

Paradigmenwechsel im urbanen Energiesystem durch Synergiepotentiale mit der Industrie

M. Theissing, K. Karner,
M. Rogetzer, J. Bärnthaler

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

32/2018

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Paradigmenwechsel im urbanen Energiesystem durch Synergiepotentiale mit der Industrie

DI Dr. Matthias Theissing, Katharina Karner MSc, DI Melanie Rogetzer
FH JOANNEUM, Energie-, Verkehrs- und Umweltmanagement

DI Josef Bärnthaler
Energieagentur Obersteiermark GmbH

Kapfenberg, Februar 2016

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMVIT publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	10
Abstract.....	13
1 Einleitung.....	15
1.1 Aufgabenstellung.....	16
1.2 Stand der Technik.....	18
1.2.1 (internationale) Forschungsarbeit	18
1.2.2 Integrationsmöglichkeiten von industrieller Energie	21
1.3 Verwendete Methoden.....	26
1.3.1 Identifikation der energieintensiven Industriebranchen	26
1.3.2 Datenerfassung und Aufbereitung – Modell.....	27
1.3.3 Modellentwicklung	28
1.3.4 Datenerfassung und Aufbereitung – Ökonomie	31
1.3.5 Ökonomische Analyse nach VDI 2067	31
1.3.6 Simulation verschiedener Fördersysteme in Form von Szenarien	34
1.3.7 Sensitivitätsanalyse	34
1.3.8 Ökologische Analyse.....	35
2 Ergebnisse	37
2.1 Synergiepotenziale	37
2.2 Technische Einbindung.....	38
2.2.1 Wärme	39
2.2.2 Strom	41
2.3 Ökonomie	43
2.3.1 Wärme	44
2.3.2 Strom	46
2.4 Ökologie	48
2.4.1 Quantitative Bewertung	48
2.4.2 Qualitative Bewertung	50
3 Schlussfolgerungen	52
4 Ausblick und Empfehlungen	54
5 Verzeichnisse	56
5.1 Abbildungsverzeichnis	56
5.2 Tabellenverzeichnis	56

5.3	Literaturverzeichnis.....	58
6	Anhang.....	62
6.1	Basis Daten für Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	62
6.2	Basisdaten für die ökologische Analyse.....	62
6.3	Entwickelte Komponentenmodelle in IPSEpro.....	62
6.3.1	Wärmepumpe.....	63
6.3.2	Photovoltaik.....	63
6.3.3	Industrie.....	64
6.3.4	Temperaturübertrag.....	65
6.3.5	Stromspeicher.....	65
6.3.6	MVA.....	66
6.3.7	Wärme +/-.....	66
6.3.8	Strom +/-.....	67
6.3.9	Stromübertrag.....	67
6.3.10	Stadt.....	68
6.3.11	Wärmeübertrag.....	68
6.4	Gesamtsystem.....	68

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Mehr als ein Drittel des Energiebedarfs in Österreich ist dem produzierenden Bereich zuzuordnen. Daher wird hier ein Ansatz gewählt, bei der Industrie die Energienutzung zu erhöhen und somit die Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren.

Inhalte und Zielsetzungen

Industriebetriebe sind nicht nur durch einen hohen Energieeinsatz für die Produktion gekennzeichnet, sondern es fällt parallel zur Produktion Energie z.B. in Form von Abwärme, Abwasser und Abfall, an bzw. können verfügbare Dachflächen zur Gewinnung regenerativer Energie genutzt werden. So weit möglich erfolgt eine Nutzung dieser Energie bereits in den Betrieben selbst. Der nicht im Betrieb nutzbare Anteil steht jedoch grundsätzlich für eine externe Nutzung zur Verfügung. Hier sollte aber ein Paradigmenwechsel angedacht werden. Anstatt diese Energie ungenutzt an die Umgebung abzugeben, kann man sie in der nahegelegenen Stadt oder urbanen Region verwenden. Die Stadt fungiert somit als Energieschwamm und saugt die überschüssige Energie von Industriebetrieben auf. Damit erhöht sich auch die Energieeffizienz. Die Energie wird nicht nur wirtschaftlich sondern auch energetisch sinnvoll eingesetzt.

Im Projekt werden die Strom-, Kälte- und Wärmeerzeugung aus industrieller Abwärme, warmem Industrieabwasser, industriellem Abfall und die energetische Flächennutzung betrachtet, Potentiale erhoben und Synergien mit dem urbanen Energiebedarf ermittelt. Betrachtet werden hierbei konkret vier Städte in Kombination mit den lokalen Industriebetrieben in der Region Murtal: Zeltweg, Fohnsdorf, Knittelfeld und Judenburg.

Das Projekt weist folgende Kernzielsetzungen auf:

- Schaffung einer Datenbasis
- Erstellung eines Simulationsmodells um die Integration von industrieller Energie in einer Stadt repräsentativ darzustellen
- Analyse der ökonomischen und ökologischen Fragestellungen

Methodische Vorgehensweise

Zu Beginn wurden energieintensive Industriebranchen in der Steiermark bzw. in Österreich identifiziert. Anhand dieser erfolgte die Auswahl der Industriebetriebe in den Projektregionen und die Datenrecherche. Sowohl für die Industrie, als auch für die Städte wurden die nötigen Daten recherchiert, erfasst und passend aufbereitet.

Anschließend wurde das auf Gleichungen basierte Simulationsmodell erstellt und die Industriebetriebe und die Stadt abgebildet. Das Simulationsmodell wurde so gestaltet, dass es je nach Bedarf an verschiedene Größenordnungen angepasst werden kann. Die

Simulation wurde für alle vier Städte durchgeführt und mittels Evaluierungsschleifen wurde das Modell verfeinert.

Basierend auf den Ergebnissen der technischen Simulation und der Datenrecherche wurde die ökonomische Analyse nach VDI 2067 durchgeführt. Anhand verschiedener Szenarien wurden verschiedene Fördersysteme mit in die Analyse eingebunden. Die Auswirkungen von Preisschwankungen und zukünftigen Entwicklungen wurden in einer Sensitivitätsanalyse betrachtet.

Die ökologische Bewertung besteht aus zwei Teilen: Die quantitative Bewertung betrachtet die Auswirkungen der Nutzung von industrieller Energie (Definition siehe Kapitel 1) auf die CO₂ Emissionen. Die qualitative Bewertung analysiert nicht messbare Umweltauswirkungen.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Es konnte festgestellt werden, dass insgesamt bis zu 32% des Gesamtendenergiebedarfs der untersuchten Städte durch industrielle Energie gedeckt werden kann. Dies führt zu einer Reduzierung der extern und intern für die urbanen Gebiete bereitzustellenden Endenergieträger Strom und Wärme. Außerdem kann fast die gesamte Menge der anfallenden industriellen Energie in dem Energiesystem der Stadt integriert werden. Nur wenige Stunden im Jahr und in geringer Höhe besteht ein Überangebot durch industrielle Energie.

Umsetzungen zur Nutzung von industriellem Strom sind ohne den Erhalt von Einspeisetarifen nicht wirtschaftlich. Die Umsetzung von PV-Anlagen ist generell mit geringem Aufwand verbunden. Die Stromgestehungskosten werden größtenteils durch die Kosten der PV-Module beeinflusst. Umsetzungen zur Nutzung von industrieller Wärme sind auch ohne Investitionsförderungen wirtschaftlich. Die Wärmegestehungskosten werden am meisten von den Kosten für Strom, der für den Betrieb der Fernwärmepumpen und der Wärmepumpen benötigt wird, beeinflusst.

Abhängig von dem Anteil an direkt nutzbarer Wärme und Wärme, die über Wärmepumpen genutzt wird, sinken die CO₂ Emissionen und der Verbrauch an Primärenergie. CO₂ Einsparungen von bis zu 20% im Vergleich zur aktuellen Versorgung können verzeichnet werden.

Die Nutzung industrieller Energie führt zu einer deutlichen Erhöhung der Energieeffizienz für die Industriebetriebe, zur Reduktion von CO₂ Emissionen und des Bedarfs an Primärenergie, reduziert die Abhängigkeit von externen Energielieferanten und erhöht somit die Versorgungssicherheit.

Ausblick

Im Zuge des Forschungsprojektes wurden vier für Österreich charakteristische Städte hinsichtlich ihres energetischen Synergiepotenzials mit der Industrie untersucht. Durch kleine Adaptierungen kann das entwickelte Modell für andere Städte angepasst werden. Eine Generalisierung über die Höhe des Synergiepotenzials für Städte in derselben

Größenordnung ist jedoch mit einer Unsicherheit behaftet, die durch Erhöhen der Anzahl von untersuchten Städten reduziert werden kann.

Die untersuchten Projektregionen sind in unmittelbarer Nähe zueinander. Der Zusammenschluss von Verbrauch und Angebot über die Stadtgrenzen hinaus würde die Möglichkeit bieten, die Synergieeffekte zu erhöhen und etwaige Angebotsspitzen zu reduzieren.

Das kurzfristige Überangebot, das sich aus der Stromerzeugung ergibt, kann entweder in das allgemeine öffentliche Netz eingespeist, in geeigneten Komponenten gespeichert oder für Hybridisierung verwendet werden. Dort wird das Überangebot an Strom nicht in das Stromnetz abgegeben, sondern z.B. zur Wärmeerzeugung (power2heat) genutzt. Ein Vergleich der beiden Varianten ist durchzuführen.

Abstract

Starting point/Motivation

More than a third of the energy demand is caused by the producing sector in Austria. Because of that, this approach is chosen by the industry to save energy and thus reduce the impact on the environment.

Contents and Objectives

Industrial enterprises are not only characterized by a high energy input, but also by the production of energy e.g. in the form of waste heat, waste water and waste, or available land can be used for the recovery of renewable energy. As far as possible the use of this energy is already done inside the companies. The not internally used energy is, however, in principle available for external use. Instead of releasing this energy unused to the environment, it can be used in the nearby town or urban region. The city acts as a sponge and absorbs the excess energy of industrial companies. This also increases energy efficiency.

In the project, the electricity, cold and heat generation from industrial waste heat, industrial waste water, industrial waste and the energetic use of roof areas are considered. Furthermore potentials are elevated and synergies with the urban energy demand are determined. This is done for four cities in the Styrian Murtal: Zeltweg, Fohnsdorf, Knittelfeld and Judenburg.

The project has the following key objectives:

- Creation of a data base
- Creation of a simulation model for the representative integration of industrial energy in a town
- Analysis of economic and environmental issues

Methods

Initially, energy-intensive industries are identified in Styria and in Austria. Based on that, the selection of the industrial companies is made for the project regions. Both for the industry, as well as for the cities the necessary data is researched, collected and processed appropriately.

Then, an equations-based simulation model is created which represents the industry and the city. The simulation model has been designed in a way that it can be adapted to various sizes depending on the requirements. The simulation was performed for all four cities and the model was improved by means of evaluation loops.

Based on the results of the simulation and data research, the economic analysis was carried out according to VDI 2067. Based on different scenarios, various funding systems are involved in the analysis. The effects of price volatility and future developments are considered in a sensitivity analysis.

The ecological assessment, consisting of two parts: The quantitative evaluation considers the impact of the industrial energy use on CO₂ emissions. The qualitative assessment analyzed not measurable environmental impacts through the use of industrial energy.

Results

It was found that up to 32% of the total energy demand of the cities can be covered by industrial energy. This leads to a reduction of the maximum power for electricity and heat generation. In addition, almost the total amount of accumulated industrial energy can be integrated into the energy system of the city. Just a few hours a year and at low extent an oversupply of industrial energy occurs.

The use of industrial power is not economical without obtaining feed-in tariffs. The implementation of PV systems is connected with little effort. The electricity production costs are largely influenced by the cost of PV modules. The use of industrial heat is also economical without investment funding. The heat production costs are most influenced by the cost of electricity, which is needed for the operation of the district heating pumps and heat pumps.

Depending on the proportion of directly usable heat and heat, which is used via heat pumps, a decrease in CO₂ emissions and primary energy is recordable. CO₂ savings of up to 20% compared to the current supply can be registered.

The use of industrial energy leads to a significant increase in energy efficiency for the industrial enterprises, a reduction of CO₂ emissions and primary energy, a reduction in the dependence on external energy suppliers and thus an increase in the security of supply.

Prospects / Suggestions for future research

In the course of the research project four characteristic cities were examined in terms of their potential synergy with the industry. Through small adaptations the developed model can be customized for other cities. A generalization about the level of synergy potential for cities of the same size is afflicted with uncertainties; this can be reduced by increasing the number of analyzed cities.

The studied regions are nearby. A merger between consumption and supply across the city's borders would provide an opportunity to increase synergies and reduce any oversupplies.

The short-term oversupply, resulting from electricity generation can be stored either in suitable storages or used for hybridization. There, the oversupply is not fed in the power grid, but used for heat generation (power2heat). A comparison of the two alternatives has to be done.

1 Einleitung

Zu Beginn einige wichtige Definitionen, die im Rahmen des Projektes für das weitere Arbeiten festgelegt wurden:

Industrielle Energie beinhaltet sämtliche Abwärmeströme (über Abgas / Abluft, Konvektion, Strahlung und Wasser aus dem Betrieb abgeführt), sowie Energie gebunden in Form von Reststoffen, und Dachflächen bzw. regenerative Energieträger, die auf den Standorten der Industriebetriebe zusätzlich gewonnen werden können (PV, Solarthermie).

Der **Versorgungsgrad** ist definiert als das Verhältnis zwischen einer bestimmten Form jährlich verfügbarer Endenergie und dem jährlichen Endenergiebedarf für eine bestimmte Form von Endenergie. Mit dem Versorgungsgrad erfolgt ein Vergleich von (Jahres-) Energiemengen. [1] Der im Projekt verwendete Begriff „Synergiepotenzial“ entspricht dem hier definierten Versorgungsgrad.

Der **Bedarfsdeckungsgrad** berücksichtigt die momentane Verfügbarkeit und den momentanen Bedarf der verschiedenen Endenergieträger durch einen Abgleich zwischen dem Lastgang der Endenergiebereitstellung mit dem Lastgang des Endenergiebedarfs. Somit können Aussagen zu den momentan erreichbaren Lastabdeckungen gewonnen werden. [1]

Von den Primärenergiepotenzialen aus der Industrie und dem Gewerbe wird bislang meist nur Abwärme direkt innerhalb der industriellen Produktion genutzt. Außerdem ist man immer wieder mit der Situation konfrontiert, dass industrielle Energie im System grundsätzlich in nutzbarer Form vorliegt, aber nicht genutzt werden kann. Eine Vielzahl von Untersuchungen, in die die Antragsteller involviert waren, stützt diese Beobachtungen.

Die Nutzung der Primärenergiepotenziale durch z.B. die Wärmenutzung des warmen Abwassers fand bislang eher in untergeordnetem Ausmaß statt. Die Projekte, die bisher realisiert wurden, verfolgen eine Nutzung von Anteilen der Abwärme, die mit konstanter Wärmeleistung zur Verfügung stehen, oder speisen mit instationärem Verlauf in sehr große Fernwärmenetze ein, die durch diese ungleichmäßige Wärmeeinlieferung nicht in ihrer Betriebssicherheit beeinflusst werden. Die vorhandenen Potenziale werden somit nicht vollständig genutzt. [2]

Die Ausgliederung der industriellen Energie außerhalb der Produktionsprozesse bedeutet einerseits eine zusätzliche Einnahmequelle für die Industriebetriebe, stellt andererseits aber eine Herausforderung hinsichtlich der Energielieferung dar, da besonders auf die Verbrauchscharakteristik der Stadt außerhalb der industriellen Produktion Rücksicht genommen werden muss. [2] In diesem Zusammenhang gilt es, die Synergien und Potenziale dahingehend zu erheben.

1.1 Aufgabenstellung

Eine Stadt oder urbane Region hat einen Energiebedarf, der über das Jahr hin schwankt, aber dennoch bestimmte Charakteristika aufweist. Bei weitem einfacher ist das bei industriellen Prozessen. Ist ein Prozess bereits erprobt, läuft er immer wieder in derselben Abfolge ab und weist auch immer denselben Energiebedarf auf bzw. stellt auch Energie bereit (z.B. warmes Industrieabwasser, industrielle Abwärme etc.). Die Schwankungen hängen somit von Produktionszyklen, Schichtsystemen und vor allem von den Prozessen selbst ab. Der Bedarf sowie die Produktion an Energie sind daher instationär. Die Produktion an Überschussenergie in industriellen Prozessen und Betrieben wird meist nicht genutzt. Oftmals ist das auch gar nicht im Betrieb möglich. Dasselbe gilt für große ungenutzte Flächen von Industriebetrieben (z.B. Dachflächen).

Hier sollte aber ein Paradigmenwechsel angedacht werden. Anstatt diese Energie ungenutzt an die Umgebung abzugeben, kann man sie in der nahegelegenen Stadt oder urbanen Region verwenden. Die Stadt fungiert somit als Energieschwamm und saugt die überschüssige Energie von Industriebetrieben auf. Damit erhöht sich somit auch die Energieeffizienz. Die verfügbare Energie wird nicht nur wirtschaftlich, sondern auch energetisch sinnvoll eingesetzt. Synergien zwischen Stadt und Industrie sind also durchaus vorstellbar. Diese gilt es in vorliegendem Projekt zu erforschen.

Im Projekt werden die Strom-, Kälte- und Wärmeerzeugung aus industrieller Abwärme, warmem Industrieabwasser, industriellem Abfall und die energetische Flächennutzung betrachtet, Potentiale erhoben und Synergien mit dem urbanen Energiebedarf ermittelt. Betrachtet werden hierbei konkret vier Städte in der Region Murtal: Zeltweg, Fohnsdorf, Knittelfeld und Judenburg.

Das Projekt weist folgende **Zielsetzungen** auf:

- Schaffung einer Datenbasis (technisch und wirtschaftlich): Umfassendes Datenmaterial zur technologischen Charakterisierung industrieller Energie (Mengen, zeitlicher Verlauf der Verfügbarkeit, Temperatur- bzw. Druckniveaus und –verläufe etc.) und des typischen Bedarfs hinsichtlich Strom, Wärme und Kälte in einer Stadt bzw. urbanen Region wird erhoben und steht in aggregierter Form zur Verfügung. Umfassende Daten zu typischen Technologien der Nutzung von industrieller Energie und der Integration dieser in das städtische Energiesystem stehen in gesammelter Form zur Verfügung. Daten zu typischen Kosten werden so weit möglich in allgemeingültiger Form erhoben. Weiters werden Daten zu weiteren, externen Effekten (z. B. Emissionsminderungen) erhoben.
- Erstellung eines Simulationsmodells um die Integration von industrieller Energie in eine Stadt repräsentativ darzustellen: Die Erarbeitung eines Simulationsmodells soll als Hilfestellung für die Abschätzung des Potenzials dienen. Um eine Übereinstimmung von industrieller Energie von einem Industriebetrieb und dem Bedarf an Energie einer

Stadt oder urbanen Region darstellen zu können, wird ein Simulationsmodell erarbeitet. Mit diesem Modell ist darüber hinaus eine Klassifizierung der Energielieferung und der Verträglichkeit des Energienetzes der Stadt hinsichtlich Instationaritäten möglich. Die Verknüpfung von Kosten mit der gelieferten Menge an industrieller Energie in weiteren, wirtschaftsbezogenen Kennzahlen ermöglicht eine wirtschaftliche Bewertung und die prinzipielle Kalkulation von spezifischen Kosten der gelieferten industriellen Energie. Das Simulationsmodell mit den gesamten Ergebnissen und Lerneffekten soll als Basis für ein Folgeprojekt dienen, in dem Definitionsschritte in Richtung einer Umsetzung erarbeitet werden sollen.

- Analyse der ökonomischen und ökologischen Fragestellungen: In einer weiteren Auswertung werden die grundsätzlichen Kosten bei Verwirklichung der erarbeiteten Maßnahmen ermittelt. Hierbei werden auch die Aspekte unterschiedlicher Betreibermodelle mitberücksichtigt. Abschließend erfolgt noch eine Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Synergienutzung Industriebetrieb – Stadt / urbaner Bereich.

Durch die genannten Zielsetzungen wurden folgende **Ergebnisse** erarbeitet:

- Synergiepotenziale zwischen Stadt und Industrie sind erhoben.
- Daten über industrielle Energie stehen zur Verfügung.
- Daten über Energienetze sind erhoben.
- Kenntnisse über relevante, externe Rahmenbedingungen für die Nutzung von industrieller Energie sind bekannt.
- Daten über relevante Technologien der Nutzung bzw. der Integration von industrieller Energie sind erarbeitet.
- Ein Simulationsmodell, um die bestmögliche Integration von industrieller Energie in die Stadt zu ermitteln, ist erstellt.
- Kosten der vorgeschlagenen Umsetzungsmaßnahmen sind erhoben und die ökologischen Auswirkungen ermittelt.
- Informationsvermittlung zu Stakeholdern, um ein Folgeprojekt zu gewährleisten, ist gemacht.

1.2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Auszug über die Forschungsarbeiten über industrielle Energie dargestellt, die Integrationsmöglichkeiten in das städtische Energiesystem beschrieben und einige Demonstrationsprojekte in diesem Bereich präsentiert.

Wie der nachfolgend beschriebene Stand der Technik zeigt, wurde industrielle Energie zum Teil bereits in zahlreichen Studien untersucht. Der Schwerpunkt lag auf Wärme; andere industrielle Energiequellen wurden nicht erwähnt. Darüber hinaus ist die synergetische Verbindung zwischen Industrie und angrenzenden städtischen Gebieten eine neuartige Betrachtungsweise.

1.2.1 (internationale) Forschungsarbeit

In der Studie von Fang et al., (2013) wurde die industrielle Abwärmenutzung für Niedertemperatur-Fernwärmenetze analysiert. Der Vorteil von niedrigeren Temperaturen in Fernwärmenetzen ist die hohe Nutzungsrate von industrieller Abwärme. Auf der Grundlage eines Demonstrationsprojektes in Nordchina, wurde festgestellt, dass die thermische Effizienz der Industriebetriebe um 11% verbessert werden konnte. [3]

Die Forschungsarbeit von Rattner und Garimella, (2011) analysierte das Potenzial der Nutzung von Abwärmeströmen in den USA. Dabei wurde die Verfügbarkeit von Abwärme in Kraftwerken, in Industriebetrieben, im Gebäudesektor und im Transportsektor betrachtet. Die überwältigende Mehrheit der Abwärme wird von Kraftwerken freigesetzt. Der effektivste Ansatz ist somit die Bereitstellung dieser Niedertemperaturabwärme an Wohnungen, Häuser und Industriebetriebe für Raumheizung und Warmwasserbereitung. Zu einem geringen Teil wird das in den USA bereits umgesetzt, 13% der Raumwärme und 2,5% des Warmwassers werden durch Fernwärme bereitgestellt. Abwärmeströme von industriellen Prozessen sind, mit nur 1% der Gesamtverfügbarkeit von Abwärme, nur in geringer Höhe verfügbar. Endergebnis dieser Studie war, das durch die Nutzung der vorhandenen Abwärme 12% des Primärenergiebedarfs eingespart werden könnte. [4]

Bei der Entwicklung der „heat roadmap Europe“ wurde mit Hilfe von GIS ein Wärmepotenzial für Überschussenergie von 753 [GWh/a] für EU-27 identifiziert. [5] Auf europäischer Ebene wurde eine Studie [6] durchgeführt, die die jährliche Menge an Überschusswärme von Tätigkeiten der Kraftstoffverbrennung im Energie- und Industriesektor auf Basis von Kohlendioxidemissionsdaten erhoben hat. Dabei wurde auf Regionsebene die Übereinstimmung von vorhandener Überschusswärme und lokalem Wärmebedarf betrachtet und sogenannte „strategic heat synergy regions“ identifiziert. Es konnte festgestellt werden, dass 46% der gesamten Überschusswärme der EU27 31% des Heizwärmebedarfs der Gebäude in den identifizierten synergy regions decken könnten.

