

Multikriterielle Auslegung der Energieversorgung eines Nahwärmenetzes

Hochschule Düsseldorf, ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme,
M.Sc. J. Gottschald, M.Sc. M. Reich, Prof. Dr.-Ing. M. Adam

Zusammenfassung

Die Autoren stellen ein neues Verfahren zur optimierten und zeiteffizienten Konzeption von Energieversorgungssystemen nach konkurrierenden ökonomischen und ökologischen Kriterien am Beispiel eines geplanten innovativen Nahwärmenetzes mit mehreren Wärmeerzeugern vor. Das Verfahren basiert auf einer Kombination von Modellbildungs- und Optimierungsalgorithmen. Es ermöglicht die rasche Ermittlung einer Pareto-Front, welche die besten Systemkonfigurationen gemäß den gewählten Bewertungskriterien enthält. Darüber hinaus bietet es beachtliches Potential zur Veranschaulichung der Ergebnisse.

1. Einleitung und Motivation

Energieversorgungsunternehmen sind bemüht, zukunftssichere Versorgungskonzepte zu entwerfen, die möglichst nachhaltig und damit attraktiv für den reflektierten Endkunden, gleichzeitig bezahlbar sind und eine sichere Versorgung gewährleisten. Dem Planer bietet sich dabei eine große Palette an kommerziellen (Software-)Werkzeugen zur Auslegung bzw. Dimensionierung: Über Jahresdauerlinien mittels Tabellenkalkulation bis zu detaillierten Simulationswerkzeugen. Für die bis heute üblichen einfachen Systeme bei Nah- und Fernwärme bestehend aus KWK-Modul und Wärmebackup (z.B. Gaskessel) reichen diese Werkzeuge in den meisten Fällen aus. Im Sinne der Energiewende entstehen nun zunehmend komplexere Wärmenetze, die aus konventionellen und erneuerbaren Wärmeerzeugern gespeist werden [1]. Mit der Anzahl unterschiedlicher Erzeuger steigt auch der Planungsaufwand. Neben einer Vielzahl von hydraulischen Verschaltungen oder Einschaltreihenfolgen etc. gilt es zum Beispiel bei der Solarthermie auch den Kollektortyp, die Solarfeldfläche und die Speichergröße in dem Maße zu dimensionieren, dass die ökonomischen wie ökologischen Kriterien als auch die Versorgungssicherheit erfüllt sind.

2. Ausgangslage

Die Autoren beschäftigen sich in diesem Artikel beispielhaft mit der optimierten Auslegung eines geplanten Nahwärmenetzes mit erneuerbarem Energieanteil für eine Neubausiedlung in NRW. Mit 120 Wohneinheiten (WE) und einer Gesamtwohnfläche von voraussichtlich 15.600 m² wird der jährliche Wärmebedarf an Heizung, Warmwasser und Netzverluste auf insgesamt 950 MWh geschätzt. Hierfür wurde ein Heizwärmebedarf von 40 kWh/(m²·a) und ein Warmwasserbedarf von 15 kWh/(m²·a) angenommen. Ein wichtiges Merkmal des Netzes sind die geplanten niedrigen Netztemperaturen von maximal 70°C im Vorlauf und 50°C im Rücklauf. Diese sind für die Einbindung von erneuerbaren Energien insbesondere für Solarthermie und Wärmepumpen vorteilhaft.

