



# Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieur

der Studienrichtung Energietechnik an der Technischen Universität Wien  
über das Thema

– Lei(s)tungswasser –

Das Potential einer zentralen Trinkwasservorwärmung

eingereicht am

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Energy Economics Group (EEG)

Begutachter

Prof. Reinhard Haas

Assistent

Mag. Dr. Michael Hartner

von

Froschauer Manuel

0850729

Wien, September 2018



## Kurzfassung

Aktuell wird das Wasserversorgungssystem nicht als potentieller Energieträger betrachtet, obwohl die Wärmekapazität von Wasser relativ hoch ist und damit schon bei geringer Menge viel Energie transportiert werden kann. Das zentrale Wasserversorgungssystem als Energieträger zu verstehen, würde es Städten ermöglichen, bislang ungenutzte niedertemperierte Energieressourcen zu erschließen und neue Geschäftsmodelle am Energiemarkt zu entwickeln.

Entsprechend dieser Überlegung stelle ich die Hypothese auf, dass eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung erhebliche ökonomische sowie ökologische Einsparpotentiale birgt. Wenn das Leitungswasser an zentralen Stellen vorgewärmt wird, verringert das in der Folge den Energieeinsatz an Gas, Fernwärme, Elektrizität und sonstigen Energieträgern für die Warmwasserbereitung in den Haushalten und Industriebetrieben. Für eine zentrale Vorwärmung kommen dabei günstige Wärmequellen in Frage, die sich in der Nähe der Trinkwasserleitungen befinden und keinem anderen Zweck zugeführt werden können.

In dieser Arbeit prüfe ich die aufgestellte Hypothese von Einsparpotentialen einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung am Beispiel der Stadt Wien.

Zur Überprüfung der Hypothese recherchiere und verwerte ich Daten zum Wasserversorgungssystem, zum Wasserverbrauch, zur Warmwasseraufbereitung und zu möglichen Wärmequellen für eine Vorwärmung. In einem Rechenmodell werden die gewonnenen Erkenntnisse und die ermittelten Daten herangezogen, um Abschätzungen zu den Einsparungspotentialen zu liefern. Zusätzlich werden Überlegungen angestellt wie die Gesamtkosten der Trinkwassererwärmung minimiert werden können und welche Auswirkungen sich daraus ergeben.

Die Modellberechnungen zeigen, dass eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung ein theoretisch umsetzbares Einsparungspotential von etwa 1 % der urbanen CO<sub>2</sub>-Emissionen birgt. Dies würde aus einer 10 %-Reduktion des Nutzenergiebedarfs für den Verbrauchsbereich ‚Warmwasser und Kochen‘ resultieren. Eine Wärmeeinspeisung erweist sich bei Gestehungskosten unterhalb von 15 €/MWh als rentabel.





## Abstract

Currently, the water supply system is not considered as a potential source of energy. But the heat capacity of water is relatively high and therefore plenty of energy can be transmitted. Understanding the central water supply system as an energy carrier would enable cities to exploit previously unused low-temperature energy resources and develop new business models in the energy market.

According to this consideration, I hypothesize that a temperature-controlled water supply system has a considerable economical and ecological savings potential. By preheating the water at central locations, the energy consumption of gas, district heating, electricity and other sources for domestic hot water can be reduced. Cheap heat sources located near the water supply pipes that cannot serve any other purpose, qualify for a central preheating.

In this thesis I examined the established hypothesis of savings potential of a temperature-controlled water supply system using the example of the city of Vienna. To test the hypothesis, I researched and analyzed data on the water supply system, water consumption, hot water preparation and possible heat sources for preheating. In an optimization model estimated savings potentials were calculated by minimizing the total costs of water heating both centrally and locally.

The model calculations showed that a temperature-controlled water supply system has a theoretically feasible savings potential of about 1% of urban CO<sub>2</sub> emissions. This would result from a 10% reduction in useful energy demand for the consumption category of 'hot water and cooking'. A central heat feed-in proves to be profitable at production costs below 15 €/MWh.



# Inhaltsverzeichnis

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| KURZFASSUNG .....                                         | III |
| ABSTRACT .....                                            | V   |
| 1 EINLEITUNG .....                                        | 1   |
| 2 HYPOTHESE .....                                         | 3   |
| 2.1 HINTERGRUND.....                                      | 3   |
| 2.2 KONZEPT.....                                          | 4   |
| 2.3 AUSWIRKUNGEN .....                                    | 8   |
| 3 WASSERVERSORGUNG .....                                  | 13  |
| 3.1 VERSORGUNGSLEITUNGEN.....                             | 13  |
| 3.2 VERTEILNETZ.....                                      | 16  |
| 3.3 TEMPERATUREN IM WASSERVERSORGUNGSSYSTEM .....         | 16  |
| 3.4 ENERGIEEINTRAG ENTLANG DER VERSORGUNGSLEITUNG .....   | 18  |
| 3.5 ENERGIEEINTRAG UND –AUSTRAG IM VERTEILNETZ.....       | 24  |
| 4 WARMWASSERAUFBEREITUNG .....                            | 28  |
| 4.1 WASSERNUTZUNG .....                                   | 28  |
| 4.2 WARMWASSERBEREITUNG .....                             | 30  |
| 4.3 EMISSIONSKOSTEN IN DER WARMWASSERBEREITUNG .....      | 33  |
| 4.4 SUBSTITUTIONSPREISE .....                             | 34  |
| 5 POTENTIALE UND KOSTEN DER WÄRMEQUELLEN .....            | 36  |
| 5.1 KOSTENKOMPONENTEN DER VORWÄRMUNG .....                | 38  |
| 5.2 SOLARE EINSTRahlung .....                             | 40  |
| 5.3 INDUSTRIELLE ABWÄRME .....                            | 41  |
| 5.4 GEOTHERMISCHE WÄRME .....                             | 43  |
| 5.5 WÄRMEERZEUGUNG AUS STROM.....                         | 46  |
| 5.6 ZUKÜNFTIGE ABWÄRMEQUELLEN.....                        | 48  |
| 5.7 ZUSAMMENFASSUNG DER WÄRMEPOTENTIALE .....             | 48  |
| 6 MODELL.....                                             | 51  |
| 6.1 MODELLBESCHREIBUNG .....                              | 51  |
| 6.2 SZENARIENBESCHREIBUNG .....                           | 55  |
| 7 ERGEBNISSE .....                                        | 57  |
| 7.1 TEMPERATURÄNDERUNGEN .....                            | 58  |
| 7.2 ENERGIEEINSparungen DER LOKALEN WASSERBEREITUNG ..... | 60  |
| 7.3 EMISSIONSEINSparungen.....                            | 63  |
| 7.4 RESULTIERENDE ENERGIEEINSPEISUNG .....                | 63  |
| 7.5 ERFORDERLICHER LEISTUNGSZUBAU .....                   | 65  |

|     |                                |    |
|-----|--------------------------------|----|
| 7.6 | GESAMTSYSTEMKOSTEN .....       | 66 |
| 7.7 | ZENTRALER WIRKUNGSGRAD .....   | 68 |
| 7.8 | VERANSCHAULICHUNG .....        | 69 |
| 7.9 | RENTABILITÄTSKOSTEN .....      | 70 |
| 8   | ERKENNTNISSE.....              | 72 |
| 9   | SCHLUSS.....                   | 73 |
|     | BIBLIOGRAPHIE .....            | 74 |
|     | ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....    | 77 |
|     | ANHANG .....                   | 80 |
|     | EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG..... | 85 |

# 1 Einleitung

Bei der *Pariser Klimakonferenz 2015* hat sich die Staatengemeinschaft auf die Erreichung eines 2°C-Ziels zur maximalen Klimaerwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verständigt. Trotz der inzwischen erfolgten politischen Umbrüche scheint klar, dass dieses Ziel weiter verfolgt wird. Dafür bedarf es großer Anstrengungen, um die Treibhausgasemissionen, die als Hauptverursacher der Klimaerwärmung gelten, zu reduzieren. Erneuerbare Energieressourcen wären theoretisch in der Lage, den weltweiten Energiebedarf zu decken. So beträgt allein die solare Energieeinstrahlung etwa das Zehntausendfache des weltweiten Energieverbrauchs. Doch der größte Teil der alternativen Energieressourcen kann wirtschaftlich keinem sinnvollen Nutzen zugeführt werden, da das Temperaturniveau nicht hoch genug ist. So werden für eine effiziente Elektrizitätserzeugung aus Wärmequellen Temperaturen jenseits von 300°C benötigt. Derzeit wird der Wärmebedarf hauptsächlich aus fossilen Ressourcen, Biomasse, Elektrizität und Fernwärme gedeckt. Um in das Fernwärmenetz einzuspeisen, sind auch Temperaturen jenseits der 100°C erforderlich. Städte sind weltweit im Wachstum begriffen und so auch ihr Energiebedarf. Um die Ziele von geringerem Energieverbrauch, einem größeren Anteil an erneuerbaren Energien und einem geringeren Treibhausgasausstoß zu erreichen, stehen Städte vor großen Herausforderungen.

Wege, um den Energieverbrauch stetig zu senken, zeichnen sich im Gebäudebereich durch Dämmung, im Strombereich durch den Einsatz erneuerbarer Energien und im Verkehrsbereich durch digitale Vernetzung sowie alternative Antriebstechnologien ab. Hingegen weist der Bereich der Warmwasserbereitung, für den wir einen signifikanten Anteil unseres fossilen Ressourcenverbrauchs aufwenden, keine sonderlichen Einsparungsmöglichkeiten auf. Hier setzt diese Arbeit an, indem ein Vorschlag untersucht wird, wie der lokale Energiebedarf für Warmwasser und damit auch die CO<sub>2</sub>-Emission gesenkt werden können.

Bisher wird das Wasserversorgungssystem nicht als potentieller Energieträger betrachtet, obwohl die Wärmekapazität von Wasser relativ hoch ist. Das zentrale Wasserversorgungssystem als Energieträger zu betrachten, würde es Städten ermöglichen, ungenutzte Energieressourcen zu erschließen, die auf Grund ihrer niedrigen Enthalpie bisher ungenützt sind. Sobald das Trinkwasser vorgewärmt wird, verringert das den Energieeinsatz für die Warmwasserbereitung in den Haushalten durch Gas, Fernwärme, Elektrizität und Biomasse. Auf Grund der unterstellten Substitutionseffekte, stelle ich die Hypothese auf, dass eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung erhebliche ökonomische sowie ökologische Einsparpotentiale

birgt. Dabei bedeutet temperaturgeführt, dass in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen auf eine gewünschte Entnahmetemperatur vorgewärmt wird. Die Einsparpotentiale sollten sich ergeben, auch unter Berücksichtigung, dass nur ein Teil des Trinkwassers einer Erwärmung zugeführt wird.

Inhalt der vorliegenden Arbeit ist demnach die Beantwortung der Forschungsfrage, welche Einsparpotentiale eine solche, real umsetzbare temperaturgeführte Trinkwasserversorgung aufweist. Daraus leiten sich weitere Fragen zur Trinkwasserversorgung, zur Warmwasserbereitung, zu den potentiellen Wärmequellen sowie ihren Erschließungskosten und nach Auswirkungen einer solchen Systemänderung ab.

Mit der vorliegenden Diplomarbeit prüfe ich die aufgestellte Hypothese am Beispiel der Wiener Wasserversorgung. In KAPITEL 2 versuche ich den Hintergrund und die Idee, auf der diese Hypothese basiert, plausibel darzulegen, sowie die Auswirkungen einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung im Rahmen einer SWOT-Analyse darzustellen. KAPITEL 3 beschreibt die Wiener Wasserversorgung. Dabei stelle ich die Versorgung in Menge und Temperatur im Jahresverlauf dar und kann daraus Rückschlüsse auf die Energieeinträge bzw. -verluste auf Grund von verschiedenen Einflussfaktoren ziehen. In KAPITEL 4 behandle ich die Bereitstellung/Versorgung mit Warmwasser und damit den Energieaufwand, die Treibhausgasemissionen und die Kosten der Warmwasserbereitung. In der Folge suche ich in KAPITEL 5 nach Wärmequellen in der Wiener Umgebung, die für die temperaturgeführte Wasserversorgung genutzt werden können. Ausgehend von diesen Erkenntnissen erläutere ich in KAPITEL 6 das Prognose/Optimierungsmodell das ich erstellt habe, um die Hypothese zu prüfen. Anhand verschiedener Umsetzungsszenarien zeige ich in KAPITEL 7 die möglichen ökonomischen sowie ökologischen Einsparpotentiale und liefere damit eine Antwort auf die Forschungsfrage. Die Ergebnisse daraus bilden die Grundlage, um in KAPITEL 8 die wesentlichen Erkenntnisse zu präsentieren.

Der Hauptaufwand dieser Diplomarbeit steckt in

- a) der kreativen Anstrengung zur Erkennung der Potentiale,
- b) der Beschreibung des Wasserversorgungssystems sowie der Datenerhebung,
- c) der Modellierung des Wassersystems zur Abschätzung der Potentiale,
- d) den Ableitungen aus den angestellten Berechnungen.

Somit stellt diese Diplomarbeit den Versuch dar, die Idee einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung am Beispiel der Wiener Wasserversorgung wissenschaftlich zu untermauern und ihre Einsparungspotentiale aufzuzeigen. Es werden die Größenordnungen dargestellt, in denen sich das Konzept einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung bewegt, um damit die Relevanz dieser Idee zu verdeutlichen.

## 2 Hypothese

In diesem Kapitel wird die Hypothese präzisiert, das Konzept veranschaulicht und die qualitativen Auswirkungen geprüft. Dabei wird der Hintergrund dargelegt, warum, auf Grund des derzeitigen Energieverbrauchs und der politischen Ziele zu dessen Reduktion, Bedarf an Einsparpotentialen in der Warmwasserbereitung besteht.

### 2.1 Hintergrund

Um einen Überblick über die Größenordnungen zu bekommen, ist in Abbildung 2-1 ein Teil des Energieflussbildes der Stadt Wien aus dem Jahr 2014 abgebildet. Die nicht ersichtlichen 9,5 % der Energie, die auf den Primärenergieeinsatz fehlen, ergeben sich aus Umwandlungsverlusten und Eigenverbrauch des Energiesektors. Insgesamt wurden 2014 in Wien 21.146 GWh an Nutzenergie eingesetzt.

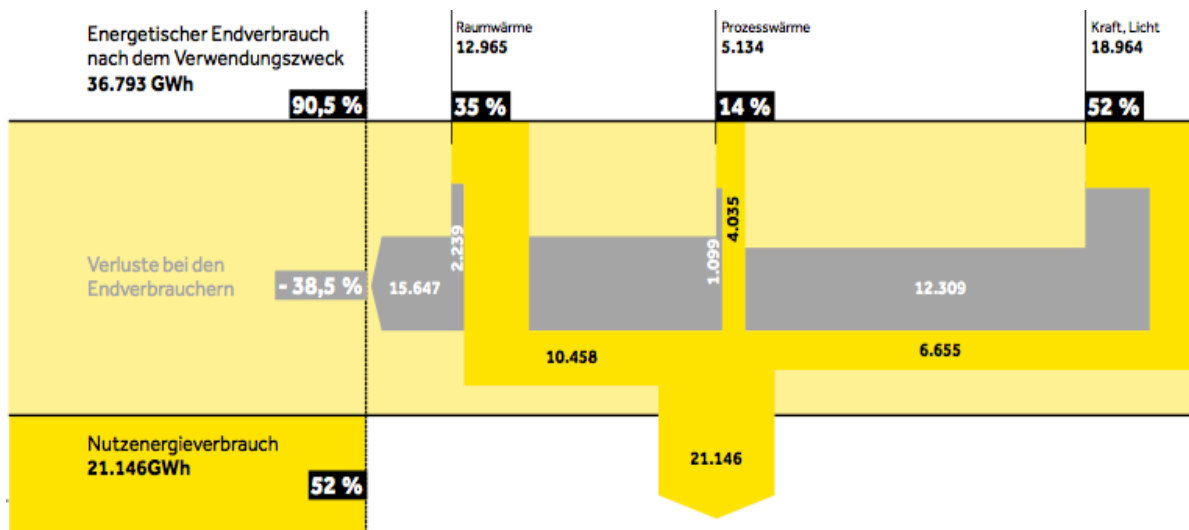


Abbildung 2-1: Energieflussbild der Stadt Wien 2014<sup>1</sup>

Die nachfolgenden Ausführungen dienen dazu das Potential zu verdeutlichen, das im Energiebereich an Einsparung durch zentrale Maßnahmen möglich ist. „Rund 80 % des Energieverbrauchs von privaten Haushalten wird für die Raumwärme- und Warmwasserproduktion eingesetzt.“<sup>2</sup> In Wien wurden „im Jahr 2012 rund 7 PJ (1.970 GWh) für die Warmwasserbereitung eingesetzt. Das entspricht rund 16 % des Gesamtendenergiebedarfs der Wiener Haushalte.“<sup>3</sup> Zusätzlich wurden noch etwa

<sup>1</sup> Magistrat der Stadt Wien 2016 (Datenquelle: Wien Energie)

<sup>2</sup> Farghadan 2016

<sup>3</sup> Farghadan 2016

400 GWh für Kochen aufgewendet. Schafft man im Bereich Warmwasserbereitung und Kochen eine Einsparung von einem Prozent, so gelangt man allein dadurch auf 23.700 MWh Energieeinsparung. Auf Grund des generellen Anteils von Nutzenergie zu Endenergie wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass 2370 MWh Endenergiebedarf für Warmwasser und Kochen etwa 1362 MWh an Nutzenergie entsprechen.

Neben Energieeinsparungen setzt sich die Stadt Wien im Energiebericht 2016 das Ziel bis 2050 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % gegenüber 1990 zu senken, sowie bis 2030 um 35 %. <sup>4</sup> Dafür gilt es „grundlegende und effektive Maßnahmen für eine Energiewende zu ergreifen und alle erdenklichen Hebel in Bewegung zu setzen, um nachhaltige Technologien, innovative Entwicklungen und Forschung zu unterstützen.“<sup>5</sup> Ein solcher Hebel wäre mit der temperaturgeführten Trinkwasserversorgung gegeben, wie im Folgenden näher erläutert wird. Dieser Hebel soll eine Ergänzung zu anderen Hebeln sein und nicht mit ihnen in Konkurrenz stehen.

## 2.2 Konzept

Wie schon in der Einleitung skizziert, ist die Grundannahme dieser Arbeit, eine geringe Anhebung der Wasserentnahmetemperatur vorzunehmen, um bei der lokalen Warmwasserbereitung Energie zu sparen. Es sei ausdrücklich erwähnt, dass insgesamt nicht Energie „gespart“ wird, sondern nur ein Energieträger den anderen substituiert. Durch höhere Verluste kann insgesamt sogar mehr Energie benötigt werden. Eine solche Maßnahme ist aber den politischen Zielen entsprechend sinnvoll, wenn insgesamt die Kosten und die CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken.

Die allgemein vertretene Ansicht ist, dass Leitungswasser „möglichst kalt sein soll“, weil das „eine höhere Qualität bedeutet“ und „die Leute lieber kaltes Wasser trinken“. Um den Geist dieser Arbeit nachvollziehen zu können, ist es notwendig, sich für einen Moment von diesen Dogmen zu befreien und sich einem neuen Gedanken hinzugeben. Denn die Idee dieser Arbeit ist ja gerade, das Trinkwasser zentral vorzuheizen. Hinter dieser Idee steht die Annahme, dass zentral vorgewärmtes Trinkwasser in der Lage ist, an der Wasserentnahme, vor allem in den Haushalten, hochwertige Energieträger zu substituieren. Da „es primär um die Bereitstellung von Energiedienstleistungen geht und nicht um den ‚Verbrauch‘ von Energie“<sup>6</sup>, wird davon ausgegangen, dass es für den Nachfrager des Warmwassers keine Rolle spielt, wie die Erwärmung im Detail von staten geht.

---

<sup>4</sup> Magistrat der Stadt Wien 2016

<sup>5</sup> Magistrat der Stadt Wien 2016

<sup>6</sup> Haas 2014



Da es sich bei der Trinkwasserversorgung um ein natürliches Monopol handelt, das von der öffentlichen Hand zur Verfügung gestellt wird, kann eine Vorwärmung des Trinkwassers als ein nichtausschließbares Gut charakterisiert werden. Nichtausschließbarkeit bedeutet, dass keiner der angeschlossenen Kunden von dem Leistungsbezug ausgeschlossen werden kann, jedoch jeder davon profitiert. Geht man auch von einer Nichtrivalisierung aus, dass also ohne zusätzliche Grenzkosten das Gut jedem zur Verfügung steht, dann würde es sich dabei um ein öffentliches Gut handeln.<sup>7</sup> So kommt die OECD in ihrer aktuellen Trinkwasserstudie zu dem Schluss, dass sich im Laufe der Geschichte Trinkwasser in den industrialisierten Staaten von einem Klubgut zu einem öffentlichen Gut entwickelt hat.<sup>8</sup> Geht man jedoch von einer gewissen Rivalität im Konsum aus, so handelt es sich bei der Trinkwasserversorgung im Allgemeinen und der Vorwärmung im Speziellen um ein Allmendegut, das von einer Übernutzung bedroht ist. Um eine Übernutzung zu verhindern und den Verbraucher für die tatsächlichen Kosten aufkommen zu lassen, sind Gebühren für die Nutzung des Wasserversorgungssystems pro Mengeneinheit (nicht aber für das Wasser selbst) zu zahlen.

Das Ausmaß des tatsächlichen ökonomischen Nutzens der temperaturgeführten Trinkwasserversorgung bei einem spezifischen Verbraucher ist nur unter unverhältnismäßigem Aufwand feststellbar. Daher, und weil es sich um ein Allmendegut handelt, ist die Umsetzung eines solchen Konzepts von einem Betreiber aus marktwirtschaftlicher Sicht schwer argumentierbar. Da trotz Einsparungsmöglichkeiten kein Business Case bzw. keine direkte Gewinnmöglichkeit für private Unternehmen vorhanden ist, kann hier von einem Marktversagen gesprochen werden. „Marktversagen tritt auf, wenn ein Markt Güter, die viele Konsumenten wertschätzen, nicht anbieten kann.“<sup>9</sup> Die öffentliche Hand kann dieses Problem jedoch lösen, indem sie die Allmende beziehungsweise das öffentliche „Gut selbst zur Verfügung stellt oder für private Unternehmen den Anreiz schafft, das Gut zu produzieren.“<sup>10</sup> Will man für die Bereitstellung keine allgemeinen Steuermittel aufwenden, besteht die Möglichkeit eine direkte Verrechnung vorzunehmen, indem die Bereitstellungskosten auf die Wassergebühren umgelegt werden.<sup>11</sup>

Aus diesen Gründen wird nicht „der Markt“ für eine Umsetzung des untersuchten Konzepts sorgen. Sollte sich eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung in einer

---

<sup>7</sup> Pindyck and Rubinfeld 2009

<sup>8</sup> OECD 2015

<sup>9</sup> Pindyck and Rubinfeld 2009

<sup>10</sup> Pindyck and Rubinfeld 2009

<sup>11</sup> Interessant ist, ob dieses Konzept unter „bessere Wasserversorgung“ oder „neuartige Fernwärme“ subsumiert wird.

Betrachtung der Gesamtsystemkosten jedoch als sinnvoll erweisen, könnte die öffentliche Hand, respektive die betreffenden Subjekte des öffentlichen Rechts, in Erwägung ziehen, dieses öffentliche Gut im allgemeinen Interesse zur Verfügung zu stellen. Sinnvoll erscheint eine solche Maßnahme unter der Bedingung, dass bei einer Berücksichtigung der jeweiligen Gesamtsystemwirkungsgrade die Kosten einer zentralen Trinkwasservorwärmung unterhalb der Kosten der lokalen Trinkwassererwärmung liegen:

$$\frac{c_{heat_{central}}}{\eta_{central}} \leq \frac{c_{heat_{local}}}{\eta_{local}} \quad [1]$$

$c_{heat_{central}}$  ... Kosten der zentralen Wärmebereitung

$\eta_{central}$  ... Wirkungsgrad der zentralen Wärmebereitung

$c_{heat_{local}}$  ... Kosten der lokalen Wärmebereitung

$\eta_{local}$  ... Wirkungsgrad der lokalen Wärmebereitung

Eine technische Lösung, wie in Abbildung 2-2 schematisch dargestellt, zielt darauf ab, dass das Leitungswasser einer Kommune beliebiger Größe an einem oder mehreren Punkten (zentral) im Leitungsnetz über Wärmetauscher vorgewärmt wird. Diese Vorwärmung(en) kann/können vorzugsweise zwischen den Quellen und den zentralen Sammelbehältern erfolgen.

Urbanes Leitungswassersystem mit Vorwärmung

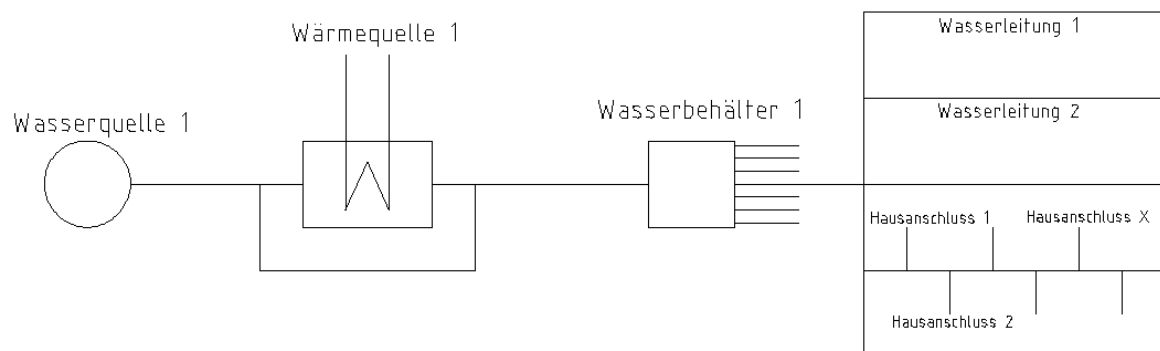


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der zentralen Trinkwasservorwärmung

Die Wärmequellen, die den Wärmetauscher speisen, können je nach kommunalen Gegebenheiten und wirtschaftlichen Faktoren unterschiedlich sein. Denkbar sind geothermische, solarthermische, biogene, elektrische, aber auch fossile oder sogar nukleare Wärmequellen. Darüberhinaus würde sich auch Industrie- oder Kondensatorabwärme eignen, da im Gegensatz zu Stromerzeugung und Fernwärme die Wärmeenergie nur auf einem geringen Temperaturniveau verfügbar sein muss. So reicht eine Temperaturdifferenz von einigen Grad Celsius gegenüber der vorhandenen Leitungswassertemperatur aus, um diese technische Lösung zu realisieren. Die Entfernung der Wärmequelle zur Wasserleitung sollte gering sein, um die Kosten niedrig zu halten.

In meinen Recherchen bin ich auf keine Literaturquelle gestoßen, die sich mit diesem Konzept auseinandersetzt, geschweige denn auf eine schon vorhandene Umsetzung. Jedoch gibt es beispielsweise in Island Regionen, in denen es neben der normalen Wasserleitung auch eine Warmwasserleitung gibt, die aus geothermischen Quellen gespeist wird.<sup>12</sup> Hier scheint Energie im Überfluss vorhanden zu sein, sodass man sich auch keine Gedanken bezüglich etwaiger Verluste machen muss. Meiner Ansicht nach kann ein solches Parallelleitungssystem jedoch eher mit unserem Fernwärmesystem verglichen werden.

Obwohl dieses vorgestellte Konzept einer zentralen Trinkwasservorwärmung originär ist, sind ähnliche Überlegungen gewiss schon öfter aufgetaucht. Die einzige schriftliche Festhaltung dieses grundlegenden Gedankens habe ich bei meinen Recherchen im Blog von Helge Fahrnberger *helge.at* gefunden, der diese Überlegung im Jahr 2008 formuliert und zur Diskussion gestellt hat.<sup>13</sup>

---

<sup>12</sup> "Nine Fascinating Facts about Geothermal Energy and Reykjavík" 2017

<sup>13</sup> Fahrnberger 2008

## 2.3 Auswirkungen

Um im Rahmen der Potentialermittlung einen umfassenden Blick auf das Konzept der temperaturgeführten Trinkwasserversorgung zu werfen, werden die Stärken (Strenghts) und Schwächen (Weaknesses) sowie die Chancen (Opportunities) und Bedrohungen (Threats) im Rahmen einer SWOT-Analyse ermittelt. Dies ist wichtig, weil dadurch die Abschätzung der möglichen Einsparpotentiale, sowie daraus folgend, die strategische Planung eines solchen Konzepts unterstützt wird.

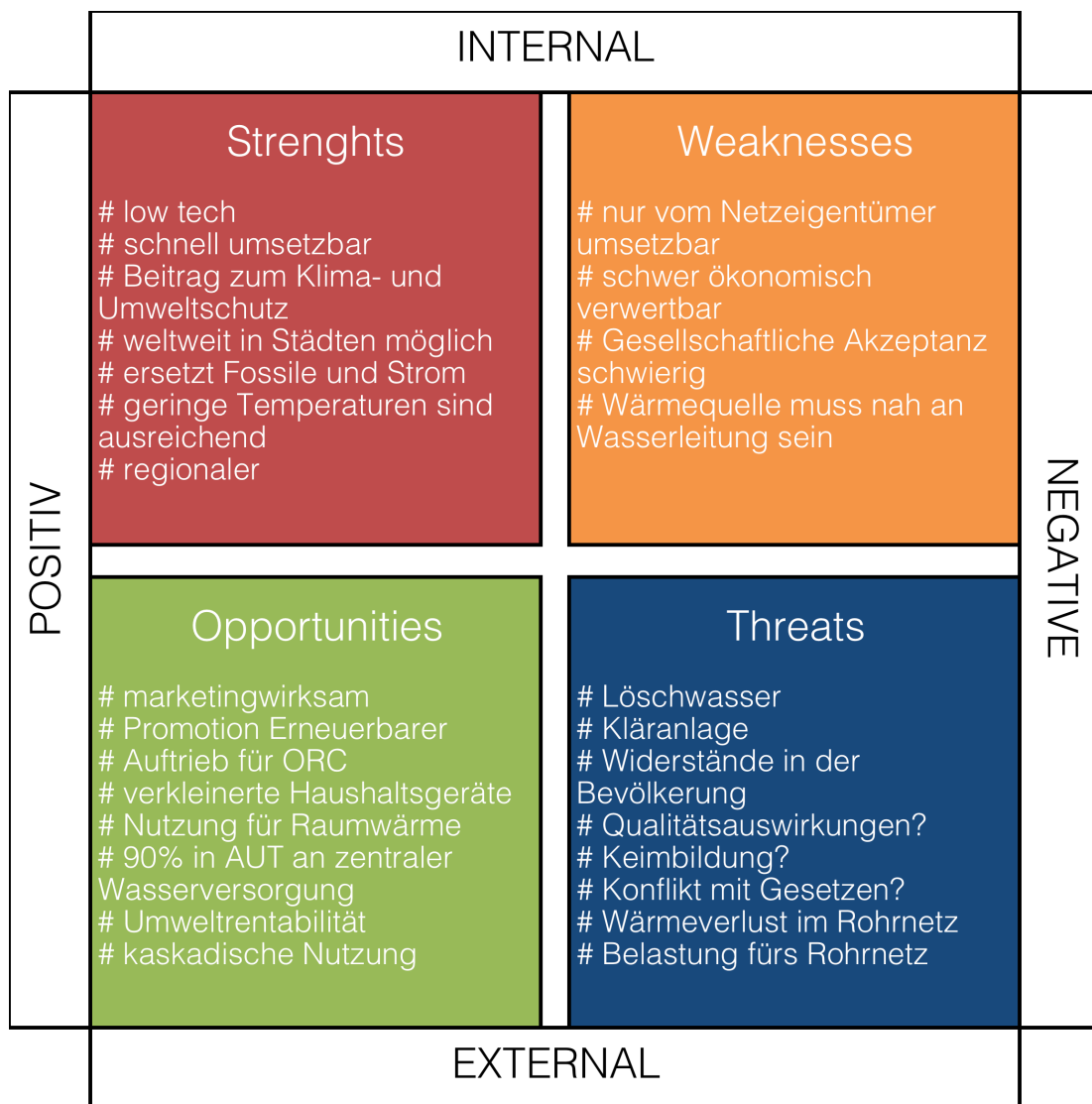


Abbildung 2-3: SWOT-Analyse zur Einführung einer Trinkwasservorwärmung

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf die einzelnen Punkte genauer eingegangen.

### **2.3.1 Strengths**

Eine der größten Stärken der temperaturgeführten Trinkwasserversorgung ist, dass die Maßnahme dem Lowtech-Bereich zugeordnet werden kann und damit leicht umsetzbar wäre. Es benötigt keine großartige Kommunikationsinfrastruktur, sondern es muss nur dem Wasser ein wenig Wärme zugeführt werden und schon ergeben sich positive Effekte auf Energieverbrauch und Emissionen in der lokalen Warmwasserbereitung. Da nur niedrige Temperaturniveaus benötigt werden, gibt es ein großes Potential an Wärmequellen. Die Regionalität der Wärmeversorgung erhöht die Autarkie. Es können fossile Brennstoffe und Elektrizität in der lokalen Wärmebereitung eingespart werden. Die positiven Auswirkungen zum Klimaschutz ergeben sich unabhängig von einer Teilnahme der Nutzer. Sobald das Konzept einmal erprobt ist, ist es auch in anderen Regionen/Städten anwendbar, die niedrige Trinkwassertemperaturen haben.

### **2.3.2 Weaknesses**

Problematisch in der Umsetzung könnte sich erweisen, dass eine solche Maßnahme nur vom Wassernetzbetreiber durchgeführt werden kann und es fraglich ist, inwieweit die Auswirkungen der Umsetzung mit den Zielen des Wassernetzbetreibers in Einklang zu bringen sind. Auf Grund der mangelnden unmittelbaren ökonomischen Verwertbarkeit, bestehen kaum Anreize für den Wassernetzbetreiber, eine solche Umstellung zu betreiben. Unklar ist, ob eine solche Maßnahme auf gesellschaftliche Akzeptanz stoßen würde. Hier müsste der Netzbetreiber bei einer etwaigen Umsetzung jedenfalls sensibel vorgehen. Da nur sehr günstige Wärmequellen für die Vorwärmung in Frage kommen, kann die Wärme nicht über weite Strecken transportiert werden. Die Wärmequelle muss also nahe an der Wasserleitung liegen.