In Zusammenhang mit neuen Studien über die künftige Fernwärme (FW) Netze, wurde die Rolle von industrieller Abwärme ebenfalls berücksichtigt. Nach Lund et al., (2014) werden Fernwärmenetze eine wichtige Rolle bei künftigen nachhaltigen Energiesystemen spielen. Besonders Fernwärmesysteme der 4. Generation ermöglichen die Verwendung

verschiedener industrieller Überschusswärmequellen und anderer regenerativer Energieträger. [7] Fernwärmesysteme in Verbindung mit Abwärme von Kraftwerken und Industrie wird eine wichtige Rolle auf dem Weg zu einem 100% erneuerbaren Energiesystem zugeschrieben [8]. Abwärme wird für die Grundlastversorgung in Göteborgs (Schweden) Fernwärmenetz verwendet. Holmgren, (2006) untersuchte die Auswirkungen der Reduzierung der Abwärmenutzung im Fernwärmenetz und beobachtete, dass sich die Kosten des Systems und die CO₂-Emissionen erheblich erhöhen würden [9]. Morandin et al., (2014) bestätigen die Ergebnisse, dass der Betrieb von Fernwärmenetzen mit industrieller Abwärme profitabel im gesamten Leistungsbereich ist [10].

Im Zuge von Energieeffizienzmaßnahmen in Industrieunternehmen wird Abwärmenutzung als eine Option gesehen. In den meisten Fällen wurde Wärmerückgewinnung nur für interne Zwecke in Betracht gezogen. Eine Studie untersuchte die Wärmerückgewinnung bei industriellen Verfahren zur Wiederverwendung innerhalb des Unternehmens [11]. Ajah et al., (2007) haben eine technische, wirtschaftliche und ökologische Machbarkeitsstudie für die Aufwertung von Niedertemperaturabwärme für die Fernwärmeversorgung einer Stadt in den Niederlanden durchgeführt [12]. Söğüt et al., (2010) führten eine Exergie-Analyse an einem Zementwerk durch und berichteten von einem Abwärmerückgewinnungspotential, das den Erdgas- und Kohleverbrauch um rund 50% verringern könnte [13]. Außerdem stellt die externe Abwärmenutzung einen effektiveren Weg zur CO₂-Reduktion dar als eine interne Nutzung [14].

Die Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz in der deutschen Zementindustrie wurden mit Hilfe von 21 Energieeffizienzmaßnahmen untersucht. Brunke und Blesl, (2014) führten eine bottom-up-Untersuchung durch, und weisen Kraftstoffeinsparungen von 4% und Stromeinsparung von 0,7% für das Jahr 2013 aus. Dabei wurde die Abwärmerückgewinnung als eine Maßnahme für die interne Anwendung berücksichtigt. [15]

Hasanbeigi et al., (2013) identifizierten und analysierten 23 Energieeffizienzmethoden für die chinesische Eisen und Stahlindustrie. Mit Hilfe eines bottom-up Ansatzes wurden sogenannte „Conservation Supply Curves“ (CSC) für den Strom- und für den Kraftstoffverbrauch der Industrie erstellt. Die Kurve zeigt das Energieeinsparungspotenzial in Abhängigkeit von den Grenzkosten der eingesparten Energie. Für die Erstellung der sogenannten Conservation Supply Curves werden zuerst von jeder Energieeinsparungsmaßnahme die Kosten berechnet. Anschließend werden die Maßnahmen in aufsteigender Folge anhand ihrer Kosten angeordnet und daraus ergibt sich die CSC. In diesen Kurven werden die Einsparungsmöglichkeiten anhand ihres Potenzial und ihrer verursachten Kosten dargestellt. Wichtiger Teil der Betrachtung stellt zwar die Wärmerückgewinnung dar, jedoch wird diese nur für die interne Nutzung in Betracht gezogen. [16]

Ähnliche Analysen gibt es auch für die chinesische Zementindustrie [17]. Die CSC für Strom und Kraftstoff wurde auch auf die indische Zement- und Stahlindustrie angewandt [18]. Die Methode der Conservation Supply Curves wurde ebenso in der amerikanischen Studie von Lung et al. (2005) verwendet, um die Vorteile von Energieeffizienzmaßnahmen zu

veranschaulichen. Dabei wurden 81 Energieeffizienzprojekte evaluiert, bei 54 Projekten konnten durch Energieeinsparungen Sekundärnutzen und Produktionsvorteile erzielt werden. [19]

Napp et al., (2014) untersuchten Technologien, Wirtschafts- und Politikinstrumente zur Dekarbonisierung energieintensiver Fertigungsindustrien. Der Fokus liegt auf der Eisen- und Stahlindustrie, der Zementindustrie und dem Raffineriesektor. Energieeffizienzpotenziale und Maßnahmen für die einzelnen Sektoren wurden identifiziert; z.B. effiziente Produktionsrouten, Abwärmenutzung (nur teilweise auch für externe Anwendungen) und die effizienteren Maschinen. [20]

Nach der Analyse von Walsh und Thornley, (2012) ist die Verwendung von Niedertemperaturabwärme, um die Energieeffizienz von Industrieunternehmen zu erhöhen, mit einer Reihe von Hindernissen verbunden. Stakeholder-Engagement und der Kapitalbedarf für Infrastruktur wurden als die wichtigsten Faktoren identifiziert. [21]

Bayulken und Huisingsh, (2015) systematisierten die Entwicklung von "Öko-Städten" in Nord- und Westeuropa. Es wurde festgestellt, dass nur asiatische Öko-Städte einen industrieorientierten Ansatz wählten [22]. Das Konzept der "Hybridindustrien" präsentierten Fujii et al., (2015) und stellten eine Reduktion der CO₂-Emissionen, durch die Verwendung von Siedlungsabfällen in Industrieunternehmen, fest [23].

Li et al., (2012) untersuchten die Entwicklung von „low carbon“ Städten in China. Anhand einer Kategorisierung der Städte wurden abgestimmte Programme entwickelt, die zu einem niedrigeren CO₂ Ausstoß führen. Rund 18% der untersuchten Städte gehörten zu der Kategorie "Industriestädte". Abfallverwertung stellte den wichtigsten Punkt dar, Energieeinsparung folgte erst auf Platz 5. [24]

Wirtschaftliche Gewinne, Verringerung der Umweltauswirkungen und reduzierte Treibhausgasemissionen können durch industrielle Symbiosen im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft erreicht werden. In der Studie von Dong et al., (2013) wurden industrielle Symbiosen zwischen verschiedenen Industrieunternehmen, und zwischen Industrieunternehmen und ihrer städtischen Umwelt untersucht. In diesem Fall wird der Restmüll der Stadt in industriellen Anwendungen verwendet. Diese Möglichkeit ergibt sich aus der geographischen Nähe [25]. Yu et al., (2014) analysierten die Verringerung von Kohlendioxidemissionen im Zuge von industriellen Symbiosen. Teil der Untersuchung war auch die Nutzung von Abwärme zwischen verschiedenen Industrieunternehmen [26]. Im Zusammenhang mit industriellen Symbiosen wurde auch die CO₂-Emissionsreduktion für chinesische Stahlwerke analysiert. Das Recycling von Hochofengas ist die effektivste Maßnahme um CO₂-Emissionen zu reduzieren; Wärmerückgewinnung ist in der Studie nur von untergeordneter Bedeutung [27].

Die Entwicklungsmöglichkeiten von Taipei hin zu einem internationalem Industriezentrum für grüne Energie wurden in der Studie von Lu et al., (2013) untersucht. Der Fokus liegt auf einer verstärkten Nutzung von Elektroautos und erneuerbare Energien (Abfall, Biomasse, Solarenergie und Photovoltaik, Geothermie). [28]

1.2.2 Integrationsmöglichkeiten von industrieller Energie

In industriellen Prozessen werden sowohl das gewünschte Produkt, als auch Emissionen erzeugt. Emissionen können nicht nur Luftschadstoffe und Treibhausgase, sondern auch Träger von Energie, sein. Als Energieträger fungieren Abwärmeströme (über Luft oder Wasser abgeführt) und Abfallströme. Weiters stehen bei Industriebetrieben große Dachflächen für die solare Nutzung zur Verfügung.

1.2.2.1 Verfügbare Routen

Abwärme

Industrielle Prozesse produzieren häufig große Mengen an Abwärme, die oft nicht in Anspruch genommen werden. Sie werden über Kühleinrichtungen abgeführt oder direkt an die Umgebung abgegeben. Abwärme entsteht als ein Nebenprodukt bei der normalen Produktion. Diese betriebliche Produktion steht immer im Vordergrund und ist gegenüber der Wärmebereitstellung stets prioritär. Die Nutzung von Abwärme ordnet sich daher den normalen Produktionsabläufen unter. Typische Abwärmequellen in Industriebetrieben sind beispielsweise Rauchgas, Abwärmeströme aus der Strukturkühlung von Wärmebehandlungsanlagen und Abwärmeströme von Produkt- und Kühleinheiten, die entweder in kontinuierlichen oder Batch-Prozessen anfallen. Diese unterscheiden sich anhand ihrer Liefercharakteristik und anhand ihres Temperaturniveaus. Das Temperaturniveau der Abwärme reicht von heißen Abgasströmen mit mehreren hundert Grad bis hin zu Niedertemperatur-Abwärme im Bereich von 40 bis 60 [°C]. Zudem sind Abwärmeströme hinsichtlich des Lastverlaufes von den davor geschalteten Industrieprozessen abhängig und können demnach starken kurzzeitigen aber auch langfristigen Schwankungen unterliegen (instationäre Abwärmeerzeugung). Durch die instationäre Verfügbarkeit von industrieller Abwärme stellt es eine Herausforderung dar, diese in das urbane Wärmeverteilnetz zu integrieren. [2]

Abwasser

Mit der Nichtnutzung von warmem Abwasser (Abwärme via Abwasser abgeleitet) geht eine große Menge von Niedertemperaturenergie (30-45 °C) verloren. Besonders wasserintensive Branchen wie die Papier- und Zellstoffindustrie und die Lebensmittelindustrie würden Abwasser in großen Mengen und mit interessanten Temperaturniveaus bereitstellen. [29]

Abwärme im Abwasser kann direkt aus dem Kanal oder aus der Kläranlage genutzt werden. Zur Rückgewinnung von Abwärme aus industriellen Abwässern ist nur die erste der beiden Möglichkeiten von Bedeutung. Die Nutzung der Wärme aus Kläranlagen ist von geringer

Bedeutung, mit Ausnahme von Unternehmen, die über eine eigene Abwasserbehandlungsanlage verfügen. [30]

Die Wirksamkeit von Kläranlagen wird durch die Rückgewinnung von Wärme nicht beeinflusst. Viele Industrieunternehmen müssen ihre Abwässer abkühlen, bevor sie diese einleiten dürfen. Im Zuge dessen werden diese mit frischem Wasser vermischt, damit die hohen Temperaturen des Abwassers die notwendigen Bakterien im Reinigungsverfahren der Kläranlagen nicht negativ beeinflussen. Das abgegebene Wärmepotential bleibt somit ungenutzt und schädigt in vielen Fällen Flüsse thermisch. [29]

Abfall

Abfälle können unterschiedlichen Behandlungen zugeführt werden. Je nach Bedarf müssen Abfälle vorher aufbereitet werden. Im Zuge einer thermischen Abfallbehandlung kann der Energiegehalt der Abfälle genutzt werden. Darüber hinaus werden das Gefährdungspotential und die Masse bzw. das Volumen reduziert. Heizwertreiche Fraktionen aus der mechanischen Abfallbehandlung, Reststoffe aus der Holzbearbeitung und -verarbeitung sowie Altholz, Klärschlämme und sonstige Schlämme, Reststoffe aus der Papier- und Zellstoffproduktion, Kunststoffe und Verpackungsmaterialien, Altreifen und sonstige Gummiabfälle, gefährliche Abfälle und Altöle, Tiermehl und Tierfette und Shredder-Rückstände können einer thermischen Behandlung zugeführt werden. Seit den 1990er Jahren gibt es Branchenkonzepte für die Industrie, um das Abfallaufkommen so gering wie möglich zu halten. Im Falle der energetischen Nutzung von Abfällen, die in Industrie- und Gewerbebetrieben anfallen, werden diese einer thermischen Behandlung zugeführt. Zusätzlich ist eine Deponierung von unbehandelten Abfällen seit 2004 in Österreich nicht mehr erlaubt (Deponieverordnung). Abfälle können in Abfallverbrennungsanlagen verbrannt werden bzw. in (industriellen) Feuerungsanlagen oder kalorischen Kraftwerken (Mitverbrennungsanlagen) nach der Aufbereitung mitverbrannt werden. Es kommen Anlagen mit Rostfeuerung, mit Wirbelschichtfeuerung und Anlagen mit Drehrohröfen zum Einsatz. [31]

Freie Dachflächen

Industrie- und Gewerbebetriebe bieten sich für eine energetische Flächennutzung durch z.B. große Dachflächen optimal an. Für die Betriebe ist es oftmals unwirtschaftlich mittels PV- oder Solarthermieanlagen Strom oder Wärme zu erzeugen, da die Energie momentan günstiger zugekauft werden kann. Für die nahegelegene Stadt bietet sich hier aber dennoch eine Möglichkeit, eines günstigen und sauberen Energiebezugs.

Ein Großteil der industriellen Dachflächen sind Flachdächer, welche durch einen geringen Winkel eine gewisse Flexibilität bei der Aufständigung, Aufstellung und Ausrichtung der Module ermöglicht. Satteldächer haben einen Winkel zwischen 20 bis 50° und die Ausrichtung der Module ist an die Gegebenheiten durch das Satteldach vorbestimmt. Ein

Vorteil für die Nutzung der freien Dachflächen für die Stromerzeugung mittels Photovoltaik besteht in der Nutzung vorhandener Infrastruktur. In der Regel ist der Anschluss an das Mittelspannungsnetz bereits vorhanden, und kann für die PV-Anlage verwendet werden. Dadurch ergibt sich ein geringerer Aufwand für Infrastrukturanbindungen.

1.2.2.2 Technologische Aspekte

Die nachstehend angeführten Faktoren sind essentiell für eine Integration industrieller Energie in das städtische Energienetz:

- zeitliche Verfügbarkeit,
- Temperaturniveau,
- Medium des Energiestromes.

In nachstehender Tabelle 1 sind die industriellen Energieträger mit ihren Integrationsmöglichkeiten in das städtische Energienetz dargestellt. Einzelne Technologien sind nachfolgend näher beschrieben. Freie Dachflächen sind grundsätzlich auch für die solarthermische Nutzung geeignet. Es wird aber zu Gunsten der Stromerzeugung auf diese Möglichkeit verzichtet und deswegen nicht weiter betrachtet. Wegen technischer / wirtschaftlicher Rahmenbedingungen werden Abwärme- und Abwasserströme unter 35°C nicht berücksichtigt. Bei einem Temperaturniveau der Abwärme unter 90°C werden Wärmepumpen verwendet, um das notwendige Vorlauf Temperaturniveau für das Fernwärmenetz zu erreichen.

Tabelle 1: Übersicht über Energieträger, ihre Nutzungsmöglichkeiten und Technologien

Energieträger	Nutzungsmöglichkeiten	Technologien
Abwärme	Wärme, Strom, Kälte	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeübertrager • Wärmepumpe • Kältemaschine • Varianten des Rankine Cycles
Abwasser	Wärme	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeübertrager • Wärmepumpe
Abfall	Wärme, Strom	<ul style="list-style-type: none"> • Heizwerk • Kraft-Wärme-Kopplung • Varianten des Rankine Cycles
Freie Dachflächen	Wärme, Strom	<ul style="list-style-type: none"> • Photovoltaik • Solarthermie

Industrielle Energieträger können zur Wärme-, Strom- und Kälteerzeugung genutzt werden. Die Nutzungsmöglichkeit hängt von der Menge des Anfalls und vom Temperaturniveau ab. Sind beide Bedingungen hinreichend erfüllt, ist sogar eine kaskadische Nutzung möglich.

Wärmeerzeugung

Wie in der oben dargestellten Tabelle ersichtlich, können alle industriellen Energiequellen zur Wärmeerzeugung herangezogen werden. Die in Form von Abwärme oder Abwasser anfallende Wärme wird zur Entkopplung der Medienströme mittels Wärmeübertrager auf einen zweiten Kreislauf übertragen. Bei einem passenden Temperaturniveau (abhängig von der Auslegung, etwa 90°C) kann die Wärme direkt in das Wärmenetz eingespeist werden. Sollte eine Temperaturanhebung nötig sein, muss eine Wärmepumpe zwischengeschaltet werden. Steht Abfall als Energiequelle bereit, kann dieser in Abfallverbrennungsanlagen verbrannt werden oder in industriellen Feuerungsanlagen kalorisch mitverbrannt werden. Die entstehende Wärme kann ebenfalls an ein Wärmenetz ausgekoppelt werden.

Stromerzeugung

Freie Dachflächen können für Photovoltaikanlagen zur Verfügung gestellt werden und zur Stromproduktion verwendet werden. Einstrahlungswerte, Wirkungsgrade und die Wahl des Moduls haben auf den Stromertrag den größten Einfluss.

Bei Vorliegen von Abwärme mit großen Massenströmen und mit hohen Temperaturen kann eine Stromerzeugung eine ökologisch und wirtschaftlich attraktive Lösung darstellen. Hier wird nur die ORC-Technologie näher betrachtet, da diese eine bewährte Technologie für die Nutzung von Abwärme ist. Die ORC-Technologie, welche speziell für Niedertemperaturanwendungen entwickelt wurde, eignet sich besonders für die Nachverstromung von industrieller Abwärme (Temperaturen ab 90°C). Zusätzlich fällt Abwärme bei dem ORC-Prozess an, die je nach Rahmenbedingungen gegebenenfalls noch ins Fernwärmenetz ausgekoppelt werden kann.

Kälteerzeugung

Abwärme kann in den Sommermonaten, sofern geeignete Abnehmer vorhanden sind, für die Kältebereitstellung herangezogen werden.

Wenn mit Hilfe von industrieller Wärme Kälte erzeugt werden soll, dann kommen Absorptionskältemaschinen in Frage. Im Gegensatz zu herkömmlichen, mit einem Kompressor ausgestatteten Kältemaschinen wird der Kühleffekt in den Absorptionskälteanlagen nicht mit der Zuführung von mechanischer Energie, sondern mit Wärmeenergie erreicht. Hierfür kann praktisch jede Wärmequelle, von der direkten Befuerung bis hin zu heißen Wasser, verwendet werden.

1.2.2.3 Beispiele für die Nutzung von industrieller Energie

Ein Auszug der, im Zusammenhang mit industrieller Energie realisierten Projekten, wird anschließend aufgelistet. In folgenden Wärmeverteilnetzen wird industrielle Abwärme als Energiequelle genutzt:

- Abwärmenutzung der Heinzl Pulp Zellstoff Pöls AG für das Aichfeld (30 MW)
- Abwärmenutzung der Firma Sandoz GmbH für die Marktgemeinde Kundl (18 GWh/a)
- Abwärmenutzung der Firma Kaindl für die Stadt Salzburg (25 GWh/a)
- Abwärmenutzung der Firma Henkel Austria für die Stadt Wien (19,4 GWh/a)
- Abwärmenutzung der Firma voestalpine Donawitz für die Stadt Leoben und Trofaiach (32 GWh/a)
- Abwärmenutzung Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH für die Stadt Graz (40 GWh/a)
- Abwärmenutzung der Firma Böhler Edelstahl GmbH & Co KG für die Stadt Kapfenberg (7MW)

Die Gebäude der Stadtwerke in Amstetten werden mit Wärme- und Kälte aus dem Kanal versorgt. Die Energie wird dem Abwasser über Kanalwärmetauscher entzogen, mit einer Wärmepumpe (250 kW) aufgewertet und über ein Niedertemperaturabwärmernetz verteilt. [32]

In Österreich wird Abwasserwärme bereits für die Magistratsabteilung 30 in Wien genutzt. Dabei wurde ein Wärmeübertrager in den Verbindungskanal eingebaut und mit einer Wärmepumpe entweder Wärme entzogen oder zu Kühlzwecken Wärme zugeführt. Dabei werden 925 m² Nutzfläche mit Wärme und Kälte versorgt. Durch eine Kompressionswärmepumpe kann eine 100% Deckung mit Kälte erreicht werden, im Winter wird die Anlage durch Fernwärme unterstützt. 366.000 kWh thermischer Energie werden im Jahr erzeugt. Die Wärmepumpe erreicht eine Leistungszahl von 3,7. [30]

Ein weiteres Beispiel ist die Nutzung von Abwasserwärme in einer Krankenhauswäscherei in Graz. Dabei wird dem heißen Abwasser mittels Wärmeübertrager die Energie entzogen und zum Vorheizen des kalten Frischwassers verwendet. Durch diese Installation konnten 2.400 kWh Erdgas pro Tag eingespart werden. [30]

In Österreich befinden sich 32 ORC Anlagen in Betrieb. Der Großteil davon wird im Zusammenhang mit der Biomassenutzung (30 Anlagen) verwendet. Weitere Anwendungsbeispiele gibt es auch im Geothermiebereich. Nur die Firma RHI AG in Radenthein erzeugt Strom mittels Wärmerückgewinnung aus industriellen Abgasströmen auf Basis des ORC-Prozesses. [33]

1.3 Verwendete Methoden

1.3.1 Identifikation der energieintensiven Industriebranchen

Der jährliche Endenergiebedarf der österreichischen Industriebranchen der letzten 30 Jahren dient als Grundlage für die Identifizierung der energieintensivsten Zweige. Es wird angenommen, dass ein hoher Energiebedarf der Industriebetriebe auch eine hohe Menge an industrieller Energie impliziert. Seit 1994 kann ein kontinuierlicher Anstieg der Energienachfrage in der Produktion festgestellt werden.

