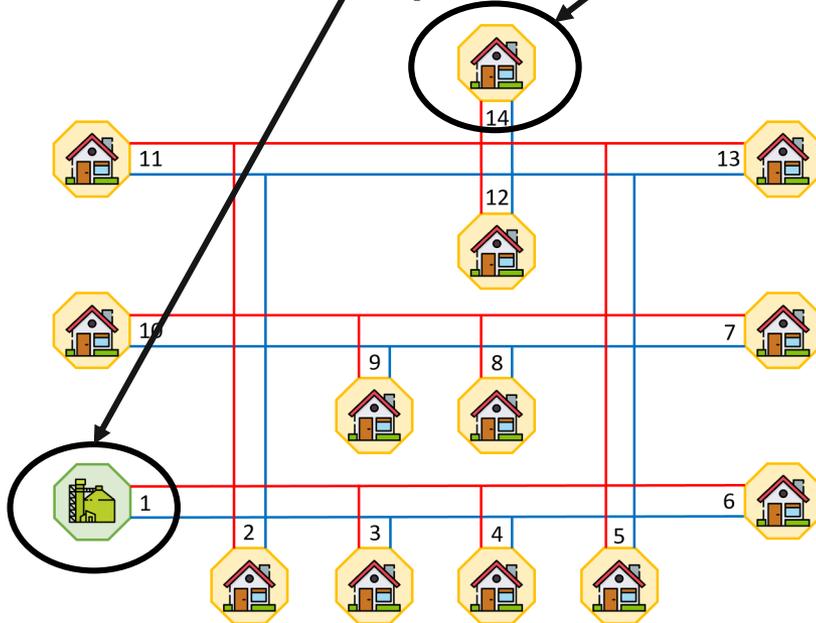
- Vorlauf
- Rücklauf
-  Verbraucher-Knoten
-  Erzeuger-Knoten

Lastflussrechnung

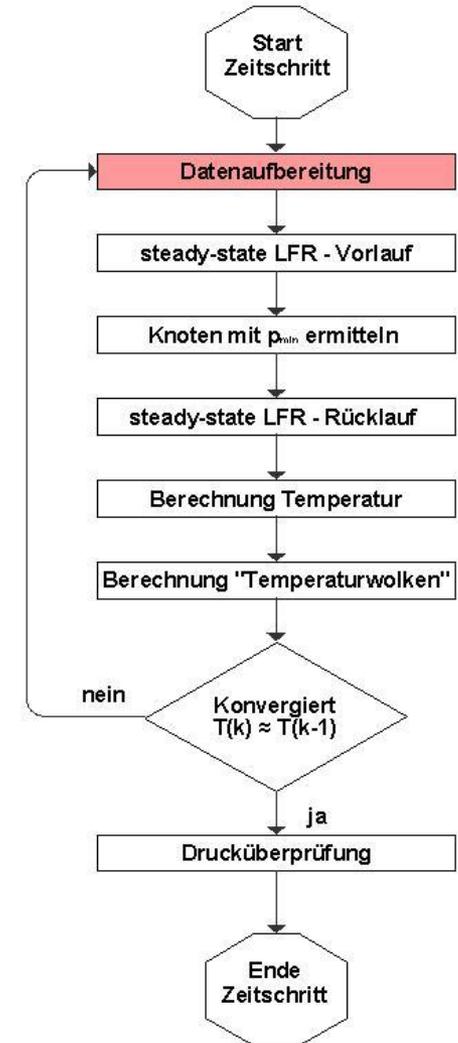
Datenaufbereitung

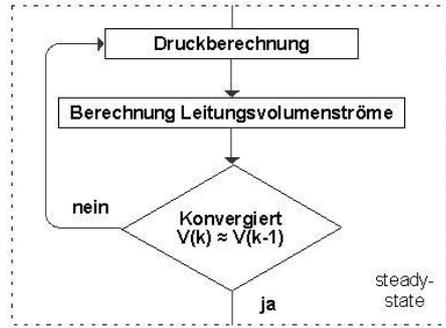
- Druck am „Slack-Knoten“
- Volumenströme an den restlichen Knoten → Berechnung aus den Leistungsdaten

$$\dot{V}_{Knoten} = \frac{P}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}$$



