

# Entwicklung von zukunftsfähigen Versorgungsstrategien für Fernwärmenetze – Tools und Methoden –

Ralf-Roman SCHMIDT<sup>1</sup>, Steffen ROBBI<sup>1</sup>, Rene HOFMANN<sup>1/2</sup>, Martin KOLLER<sup>2</sup>,  
Roman GEYER<sup>1</sup>, Daniele BASCIOTTI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy,  
Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria, T +43 (0) 50550-6695, F +43 (0) 50550-6679,  
[Ralf-Roman.Schmidt@ait.ac.at](mailto:Ralf-Roman.Schmidt@ait.ac.at), [www.ait.ac.at](http://www.ait.ac.at)

<sup>2</sup>TU Wien/Institut für Energietechnik und Thermodynamik,  
Getreidemarkt 9/E302, 1060 Wien, T +43 (0) 1 58801 302327, F +43 (0) 1 58801 30299,  
[rene.hofmann@tuwien.ac.at](mailto:rene.hofmann@tuwien.ac.at), [www.iet.tuwien.ac.at](http://www.iet.tuwien.ac.at)

## **Kurzfassung:**

Zum Erreichen der COP-21 Ziele kommt der „Wärmewende“ eine zunehmende Bedeutung zu. Hierbei bieten Wärmenetze die Möglichkeit, alternative bzw. CO<sub>2</sub>-arme Energieträger wie Solar- und Geothermie, Umweltwärme und Abwärme zu integrieren, gleichzeitig wird erwartet, dass durch die Sektorenkopplung ein signifikanter Beitrag zur Sicherung der Systemstabilität und Flexibilität im Stromnetz geleistet werden kann.

Viele Fernwärmenetze sind historisch gewachsen und unterliegen diversen individuellen Randbedingungen (technisch, regulativ) und Einflussparametern (Energemarkt und Kunden), des Weiteren sind unterschiedliche Entscheidungskriterien und Stakeholder (Netzbetreiber, Kunden, Stadt, Land) zu berücksichtigen. Entsprechend ist die Entscheidungsfindung für neue Erzeugungstechnologien sehr komplex und Bedarf einer transparenten und konsistenten Herangehensweise.

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die eine klar strukturierte Entwicklung von zukunftsfähigen Versorgungsstrategien für Fernwärmenetze erlaubt und sich in die folgenden drei wesentliche Stufen gliedert: 1. Analyse der Randbedingungen, 2. Entwicklung von Technologieszenarien und 3. Entscheidung zum finalen Konzept. Es werden die unterschiedlichen Schritte sowie Lösungsansätze und Tools für jede Stufe dargestellt.

**Keywords:** Wärmewende, Fernwärme, Transformationsstrategien, Versorgungssicherheit, Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit

## **1 Einführung**

### **1.1 Die Dekarbonisierung der Fernwärme**

Die internationale Staatengemeinschaft hat sich darauf verständigt, den durch den Menschen verursachten Klimawandel auf 2 °C gegenüber dem Niveau vor der Industrialisierung zu begrenzen (UNFCCC, 2015). Neben der somit notwendigen Dekarbonisierung des Stromsektors kommt auch der „Wärmewende“, also der Dekarbonisierung der Erzeugung von

Prozess- und Raumwärme sowie Warmwasser, eine zunehmende Bedeutung zu. Derzeit ist in der EU28 der Bedarf an thermischer Energie in Gebäuden (inkl. Kälte) und der Industrie ca. doppelt so groß wie der gesamte Strombedarf (Connolly, 2017).

Obwohl Europaweit die Fernwärme nur für ca. 13% der Wärmelieferung im Wohnbau und Dienstleistungssektor verantwortlich ist (Werner, 2017), sind Fernwärmnetze mit über 6.000 Systemen (davon mehr als 2.400 Netze in Städten mit über 5.000 Einwohnern) ein wichtiges Rückgrat der Energieversorgung von Städten in Europa, in Österreich existieren neben einer Vielzahl an ländlichen Biomasse basierten Systemen in fast allen Städten Fernwärmenetze. Während derzeit die Fernwärmeversorgung in Österreich zu 51% aus fossilen Quellen stammt (davon 39%-Punkte aus Erdgas, (FGW, Facherband Gas Wärme, 2017)<sup>1</sup>), basiert insbesondere in Deutschland die Fernwärme neben Erdgas (39,6%) zu großen Teilen auf Braun- und Steinkohle (26,9%, (BMW, 2017)). Während Erdgas insbesondere für große Fernwärmenetze als Brückentechnologie angesehen wird und (zumindest in Österreich) langfristig durch Bio- bzw. Synthesegas substituiert werden könnte (Tichler, 2017), (Kranzl, Müller, Maia, Büchele, & Hartner, 2018), gerät die Verwendung von Kohle auf nicht nur auf Europäischer Ebene (EC, Directorate-General for Energy in the European Commission, 2017), sondern auch zunehmend in Deutschland unter Druck, z.B. (München.de, Portal München Betriebs-GmbH & Co. KG, 2017), (WDR, 2018).

Auf der anderen Seite bieten Wärmenetze die Möglichkeit alternative und CO<sub>2</sub>-arme Energieträger wie Solar- und Geothermie, Großwärmepumpen und Abwärme zu integrieren, deren Nutzung in Einzelgebäuden sich wirtschaftlich nicht realisieren lassen. So geht (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, 2017) davon aus, dass bis zum Jahr 2050 rund 88% der Wärme in den Wärmenetzen Deutschlands aus Erneuerbaren Energien, Ab- und Umweltwärme sowie aus der Abfallverwertung stammen können. Gleichzeitig wird erwartet, dass durch die Sektorenkopplung über KWK-Anlagen, Wärmespeicher und Power-to-Heat-Module ein signifikanter Beitrag zur Sicherung der Systemstabilität und Flexibilität im Stromnetz geleistet werden kann, siehe auch (AEE, Agentur für Erneuerbare Energien e.V., 2017) (Totschnig, et al., 2017).