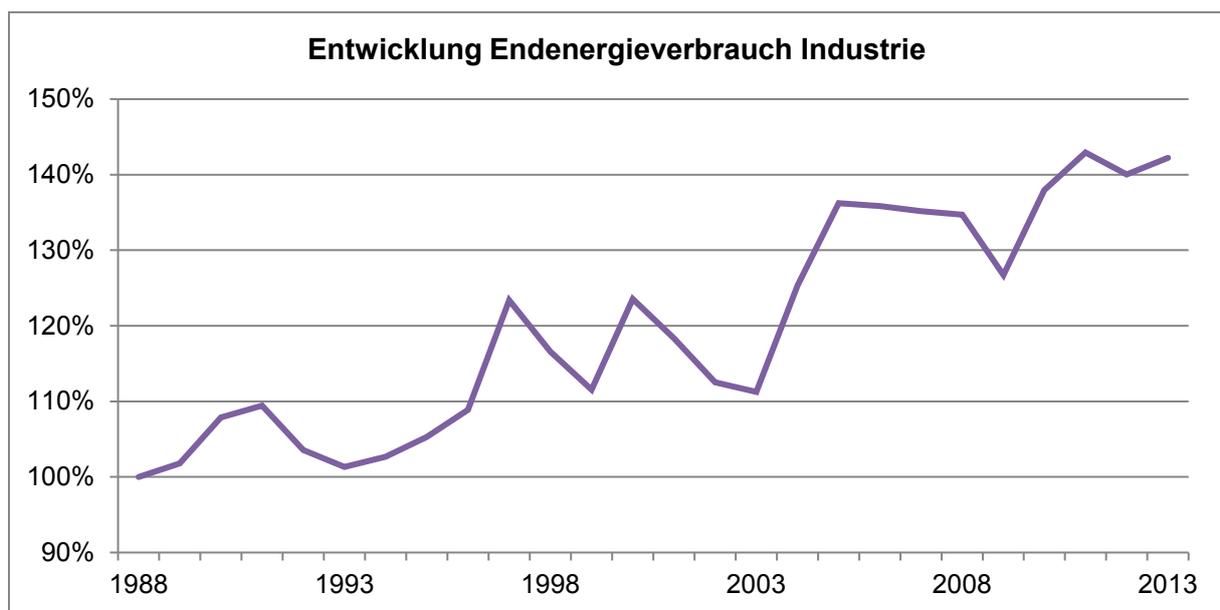


Abbildung 1: Entwicklung des industriellen Endenergieverbrauchs 1988 bis 2013 in Österreich; [34]

Basierend auf dem Jahr 1989 (100%) ist die Entwicklung des Endenergieverbrauchs der steirischen Industrie bis 2013 dargestellt (siehe Abbildung 1). Einbrüche des Energieverbrauchs erfolgten in den Jahren 1999, 2003 und 2009, aufgrund der Auftragslage der Unternehmen. Vor allem auf Branchen wie die Papier- und Zellstoffindustrie, Eisen- und Stahlindustrie, chemische Industrie, Holzstoffindustrie und die Lebensmittelindustrie entfallen die größten Teile des Energiebedarfs, der in Abbildung 2 dargestellt ist.

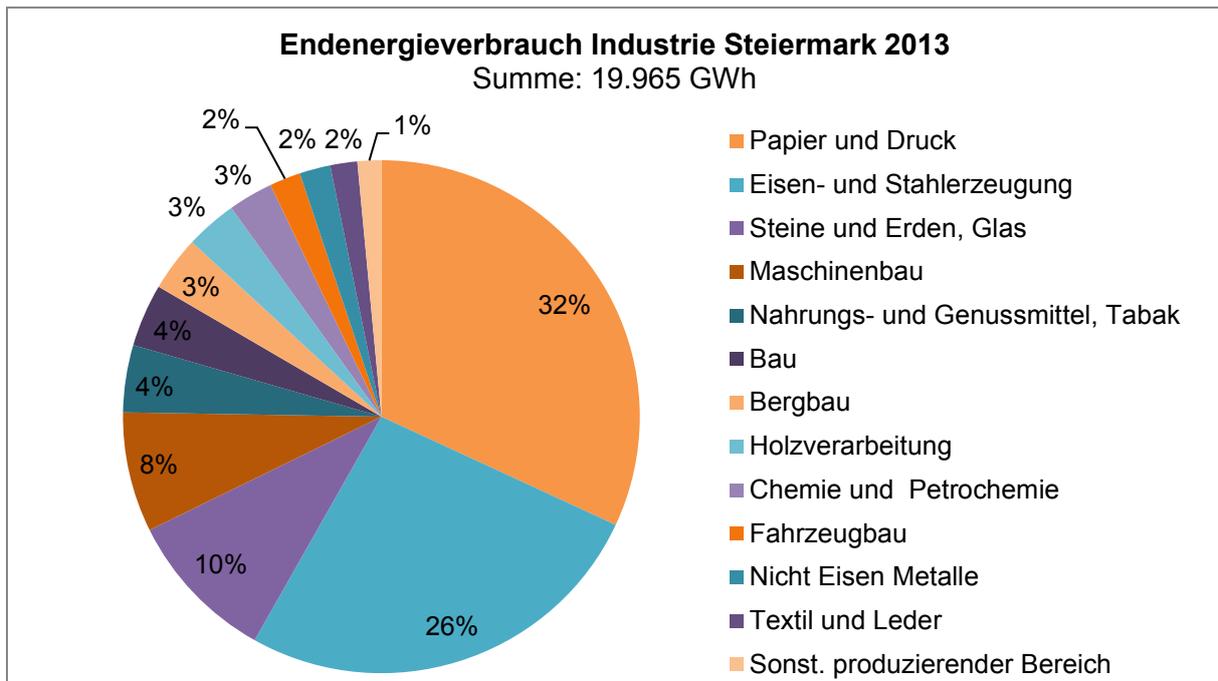


Abbildung 2: Endenergieverbrauch der Industriebranchen in der Steiermark, 2013; [34]

1.3.2 Datenerfassung und Aufbereitung – Modell

Die Modellgrenzen sind gleichzeitig die Stadtgrenzen vom Jahr 2014, etwaige Gemeindegemeinschaften sind bei den Ergebnissen noch nicht berücksichtigt, aber in den Schlussfolgerungen mitbedacht. Die derzeitige Abwärmenutzung der Zellstofffabrik Pöls soll durch die zusätzliche Nutzung industrieller Energie nicht substituiert werden, da die Abwärme der Zellstofffabrik auch zur industriellen Energie, aber außerhalb der Systemgrenzen, gehört. Dementsprechend wird der Gesamtjahreswärmebedarf der Städte um den Anteil der Abwärme aus der Zellstofffabrik verringert. Alle Berechnungen werden auf Endenergiebasis durchgeführt.

Bei der Vorbereitung wurden die Versorgungsseite (Industrie) und die Bedarfsseite (Stadt) getrennt untersucht, weiters wurden die Überlegungen auch in Wärme für Raumwärme und Warmwasserbereitung sowie Strom unterteilt. Im Allgemeinen werden die Daten von Branchen und Städten auf Jahressummenbasis zur Verfügung gestellt und mit Lastprofilen und statistischen Daten kombiniert. Die Daten für Wärme werden auf Stundenbasis aufbereitet und die Daten für Strom auf Viertelstundenbasis.

Das Sammeln von industriebezogenen Daten basiert auf einem Bottom-up-Ansatz. Die Mehrzahl der Daten beruhen auf direkt gemessenen Werten aus der Industrie (zum Beispiel Messungen der Temperatur der Abgase von Öfen), die entsprechend zu Lastprofilen kombiniert werden. Daten, die nur als absolute Jahreswerte vorliegen, werden branchentypische Lastprofile zu Grunde gelegt. Zusätzlich werden Vergleiche mit statistischen Daten durchgeführt.

Lastprofile für die Wärmeangebotsseite werden durch das Verhalten der industriellen Prozesse bestimmt. Die Prozesse können entweder einen instationären (z.B. bei Abwärme aus Rauchgas) oder kontinuierlichen Charakter (z.B. bei Strukturkühlung der Produktionsanlagen oder bei Abwasserströmen aus Bandkühlung) haben. [2] Für nicht stationäre Prozessen wird ein Profil verwendet, das auf den Temperaturmessungen von Abgasen beruht. Kontinuierliche Prozesse werden als konstant angenommen (Bandlast). Dabei werden die absoluten Jahreswerte durch die Produktionsstunden des Unternehmens geteilt, um das Profil zu bilden. Anhand der Prozessabläufe und der Informationen von den Unternehmen konnte der Energiequelle Abwasser auch ein Bandlastprofil zu Grunde gelegt werden. Wegen der einfachen „Speicherbarkeit“ von Abfall wird auch dem Abfall ein kontinuierliches Profil hinterlegt. Basierend auf der Art des Prozesses und des Mediums des Energieträgers wird das gewünschte Profil ausgewählt und die gesamte Wärmeangebotskurve ermittelt. Durch Kombination und Aufsummierung dieser einzelnen Kurven wird die Wärmeangebotskurve für die gesamte Industrie erstellt.

Stromversorgungskurven basieren auf den Standard-Profilen für Sonneneinstrahlung aus PV-GIS für die jeweilige Region. Die verfügbaren industriellen Dachflächen wurden über GIS erhoben. Effekte der Ausrichtung und der Verschattung werden mittels Korrekturfaktoren berücksichtigt.

Strombedarfskurven basieren auf den veröffentlichten Standardlastprofilen H0 und „Gewerbe starker Verbrauch“ und werden anhand des Gesamtstrombedarfs den Anteilen entsprechend kombiniert. Wärmebedarfskurven basieren ebenfalls auf typischen Lastprofilen und den absoluten Werten für den jährlichen Wärmebedarf einer Stadt.

1.3.3 Modellentwicklung

Die technische Machbarkeit der Integration von industrieller Energie in städtische Energienetze wurde mit Hilfe eines Simulationsmodells bewertet. Das Modell basiert auf Gleichungssystemen. Die hierbei integrierten Komponenten werden mit einem Black-Box-Ansatz beschrieben.

Folgende Komponentenmodelle werden für das Modell verwendet: „Industrie“, „Stadt“, „Wärmepumpe“, „PV“, „Abfalllager“, „MVA“, „+/- Wärme“ und „+/- Strom“. Der Zusammenhang der Komponenten und die relevanten Eingabedaten sind in Abbildung 3 dargestellt. Rote Elemente symbolisieren wärmezugehörige Bereiche, blaue Elemente werden dem Strombereich zugeordnet und grüne Elemente stellen die benötigten zusätzlichen Inputdaten dar.

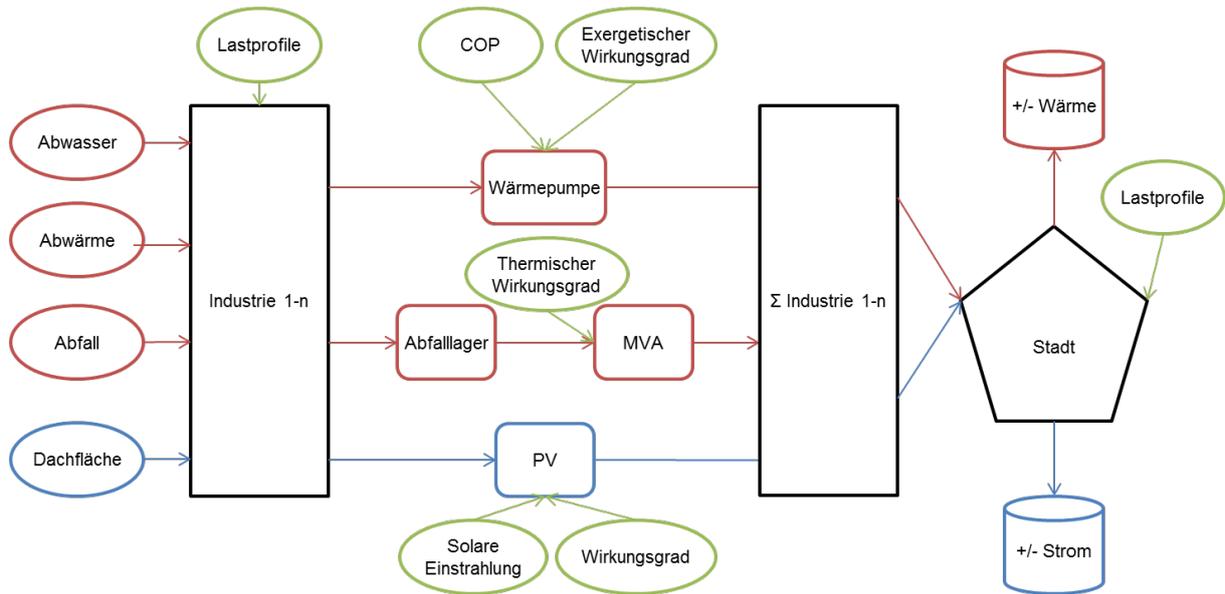


Abbildung 3: Basisstruktur des Simulationsmodells

Das Komponentenmodell "Industrie 1-n" steht für Industrieunternehmen in der Stadt, die Anzahl der Komponentenmodelle variiert von 1 bis n. Dabei dient die Komponente als eine einfache Eingabeschnittstelle für alle industriebezogenen Daten. Die Daten werden hier gesammelt und in dieser Stufe werden bereits Summenlastprofile für Abwasser, Abwärme und Abfall generiert.

Eingangsdaten für das Komponentenmodell „PV“ sind die zur Verfügung stehenden Dachflächen (A) des Industrieunternehmens, die Solarstrahlung (I), die Moduleffizienz (η) und der Faktor (f), der die Verschattung und die Ausrichtung des Daches beschreibt. Dieser Faktor wird an die örtlichen Gegebenheiten der Industriestandorte angepasst. Als Ausgabewert wird die elektrische Leistung (W_{PV}) errechnet, die für die Stromversorgung der Stadt zur Verfügung steht. Die Variablen werden auf Basis folgender Formel 1: in Bezug gesetzt:

$$W_{PV} \text{ [kW]} = \Sigma A \text{ [m}^2\text{]} * I \text{ [kW/m}^2\text{]} * \eta \text{ [-]} * f \text{ [-]}$$

Formel 1: Berechnung der elektrischen Leistung – Modell PV

Die Komponente "Wärmepumpe" wird für all jene Abwasserströme und Abwärmeströme verwendet, die das erforderliche Mindesttemperaturniveau für die Direktnutzung von 90 °C nicht erreichen. Dieser Prozess wird durch einen Satz von Gleichungen modelliert, um die Energiebilanz des Komponentenmodells zu bestimmen.

Die Gleichungen beschreiben einen idealen Wärmepumpenprozess auf der Basis des Carnot-Prozesses. Deswegen wird eine Variable hinzugefügt, die die Irreversibilitäten (ξ) der Wärmepumpe berücksichtigt. Formel 2 setzt das Temperaturniveau des Ausgangstroms

(T_{out}) und das Temperaturniveau des Eingangstroms (T_{in}) in Beziehung zueinander. Der COP kann für jede Wärmepumpe individuell berechnet werden. Dies ist notwendig, da nicht jeder Industriebetrieb das gleiche Temperaturniveau von Abwasser oder Abwärme liefert. Die gewonnene thermische Leistung (W_{HPout}) kann mit Formel 3 berechnet werden. Schließlich wird die elektrische Eingangsleistung (W_{HP}) für die Wärmepumpe mit der gewonnenen thermischen Leistung und Wärmeeingangsleistung (W_{HPin}) in Bezug gesetzt (siehe Formel 4).

$$COP [-] = T_{out} [K] / (T_{out} - T_{in}) * \xi [-]$$

Formel 2: Berechnung des COPs – Modell Wärmepumpe

$$W_{HPout} [kW] = W_{HPin} [kW] / (COP [-] - 1)$$

Formel 3: Berechnung der thermischen Leistung – Modell Wärmepumpe

$$W_{HP} [kW] = W_{HPout} [kW] - W_{HPin} [kW]$$

Formel 4: Berechnung der zusätzlichen elektrischen Leistung – Modell Wärmepumpe

Die Komponente "Abfalllager", fügt alle Abfallströme virtuell zusammen und errechnet einen durchschnittlichen Heizwert für die gesammelte Menge an Abfall. Diese Werte dienen als Eingabeparameter für die "MVA" Komponente, wo der Abfall mit einem bestimmten thermischen Wirkungsgrad verbrannt wird.

Schließlich werden in der Komponente "Σ Industrie 1-n" alle wärmebezogenen Lastprofile der einzelnen Unternehmen zu einer Wärmeangebotskurve und alle strombezogenen Lastkurven zu einer Stromangebotskurve kombiniert. Die Wärme wird über ein Fernwärmenetz zu der Stadt transportiert. Die Wärmeangebotskurve und die Stromangebotskurve werden der Wärme- und Strombedarfskurve der Stadt in der Komponente „Stadt“ gegenübergestellt. Die Komponente „Stadt“ zeichnet sich selbst durch einen Strom- und Wärmebedarf aus, die mit den dazugehörigen Lastprofilen kombiniert werden.

Die Komponenten „+/- Wärme“ und „+/- Strom“ zeigen den Überschuss der industriellen Energie oder die zusätzlich benötigte Energie, um den Energiebedarf der Stadt zu decken, an. Wenn die Komponente einen positiven Wert anzeigt, steht ein Überangebot seitens der Industrie zur Verfügung und die Notwendigkeit eines Speichers ist gegeben. Wenn die Komponente einen negativen Wert anzeigt, dann ist die Stadt unterversorgt und zusätzliche Energie vorzugsweise erneuerbare Energie, wird von extern benötigt.

Die Struktur des Modells ermöglicht ein hohes Maß an Flexibilität. Das Modell kann auf verschiedene Industrieprofile und verschiedene Größen von Städten angepasst werden. Das Modell kann leicht durch Hinzufügen von mehr „Industrie 1-n“ Komponenten, die später in der Komponente "Σ Industrie 1-n" gesammelt und summiert werden, erweitert werden. Es ist daher nicht notwendig ein neues Modell zu entwickeln. Mit nur geringen Anpassungen ist zumindest eine erste Abschätzung von Synergien zwischen Industrie und Stadt möglich. Für Demonstrationsprojekte ist eine detaillierte Untersuchung für jede Stadt notwendig.

1.3.4 Datenerfassung und Aufbereitung – Ökonomie

Technische Daten der Simulation der Synergiepotenziale zwischen Industrie und Stadt werden für die ökonomische Analyse aufbereitet. Folgende Daten werden von der technischen Simulation als Eingangsdaten für die Wirtschaftsanalyse verwendet: Leistung der Wärmetauscher, Leistung und Betriebszeit der Wärmepumpen, Fläche der benötigten PV-Module, die Menge an zur Verfügung stehender industrieller Wärme (H_S) und industriellem Strom (E_S), die Länge des erforderlichen Fernwärmenetzes und die Betriebszeit der Fernwärmepumpen. Zusätzlich wird die Lebensdauer für jede Komponente recherchiert.

In einem zweiten Schritt werden die spezifischen Kosten ermittelt, um die Investitionskosten für die einzelnen Komponenten zu berechnen. Daher werden spezifische Kosten für Wärmetauscher, für Wärmepumpen, für PV-Module und für Fernwärmenetze recherchiert.

Darüber hinaus wird der momentane Strompreis (inkl. Netzentgelte und Zuschläge) verwendet, um die jährlichen Kosten für den Betrieb der Fernwärmepumpen und der Wärmepumpen zu berechnen. Für die Berechnung der jährlichen Einnahmen werden der momentane Marktpreis für Strom und ein aktueller Wärmeverkaufspreis verwendet.

1.3.5 Ökonomische Analyse nach VDI 2067

Die wirtschaftliche Analyse der Umsetzung und die Nutzung von industrieller Energie erfolgt gemäß VDI-Richtlinie 2067, die auf der Basis der Annuitätenmethode durchgeführt wird. Der erste Schritt beinhaltet die Berechnung der Annuität und im zweiten Schritt werden die jährlichen variablen Kosten ermittelt. Schließlich werden die jährlichen Einnahmen abgeschätzt. Die Berechnung wird für einen Zeitraum von 30 Jahren durchgeführt. Hier werden die Kosten und Erlöse mit einer jährlichen Inflationsrate von 3% bewertet. Schließlich werden die Kosten den Einnahmen gegenüber gestellt. Als Ergebnis erhält man die Amortisationszeit und den Gewinn für die folgenden 30 Jahre. Als Beispiel wird das Ergebnis für die Stadt Judenburg in Abbildung 4 dargestellt. Der letzte Schritt, beinhaltet die Berechnung der Gestehungskosten für Strom bzw. Wärme und die Gewinne pro Einheit an verkaufter Energie. Das beschriebene Verfahren wird im Speziellen nur für Wärme gezeigt, aber es ist in gleicher Weise auch für Strom anwendbar. Die verwendeten Daten sind im Anhang 6.1 dargestellt.

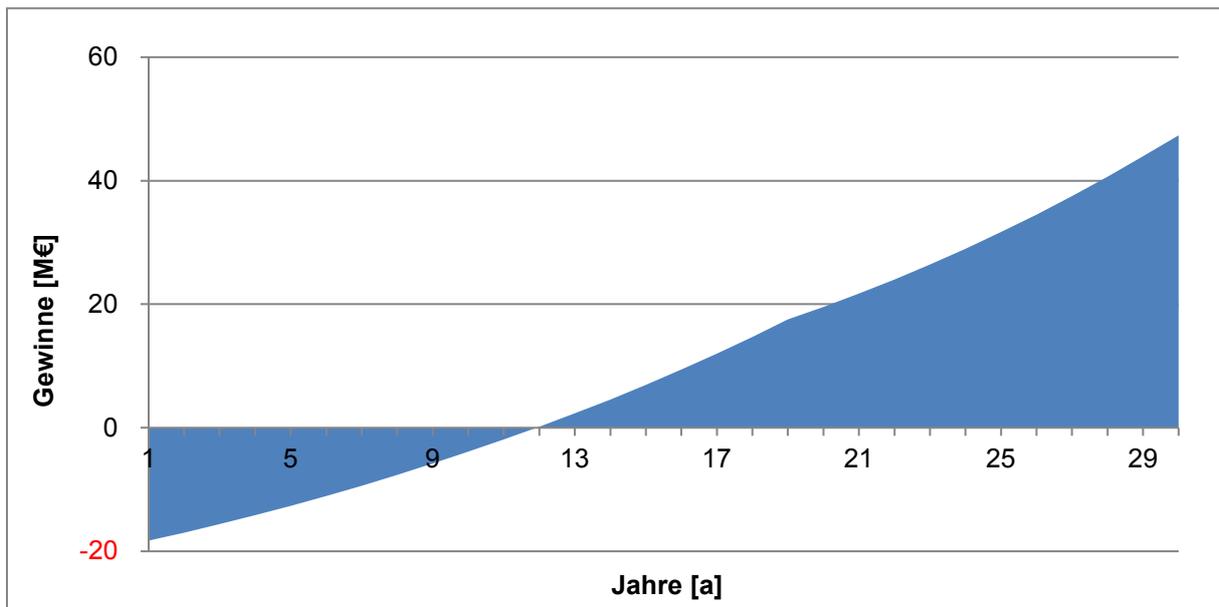


Abbildung 4: Profit und Amortisationszeit der Nutzung industriellem Strom der Stadt Judenburg

Schritt 1:

Die Informationen aus der Datenerfassung und -aufbereitung werden kombiniert, um die Investitionskosten für jede einzelne Komponente zu berechnen. Die technischen Spezifikationen der Komponente (T_C) werden mit den spezifischen Kosten der Komponente (C_C) anhand der Formel 5 multipliziert, um die Investitionskosten der Komponente (I_C) zu erhalten.

$$T_C \text{ [kW]} * C_C \text{ [€/kW]} = I_C \text{ [€]}$$

Formel 5: Berechnung der spezifischen Investitionskosten

Durch Addition der einzelnen Investitionskosten aller Komponenten können die Gesamtinvestitionskosten berechnet werden. Der Anschluss an das Fernwärmenetz ist mit Kosten verbunden, die teilweise von den Hausbesitzern getragen werden (Anschlussgebühr). Dieser Betrag wird als Einmalbetrag im ersten Jahr berücksichtigt und von den Investitionskosten abgezogen. Eventualkosten werden als Prozentsatz der Investitionskosten den Gesamtkosten hinzugefügt.