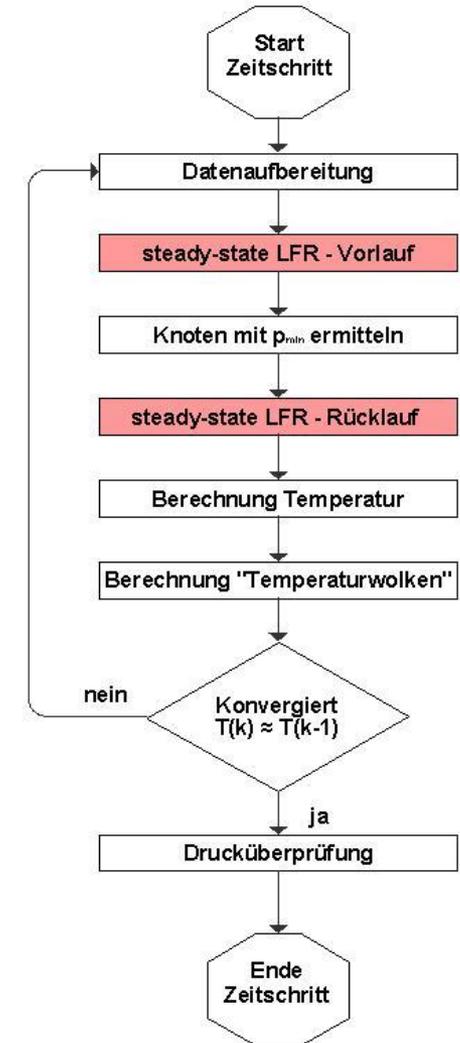
designed by Freepik from Flaticon





Lastflussrechnung

Steady-state



- Druckberechnung: Darcy-Gleichung → Linearisierung mithilfe des Newton-Raphson Verfahren

$$\Delta p_{(k)} = R \cdot \dot{V}_{(k-1)} = \frac{8 \cdot \rho \cdot \lambda_{(k-1)}}{\pi^2} \cdot \frac{l}{d^5} \cdot \dot{V}_{(k)} \cdot \dot{V}_{(k-1)}$$

- Berechnung des Volumenstroms in den Leitungen mithilfe des Druckunterschieds zwischen zwei Knoten

$$\dot{V}_{ij,(k)} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8 \cdot \lambda_{ij,(k-1)} \cdot \rho} \cdot \frac{d^5}{l} \cdot \Delta p_{ij,(k)}}$$

- Die Berechnung erfolgt über eine angepasste Form, vom Knotenpotentialverfahren im elektrischen Netz, an das Wärmenetz