## 1.2 Fallbeispiel Chemnitz

Die eins energie in Sachsen GmbH & Co. KG (eins) betreibt in Chemnitz ein Fernwärmesystem mit einer Netzeinspeisung von 885 GWh, einer der wichtigsten Energieträger ist derzeit Braunkohle (Patzig, 2016). Aufgrund der entsprechend hohen CO<sub>2</sub> Emissionen und dem hohem Alter der Anlagen hat die eins die GEF Ingenieur AG (GEF) und das Austrian Institute of Technology GmbH (AIT) Anfang 2016 beauftragt, bei der Entwicklung einer konsistenten Zukunftsstrategie für das Fernwärmesystem Chemnitz zu unterstützen, die die Randbedingungen des energiewirtschaftlichen und -politischen Umfelds sowie die Entwicklung des Wärmebedarfs berücksichtigt und gleichzeitig die Nutzung CO<sub>2</sub>-armer Wärmequellen forciert (Patzig, Ochse, Ziegler, Robbi, & Schmidt, 2018).

---

<sup>1</sup> Aufgrund unterschiedlicher statistischer Herangehensweisen bzw. Datengrundlagen können in der Literatur z.T. andere Zahlen gefunden werden, siehe z.B. (Hartner, et al., 2015), (bmdw, Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Abteilung III/2 - Energiebilanz und Energieeffizienz, 2016)

### 1.3 Transformationsstrategien für Wärmenetze

Neben der oben angeführten Notwendigkeit zur Dekarbonisierung der bestehenden Wärmenetze bzw. dem Ausstieg aus der Kohle stehen die Systeme zunehmend weiteren Herausforderungen gegenüber, wie der unsicheren Preisentwicklung von Strom, Erdgas und biogenen Brennstoffen sowie dem sinkenden spezifischen Wärmebedarf im Bestand und Neubau (Schmidt, Neue Netzarchitekturen für zukunftsfähige Wärmesysteme, 2017). Zur Sicherung der Zukunftsfähigkeit von Wärmenetzen ist es entsprechend notwendig, individuelle Transformationsstrategien zu entwickeln, die neben der Steigerung der Energieeffizienz in der gesamten Umwandlungskette eine signifikante Integration erneuerbarer Wärmequellen (wie Solar/ Geothermie, Umgebungswärme über Wärmepumpen) sowie Abwärme aus Industrie- und Gewerbeprozessen und power-to-heat (z.B. über Wärmepumpen) forcieren. Somit kann das Erzeugungsportfolio diversifiziert und Investitionsrisiken minimiert werden (Rab, 2017).

Insbesondere in städtischen Energiesystemen sind hierbei jedoch diverse Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Erzeugern und Verbrauchern (inklusive Mobilität) zu berücksichtigen. So zeigen zeitlich hochaufgelöste, multisektorielle Simulationsrechnungen von (Stryi-Hipp, 2015), dass eine Vollversorgung der Stadt Frankfurt mit erneuerbaren Energien (Strom, Wärme und Verkehr) im Jahr 2050 möglich ist, allerdings entstehen hierbei sehr große Kosten. Jedenfalls müssen Energien aus dem Bundesland importiert werden, mit den eigenen erneuerbaren Energien-Potenzialen in der Stadt kann diese ca. 30% des Strombedarfs und ca. 31% des Wärmebedarfs decken.

Ein sehr ambitioniertes Beispiel für eine Transformationsstrategie zu sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energieträger ist das Grazer Wärmenetz. Aufgrund der unsicheren Zukunft der wichtigsten KWK-Anlage wurden seit 2013 neben unterschiedlichen Effizienzmaßnahmen diverse alternative Erzeugungsoptionen entwickelt und z.T. bereits umgesetzt (Götzhaber, et al., 2017). U.a. sind hier zu nennen eine verstärkte Abwärmenutzung (Stahl- und Papierwerk, Müllverbrennung, Kläranlage, Gasproduktion) und die Installation einer Power-to-Heat Anlage. Des Weiteren sehen aktuelle Planungen die weltweit größte Solarthermieanlage vor, die ab 2020 mit 450.000 m<sup>2</sup> Kollektorfläche und einem 1,8 mil. m<sup>3</sup> großem Saisonspeicher bis zu 20% des Grazer Fernwärmebedarfs (hauptsächlich in der Übergangszeit und im Winter) decken soll (Poier, 2017). Obwohl die Vorbereitungen für die Solarthermieanlage laufen (Stadler & Eijbergen, 2017), ist deren Realisierung derzeit noch ausständig.

Ein wesentlicher Schritt für die Transformation des Linzer Fernwärmenetzes kann die Integration großer Mengen Abwärme aus Gewerbe- und Industriebetrieben im Stadtgebiet sein, was gegenwärtig allerdings aufgrund der bestehenden Grundlasterzeugung aus der Müllverbrennung unwirtschaftlich ist. Eine Untersuchung von (Köfinger, et al., 2018) zeigt, dass die Integration eines 2,6 mil. m<sup>3</sup> großen Saisonspeichers einen Abwärmeanteil an der Fernwärmeerzeugung in Linz von ca. 25% ermöglicht. Durch die Einbindung in die bestehenden KWK-Prozess und eine optimierte Betriebsführung kann die Amortisationszeit des Speichers signifikant auf 20 Jahre reduziert werden, wobei sich auch hier eine Senkung der Netztemperaturen positiv auswirkt. Grundsätzliche ist aber zu erwähnen, dass große Risiken hinsichtlich der Entwicklungen der Energiepreise und des Emissionshandels sowie Unsicherheiten bzgl. der erforderlichen Verfügbarkeit der Industriellen Abwärme bestehen.

Eine Untersuchung von (Paar & Ochse, 2013) am Beispiel der Fernwärmenetze Jena und Ulm zeigt, dass bestehende Grundlast-Erzeuger wie KWK-Anlagen, Müllverbrennung oder

industrielle Abwärme, mit alternativen Wärmequellen wie Solarthermie, Abwärme aus Abwasser oder Geothermie konkurrieren. Eine fehlende Vergütung für EEG-Strom verschlechtert somit die Bewertung alternativer Wärmequellen gegenüber traditionellen Erzeugungsanlagen weiter. Des Weiteren wird herausgestrichen, dass aufgrund der individuellen Randbedingungen der Wärmenetze für jedes Systeme spezifische Ansätze entwickelt werden müssen. Die dazu vorgeschlagene Methode zur Entwicklung einer Transformationsstrategie basiert auf einen Entscheidungsbaum. Dieser setzt die Potentialanalyse erneuerbarer Energieträger (EE-Anlagen) in den Mittelpunkt, nach ggf. notwendigen Netzoptimierungen werden verschiedene Varianten zur schrittweisen Integration von EE-Anlagen bzw. dem kompletten Ersatz konventioneller Anlagen untersucht.

