

Dynamische Anlagen- und Netzsimulation zur Dimensionierung kalter Nahwärmenetze: Fallstudie Innenstadtquartier Dresden

Andreas Wilde¹, Torsten Schwan¹, Martin Leuschke¹ und Monika Wicke¹

¹EA Systems GmbH, Germany

Zusammenfassung

Kalte Nahwärmenetze ermöglichen die quartiersweite Nutzung niedrig temperierter Umwelt- und Solarwärme, stellen die Planung jedoch vor gekoppelte Auslegungsfragen: Wie viele Erdsonden sind erforderlich? Welche Rolle übernehmen PVT-Kollektoren, Netzgewinne, Wärmepumpen und ein vorhandener Spitzenlast- oder Backup-Kessel? Und wie robust ist ein Konzept gegenüber abweichenden Bedarfen oder reduzierter Quellenverfügbarkeit? Der Beitrag zeigt anhand einer Fallstudie für ein Innenstadtquartier in Dresden, wie dynamische Anlagen- und Netzsimulationen als Entscheidungsinstrument in der Planung eingesetzt werden können. Grundlage ist ein Modelica-basiertes Simulationsmodell mit Gebäudelastlinien, Sonden-FMUs, Netzverlust- bzw. Netzgewinnmodellierung, PVT-Einbindung, Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen sowie Anlagenregelung. Untersucht werden eine Basisvariante mit 55 Doppel-U-Sonden, etwa 300 PVT-Modulen, 300 kW Sole/Wasser-Wärmepumpe, 100 kW Luft/Wasser-Wärmepumpe und minimalem Gaskesseleinsatz sowie Varianten mit reduzierter und erhöhter Sondenanzahl und ein konservatives Worst-Case-Szenario. Die Simulation zeigt, dass die Basisvariante nach etwa fünf Jahren einen stabilisierten geothermischen Zustand erreicht; der Kesselanteil liegt im fünften Jahr bei unter 1 %. Die Variante mit reduzierter Sondenanzahl bleibt mit 2 % Kesselanteil machbar; im Worst Case steigt der Anteil auf 7 %, bleibt jedoch unter der Schwelle von 10 %. Die Simulation liefert damit nicht nur einen Machbarkeitsnachweis, sondern unterstützt konkrete Auslegungsentscheidungen.

Einleitung, planerische Fragestellung

Die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung im Quartier erfordert Systemkonzepte, die erneuerbare Wärmequellen, Niedertemperaturnetze, Wär-

mepumpen und Speicher- bzw. Erdreichpotenziale integriert betrachten. Kalte Nahwärmenetze sind hierfür ein besonders geeignetes Konzept, da sie Wärmequellen auf niedrigem Temperaturniveau erschließen und gebäudeseitige Wärmepumpen oder zentrale Anlagen mit vergleichsweise geringen Netzverlusten versorgen können (Lund et al. (2014), Jodeiri et al. (2022), Buffa et al. (2019)). Gleichzeitig verschiebt sich die planerische Herausforderung: Nicht mehr eine einzelne Komponente, sondern die Interaktion aus Gebäudelasten, Quelltemperaturen, Netztemperaturen, Regelung, langfristiger Erdreichregeneration und Spitzenlastabdeckung entscheidet über Machbarkeit und Effizienz.

Der vorliegende Beitrag adressiert deshalb die Frage, wie dynamische Anlagen- und Netzsimulationen genutzt werden können, um belastbare Planungsentscheidungen für ein kaltes Nahwärmenetz zu treffen. Im Mittelpunkt steht die Fallstudie Innenstadtquartier Dresden. Das Projekt untersucht ein Quartiersversorgungskonzept, in dem ein mehrgeschossiges Bestandsgebäude für betreutes Wohnen mit Flachdach und mehrere geplante Wohngebäude über ein kaltes Nahwärmenetz, Erdsondenfelder, PVT-Module und Wärmepumpen versorgt werden. Der Ansatz knüpft an parallele Untersuchungen für ein peripheres Quartier in Dresden-Pillnitz/Hosterwitz an, in denen vergleichbare modellbasierte Workflows für Quartiers- und Gebäudesimulation beschrieben wurden (Tribulowski et al. (2025), Schwan et al. (2025)). Aus planerischer Sicht sind insbesondere folgende Entscheidungen relevant:

1. Anzahl, Belastung und langfristige Stabilisierung der Erdsonden,
2. Wirkung der PVT-Anlage als thermische Quelle und Eigenstromerzeuger,
3. Auslegung und Einsatzstrategie der Wärmepumpen sowie verbleibender Backupbedarf des Gaskessels,

4. Robustheit des Konzepts gegenüber konservativen Randbedingungen.

Die zentrale These lautet: Erst die dynamische Kopplung von Gebäude-, Netz-, Quellen- und Anlagenmodell macht sichtbar, welche Auslegungsentscheidung die Machbarkeit tatsächlich begrenzt und welche Komponenten Freiheitsgrade zur Optimierung bieten, [Schwan et al. \(2021\)](#), [Schwan et al. \(2023\)](#).