$$\bar{p}_{i0,(k)} = \bar{G}_{(k-1)}^{-1} \cdot \bar{V}_{input}$$

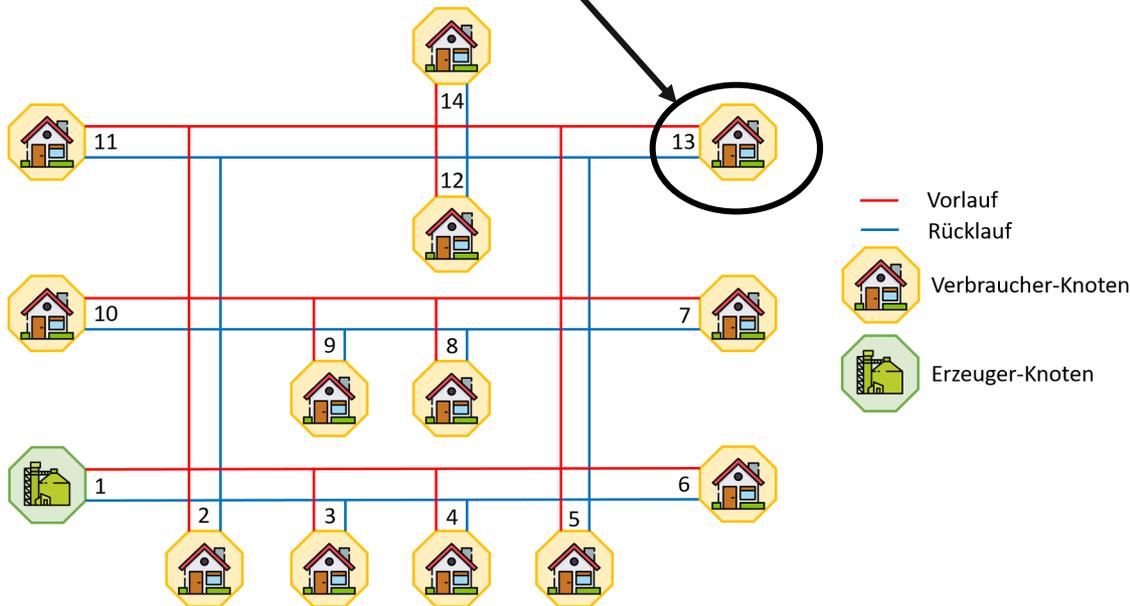
↙ Widerstandsmatrix

Lastflussrechnung

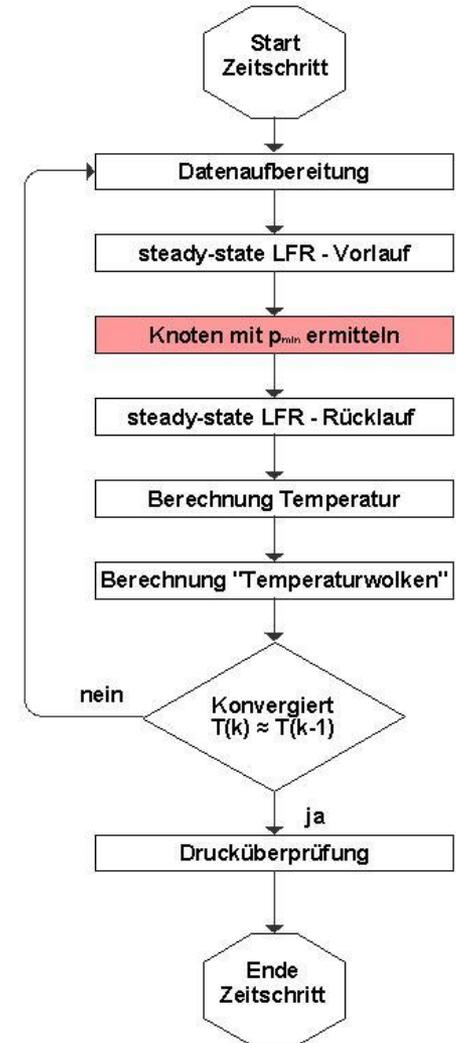
Knoten mit minimalen Druck bestimmen

- Knoten mit geringstem Druck im Vorlauf dient als „Slack-Knoten“ im Rücklauf → Bestimmt den Systemdruck