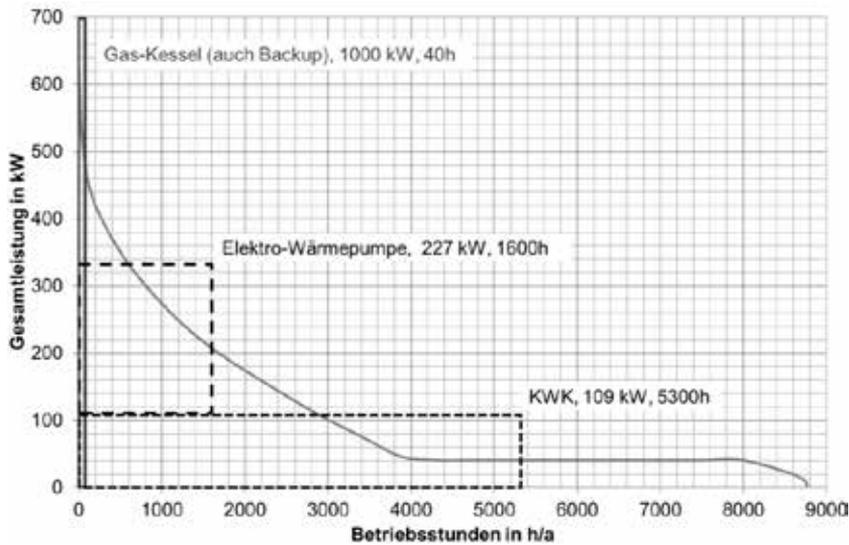


Abbildung 1: Beispielhafte Auslegung der Erzeuger nach Jahresdauerlinie

In einem ersten Auslegungsschritt findet eine Analyse der möglichen Anlagentechnik statt. Zur Auswahl stehen zwei fossile Wärmeerzeuger in Form eines gasbetriebenen KWK-Moduls und eines Gas-Kessels, eine Elektro-Wärmepumpe mit Außenluft oder Erdreich als Wärmequelle als auch eine zentrale Solarthermieanlage mit Kurzzeit- oder Langzeitwärmespeicher. Die in dieser Vor-Analyse untersuchten Erzeugerkonfigurationen unterscheiden sich in der Zusammensetzung des Erzeugerparks, wobei alle Konfigurationen ein KWK-Modul zur Grundlastdeckung beinhalten. Die Planung der wetterunabhängigen Erzeuger erfolgt anhand von Jahresdauerlinien (Abbildung 1) während in Abbildung 2 zusätzlich eine ergänzende Solarthermieanlage berücksichtigt wird. Im Ergebnis wird eine Kombination aus KWK-Modul, Gas-Kessel, Solarthermie und Erdwärmepumpe priorisiert.

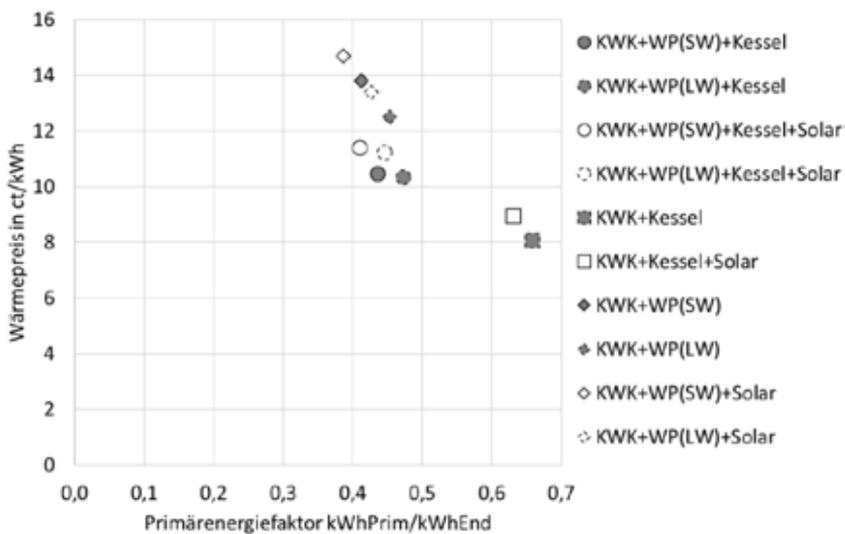


Abbildung 2: Ergebnisse der Auslegung nach Jahresdauerlinie für die untersuchten Systeme

Die in der Vor-Analyse untersuchten Erzeuger weisen konstante Leistungen, Kollektorfeldgröße und Speichervolumen basierend auf der Jahresdauerlinie bzw. Erfahrungswerten auf. Diese Auslegung muss aber nicht das Optimum für das geplante Energieversorgungssystem darstellen. Eine andere Zusammensetzung (kleinere/größere Wärmepumpe, Solarfeldgröße etc.) der Erzeuger kann zu besseren Verhältnissen von Wärmepreis zu Primärenergiefaktor führen. Allgemein ist interessant, welche Primärenergiefaktoren zu welchem Wärmepreis im besten Falle erreichbar sind und wie die zugehörigen Systemkonfigurationen dazu aussehen. Dies über „manuelle“ Parametervariationen zu ermitteln, wäre bei der großen Anzahl möglicher Konfigurationen sehr aufwendig.

