

# ENERGIENUTZUNGSPLAN FÜR DIE PIONIER- UND PRINZ-LEOPOLD-KASERNE SOWIE FÜR DIE ANGRENZENDEN GEWERBEFLÄCHEN

Endbericht  
30.09.2020

LUXGREEN Climadesign  
info@luxgreen.de  
Andreasstraße 23  
93059 Regensburg

Gefördert durch:

Bayerisches Staatsministerium für  
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie



Projektträger:

**bayern**  **innovativ**



## Verfasser

LUXGREEN Climadesign  
Andreasstraße 23  
93059 Regensburg  
Telefon +49-(0) 941-462 913 21  
Telefax +49-(0) 941-600 932 56

vertreten durch:

Dipl.-Ing. Arch Tobias Saller, M.Sc (TUM) Climadesign  
Matthias Trauner, M.Sc (OTH)  
Andreas Schnabl, M.Sc (OTH)  
Moritz Vießmann, M.Eng (HSA)  
Thomas Mühlberger, M.Sc (OTH)  
Dr. Michael Riederer

Consolinno Energy GmbH  
Franz-Mayer-Straße 1  
93053 Regensburg  
Telefon +49-(0) 941-462 975 21

vertreten durch:

Klaus Nagl, Dipl.-Phys., M,Sc  
Fabian Eckert, M.Sc

TGA Projektierung GmbH  
Langobardenstraße 2  
93053 Regensburg  
Telefon +49-(0) 941-784 992 10  
Telefax +49-(0) 941-784 992 120

vertreten durch:

Oliver Stier, Dipl.-Ing.

### Auftraggeberin

Stadt Regensburg  
Amt für Stadtentwicklung  
Neues Rathaus  
Minoritenweg 10  
93047 Regensburg  
Telefon +49-(0) 941-507-1662  
Telefax +49-(0) 941-507-1669



Ansprechpartner  
Dipl.-Geogr. Armin Mayr  
Tomas Hefter, Geograph M. A.

### Quartier

Ehemalige Pionier- und Prinz-Leopold-Kaserne Regensburg<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Wie markierter Umgriff auf Deckblatt, Quelle: Aerowest GmbH, Luxgreen Climadesign

# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis .....                              | 4  |
| Abkürzungsverzeichnis .....                           | 7  |
| 1 Einführung .....                                    | 8  |
| 1.1 Anlass und Ausgangslage der Untersuchung .....    | 8  |
| 1.2 Methodik und wissenschaftliche Grundlage .....    | 9  |
| 1.3 Klimawandel als zentraler Handlungsauslöser ..... | 10 |
| 1.4 Bestandsanalyse .....                             | 12 |
| 2 Bauliche Rahmenbedingungen .....                    | 13 |
| 2.1 Rahmenbedingung Wohnungsbau .....                 | 14 |
| 2.2 Rahmenbedingung Grundschule .....                 | 14 |
| 2.3 Rahmenbedingung Sport-Park Ost .....              | 15 |
| 3 Energieverbrauchssektoren .....                     | 16 |
| 3.1 Wohnen .....                                      | 16 |
| 3.1.1 Heizen .....                                    | 17 |
| 3.1.2 Stromverbrauch .....                            | 17 |
| 3.1.3 Kühlung .....                                   | 17 |
| 3.1.4 Hilfsenergie .....                              | 17 |
| 3.1.5 Mobilität .....                                 | 18 |
| 3.2 Gewerbe .....                                     | 19 |
| 3.2.1 Heizen .....                                    | 19 |
| 3.2.2 Stromverbrauch .....                            | 19 |
| 3.2.3 Kühlung .....                                   | 20 |
| 3.2.4 Hilfsenergie .....                              | 20 |
| 3.2.5 Mobilität .....                                 | 20 |
| 4 Potenzialanalyse .....                              | 21 |
| 4.1 Photovoltaik .....                                | 21 |
| 4.2 Wind .....  | 23 |
| 4.3 Biomasse .....                                    | 23 |
| 4.4 Umweltwärme .....                                 | 23 |
| 4.4.1 Abwasser .....                                  | 23 |
| 4.4.2 Geothermie .....                                | 25 |
| 4.4.3 Luft .....                                      | 27 |
| 4.5 Fazit Energiepotenziale PLK .....                 | 28 |

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5     | Quartiersbilanzierung .....   | 29 |
| 5.1   | Städtische Gebäudestandards.....  | 29 |
| 5.2   | Typologie-Studie.....   | 30 |
| 5.3   | Ergebnisse der Bilanzierung .....   | 32 |
| 6     | Einsparmöglichkeiten .....  | 34 |
| 6.1   | Energieeinsparung durch Verbrauchsoptimierung und bedarfsgerechter Wärmeverteilung.....               | 34 |
| 6.2   | Energieeinsparung durch perspektive Heizungsteuerung basierend auf thermodynamischer Simulation ..... | 36 |
| 7     | Wärmeerzeugung und -Verteilung .....  | 40 |
| 7.1   | Wärmeerzeugung.....   | 41 |
| 7.1.1 | BHKW .....  | 42 |
| 7.1.2 | Wärmepumpen-System .....  | 43 |
| 7.1.3 | Power-to-X-System .....   | 44 |
| 7.2   | Wärmeverteilkonzept .....   | 46 |
| 7.2.1 | Energiezentralen.....   | 47 |
| 7.2.2 | Energetische Verknüpfung des ersten Bauabschnitts.....  | 50 |
| 7.2.3 | Aufbau des 3-Leiter-System .....  | 51 |
| 7.2.4 | Steuerung von Wärmenetzen.....  | 54 |
| 7.2.5 | Abwicklung.....   | 56 |
| 7.3   | Kälteerzeugung und Verteilung.....  | 57 |
| 8     | Stromerzeugung und Verteilung .....   | 60 |
| 8.1   | Ausführung des Stromnetzes.....   | 60 |
| 8.1.1 | Erzeugungsanlagen .....   | 61 |
| 8.1.2 | Steuerung und Regelung des Wärmenetzes.....   | 61 |
| 8.1.3 | Netzdimensionierung .....   | 62 |
| 8.1.4 | Kundenanlage.....   | 63 |
| 8.2   | Energie-Überschuss-Austausch.....   | 64 |
| 8.2.1 | Direktvermarktung im Marktprämienmodell.....  | 65 |
| 8.2.2 | Sonstige Direktvermarktung.....   | 66 |
| 8.2.3 | Netzanschluss .....   | 67 |
| 8.2.4 | Messung und Messkonzepte .....  | 68 |
| 8.2.5 | Direktleitung.....  | 69 |
| 9     | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....  | 71 |
| 9.1   | Kostenermittlung.....   | 71 |
| 9.2   | Fazit Kosten.....   | 78 |

---

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 9.3  | Einbindung von Förderungen der Bundesregierung.....                | 79  |
| 10   | Ökologie.....  | 80  |
| 10.1 | Emissionen und Graue Energie bei der Erstellung von Gebäuden ..... | 80  |
| 10.2 | Bewertungsbasis und Handlungsvorschläge .....                      | 81  |
| 11   | Umsetzungshinweise .....   | 82  |
| 12   | Fazit und Ausblick.....  | 84  |
| 13   | Anhang.....  | 87  |
| 13.1 | Anhang 1: Rahmenplan Stadt Regensburg PLK.....                     | 87  |
| 13.2 | Anhang 2: Globalstrahlung in Bayern.....                           | 88  |
| 13.3 | Anhang 3: Energieverbrauchssektoren, clusterweise.....             | 89  |
| 13.4 | Anhang 4: Thermodynamische Simulation .....                        | 103 |
| 13.5 | Anhang 5: Ausführung des Stromnetzes .....                         | 111 |
| 13.6 | Anhang 6: Clusterbilanzierung .....                                | 117 |
|      | Abbildungsverzeichnis.....   | 118 |
|      | Tabellenverzeichnis .....  | 121 |
|      | Literaturverzeichnis .....   | 122 |

# Abkürzungsverzeichnis

|                |   |
|----------------|---|
| PLK            | Prinz Leopold Kaserne                     |
| BHKW           | Blockheizkraftwerk                        |
| EEG            | Erneuerbare-Energien-Gesetz               |
| kWh            | Kilowattstunde                            |
| kW             | Kilowatt                                  |
| m <sup>2</sup> | Quadratmeter                              |
| kWp            | Kilowatt Peak                             |
| KWK            | Kraft-Wärme-Kopplung                      |
| EK             | Energiekonzept                            |
| EVU            | Energieversorgungsunternehmen             |
| GWh            | Gigawattstunden                           |
| IPCC           | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| JAZ            | Jahresarbeitszahl                         |
| LCA            | Life cycle analysis - Lebenszyklusanalyse |
| MSR            | Elektrisches Messen, Steuern und Regeln   |
| PtX            | Power-to-X, Stromüberschussumwandlung     |
| WP             | Wärmepumpe                                |
| PV             | Photovoltaik                              |
| SPO            | Sport-Park Ost Regensburg                 |
| WP             | Wärmepumpe                                |
| WEÄ            | Wohneinheits-Äquivalente                  |
| PPD            | Predicted Percentage Dissatisfied Index   |
| PMV            | Predicted Mean Vote Index                 |
| PI-Regler      | Proportional-Integral-Regler              |
| NGF            | Nettogrundfläche                          |
| BGF            | Bruttogrundfläche                         |
| nawaros        | Nachwachsende Rohstoffe                   |

# 1 Einführung

## 1.1 Anlass und Ausgangslage der Untersuchung

Die Prinz-Leopold-Kaserne, im Inneren Südosten der Stadt Regensburg gelegen, wurde bis 2009 von der Bundeswehr als Standort für zahlreiche Logistikeinheiten genutzt. Im Zuge der Standortauflassung und des Abzugs der Bundeswehr bzw. der Auflösung der Truppenteile konnte nach dem Erwerb des ehemaligen Neuen Technischen Bereichs (Entwicklung gemäß Bebauungsplan Nr. 164) nun auch der restliche Teil von der Stadt Regensburg erworben werden. Als letzte bedeutende innerstädtische Konversionsfläche besitzt die Fläche der Prinz-Leopold-Kaserne, zusammen mit den angrenzenden Gewerbeflächen mit einer Größe von insgesamt ca. 25,7 ha, ein hohes Potenzial für die Entwicklung des östlichen Stadtgebietes und soll nun einer urbanen, gemischten Nutzung zugeführt werden. Perspektivisch trifft dieses Potenzial auch auf die direkt nördlich angrenzende ehemalige Pionierkaserne zu, die mittelfristig noch vom Freistaat Bayern beansprucht wird. Diese umfasst eine Größe von ca. 7,6 ha und wurde ebenfalls in das Wettbewerbsgebiet für einen städtebaulichen Ideenwettbewerb einbezogen. Der Umgriff des Wettbewerbs umfasst beide Kasernenflächen sowie weitere direkt angrenzende Teilflächen im Eigentum Dritter. Insgesamt ergibt sich eine Gesamtgröße von ca. 33,3 ha [1]. Das Untersuchungsgebiet (siehe Abbildung Deckblatt) für das hier vorliegende Konzept ist deckungsgleich mit dem Umgriff des städtebaulichen Ideenwettbewerbs.

Das Büro Luxgreen Climadesign wurde für die Erstellung eines Energiekonzeptes (EK) bzw. quartiersbezogenen Energienutzungsplans für die Konversion der Pionier- und Prinz-Leopold-Kaserne sowie für die angrenzenden Gewerbeflächen (im Folgenden auch als PLK bezeichnet) beauftragt. Wichtige Partner für die Erarbeitung des EK waren die OTH Regensburg, Consolinno Energy und TGA Projektierung. Bei der Einarbeitung aktueller Forschungsergebnisse und zukünftiger Forschungsschwerpunkte wurde die OTH von Herrn Prof. Dr. Steffens und Herrn Prof. Dr. Dawoud vertreten. Consolinno unterstützte die Erstellung des Konzeptes besonders in den Themen KI-gesteuerte Gebäude, netzdienliche Sektorenkopplung und Quartiersstrom. TGA begleitete das Vorhaben in der Bewertung der dynamischen Wärmebereitstellung, Verteilung und Speicherung. Das Energiekonzept ist unabhängig vom Planungsstand der städtebaulichen Entwicklungen (Wettbewerb) gültig und basiert auf einem Rahmenplan aus dem Jahr 2019, welcher im Anhang 1 zu betrachten ist. Die Anforderungen an die Entwicklung der PLK durch den Auftraggeber Stadt Regensburg wurden wie folgt in einem Stadtratsbeschluss von 2019 festgelegt:

### *Leitziele für die Entwicklung eines Innovationsquartiers*

- Das Areal der ehemaligen Prinz-Leopold-/Pionier-Kaserne soll als zukunftsweisendes Innovationsquartier (IQ) entwickelt werden, welches bezahlbaren Wohnraum und attraktive Gewerbeflächen schafft, die Ziele des Leitbilds Energie und Klima konsequent umsetzt und dabei beispielhaft für eine nutzungsgemischte und soziale Quartiersentwicklung steht.
- Das Innovationsquartier soll als energetisch optimiertes Viertel entwickelt werden. Bei Neubauten wird der Passivhausstandard und in der Bestandssanierung der Niedrigenergiestandard angestrebt. Dabei wird gleichzeitig Wert auf nachhaltige Baumaterialien, innovative Haustechnik, ökologische Energieerzeugung (bspw. Solarenergie, Geothermie, Wärmerückgewinnung) und eine kurze Bauzeit gelegt.
- Die Energieversorgung der gesamten Prinz-Leopold-/Pionier-Kaserne soll weitestgehend klimaneutral erfolgen. Auf die Nutzung fossiler Energieträger soll deshalb möglichst verzichtet werden.
- Für das Innovationsquartier soll ein eigenes Mobilitäts- und Parkraumkonzept entwickelt werden. Als autoreduziertes „Quartier der kurzen Wege“ soll das Viertel optimale Bedingungen für den Fuß- und Radverkehr sowie eine gute Nahversorgung bieten.
- Die Möglichkeit der gemeinsamen Nutzung innovativer Mobilitätsangebote sowie Räume der Begegnung und des Engagements sollen den beispielhaften Charakter des Quartiers für zukünftige Bauprojekte unterstreichen [2]

## 1.2 Methodik und wissenschaftliche Grundlage

Das vorliegende Energiekonzept für das Areal der ehemaligen Pionier- und Prinz-Leopold-Kaserne orientiert sich methodisch an den Vorgaben zur Erstellung eines Energienutzungsplans. Ausgehend von einer Bestands- und Potenzialanalyse wurden verschiedenen Optionen für eine möglichst auf erneuerbaren Energien basierende und CO<sub>2</sub>-neutrale Wärme- und Stromversorgung für das Untersuchungsgebiet entwickelt. Außerdem wurden Potenziale zur Energieeinsparung sowie zur effizienten Steuerung und Verteilung der Wärmeenergie untersucht und konkrete Umsetzungsvorschläge für die Entwicklung des neuen Stadtquartiers gemacht. Näher betrachtet wurden auch die Möglichkeiten zur Ausgestaltung des Stromnetzes und einer möglichen Sektorenkopplung. Ein weiterer Baustein der Untersuchung ist eine erste Wirtschaftlichkeitsrechnung des vorgeschlagenen Versorgungskonzepts. Im Verlauf der Untersuchung hat die Stadt Regensburg entschieden, sämtliche Bestandsgebäude auf dem Areal der PLK abzurechnen. In den gebäudebezogenen Betrachtungen spielt das Thema Sanierung deshalb entgegen der ursprünglichen Leistungsbeschreibung des Energiekonzepts keine Rolle, vielmehr wurde bei den Berechnungen von einem sehr hohen energetischen Neubaustandard ausgegangen. Lösungen für die energetische Entwicklung des Gebietes der PLK basieren auf Betrachtungen und Berechnungen mithilfe von thermodynamischer Gebäudesimulation. Hierbei wurden dynamische Randbedingungen, unter

anderem Klimaeinflüsse, Speichermassen und Nutzereinflüsse berücksichtigt. Vergleiche wurden mit relevanten DIN-Normen angestellt und kritisch hinterfragt.

Bei der Erarbeitung des Energiekonzepts konnte das beauftragte Konsortium auf zahlreichen Erkenntnissen des Forschungsprojekts MAGGIE aufbauen. Im Projekt MAGGIE [3] der OTH Regensburg, mit einem Fördervolumen von 3,4 Mio. Euro, war die Stadt Regensburg 2016 für die Auslotung eines geeigneten Quartiers im Hinblick auf die Anwendung der Forschungsinhalte eine starke Verbündete. Auch das Büro Luxgreen Climadesign hat in MAGGIE eine tragende Rolle in der Forschung und Entwicklung, insbesondere der Gebäudesimulation sowie der Bauplanung und Abwicklung inne. Luxgreen hat dabei weiteres Knowhow im Bereich der nachhaltigen Quartiersanierung und Energieversorgung aufgebaut. Dieses wird nun im Zuge der CO<sub>2</sub>-neutralen Quartiers-Energieversorgung direkt angewendet und so Hand in Hand mit den beteiligten Partnern (Consolinno, TGA Projektierung) ein Beitrag zu den Klimazielen der Stadt Regensburg geleistet.

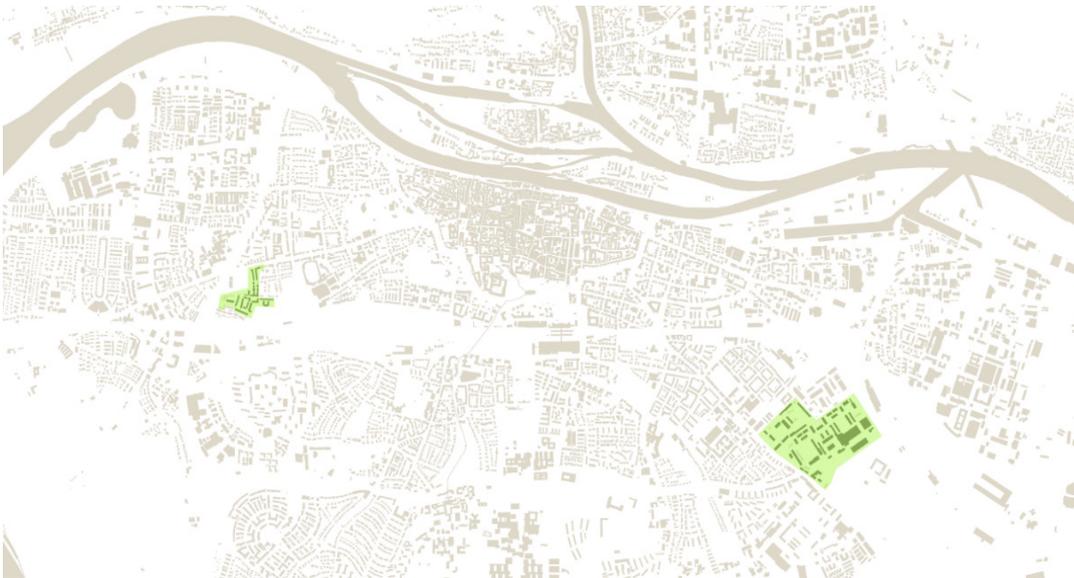


Abbildung 1: Kartografische Darstellung von Regensburg, Markierung der relevanten Stadtgebiete PLK und Margaretenau (MAGGIE-Projekt)

### 1.3 Klimawandel als zentraler Handlungsauslöser

Der anthropogen ausgelöste Treibhauseffekt ist wissenschaftlich nicht zu widerlegen. Bereits im Jahr 2015 hat sich deshalb die Weltgemeinschaft im Rahmen des Pariser Klimaabkommens darauf verständigt, die Erderwärmung nicht stärker als um 1,5-Grad Celsius ansteigen zu lassen. Dabei haben sich erstmals alle Staaten, darunter Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländer, dazu verpflichtet, einen Beitrag zum internationalen Klimaschutz zu leisten. Unter den Vertragspartnern ist auch Deutschland und somit auch die Stadt Regensburg. Die Stadt Regensburg hat sich vor dem Hintergrund des UN-Abkommens von Paris, in ihrem Leitbild Energie und Klima vorgenommen, bis 2050 den (Pro-Kopf) Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stadtgebiet um 95% zu senken [4]. Anhand von

Abbildung 2 werden zwei Temperaturszenarien dargestellt, wie sie durch den IPCC prognostiziert werden. Die graue Kurve zeigt die Temperaturerhöhung bei gleichbleibender Entwicklung im Bereich Emissionen und Energieverbrauch. Für das Szenario der grünen Kurve ist ein Handeln notwendig, im Bereich Bauen und Wohnen deshalb, weil die Gebäude, die wir heute erbauen, eine Lebensdauer von bis zu 70 [5] Jahren haben und somit bis 2090 bestehen bleiben können.

Ein direkter Zusammenhang zwischen Klimaerwärmung und Energieversorgung ergibt sich z. B. bei der Betrachtung der Dimensionierung von Heizungsanlagen. Für deren Auslegung wird die DIN-Norm 12831 [6] angewandt. Links in Abbildung 2 wird hierzu der Betrachtungszeitraum der Temperaturdaten gezeigt, welcher dieser Norm zugrunde liegt (1951-1970) [7]. Die Auslegung von Heizungen auf Basis dieses Zeitraumes stellt eine adäquate Berücksichtigung der Einflüsse des Klimawandels berechtigterweise in Frage. Für eine realistische und zukunftsnahe Betrachtung müssen aktuelle Klimadaten, besser validierte Zukunftsszenarien, herangezogen werden. Dies kann mit Hilfe von dynamischer Gebäudesimulation erreicht werden.

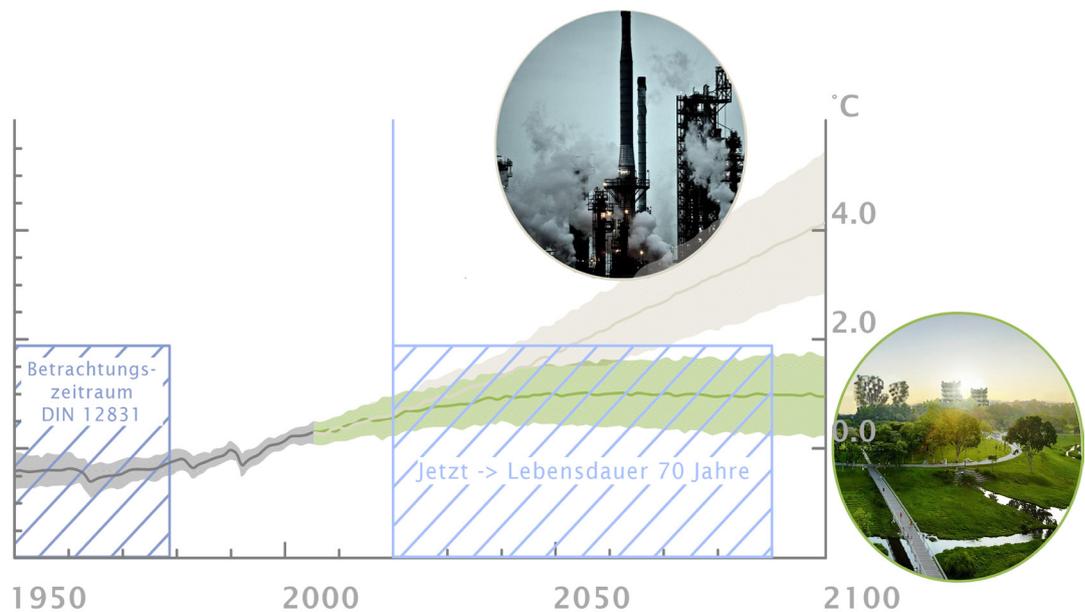


Abbildung 2:  
Temperaturszenarien gemäß  
des IPCC mit und ohne  
drastische Veränderungen  
im Emissionsausstoß

## 1.4 Bestandsanalyse

Im Zuge der Entwicklung der Prinz-Leopold-Kaserne wird ein nahezu vollständiger Abbruch der derzeitigen vorhandenen Gebäude (inkl. Kasernengebäude) durchgeführt. Grundlage dieser Entscheidung waren Untersuchungen des Gebäudebestands durch die Stadtverwaltung Regensburg. Diese haben ergeben, dass die auf dem Gebiet der Prinz-Leopold-Kaserne vorhandenen Gebäude für die zukünftig geplante überwiegende Wohnnutzung nicht geeignet sind, weil sie zahlreiche Bauschäden aufweisen und hinsichtlich ihrer Grundrisse und Statik nur mit erheblichem Aufwand nutzbar wären. Aus diesem Grund wurde in diesem Energiekonzept auf eine energetische Untersuchung des Gebäudebestands verzichtet. Für die energetischen Berechnungen und Simulationen wird deshalb ausschließlich von Neubaugebäuden ausgegangen.

## 2 Bauliche Rahmenbedingungen

Im Endausbau sollen auf dem Areal der ehemaligen Prinz-Leopold-Kaserne laut Ergebnis des städtebaulichen Ideenwettbewerbs einmal bis zu 1.400 neue Wohnungen entstehen. Auf dem angrenzenden Gebiet der früheren Pionierkaserne sind nochmals bis zu 600 Wohneinheiten möglich. Die Umsetzung dieser Baumaßnahmen wird allerdings über einen längeren Zeitraum in mehreren Bauabschnitten erfolgen. Die Bruttogrundfläche geht aus dem städtebaulichen Rahmenplan hervor und betragen für den Wohnbau etwa 180.000 m<sup>2</sup> wohingegen eine Gewerbefläche von rund 130.000 m<sup>2</sup> Bruttogrundfläche entstehen soll.

In einem ersten Bauabschnitt sollen bis 2024 auf dem Areal der ehemaligen Prinz-Leopold-Kaserne mehrere Gebäudekomplexe mit insgesamt ca. 360 Wohneinheiten durch die städtische Wohnbaugesellschaft errichtet werden. Das Energiekonzept wird schwerpunktmäßig die Erstellung der ersten 360 Wohneinheiten der PLK berücksichtigen. Zudem wird untersucht, wie die weiteren Bauabschnitte bei der künftigen Energieversorgung berücksichtigt werden können. Das Konzept für den ersten Bauabschnitt soll deshalb auf die weiteren Bauabschnitte übertragbar sein und sozusagen mit dem Gebiet „mitwachsen“. Das Energiekonzept basiert auf einem Rahmenplan, welcher Anhang 1 zu entnehmen ist. Dieser wurde in Zusammenhang mit dem Energiekonzept auf die wesentlichen Informationen reduziert und für Veranschaulichungen verwendet. Das Energiekonzept ist jedoch unabhängig vom Rahmenplan gültig und kann so flexibel bei Änderungen des städtebaulichen Entwurfs angepasst werden.

Im Folgenden werden die Bebauungen erläutert und die Rahmenbedingungen erklärt. Wie die energetische Verknüpfung dieser gelöst werden kann, wird in Kapitel 7.2.2 näher beschrieben.

## 2.1 Rahmenbedingung Wohnungsbau



Abbildung 3:  
Rahmenplan der PLK  
mit Cluster und  
Baubereiche des 1.  
Baubereichs

Eine der bereits bekannten Randbedingungen ist die Erstellung des ersten Bauabschnittes, welcher bis 2024 abgeschlossen sein soll. Im Zuge dessen ist die Errichtung von 360 Wohneinheiten vorgesehen, die zum Großteil als geförderter Wohnungsbau errichtet werden sollen. Die Energiemengen, welche für die 360 Wohneinheiten erzeugt, beziehungsweise verbraucht werden, können aus der Quartiersbilanzierung in Kapitel 4.5 abgeleitet werden. Als Standort des ersten Bauabschnitts würde sich aus derzeitiger Planungslage der nördliche Bereich der Prinz-Leopold-Kaserne anbieten (vgl. Abbildung 3).

## 2.2 Rahmenbedingung Grundschule

Zusätzlich zur Wohnbebauung ist auch der Bau einer dreizügigen Grundschule in der Prinz-Leopold-Kaserne vorgesehen. Die Planung des Standortes hierfür ist derzeit auf zwei Varianten begrenzt, jedoch zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses des Energiekonzeptes noch nicht abgeschlossen. Allerdings lassen sich Parameter wie die Größe und der damit verbundene Wärmebedarf der geplanten Schule anhand ähnlicher, schon bestehender Grundschulen wie der Grundschule Napoleonstein oder der Grundschule in Prüfening, ableiten. So soll im Gebiet der Prinz-Leopold-Kaserne eine dreizügige Grundschule mit ca. 4.725 m<sup>2</sup> inkl. Turnhalle im Norden des Quartiers entstehen (siehe Abbildung 3). Insgesamt werden, um das Gebäude zu beheizen, pro Jahr voraussichtlich 195.000 kWh Energie benötigt. Der Strombedarf beläuft sich auf etwa 70.000 kWh

pro Jahr. Die Herausforderung hierbei wird sein, diesen Gebäudekomplex in das Energiekonzept mit einzuarbeiten.

### 2.3 Rahmenbedingung Sport-Park Ost

Der Leichtathletikstandort Regensburg soll weiterhin nachhaltig gestärkt werden. Zudem besteht bei den städtischen Bädern Handlungsbedarf. Vor allem der bauliche Zustand des städtischen Hallenbades in der Gabelsberger Straße weist ernstzunehmende Mängel auf. So hat sich die Stadt Regensburg dazu entschieden, neben der geplanten Grundschule ein neues Sportzentrum, den Sport-Park Ost (SPO), zu errichten. Der Sportpark soll nordöstlich der PLK mit dem Neubau eines Hallenbades, mit ca. 3.000 m<sup>2</sup> Bruttogrundfläche und einer Leichtathletik-Halle, mit ca. 7.800 m<sup>2</sup> Bruttogrundfläche gebaut werden (siehe Abbildung 3). Es wird deshalb auch geprüft, in welcher Form diese Gebäude in das Energiekonzept der PLK integriert werden können, um so Synergieeffekte zu erzeugen.

### 3 Energieverbrauchssektoren

Der Gesamtenergiebedarf für die PLK liegt bei ca. 12,2 GWh/a. Dieser Energiebedarfs-Wert ergibt sich aus den Berechnungen der Quartiersbilanzierung und ist detailliert in Kapitel 5 ausgeführt. Beispielhaft ist in Abbildung 4 der jährliche Energiefluss des Cluster A dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass in den Wintermonaten eine Unterdeckung und in den Sommermonaten eine Überdeckung der Energie stattfindet. Dieser Effekt wird bei der den Energieerzeugungsvarianten (Kapitel 7.1) nochmals aufgegriffen und ausführlicher erörtert.

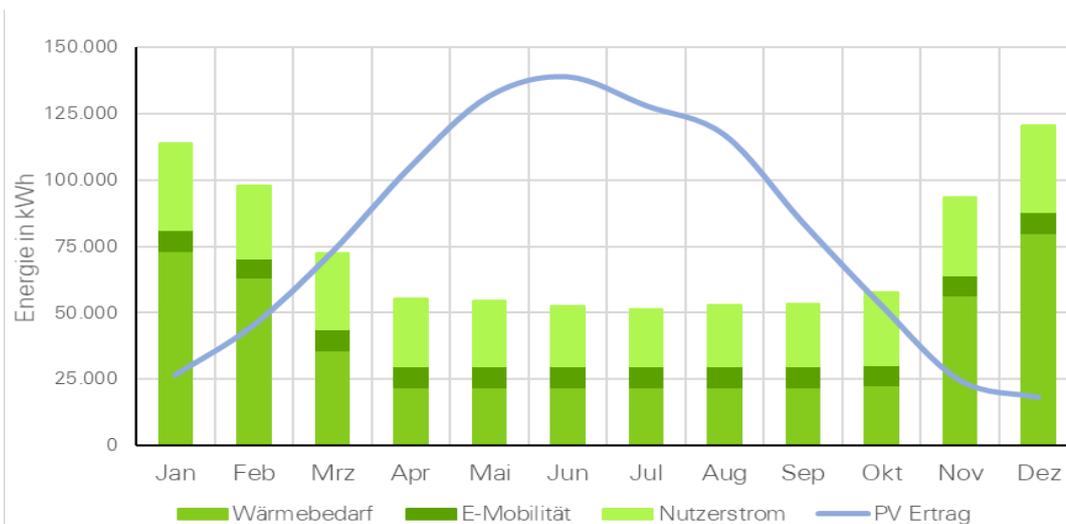


Abbildung 4:  
Energieflüsse des  
Cluster A (Wohnen  
ohne Kühlung)

Der errechnete Energiefluss setzt sich durch die verschiedenen Energieverbrauchssektoren und deren Teilenergiebereiche zusammen und soll im Folgenden aufgegliedert und Randbedingungen der Untersuchungen erläutert werden

#### 3.1 Wohnen

Im Jahr 2010 ergab eine Zählung rund 21.000 Wohngebäude und ca. 82.000 Wohnungen [8]. Bei der üblichen Energieverteilung entspricht das einem Gesamtenergiebedarf der Privathaushalte von 1.641 GWh pro Jahr [9]. Dieser lässt sich weiter aufteilen in die Teilenergiebereiche Heizen, Strom, (Kühlung), Hilfsenergie und Mobilität

Zum Vergleich: Im ausgebauten Zustand beträgt die Einwohnerzahl der Pionier- und Prinz-Leopold-Kaserne ca. 3.600 Menschen, verteilt auf rund 2.000 Wohneinheiten. Der Energiebedarf für den Sektor Wohnen liegt bei etwa 7,05GWh/a und ergibt einen Anteil von 58 % des Gesamtenergiebedarfs des Areals.

### 3.1.1 Heizen

Der in Regensburg erfasste Wärmebedarf betrug im Jahr 2012 insgesamt 1.617 GWh. Dieser wurde zu rund 80 % durch den Energieträger Erdgas bereitgestellt und davon ca. 54 %, das entspricht 864.000 MWh/a, für das private Wohnen [9]. Der Pro-Kopf-Energieverbrauch liegt demnach bei rund 5.750 kWh/a.

Die PLK wurde für eine Wärmebedarfsbilanzierung in Sektoren und Cluster unterteilt. Die Energiebedarfe wurden in Simulationen parametrisch berechnet und anschließend in einem Bottom-Up Prinzip für die Cluster ermittelt. Durch Einsatz modernster und hochwertigster Gebäudehüllen (Kapitel 5.1) sowie Gebäudetechnik (6) soll in der PLK der Wärmebedarf pro Einwohner lediglich 1.450 kWh betragen, was damit etwa einem Viertel des Regensburger Durchschnitts entspricht.

### 3.1.2 Stromverbrauch

Der Verbrauch an Strom betrug 2012 in Regensburg 1.045GWh. [10] Bereits ein Anteil von 9,4 % (113 GWh) wird über eigene Anlagen durch erneuerbare Energien erzeugt [11]. Das private Wohnen verursachte einen Verbrauch von 204.000 MWh Strom (~17% des Gesamtverbrauchs). Der Durchschnitt des Haushaltsstromverbrauchs pro Kopf lag 2012 in Regensburg bei 1.216 kWh, bzw. bei 1.354 kWh pro Einwohner mit Hauptwohnsitz. Im Vergleich mit dem bundesweiten Verbrauch von 1.400 kWh/a ist der Wert vergleichsweise gering [9]. In der PLK soll unter anderem durch effiziente Technik, der Strombedarf pro Kopf auf ca. 1.000 kWh/a reduziert werden und entspricht einem geringen Verbrauch gemäß des Stromspiegels Deutschland 2018. [12]

### 3.1.3 Kühlung

Kühlung wird in Zukunft klimawandelbedingt vor allem im Sommer einen immer höheren Stellenwert einnehmen. Aktuell ist eine Kühlung der Wohngebäude in der PLK nicht vorgesehen. Bei der Detailplanung und Ausführung sollte jedoch die Möglichkeit der nachträglichen Aufrüstung berücksichtigt werden. Beispielsweise ist das untersuchte 3-Leiter-System perspektivisch in der Lage einen Leitungsstrang für die Kühlung bereit zu stellen. Weitere Informationen werden dazu in Kapitel 7.3 gegeben.

### 3.1.4 Hilfsenergie

Zu Hilfsenergien zählen elektrische Energien welche direkt mit der Versorgung eines Gebäudes mit Raumwärme und Warmwasser in Verbindung stehen. Darunter fallen Stromverbräuche für Hilfsgeräte wie Pumpen, Ventilatoren und elektrisch betriebene Regeleinrichtungen. Sie werden beim Vergleich

unterschiedlicher Versorgungssysteme mit herangezogen. Hilfsenergien werden üblicherweise aus mittleren jährlichen Leistungen und jährlichen Laufzeiten berechnet. Aus eigenen Simulationen geht hervor, dass Hilfsenergien bei Wohngebäuden mit hocheffizienter Technik einen geringen Anteil (<5%) einnehmen. [13] Deshalb wurde dieser Bedarf mit in den Heizenergiebedarf eingerechnet (Kapitel 5).