[Hirsch et al. \(2019\)](#) demonstrierten die Kopplung eines Modelica-basierten Gebäudeenergiemodells mit einem detaillierten FEM-Erdreichmodell für ein Einzelgebäude mit Horizontalwärmetauscher und zeigten die praktische Einsetzbarkeit dieses Co-Simulationsansatzes. Der vorliegende Beitrag erweitert diesen Ansatz auf Quartiersmaßstab: mehrere Sondenfelder, PVT-Anlage, Nahwärmenetz und Mehrjahressimulation als integriertes Planungsinstrument.

Fallstudie und Aufgabenstellung

Ausgangslage

Ausgangspunkt der Fallstudie ist eine Machbarkeitsstudie für ein kaltes Nahwärmenetz in einem innerstädtischen Quartier in Dresden (Abbildung 1). Vorarbeiten lieferten detaillierte Gebäudemodelle, eine Kalibrierung anhand von Messdaten für das Bestandsgebäude für betreutes Wohnen, ein Sondenpositionierungskonzept sowie ein PVT-Belegungskonzept für dessen Flachdach. Ein weiteres Gebäude für betreutes Wohnen als möglicher Neubau wurde in der betrachteten Variante nicht berücksichtigt, da dessen Planung noch nicht finalisiert war. Aus der Flächenanalyse ergab sich eine maximale Belegung von 60 Sonden ohne diesen möglichen Neubau bzw. 80 Sonden mit zusätzlicher Fläche. Für die PVT-Anlage wurde eine maximale Dachbelegung von 300 Modulen mit jeweils etwa 2 m² ausgewiesen.

Eine im Rahmen der Vorarbeiten durchgeführte statische Systemauslegung (spez. Sondenleistung 30 W/m, Sondenlänge 95 m, inkl. Sicherheitszuschlag) ergab einen Sondenbedarf von ca. 140 Einheiten – weit mehr als die verfügbare Grundstücksfläche erlaubt. Die dynamische Simulation wurde eingesetzt, um zu prüfen, ob mit reduzierter Sondenanzahl ein robustes Versorgungskonzept erreichbar ist.

Die Aufgabe bestand darin, aus diesen Vorarbeiten ein dynamisches, planerisch auswertbares Simulationsmodell abzuleiten und damit zu prüfen,



Abbildung 1: Netzschema des kalten Nahwärme-Netzes im Innenstadtquartier Dresden

ob ein robustes Versorgungskonzept auch mit reduzierter Sondenanzahl umsetzbar ist. Dabei musste eine externe Planungsvorgabe zur Erreichung der Effizienzziele berücksichtigt werden, die vorsah, dass nicht mehr als 10 % des jährlichen Wärmebedarfes durch den Bestandsgaskessel abgedeckt werden dürfen. Die Basisvariante wurde bewusst nicht mit maximaler Sondenanzahl, sondern mit 55 Doppel-U-Sonden untersucht. Dadurch sollte geklärt werden, ob die planerischen Flächen- und Realisierungsrestriktionen mit ausreichender thermischer Reserve vereinbar sind.

Wärmebedarfe und Kalibrierung

Für das Bestandsgebäude lagen Messwerte zum Gasbedarf (ca. 700.000 kWh/a) sowie daraus abgeleitete Bedarfe für Raumheizung und Trinkwarmwasser einschließlich Zirkulation vor; die Kalibrierung erfolgte über den Effizienzfaktor des Bestands-Gaskessels. Für die 35 Wohnhäuser wurden Gebäudetypen mit Nutzflächen zwischen 110 und 150 m² berücksichtigt.