Die Annuität (A) wird für jede Komponente einzeln berechnet und dann zur Gesamtannuität aufsummiert. Dafür werden die Investitionskosten, die Lebensdauer (n_C) und der Zinssatz (p) gemäß der Formel 6 in Bezug gesetzt, um die Annuität der einzelnen Komponenten (A_C) zu erhalten.

$$A_C = I_C * [(1+p)^{n_c} * p] / [(1+p)^{n_c} - 1]$$

Formel 6: Berechnung der Annuität

Schritt 2:

Der Betrieb der Fernwärmepumpe und der Wärmepumpe verursacht Kosten, die den jährlichen variablen Kosten (V_C) hinzugefügt werden, siehe Formel 7. Auf Grundlage des Stromverbrauchs und des Strompreises (C_{EP}), werden diese Kosten berechnet. Der Stromverbrauch der Wärmepumpen wird anhand ihrer Leistung (P_{HP}) und ihrer Betriebszeit (t_{HP}) ermittelt. Der Stromverbrauch der Fernwärmepumpen basiert auf einer Kennzahl (E_{DH}), die den Verbrauch der Pumpe pro transportierter Wärmemengeneinheit angibt. Ausgaben für Versicherung und Wartung (C_{IM}) werden zu den jährlichen Kosten addiert und werden als ein Prozentsatz der Gesamtinvestitionskosten angenommen.

$$V_C [\text{€}] = C_{EP} [\text{€/kWh}] * (P_{HP} [\text{kW}] * t_{HP} [\text{h}] + E_{DH} [\text{kWh}_{el}/\text{kWh}_{th}] * H_S [\text{kWh}]) + C_{IM} [\text{€}]$$

Formel 7: Berechnung der jährlichen variablen Kosten

Schritt 3:

Der Jahresumsatz (R_A) wird anhand der Menge der verkauften Wärme und dem aktuellen Verkaufspreis für Wärme (C_{HS}) anhand von Formel 8 ermittelt.

$$R_A [\text{€}] = C_{HS} [\text{€/kWh}] * H_S [\text{kWh}]$$

Formel 8: Berechnung des Jahresumsatzes

Schritt 4:

Der letzte Schritt behandelt die Berechnung der Wärmegestehungskosten (LCOH). Um unterschiedlichen Erzeugungssysteme miteinander zu vergleichen, werden die Kosten pro Einheit erzeugter Energie berechnet, die sogenannten Gestehungskosten. Die Berechnung basiert auf der allgemeinen Formel 9.

$$LCOH [\text{€/MWh}] = \{A + V_C\} / H_S$$

Formel 9: Berechnung der Wärmegestehungskosten

Die jährlichen Gewinne pro verkaufter Wärmeeinheit (G_A) werden basierend auf dem Jahresumsatz und den Gestehungskosten berechnet, und gemäß der Formel 10 in Beziehung gesetzt. Abhängig vom gewählten Geschäftsmodell spiegeln die Gewinne entweder den Gewinn für das Industrieunternehmen oder den Gewinn für das Energieversorgungsunternehmen wider. Im letzteren Fall muss die vereinbarte Vergütung für das Industrieunternehmen abgezogen werden.

$$G_A \text{ [€/MWh]} = C_{HS} \text{ [€/MWh]} - LCOH \text{ [€/MWh]}$$

Formel 10: Berechnung der spezifischen Gewinne

1.3.6 Simulation verschiedener Fördersysteme in Form von Szenarien

Die Einflüsse der verschiedenen Zuschüsse werden in verschiedenen Szenarien betrachtet. Die Förderung erfolgt entweder in Form von Investitionsförderung oder mittels Einspeisevergütung. Für wärmebezogene Investitionen sind Investitionsförderungen abhängig vom betrachteten Gegenstand von ca. 15% (z.B. Fernwärme) bis 35% (z.B. Abwärmenutzung) möglich [35]. Aus diesem Grund wird eine durchschnittliche Investitionsförderung von 20% angenommen. Für PV-Kraftwerke können Einspeisetarife für Ökostrom in der Höhe von 13,5 ct/kWh [36] realisiert werden.

- Szenario 1 (S1): kein Einspeisetarif, keine Investitionsförderung
- Szenario 2 (S2): Einspeisetarif, keine Investitionsförderung
- Szenario 3 (S3): kein Einspeisetarif, Investitionsförderung

1.3.7 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse betrachtet mögliche Auswirkungen auf die Energiegestehungskosten. Die Kosten für die Wärmerückgewinnungskomponenten (Wärmetauscher und Wärmepumpen), die Kosten für das Fernwärmenetz, die Kosten für die PV-Module, der Stromeinkaufspreis und der Zinssatz werden um $\pm 20\%$ verändert und die Auswirkungen auf die Gestehungskosten betrachtet. Die Veränderung der Energiegestehungskosten, der Gewinne und der Amortisationszeit werden für jedes Szenario dokumentiert. Die ermittelten Werte werden entweder als Mittelwerte angegeben oder mit einer Spannweite, die sich auf Grund der Sensitivitätsanalyse ergibt.

In Bezug auf die Gestehungskosten für industriellen Strom, deckt die Sensitivitätsanalyse vor allem zukünftige Entwicklungen wie z.B. Kostenreduktion für die PV-Module; in Bezug auf die Gestehungskosten für industrielle Wärme, berücksichtigt die Sensitivitätsanalyse vor allem Unsicherheiten in den örtlichen Gegebenheiten, wie z.B. unterschiedliche Lastprofile und Volllaststunden sowie den Anteil direkter Wärme und Wärme aus Wärmepumpen.

1.3.8 Ökologische Analyse

Die ökologische Analyse besteht aus zwei Teilen: einerseits wird eine vergleichende Bilanzierung der direkten CO₂-Emissionen durchgeführt, um die lokalen Umwelteffekte quantitativ zu bewerten und andererseits werden die lokalen Umwelteffekte einer qualitativen Bewertung unterzogen.

Quantitative Bewertung der Nutzung industrieller Energie

Grundlage ökologischen Analyse sind der aktuelle Strom (E_D)- und Wärmebedarf (H_D) der Stadt, die zur Verfügung stehende Menge an industriellem Strom (E_S) und industrieller Wärme (H_S) sowie der Verbrauch an zusätzlicher Energie zum Betrieb von Wärmepumpen und Fernwärmepumpen (A_D). Kombiniert mit den direkten CO₂ Emissionen für die Wärmeerzeugung (H_{CO2}) bzw. die Stromerzeugung (E_{CO2}) in Österreich können die jährlichen direkten CO₂ Emissionen (CO_{2ist}) errechnet werden. Im Gegensatz dazu verursacht die Nutzung industrieller Energie keine direkten CO₂ Emissionen. So kann der Anteil, der durch industrielle Energie erzeugten Wärme vom Gesamtwärmebedarf abgezogen und wiederum die jährlichen CO₂ Emissionen (CO_{2neu}) errechnet werden. Die Differenz spiegelt die Einsparung (CO_{2save}) an direkten CO₂ Emissionen im Jahr wider. So kann der direkte lokale Effekt auf Umwelt und Gesellschaft quantifiziert werden. Die dafür verwendeten Formeln 11-13 sind nachfolgend dargestellt. Die verwendeten CO₂ Emissionsfaktoren sind in Anhang 6.2 aufgelistet.

$$\text{CO}_{2\text{ist}} [\text{t/a}] = H_D [\text{MWh}] * H_{\text{CO}_2} [\text{t/MWh}]$$

Formel 11: Berechnung der aktuellen CO₂ Emissionen

$$\text{CO}_{2\text{neu}} [\text{t/a}] = H_S [\text{t/MWh}] * 0 [\text{t/MWh}] + A_D [\text{MWh}] * E_{\text{CO}_2} [\text{t/MWh}] + (H_D - H_S) * H_{\text{CO}_2}$$

Formel 12: Berechnung der verringerten CO₂ Emissionen durch industrielle Energie

$$\text{CO}_{2\text{save}} [\text{t/a}] = \text{CO}_{2\text{ist}} - \text{CO}_{2\text{neu}}$$

Formel 13: Berechnung der eingesparten CO₂ Emissionen

Qualitative Bewertung der Nutzung industrieller Energie

Neben der quantitativen Bewertung der Umwelteffekte, durch die CO₂-Bilanzierung gibt es auch Auswirkungen auf die Umwelt die nicht quantitativ bewertet werden konnten. Die Nutzung industrieller Energie stellt keine Beeinträchtigung der Umwelt dar, die Auswirkungen auf die Umwelt entstehen durch die Industriebetriebe und deren Prozesse. Die möglichen

Umwelteffekte werden recherchiert und die maßgeblichsten werden näher beschreiben. Die Bewertung erfolgt beispielhaft für einen Industriebetrieb aus der Region.

Dabei wird jeweils zwischen fünf Phasen „Bau“, „Betrieb“, „Stilllegung“, „Entsorgung“ und „Störfall“ unterschieden, in denen die Effekte auftreten können. Die Gewichtung über die Ernsthaftigkeit der Auswirkungen erfolgt mit „1“ für „sehr geringe Auswirkungen“ bis „3“ für „sehr starke Auswirkungen“ auf die Umwelt.

2 Ergebnisse

Die erarbeiteten Ergebnisse werden in Unterkapiteln dargestellt. Zuerst werden die Synergiepotenziale und die technische Einbindung industrieller Energie in das städtische Energiesystem dargestellt, gefolgt von den Ergebnissen der ökonomischen und ökologischen Analyse. Die Synergiepotenziale werden einerseits für Strom und Wärme getrennt dargestellt, andererseits wird aber auch ein Gesamtenergiepotenzial für Stadt und Industrie ausgewiesen, da dieser Wert im Zuge der Energieeffizienzrichtlinie bzw. bei politischen Entscheidungen herangezogen werden kann.

2.1 Synergiepotenziale

Das *theoretische Potenzial* beschreibt die theoretisch, physikalisch in einer Stadt in einem bestimmten Zeitraum nutzbaren Synergiepotenziale zwischen Industrie und Stadt. Es markiert damit die Obergrenze des realisierbaren Synergiepotenzials. Aufgrund technischer und wirtschaftlicher Restriktionen kann dieses Potenzial nur zu einem Teil erschlossen werden. Dieser Potenzialbegriff hat keine praktische Relevanz, da Wirkungsgrade, Verluste etc. nicht mit einbezogen werden. Das theoretische Potenzial für das steirische Murtal ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Theoretische Synergiepotenziale für das steirische Murtal

	Fohnsdorf	Judenburg	Knittelfeld	Zeltweg
Energiebedarf der Industrie in % vom Gesamtenergiebedarf	12	67	53	71
Abwärme [MWh]	0	12.729	3.478	49.056
Abwasser [MWh]	0	31.425	0	0
Abfall [MWh]	5.987	897	4.731	819
PV-Strom [MWh]	20.977	94.565	62.850	121.012
Versorgungsgrad Wärme in %	2	22	3	32
Versorgungsgrad Strom in %	41	200	106	305
Gesamtversorgungsgrad in %	8	55	21	87

Das *technische Potenzial* beschreibt den Teil des theoretischen Potenzials, der unter gegebenen technischen Rahmenbedingungen nutzbar ist. Hier werden die Wirkungsgrade des Heizkessels für die Verbrennung von Abfall (80%), Leitungsverluste im Fernwärmenetz (10%) und Wirkungsgrade der PV-Module (15%) berücksichtigt.

Tabelle 3: Technisches Synergiepotenziale für das steirische Murtal

	Fohnsdorf	Judenburg	Knittelfeld	Zeltweg
Abwärme [MWh]	0	11.456	3.130	44.150
Abwasser [MWh]	0	28.283	0	0
Abfall [MWh]	4.310	646	3	590
PV-Strom [MWh]	3.147	14.185	9	18.152
Versorgungsgrad Wärme in %	2	20	2	29
Versorgungsgrad Strom in %	6	30	16	46
Gesamtversorgungsgrad in %	2	22	5	32

Das *wirtschaftliche Potenzial* beschränkt das technische Potenzial auf den Anteil, der unter Einbeziehung definierter ökonomischer Randbedingungen darstellbar ist. Die thermische Verwertung von industriellem Abfall ist nicht möglich, da die wirtschaftliche Untergrenze für die Errichtung einer Müllverbrennungsanlage von 2 MW nicht erreicht wird. Der Anteil an Abwärme in Knittelfeld ist zu niedrig, um wirtschaftlich genutzt zu werden und wird deswegen vernachlässigt.

Tabelle 4: wirtschaftliches Synergiepotenziale für das steirische Murtal

	Fohnsdorf	Judenburg	Knittelfeld	Zeltweg
Abwärme [MWh]	0	12.729	0	49.056
Abwasser [MWh]	0	31.425	0	0
Abfall [MWh]	0	0	0	0
PV-Strom [MWh]	3.147	14.185	9	18.152
Versorgungsgrad Wärme in %	0	19	0	28
Versorgungsgrad Strom in %	6	30	16	46
Gesamtversorgungsgrad in %	1	21	3	32

2.2 Technische Einbindung

Die Einbindung industrieller Energie wird auf Basis des technischen Potenzials gezeigt und für Strom und Wärme getrennt dargestellt.

Die Stadt Fohnsdorf ist durch einen geringen Anteil des industriellen Energiebedarfs am Gesamtbedarf der Stadt (12%) gekennzeichnet. Industrielle Energie liegt nur als Abfall und als Strom aus PV vor. Dies führt zu einer geringen Abdeckung des Energiebedarfs mit industrieller Energie (3%). Eine bedeutende Abdeckung des Strombedarfs kann nur in den Sommermonaten durch die hohe Verfügbarkeit der Sonneneinstrahlung und eines geringen Strombedarfs der Stadt im Vergleich zum restlichen Jahr erreicht werden.

Mehr als zwei Drittel des Energiebedarfs der Stadt Judenburg wird von der Industrie (67%) verursacht. Abwärme, Abfall, Abwasser und Strom aus PV dienen als potenzielle industrielle Energiequellen zur Versorgung der Stadt. Dementsprechend ist eine Abdeckung von bis zu 24% des gesamten Energiebedarfs der Stadt möglich. Überversorgung mit Industrierwärme entsteht in den Sommermonaten, weil der Wärmebedarf der Stadt im Vergleich zum Rest des Jahres niedrig ist. Die hohe Deckungsrate der Stromnachfrage führt zu einem Überschuss an industriellem Strom für rund 500 Stunden pro Jahr, vor allem während der Sommermonate.

Obwohl die Stadt Knittelfeld einen relativ hohen Anteil des industriellen Energiebedarfs (53%) aufweist, ist der Synergieeffekt mit der Stadt eher gering. Dies ist auf die bestehenden Industriezweige der Stadt zurückzuführen. Der Großteil der industriellen Energie steht als Abfall und Strom aus PV zur Verfügung. Ähnlich wie in Fohnsdorf kann eine bedeutende Abdeckung des Strombedarfs von Frühling bis Herbst erreicht werden.

Nachfolgend werden nur die Ergebnisse der Stadt Zeltweg ausführlich dargestellt, weil diese am repräsentativsten für Städte gleicher Größe und Struktur sind. In Österreich gibt es mindestens 70 Städten mit ähnlichen Eigenschaften, in Europa etwa 2.300 bis 4.000. Darüber hinaus können die höchsten Synergieeffekte erreicht werden.

Zeltweg zeigt einen hohen Beitrag des industriellen Energiebedarfs am Gesamtenergiebedarf der Stadt mit 71%. Abwärme, Abwasser, Abfall und Strom aus PV dienen als industrielle Energieströme, die für die Deckung des Energiebedarfs der Stadt ausgenutzt werden können.

2.2.1 Wärme

Abbildung 5 stellt die Wärmenachfrage und -angebotskurve für die Stadt Zeltweg für ein Jahr dar. Der Lastgang der Wärmenachfrage stellt einen typischen Verlauf des Wärmebedarfs einer Stadt dar. Die Wärmeangebotskurve ist von zwei Produktionsunterbrechungen aufgrund von Wartungsarbeiten während der Sommer- und Winterzeit gekennzeichnet. Außerdem ist industrielle Wärme an die Produktionszeiten der Firmen gebunden. Daher steht keine industrielle Wärme an Sonntagen zur Verfügung. Abwasser würde auch in Zeltweg zur Verfügung stehen, aber das notwendige Temperaturniveau von mindestens 35°C oder höher wird nicht erreicht. Deshalb ist die Nutzung technisch und wirtschaftlich nicht machbar.

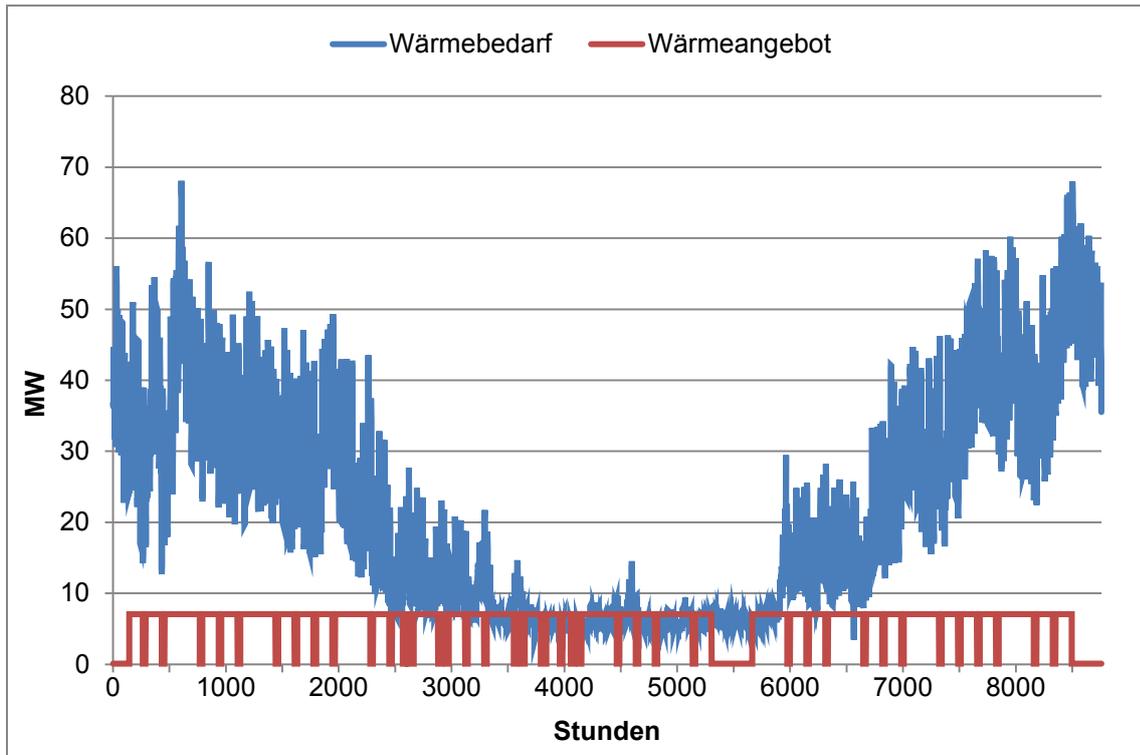


Abbildung 5: Wärmenachfrage und –angebot der Stadt Zeltweg für ein Jahr

Eine stündliche Auflösung wird für einen Tag im Frühjahr (15.04.) in Abbildung 6 gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die Wärmeversorgung durch eine kontinuierliche Lastkurve gekennzeichnet ist, denn Abwärme und Abfall sind in Zeltweg kontinuierlich verfügbar. Die Wärmebedarfskurve zeigt eine hohe Morgenspitze und eine kleinere Spitze am Abend. Man kann erkennen, dass es zu einer geringen Über- und Unterversorgung mit industrieller Wärme kommt.

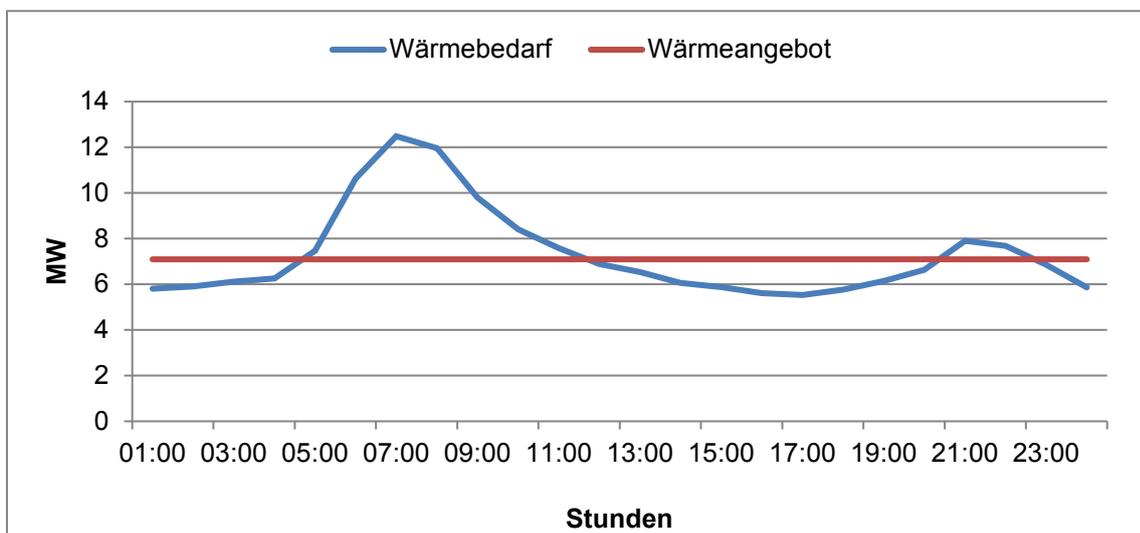


Abbildung 6: Wärmebedarf und –angebot an einem ausgewählten Tag (15.04.)