### 3.1.5 Mobilität

Im Jahr 2012 waren in der Stadt Regensburg insgesamt 86.389 Kraftfahrzeuge zugelassen, welche eine Gesamtfahrleistung von ca. 1,8 Mrd. km pro Jahr erreichten und dabei ca. 1.239 GWh Endenergie verbrauchten. Dabei verteilt sich diese zu 53 % auf gewerbliche PKW und zu 46 % auf private PKW. Im privaten Sektor waren 2012 ca. 55.700 PKWs zugelassen, legten eine Gesamtfahrleistung von 1.529 Mio. km zurück und verbrauchten dabei eine Gesamtenergiemenge von 569 GWh. Für das Mobilitätskonzept der PLK werden jedoch andere, zukunftsweisende Maßstäbe definiert und verfolgt. [8, 9] Unter anderem auch die Optimierung und Anpassung der Kraftfahrzeugnutzung. Derzeitig weist Regensburg einen Stellplatzschlüssel von 0,68 (Fahrzeugstellplätze pro Wohneinheit) auf. Bei vergleichbaren Bauprojekten, wie beispielsweise dem Stadtentwicklungsvorhaben „HafenCity“ in Hamburg, oder der „WagnisART“ in München, sollen Werte von 0,4 [14] und 0,5 [15] erreicht werden. So sollen, durch Einführen von „Mehrparteien-Fahrzeugen“ die Anzahl an PKW pro Wohneinheit, sowie der Bedarf an Stellplätzen deutlich verringert werden. Durch diese Fahrzeug- und Stellplatzreduzierung, sowie der damit verbundenen stark reduzierten Fahrstrecke pro Tag entsteht im Betrieb eine enorme Ersparnis im Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Weiterhin wird durch den niedrigeren Stellplatzschlüssel ein Großteil an grauer Energie, die vor allem beim Errichten von Tiefgaragen verbraucht wird, eingespart. Für die PLK wird für die weiteren Berechnungen ein Stellplatzschlüssel von 0,6 pro WE und eine Tagesleistung von 15,1 km pro Pkw festgelegt und in der Umsetzung empfohlen. Das

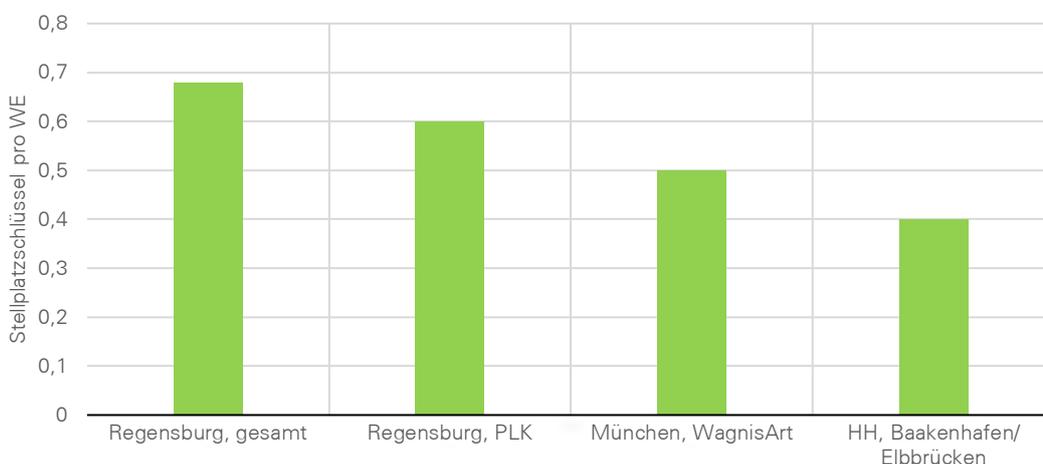


Abbildung 5:  
Stellplatzschlüssel der  
PLK und der Vergleich  
mit weiteren Beispielen

Mobilitätskonzept in der PLK basiert auf Elektromobilität, worauf sich auch Energiebedarfe beziehen. Abbildung 5 zeigt den Vergleich aller eben genannten Stellplatzschlüssel. Es ist zu erkennen, dass der für die PLK angesetzte Stellplatzschlüssel unter dem der Stadt Regensburg liegt, jedoch in Hinblick auf den Wert der Fahrzeugstellplätze pro Wohneinheit in Hamburg noch Potential vorhanden ist.

Es empfiehlt sich außerdem eine hochwertige Erschließung für Fahrräder, wodurch die Attraktivität dieser erhöht und die PKW-Nutzung drastisch verringert werden kann. [16]

## 3.2 Gewerbe

Im Wettbewerbsgebiet sollen im Sinne eines nutzungsgemischten Quartiers auch ausreichend Flächen für verschiedene gewerbliche Nutzungen vorgesehen und sowohl reine Gewerbegebiete als auch gemischte Bauflächen für Wohnen und nichtstörende gewerbliche Nutzungen planerisch sinnvoll im Gebiet angeordnet werden.

Die gewerbliche Nutzung soll dabei nicht nur die Funktion einer Schallschutzbebauung entlang der stark lärmbelasteten Verkehrswege erfüllen, sondern auch zu einer Belebung des gesamten Stadtviertels und zur Attraktivität des Gewerbestandorts Regensburg beitragen. [1]

Mit knapp 53 % entfällt der größte Teil des Energieverbrauchs von Regensburg auf die Wirtschaft. So wurden 2012 für Strom, Mobilität und Heizen zusammen 2.164 GWh verbraucht [9]. In der PLK beträgt der Energiebedarfs-Anteil des Gewerbes ca. 42 % mit 5,16 GWh/a.

### 3.2.1 Heizen

Für das Beheizen von Gewerbe und Industrie musste laut Energienutzungsplan im Jahr 2012 eine Energiemenge von 627.000 MWh aufgebracht werden. Auf ganz Regensburg bezogen ergibt das einen Anteil von knapp 39% [9]. Hierbei muss erwähnt werden, dass diese Energie nur für das Temperieren der Räume ohne Bereitstellen von Trinkwarmwasser verwendet wurde. Für die PLK wird angenommen, keine zentrale Brauchwassererwärmung zu verwenden, wodurch eine erhebliche Menge an Energie eingespart werden kann. Dies zeigt sich auch in Hinblick auf die Bilanzierung in Kapitel 5.

### 3.2.2 Stromverbrauch

Das Regensburger Gewerbe benötigt mit 876.000 MWh/a Strom 71% des Gesamtverbrauchs, 13% entfallen auf öffentliche Einrichtungen. [9] Der hohe Energieverbrauch ist auf einen großen Anteil an industriellen Strukturen

zurückzuführen. In der PLK soll Gewerbe umgesetzt werden, das überwiegend durch Bürostrukturen geprägt ist und somit im Verhältnis von deutlich geringeren Energieverbräuchen ausgegangen werden kann (Kapitel 5). Vor allem der Stromverbrauch und die Berücksichtigung von nutzungsbedingten Lastgängen ist für eine detailliertere Planung der Gewerbe-Gebäude notwendig, um dynamische Berechnungen durchführen zu können.

### 3.2.3 Kühlung

Die Kühlung der Gewerbegebäude ist zwingend notwendig für die Behaglichkeit und die Funktion der Gebäude (u.a. Serverräume oder Lebensmitteleinzelhandel). Es wird empfohlen die Kühlung über Erdsonden und aktivierte erdberührte Bauteile durchzuführen (passive Kühlung). In Sonderfällen kann auf Kompressionskältemaschinen zurückgegriffen werden (aktive Kühlung). Die Kälteübertagung im Raum soll mittels geeigneter Flächen (Böden, Wände und Decken) erfolgen.

Da der Teilenergiebereich der Kühlung besonders vom Klimawandel und dem lokalen Temperaturanstieg abhängt, sollte spätestens bei einer Fachplanung die Gegenwartsbezogenheit der Ergebnisse geprüft und mit Hilfe von dynamischer Gebäudesimulation unter Berücksichtigung von aktuellen und zu erwartenden Klimadaten ermittelt werden.

### 3.2.4 Hilfsenergie

Die Hilfsenergie ist im Sektor Gewerbe deutlich höher als im Wohnsektor. Ausschlaggebend ist dafür die Energie für die Luftförderung durch Ventilatoren. Der Energiebedarf wird deshalb gesondert bilanziert und dargestellt (Kapitel 5).

### 3.2.5 Mobilität

Der für das Wohnen beschriebene Ansatz des Wohnmobilitätskonzeptes wird auch für das Gewerbe angewandt und empfohlen. Um die dort getroffenen Festlegungen übertragen zu können muss definiert werden, dass ein Wohneinheits-Äquivalent 90 m<sup>2</sup> (WEÄ) Büro (Brutto-Grundfläche) entspricht. Somit kann der Stellplatzschlüssel von 0,6 pro Wohneinheits-Äquivalent und eine Tagesleistung von 15,1 km pro PKW verwendet werden. Besonders sollte beim Gewerbe auf eine hochwertige Fahrrad-Erschließung geachtet werden.

## 4 Potenzialanalyse

Um das Ziel der weitestgehenden Klimaneutralität bis 2050 erreichen zu können, muss, bei der Energieversorgung des Gebiets, der Anteil an erneuerbaren Energiequellen auf ein Maximum erhöht und auf den Einsatz von fossilen Energiequellen so weit wie möglich verzichtet werden. Dieses Ziel ist für die Entwicklung der PLK durch den Stadtrat auch genauso vorgegeben worden. Die Studie „Energy Transition in Europe Across Power, Heat, Transport and Desalination Sectors“ zeigt, dass bereits vor 2050 das Ziel sowohl technisch als auch wirtschaftlich erreichbar wäre. [17, 18] Die große Aufgabe wird international, aber auch lokal in der Prinz-Leopold-Kaserne sein, die Potenziale einer erneuerbaren Energieversorgung zu nutzen.

Im nächsten Kapitel wird die Erhebung und anschließende Auswertung der Potenziale für Strom und Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien in Regensburg bzw. im Untersuchungsgebiet beschrieben.

### 4.1 Photovoltaik

Laut Bayerischen Solaratlas des Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie lag der jährliche Energieertrag in Regensburg im Jahr 2015, bezogen auf die horizontale Fläche bei 1130-1150 kWh/m<sup>2</sup>. [19] Laut Messungen des Deutschen Wetterdienstes für das Mittel des Jahres 2019, liegt der Energieertrag in Regensburg bei 1220-1240 kWh/m<sup>2</sup> [17] und damit um 8% höher als noch im Jahr 2015. Diese Entwicklung verdeutlicht nochmals das Potenzial der solaren Energiequelle, welche es zu nutzen gilt.

Für das Gebiet der PLK soll eine PV-Fläche von rund 71.000 m<sup>2</sup> installiert werden. Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass die PV-Fläche 25 % der Bruttogrundfläche eines Gebäudes (Abbildung 6, blau-graue Flächen), gemäß

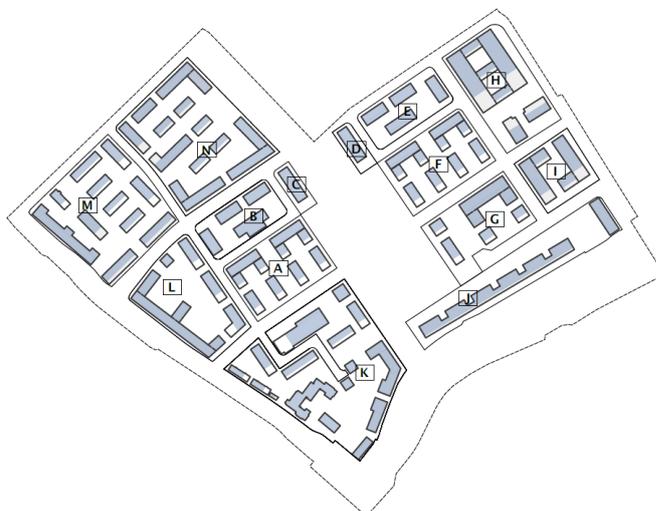


Abbildung 6: Kartografische Darstellung der PV-Flächen im Gesamtquartier PLK

Auslobungstext des städtebaulichen Wettbewerbs, entspricht. Für die Berechnung wurden Pultdächer mit einer Neigung von 12° angenommen, welche möglichst nach Süden ausgerichtet sind. Das Potenzial lässt sich theoretisch weiter erhöhen, wenn z.B. Nebengebäude (Müllaufbewahrung), Schallschutzwälle, Fassaden, Verschattungen und Hochgaragen mit PV-Anlagen ausgestattet werden würde. Da der Rahmenplan diese Informationen nicht beinhaltet, ist eine genauere Quantifizierung des Potenzials nicht möglich.

Die Aufteilung der Flächen für Gewerbe zu Wohnen entspricht 55 % zu 45 %. Für den Sektor Wohnen ergibt sich bei dieser Aufteilung eine PV-Fläche von 22 m<sup>2</sup> pro Wohneinheit und eine Energiemenge von 4.300 kWh/a pro Wohneinheit.

Der Anteil der Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen für die Stadt Regensburg liegt laut des Energienutzungsplan Regensburg bei ca. 1,5 % (17.970 MWh/a) [11] der Gesamtstromerzeugung. Im voll ausgebauten Zustand kann die Prinz-Leopold-Kaserne mit den rund 71.000 m<sup>2</sup> (PV) eine Energiemenge von ca. 13.800 MWh/a (detaillierter in Kapitel 5) erzeugen. Die Abbildung 7 zeigt Punkte der erneuerbaren Energieerzeugung. Die Größe des Kreises steht für die Menge an erzeugter Energie. Die für diesen Vergleich relevante Farbe ist gelb. Diese spiegelt die Erzeugung von PV-Strom wider. Mit der erzeugten Energiemenge in der zukünftigen PLK würde sich die Stromerzeugung durch PV der Stadt Regensburg gemäß des Energienutzungsplans nahezu verdoppeln.

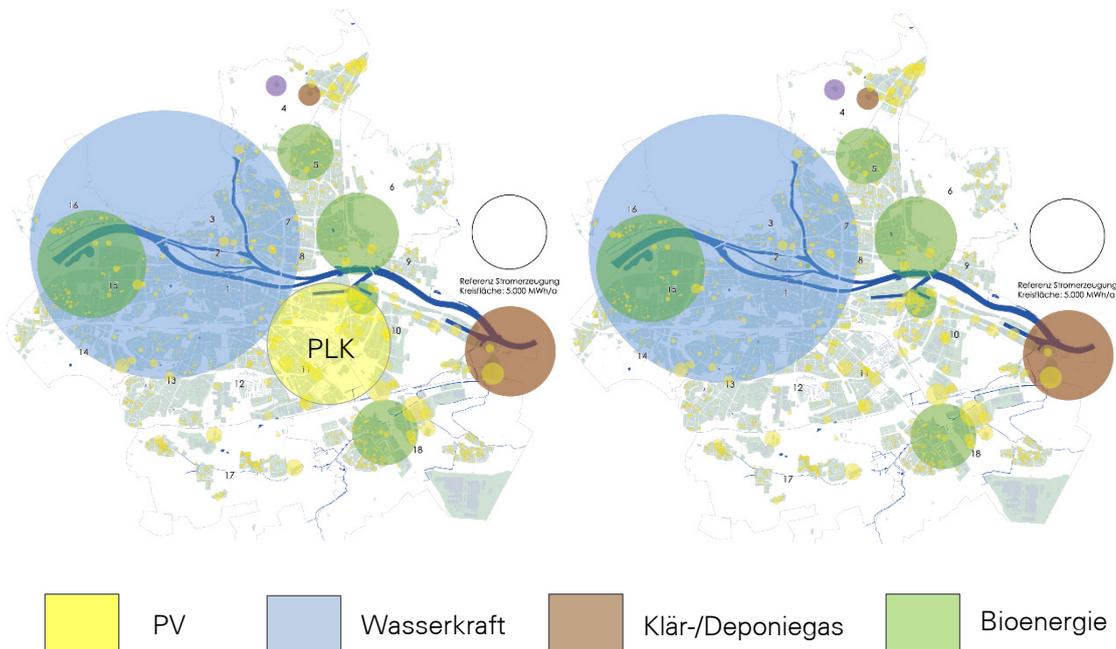


Abbildung 7: Erneuerbare Energieerzeugung in Regensburg, relevant PV-Erzeugung (gelb) mit und ohne PLK

Um diese Anforderung der hohen PV-Energieerzeugung zu erfüllen, sind neben den Dachflächen der Gebäude weitere PV-Flächen, wie z. B. Fassadenflächen, Schallschutzwälle oder Quartiersgaragen in das Konzept einzubinden. Die Einbindung dieser PV-Flächen in den Entwurf der Gebäude und des Quartiers ist eine komplexe Aufgabe, die jedoch auch das Potenzial in sich birgt, eine neue „nachhaltige architektonische Formensprache“ zu finden und diese zu etablieren.

## 4.2 Wind

Der gesamtstädtische Energienutzungsplan für Regensburg aus dem Jahr 2014 beurteilt die lokale Nutzung der Windenergie wie folgt:

*„Der bayerische Windatlas weist keinen günstigen Standort für eine weitere Windkraftanlage innerhalb der Stadtgrenzen von Regensburg aus. Aufgrund von Schutzgebieten und einzuhaltenden Abstandsflächen sind im Stadtgebiet keine größeren Potenziale vorhanden. Allerdings werden kleinere Gebiete gegenwärtig untersucht, in denen höhere Windgeschwindigkeiten als im Windatlas genannt erwartet werden und in denen bis zu zwei Anlagen aufgestellt werden könnten. Weiterhin ist es möglich, die bestehende Anlage auf dem Mühlberg durch eine größere und damit leistungsfähigere Windkraftanlage zu ersetzen (sogenanntes „Repowering“).“ [11]* Eine weitere Untersuchung des Potenzials für Windkraft wird deshalb für das Gebiet der PLK nicht durchgeführt.

## 4.3 Biomasse

Als weitere regenerative Energiequelle wurde die Biomasse Holz herangezogen und dessen Potenzial mit dem der solaren Energie verglichen. Das Energiepotenzial der Gesamtmenge an Holz, welche in Deutschland im Zeitraum eines Jahres nachhaltig geerntet werden kann, beläuft sich auf ca. 115 TWh. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass Holz auch für andere Sektoren verwendet wird wie z.B. Bau oder Industrie (vgl. Abbildung 11) [20] [21] Um in der PLK eine auf Holz oder Holzabfallprodukten basierende Energieversorgung zu etablieren wäre ein externer Brennstoffbezug notwendig, da es auf dem Gebiet der PLK keine endogenen Holzvorkommen gibt

## 4.4 Umweltwärme

### 4.4.1 Abwasser

Kommunales Abwasser enthält Wärme bei einem Temperaturniveau ganzjährig zwischen 10 und 20 °C. Selbst im Winter sinkt die Temperatur kaum unter 10 °C ab. [22] Damit stellt Abwasser eine thermische Energiequelle für den Betrieb einer Wärmepumpe dar. Im ganzjährigen Betrieb kann die entzogene Wärmeleistung somit zur Versorgung von Gebäuden dienen.

#### *Funktionsprinzip*

Um dem Abwasser Wärme zu entziehen zu können, ist ein Wärmetauscher notwendig, welcher die gewonnene Energie einer Wärmepumpe zuführt. Bei Bestandskanälen wird zunächst über ein Entnahmebauwerk ein Teilstrom des Abwassers aus dem Abwasserkanal entnommen und mit einer nachfolgenden Siebanlage die Grobstoffe zurückgehalten. Anschließend wird das gesiebte

Abwasser zum Wärmetauscher geleitet und durchströmt diesen. Im Wärmeübertrager erfolgt die Erwärmung des Sekundärkreislaufes, welcher mit der Wärmepumpe gekoppelt ist. Anschließend fließt das abgekühlte Abwasser unter gleichzeitiger Mitnahme des Siebgutes zurück in den Abwasserkanal. Anders als im Bestand kann bei neugebauten Kanälen der Wärmetauscher direkt in die Kanalsole integriert werden und somit das Problem der Abwasserfilterung umgangen werden.

Geeignete Gebäude für die Abwassernutzung sind durch einen stetigen Wärmebedarf und niedrigen Temperaturniveaus definiert. Es ist daher sinnvoll vor allem Wohn- und Verwaltungsgebäude auf diese Weise zu versorgen. Weiterhin sind neben den notwendigen Temperaturen des Abwassers auch eine Mindestdurchflussmenge zu beachten, die auch bei Trockenwetter zu



Abbildung 8:  
Kanalabschnitte für eine mögliche Abwassernutzung und erste Wohnbebauung

gewährleisten ist. Diese Grenze liegt bei etwa 15l/s (Tagesmittelwert-Trockenwetter) [22] und würde bei den in Abbildung 8 eingezeichneten Kanalabschnitt mit etwa 50l/s eingehalten werden können. Gleichzeitig sind es jedoch die einzigen Abschnitte, die für die Abwassernutzung aus technischer Sicht in Frage kommen.

Für den ersten angedachten Bauabschnitt, der in Abbildung 8 rot markiert dargestellt ist, könnte zum Teil der große Abstand zur Entnahmestelle nachteilig sein. Für die Einbindung der Abwassernutzung in einem zukünftigen Bauabschnitt

müssten zudem die rechtlichen und verwaltungstechnischen Gesichtspunkte geklärt werden.

Das Potenzial konnte auf etwa 800kW [22] quantifiziert werden, wobei davon ausgegangen wird, dass der bestehende Kanal genutzt und zwei Entnahmestellen in einem Abstand von 300 Meter als Beruhigungsstrecke ausgebildet werden. Voraussetzung für das Hintereinanderschalten mehrerer Entnahmestellen ist, dass nach den Entnahmestellen weitere Abwasser-Anschlüsse vorhanden sind die die Temperatur wieder erhöhen.

Eine Versorgung ausschließlich auf Abwassernutzung basierend, ist im Gebiet der PLK nicht möglich. Es ist denkbar, einzelne Gebäude damit zu versorgen, jedoch muss vorab eine Machbarkeit und Einbindung überprüft und die Nutzungsrechte abgeklärt werden.

#### 4.4.2 Geothermie

Geothermische Energie ist gespeicherte Energie in Form von Wärme unterhalb der Erdoberfläche. Sie findet ihre Anwendung in der Beheizung von Wohn- und Arbeitsräumen, sowie bei gewerblichen thermischen Prozessen. Umgekehrt unterstützt die Technik auch die Möglichkeit der Kühlung. Vor allem zeigt die Kombination von Erwärmung und Kühlung hohe Synergieeffekte und damit einhergehend sowohl wirtschaftliche als auch klimaschonende Anwendungen.

Oberflächennahe Geothermie ist in Bayern nahezu überall nutzbar, nur in besonderen Fällen ist eine Nutzung auf Grund von z.B. Wasserschutzgebieten nicht möglich. [23] Erste Ergebnisse einer geothermischen Untersuchung im zu betrachtenden Gebiet der PLK zeigen, dass grundsätzlich überall eine Nutzung der Geothermie durch Erwärmesonden möglich ist (siehe Abbildung 9).

Offene Brunnensysteme werden in verschiedene Ergiebigkeitsklassen unterteilt:

- hohes Brunnenfündigkeitsrisiko (hellgrün, südlich)
- gute Brunnenergibigkeit (blau)
- sehr gute Brunnenergibigkeit aber punktuelle Altlasten (grün, nördlich)
- hohes Risiko an Altlasten
- Erdwärmesonden, Kollektoren und Energiepfähle (gesamtes Gebiet verwendbar)



Abbildung 9:  
Kartografische  
Darstellung der  
geothermischen  
Energiequellen nach  
ersten Untersuchungen  
im Gebiet der PLK

Laut geologischem Bericht [24] wird die Verwendung von offenen Brunnensystemen wegen möglicher Bodenkontaminierungen in großflächigen Bereichen (grün, grün schraffiert) nicht empfohlen. Für eine Weiterverfolgung der offenen Systeme wäre eine detaillierte Untersuchung der betroffenen Gebiete notwendig. Für die Nutzung von Geothermie wird gemäß Untersuchung der Einsatz von Erdwärmesonden empfohlen. Im Untersuchungsgebiet der PLK kann nach derzeitigem Stand des Wissens nur diese Form der oberflächennahen Geothermie effizient und sicher genutzt werden und , um Energie zum Heizen und

Kühlen bereit zu stellen. Das Potenzial beläuft sich dabei theoretisch auf bis zu 12.250 kW, wobei der Rahmenplan für diese Überlegungen als Basis dient.

#### 4.4.3 Luft

Eine weitere verfügbare Umweltquelle, stellt die Umgebungsluft dar. Da das Temperaturniveau der Luft meist nicht für Heizzwecke ausreicht, muss es mittels Wärmepumpen maschinell angehoben werden. Hierbei wird Strom benötigt. Die Jahresarbeitszahl (JAZ) gibt das Verhältnis von Umweltenergie zur elektrischen Energie an, welche für die Erwärmung von Medien (z. B. Heizungswasser) benötigt wird. Je höher diese Zahl ist, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe. Luftwärmepumpen galten in der Vergangenheit im Invest als günstiger, jedoch teurer im Betrieb, weil bei sinkenden Außentemperaturen die Effizienz im Gegensatz zu Erdwärmepumpen mit sinkt. Dieser Aussage jedoch steht eine schleichende, aber sicher eintretende Entwicklung entgegen, die globale Erwärmung. Der Graph in Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Regensburg von 1990 bis 2019. Es ist bereits für diesen vergleichsweise kurzen Zeitraum ein Temperaturanstieg erkennbar. Durch diese Tatsache wird die Luft als Wärmepotenzial in ihrer Qualität grundsätzlich erhöht.

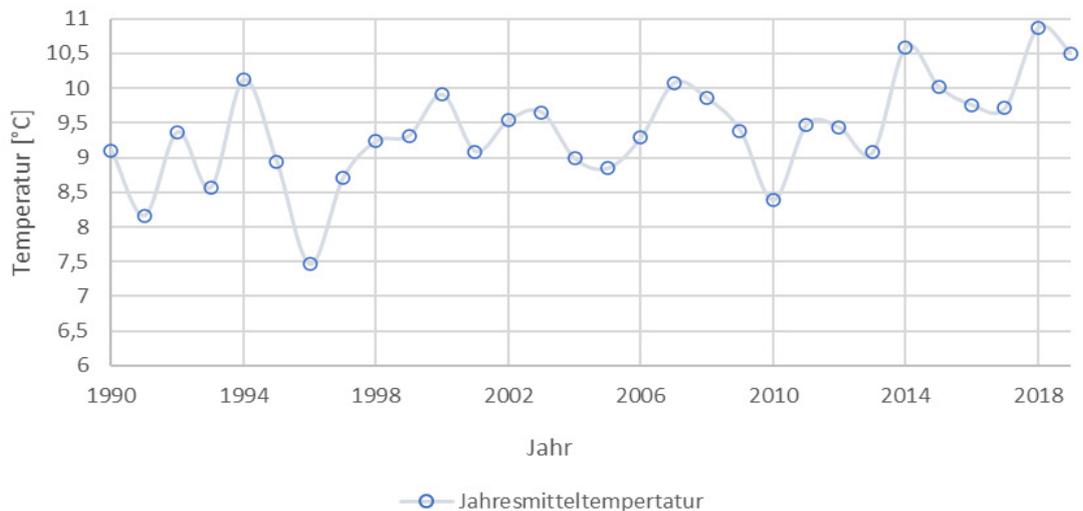


Abbildung 10: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur in Regensburg der letzten 30 Jahren nach Daten des DWD

Weitere, im Sinne der Energiegewinnung, positive Randbedingungen, wie die leichte Zugänglichkeit der Wärmequelle, die vergleichsweise geringen Investitionskosten sowie die Effizienzsteigerung der Technik von bis zu 20% in den letzten 10 Jahren wie Studien [25] steigern die Wirksamkeit dieser Technik weiter und machen sie zunehmend attraktiver für ihren Einsatz in Wohngebäuden. Durch eine Kombination der Wärmepumpe mit regenerativem PV-Strom können diese Anlagen mit hohem Autarkiegrad Gebäude mit Wärme versorgen. Das Potenzial der Luft ist nicht bestimmbar, die Verfügbarkeit ist jedoch nahezu unbegrenzt.

### 4.5 Fazit Energiepotenziale PLK

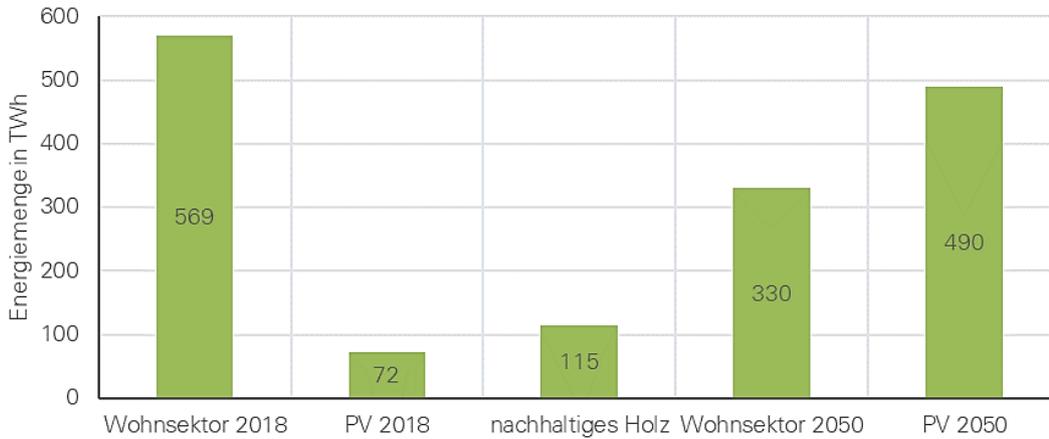


Abbildung 11: Vergleich von regenerativen Energiequellen und Energieverbrauch im Wohnsektor in Deutschland für die Jahre 2018 und 2050

Für die Gesamtenergiemenge im Sektor Wohnen wird für das Jahr 2016 eine Summe von 569 TWh [26] angenommen und ein vorhandenes PV-Energiepotenzial von 72TWh [27]. Bis 2050 wird der Energieverbrauch der Haushalte voraussichtlich auf ca. 330 TWh [28] gesunken und das PV-Energiepotenzial auf 490 TWh gestiegen sein (ca. 0,5% der dt. Landesfläche, verteilt auf Dächern, Freiflächen, etc.). [27] Das Potenzial durch Biomasse in Form von Holz reicht weder für die Deckung des Energiebedarfs von heute noch für das Szenario von 2050. Biomasse ist auch im Gebiet der PLK nicht endogen verfügbar und müsste von außen bezogen werden. Es wird daher eine solarbasierte Energieversorgung bevorzugt weiter untersucht.

Tabelle 1: Übersicht der Potenziale mit Leistung und Verfügbarkeit

| Quelle        | PV               | Biomasse          | Luft               | Geothermie       | Abwasser           |
|---------------|------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Leistung (kW) | 13.150kW         | unbegrenzt        | unbegrenzt         | 12.250kW         | 800kW              |
| Verfügbarkeit | einfach/begrenzt | mittel/unbegrenzt | einfach/unbegrenzt | einfach/begrenzt | schwierig/begrenzt |
| Vorkommen     | endogen          | exogen            | endogen            | endogen          | endogen            |

In der Tabelle 1 werden zudem die Ergebnisse der Potenziale in deren Leistung, Ergiebigkeit und Vorkommen unterteilt, aufgeführt. Um die weiteren Energiequellen Luft, Geothermie und Abwasser nutzen zu können, müssen Wärmepumpen einen zentrale Komponente des Systems darstellen. Nach der Wahl eines auf PV-Energie basierten System wird wegen der hohen Leistungen die Wuellen Luft und Geothermie für die Nutzung durch Wärmepumpen weiter untersucht.

## 5 Quartiersbilanzierung

### 5.1 Städtische Gebäudestandards

Die Stadt Regensburg hat in Bezug auf den Wärmeenergiebedarf von Neubauten eigene Standards festgelegt, welche die nach der Energieeinsparverordnung einzuhaltenden Richtwerte deutlich unterschreiten. So gibt der Stadtratsbeschluss für die Entwicklung der ehemaligen Pionier- und Prinz-Leopold-Kaserne für Neubauten eine Ausführung in mindestens KfW-40- bzw. Passivhausstandard vor. Grundlage des Energiestandards stellt die Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2016 dar. Es bietet sich an, in diesem Zuge den genannten Energiestandard in einem eigenen, öffentlichkeitswirksamen Terminus, wie Regensburg Effizienzhaus 40 zu etablieren, welcher dem Energieeffizienzniveau KfW 40 nach EnEV 2016 entspricht. Zudem soll eine nachgewiesene Luftdichtigkeit von  $n_{50} < 0,5/h$  festgelegt werden.

Der HT'-Wert der Gebäude darf, um den Anforderungen des Energiestandards gerecht zu werden,  $0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$  nicht überschreiten.

Die hier beschriebenen Parameter für den Gebäudestandard beschreiben nur die Gebäudehülle in ihrer thermischen Qualität, es sollen jedoch auch Kriterien für die ökologische Qualität der Hülle, der Baukörper und für den Betrieb der Versorgungstechnik definiert werden.

Um die Eckdaten für diese Energiestandards konsequent umsetzen zu können, wurden auch in anderen deutschen Städten eigene Methoden entwickelt. Die Stadt Hannover verfolgt bei der Vergabe von städtischen Grundstücken und beim Abschluss städtebaulicher Verträge im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Baugebiete das Ziel, dass die Errichtung von Wohngebäuden nach Möglichkeit im Passivhausstandard und ansonsten mindestens im Niedrigenergiehaus-Plus-Standard der Stadt erfolgt. Auch andere Städte haben bei der Entwicklung neuer Baugebiete zumindest teilweise das Ziel im Blick, die sich aus der ENEV 2014 ergebenden Anforderungen zu unterschreiten. Man orientiert sich dabei an den in den Programmen der KfW definierten, förderungsfähigen KfW-Standards. Basis für die Durchsetzung entsprechender Standards sind im Falle kommunaler Liegenschaften entsprechende Vereinbarungen in den Kaufverträgen mit den Investoren. Bei nicht im Eigentum der Stadt liegenden Flächen werden Vereinbarungen in städtebaulichen Verträgen angestrebt. Die Städte Freiburg und Hannover nehmen die entsprechenden Vereinbarungen standardmäßig in städtebauliche Verträge und Grundstückskaufverträge auf. So sind es auch die Städte Freiburg und Hannover, die nicht nur bei Wohngebäuden erhöhte Energieeinspar-Standards gegenüber der EnEV verlangen, sondern auch im Bereich der Büro- und Dienstleistungsimmobilien. [29]

Es wird empfohlen, die beschriebenen Maßnahmen:

- Definierung und Benennung eines eigenen städtischen Energiestandards für Neubauobjekte
- vertragliche Vereinbarung der Standards in Kaufverträgen und städtebaulichen Verträgen
- Einbeziehung von Büro und Dienstleistungsgebäuden bei der Standardisierung

im Neubaugebiet der Prinz-Leopold-Kaserne in ähnlicher Weise anzuwenden.

## 5.2 Typologie-Studie

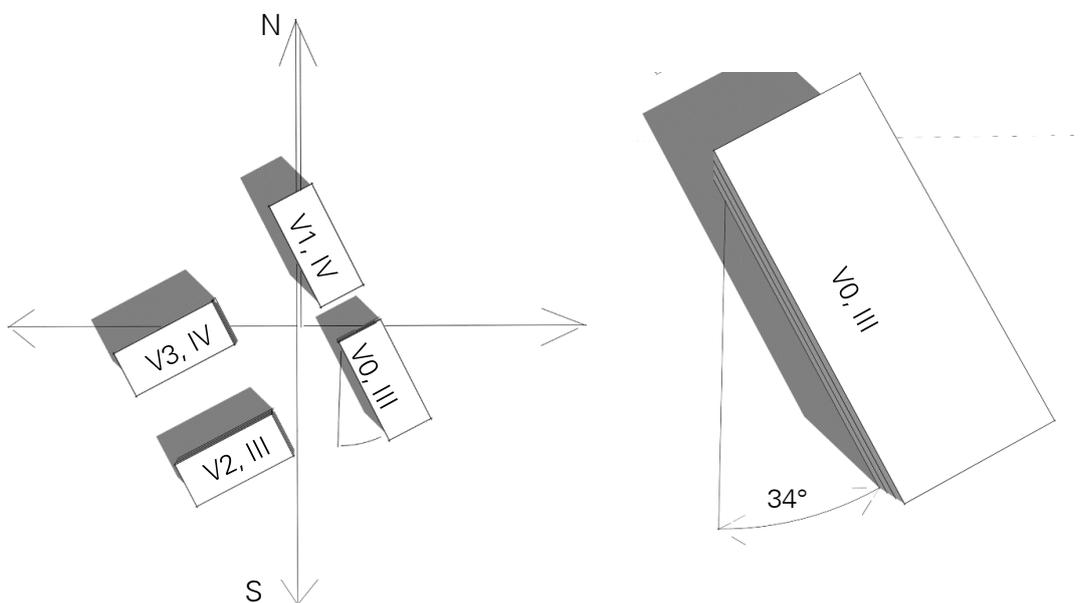


Abbildung 12:  
Ausrichtungsvarianten des  
Ausgangsmoduls

Für eine realitätsnahe Bilanzierung der Energieverbräuche des Gebietes der Prinz-Leopold-Kaserne wurde eine Typologie-Studie durchgeführt, um die Einflüsse der unterschiedlichen Ausrichtungen und Geschossigkeiten zu ermitteln. Das Grundgebäude spiegelt ein häufig vorhandenes Gebäude (V0, III) im Cluster A wider. Die Sensitivitätsanalyse des Gebäudes wird dabei in 4 Varianten durchgeführt, wobei das Gebäude in Geschossigkeit und Orientierung auf Grundlage des Rahmenplans variiert wird:

- Variante 0: SO-NW, 3 Geschosse (Referenz)
- Variante 1: SO-NW, 4 Geschosse
- Variante 2: SW-NO, 3 Geschosse
- Variante 3: SW-NO, 4 Geschosse

Die Ausrichtung des Referenzgebäudes ist Südost-Nordwest mit einer Südabweichung von  $34^\circ$  und entspricht somit einem Azimuthwinkel (Südseite) von  $-34^\circ$ .