## 2 Methodik

Viele Fernwärmenetze sind historisch gewachsene Strukturen, deren Transformation diversen Randbedingungen (technisch, regulativ) und Einflussparametern (Energemarkt und Kunden) unterliegt, des Weiteren sind unterschiedliche Entscheidungskriterien (Wirtschaftlich, Ökologisch) und Stakeholder (Netzbetreiber, Kunden, Stadt, Land) zu berücksichtigen. Entsprechend ist die Entscheidungsfindung für neue Erzeugungstechnologien sehr komplex und Bedarf einer transparenten und konsistenten Herangehensweise. In diesem Abschnitt wird eine Methode vorgestellt, die eine klar strukturierte Entscheidungsfindung erlaubt und sich in die folgenden drei Phasen gliedert, siehe Abbildung 1.

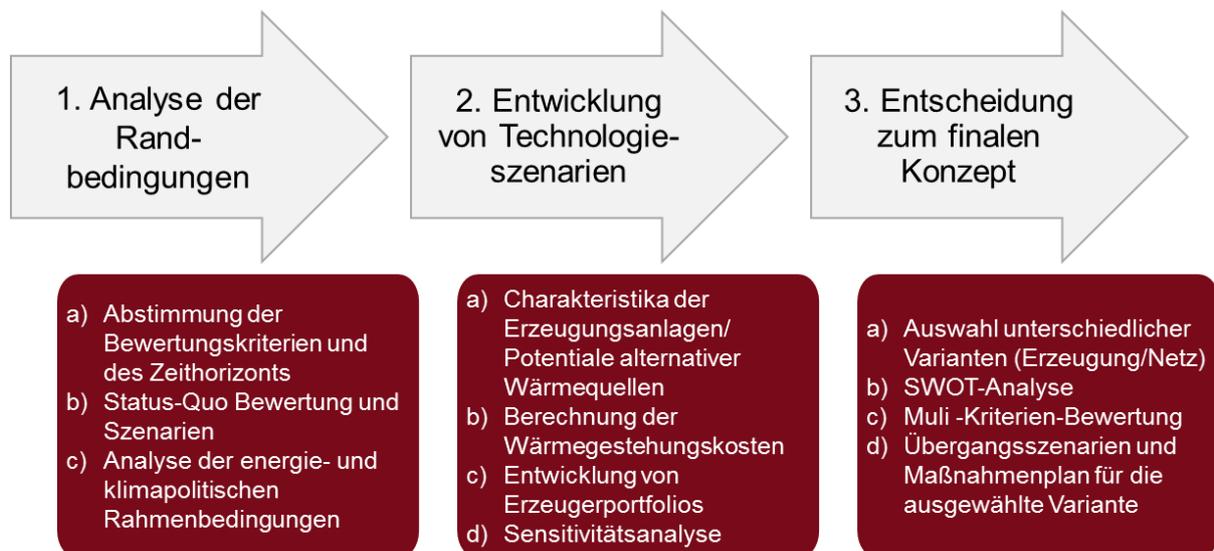


Abbildung 1 – Überblick zur Methodik

### 2.1 Analyse der Randbedingungen

Die erste Phase schafft elementare Grundlagen für die weiteren Betrachtungen in Phase 2 und 3 und inkludiert folgende Aspekte:

a) Abstimmung der Bewertungskriterien und des Zeithorizonts: Unter Einbeziehung der beteiligten Stakeholder (Wärmenetzbetreiber, Energieversorger, Vertreter der Stadt etc.) werden die wesentlichen Bewertungskriterien diskutiert und festgelegt, dieses inkludiert z.B. ökonomische Kriterien (wie z.B. Wärmegestehungskosten, Investitionsrisiko), ökologische

Kriterien (wie z.B. Anteil erneuerbarer Energien, CO<sub>2</sub>-Emissionen), technische Kriterien (wie z.B. Lastflexibilität und Ausfallrisiko) und sonstige Kriterien (wie z.B. soziale Akzeptanz und schnelle Umsetzbarkeit). Ebenso werden die Berechnungsmethodik und –parameter sowie die Gewichtung innerhalb und zwischen den Kriterien definiert.

Des Weiteren wird der zu betrachtende Zeithorizont der Szenarien und ggf. Zielwerte für die Bewertungskriterien abgestimmt, so sind neben kurzfristigen Entwicklungen (z.B. 2020) für die unmittelbaren Investitionsentscheidungen auch mittel- bis langfristige Entwicklungen (z.B. 2030/40/50) für die Erstellung der Gesamtstrategie von Bedeutung.

b) Status-Quo Bewertung und Szenarien: Die bestehenden Erzeugungsanlagen sowie die Netzinfrastruktur und die Verbraucherstrukturen werden mit Hilfe der in Schritt a) genannten Kriterien bewertet. Darauf folgt die Analyse der zu erwartenden technischen Lebensdauer bzw. notendige Revisionsarbeiten der Anlagen und Infrastruktur im betrachteten Zeithorizont.

Wesentlicher Bestandteil ist die Erstellung von Szenarien zur Entwicklung des Wärmebedarfs der Verbraucher. Hierfür kommen unterschiedliche Ansätze in Frage, von der Annahme pauschaler Raten für Sanierungen und Neuanschlüsse/ Verdichtungen, über die Nutzung von Kennzahlen innerhalb detaillierter Wärmeatlanten wie z.B. in (Möller, 2015), (Büchele, Bons, & al, 2015) oder mit Hilfe von 3D Stadtmodellen, die die Simulation des Wärmebedarfs einzelner Gebäude ermöglichen siehe z.B. (Agugiaro, Hauer, & Nadler, 2015).