Eine Unterversorgung der Stadt durch industrielle Energie erfolgt von Herbst bis Frühjahr. Überversorgung mit Industrierwärme tritt vor allem in den Sommermonaten auf, weil der Wärmebedarf der Stadt, durch den Wegfall des Heizwärmebedarfs, niedriger ist. Die Residuallast ist in Abbildung 7 dargestellt. Man kann erkennen, dass eine Überversorgung für rund 1.000 Stunden im Jahr auftritt, aber in kleinen Leistungen. Der Einsatz von Speichern beeinflusst den Bedarfsdeckungsgrad nicht wesentlich.

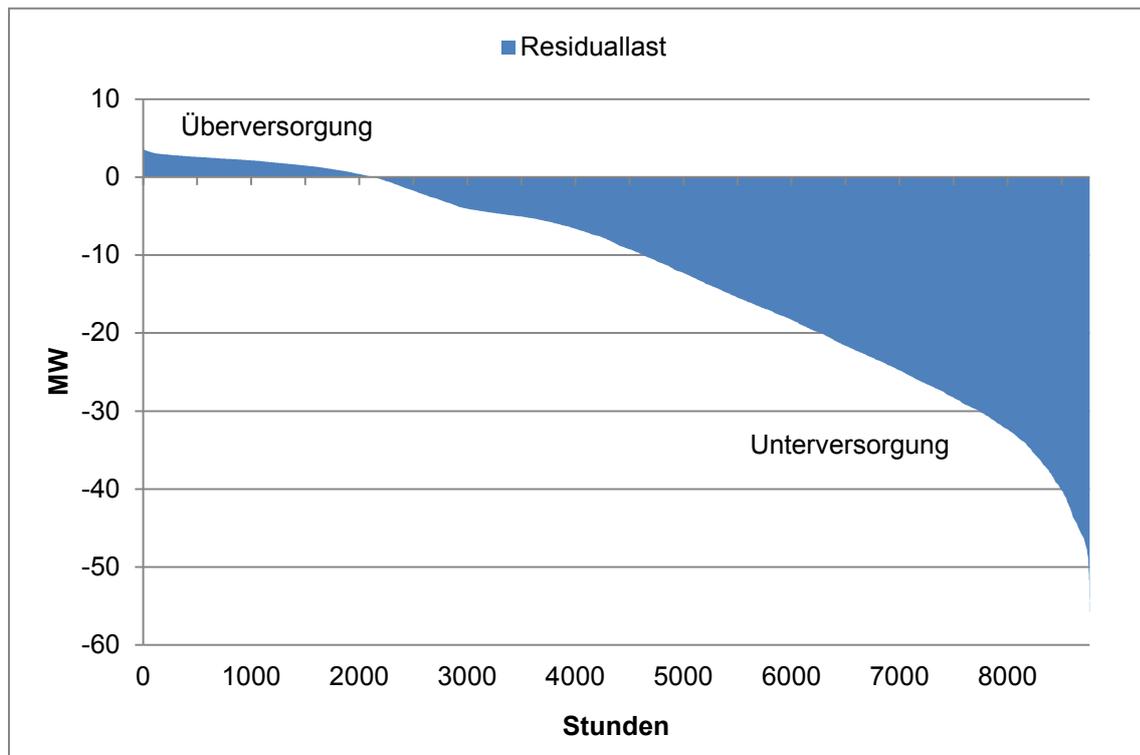


Abbildung 7: Wärme Residuallast für die Stadt Zeltweg

2.2.2 Strom

Abbildung 8 stellt die Stromnachfrage und -angebotskurve für die Stadt Zeltweg für ein Jahr dar. Der Lastgang der Stromnachfrage stellt einen typischen Verlauf des Strombedarfs einer Stadt dar. Der Strom aus PV steht das ganze Jahr, abhängig von der Sonneneinstrahlung, aber unabhängig von Produktions- und Betriebszeiten der Unternehmen, zur Verfügung.

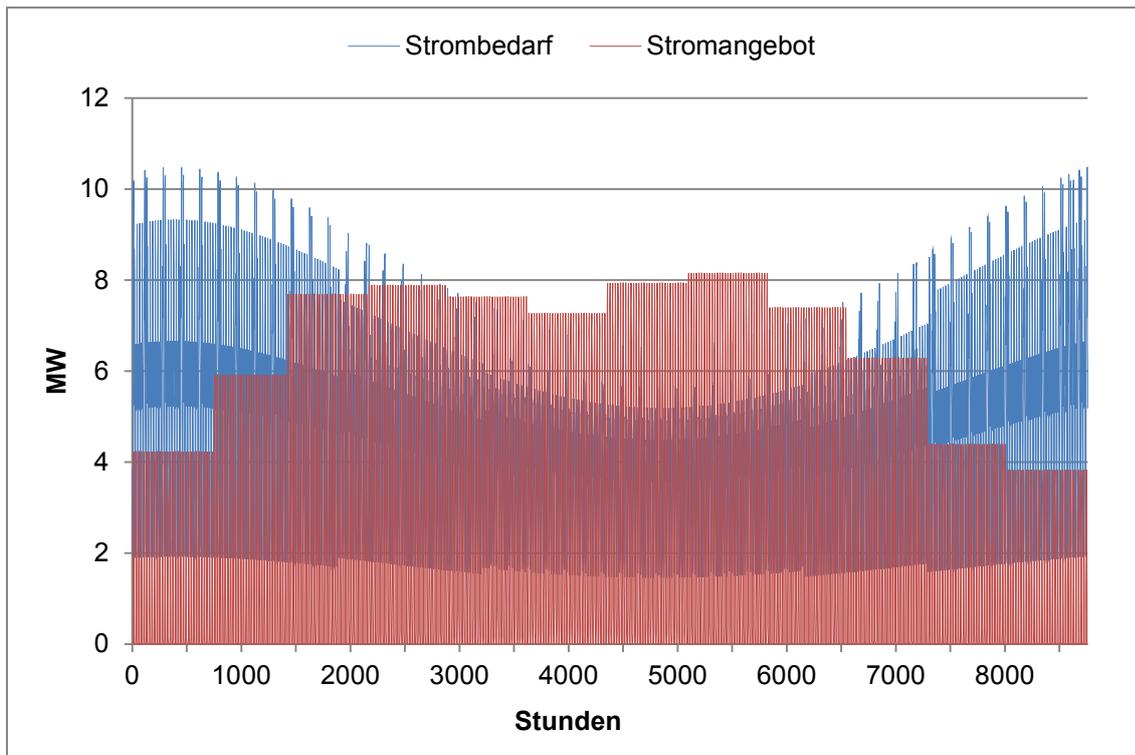


Abbildung 8: Stromangebot und –nachfrage der Stadt Zeltweg

Eine höhere Auflösung ist für einen Tag im Frühjahr (15.04.) in Abbildung 9 dargestellt. Die Stromangebotskurve ist nach der Sonneneinstrahlung geformt und hat einen Höhepunkt um die Mittagszeit. Die Strombedarfskurve ist durch einen starken Anstieg am Morgen, gefolgt von einer etwas höheren Mittagsspitze und Abendspitze gekennzeichnet. Die hohe Sonnenstrahlung im Laufe des Tages und der geringe Stromverbrauch führen zu einem kurzzeitigen Überangebot.

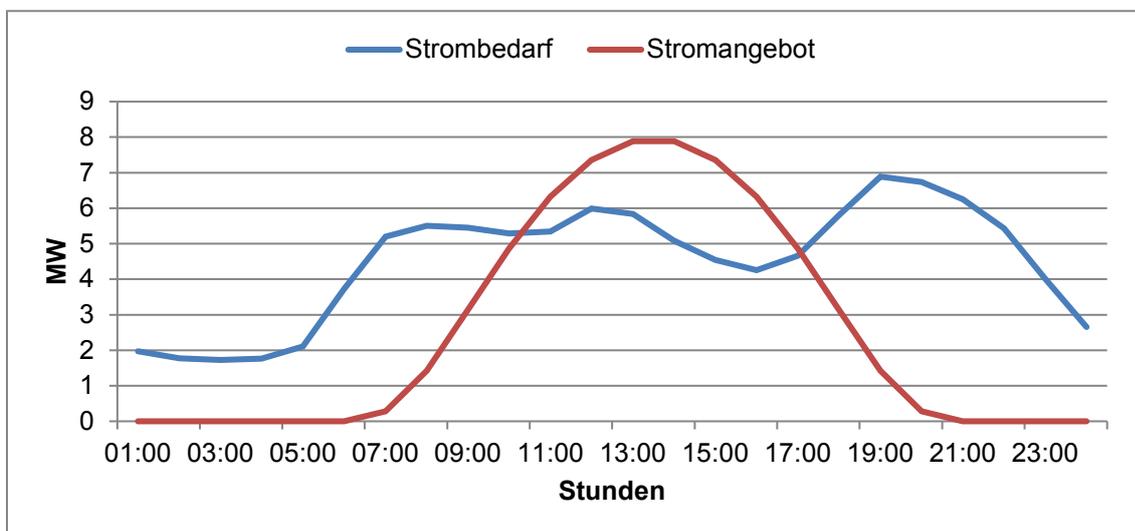


Abbildung 9: Strombedarf und –angebot an einem ausgewählten Tag (15.04.)

Eine Unterversorgung der Stadt tritt lediglich in den Wintermonaten auf. Eine Überversorgung mit industriellem Strom entsteht von Frühjahr bis Herbst, da der Strombedarf der Stadt geringer ist als der durch Sonneneinstrahlung erzeugte PV-Strom. Dies ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Überversorgung für rund 500 Stunden im Jahr, in geringer Leistung, erfolgt. Der Einsatz von Speichern beeinflusst den Bedarfsdeckungsgrad nicht wesentlich.

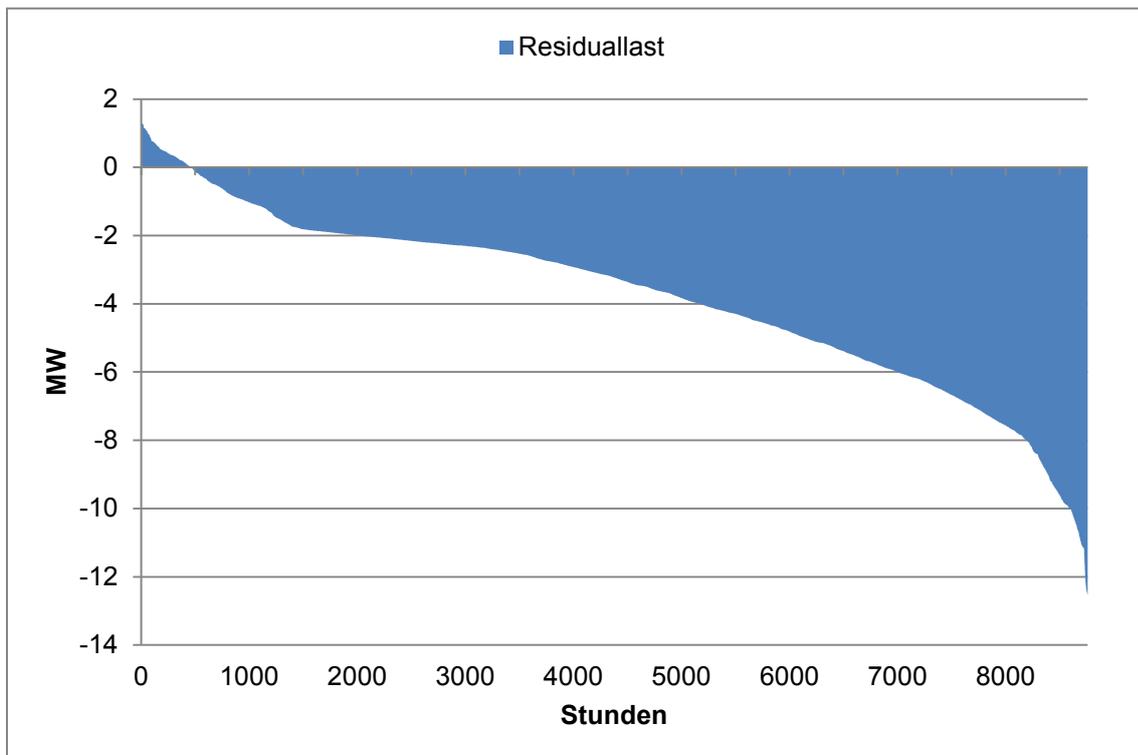


Abbildung 10: Strom Residuallast für die Stadt Zeltweg

2.3 Ökonomie

Es ist erkennbar, dass industrieller Strom aus PV-Anlagen für alle vier Städte zur Verfügung steht, während die industrielle Wärme nur für die Städte Judenburg und Zeltweg verfügbar ist. Die berechneten Werte sind für alle vier Städte ziemlich ähnlich, Schwankungen treten innerhalb von 10% für die spezifischen Gestehungskosten und die spezifischen Gewinne auf. Grund sind geringe Unterschiede in örtlichen Gegebenheiten sowie die Größen der Anlagen. Außerdem übt die Zusammensetzung der industriellen Wärme (Anteil Direktwärme und Anteil der Wärme über Wärmepumpen) einen großen Einfluss auf die Kosten aus. Die Amortisationszeiten sind für alle Städte nahezu identisch.

2.3.1 Wärme

Die Ergebnisse der wirtschaftlichen Analyse für die Städte Judenburg (J) und Zeltweg (Z), für die Nutzung industrieller Wärme, sind in Abbildung 11 dargestellt.

Die Nutzung industrieller Wärme wäre auch profitabel ohne den Erhalt von Investitionsförderungen. Die Wärmegestehungskosten reichen von 27-38 €/MWh und eine durchschnittliche Amortisationszeit von 7 Jahren kann unter Szenario 1 erreicht werden. Szenario 3 zeigt die Auswirkungen einer Investitionsförderung. Der Erhalt einer 20%igen Investitionsförderung führt zu einer Reduktion der Wärmegestehungskosten (25-37 €/MWh) von rund 6% und zu einer Erhöhung der spezifischen Gewinne im gleichen Ausmaß (siehe Abbildung 11). Es konnten keine Auswirkungen auf die durchschnittliche Amortisationszeit festgestellt werden.

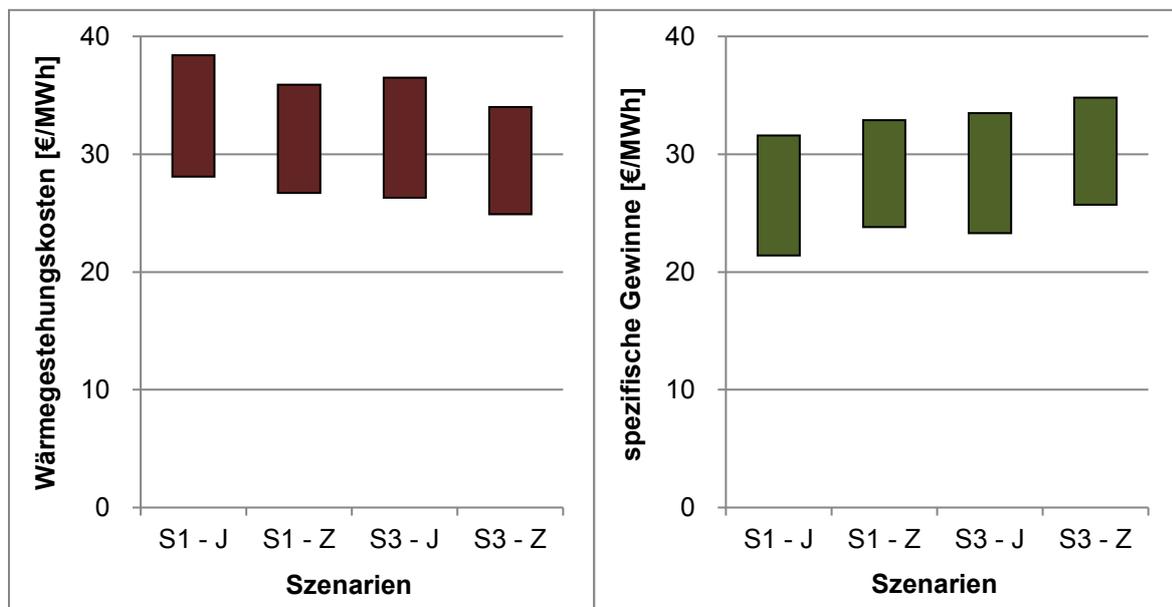


Abbildung 11: Ergebnisse der ökonomischen Analyse für die Nutzung industrieller Wärme (Szenarien für die Städte Judenburg und Zeltweg)

Die Wärmemenge, die in Kombination mit Wärmepumpen genutzt wird, im Vergleich zur direkten Wärmenutzung, hat einen großen Einfluss auf die Kosten. Dies ist vor allem auf die Kosten für den Betrieb der Wärmepumpe (Strompreis) zurückzuführen. Die Zuordnung der jährlichen Kosten für die Nutzung industrieller Wärme auf einzelne Kostenkomponenten ist in Abbildung 12 dargestellt. Mehr als drei Viertel der jährlichen Kosten werden vom Stromverbrauch, um die Pumpen für das Fernwärmenetz und die Wärmepumpen zu versorgen, verursacht. Dies spiegelt sich auch in der Sensitivitätsanalyse wider.

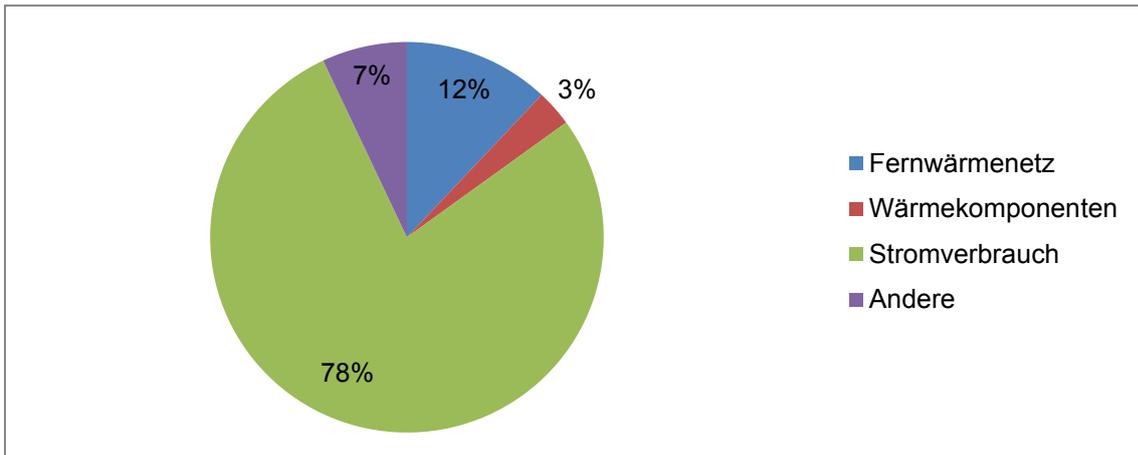


Abbildung 12: Zusammensetzung der jährlichen wärmebezogenen Kosten

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für die Wärmegestehungskosten. Abweichungen von 20% des Strompreises implizieren eine Änderung der Wärmegestehungskosten von 16%. Preisschwankungen für die Komponenten zur Nutzung der Wärme (Wärmepumpe, Wärmetauscher etc.) oder einer Änderung des Zinssatzes beeinflussen die Wärmegestehungskosten. Diese Schlussfolgerung kann für beide Szenarien gezogen werden.

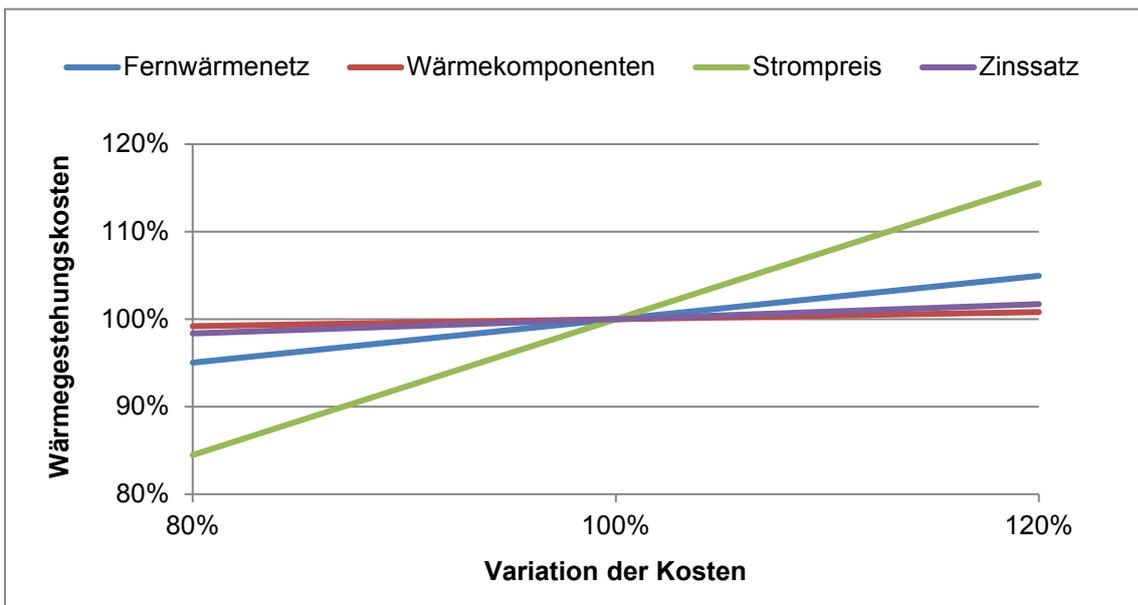


Abbildung 13: Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten

2.3.2 Strom

Die Ergebnisse der wirtschaftlichen Analyse für Strom bezogen auf die Implementierungen für alle vier Städte, Fohnsdorf (F), Judenburg, Knittelfeld (K) und Zeltweg, sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

Die Stromgestehungskosten reichen von rund 60 bis 91 €/MWh für alle Städte. Eine Implementierung von PV-Kraftwerken auf industriellen Dachflächen für die städtische Stromproduktion ist unter Szenario 1 völlig unrentabel. Im Durchschnitt können keine Gewinne verzeichnet werden, was zu Amortisationszeiten weit über 30 Jahren führt. Die Zusage über eine Einspeisevergütung führt zu Gewinnen und damit zu kürzeren Amortisationszeiten. Szenario 2 zeigt, dass Umsetzungen von PV-Anlagen auf Industriedächern für die Stromproduktion wirtschaftlich realisierbar sind.