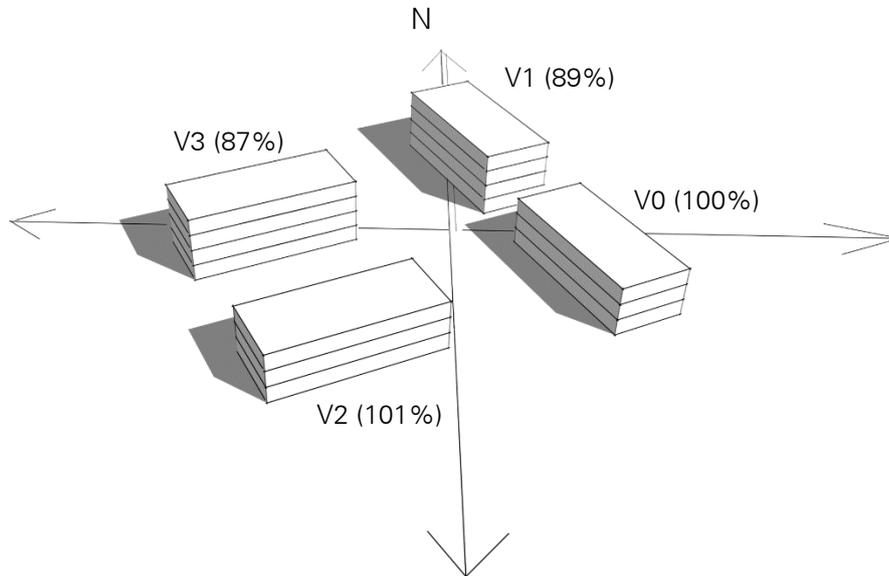


Abbildung 13:  
Gegenüberstellung der  
Bedarfswerte der  
einzelnen Varianten

Die Ergebnisse werden in der Abbildung 13 präsentiert. Die Variante V0 dient mit 100 % als Referenz. Die übrigen Varianten werden mit den jeweiligen Abweichungen (Erhöhung, Reduzierung) des spezifischen Heizenergiebedarfs ( $\text{kWh/m}^2$  und Jahr) dargestellt. Es wird deutlich, dass die Ausrichtung geringe Auswirkungen hat (1% Unterschied von V0 zu V2). Jedoch sind die Änderungen durch unterschiedliche Geschossigkeit signifikant. Dies lässt sich über den Zusammenhang mit den Hüllflächen der Geschosse erklären. Während beim 3-geschossigen Gebäude das Erdgeschoss und das Dachgeschoss je 43 % des Heizwärmebedarfs benötigen kommt das Mittelgeschoss mit nur 14 % des Heizenergiebedarfs aus. Dieses Ergebnis geht auch aus einer Studie der TU München hervor und bestätigt die Relation. [30] Beim 4-geschossigen Gebäude wird dementsprechend weniger spezifische Energie für das zweite mittlere Geschoss benötigt, wodurch sich der spezifische Heizenergiebedarf um bis zu 13% verringert.

Die Studie wurde in einem ersten Schritt für die Wohngebäude durchgeführt. Mit einer Abweichung von  $< 2\%$  kann sie ebenfalls auf die Nichtwohngebäude angewandt werden. Diese Erkenntnisse wurden bei der Bilanzierung des Quartiers angewendet.

### 5.3 Ergebnisse der Bilanzierung

Um einen Einblick in den Aufbau des gesamten Gebiets zu erhalten und die Vorgehensweise der Quartiersbilanzierung nachvollziehen zu können, wird im Folgenden das Quartier und das Herangehen der Bilanzierung beschrieben.

Das Quartier der Prinz-Leopold- und Pionier-Kaserne unterteilt sich in 14 Cluster, welche alphabetisch von A bis N aufgereiht sind. Cluster A bis L ordnen sich der ehemaligen Prinz-Leopold-Kaserne unter, M und N gehören der damaligen Pionier-Kaserne an. Diese 14 Verbundbereiche können im weiteren Schritt in Misch-, Wohn- und reine Gewerbegebiete unterteilt werden, wobei sich in diesen Gebieten, sowohl im Wohn- als auch im Gewerbebereich, bereits Bestandsbauten befinden. Folgende Abbildung 14 zeigt einen Überblick über die Einteilung des Quartiers. Eine größere Darstellung ist in Anhang 6 zu entnehmen.



Abbildung 14: Flächenermittlung des Quartiers

Zunächst wurde das gesamte Quartier aufgenommen und in die beiden Verbrauchssektoren Wohn- und Nichtwohnbau untergliedert. Der Wohnbausektor umfasst 55 %, der Anteil an Nichtwohngebäuden 45 %. Um für alle Varianten den jeweiligen Energiebedarf ermitteln zu können, also sowohl für die Wohn- als auch für alle Nichtwohnbauten, werden spezifische Energiebedarfswerte für Heizung, Kühlung, Lüftung, Strombedarf und E-Mobilität ermittelt. Mit Hilfe von Äquivalenzschlüsseln wurden die Werte für die PV-Flächen, Bewohner und Wohnflächen bestimmt. Bei den Nichtwohnbauten hingegen wird neben den PV-Flächen ein Umrechnungsschlüssel für die Mitarbeiterzahl, angelehnt an die DIN

V 18599, festgelegt. Nachfolgend sind die ermittelten Teilenergiekennwerte, sowie weitere Rahmenbedingungen wie Flächenangaben und die Anzahl an Mitarbeitern und Bewohnern abgebildet. Um einen genauen Einblick in die Werte der einzelnen Cluster zu erhalten, sind diese im Anhang in clusterweise aufgeführten Steckbriefen zu finden.

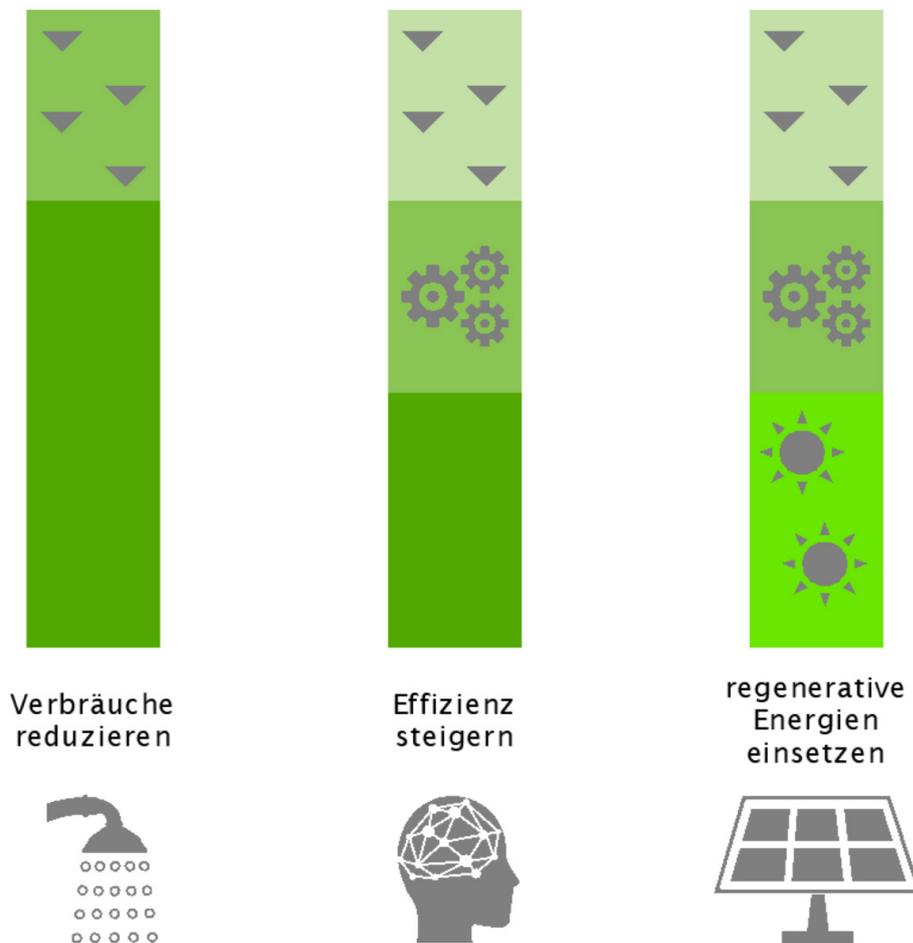
Tabelle 2: Teilenergiekennwerte [MWh/a]

|                | <i>Heizung</i> | <i>Strom</i> | <i>Lüftung</i> | <i>Kühlung</i> | <i>E-Mobilität</i> |
|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------------|
| <i>Wohnen</i>  | 3.631          | 2.708        | 0              | 0              | 740                |
| <i>Gewerbe</i> | 1.641          | 1.192        | 547            | 930            | 845                |
| <i>Gesamt</i>  | 5.272          | 3.900        | 547            | 930            | 1.585              |

Tabelle 3: Rahmenbedingungen

|                | <i>PV-<br/>Fläche<br/>[m<sup>2</sup>]</i> | <i>Wohn-<br/>fläche<br/>[m<sup>2</sup>]</i> | <i>BGF<br/>[m<sup>2</sup>]</i> | <i>Wohn-<br/>einheiten</i> | <i>Bewohner</i> | <i>Mitarbeiter</i> |
|----------------|---|---|--------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|
| <i>Wohnen</i>  | 36.033                                    | 104.418                                     | 0                              | 1.492                      | 2.387           | 0                  |
| <i>Gewerbe</i> | 35.062                                    | 0   | 140.248                        | 0                          | 0               | 6.623              |
| <i>Gesamt</i>  | 71.095                                    | 104.418                                     | 140.248                        | 1.492                      | 2.387           | 6.623              |

## 6 Einsparmöglichkeiten



Das Energiekonzept basiert auf drei Säulen. Als erstes wird der Energieverbrauch durch gezielte Maßnahmen reduziert. Im zweiten Schritt wird die Effizienz durch modernste Technik und intelligente Steuerung erhöht und zum Schluss wird der verbleibende Energiebedarf durch regenerative Energien wie Umweltwärme und solare Energie gedeckt.

### 6.1 Energieeinsparung durch Verbrauchsoptimierung und bedarfsgerechter Wärmeverteilung

Bei dem vorgeschlagenen 3-Leiter-System (detaillierter in Kapitel 7.2) soll in den Wohnungen ausschließlich hocheffiziente Haustechnik zum Einsatz kommen, wie zum Beispiel Wohnungsübergabestationen und Energiesparduschen. Die Energieeinsparung liegt hierbei vor allem an der Reduzierung der Wassermenge. Im Duschkopf befindet sich eine Engstelle, wodurch sich dort die Fließgeschwindigkeit des Wassers erhöht. Mit der hohen Geschwindigkeit wird

Luft von außen angesaugt und unter das Wasser gemischt. Das Volumen des Luft-Wasser-Gemisches ist damit höher als bei einem normalen Duschkopf mit gleicher Wassereingangsmenge, wobei der Endverbraucher keinen negativen Unterschied erkennt. Allein mit dieser Technik können pro Duschkopf im Schnitt 30 Liter Wasser eingespart werden. Bei 2.000 Wohnungen im Endausbau des Gebiets sind das pro Jahr hochgerechnet 8.500.000 Liter Wasser, die nicht verbraucht und erwärmt werden müssen.

Weiterhin wird die Wassertemperatur für das Warmwasser auf ein Minimum herabgesetzt, sodass weniger Wärme bei der Verteilung verloren geht. Den hygienischen Anforderungen der Trinkwasserverordnung wird durch Wohnungsübergabestationen erfüllt. Bei Übergabestationen wird ein zentraler Wärmeübertrager in jeder Wohnung platziert, der bei Bedarf Energie aus einem geschlossenen Heizkreis an das frische Trinkwasser übergibt. Mit einer niedrigeren Vorlauftemperatur und einer Reduzierung des Warmwasserbedarfs wird die im Gebäude benötigte Warmwassermenge und damit die Nutzenergie um ca. 22% reduziert (Abbildung 15).

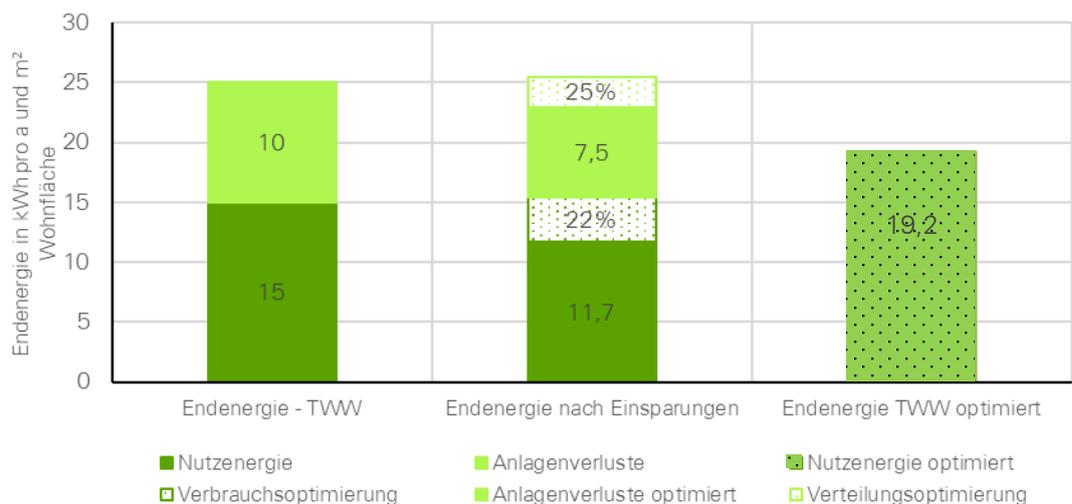


Abbildung 15: Einsparungen im Bereich Warmwasser Endenergiebedarf für die Wärmebereitung und -Verteilung

Für die Verteilung des Warmwassers wird ein Nahwärmenetz mit einem 3-Leiter-System zu empfehlen. Es besteht aus zwei Vorlaufleitungen, eine Leitung mit 58°C für das Warmwasser und eine Leitung mit 38°C für das Heizungswasser. Über einen gemeinsamen Rücklauf mit ca. 28°C wird das Wasser (Heizungs- und Warmwasser) wieder zum Pufferspeicher zurückgeführt (Abbildung 16). Es wird über eine Wohnungsübergabestation bereit, wodurch die Hygiene sichergestellt werden kann. Das 3-Leiter-System ist in einem bedarfsgeführten Netz ausgebildet. Der zentrale Pufferspeicher verteilt nur Wärme an die dezentralen Pufferspeicher, wenn ein Bedarf, durch MSR-Technik bestimmt, vorhanden ist. Das bedeutet, dass die Wärmeverteilung nur bei Bedarf stattfindet und nicht, wie bei konventionellen Systemen, durchgehend. Dadurch lässt sich eine Energieeinsparung von ca. 25% in der Verteilung erreichen (Abbildung 15).

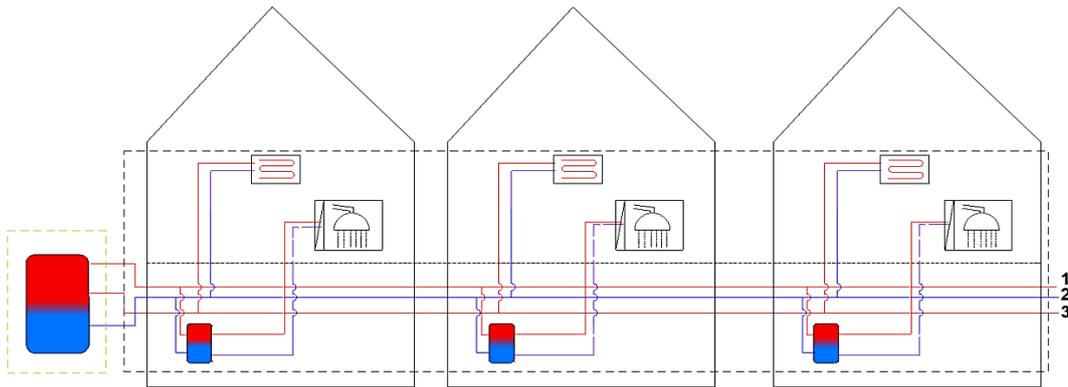


Abbildung 16: 3-Leiter-System für die Nahwärmeversorgung

Ein weiterer Vorteil des 3-Leiter-Systems ist die mögliche Verwendung eines Leitungsstranges für eine künftige Kühlung im Sommer, wobei gleichzeitig der zweite Leitungsstrang für das Warmwasser genutzt werden kann. Ein zusätzlicher Vorteil bei der Betriebsweise mit Kühlung besteht darin, dass dadurch die Geothermie-Quellen im Sommer regeneriert und dann im Winter wieder optimal genutzt werden können. Auf diesen Punkt wird in Kapitel 7.3 näher eingegangen.

## 6.2 Energieeinsparung durch perspektive Heizungsteuerung basierend auf thermodynamischer Simulation

### *Thermodynamische Simulation*

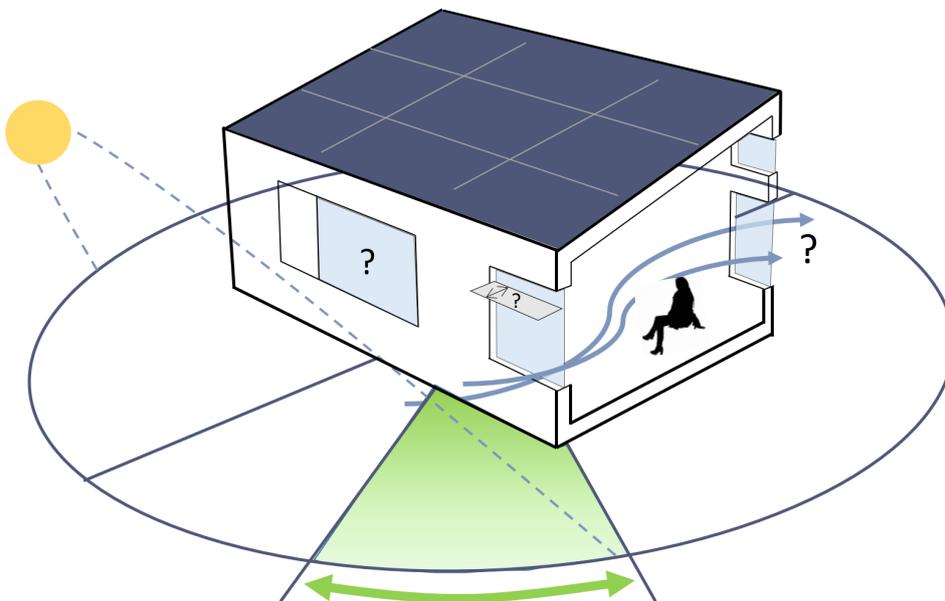


Abbildung 17: Grafische Darstellung der Funktion von thermodynamischer Gebäudesimulation

Die Entwicklung nachhaltiger, energieeffizienter Gebäude erfordert den Einsatz innovativer Planungsmethoden. Dynamische Simulationeninstrumente können das Zusammenspiel der vielen Einflussfaktoren bei der Gebäudegestaltung und der Energieeffizienz am besten abbilden und stellen somit ein unverzichtbares

Instrument im integralen Planungsprozess dar. Aus diesem Grund wurde diese Berechnungsmethode für die Entwicklung des Energiekonzeptes der PLK angewandt. Detaillierte Randbedingungen und die Vorgehensweise sind im Anhang 4 nachzulesen.

Die Energie, die zur Konditionierung eines Gebäudes eingesetzt wird, ist im Laufe eines Jahres durch unterschiedliche Parameter gekennzeichnet. Die Ausrichtung und Lage sowie die Form des Gebäudes und die Eigenschaften der Gebäudehülle bestimmen die äußeren energetischen Einflüsse. Aber auch die Nutzung des Gebäudes, die TGA-Systeme und die internen Wärmelasten beeinflussen den Energiebedarf im Jahresverlauf unterschiedlich.

Statische Berechnungen können den Einfluss der Speichermassen im Gebäude, dynamische Umweltbedingungen und perspektivische Einflüsse nicht berechnen. Infolgedessen werden die Anlagenleistungen zu groß ausgelegt und verursachen höhere Investitionskosten und einen ineffizienten Systembetrieb. Dynamische Simulationsmethoden können diese zeitlich veränderlichen Abhängigkeiten untersuchen und realistische Aussagen über die Systemleistung und den Jahresenergiebedarf eines Gebäudes ermöglichen.

Dieses Modell wird mit allen Randbedingungen (wie Raumausnutzung, Speichermassen, Regelung usw.) ausgestattet. Auftretende interne Wärmegewinne durch Personen, Kunstlicht, Geräte werden im thermischen Zonenmodell realistisch dargestellt. Basierend auf den statistischen Wetterdaten des Standortes wird das Modell stündlich dynamisch simuliert. Dieser sogenannte Digitale Zwilling ist in der Lage, die strukturellen und betrieblichen Zustände eines realen Gebäudes im Zeitverlauf abzubilden.

Eine Einsparung von Energie kann mithilfe der perspektivischen Heizungssteuerung gewährleistet und mittels dynamischer Auswertung erfasst und so in den Planungsprozess eingebunden werden.

#### *Perspektivische Heizungssteuerung*

Konventionelle Regelungen für Heizungssysteme werden standardmäßig temperaturgeführt eingesetzt. Die perspektivische Steuerung ist eine Innovation, welche im Gegensatz zu konventionellen Steuerungen unter anderem weiß, wann solare Gewinne, beispielsweise über Sonneneinstrahlung durch Glasflächen, in das Gebäude eingetragen werden. Für einen bestimmten Zeitraum erhöht sie vorab die Raumtemperatur nicht, wodurch die solaren Gewinne optimal genutzt werden. Auch interne Wärmegewinne werden bei der perspektivischen Steuerung berücksichtigt. Bei der konventionellen Steuerung erfolgt dieses bewusste Aussetzen der Heizung nicht. Eine Standardsteuerung für Heizsysteme wird temperaturgeführt mit einer Hysterese von 2K (grauer Graph in Abbildung 18 eingesetzt). Das bedeutet, dass der Heizvorgang beginnt, sobald der Istwert

(vorhandene Raumtemperatur) den Sollwert (gewünschte Raumtemperatur) innerhalb eines Wertebereichs (Regeldifferenz von 2K) unterschreitet.

Jede Überhitzung eines Raumes stellt in gewisser Weise einen Energieertrag dar, welcher genutzt und wofür entsprechend Heizenergie eingespart werden kann (grüner Bereich). Hier setzt die perspektivische Heizungssteuerung an und macht eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs von bis zu 15 % möglich. Die perspektivische Heizungssteuerung hat ihren Ursprung im Kontext des Forschungsprojektes MAGGIE und soll in einem Demonstrationsgebäude des Projektes mit insgesamt 30 Wohneinheiten bis Ende des Jahres 2020 zum Einsatz kommen.

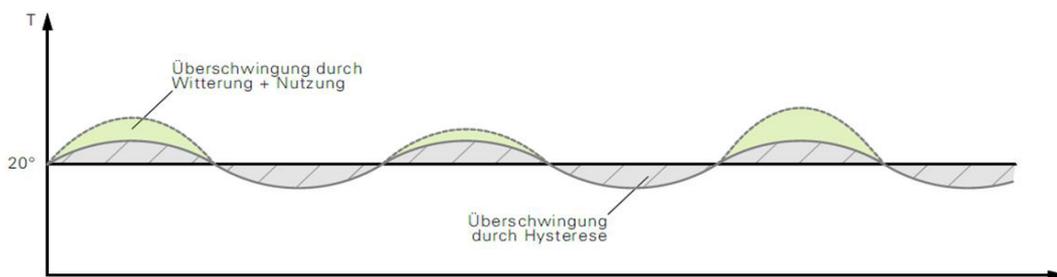


Abbildung 18: Peakshaving durch perspektivische Heizungssteuerung

Ein Vergleich hat aufgezeigt, dass unter Verwendung gleicher Randbedingungen (Klima und Steuerung) wie bei der statischen Berechnung (EnEV) der Heizwärmebedarf bei der thermodynamischen Simulation (Simulationssoftware IDA ICE) eines Wohngebäudes, sich mit den Ergebnissen aus der Berechnung nach Norm (EnEV) deckt.

Beim Vergleich zwischen thermodynamischer Simulation und EnEV-Berechnung erzielt die thermodynamische Simulation unter Einbeziehung aktueller und standortgenauer Klimadaten (DWD Regensburg 2018) und perspektivischer Steuerung eine rechnerische Einsparung bis zu 30% gegenüber den Ergebnissen der statischen Berechnung nach Norm. Es wird bei der statischen Berechnung (EnEV) eine Referenzklimadatei für Deutschland mit durchschnittlichen Messwerten des Zeitraums 1961-1990 [31, 32] angesetzt. Bei der thermodynamischen Simulation können jedoch aktuelle dynamische Klimadatensätze für unterschiedliche Standorte und Messzeiträume verwendet werden. Die hohe Einsparung bei der thermodynamischen Simulation lässt sich auf die Berücksichtigung der realen und aktuellen Gebäudespeichermassen, der solaren Gewinne, der Einbeziehung der dynamisch perspektivischen Steuerung sowie der allgemeinen, in den Daten (Kapitel 4.2) sichtbaren Klimaerwärmung zurückführen. Bei einem durchgeführten Messdaten-Monitoring wurde festgestellt, dass sich die bis zu 30% Einsparung (Simulation) in der Realität, wegen Überlagerungseffekten durch das Nutzerverhalten, nicht vollständig

umsetzen lässt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine Einsparung von bis zu 20% praktisch umsetzbar ist.

Die Energieeinsparung macht es möglich, das Wohngebäude, bei gleichbleibender thermischer Hülle, um eine Energieeffizienzklasse (KfW40 entspricht demnach Passivhaus) zu erhöhen (vgl. Abbildung 19).

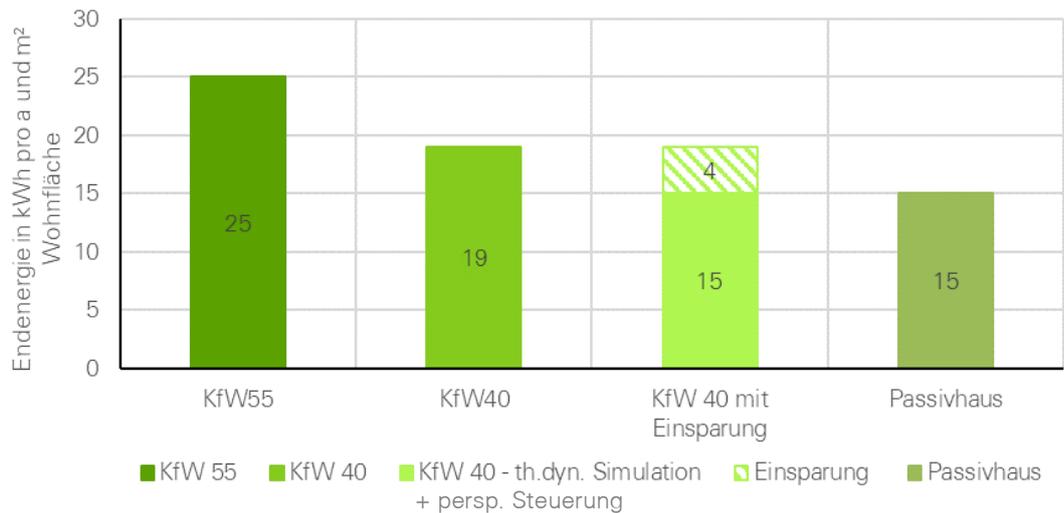


Abbildung 19: Einsparung des Heizenergiebedarf für Wohngebäude

Für das Nichtwohngebäude resultiert durch die Energieeinsparung ebenfalls eine Anhebung des energetischen Gebäudestandards und das bei gleichbleibender thermischer Hülle. Es wird dabei der Passivhausstandard annähernd erreicht. (Abbildung 20)

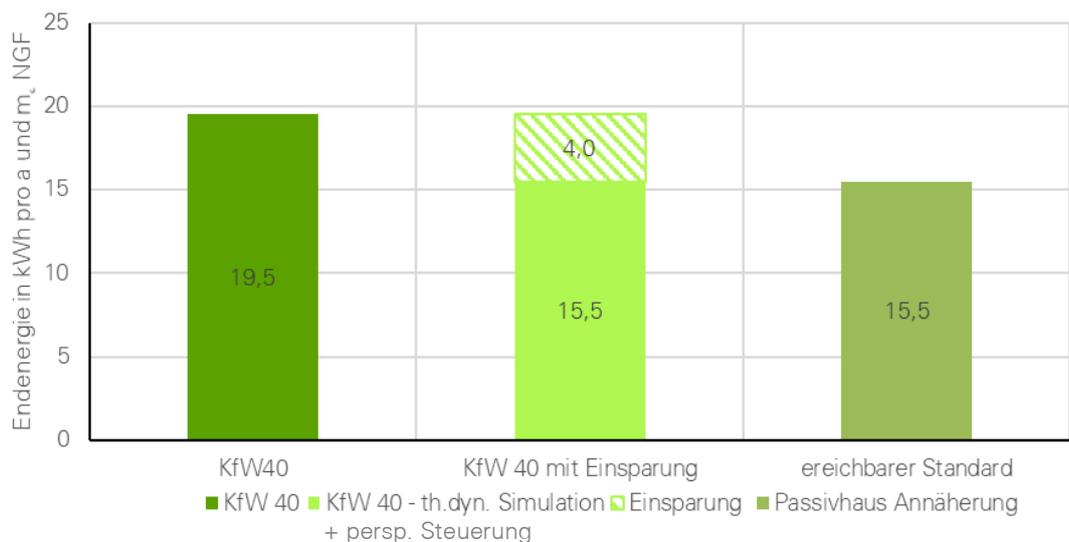


Abbildung 20: Einsparung des Heizenergiebedarf für Nichtwohngebäude

## 7 Wärmeerzeugung und -Verteilung

Mit der Sektorenkopplung, sprich der Vernetzung und übergreifenden Betrachtung der unterschiedlichen Sektoren der Energiewirtschaft, hat auch die Komplexität von Energiekonzepten stark zugenommen. Zwischen Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung, Verkehr und auch der Industrie gibt es viele Schnittstellen, Überschneidungen und Synergien. Diese können und müssen übergreifend genutzt werden. Eine separate Betrachtung der Sektoren ist heute und in Zukunft kaum mehr möglich und auch nicht zielführend, wenn das Ziel die Dekarbonisierung mittels erneuerbarer Energien ist. Im Folgenden wird nun, für einen besseren Umgang mit dieser Komplexität, eine Fokussierung auf die wichtigsten Systemzusammenhänge durchgeführt.

Um den Anforderungen an eine zukunftsfähige, nachhaltige und ganzheitliche Energieversorgung vollständig gerecht zu werden, wurde in einem ersten Schritt das Jahr in zwei funktionale Zeiträume eingeteilt. In einem, dem Energiesommer wird mehr Energie erzeugt und im anderen, dem Energiewinter, wird mehr Energie verbraucht. Das Energiekonzept basiert darauf, die Gegebenheiten im Quartier (PV-Flächen, Energieeinsparung, Anlagentechnik) dahingehend zu optimieren, den Energieüberschuss des Energiesommers in den Energiewinter mittels Speicher zu übertragen und in diesem Zeitraum wieder zu nutzen.

## 7.1 Wärmeerzeugung

Für das Energiekonzept wurden drei Varianten der Wärmeversorgung betrachtet. Die erste Variante „BHKW“ beinhaltet ein konventionelles Nahwärmenetz. Die zweite Variante „Wärmepumpen-System“ arbeitet mit einem sogenannten kalten Netz, d. h. mit einer Umweltwärmequelle auf der Entnahmeseite und einem 3-Leiter-System auf der Bereitstellungsseite. Die dritte Variante „Power-to-X-System“ beschreibt eine Wärmeversorgung mit einem innovativen System mit Stromüberschussumwandlung, welches ebenfalls mit einem kalten Netz auf der Entnahme und zudem einem bedarfsgeführten Niedertemperatur-3-Leiter-System auf der Versorgerseite arbeitet. Sämtliche Varianten wurden mithilfe einer dynamischen Simulation in deren Energieflüsse zerlegt und für ihre Anwendung im Cluster A als Planungsbeispiel optimiert. Anschließend sollen sie hinsichtlich der Effizienz, Ökologie und Ökonomie bewertet werden. Die Tabelle gibt nochmals einen Überblick über die betrachteten Varianten.

Tabelle 4: Übersicht der Wärmeversorgungsvarianten

| <i>Benennung</i>     | <i>Variante 1:</i><br><i>BHKW</i> | <i>Variante 2:</i><br><i>Wärmepumpen-System</i> | <i>Variante 3:</i><br><i>Power-to-X-System</i>                         |
|----------------------|-----------------------------------|---|--|
| <i>Betriebsweise</i> | Wärmenetz                         | Kaltes Netz,<br>Niedertemperaturnetz            | Kaltes Netz,<br>bedarfsgeführtes<br>Niedertemperatur-3-<br>Leiter-Netz |
| <i>Erzeugungsort</i> | zentral                           | zentral   | zentral  |
| <i>Grundlast</i>     | Erdgas-<br>BHKW                   | Zentrale<br>Wärmepumpe                          | Regeneratives-<br>BHKW, Abwärme,<br>Wärmepumpe                         |
| <i>Spitzenlast</i>   | Gaskessel                         | Gaskessel                                       | Gaskessel  |

### 7.1.1 BHKW

Es ist angedacht für die Neubauten im PLK-Gebiet eine Versorgung durch einzelne miteinander verbundene Niedertemperatur-Nahwärmenetze zu realisieren, welche pro Wärmecluster ca. 2 x 180 Wohneinheiten im hydraulischen Abgleich umfassen. Pro 180 Wohneinheiten sind alle Erzeugungsanlagen in einer Heizzentrale konzentriert und über ein Nahwärmenetz mit den einzelnen Gebäuden verbunden.

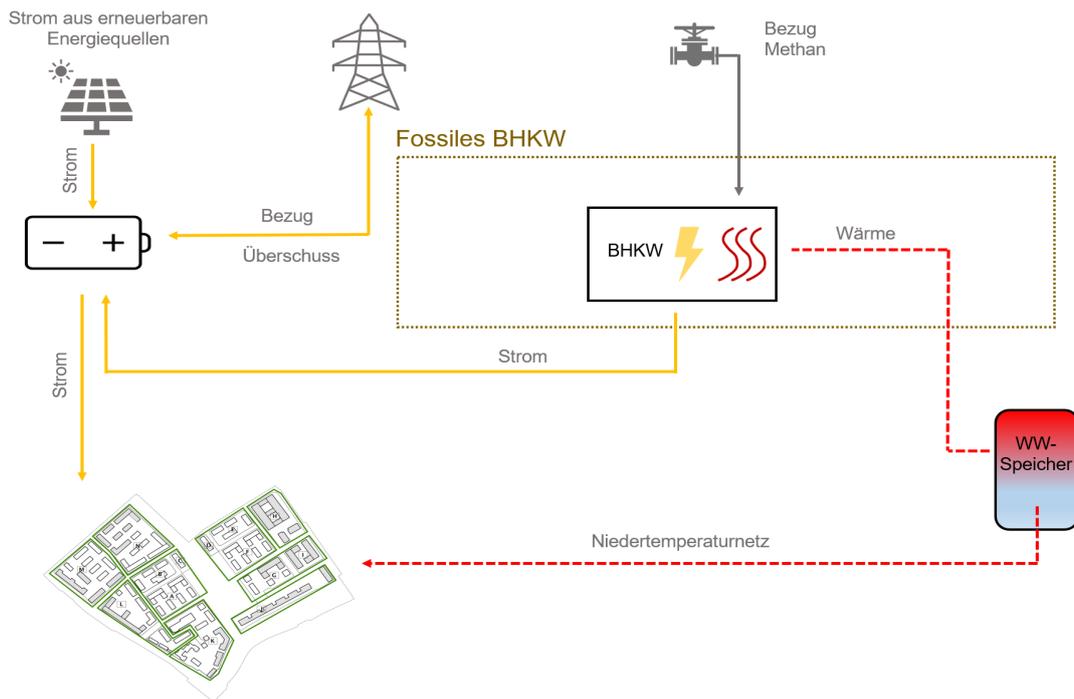


Abbildung 21:  
Funktionsschema  
Variante "BHKW"

In der Variante „BHKW“ (Abbildung 21) ist eine BHKW-Einheit sowie ein Gaskessel als Spitzen- und Reservekessel vorgesehen. Ein Pufferspeicher sorgt dabei für eine optimierte Fahrweise sowie eine optimale Auslastung des BHKW. Letzteres arbeitet nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung, d. h. der eingesetzte Brennstoff wird zweifach genutzt, über einen Generator zur Stromerzeugung und über die Abwärme für Heizzwecke. So ist ein Wirkungsgrad von über 90 % erreichbar. Das Wärmenetz wird bei der Variante mit Vorlauftemperaturen von bis zu 60°C betrieben.