Für die Erstellung der Lastkurven wurden außerdem energetische 3D-Gebäudemodelle auf Basis von SimVICUS¹ für die geplanten Gebäude

¹<https://bauklimatik-dresden.de/en/software/sim-vicus/#features>

(Einfamilien- und Reihenhäuser sowie ein mögliches Gebäude für betreutes Wohnen) und das Bestandsgebäude für betreutes Wohnen genutzt. Diese Modelle wurden mit planerischen Annahmen, zum Beispiel für den Trinkwarmwasserbedarf, sowie mit Messdaten des Bestandsgebäudes kalibriert. Für den Warmwasserbedarf wurde ein spezifischer Wert von $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ einschließlich Zirkulation angenommen.

Damit basiert die Simulation nicht auf normativen Volllaststunden allein, sondern auf zeitlich aufgelösten Lastlinien. Das ist für die Bewertung von PVT-Erträgen, Netzgewinnen, Quelltemperaturen und Regelungszuständen wesentlich, weil die Gleichzeitigkeit von Bedarf und verfügbarer Quellwärme die Systemeffizienz bestimmt.

Systemkonzept des kalten Nahwärmenetzes

Netz- und Anlagenstruktur

Das untersuchte Versorgungskonzept kombiniert ein kaltes Nahwärmenetz mit fünf zentralen bzw. semi-zentralen Quellen- und Erzeugergruppen (Abbildung 2):

- Erdsondenfelder mit Doppel-U-Sonden als saisonal belastete und regenerierte Umweltwärmequelle,
- PVT-Module auf dem Bestandsgebäude als thermische Quelle und Stromerzeuger,
- Sole/Wasser-Wärmepumpen für die Nutzwärmeerzeugung,
- eine Luft/Wasser-Wärmepumpe zur Heizungsunterstützung sowie
- ein vorhandener Gaskessel als Backup.

Die Basisvariante umfasst 55 Doppel-U-Sonden in drei Feldern (je ca. 100 m Tiefe), ca. 300 PVT-Module (je 2 m^2), eine 300 kW Sole/Wasser-Wärmepumpe, eine 100 kW Luft/Wasser-Wärmepumpe und den Bestandskessel. Versorgungstemperaturen: 55°C Heizung / 65°C Warmwasser im Bestandsgebäude; 35°C Heizung / 65°C Warmwasser in den Wohngebäuden.

Die Leitungsdimensionierung des kalten Netzes wurde auf Basis der Lastdaten vordimensioniert. Dafür wurden Rohrennweiten, Leitungslängen, Rohrdurchmesser und Wärmeübergangskoeffizienten angesetzt. Diese Vordimensionierung

dient nicht allein einer hydraulischen Vorplanung, sondern auch der Netzverlust- bzw. Netzgewinnmodellierung. Gerade bei kalten Netzen können Umgebungswärmegewinne im Erdreich einen relevanten Beitrag zur Quellbilanz leisten.

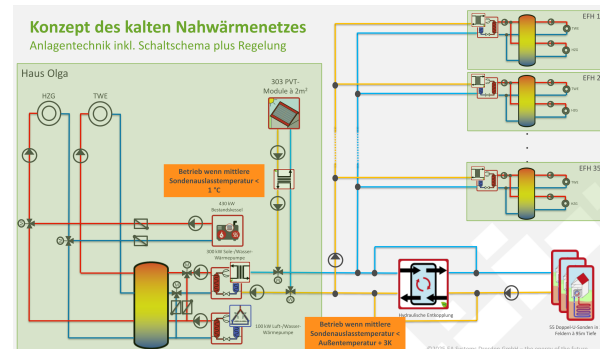


Abbildung 2: Vereinfachtes Anlagenschema bzw. Simulationsmodell für das Innenstadtquartier Dresden

Regelungsannahmen

Die Regelungsstrategie ist eine Planungsvariable: Die Wohnhäuser werden über Sonden und PVT versorgt; für das Bestandsgebäude gilt eine gestaffelte Strategie. Bei hohen Außentemperaturen (AT) übernimmt die Luft/Wasser-WP allein. Bei niedrigen AT ($AT + 3^\circ\text{C} < \text{Sondenauslasstemp.}$) wird die Sole/Wasser-WP zugeschaltet. Fällt die Sondenauslasstemp. unter 1°C , wird der Gaskessel zur Entlastung hinzugenommen. Die Simulation erlaubt es, den Einfluss dieser Einsatzlogik auf Sondentemperaturen, Kesselanteil und Jahresarbeitszahl vorab zu quantifizieren.