### **2.3.3 Opportunities**

Was einerseits eine Schwäche ist, kann andererseits als Chance wahrgenommen werden. So kann sich ein Wassernetzbetreiber durch die Einführung einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung öffentlichkeitswirksam als Innovator präsentieren, der im allgemeinen Interesse handelt und der zuständigen Gebietskörperschaft das Image vermitteln, sich auf allen Ebenen für eine nachhaltige Zukunft einzusetzen.

Eine Umsetzung würde gleichzeitig eine Werbung für erneuerbare Energien darstellen und alternative Lösungskonzepte zur fossilen Vorherrschaft vorantreiben.

Je nach den tatsächlichen Temperaturniveaus der Wärmequellen kann eine verstärkte Nutzung beziehungsweise Erschließung von Wärmequellen mit geringen Temperaturen

einen Aufschwung für die Stromerzeugung mittels Organic-Rankine-Cycle Prozess bedeuten.

In Gebäuden kann eine höhere Trinkwassertemperatur zu neuen Energiekonzepten führen. So wäre es durchaus vorstellbar, das Trinkwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen zu nutzen, um Raumwärme bereitzustellen. Daneben können sich in Gebäuden Einsparungseffekte ergeben, falls Wärmebereitstellungsgeräte und Energieleitungen kleiner dimensioniert werden können.

Eine höhere Abwassertemperatur könnte in weiterer Folge den Energieeinsatz in der Kläranlage verringern und eine potentielle Wärmequelle für eine großtechnische Wärmepumpe darstellen.

Nachdem 90 % der Haushalte in Österreich an eine zentrale Wasserversorgung angeschlossen sind, kann dieses Konzept eine weite Durchdringung erreichen und ist nicht zwangsläufig auf eine Nischenanwendung beschränkt.

In den Berechnungen zu den Auswirkungen auf die Gesamtsystemkosten der Trinkwassererwärmung werden makroökonomische Aspekte wie eine Umwegrentabilität solcher Investitionen oder eines geringeren Importbedarfs fossiler Energieträger außer Acht gelassen. Dies würde den Nutzen zweifelsohne erhöhen. Darüber hinaus würden durch eine geringere Nachfrage nach den substituierten Energieträgern die Preise für diese sinken. Daraus könnten sich weitere positive Effekte für die Konsumenten ergeben.

Die Möglichkeit zur kaskadischen Nutzung bedeutet, dass die Kondensatorabwärme eines thermischen Kraftwerks ausgekoppelt werden könnte und damit ein neuer Typ an KWK-Anlagen denkbar ist.

#### **2.3.4 Threats**

Laut Pressestelle der Feuerwehr Wien, hegt diese „keine Bedenken“ hinsichtlich der Löschfähigkeit des Wassers bei einer leicht erhöhten Leitungswassertemperatur.<sup>14</sup>

In einer Stellungnahme erklärt der Laborleiter der Kläranlage Wien: „Allgemein gilt es, dass die Geschwindigkeit einer (bio-)chemischen Reaktion mit steigender Temperatur zunimmt. Eine Erwärmung des Abwassers ist für die Mikroorganismen der biologischen Stufe tendenziell unproblematisch und wird sogar zu einer erhöhten Umsatzrate bei der biologischen Abwasserreinigung führen. Die steigende Temperatur beeinflusst allerdings die Sauerstofflöslichkeit im Wasser, wobei diese mit steigender Temperatur sinkt. Auf Grund der mit steigender Temperatur erhöhten bakteriellen Aktivität und der geringeren Sauerstofflöslichkeit, kann ein Sauerstoffmangel auftreten. Sauerstoff

---

<sup>14</sup> Alteneder 2016

benötigen die Mikroorganismen zum Abbau der Abwasserinhaltsstoffe. Generell nimmt die Aktivität von Mikroorganismen und somit die Reinigungsleistung der Kläranlage bei sinkenden Temperaturen stark ab. Die Nitrifikation (Stickstoffentfernung) wird bei Abwassertemperaturen unter 12°C verlangsamt und unter 8°C eingestellt.”<sup>15</sup> Für Kläranlagen stellt eine höhere Leitungstemperatur demnach auch kein Problem dar.

Bedenken in der Bevölkerung können vor allem in Bezug auf die Behaglichkeit einer wärmeren Trinkwassertemperatur verortet werden. In zahlreichen Gesprächen hat sich eine intuitive Ablehnung gegenüber einer zentralen Trinkwasservorwärmung gezeigt. Unklar ist, ob es sich hierbei um eine dogmatische Hürde handelt, da bisher eine kalte Wassertemperatur mit hoher Qualität gleichgesetzt wird, oder ob es fundierte Gründe für die Befürchtungen von Qualitätseinbußen gibt. Um die Akzeptanz in der Bevölkerung besser abschätzen zu können, sollte in mehreren Versuchen/Umfragen/Studien die optimal behagliche Trinkwassertemperatur der Wiener Bevölkerung ermittelt werden. In einem der Standardwerke über die Wasserversorgung heißt es lapidar, dass die Temperatur “25°C nicht übersteigen [darf], sonst schmeckt das Wasser fade.”<sup>16</sup> Tatsächlich kann nach eigenen Beobachtungen davon ausgegangen werden, dass sich eine behagliche Temperatur im Bereich von 12–15°C befindet. Um die Bedenken der Bevölkerung zu reduzieren, sollte sich die Erwärmung in der heißen Jahreszeit auf ein Mindestmaß beschränken.

Das *Umwelt-Bundesamt* in Deutschland kommt zu der Feststellung, dass „Trinkwasser, das gemäß den Anforderungen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) einwandfrei ist, nicht steril ist. Es enthält Keime, darunter möglicherweise auch Krankheitserreger (pathogene Keime), jedoch in Konzentrationen, die gesundheitlich unbedenklich sind. Im öffentlichen Leitungsnetz der Wasserversorgungsunternehmen (WVU) liegt die Wassertemperatur deutlich unter 20°C, was das Bakterienwachstum wirksam verhindert.”<sup>17</sup> Die größte Aufmerksamkeit wird auf die Vermehrung von Legionellen gerichtet. “Im Trinkwasser-Temperaturbereich von 20–55°C können sich Legionellen auf gesundheitlich bedenkliche Konzentrationen vermehren, wobei lange Aufenthaltszeiten des Wassers von einigen Stunden bis Tagen in Installationsrohren und Wasserspeichern die Vermehrung der Bakterien begünstigen.”<sup>18</sup> Auch aus diesen Gründen sollte die Wassertemperatur im Versorgungssystem zu jedem Zeitpunkt unter 20°C bleiben.

Entsprechend der österreichischen Trinkwasserverordnung TWV § 3 (1) muss Wasser “geeignet sein, ohne Gefährdung der menschlichen Gesundheit getrunken oder

---

<sup>15</sup> Matzke 2016

<sup>16</sup> Karger, Cord-Landwehr, and Hoffmann 2008

<sup>17</sup> Deutsches Umweltbundesamt 2011

<sup>18</sup> Deutsches Umweltbundesamt 2011

verwendet zu werden. Das ist gegeben, wenn es Mikroorganismen, Parasiten und Stoffe jedweder Art nicht in einer Anzahl oder Konzentration enthält, die eine potentielle Gefährdung der menschlichen Gesundheit darstellen“ und einigen anderen Mindestanforderungen entsprechen. Nach TWV Anhang I Teil C ist bei einer Überschreitung der Temperatur von 25°C “die Ursache zu prüfen und festzustellen, ob bzw. welche Maßnahmen zur Aufrechterhaltung einer einwandfreien Wasserqualität erforderlich sind.” Abgesehen davon sind in Österreich keine einschränkende Bestimmungen zur Wassertemperatur gegeben, sodass lediglich die Einhaltung einer Temperatur von unter 25°C als gesetzlich begrenzende Einschränkung gilt.

Eine weitere Bedrohung stellen Wärmeverluste im Wassernetz dar, die eine Vorwärmung unwirksam machen würden. Zwar wird in dieser Arbeit gezeigt, dass die Wärmeverluste nicht signifikant für die Wirtschaftlichkeit sind, trotzdem bleiben Bedenken über die Richtigkeit dieser Ergebnisse und es bedarf weiterer Überlegungen in dieser Hinsicht.

In einem Gespräch mit Herrn Dr. Werderitsch<sup>19</sup> hinsichtlich der Zusatzbelastung für das Rohrnetz wurde darauf hingewiesen, dass „mikrobiologisches Wachstum positiv mit der Temperatur korreliert. Dieses Wachstum führt zu einem Biofilm an der Oberfläche, damit in Folge zu einer höheren Sauerstoffzehrung und somit zu Korrosion in metallischen Rohren“. Außerdem muss auch „Karstschliff und Partikelverschmutzung“, die durch eine Trinkwasservorwärmung entstehen könnten, berücksichtigt werden. Prinzipiell sinkt nach dem Henry Gesetz mit steigender Temperatur die Löslichkeit von Gasen im Wasser.

Obwohl der gesetzliche Rahmen Trinkwassertemperaturen von bis zu 25°C ermöglicht, sollten in jedem Fall Temperaturen von unter 20°C eingehalten werden, um einwandfreies Trinkwasser sicher zu stellen. Damit den Behaglichkeitsanforderungen der Bevölkerung Rechnung getragen wird, sollten jahreszeitabhängige Temperaturen von 12–15°C bei der Entnahme nicht überschritten werden.

---

<sup>19</sup> Werderitsch 2016



### **3 Wasserversorgung**

In diesem Kapitel wird das Wiener Trinkwasserversorgungssystem beschrieben. Auf Grundlage täglicher Temperatur- und Mengenwerte der Hochquellleitungen (HQL), der Speichertemperaturen im Behälter Neusiedl und kontinuierlicher Messungen an der Entnahmestelle im gesamten Jahresverlauf 2015, wird das Wiener Wasserversorgungssystem skizziert. In Abhängigkeit der lokalen meteorologischen Daten aus dem Jahr 2015 kann das Gesamtsystem dargestellt werden. Dies bildet die Grundlage für die Erstellung eines Rechenmodells, welches in weiterer Folge Einsparungspotentiale abschätzt und wirtschaftliche Überlegungen anstellt.

Der Großteil (etwa 90 %) des Wassers wird über zwei Hochquellleitungen nach Wien geführt. Die Quellregionen dieser Wasserleitungen liegen in der Steiermark und Niederösterreich. Weitere Anteile liefern die Grundwasserwerke Wien, die Wientalleitung und die dritte Wiener Wasserleitung aus dem Wasserwerk Moosbrunn. Diese werden jedoch auf Grund ihres geringen Anteils nicht weiter betrachtet. Aus den Hochquellleitungen gelangt das Wasser in große Speicher, von denen ausgehend das Wasser über mehrere tausend Kilometer Versorgungsleitungen in der Stadt verteilt wird. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass das gesamte Wasser sowie ein Teil des Regenwassers nach der Nutzung wieder über Kanäle einer Reinigung zugeführt wird, um in Folge in die Donau eingeleitet zu werden.

Das Quellwasser ist in Abhängigkeit zur Quelltemperatur, der Transportdistanz, der Jahreszeit und einigen anderen Faktoren einem Energieeintrag ausgesetzt und erwärmt sich damit in der Regel. Grob gerechnet findet im Schnitt zwischen Quelle und Entnahme eine Temperaturerhöhung von 6,5°C auf 8,5°C statt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die beiden Hauptversorgungsleitungen, das Verteilnetz, die anschließende Verwendung und die Ableitung genauer betrachtet.

#### **3.1 Versorgungsleitungen**

Die Stadt Wien wird hauptsächlich von zwei Hochquellleitungen versorgt, die schon im 19. sowie Anfang des 20. Jahrhundert errichtet worden sind.

In Abbildung 3-1 sind die Quellen und Verläufe dieser beiden Leitungen geographisch dargestellt. Durch Rechtecke werden die wesentlichen Wasserbehälter dargestellt. Der Behälter Neusiedl in der Nähe von Wiener Neustadt stellt den größten Speicher an den Versorgungsleitungen dar. Von diesem Speicher aus wird im Wesentlichen die

Wasserversorgung für Wien geregelt. In Wien liegen die Behälter am Stadtrand in ausreichender Höhenlage, um den nötigen Versorgungsdruck für das Stadtgebiet sicherzustellen.



Abbildung 3-1: Quellen und Versorgungswasserleitungen Wien<sup>20</sup>

Wie oben festgestellt, liefern die beiden Hochquellwasserleitungen den Großteil des Wiener Wassers. In Abbildung 3-2 sind die täglich gelieferten Wassermengen der unterschiedlichen Versorgungsleitungen in Kubikmeter über den gesamten Jahresverlauf dargestellt. HQL1 liefert im Jahresmittel täglich 150.000 m<sup>3</sup>, HQL2 etwa 200.000 m<sup>3</sup> und die kleineren zusammen weniger als 50.000 m<sup>3</sup>. Insgesamt tragen die beiden Hochquellleitungen zu mehr als 90 % zur Wasserversorgung von Wien bei. Die gelegentlichen Versorgungsunterbrechungen der Leitungen sind auf Wartungs- und Revisionsarbeiten zurückzuführen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass während Wartungs- und Revisionsarbeiten an den beiden Hochquellleitungen die Grundwasserwerke Wien in der Leopoldau verstärkt ins Netz einspeisen. In Zeiten hohen Verbrauchs speisen die Wasserwerke Moosbrunn über die dritte Wiener Wasserleitung zusätzliches Wasser ein. Die Wientalwasserleitung liefert kontinuierlich in das Versorgungsgebiet der HQL2. In einer vereinfachten Verkürzung wird in den Potentialberechnungen davon ausgegangen, dass Wien allein von HQL1 und HQL2 versorgt wird.

<sup>20</sup> Wiener Wasser (MA 31) 2017a



Abbildung 3-2: Wassereinspeisung Wien im Jahr 2015<sup>21</sup>

Bei genauerer Betrachtung der Verbrauchs- und Speicherwerte in Abbildung 3-3 ist ersichtlich, dass zeitgleich mit den Revisionsarbeiten auch die Speichermengen sinken. Die Speicherstände stellen dabei kumulierte Werte für ganz Wien dar. Die Verbrauchswerte errechnen sich aus dem Saldo der Einspeisungen und der Veränderung der Speicherstände. In dieser Konsequenz sind auch die Leitungsverluste im Verbrauch enthalten. Die Verluste im Verteilnetz können mit etwa 10 % der Wassermenge angenommen werden.<sup>22</sup> Die Verluste spielen jedoch für die weiteren Überlegungen keine Rolle. Die Speicherstände betragen im Schnitt den Verbrauch von 2 Tagen. Damit könnte eine Hochquellleitung problemlos für 4 Tage ausfallen, ohne dass es zu Versorgungsengpässen kommt.

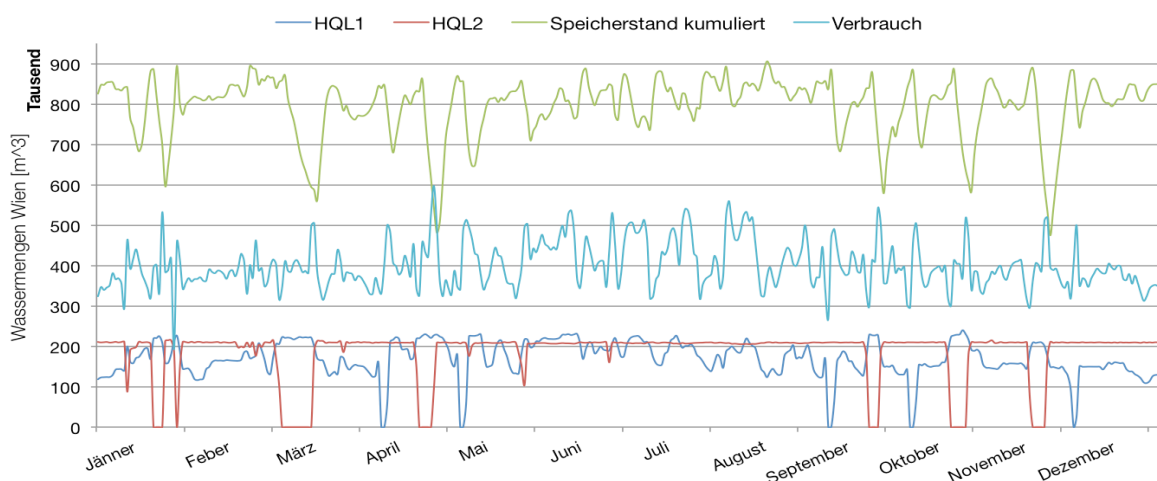


Abbildung 3-3: Speicherstand und Verbrauch von Wasser<sup>23</sup>

<sup>21</sup> Datenquelle: MA31 – Wiener Wasser

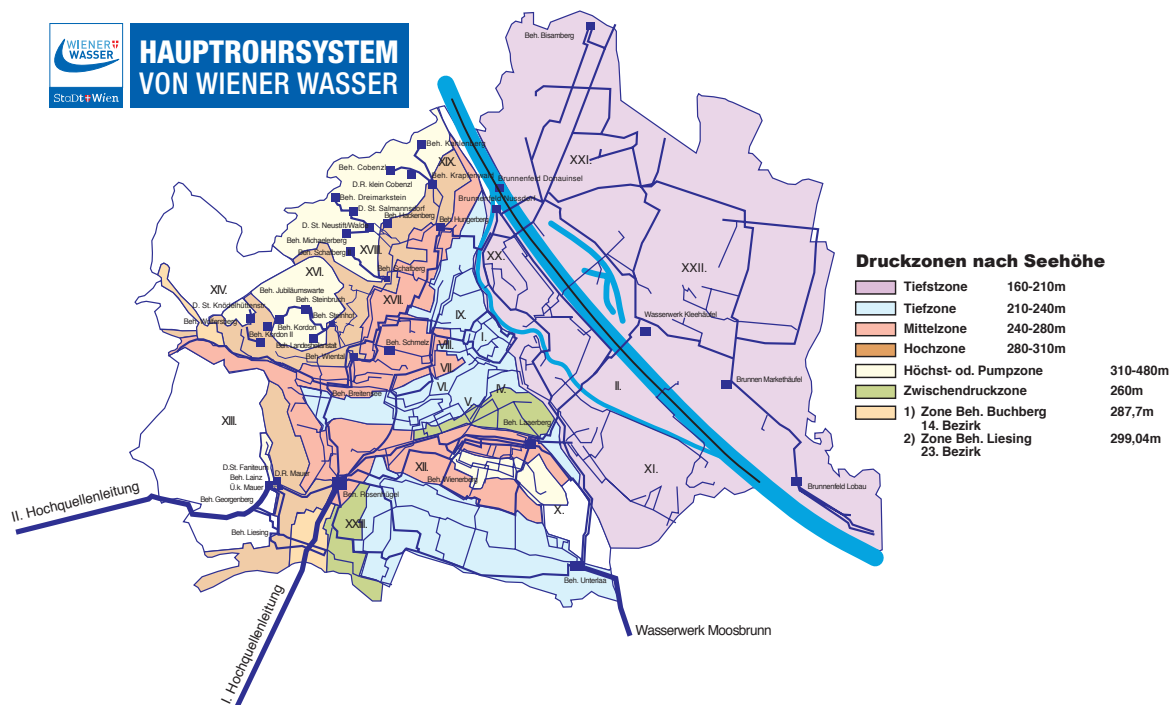
<sup>22</sup> Werderitsch 2016

<sup>23</sup> Datenquelle: MA31 – Wiener Wasser

## 3.2 Verteilnetz

Nachdem das Wasser aus den Hochquellleitungen in den Hauptbehältern landet, wird es in der Stadt verteilt. Dabei ist interessant, dass im regulären Betrieb das Wasser der höher gelegenen HQL2 in die Behälter Georgenberg und Lainz fließt und auf Grund des höheren hydrostatischen Drucks von dort aus die in Abbildung 3-4 erkennbare Mittel-, Hoch- und Höchstzone versorgt. Die HQL1 versorgt vom Behälter Rosenhügel aus die Tief- und Tiefstzone.

Daraus erschließt sich, dass die beiden Hochquellleitungen in der Modellierung unterschiedlich berücksichtigt werden müssen, da im Normalfall keine Vermischung stattfindet und somit zwei weitgehend getrennte Systeme vorliegen.

Abbildung 3-4: Wasserverteilsystem im Wiener Stadtgebiet<sup>24</sup>

### 3.3 Temperaturen im Wasserversorgungssystem

Die Temperaturen in der Wasserversorgung über den Jahresverlauf spielen für die Prüfungen der Hypothese dieser Diplomarbeit eine wesentliche Rolle. So können daraus die Energieeinträge bzw. -verluste im Rohrleitungssystem analysiert werden. Dies stellt die Grundlage dar, um bei einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung

<sup>24</sup> Wiener Wasser (MA 31) 2017b

die tatsächlichen neuen Entnahmetemperaturen zu berechnen. Diese bilden wiederum die Ausgangsbasis, um das Einsparpotential der temperaturgeführten Trinkwasserversorgung mit den Aufwänden dafür gegenüber zu stellen. Die Energieeinträge setzen sich vor allem aus Druckverlusten, also Reibung, und dem Wärmeaustausch mit dem Erdreich zusammen.

Um eine schlüssige Darstellung zu liefern, betrachten wir die Temperaturverläufe am Beispiel der ersten Hochquellleitung. In Abbildung 3-5 ist ein schematischer Höhenverlauf der beobachteten Strecke wiedergegeben.

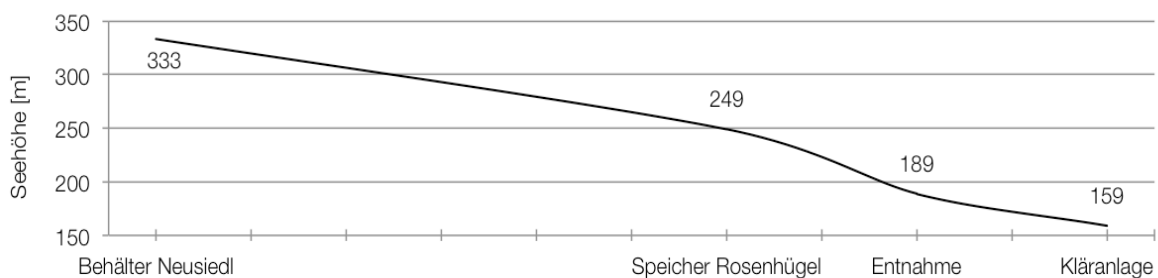


Abbildung 3-5: Höhenverlauf der HQL1

Entlang dem Lauf der ersten HQL liegen die ersten kontinuierlichen Temperaturmesswerte für den Behälter Neusiedl (333m Seehöhe) vor. Die verwendeten Werte ergeben sich aus dem Mittelwert der Messwerte von vier unterschiedlichen Speicherkammern. Im weiteren Verlauf wird die Temperatur etwa 60km weiter, im Speicher Rosenhügel, aufgezeichnet. Es handelt sich um Tagesmittelwerte, die aus 10-minütiger Aufzeichnung stammen. Die Daten hierfür stammen direkt aus dem Betriebslabor von *Wiener Wasser*. Bezüglich der Temperatur bei der Wasserentnahme konnten von *Wiener Wasser* keine kontinuierlichen Messungen zur Verfügung gestellt werden. Nach langer Recherche konnte mit der *VAMED* eine Einrichtung gefunden werden, die diese Daten aufnimmt und dankenswerterweise für akademische Zwecke zur Verfügung stellt. Die Messstelle für die Entnahmetemperatur befindet sich am Gelände des *Allgemeinen Krankenhaus der Stadt Wien* (AKH) im BT31.1, unmittelbar nach dem Gebäudeeintritt – ca. 130m entfernt vom Hauptrohr der Wiener Wasserwerke. Aus den Messwerten der Entnahmetemperatur sind sehr gut Wochenendspitzen ablesbar. Auf Nachfrage beim Messstellenbetreiber ergeben sich diese Wochenendspitzen aus einer geringeren Wassernutzung und einer damit einhergehenden zusätzlichen Erwärmung des Wassers innerhalb des Gebäudes. Um die stündlich aufgenommenen Daten in tägliche Mittelwerte umzuwandeln, wurden entsprechend dem Verbrauchsprofil an der Messeinrichtung nur die Messwerte der Werktage zwischen 06:00 und 18:00 arithmetisch gemittelt. Nacht- und Wochenendwerte hätten den Mittelwert verfälscht, da in dieser Zeit keine Entnahme stattfindet.

Für das bessere Verständnis sind die Temperaturverläufe entlang der Versorgung der HQL1 an zwei Beispieltagen in Abbildung 3-6 dargestellt. Unabhängig von der Jahreszeit erkennt man eine Erwärmung zwischen den beiden Behältern. Hin zur Entnahme findet in der warmen Jahreszeit eine weitere Erwärmung statt und in der kälteren eine Abkühlung. Aus der Differenz der Entnahmetemperatur und der Temperatur an der Kläranlage kann auf die Erwärmung rückgeschlossen werden. Unterstellt man einen konstanten Energieeintrag bei der Wassernutzung, so stellt die jahreszeitabhängige Temperaturveränderung des Abwassers den Energieeintrag aus dem Erdreich in das Kanalsystem dar.

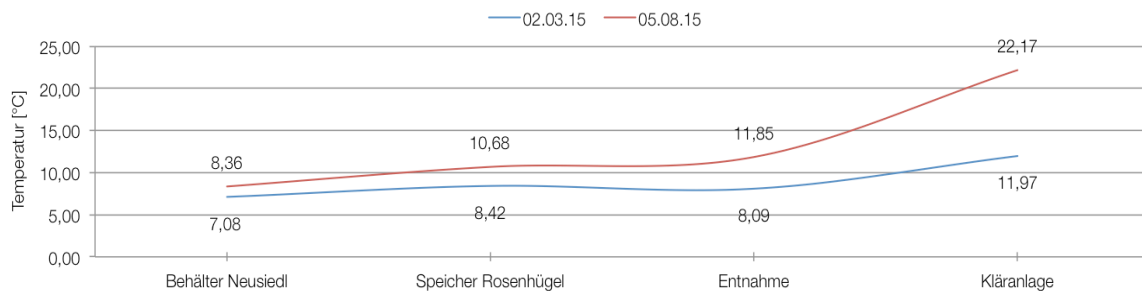


Abbildung 3-6: Temperaturverlauf entlang der Versorgung und Verteilung der 1.HQL an Beispieltagen

### 3.4 Energieeintrag entlang der Versorgungsleitung

Nun werden, wie in Abbildung 3-7 dargestellt, die Temperaturen im Jahresverlauf im Behälter Neusiedl betrachtet und die Erwärmung bis zum Speicher Rosenhügel berechnet.

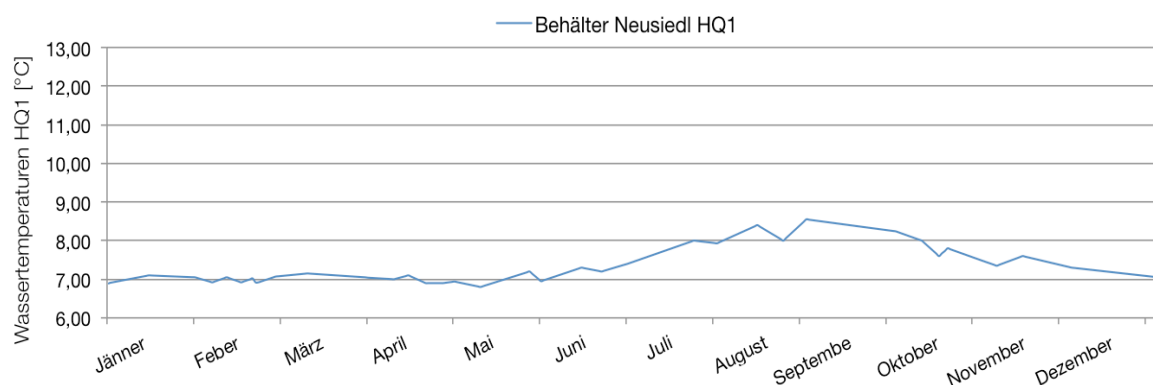


Abbildung 3-7: Temperaturverlauf im Behälter Neusiedl

In der kalten Jahreszeit liegt die Wassertemperatur im Behälter Neusiedl bei etwa 7°C und steigt im Sommer leicht auf bis zu 8,5°C an. Das erklärt sich aus der geringfügig höheren Quelltemperatur und dem höheren Energieeintrag vor dem Speicher.

Im Vergleich dazu lohnt es, die Umgebungstemperaturen zu betrachten. In Abbildung 3-8 sind die Umgebungstemperaturen der Außenluft sowie des Bodens in einem halben, zwei, vier, sechs und zwölf Metern Tiefe aufgezeichnet.

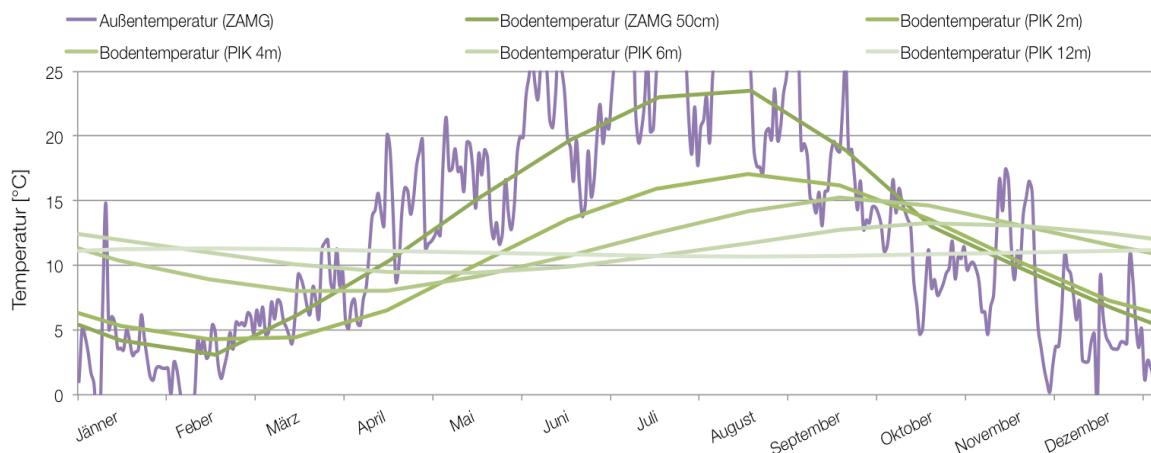


Abbildung 3-8: Boden- und Außentemperatur

Die Umgebungsdaten stammen von der *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik* (ZAMG). Diese Daten entsprechen den täglichen Mittelwerten für das Jahr 2015. Für die Bodentemperatur aus 2015 liegen seitens ZAMG nur monatliche Mittelwerte für die Temperatur in maximal 50 cm Tiefe vor. Daher wurden für die Temperaturen in größerer Tiefe die veröffentlichten Daten des *Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung* (PIK) aus 2015 verwendet. Die angenommenen täglichen Werte der Bodentemperaturen ergeben sich als lineare Punkte zwischen zwei gemessenen Monatsmitteln.

Es kann nun abgeschätzt werden, wie sich die Wassertemperatur entlang der Hochquellleitung bis nach Wien verändern wird. Dafür wird davon ausgegangen, dass die gesamte potentielle Energie  $E_{Pot}$ , die sich auf Grund der Höhendifferenz  $h$  von 85m zwischen dem Behälter Neusiedl (333m) und dem Speicher Rosenhügel (249m) im Wasser befindet, durch Reibung/Druckverluste in Wärme umgewandelt wird:

$$E_{Pot} = m * g * h \quad [ 2 ]$$

$$E_{Pot} = 1\text{kg} * 9,81\text{m/s}^2 * 84\text{m} \quad [ 3 ]$$

$$E_{Pot} \sim 840\text{Nm/kg} \quad [ 4 ]$$

Daraus lässt sich eine reibungsbedingte Erwärmung von etwa 0,2°C zwischen den beiden Speichern ableiten:

$$\Delta T_{Pot} = E_{Pot} / c_{Wasser} \quad [ 5 ]$$

$$\Delta T_{Pot} = 840 / 4200\text{K} = 0,2\text{K} = 0,2^\circ\text{C} \quad [ 6 ]$$

$$c_{wasser} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$$

$$\text{Nm} = \text{J} = 0,001\text{kJ}$$

Der Wärmeübergang aus dem Erdreich kann hingegen nicht als konstant angenommen werden, sondern muss in Abhängigkeit einer variablen Temperaturspreizung zwischen Wasser und Boden berechnet werden.