Darüber hinaus erfordert die Auslegung derart komplexer Energieversorgungssysteme unter Einbindung von fossilen und erneuerbaren, teils vom Wetter abhängigen Erzeugern detaillierte Jahressimulationen. Die Generierung des dafür notwendigen Wärmelastprofils erfolgt im Folgenden hinsichtlich der Heizlast über Vollbenutzungsstunden, Heizgrenze, Normauslegungstemperatur und den Jahresverlauf der Außentemperatur. Die Warmwasserlast wird mit der Software DHWcalc /2/ ermittelt, welche den stündlich aufgelösten Trinkwarmwasser-Zapfverbrauch auf statistischer Basis ausgibt. Die Netzverluste finden mit einem Aufschlag von 15% des Gesamt-Nutzwärmebedarfs Berücksichtigung.

3. Simulationsmodell

Im zweiten Auslegungsschritt erfolgt die Erstellung eines Simulationsmodells für das Energieversorgungssystem nach dem Energiebilanzverfahren in Form einer Tabellenkalkulation, d.h. der Wärmebedarf wird zu jedem Zeitpunkt im Simulationsjahr vom Erzeugerpark gedeckt. Für jeden Erzeuger, d.h. KWK-Modul, Elektro-Wärmepumpe, Solarkollektoren, Solarspeicher und Gas-Kessel, wird ein Modell erstellt. Hierfür nutzt die Tabellenkalkulation eine Vielzahl von gerätespezifischen Kenndaten (u.a. Investitionskostenfunktionen und Wirkungsgradkennlinien) sowie Jahresganglinien (u.a. Außentemperatur, Globalstrahlung und Wärmebedarf) in stündlicher Auflösung für den Standort Düsseldorf. Für die Regelung der einzelnen Wärmeerzeuger zur Deckung des Wärmebedarfs dient eine festgelegte Einschaltreihenfolge: Sofern Solarwärme im Speicher vorhanden ist oder das Kollektorfeld Leistung bereitstellen kann, wird diese zunächst zur Deckung des Wärmebedarfs verwendet. Übersteigt der Wärmebedarf die zur Verfügung stehende Solarwärme, geht zunächst das KWK-Modul in Betrieb. Reicht auch dessen Leistung nicht, folgt die Elektro-Wärmepumpe und zu Spitzenlastzeiten der Gas-Kessel.

Das Modell ermöglicht eine variable Erzeugerkonfiguration über Einstellung der Geräte-Wärmeleistung von KWK-Modul, Elektrowärmepumpe und Gas-Kessel als auch über die Kollektorfeldgröße und das Speichervolumen. Mit der Einstellung von beispielsweise 0 kW lassen sich einzelne Geräte aus der Erzeugerkonfiguration entfernen. Als Zielgrößen werden der Primärenergiefaktor und der Wärmepreis des Energieversorgungssystems definiert. Der Primärenergiefaktor für Strombezug aus dem öffentlichen Versorgungsnetz beträgt derzeit $1,8 \text{ kWh}_{\text{Prim}}/\text{kWh}_{\text{End}}$ und für Erdgas $1,1 \text{ kWh}_{\text{Prim}}/\text{kWh}_{\text{End}}$. Die Berechnung des Primärenergiefaktors für das KWK-Modul findet nach der Stromgutschriftmethode /3/ statt. In die Berechnung des Wärmepreises fließen Kapital- (u.a. Investitionskosten), Wartungs- und Betriebskosten (u.a. Energiekosten, KWK-G Förderung, Steuern etc.) ein.