$$p_{System,RL} = p_{min,VL} - \Delta p_{Wärmetauscher}$$



designed by Freepik from Flaticon



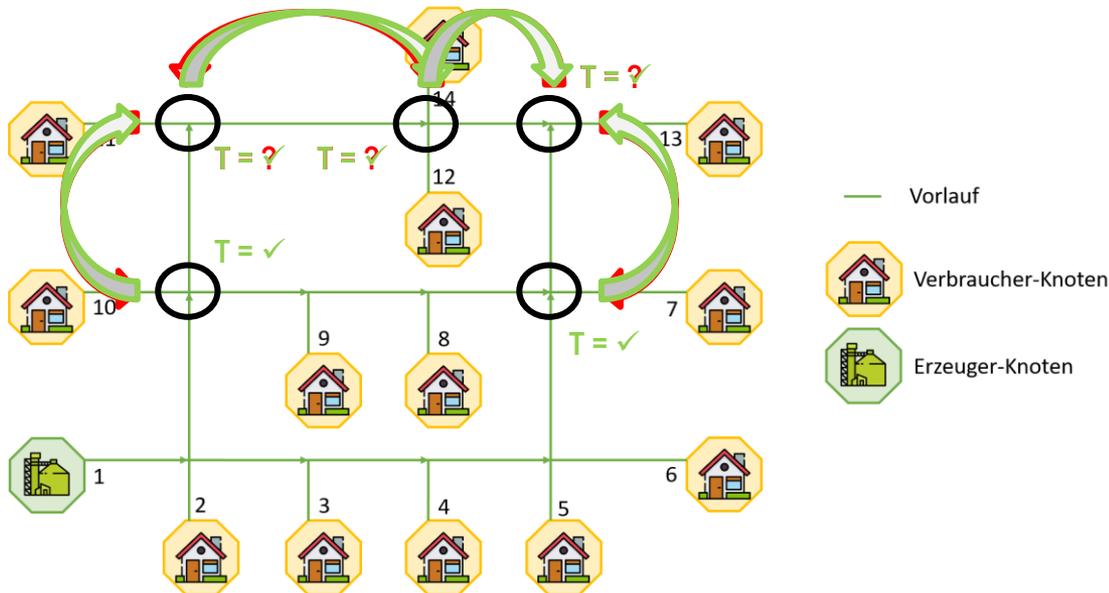
Lastflussrechnung

Berechnung Temperatur

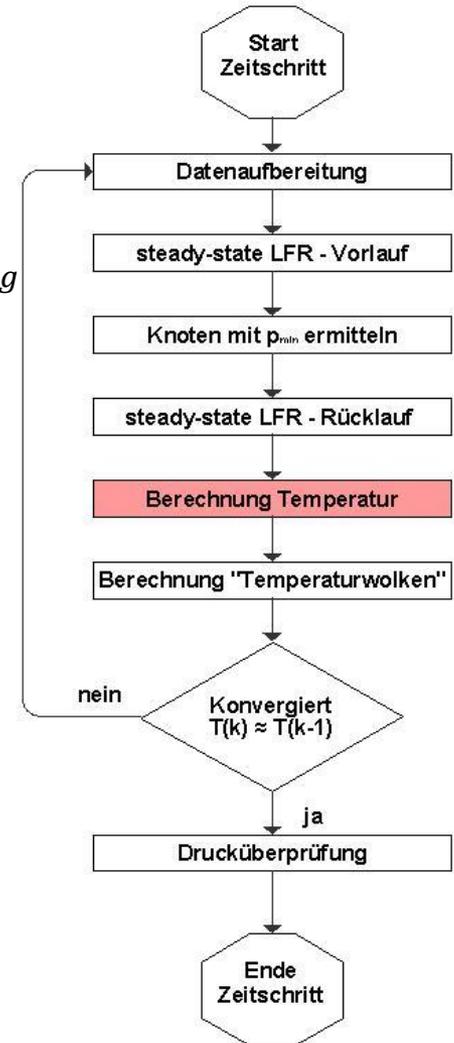
- Berechnung der Knotentemperaturen im Vorlauf und Rücklauf

$$T_{EndKnoten} = (T_{StartKnoten} - T_{Umgebung}) * e^{\frac{-2 * \pi * k * l}{c_p * \rho * \dot{V}}} + T_{Umgebung}$$