Ganz allgemein setzt sich die Wärmeübertragungsleistung  $\dot{Q}$  aus dem Wärmeübergangskoeffizienten  $k_i$ , der Übertragungsfläche  $A$  und der mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta\theta$  zusammen, also:

$$\dot{Q} = k_i * A * \Delta\theta \quad [ 7 ]$$

Dabei wird der Wärmeübergangskoeffizient wie folgt berechnet:<sup>25</sup>

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_i}{2 * \lambda_a} * \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) + \frac{d_i}{2 * \lambda_d} * \ln\left(\frac{d_d}{d_i}\right) + \frac{d_i}{2 * \lambda_m} * \ln\left(\frac{d_m}{d_d}\right) + \frac{d_i}{d_m * \alpha_a}} \quad [ 8 ]$$

$d_i$  ... Innendurchmesser

$d_a$  ... Außendurchmesser

$d_m$  ... Manteldurchmesser

$d_d$  ... Dämmdurchmesser

$\lambda_a$  ... Wärmeleitfähigkeit Rohr

$\lambda_d$  ... Wärmeleitfähigkeit Dämmung

$\lambda_m$  ... Wärmeleitfähigkeit Mantel

$\alpha_i$  ... Gesamtwärmeübergangskoeffizient Innen

$\alpha_a$  ... Gesamtwärmeübergangskoeffizient Außen

Zur Vereinfachung wird die Hochquellleitung als vollverziegelter Hohlzylinder ohne zusätzliche Dämmung angenommen. Damit entspricht der Ziegel des Außenmantels ( $\lambda_d = 0,76 \text{ W/mK}$ ) der Dämmung und es gibt kein zusätzliches Rohr- oder Mantelmaterial. Der Gesamtwärmeübergangskoeffizient Innen  $\alpha_i$  wird üblicherweise vernachlässigt.<sup>26</sup> Da nun  $d_i = d_a$  und  $d_m = d_d$  gleichgesetzt werden, kann mit  $\ln(1) = 0$  die Wärmeübergangskoeffizientengleichung vereinfacht werden:

$$k_i = \frac{1}{\frac{d_i}{2 * \lambda_d} * \ln\left(\frac{d_d}{d_i}\right) + \frac{d_i}{d_d * \alpha_a}} \quad [ 9 ]$$

Für erdverlegte Rohrleitungen wird die Berechnung jedoch etwas komplizierter, da es sich hierbei in Wirklichkeit um ein instationäres Wärmeleitproblem handelt, wie in (Rötsch, 1999) anschaulich dargestellt wird.<sup>27</sup> Der längenbezogene Wärmeübergang  $q_V$  ergibt sich dabei zu:

$$q_V = \frac{1}{R_s + R_i} * (T_W - T_B) \quad [ 10 ]$$

<sup>25</sup> Rötsch 1999

<sup>26</sup> Rötsch 1999

<sup>27</sup> Rötsch 1999



$R_s$  ... Dämmwert Boden

$R_i$  ... Dämmwert Innen

$T_W$  ... Temperatur Wasser

$T_B$  ... Temperatur Boden

Die Dämmwerte aus [ 10 ] ergeben sich zu:

$$R_s = \frac{1}{2\pi * \lambda_E} * \ln\left(\frac{4 * Z_c}{d_d}\right) = \frac{1}{2\pi * \lambda_E} * \ln\left(\frac{2 * Z + R_o * \lambda_E}{d_d}\right) \quad [ 11 ]$$

$$R_i = \frac{1}{2\pi * \lambda_d} * \ln\left(\frac{d_d}{d_a}\right) \quad [ 12 ]$$

Die Maße der Leitung werden mit  $d_d = 2,4 \text{ m}$  und  $d_a = 2 \text{ m}$  angenommen (20 cm Wandstärke). Mit einer Wärmeleitfähigkeit des Bodens  $\lambda_E$  von  $1,8 \text{ W/mK}$ <sup>28</sup> und einer charakteristischen Tiefe  $Z_c = 2 + 0,0685 * 1,8 = 2,12 \text{ m}$  ergibt sich aus der Verlegetiefe  $Z$  (der Überschüttungshöhe der Leitung von mindestens  $1,5 \text{ m}$ )<sup>29</sup>,  $\lambda_E$  und dem Übergangswiderstand an der Bodenoberfläche  $R_o$  nach [ 11 ] & [ 12 ]:

$$R_s = \frac{1}{2\pi * 1,8} * \ln\left(\frac{4 * 2,12}{2,4}\right) = 0,11 \text{ mK/W} \quad [ 13 ]$$

$$R_i = \frac{1}{2\pi * 0,76} * \ln\left(\frac{2,4}{2}\right) = 0,04 \text{ mK/W} \quad [ 14 ]$$

So berechnet sich der längenbezogene Wärmeübergang  $q_W$  nach [ 10 ]:

$$q_W = \frac{1}{0,11 + 0,04} * (T_W - T_B) = 6,67 * \Delta T \text{ [W/m]} \quad [ 15 ]$$

Bei einer beispielhaften Temperaturspreizung von  $-5^\circ\text{K}$  und der Leitungslänge zwischen den Speichern von 60 km ergäbe sich eine kontinuierliche Wärmeübergangsleistung von -2 MW (das entspricht dem Energieeintrag in das Wasser). Damit würde sich auf Grund dieser Berechnung die Temperatur eines Tagesdurchflusses von etwa  $120.000 \text{ m}^3$  um circa  $0,25^\circ\text{C}$  erhöhen.

Mit diesen Überlegungen kann nun aus den Gleichungen [ 6 ] und [ 15 ] die Temperaturentwicklung in der Leitung über den Jahresverlauf berechnet werden. Dafür werden die Werte der Bodentemperatur in 4 m Tiefe herangezogen. In Abbildung 3-9 ist hingegen eine große Diskrepanz zwischen prognostizierten und tatsächlichen Temperaturen im Speicher Rosenhügel erkennbar.<sup>30</sup>

---

<sup>28</sup> Rötsch 1999

<sup>29</sup> "Tätigkeitsbericht 2011 - MA 31, Abkehr Der II. Wiener Hochquellleitung" 2011

<sup>30</sup> Die Dezemberwerte der Temperatur im Speicher Rosenhügel sind mit Vorbehalt zu betrachten, da in dieser Zeit der Sensor ausgefallen ist und die Werte linearisiert aufgefüllt worden sind.

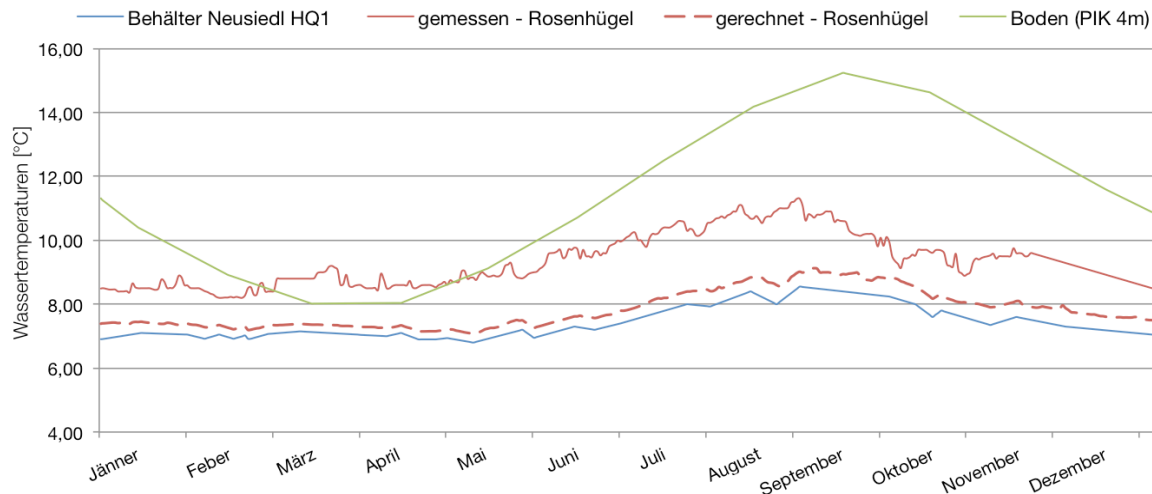


Abbildung 3-9: Diskrepanz zwischen prognostizierten und gemessenen Werten im Speicher Rosenhügel

Laut Berechnung sollte die Temperatur um  $0,23\text{--}0,65^{\circ}\text{C}$  steigen, tatsächlich steigt die gemessene Temperatur jedoch um  $1,00\text{--}2,93^{\circ}\text{C}$ . Diese Diskrepanz gibt Raum für Interpretation. So ergeben sich mehrere Erklärungsmöglichkeiten:

- Die Berechnungen sind weiterhin falsch;
- die gemessenen Werte sind falsch;
- es gibt unbekannte Energieeinträge.

Zieht man die Bodentemperaturen in 2 m Tiefe für die Erklärung der Erwärmung heran, so wäre es thermodynamisch nicht nachvollziehbar, wieso sich das Wasser entlang der Hochquellleitung in der kalten Jahreszeit nicht abkühlt, sondern trotzdem um etwa zwei Grad aufwärmt. Zwischen der Temperaturerhöhung entlang der Hochquellleitung und etwaigen Bodentemperaturen ist, wie in Abbildung 3-10 ersichtlich, kein direkter Zusammenhang feststellbar, weil teilweise die Bodentemperaturen unter der Temperatur liegen mit der das Wasser im Speicher Rosenhügel gemessen wird.

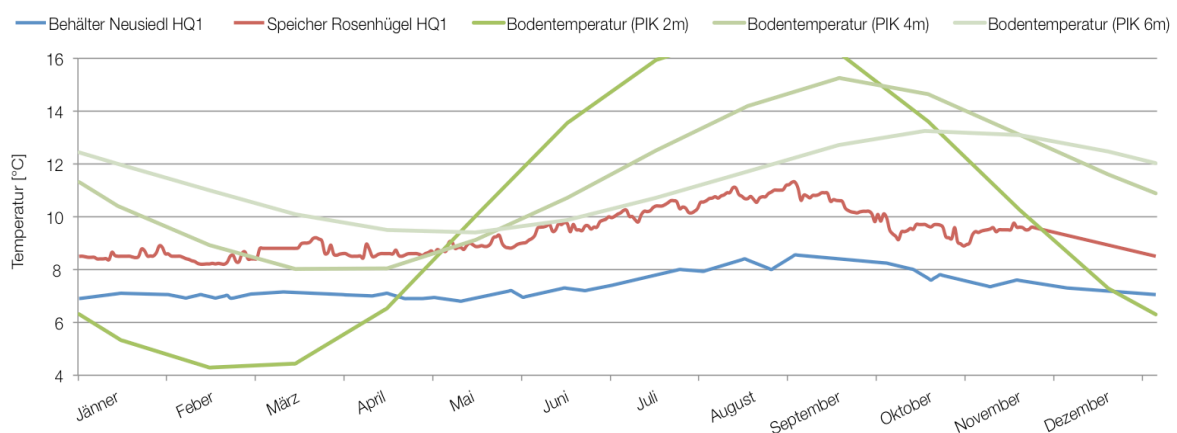


Abbildung 3-10: Speicher- und Bodentemperaturen

Mit Hilfe einer Regressionsanalyse wird nun trotzdem versucht, einen bisher unbekannten Zusammenhang zwischen der Erwärmung des Wassers und der Bodentemperatur herzustellen. Geht man davon aus, dass die Hochquellleitung mindestens 1,5 m überschüttet ist, ist es naheliegend, die Differenz der Bodentemperatur in 4 m oder 2 m Tiefe und der Wassertemperatur im Behälter Neusiedl für diese Regressionsanalyse heranzuziehen.

Der für die Regressionsanalyse relevante tägliche Energieeintrag in die Wasserleitung berechnet sich wie folgt:

$$E_{\text{Leitung}} = x_{HQL1} * c_{\text{wasser}} * (T_{\text{Rosen}} - T_{\text{Neusiedl}}) \text{ [MWh/Tag]} \quad [16]$$

$x_{HQL1}$  ... gemessener Wasserdurchfluss HQL1 [kg/Tag]

$c_{\text{wasser}} = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$

$T_{\text{Rosen}}$  ... gemessene Temperatur im Speicher Rosenhügel

$T_{\text{Neusiedl}}$  ... gemessene Temperatur im Behälter Neusiedl

In Abbildung 3-11 ist zu sehen, dass die Regressionsanalyse mit der Bodentemperatur in 4 m Tiefe ein Bestimmtheitsmaß von 0,05 aufweist. Das Offset der Regressionsanalyse von 354 MWh/Tag entspricht einer konstanten Wärmeleistung von fast 15 MW, die immer entlang der Leitung vorhanden sein müsste. Tatsächlich ist aber entlang der Leitung keine Wärmequelle bekannt.

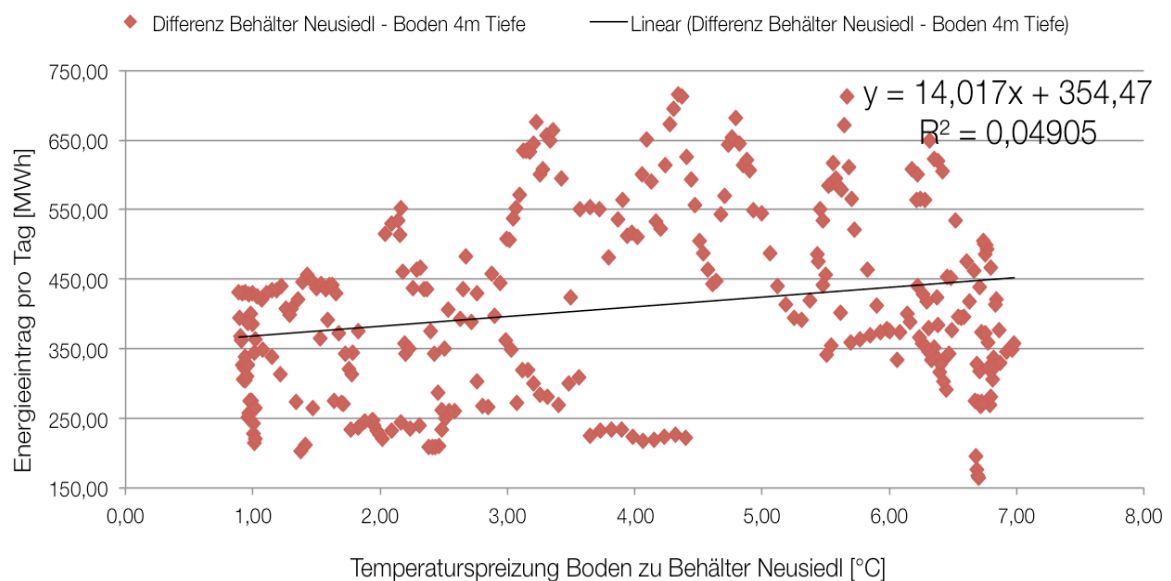


Abbildung 3-11: Regressionsanalyse des Energieeintrags in der HQL1 mit der Temperatur in 4 m Tiefe

Wie in Abbildung 3-12 zu sehen, liefert eine Regressionsanalyse, die die Bodentemperatur in 2 m Tiefe (siehe dazu Abbildung 3-10) in Zusammenhang mit der Erwärmung [ 16 ] entlang der Hochquellleitung zwischen den beiden Speichern setzt, ähnliche Werte, aber mit einem höheren Bestimmtheitsmaß von 0,38. Es ist damit gezeigt, dass die Wassererwärmung kaum durch die Temperaturdifferenz von Wasser und Boden erklärt werden kann. Es konnte für den Hauptteil der Temperatur-

veränderung im Rahmen dieser Diplomarbeit kein schlüssiger Zusammenhang hergestellt werden.<sup>31</sup>

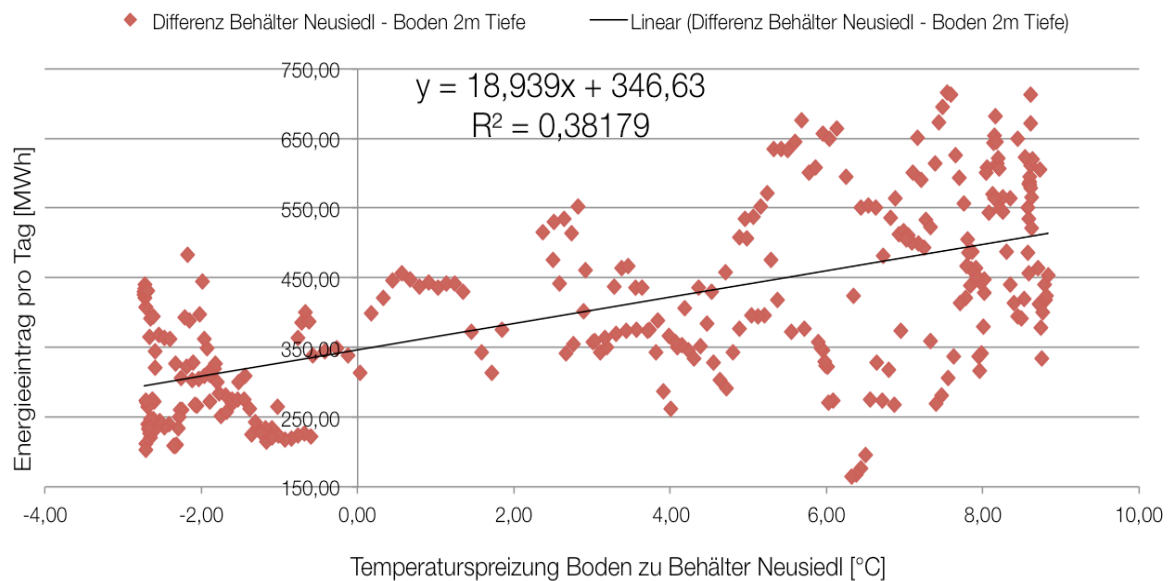


Abbildung 3-12: Regressionsanalyse des Energieeintrags in der HQL1 mit der Temperatur in 2 m Tiefe

Für die weiteren Simulationen werden die berechenbaren Temperaturveränderungen entlang der Versorgungsleitungen dahingehend berücksichtigt, dass eine Erwärmung auf halbem Weg zwischen den beiden Behältern angenommen wird. Dies gilt entsprechend auch für die HQL2. Es werden für beide Hochquellleitungen Energieeinträge aus der potentiellen Energie (42 Höhenmeter) und dem Wärmeaustausch zwischen Wasser und Boden entlang einer Fließstrecke von 30 km modelliert.

### 3.5 Energieeintrag und –austrag im Verteilnetz

Der Energieeintrag bzw. –austrag im Verteilnetz ergibt sich, analog zu [ 16 ], aus der Wassermenge und der Temperaturdifferenz in den Speichern und an den Entnahmestellen. Folglich ist es wichtig, die Temperatur mit der das Wasser bei Verbrauchern ankommt, zu kennen.

Da die Temperaturen der Hochquellleitungen in den beiden großen Versorgungsspeichern im Wiener Stadtgebiet gemessen werden, ist aus Abbildung 3-13 ablesbar, dass die Temperaturerhöhungen der HQL2 zeitlich mit Wartungs-/Revisionsarbeiten der Leitung zusammenfallen. In dieser Zeit wird Wasser aus dem Speicher der HQL1 in

<sup>31</sup> Über mögliche Erklärungen können nur Vermutungen angestellt werden. So kann eine bisher unbekannte Wärmequelle für die unerwartet hohen Temperaturen im Speicher Rosenhügel verantwortlich sein. Es kann aber auch ein Messfehler von etwa 1,5°C vorliegen.

den Speicher der HQL2 gepumpt, um von dort die höhergelegenen Druckzonen versorgen zu können. Ansonsten liegt die Temperatur der HQL2 bei konstanten 6,5°C. Derselbe Effekt ist bei Temperatureinbrüchen der HQL1 zu sehen. Der Temperaturrückgang Mitte August an der Entnahmestelle ist dadurch erklärbar, dass in dieser Phase ein sehr hoher Wasserbedarf vorhanden war und daher diese Messstelle möglicherweise von der HQL2 mitversorgt wurde. In Abbildung 3-13 stellt ‚Kläranlage‘ die Temperatur des Abwassers bei Eintritt in die Kläranlage dar und soll den Energieeintrag bei der Wassernutzung verdeutlichen.

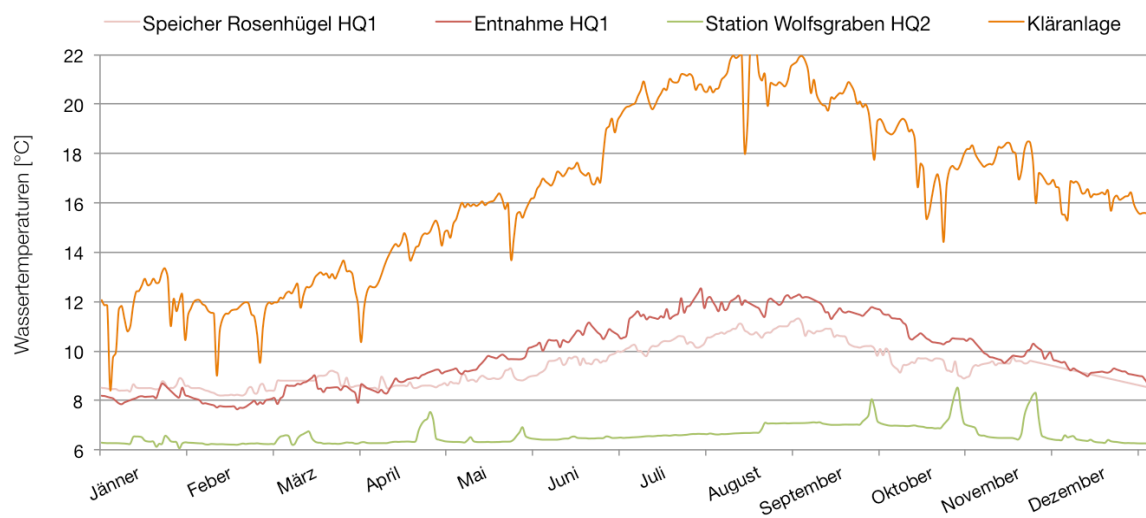


Abbildung 3-13: Temperaturen im Wiener Wassersystem

‚Entnahme HQL1‘ stellt eine manipulierte Messreihe an einer typischen Entnahmestelle (BT31.1 AKH Wien) aus dem Versorgungsgebiet der HQL1 dar. Für die Messdatenmanipulation wurde unterstellt, dass nur zu Arbeitszeiten korrekte Temperaturdaten erhoben werden, da ansonsten zu wenig Wasser genutzt wird. Daher wurden nur die gemittelten Wochentagswerte zwischen 6h00–18h00 der Entnahmetemperaturmessung herangezogen und die Wochenendwerte zwischen Freitag und Montag linearisiert aufgefüllt. Ebenso wurden die Messwerte der Entnahme HQL1 an gesetzlichen Feiertagen und dem Sommereinbruch bereinigt.

In weiterer Folge kann mittels einer linearen Regressionsanalyse der Energieeintrag bzw. –austrag im Verteilnetz untersucht werden. Wie in Abbildung 3-14 zu sehen ist, werden die Daten der Speichertemperatur Rosenhügel, der Entnahmetemperatur und der Bodentemperatur in 2 m Tiefe in einen Zusammenhang gesetzt. Aus der Differenz der Wassertemperatur und den Verbrauchswerten kann ein Energieeintrag in das Rohrleitungssystem berechnet werden, der, auf Grund der Linearität des Wärmeübergangs, in einen linearen Zusammenhang mit der Temperaturspreizung zwischen Wasser und Boden gesetzt wird.

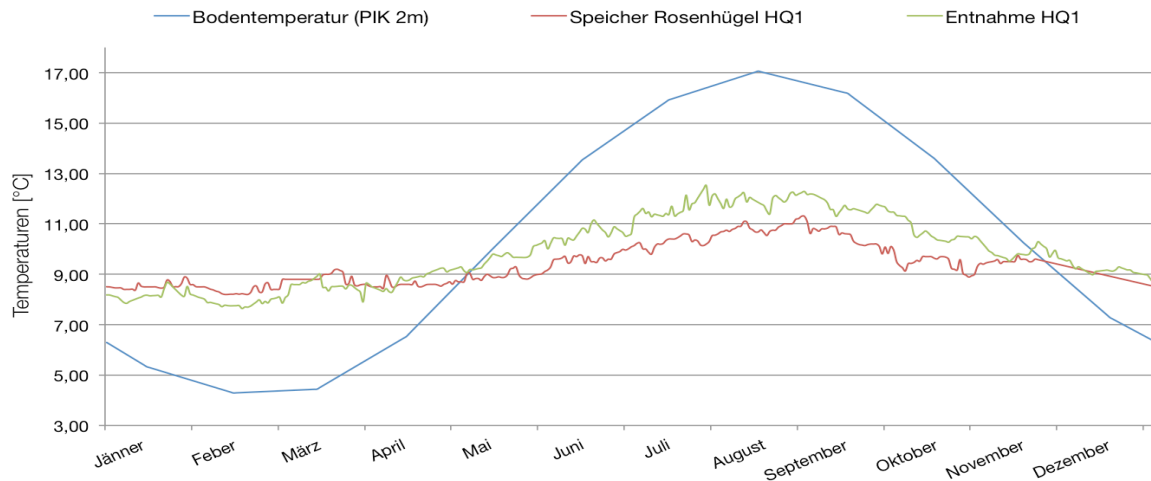


Abbildung 3-14: Bereinigte Temperaturen für die Regressionsanalyse

Um nun tatsächlich den Einfluss der Temperaturspreizung zwischen der Hochquelltemperatur im Speicher und der Bodentemperatur zu dem Energieeintrag in das Wasserverteilnetz festzustellen, wird eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Daraus ergibt sich der in Abbildung 3-15 dargestellte Zusammenhang zwischen der Temperaturdiffrenz von Entnahmetemperatur und Bodentemperatur und dem Energieeintrag.

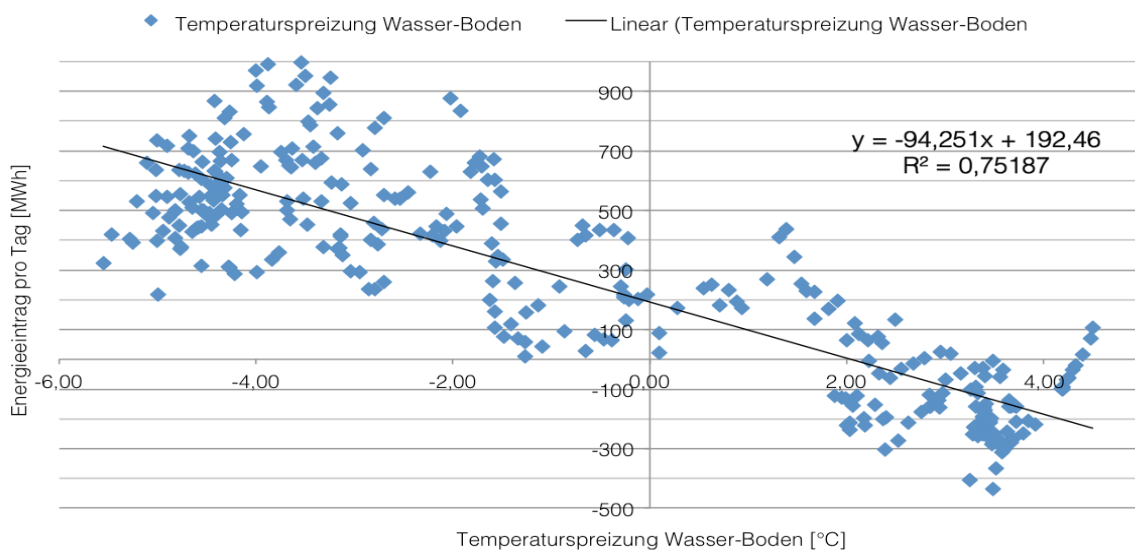


Abbildung 3-15: Bereinigter Zusammenhang

Entsprechend dem Fourier'schen Gesetz der Wärmeleistung,

$$\dot{Q} = \lambda * A * (T1 - T2) \quad [17]$$

das einen linearen Zusammenhang von der Temperaturdiffrenz zur übertragenen Wärmeleistung belegt, ergibt sich für den täglichen Energieeintrag in das gesamte Wiener Leitungsnetz ein linearer Zusammenhang von:

$$\dot{Q} = 192,5 - 94,25 * \Delta T [MWh] \quad [18]$$

Dass selbst bei einer nicht vorhandenen Temperaturdifferenz ein Energieeintrag stattfindet, kann/muss damit erklärt werden, dass im Leitungsnetz potentielle Energie des Wassers durch Druckverluste/Reibung in Wärme umgewandelt wird und dass eine gewisse Erwärmung im Gebäude stattfindet.

Der konstante Wärmeeintrag von 192 MWh bedeutet bei einem durchschnittlichen Tagesverbrauch von 400.000 m<sup>3</sup> eine Temperaturerhöhung von 0,41 °C. Auf Grund der Höhendifferenz aus Abbildung 3-5 von 60 m zwischen Speicher und Entnahme, kann nach [ 2 ] ein Drittel der Temperaturerhöhung erklärt werden. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass das Wasser im Gebäude der Messung der Entnahmetemperatur (BT31.1 AKH Wien), siehe Kapitel 3.3, im Jahresmittel um 0,27 °C aufgewärmt wird. Das kann natürlich kein absoluter Wert sein, sondern spiegelt eine Funktion aus Verweildauer, Gebäudetemperatur und Wassertemperatur wieder. In den Berechnungen wird dieser Effekt nicht weiter berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die Erwärmung bei einer höheren Vorlauftemperatur zwar verringert wird, aber damit dem Gebäude in der kalten Jahreszeit auch weniger Wärme entzogen wird. Daher ergäbe sich zwar ein etwas geringerer Effekt in der lokalen Wassererwärmung, der jedoch durch einen positiven Effekt in der Gebäudeheizung ausgeglichen wird. Für eine detailliertere Abschätzung des Einflusses im Gebäude bräuchte es eine Vielzahl an Messungen in den unterschiedlichsten Gebäudetypen.

Solange die temperaturegeführte Vorwärmung in der Heizsaison stattfindet, führt eine höhere Vorlauftemperatur nur zu Effekten zwischen Heizungs- und Warmwasserbereitungssystemen. Die durch die zentrale Trinkwasservorwärmung substituierte Energie in einem Gebäude bleibt unabhängig von der Verweildauer im Wesentlichen gleich. In der heißen Jahreszeit kann es sein, dass durch vorgewärmtes Trinkwasser der sonstige Kühlbedarf in einem Gebäude steigt, da weniger Wärme an das Wasser abgegeben wird. Dies stellt neben den Behaglichkeitsanforderungen ein Argument gegen eine zentrale Trinkwasservorwärmung in der heißen Jahreszeit dar.

Mit diesen Erkenntnissen über die Temperatur- und Energieentwicklungen im Wiener Wasserversorgungssystem wird dieses Kapitel geschlossen. Im nächsten Kapitel wird der Wasserbrauch näher betrachtet, um in der Folge die Warmwassernutzung und damit die Möglichkeit der Substitutionen von höherwertigen Energieträgern abschätzen zu können.

## 4 Warmwasseraufbereitung

In diesem Kapitel wird die Nutzung von Wasser diskutiert, um den gesamten Warmwasserbedarf und den Aufwand für die Warmwasserbereitung zu ermitteln.

### 4.1 Wassernutzung

Um die Wassernutzung festzustellen, wird auf Literaturangaben zurückgegriffen. Auch wenn diese Erhebungen ein paar Jahre zurückliegen, kann davon ausgegangen werden, dass sie im Wesentlichen der heutigen Nutzung entsprechen. "Erhebungen im Jahr 2011 zufolge hat sich derzeit ein durchschnittlicher Pro-Kopf-Verbrauch (Abgabe an Verbraucher inkl. Gewerbe und Industrie) von rund 163 l/Ed (Liter pro Einwohner und Tag) eingestellt. Gemeinsam mit der österreichweiten Hochrechnung des durchschnittlichen Haushaltswasserverbrauchs von 135 l/Ed ergibt sich daraus ein Anteil von 17 % für öffentliche Einrichtungen, Gewerbe und mitversorgte Industrie während 83 % in privaten Haushalten verbraucht wird."<sup>32</sup> In Abbildung 4-1 ist die Zusammensetzung des Wasserverbrauchs in Versorgungssystemen dargestellt, die im Zuge dieser österreichweiten Erhebung festgestellt worden ist.

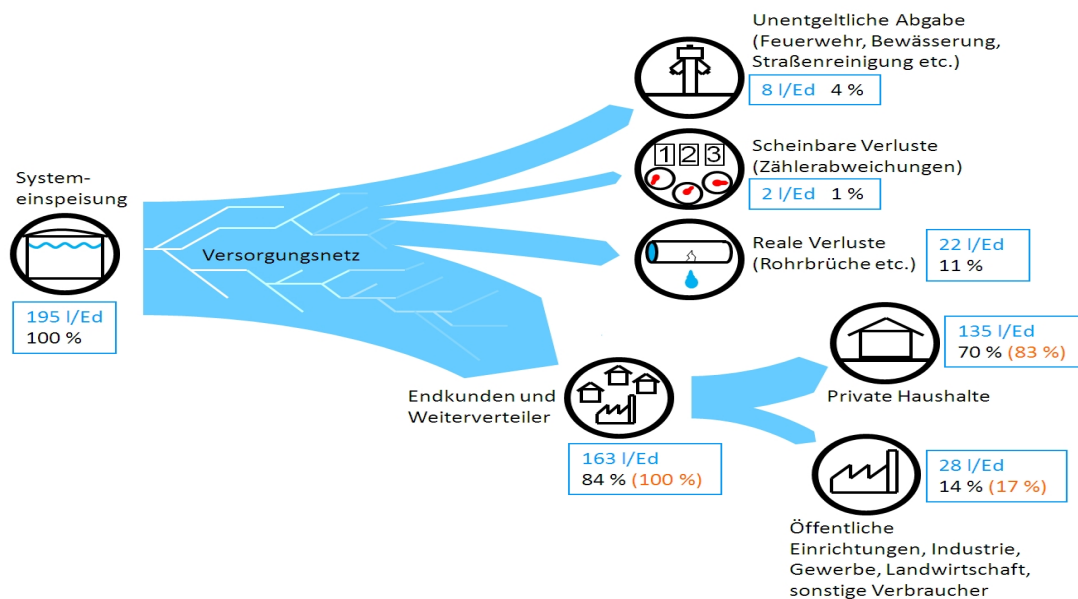


Abbildung 4-1: Wasserverbrauch und Bedarf<sup>33</sup>

Demnach kann davon ausgegangen werden, dass private Haushalte 70 % und öffentliche Einrichtungen, Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft und Sonstige 14 % des insgesamt eingespeisten Wassers verbrauchen.

<sup>32</sup> Neunteufel 2012

<sup>33</sup> Neunteufel 2012



Nach Angaben der Stadt Wien verbraucht der durchschnittliche Wiener privat etwa 133 Liter Wasser pro Tag. Diese Nutzung setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:<sup>34</sup>

- Duschen, Baden: 44 Liter
- WC-Spülung: 40 Liter
- Wäsche waschen: 15 Liter
- Körperpflege: 9 Liter
- Geschirr spülen: 6 Liter
- Kochen: 3 Liter
- Trinken: 3 Liter
- Sonstige Anwendungen wie Wohnungsreinigung, Garten, Autowaschen: 13 Liter

Unterstellt man bei Duschen, Waschen, Pflege, Spülen, Kochen und der Hälfte an sonstigen Anwendungen einen Warmwassergebrauch, so errechnet sich ein Warmwasserbedarf von 83,5 Liter pro Tag und Person. Bei 1.797.337 Einwohner der Stadt Wien im Jahr 2015<sup>35</sup> errechnet sich somit ein gesamter Warmwasserbedarf von 150.077 m<sup>3</sup>/Tag. Nachdem neben Privaten, sonstige Verbraucher 17 % des entgeltlichen Wassers konsumieren, muss für diese noch ein Anteil aufgeschlagen werden, um den gesamten Warmwassergebrauch zu ermitteln. Obwohl Wien verhältnismäßig weniger Landwirtschaft als Restösterreich betreibt und der Warmwasserbedarf in Hotellerie, Gastgewerbe, Wäschereien, Sportanlagen und anderen nicht unerheblich sein dürfte, wird für Andere ein pauschaler Anteil von 10 % aufgeschlagen, um in den Potentialabschätzungen eher konservativ zu sein und diese nicht zu überschätzen. Das ergibt für Wien einen täglichen Warmwasserbedarf von 165.000 m<sup>3</sup>.

Wie sich gezeigt hat, ist die Menge an Wasser die bei den Wassernutzern aufgewärmt wird nur grob zu schätzen. Zwar gibt es einen „Einfluss von Tagestemperaturen und Trockenheit auf den Wasserverbrauch“<sup>36</sup>, der sich im Wesentlichen auf Poolbefüllungen und Außennutzung zurückführen lässt, es ist aber weder ein jahreszeitlicher noch wochentägiger Einfluss auf den Bedarf für Warmwasser bekannt.<sup>37</sup> Daher wird in den Modellberechnungen der Wert für den Warmwassergebrauch über das Jahr konstant gehalten.