4. Versuchsplanung und Modellbildung

Das Simulationsmodell dient als Basis für die Optimierung einer „Super-Struktur“. Eine „Super-Struktur“ besteht aus allen Wärmeerzeugern (KWK-Modul, Gas-Kessel, Solarthermie mit Wärmespeicher, Wärmepumpe, etc.), die für den realen Betrieb berücksichtigt werden sollen und aus denen für die optimale Struktur ausgewählt werden soll. Damit sichergestellt ist, dass der Wärmebedarf immer abgedeckt werden kann, wird in dieser Untersuchung ein Gaskessel standardmäßig in die Systemstruktur integriert, welcher die Gesamtleistung der Wärmeerzeuger auf

den geforderten Nennwert ergänzt. Die Optimierung soll die Frage nach der optimalen Struktur (Welche Komponenten sollen genutzt werden?) sowie der optimalen Dimensionierung der Komponenten (z.B. thermische Nennleistung des KWK-Moduls, Solarfeldfläche, Wärmespeichergroße etc.) hinsichtlich Wärmepreis als ökonomische und Primärenergiefaktor als ökologische Zielgröße beantworten. Ein gängiger Ansatz hierzu ist die Formulierung eines Optimierungsmodells durch gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung (engl.: Mixed-Integer Linear Programming, MILP, s. /4/). Nachteilig an MILP ist, dass die Rechenzeit exponentiell mit der Anzahl der Zeitschritte der Zeitreihen ansteigt, die Zielgrößen nur einzeln bzw. nacheinander optimiert werden können und die grafische Visualisierung des allgemeinen Systemverhaltens unzureichend ist.

Der Ansatz der Autoren besteht im Unterschied dazu aus einem iterativem Prozess, welcher eine hinreichend genaue Approximation des nichtlinearen Systemverhaltens in Abhängigkeit von exemplarisch gewählten Einflussfaktoren (hier drei Stück aus Gründen der Übersichtlichkeit und Darstellbarkeit; eine größere Anzahl lässt die Methodik problemlos zu) mit möglichst geringem Aufwand gestattet. Das generierte Approximationsmodell erlaubt nicht nur eine schnelle Visualisierung des allgemeinen Systemverhaltens, sondern auch die mit vielen Systemauswertungen verbundene multikriterielle ungewichtete Systemoptimierung.

Die drei gewählten Einflussfaktoren und die dazugehörigen Grenzen des Versuchsraums sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Einflussfaktoren und jeweilige untere und obere Grenze im Versuchsraum

Einflussgröße	Untere Grenze	Obere Grenze
Solarfeldgröße	0 m ²	4000 m ²
Wärmespeichervolumen	0 m ³	600 m ³
Wärmepumpennennleistung	0 kW	1000 kW

Das nicht-parametrische Approximationsmodell wird anhand von Simulationsdaten trainiert und validiert. Das Modell besitzt dabei eine möglichst einfache Struktur, mit der eine Überanpassung an die Trainingsdaten und eine damit einhergehende schlechte Prognose bzw. Approximation unbekannter Daten verhindert werden soll. Als Trainingsgrundlage dient zunächst ein faktorieller zweistufiger Versuchsplan mit jeweils einem Versuchspunkt in den Ecken des Versuchsraumes. Um die Prognosegüte des Netzwerkes zu validieren, nutzen die Autoren einen gleichverteilten Versuchsplan, dessen Versuchspunkte hinsichtlich eines Abstandsmaßes sowie eines Korrelations-Kriteriums optimiert werden. So lange die Prognosegüte des Modells an den Validationsdaten unzureichend ist, werden zusätzliche Versuchspunkte zufällig ausgewählt, simuliert und dem Trainingsdatensatz hinzugefügt. Das Modell wird erneut trainiert und an den Validationsdaten getestet.

Letztlich werden für eine hinreichend genaue Approximation des Wärmepreises 51 Simulationen und des Primärenergiefaktors 131 Simulationen benötigt. Einen Überblick über die Verteilung der Versuchspunkte des Trainingsdatensatzes im Versuchsraum gibt Abbildung 3 für den Primärenergiefaktor (links) und den Wärmepreis (rechts):