- Erfolgt über Rekursion



designed by Freepik from Flaticon

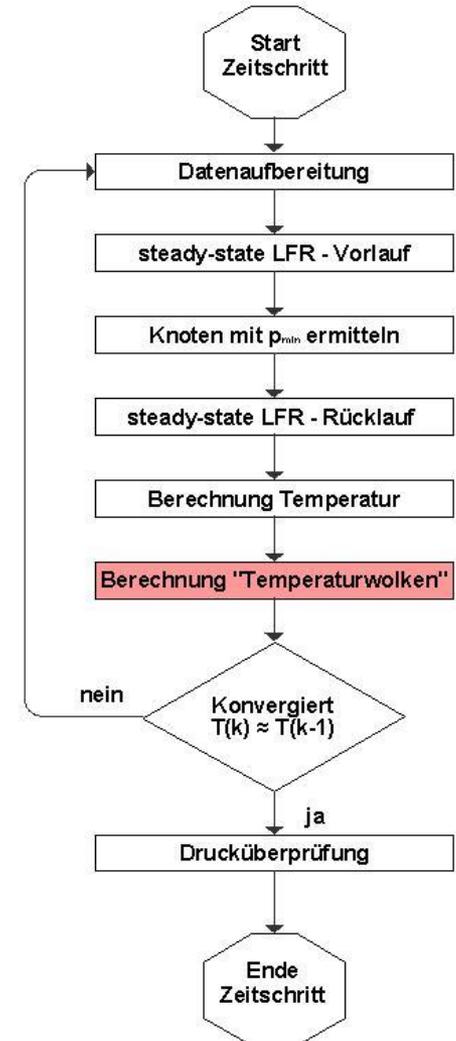
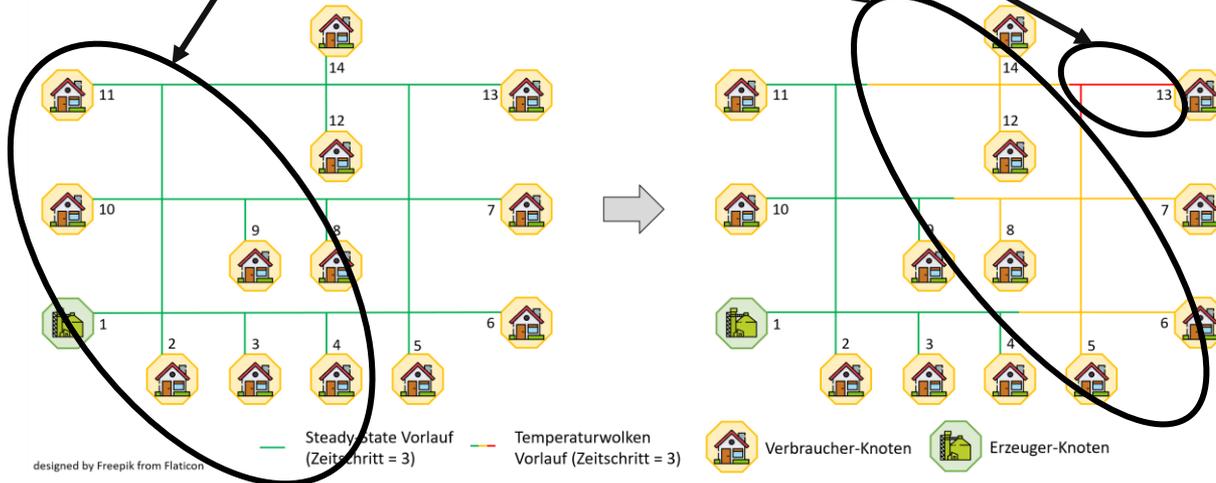


Lastflussrechnung

Berechnung der Temperaturwolken

- Bildung der neuen „Temperaturwolken“ auf Basis der steady-state LFR
- „Temperaturwolken“ aus vorhergehenden Zeitschritten weiterschieben
- Berechnung der durchschnittlichen Knotentemperaturen aus den unterschiedlichen „Temperaturwolken“ = Neue Temperaturen für die Volumenstromberechnung in der Datenaufbereitung