Des Weiteren erfolgt eine Abschätzung zur Reduktion der Netztemperaturen. Hierbei handelt es sich um eine wichtige Voraussetzung zur vermehrten Nutzung alternativer Wärmequellen (Lund, et al., 2014), siehe auch Schritt 2a). Die Temperaturen im Wärmenetz werden im Wesentlichen von den angeschlossenen Gebäuden bestimmt, wobei technische Maßnahmen zur Reduktion der gebäudeseitigen Temperaturniveaus grundsätzlich bekannt und gut beherrschbar sind. Es existieren allerdings nur sehr wenige Ansätze, die konkreten Potentiale und Kosten von Maßnahmen zur Senkung der Temperaturniveaus zu quantifizieren, siehe z.B. (Basciotti, et al., 2016). Insbesondere fehlen belastbare bzw. übertragbare Zusammenhänge zwischen den Kosten und Effekten von Optimierungsmaßnahmen auf Gesamtnetzebene. Entsprechend werden oftmals lineare Fortschreitungen vergangener Entwicklungen oder Erfahrungswerte aus vergleichbaren Netzen verwendet.

c) Analyse der energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen: Dieses betrifft im Wesentlichen Steuern und Subventionen auf Ebene der EU, des Bundes, des Landes sowie auf kommunaler bzw. regionaler Ebene. Realistische Szenarien für die politischen und regulativen Entwicklungen sind zu definieren und den relevanten Stakeholdern zur Abstimmung vorzulegen. Darauf aufbauend erfolgt eine präzise Abbildung der jeweiligen Auswirkungen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung (Schritt 2b).

Ein wichtiger Fokus in diesem Schritt liegt auf den Strom- und Brennstoffpreisen (Biomasse, Erdgas), sowie Entsorgungsgebühren für die Müllverbrennung sowie Netzanschlussgebühren (Strom und Gas). Insbesondere für die Bewertung von KWK-Anlagen und power-to-heat Anwendungen ist neben der Prognose von Jahresmittelwerten des Strompreises (siehe Abbildung 2) die Abschätzung der stündlichen Profile entscheidend, da die Fluktuationen am Strommarkt für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen wesentlich ist. Entsprechende Profile können vereinfacht mit Hilfe von Prognosen der Häufigkeitsverteilung basierend auf vergangenen Entwicklungen (z.B. (Takle, 2017)) oder mittels

Fundamentalmodellen erstellt werden (z.B. (Burgholzer & Auer, 2016)). Für letzteren Ansatz sind Annahmen für Primärenergiepreise und die Kraftwerksentwicklung im Zielland und seinen Nachbarländern zu treffen und mit den Stakeholdern abzustimmen.

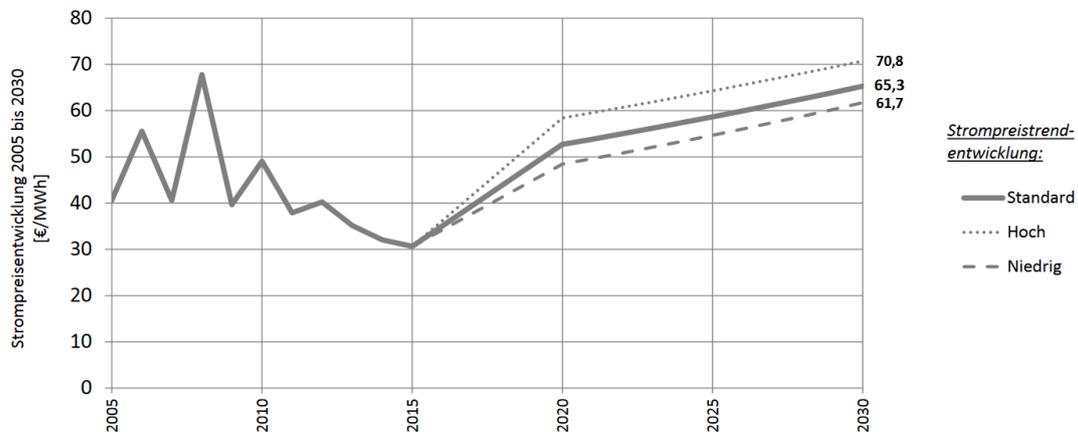


Abbildung 2 Trendszenarien der Strompreisentwicklung Österreich (Haas, et al., 2017)

## 2.2 Entwicklung von Technologieszenarien

In der zweiten Phase werden unterschiedliche Technologieszenarien bzw. Erzeugerportfolios als Grundlage der Entscheidungsfindung in Phase 3 entwickelt. Dieses inkludiert:

a) Charakteristika der Erzeugungsanlagen/ Potentiale alternativer Wärmequellen: In diesem Schritt erfolgt die Recherche und Zusammenführung der techno-ökonomischen Charakteristika relevanter Erzeugungsanlagen. Der Fokus hierbei liegt auf den (Teillast-) Wirkungsgraden sowie Investitions- und Betriebskosten von KWK-Anlagen – auf unterschiedlichen Größenskalen (Blockheizkraftwerke (BHKWs), Gas-und-Dampf (GuD)-Kraftwerke) und mit unterschiedlichen Brennstoffen (Erdgas, Biomasse) – Spitzenlastkesseln, Müllverbrennung, Großwärmepumpen und Solarthermie. Neben der Nutzung von entsprechenden Datenbanken, wie z.B. (Große & Geyer, 2017) kann es zur Erhöhung der Genauigkeit notwendig sein konkrete Angebote für Einzeltechnologien einzuholen.