Es wäre eine naheliegende Überlegung, aus einem Vergleich der Temperaturdaten bei der Entnahme und an der Kläranlage, sowie der täglichen Wassermenge den

---

<sup>34</sup> Wiener Wasser (MA 31) 2017c

<sup>35</sup> Wirtschaft, Arbeit und Statistik (Magistratsabteilung 23) 2017

<sup>36</sup> Neunteufel 2015

<sup>37</sup> Neunteufel 2016

Energieeintrag zu ermitteln. In Abbildung 4-2 ist der Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag im Versorgungsgebiet der HQL1 und der Differenz aus der Temperatur des Wassers an der Kläranlage und dem Boden abgebildet. Geht man davon aus, dass der Fixanteil dieser Regression der Wassererwärmung entspricht und die HQL1 45 % der Wasserversorgung abdeckt, so ermittelt sich für ganz Wien ein Energiebedarf für Warmwasser von 1.580 GWh. Berücksichtigt man, dass sich dieser Wert noch um die Abkühlung des Regenwassers erhöhen würde, so nähert sich dieser Wert den etwa 1.970 GWh (siehe dazu Kapitel 2.1), die die Statistik Austria für die Warmwasserbereitung ermittelt hat.

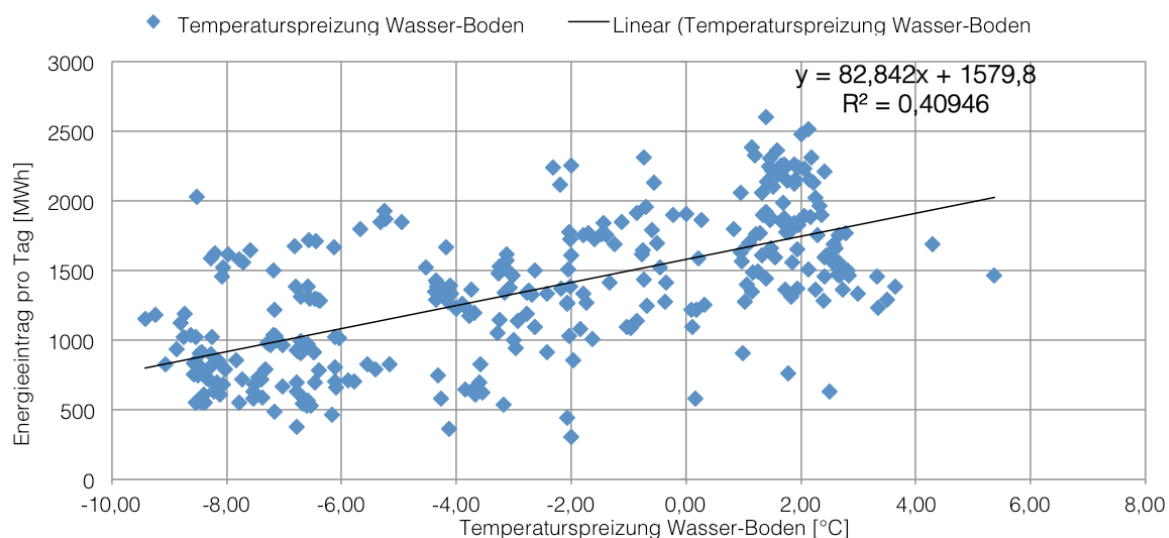


Abbildung 4-2: Regressionsanalyse des Energieeintrags zwischen Entnahme und Kläranlage und der Temperaturspreizung

Zwar kann festgestellt werden, wie groß der Energieeintrag während der Wassernutzung ist, jedoch lässt sich nicht feststellen, wie groß die genutzte Warmwassermenge ist. Diese ist allerdings für die Berechnung der Substitutionseffekte relevant. Daher muss, wie schon oben festgestellt, die Warmwassermenge anhand von Literaturquellen geschätzt werden.

## 4.2 Warmwasserbereitung

Als Systemgrenze für die Substituierung der Energieträger durch die zentrale Trinkwasservorwärmung wird versucht abzuschätzen, wie sich der Energieträgereinsatz am Zähler (des Haushaltes) verändert. Somit wird als betrachtetes System der Warmwasserbereitung die Gebäudehülle angenommen. Damit bleiben Verluste in der Vorlaufkette der Energieträger unberücksichtigt. Für die ökonomische Potentialabschätzung ist dies jedoch treffsicher, da sich diese Vorverluste idealerweise im Arbeitspreis der Energieträger abbilden. Wärmeverluste, die im Gebäude, also innerhalb

des betrachteten Systems, passieren, sind schwierig abzuschätzen, da sie in der Folge den Energieeinsatz anderer Systeme verändern. Werden beispielsweise Leitungen im Haus besser gedämmt, steigt in der kalten Jahreszeit der übrige Heizbedarf. Inwieweit sich diese Werte verändern, hängt von Gebäude und Nutzungsform ab.

Der tägliche Warmwasserbedarf für Wien wurde, wie in Kapitel 4.1 dargelegt, in Höhe von 165.000 m<sup>3</sup> ermittelt. Nun stellt sich die Frage, mit welchem Aufwand diese Warmwasserbereitung durchgeführt wird. Aus den Daten der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria<sup>38</sup> zeigt sich, „rund die Hälfte der Energie [für die Warmwasserbereitung] stammt vom Energieträger Gas, ein Drittel der Energie liefert in Wien die Fernwärme“<sup>39</sup> und ein gutes Sechstel wird aus elektrischer Energie bereitgestellt. Die genaue Aufteilung ist in Abbildung 4-3 aufgeschlüsselt, wobei die Sonstigen überwiegend aus Heizöl aber auch aus kleinen Anteilen an Wärmepumpe, Solarwärme und Holz bestehen. „Der Anteil erneuerbarer Energie zur Warmwasserbereitung ist gegenwärtig noch sehr gering. Aktuell tragen in Wien im Bereich der privaten Haushalte Wärmepumpen mit rund 0,03 PJ (8 GWh), solarthermische Anlagen mit 0,06 PJ (16 GWh) zur Energieaufbringung für Raumwärme und Warmwasserbereitung bei. Beide Werte sind jeweils noch unter 1 % des relevanten Energieeinsatzes zur Warmwasserbereitung und liegen deutlich unter dem österreichischen Durchschnitt.“<sup>40</sup>

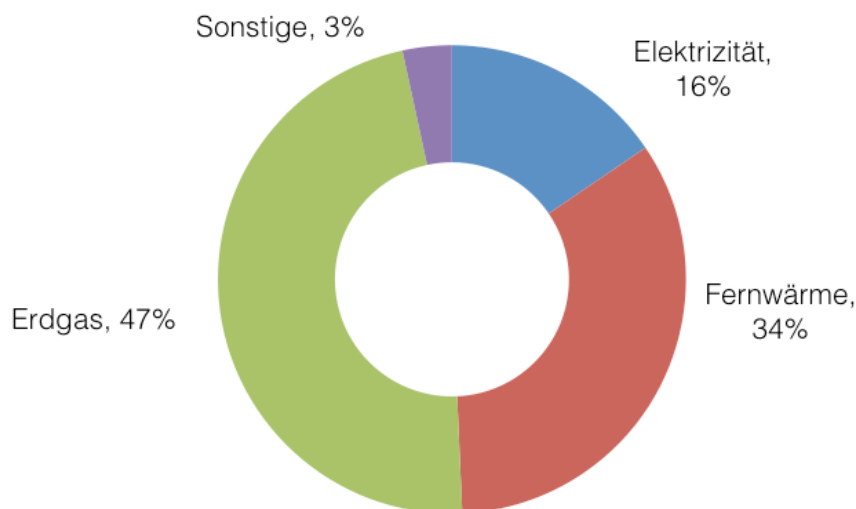


Abbildung 4-3: Aufteilung der Energieträger für die Warmwasserbereitung in Wien 2015/16

„Bei Nutzung des Energieträgers Erdgas sind bezüglich der Warmwasserbereitung sowohl zentrale als auch dezentrale Ausführungen üblich. Zu den eingesetzten Gerätetypen zählen Durchlauferhitzer, Kombithermen, Gas-Warmwasserspeicher und Brennwertgeräte.“<sup>41</sup> Für den Wirkungsgrad von erdgasbetriebenen Warmwasserbe-

<sup>38</sup> STATISTIK AUSTRIA 2017

<sup>39</sup> Farghadan 2016

<sup>40</sup> Farghadan 2016

<sup>41</sup> Farghadan 2016

leitungsanlagen wird entsprechend der Literatur ein Wirkungsgrad von 0,85 bezogen auf den Heizwert angenommen.<sup>42</sup> Nachdem die Verrechnung jedoch auf Basis des Brennwertes durchgeführt wird, wird dieser Wirkungsgrad noch um diesen Faktor verändert:

$$\eta_{Brenn} = \eta_{Heiz} * \frac{Heizwert}{Brennwert} \quad [19]$$

In Wien hat das gelieferte Erdgas einen Brennwert von 11,1 kWh/m<sup>3</sup> und einen Heizwert von 10 kWh/m<sup>3</sup>.<sup>43</sup> Somit ergibt sich ein Wirkungsgrad von 0,766 bezogen auf den Brennwert. Weiters wird ein Emissionsfaktor von 202 g<sub>CO2</sub>/kWh unterstellt.<sup>44</sup>

„Die Wärmeerzeugung der Fernwärme Wien erfolgt zu einem Großteil aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie aus Abwärme der Industrie. Zusätzlich wird rund ein Drittel der benötigten Wärme durch Müllverbrennungs- bzw. Biomasseanlagen bereitgestellt. Die Wärmeübergabe an ein Mehrfamilienhaus geschieht durch eine sogenannte Hausstation (Wärmetauscher).“<sup>45</sup> Für die weiteren Berechnungen wird vom Autor für den Energieträger Fernwärme in der Wärmeumwandlung zwischen der Hausstation und der Wasserentnahmestelle ein Wirkungsgrad von 0,85 unterstellt. Zwar findet sich in der Literatur ein Wert von 0,95<sup>46</sup>, doch darin sind keine Verluste zwischen Zähler und Verbraucher berücksichtigt. Für die Erzeugung der Fernwärme wird mit einem Emissionsfaktor von 132 g<sub>CO2</sub>/kWh gerechnet.<sup>47</sup>

Für die Erwärmung mit Strom wird entsprechend der Literatur vom Autor ein Wirkungsgrad von 95 % unterstellt.<sup>48</sup> Der Emissionsfaktor wird gemäß § 78 Abs. 2 EIWOG 2010 und Stromkennzeichnungsverordnung entsprechend der Stromkennzeichnung des Hauptlieferanten Wien Energie mit 131,55 g<sub>CO2</sub>/kWh angenommen.<sup>49</sup> Ruft man sich eine typische Merit Order Kurve in Erinnerung, könnte auch argumentiert werden, dass eine Einsparung beim Strom in erster Linie die Stromerzeugung aus fossiler Erzeugung substituieren würde. Demzufolge könnte man den Emissionsfaktor deutlich höher, bei etwa 500 g<sub>CO2</sub>/kWh ansetzen. Aus qualitativer Sicht wird eine zentrale Trinkwasservorwärmung mit elektrischer Energie eher nicht rentabel sein, da genauso die Fernwärme mit elektrischer Energie geheizt werden könnte, die gesamten Verluste jedoch geringer wären.

---

<sup>42</sup> Laasch and Laasch 2013

<sup>43</sup> „Wiener Netze | Kenndaten Für Erdgas | Kenndaten | Rund Um Erdgas | Erdgas“ 2018

<sup>44</sup> Forschungsstelle für Energiewirtschaft 2009, 2

<sup>45</sup> Farghadan 2016

<sup>46</sup> Laasch and Laasch 2013

<sup>47</sup> Strobl and Grüneis 2017

<sup>48</sup> Laasch and Laasch 2013

<sup>49</sup> Wien Energie 2017

Für die sonstige Erwärmung wird, wegen dem Hauptanteil von Heizöl und den Wirkungsgradangaben über verschiedene Heizsysteme in der Literatur, vom Autor ein Wirkungsgrad von 75 % unterstellt und der Emissionsfaktor mit 300 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh geschätzt.<sup>50</sup>

Die in dieser Arbeit angenommenen Arbeitspreise der unterschiedlichen Energieträger orientieren sich an den in Wien verfügbaren Tarifen und den an den Börsen gehandelten Future Preisen. In den weiteren Berechnungen wird von folgenden Preisannahmen ausgegangen:

| <i>Warmwasser Wien</i> | Elektrizität | Fernwärme | Erdgas | Sonstige |
|------------------------|--------------|-----------|--------|----------|
| Arbeitspreis [€/MWh]   | 45           | 55        | 25     | 35       |

Tabelle 4-1: angenommene Arbeitspreise der Warmwasserbereitung

Ausgehend davon müssen noch Kostenauswirkungen auf Grund der CO<sub>2</sub>-Emissionen bedacht werden, um daraus die Substitutionspreise berechnen zu können.

### 4.3 Emissionskosten in der Warmwasserbereitung

Für die bei der Warmwasserbereitung potentiell einsparbaren Emissionskosten werden die CO<sub>2</sub>-Preise und der Ausgleichsbetrag aus dem EEffG 2015 als Kosteneinsparungen aus der CO<sub>2</sub>-Vermeidung in Betracht gezogen.

Entsprechend den aktuellen an der EEX gehandelten Preisen wird der Emission einer Tonne CO<sub>2</sub> ein Preis von 7,5 € zugeschrieben.<sup>51</sup> Es ist für Strom und Fernwärme richtig, dass diese Emissionskosten schon in den Arbeitspreisen der substituierten Energie enthalten sind. Trotzdem können sie als fiktive Kosteneinsparungen in einen Vergleich über die Gesamtsystemkosten mit einbezogen werden. Zwar merkt diese Einsparung nicht der Wassernutzer direkt, jedoch werden diese zusätzlichen Einsparungen beim Lieferanten wirksam und verschmälern dessen Kostenstruktur wodurch sich eine Verringerung der allgemeinen Energiekosten ergeben sollte.

Im Zusammenhang mit der Berücksichtigung von neuen Heizkesseln im Rahmen des Energieeffizienzgesetzes argumentiert Roth, Vizechef der Wirtschaftskammer, dass von dem Grundsatz auszugehen ist, dass jede eingesparte fossile Energie zu einer Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes führt.<sup>52</sup> So kann auch davon ausgegangen werden, dass die CO<sub>2</sub>-Einsparung durch eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung nach dem Energieeffizienzgesetz anrechenbar ist und damit monetisiert werden kann. Ein

<sup>50</sup> Laasch and Laasch 2013

<sup>51</sup> "European Emission Allowances (EUA)" 2017

<sup>52</sup> Narodoslawsky 2017

Ausgleichsbetrag für die CO<sub>2</sub>-Einsparung kann nach EEffG 2015 §21 (2) mit 20 € pro Tonne angenommen werden. Zusätzlich könnte nach §21 (4) auf Ansuchen "eine Förderung einer Energieeffizienzmaßnahme in Form eines Investitionszuschusses gewährt werden. Die Förderungen werden gemäß den Bestimmungen des Bundesgesetzes, mit dem zusätzliche Mittel für Energieeffizienz bereitgestellt werden, abgewickelt." Entsprechend §12 (6) kann bis zur Hälfte der Investitionen gefördert werden. "Nach Maßgabe der verfügbaren Mittel sind maximal 50 % der Investitionsmehrkosten bzw. 35 % des unmittelbar für das Setzen der Maßnahme gemäß Abs. 4 erforderlichen Investitionsvolumens (exklusive Grundstückskosten) als Investitionszuschuss zu gewähren." Ein solcher Investitionszuschuss kann in den Modellberechnungen jedoch nicht berücksichtigt werden, da er nicht gesichert zur Verfügung steht.

Die Kosteneinsparungen aus der CO<sub>2</sub>-Vermeidung werden also, wie oben ausgeführt, mit 27,5 €/t<sub>CO2</sub> angesetzt und resultieren aus den gehandelten CO<sub>2</sub>-Preisen sowie dem Ausgleichsbeitrag des EEffG 2015.

## 4.4 Substitutionspreise

Für die Berechnung fiktiver Substitutionspreise der Energieträger durch eine zentrale Trinkwasservorwärmung werden die reinen Arbeitspreise als Berechnungsgrundlage für Kosteneinsparungen angenommen und zusätzliche Einsparungen aus einer CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion miteinbezogen. Zwar stimmt die Argumentation, dass durch eine zentrale Trinkwasservorwärmung auch die Leistungsspitzen bei den substituierten Energieträgern reduziert werden und damit positive Effekte bei der Leitungsinfrastruktur erwartet werden können. Trotzdem wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Kosten für die Leitungsinfrastruktur und die Besteuerung des Energieverbrauchs in Folge anders umgelegt werden und eben tatsächlich nur eine Einsparung beim Faktor Arbeit für wirtschaftliche Überlegungen herangezogen werden kann. Der Substitutionspreis bezieht sich auf die Kosten, die eingespart werden, wenn im Wasser mehr Energie enthalten ist. Daraus ergibt sich für die Berechnung der Substitutionspreise der Technologien k folgender Zusammenhang:

$$p_{Sub,k} = \frac{p_k}{\eta_k} + \frac{emf_k * p_{CO2}}{\eta_k} \quad [20]$$

*p<sub>sub,k</sub> ... Substitutionspreis der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie*

*p<sub>k</sub> ... Arbeitspreis der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie*

*η<sub>k</sub> ... Wirkungsgrad der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie*

*emf<sub>k</sub> ... Emissionsfaktor der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie*

*p<sub>CO2</sub> ... Erlöse aus der CO<sub>2</sub> – Vermeidung*

Gewichtet nach den Anteilen an der gesamten Warmwasseraufbereitung, berechnet sich insgesamt der relevante Substitutionspreis  $p_{Sub}$  für die zentrale Trinkwasservorwärmung folgendermaßen:

$$p_{Sub} = \sum_{k=1}^n \frac{p_{Sub,k}}{share_k} \quad [ 21 ]$$

$p_{Sub}$  ... Substitutionspreis

$share_k$  ... Anteil der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie

Dieser Substitutionspreis entspricht der rechten Seite der ursprünglichen Gleichung [ 1 ] zur Überlegung der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit einer zentralen Trinkwasservorwärmung und lässt sich damit umschreiben zu:

$$\frac{c_{heat_{central}}}{\eta_{central}} \leq p_{Sub} , \quad p_{Sub} = \frac{c_{heat_{local}}}{\eta_{local}} \quad [ 22 ]$$

In untenstehender Zusammenfassung sind die in dieser Arbeit angenommenen Substitutionspreise für die lokale Wassererwärmung aufgelistet.

|            | Warmwasser Wien                    | Elektrizität | Fernwärme | Erdgas | Sonstige |
|------------|------------------------------------|--------------|-----------|--------|----------|
| share      | Anteil                             | 15,5%        | 33,8%     | 47,3%  | 3,4%     |
| $\eta$     | Wirkungsgrad                       | 95%          | 85%       | 77%    | 75%      |
| emf        | Emissionsfaktor [g/kWh]            | 131,55       | 132       | 202    | 300      |
| p          | Arbeitspreis [€/MWh]               | 45           | 55        | 25     | 35       |
| $p_{CO_2}$ | CO <sub>2</sub> Anrechnung [€/MWh] | 3,62         | 3,63      | 5,56   | 8,25     |
| $p_{Sub}$  | Substitutionspreis [€/MWh]         | 51,18        | 68,98     | 39,89  | 57,67    |

Tabelle 4-2: Übersicht zur lokalen Warmwasserbereitung in Wien

Tabelle 4-2 stellt also die finanziellen Grundlagen dar, mit denen die Einsparungen der lokalen Warmwasserbereitung an den Orten der Wassernutzung abgeschätzt werden können. Der Substitutionspreis pro ersetzter MWh Wärme bei der Wassernutzung ergibt sich nach [ 21 ] mit 52,07 €/MWh:

$$p_{Sub} = \frac{c_{heat_{local}}}{\eta_{local}} = \sum_{k=1}^n \frac{p_{Sub,k}}{share_k} = 52,07 \text{ €/MWh} \quad [ 23 ]$$

Der lokale Teil der Gleichung zur Sinnhaftigkeit einer zentralen Trinkwasservorwärmung konnte dadurch ermittelt werden. Für die zentrale Vorwärmung wird nun in Kapitel 5 nach Wärmequellen und deren Erschließungskosten gesucht, ehe in einem Rechenmodell die Systemwirkungsgrade der zentralen Trinkwasservorwärmung abgeschätzt werden und damit anhand verschiedener Optimierungsszenarien Aussagen zu den Potentialen gemacht werden können.

## 5 Potentiale und Kosten der Wärmequellen

Nachdem im vorherigen Kapitel die lokale Warmwasserbereitung analysiert wurde, stellt sich nun die Frage, unter welchen Bedingungen mögliche Wärmequellen für eine zentrale Vorwärmung genutzt werden können, um Teile der lokalen Warmwasserbereitung zu substituieren. Konkret geht es also darum die Grundlage für die Berechnung der zentralen Wärmegestehungskosten  $c_{heat_{central}}$  zu schaffen.

Die Lektüre der energiewirtschaftlichen Literatur gibt keinen Aufschluss über die exakten Kosten zu denen Wärmepotentiale in der angedachten Form erschlossen werden können. Das liegt daran, dass es keine Erfahrung mit großtechnischen Wärmeanlagen für den Einsatzzweck einer Trinkwasservorwärmung gibt. Es werden daher lediglich Abschätzungen in Anlehnung an ähnliche Wärmewerke, die sich aus der Literatur ergeben, vorgenommen. Diese präsentierten Abschätzungen stehen frei zur Diskussion und bedürfen gewiss weiterer Recherche.

Bei der Nutzung von Wärmepotentialen für eine mögliche zentrale Trinkwasservorwärmung bieten sich vorrangig Wärmequellen an, die (a) auf einem niedrigen Temperatur/Exergie-Niveau zur Verfügung stehen und (b) auf Grund einer schlechten anderweitigen Nutzbarkeit relativ günstig nutzbar wären. Da die Gesamtsystemverluste jedenfalls größer sind als bei einer lokalen Wärmenutzung, sollte eine zentrale Wärmequelle entsprechend günstiger sein als die lokalen. Daher müssen die Wärmepotentiale auch in der Nähe des Wasserversorgungssystems liegen, da ein Wärmetransport über weite Distanzen nicht rentabel wäre.

Um die unterschiedlichen Wärmequellen miteinander zu vergleichen, werden in den folgenden Unterkapiteln Überlegungen zu den variablen und fixen Kosten sowie der jeweiligen Lebensdauer angestellt. Für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gibt es statische und dynamische Verfahren. „Bei Investitionen mit langer Laufzeit wie in der Energiewirtschaft werden vorzugweise die dynamischen Verfahren angewandt“.<sup>53</sup> Dynamisch bedeutet hierbei, dass die Zahlungen diskontiert werden. „Ein Vergleich der Kapitalwerte ist meistens nicht das Ziel von Investitionsrechnungen für Projekte im Energiebereich. Das eigentliche Wirtschaftlichkeitskriterium sind die spezifischen Kosten pro Produkteinheit. [...] Sie werden als finanzmathematischer Mittelwert über die Nutzungsdauer ermittelt.“<sup>54</sup> Daher wird in dieser Arbeit die Annuitätenmethode verwendet, um die Investitionskosten einer zentralen Trinkwasservorwärmung in Relation zu ihren variablen Kosten und den möglichen lokalen Kosteneinsparungen zu

---

<sup>53</sup> Panos 2013

<sup>54</sup> Panos 2013



setzen. „Bei der Annuitätenmethode werden alle mit einem Investitionsvorhaben zusammenhängenden Zahlungen finanzmathematisch in gleich hohe jährliche Raten umgewandelt. Die jährlichen Raten werden als Annuitäten bezeichnet.“<sup>55</sup> Der zugehörige Annuitätsfaktor  $a_n$  berechnet sich :

$$a_n = \frac{1}{\sum_{t=1}^n \frac{1}{q^t}} = \frac{q^n * (q - 1)}{q^n - 1} \quad [ 24 ]$$

$a_n$  ... Annuitätsfaktor

$q$  ... Diskontierungsfaktor  $q = 1 + i/100$

$i$  ... kalkulatorischer Zinssatz in %/a

$t$  ... Jahr der Nutzungsdauer 1,2,3 ...,  $n$

$n$  ... kalkulatorische Nutzungsdauer in Jahren

Die variablen Kosten der zentralen Vorwärmung und die möglichen Kosteneinsparungen bei der lokalen Trinkwassererwärmung in den Haushalten werden in dieser Arbeit nicht eskaliert (da der Fokus dieser Arbeit nicht auf Szenarien über Preisentwicklungen liegen soll). Dieser Umstand muss bei der Wahl des kalkulatorischen Zinssatzes  $i$  berücksichtigt werden. Um die Unsicherheit der Inflationsraten zu umgehen, wird die Investitionsrechnung inflationsbereinigt durchgeführt. „Dabei wird bei Zahlungsströmen nur die über die Inflation hinausgehende Steigerungsrate in der Kalkulation berücksichtigt. [...] Zur Bestimmung des realen Zinssatzes muss der jeweilige Nominalzinssatz um die Inflationsrate bereinigt werden. Zur Inflationsbereinigung wird oft die Inflationsrate vom nominalen Zinssatz arithmetisch subtrahiert“.<sup>56</sup>

$$i_r = i_n - r \text{ [%]} \quad [ 25 ]$$

$i_n, i_r$  ... nominaler, realer Zinssatz

$r$  ... Inflationsrate

Die Berechnungsmethode nach [ 25 ] ist zwar nicht exakt, genügt aber für erste Abschätzungen, wie sie hier vorgenommen werden. Nimmt man, wie in der Literatur<sup>57</sup> dargestellt, eine Inflation von 2,1 % und eine Rendite 4,1 % für die Eurozone im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts an und einen zusätzlichen Risikoaufschlag von 1 %, so ergibt sich für den realen (kalkulatorischen) Zinssatz  $i_r = 3 \text{ %}$ . Allgemein lässt sich sagen: „Eine Investition gilt als vorteilhaft, wenn die Annuität aus Einnahmen minus Kosten positiv ist (absolute Vorteilhaftigkeit)“.<sup>58</sup>

---

<sup>55</sup> Panos 2013

<sup>56</sup> Panos 2013

<sup>57</sup> Panos 2013

<sup>58</sup> Panos 2013

In den folgenden Unterkapiteln wird die allgemeinen Kostenkomponente der potentiellen Wärmequellen debattiert. Dann werden die Wärmepotentiale aus solarer Einstrahlung, industrieller Abwärme sowie geothermischer Wärme betrachtet. Zusätzlich wird die Möglichkeit der Nutzung einer elektrischen Vorwärmung diskutiert. Aus einer zusammenfassenden Darstellung am Ende des Kapitels werden die Wärmegestehungskosten der Technologien ermittelt und damit  $c_{heat_{central}}$  berechnet.

## 5.1 Kostenkomponenten der Vorwärmung

Die Kosten eines Werks zur Trinkwasservorwärmung setzen sich im Wesentlichen aus den Kosten der Erschließung einer Wärmequelle und den laufenden Betriebskosten dieser Anlage zusammen. Zusätzlich fallen Kosten an für den Transport der Wärme von der Wärmequelle zur Wasserleitung und für eine Übergabestation, an der das Wasser vorgewärmt wird.

Die spezifischen Kosten der Wärmequellen werden in den jeweiligen folgenden Kapitel betrachtet.

Um Wärmeleistungen im Bereich von 5–50 MW in Wärmeleitungen über weitere Strecken zu transportieren, sind Leitungsdurchmesser von 100–400 mm nötig.<sup>59</sup> Je nach Größe und Bebauung der Strecke ergeben sich spezifische Investitionskosten von 500–1.500 €/m Trasse.<sup>60</sup> Andere Quellen geben Leitungskosten von 1.350–1.800 €/m Trasse bei 1–10 MW Leistung an. Dies jedoch im Stadtgebiet.<sup>61</sup> Bezogen auf Leistungen, lassen sich daraus Kosten von 30.000–135.000 €/MW/km abschätzen. „Die spezifischen Investitionskosten pro Trassenmeter Fernwärmeleitung setzen sich zusammen aus den Kosten für Material, Verlegung und Grabarbeiten.“<sup>62</sup> Die spezifischen Investitionskosten müssen, wie die übrigen Wärmewerkskosten, mit einem Annuitätenfaktor multipliziert und durch die jährlich zugeführte Wärmemenge dividiert werden, um die Leitungskosten je Energieeinheit zu gelangen.<sup>63</sup>

Im Folgenden werden die Kosten für eine beispielhafte Leitung berechnet, um mögliche Transportdistanzen zu verdeutlichen.

Mit dem realen (kalkulatorischen) Zinssatz  $i_r = 3\%$  aus [ 25 ] und einer Lebensdauer von 20 Jahren ergibt sich der Annuitätsfaktor  $a_n$  zu:

---

<sup>59</sup> Panos 2013

<sup>60</sup> Panos 2013

<sup>61</sup> Fritz 2016

<sup>62</sup> Thalmann 2018

<sup>63</sup> Thalmann 2018

$$a_n = \frac{1,03^{20} * (1,03 - 1)}{1,03^{20} - 1} = 6,72\% \quad [ 26 ]$$

Bei beispielhaften 5000 Volllaststunden ( *VLH* ) und Investitionskosten  $I_L$  von 60.000 €/MW/km ergeben sich Leitungskosten von 0,81 €/MWh/km:

$$c_{Leitung} = \frac{a_n * I_L}{VLH} = \frac{6,72\% * 60.000}{5000} = 0,81 \text{ €/MWh|km} \quad [ 27 ]$$

Somit können in der weiteren Betrachtung die Leitungskosten als variable Kosten verstanden werden. Je nach Auslastung und Leistungsgröße ändern sich die Kosten für die Wärmeleitung. Bei Kosten von über 20 €/MWh, die einer Entfernung von über 25 km entsprechen, wird eine Wärmeleitungen jedenfalls unrentabel sein. Bei solarer Wärme, Wärme aus Strom und Geothermie wird in weiterer Folge davon ausgegangen, dass sich diese Wärmequellen entlang der Leitung befinden. Bei industrieller Abwärme wird davon ausgegangen, dass sich diese in einem durchschnittlichen Abstand von 10 km zur Wasserleitung befindet.

Die Kosten für Wärmeübergabestationen betragen im Verbraucherbereich 5.000–12.000 € bei Leistungen von 10–500 kW, wobei die Kosten degressiv steigen.<sup>64</sup> In einer Studie zu Wärmetauschern werden die Kosten von flüssig/flüssig Plattenwärmetauschern mit <10 €/kW angegeben.<sup>65</sup> Da sich die Kosten bei den Wärmebereitungsanlagen eher im Bereich von 500.000–1.000.000 €/MW bewegen, ändern Kosten von <10.000–20.000 €/MW für den Wärmetauscher die Wirtschaftlichkeit eines solchen Projekts nicht wesentlich.

---

<sup>64</sup> Panos 2013

<sup>65</sup> Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH 2016

## 5.2 Solare Einstrahlung

Eine Möglichkeit das Trinkwasser zentral vorzuwärmen besteht darin, die solare Einstrahlung in Wärme umzuwandeln und diese Energie dem Wasser zuzuführen. Da für die Vorwärmung im Gegensatz zur Stromproduktion nur geringe Temperaturen nötig sind, kann mit einem hohen Umwandlungswirkungsgrad gerechnet werden. Wie in Abbildung 5-1 ersichtlich ist, gibt es im Raum Wien eine jährliche solare Einstrahlung von etwa 1100 kWh/m<sup>2</sup>.

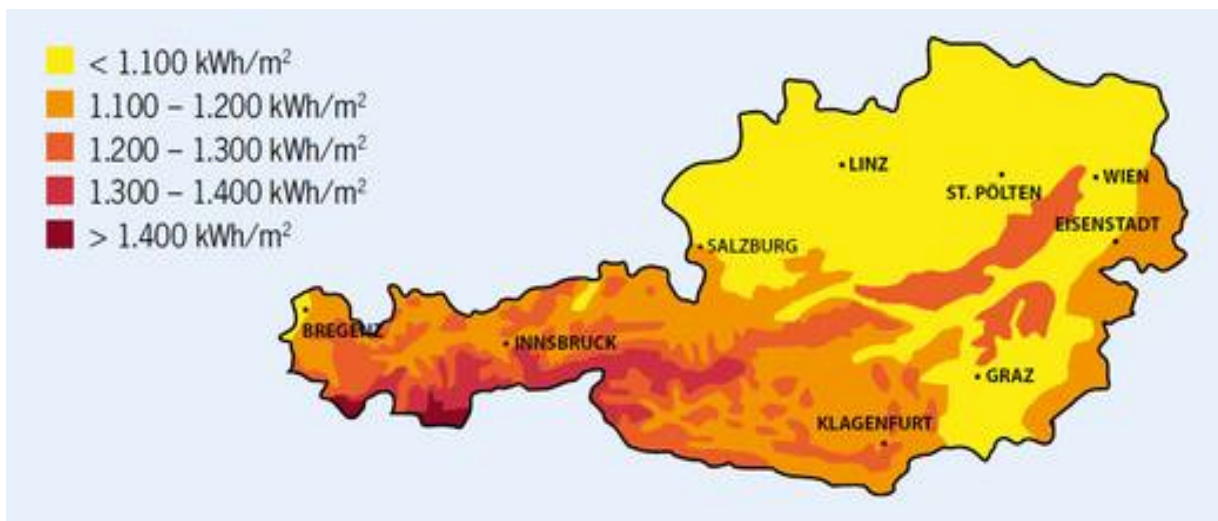


Abbildung 5-1: Solare Einstrahlung in Österreich<sup>66</sup>

Zur Abschätzung des solaren Wärmepotentials für die zentrale Trinkwasservorwärmung sind die täglichen Strahlungswerte im Raum Wien maßgebend. Die herangezogenen Einstrahlungsmessungen dafür stammen von der ZAMG. Tatsächlich summierte sich die eingestrahelte Energiemenge 2015 auf 1226,7 kWh/m<sup>2</sup>. Relevant für die Dimensionierung eines solaren Wärmewerks sind jedoch nicht jährliche, sondern die täglichen Strahlungswerte. Diese sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Im Gegensatz zu einer täglichen Einstrahlung von über 6 kWh/m<sup>2</sup> in den Sommermonaten kann im Winter nur mit 1,5 kWh/m<sup>2</sup> gerechnet werden. Diese Tatsache wird sich als ungünstig erweisen, da die Investitionskosten erhöht werden und in den Wintermonaten der Wärmebedarf höher ist. In den Berechnungen des Optimierungsmodells werden die tatsächlichen Tageswerte berücksichtigt.