Werkzeuge und Simulationsmethodik

Modellierungsansatz

Für die Systembewertung wurde ein Modelica-Modell aufgebaut, das Gebäudelastlinien, Sonden-FMUs, Anlagenkomponenten und Regelungslogik integriert (Schwan & Unger (2017), Hirsch et al. (2019), Schwan et al. (2017)). Es umfasst getrennte Wärmelasten für Heizung und Trinkwasser, beide Wärmepumpen, den Gaskessel und die Regelung; das Quartiersmodell ergänzt Wohnhäuser, Netzstränge, Sondenfelder und PVT.

Die Geothermiesonden werden durch ortsaufgelöste FEM-Modelle abgebildet, die als FMUs eingebunden sind. Das Gesamtmodell verwendet ei-

ne adaptive Zeitschrittweite bis zu einer Minute, so dass Lastspitzen und kurzzeitige Quelltemperaturänderungen zeitlich aufgelöst werden.

Der methodische Mehrwert liegt in der Kopplung mehrerer Zeitskalen: kurzfristig Lastspitzen und Wärmepumpeneinsatz, mittelfristig saisonale Entzugs- und Regenerationszyklen, langfristig die Temperaturstabilisierung des Erdreichs.

Die Implementierung nutzt SimVICUS-basierte Gebäudemodelle, Sonden-FMUs und Modelica-Modelle der GreenCity-Bibliothek² in SimulationX.³ Übertragbar ist vor allem die Modellierungslogik – zeitaufgelöste Gebäudelasten, austauschbare Quellenmodelle, parametrierbare Netz- und Anlagenmodelle sowie explizite Regelungslogik – die sich mit geeigneten Vorarbeiten bereits in der Vorplanung einsetzen lässt.

Varianten und Bewertungsgrößen

Untersucht wurden vier Varianten (Tabelle 1):

Als zentrale Bewertungsgrößen wurden verwendet:

- minimale jährliche Sondenauslasstemperatur,
- Anteil der Kesselwärme am Gesamtwärmebedarf,
- Kältenetzbilanz mit Sondenwärmeaufnahme, PVT-Wärme, Sondenwärmebereitstellung und Netzgewinnen,
- Wärmeerzeugung durch Sole/Wasser-Wärmepumpen, Luft/Wasser-Wärmepumpen und Gaskessel,
- elektrische Energiebilanz einschließlich PVT-Eigenstromanteil,
- Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen.

Diese Größen sind direkt an Planungsentscheidungen gekoppelt. Die minimale Sondentemperatur beschreibt das technische Risiko einer Überlastung des Erdreichs. Der Kesselanteil bewertet den verbleibenden fossilen Anteil bzw. Backupbedarf. Die Energie- und Strombilanzen zeigen, welche Komponente welchen Beitrag zur Systemeffizienz leistet.

²<https://www.green-city-library.de/>

³<https://www.simulationx.com/>

Ergebnisse

Basisvariante mit 55 Sonden

Die dynamische Simulation der Basisvariante zeigt, dass die Auskühlung der Sonden bzw. des Erdreichs nach etwa fünf Jahren ein Minimum erreicht oder weitgehend ausgeglichen ist (Tabelle 2). Die minimale jährliche Sondenauslasstemperatur sinkt von 2 °C im ersten Jahr auf 0 °C im fünften Jahr. Parallel steigt der Anteil der Kesselwärme am Gesamtwärmebedarf nur geringfügig von 0 % in den ersten beiden Jahren auf 0,3 % im fünften Jahr.

Der fossile Backupanteil bleibt damit weit unterhalb einer planerischen Schwelle von 10 %. Aus den simulierten Verläufen ist zudem nicht zu erwarten, dass das durch den Kessel auszugleichende Defizit auch in einem längeren Betrachtungszeitraum in die Größenordnung von 10 % ansteigt, sofern die getroffenen Annahmen zur Last, PVT-Verfügbarkeit, Netzbilanz und Regelung eingehalten werden.

Abbildung 3 zeigt die zeitlichen Verläufe der PVT-Ausgangstemperaturen sowie der mittleren und minimalen Sondenauslasstemperaturen über fünf Betriebsjahre. Die saisonale Dynamik ist deutlich erkennbar: Sondentemperaturen sinken im Winter und erholen sich durch Regeneration und PVT-Einspeisung. Die fortschreitende Auskühlung des Erdreichs konvergiert ab Jahr 4–5 gegen einen stabilen Zustand.