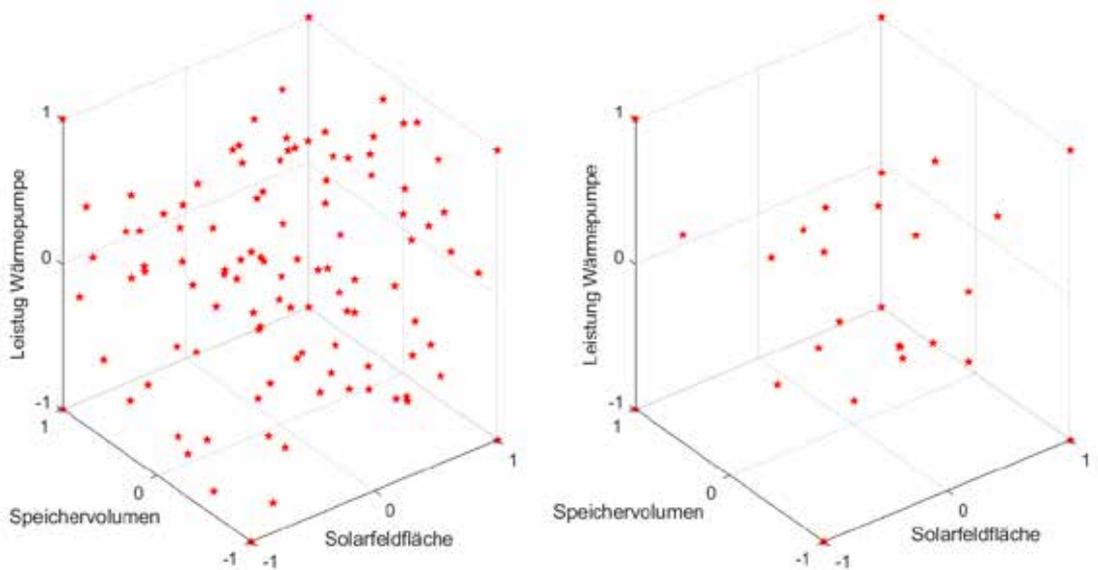


Abbildung 3: Versuchspunkte im Versuchsraum für eine hinreichend genaue Approximation des Validationsdatensatzes, Primärenergiefaktor (links) und Wärmepreis (rechts)

Um die Approximationen abschließend bewerten zu können, wird neben dem Trainings- und Validierungsdatensatz ein unabhängiger Testdatensatz erzeugt, der in keiner Weise mit den vorher verwendeten Daten korreliert. Die trainierten Modelle approximieren den Testdatensatz, was eine unabhängige qualitative und quantitative Bewertung der Prognosegüte erlaubt. Die qualitative Prognosegüte als Vergleich zwischen den neuen Testdatenwerten und den Prognosewerten des Approximationsmodells zeigen die sog. Prognose/Beobachtungs-Plots in Abbildung 4. Zum Vergleich zeigt Abbildung 4 ebenso die Prognose/Beobachtungs-Datenpaare für den Fall einer quadratischen Wirkflächenregression als Approximation, die am identischen Trainingsdatensatz (welcher nur geringe Vermengungen der Haupteffekte aufweist) gebildet wurden:

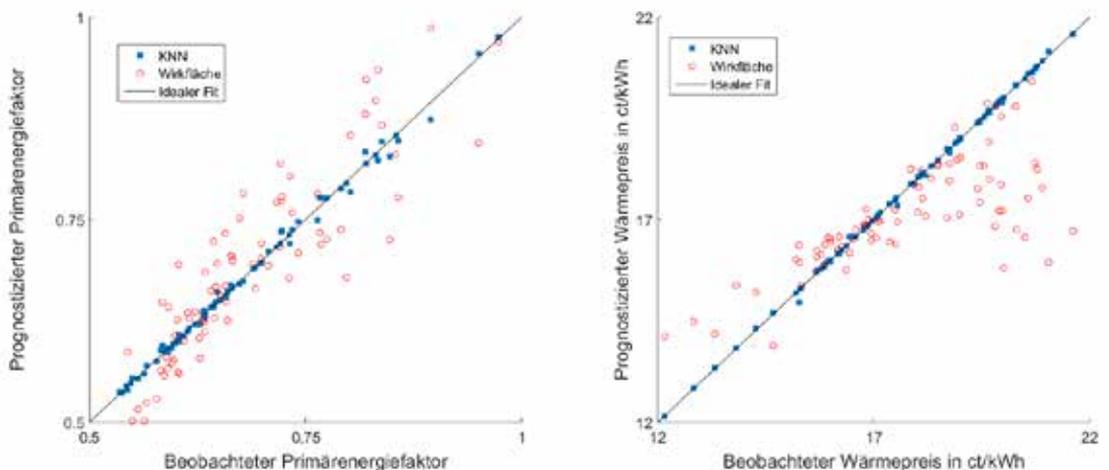


Abbildung 4: Prognose/Beobachtungs-Plot von Primärenergiefaktor (links) und Wärmepreis (rechts). Approximiert anhand eines künstlichen neuronalen Netzwerks (blaue Quadrate) und anhand einer Wirkflächenregression (rote Kreise)

Es ist ersichtlich, dass das nicht-parametrische Approximationsmodell eher in der Lage ist, das nichtlineare Systemverhalten abzubilden als eine Wirkflächenregression. Die Approximation des Testdatensatzes zeigt, dass die erstellten Modelle sehr gut generalisieren und daher ideal für eine allgemeine Analyse des Systems geeignet sind.