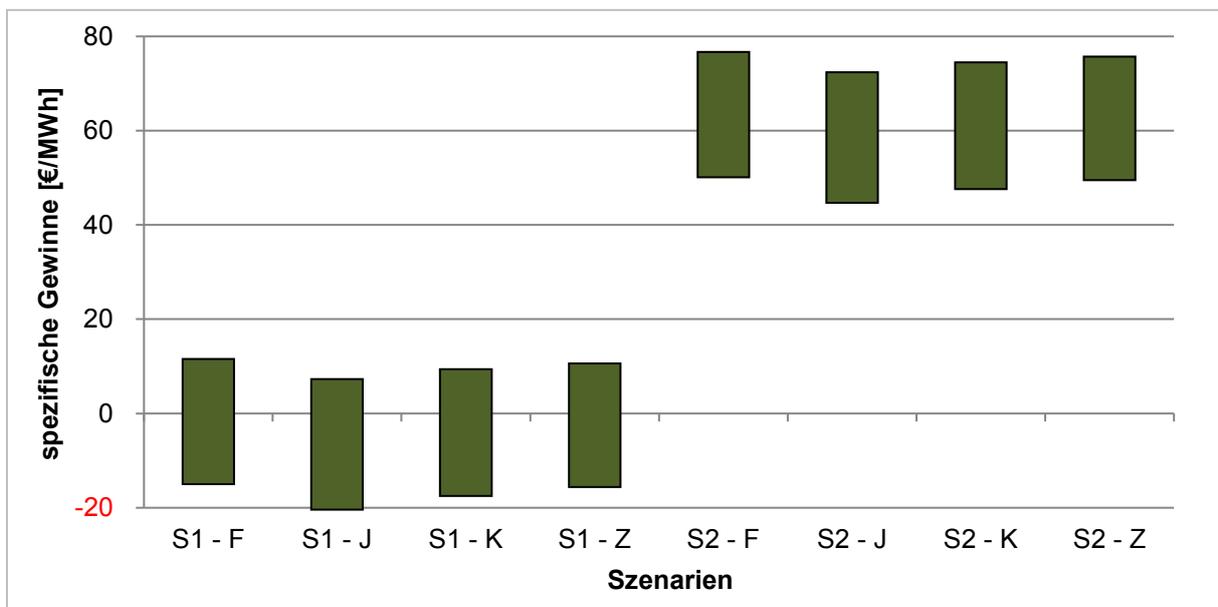


Abbildung 14: Spezifische Gewinne für strombezogene Demonstrationsanlagen (Szenarien für die Städte Fohnsdorf, Judenburg, Knittelfeld und Zeltweg)

Szenario 2 führt zu höheren spezifischen Gewinne (siehe Abbildung 14) und somit zu kürzeren Amortisationszeiten (siehe Abbildung 15). Durchschnittliche Amortisationszeiten von 12 Jahren können erreicht werden. Unter den gewählten Bedingungen verändern sich die Stromgestehungskosten aufgrund einer Einspeisevergütung nicht.

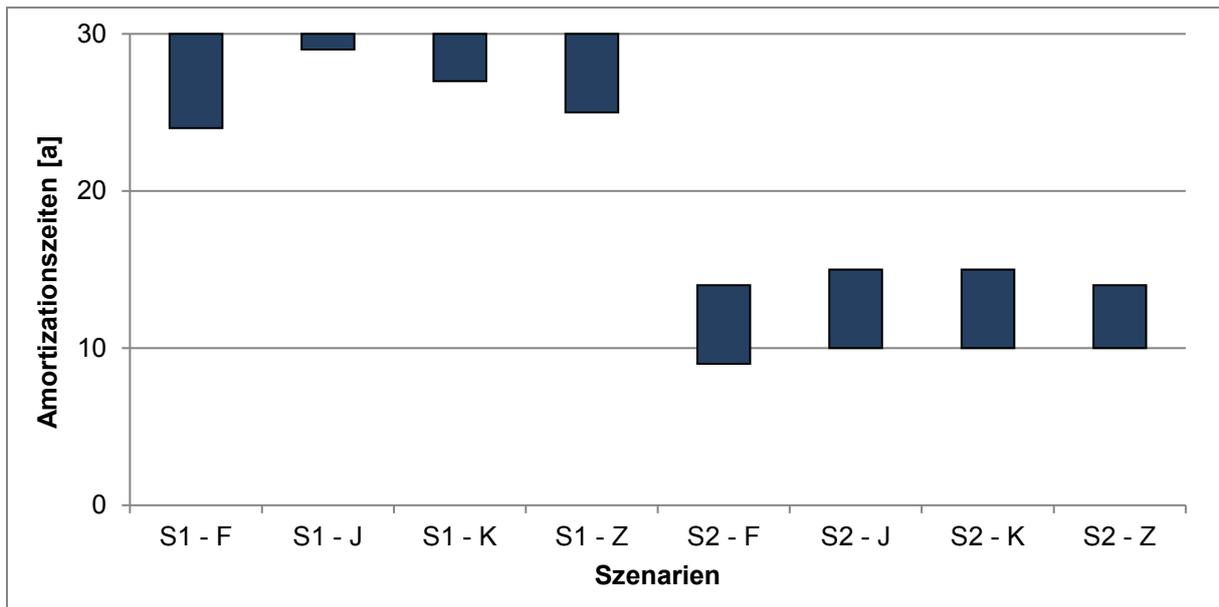


Abbildung 15: Amortisationszeiten für strombezogene Demonstrationsanlagen (Szenarien für die Städte Fohnsdorf, Judenburg, Knittelfeld und Zeltweg)

Die Zuordnung der jährlichen Kosten für strombezogene Demonstrationsanlagen auf einzelne Kostenposten ist in Abbildung 16 dargestellt. Mehr als drei Viertel der jährlichen Kosten werden durch Investitionen für PV-Module verursacht. Dies spiegelt sich in der Sensitivitätsanalyse wider (siehe Abbildung 17).

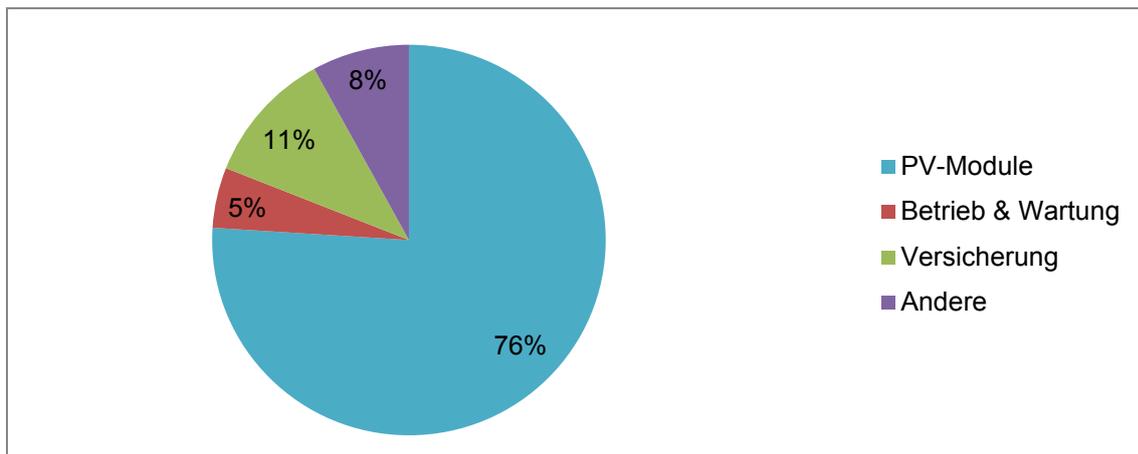


Abbildung 16: Zusammensetzung der jährlichen strombezogenen Investitionskosten

Abweichungen von 20% der Kosten für PV-Module implizieren eine Änderung der Stromgestehungskosten von 18%. Diese Schlussfolgerung kann für beide Szenarien und in allen Städten gezogen werden.

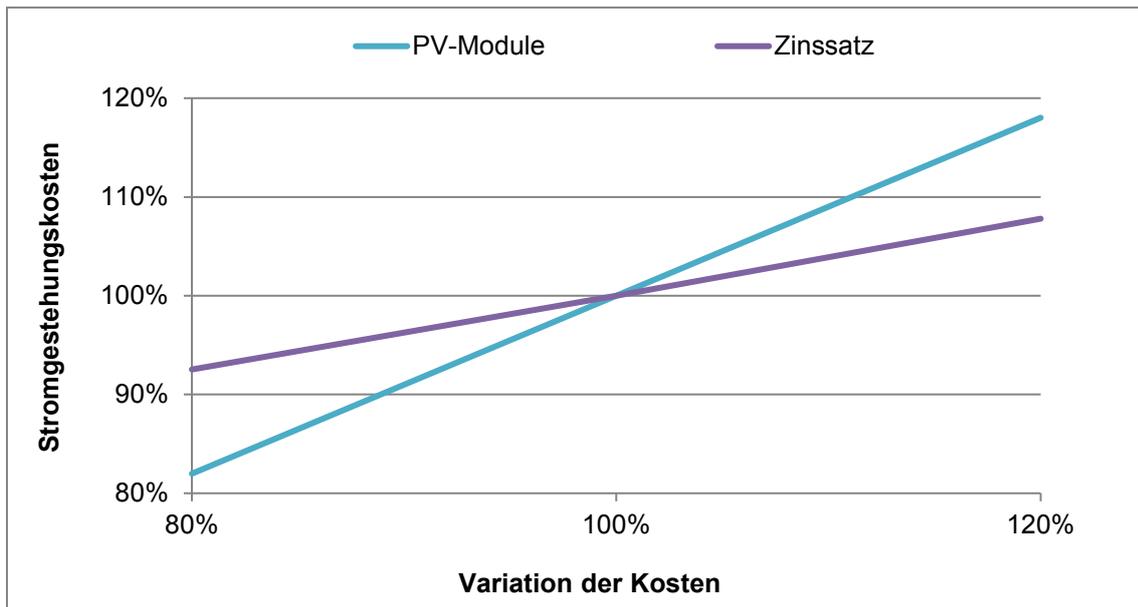


Abbildung 17: Sensitivitätsanalyse der Stromgestehungskosten

2.4 Ökologie

Die ökologische Analyse wird in zwei Teilen durchgeführt, zuerst werden die Ergebnisse der quantitativen Bewertung dargestellt, anschließend die Ergebnisse der qualitativen Bewertung.

2.4.1 Quantitative Bewertung

Die quantitative Bewertung wird ebenfalls auf Basis des technischen Potenzials durchgeführt und für Wärme und Strom getrennt dargestellt. Insgesamt können bis zu 20% an CO₂ Emissionen eingespart werden.

2.4.1.1 Wärme

Die wärmebezogenen CO₂ Einsparung erfolgen nicht in derselben Höhe, wie das Synergiepotenzial, da ein zusätzlicher Energieaufwand für den Betrieb der Wärmepumpen und Fernwärmepumpen notwendig ist. Die CO₂ Emissionen und der Anteil der Einsparung durch die Nutzung industrieller Energie ist in Abbildung 18 für alle Städte dargestellt.

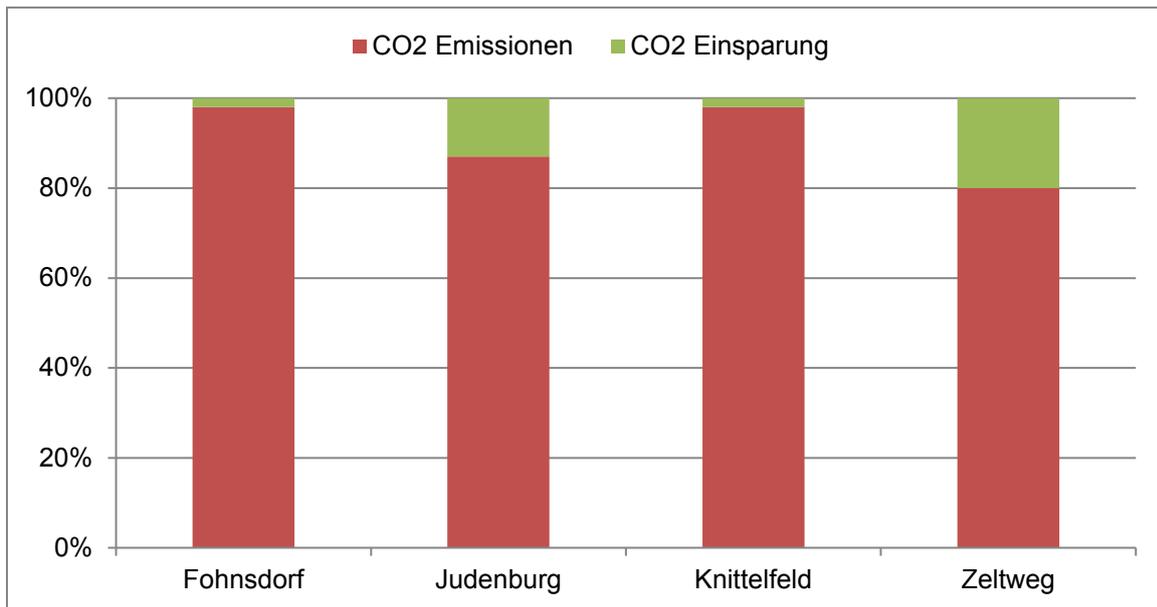


Abbildung 18: Wärmebezogene CO₂ Einsparung

Wie zu erwarten, werden durch die Nutzung industrieller Energie, nur CO₂ Emissionen im Ausmaß von 2% eingespart. Die unterschiedliche Höhe der CO₂ Einsparungen für Judenburg und Zeltweg ergibt sich durch den unterschiedlichen Anteil an Wärme, die mit Wärmepumpen genutzt wird im Vergleich zur Direktwärmenutzung. Zeltweg kann mehr Wärme direkt nutzen und benötigt einen geringen Einsatz von Wärmepumpenleistung, um das erforderliche Temperaturniveau zu garantieren.

2.4.1.2 Strom

Die CO₂ Einsparung strombezogener Demonstrationsanlagen erfolgt in selber Höhe, wie das Synergiepotenzial, da kein zusätzlicher Energieaufwand notwendig ist. Die CO₂ Emissionen und der Anteil der Einsparung durch die Nutzung industrieller Energie ist in Abbildung 19 für alle Städte dargestellt.

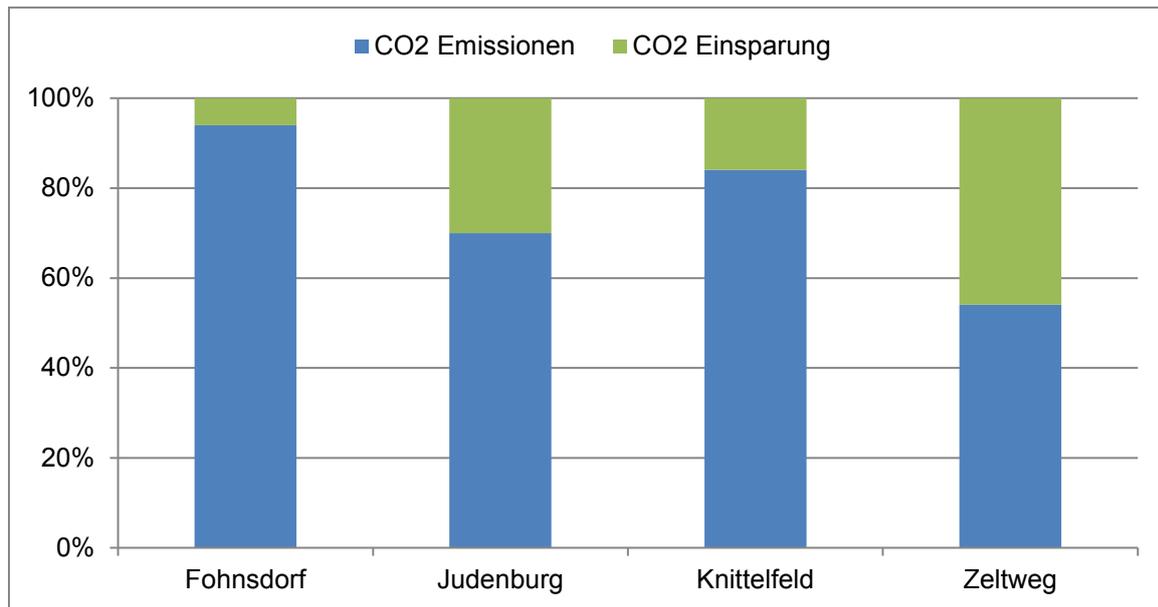


Abbildung 19: Strombezogene CO₂ Einsparung

Abhängig von der betrachteten Stadt können 6% (für Fohnsdorf) bis 46% (für Zeltweg) an CO₂ Emissionen eingespart werden.

2.4.2 Qualitative Bewertung

Die Nutzung industrieller Energie ist mit keiner zusätzlichen Beeinträchtigung der lokalen Umwelt verbunden. Die im Folgenden (Tabelle 5) angeführte qualitative Bewertung bezieht sich direkt auf die Industriebetriebe.

Lärmeinwirkung

Während des Prozessablaufs ist mit einer branchenunterschiedlichen Lärmentwicklung zu rechnen. Beim Bau sowie bei der Entsorgung ist ebenso mit erhöhtem Lärm (erhöhtes LKW und Baumaschinenaufkommen) zu rechnen.

Visuelle Beeinträchtigung

Anrainer und Bewohner können bei der Errichtung der Industrieanlagen sowie durch deren Beleuchtung in der Bauphase, als auch in der Betriebsphase beeinträchtigt werden. Durch eine möglichst unauffällige Einbindung der Industrieanlage in die Umgebung können die Beeinträchtigungen zumindest minimiert werden.

Flächenbedarf

Da es sich meist um größere Industrieanlagen handelt, ist mit einem erhöhten Flächenbedarf zu rechnen. Vor allem der erforderliche Bauraum und die steigenden Kompetenzanforderungen für die zusätzliche Anlagentechnik sind zu berücksichtigen.

Abfälle

Abfälle entstehen bei der Errichtung einer Anlage, in der Betriebsphase sowie bei der endgültigen Entsorgung einer Anlage. Bei der Stilllegung fallen keine Abfälle an.

Tabelle 5: Qualitative Bewertung der Ökologie

Umwelteffekte	Phase	Bewertung	Umwelteffekte	Phase	Bewertung
Visuelle Beeinträchtigung	Bau	2	Lärm	Bau	2
	Betrieb	2		Betrieb	2
	Störfall	2		Störfall	1
	Stilllegung	2		Stilllegung	1
	Entsorgung	1		Entsorgung	2
Abfälle	Bau	2	Fläche	Bau	2
	Betrieb	2		Betrieb	2
	Störfall	1		Störfall	2
	Stilllegung	1		Stilllegung	2
	Entsorgung	3		Entsorgung	1

Die Gesamtbetrachtung spiegelt einen vertretbaren Einfluss auf die Umwelt durch den Bau, den Betrieb, einen Störfall, einer Stilllegung sowie durch die Entsorgung der kompletten Industriebetriebe wider. Die Bewertungen der einzelnen Kriterien liegen vorwiegend zwischen 1 und 2 und beeinflussen daher die Umwelt in einem vertretbaren Maß.

3 Schlussfolgerungen

Fachliche Erkenntnisse

Es konnte festgestellt werden, dass, abhängig von der industriellen Durchdringung, insgesamt bis zu 32% des Gesamtenergiebedarfs der untersuchten Städte durch industrielle Energie gedeckt werden kann. Dies führt zu einer Reduzierung der maximalen Leistung für die Strom- und Wärmeerzeugung. Außerdem kann fast die Gesamtmenge der anfallenden industriellen Energie in dem Energiesystem der Stadt integriert werden. Nur wenige Stunden im Jahr und in geringer Höhe besteht ein Überangebot durch industrielle Energie. Der Einsatz von Speichern beeinflusst den Bedarfsdeckungsgrad nicht wesentlich.

Die Nutzung von industriellem Strom ist ohne den Erhalt von Einspeisetarifen nicht wirtschaftlich. Die Umsetzung von PV-Anlagen ist mit geringem Aufwand verbunden, so dass eine Nutzung auch für die Stadt Fohnsdorf, die ein geringes Synergiepotenzial aufweist, als sinnvoll angesehen werden kann. Stromgestehungskosten von 60-91 €/MWh wurden ermittelt. Die Stromgestehungskosten werden größtenteils durch die Kosten der PV-Module beeinflusst.

Abfall kann nicht wirtschaftlich thermisch verwertet werden, die Mindestanlagengröße von 2 MW wird in den betrachteten Projektregionen nicht erreicht. Die Nutzung von industrieller Wärme ist auch ohne Investitionsförderungen wirtschaftlich. Wärmegestehungskosten von 25-38 €/MWh wurden ermittelt. Die Wärmegestehungskosten werden am meisten von den Kosten für Strom, der für den Betrieb der Fernwärmepumpen und der Wärmepumpen benötigt wird, beeinflusst.

Abhängig von dem Anteil an direkt nutzbarer Wärme und Wärme, die über Wärmepumpen genutzt wird, sinken die CO₂ Emissionen und der Verbrauch an Primärenergie. CO₂ Einsparungen von bis zu 20% im Vergleich zur aktuellen Versorgung können reduziert werden.

Die Nutzung industrieller Energie führt zu einer deutlichen Erhöhung der Energieeffizienz für die Industriebetriebe, zur Reduktion von CO₂ Emissionen und des Bedarfs an Primärenergie, reduziert die Abhängigkeit von externen Energiequellen und erhöht somit die Versorgungssicherheit.

Weiteres Vorgehen

Das Projektkonsortium verwendet die erworbenen Erkenntnisse und die aufgetretenen neuen Forschungsfragen dazu neue Forschungsprojekte zu entwickeln und zu akquirieren. Im Rahmen der 6. Ausschreibung Smart Cities Demo wurde der Projektantrag „SISI“ eingereicht (genaue Beschreibung siehe Kapitel 4) und als förderwürdig eingestuft. Projektstart wird am 01.04.2016 sein.

Zielgruppen

Die Methodik und Grundstruktur des Simulationsmodells stehen mit dem Endbericht zur Verfügung und können bei neuen Projekten zumindest für erste Abschätzungen herangezogen werden. Auch die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse können als Anhaltswerte dienen. Das Projektkonsortium steht als Projekt- und Umsetzungspartner zur Verfügung. Die Zielgruppen, mit der möglichen Vorgehensweise, lassen sich wie folgt einteilen:

- Forschungsunternehmen, Universitäten und Fachhochschulen können als Umsetzungspartner bzw. zur wissenschaftlichen Begleitung zusammen mit Städten und Industriebetrieben dienen. Außerdem können die weiteren Forschungsfragen (siehe Kapitel 4) von dieser Zielgruppe abgearbeitet werden.
- Städte (z.B. Klima- und Energiemodellregionen, e5-Gemeinden etc.) und Industriebetriebe können Sondierungsprojekte (Ermittlung des Synergiepotenzials) und Demonstrationsprojekte (Umsetzung zur Nutzung industrieller Energie) initiieren. Einerseits werden durch die Vorbildwirkung auch andere Städte und Industriebetriebe motiviert ihrem Beispiel zu folgen, andererseits können Industriebetriebe somit ihre gesetzlichen Verpflichtungen zur Energieeinsparung bzw. zur Energieeffizienz erfüllen.
- Die Politik kann Maßnahmen und Rahmenbedingungen schaffen, um die Nutzung industrieller Energie zu begünstigen z.B. in Form von Förderungen, Gesetzen und der Erarbeitung von passenden Forschungslinien.
- Energieagenturen können als Umsetzungspartner von Sondierungs- und Demonstrationsprojekten dienen. Durch die meist regionale Verankerung kann z.B. der Stakeholderprozess von den Energieagenturen übernommen werden.