Strom wird überwiegend mit den Photovoltaikanlagen erzeugt und über eine Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterie den zu versorgenden Gebäuden zur Verfügung gestellt. Stromüberschüsse werden in das öffentliche Stromnetz gegen Entgelt eingespeist. Das BHKW versorgt das Gebiet mit Wärme und mit Strom, wenn die PV-Anlagen keine vollständige Bedarfsdeckung gewährleisten können. Diese Kombination stellt eine weitgehende Stromautarkie sicher. Das für das BHKW benötigte fossile Erdgas wird aus dem lokalen Erdgasnetz entnommen und ist der Hauptgrund für den Emissionsausstoß des Systems in dieser Variante.



### 7.1.3 Power-to-X-System

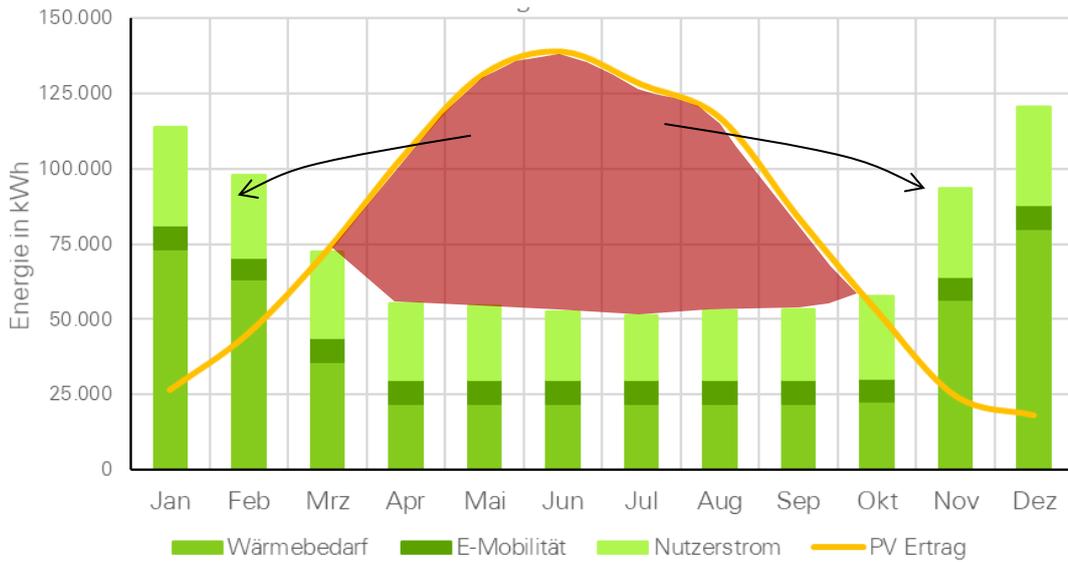


Abbildung 23: Energieflüsse beispielhaft für Cluster A und Darstellung der Überschussenergie (rot)

In Abbildung 23 werden wieder die Energieflüsse wie in Kapitel 3 beispielhaft für Cluster A aufgegriffen, um das System zu erklären. Die Überschüsse im Sommer (rot) sollen mittels Speicherung dem Winter zur Verfügung gestellt werden. In der Variante „Power-to-X“ für die Energieversorgung des Quartiers werden entsprechend der Variante „Wärmepumpe“ einzelne miteinander verbundene Nahwärmenetze vorgeschlagen, welche pro Wärmecluster zweimal 180 Wohneinheiten im hydraulischen Abgleich umfassen. Diese Cluster sind mit einer innovativen Power-to-X-Anlage (PtX-Anlage) ausgestattet, welche die verbrauchten Energiemengen bilanziell über das Jahr betrachtet zu 100 % aus eigenen erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen (PV) bezieht. Der vorgesehene

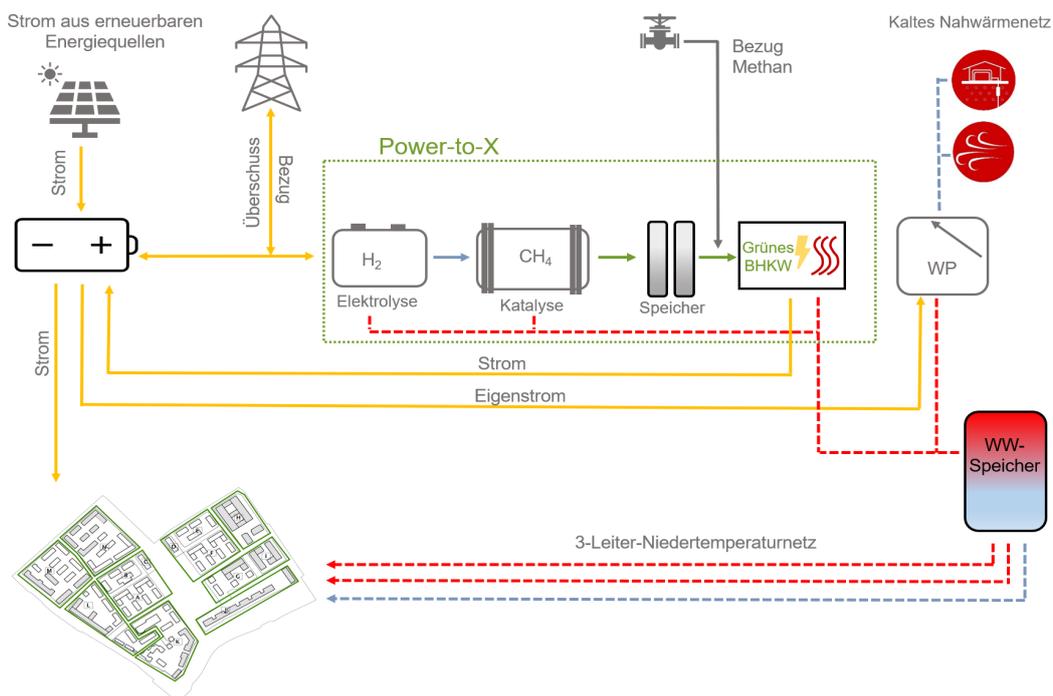


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Variante "Power-to-X-System"

PtX-Systemansatz ist in Abbildung 24 dargestellt und soll im Folgenden detaillierter erläutert werden.

Um erneuerbare Energieträger in eine sichere und stabile Energieversorgung einbinden zu können ist sowohl ein Kurz- als auch ein Langzeitausgleich zwischen dem Energieertrag und dem Energiebedarf erforderlich. Neben der Speicherkapazität sowie der Ausspeisedauer ist die Reaktionszeit eines Speichers für die Systemdienlichkeit, insbesondere hinsichtlich des Stromnetzbetriebes eines Energieversorgungssystems, von Bedeutung. Kurzzeitige Leistungsschwankungen werden mittels einer Batterie (schneller Kurzzeitspeicher) ausgeglichen.

Übersteigt der Stromertrag aus den Photovoltaikanlagen über einen längeren Zeitraum den lokalen Strombedarf (Nutzerverbrauch), wird der regenerative Strom in einen sogenannten Elektrolyseur eingespeist. In diesem wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Der Wasserstoff ( $H_2$ ) wird in einem speziellen Katalysator zusammen mit Kohlenstoffdioxid zu Methan umgesetzt. Dieses regenerativ erzeugte Methan entspricht in seiner chemischen Zusammensetzung hochwertigem Erdgas mit mehr als 98 % Methananteil und lässt sich problemlos langfristig in Tanks speichern oder alternativ in das Gasnetz einspeisen. Steht dann temporär keine oder zu wenig erneuerbare Energie zur Verfügung, kann das zwischengespeicherte regenerative Methan in einem Blockheizkraftwerk (grünes BHKW) wieder rückverstromt werden, um die Energiedefizite für den Endverbraucher auszugleichen. Durch die zeitliche Entkopplung von regenerativer Stromerzeugung und lokalem Energiebedarf kann somit die Energieversorgung vollständig auf Basis erneuerbarer Energien realisiert werden. Überschussmengen an regenerativem Erdgas können in komprimierter Form, sprich mit erheblich erhöhter Energiedichte, in Tanks gespeichert werden.

Vergleichbar mit der Wärmeerzeugung bei der Verbrennung im BHKW stellen auch Elektrolyse und Katalyse in der PtX-Anlage bei ihren Prozessen Abwärme zur Verfügung. Diese kann mittels einer Wärmepumpe aus dem Kühlwasser des Elektrolyseurs und aus dem exothermen Prozess der Methanisierung mit einem hohen Temperaturniveau, das auch für die Erzeugung von Kälte nutzbar wäre, gewonnen werden. Diese Wärme wird dem Nahversorgungsnetz zur Verfügung gestellt und ersetzt so eine konventionelle Bereitstellung von Heizungswärme für die Gebäude. Dem Nutzer wird eine vollständig auf regenerativen Ressourcen aufbauende Wärmeversorgung ermöglicht.

Durch die Nutzung der im Gasspeicherprozess entstehenden Abwärmepotenziale sind mit dem vorgeschlagenen Konzept Gesamtnutzungsgrade der erneuerbaren Energie von über 90 % möglich. Der Methanisierungsprozess und insbesondere die Rückverstromung sind emissionsfrei, wodurch im Idealfall auf einen Schornstein verzichtet werden kann. Es kann in Zeiten mit hoher PV-Leistung oder anderweitig hervorgerufenen Netzspitzen der Strom vor Ort direkt genutzt oder in

der Hochleistungsbatterie zwischengespeichert und das vorgelagerte Netz so weit wie möglich im Sinne der Netzdienlichkeit entlastet werden.

Die Einbindung der einzelnen Bestandteile des vorgeschlagenen Systems, welches im Wesentlichen aus drei Elementen, aus einem konventionellen BHKW, einer konventionellen Luft-Wärmepumpe (oder Erd-Wärmepumpe oder Abwasser-Wärmepumpe) und der Power-to-X-Technik aufgebaut ist, kann von Beginn an oder zu einem späteren Zeitpunkt flexibel in das Energiesystem ein- bzw. ausgekoppelt werden. Wichtig ist hierbei, dass in jedem Fall vorab Flächen für die entsprechende Technik (auch Speicher, Power-to-X-Technik, Leitungen) vorgehalten wird.

### 7.2 Wärmeverteilkonzept

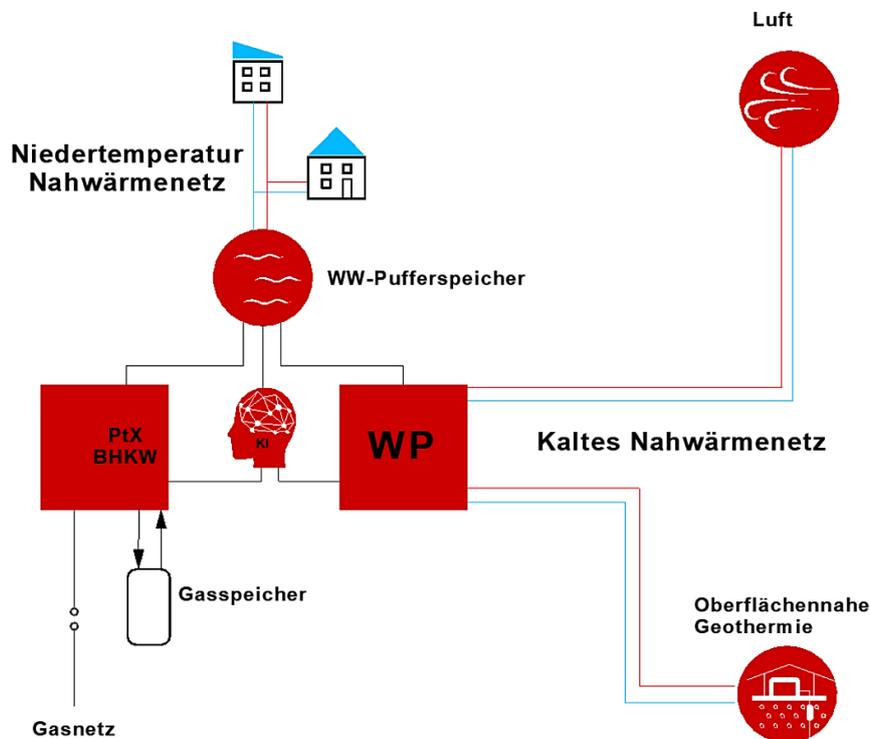


Abbildung 25: Darstellung des Wärmenetzes (Kaltes Nahwärmenetz und Niedertemperatur-Nahwärmenetz)

Im Hintergrund des Forschungsprojektes MAGGIE wurden bereits konventionelle Wärmeverteilssysteme und ein innovatives 3-Leiter-System analysiert und verglichen. Das Ziel war es dabei, unter Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen (Zapftemperaturen Warmwasser) und des Komforts, eine Wärmelogistik mit niedrigen Temperaturen (< 60 °C) zu entwickeln. Es stellte sich heraus, dass die Wärmeverteilung bei einem 3-Leiter-System, eingebettet in ein Niedertemperaturnetz besonders effizient gewährleistet werden kann.

Das vorgeschlagene 3-Leiter-Wärmenetz ist in zwei Systembereiche aufgeteilt. Das Primärnetz wird in einem Kalten Nahwärmenetz und das Sekundärnetz in einem Niedertemperatur-Nahwärmenetz ausgebildet. Verbunden werden diese

beiden Wärmenetze durch zentrale Wärmepumpen, Pufferspeicher sowie BHKW und Power-to-X-Einheit.

Durch das zu installierende Kalte Nahwärmenetz können alle Umweltwärmequellen genutzt werden. Konkret können die Wärmequellen Luft, Geothermie (Erdwärmesonden) und ggf. Abwasserwärme erschlossen werden, um das kalte Nahwärmenetz zu speisen (vgl. Abbildung 25).

Ein kaltes Nahwärmenetz wird mit umgebungsnahen Temperaturen betrieben. Sowohl Heizen als auch ein Kühlen ist möglich. Das Heizen erfolgt mittels Wärmepumpen, das Kühlen erfolgt direkt<sup>2</sup> oder mittels Kältemaschinen. Das Leitungsnetz kann praktisch verlustfrei betrieben werden, da nur sehr geringe Temperaturunterschiede zwischen Netz und Umgebung vorhanden sind.

Das zweite Netz stellt ein Niedertemperatur-Netz dar. Hierbei handelt es sich um ein innovatives 3-Leiter System, das in Kapitel 7.2.2 näher beschrieben wird.

### 7.2.1 Energiezentralen

Das Gebiet der PLK soll ein Vorbild für die dezentrale Versorgung von Stadtquartieren der Zukunft sein. Nur wenn vorab ein einheitliches Energieerzeugungs- und Versorgungskonzept entwickelt wird, kann eine funktionierende und nachhaltige Versorgung sichergestellt werden.

Dazu wird das Quartier PLK in funktionale Einheiten unterteilt, wobei die Clusterstrukturen teilweise zusammengefasst werden. Eine Unterteilung in 360 Wohneinheiten-Äquivalenten (WEÄ) bietet sich an. Bei dieser Einteilung sind die angestrebten geringen Verteilverluste für die Wärme zu erreichen und erweiterbar, wodurch ein dynamisch wachsendes Energienetz etabliert werden kann. Für eine funktionale Einheit sollen zwei Energiezentralen mit je 180 WEÄ mit der folgenden Ausstattung vorgesehen werden:

#### Energiezentrale 1

- Wärmepumpe (Luft)
- BHKW
- Power-to-X-Einheit

#### Energiezentrale 2

- Wärmepumpe (Luft/Sole, wenn Anteil Gewerbe)
- BHKW
- Gas-Spitzenlastkessel aus Redundanzgründen

---

<sup>2</sup> Direktes Kühlen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass keine Wärmepumpe notwendig ist, um das Medium zusätzlich abzukühlen, da die Temperatur aus z.B der Erde niedrig genug ist, um Gebäude zu kühlen

Es soll eine Power-to-X-Einheit pro 360 Wohneinheiten-Äquivalente<sup>3</sup> (Abbildung 26) zur Versorgung von Wärme und Strom zum Einsatz kommen. Unterstützt wird



Abbildung 26: Einteilung des Quartiers in funktionale Einheiten von ca. 360 Wohneinheiten-Äquivalente

diese Anlage durch die auf die Energiezentralen verteilten BHKW und Wärmepumpen. Wenn in einer funktionalen Einheit Wohn- und Gewerbebauten kombiniert sind, wird der Einsatz einer Sole-Wärmepumpe vorgeschlagen. Dieses System ist auch effizient zur Kühlung zu verwenden und wird in Punkt 7.3 unten genauer beschrieben.

*Energiespeicher*

Ein wichtiger Bestandteil der Variante Power-to-X-System ist eine Gasspeichereinheit, welche die Gasmengen aus dem PtX-Vorgang aufnehmen und im Heizfall wieder BHKW zugeführt werden kann. Da der Flächenbedarf für die im Zusammenhang mit der PtX-Anlage benötigten Gasspeicher verhältnismäßig groß ist, ist eine Aufstellung im Technikraum nicht möglich. Auch aus optischen Gründen bietet es sich an, die Tanks nicht sichtbar für Bewohner aufzustellen. Eine Eingrabung und Verfüllung wird nicht empfohlen, da

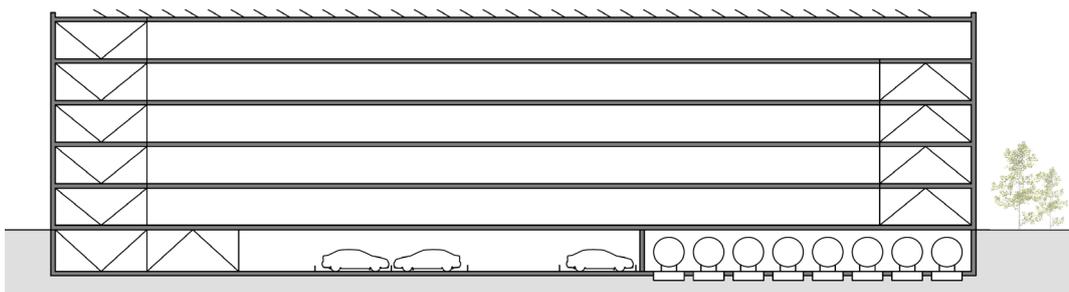


Abbildung 27: Aufstellung der Gasspeicher in Quartiersgaragen

<sup>3</sup> Ein Wohneinheiten-Äquivalent entspricht einer Bruttogrundfläche von 90m<sup>2</sup>

Wartungsarbeiten ermöglicht und eine Revisionierbarkeit gewährleistet werden muss. Eine Variante ist die Aufstellung der Gasspeicher in den Quartiersgaragen (Abbildung 27), welche im Zuge der einzelnen Bauabschnitte entstehen sollen.

Eine weitere Möglichkeit ist die unterirdische Aufstellung mit einer begehbaren, möglicherweise begrünten Überdeckung. Hier würden die Tanks näher an der Energiezentrale platziert werden können. Es wäre zu untersuchen, ob die Lagerfläche, die Muldenartig ausgebildet ist, in das Entwässerungskonzept eingebunden werden kann. Diese Variante ist technisch sicher aufwändiger als eine Unterbringung der Gasspeicher innerhalb der Quartiersgaragen.

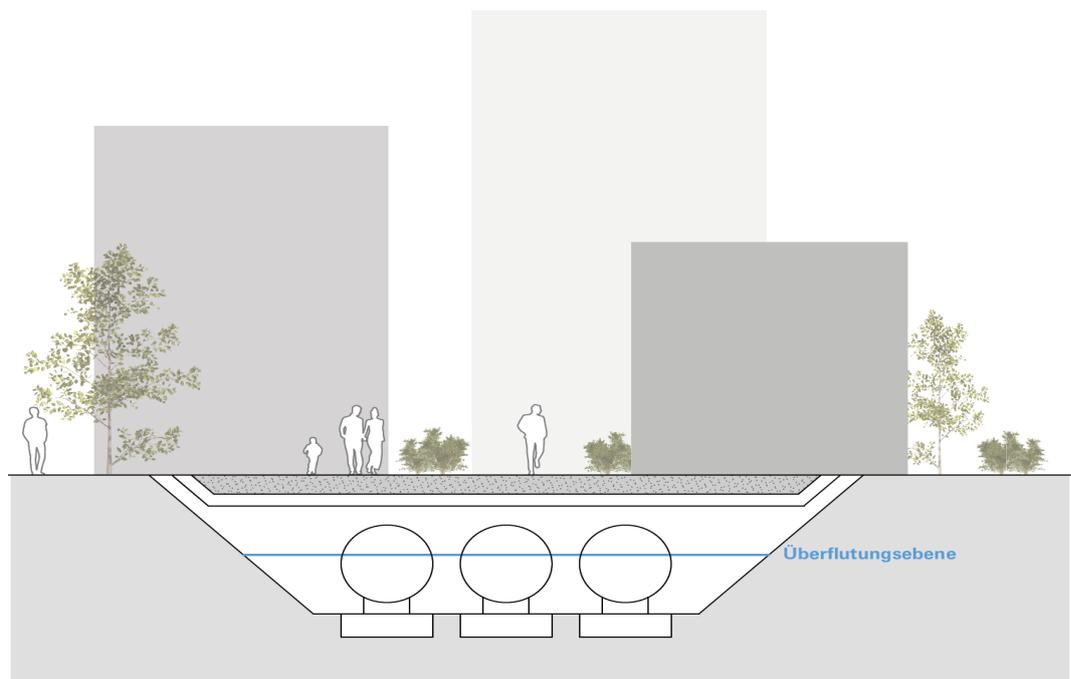


Abbildung 28: Unterirdische Aufstellung der Gasspeicher mit gleichzeitiger Überflutungsmöglichkeit

### 7.2.2 Energetische Verknüpfung des ersten Bauabschnitts

Zum Zeitpunkt der Entstehung des Energiekonzeptes gab es noch keinen festen Planstand, wie die PLK entwickelt werden sollte, da der städtebauliche Wettbewerb noch nicht entschieden war. Eingangs wurde erläutert, dass das Energiekonzept, zwar an einem Rahmenplan angelehnt, aber trotzdem allgemeingültig ist.

Erste Änderungen des derzeitigen Rahmenplans, stellen die geplanten Standorte der in Kapitel 2.1 bis 2.3 beschriebenen Baubereiche dar. Alle drei Baubereiche, darunter die Grundschule, der Sport-Park Ost und der erste Bauabschnitt des Wohnungsbaus, sollen wie in Abbildung 29 dargestellt platziert werden, wobei eine endgültige Lokalisierung aussteht. Da die Planungen der beschriebenen Gebäude auf sehr unterschiedlichen Planungsständen (Standortfindung, Entwurfsplanung bzw. Konzeptphase) stehen, ist die Versorgung der Gebäude durch eine einzige Energiezentrale nicht zu empfehlen. Es müssen darum Synergien der Energieflüsse erkannt und bei der Planung entsprechende anwendbare Lösungen gefunden werden.



Abbildung 29: Vorschlag der Energetischen Verknüpfung der Sektoren des ersten Bauabschnitts

Eine wesentliche Grundlage des Energiekonzeptes ist die Vernetzung, im kleinem wie im großen Maßstab. So sollen die überschüssigen Energien Strom, Wärme und Gas zwischen den Energiezentralen (EZ) Wohnen, Schule und Sport-Park Ost bidirektional dynamisch in Form von Strom (schwarze Linien), Wärme (rote Linien) und Gas (grüne Linie) ausgetauscht werden.

Da der Komplex des Sport-Park Ost enorme Energiemengen benötigen wird, bietet dieser sich bevorzugt als Abnehmer an, kann aber gleichzeitig, auf Basis seiner enormen Dachflächenpotenziale, zeitweise als PV-Stromlieferant dienen.

Die frühzeitige Abstimmung der dynamischen Lastkurven für Wärme und Strom der drei energetisch grundsätzlich unterschiedlichen Gebiete ist entscheidend für das Niveau der Vernetzung.

Optimal kann dieser Abstimmungsprozess auf Basis eines Energiekonzeptes erfolgen, welches die Anknüpfungspunkte an die PLK, für die Grundschule und den Sport-Park Ost belastbar erarbeitet. Nur so kann gewährleistet werden, dass die notwendigen Trassen für Wärme, Strom und Gas entsprechend den zu erwartenden Anforderungen nach optimal geplant und errichtet werden.

Weiterhin wäre es natürlich wünschenswert, dass die für das PLK beschriebene hohe Effizienz und auch Intelligenz der Energielogistik auch für die Nutzung von Grundschule und Sport-Park Ost entwickelt und übertragen wird.

### 7.2.3 Aufbau des 3-Leiter-System

#### *Netzstruktur*

Die Struktur von Wärmeverteilungsnetzen wird vor allem durch städtebauliche Gegebenheiten (Straßenführung, räumliche Anordnung der Häuser), die Netzgröße und die Einbindung der Wärmeerzeuger bestimmt.

Für das Cluster A, B und C würde sich nach dem Ansatz, dass ca. 360 Wohneinheiten-Äquivalente in einer funktionalen Einheit zusammengefasst werden, bei einem Sternnetz eine Anordnung wie in Abbildung 30 ergeben. Jeder abgehende Versorgungsstrang versorgt dabei 30-50 Wohneinheiten-Äquivalente. Das sternförmige Netz ist besonders für kleinere Wärmenetzen geeignet, welche auf die verschiedenen Anforderungen flexibel reagieren müssen. Bei der Anordnung ist es möglich, Gebäude gleichzeitig zu kühlen und zu beheizen. Dieser Effekt kann als Synergieeffekt eingestuft werden, da durch die Kühlung das Temperaturniveau des Rücklaufs angehoben wird.

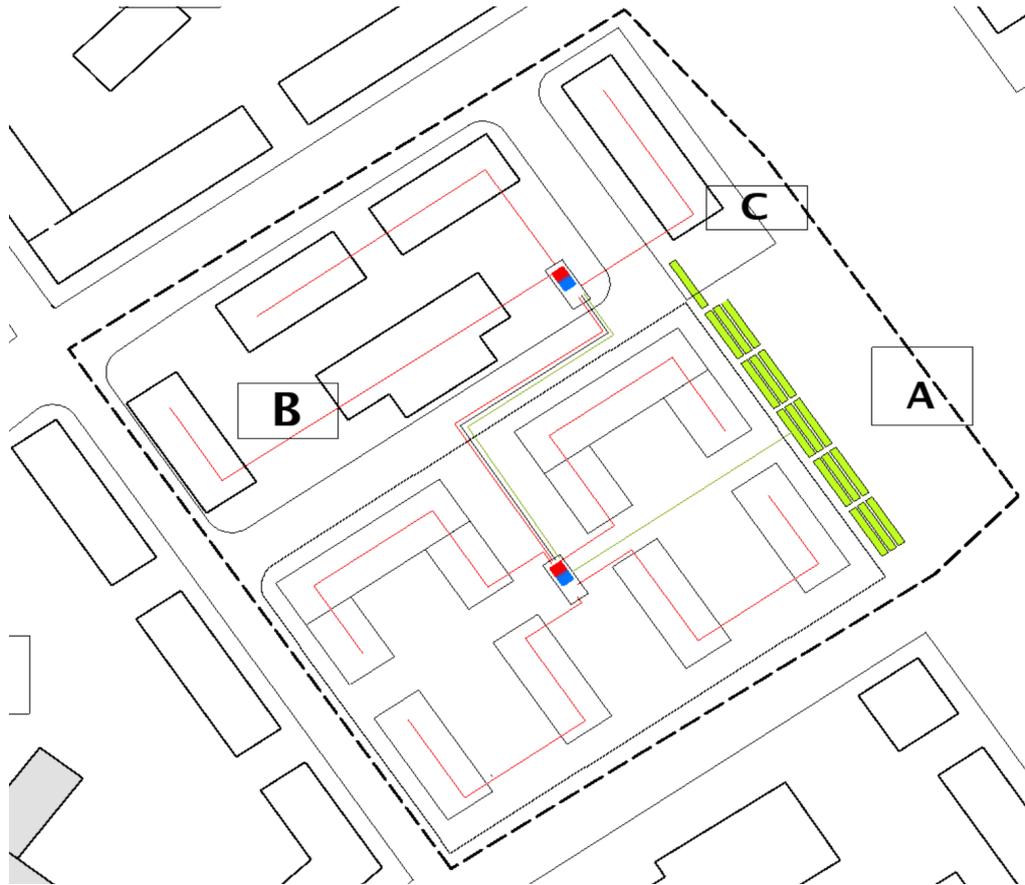


Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung des Wärmenetzes im energie-Cluster A-B-C mit Energiezentrale

Für das 3-Leiter-System wird eine „Haus zu Haus“-Trassenführung empfohlen. Dabei werden Häuser im Gruppen zusammengefasst und nur ein Haus direkt an die Verteilleitung angeschlossen. Von diesem aus werden die restlichen Häuser angebunden, so dass insgesamt weniger Abzweigungen von der Verteilleitung notwendig sind.

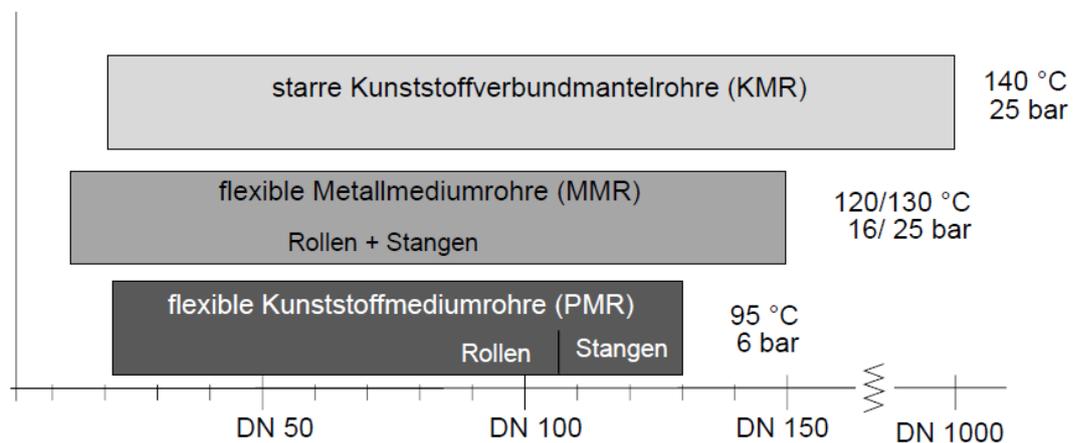
Da die Rohrleitungen durch Privatgrundstücke und Gebäude verlaufen, sind von den Eigentümern Genehmigungen und Wegerechte einzuholen und diesbezüglich Verträge aufzusetzen.

Des Weiteren wird empfohlen, eine Kellerverlegung bei der „Haus zu Haus“-Trassenführung anzuwenden. Diese gehört zu den preiswerteren Verlegearten, da hier weder Kosten für Tiefbauarbeiten, noch für spezielle Fernwärmerohre anfallen. Die Hausverteilung kann durch einfache Heizwasserrohre erfolgen und mit z. B. Steinwollgedämmung einfach nachgedämmt werden. Eventuelle Leckagen werden schnell entdeckt und einfach, ohne Tiefbauarbeiten behoben. Bei dieser Kombination werden die Leitungen abwechselnd durch den Keller (nachgedämmte Heißwasserrohre) und den Grünbereich zwischen den Gebäuden (vorgedämmte Fernwärmeleitungen) geführt.

### Nahwärme-Verlegesysteme

Es gibt mehrere Verlegesysteme für die Nahwärmeversorgung. Für die Festlegung eines Verlegesystems muss der Anwendungszweck analysiert werden. Zur Verfügung steht das Kunststoffverbundmantelrohr mit Stahlmediumrohr (KMR). Dieses ist aufgrund der Standardisierung, der Robustheit und des geringen Materialpreises das meistverlegete Rohrsystem.

Abbildung 31:  
Charakterisierung der  
verschiedenen  
Rohrsysteme für  
Nahwärmenetze [57]



Daneben werden flexible Rohre, wie das flexible Kunststoffmediumrohr (PMR) oder das flexible Metallmediumrohr (MMR), je nach Einsatzort und Einsatzkennndaten, für die Verteilung der Wärme verwendet. Vorteilhaft ist hier die Verlegung „von der Rolle“ (Herstellerangaben zu maximalen Nennweiten beachten), wodurch eine hohe Verlegegeschwindigkeit realisiert werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die Selbstkompensation bei Temperaturschwankungen.

### *Netzdimensionierung*

Um optimale Rohrdurchmesser der verschiedenen Teilstrecken des Netzes zu realisieren, müssen mehrere Einflussfaktoren analysiert werden. Grundsätzlich sind die Material- und Tiefbaukosten bei kleineren Durchmessern niedriger, jedoch steigt der Pumpenergieverbrauch in Folge des Druckverlusts an, was wiederum höhere Kosten verursacht. Es müssen auch Geräuschemissionen wegen hoher Fließgeschwindigkeiten an den Hausübergabestationen beachtet und gegebenenfalls reduziert werden. Eine Kostenminimierung hierzu basiert auf einer feingliedrigen Untersuchung und Optimierung folgender Punkte:

- Netzstruktur
- Vor- und Rücklauftemperaturen
- Gleichzeitigkeitsfaktoren
- Geodätische Höhen
- Stromkosten des Betriebs
- Druckverlust in Abhängigkeit der Rohrrauigkeit (bei Kunststoff- bzw. Kupfermediumrohren geringer als bei Stahlmediumrohren)
- Maximal zu übertragende Leistung je Trassenabschnitt

Die maximale Übertragungsleistung wird durch eine Aufsummierung der von dieser Rohrleitung versorgten Anschlussleistungen der jeweiligen Gebäude ermittelt. Die Leistungen für die Warmwasserversorgung müssen ebenfalls bei den Leistungsübertragungen auf Grundlage der Anforderungen der Warmwasserbereiter berücksichtigt werden.

#### 7.2.4 Steuerung von Wärmenetzen

Die übergeordnete Steuereinheit, welche beim Betrieb eines Wärmenetzes zur Verwendung kommt, dient der Visualisierung der Systemzustände, der Fehlermeldungen, der Ist- und Sollwerteanalyse des gesamten Wärmenetzsystems. Weiterhin soll eine Visualisierung der Energiezentralen- und der Netzregelung aufgebaut werden. Es ist möglich Abläufe zu analysieren und Optimierungen des Systems durchzuführen. Das zu verwendende System erfasst sämtliche Regeleinheiten und Komponenten, die beim Kunden verbaut sind, wie Übergabestationen mit Wärmemengenzählern, Netztemperaturen und -drücken. Weiter wird das hydraulische Schema bei jedem einzelnen Wärmeabnehmer visualisiert sowie sämtliche Werte wie Vor- und Rücklauftemperatur, Speichertemperatur, Durchfluss, Schaltzeiten, Ventil- und Schalterstellungen, momentane Leistung, und abgenommenen Wärmemengen erfasst. Neben den Wärmeabnehmern können sowohl Wärmeerzeuger und -speicher visualisiert und sämtliche Daten dargestellt werden.

Alle Kunden- und Wärmezählerdaten werden verschlüsselt von den einzelnen Reglern zur Leittechnik übertragen, sodass keine Verbrauchs- oder Kundendaten von Dritten aufgezeichnet oder manipuliert werden können.

Über die Steuerung des Wärmenetzes werden alle relevanten Parameter der Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Verbrauchs von Wärme erfasst und gespeichert. Stromseitig werden sowohl die Stromerzeugung als auch deren Verbrauch sowie der netzseitige Strombezug erfasst.

Unter anderem sollen im Wärmenetz und bei den Übergabestationen folgende Parameter erfasst und aufgezeichnet werden:

- Leistungsübertragungen
- Vorlauftemperaturen
- Rücklauftemperaturen
- Durchflüsse
- Ventilstellung an der Hausübergabestation
- Außentemperatur
- Betriebszustand der Pumpen
- Temperatur der Heizkreise
- Netzdrücke
- Druckdifferenzen
- Drehzahl der Netzpumpen
- Sollwert der Vorlauftemperatur
- Wärmemenge Netz
- Wärmemenge Speicher
- Stromzähler Pumpen
- Wasserzähler für Nachspeisung
- Betriebszustand der Wärmeerzeuger
- Betriebsstunden des Wärmeerzeugers
- Wärmeverluste
- Brennstoff- und Stromverbrauch der Wärmeerzeuger
- Wärmemengen an Kunden
- Be- und Entladungsenergiemengen der Speicher

### 7.2.5 Abwicklung

Es wird empfohlen für Bauherren einen Anschluss- und Benutzungszwang zu etablieren und vertraglich zu fixieren, d. h. der gesamte Wärmebedarf für Heizung und Warmwasserbereitung ist aus der Nahwärmeversorgung zu decken. Die Abnahme von Wärme aus einem Wärmenetz ist grundsätzlich, im Gegensatz zur Abnahme von Strom aus dem Stromnetz, dem Bauherrn (Investor) frei überlassen. Es ist jedoch sinnvoll, wenn im Baugebiet alle Gebäude an das Wärmenetz angeschlossen werden und die gesamte Heizwärme mit Nahwärme gedeckt wird, da so der Aufbau und Betrieb eines umweltfreundlichen Wärmenetzes wirtschaftlich möglich ist. Ausnahmen von der Nahwärmenutzung können in Einzelfällen, z. B. bei überdurchschnittlich hohen Energieverbräuchen und Leistungen, sinnvoll sein.