Des Weiteren ist es wichtig, die verfügbaren bzw. technischen Potentiale der relevanten Wärmequellen abzuschätzen, das betrifft insbesondere:

- *Biomasse und Müll*: Die mittel- und langfristige Verfügbarkeit innerhalb der Stadt bzw. in näherer Umgebung. Ggf. können auch weitere Importstrecken in Betracht gezogen werden, was aber den Nachhaltigkeitsgedanken konterkariert.
- *Solarthermie*: Da Dachflächen innerhalb der Stadt i.A. keine relevanten Potentiale bieten bzw. diese nur sehr schwer wirtschaftlich zu heben sind, kommen für die Nutzung von Solarthermie im Wesentlichen Freiflächen in Frage. Weiters sind die lokalen Einstrahlungscharakteristika und Eigentumsverhältnisse zu berücksichtigen, siehe auch (Schmidt, Gölles, Provasnek, Leoni, & Putz, 2017).
- *Tiefe Geothermie*: Die hydrogeologischen Voraussetzungen für die Nutzung von Geothermie variieren regional sehr stark, so dass die verfügbaren Potentiale genau eruiert werden müssen, z.B. über nationale oder regionale Kataster. Grundsätzlich ist allerdings anzumerken ist, dass die Potentiale nicht immer Präzise vorausgesagt werden

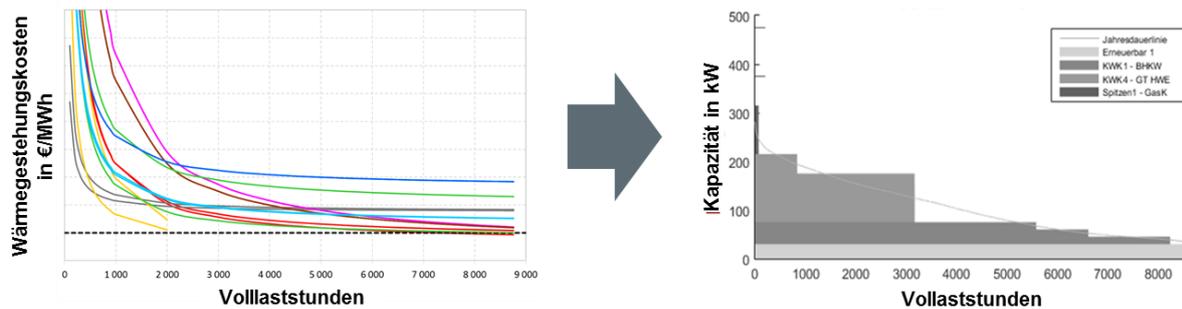
können, der technische Aufwand für die Bohrungen im Vergleich zu anderen Technologien aber hoch ist, was in einem hohen Risiko von Fehlbohrungen resultiert.

- *Abwärme*: Hierfür kommen der produzierende Sektor (z.B. Stahl- und Zementwerke, lebensmittelverarbeitende Betriebe) und der Dienstleistungsbereich (z.B. Wasch- und Reinigungsprozesse, Großküchen, Rechenzentren, Klimatisierungs- und Kühlanlagen ...) in Frage. Die Potentialbestimmung kann entweder mit Hilfe von verfügbaren Abwärmeatlanten, siehe z.B. (Büchele, et al., 2015) oder über Kennzahlen erfolgen, siehe z.B. (Loibl, Stollnberger, & Österreicher, 2017). Bei Niedertemperaturquellen werden allerdings Wärmepumpen zur Nutzbarmachung benötigt.
- *Wärmepumpen*: Besonders relevante Wärmequellen sind hierbei neben industrieller Abwärme (siehe oben), Abwärme aus Abwasserkanäle oder Kläranlagen, siehe z.B. (Ochsner, 2013) und Abwärme aus Meer- oder Flußwasser, siehe z.B. (Wilk, Windholz, Hartl, & Fleckl, 2015). Die Außenluft und das Erdreich werden in der Fernwärme aufgrund der geringeren Quelltemperaturen nur bedingt eingesetzt (Averfalk, 2014). Des Weiteren kann Abwärme aus dem Kraftwerksprozess selber genutzt werden, wie z.B. aus der Rauchgaskondensation, z.B. (Fleckl, et al., 2014 ) oder dem Kühlwasser, z.B. (Wien Energie, 2017).

Den genannten Quellen (außer Biomasse und Müllverbrennung) ist gemein, dass a) die Wirtschaftlichkeit sehr stark von den Netztemperaturen abhängt, b) die Erzeugerprofile nicht (einfach) kontrollierbar sind und sich somit im Regelfall Überschüsse im Sommer ergeben bzw. eine Konkurrenz untereinander besteht und c) oftmals kleinskalig bzw. dezentral vorliegen, so dass auf die Nähe zum Wärmenetz und hydraulische Restriktionen zu achten ist. Diese Aspekte sind in den folgenden Schritten zu berücksichtigen.

b) Berechnung Wärmegestehungskosten: Mit Hilfe der in Schritt 1 entwickelten Daten (insbesondere Investitions- und Betriebskosten, (mittleren) Strom- und Brennstoffpreise, Steuern und Förderungen, sowie Potentiale bzw. Wirkungsgrade) werden die Wärmegestehungskosten der relevanten Erzeugungstechnologien und Wärmequellen aus Schritt 2 a) in Abhängigkeit der Volllaststunden ermittelt (Vollkostenrechnung, siehe Abbildung 3, links) – ggf. sind zusätzliche Investitionskosten für Speicher oder Transportleitungen zu berücksichtigen. Dieses ermöglicht einen groben Überblick zur Wirtschaftlichkeit der Anlagen und liefert die Eingangsdaten für den Schritt 2c).

c) Entwicklung von Erzeugerportfolios: Um die Anzahl möglicher Varianten zu reduzieren erfolgt eine Grobauswahl der Erzeugungsanlagen (Art, Anzahl und Kapazität) basierend auf der Jahresdauerlinie der Verbraucher und den wirtschaftlichen und technischen Randbedingungen aus dem vorherigen Schritt. Dieser Ansatz erlaubt eine relativ kurze Berechnungsdauer, so dass Optimierungstools eine große Anzahl von Stützjahren und Szenarien berücksichtigen können. Die Auswahl der Anlagen (Art und Kapazität) im kostenoptimalen Erzeugerportfolios erfolgt hierbei von unten (Grundlast) nach oben (Spitzenlast) mit den zuvor definierten Technologien (Abbildung 3, rechts). Hierbei ist der (n-1)-Fall zu beachten, d.h. die größte in der Variante vorkommende Anlage muss besichert werden um im Zuge eines Ausfalls keine Deckungslücke zu erhalten.