Marktpotenzial

In Österreich gibt es neben den Städten Judenburg, Fohnsdorf, Zeltweg und Knittelfeld (aus der Region Murtal) noch über 70 weitere Städte mit einer Einwohnerzahl zwischen 7.000 und 12.000. Die recherchierten Daten und das erstellte Simulationsmodell sowie die gewonnenen Erkenntnisse können daher auch auf diese umgelegt werden. Auf EU28 Ebene kann das Potenzial auf 2.300 bis 4.000 derartige Städte abgeschätzt werden.

4 Ausblick und Empfehlungen

Empfehlungen für weiterführende Forschungsarbeit

Im Zuge des Forschungsprojektes wurden vier für Österreich charakteristische Städte hinsichtlich ihres Synergiepotenzials mit der Industrie untersucht. Durch kleine Adaptierungen kann das entwickelte Modell für andere Städte angepasst werden. Eine Generalisierung über die Höhe des Synergiepotenzials für Städte in derselben Größenordnung ist jedoch mit einer Unsicherheit behaftet, die durch Erhöhen der Anzahl von untersuchten Städten reduziert werden kann.

Die untersuchten Projektregionen sind in unmittelbarer Nähe von einander. Der Zusammenschluss von Verbrauch und Angebot über die Stadtgrenzen hinaus würde die Möglichkeit bieten die Synergieeffekte zu erhöhen und etwaige Angebotsspitzen zu reduzieren.

Das kurzfristige Überangebot, das sich aus der Stromerzeugung ergibt, kann entweder in geeigneten Komponenten gespeichert oder für Hybridisierung verwendet werden. Dort wird das Überangebot an Strom nicht in das Stromnetz abgegeben, sondern z.B. zur Wärmeerzeugung (power2heat) genutzt. [37] Ein Vergleich der beiden Varianten ist durchzuführen.

Potenzial für Demonstrationsvorhaben in Österreich

Für Gesamtösterreich steht ein technisches Potenzial von ca. 15.713 GWh_{th} an industrieller Wärme im Jahr zur Verfügung. Der Großteil wird über Abwärme bereitgestellt (95%), der Rest teilt sich auf Abfall und Abwärme auf. Damit könnten 23% des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs der Haushalte gedeckt werden. In Bezug auf industriellen Strom steht ein technisches Potenzial von rund 10.837 GWh_{el} im Jahr zur Verfügung. Damit können rund 74% des von den Haushalten nachgefragten Strombedarfs gedeckt werden. Insgesamt ist somit eine Deckung von 33% des Energiebedarfs von Haushalten mittels industrieller Energie möglich. Wie die Daten zeigen, ist also durchaus ein Potenzial zur Nutzung industrieller Energie vorhanden. In weiteren Untersuchungen muss geklärt werden, inwiefern sich das Angebot und der Bedarf auch geografisch überschneidet und ob eine wirtschaftliche Nutzung unter den ermittelten Rahmenbedingung möglich ist.

Potenzial für Demonstrationsvorhaben in den Projektregionen

In Hinblick auf die Projektregionen bieten sich vor allem Judenburg und Zeltweg als mögliche Demonstrationsstandorte an, da ein großes Synergiepotenzial im Zuge des Projektes ermittelt werden konnte. Durch die gute Kooperation mit dem Umweltamt der Stadt Judenburg, sowie der Energieagentur Obersteiermark wurde ein Folgeprojekt namens „SISI“ entwickelt.

Im Rahmen der 6. Ausschreibung Smart Cities Demo wurde der Projektantrag „SISI“ eingereicht und als förderwürdig eingestuft. Projektstart wird am 01.04.2016 sein.

Inhalt des Projektantrages „SISI“: Erarbeitung eines Umsetzungsplans für eine verstärkte energetische Kopplung zwischen Stadt und Industrie am Beispiel der Stadt Judenburg. Hierbei werden die für die Stadt nutzbare Potenziale an industrieller Energie und regional verfügbarer regenerativer Energie in verschiedenen Szenarien, die auch Fragen zur Technologieauswahl beinhalten, in einem Simulationsmodell ermittelt. Durch die gewählte Methodik wird eine Übereinstimmung mit den Zielen kommunaler und regionaler Entwicklungspläne gewährleistet. Zur Beurteilung der Qualität und Quantität der energetischen Kopplung werden Kennzahlen erarbeitet, die weiterführend auch als allgemeine Benchmarks zur Beurteilung der energetischen Integration der Industrie in die Energieversorgung von Städten ähnlicher Struktur herangezogen werden können.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des industriellen Endenergieverbrauchs 1988 bis 2013 in Österreich; [34].....	26
Abbildung 2: Endenergieverbrauch der Industriebranchen in der Steiermark, 2013; [34].....	27
Abbildung 3: Basisstruktur des Simulationsmodells.....	29
Abbildung 4: Profit und Amortisationszeit der Nutzung industriellem Strom der Stadt Judenburg.....	32
Abbildung 5: Wärmenachfrage und –angebot der Stadt Zeltweg für ein Jahr.....	40
Abbildung 6: Wärmebedarf und –angebot an einem ausgewählten Tag (15.04.).....	40
Abbildung 7: Wärme Residuallast für die Stadt Zeltweg.....	41
Abbildung 8: Stromangebot und –nachfrage der Stadt Zeltweg.....	42
Abbildung 9: Strombedarf und –angebot an einem ausgewählten Tag (15.04.).....	42
Abbildung 10: Strom Residuallast für die Stadt Zeltweg.....	43
Abbildung 11: Ergebnisse der ökonomischen Analyse für die Nutzung industrieller Wärme (Szenarien für die Städte Judenburg und Zeltweg).....	44
Abbildung 12: Zusammensetzung der jährlichen wärmebezogenen Kosten.....	45
Abbildung 13: Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten.....	45
Abbildung 14: Spezifische Gewinne für strombezogene Demonstrationsanlagen (Szenarien für die Städte Fohnsdorf, Judenburg, Knittelfeld und Zeltweg).....	46
Abbildung 15: Amortisationszeiten für strombezogene Demonstrationsanlagen (Szenarien für die Städte Fohnsdorf, Judenburg, Knittelfeld und Zeltweg).....	47
Abbildung 16: Zusammensetzung der jährlichen strombezogenen Investitionskosten.....	47
Abbildung 17: Sensitivitätsanalyse der Stromgestehungskosten.....	48
Abbildung 18: Wärmebezogene CO ₂ Einsparung.....	49
Abbildung 19: Strombezogene CO ₂ Einsparung.....	50

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über Energieträger, ihre Nutzungsmöglichkeiten und Technologien.....	23
Tabelle 2: Theoretische Synergiepotenziale für das steirische Murtal.....	37
Tabelle 3: Technisches Synergiepotenziale für das steirische Murtal.....	38
Tabelle 4: wirtschaftliches Synergiepotenziale für das steirische Murtal.....	38
Tabelle 5: Qualitative Bewertung der Ökologie.....	51

5.3 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der elektrischen Leistung – Modell PV.....	29
---	----

Formel 2: Berechnung des COPs – Modell Wärmepumpe	30
Formel 3: Berechnung der thermischen Leistung – Modell Wärmepumpe	30
Formel 4: Berechnung der zusätzlichen elektrischen Leistung – Modell Wärmepumpe	30
Formel 5: Berechnung der spezifischen Investitionskosten	32
Formel 6: Berechnung der Annuität	33
Formel 7: Berechnung der jährlichen variablen Kosten	33
Formel 8: Berechnung des Jahresumsatzes	33
Formel 9: Berechnung der Wärmegestehungskosten	33
Formel 10: Berechnung der spezifischen Gewinne	34
Formel 11: Berechnung der aktuellen CO ₂ Emissionen	35
Formel 12: Berechnung der verringerten CO ₂ Emissionen durch industrielle Energie	35
Formel 13: Berechnung der eingesparten CO ₂ Emissionen	35

5.4 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent	I	Solarstrahlung
€	Euro	I _c	Investitionskosten der Komponente
°C	Grad Celsius	J	Judenburg
η	Wirkungsgrad	K	Knittelfeld
ξ	Irreversibilität	kW	Kilowatt
Σ	Summe	kWh	Kilowattstunde
a	Jahr	LCOE	Stromgestehungskosten
A	Fläche	LCOH	Wärmegestehungskosten
A	Annuität	LKW	Lastkraftwagen
A _c	Annuität der Komponente	m ²	Quadratmeter
A _D	Strombedarf Wärmepumpen und Fernwärmepumpen	MVA	Müllverbrennungsanlage
C _c	spezifische Kosten der Komponente	MW	Megawatt
C _{EP}	Strompreis	MWh	Megawattstunde
C _{HS}	Wärmeverkaufspreis	n _c	Lebensdauer der Komponente
C _{IM}	Kosten für Versicherung und Wartung	ORC	Organic Rankine Cycle
CO ₂	Kohlendioxid	p	Zinssatz
CO _{2ist}	jährlichen Menge an CO ₂ Emissionen, aktuelle Situation	P _{HP}	Wärmepumpenleistung

CO _{2neu}	jährlichen Menge an CO ₂ Emissionen, industrielle Energie	PV	Photovoltaik
CO _{2save}	jährlichen Menge an eingesparten CO ₂ Emissionen	R _A	Jahresumsatz
COP	Coefficient of Performance	S1	Szenario 1
CSC	Conservation Supply Curve	S2	Szenario 2
ct	Cent	S3	Szenario 3
E _D	Strombedarf	SISI	Smart City Judenburg durch Synergiepotenziale mit der Industrie
E _{DH}	Kennzahl: Stromverbrauch Fernwärmepumpe	t	Tonne
el	elektrisch	T _C	Leistung der Komponente
E _S	industrieller Strom	th	thermisch
f	Faktor für Verschattung und Orientierung	T _{HP}	Betriebszeit Wärmepumpe
F	Fohnsdorf	T _{in}	Temperatur Eingangsstrom Wärmepumpe
FW	Fernwärme	T _{out}	Temperatur Ausgangsstrom Wärmepumpe
G _A	spezifischen Gewinne	V _C	Variable Kosten
GIS	Geographisches Informationssystem	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
GWh	Gigawattstunde	W _{HP}	elektrische Eingangsleistung Wärmepumpe
h	Stunde	W _{HPin}	thermische Leistung, Eingang Wärmepumpe
H _{CO2}	direkten CO ₂ Emissionen der Wärmezeugung	W _{HPout}	thermische Leistung, Ausgang, Wärmepumpe
H _D	Wärmebedarf	W _{PV}	elektrische Leistung PV
H _s	industrielle Wärme	Z	Zeltweg

5.5 Literaturverzeichnis

- [1] Tausz K, Tragner M, Schloffer M, Kraußler A, Theißing-Brauhart I, Theissing M, et al. Energiepotenzialanalyse Industrieregion Raum Krems. Neulengnabach: 2010.

- [2] Theissing M, Schloffer M, Tragner M, Wanek M, Theiing-Brauhart I. Instationaritat von industrieller Abwärme als limitierender Faktor bei der Nutzung und Integration in Warmevertei- und Warmenutzungssystemen. Kapfenberg: 2009.
- [3] Fang H, Xia J, Zhu K, Su Y, Jiang Y. Industrial waste heat utilization for low temperature district heating. *Energy Policy* 2013;62:236–46. doi:10.1016/j.enpol.2013.06.104.
- [4] Rattner AS, Garimella S. Energy harvesting, reuse and upgrade to reduce primary energy usage in the USA. *Energy* 2011;36:6172–83. doi:10.1016/j.energy.2011.07.047.
- [5] Connolly D, Lund H, Mathiesen B V., Werner S, Möller B, Persson U, et al. Heat roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. *Energy Policy* 2014;65:475–89. doi:10.1016/j.enpol.2013.10.035.
- [6] Persson U, Moller B, Werner S. Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions. *Energy Policy* 2014;74:663–81. doi:10.1016/j.enpol.2014.07.015.
- [7] Lund H, Werner S, Wiltshire R, Svendsen S, Thorsen JE, Hvelplund F, et al. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 2014;68:1–11. doi:10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [8] Connolly D, Mathiesen BV. A technical and economic analysis of one potential pathway to a 100 % renewable energy system. *Int J Sustain Energy Plan Manag* 2014;01:7–28.
- [9] Holmgren K. Role of a district-heating network as a user of waste-heat supply from various sources - the case of Göteborg. *Appl Energy* 2006;83:1351–67. doi:10.1016/j.apenergy.2006.02.001.
- [10] Morandin M, Hackl R, Harvey S. Economic feasibility of district heating delivery from industrial excess heat: A case study of a Swedish petrochemical cluster. *Energy* 2014;65:209–20. doi:10.1016/j.energy.2013.11.064.
- [11] Karellas S, Leontaritis a. D, Panousis G, Bellos E, Kakaras E. Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry. *Energy* 2013;58:147–56. doi:10.1016/j.energy.2013.03.097.
- [12] Ajah AN, Patil AC, Herder PM, Grievink J. Integrated conceptual design of a robust and reliable waste-heat district heating system. *Appl Therm Eng* 2007;27:1158–64. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.02.039.
- [13] Sogut Z, Oktay Z, Karako H. Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln. *Appl Therm Eng* 2010;30:817–25. doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.12.009.
- [14] Svensson IL, Jonsson J, Berntsson T, Moshfegh B. Excess heat from kraft pulp mills: Trade-offs between internal and external use in the case of Sweden-Part 1: Methodology. *Energy Policy* 2008;36:4178–85. doi:10.1016/j.enpol.2008.07.017.
- [15] Brunke JC, Blesl M. Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs. *J Clean Prod* 2014;82:94–111. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.074.

- [16] Hasanbeigi A, Morrow W, Sathaye J, Masanet E, Xu T. A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry. *Energy* 2013;50:315–25. doi:10.1016/j.energy.2012.10.062.
- [17] Hasanbeigi A, Morrow W, Masanet E, Sathaye J, Xu T. Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China. *Energy Policy* 2013;57:287–97. doi:10.1016/j.enpol.2013.01.053.
- [18] Morrow WR, Hasanbeigi A, Sathaye J, Xu T. Assessment of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries. *J Clean Prod* 2014;65:131–41. doi:10.1016/j.jclepro.2013.07.022.
- [19] Lung RB, Mckane A, Leach R, Marsh D. Ancillary Savings and Production Benefits in the Evaluation of Industrial Energy Efficiency Measures 2005:103–14.
- [20] Napp T a., Gambhir a., Hills TP, Florin N, Fennell PS. A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;30:616–40. doi:10.1016/j.rser.2013.10.036.
- [21] Walsh C, Thornley P. Barriers to improving energy efficiency within the process industries with a focus on low grade heat utilisation. *J Clean Prod* 2012;23:138–46. doi:10.1016/j.jclepro.2011.10.038.
- [22] Bayulken B, Huisingh D. Are lessons from eco-towns helping planners make more effective progress in transforming cities into sustainable urban systems: a literature review (part 2 of 2). *J Clean Prod* 2015:1–14. doi:10.1016/j.jclepro.2014.12.099.
- [23] Fujii M, Fujita T, Dong L, Lu C, Geng Y, Behera SK, et al. Possibility of developing low-carbon industries through urban symbiosis in Asian cities. *J Clean Prod* 2015. doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.027.
- [24] Li Z, Chang S, Ma L, Liu P, Zhao L, Yao Q. The development of low-carbon towns in China: Concepts and practices. *Energy* 2012;47:590–9. doi:10.1016/j.energy.2012.08.045.
- [25] Dong H, Ohnishi S, Fujita T, Geng Y, Fujii M, Dong L. Achieving carbon emission reduction through industrial & urban symbiosis: A case of Kawasaki. *Energy* 2014;64:277–86. doi:10.1016/j.energy.2013.11.005.
- [26] Yu F, Han F, Cui Z. Reducing carbon emissions through industrial symbiosis: a case study of a large enterprise group in China. *J Clean Prod* 2014;103:811–8. doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.038.
- [27] Yu B, Li X, Shi L, Qian Y. Quantifying CO₂ emission reduction from industrial symbiosis in integrated steel mills in China. *J Clean Prod* 2015;103:801–10. doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.015.
- [28] Lu SM, Huang MY, Su PT, Tseng KT, Chen F. Development strategy of green energy industry for Taipei-A modern medium-sized city. *Energy Policy* 2013;62:484–92. doi:10.1016/j.enpol.2013.08.007.
- [29] Mauz H. *Abwasserwärmenutzungsanlagen*. Graz: 2007.

- [30] Grazer Energieagentur. Abwasserwärmenutzung. Graz: 2007.
- [31] Gara S, Schrimpf S. Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen-und Stahlindustrie. 1998.
- [32] Umweltbundesamt GmbH. Amstettener Stadtwerke nutzen Wärme des Abwassers 2014. <http://www.umwelttechnik.at/de/erneuerbare-energie-technologie/waermepumpe-geothermie/good-practise/amstettener-stadtwerke-nutzen-waerme-des-abwassers/> (accessed December 17, 2015).
- [33] Turboden. Turboden: References 2015. <http://www.turboden.eu/en/references/references-map.php> (accessed August 19, 2015).
- [34] Statistik Austria. Gesamtenergiebilanz Österreich 1970-2013 2014.
- [35] Kommunalkredit Public Consulting GmbH. Alle Förderungen 2015. <http://www.umweltfoerderung.at/kpc/de/home/allefoerderungen/#energieversorgung> (accessed November 13, 2015).
- [36] OeMAG. Einspeisetarif Photovoltaik 2015. <http://www.oem-ag.at/de/foerderung/photovoltaik/> (accessed October 28, 2015).
- [37] Hinterberger Robert. Arbeitsgruppe: Hybridnetze und Synergiepotentiale mit kommunalen Infrastrukturen. Wien: 2013.
- [38] Lambeuer J, Fahl U, Ohl M, Blesl M, Voß A. Industrielle Großwärmepumpen. Stuttgart: 2008.
- [39] Karner K. Technisch-ökonomische und ökologische Analyse eines Geothermie-Biomasse-Fernwärmenetzes. FH JOANNEUM GmbH, 2013.
- [40] Stadtwerke Judenburg. Preisliste für Ökostrom. Judenburg: 2015.
- [41] Energie-Control Austria. Tarif Kalkulator 2015. <http://www.e-control.at/konsumenten/service-und-beratung/toolbox/tarifkalkulator> (accessed October 28, 2015).
- [42] Energie Graz. Preisliste für Fernwärme. Graz: 2015.
- [43] Energie-Control Austria. Stromkennzeichnung 2015. <https://www.e-control.at/industrie/oeko-energie/stromkennzeichnung> (accessed December 16, 2015).
- [44] Theissing M. CO₂ - Emissionen und Primärenergiefaktor der Fernwärme in Österreich Inhalt. Fernwärmetage 2012, Wels: 2012.

6 Anhang

6.1 Basis Daten für Wirtschaftlichkeitsanalyse

Posten	Preis	Quelle
Spez. Kosten für Wärmetauscher	29,3 €/kW _{th}	[2]
Spez. Kosten für Wärmepumpen	330 €/kW _{th}	[38]
Spez. Kosten Fernwärmenetz	550 €/m Trasse	[39]
Stromverbrauch Fernwärmepumpe	10 kWh _{el} /MWh _{th}	[39]
Momentaner Marktpreis für Strom	69,90 €/MWh _{el}	[40]
Strompreis	120 €/MWh _{el}	[41]
Wärmeverkaufspreis	58,80 €/MWh _{th}	[42]

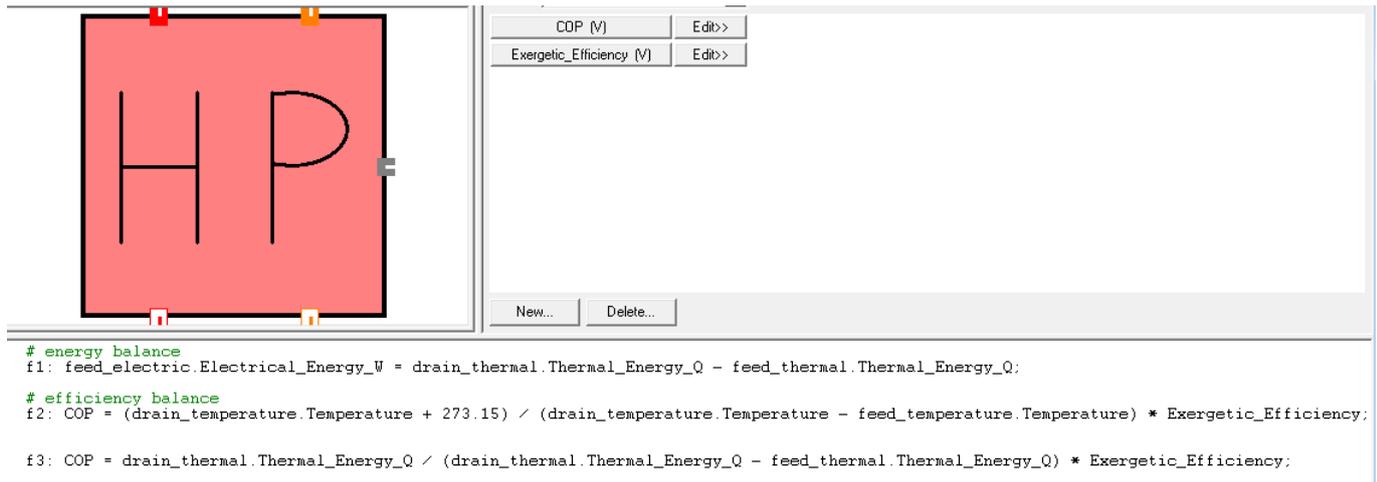
6.2 Basisdaten für die ökologische Analyse

Posten	Preis	Quelle
CO ₂ Emissionsfaktor für Strommix Österreich	129 kg/MWh _{el}	[43]
CO ₂ Emissionsfaktor für Wärmebereitstellung Österreich	81 kg/MWh _{th}	[44]

6.3 Entwickelte Komponentenmodelle in IPSEpro

Der entwickelte Modellansatz wurde in der Simulationsumgebung IPSEpro nachgebildet. Neben den bestehenden Komponentenmodellen mussten einige selbst entwickelt werden. Diese sind nachfolgend dargestellt.