Für den Anschluss an das Nahwärmenetz bezahlt der Bauherr einen einmaligen Betrag. Dabei wird zwischen dem Baukostenzuschuss und den Hausanschlusskosten unterschieden. Der Baukostenzuschuss betrifft das Wärmeverteilnetz, also die Versorgungsleitungen in den öffentlichen Straßen, die z. B. für die Erschließung eines Baugebiets verlegt wurden. Bei den Hausanschlusskosten handelt es sich um die Verbindung zwischen dem Verteilnetz und dem Übergabepunkt im Gebäude.

Bei einem Anschluss an das Nahwärmenetz kann ein Baukostenzuschuss für das vorgelagerte Netz sowie eine Hausanschlusspauschale erhoben werden.

Neben den ökologischen Vorteilen bietet die Nahwärmeversorgung eine besonders platzsparende geräuschlose, geruchslose und sehr bequeme Möglichkeit zu heizen. Die Zuständigkeiten an der Heizanlage sind klar geregelt, z.B. sind die Stadtwerke für die Heizzentrale mit den Erzeugungsanlagen, für das Verteilnetz und für den Hausanschluss bis zur Übergabestelle verantwortlich. Sollten hier zukünftig Reparaturen oder Erneuerungsinvestitionen notwendig sein, tragen der Contractor bzw. die Stadtwerke die Kosten. Der Kunde ist für die Anlagen in seinem Zuständigkeitsbereich verantwortlich.

## 7.3 Kälteerzeugung und Verteilung

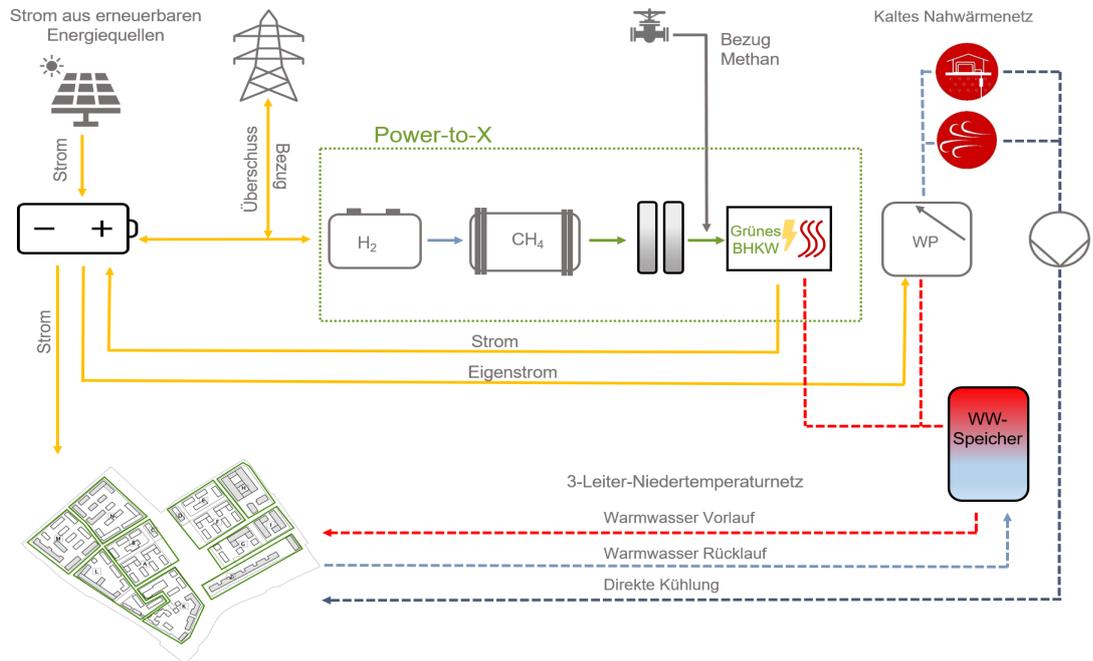


Abbildung 32:  
Kälteversorgung des  
Quartiers im Sommerfall

Das Prinzip der Kälteversorgung über eine Kältezentrale funktioniert ähnlich wie der Kreislauf der Fernwärme. Wasser wird zentral abgekühlt und über eine Rohrleitung an die Kunden geliefert. Dort nimmt es Wärme aus der Gebäudeklimatisierung (Flächenkühlung) auf. Anschließend wird es über eine zweite, parallel verlaufende Leitung der Kälteerzeugung (z. B. Sondenfeld, Kältemaschine) zugeführt, wieder abgekühlt und dem Kunden erneut zur Verfügung gestellt. Das Leitungsnetz des 3-Leiter-Systems wird in diesem Fall optimal ausgenutzt. Die Vorlaufleitung für die Kälteversorgung stellt im Heizfall die Leitung für die Wärmeversorgung der Heizflächen dar. Im Kühlfall kann mit derselben Leitung die Flächenkühlung der Gebäude gespeist werden. In der PLK soll zur Kälteerzeugung Umgebungsenergie in Kombination mit Wärmepumpen und Geothermie (niedrige Jahresmitteltemperatur ca. 8°C[33]) genutzt werden. Für die Geothermie wird das Medium direkt über Pumpen und ohne maschinelles Herabsenken der Temperatur den Gebäuden zur Verfügung gestellt. Dort wird im Regelfall passiv gekühlt, d. h. über die Aktivierung von Bauteilen und nur in Ausnahmefällen sollen zentrale Erzeugungsanlagen zur Rückkühlung genutzt werden. Da es sich bei der Fernkälte um ein geschlossenes Sonden-System handeln würde, gäbe es keinen Wasseraustausch mit dem Grundwasser, somit keinen Eingriff in die Wasserökologie und keine Probleme mit möglichen Altlasten auf dem Gebiet. Durch diese natürliche Kühlung wird deutlich weniger elektrische Energie für die Kälteerzeugung benötigt und es ist eine Gesamtstromersparnis von rund 70 % gegenüber individueller Maschinenkälte mit Kühlturm möglich [34]. Prinzipiell sollen die Erdsonden die Basis der Kälteversorgung der Gewerbebauten der PLK darstellen und nur im Ausnahmefall, z. B. für Räume mit besonders hoher

Kühllast, wie u. a. Serverräume oder Kühlräume des Lebensmitteleinzelhandels, mittels Kompressionskältemaschinen bereitgestellt werden. Im Sommer kann der Strombedarf von Kompressionskältemaschinen mit nachhaltigem PV-Strom gedeckt werden.

Da die Kühlung grundsätzlich über Flächen erfolgen soll, ist es notwendig, die Temperaturunterschiede zwischen Kühlfläche und Raumtemperatur möglichst klein zu halten, um Kondensationseffekte zu vermeiden. Aus diesem Grunde ist es notwendig die Gebäude in Ihrer Form und Konstruktion soweit wie möglich mit passiven Maßnahmen besonders kühllastschonend zu gestalten. Dies kann über Ausrichtung, Verschattungselemente sowie einen optimierten Fensterflächenanteil gewährleistet und eine geringe mittlere Kühllast von  $8,5\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$  erreicht werden.

Wie bereits angesprochen, soll eine direkte Kühlung über die Geothermie-Quellen eingesetzt werden. Um die Anzahl der dafür zu errichtenden Sonden auf ein Minimum zu reduzieren bietet es sich an, weitere erdberührte Bauteile als Entzugsquellen zu aktivieren. Priorisiert werden, sollten folgende Bauteile:

- erdberührte Bereiche der Hochgarage
- Bauteile der Tiefgarage
- Baulich erforderliche Gründungspfähle

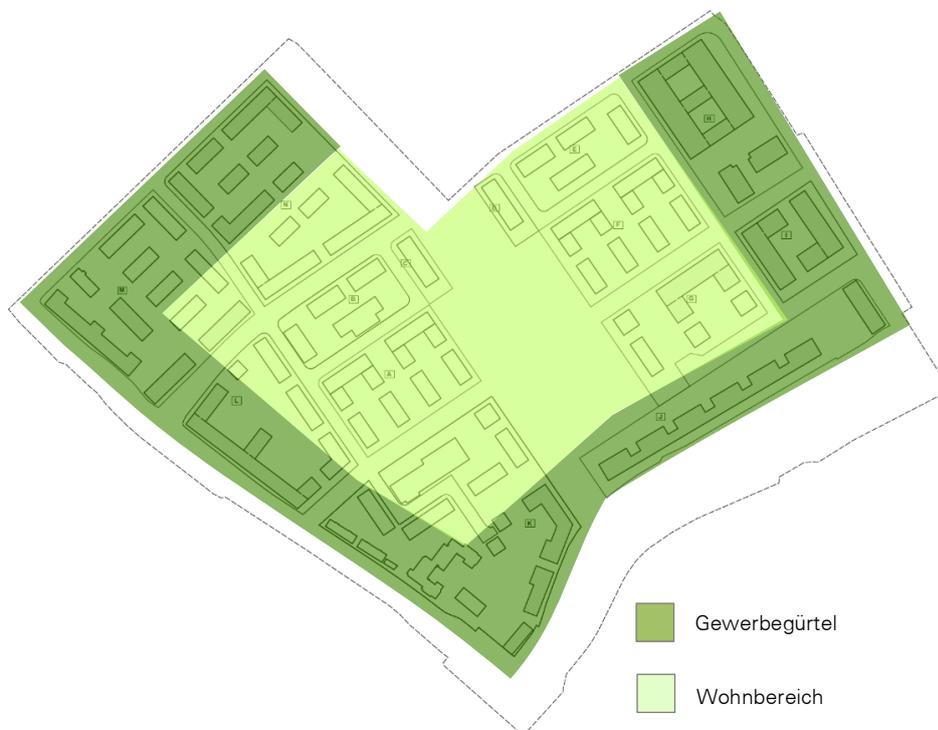


Abbildung 33: Vereinfachte Unterteilung des Quartiers in Wohnbereich und Gewerbegebiet

Die gleichzeitige Nutzung der Sonden für Kälte und Wärme ist auch im Hinblick auf die Effizienz der Quelle als positiv zu bewerten, da die Wärme, welche im Sommer aus den Gebäuden in den Boden geleitet wird, im Winter teilweise als

zusätzliche Wärme für die Beheizung der Gebäude vorhanden ist. Diese Synergieeffekte in Form von ausgeglichenen Energiebilanzen sind nicht nur zu empfehlen, sondern in Teilen auch für eine Genehmigung notwendig. Das Gebiet lässt sich grob in die zwei dargestellten Bereiche (Abbildung 33) unterteilen: Den sogenannten Gewerbegürtel, der auch wichtige schallschutztechnische Aufgaben erfüllt und den innenliegenden Wohnbereich.

Für die Versorgung mit Kälte ist der Gewerbebereich besonders relevant, da vorwiegend in diesem Bereich gekühlt wird. Es ist sinnvoll die Sonden in diesem Gürtelbereich zu platzieren, um so die Leitungslängen und gleichzeitig die Verluste zu minimieren. Es ist außerdem darauf zu achten, dass die Entzugsleistung der Sonden die Kühllast der zu versorgenden Gebäude unter Berücksichtigung von Pufferspeichern decken kann. Für weitere Untersuchungen und die nachfolgenden genehmigungsbegleitenden Phasen wird die Beauftragung eines Planungsbüros mit Spezialisierung auf Geothermie empfohlen.

Die benötigte Fläche an Sonden, um über diese zu kühlen, beträgt ca. 18.000m<sup>2</sup> und könnte gemäß Abbildung 34 links angeordnet werden. Der spezifische Kühlenergiebedarf für die Gewerbe-Gebäude liegt bei ca. 8,5 kWh/m<sup>2</sup>a und der spezifische Heizenergiebedarf bei 15 kWh/m<sup>2</sup>a. Somit kann das Sondenfeld (Geothermie) mit ihren ca. 18.000 m<sup>2</sup> die Kühllast des Gewerbebereichs zu 100% decken und dessen Heizenergiebedarf zu mehr als 50%. (Prinzipdarstellung des Bereichs, rechts, rot, in Abbildung 34)

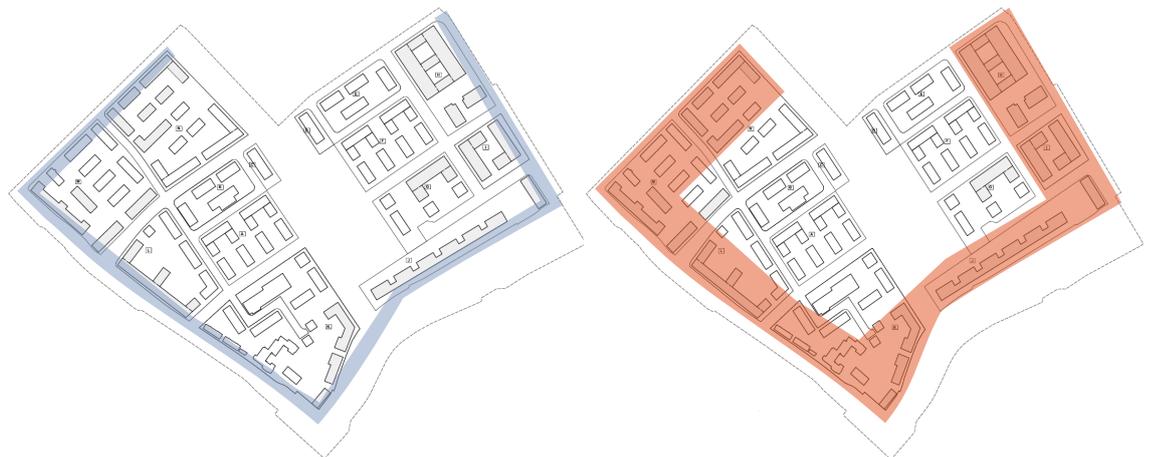


Abbildung 34:  
Erdsondenfläche für Kühlen  
(links) und Ausnutzung der  
Geothermiequelle für  
Heizen und Kühlen (rechts)

In der Übergangszeit (September, Oktober, März, April) liegt der benötigte Leistungsbedarf für die Beheizung auf einem niedrigen Niveau, wodurch eine großflächige Versorgung des Gewerbebereichs mit Wärme durch die Geothermiequelle stattfinden kann. Im Winterfall wird die Versorgung von Wärme neben den Wärmepumpen auch durch das PtX-System und das BHKW sichergestellt. Zudem kann die Geothermiequelle weiterhin einen Beitrag leisten.

## 8 Stromerzeugung und Verteilung

### 8.1 Ausführung des Stromnetzes

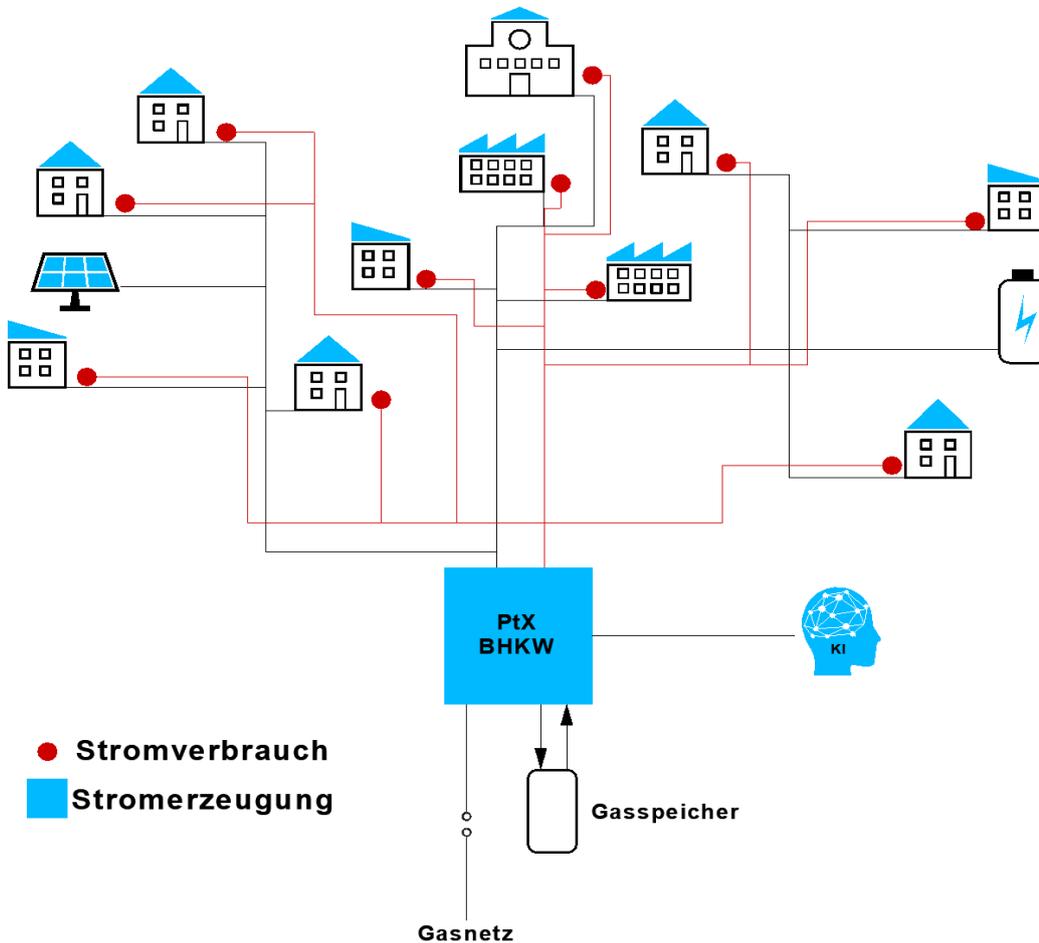


Abbildung 35:  
Schematische Darstellung  
des Stromnetzes für die  
PLK

Das Stromnetz soll generell als Kundenstromnetz ausgebildet werden, was bedeutet, dass die Mieter der Kundenstromanlage vom Eigentümer der Kundenstromanlage mit Strom beliefert werden. Dadurch entfallen die Netzentgelte und es wird ein niedrigerer Strompreis als ortsüblich realisierbar. Dieses Einsparpotenzial ist in der Gesamtbilanz ein wichtiger Bestandteil der Refinanzierung des Systems. Das Stromnetz besteht aus mehreren Erzeugern und Verbrauchern. Erzeuger sind PV-Anlagen und BHKW. Die Verbraucher sind die privaten Haushalte und das Gewerbe. Diese Erzeuger- und Verbrauchernetze werden durch Elektrospeicher verbunden. Eine Sektorenkopplung kann durch den Einsatz des Stroms für die Wärmepumpe und die zu jedem Zeitpunkt flexible Einbindung des Power-to-X-Systems stattfinden.

### 8.1.1 Erzeugungsanlagen

Es gibt zwei Stromerzeugungssysteme, die das Quartier der Prinz-Leopold-Kaserne mit bis zu 100% autark mit Strom versorgen sollen. Zum einen kommen BHKW (Abbildung 36, blaue Punkte) zur Strom- und Wärmeversorgung für die Gebäude zum Einsatz und zum anderen werden PV-Anlagen auf den Dächern, Quartiersgaragen und möglicherweise an Lärmschutzwällen installiert. (Abbildung 36, graue Flächen)



Abbildung 36: Flächige und punktuelle Stromerzeugungsanlagen im Gebiet der PLK

### 8.1.2 Steuerung und Regelung des Wärmenetzes

Die Wärmeerzeugung eines Energie-Clusters mit ca. 360 WE erfolgt über zwei BHKW, zwei Wärmepumpen und den Spitzenlastkessel, wobei ein Pufferspeicher zwischen Komponenten und Verbrauchern geschaltet ist. Die Wärmepumpe wird bevorzugt zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Zur Deckung von Spitzenlasten und zu Gunsten der Flexibilität der Erzeugung dient der Pufferspeicher sowie das BHKW. Sollte in einem Betriebszustand die Wärmeerzeugung aus BHKW und Wärmepumpe mit Pufferspeicher nicht ausreichen, wird der gasbetriebene Spitzenlastkessel eingesetzt. Der Spitzenlastkessel dient gleichzeitig der Redundanz. Die Spitzenlastkessel können auch Wärmecluster übergreifend eingesetzt werden. Zur Stromerzeugung wird in erster Linie die PV-Anlage eingesetzt. Die PV-Anlage bzw. das BHKW werden mit einem Stromspeicher kombiniert. Sollte die Stromerzeugung der PV-Anlage zur Deckung des Strombedarfs der Bewohner und der Wärmepumpe nicht ausreichen, schaltet sich das BHKW hinzu. Die vom BHKW erzeugte Wärme wird dann mit der Wärme der

Wärmepumpe ergänzt, um den Wärmebedarf zu decken. Überschüssiger Strom, der den Bedarf übersteigt und nicht in den Stromspeicher eingespeichert werden kann, fließt in die E-Mobilität und den Elektrolyseur. Sollte in bestimmten Betriebszuständen die Stromerzeugung aus BHKW und PV nicht ausreichen, besteht immer die Option des Strombezugs aus dem Netz der allgemeinen Versorgung.

Für eine Regelung sind durch ein Energiemanagementsystem in einem Nahwärmenetz mit zentralem Pufferspeicher Temperaturfühler, Wärme- und Strommengenähler auszulesen und BHKWs anzusteuern. Die erhobenen Daten werden in einer Datenbank auf einem Server abgespeichert und können von dort aus online visualisiert werden. Auf der Datenbank operiert ein Programm, welches viertelstündlich für die Wärmepumpe und das BHKW angepasste Fahrpläne erstellen soll.

Die Regelung erfolgt dabei in 5 Schritten:

1. Generieren der Messwerte: Temperaturen im Pufferspeicher und der Stand des Wärmemengenählers werden minütlich ausgelesen und in der Datenbank abgespeichert.
2. Generieren der Randwerte des Fahrplanoptimierungsproblems: Der Fahrplan wird auf Basis der Wärmemengenählerhistorie, aus welcher ein Wärmelastvorhersage, auf Basis von KI-gestützten Analysen unter Berücksichtigung der solaren Gewinne und thermischen Speichermassen (detaillierter in Kapitel 6.2) für den Simulationszeitraum erstellt wird, und die aktuellen Temperaturen generiert, womit der Füllstand des Pufferspeichers geschätzt wird.
3. Optimierung des BHKW-Fahrplans: Mit Hilfe einer Optimierung des Nahwärmenetzes wird ein optimaler (bezüglich EPEX-Börsen-Preisen) Fahrplan berechnet, welcher die zukünftige Wärmelast deckt und den aktuellen Pufferspeicherfüllstand berücksichtigt.
4. Ablegen des Fahrplans: Der Fahrplan wird auf der Datenbank abgelegt und ist von dort aus für die Umsetzung vor Ort verfügbar gestellt.
5. Umsetzung des Fahrplans: Der aktuellste Fahrplan dient als Sollwert für den nächsten Regelschritt, welcher BHKW eingestellt und umgesetzt wird. Zusätzlich gibt es auf dem Energiemanagementsystem lokal eine Fallbackstrategie, welche eine rudimentäre, wärmegeführte Regelstrategie der BHKWs umsetzt, falls keine externen Sollwerte für den relevanten Regelschritt vorhanden sind.

### 8.1.3 Netzdimensionierung

Durch ein geeignetes Lastmanagement, das z. B. den Strombedarf zur Ladung von Elektroautos miteinbezieht, kann die Netzbelastung geringgehalten werden.

Dadurch wird ermöglicht, dass die Netzdimensionierung klassisch erfolgen kann. Dies wirkt sich positiv auf die Netzanschlusskosten aus: Die Netzanschlusskosten werden anhand der maximalen Leistung und der Energiemenge, die über den Netzanschlusspunkt fließen, berechnet. Eine Senkung bzw. ein Gleichbleiben der Netzanschlussleistung spart dementsprechend Kosten.

#### 8.1.4 Kundenanlage

Die für das Quartier vorgeschlagene Kundenanlage im Sinne des § 3 Nr. 24 a) Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), führt zu folgenden Voraussetzungen und Rechtsfolgen (vgl. § 3 Nr. 24 a) EnWG):

- Verbindung mit einem Stromnetz der allgemeinen Versorgung oder einer Stromerzeugungsanlage
- Unbedeutend für den Wettbewerb (grundsätzlich wenige Kunden und geringe Strommengen)
- Räumlich zusammenhängendes Gebiet
- Unentgeltliche Zurverfügungstellung der Infrastruktur, d. h. grundsätzlich keine Abrechnung von Netzentgelten zulässig
- Folge: Ausgenommen von Regulierungsvorgaben

Es handelt sich bei den Voraussetzungen für eine Kundenanlage um unbestimmte Rechtsbegriffe. Deshalb bedürfen sie insbesondere in Zweifelsfällen der Auslegung durch die Regulierungsbehörden und Gerichte.

Es liegen zwei Beschlüsse der Bundesnetzagentur (BNetzA) und eine Entscheidung des OLG Frankfurt vor:

- Frage der räumlichen Abgrenzung einer Kundenanlage und der Anzahl der Wohneinheiten innerhalb einer Kundenanlage – BNetzA, Beschluss vom 3. April 2017 (Az. BK6-15-166)
- Frage des räumlichen Zusammenhangs von Kundenanlagen – BNetzA, Beschluss vom 27. Juli 2017 (Az. BK6-16-279)
- Frage der unentgeltlichen Zurverfügungstellung der Infrastruktur und der Anzahl der innerhalb einer Kundenanlage versorgten Kunden – OLG Frankfurt am Main, Beschluss vom 8. März 2018 (Az. 11 W 40/16)

Daraus ergeben sich folgende Erkenntnisse:

Eine zu hohe Anzahl an Letztverbrauchern, wie sie im Fall (Az. BK6-15-166) mit 400-500 Wohneinheiten gegeben ist, ist nach Auffassung der BNetzA mit den Vorgaben aus § 3 Nr. 24 a) EnWG nicht vereinbar. Bei deutlich über 100 Letztverbrauchern kann nicht mehr ohne Weiteres davon ausgegangen werden, dass dies unbedeutend für die Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten Wettbewerbs ist.

Somit lässt sich für die Pionier- und Prinz-Leopold-Kaserne mit den geplanten ca. 2.000 geplanten Wohnungen feststellen, dass eine Kundenanlage im Gesamten

nicht zulässig ist und diese in mehrere unabhängige Anlagen aufgeteilt werden muss, die durch eine Direktleitung verbunden sind. Nach derzeitiger Rechtsprechung erscheint es möglich, dass der geplante erste Bauabschnitt von 360 Wohneinheiten als eine Kundenanlage bezeichnet werden kann.

Die BNetzA legt Kriterien zur Ermittlung fest, ob eine Straße im jeweiligen Fall die räumliche Einheit eines Gebietes stört. Nach Auffassung der Behörde sind in die Einzelfallentscheidungen folgende Punkte einzubeziehen:

- Bauart und Ausmaß der Verkehrsquerung(en)
- Charakter der Straße als Hauptverkehrsstraße oder zum Zweck der Erschließung des Gebiets sowie
- Art und Ausmaß der Nutzung

Handelt es sich beispielsweise um eine reine Anliegerstraße, die nahezu ausschließlich der Erschließung dient, ist der Charakter des Gebiets nicht unterbrochen. Anders ist es jedoch bei einer z. B. vierspurigen Straße, die durch einen begrünten Mittelstreifen getrennt ist. Dabei handelt es sich um einen Hauptverkehrsweg, der nicht nur zur Erschließung des Wohngebietes, sondern zur Erschließung des gesamten Stadtgebiets beiträgt und nicht ohne Weiteres überwunden werden kann.

Ferner helfen gemeinsam genutzte Versorgungsleitungen nicht über einen fehlenden räumlichen Zusammenhang hinweg. [35]

Ob eine Kundenanlage nach § 3 Nr. 24 a/b EnWG vorliegt, entscheidet das Unternehmen bzw. der Eigentümer/Betreiber der Anlage selbst. Ein Antrags- oder Bestätigungsverfahren bei den Regulierungsbehörden ist nicht vorgesehen. Vom Anschlussnetzbetreiber wird die Selbsteinordnung in aller Regel übernommen und nur in begründeten Einzelfällen wird die Einstufung hinterfragt. Daraus resultiert aber das Risiko, dass die Entscheidung eventuell nicht korrekt ist. In diesem Fall kann auch Jahre später z. B. im Rahmen eines gerichtlichen oder behördlichen Verfahrens die Richtigkeit des Vorliegens einer Kundenanlage geprüft werden. Bezüglich rechtlicher Folgen von einer irrtümlichen Annahme einer Kundenanlage und dessen Betrieb gibt es bisher kaum belastbare Behördenpraxis oder Rechtsprechung [36]. Um dieses Risiko zu begrenzen, empfiehlt es sich mit dem regionalen Netzbetreiber gemeinsam den Prozess der Feststellung einer Kundenanlage zu betreiben, und diese Feststellung auch vertraglich zu binden

## 8.2 Energie-Überschuss-Austausch

Wie oben beschrieben, sind im ersten Bauabschnitt nicht nur 360 Wohneinheiten geplant, sondern auch eine Grundschule und der sogenannte Sport-Park Ost. Da es nicht möglich ist, alle Gebäude mit einer zentralen Energiezentrale zu versorgen, müssen Synergien, wie der Austausch von elektrischer Energie mittels Direktleitung (Direktvermarktung) genutzt werden. Die Direktvermarktung

bezeichnet den Verkauf von Strom aus erneuerbaren Energiequellen an Endabnehmer oder an der Strombörse. Alle neuen EEG-Anlagen ab 100 kW Anschlussleistung müssen an der Direktvermarktung teilnehmen [37]. Betreiber von kleineren Neuanlagen können zwischen dem alten Modell der Einspeisevergütung und der Direktvermarktung wählen.

Es gibt zwei Möglichkeiten der Direktvermarktung:

- geförderte Direktvermarktung im Marktprämienmodell
- ungeförderte sonstige Direktvermarktung

### 8.2.1 Direktvermarktung im Marktprämienmodell

Gesetzliche Voraussetzungen:

Die allgemeinen technischen und standortbezogenen Anforderungen sowie die Meldepflichten sind einzuhalten. Dazu kommen die nachfolgenden Anforderungen:

- Der Strom muss über das Netz der allgemeinen Versorgung an einen Dritten (Direktvermarktungsunternehmer) veräußert werden.
- die Grünstromeigenschaft darf nicht „mitveräußert“ werden, sondern dem Netzbetreiber, der die Marktprämie zahlt, muss das Recht zur Kennzeichnung des Stroms als „Strom aus erneuerbaren Energien, finanziert aus der EEG-Umlage“ überlassen werden.
- die Meldefristen zur Meldung der Veräußerungsform an den Netzbetreiber sind einzuhalten (Anmeldung der Direktvermarktung beim Netzbetreiber spätestens vor Beginn des Vormonats, d.h., wenn Direktvermarktung am 1. Mai beginnen soll, Meldung spätestens am 31. März).
- Sofern mehrere EEG-Anlagen über dieselbe Messstelle wie die direkt vermarktete PV-Anlage abgerechnet werden, muss der Strom aus den anderen Anlagen grundsätzlich auf dieselbe Art und Weise vermarktet werden (z.B. Vermarktung des gesamten Stroms im Marktprämienmodell) oder der gesamte eingespeiste Strom zu festen Prozentsätzen jeweils einer bestimmten Vermarktungsart zugeordnet sein (z.B. für 30% des Stroms Einspeisevergütung und für 70% Marktprämie).
- Es dürfen für den direkt vermarkteten Strom keine vermiedenen Netzentgelte nach § 18 Absatz 1 Satz 1 StromNEV in Anspruch genommen werden.
- Die PV-Anlage muss mit technischen Einrichtungen ausgestattet sein, die es dem Direktvermarktungsunternehmer ermöglichen, jederzeit die jeweilige Ist-Einspeisung abzurufen und die Einspeiseleistung ferngesteuert zu reduzieren.
- Dem Direktvermarktungsunternehmer muss die Befugnis eingeräumt werden, jederzeit die jeweilige Ist-Einspeisung abzurufen und die Einspeiseleistung ferngesteuert zu reduzieren, wenn dies für eine bedarfsgerechte Einspeisung erforderlich ist, sofern dies nicht nach genehmigungsrechtlichen Vorgaben nachweislich ausgeschlossen ist.

- Der Strom darf nur in einem Bilanzkreis bilanziert werden, in dem vom Anlagenbetreiber oder dem Direktvermarktungsunternehmer ausschließlich im Marktprämienmodell vermarkteter Strom aus Erneuerbaren Energien bilanziert wird.
- In vielen Fällen übernimmt ein Dienstleister die administrativen Voraussetzungen der Direktvermarktung (Ummeldung und Bilanzierung) gegen ein Entgelt. Es hat sich die Praxis etabliert, dass der direkt vermarktete Strom auch unmittelbar an diesen Dienstleister verkauft wird. Der Direktvermarkter übernimmt ebenfalls die Weitervermarktung des Stroms an Abnehmer oder den Verkauf an der Strombörse. Er fungiert also auch als Stromhändler.

Erlöse im Marktprämienmodell:

Folgende Erlöse erhält der Betreiber der EEG-Anlage bei einer Vermarktung im Marktprämienmodell:

- die Marktprämie und
- den Erlös, den er beim Verkauf des Stroms an einen Dritten erzielt.

Die Marktprämie wird wie bei der EEG-Vergütung vom Netzbetreiber ausgezahlt. Die Höhe der Marktprämie errechnet sich, indem von dem anzulegenden Wert („Vergütungssatz“) der durchschnittliche Marktwert des Stroms aus PV-Anlagen abgezogen wird, der in dem betreffenden Monat an der Strombörse erzielt werden konnte [38].

Hinzu kommt der tatsächlich erzielte Erlös aus dem Stromverkauf. Da bei BHKW-Anlagen (anders als bei PV-Anlagen) Möglichkeiten der Steuerung der Stromeinspeisung bestehen, lassen sich Erlöse durch eine gezielte marktorientierte Einspeisung erzielen, die über den durchschnittlichen Börsenpreis hinausgehen.

### 8.2.2 Sonstige Direktvermarktung

Der von der EEG-Anlage produzierte Strom kann neben der Marktprämie auch auf sonstige Weise vermarktet werden. Es handelt sich dabei um jede Form der Stromvermarktung über das Netz der allgemeinen Versorgung an Dritte, für die keine Förderung nach dem EEG in Anspruch genommen wird.

Diese Option spielt in der Praxis keine Rolle. Wegen den geringen wirtschaftlichen Vorteilen und der erheblich höheren Wirtschaftlichkeit des Marktprämienmodells ist dieses Modell nicht lukrativ.

### 8.2.3 Netzanschluss

Zuerst muss der Anlagenbetreiber beim Netzbetreiber ein Netzanschlussbegehren stellen, damit dieser alle erforderlichen Maßnahmen für die Umsetzung des Netzanschlusses ergreifen kann. Von den meisten Netzbetreibern werden hierzu Musterformulare auf deren Internetseiten angeboten. Nach Eingang eines Netzanschlussbegehrens ist der Netzbetreiber verpflichtet, dem Anlagenbetreiber einen genauen Zeitplan für die Umsetzung des Netzanschlusses zuzusenden.

Das Netzanschlussbegehren sollte im frühzeitigen Planungsstadium gestellt werden, um eine Verzögerung des Projekts wegen eines etwaigen verspäteten Netzanschlusses zu verhindern.

Gemäß EEG ist der Netzbetreiber verpflichtet, die PV-Anlage unverzüglich an sein Netz anzuschließen. Hierfür ist zur Herstellung des Netzanschlusses der nächste geeignete Netzverknüpfungspunkt zu wählen.

Der Eigentümer des Hausanschlusses muss grundsätzlich die bis zu diesem Punkt entstehenden Anschlusskosten selbst tragen. Dies sind in der Regel die Kosten des Netzanschlusses sowie die Kosten, die mit der Verlegung der Stromleitung bis zum Verknüpfungspunkt verbunden sind. Die hinter dem Verknüpfungspunkt anfallenden Kosten, z. B. für einen erforderlichen Netzausbau, sind vom Netzbetreiber zu entrichten.

In der Regel wird der Netzanschluss vom Netzbetreiber ausgeführt und stellt dies dem Anlagenbetreiber in Rechnung. Der Anlagenbetreiber hat aber auch die Option, einen fachkundigen Dritten zu beauftragen, die Errichtung und den Betrieb des Netzanschlusses durchzuführen. Dies kann beispielsweise sinnvoll sein, wenn der fachkundige Dritte die Leistung kostengünstiger als der Netzbetreiber anbietet. In einem solchen Fall sind die technischen Vorgaben des Netzbetreibers ebenso einzuhalten. Deshalb ist es notwendig, im Vorfeld mit dem Netzbetreiber abzuklären, wie die Einhaltung der technischen Vorgaben bewerkstelligt werden kann.

## 8.2.4 Messung und Messkonzepte

Die selbst verbrauchten Strommengen eines jeden Eigenversorgers sind gemäß EEG mess- und eichrechtskonform zu erfassen, wenn die Eigenversorgung (anteilig) mit der EEG-Umlage belastet ist.