5. Multikriterielle Optimierung

In der Regel haben zwei interessierende Zielgrößen voneinander abweichende Verläufe im Versuchsraum und damit einhergehend unterschiedlich optimale Lagen. Interessiert man sich für beide Zielgrößen gleichermaßen und möchte außerdem besonders effiziente Einstellungen finden und anhand einer Pareto-Front visualisieren, lassen sich ungewichtete multikriterielle Optimierungen /5/ am sinnvollsten einsetzen. Der verwendete Algorithmus beginnt mit einer zufälligen Auswahl von Parametersätzen bzw. Konfigurationen (Wärmepumpenleistung, Solarfeldgröße, Speichervolumen). Die einzelnen Kombinationen aus Faktorstufen (Konfigurationen) und Ergebniswerten werden anhand ihrer Nähe zum Optimum sowie ihrer Verteilung bewertet. Die besten werden anhand ihrer binären Kodierung kombiniert. Dabei können die Binärwerte einzelner Faktorstufen zufällig variieren. Die auf diese Weise neu erzeugten Kombinationen an Faktorstufen werden erneut simuliert und bilden die nächste Generation an Systemkonfigurationen. Der Prozess aus Kodierung und zufälliger Variation der Binärwerte beginnt erneut. Verbessern sich die Kombinationen aus Faktorstufen und Ergebniswerten nicht mehr wesentlich oder ist eine maximale Anzahl an Generationen erstellt worden, so bricht der Algorithmus ab. Dieses stochastische Optimierungsverfahren ist zudem in der Lage, lokale Optima zu überwinden, nutzt dabei aber auch eine Vielzahl ($>>1000$) an Systemauswertungen. Eine (Nach-)Simulation der vom Optimierer ermittelten optimalen Konfigurationen sichert die Ergebnisse im Nachhinein ab.

6. Ergebnisse

Es zeigte sich, dass die iterative Modellbildung kombiniert mit Methoden der Versuchsplanung eine sehr genaue und (zeit-)effiziente Näherung des Systemverhaltens zulässt. Durch das Approximationsmodell, das nur ein Tausendstel der Simulationszeit für die Berechnung der Zielgrößen benötigt als das ursprüngliche Simulationsmodell, werden komplexe, variierende Analyseverfahren ermöglicht, insbesondere die multikriterielle ungewichtete Optimierung der Systemkonfigurationen. Deren Ergebnis ist eine Pareto-Front der Konfigurationen, die einen nicht mehr zu verbessernden Kompromiss bzgl. der gewählten Bewertungskriterien, hier Primärenergiefaktor und Wärmepreis, darstellen, siehe Abbildung 5. So sind alle Lösungen oberhalb der Front ineffizienter während alle Lösungen unterhalb nicht realisierbar sind. Die unten dargestellten Ergebnisse gelten für die hier gewählten Randbedingungen des zu versorgenden Nahwärmenetzes, der Kosten, der Witterungsbedingungen, etc.