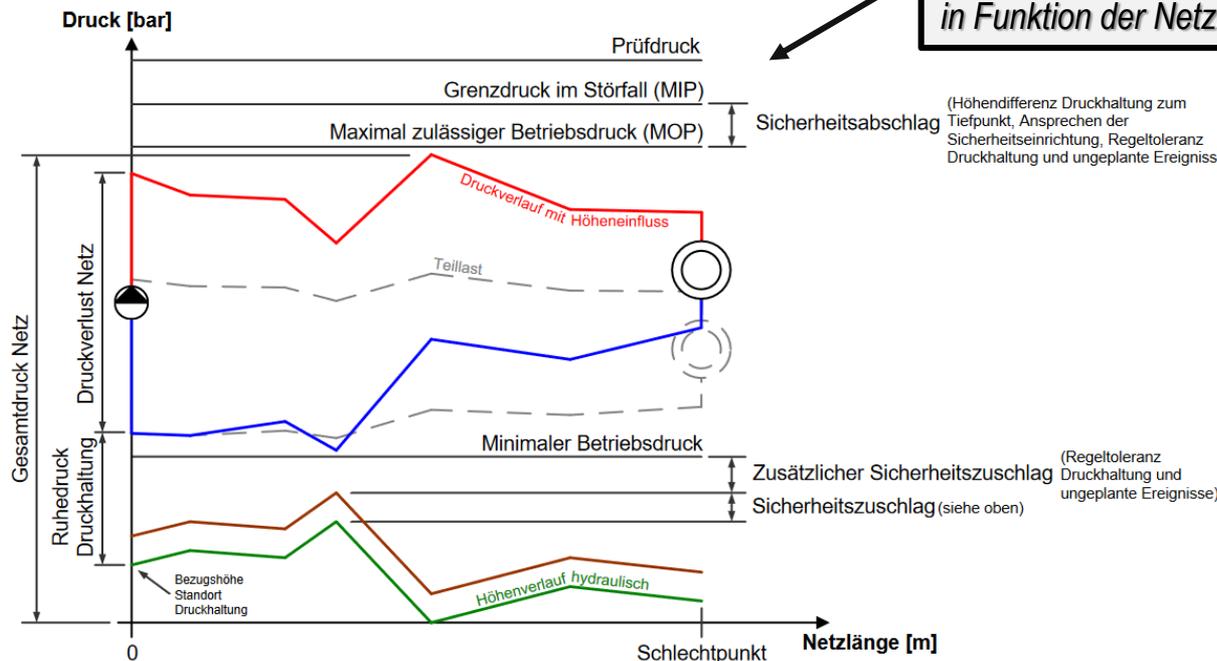
$$\dot{V}_{Knoten} = \frac{P}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T}$$



Lastflussrechnung

Überprüfung des Leitungsdrucks

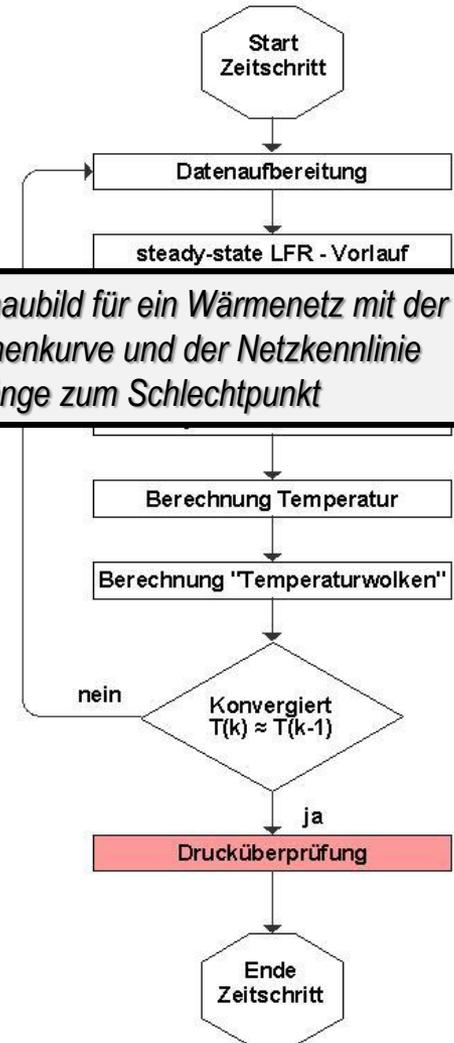
- Der absolute Leitungsdruck muss im Rahmen der Leitungsparameter sein
- Ist abhängig von den zurückgelegten Höhenmeter zum Referenzknoten