Die für die Umsetzung eines Eigenversorgungsmodells erforderlichen Messeinrichtungen werden meist vom Netzbetreiber installiert und betrieben. Dabei variieren die anfallenden Kosten je nach Messkonzept und Netzbetreiber.

Der Betreiber der EEG-Anlage kann grundsätzlich auch einen fachkundigen Dritten beauftragen, die Installation und den Betrieb der Messeinrichtung durchzuführen.

Das Messkonzept entspricht dem üblichen Messkonzept bei Eigenversorgung und Überschusseinspeisung. Am Netzanschluss wird ein Zwei-Richtungszähler verbaut. Auf diese Weise lassen sich Stromeinspeisung und Strombezug aus dem Netz erfassen. Die Gesamterzeugung der EEG-Anlagen wird durch jeweilige Zähler an den Anlagen erfasst. Jeweils eigene Zähler sind an zu unterscheidenden Verbrauchseinheiten zu installieren. Es ist in jedem Einzelfall zu prüfen, welches Messkonzept sinnvoll ist.

## 8.2.5 Direktleitung

Definition: Direktleitung im Sinne des § 3 Nr. 12 EnWG [39]

- eine Leitung, die einen einzelnen Produktionsstandort mit einem einzelnen Kunden verbindet, oder
- eine Leitung, die einen Elektrizitätserzeuger und ein EVU zum Zwecke der direkten Versorgung mit ihrer eigenen Betriebsstätte, Tochterunternehmen oder Kunden verbindet, oder
- eine zusätzlich zum Verbundnetz errichtete Leitung zur Versorgung einzelner Kunden

Neben der Direktvermarktung gibt es die Option den überschüssigen Strom an Dritte in unmittelbarer räumlicher Nähe ohne Nutzung des Netzes der allgemeinen Versorgung zu veräußern.

Der Verbrauch muss durch einen „Dritten“ erfolgen. Dies setzt zwangsläufig eine Personenverschiedenheit zwischen Anlagenbetreiber und Letztverbraucher voraus.

Der Begriff der unmittelbaren räumlichen Nähe wird im EEG nicht definiert. Die Auslegung des Begriffs sollte anhand von netzbezogenen (hier: vorzugsweise – wie die Clearingstelle EEG es tut – auf den Netzverknüpfungspunkt abzustellen) und gebietsbezogenen Kriterien (tatsächliche Entfernung) erfolgen. Im Zweifel kommt es auf die Umstände des konkreten Einzelfalls an.

Es darf keine Durchleitung des Stroms durch ein Netz der allgemeinen Versorgung erfolgen. Eine Direktleitung z. B. zur Versorgung des Nachbarn und eine Kundenanlage, wie z. B. im Mietshaus sind keine Netze der allgemeinen Versorgung.

Außerdem muss der Strom „veräußert“ werden. Von Veräußerung kann nach dem Wortsinn nicht gesprochen werden, wenn die zur Verfügung gestellte Sache schenkweise – also unentgeltlich – zur Verfügung gestellt wird.

Beispiel:

Der Eigentümer eines Wohnhauses hat auf seinem Dach eine PV-Anlage installiert, über die er die alleinige Verfügungsgewalt hat und deren Kosten er auch trägt; er ist also der Betreiber der Anlage. Den produzierten Strom verwendet der Anlagenbetreiber nicht nur selbst, sondern beliefert auch seinen unmittelbar angrenzenden Grundstücksnachbarn. Dazu hat er zu diesem eine eigene Direktleitung verlegt [40].

Stromkosten:

Die EEG-Umlage fällt bei einer Direktlieferung in voller Höhe an [41]. Verschiedene weitere gesetzliche Umlagen, Abgaben und Entgelte können jedoch eingespart werden. Diese mit der Lieferung über bzw. dem Bezug von Strom aus dem

Stromnetz verbundenen Kosten, entfallen bei der Direktleitung. Es entfallen insbesondere die Netzentgelte und die damit erhobenen gesetzlichen Abgaben und Umlagen (KWK-Umlage, Offshore-Haftungsumlage, die „19-StromNEV-Umlage“ und Konzessionsabgaben) [41].

Tabelle 1 listet die Strompreisbestandteile, die bei der Direktleitung wegfallen mit der zugehörigen Einsparung auf. In dieser Tabelle sind die eingesparten Netznutzungskosten nicht inbegriffen, da diese individuell festzulegen sind.

Tabelle 5 :Eingesparte Strompreisbestandteile bei Direktleitung

| <i>Strompreisbestandteil:</i>  | <i>Einsparung:</i> | <i>Quelle:</i> |
|--------------------------------|--------------------|----------------|
| <i>KWK-Umlage</i>              | 0,226 ct/kWh       | [42]           |
| <i>Offshore-Haftungsumlage</i> | 0,416 ct/kWh       | [43]           |
| <i>19-StromNEV-Umlage</i>      | 0,358 ct/kWh       | [44]           |
| <i>Konzessionsabgabe</i>       | 1,990 ct/kWh       | [45]           |
| <i>GESAMT</i>                  | 2,990 ct/kWh       |                |

Zusätzlich kann bei der Direktlieferung eine Stromsteuerbefreiung bei kleineren Erzeugungsanlagen (< 2 MWel) in Betracht kommen [44]. Gemäß § 9 Absatz 1 Nummer 3 Stromsteuergesetz (StromStG) kann die Stromsteuer entfallen, wenn der Strom von Letztverbrauchern im räumlichen Zusammenhang zur Anlage entnommen wird [46]. Die Stromsteuer beträgt im Jahr 2020 2,05 ct/kWh [47].

## 9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 9.1 Kostenermittlung

In diesem Kapitel werden die bereits beschriebenen Energieversorgungsvarianten hinsichtlich ihrer Annuitäten gegenübergestellt. Bei allen Betrachtungen handelt es sich um Kostenpositionen, welche die Investitions- und Betriebskosten, bezogen auf die Lebensdauer des Systems beschreiben. Dies bedeutet, dass für die Energiesysteme nicht nur Betriebskosten, Wartungskosten und Ersatzkosten (Kapitalkosten) berücksichtigt werden, sondern natürlich auch die Preisentwicklung der Wartungs- und Energiekosten, bezogen auf den Betrachtungszeitraum von 15 Jahren bzw. bei Erdsonden und PV-Modulen von 30 Jahren. Auf Basis dieser dynamischen Investitionsrechnung wird im Sinne der Annuitätenmethode ein Wärmegestehungspreis für die jeweiligen Energieerzeugungsvarianten bestimmt. Die Kostenermittlung der Varianten umfasst die jeweilig beschriebene Energieerzeugungs- und Verteilungstechnik, die Systemgrenzen stellen die Wohnungsübergabestationen dar.

Bei der ersten Untersuchung der monatlichen Energiekosten für Wärme und Haushaltstrom der zu betrachteten Wärmepumpenvarianten (Luft-Wasser, Geothermie, Hybrid und Abwasser) zeichnet sich eine Tendenz für die Varianten Luft-Wasser-Wärmepumpe und Geothermie ab. Wie in der folgenden Abbildung 37 dargestellt,

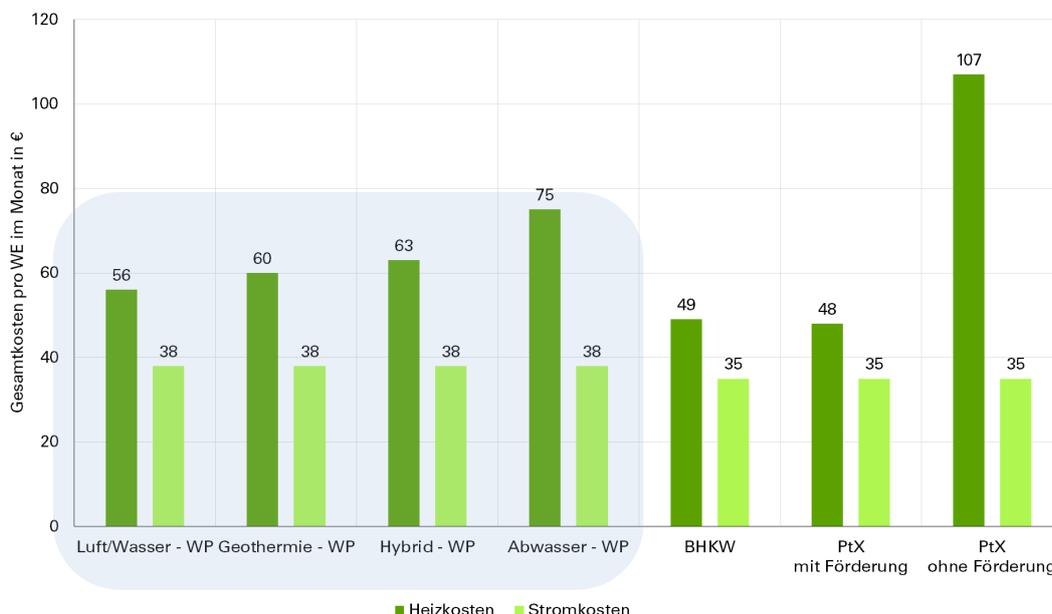


Abbildung 37:  
 Monatliche  
 Energiekosten pro  
 Wohneinheit

können die monatlichen Gestehungskosten für Wärme bei der Luft-Wasser-Wärmepumpe um bis zu 25% gegenüber der Abwasserwärmepumpe reduziert werden. Diese Mehrkosten sind bei den Varianten Hybrid und Abwasser im Wesentlichen auf den erhöhten Investitionsaufwand zurückzuführen. Die Höhe

der Stromkosten ist für die verschiedenen Wärmepumpenvarianten konstant, da der Strom für alle Varianten ausschließlich über die PV-Anlage erzeugt wird.

Durch die hohe Lebensdauer (>30a) und die gesunkenen Kosten für PV-Module, können diese nach wie vor mit dem Modell der Volleinspeisung finanziert werden. Dadurch ist eine Refinanzierung der Anlage ohne weitere zusätzliche Investitionen gegeben. Auf eine Darstellung der PV-Anlagenkosten in dem Variantenvergleich wird deshalb verzichtet.

Für die weitere Untersuchung der Gestehungs- und Energiekosten werden die Varianten Luft-Wasser-Wärmepumpe, Geothermie-Wärmepumpe, BHKW und das Power-to-X-System detaillierter für das Cluster A des Untersuchungsgebiet PLK betrachtet.

## Variante 1: Luft-Wasser-Wärmepumpe + Gasspitzenlastkessel

RandbedingungenVerwendete Energiepreise in Euro Brutto

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| Anzahl der Wohneinheiten | 188 WE       |
| Anzahl Anlage            | 1 Stück      |
| Strompreis PV            | 19,47 ct/kWh |

Kosten Heizanlage

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| Stromkosten Heizanlage           | 185,33 €/a WE |
| Kosten Ersatz und Wartung Anlage | 481,74 €/a WE |
| Stromkosten Haushalt             | 460,26 €/a WE |

Kosten pro WE im Monat

|                |               |
|----------------|---------------|
| Heizung        | 55,59 €/Monat |
| Strom Haushalt | 38,35 €/Monat |

Investitionskosten pro Heizungsanlage

|  |             |
|--|-------------|
| Luft-Wasser-Wärmepumpe<br>+ Gasspitzenlastkessel | 1.245.141 € |
| Ersatz nach                                      | 15 Jahren   |

Energiewerte Cluster A

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Strom Heizanlage                  | 152.197 kWh/a |
| Strom Haushalte                   | 319.000 kWh/a |
| Strom PV Eigenverbr. Heizen+Strom | 327.213 kWh/a |
| Strom Netz                        | 143.984 kWh/a |

## Variante 2 Geothermie-Wärmepumpe+ Gasspitzenlastkessel

RandbedingungenVerwendete Energiepreise in Euro Brutto

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| Anzahl der Wohneinheiten | 188 WE       |
| Anzahl Anlage            | 1 Stück      |
| Strompreis PV            | 19,47 ct/kWh |

Kosten Heizanlage

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| Stromkosten Heizanlage           | 148,56 €/a WE |
| Kosten Ersatz und Wartung Anlage | 575,74 €/a WE |
| Stromkosten Haushalt             | 460,26 €/a WE |

Kosten pro WE im Monat

|                |               |
|----------------|---------------|
| Heizung        | 60,36 €/Monat |
| Strom Haushalt | 38,35 €/Monat |

Investitionskosten pro Heizungsanlage

|   |             |
|---|-------------|
| Geothermie-Wärmepumpe<br>+ Gasspitzenlastkessel | 1.632.844 € |
| Ersatz WP und Gasterme nach                     | 15 Jahren   |

Energiewerte Cluster A

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Strom Heizanlage                  | 124.246 kWh/a |
| Strom Haushalte                   | 319.000 kWh/a |
| Strom PV Eigenverbr. Heizen+Strom | 322.037 kWh/a |
| Strom Netz                        | 121.209 kWh/a |

## Variante 3 BHKW + Gasspitzenlastkessel

RandbedingungenVerwendete Energiepreise in Euro Brutto

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| Anzahl der Wohneinheiten | 188 WE       |
| Anzahl Anlage            | 1 Stück      |
| Strompreis PV            | 19,47 ct/kWh |

Kosten Heizanlage

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| Gaskosten Heizanlage pro Jahr    | 198,64 €/a WE |
| Kosten Ersatz und Wartung Anlage | 520,00 €/a WE |
| Stromkosten Haushalte            | 425,14 €/a WE |

Kosten pro WE im Monat

|                |               |
|----------------|---------------|
| Heizung        | 49,13 €/Monat |
| Strom Haushalt | 35,43 €/Monat |

Investitionskosten pro Heizungsanlage

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| BHKW + Gasspitzenlastkessel | 1.349.582 € |
| Ersatz nach                 | 15 Jahren   |

Energiewerte Cluster A

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| Erdgas Heizanlage       | 784.557 kWh/a |
| Strom Haushalte         | 319.000 kWh/a |
| Strom PV für Haushalt   | 256.000 kWh/a |
| Strom BHKW für Haushalt | 63.000 kWh/a  |
| Strom BHKW Einspeisung  | 205.700 kWh/a |

## Variante 4 PtX + Gasspitzenlastkessel mit Einbindung Förderung (Kapitel 9.3)

RandbedingungenVerwendete Energiepreise in Euro Brutto

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| Anzahl der Wohneinheiten | 188 WE       |
| Anzahl Anlage            | 1 Stück      |
| Strompreis PV            | 19,47 ct/kWh |

Kosten Heizanlage

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| Gaskosten Heizanlage pro Jahr    | 25,45 €/a WE  |
| Kosten Ersatz und Wartung Anlage | 553,74 €/a WE |
| Stromkosten Haushalt             | 424,10 €/a WE |

Kosten pro WE im Monat

|                |               |
|----------------|---------------|
| Heizung        | 48,27 €/Monat |
| Strom Haushalt | 35,34 €/Monat |

Investitionskosten pro Heizungsanlage

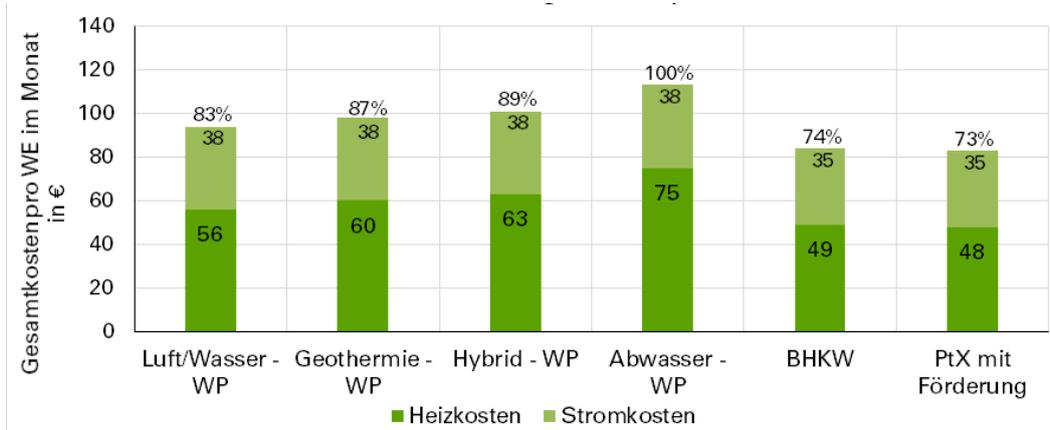
|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| PtX + Gasspitzenlastkessel | 1.324.962 € |
| Ersatz nach                | 15 Jahren   |

Energiewerte Cluster A

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| Erdgas Heizanlage      | 101.382 kWh/a |
| Strom Haushalte        | 319.000 kWh/a |
| Strom PV für Haushalt  | 256.000 kWh/a |
| Strom PtX für Haushalt | 63.000 kWh/a  |

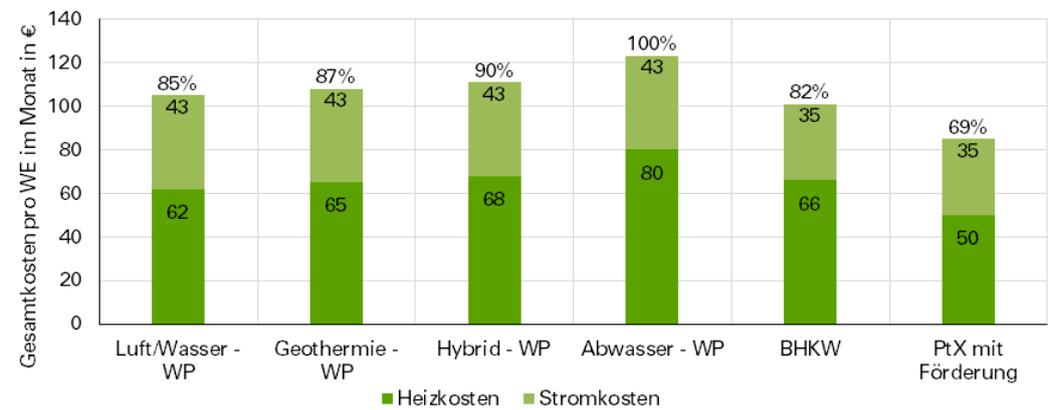
Monatliche Energiekosten Wohnen heute

Abbildung 38:  
Monatliche  
Energiekosten pro WE



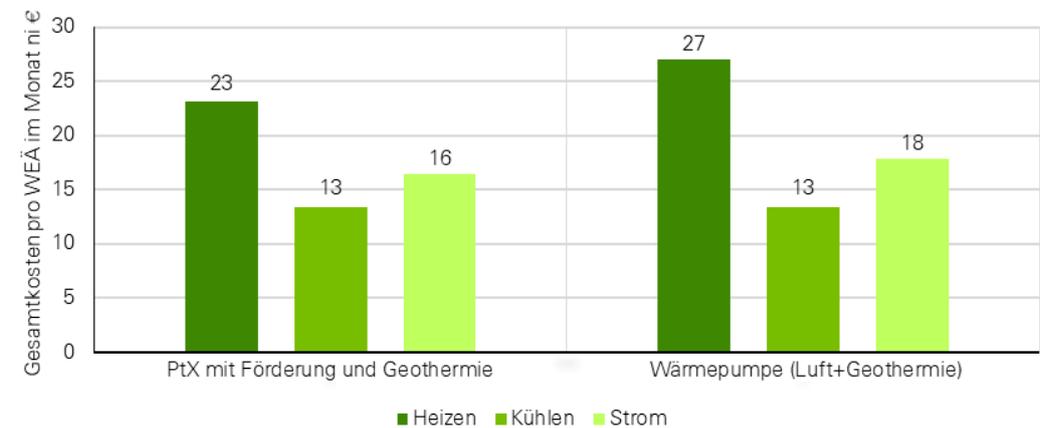
Monatliche Energiekosten Wohnen in 15 Jahren

Abbildung 39:  
Monatliche  
Energiekosten pro WE  
in 15 Jahren



Monatliche Energiekosten Nichtwohnungsbau heute

Abbildung 40: Monatliche  
Energiekosten pro  
Wohneinheitsäquivalent



## 9.2 Fazit Wirtschaftlichkeit

Wie in Abbildung 38 dargestellt, können sich die monatlichen Energiekosten für Wärme und Strom, je nach gewählter Variante, um bis zu 27% im Vergleich zur Abwasserwärmenutzung reduzieren. Betrachtet man in Abbildung 39 die Entwicklung der Preise in 15 Jahren, so bleibt der prozentuale Abstand der reinen Wärmepumpensysteme gleich. Dies ist auf den Eigenverbrauch des durch die PV-Anlage lokal erzeugten Stroms für die Wärmepumpe zurückzuführen. Bei der Variante BHKW sind die Gründe für die Zunahme der monatlichen Kosten in 15 Jahren erstens die angesetzte Preissteigerung des Energieträgers Erdgas und zweitens die Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Besteuerung. Bei der Variante PtX mit Förderung (s. Kapitel 9.3) wirkt sich die Steigerung der Energieträgerkosten kaum aus, da durch den hohen Autarkiegrad von 87% eine weitgehende Entkopplung von den Gas- und Stromkosten erfolgt. Mit der Variante PtX kann somit in 15 Jahren eine Reduzierung der monatlichen Kosten von 31% gegenüber der Abwasserwärmenutzung erzielt werden.

Auf Basis der verfügbaren Zahlen wurden die geringsten monatlichen Kosten für das Luft/Wasser-Wärmepumpe-, BHKW- und das PtX-System ermittelt. Betrachtet man diese Ergebnisse in Kombination mit den anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen der Varianten in Abbildung 41 im Hinblick auf den Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung, so können als einzige das Luft/Wasser-Wärmepumpen-System und PtX-System diese Ziele mit geringen monatlichen Kosten erfüllen.

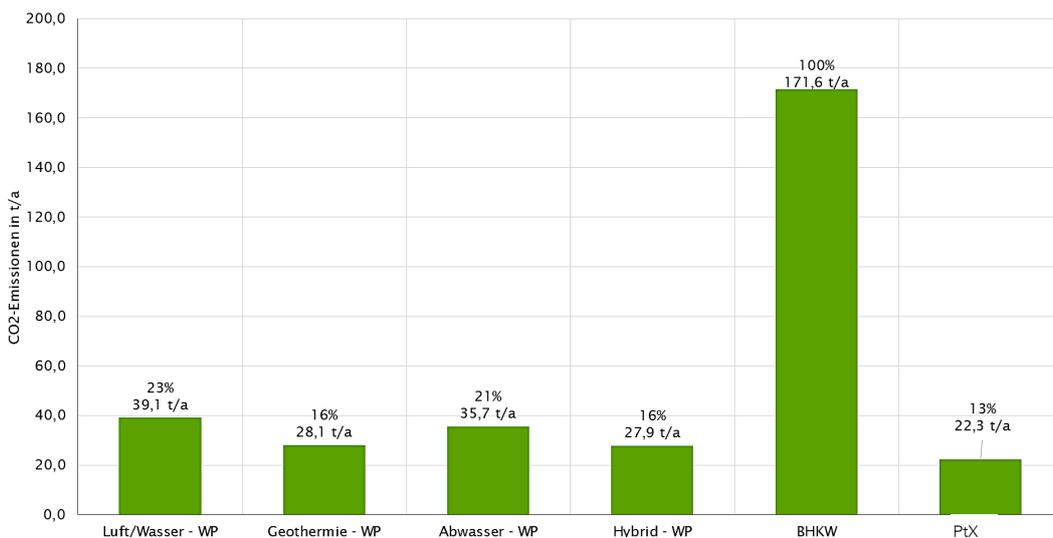


Abbildung 41: Vergleich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der einzelnen Varianten

Hinsichtlich der resultierenden monatlichen Energiekosten für Wärme, Strom und Kühlung für den Nichtwohnungsbau in Abbildung 40 sind die energetischen

Zielwerte für die zu erwartenden Energieverbräuche an den Passivhausstandard angelehnt. Die Energiekosten sind hier auf ein Wohneinheits-Äquivalent von 90 m<sup>2</sup> BGF (76,5 m<sup>2</sup> NGF) berechnet. Bei den untersuchten Varianten PtX und Luft-Wärmepumpe handelt es sich jeweils um ein Hybridsystem mit Erdwärmesonden. Die dabei benötigte Fläche für die Erdsondenfelder ist in Abbildung 34 dargestellt.

Es lässt sich aus den Untersuchungen folgern, dass auch im Punkt Wirtschaftlichkeit mit Einbeziehung von Förderungen das Power-to-X-System am positivsten abschneidet. Daneben stellt es das System mit den geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen dar und übertrifft alle anderen Versorgungsvarianten an Innovativität. PtX-Lösungen im Bereich der Quartiersversorgung gibt es nach Recherchen im nationalen Umfeld weniger als fünf. Dagegen werden BHKW-Versorgungen mittlerweile als Standard-Lösung in diesem Bereich verwendet. Es ist daher möglich im Bereich Power-to-X und insbesondere im Kontext der Wasserstoffinitiative, bei Umsetzung der vorgeschlagenen Variante eine Vorreiterrolle einzunehmen.

### 9.3 Einbindung von Förderungen der Bundesregierung

Für die Realisierung zukunftssträchtiger Wärmeversorgungssysteme gelten Wärmenetze als wichtiges Infrastrukturelement, insbesondere für den räumlich-zeitlichen Ausgleich im System von Wärmequellen und -Senken.

Ein wesentlicher wirtschaftlicher Vorteil gegenüber herkömmlichen Wärmebereitstellungsmöglichkeiten ist die Möglichkeit der finanziellen Unterstützung durch die Bundesregierung in Form von Fördermitteln. Unter der Bedingung eines überwiegenden Anteils an erneuerbaren Energien bzw. Abwärme im System sowie eines ausreichenden Innovationsgrades, kann diese Bundesförderung für effiziente Wärmenetze „Wärmenetzsysteme 4.0“ in Anspruch genommen werden. Zunächst wird dabei eine Machbarkeitsstudie mit bis zu 60% der förderfähigen Ausgaben und einer maximalen Förderung von 600.000 Euro bezuschusst. Die Realisierung des Wärmenetzsystems 4.0 kann in einem weiteren Schritt mit bis zu 50% der förderfähigen Ausgaben unterstützt werden. Neben Einzelkomponenten können auch Gesamtsysteme moderner Wärmeinfrastruktur gefördert werden. Außerdem lassen sich weitere Maßnahmen zur Kundeninformation im Gebiet und projektbezogene regionale wissenschaftliche Kooperationen im Programm unterbringen. Zuständig für das Förderprogramm ist das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). [48]

# 10 Ökologie

## 10.1 Emissionen und Graue Energie bei der Erstellung von Gebäuden

Nach dem Bericht der Bundesstiftung zur Baukultur [49] betrug das Bauvolumen in Deutschland 2019 rund 430 Mrd. Euro. Allein diese Größenordnung macht deutlich, welchen Einfluss Planung und Bau in der Stadtgestaltung nehmen können. Würde diese Summe konsequent in nachhaltige Stadtentwicklung investiert, wäre das ein enormer Schub nach vorne und würde sämtliche Förderprogramme zur klimagerechten Stadt übertreffen. Folglich muss, um eine entsprechende Wirksamkeit zu erreichen, dort begonnen werden, wo gebaut und umgesetzt wird.

Der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen, die Verwendung nachwachsender Rohstoffe und ein effizienter und sparsamer Einsatz von Energie müssen unsere Baukultur durchdringen und von einer Option zur gelebten Normalität werden.

Um dies zu erreichen ist es notwendig auch die „Graue Energie“ bei der Erstellung von Gebäuden, auf Basis einer ganzheitlichen Bilanzierung der Gebäudeenergie im Lebenszyklus, zu berücksichtigen. Unter „grauer Energie“ wird dabei die energiebedingte Aufwendung für die Herstellung und Instandsetzung inklusive des Endes der Lebensdauer (End of Life - EoL) der Baumaterialien verstanden.

Im Endbericht „Graue Energie im Ordnungsrecht“ [50] im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung wird schlüssig dargestellt, dass die „Graue Energie“ eines typischen Wohnneubaus 10 bis 16 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro m<sup>2</sup> Wohnfläche (Wfl) und Jahr beträgt.

Für ein dem PLK-Konstruktionsstandard ähnliches Gebäude in Massivbauweise, mit PV-Anlage und einer Standardenergieversorgung und -Verteilung ergibt sich folgendes Bild:

- Konstruktion: 14 kg CO<sub>2</sub>-Ä. / m<sup>2</sup> Wfl. \*a
- Energieaufwand Gebäudebetrieb: 12 kg CO<sub>2</sub>-Ä. / m<sup>2</sup> Wfl. \*a
- Energieaufwand Nutzerstrom: 13 kg CO<sub>2</sub>-Ä. / m<sup>2</sup> Wfl. \*a

In dieser Betrachtung beläuft sich das Treibhausgaspotenzial auf ca. 43 kgCO<sub>2</sub>Ä./m<sup>2</sup> Wfl. \*a. Somit entspricht die „Graue Energie“ der Konstruktion mit ca. 33% der CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Mehrfamilienhauses in Massivbauweise.

Wird das gleiche Mehrfamilienhaus in Holzbauweise errichtet, sinkt der Anteil der Konstruktion von 14 auf 8 kgCO<sub>2</sub>-Äquivalente/ m<sup>2</sup> Wfl. \*a, was einer Reduktion der „grauen Energie“ bei der Konstruktion um 40% gleichkommt.

Hochgerechnet auf das jährliche Neubauvolumen könnten allein mit dieser Maßnahme theoretisch ca. 7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente jährlich eingespart werden.

## 10.2 Bewertungsbasis und Handlungsvorschläge

Um dieses Einsparpotenzial zu nutzen ist es notwendig, Methoden der Ökobilanzierung und deren Untersuchungsgrenzen in der Planungspraxis zu verankern.

Die für das Quartier PLK vorgeschlagenen Untersuchungsgrenzen entsprechen in etwa dem SIA Effizienzpfad Energie und sollten folgende Energien berücksichtigen:

- Konstruktion KG 300 – 400
- Gebäudebetrieb
- Nutzerstrom
- Private E-Mobilität

Der für die Konstruktion vorgeschlagene Richtwert entspricht dem im Endbericht „Graue Energie im Ordnungsrecht“ [50] definierten Wert für Mehrfamilienhaus in Holzbauweise:

- Konstruktion: 8 kg CO<sub>2</sub>-Ä. / m<sup>2</sup> Wfl. \*a

Diese im ersten Schritt vorgeschlagenen Untersuchungsgrenzen sind zwar deutlich breiter als z.B. die der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB, nur KG 300-400 und Gebäudebetrieb), aber immer noch weit von der transnationalen Standardreihe zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen „GHG Protocol“ entfernt, da viele Energieströme, wie z.B. die Entsorgung, unberücksichtigt bleiben.

Da eine vollständige Bilanzierung der Gebäude des Quartiers PLK im Lebenszyklus sehr aufwendig und auch kostenintensiv ist, könnten auf Basis von Musterbilanzierungen von Gebäudetypen, Kriterien für eine ökologische Mustersiedlung in Regensburg erarbeitet werden, die dann unkompliziert in den Bauablauf zu integrieren wäre. Als Vorbild kann der Prinz Eugen Park in München dienen, der z.B. als ein Kriterium die einzusetzende Menge an nachwachsenden Rohstoffen (kg nawaros / m<sup>2</sup> Wohnfläche) definiert hat und die Erfüllung aller ökologischen Parameter mit 30% bei der Grundstücksvergabe berücksichtigt. [51]

# 11 Umsetzungshinweise

Für die Durchführung von Maßnahmen im Rahmen des vorliegenden Energienutzungsplans oder anderen vergleichbaren Klimaschutzbezogenen Bauprojekten sollen im Folgenden Empfehlungen hinsichtlich zu erreichender energietechnischer Werte sowie der verwaltungstechnischen Umsetzung gegeben werden.

*Energietechnisch mögliche Richtwerte, bei Umsetzung der PtX-Variante, die im Zuge des Energiekonzeptes erarbeitet wurden*

- Emission Äquivalente pro Jahr für Energieversorgung: 0,21 t/ Wohneinheit
- Autarkiegrad des Versorgungssystems: 87% (Wärme und Kälte)
- PV-Flächen: 25% der BGF
- $H_t$ -Wert für Gebäude-Energiestandard: 0,21 W/m<sup>2</sup>\*K
- Emissionen für Baukonstruktion: 8 CO<sub>2</sub>-Ä. / m<sup>2</sup> Wfl. \*a (Praxisbeispiel Kapitel 10)

*Planerische Hinweise*

- Vorhalten der notwendigen Flächen für PV-Anlagen auf den Dächern
- Minimieren von anderen Dachbelegungen, die in Konkurrenz zu PV-Anlagen stehen (Anlagentechnik, Fördertechnik, Dachterrassen, etc.)
- Berücksichtigung von Flächen zur Aufstellung dezentraler Wärmespeicher im Gebäude
- Prüfung der notwendigen Flächen für Technikzentralen und Speichereinheiten (insbesondere Gasspeicher)
- Cluster von je ca. 180 Wohneinheiten sollten ein Wärmenetz bilden und übergeordnet ist für je ca. 360 Wohneinheiten eine Power-to-X-Einheit vorzusehen
- Möglichst strahlenartige "Haus zu Haus"-Trassenführung der Leitungen des Wärmenetzes
- Möglichkeit zur Unterbringung von Energiespeichern (Gas) in den Quartiersgaragen sollte geprüft werden.

*Verwaltungstechnische Empfehlungen*

Mit dem Ziel einen Beitrag zu den verwaltungstechnischen Herausforderungen bei der Umsetzung zu leisten, wurde eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Es folgen komprimierte Auszüge aus den Empfehlungen in Kapitel 6 des Berichtes „Klimaschutz in der verbindlichen Bauleitplanung“ des Deutschen Instituts für Urbanistik, welcher 2017 für die Stadt Potsdam ausgearbeitet wurde. Die Inhalte wurden in Teilen angepasst und der Vollständigkeit halber wurden auch Empfehlungen aufgenommen, welche in Regensburg bereits (teilweise) umgesetzt wurden:

- Sicherung ausreichender politischer Unterstützung durch einen Stadtratsbeschluss
- Frühzeitige Abstimmung der Fachinteressen innerhalb der Stadtverwaltung als Grundlage für eine energetisch optimierte Planung ("Runde Tische", ressortübergreifende Arbeitsstrukturen)
- Bei Erweiterung des Spektrums durch zusätzliche Aufgaben ist eine adäquate Anpassung der Personal- und Finanzausstattung angeraten (Personalkapazität, Qualifizierung, Sensibilisierung aller Beteiligten für Komplexität und Umfang der Verwaltungsaufgaben)
- Energetisch und städtebaulich abgestimmte Umsetzungswege durch die Erarbeitung von baugebietsbezogenen Energiekonzepten sind besonders dann sinnvoll, wenn eine große Bandbreite an Maßnahmen vorliegt; zu beachten ist die frühzeitige Einbindung des örtlichen Energieversorgers
- Zu Bedenken ist, welche Maßnahmen und energetische Standards regelmäßig durchgesetzt werden und welche eher im Einzelfall?
- Auf der Grundlage der Regelungsbeispiele aus anderen Städten sollten als Vertragsmuster Textbausteine für die angestrebten Regelungen in städtebaulichen Verträgen entwickelt werden.
- Checklisten schaffen die Basis für ein einheitliches und verlässliches Verwaltungshandeln und damit für eine konsequente Umsetzung der klimaschutzbezogenen politischen Ziele. Die Stadt Regensburg sollte die bisher vorrangig intern genutzte Arbeitshilfe „Energieeffizienz in der Bauleitplanung“ zu einer allgemeingültigen Checkliste weiterentwickeln, die bei der Beratung von Bauträgern und Bauwilligen aktiv genutzt werden kann.
- In Abstimmung mit der für Klimaschutz zuständigen Stelle der Regensburger Stadtverwaltung sollte ein für die Entwicklung neuer Baugebiete maßgeschneidertes Beratungsangebot für Vorhabenträger und einzelne Bauwillige vorbereitet werden.[29]

## 12 Fazit und Ausblick

### *Fazit*

Für die Erstellung eines Energienutzungsplans für die Konversion der ehemaligen Pionier- und Prinz-Leopold-Kaserne wurden Energiepotenziale auf deren Verfügbarkeit und Nutzungsmöglichkeit in Hinblick auf die Energieversorgung des angesprochenen Quartiers untersucht. Die Potenziale wurden quantifiziert und in Relation zueinander gesetzt. Es wurden bauliche Randbedingungen und die zu untersuchenden Energieverbrauchssektoren differenziert mit Randbedingungen erläutert. An dieser Stelle sollte nochmal betont werden, dass es sich um ein Energiekonzept handelt, welches an einen Rahmenplan angelehnt, jedoch allgemeingültig ist und auf neue Entwicklungen, speziell des städtebaulichen Wettbewerbs flexibel reagieren kann. Eine umfassende Quartiersbilanzierung weist Informationen zu Flächen und Energiebedarfe bezogen auf die Energieverbrauchssektoren und Teilenergiebereiche aus. Es wurden mehrere Varianten der Erzeugung von Strom und Wärme für das Quartier beschrieben. Zusätzlich wurde für das favorisierte System mit innovativer Power-to-X-Technik ein Konzept für die Einbindung der Energiezentralen sowie der Energieversorgung durch ein bedarfsgeführtes 3-Leiter-System ausgearbeitet. Hierbei wurde der Bereich Kühlung insbesondere für den Gewerbe Sektor einbezogen. Ferner sind die Möglichkeiten des Aufbaus eines Kundenstromsystems für die PLK und der Austausch von Energiemengen erörtert worden. Durch die Thermodynamische Simulation wurde nachgewiesen welches Einsparpotenzial in der dynamischen Betrachtung von Gebäuden unter Berücksichtigung von aktuellen, lokalen Randbedingungen und intelligenter Steuerungssysteme möglich ist. Die Betrachtung und Abschätzung der ökologischen Auswirkungen durch den Neubau und den Betrieb der PLK wurde auch durchgeführt. Auf Basis einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnte die Wirtschaftlichkeit des favorisierten Systems nachgewiesen werden, wobei aktuelle Fördermöglichkeiten berücksichtigt wurden. Schließlich konnten so Umsetzungshinweise ausgearbeitet und für eine effiziente Ausgestaltung der Energieversorgung der PLK mitgegeben werden.