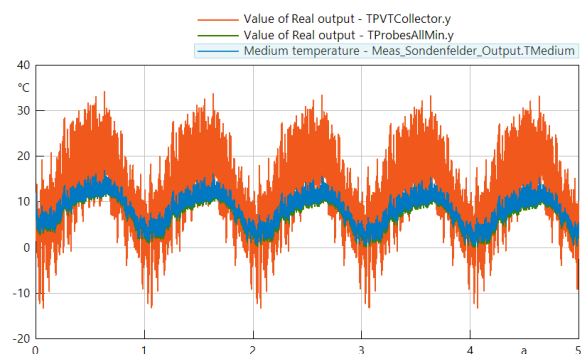


Abbildung 3: Zeitreihe der Ausgangstemperaturen von PVT-Anlage und Erdsonden (Mittelwert und Minimum) über 5 Betriebsjahre, Basisvariante

Die Energieauswertung zeigt, dass die entnehmbare Wärme aus den Sonden in den ersten Jahren sinkt, sich aber zwischen dem fünften und zehnten Jahr stabilisiert. Dieser Effekt wird zu einem wesentlichen Teil durch höhere Netzgewinne und PVT-Erzeugung kompensiert. Im fünften

Tabelle 1: Untersuchte Varianten

Variante	Sondenanzahl	PVT-Module	Weitere Annahmen	Planerische Funktion
Basisvariante	55	300	Netzgewinne berücksichtigt, Luft/Wasser-WP zur Sondenentlastung wie Basisvariante	Referenz für Machbarkeit und Auslegung
Reduzierte Sondenanzahl	40	300		Prüfung der unteren Robustheitsgrenze
Erhöhte Sondenanzahl	70	300	wie Basisvariante	Prüfung des Effizienz- und Reservegewinns
Worst Case	55	200	20 % höherer Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes, keine Netzgewinne	konservative Sensitivitätsanalyse

Tabelle 2: Geothermie: Auskühlung des Erdreichs in den ersten 5 Jahren, Basisvariante

Jahr	Minimale Sondenauslass-temperatur in °C	Anteil Kesselwärme am Gesamtwärmebedarf
1	1,8	0 %
2	0,9	0 %
3	0,2	0,1 %
4	0,1	0,3 %
5	0,0	0,3 %

Bohrkapazität und Fläche. Für die Planung bedeutet dies, dass die optimale Sondenanzahl nicht ausschließlich aus Machbarkeitssicht, sondern in Abwägung von Investition, Genehmigungsfähigkeit, Flächenverfügbarkeit, Regelungsstrategie und Betriebseffizienz festgelegt werden sollte.

Worst-Case-Szenario

Das Worst-Case-Szenario reduziert die PVT-Modulanzahl auf 200 Module, erhöht den Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes um 20 % und setzt keine Wärmegewinne im Netz an. Unter diesen Randbedingungen stellt sich die Einhaltung der geforderten Grenzen deutlich kritischer dar. Die minimale jährliche Sondenauslasstemperatur sinkt im fünften Jahr auf -1,5 °C (Tabelle 4). Die Bodenauskühlung benötigt länger, um einen stabilen Zustand zu erreichen; eine Stabilisierung kann mehr als zehn Jahre dauern. Kurzzeitiges und räumlich begrenztes Einfrieren im Boden wird als potenziell möglich bewertet.

Gleichzeitig bleibt der Anteil der Kesselwärme auch in diesem konservativen Szenario mit 7 % im fünften Jahr unterhalb der 10 %-Schwelle. Damit wird die Machbarkeit nicht grundsätzlich widerlegt, jedoch verschlechtert sich die Gesamtsystemeffizienz deutlich. Besonders relevant ist, dass der Gaskesselbetrieb trotz erhöhtem Betrieb der Luft/Wasser-Wärmepumpe deutlich zunimmt. Die Simulation legt deshalb nahe, die Regelungsstrategie der Luft/Wasser-Wärmepumpe im Worst Case anzupassen und anlagentechnische Optionen wie eine größere Luft/Wasser-Wärmepumpenkaskade zu prüfen.

Jahr decken Netzgewinne etwa 15 % und die PVT-Anlage etwa 60 % des Gesamtnetzwärmebedarfs. Die PVT-Eigenstromerzeugung entspricht im fünften Jahr etwa die Hälfte des Gesamtstrombedarfs der Wärmepumpen.