Gestapeltes Druckschaubild für ein Wärmenetz mit der Überlagerung der Höhenkurve und der Netzkennlinie in Funktion der Netzlänge zum Schlechtpunkt

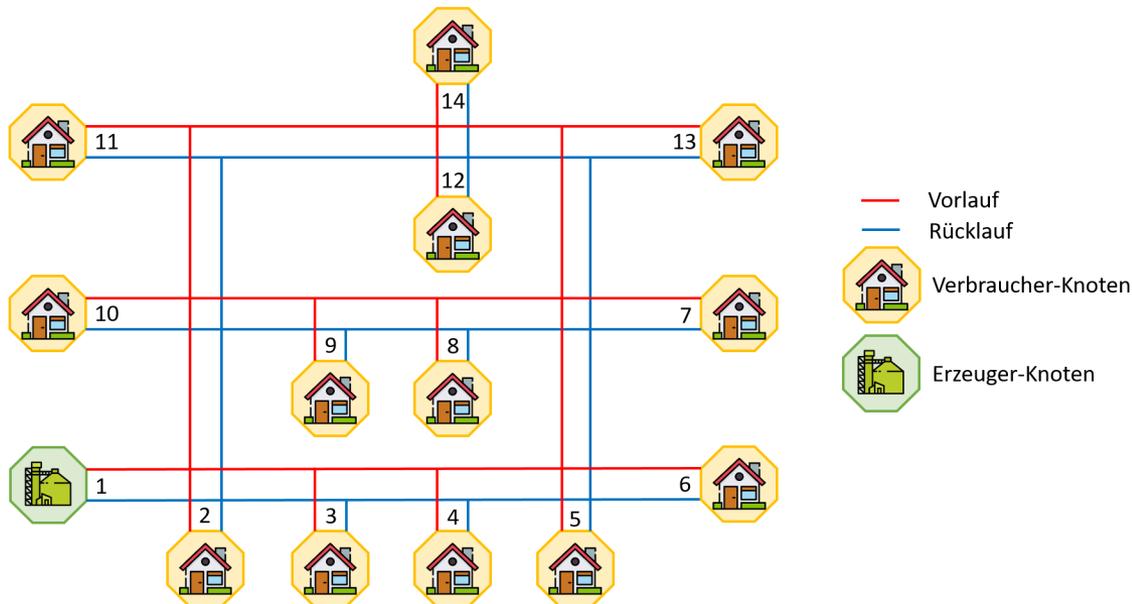
(Höhendifferenz Druckhaltung zum Tiefpunkt, Ansprechen der Sicherheitseinrichtung, Regeltoleranz Druckhaltung und ungeplante Ereignisse)

(Regeltoleranz Druckhaltung und ungeplante Ereignisse)



Diskussion & Validierung

- Rechenzeiten für ein Jahr, je nach Komplexität des Netzes, zwischen 6min und 1h
- Vergleich der Ergebnisse des Beispielnetzes mit dem kommerziell erhältlichen Programm PSS[®]SINCAL → Unterschiede sind vernachlässigbar klein (unter 0,012%)



Zusammenfassung

Quasi-dynamische LFR

- Kombination von dem Knotenpotentialverfahren mit „Temperaturwolken“-Ansatz
 - Berücksichtigung von Temperatur- & Leistungsänderungen über die Zeit
 - Genaue Ergebnisse
 - Rasche Berechnungszeiten
 - Berücksichtigung aller möglichen Komponenten im Wärmenetz

Danke für Ihre
Aufmerksamkeit