<sup>66</sup> OÖ ENERGIESPARVERBAND 2017

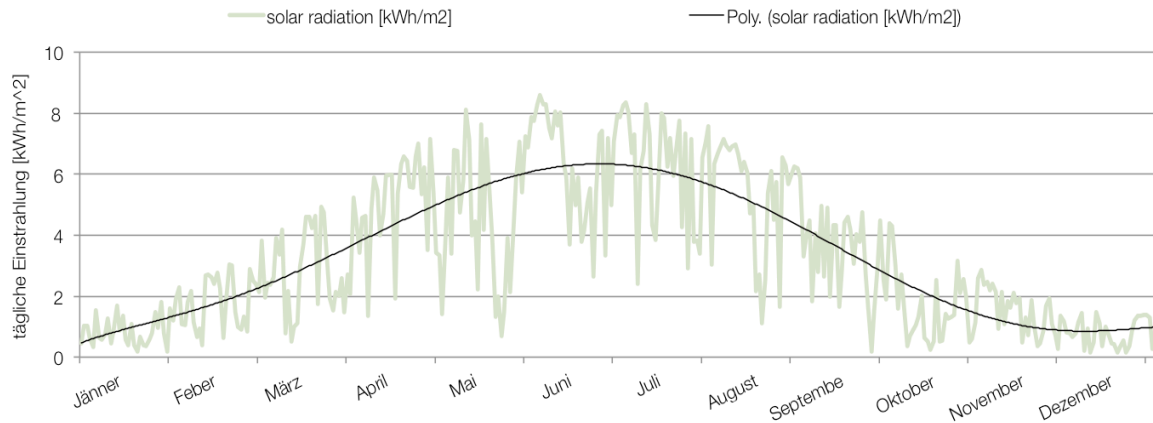


Abbildung 5-2: Solare Einstrahlung im Raum Wien im Jahresverlauf 2015

Für den Hausgebrauch kosten einfache Absorbermatten 25–75 €/m<sup>2</sup>, verglaste Flachkollektoren jedoch schon 270 €/m<sup>2</sup>.<sup>67</sup> Unter der Annahme, dass ein solares Wärmewerk im größeren Maßstab realisiert wird, werden die Kosten für ein solares Wärmewerk mit 150 €/m<sup>2</sup> angenommen. Die Kosten fallen dabei maßgeblich bei den Kollektoren und der Verrohrung an. Je nach Kollektorart werden optische Wirkungsgrade von 64–92 % erreicht.<sup>68</sup> Auf Grund von Wärmeverlusten an die Umgebung kann aber nur mit einer Effizienz von 70 % gerechnet werden. Damit ergeben sich, bei einer maximalen Einstrahlung auf den Quadratmeter von 8,5 kWh/Tag, Investitionskosten von 600 T€/MW<sub>peak</sub>. In Zeiten geringer Einstrahlung kann entsprechend weniger Leistung aus dieser Anlage bezogen werden. Als Lebensdauer werden 20 Jahre angenommen. Die laufenden Kosten werden zu 5 €/MWh angenommen. Geht man davon aus, dass entlang von 10 km der Leitung in einem Abstand von bis zu 1 km die solare Strahlung nutzbar wäre, so käme man auf ein hypothetisches technisches Potential von etwa 25.000 GWh/a.

### 5.3 Industrielle Abwärme

Eine weitere Möglichkeit das Trinkwasser aufzuwärmen, besteht in der Nutzung von industriellen Abwärmequellen. Im Rahmen des Austrian Heatmap Projekts<sup>69</sup> wurde eine umfassende Bewertung der Potentiale möglicher Abwärmequellen durchgeführt. In Abbildung 5-3 ist ein Ausschnitt der angesprochenen Heatmap abgebildet (Dreiecke stellen dabei industrielle Abwärme dar und Kreise symbolisieren Kraftwerke).

<sup>67</sup> Kaltschmitt and Streicher 2009

<sup>68</sup> Kaltschmitt and Streicher 2009

<sup>69</sup> "Das Projekt — Austrian Heat Map" 2017



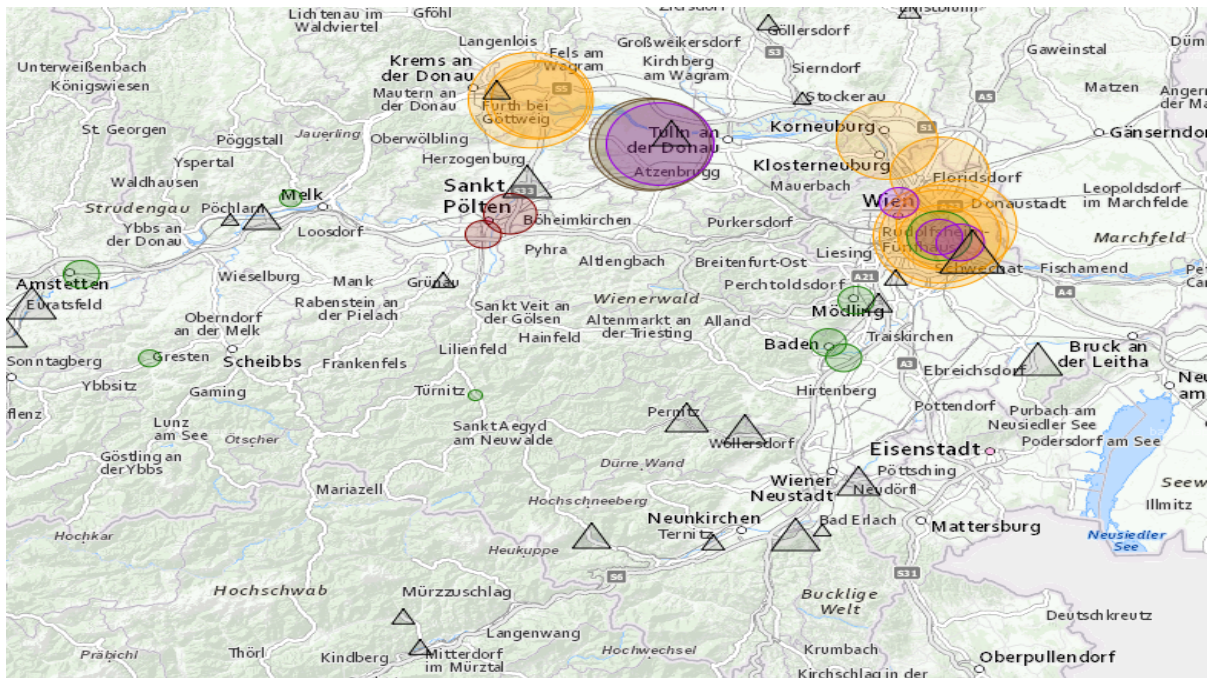


Abbildung 5-3: Heatmap – Potentielle industrielle Abwärmquellen in der Umgebung des Wiener Wasserversorgungssystems<sup>70</sup>

Für eine Vorwärmung der Trinkwasserversorgung kommen Abwärmquellen in Frage, die in der Nähe der Hochquellleitungen liegen. In Kapitel 5.1 wurde gezeigt, dass die Entfernung keinesfalls 25 km überschreiten sollte, um eine Wirtschaftlichkeit sicher zu stellen. Um die Distanzen der Wärmequellen zum Wassernetz sichtbar zu machen wird, wie in Abbildung 5-4 zu sehen ist, die Heatmap mit dem Verlauf der Hochquellleitungen überlagert.



Abbildung 5-4: Überlagerung der Abwärmepotentiale mit dem Verlauf der Hochquellleitungen

<sup>70</sup> "Interaktive Karte – Austrian Heat Map" 2017

Es wird davon ausgegangen, dass eine Wärmeauskopplung aus Kraftwerken nicht möglich ist, da diese meist schon für Fernwärmezwecke genutzt wird. Für diese wird in der Heatmap zwar eine thermische Leistung angegeben, aber kein künftiges Potential. Aus einer genaueren Betrachtung der industriellen Abwärmequellen entsprechend Abbildung 5-4 ergibt sich an der HQL1 ein Potential von 450 GWh/a und an der HQL2 ein Potential von 180 GWh/a. Für diese Wärmepotentiale wird davon ausgegangen, dass sie in einem durchschnittlichen Abstand von 10 km zur Wasserleitung auffindbar sind.

Daraus ergeben sich nach den Leitungskosten aus [ 27 ] variable Kosten für den Wärmetransport von 8,1 €/MWh. Für die Bereitstellung der Abwärme kann eine Vergütung von 6,9 €/MWh angewendet werden um gesamte variable Kosten von 15 €/MWh zu erhalten. Die Investitionskosten für die Wärmeauskopplung beim Industriebetrieb und der Übergabe werden trotz der geringen recherchierten Kosten einer Wärmeübergabestation aus Kapitel 5.1, mit 500.000 €/MW<sub>th</sub> angenommen. Die Lebensdauer einer solchen Maßnahme wird mit 15 Jahren angenommen.

## **5.4 Geothermische Wärme**

Als weitere vielversprechende Wärmequelle bietet sich geothermische Wärme an. Betrachtet man die im ‚Geothermal District Heating‘-Projekt (GeoDH) ermittelten geothermischen Potentiale in Europa, so scheint der Raum Wien nicht für eine geothermische Nutzung prädestiniert. In Abbildung 5-5 ist ein beispielgebender Kartenausschnitt zu sehen. Dabei sind in Blau die Gebiete markiert, in denen in 1000 m Tiefe Temperaturen von über 50 °C vorhanden sind.





Abbildung 5-5: Kartenausschnitt Temperaturen  $>50^{\circ}\text{C}$  in 1000 m Tiefe<sup>71</sup>

Ein österreichisches Forschungsprojekt hat im Rahmen von „Neue Energie 2020“ das „Potential der Tiefengeothermie für die Fernwärme- und Stromproduktion in Österreich“<sup>72</sup> untersucht. Dabei wird das Potential „anhand des geologisch-hydrogeologischen Aufbaues von Österreich analysiert.“<sup>73</sup> In Abbildung 5-6 ist das ermittelte hydrothermale Potential für Österreich zu sehen. Dabei ist ein Großteil der Gebiete hydrothermal unbedeutend.

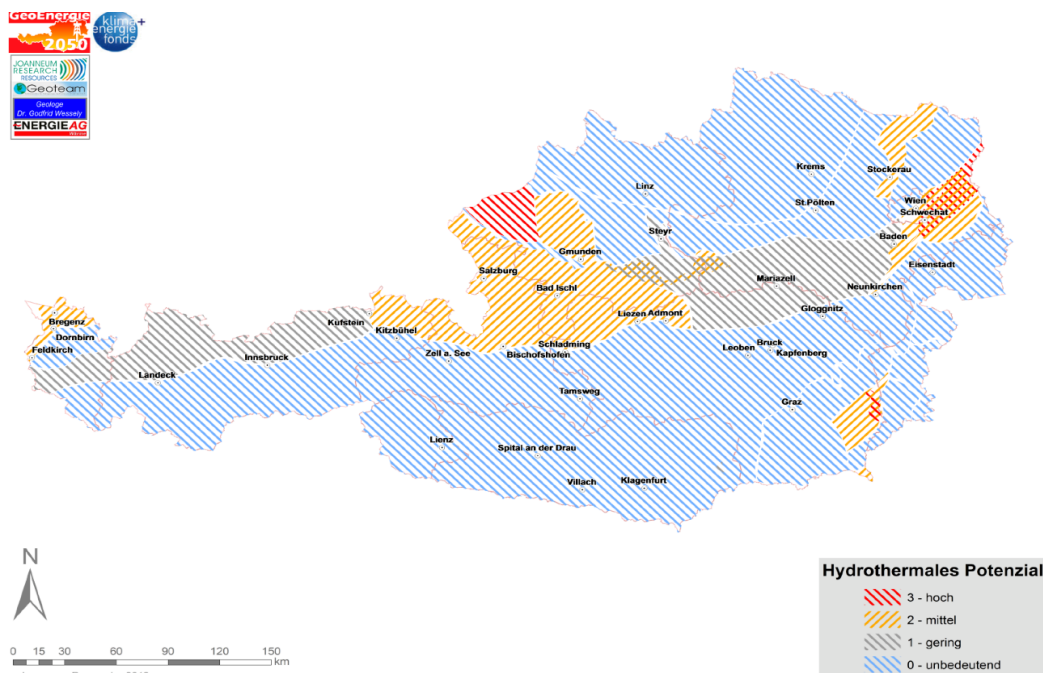


Abbildung 5-6: Hydrothermales Potential in Österreich<sup>74</sup>

<sup>71</sup> „GeoDH Europe“ 2017

<sup>72</sup> Könighofer 2014

<sup>73</sup> Könighofer 2014

<sup>74</sup> Neue Energien 2020 Endbericht



Durch die Überlagerung des hydrothermalen Potentials mit dem Verlauf der Hochquellleitungen ist erkennbar, wie in Abbildung 5-7 dargestellt, dass entlang der HQL1 geringes bis mittleres Potential vorhanden ist und die HQL2 weitgehend durch Zonen mit unbedeutendem oder geringem Potential verläuft. Das Potential für HQL1 wird mit 500 GWh/a und für HQL2 mit 100 GWh/a angenommen.



Abbildung 5-7: Überlagerung des hydrothermalen Potentials mit dem Verlauf der Hochquellleitungen

In der zusammenfassenden Arbeit „Potential and costs of geothermal energy with particular interest on district heating“<sup>75</sup> werden nach dem IPCC SREN Szenario und der Geothermal Roadmap die Investitionskosten für geothermische Wärme für Fernwärmezwecke mit 480–1347 T€/MW<sub>th</sub> angegeben und die Betriebskosten mit 16,9–22,5 €/MWh. Unter der Annahme, dass für eine zentrale Trinkwasservorwärmung geringere Kosten anfallen, da niedrigere Temperaturen als für die Fernwärme notwendig sind und damit auch geringere Pumpleistungen nötig sind, werden die Investitionskosten mit 1000 T€/MW<sub>th</sub> und die laufenden Kosten mit 10 €/MWh angenommen. Es wird mit einer Lebensdauer von 25 Jahren gerechnet.<sup>76</sup>

<sup>75</sup> Danese 2016

<sup>76</sup> Danese 2016

## 5.5 Wärmeerzeugung aus Strom

Die Entwicklungen an den Strommärkten ermöglichen, zu gewissen Zeiten sehr günstigen Strom zu beziehen oder sich sogar im Rahmen von Ausgleichsenergie für den Bezug von elektrischer Energie bezahlen zu lassen. In Abbildung 5-8 sind die jeweils tiefsten stündlichen Strompreise eines Tages aus dem Jahr 2015, entsprechend den Markttransparenzdaten der APG,<sup>77</sup> abgebildet. Zusätzlich wird in Abbildung 5-8 bei einem Preis von 11 €/MWh eine Linie gezogen, die als Break-Even Preis für die Vorwärmung angenommen wird. Diese Preisgrenze wird angegeben, um eine Vorstellung zu bekommen, ob sich eine elektrische Vorwärmung rentieren könnte. In den Ergebnissen der Modellberechnungen in Kapitel 7.9 wird über die Effizienz des zentralen Vorwärmsystems ein tatsächlicher Wert der Rentabilitätskosten ermittelt.

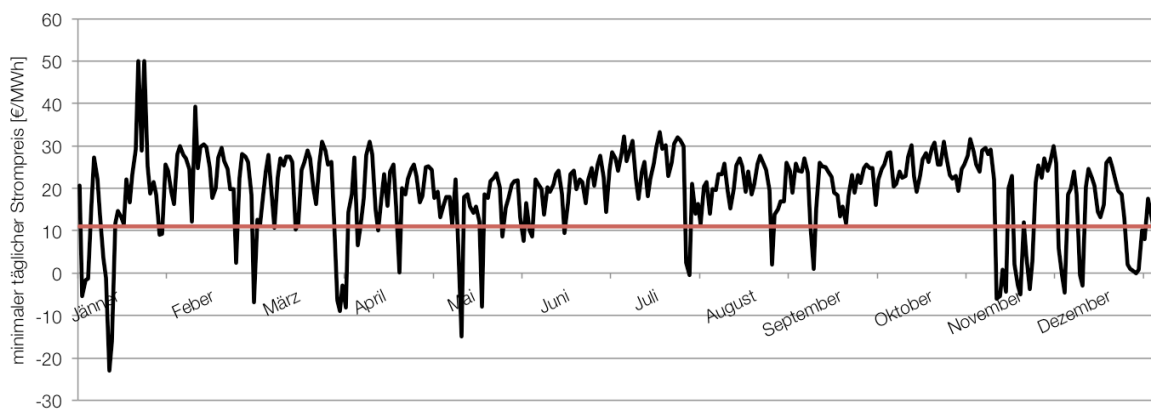


Abbildung 5-8: Tagestiefstwerte der Strompreis im Jahr 2015

Um eine Wärmebereitstellung in dem Optimierungsmodell zur temperaturgeführten Trinkwasserversorgung zu berücksichtigen, wird unterstellt, dass der Heizstab maximal eine Stunde am Tag aktiviert wird. Als für diesen Tag maßgeblichen Strompreis wird der niedrigste Stundenwert des jeweiligen Tages angenommen.

Um eine Vorstellung zu geben, inwieweit eine elektrische Vorwärmung wirtschaftlich wäre, werden die Strompreise wie in Abbildung 5-9 aufsteigend geordnet. Es zeigt sich, dass an 57 Tagen die variablen Kosten der Stromheizung unterhalb des fiktiven Break-Even Preis liegen. Das bedeutet, dass der Heizstab an 57 Tagen aktiviert werden kann. Ob diese einfache Abschätzung schon für eine wirtschaftliche Darstellbarkeit reicht, wird sich in den Modellberechnungen zeigen.

<sup>77</sup> "APG - Marktinformationen" 2017

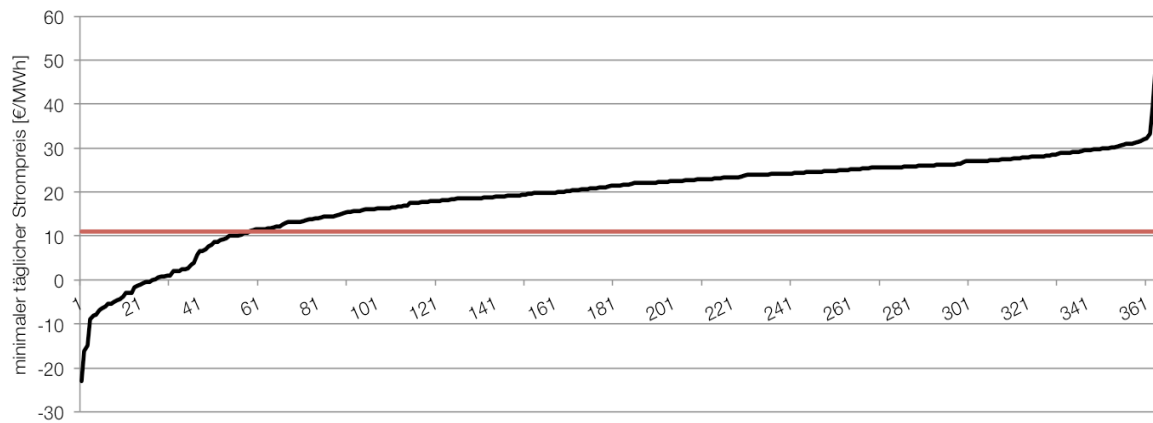


Abbildung 5-9: Aufsteigende Ordnung der jeweils niedrigsten täglichen Strompreise

Es ist schwierig, die Investitionskosten für eine großtechnische elektrische Heizanlage zu schätzen. Bei der Kostenabschätzung wird berücksichtigt, dass ein 2 kW Waschmaschinen-Heizstab im Consumerhandel für etwa 10 € exklusive Steuer<sup>78</sup> erhältlich ist. Obwohl für den Heizstab also lediglich mit etwa 5.000 €/MW<sub>th</sub> gerechnet werden muss, ergeben sich noch Kosten für die Ausleitung, Speicherung, Gebäude, Grundstücke und Sonstigem. In der Literatur wird für elektrische Heizkessel in einem Leistungsbereich von mehreren MW mit Kosten von deutlich unter 100.000 €/MW<sub>th</sub> gerechnet.<sup>79</sup> So kann in dieser Arbeit davon ausgegangen werden, dass sich die gesamten Investitionskosten pro MW<sub>th</sub> im Bereich von etwa 100.000 Euro bewegen. Dabei wird von einer Lebensdauer von 20 Jahren ausgegangen.<sup>80</sup> Die operativen Kosten ergeben sich einerseits aus einem fixen Anteil pro Energieeinheit für Wartung und eventuell Netzkosten<sup>81</sup> in einer angenommenen Gesamthöhe von 2 €/MWh und einem variablen mengenabhängigen Anteil für die Stromkosten. Dafür werden täglich die, in Abbildung 5-8 abgebildeten, niedrigsten stündlichen Strompreise aus dem Jahr 2015 herangezogen.

Als maximales jährliches Wärmepotential werden pro Leitung 1.000 GWh/a angenommen. Grob geschätzt, wird für eine zentrale Trinkwasservorwärmung eine Leistung von maximal 100 MW pro Wasserleitung benötigt. Bei einer aktuellen Gesamtlast von 10 GW alleine am Elektrizitätsmarkt in Österreich sollte diese maximale elektrische Leistung zur zentralen Trinkwasservorwärmung die Elektrizitätspreise nur unwesentlich beeinflussen.

<sup>78</sup> "Heizelement 2000 Watt" 2017

<sup>79</sup> Eller 2015

<sup>80</sup> Eller 2015

<sup>81</sup> Dieser Punkt kann in einer eigenen Arbeit diskutiert werden. Im Endeffekt wird hier elektrische Energie als Wärmeenergie für die spätere Nutzung gespeichert. Nachdem Speicherkraftwerke im Pumpbetrieb von den Netzkosten ausgenommen sind (siehe EIWOG) kann dies für diese Technologie eigentlich auch gelten.

## 5.6 Zukünftige Abwärmequellen

Nachdem im Rahmen dieser Arbeit auch die Break-Even Kosten der Wärmebereitstellung ermittelt werden, also die Kosten  $c_{heat_{central}}$  unterhalb derer eine zentrale Wärmeeinspeisung in die Trinkwasserversorgung bei einer Gesamtsystemkostenbetrachtung vorteilhaft erscheint, kann die potentielle Nutzung der Abwärme eine entscheidende Rolle bei der Standortwahl industrieller Betriebe mit größerer Abwärmeerzeugung spielen. Genauso ist es aber vorstellbar, niedrige Strompreise mit einer Wärmepumpe auszunützen und eventuell auch noch einen Wärme- oder Stromspeicher heranzuziehen. Diese Varianten können die Wirtschaftlichkeit von möglichen Wärmequellen beeinflussen. Kreativen Köpfen werden vermutlich unzählige Varianten einfallen, bei denen es zu Synergieeffekten kommen könnte. Im Rahmen dieser Arbeit können sie nicht weiter behandelt werden.

## 5.7 Zusammenfassung der Wärmepotentiale

Die in den vorangegangenen Unterkapiteln diskutierten Kosten und Potentiale der identifizierten Wärmequellen werden wie in der Tabelle 5-1 in das Prognose-/Optimierungsmodell aufgenommen.

Um Probleme im Modell zu vermeiden, die durch die Erschöpfbarkeit der potentiellen Wärmequellen entstehen, wird den potentiellen Wärmequellen in der Modellierung eine Backstop-Technologie hinzugefügt, die aus einem Heizstab besteht, der zu angenommenen Strompreisen von 150 €/MWh Wärme erzeugt.

|            | CAPEX                 | OPEX/a  | Lifetime | Potential HQL1 | Potential HQL2 |
|------------|-----------------------|---------|----------|----------------|----------------|
|            | [€/MW <sub>th</sub> ] | [€/MWh] | [a]      | [GWh/a]        | [GWh/a]        |
| Geothermal | 1.000.000             | 10      | 25       | 500            | 100            |
| Industrial | 500.000               | 15      | 15       | 450            | 180            |
| Solar      | 600.000               | 5       | 20       | 25.000         | 25.000         |
| Electrical | 100.000               | 5+x     | 20       | 1.000          | 1.000          |
| Backstop   | 100.000               | 150     | 20       | 100.000        | 100.000        |

Tabelle 5-1: Übersicht möglicher Wärmequellen für die Vorwärmung

Aus der Übersicht in Tabelle 5-1 können nun mit der Wahl typischer Betriebsstunden die Wärmegestehungskosten berechnet werden. Es wird angenommen, dass eine zentrale Trinkwasservorwärmung in der warmen Jahreszeit ausgesetzt wird, um, wie in Kapitel 2.3 gezeigt, den Behaglichkeitsanforderungen der Bevölkerung gerecht zu

werden. Die typischen Betriebsstunden werden mit typischen Werten angenommen. Der Annuitätsfaktor der Investitionskosten wird entsprechend Gleichung [ 24 ] und einem kalkulatorischen Zinssatz aus [ 25 ] von 3 % berechnet. Die beispielhafte Abschätzung der Wärmegestehungskosten pro Energieeinheit berechnet sich zu:

$$c_{heat_{central}} = \frac{a_n * CAPEX}{VLH} + OPEX \left[ \frac{\text{€}}{MWh} \right] \quad [ 28 ]$$

Daraus ergeben sich in Tabelle 5-2 die beispielhaften Wärmegestehungskosten  $c_{heat_{central}}$  der unterschiedlichen Technologien:

|            | CAPEX     | OPEX/a  | Lifetime | VLH  | Annuität | Wärmekosten |
|------------|-----------|---------|----------|------|----------|-------------|
|            | [€/MWth]  | [€/MWh] | [a]      | [h]  |          | [€/MWh]     |
| Geothermal | 1.000.000 | 10      | 25       | 6500 | 5,74%    | 18,84       |
| Industrial | 500.000   | 15      | 15       | 5000 | 8,38%    | 23,38       |
| Solar      | 600.000   | 5       | 20       | 1000 | 6,72%    | 45,33       |
| Electrical | 100.000   | 5+x     | 20       | 300  | 6,72%    | 27,41       |
| Backstop   | 10.000    | 150     | 20       | 365  | 6,72%    | 151,84      |

Tabelle 5-2: Ermittelte Wärmegestehungskosten der unterschiedlichen Technologien

Setzt man die ermittelten Wärmegestehungskosten nun in die grundlegende Gleichung [ 1 ] über die Wirtschaftlichkeit einer zentralen Trinkwasservorwärmung, so können über die Umformung [ 29 ] jene Gesamtsystemwirkungsgrade festgestellt werden, die für eine rentable Trinkwasservorwärmung nötig sind.

$$\eta_{central} \geq \frac{\eta_{local}}{c_{heat_{local}}} * c_{heat_{central}} \quad [ 29 ]$$

Der erforderliche Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung  $\eta_{central,soll}$ , der die gesamte Kette von der zentralen Energiequelle bis zu den lokalen Wassernutzern umfasst, muss für die Rentabilität der unterschiedlichen Technologien über den Werten aus Tabelle 5-3 liegen. Dabei zeigt sich, dass, bedingt durch die Wärmegestehungskosten, geothermische Wärme den geringsten Wirkungsgrad erfordert und solare Wärme einen sehr hohen Wirkungsgrad benötigen würde um rentabel betrieben werden zu können.

|            | erforderlicher WG |
|------------|-------------------|
| Geothermal | 36 %              |
| Industrial | 45 %              |
| Solar      | 87 %              |
| Electrical | 53 %              |

Tabelle 5-3: erforderlicher Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung

Graphisch lässt sich dieser Zusammenhang linear darstellen. In Abbildung 5-10 ist der Zusammenhang von Wärmegestehungskosten und erforderlichem Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung dargestellt. Je niedriger die Kosten sind, desto geringer kann auch der Wirkungsgrad sein.

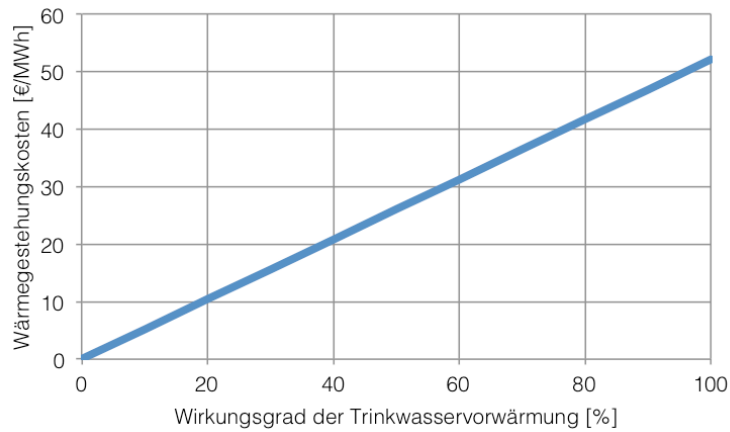


Abbildung 5-10: erforderlicher Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung in Abhängigkeit von den Wärmegestehungskosten, um kosteneffizient zu sein

Der tatsächliche Wirkungsgrad hängt von der Art des Wasserverbrauchs sowie den Wärmeverlusten in Versorgungs- und Verteilleitungen ab. Die Wärmeverluste hängen wiederum von der Differenz zwischen der zentralen Vorwärmtemperatur des Trinkwassers und der Außentemperatur ab. Um den tatsächlichen Wirkungsgrad der Trinkwasservorwärmung festzustellen, wird im nächsten Kapitel das Berechnungsmodell erläutert, das mit täglichen Wasser- und Temperaturdaten die Wasserversorgung modelliert und in Abhängigkeit von der geplanten Vorwärmung eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung beschreibt.

## 6 Modell

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die relevanten Einflussfaktoren für die Trinkwassertemperatur und den Warmwasserverbrauch erläutert wurden sowie nach geeigneten Wärmequellen gesucht wurde, wird nun in diesem Kapitel das Berechnungsmodell für eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung beschrieben.<sup>82</sup> Aus diesem Modell werden, je nach Randbedingungen, mögliche ökologische und ökonomische Einsparpotentiale abgeleitet. Zuerst wird die grundsätzliche Struktur des Berechnungsmodells dargestellt und danach werden die berechneten Szenarien erläutert.

### 6.1 Modellbeschreibung

Das Modell beschreibt eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung für das zugrunde gelegte Jahr 2015. Es wird demnach mit Preisen, Kosten, Strahlungswerten, etc. aus dem Jahr 2015 gerechnet. Die Aussagen des Modells geben Aufschluss über die Sinnhaftigkeit eines solchen Projekts auf Grundlage der Daten, Preise und Messungen im Jahr 2015. Es werden keine Preisprognosen in das Modell integriert und daher auch keine Aussagen über die Zukunft gemacht.

Das Modell wird also auf täglicher Basis für ein Jahr gerechnet ( $t=365$ ). Den Erkenntnissen aus Kapitel 3 über die Wasserversorgung folgend, wird für das Versorgungssystem Wien mit 2 Leitungen gerechnet ( $i=2$ ). Weitere Grundlagen sind die in Kapitel 4 herausgearbeiteten 4 wesentlichen lokalen Warmwasserbereitungs-technologien ( $k=4$ ), sowie die in Kapitel 5 ausführlicher betrachteten 5 möglichen Wärmequellen für eine Vorwärmung. ( $j=5$ ). Der reale kalkulatorische Zinssatz wird, wie in der Einleitung von Kapitel 5 erläutert, mit 3 % angenommen.

Ziel des Modells ist es, die Gesamtsystemkosten der Trinkwassererwärmung zu minimieren. Die beinhalteten Kosten für die zentrale Trinkwasservorwärmung setzen sich aus den für das betrachtete Jahr anteiligen Investitionskosten und den variablen Heizkosten zusammen. Als mögliche Kosteneinsparungen werden die lokalen Energieeinsparungen und die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen angesetzt. In Abbildung 6-1 wird graphisch ein Überblick über das Modell gegeben. In der Optimierung wird die Möglichkeit geboten, im Rahmen der Randbedingungen, die Zieltemperatur der Wasserentnahme, die installierten Leistungen und die Energieeinspeisung frei

---

<sup>82</sup> Der interessierte Leser findet im Anhang den Wortlaut des MATLAB-Codes.

anzupassen. Für die Ermittlung der Kosten einer zentralen Trinkwasservorwärmung und den möglichen Kosteneinsparungen bei der lokalen Trinkwassererwärmung werden die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Wasserdaten, Umgebungsdaten, Parameter der lokalen Warmwasserbereitung sowie die zentralen Heizkostenparameter als Berechnungsgrundlage verwendet.

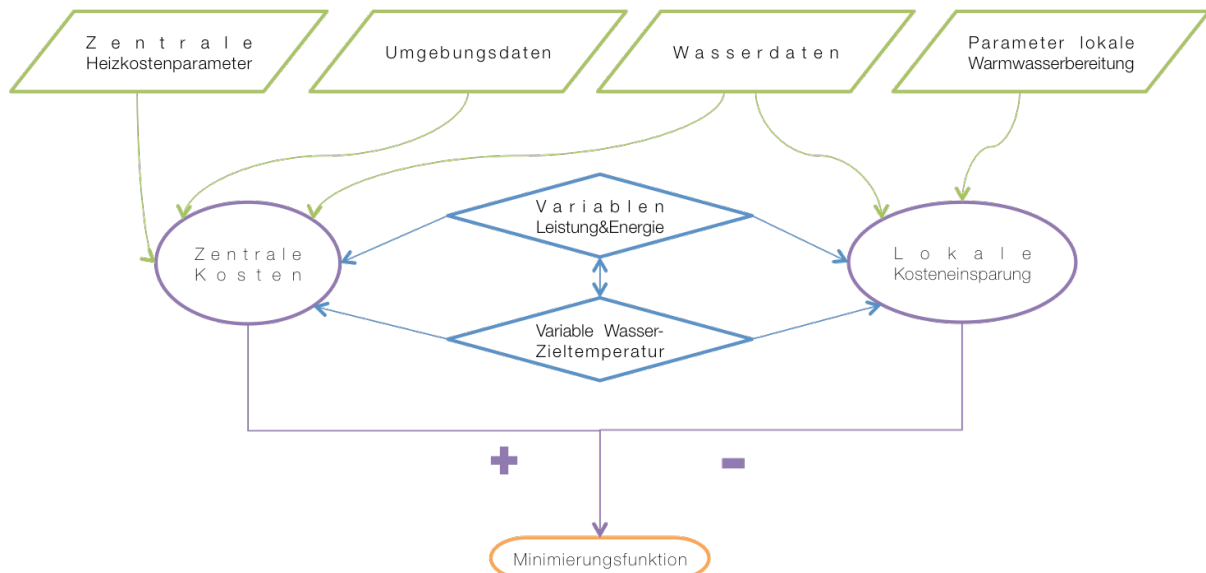


Abbildung 6-1: Veranschaulichung des Berechnungsmodells zur Optimierung einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung

Die **Zielfunktion** *obj* lautet also:

$$obj = C_{fix} + C_{var} - S_{energy} - S_{CO2} \quad [30]$$

$C_{fix}$  ... fixe Kosten (Investitionen)

$C_{var}$  ... variable Kosten

$S_{energy}$  ... Energieeinsparungen

$S_{CO2}$  ... Emissionseinsparungen

Die Zielfunktion enthält die zentralen Kosten abzüglich der lokalen Kosteneinsparung. Sie stellt also einen Vergleich der Gesamtsystemkosten unterschiedlicher Varianten her. Die einzelnen Komponenten der Zielfunktion werden nun genauer definiert.