Einfluss der Sondenanzahl

Der Variantenvergleich zeigt, dass die Anzahl der Sonden die Effizienz und Temperaturreerven deutlich beeinflusst, die grundsätzliche Machbarkeit jedoch nicht allein bestimmt (Tabelle 3). Bei 40 Sonden sinkt die minimale jährliche Sondenauslasstemperatur im fünften Jahr auf -0,6 °C. Der Kesselanteil steigt auf 2 %, bleibt aber weiterhin deutlich unter 10 %. Bei 70 Sonden bleiben die minimalen Sondenauslasstemperaturen deutlich positiv; im fünften Jahr beträgt der Wert 3,5 °C. Kesselwärme wird in der Variante mit 70 Sonden in den ersten fünf Jahren nicht benötigt.

Die Variante mit 40 Sonden ist damit keine reine Ausschlussvariante, sondern markiert eine mögliche untere Auslegungsgrenze. Die Variante mit 70 Sonden erhöht die Reserven und reduziert die Belastung der Zusatzsysteme, bindet aber mehr

Tabelle 3: Geothermieentwicklung der verschiedenen Auslegungsvarianten Jahr 5

Variante	Minimale Sondenauslass-temperatur Jahr 5	Kesselanteil Jahr 5	Interpretation
40 Sonden	-0,6 °C	ca. 2 %	machbar, aber geringere Temperaturreserve und höhere Backupnutzung
55 Sonden	0 °C	ca. 0,3 %	robuste Basisvariante mit sehr geringem Backupanteil
70 Sonden	3,5 °C	0 %	hohe thermische Reserve und bessere Quelltemperaturen

Tabelle 4: Auskühlung des Erdreichs und resultierender Bedarf an Wärme aus Bestands-Gaskesseln, Worst-case-Szenario

Jahr	Minimale Sondenauslass-temperatur in °C	Kesselanteil im Worst Case
1	-0,3	0,3 %
2	-0,7	2,5 %
3	-0,9	5,0 %
4	-1,1	6,3 %
5	-1,5	7,0 %

Diskussion: Simulation als Entscheidungsinstrument

Die Fallstudie zeigt, dass dynamische Simulationen in frühen und mittleren Planungsphasen mehrere Funktionen übernehmen können. Erstens dienen sie als Machbarkeitsnachweis. Für die Basisvariante mit 55 Sonden wird gezeigt, dass sich die Sondentemperaturen innerhalb der ersten Betriebsjahre stabilisieren und der Gaskesselanteil sehr gering bleibt. Zweitens ermöglichen sie die Quantifizierung von Robustheit. Die Varianten mit reduzierter und erhöhter Sondenanzahl zeigen, welche Folgen eine reduzierte oder erhöhte Quellenkapazität hat. Drittens unterstützen sie die Regelungsentwicklung. Das Worst-Case-Szenario macht sichtbar, dass eine rein statische Komponentenauslegung nicht ausreicht; die Einsatzschwellen der Luft/Wasser-Wärmepumpe haben direkten Einfluss auf Sondenentlastung, Kesselanteil und Effizienz.

Statische Verfahren können dynamische Systemzustände und Komponentenwechselwirkungen nicht abbilden; die notwendigen Worst-Case-Annahmen führen zu Überdimensionierungen. Typisches Beispiel sind die PVT-Erträge: saisonal stark schwankend, im Winter zeitweise null (vgl. Abbildung 3). Die saisonale Erdreich-Regeneration durch PVT-Einspeisung ist statisch nicht abbildbar und muss daher vernachlässigt werden. Dynamisch zeigt sich jedoch, dass genau dieser Effekt die winterlichen Lastspitzen der Sonden beherrschbar hält – und damit die Auslegung mit 55 statt ca. 140 Sonden erst ermöglicht.

Für Planungsentscheidungen lassen sich vier konkrete Schlussfolgerungen ableiten:

1. **Sondenanzahl:** 55 Sonden bilden eine robuste Basisvariante. Eine Reduktion auf 40 Sonden erscheint machbar, erhöht aber Backupbedarf und thermische Belastung. 70 Sonden verbessern die Effizienz und die Temperaturreserve,

Energiebilanzen im fünften Betriebsjahr

Der Vergleich der fünften Betriebsjahre zeigt, wie sich Quellen- und Erzeugeranteile zwischen den Varianten verschieben (Tabelle 5). Die Werte verdeutlichen, dass die PVT-Anlage auch bei reduzierter Modulanzahl im Worst Case eine hohe thermische Bedeutung behält. Aufgrund der niedrigeren Netztemperaturen wird die geringere Modulanzahl teilweise durch höhere Effizienz der PVT-Module aufgrund geringerer Verluste kompensiert. Gleichzeitig steigt jedoch der sofort genutzte Anteil der Quellwärme im Netz und die elektrische Eigenversorgung sinkt deutlich.