**Abbildung 3 – links: Volllaststunden der relevanten Erzeugungstechnologien in Abhängigkeit der Wärmegestehungskosten, rechts: Nutzung eines Optimierungstools (hier VarOpt<sup>2</sup>) zur Erstellung von Erzeugerportfolios**

d) Sensitivitätsanalyse: Basierend auf der Grobauswahl und Dimensionierung in Schritt 2c) erfolgt eine Sensitivitätsanalyse für unterschiedliche externe Randbedingungen aus Phase 1 (insbesondere Strom- und Brennstoffpreise sowie Wärmebedarf). Da für den optimalen Einsatz von KWK- und power-to-heat Anlagen die Betrachtung der stündlichen Strompreiskurven notwendig ist, wird für die Sensitivitätsanalyse eine Einsatz- bzw. Betriebsoptimierung verwendet. Hierfür existieren eine Reihe von Optimierungsprogrammen, die Faktoren wie Brennstoff-, Anfahr- und Wartungskosten, CO<sub>2</sub>-Zertifikate sowie die Stromvergütung bei KWK-Anlagen betrachten und Einsatzprognosen anhand der Verbrauchs- und Wetterdaten erstellen, siehe z.B. (procom, 2017), (TU Dresden, 2009). Dieses betrifft auch die Entscheidung zur Be- und Entladung von Speichern.

### 2.3 Entscheidung zum finalen Konzept

Die finale Konzeptentwicklung in Phase 3 fasst die Ergebnisse aus Phase 2 zusammen und vergleicht alle Szenarien. Dies inkludiert:

a) Auswahl unterschiedlicher Varianten (Erzeugung/Netz) Der erste Schritt hierbei ist die Entwicklung von sinnvollen Kombinationen von Erzeugungs- und ggf. Wärmenetzoptionen zu Wärmeversorgungsvarianten. Hierbei muss u.a. auf die Kompatibilität der Optionen geachtet werden, so lassen sich z.B. Inselnetzlösungen nur mit kleineren, modular aufgebauten Erzeugungsanlagen realisieren bzw. ist bei dezentralen Einspeisern die Netzhydraulik zu prüfen und ggf. Ausbaumaßnahmen zu berücksichtigen.

b) SWOT-Analyse<sup>3</sup> Die SWOT-Analyse wird im Rahmen der Strategieentwicklung zur Unterstützung der quantitativen Bewertung der unterschiedlichen Versorgungsvarianten durchgeführt. Hierfür werden insbesondere die qualitativen Kriterien aus Phase 1 verwendet. Es werden zwei Blickwinkel genutzt: Bei der *internen* Analyse werden die Stärken (Strengths) und Schwächen (Weaknesses) der Technologie betrachtet. Bei der *externen* Analyse werden die jeweiligen Chancen (Opportunities) und Risiken (Threats) analysiert. Diese Umweltfaktoren können vielfältig und beispielsweise technologischer, ökologischer, politischer oder sozialer Art sein. Diese externen Faktoren können nur bedingt bis gar nicht beeinflusst

<sup>2</sup> Eigenentwicklung AIT/ TU Wien

<sup>3</sup> engl. Akronym für Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Bedrohungen)

werden und daher kann darauf auch nur reagiert werden. Anstelle für jede einzelne Versorgungsvariante eine individuelle SWOT Analyse durchzuführen, ist es sinnvoller für die jeweiligen relevanten Erzeugungstechnologien bzw. Versorgungsoptionen selber die SWOT Analyse durchzuführen.

c) Multi-Kriterien-Bewertung. Für die finale Entscheidungsfindung wird eine normierte, gewichtete Entscheidungsmatrix aller sinnvollen Varianten bzw. Erzeugungsportfolios verwendet. Die Bewertung der einzelnen Portfolios erfolgt – wo möglich – auf quantitativen Daten aus Schritt 2d) – was insbesondere bei den wirtschaftlichen und ökologischen Parameter möglich ist, sowie auf den Ergebnissen der SWOT-Analyse aus Schritt 3a) – für die technischen und sonstigen Kriterien. Es erfolgt eine Gewichtung der Kriterien miteinander als auch der jeweiligen Subkriterien untereinander entsprechend Schritt 1a), um abschließend eine klare Reihung der unterschiedlichen Varianten zu erhalten. Mit den relevanten Stakeholdern wird so die Vorzugsvariante ausgewählt und ggf. für den nächsten Schritt konkretisiert.

d) Übergangsszenarien und Maßnahmenplan für die ausgewählte Variante. Für die Vorzugsvarianten erfolgte die Ableitung notwendiger Umsetzungsmaßnahmen (Detailstudien, Genehmigungen, Ausschreibungsverfahren usw.) und eines sinnvollen Zeitplans für eine Transformation der Bestandsanlagen und Installation von Neuanlagen. Dieser berücksichtigte neben der minimalen benötigten Kapazität zur Deckung der Wärmebedarfsszenarien auch eine n-1 Ausfallsicherheit und die Restlaufzeit der Bestandsanlagen bzw. allfälliger Förderungen.

### **3 Zusammenfassung**

Sich ändernde Marktbedingungen (fluktuierende Energiepreise, regulative Randbedingungen und ein tendenziell sinkender spezifischer Wärmebedarf) sowie der steigende Druck zur Senkung der CO<sub>2</sub> Emissionen bzw. dem Ausstieg aus der Kohle machen die Überdenkung gegenwärtiger Erzeugungsstrukturen in der Fernwärme notwendig.

In diesem Beitrag wird eine dreistufige Methode (1. Analyse der Randbedingungen, 2. Entwicklung von Technologieszenarien und 3. Entscheidung zum finalen Konzept.) zur Entwicklung von zukunftsfähigen Wärmeversorgungskonzepten für Fernwärmenetze im Zieldreieck Versorgungssicherheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit vorgestellt sowie die jeweiligen Schritte und geeigneten Tools erläutert.