Das Quartier der ehemaligen Pionier- und Prinz-Leopold-Kaserne soll für die Energiezukunft gebaut werden und basierend auf drei innovativen Leittechniken im Bereich der Energie- und Versorgungstechnik einen Beitrag zur Regensburger Energiewende leisten.

1. Es ist angedacht **mittels thermodynamisch-perspektivischer und KI-optimierter Gebäudesteuerung** den Energiefluss zu optimieren und dadurch die Verbräuche zu minimieren. Diese Einsparung von rund 20% (Heizenergie) leistet einen wesentlichen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit des vorgeschlagenen Systems.

2. Die Energieverteilung erfolgt in einem **dynamisch erweiterbaren bedarfsgeführten 3-Leiter-Verteilungssystem und dezentrale Wärmeübergabestationen**. Dadurch können sehr niedrige Vorlauftemperaturen realisiert werden, die essentiell für die wirtschaftliche Nutzung von Umweltwärme sind. Beim Verwenden dieses Systems ist eine Einsparung von 23% möglich (Wärmeverteilung und Warmwasser).

3. Die Energieerzeugung wird durch ein **solarbasiertes innovatives Power-to-X-System** gespeist und besteht im Wesentlichen aus konventioneller Wärmepumpe, konventionellem BHKW und der innovativen Power-to-X-Einheit.

Durch eine intelligente Kopplung der einzelnen Komponenten kann nach heutigem Stand eine Quartiersautarkie von 87% dargestellt werden.

Jede einzelne Innovation beinhaltet hohe Potenziale der nachhaltigen Energienutzung, wobei ein Optimum der Energieeinsparung erst durch das Ineinandergreifen aller Leittechniken möglich wird. Es ist somit möglich mit dem vorgeschlagenen System die CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber einer Versorgung mit einem BHKW um 87% und rund 150 tCO<sub>2</sub>/a zu reduzieren.

#### *Ausblick: solarbasierte Speichersysteme*

Die ganzheitliche Energieversorgung des Quartiers basiert auf dem Prinzip, dass im Sommer überschüssige Energie mittels geeigneter Speicher in den Winter transferiert und letztlich in der kalten Jahreszeit verbraucht wird.

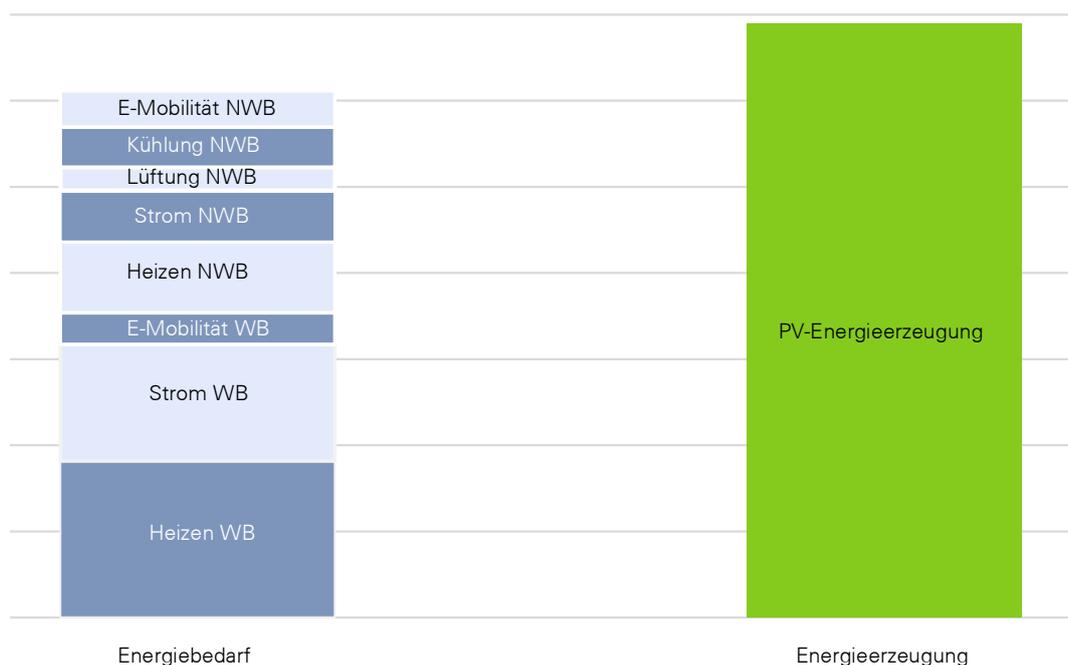


Abbildung 42:  
Gegenüberstellung von  
Energieerzeugung und  
Energiebedarf des  
Quartiers,  
Nichtwohnbau (NWB),  
Wohnbau (WB)

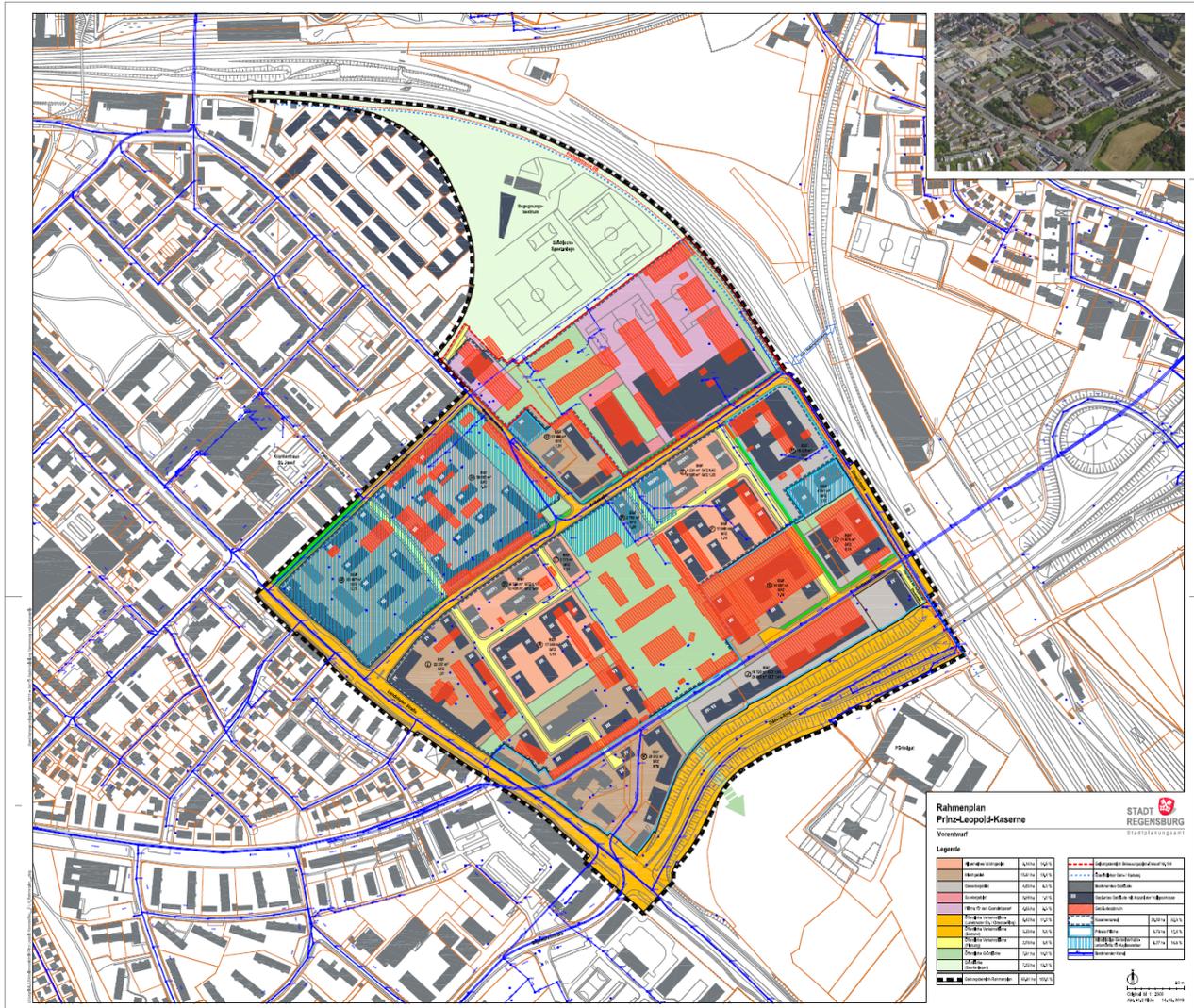
Eine Gegenüberstellung der eigens erzeugten Energiemengen und der Energiebedarfe der Sektoren Gewerbe und Wohnen, wie im Abbildung 42 gezeigt, macht folgendes deutlich: Solarbasierte Energiespeichersysteme sind bereits heute in der Lage ein Quartier autark (nicht nur Wärmesektor!) mit Energie zu versorgen. Das Energieversorgungssystem bietet einen Gesamtwirkungsgrad von rund 91%, von PV-Strom zu allen in Abbildung 42 dargestellten Formen der Nutzenergie. Konkret bedeutet das, dass verlorene Energie (rund 9%) durch die Überproduktion von PV-Energie kompensiert und somit ein ausgeglichener Energiekreislauf auf Basis der Sonne erzeugt wird.

Solarbasierte Speichersysteme, welche die Sektoren Strom, Wärme und Gas koppeln, haben das Potenzial, die multidirektionalen Regelenergielieferanten von morgen zu werden und so die überregionalen Strom und Gasnetze zuverlässig zu stabilisieren. Die Grundlage bildet das in diesem Konzept vorgeschlagene PtX-System, das durch den Einsatz von thermodynamisch-perspektivischer und KI-optimierter Gebäudesteuerung und den damit zu erzielenden Einsparungen, bereits heute eine wirtschaftliche (mit Förderung) und nachhaltige Energielösung darstellt.

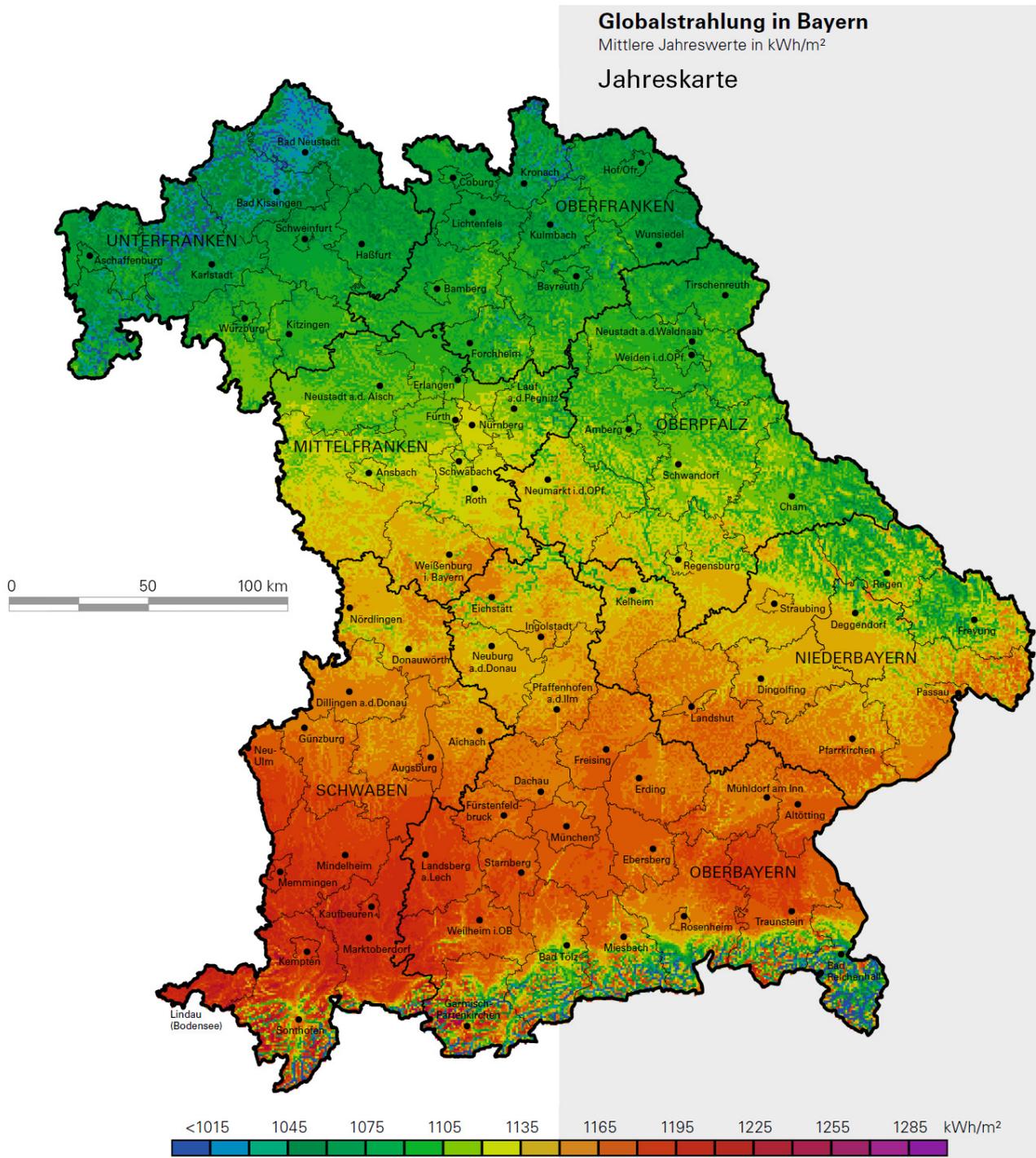
Deutschland ist derzeit Technologieführer im Bereich dieser solarbasierten Speichersysteme. Diesen Vorsprung gilt es zu sichern und im besten Fall auszubauen. Daher ist eine Unterstützung bei der Entwicklung und Etablierung der solarbasierten Energieversorgungstechnologie, durch deren konsequente Umsetzung im Gebäudebereich, insbesondere in der letzten großen Konversionsfläche in Regensburg, auch aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Und auch regional bieten sich nicht nur Chancen hinsichtlich einer nachhaltigen, zukünftigen Energieversorgung, sondern auch für eine Weiterentwicklung des Wirtschafts- und Technologiestandortes Regensburg. Diese Vorreiterrolle im Bereich der Energieversorgung wird künftig weiteren Städten und Kommunen als Musterbeispiel und Anreiz für eine Entscheidung für die Dekarbonisierung der Energieversorgung dienen.

# 13 Anhang

## 13.1 Anhang 1: Rahmenplan Stadt Regensburg PLK



### 13.2 Anhang 2: Globalstrahlung in Bayern



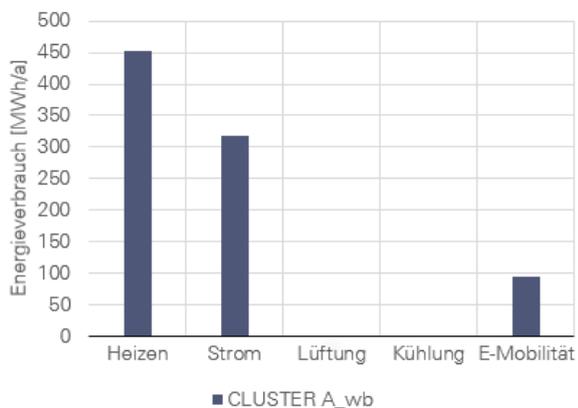
### 13.3 Anhang 3: Energieverbrauchssektoren, clusterweise

#### Cluster A, Prinz-Leopold – Steckbrief

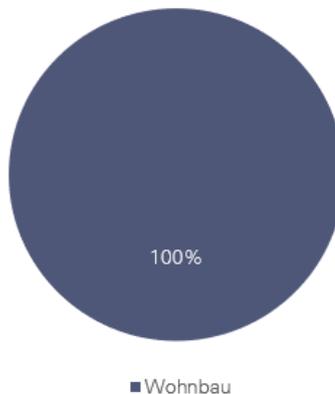


| Wohnbau           |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 17038 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 13290 m <sup>2</sup> |
| Bewohner          | 303                  |
| Wohneinheiten     | 189                  |
| Pkw               | 113                  |
| PV-Fläche         | 4260 m <sup>2</sup>  |

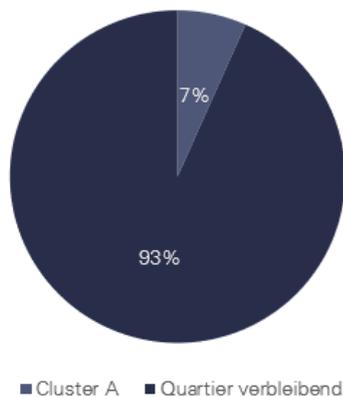
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektor Cluster A



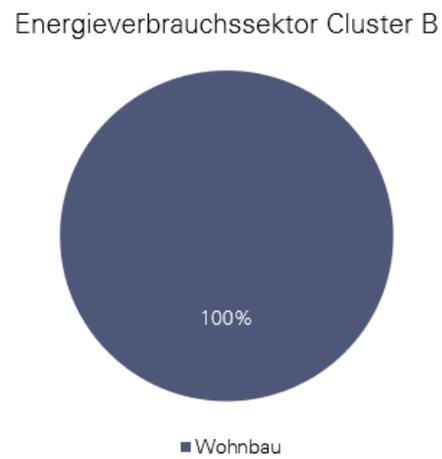
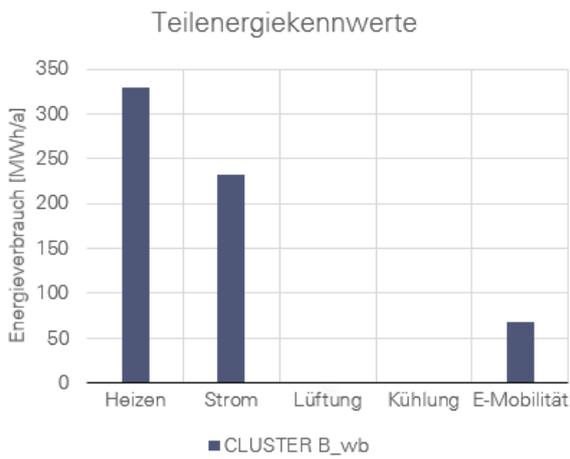
Anteil Cluster A am Gesamtverbrauch



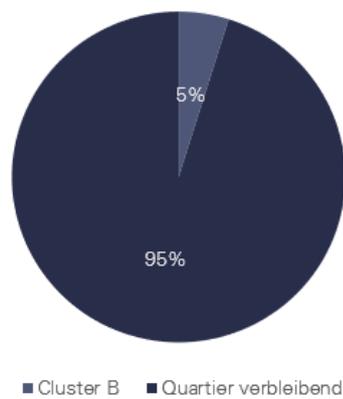
Cluster B, Prinz-Leopold – Steckbrief



| Wohnbau           |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 12440 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 9703 m <sup>2</sup>  |
| Bewohner          | 221                  |
| Wohneinheiten     | 138                  |
| Pkw               | 83                   |
| PV-Fläche         | 3110 m <sup>2</sup>  |



Anteil Cluster B am Gesamtverbrauch

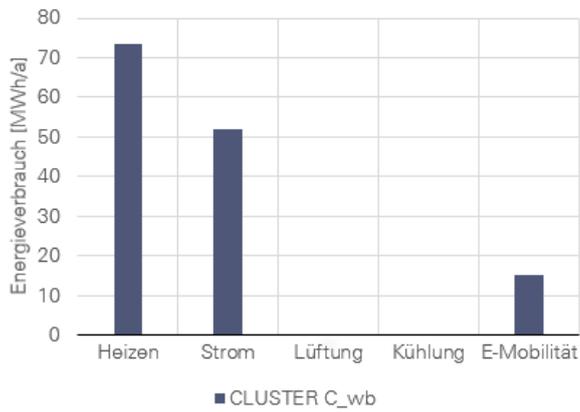


Cluster C, Prinz-Leopold – Steckbrief

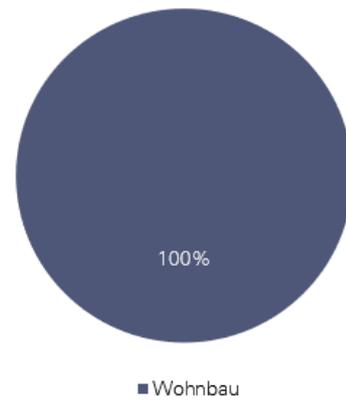


| Wohnbau           |                     |
|-------------------|---------------------|
| Bruttogrundfläche | 2773 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 2163 m <sup>2</sup> |
| Bewohner          | 49                  |
| Wohneinheiten     | 30                  |
| Pkw               | 18                  |
| PV-Fläche         | 693 m <sup>2</sup>  |

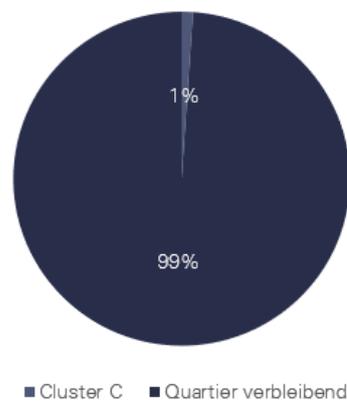
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektor Cluster C



Anteil Cluster C am Gesamtverbrauch



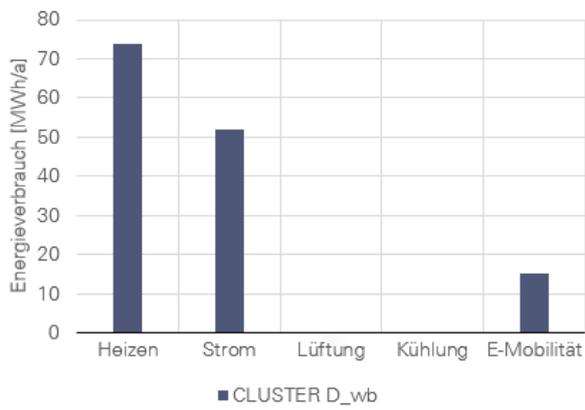
Cluster D, Prinz-Leopold – Steckbrief



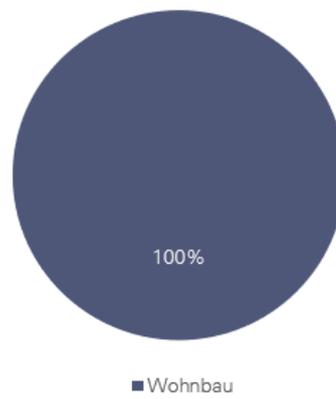
| Wohnbau           |                     |
|-------------------|---------------------|
| Bruttogrundfläche | 2779 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 2168 m <sup>2</sup> |
| Bewohner          | 49                  |
| Wohneinheiten     | 30                  |
| Pkw               | 18                  |
| PV-Fläche         | 695 m <sup>2</sup>  |

LEGENDE  
 ■ Gewerbe, Gewerbe Bestand  
 ■ Wohnen  
 - Clusterumrisse

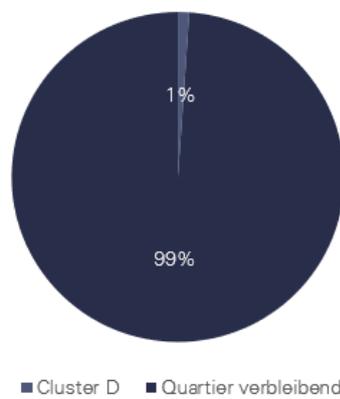
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektor Cluster D



Anteil Cluster D am Gesamtverbrauch

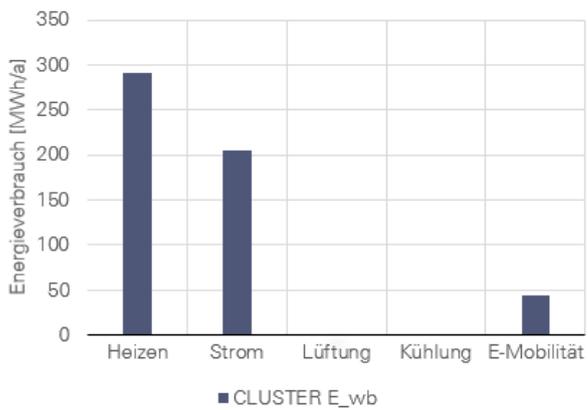


Cluster E, Prinz-Leopold – Steckbrief

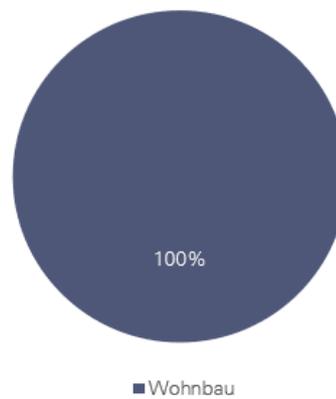


| Wohnbau           |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 10972 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 6181 m <sup>2</sup>  |
| Bewohner          | 141                  |
| Wohneinheiten     | 88                   |
| Pkw               | 52                   |
| PV-Fläche         | 2743 m <sup>2</sup>  |

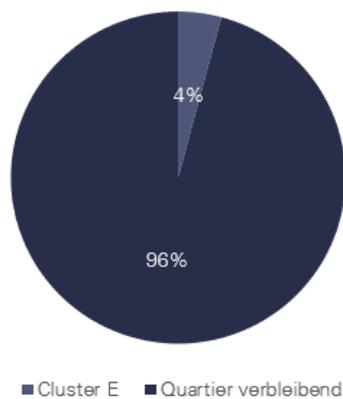
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektor Cluster E



Anteil Cluster E am Gesamtverbrauch

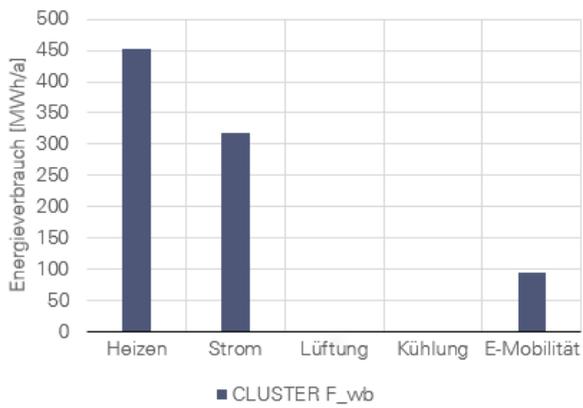


Cluster F, Prinz-Leopold – Steckbrief

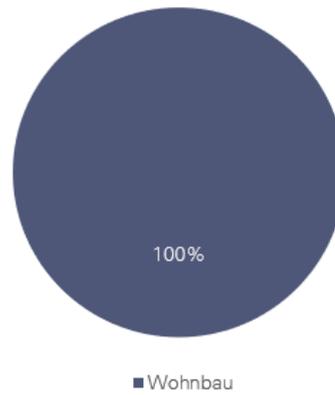


| Wohnbau           |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 17039 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 13290 m <sup>2</sup> |
| Bewohner          | 303                  |
| Wohneinheiten     | 189                  |
| Pkw               | 113                  |
| PV-Fläche         | 4260 m <sup>2</sup>  |

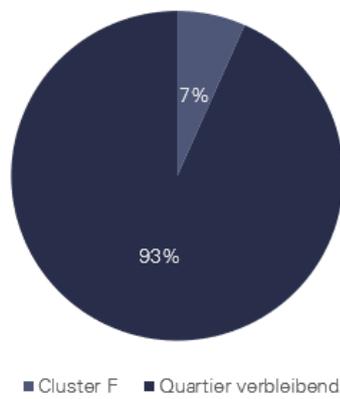
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektor Cluster F



Anteil Cluster F am Gesamtverbrauch



Cluster G, Prinz-Leopold – Steckbrief



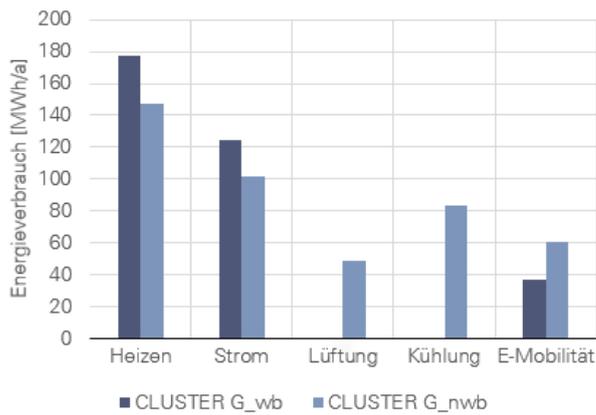
**Wohnbau**

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| Bruttogrundfläche | 6673 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 5205 m <sup>2</sup> |
| Bewohner          | 118                 |
| Wohneinheiten     | 74                  |
| Pkw               | 44                  |
| PV-Fläche         | 3472 m <sup>2</sup> |

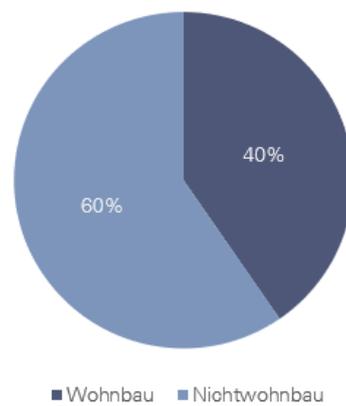
**Nichtwohnbau**

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| Bruttogrundfläche | 9839 m <sup>2</sup> |
| Mitarbeiter       | 464                 |
| Pkw               | 71                  |
| PV-Fläche         | 2460 m <sup>2</sup> |

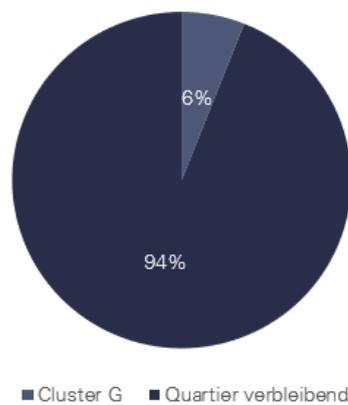
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektoren Cluster G



Anteil Cluster G am Gesamtverbrauch

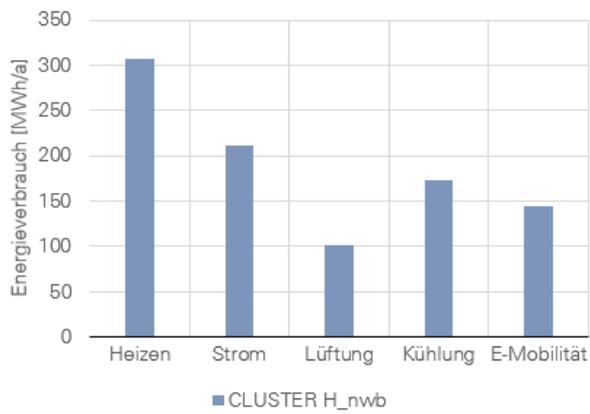


Cluster H, Prinz-Leopold – Steckbrief

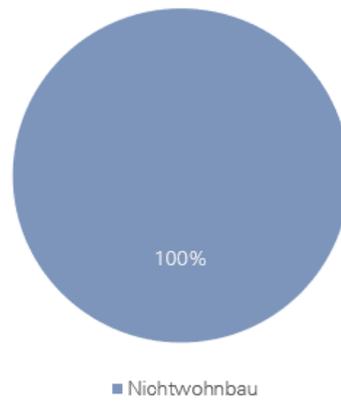


| Nichtwohnbau      |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 24082 m <sup>2</sup> |
| Mitarbeiter       | 1137                 |
| Pkw               | 175                  |
| PV-Fläche         | 6020 m <sup>2</sup>  |

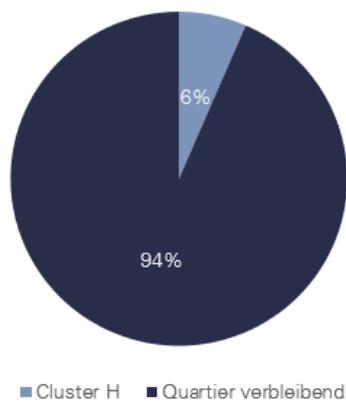
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektor Cluster H



Anteil Cluster H am Gesamtverbrauch

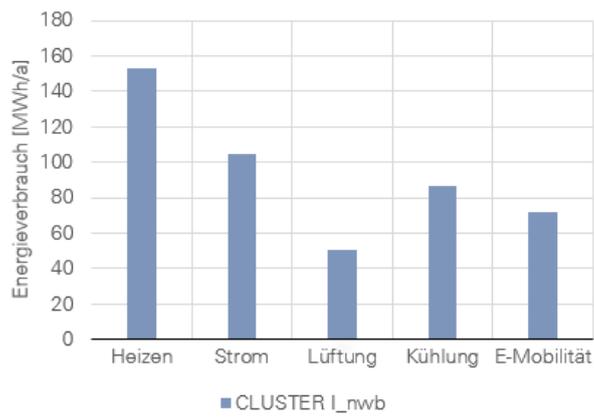


Cluster I, Prinz-Leopold – Steckbrief

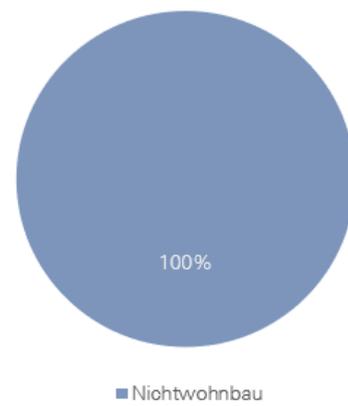


| Nichtwohnbau      |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 11974 m <sup>2</sup> |
| Mitarbeiter       | 565                  |
| Pkw               | 87                   |
| PV-Fläche         | 2994 m <sup>2</sup>  |

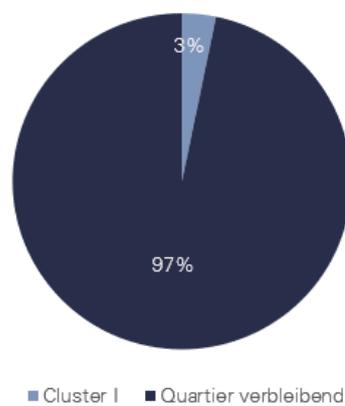
Teilergiegienennwerte



Energieverbrauchssektor Cluster I



Anteil Cluster I am Gesamtverbrauch



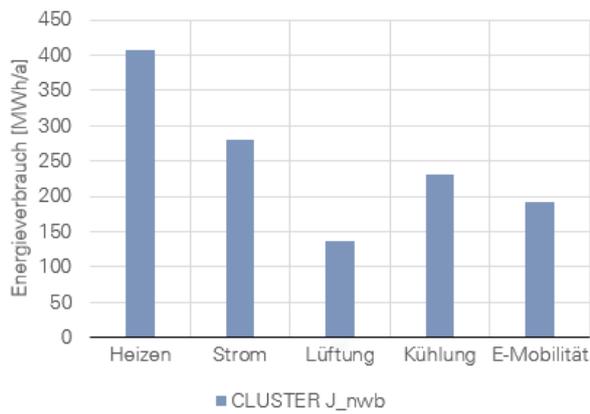
Cluster J, Prinz-Leopold – Steckbrief



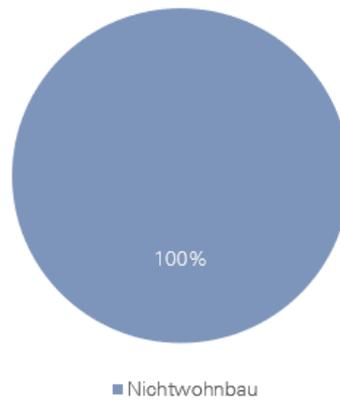
| <b>Nichtwohnbau</b> |                      |
|---------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche   | 32004 m <sup>2</sup> |
| Mitarbeiter         | 1511                 |
| Pkw                 | 233                  |
| PV-Fläche           | 8001 m <sup>2</sup>  |

**LEGENDE**  
 ■ Gewerbe, Gewerbe Bestand  
 ■ Wohnen  
 - Clusterumrisse

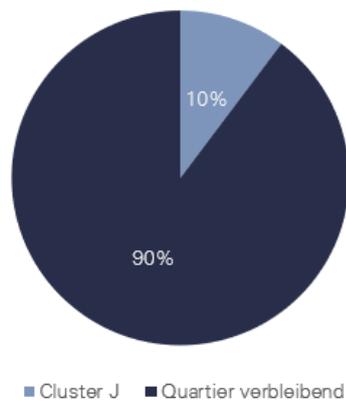
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektor Cluster J