Die elektrische Energiebilanz bestätigt die Relevanz der PVT-Anlage nicht nur als Wärmequelle, sondern auch als Eigenstromerzeuger (Tabelle 6). In der Basisvariante werden im fünften Jahr rund 135 MWh/a PVT-Strom erzeugt. Dem stehen Strombedarfe von rund 180 MWh/a für Sole/Wasser-Wärmepumpen und rund 95 MWh/a für Luft/Wasser-Wärmepumpen gegenüber. Der PVT-Anteil am Gesamtstrombedarf der Wärmepumpen liegt damit bei etwa 50 %. Im Worst Case sinkt dieser Anteil auf etwa 30 %, da weniger PVT-Module verfügbar sind und zugleich der Luft/Wasser-Wärmepumpeinsatz steigt.

Tabelle 5: Gerundeter Beitrag der verschiedenen Quellen zum Wärmebedarf im 5. Jahr in MWh/a

Variante	PVT in MWh/a	Netzgewinne in MWh/a	Sonden in MWh/a	Kessel in MWh/a	WP Luft/Wasser in MWh/a	WP Sole/Wasser in MWh/a
55 Sonden	277	70	313	3	259	654
40 Sonden	279	77	279	17	275	623
70 Sonden	269	56	368	0	218	698
55 Sonden, Worst Case	241	0	322	48	332	594

Tabelle 6: Gerundete Elektroenergiebilanz im 5. Jahr in MWh/a, Verbrauch wird positiv, Erzeugung wird negativ gezählt

Variante	55 Sonden	40 Sonden	70 Sonden	55 Sonden worst case
PVT	-135	-135	-135	-91
Luft-/Wasser WP	95	101	78	124
Sole-/Wasser WP	179	171	188	165

sind jedoch aus Investitions- und Flächensicht gegen die Zusatznutzen abzuwägen.

- PVT-Fläche:** Zentrale Systemkomponente: Im fünften Jahr stellt die PVT-Anlage ca. 20 % der Quellwärme und 50 % des Wärmepumpenstroms der Basisvariante bereit.
- Luft/Wasser-Wärmepumpe:** Die zusätzliche Luft/Wasser-Wärmepumpe ist Voraussetzung für die geringe Sondenzahl und wirkt als steuerbarer Entlastungspfad. Ihre Leistung und Regelung sollten in der weiteren Planung detailliert optimiert werden.
- Bestandskessel:** Der Gaskessel wird in der Basisvariante nur minimal benötigt. In der aktuellen Auslegung erscheint eine ersatzlose Substitution des Gaskessels durch erhöhten Luft/Wasser-Wärmepumpenbetrieb plausibel. Im Worst Case sollte dies jedoch mit einer größeren Luft/Wasser-Wärmepumpenkaskade oder alternativen Backupkonzepten geprüft werden.

Die Simulation macht damit aus einer komponentenbezogenen Auslegungsfrage eine systemische Optimierungsaufgabe. Entscheidend ist nicht nur, ob genügend Sonden vorhanden sind, sondern ob Sondenfeld, PVT, Netz, Wärmepumpen und Regelung gemeinsam in einem robusten Betriebsbereich liegen. Die Fallstudie ist damit zwar projektspezifisch parametrisiert, der Ablauf aus Datenerhebung, Gebäudelastmodellierung, Quellenmodellierung, Anlagenmodell, Regelung und Variantenbewertung ist jedoch auf andere Quartiere übertragbar.

Grenzen der Untersuchung

Die Ergebnisse sind als planerische Simulationsergebnisse zu interpretieren. Mehrere Punkte sollten im weiteren Projektverlauf vertieft werden:

- Die Kalibrierung stützt sich für das Bestandsgebäude auf Messdaten und planerische Annahmen. Für weitere Gebäude sollten reale Betriebsdaten nach Möglichkeit ergänzt werden.
- Ein möglicher Neubau für betreutes Wohnen wurde in der betrachteten Modellvariante nicht berücksichtigt. Eine spätere Einbindung kann die Bilanz des Netzes und der Sondenfelder verändern.
- Die Netzgewinne leisten einen relevanten Beitrag; ihre Unsicherheit sollte über Sensitivitätsanalysen zu Verlegetiefe, Bodentemperatur und Rohrparametern weiter quantifiziert werden.
- Die Langzeitbewertung über 50 Jahre stützt sich auf die beobachtete Stabilisierung; für die Ausführungsplanung ist eine explizite Langzeitsimulation sinnvoll.
- Wirtschaftlichkeit, CO₂-Bilanz, Genehmigungsrisiken und bauliche Restriktionen wurden in der vorliegenden Auswertung nicht im gleichen Detaillierungsgrad betrachtet wie die energetische Machbarkeit.
- Die Regelung wurde bereits als Einflussgröße untersucht, aber noch nicht global optimiert.