Die genannte Methode wurde anhand des Fernwärmenetzes in Chemnitz (Deutschland) zur Erstellung eines mittel- und langfristigen Wärmeversorgungskonzeptes angewendet, die konkreten Ergebnisse unterliegen jedoch der Vertraulichkeit und können nicht beschrieben werden. Die mehrstufige Herangehensweise erlaubte jedenfalls eine klare Entscheidungsfindung, durch die Nutzung von eindeutigen Meilensteinen zwischen den jeweiligen Phasen und der transparenten Darstellung von Zwischenergebnissen, konnten die relevanten Stakeholder (Energieversorger, Wärmenetzbetreiber, Stadt Chemnitz) intensiv eingebunden werden. Die Verwendung von unterschiedlichen Simulationstools und Parametervariationen ermöglichte eine hohe Robustheit der Ergebnisse gegenüber energiewirtschaftlichen Änderungen.

Die wichtigsten Barrieren für die Integration alternativer bzw. CO<sub>2</sub> armer Wärmequellen in Wärmenetze sind suboptimale regulative bzw. steuerliche Anreize, hohe Strompreise für den Einsatz von Wärmepumpen (insbesondere in der Prognose), hohe Netztemperaturen, oftmals geringe bzw. unsichere Potentiale von Umgebungs- und Abwärmequellen, und die Konkurrenz der Wärmequellen untereinander im Sommer. Entsprechende Technologien für Saisonalspeicher sind zwar grundsätzlich verfügbar, aber für urbane Fernwärmenetze Investitionskostenintensiv und somit mit einem hohen Risiko behaftet. Des Weiteren kann der relativ große Platzbedarf eine Herausforderung darstellen.

#### 4 Literaturverzeichnis

- AEE, Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2017). *METAANALYSE Energiewende: Zusammenspiel von Strom und Wärmesystem*.
- Agugiaro, G., Hauer, S., & Nadler, F. (2015). Coupling of CityGML-based Semantic City Models with Energy Simulation Tools: some Experiences. *REAL CORP*.
- Averfalk, H. (2014). On the use of surplus electricity in district heating systems. *14th International Symposium on District Heating and Cooling*.
- Basciotti, D., Köfinger, M., Marguerite, C., Terreros, O., Agugiaro, G., & Schmidt, R. (2016). Methodology for the Assessment of Temperature Reduction Potentials in District Heating Networks by Demand Side Measures and Cascading Solutions. *CLIMA 2016*, . Aalborg, Denmark.
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft;. (2017). *Strategiepapier „Zukunft Wärmenetzsysteme“*. Berlin.
- bmdw, Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Abteilung III/2 - Energiebilanz und Energieeffizienz. (2016). *Energiestatus 2016*. Von [https://www.bmdw.gv.at/EnergieUndBergbau/Energiebericht/Documents/Energiestatus\\_2016\\_barrierefrei\\_Impressum.pdf](https://www.bmdw.gv.at/EnergieUndBergbau/Energiebericht/Documents/Energiestatus_2016_barrierefrei_Impressum.pdf) abgerufen
- BMWi. (4. 10 2017). *INFOGRAFIK - Energiedaten und -szenarien, Verwendung von Fernwärme in Deutschland*. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energietraeger/energiedaten-energietraeger-32.html> abgerufen
- Büchele, R., Bons, M., & al, e. (2015). *Bewertung des Potenzials für den und effizienter Fernwärme- und Fernkälteversorgung*. TU Wien.
- Büchele, R., Haas, R., Hartner, M., Hirner, R., Hummel, M., Kranzl, L., . . . Blok, K. (2015). *Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und effizienter Fernwärme- und Fernkälteversorgung*. Wien: TU Wien und Ecofys.
- Burgholzer, B., & Auer, H. (2016). Cost/benefit analysis of transmission grid expansion to enable further integration of renewable electricity generation in Austria. *Renewable Energy* 97, 189–196.
- Connolly, D. (2017). Heat Roadmap Europe: Quantitative comparison between the electricity, heating, and cooling sectors for different European countries. *Energy, Volume 139*,, Pages 580-593.

- EC, Directorate-General for Energy in the European Commission. (11. 12 2017). *Conference: Coal Regions in Transition Platform*. Von <https://ec.europa.eu/energy/en/events/conference-coal-regions-transition-platform> abgerufen
- FGW, Facherband Gas Wärme. (2017). *Zahlenspiegel - Erdgas und Fernwärme in Österreich*.
- Fleckl, T., Seichter, S., Benovsky, P., Hammerschmid, A., Ramerstorfer, C., Lachmair, T., & Ciepiela, T. (2014 ). *ICON - Rauchgaskondensation der Zukunft mit hohem Jahresnutzungsgrad durch Kombination mit einer Industriewärmepumpe*. Blue Globe Foresight, Studie #8/2014.
- Götzhaber, W., Meißner, E., Moravi, G., Prutsch, W., Schlemmer, P., Schmied, R., . . . Zimmel, M. (2017). *Wärmeversorgung Graz 2020/2030 - Wärmebereitstellung für die fernwärmeversorgten Objekte im Großraum Graz, Statusbericht 2017*. Graz: Grazer Energieagentur Ges.m.b.H.
- Große, R., & Geyer, R. (2017). *Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU*. Joint Research Centre (European Commission).
- Haas, R., Resch, G., Burgholzer, B., Totschnig, G., Lettner, G., Auer, H., & Geipel, J. (2017). *Endbericht Stromzukunft Österreich 2030 - Analyse der Erfordernisse und*. Wien.
- Hartner, M., Büchele, R., Haas, R., Hummel, M., Hirner, R., Müller, A., . . . Totschnig, G. (2015). *Fernwärme in Österreich – Status quo und Perspektiven bis 2050*. Von [https://eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at\\_pages/publications/pdf/HAR\\_PRE\\_2015\\_1.pdf](https://eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/publications/pdf/HAR_PRE_2015_1.pdf) abgerufen
- Köfinger, M., Baldvinsson, I., Basciotti, D., O.Terreros, Schmidt, R., Mayerhofer, J., . . . Pauli, H. (2018). Simulation based evaluation of large scale waste heat utilization: Optimized integration and operation of a seasonal storage. *Energy, article submitted*.
- Kranzl, L., Müller, A., Maia, I., Büchele, R., & Hartner, M. (2018). *Wärmezukunft 2050 - Erfordernisse und Konsequenzen der Dekarbonisierung von Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in Österreich*. Wien: TU Wien.
- Loibl, W., Stollnberger, R., & Österreicher, D. (2017). Residential Heat Supply by Waste-Heat Re-Use: Sources, Supply Potential and Demand Coverage—A Case Study. *Sustainability* 9, 250.
- 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, Volume* 68, 1-11.
- Möller, B. (2015). *Mapping the Heating and Cooling Demand in Europe*. STRATEGO project.
- München.de, Portal München Betriebs-GmbH & Co. KG. (5. 11 2017). *Bürgerentscheid "Raus aus der Steinkohle!"*. Von <http://www.muenchen.de/aktuell/2017-10/infos-zum-buergerentscheid-raus-aus-der-steinkohle.html> abgerufen
- Ochsner. (2013). *Energie aus Abwasser, Abwasser-Wärme- und –Kältenutzung mittels hocheffizienter Großwärmepumpen*. Blue Globe Report Erneuerbare Energien, Klima- und Energiefonds.