Die **fixen Kosten**  $C_{fix}$  ergeben sich aus der Investition in diverse Heizleistungstechnologien (j) entlang der Leitungen (i):

$$C_{fix} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{i,j} * capex_j \quad [31]$$

$C_{fix}$  ... fixe Kosten (Investitionen)

$P_{i,j}$  ... Heizleistung

$capex_j$  ... Kapitalkosten je Technologie

Der Zubau an Heizleistung  $P_{i,j}$  wird vom Modell frei gewählt. Als Rahmenbedingungen werden die Potentiale entlang der einzelnen Leitungen festgelegt, sowie der Umstand,



dass die installierte Leistung in der Lage sein muss, die erforderliche Heizenergie zu Verfügung zu stellen. Die Kapitalkosten  $capex_j$  der jeweiligen Technologie ergeben sich aus den in Kapitel 5.7 zusammengefassten Investitionskosten, anteilig auf ein Jahr umgerechnet.

Die **variablen Kosten**  $C_{var}$  ergeben sich aus der täglich (t) eingespeisten Energie in diversen Heizwerken (j) entlang der Leitungen (i):

$$C_{var} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^n E_{i,j,t} * opex_{j,t} \quad [ 32 ]$$

$C_{var}$  ... variable Kosten

$E_{i,j,t}$  ... Heizenergie

$opex_{j,t}$  ... Betriebskosten je Technologie

Dabei wird die Zusammensetzung der eingespeisten Energie  $E_{i,j,t}$  durch das Modell optimiert. Es gilt jedoch, dass die Summe der aus unterschiedlichen Quellen eingespeisten Energie entlang jeder Leitung der für die Zieltemperatur benötigten Gesamtenergie entspricht:

$$\sum_{j=1}^n E_{i,j,t} = c_{Wasser} * (T_{heated_{i,t}} - T_{fresh_{i,t}}) * x_{Wasser_{i,t}} \quad [ 33 ]$$

$c_{Wasser}$  ... Wärmekapazität von Wasser (wird mit 4,2 kJ/kgK angenommen)

$T_{heated_{i,t}}$  ... Zieltemperatur der zentralen Trinkwasservorwärmung

$T_{fresh_{i,t}}$  ... Frischwassertemperatur

$x_{Wasser_{i,t}}$  ... Wassermengen

Die Zieltemperatur der zentralen Trinkwasservorwärmung  $T_{heated_{i,t}}$  ist abhängig von der Zieltemperatur der Entnahme und den Wärmeeinträgen/-austrägen, die zwischen Vorwärmung und Entnahme stattfinden. Wobei die Zieltemperatur der Entnahme je nach Szenario vorgegeben oder der Optimierung als Freiheitsgrad gelassen wird. Die Frischwassertemperaturen  $T_{fresh_{i,t}}$  und die Wassermengen  $x_{Wasser_{i,t}}$  an den Leitungen auf täglicher Basis ergeben sich aus den in Kapitel 3.1 und 3.3 diskutierten Daten.

Die Kosteneinsparungen aus **Energieeinsparungen**  $S_{energy}$  ergeben sich aus den täglichen (t) Kosten der substituierten lokalen Energieträger (k) in den Versorgungsgebieten der Leitungen (i):

$$S_{energy} = \sum_{k=1}^n \left[ \frac{p_k * share_k}{\eta_k} * \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n E_{sub_{i,t}} \right] \quad [ 34 ]$$

$S_{energy}$  ... Energieeinsparungen

$p_k$  ... Arbeitspreis der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie  
 $share_k$  ... Anteil der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie  
 $\eta_k$  ... Wirkungsgrad der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie  
 $E_{sub_{i,t}}$  ... täglich substituierte lokale Wärmeenergie je Leitung

Wobei sich die Zusammensetzung der täglich substituierten lokalen Wärmeenergie je Leitung  $E_{sub_{i,t}}$  ähnlich der benötigten Energie berechnet:

$$E_{sub_{i,t}} = c_{Wasser} * (T_{consumption_{i,t}} - T_{old_{i,t}}) * x_{Warmwasser_{i,t}} \quad [ 35 ]$$

$c_{Wasser}$  ... Wärmekapazität von Wasser (wird mit 4,2 kJ/kgK angenommen)  
 $T_{consumption_{i,t}}$  ... modellierte Temperatur der Wasserentnahme  
 $T_{old_{i,t}}$  ... ursprüngliche Temperatur der Wasserentnahme  
 $x_{Warmwasser_{i,t}}$  ... täglich benötigte Warmwassermengen je Versorgungsgebiet

Die modellierte Temperatur der Wasserentnahme  $T_{consumption_{i,t}}$  entspricht der im Modell optimierten oder vorgegebenen Zieltemperatur unter Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen, wie maximaler Wassertemperatur. Die ursprüngliche Temperatur der Wasserentnahme  $T_{old_{i,t}}$  und die Warmwassermengen  $x_{Warmwasser_{i,t}}$  wurden in Kapitel 3.3 sowie 4.1 erläutert.

Die Kosteneinsparungen aus **Emissionseinsparungen**  $S_{CO2}$  ergeben sich aus den täglichen (t) Kosten der vermiedenen Emissionen der substituierten lokalen Energieträger (k) in den Versorgungsgebieten der Leitungen (i):

$$S_{CO2} = p_{CO2} * \sum_{k=1}^n \left[ \frac{emf_k * share_k}{\eta_k} * \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n E_{sub_{i,t}} \right] \quad [ 36 ]$$

$S_{CO2}$  ... Emissionseinsparungen  
 $p_{CO2}$  ... fiktive Erlöse der Emissionseinsparung  
 $emf_k$  ... Emissionsfaktor der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie  
 $share_k$  ... Anteil der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie  
 $\eta_k$  ... Wirkungsgrad der lokalen Warmwasserbereitungstechnologie  
 $E_{sub_{i,t}}$  ... täglich substituierte lokale Wärmeenergie je Leitung

Nachdem nun die grundsätzliche Struktur des Modells gezeigt wurde, werden im nächsten Schritt die angenommenen Szenarien erläutert, die die Ausgangsbasis für die Berechnungen darstellen.

## 6.2 Szenarienbeschreibung

In diesem Unterkapitel werden verschiedenen Szenarien beschrieben, auf Basis derer, in Verbindung mit dem beschriebenen Modell, Antworten auf die Forschungsfrage nach den möglichen ökologischen Einsparungspotentialen einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung gefunden werden sollen. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Szenarien darin, welche Zieltemperatur der Wasserentnahme vorgegeben wird.

In Anlehnung an die Einordnung von Erdölvorkommen in Reserven/Ressourcen im Rahmen eines McKelvey-Diagramms<sup>83</sup> wird zur Beantwortung der Forschungsfrage versucht, die unterschiedlichen Potentiale einzuordnen. Dazu werden drei Szenarien definiert, die nach den technischen und legal maximalen Einsparungspotentialen (Ressourcen) im Szenario ‚Legal‘, nach den gesellschaftlich akzeptablen Potentialen (unwirtschaftliche Reserve) im Szenario ‚Sozial‘ und nach den ökonomisch sinnvollsten Potentialen (Reserve) im Szenario ‚Eco‘ suchen.

Bei der Suche nach den technischen und legal maximalen Einsparungspotentialen im Szenario ‚Legal‘ müssen als Randbedingung die technischen bzw. biologischen Probleme sowie die rechtlichen Einschränkungen berücksichtigt werden, die sich aus den Überlegungen in Kapitel 2.3 ergeben. So soll sich aus gesundheitlichen Aspekten die Wassertemperatur zu jeder Zeit in jedem Punkt unterhalb von 20°C befinden. Damit ist auch die rechtliche Anforderung erfüllt, die für Trinkwasser eine Temperatur unter 25°C fordert. Als Konsequenz wird für das Szenario ‚Legal‘ eine Zieltemperatur der Entnahme  $T_{Ziel}$  von 19,9°C festgelegt. Auf Grund der in Kapitel 3.5 beschriebenen Wärmeverluste im Verteilungsnetz wird diese Zieltemperatur allerdings nie erreicht werden.

Um den berechtigten Komfortansprüchen der Bevölkerung und dem Verlangen nach möglichst kaltem Trinkwasser nachzukommen, wird im Szenario ‚Sozial‘ Abstand davon genommen auf die maximale Temperatur vorzuwärmen. Als Zieltemperatur wird die folgende Funktion [ 37 ] für die optimale behagliche Wassertemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur vorgeschlagen und zur Diskussion gestellt:

$$T_{Ziel} = 15 - \frac{T_{Außen}}{7} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad [ 37 ]$$

$T_{Ziel}$  ... Zieltemperatur der Entnahme

$T_{Außen}$  ... Außentemperatur

Das tatsächlich realisierbare Potential liegt in einem Bereich, der gesundheitlich unbedenklich, wirtschaftlich vertretbar und gesellschaftlich akzeptabel ist. Also wird schließlich im Szenario ‚Eco‘ diese formulierte Zieltemperatur  $T_{Ziel}$  als Obergrenze

---

<sup>83</sup> „McKelvey-Diagramm“ 2017

verstanden und der Optimierung überlassen, auf welche Temperatur tatsächlich vorgewärmt wird, um eine wirtschaftlich optimale Umsetzungsvariante zu finden. Wirtschaftlich optimal bedeutet, entsprechend der Modellformulierung, eine Minimierung der Gesamtsystemkosten zu erreichen, indem der Saldo aus zusätzlichen Kosten für die zentrale Trinkwasservorwärmung und die Kosteneinsparungen bei der lokalen Trinkwassererwärmung minimiert werden.

Ergänzend wird im Szenario ‚+1°C‘ gezeigt, welche Auswirkungen sich durch eine konstante Temperaturerhöhung um 1°C ergeben.

## 7 Ergebnisse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden das Wassersystem, die Warmwasserbereitung und mögliche neue Wärmequellen beschrieben. Daraus wurde ein Optimierungsmodell abgeleitet, mit dessen Hilfe in diesem Kapitel die Einsparungspotentiale einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung aufgezeigt und darüber hinausgehende Ergebnisse präsentiert werden. Um den in [ 1 ] begonnenen Kreis des Vergleichs von lokaler und zentraler Wärmebereitung zu schließen, wird der Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung  $\eta_{central}$  ermittelt. Daraus werden Rentabilitätskosten und Substitutionswirkungsgrade abgeleitet.

Das im vorherigen Kapitel 6.1 beschriebene Modell wurde in MATLAB R2013b gerechnet. Mit Hilfe von YALMIP<sup>84</sup> kann das lineare Optimierungsproblem beschrieben werden. Dabei wandelt es das Problem in ein Gleichungssystem um. YALMIP ist so programmiert, dass die Zielfunktion minimiert werden kann. Um also den Saldo aus lokalen Kosteneinsparungen und zentralen Kosten zu maximieren, werden die Kosten (abzüglich der Einsparungen) minimiert. Zur Lösung des formulierten linearen Optimierungsproblems können unterschiedliche Solver eingesetzt werden. YALMIP liefert noch keine Solver mit. In dieser Arbeit wird dafür GUROBI genutzt. Dabei wird es dem Programm überlassen, den optimalen Lösungsalgorithmus zu wählen. Im MATLAB-Skript werden direkt die verschiedenen in Kapitel 6.2 gezeigten Szenarien implementiert, die es erlauben, Antworten zu möglichen Einsparungspotentialen zu geben. Das gesamte Optimierungsmodell wird daraufhin für diese Szenarien gerechnet. In folgender Tabelle wird noch einmal ein Überblick über die Zieltemperaturen der verschiedenen Szenarien gegeben:

| Szenario | Zieltemperatur $T_{Ziel}$ [°C]          |
|----------|-----------------------------------------|
| +1°C     | $T_{Ziel} = T_{Old} + 1$                |
| Legal    | $T_{Ziel} = 19,99$                      |
| Sozial   | $T_{Ziel} = 15 - T_{Außen}/7$           |
| Eco      | $T_{Old} < T_{Ziel} < 15 - T_{Außen}/7$ |

Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Zieltemperatur in den unterschiedlichen Szenarien

Die Berechnungsergebnisse sollen als Größenordnung und als Überleitung zu den Erkenntnissen betrachtet werden, denn die Modellergebnisse hängen stark von den getroffenen Annahmen ab.

<sup>84</sup> THX to Johan Löfberg!: (Yalmip wird frei zur Verfügung stellt). YALMIP is free of charge to use and is openly distributed

## 7.1 Temperaturänderungen

Zur Einleitung der Ergebnisse sei noch einmal die Datengrundlage zur Wasserversorgung in Erinnerung gerufen. In Abbildung 7-1 sind die Wassermengen im Jahresverlauf dargestellt. Der Wasserverbrauch bewegt sich täglich um  $400.000 \text{ m}^3$ , wobei die beiden HQL bis auf Wartungsunterbrechungen jeweils etwa die Hälfte, also grob  $200.000 \text{ m}^3$  pro Tag liefern. Der Warmwasserverbrauch wurde entsprechend Kapitel 4.1 mit  $165.000 \text{ m}^3$  pro Tag angenommen.

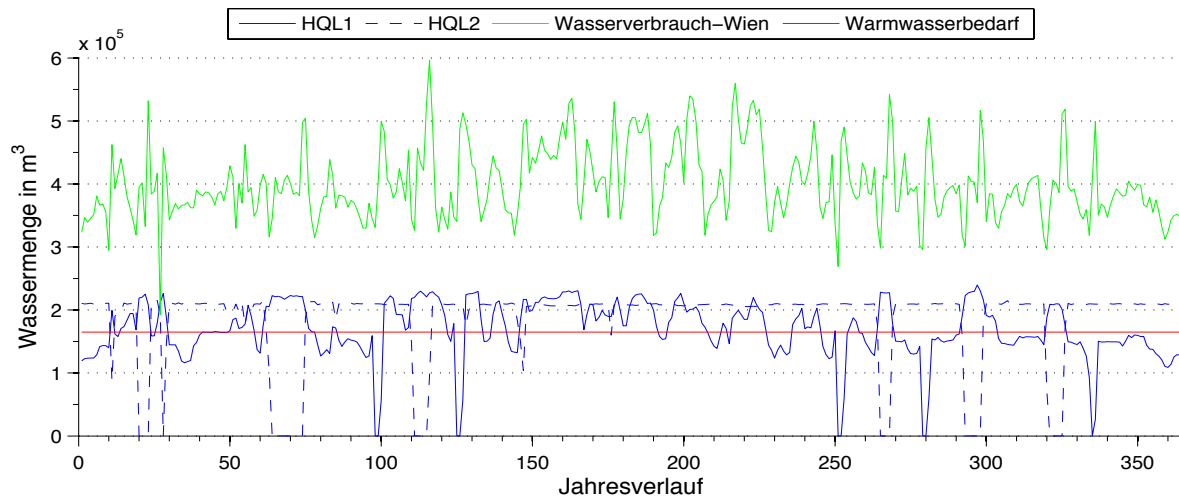


Abbildung 7-1: Wassermengen im Jahresverlauf

Das Wasser der beiden HQL hat im Jahresverlauf eine unterschiedliche Temperatur. In Abbildung 7-2 sind die historischen Temperaturen dargestellt. Die Entnahmetemperatur an HQL1 sinkt zeitweise sogar unter die Frischwassertemperatur, da bei tiefen Temperaturen ein Wärmeaustausch aus der Leitung in den Boden stattfindet. Die Temperaturskala ist so groß gewählt, damit ein anschaulicher Vergleich zu den Entnahmetemperaturen der unterschiedlichen Szenarien ermöglicht wird.

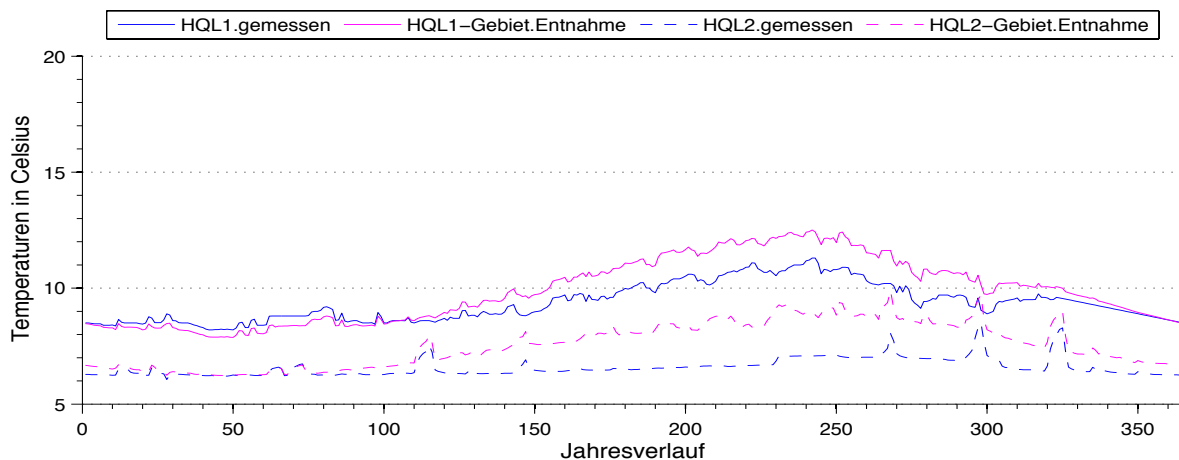


Abbildung 7-2: gemessene Temperaturen der Hochquellleitungen und an der jeweiligen Entnahme

Um einen Eindruck von den Vorgängen in den Szenarien zu bekommen, ist in Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4 der jeweilige Entnahmetemperaturverlauf dargestellt.

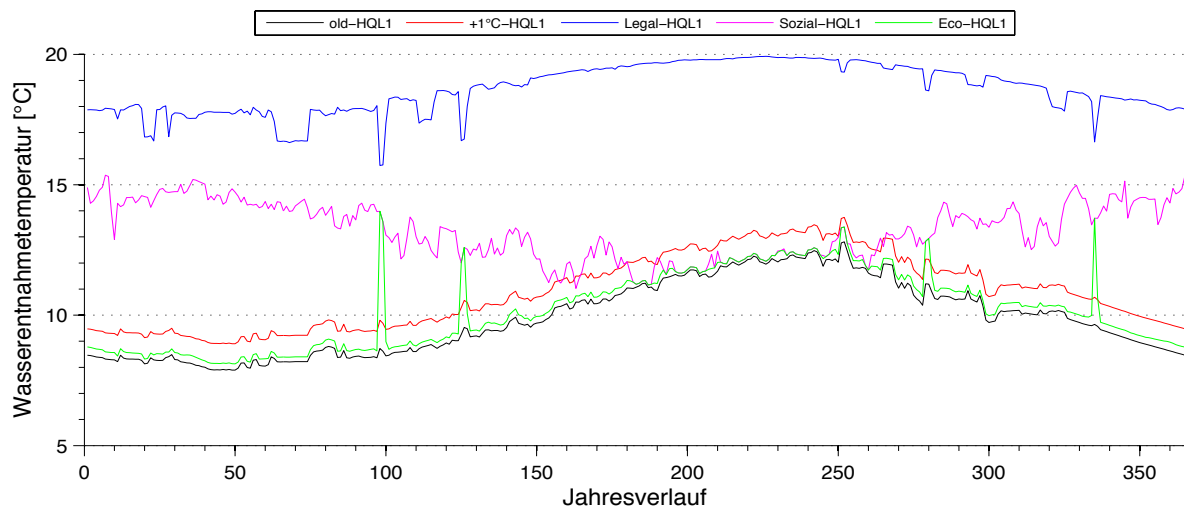


Abbildung 7-3: Entnahmetemperaturen der verschiedenen Szenarien an HQL1

Im Gegensatz zu HQL1 aus Abbildung 7-3 ist im Entnahmetemperaturverlauf der HQL2 in Abbildung 7-4 zu erkennen, dass selbst bei einer Erwärmung um ein Grad die Temperaturen der HQL1 noch unterschritten werden. In den maximalen Szenarien herrschen gleiche Temperaturen vor, da eine vorgegebene Beschränkung ausgereizt wird.

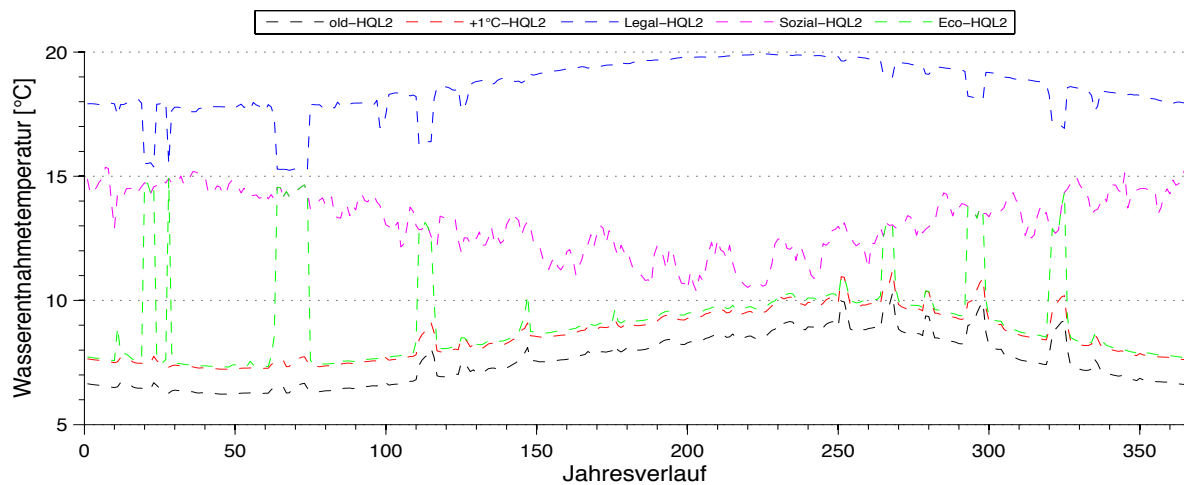


Abbildung 7-4: Entnahmetemperaturen der verschiedenen Szenarien an HQL2

Der rote Temperaturverlauf stellt die Temperaturen in den beiden Leitungen im Szenario ‚+1°C‘ dar. Diese entsprechen den aktuellen Entnahmetemperaturen, jeweils um ein Grad erhöht. Dieses Szenario kann als Referenz zum Status quo betrachtet werden.

Im blau dargestellten Temperaturverlauf erkennt man, dass im Sommer die maximale Entnahmetemperatur von 20°C des Szenarios ‚Legal‘ annähernd erreicht werden kann. Auf Grund der ermittelten (gesundheitlichen) Rahmenbedingungen in Kapitel 2.3 soll die Wassertemperatur an keinem Punkt über 20°C betragen. Im Winter kann die maximale Entnahmetemperatur daher nicht erreicht werden, weil sich das Wasser zwischen der Vorwärmung und der Entnahme auf Grund von Wärmeverlusten in den HQL und dem Verteilnetz abkühlt. Die sprunghaften Temperaturänderungen hängen mit Wartungs-

arbeiten zusammen. Dabei verringert sich der Wasserdurchfluss in den Leitungen und deswegen fallen die Temperaturänderungen drastisch aus. Auf Grund der geringen Wassermengen finden hier auch kaum Energietransporte statt. Deswegen können diese Abweichungen vernachlässigt werden.

Im Szenario ‚Sozial‘ (rosa) werden beide Leitungen auf die optimale noch behagliche Trinkwasserzieltemperatur gewärmt. Da die behagliche Temperatur in den heißesten Sommerwochen unterhalb der in diesen Wochen herrschenden Frischwassertemperatur auf Leitung HQL1 liegt, wird in diesem Szenario im Sommer keine Vorwärmung vorgenommen. Auf HQL2 findet trotzdem eine Vorwärmung statt, da hier die Frischwassertemperatur geringer ist.

Ebenso wird im Szenario ‚Eco‘ (grün) wegen der behaglichen Trinkwasserzieltemperatur im Sommer keine Vorwärmung an der HQL1 vorgenommen. In der übrigen Zeit wird eine geringe Wärmemenge auf Leitung HQL1 eingespeist. An HQL2 findet über den ganzen Jahresverlauf eine kontinuierliche Wärmeerhöhung statt.

## **7.2 Energieeinsparungen der lokalen Wasserbereitung**

Energieeinsparungen bei der lokalen Warmwasseraufbereitung ergeben sich durch die höheren Entnahmetemperaturen der Szenarien im Gegensatz zur ursprünglichen Entnahmetemperatur. In Abbildung 7-5 sind die Energieeinsparungen der jeweiligen Szenarien im Jahresverlauf dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Energieträger der lokalen Wassererwärmung in einem konstanten Verhältnis zueinander substituiert werden. Das liegt an der fixen Annahme aus Kapitel 4.2 zu den Energieträgern, die in der Warmwasserbereitung eingesetzt werden. Dazu ist hier noch einmal darauf hinzuweisen, dass es, wegen höherer Verluste einer zentralen Warmwasservorwärmung, insgesamt zu einem Anstieg des Endenergieeinsatzes kommt. Damit kann eine Warmwasservorwärmung aus ökologischer Sicht nur dann bevorzugt werden, wenn erneuerbare Primärenergieträger zur Vorwärmung eingesetzt werden oder Abwärme genutzt werden kann, die ansonsten ungenutzt bleibt.

Im Szenario ‚+1°C‘ wird ein regelmäßiger Energiebetrag von etwa 250 MWh an Nutzenergie täglich substituiert, der proportional zum Versorgungsanteil der beiden Hochquellleitungen am gesamten Wiener Wasserbrauch ist.

Als maximal mögliche Nutzenergiesubstitutionen werden im Szenario ‚Legal‘ etwa 2.000 MWh/Tag errechnet. Verringerungen in der Energiesubstitution ergeben sich, wenn eine Leitung unterbrochen wird und stattdessen Wasser aus den Grundwasserwerken Wien in das Wassernetz eingespeist wird. Für das Wasser aus den Grundwasserwerken wird keine Vorwärmung angenommen.



Die Substitutionseffekte im gesellschaftlich akzeptablen Szenario ‚Sozial‘ sind im Winter deutlich stärker als im Sommer, da die Temperaturspreizung im Winter höher sein kann. Auf Grund der Behaglichkeitsanforderungen der Bevölkerung, wird im Sommer auf eine stärkere Vorwärmung verzichtet.

In der Gesamtkostenbetrachtung des Szenario ‚Eco‘, erweist es sich am kosten-effizientesten wenn nur kleinere Nutzenergiemengen von etwa 200 MWh/Tag substituiert werden.

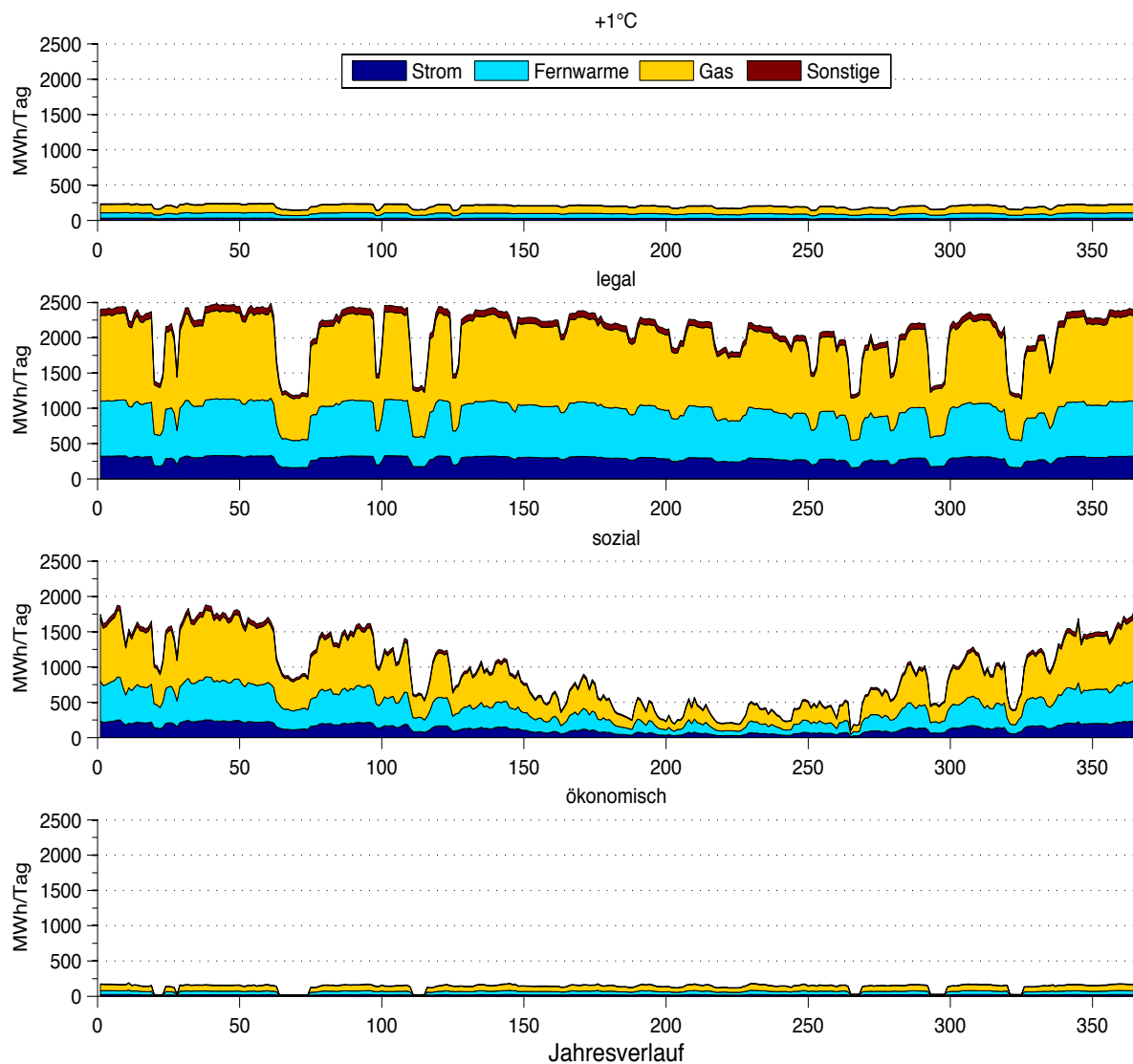


Abbildung 7-5: Nutzenergiesubstitutionen in den jeweiligen Szenarien bei den Wassernutzern im Jahresverlauf

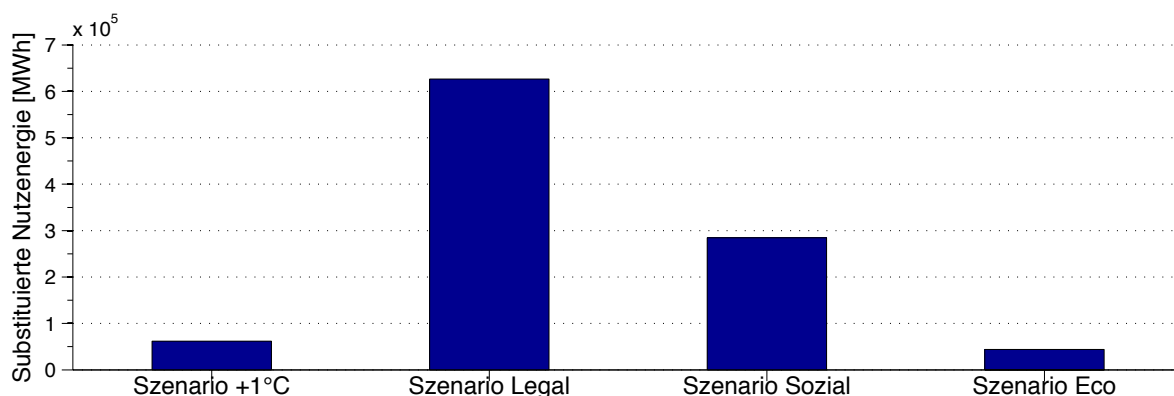


Abbildung 7-6: jährlich substituierbare Nutzenergie durch eine zentrale Trinkwasservorwärmung

Über das Jahr hinweg gesehen sind, wie in Abbildung 7-6 dargestellt, Nutzenergieeinsparungen in Höhe von bis zu 626 GWh möglich. Hebt man die Entnahmetemperatur konstant um 1°C an, so ergibt sich eine Nutzenergiereduktion von 62 GWh.

|            | identifiziert Potentiale         |                  |                 |
|------------|----------------------------------|------------------|-----------------|
|            | Einsparreserve                   | Einsparressource | Gesamtverbrauch |
| rentabel   | ECO (44 GWh)                     | LEGAL (626 GWh)  |                 |
| unrentabel | SOZIAL (284 GWh)                 |                  |                 |
|            | WARMWASSER und KOCHEN (1362 GWh) |                  |                 |

Abbildung 7-7: Vergleich der jährlichen Einsparpotentiale mit dem Gesamtnutzenergieverbrauch der Haushalte für Warmwasser und Kochen

In Abbildung 7-7 werden diese möglichen Energieeinsparungen der Szenarien in ein Verhältnis zu dem gesamten Nutzenergieverbrauch in der Stadt Wien für Warmwasser und Kochen von 1362 GWh gesetzt, siehe dazu Kapitel 2.1. Es zeigt sich, dass im Szenario ‚Legal‘ 50 % des aktuellen Nutzenergieverbrauch für Warmwasser und Kochen durch vorgewärmtes Trinkwasser substituiert werden könnte. Unter Berücksichtigung der Behaglichkeitsanforderungen der Bevölkerung ist es immerhin noch möglich etwa 20 % zu ersetzen. Ohne zusätzliche Gesamtsystemkosten könnten etwa 117 GWh bzw. 10 % an Nutzenergie substituiert werden. Unter der Prämisse der Minimierung der Gesamtsystemkosten der Trinkwassererwärmung könnten mit Hilfe einer zentralen Vorwärmung unter den derzeitigen Rahmenbedingungen etwa 3 % des Nutzenergieverbrauchs für Warmwasser und Kochen substituiert werden.