Insbesondere im Worst Case kann eine Optimierung der Einsatzschwellen und Wärmepumpenkaskaden die Ergebnisse verbessern.

Schlussfolgerungen

Die Fallstudie belegt, dass der Einsatz dynamischer Simulation in diesem Fall nicht nur die Planungsqualität verbessert, sondern die Projektentscheidung grundlegend verändert hat. Die statische Vorauslegung ergab ca. 140 Sonden und hätte das Geothermiekonzept als nicht realisierbar ausgeschlossen. Erst die dynamische Simulation zeigte, dass 55 Sonden ausreichen – weil saisonale PVT-Regeneration, Netzgewinne und Regelungseffekte statisch nicht abbildbar sind, aber gemeinsam den entscheidenden Unterschied machen. Es handelt sich damit nicht um eine Verfeinerung der Auslegung, sondern um eine qualitative Kehrtwende in der Planungsentscheidung.

Die Basisvariante (55 Sonden, 300 PVT-Module, 100 kW Luft/Wasser-WP) erweist sich als robust: Sondenauslasstempertur ca. 0 °C und Kesselanteil <1 % im fünften Jahr; selbst der Worst Case bleibt mit 7 % unter der 10 %-Schwelle.

Der Modellierungsaufwand für die vorliegende Studie betrug bei vorhandenen Gebäudemodellen und Sondenpositionierungskonzept etwa zwei Wochen. Das Verfahren ist damit nicht nur eine wissenschaftliche Pilotstudie, sondern in der planerischen Praxis mit vertretbarem Aufwand einsetzbar.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht bei Regelungsoptimierung, Gaskesselsubstitution, Langzeitstabilität der Sondenfelder und wirtschaftlich-ökologischer Bewertung.

Literatur

Buffa, S., Cozzini, M., D'antoni, M., Baratieri, M. & Fedrizzi, R. (2019), '5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in europe', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **104**, 504–522.

Hirsch, H., Nicolai, A. & Petzold, H. (2019), Co-simulation through exchange of time-series data applied to an energy system model and detailed ground heat exchanger model., in 'Modelica', pp. 157–053.

Jodeiri, A. M., Goldsworthy, M. J., Buffa, S. & Cozzini, M. (2022), 'Role of sustainable heat sources in transition towards fourth generation district

heating—a review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **158**, 112156.

Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F. & Mathiesen, B. V. (2014), '4th generation district heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems', *energy* **68**, 1–11.

Schwan, T., Feige, D., Wenzel, L., Voelckner, C. & Leuschke, M. (2023), Automatic optimization of energy supply systems in buildings and city quarters based on modelica models, in 'Modelica Conferences', pp. 789–798.

Schwan, T., Tribulowski, K., Weiß, D., Wicke, M. & Eckhardt, T. (2025), Model-based co-design of lowex heat supply and active thermal insulation systems, in 'Building Simulation 2025', Vol. 19, IBPSA, pp. 0–0.

Schwan, T. & Unger, R. (2017), Complex large-scale heating, cooling and power supply models—virtual renewable power plant simulation with modelica, in 'Building Simulation 2017', Vol. 15, IBPSA, pp. 1913–1921.

Schwan, T., Unger, R. & Pipiorke, J. (2017), Aspects of FMI in building simulation., in 'Modelica', pp. 132–007.

Schwan, T., Wicke, M., Hentschel, A. & Unger, R. (2021), Modelica models as integral part of the building design process, in 'Modelica Conferences', pp. 383–392.

Tribulowski, K., Wicke, M., Weiß, D., Schwan, T. & Grunewald, J. (2025), 'Regenerative Wärme- und Kälteversorgung des städtischen Quartiers auf Basis eines neuartigen aktiven Dämm-, Heiz- und Kühlsystems', *Bauphysik-Kalender 2025: Simulationen, BIM und KI* pp. 583–598.