- Paar, A., & Ochse, S. H. (2013). *Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien*. Heidelberg, Leimen, Frankfurt am Main.
- Patzig, L. (2016). *Entwicklung einer Wärmeversorgungsstrategie für die Stadt Chemnitz; 2. PRAXIS- UND WISSENSFORUM FERNWÄRME & FERNKÄLTE, 15. November 2016, TECHbase Vienna, 1210 Wien*. Von [https://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/energy/downloads/News\\_and\\_Events/2016\\_11\\_15\\_2.Praxis\\_und\\_Wissensforum\\_FWK/B2\\_Patzig\\_\\_161115\\_Praesentation\\_Waermever\\_sorgungskonzept\\_eins.pdf](https://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/energy/downloads/News_and_Events/2016_11_15_2.Praxis_und_Wissensforum_FWK/B2_Patzig__161115_Praesentation_Waermever_sorgungskonzept_eins.pdf) abgerufen
- Patzig, L., Ochse, S., Ziegler, R., Robbi, S., & Schmidt, R.-R. (2018). Entwicklung der zukünftigen Fernwärmeversorgung für Chemnitz. *Euroheat&Power*.
- Poier, H. (2017). BIG SOLAR GRAZ – Results of a techno-economic feasibility for solar district heating. *3rd international conference on Smart Energy Systems and 4th generation district heating, Copenhagen, 12–13 September 2017*.
- procom. (2017). *BoFiT Optimierung*. Von <https://www.procom.de/produkte/bofit-optimierung/> abgerufen
- Rab, N. (2017). ABSICHERUNG VON LANGFRSITIGEN PREISRISIKEN DER FERNWÄRMEGESTEHUNG DURCH GROSSWÄRMEPUMPEN. *IEWT 2017 - 10. Internationale Energiewirtschaftstagung "Klimaziele 2050: Chance für einen Paradigmenwechsel?"*.
- Schmidt, R.-R. (2017). Neue Netzarchitekturen für zukunftsfähige Wärmesysteme. *Smart Energy Systems Week Austria*. Messe Congress Graz.
- Schmidt, R.-R., Göllles, M., Provasnek, A. K., Leoni, P., & Putz, S. (2017). Barriers and opportunities to maximize the share of solar thermal energy in district heating networks – approaches within the IEA SHC Task 55, Subtask A and selected preliminary results. *Solar World Congress 2017, 29.10. - 2.11.2017, Abu Dhabi, UAE*.
- Stadler, C., & Eijbergen, P. (2017). WIR ERNTEN DIE SONNE - PROJEKTE IN DÄNEMARK UND STATUS BIG SOLAR GRAZ. *3. FERNWÄRME/FERNKÄLTE PRAXIS- UND WISSENSFORUM*. Wien.
- Stryi-Hipp. (2015). *Berechnung zeitlich hochaufgelöster Energieszenarien im Rahmen des Projektes Masterplan 100%*. Frankfurt am Main: Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main.
- Takle, A. M. (2017). *Simulation based analysis of control strategies for Heat Pump integration in District Heating Networks*. Master thesis University of applied science upper Austria.
- Tichler, R. (2017). Dekarbonisierung des Raumwärmemarktes mit grünem Gas. *20. Österreichischer Biomassetag, 14. - 15. November 2017, Windischgarsten*.
- Totschnig, G., Büchele, R., Fritz, S., Kranzl, L., Müller, A., Nagler, J., . . . Blarke, M. B. (2017). *Potentiale, Wirtschaftlichkeit und Systemlösungen für Power-to-Heat, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, bmvit*. Von [http://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at\\_pages/research/downloads/PR\\_444\\_P2H-Pot-Publizierbarer\\_Endbericht\\_2017\\_update.pdf](http://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/research/downloads/PR_444_P2H-Pot-Publizierbarer_Endbericht_2017_update.pdf) abgerufen

- TU Dresden. (2009). *Optimierung der Einsatzplanung von Wärme-Erzeugern (FreeOpt - frei (free) nutzbare Software zur Optimierung des Erzeugereinsatzes)*. Von [https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/mldh/download\\_mldh](https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/mldh/download_mldh) abgerufen
- UNFCCC. (2015). *21st Conference of the Parties of the UNFCCC. In: The Paris Agreement of December 12th 2015 on Greenhouse Gases Emissions Mitigation, Adaptation and Finance*. Paris.
- WDR. (14. 1 2018). *NRW Trend: Mehrheit für Braunkohleausstieg*. Von <https://www1.wdr.de/nachrichten/landespolitik/nrw-trend-200.html> abgerufen
- Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling,. *Energy, Volume 137*, Pages 617-631.
- Wien Energie. (2017). *Sima/Gruber: Spatenstich für stärkste Großwärmepumpe Mitteleuropas*. Von <https://www.wienenergie.at/eportal3/ep/contentView.do/pageTypeld/67831/programId/74495/contentTypeld/1001/channelId/-53365/contentId/4200425> abgerufen
- Wilk, V., Windholz, B., Hartl, M., & Fleckl, T. (2015). *Techno - ökonomische Analyse der Integration von flusswassergespeisten Großwärmepumpen in FW-Netzen. 1. Praxis und Wissensforum Fernwärme/Fernkälte*. Wien.