### 7.3 Emissionseinsparungen

Die ermittelten potentiellen Energiesubstitutionen übersetzen sich in ein jährliches Potential an CO<sub>2</sub>-Emissionen, das durch eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung vermieden werden kann. Dieses Emissionseinsparpotential liegt bei bis zu 133.000 Tonnen CO<sub>2</sub> im maximalen Szenario. In einem Szenario in dem die Gesamtsystemkosten der Trinkwasservorwärmung minimiert werden, wären im Jahr 2015 Einsparungen in Höhe von 9.318 Tonnen CO<sub>2</sub> umsetzbar. In Abbildung 7-8 sind die Szenarienergebnisse dazu graphisch dargestellt.

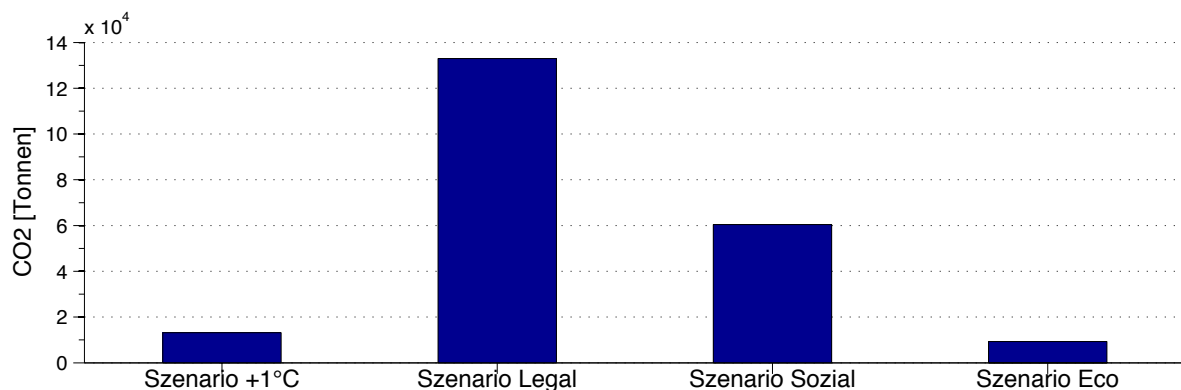


Abbildung 7-8: jährliches Einsparpotential an CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Wien sind je nach Berechnungsmethode<sup>85</sup> (lt.KliP, ohne Emissionshandel, nach BLI) im Jahr 2013 bei 2,8–4,8 Tonnen pro Kopf und Jahr gelegen. Bei 1.797.337 Einwohner der Stadt Wien im Jahr 2015<sup>86</sup> ergeben sich daraus Gesamtemissionen von 5–8,6 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>. Die möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen liegen also je nach Szenario und Berechnungsmethode in einem Bereich von 0,1–2,5 % an Emissionsreduktion. Unter Berücksichtigung der Behaglichkeitsanforderungen der Bevölkerung wäre, bei Annahme einer CO<sub>2</sub> freien zentralen Vorwärmung, immerhin etwa 1 % der aktuellen urbanen CO<sub>2</sub>-Emissionen vermeidbar. Kostenneutral, also ohne zusätzlichen Finanzierungsbedarf in einem Vergleich der Gesamtsystemkosten, könnten 25.000 Tonnen CO<sub>2</sub> oder etwa 0,4 % der urbanen Emissionen eingespart werden

### 7.4 Resultierende Energieeinspeisung

Um die Energieeinsparungen aus Kapitel 7.2 zu ermöglichen, muss das Wasser an vorgelagerter Stelle erwärmt werden. Die erforderliche Erwärmung ergibt sich aus

<sup>85</sup> Magistrat der Stadt Wien 2016

<sup>86</sup> Wirtschaft, Arbeit und Statistik (Magistratsabteilung 23) 2017

verschiedenen Einflussfaktoren, wie unter anderem der Wärmeverluste auf Grund der jahreszeitabhängigen Bodentemperatur. Diese Überlegungen werden in den Modellberechnungen berücksichtigt. Die Grundlast wird, wie in Abbildung 7-9 ersichtlich, in allen Szenarien von Wärme aus Geothermie zur Verfügung gestellt, weil sich diese in der Recherche als die Wärmequelle mit den geringsten Gestehungskosten erweist. Teilweise wird auch Energie aus industrieller Abwärme genutzt. In den Szenarien ‚Legal‘ und ‚Sozial‘, bei denen nach den maximalen Energieeinsparungspotentialen gesucht wird, müssen auf HQL2 alle in Kapitel 5 identifizierten Wärmequellen ausgeschöpft werden, um die nötige Erwärmung zu erreichen, da nur beschränkte Potenziale für Geothermie und industrielle Abwärme angenommen wurden. Dabei ist ersichtlich, dass im Sommer Wärme aus Solarthermie einen Großteil liefert, jedoch auf Grund der schwächeren solaren Einstrahlung im Winter von der Backstop Technologie unterstützt werden muss. Da Solarthermie relativ geringe variable Kosten hat, verdrängt es in diesen Szenarien in den Sommermonaten die Erzeugung aus Geothermie. Elektrische Energie wird nur fallweise, bei besonderen Preiskonstellationen genutzt.

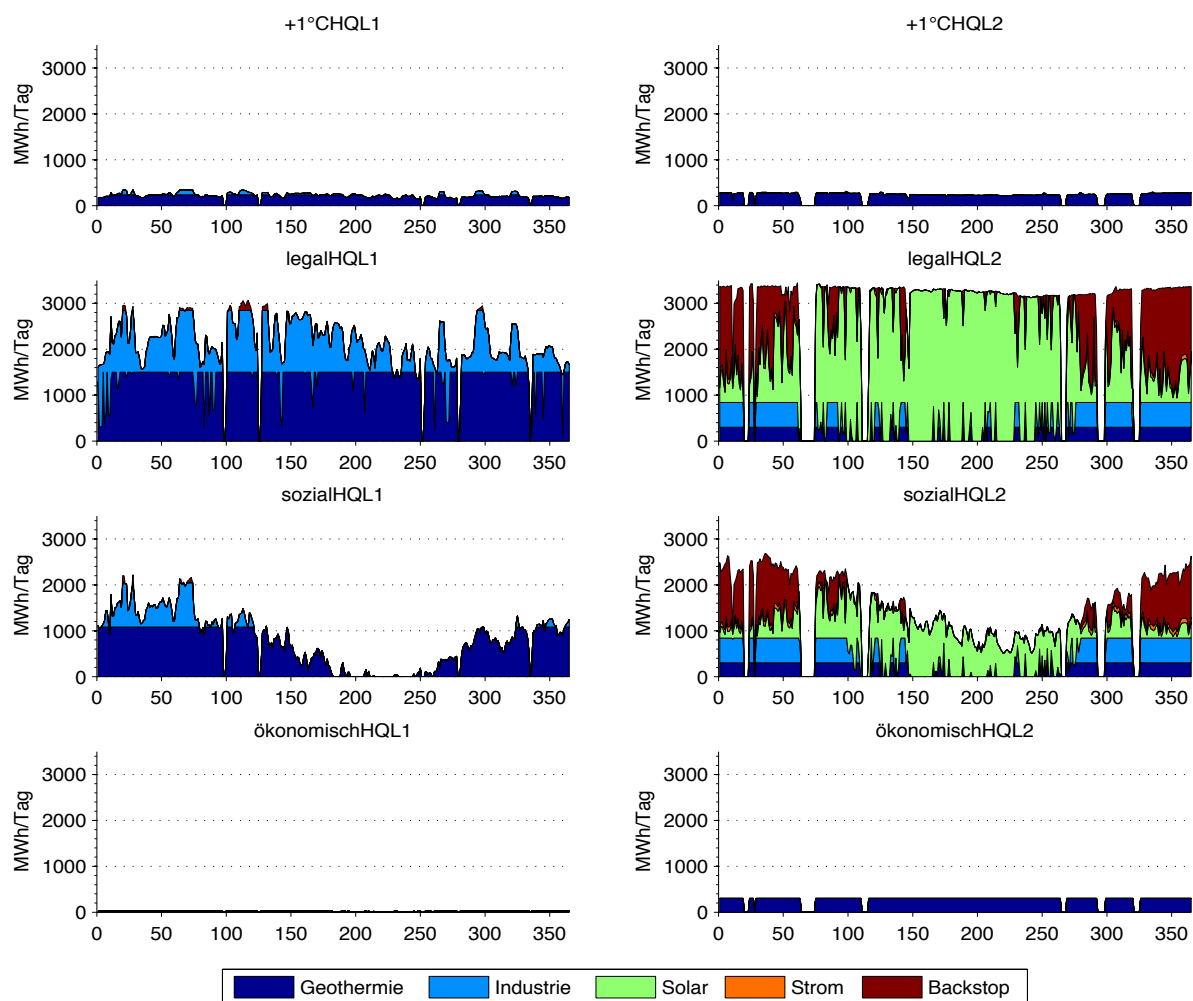


Abbildung 7-9: Energieeinspeisungen in den Szenarien je Leitung

## 7.5 Erforderlicher Leistungszubau

Um die gezeigten Einsparungspotentiale und den dafür nötigen Energiebedarf bedienen zu können, ist ein Heizleistungszubau nötig, der wie in Abbildung 7-10 dargestellt, je nach Szenario und HQL variiert. Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, reicht die Skala des Leistungszubaus von 0–100 MW.

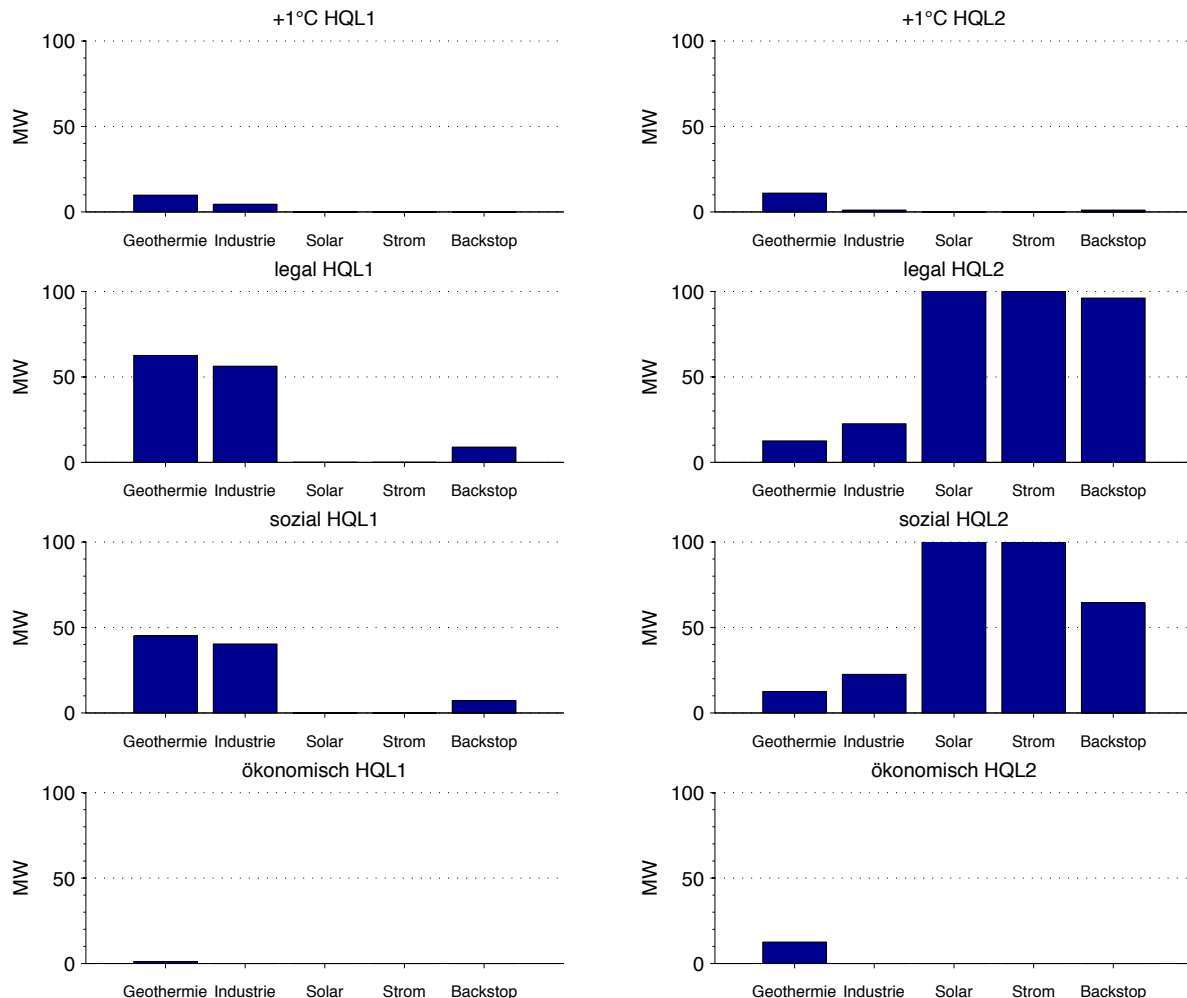


Abbildung 7-10: Installierte Leistungen in den unterschiedlichen Szenarien an HQL1 und HQL2

In den Ergebnissen der Szenarien ‚Legal‘ und ‚Sozial‘ fällt auf, dass bei der Suche nach dem größten Einsparungspotential vor allem an HQL2 sehr große Leistungen installiert werden müssen, um den Wärmebedarf zu befriedigen. Das liegt daran, dass im Modell angenommen wurde, dass kein substanzielles industrielles oder geothermisches Wärmepotential entlang der HQL2 zur Verfügung steht und hohe Überkapazitäten geschaffen werden müssen. Aus den Randbedingungen, die in Kapitel 5 ermittelt wurden, ergibt sich, dass hohe solare Leistungen nötig sind, um im Winter eine ausreichende Erwärmung zur Verfügung stellen zu können. Zusätzlich werden im Modell hohe elektrische Leistungen installiert. Im Gegensatz dazu ist an HQL1 auch bei der Suche nach den maximalen Einsparpotentialen kein solarer oder elektrischer

Ausbau notwendig, da das geothermische und industrielle Wärmepotential groß genug ist.

Um eine gleichmäßige Temperaturerhöhung an der Entnahme von 1°C zu erreichen, sind an beiden HQL Wärmeleistungen im Umfang von etwa 12–14 MW nötig. Für eine kontinuierliche Erwärmung erweist sich unter den getroffenen Annahmen ein Ausbau von Geothermie am günstigsten. Ein kleiner Teil der Leistung wird durch Industrieabwärme gedeckt.

In der wirtschaftlichen Ausbauweise findet im Modell insgesamt eine Installation von lediglich 14,3 MW geothermischer Wärmeleistung statt. Davon werden 12,5 MW an der HQL2 erschlossen und nur 1,8 MW an der HQL1.

## **7.6 Gesamtsystemkosten**

Die Gesamtsystemkosten für die Umsetzung der einzelnen Szenarien sind als Optimierungsergebnis in Abbildung 7-11 dargestellt. Das Optimierungsergebnis entspricht dem Saldo aus der Kostenvermeidung der lokalen Trinkwassererwärmung und den Kosten der zentralen Trinkwasservorwärmung. Auf Basis der in den vorherigen Kapiteln erarbeiteten Datengrundlagen zeigt sich, dass die Szenarien ‚Legal‘ und ‚Sozial‘ nicht wirtschaftlich umgesetzt werden können. Die Modellrechnungen ergeben zusätzliche Kosten von 27,7–53,3 Mio. € jährlich. Die zusätzlichen Kosten entstehen, da das Modell unrentable Technologien mit geringer Auslastung nutzt, um den vorgegebenen Wärmepfad zu befolgen. So werden im Modell Leistungskapazitäten geschaffen, die kaum genutzt werden. Auf Grund der Potentialbeschränkungen der Wärmequellen entstehen sehr hohe Kosten z. B. durch den Einsatz von Solarthermie, um die geforderten hohen Temperaturen zu erreichen. Im Szenario ‚+1°C‘ entstehen laut Modellrechnungen geringe Einsparungen der Gesamtsystemkosten gegenüber dem Status quo. Im Szenario ‚Eco‘ wird das wirtschaftlich sinnvollste Potential aufgezeigt, bei dem für das Versorgungsgebiet Wien Gesamtkosteneinsparungen von 346.000 € jährlich möglich sind. Es werden in diesem Szenario nur die günstigsten Wärmequellen erschlossen und zusätzlich eine hohe Auslastung der Vorwärmeerzeugung erreicht.

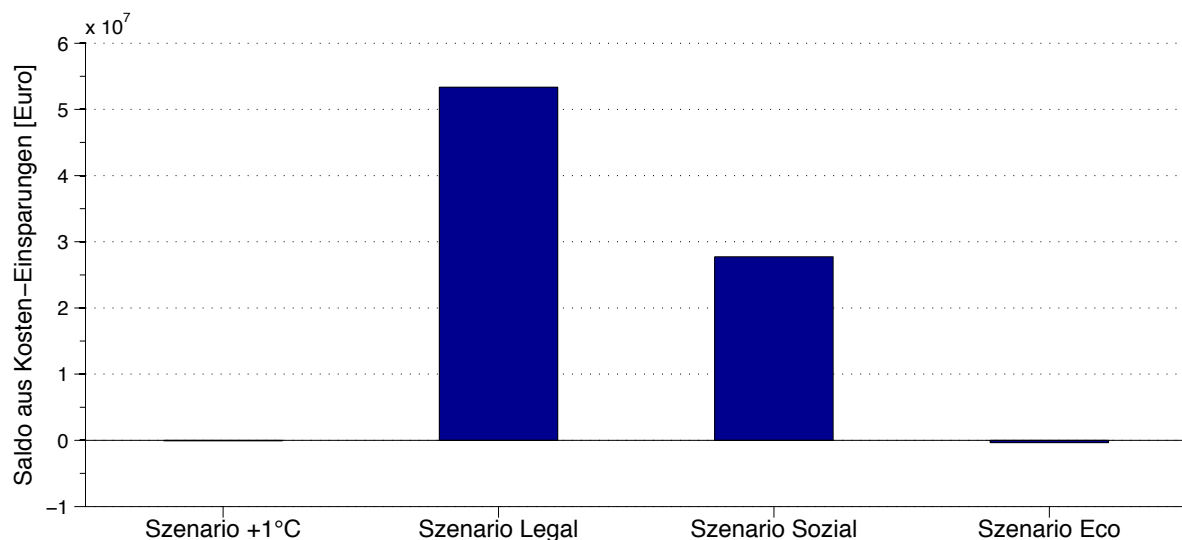


Abbildung 7-11: Optimierungsergebnis der einzelnen Szenarien

Umgelegt auf den Kubikmeter Wasser liegt der Saldo aus Kosten und Einsparungen je nach Szenario bei -0,27 bis 41,3 EuroCent/m<sup>3</sup>. In Relation dazu befindet sich der durchschnittliche österreichische Kubikmeterpreis bei 185 EuroCent.<sup>87</sup>

Auch wenn der Großteil des verfügbaren Potentials aus der temperaturgeführten Trinkwasserversorgung nicht rentabel umgesetzt werden kann, zeigt sich in der Betrachtung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in Abbildung 7-12, dass diese Potentiale bei hohen CO<sub>2</sub>-Preisen rentabel sein können. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten errechnen sich aus dem Saldo der Kosten und Energieeinsparungen bezogen auf die eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen je Szenario:

$$c_{CO_2} = \frac{C_{fix} + C_{var} - S_{energy}}{CO_2} \text{ [€/T]} \quad [38]$$

$c_{CO_2}$  ... spezifische CO<sub>2</sub> – Vermeidungskosten

$C_{fix}$  ... fixe Kosten (Investitionen)

$C_{var}$  ... variable Kosten

$CO_2$  ... Menge an eingesparten CO<sub>2</sub> – Emissionen

$S_{energy}$  ... Energieeinsparungen

In der Betrachtung zu den Vermeidungskosten [ 38 ] werden etwaige Kosteneinsparungen aus der Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen noch nicht betrachtet. Obwohl, wie in Kapitel 5.7 gezeigt, die Gestehungskosten der unterschiedlichen Wärmequellen nur um den Faktor 3 auseinander liegen, ergeben sich szenarienabhängig große Unterschiede in den Vermeidungskosten. Die großen Unterschiede in den spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten aus Abbildung 7-12 ergeben sich aus den großen (unnötigen) Kosten, um die maximale Energieeinsparung zu erreichen.

<sup>87</sup> "ÖVGW · Ressource" 2017

Einerseits müssen Überkapazitäten geschaffen werden und andererseits müssen die hohen Kosten der Backstop Technologie in Kauf genommen werden.

Für eine Einordnung von realistisch umsetzbaren Vermeidungskosten müssen die errechneten Ergebnisse aus Szenario ‚+1°C‘ und ‚Eco‘ betrachtet werden. Dabei liegen die Vermeidungskosten bei einer Temperaturanhebung von 1°C bei 21,5 €/Tonne. In der wirtschaftlichsten Umsetzungsvariante errechnen sich negative Vermeidungskosten in Höhe von -11,03 €/Tonne.

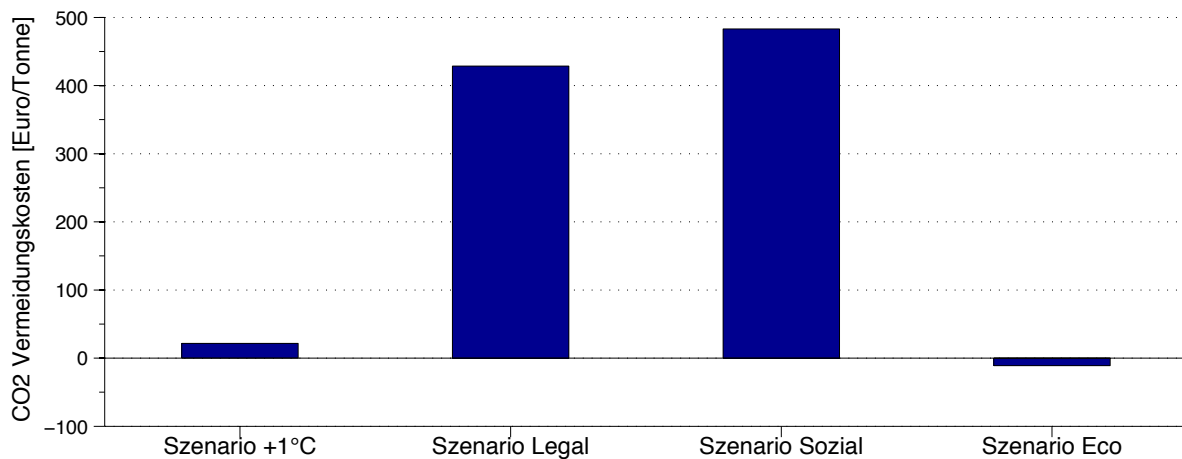


Abbildung 7-12: Spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der unterschiedlichen Szenarien

## 7.7 Zentraler Wirkungsgrad

Um den in [ 1 ] begonnenen Kreis über den Vergleich von lokaler und zentraler Wärmebereitung zu schließen und Überlegungen hinsichtlich der Sinnhaftigkeit einer zentralen Trinkwasservorwärmung anzustellen, kann nun der Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung  $\eta_{central}$  bestimmt werden.

Unter dem Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung  $\eta_{central}$  wird das Verhältnis von zentral eingespeister Energie zu substituierter Nutzenergie verstanden:

$$\eta_{central} = \frac{E_{substituiert}}{E_{eingespeist}} \quad [ 39 ]$$

$E_{substituiert}$  ... Nutzenergie im Wasser die an der Entnahme lokale Erwärmung substituiert  
 $E_{eingespeist}$  ... Energie die zur Trinkwasservorwärmung eingespeist wird

Die Ergebnisse der Modellberechnung zeigen je nach Szenario zentrale Wirkungsgrade  $\eta_{central}$  von etwa 34,3–39,5 %. In Abbildung 7-13 sind die jeweiligen Ergebnisse dargestellt. Die Unterschiede im Wirkungsgrad ergeben sich zum Einen daraus, dass das Wasser im Szenario ‚Eco‘ nur aufgewärmt wird, wenn der Anteil von Warmwasser am Gesamtwasserverbrauch günstig ist. In den Sommermonaten herrscht ein erhöhter Kaltwasserverbrauch. Dadurch reduziert sich bei einer starken Vorwärmung der



Wirkungsgrad, da anteilig weniger Energie im Warmwasser substituiert werden kann und mehr Energie ungenutzt bleibt. Zum Anderen sind bei einer höheren Vorwärmung, wie sie in den Szenarien ‚Legal‘ und ‚Sozial‘ passiert, die Wärmeverluste größer und senken damit den zentralen Wirkungsgrad.

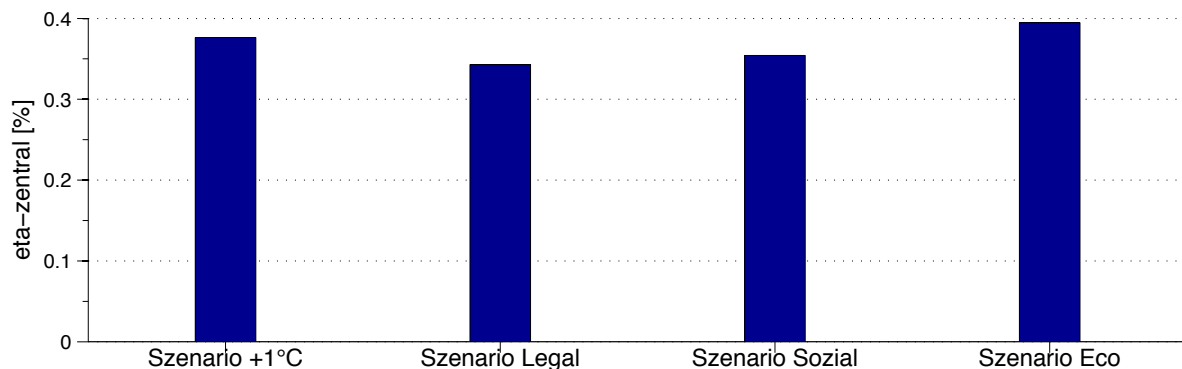


Abbildung 7-13: zentraler Wirkungsgrad der Trinkwasservorwärmung

## 7.8 Veranschaulichung

Um ein Besseres Verständnis für die Vorgänge entlang der Leitung zu erhalten werden in Abbildung 7-14 die Temperaturverläufe entlang der HQL1 an zwei unterschiedlichen Tagen mit und ohne Vorwärmung eingezeichnet. Die dünnen durchgezogenen Linien stellen die drei echten Messwerte der HQL1 [Neusiedl (WienerWasser), Rosenhügel(WienerWasser), Entnahme(VAMED)] dar. Die dicken strichlierten Linien stellen die Temperaturen dar, die sich im ‚+1°C‘-Szenario in den Modellberechnungen ergeben haben. Dabei werden die Temperatur so berechnet, dass im ersten Schritt die gewünschte Entnahmetemperatur festgelegt wird, dann im zweiten Schritt, auf Grund des Zusammenhangs aus der Regressionsanalyse, die dafür notwendige Temperatur im Speicher Rosenhügel (schon in Wien) berechnet wird. Aus dieser ermittelten *Temperaturdifferenz* ergibt sich die nötige Wärmemenge. Die Grafik verdeutlicht insbesondere den Temperaturanstieg/-abfall zwischen Speicher und Entnahme je nach Jahreszeit. Durch eine Erwärmung flacht der Temperaturanstieg im Sommer ab (geringere Temperaturspreizung Wasser/Boden) und wird im Winter steiler.

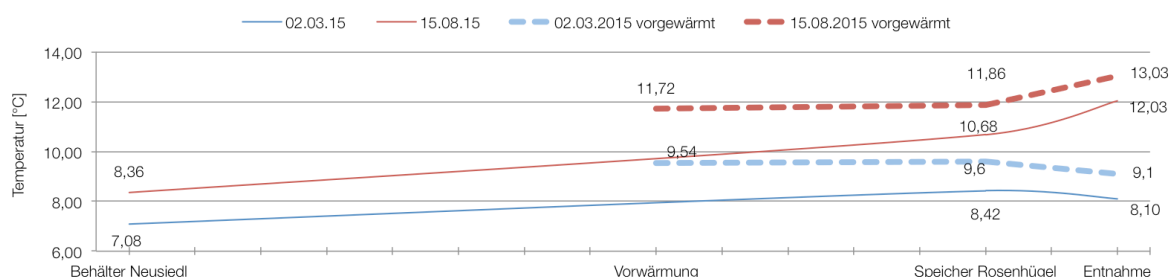


Abbildung 7-14: Temperaturverlauf entlang der Leitung (mit/ohne Vorwärmung)

Betrachtet man die Energieflüsse des Referenzszenarios ‚+1°C‘ detaillierter in einem Sankey-Diagramm in Abbildung 7-15, so zeigt sich, dass ein Großteil der Verluste direkt in das Abwasser münden. Nur ein kleiner Teil der Wärmeverluste ergibt sich aus Leitungsverlusten beim Wassertransport von der Vorwärmung zu den Haushalten. Zusätzliche Verluste ergeben sich durch eine unentgeltliche Wassernutzung, die gänzlich dem Kaltwasserverbrauch zugeschrieben wird und Leckagen im Rohrleitungsnetz. Der Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung kann vor allem über das Verhältnis von Warmwasser- zu Gesamtwasserverbrauch beeinflusst werden. Eine zusätzliche Isolierung von Wasserleitungen scheint nur marginale Vorteile zu bewirken. Der Aufwand hierfür wäre überdies unverhältnismäßig hoch.

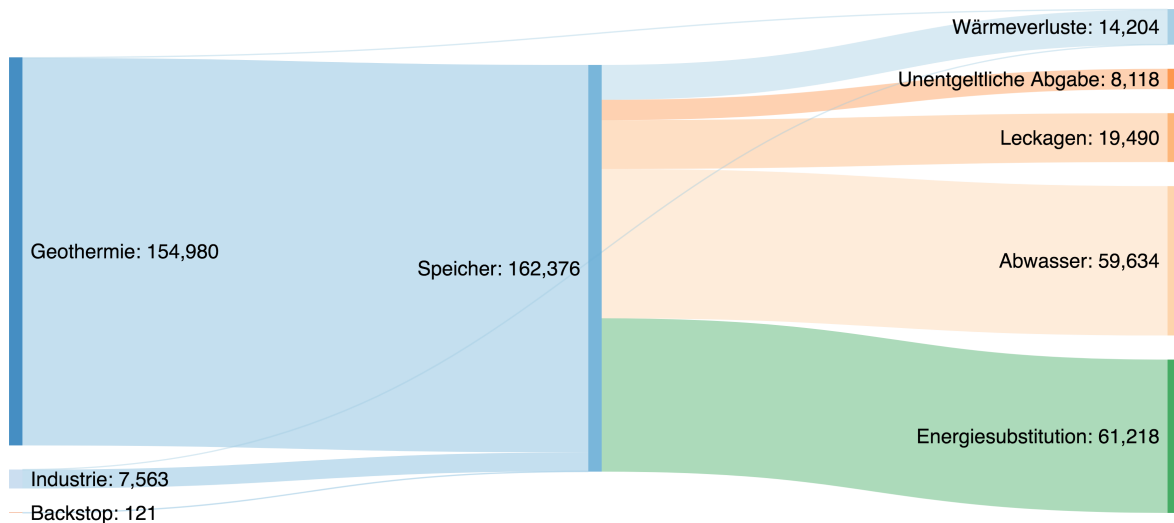


Abbildung 7-15: Sankey-Diagramm zu den Energieflüssen im Szenario '+1°C'

## 7.9 Rentabilitätskosten

Aus der Kenntnis des zentralen Wirkungsgrads  $\eta_{central}$  mit dem die zentrale Wärmequelle einen Teil der lokalen Wärmebereitung ersetzt, kann an die Überlegung zu der Sinnhaftigkeit einer zentralen Trinkwasservorwärmung in [ 1 ] angeknüpft werden, wonach die zentrale Wärmebereitung unter folgender Bedingung rentabel sein kann:

$$c_{heat_{central}} \leq \frac{c_{heat_{local}}}{\eta_{local}} * \eta_{central} \quad [ 40 ]$$

Damit kann nun ausgedrückt werden zu welchen Kosten eine zentrale Trinkwasservorwärmung in einer Gesamtkostenbetrachtung vorteilhaft wäre. Diese Darstellung [ 40 ] erscheint für weitere Überlegungen sinnvoll, da die Berechnungen zu den lokalen Wärmegegestehungskosten  $c_{heat_{local}}$  sowie den Wirkungsgraden  $\eta_{local}$  und  $\eta_{central}$  mit realen Daten unterlagert sind. Sie unterliegen zwar einer gewissen Ungenauigkeit, geben aber die Größenordnungen wieder. Im Gegensatz dazu ist es schwierig, die

realen Potentiale und Kosten einer möglichen zentralen Vorwärmung zu ermitteln, da es hierfür keine Erfahrungswerte gibt und unklar ist zu welchen Konditionen Wärmequellen tatsächlich zur Verfügung gestellt werden können. Jedoch kann mit der Kenntnis über zentrale Wärmegegestehungskosten  $c_{heat_{central}}$  zu denen eine Trinkwasservorwärmung rentabel wäre eine Suche nach solchen Wärmequellen gestartet werden.