6.3.1 Wärmepumpe

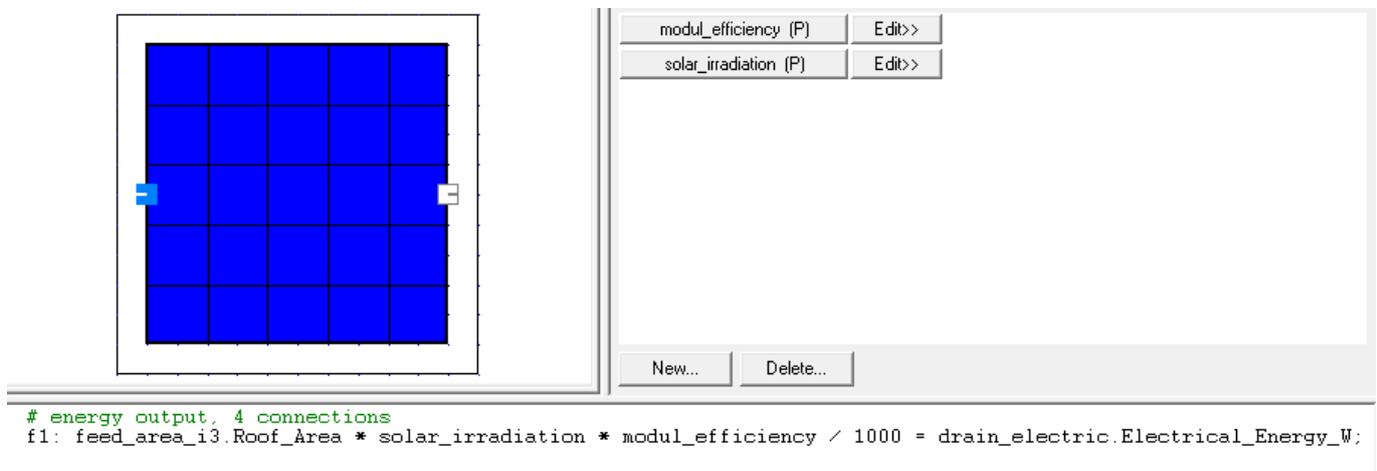


```
# energy balance
f1: feed_electric.Electrical_Energy_W = drain_thermal.Thermal_Energy_Q - feed_thermal.Thermal_Energy_Q;

# efficiency balance
f2: COP = (drain_temperature.Temperature + 273.15) / (drain_temperature.Temperature - feed_temperature.Temperature) * Exergetic_Efficiency;

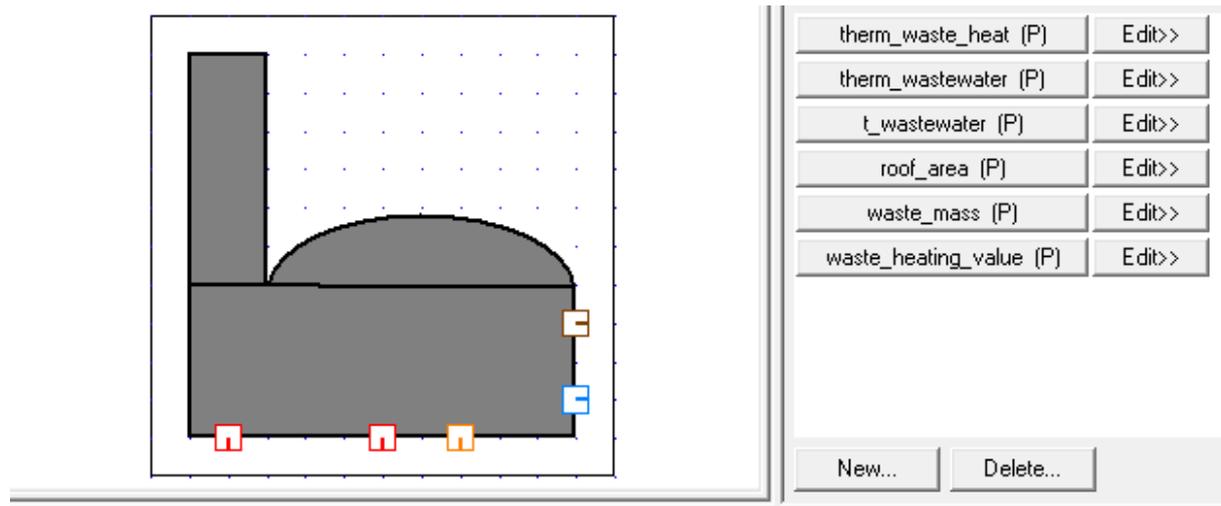
f3: COP = drain_thermal.Thermal_Energy_Q / (drain_thermal.Thermal_Energy_Q - feed_thermal.Thermal_Energy_Q) * Exergetic_Efficiency;
```

6.3.2 Photovoltaik



```
# energy output, 4 connections
f1: feed_area_i3.Roof_Area * solar_irradiation * modul_efficiency / 1000 = drain_electric.Electrical_Energy_W;
```

6.3.3 Industrie



The diagram shows a cross-section of an industrial waste treatment unit. It features a large rectangular tank with a semi-circular roof. A vertical chimney is attached to the left side. The tank is divided into two main sections: a lower section for waste and an upper section for air. A grid of blue dots is visible in the upper section. On the right side of the tank, there are two blue square buttons labeled 'C'. At the bottom of the tank, there are three red square buttons labeled 'H' and one orange square button labeled 'H'. To the right of the tank is a control panel with a list of parameters and their units, each with an 'Edit>>' button. At the bottom of the panel are 'New...' and 'Delete...' buttons.

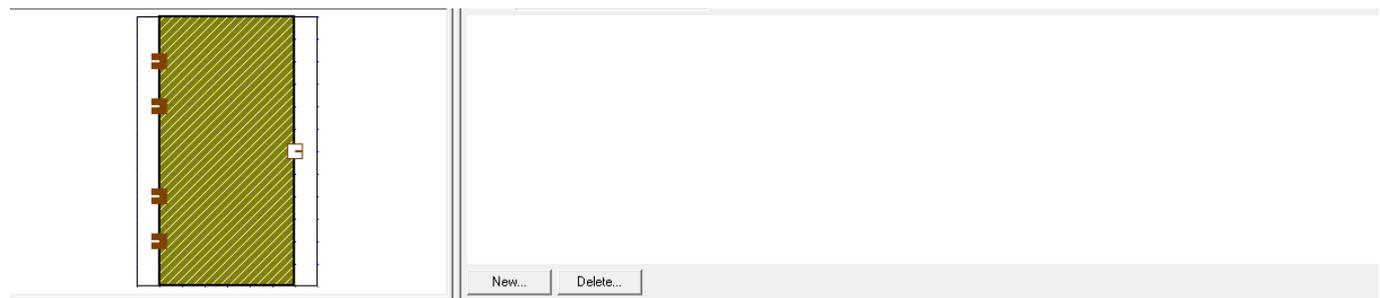
therm_waste_heat (P)	Edit>>
therm_wastewater (P)	Edit>>
t_wastewater (P)	Edit>>
roof_area (P)	Edit>>
waste_mass (P)	Edit>>
waste_heating_value (P)	Edit>>

New... Delete...

Übertrag Werte

```
f1: roof_area = drain_roof.Roof_Area;
f2: drain_waste.mass = waste_mass;
f3: drain_waste.heating_value = waste_heating_value;
f4: drain_temperature.Temperature = t_wastewater;
f5: drain_thermal_ww.Thermal_Energy_Q = therm_wastewater;
f6: drain_thermal_wh.Thermal_Energy_Q = therm_waste_heat;
```

6.3.3.1 Abfalllager



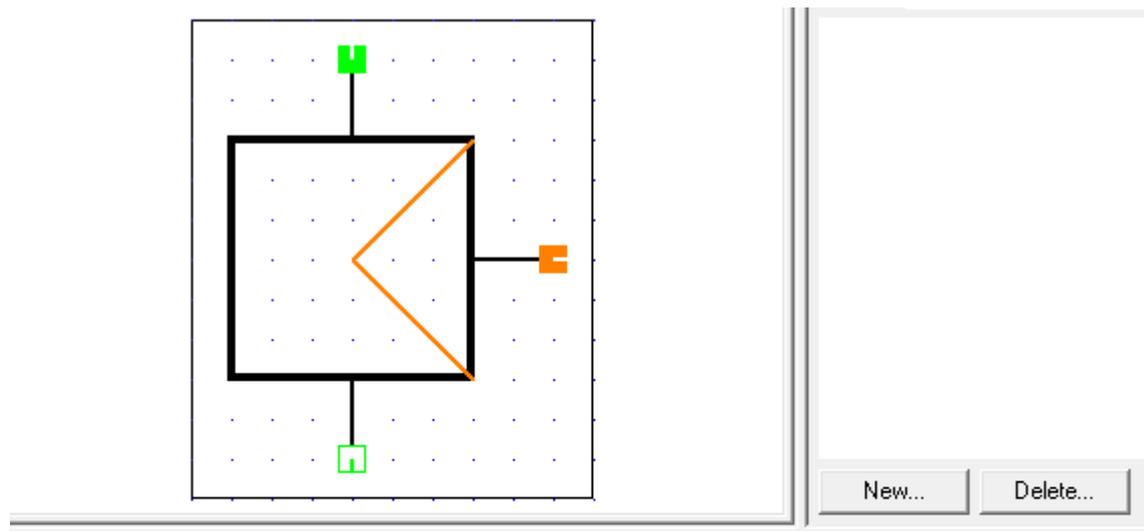
The diagram shows a vertical cylindrical waste storage silo. The silo is filled with a hatched pattern representing waste. On the left side, there are four red square buttons labeled 'H'. On the right side, there is one blue square button labeled 'C'. Below the silo is a control panel with 'New...' and 'Delete...' buttons.

New... Delete...

```
# mass balance
f1: feed_waste_i_1.mass + feed_waste_i_2.mass + feed_waste_i_3.mass + feed_waste_i_4.mass = drain_waste_i.mass;

# average heating value
f2: feed_waste_i_1.mass / (feed_waste_i_1.mass + feed_waste_i_2.mass + feed_waste_i_3.mass + feed_waste_i_4.mass) * feed_waste_i_1.heating_value +
    feed_waste_i_2.mass / (feed_waste_i_1.mass + feed_waste_i_2.mass + feed_waste_i_3.mass + feed_waste_i_4.mass) * feed_waste_i_2.heating_value +
    feed_waste_i_3.mass / (feed_waste_i_1.mass + feed_waste_i_2.mass + feed_waste_i_3.mass + feed_waste_i_4.mass) * feed_waste_i_3.heating_value +
    feed_waste_i_4.mass / (feed_waste_i_1.mass + feed_waste_i_2.mass + feed_waste_i_3.mass + feed_waste_i_4.mass) * feed_waste_i_4.heating_value =
    drain_waste_i.heating_value;
```

6.3.4 Temperaturübertrag

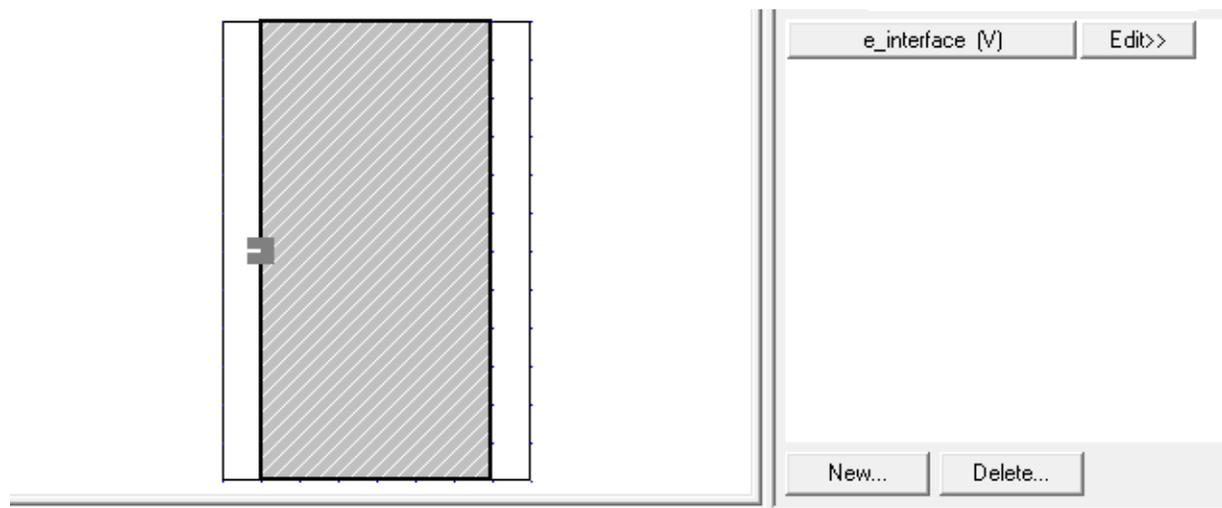


```
# temperature transfer
f1: feed_temperature.Temperature = drain_stream.t;
f2: feed_stream.t = feed_temperature.Temperature;

# pressure transfer
f3: feed_stream.p = drain_stream.p;

# mass transfer
f4: feed_stream.mass = drain_stream.mass;
```

6.3.5 Stromspeicher



```
f1: feed_electricity.Electrical_Energy_W = e_interface;
```

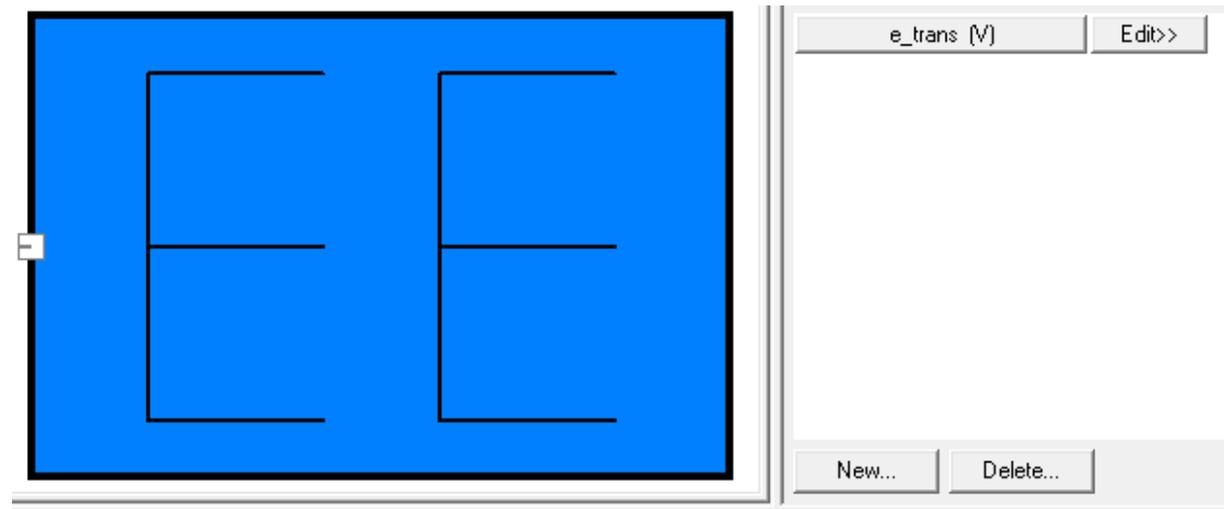
6.3.6 MVA

```
f1: feed_waste.mass * feed_waste.heating_value * thermal_efficiency = drain_heat.Thermal_Energy_Q;  
f2: drain_temperature.Temperature = temperature_supply;
```

6.3.7 Wärme +/-

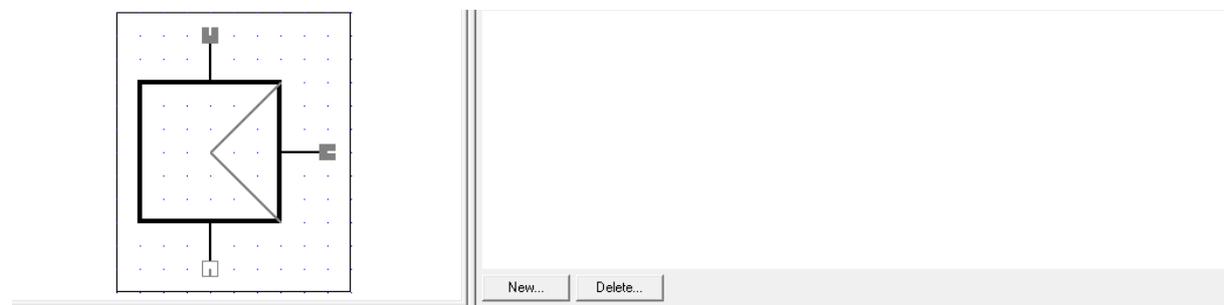
```
# Übertrag externe Wärme ans FW-Netz  
f_1: feed_stream.mass * feed_stream.h + q_trans = drain_stream.mass * drain_stream.h;  
# Massenerhaltung  
f_2: feed_stream.mass = drain_stream.mass;  
# Druckerhaltung  
f_3: feed_stream.p = drain_stream.p;
```

6.3.8 Strom +/-



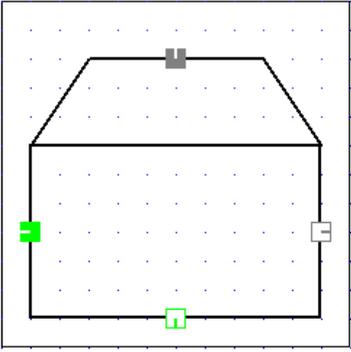
```
# einbringen von Strom in das Netz  
f_1: drain_electricity_external.Electrical_Energy_W = e_trans;
```

6.3.9 Stromübertrag



```
# Stromübertrag  
f_1: feed_electricity.Electrical_Energy_W + feed_electricity_extern.Electrical_Energy_W = drain_electricity.Electrical_Energy_W;
```

6.3.10 Stadt



delta_p (P)	Edit>
q_trans (W)	Edit>
e_trans (P)	Edit>

New... Delete...

```
f_mass:    feed.mass = drain_stream.mass;

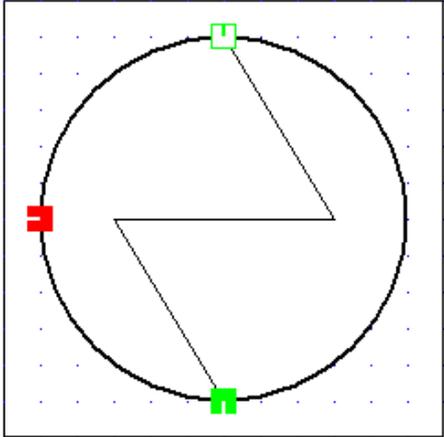
# heat is removed from the process
f_heat:    feed.mass * feed.h - q_trans = drain_stream.mass * drain_stream.h;

f_p: feed.p - delta_p = drain_stream.p;

# electricity is removed from the process
f_electricity: feed_electricity.Electrical_Energy_W - e_trans = drain_electricity.Electrical_Energy_W;

# test conditions
t_q_trans: test (q_trans >= 0.0) warning "q_trans negative";
t_delta_p: test (delta_p >= 0.0) warning "delta_p negative";
t_e_trans: test (e_trans >= 0.0) warning "e_trans negative";
```

6.3.11 Wärmeübertrag



New... Delete...

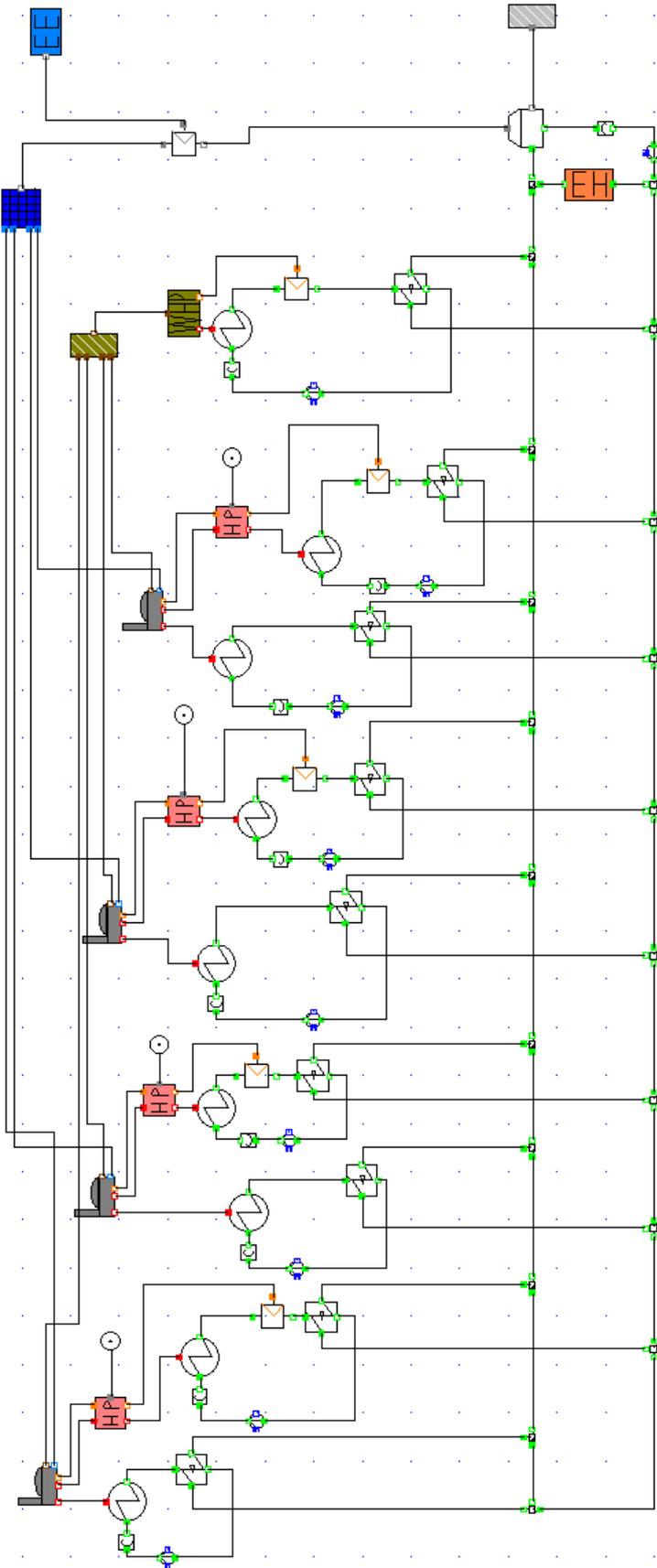
```
f_mass:    feed.mass = drain.mass;

# heat is added to the process
f_energy:  feed.mass*feed.h + feed_therm.Thermal_Energy_Q = drain.mass*drain.h;

f_2: feed.p = drain.p;
```

6.4 Gesamtsystem

Anhand der Standardkomponenten und der selbst entwickelten Komponenten wurde ein repräsentatives „Industrie-Stadt“ Modell entwickelt.





Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)