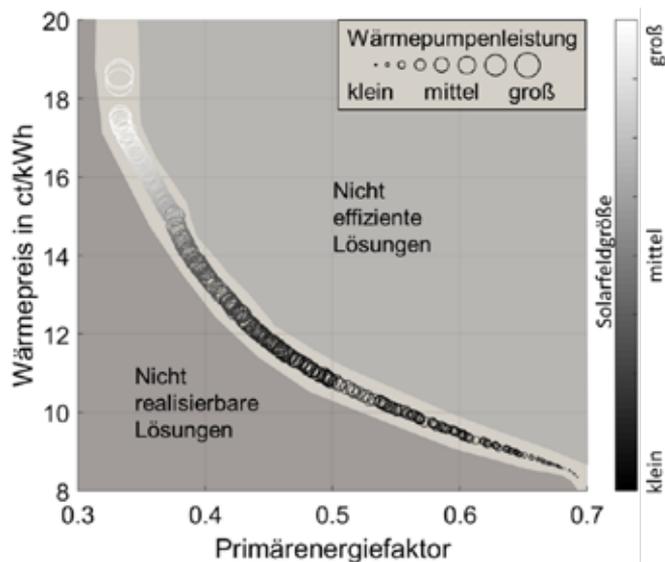


Abbildung 5 Pareto-Front der Systemkonfigurationen zur Versorgung des Nahwärmenetzes

Jeder Kreis in Abbildung 5 stellt eine Systemkonfiguration dar. Der Kreisdurchmesser steht für die Wärmepumpenleistung und dessen Farbe für die Größe des Solarfeldes. Das Solarspeichervolumen variiert ebenfalls, ist hier wegen der Analogie zur Solarfeldgröße aber nicht dargestellt. Die Konfigurationen mit dem höchsten Primärenergiefaktor aber niedrigsten Wärmepreis (untere rechte Ecke in der Abbildung) bilden Systeme, die ausschließlich das KWK-Modul und den Gas-Kessel enthalten. Von diesem Punkt ausgehend und entlang der Front steigt die Wärmepumpenleistung (größer werdende Kreise) an, während das Solarfeld zunächst klein oder gar nicht (schwarze Kreise) vorhanden ist. In diesem Abschnitt der Pareto-Front ist der Einsatz einer Wärmepumpe effektiver als eine Solarthermieanlage, was auch an der flachen Steigung (moderate Steigerung im Wärmepreis bei starker Verbesserung des Primärenergiefaktors) der Front erkennbar ist. Dies geschieht bis zu einem Primärenergiefaktor von ca. 0,45 und einem Wärmepreis von ca. 12 ct/kWh. Oberhalb von diesem Punkt bleibt die Wärmepumpenleistung annähernd konstant (gleicher Kreisdurchmesser) während das Solarfeld stetig wächst (Kreisfarbe zunehmend heller). Eine größere Solarthermieanlage ist in diesem Bereich effizienter als eine größere Wärmepumpe.

Mittels der Pareto-Front kann nun die passende Konfiguration für das Energieversorgungssystem durch Auswahl der gewünschten Primärenergiefaktor-Wärmepreis-Kombination festgelegt werden. Ein methodischer Vorteil ist das beachtliche Visualisierungspotential. Durch den Aufbau als Pareto-Front können Polyoptima anschaulich dargestellt und Zusammenhänge einfach abgelesen werden.

7. Ausblick

Die nächsten Schritte der Autoren betreffen die Weiterentwicklung der Methodik hin zu einer besseren Anwendbarkeit bei Simulationen mit langen Simulationszeiten (>1h), einer robusten Optimierung und einer noch einfacheren Anwendbarkeit. Durch die robuste Optimierung wird es möglich sein, auch robuste, also möglichst von schwankenden Randbedingungen (z.B. Wetter, Energiepreis) unabhängige Best-Konfigurationen zu liefern. Ein weiterer geplanter Schritt ist die Verallgemeinerung der Methode hin zu einer möglichen Verwendung mit jeglicher Simulationssoftware sowie die Verbesserung der Versuchsplanungsmethoden.

8. Quellenverzeichnis

- /1/ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Förderbekanntmachung zu den Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0 („Wärmenetze 4.0“), 27. Juni 2017, Berlin
- /2/ U. Jordan*, K. Vajen**, DHWcalc: Software zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis, *Technical University of Denmark DTU, **Universität Kassel, 2003, Kostenlos Downloadbar unter <https://www.uni-kassel.de/maschinenbau/en/institute/ite/fachgebieteleitung/about-us/downloads.html>
- /3/ DIN V 4701-10 Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnische Anlagen Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, August 2003, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- /4/ P. Voll, „sOptimo: Strukturoptimierung von Energieversorgungssystemen - am Beispiel von Industrieparks,“ 2013.
- /5/ A. Konak, D. W. Coit, A. E. Smith: Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, In Reliability Engineering & System Safety, Volume 91, Issue 9, 2006, Seite 992-1007, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.018>