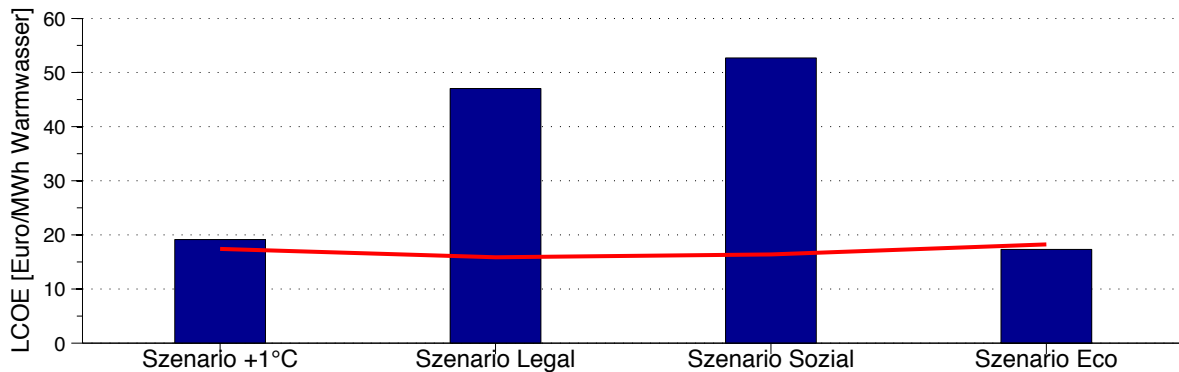


Abbildung 7-16: tatsächliche (blau) und wirtschaftliche rentable (rot) zentrale Wärmebereitungskosten je Szenario

In Abbildung 7-16 sind dementsprechend das Kostenniveau (rote Linie) unterhalb dessen die zentrale Wärmebereitstellung rentabel ist (nach [ 40 ]) und die durchschnittlichen Kosten der zentralen Wärmebereitung  $c_{heat_{central}}$  (blauer Balken), die in den unterschiedlichen Szenarien des Modells berechnet wurden, dargestellt. Die durchschnittlichen Kosten der zentralen Wärmebereitung  $c_{heat_{central}}$  berechnen sich dabei, gemäß [ 41 ], aus den gesamten Kosten bezogen auf die eingespeiste Wärmemenge:

$$c_{heat_{central}} = \frac{C_{fix} + C_{var}}{E_{eingespeist}} \text{ [€/MWh]} \quad [ 41 ]$$

Es zeigt sich auch in Abbildung 7-16, dass bei einer größeren Aufwärmung die zentralen Wärmegegestehungskosten  $c_{heat_{central}}$  zu denen eine Trinkwasservorwärmung rentabel wäre (rote Linie) sinken. Das liegt daran, dass sich, wie in Abbildung 7-13 gezeigt wird, der zentrale Wirkungsgrad verschlechtert. Je günstiger also potentielle Wärmequellen zur Verfügung stehen, desto größer sind die möglichen Energiesubstitutionen und Emissionsvermeidungen, die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten realisiert werden können. Die Kosten, zu denen eine zentrale Trinkwasservorwärmung kosteneffizient wäre, liegen den Modellrechnungen nach bei:

$$c_{heat_{central}} \leq 15,85 - 18,25 \text{ €/MWh} \quad [ 42 ]$$

## 8 Erkenntnisse

Es kann in dieser Arbeit gezeigt werden, dass eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung ein theoretisches Potential hat, etwa 1 % der urbanen CO<sub>2</sub>-Emissionen Wiens einzusparen. Dies resultiert aus einer 20 %-Reduktion des Nutzenergiebedarfs für den Verbrauchsbereich ‚Warmwasser und Kochen‘. Neben der Beantwortung der Forschungsfrage liefert die Arbeit eine Reihe weiterer wesentlicher Erkenntnisse.

Aus den Ergebnissen der Modellberechnungen zeigt sich, dass für eine zentrale Vorwärmung nur sehr günstige Wärmequellen mit hohen Auslastungen in Frage kommen.

Unter den getroffenen Annahmen erweisen sich Geothermie und industrielle Abwärme am günstigsten und unter bestimmten Voraussetzungen für die Vorwärmung von Warmwasser geeignet. Die Nutzung von niedertemperierter Abwärme stellt eine effiziente Wärmenutzung dar. Solare Erwärmung erweist sich als unrentabel. Es konnte über den wesentlichen Zusammenhang zwischen zentraler und lokaler Wärmebereitung festgestellt werden, dass eine Einspeisung zu Kosten unterhalb von 15,85–18,25 €/MWh rentabel sein kann.

Für den rentablen Betrieb einer zentralen Trinkwasservorwärmung ist es essentiell, dass die Wärmequelle in der Nähe der Wasserversorgungsleitung liegt, da der Wärmetransport über weitere Strecken zur Wasserleitung ein großer Kostenfaktor ist. Hingegen beeinflussen Wärmeverluste im Wassernetz den Wirkungsgrad der zentralen Wärmebereitstellung nur geringfügig. Bei der Suche nach geeigneten Wärmequellen spielt folglich die Entfernung der Wärmequelle zur Entnahmestelle bei entsprechendem Wasserdurchfluss eine untergeordnete Rolle.

In der heißen Jahreszeit kann eine zentrale Trinkwasservorwärmung aus mehreren Gründen kritisch gesehen werden. Eine Trinkwasservorwärmung ist effizient, wenn der Anteil des Warmwasserbedarfs am Gesamtwasserverbrauch hoch ist. Daher ist auf Grund des höheren Kaltwasserverbrauchs im Sommer eine Vorwärmung in dieser Zeit weniger effizient. Zusätzlich sollte auch wegen den Behaglichkeitsanforderungen der Bevölkerung von einer übermäßigen Erwärmung im Sommer abgesehen werden.

Ein großer Vorteil der zentralen Trinkwasservorwärmung ist, dass sie durch die höhere Vorlauftemperatur den Energieeinsatz bei bestehenden lokalen Wärmebereitungsanlagen verringern kann.

Die ermittelten spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der unterschiedlichen Szenarien erlauben eine Einordnung dieses Konzepts in das Panel an Strategien, die darauf abzielen, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Diese Erkenntnisse könnten demnach bei künftigen Überlegungen zur CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion genutzt werden.

## 9 Schluss

Das Konzept der zentralen Trinkwasservorwärmung basiert auf der Hypothese, dass der Energieeinsatz in den Haushalten dadurch reduziert werden kann.

Grundlegend können die Berechnungsergebnisse der temperaturgeführten Trinkwasserversorgung am Beispiel der Stadt Wien dahingehend zusammengefasst werden, dass für den gesamten urbanen Raum eine 1 %-Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen theoretisch umsetzbar ist und eine Vorwärmung des Trinkwassers eine 20 %-Reduktion des Nutzenergiebedarfs für den Bereich ‚Warmwasser und Kochen‘ ermöglicht. Kostenneutral ist etwa die Hälfte dieser Potentiale umsetzbar.

Aus den Modellergebnissen ist ersichtlich, dass eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung in der Lage ist, den lokalen Energieverbrauch und den Emissionsausstoß in den Haushalten zu senken. In dem Szenario ‚Eco‘ konnte darüber hinaus unter den getroffenen Annahmen die mögliche Wirtschaftlichkeit eines solchen Konzepts gezeigt werden. Eine Wärmeeinspeisung erweist sich bei Gestehungskosten unterhalb von 15 €/MWh als rentabel.

Damit konnten in dieser Arbeit die meisten Bedenken (wie Wärmeverluste im Leitungsnetz, Sorge um kaltes Wasser im Sommer oder Unrentabilität), die gegen eine temperaturgeführte Trinkwasserversorgung sprechen relativiert werden und gezeigt werden, dass das Konzept unter gewissen Voraussetzung als mögliche Primärenergieeinsparungsoption denkbar ist. Dazu muss angemerkt werden, dass eine Trinkwasservorwärmung nur dann sinnvoll sein kann, wenn günstige Wärmequellen zur Verfügung stehen, die abseits der Nutzung zur Vorwärmung entweder auf Grund des zu geringen Temperaturniveaus oder auf Grund nicht vorhandener anderen Wärmesenken nicht genutzt werden können.

Weiters bleibt hinsichtlich einer zentralen Trinkwasservorwärmung die Frage zu beantworten, ob ganzjährig möglichst kaltes Leitungswasser als schützenswertes Kulturgut betrachtet wird, oder ob die positiven Effekte der fossilen Ressourceneinsparung und der Verringerung der Emissionen überwiegen, um geringe Erwärmungen des Trinkwassers zu rechtfertigen.

Um eine fundierte Wertung des Konzepts der zentralen Trinkwasservorwärmung vornehmen zu können, sollten die vorliegenden Ergebnisse um eine Studie zur Behaglichkeit der Trinkwassertemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur, eine Studie über den tatsächlichen Warmwasserbedarf im Jahresgang, eine genauere Analyse der Wärmepotentiale und ihre Erschließungskosten, sowie eine Aufnahme der Temperaturen in der gesamten Wasserversorgung erweitert werden.

## Bibliographie

- Alteneder, Elke. 2016. "AW: Datenanfrage Diplomarbeit.", October 5.
- "APG - Marktinformationen." 2017. At <https://www.apg.at/de/markt/Markttransparenz/Uebertragung/EXAA%20Spotmarkt>, accessed November 14, 2017.
- Danese, Carlo. 2016. "Potential and Costs of Geothermal Energy." TU Wien.
- "Das Projekt — Austrian Heat Map." 2017. At <http://www.austrian-heatmap.gv.at/das-projekt/>, accessed November 14, 2017.
- Eller, Dominik. 2015. *Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland Potentiale zur Nutzung von Stromüberschüssen in Fernwärmenetzen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- "Energiesparen Bei Der Warmwasserbereitung." 2011. Umwelt Bundesamt.
- "European Emission Allowances (EUA)." 2017. At <https://www.eex.com/de/marktdaten/umweltprodukte/spotmarkt/european-emission-allowances#!/2017/11/13>, accessed November 14, 2017.
- Fahrnberger, Helge. 2017. "» Trinkwasser Vorwärmen Und €32 Mio. Sparen." At <http://www.helge.at/2008/07/trinkwasser-vorwaermen-und-20-mio-euro-sparen/>, accessed November 14, 2017.
- Farghadan, Manuela. 2016. "Warmwasser Effizient Bereitstellen." Wien: Magistrat der Stadt Wien.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft. 2009. "CO<sub>2</sub>-Verminderung in Deutschland." München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft.
- Fritz, Sara. 2016. "Economic Assessment of the Long-Term Development of Buildings' Heat Demand and Grid-Bound Supply: A Case Study for Vienna." Wien: Technische Universität Wien.
- "GeoDH Europe." 2017. At [https://map.mbfisz.gov.hu/geo\\_DH/](https://map.mbfisz.gov.hu/geo_DH/), accessed November 14, 2017.
- Haas, Reihard. 2014. "Skript Energieökonomie 373.010." TU Wien.
- "Heizelement 2000 Watt." 2017. At <https://www.amazon.de/dp/B005FE66J0/?tag=gpn-21&ascsubtag=1e5b08b8-40d6-4359-8d8c-f83d2dea63f9>, accessed November 14, 2017.
- "Interaktive Karte – Austrian Heat Map." 2017. At <http://www.austrian-heatmap.gv.at/karte/>, accessed November 14, 2017.
- Kaltschmitt, Martin, and Wolfgang Streicher, eds. 2009. *Regenerative Energien in Österreich: Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung*. 1. Aufl Praxis Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Karger, Rosemarie, Klaus Cord-Landwehr, and Frank Hoffmann. 2008. *Wasserversorgung*. Wiesbaden: Vieweg +Teubner Verlag / GWV Fachverlage,

- Wiesbaden. At <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8351-9228-7>, accessed January 10, 2018.
- Könighofer, Kurt. 2014. "Potenzial Der Tiefengeothermie Für Die Fernwärme- Und Stromproduktion in Österreich."
- Laasch, Thomas, and Erhard Laasch. 2013. *Haustechnik: Grundlagen - Planung - Ausführung*. 13., durchges. und aktualisierte Aufl Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Magistrat der Stadt Wien. 2016. "Energiebericht Der Stadt Wien."
- Matzke, Christian. 2016. "AW: Datenanfrage Diplomarbeit.", September 29.
- "McKelvey-Diagramm." 2017. At <http://bfy.tw/F18x>, accessed November 14, 2017.
- Narodoslawsky, Benedikt. 2017. "Altes Öl in Neuen Kesseln." *Falter*, October 11, 39/17 edition.
- Neunteufel, Roman. 2012. "Wasserverbrauch Und Wasserbedarf." Zusammenfassung der Ergebnisse Wien.
- — —. 2015. "Wasserversorgung Im Jahre 2015 - Erfahrungen Und Ausblick." Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Universität für Bodenkultur Wien.
- — —. 2016. "Telefonat."
- "Nine Fascinating Facts about Geothermal Energy and Reykjavík." 2017. *Icelandmag*. At <http://icelandmag.visir.is/article/nine-fascinating-facts-about-geothermal-energy-and-reykjavik>, accessed November 14, 2017.
- OECD, ed. 2015. *Wasser und Städte: Sicherung einer nachhaltigen Zukunft*. OECD-Wasserstudien Paris: OECD Publishing.
- OÖ ENERGIESPARVERBAND. 2017. "Photovoltaik - PV-Schule." At <http://www.pv-schule.at/foerderprogramm/photovoltaik/>, accessed November 14, 2017.
- "ÖVGW · Ressource." 2017. At <http://www.ovgw.at/wasser/ressource/>, accessed November 14, 2017.
- Panos, Konstantin. 2013. *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. 3., aktualisierte Aufl VDI Berlin: Springer Vieweg.
- Pindyck, Robert, and Daniel Rubinfeld. 2009. *Mikroökonomie*. 7., aktualisierte Aufl. [der amerikan. Ausg.], [Nachdr.] Wi - Wirtschaft München: Pearson Higher Education.
- Rötsch, Dietmar. 1999. *Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen: Fernwärme Und Wasser*. VDI-Buch Berlin ; New York: Springer.
- Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH. 2016. "Technologien Der Abwärmenutzung."
- STATISTIK AUSTRIA. 2017. "Nutzenenergieanalyse." At [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/energie\\_und\\_umwelt/energie/nutzenenergieanalyse/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/nutzenenergieanalyse/index.html), accessed November 14, 2017.

- Strobl, Ruth, and Robert Grüneis. 2017. "Mit Fernwärme CO2 Einsparen | Wien Energie Fernwärme, 04.12.2007." At [https://www.ots.at/presseaussendung/OTS\\_20071204\\_OTS0186/mit-fernwaerme-co2-einsparen](https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20071204_OTS0186/mit-fernwaerme-co2-einsparen), accessed November 14, 2017.
- "Tätigkeitsbericht 2011 - MA 31, Abkehr Der II. Wiener Hochquellleitung." 2011. Kontrollamt der Stadt Wien.
- Thalmann, Stefan. 2018. "ANALYSE UND OPTIMIERUNG VON FERNWÄRMENETZEN IST-ANALYSE VON FERNWÄRMENETZEN UND BEWERTUNGS-TOOL ZUR NETZ-OPTIMIERUNG." Zürich: Bundesamt für Energie BFE. At [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwikip5OCw8vYAhUN\\_KQKHT2kAUQQFggoMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.bfe.admin.ch%2Fphp%2Fmodules%2Fpublikationen%2Fstream.php%3Fextlang%3Dde%26name%3Dde\\_11477087.pdf&usg=AOvVaw0kyV3JBJ5iXelKUrCHXJZO](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwikip5OCw8vYAhUN_KQKHT2kAUQQFggoMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.bfe.admin.ch%2Fphp%2Fmodules%2Fpublikationen%2Fstream.php%3Fextlang%3Dde%26name%3Dde_11477087.pdf&usg=AOvVaw0kyV3JBJ5iXelKUrCHXJZO), accessed January 9, 2018.
- Werderitsch, Markus. 2016. "Gespräch Mit MA 31 – Wiener Wasser - Fachbereich Planung, Wasserqualität Und EDV."
- Wien Energie. 2017. "Stromkennzeichnung."
- "Wiener Netze | Kenndaten Für Erdgas | Kenndaten | Rund Um Erdgas | Erdgas." 2018. *Www.Wienernetze.At*. At <http%3A%2F%2Fwww.wienernetze.at%2Fnc%2Fep%2FprogramView.do%3FpageTypeld%3D65646%26channelld%3D-46192%26programld%3D38910>, accessed January 11, 2018.
- Wiener Wasser (MA 31). 2017a. "Quellen Und Versorgungswasserleitungen Wien." At <https://www.wien.gv.at/wienwasser/images/hql-grafik-gr.jpg>, accessed November 14, 2017.
- — —. 2017b. "Rohrnetz - Verteilung des Wassers in Wien." At <https://www.wien.gv.at/wienwasser/versorgung/rohrnetz/>, accessed November 14, 2017.
- — —. 2017c. "Wasserverbrauch." At <https://www.wien.gv.at/wienwasser/verbrauch.html>, accessed November 14, 2017.
- Wirtschaft, Arbeit und Statistik (Magistratsabteilung 23). 2017. "Bevölkerung nach Staatsangehörigkeit und Geschlecht 2015 und 2016." At <https://www.wien.gv.at/statistik/bevoelkerung/tabellen/bevoelkerung-staat-geschl-zr.html>, accessed November 14, 2017.



## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2-1: Energieflussbild der Stadt Wien 2014 .....                                                                   | 3  |
| Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der zentralen Trinkwasservorwärmung.....                                            | 6  |
| Abbildung 2-3: SWOT-Analyse zur Einführung einer Trinkwasservorwärmung.....                                                 | 8  |
| Abbildung 3-1: Quellen und Versorgungswasserleitungen Wien .....                                                            | 14 |
| Abbildung 3-2: Wassereinspeisung Wien im Jahr 2015.....                                                                     | 15 |
| Abbildung 3-3: Speicherstand und Verbrauch von Wasser .....                                                                 | 15 |
| Abbildung 3-4: Wasserverteilsystem im Wiener Stadtgebiet.....                                                               | 16 |
| Abbildung 3-5: Höhenverlauf der HQL1 .....                                                                                  | 17 |
| Abbildung 3-6: Temperaturverlauf entlang der Versorgung und Verteilung der 1.HQL an<br>Beispieltagen .....                  | 18 |
| Abbildung 3-7: Temperaturverlauf im Behälter Neusiedl.....                                                                  | 18 |
| Abbildung 3-8: Boden- und Außentemperatur .....                                                                             | 19 |
| Abbildung 3-9: Diskrepanz zwischen prognostizierten und gemessenen Werten im<br>Speicher Rosenhügel .....                   | 22 |
| Abbildung 3-10: Speicher- und Bodentemperaturen.....                                                                        | 22 |
| Abbildung 3-11: Regressionsanalyse des Energieeintrags in der HQL1 mit der<br>Temperatur in 4 m Tiefe.....                  | 23 |
| Abbildung 3-12: Regressionsanalyse des Energieeintrags in der HQL1 mit der<br>Temperatur in 2 m Tiefe.....                  | 24 |
| Abbildung 3-13: Temperaturen im Wiener Wassersystem .....                                                                   | 25 |
| Abbildung 3-14: Bereinigte Temperaturen für die Regressionsanalyse .....                                                    | 26 |
| Abbildung 3-15: Bereinigter Zusammenhang .....                                                                              | 26 |
| Abbildung 4-1: Wasserverbrauch und Bedarf .....                                                                             | 28 |
| Abbildung 4-2: Regressionsanalyse des Energieeintrags zwischen Entnahme und<br>Kläranlage und der Temperaturspreizung ..... | 30 |
| Abbildung 4-3: Aufteilung der Energieträger für die Warmwasserbereitung in Wien<br>2015/16 .....                            | 31 |
| Abbildung 5-1: Solare Einstrahlung in Österreich .....                                                                      | 40 |
| Abbildung 5-2: Solare Einstrahlung im Raum Wien im Jahresverlauf 2015 .....                                                 | 41 |

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 5-3: Heatmap – Potentielle industrielle Abwärmequellen in der Umgebung des Wiener Wasserversorgungssystems.....                                      | 42 |
| Abbildung 5-4: Überlagerung der Abwärmepotentiale mit dem Verlauf der Hochquellleitungen .....                                                                 | 42 |
| Abbildung 5-5: Kartenausschnitt Temperaturen >50°C in 1000 m Tiefe .....                                                                                       | 44 |
| Abbildung 5-6: Hydrothermales Potential in Österreich .....                                                                                                    | 44 |
| Abbildung 5-7: Überlagerung des hydrothermalen Potentials mit dem Verlauf der Hochquellleitungen .....                                                         | 45 |
| Abbildung 5-8: Tagestiefstwerte der Strompreis im Jahr 2015 .....                                                                                              | 46 |
| Abbildung 5-9: Aufsteigende Ordnung der jeweils niedrigsten täglichen Strompreise .                                                                            | 47 |
| Abbildung 5-10: erforderlicher Wirkungsgrad der zentralen Trinkwasservorwärmung in Abhängigkeit von den Wärmegestehungskosten, um kosteneffizient zu sein..... | 50 |
| Abbildung 6-1: Veranschaulichung des Berechnungsmodells zur Optimierung einer temperaturgeführten Trinkwasserversorgung .....                                  | 52 |
| Abbildung 7-1: Wassermengen im Jahresverlauf .....                                                                                                             | 58 |
| Abbildung 7-2: gemessene Temperaturen der Hochquellleitungen und an der jeweiligen Entnahme.....                                                               | 58 |
| Abbildung 7-3: Entnahmetemperaturen der verschiedenen Szenarien an HQL1.....                                                                                   | 59 |
| Abbildung 7-4: Entnahmetemperaturen der verschiedenen Szenarien an HQL2.....                                                                                   | 59 |
| Abbildung 7-5: Nutzenergiesubstitutionen in den jeweiligen Szenarien bei den Wassernutzern im Jahresverlauf .....                                              | 61 |
| Abbildung 7-6: jährlich substituierbare Nutzenergie durch eine zentrale Trinkwasservorwärmung.....                                                             | 62 |
| Abbildung 7-7: Vergleich der jährlichen Einsparpotentiale mit dem Gesamtnutzenergieverbrauch der Haushalte für Warmwasser und Kochen .....                     | 62 |
| Abbildung 7-8: jährliches Einsparpotential an CO <sub>2</sub> -Emissionen .....                                                                                | 63 |
| Abbildung 7-9: Energieeinspeisungen in den Szenarien je Leitung .....                                                                                          | 64 |
| Abbildung 7-10: Installierte Leistungen in den unterschiedlichen Szenarien an HQL1 und HQL2 .....                                                              | 65 |
| Abbildung 7-11: Optimierungsergebnis der einzelnen Szenarien .....                                                                                             | 67 |
| Abbildung 7-12: Spezifische CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten der unterschiedlichen Szenarien .....                                                           | 68 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 7-13: zentraler Wirkungsgrad der Trinkwasservorwärmung .....                                                    | 69 |
| Abbildung 7-14: Temperaturverlauf entlang der Leitung (mit/ohne Vorwärmung).....                                          | 69 |
| Abbildung 7-15: Sankey-Diagramm zu den Energieflüssen im Szenario '+1°C' .....                                            | 70 |
| Abbildung 7-16: tatsächliche (blau) und wirtschaftliche rentable (rot) zentrale<br>Wärmebereitungskosten je Szenario..... | 71 |

## Anhang

%% Potential of preheated tap water in Vienna in 2015

%% Manuel Froschauer

%% Master thesis - TU Vienna - EEG

clear all;

clc

tic;

%% initialization

addpath(genpath('...'));

yalmip('clear');

solver = 'gurobi';

%% Parameter

i=2; %Anzahl WasserQuellen

j=5; %Anzahl zentrale Wärmequellen

k=4; %Anzahl lokale Heiztechnologien

t=365; %days of a year

z=0.03; %interest rate for investments in public goods

g=9.81; %grav force [m/s^2]

c\_h2o=4.2; %heat capacity [kJ/kgK]

p\_co2=27.5; %Emissionprices [Euro/t]

rue=6.67; %längenbezogener Wärmeübergangskoeffizient der HQL (W/mK)

hm=42; %Annahme: Heizwerk sei 42hm vor Wien

km=30; %Annahme: Heizwerk sei 30km vor Wien

%% Water\_Climate\_Radiation\_Parameter\_Vienna [°C, kg and kWh/m2 and MWh]

% sources ZAMG, PIK, APG, Vamed, Boku and WienerWasser

[T\_outside] = xlsread('AmbientData\_real',1,'B2:B366');

%[T\_ground] = xlsread('AmbientData\_real',1,'C2:C366'); %50cm

[T\_ground] = xlsread('AmbientData\_real',1,'D2:D366'); %200cm

[r\_solar] = xlsread('AmbientData\_real',1,'E2:E366');

[p\_elec] = xlsread('AmbientData\_real',1,'F2:F366');

[num,~,~] = xlsread('WaterData\_real');

[HQL.x\_waterfresh] = num(1:365,2:i+1);

HQL.x\_waterfresh = HQL.x\_waterfresh+0.0001; % +0.0001 ist ein Trick um -0 und NaN wegzubringen

[HQL.T\_waterfresh] = num(1:365,12:i+1); %speichertemperaturen in Wien

[x\_watertot] = xlsread('WaterData\_real',1,'G2:G366'); %Feedin Total

x\_watertotal = sum(HQL.x\_waterfresh,2);

AnteilHQ1u2 = (x\_watertotal)./(x\_watertot);

[x\_totalconsumption] = xlsread('WaterData\_real',1,'I2:I366'); %Änderung der Speicherstände + Feedin Total

[x\_waterheated] = xlsread('WaterData\_real',1,'J2:J366'); %Siehe Thesis

x\_waterheated = x\_waterheated.\*AnteilHQ1u2; %weil ich das Model nur für HQ1 und HQ2 rechnen

[x\_storage] = xlsread('WaterData\_real',1,'H2:H366'); %Speicherlevel Wien

```
[T_HQL1_consumption] = xlsread('WaterData_real',1,'N2:N366'); %EntnahmeTemperatur VAMED
[T_HQL1_neusiedl] = xlsread('WaterData_real',1,'K2:K366'); %Temperatur 60km vor Wien
```

```
%% Heat Sources Cost Parameters / zentrales Heizen
% sources WienerEnergie Sommerakademie, others (see thesis)
[num,txt,~] = xlsread('HeatCostParameter_real');
HS.name = txt(3:j+2,1);
HS.capex = num(1:j,1); % [Euro/MW_th]
HS.opex = num(1:j,2); % [Euro/MWh]
HS.life = num(1:j,3); % [a]
HS.potential = num(1:j,4:i+3); % [MWh/a]
```

```
%% Specifications for Viennese household tap water heating / lokales Heizen
% sources Energieverbrauch Statistik Wien, Statistik Austria
[num,txt,~] = xlsread('specs_Vienna_real');
tech.name = txt(1,2:k+1);
tech.share = num(1,1:k);
tech.efficacy = num(2,1:k);
tech.emission = num(3,1:k);
tech.price = num(4,1:k); % ENERGIE preisannahmen
%tech.price = num(5,1:k); %pessimistische ENERGIE preisannahmen
%tech.price = num(6,1:k); % Wien Energie OPTIMA Arbeitspreise
```

```
%% R E G R E S S I O N (einfach, linear)
% entsprechend dem Fourierschen Gesetz der Wärmeleistung  $Q = \lambda \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$ 
% linearer Zusammenhang der Temperaturdifferenz zu übertragener Wärmeleistung

% Regressionsanalyse ohne Dezember da die Werte linearisiert wurden
Energieeintrag = x_watertotal(1:322)/3600*4.2.*(T_HQL1_consumption(1:322)-
HQL.T_waterfresh(1:322,1));
deltaT = T_HQL1_consumption(1:322)-T_ground(1:322);

mdl = fitlm(deltaT,Energieeintrag,'linear');
intercept = mdl.Coefficients.Estimate(1);
lin = mdl.Coefficients.Estimate(2);
fit = intercept+lin*deltaT;

% der Energieeintrag ist auf die gesamte Wassermenge bezogen
% zum einfacher rechnen
hx3 = HQL.x_waterfresh*c_h2o/3600;
share = (HQL.x_waterfresh)./(x_watertotal*ones(1,i));
T_cons_old = ((intercept*share)+HQL.T_waterfresh.*hx3+(-lin*share).*(T_ground*ones(1,i)))./(-
lin*share+hx3);
```

```
%% S Z E N A R I E N
% +1°C, techno-legal, sozial, wirtschaftlich
% - +1°C: interessant zu sehen was bei 1°C plus passiert
% - techno-legal: gesetzlich trinkwasser <25°, legionellen problem -> max temp <20°
% - sozial: funktion behagliche wassertemp in abhängigkeit der außentemp
% - wirtschaftlich: alle constraints
```

```
scenarios = 4;
```

```

Szenario(1).name = '+1 °C';
Szenario(2).name = 'legal';
Szenario(3).name = 'sozial';
Szenario(4).name = 'ökonomisch';

Szenario(1).T_goal = (T_cons_old+1);
Szenario(2).T_goal = max(T_cons_old, 19.99*ones(t,i));
Szenario(3).T_goal = max(T_cons_old, ((15-T_outside/7)*ones(1,i)));
Szenario(4).T_goal = max(T_cons_old, ((15-T_outside/7)*ones(1,i)));

%% V A R I A B L E S
for s=1:scenarios;
    VHQL(s).Energy = sdpvar(t,i,j);
    VHQL(s).Power = sdpvar(1,i,j);
    VHQL(s).T_heated = sdpvar(t,i);
end

%% C O N S T R A I N T S
% Temperatures, Energy and Power
for s=1:scenarios;
    Constraints = [];

    %Potentialbeschränkungen (siehe Recherche)
    for iii=1:i;
        for jj=1:j;
            Constraints = [Constraints, 0 <= sum(VHQL(s).Energy(:,iii,jj)*ones) <= HS.potential(jj,iii)+0.00001];
            Constraints = [Constraints, 0 <= sum(VHQL(s).Power(:,iii,jj)) <= HS.potential(jj,iii)/8000+0.00001];
        end
    end
    %91,32% max Volllaststunden unterstelle ich wegen Wartung und so ;)
    Constraints = [Constraints, 0 <= sum(VHQL(s).Power(:,4)) <= 100]; %maximal 100MW pro
    %Leitung

    % Leistung muss Energie zur Verfügung stellen können
    for ii=1:i;
        %geothermal
        Constraints = [Constraints, 0 <= (VHQL(s).Energy(:,ii,1))/24 <= (VHQL(s).Power(:,ii,1)*ones(t,1))];
        %industrial
        Constraints = [Constraints, 0 <= (VHQL(s).Energy(:,ii,2))/24 <= (VHQL(s).Power(:,ii,2)*ones(t,1))];
        %solar
        Constraints = [Constraints, 0 <= (VHQL(s).Energy(:,ii,3))/(r_solar) <=
        VHQL(s).Power(:,ii,3)*ones(t,1)];
        %electrical %ich erlaube nur in der günstigsten Stunde des Tages elektrische Heizleistung! sonst
        %wird das modellieren zu komplex, weil Modell auf Tagesbasis ist
        Constraints = [Constraints, 0 <= (VHQL(s).Energy(:,ii,4))/1 <= (VHQL(s).Power(:,ii,4)*ones(t,1))];
        %Backstop
        Constraints = [Constraints, 0 <= (VHQL(s).Energy(:,ii,5))/24 <= (VHQL(s).Power(:,ii,5)*ones(t,1))];
    end
end

```

```

%% M O D E L L I N G

%% Temperatur auf die geheizt wird
% der Energieaustausch mit Erdreich muss berücksichtigt werden
% im Verteilsystem (siehe Regression)
% im Versorgungssystem (Zusammenhang entspr. Thesis)

%Wärmeeintrag zwischen Entnahme und Speicher in Wien
VHQL(s).T_temp_goal_storage = ((Szenario(s).T_goal.*((-lin*share+hx3))-(-lin*share).*(T_ground*ones(1,i))-(intercept*share))./hx3);

%Wärmeeintrag zwischen Speicherin Wien und Heizwerk aus
%Wärmeübergang (2W/mK; 30km vor Wien) und Reibung (42hm)
VHQL(s).T_temp_goal_plant = VHQL(s).T_temp_goal_storage - g*hm/c_h2o/1000 +
((rue*(VHQL(s).T_temp_goal_storage-
T_ground*ones(1,i))*24/1000)/c_h2o./(HQL.x_waterfresh+10000))*3600;

%Damit die Zielvorwärmtemperatur nicht unter der
%Quelltemperatur liegt
VHQL(s).T_temp_goal_plant_c = max(HQL.T_waterfresh+0.0002,VHQL(s).T_temp_goal_plant);

VHQL(s).T_heated_max = min(20,VHQL(s).T_temp_goal_plant_c);

%% CONSTRAINTS Temperaturen in den Szenarien
% +0.0001 ist ein Trick um die Nuller/NaN/-0 wegzubringen die dann in den Multiplikationen
% (share) Probleme machen
if s<4;
    Constraints = [Constraints, VHQL(s).T_heated_max-0.0001 <= VHQL(s).T_heated <=
VHQL(s).T_heated_max];
else
    Constraints = [Constraints, HQL.T_waterfresh+0.0001- g*hm/c_h2o/1000 <= VHQL(s).T_heated
<= VHQL(s).T_heated_max+0.0001];
end

%% Preheating [MWh]
% the energy required for preheating the water has to be supplied on each day
VHQL(s).Energy_Need = c_h2o * (VHQL(s).T_heated - HQL.T_waterfresh) .* HQL.x_waterfresh /
3600;

% the energy required has to be injected by the technologies on each line
Constraints = [Constraints, VHQL(s).Energy_Need <= sum(VHQL(s).Energy,3)];

%% C O S T S

PARA=ones(t,i,j);
for x=1:j;
    OPEX(:,x) = PARA(:,x)*HS.opex(x);
    LIFE(x) = ((1+z).^HS.life(x)*z)./(1+z).^HS.life(x)-1);
    CAPEX(:,x) = PARA(1,:,x)*(HS.capex(x)*LIFE(x)); %diskontiert, wobei egal?!
end

%zu den variable Wärmekosten aus Elektrizität kommen noch die Strompreise
OPEX(:,4) = OPEX(:,4)+p_elec*ones(1,i);

VHS(s).var_costs = VHQL(s).Energy.*OPEX; %[Euro/MWh]

```

$VHS(s).fix\_costs = VHQL(s).Power . * CAPEX; \%[Euro/a]$

%% S A V I N G S

% Substitution [MWh] Emissionsavings [t CO2] Saved Costs [Euro]

$VHQL(s).T\_storage\_real = VHQL(s).T\_heated + g*hm/c\_h2o/1000 - ((2*(VHQL(s).T\_heated - T\_ground*ones(1,i))*km)*24/1000)/c\_h2o./(HQL.x\_waterfresh+10000)*3600;$

$VHQL(s).T\_consumption\_real = [(intercept*share) + VHQL(s).T\_storage\_real.*hx3 + (-lin*share).*(T\_ground*ones(1,i))]./(-lin*share+hx3);$

$Energy(s).Substituted = c\_h2o*(VHQL(s).T\_consumption\_real - T\_cons\_old).*(share.*x\_waterheated*ones(1,i))/3600;$

$Vtech(s).sub = sum(sum(Energy(s).Substituted)).*(tech.share./tech.efficacy);$

$Vtech(s).cost\_save = Vtech(s).sub.*tech.price;$

$sub\_Energy(s) = sum(sum((Energy(s).Substituted)));$

$Vtech(s).emission\_save = Vtech(s).sub.*tech.emission/1000;$

$Vtech(s).co2\_cost\_save = sum(Vtech(s).emission\_save) * p\_co2;$

$saved\_emis(s) = sum(Vtech(s).emission\_save);$

%% OBJECTIVE FUNCTION

% yalmip always minimizes -> maximizing the benefit

$c\_fix(s) = sum(sum(VHS(s).fix\_costs));$

$c\_var(s) = sum(sum(sum((VHS(s).var\_costs))));$

$s\_energy(s) = sum(Vtech(s).cost\_save);$

$s\_CO2(s) = Vtech(s).co2\_cost\_save;$

$obj = c\_fix(s) + c\_var(s) - s\_energy(s) - s\_CO2(s);$



## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In– noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, am

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

Manuel Froschauer