Anteil Cluster J am Gesamtverbrauch

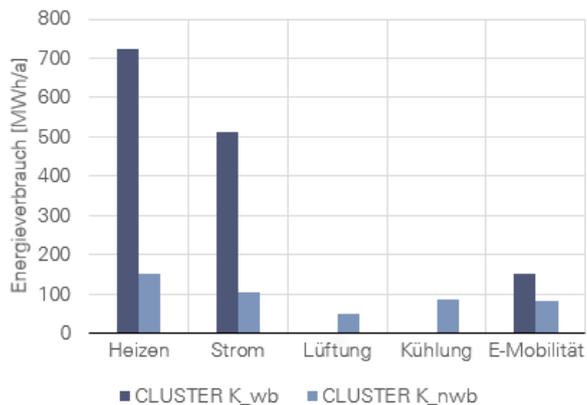


Cluster K, Prinz-Leopold – Steckbrief

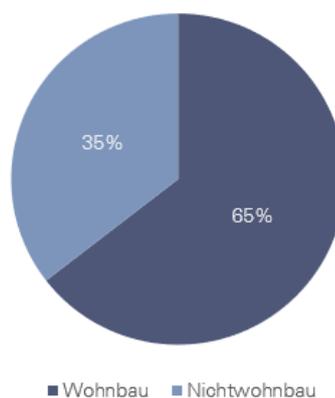


| Wohnbau           |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 27314 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 21305 m <sup>2</sup> |
| Bewohner          | 486                  |
| Wohneinheiten     | 304                  |
| Pkw               | 182                  |
| PV-Fläche         | 6828 m <sup>2</sup>  |
| Nichtwohnbau      |                      |
| Bruttogrundfläche | 13650 m <sup>2</sup> |
| Mitarbeiter       | 659                  |
| Pkw               | 101                  |
| PV-Fläche         | 3413 m <sup>2</sup>  |

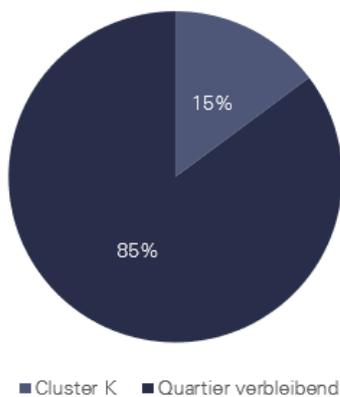
Teilergiegienkennwerte



Energieverbrauchssektoren Cluster K



Anteil Cluster K am Gesamtverbrauch



Cluster L, Prinz-Leopold – Steckbrief

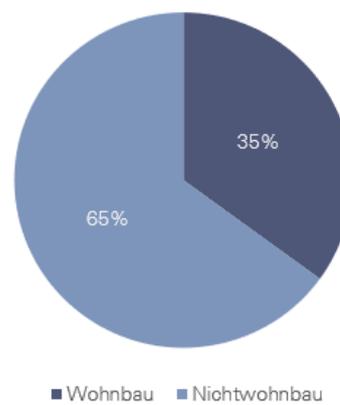


| Wohnbau           |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 7792 m <sup>2</sup>  |
| Wohnfläche        | 6078 m <sup>2</sup>  |
| Bewohner          | 138                  |
| Wohneinheiten     | 86                   |
| Pkw               | 52                   |
| PV-Fläche         | 1948 m <sup>2</sup>  |
| Nichtwohnbau      |                      |
| Bruttogrundfläche | 14461 m <sup>2</sup> |
| Mitarbeiter       | 682                  |
| Pkw               | 105                  |
| PV-Fläche         | 3615 m <sup>2</sup>  |

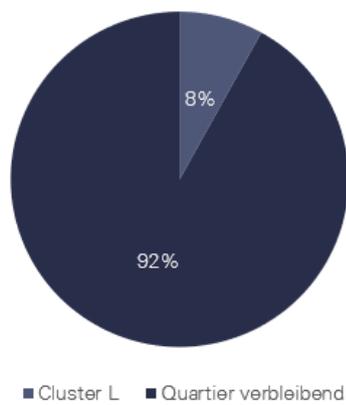
Teilergiegienwerte



Energieverbrauchssektoren Cluster L



Anteil Cluster L am Gesamtverbrauch

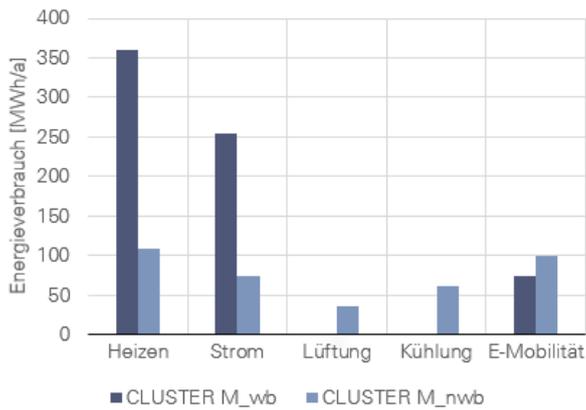


Cluster M, Pionier – Steckbrief

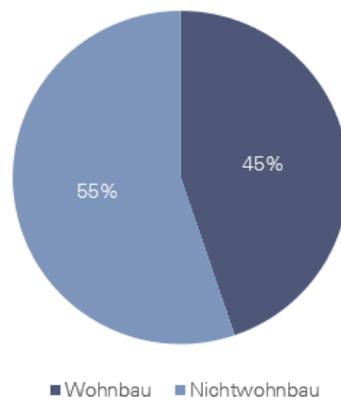


| Wohnbau           |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 13550 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 10569 m <sup>2</sup> |
| Bewohner          | 241                  |
| Wohneinheiten     | 150                  |
| Pkw               | 90                   |
| PV-Fläche         | 3388 m <sup>2</sup>  |
| Nichtwohnbau      |                      |
| Bruttogrundfläche | 16700 m <sup>2</sup> |
| Mitarbeiter       | 788                  |
| Pkw               | 121                  |
| PV-Fläche         | 4175 m <sup>2</sup>  |

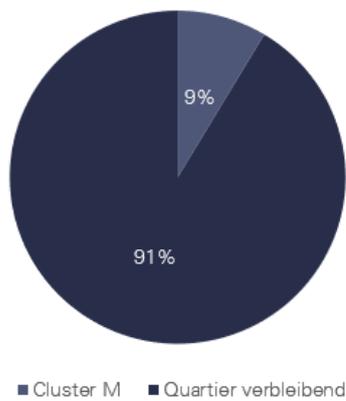
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektoren Cluster M



Anteil Cluster M am Gesamtverbrauch

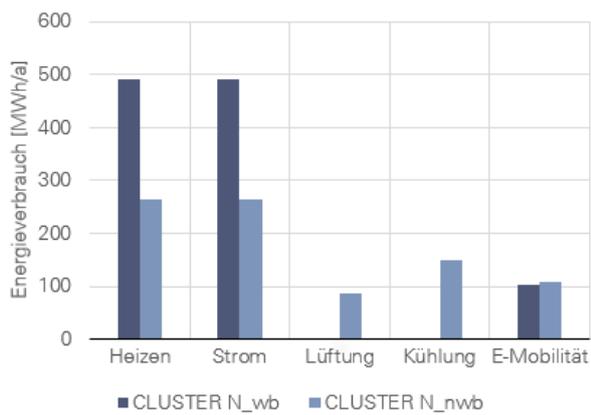


Cluster N, Pionier – Steckbrief

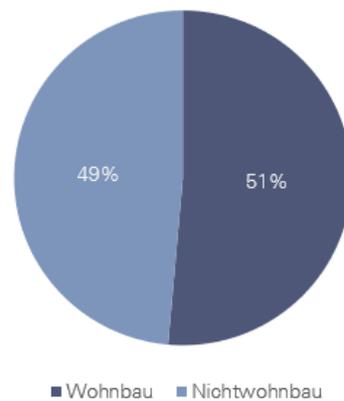


| Wohnbau           |                      |
|-------------------|----------------------|
| Bruttogrundfläche | 18548 m <sup>2</sup> |
| Wohnfläche        | 14467 m <sup>2</sup> |
| Bewohner          | 330                  |
| Wohneinheiten     | 206                  |
| PKW               | 124                  |
| PV-Fläche         | 4637 m <sup>2</sup>  |
| Nichtwohnbau      |                      |
| Bruttogrundfläche | 17537 m <sup>2</sup> |
| Mitarbeiter       | 828                  |
| Pkw               | 127                  |
| PV-Fläche         | 4385 m <sup>2</sup>  |

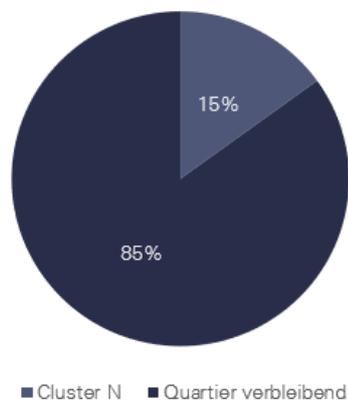
Teilenergiekennwerte



Energieverbrauchssektoren Cluster N



Anteil Cluster N am Gesamtverbrauch



## 13.4 Anhang 4: Thermodynamische Simulation

Für die Bearbeitung des Energiekonzeptes wurden die Simulationsumgebung IDA SE und die Software-Applikation Indoor Climate and Energy (IDA ICE) verwendet. Im Simulationsprogramm können standardisierte und aktuelle Klimadatensätze dynamisch berücksichtigt werden. Die Simulationstechnologie wurde am Schwedischen Institut für Angewandte Mathematik Mitte der 1980er Jahre entwickelt und wird seit 1998 von dem schwedischen Unternehmen EQUA Solutions AB kommerziell vertrieben. [52] Die Simulationssoftware IDA ICE kann für die meisten Gebäudetypen [53]

unter anderem zu folgenden Berechnungen verwendet werden:

- Wärmebilanz einschließlich der spezifischen Beiträgen von: Sonne, Bewohnern, Geräten, Leuchten, Lüftungs-, Heiz- und Kühlanlagen, Oberflächenübertragungen, Luft-Leckagen, Kältebrücken und Möbel
- Sonneneinstrahlung durch Fenster mit vollständiger 3D-Berechnung für lokale Beschattungsanlagen sowie umliegende Gebäude und andere Objekte
- Tageslichtniveau an einer beliebigen Raumposition
- Komfort-Indizes, PPD und PMV, bei mehreren, beliebig vielen Nutzerpositionen
- Gerichtete Umgebungstemperatur zur Abschätzung von asymmetrische Komfortbedingungen
- Durch Wind und Auftrieb verursachte Luftströmungen werden durch Leckagen und Öffnungen über ein vollständig integriertes Luftstromnetzmodell realisiert. Dies ermöglicht es, vorübergehend geöffnete Fenster oder Türen zwischen den Räumen zu untersuchen.
- Gesamtenergiekosten basierend auf zeitabhängigen Preisen

Somit können mit Hilfe der thermisch-dynamischen Simulation auch bei komplexen Gebäudemodellen verschiedene Zusammenhänge und Ursachen der Wechselwirkungen von Bauteilen und Systemen erarbeitet werden. Der Hauptzweck ist die energetische Bewertung eines bestimmten Gebäudemodells, um dadurch Analysen und Schlussfolgerungen hinsichtlich Ausrichtung, Bauteilparameter, Energiebedarf und thermischer Behaglichkeit, schon in der Planungs- und Entwurfsphase von Bauprojekten zu integrieren.

### 13.4.1 Simulationsmodelle und Randbedingungen

Die Simulationsmodelle für Wohnbaugebäude und Nichtwohngebäude wurden auf Basis einer zugehörigen Energie-Bilanzierung<sup>4</sup> erstellt. Die unterschiedlichen Parameter für die Eingabe der Randbedingungen, welche in den Simulationen berücksichtigt werden mussten, wurden gemäß DIN 4108 (Wohngebäude) bzw. DIN 18599 (Nichtwohngebäude) festgelegt. Dadurch ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen Energieausweis und Simulationen realisierbar. Die in der Modulstudie<sup>5</sup> betrachteten Gebäude sind Teil des Cluster A und in Abbildung 43 zu erkennen.

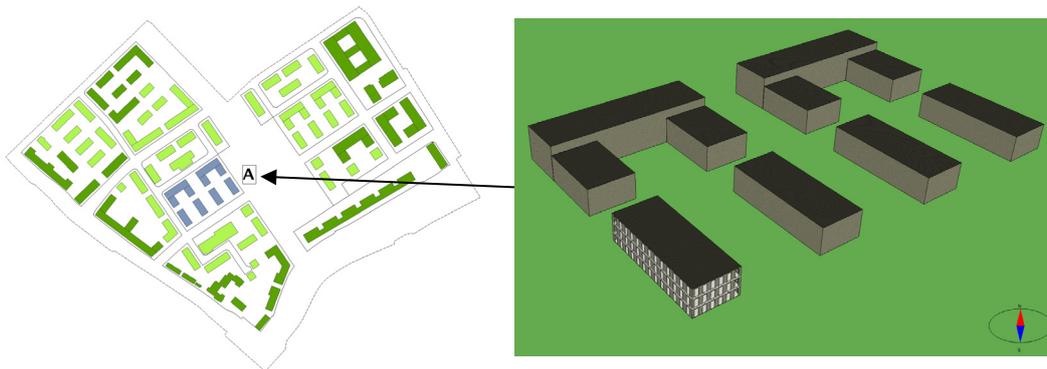


Abbildung 43:  
Untersuchungsgebiet für  
die thermisch dynamische  
Gebäudesimulation

EnEV-Berechnung wurde das Gebäude als eine gesamtheitliche thermische Hülle betrachtet. Dagegen wurden in den beiden Simulationsmodellen zur Berücksichtigung der relevanten internen Speichermassen die einzelnen Geschosse mit den zugehörigen Zwischengeschossdecken definiert. Zudem wurde das Nichtwohngebäude gemäß 18599 in die drei separaten Zonen Gruppenbüro, Verkehrsfläche und Sanitär/ WC gemäß eines Standardbürogebäudes nach [54] eingeteilt. Die einzelnen Baukonstruktionen wurden nach Vorbild der EnEV-Berechnung eingegeben und sind Tabelle 6 und Tabelle 7 mit den dazugehörigen U-Werten und Bauteildicken zu entnehmen.

Tabelle 6: Baukonstruktionen für Wohngebäude

| Bauteilbezeichnung | U-Wert                    | Dicke  |
|--------------------|---------------------------|--------|
| Außenwand WB       | 0.15 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.45 m |
| Geschossdecke WB   | 0.48 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.35 m |
| Flachdach WB       | 0.11 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.55 m |
| Bodenplatte WB     | 0.12 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.66 m |

<sup>4</sup> Bilanzierung = EnEV-Berechnung= Energieausweis

<sup>5</sup>Eine Modulstudie wird bei der Lösung eines großen Problems angewandt, welches in viele gleichartige kleine Probleme aufgeteilt werden kann. Dabei werden Kenntnisse, die bei der Untersuchung eines Teilproblems gewonnen werden auf das Gesamtproblem für dessen Lösung angewandt

Tabelle 7: Baukonstruktionen für Nichtwohngebäude

| Bauteilbezeichnung                | U-Wert                    | Dicke  |
|-----------------------------------|---------------------------|--------|
| Außenwand NWB                     | 0.15 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.45 m |
| Geschossdecke NWB                 | 0.48 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.35 m |
| Geschossdecke NWB - mit Hohlboden | 1.31 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.50 m |
| Flachdach NWB                     | 0.11 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.55 m |
| Bodenplatte NWB                   | 0.12 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.66 m |

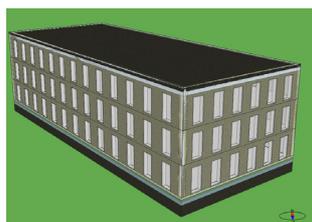


Abbildung 44: Simulationsmodell des Wohngebäudes als 1-Zonen-Modell, Vergleich mit DIN 4108

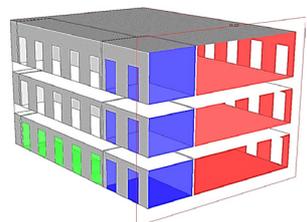
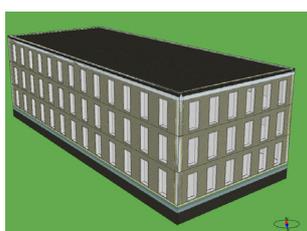
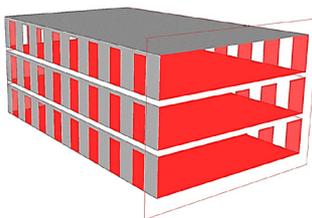


Abbildung 45: Simulationsmodell des Nichtwohngebäudes als Mehr-Zonen-Modell, Vergleich mit DIN 18599

Hinsichtlich der Anlagentechnik wurde nach den jeweiligen Energieausweisen pro Simulationsmodell ein idealer Energieerzeuger definiert (0% Erzeugungsverluste) um für die Berechnung der Energiemengen eine Vergleichbarkeit der Berechnungsmethoden zu erreichen. Bei beiden Modellen konnten somit gleichwertige Energiesysteme des Simulationsprogramms IDA ICE und des EnEV-Programms verwendet werden. In den Gebäudemodellen wurde als Wärmeübergabesystem eine Fußbodenheizung pro Geschoss bzw. Nutzungszone eingefügt. Die Fußbodenheizungen wurden mit Hilfe von PI-Reglern in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur der einzelnen Zonen geregelt. Im Gegensatz zum Wohngebäude wurde für das Simulationsmodell des Nichtwohngebäudes ein zusätzliches Kühlsystem, welches nach DIN 18599 für die Zone Gruppenbüro gefordert ist, festgelegt. Hierfür wurde eine Fußbodenkühlung umgesetzt, welche ebenfalls mit Hilfe eines PI-Reglers und der Raumlufttemperatur (Sollwert 24°C) geregelt wurde.

Die Lüftungssysteme der beiden Gebäudevarianten unterscheiden sich nach den jeweiligen Energieausweisen dahingehend, dass für das Wohngebäude eine Abluftanlage und für das Nichtwohngebäude unterschiedliche Lüftungssysteme entsprechend der Nutzungszonen definiert wurden. Folglich wurde der Nichtwohnbau mit einer Abluftanlage in den Sanitärräumen, einer Lüftungsanlage zur teilweisen Belüftung in den Gruppenbüros und die Verkehrsflächen ohne Lüftungsanlage ausgestattet. Im Simulationsmodell des Wohngebäudes wurde die Charakteristik einer Abluftanlage abgebildet. Für die Simulationsmodelle wurde eine PI-Fensterregelung definiert, um den Vergleich zur EnEV-Berechnung herzustellen. Die Fenster werden dabei geöffnet sobald die Raumlufttemperatur in der Zone den Sollwert von 24°C erreicht hat. Zur Berücksichtigung von internen Lasten, konnte für das Wohngebäude ein Pauschalwert nach DIN 4108 für den spezifischen Wärmeeintrag definiert werden. Dieser lässt sich auf 5 W/m<sup>2</sup> pro Tag quantifizieren. Die internen Wärmegewinne im Nichtwohngebäude wurden nach DIN 18599 für die jeweiligen Nutzungszonen differenziert berücksichtigt und können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 8: Wärmegewinne der jeweiligen Zonen

| <i>Nutzungszone</i>   | <i>Personenbelegung</i>  | <i>Arbeitshilfen</i>  | <i>Beleuchtung</i>   |
|-----------------------|--|---|--|
| <i>Gruppenbüro</i>    | 28 Personen pro<br>Gruppenbüro<br><br>Anwesenheit:<br>Mo bis Fr<br>09:00 bis 15:00 Uhr | Pauschale Leistung<br>pro Gruppebüro von<br>7 W/m <sup>2</sup><br><br>Laufzeit:<br>Mo bis Fr<br>09:00 bis 15:00 Uhr | 60 Lichtquellen pro<br>Gruppenbüro<br>Leistung: 60 W<br><br>Laufzeit:<br>Mo bis Fr<br>06:30 bis 18:00 Uhr  |
| <i>Sanitär, WC</i>    | Keine Personen   | Keine Arbeitshilfen   | 3 Lichtquellen pro<br>Sanitärraum<br>Leistung: 60 W<br><br>Laufzeit:<br>Mo bis Fr<br>06:30 bis 18:00 Uhr   |
| <i>Verkehrsfläche</i> | Keine Personen   | Keine Arbeitshilfen   | 1 Lichtquelle pro<br>Verkehrsfläche<br>Leistung: 60 W<br><br>Laufzeit:<br>Mo bis Fr<br>06:30 bis 18:00 Uhr |

### 13.4.2 Vergleich der klimatischen Eingangsparameter

Die klimatischen Randbedingungen der Simulationsmodelle wurden auf Basis der meteorologischen Daten der DIN 4108 bzw. DIN 18599 definiert. Die standardmäßig verwendete Klimadatei für ein Wohngebäude im Energieausweis gibt ein gemittelt Referenzklima für Deutschland wieder. Die Klimadatei, welche für das Nichtwohngebäude verwendet wird, ist ein gemittelt Referenzklima des Standortes Potsdam. Die Datenbasis für Temperatur, Feuchte und Sonnenscheindauer wird durch einen 30-jährigen-Betrachtungszeitraum (1961 bis 1990) dargestellt. Die solaren Strahlungswerte für Diffus- und Globalstrahlung basieren auf einer Strahlungsstatistik mit einem Betrachtungszeitraum über 15 Jahren (1980 bis 1994). Für die Erstellung der Energieausweise basieren die meteorologischen Daten der DIN 4108 und DIN 18599 [31] auf veralteten Messwerten und sind nicht standortbezogen. Aus diesem Grund wurde ein Vergleich erstellt, wobei für die Simulation eine standortspezifische Klimadatei mit aktuellen Messwerten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus Regensburg des Jahres 2018 verwendet wurde.

Vorab wurde eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Klimadateien in Bezug auf die Außenlufttemperaturen und Strahlungsintensitäten durchgeführt. Die Untersuchungen haben aufgezeigt, dass die monatliche Außenlufttemperatur der aktuellen Klimadatei (Regensburg 2018) bis auf die Monate Februar, März und November höhere Werte gegenüber der beiden Referenzklimadateien aufweist (Abbildung 46). Bei diesem Vergleich wird ebenfalls ersichtlich, dass die Klimadatei

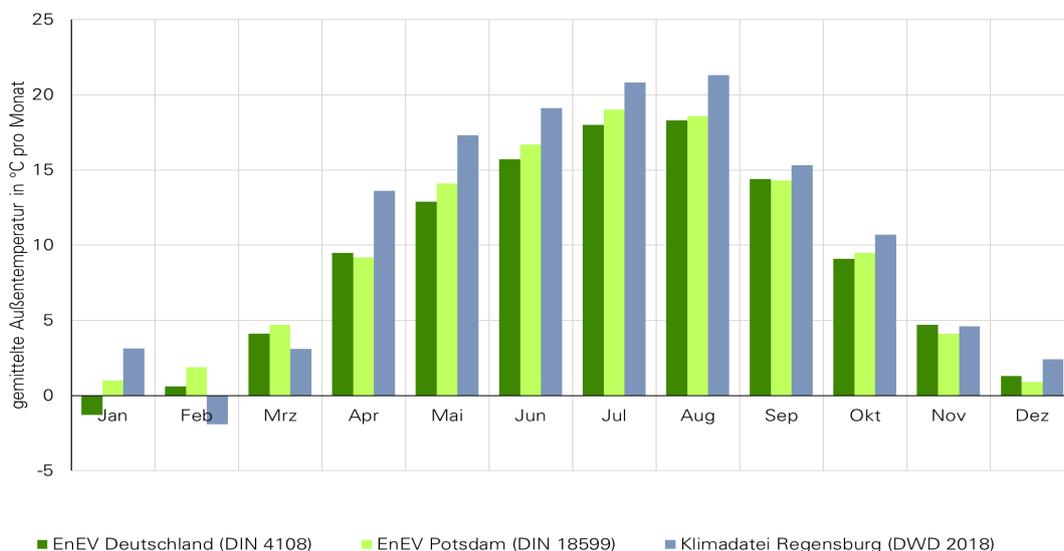


Abbildung 46: Monatliche Außenlufttemperaturen der jeweiligen Klimadateien

Potsdam höhere Temperaturen als die Klimadatei Deutschland aufweist. Bei der Betrachtung der Jahresmitteltemperatur wird nochmals deutlich, wie sehr sich die Außenlufttemperaturen voneinander unterscheiden. Die Klimadatei Deutschland weist eine Jahresmitteltemperatur von 8,9°C auf und hat damit die niedrigste

Jahresmitteltemperatur. Im Gegensatz dazu beläuft sich die Außenlufttemperatur der Klimadatei Potsdam auf 9,5°C und die Klimadatei Regensburg auf 10,8°C.

Bei der Gegenüberstellung der solaren Strahlungsleistungen ist eine Analogie zur Entwicklung der Außenlufttemperatur festzustellen. Die Strahlungsleistungen der beiden Klimadateien aus den DIN-Normen 4108 und 18599 sind sehr ähnlich. Die monatliche Strahlungsintensität der Klimadatei Regensburg übersteigt die Werte der Klimadateien Deutschland und Potsdam bis auf die Monate Januar, November und Dezember deutlich (Abbildung 47). Die Jahresstrahlungsenergie kann im Bereich von ca. 1000 bis 1100 kWh/(m<sup>2</sup>a) eingeordnet werden. Im Vergleich dazu

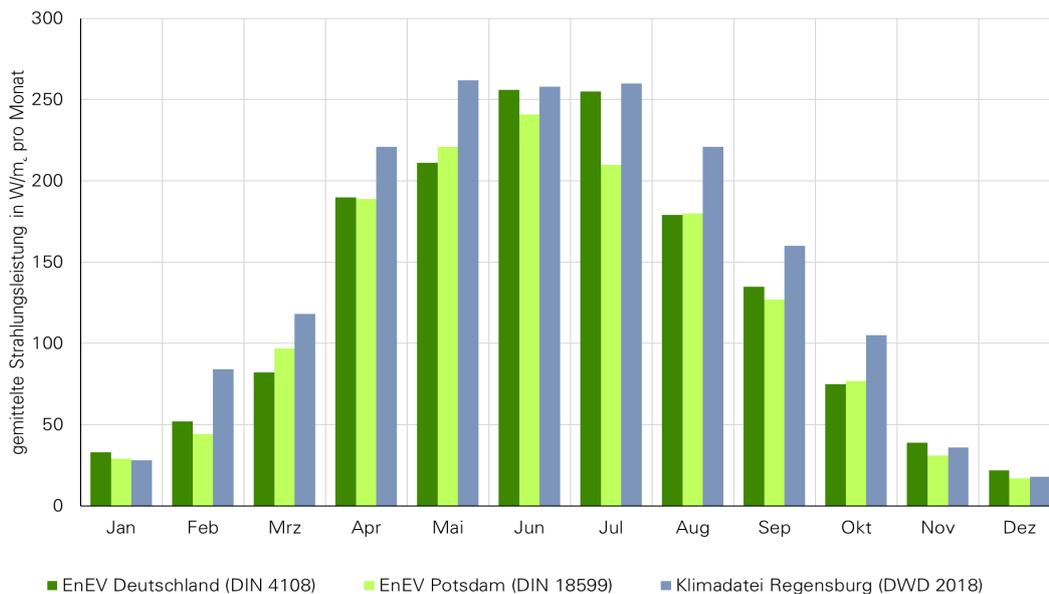


Abbildung 47: Monatliche Strahlungsintensitäten der jeweiligen Klimadateien

steht die aktuelle Klimadatei Regensburg mit den Werten vom DWD aus dem Jahr 2018. Diese weist bei der Betrachtung der monatlichen Strahlungsleistungen ebenfalls höhere Werte auf als die beiden anderen Klimadateien. Die gemittelte Jahresstrahlungsenergie von Regensburg beträgt etwa 1300 kWh/(m<sup>2</sup>a) und entspricht einem prozentualen Mehrertrag von ca. 30%.

Der Vergleich der Eingangsparameter Temperatur und Strahlungsintensität aus den Klimadateien als Randparameter für die Berechnungen und Simulationen zeigt einen erheblichen Unterschied. Dieser Unterschied wird auch in den Ergebnissen der Wärmebedarfsberechnung ersichtlich und fordert zugleich einen Ansatzwechsel. Es wird empfohlen, für detaillierte Wärmebedarfsberechnungen bei der Planung des ersten Bauabschnittes einen Nachweis durch thermodynamischer Gebäudesimulation von Planungsbüros zu fordern wobei aktuelle und künftige Klimadatensätze einzubeziehen sind.

### 13.4.3 Einfluss lokaler aktueller dynamischer Klimadaten

Aus der Analyse der klimatischen Unterschiede wurde bereits ersichtlich, dass bei der Erstellung eines Energieausweises durch die Verwendung von veralteten Klimadaten und unspezifischen Standortangaben offensichtliche Abweichungen entstehen. Obwohl bekannt ist, dass sich je nach Standort Klimadaten teilweise erheblich unterscheiden, wird der Energieausweis trotzdem mit konstanten klimatischen Randbedingungen berechnet. Es gibt dabei lediglich eine Unterscheidung in Wohngebäude bzw. Nichtwohngebäude.

Der entscheidende Nachteil der Berechnung der des Energieausweises nach EnEV ist der erhöhte Energiebedarf für Gebäude. Dies ist maßgeblich auf die Randbedingungen zurückzuführen, welche allerdings als veraltet einzustufen sind. Der im Ergebnis zu hohe Energiebedarf hat zur Folge, dass für die Energieversorgung Erzeuger und zugehörige Anlagentechnik dementsprechend überdimensioniert werden. Folglich ergeben sich erhebliche Mehrkosten durch Anschaffung und Betrieb überdimensionierter Anlagentechnik.

Zur Überprüfung dieser These wurde ein Vergleich der Ergebnisse aus den EnEV-Berechnungen mit den Ergebnissen aus den thermisch-dynamischen Gebäudesimulationen gezogen. In einem ersten Schritt wird ein Wohngebäude mit den beiden unterschiedlichen Methoden berechnet, nach DIN 4108 und mithilfe des Simulationsprogramms IDA ICE.

Um einen aussagekräftigen Vergleich zu erstellen, wurden alle Randparameter vereinheitlicht. Wichtigster Parameter sind die verwendeten Klimabedingungen, weshalb für die thermodynamische Simulation ein annähernd gleiches Klima (Potsdam nach TRY, „Test Reference Year“) wie bei der EnEV-Berechnung verwendet wurde. Der zugrundeliegende Messzeitraum des TRY-Klimadatensatzes beträgt ca. 25 Jahre (1983-2008).

Als Vergleichsbasis diente der ermittelte Heizwärmebedarf, welcher nach Definition der Summe aus Transmissions- und Lüftungswärmeverluste abzüglich den internen und solaren Wärmegewinnen entspricht. Daher konnten die klimatischen Veränderungen, welche sich direkt auf die solaren Gewinne und Verluste auswirken, mit Hilfe des Heizwärmebedarfs nachvollzogen werden.

Die Ergebnisse des Wohngebäudes zeigen auf, dass der Abgleich von Simulation zu Energieausweis unter Verwendung einer ähnlichen Klimadatei erfolgreich durchgeführt werden konnte. Hierbei weicht das Ergebnis der Simulation („IDA – Klima Potsdam“) des Jahresheizwärmebedarfs um gerade einmal 1% im Vergleich zum Energieausweis („EnEV – Klima EnEV“) ab (Abbildung 49). Somit konnte gleichzeitig eine Validierung des Simulationsmodells erfolgreich erstellt werden.

Darauf aufbauend erfolgte eine Simulation mit aktuellen Klimadaten („IDA – Klima Rgbg18“) des Projektstandortes Regensburg und mit einer perspektivischen Heizungssteuerung. Als Ergebnis konnte eine Reduzierung des Jahresheizwärmebedarfs um ca. 34% gegenüber der EnEV-Berechnung erzielt werden. Dieser Wert ist rein simulativ ermittelt und wird im Folgenden genauer differenziert.

Für einen Vergleich im Bereich der Nichtwohngebäude wurde dasselbe Prozedere wie für den Wohnbau angewandt. Betrachtungen der Ergebnisse des Nichtwohngebäudes zeigen auf, dass auch hier eine Übereinstimmung der

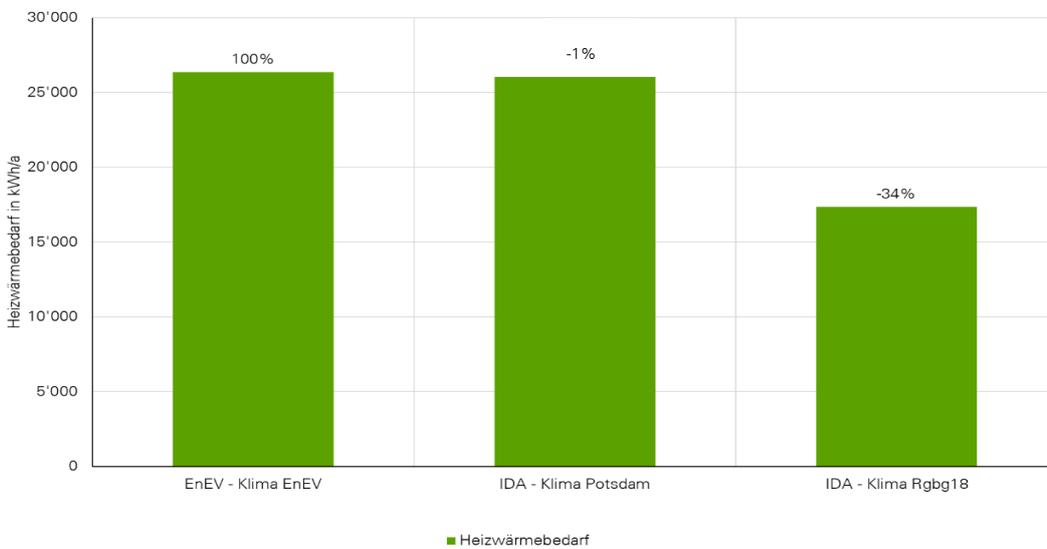


Abbildung 49: Vergleich von EnEV-Berechnung und Gebäudesimulation des Wohngebäudes anhand des jährlichen Heizenergiebedarfs

Berechnungen (EnEV-DIN 18599 und IDA ICE) mit gleichen Randbedingungen erzielt werden konnte. Im Ergebnis weicht der simulierte Jahresheizwärmebedarf um ca. 3% gegenüber der EnEV-Berechnung ab. Bei der Simulation mit aktuellen

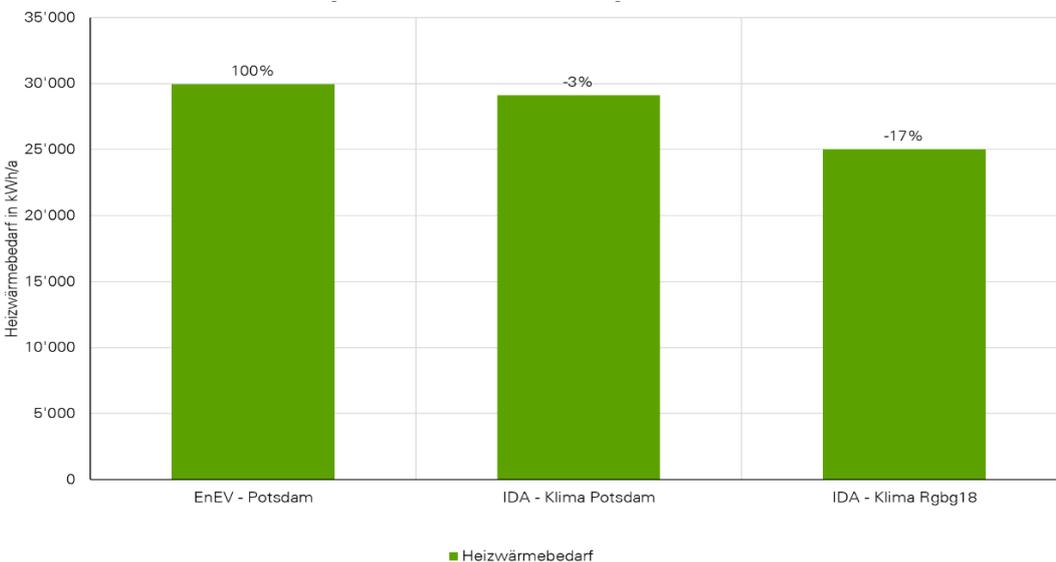


Abbildung 48: Vergleich von EnEV-Berechnung und Gebäudesimulation des Nichtwohngebäudes anhand des jährlichen Heizenergiebedarfs

Klimadaten und optimierter Steuerung (IDA-Klima Rgbg18) kann demzufolge eine Reduzierung des Jahresheizwärmebedarfs von ca. 17% erreicht werden.

## 13.5 Anhang 5: Ausführung des Stromnetzes

### 13.5.1 Analyse der Sektorenkopplung

#### 13.5.1.1 Ziel der Sektorenkopplung

Ziel der Sektorenkopplung ist es, erneuerbare Energien besser in das System zu integrieren und so auch andere Sektoren mit Strom aus erneuerbaren Energien zu versorgen. Strom spielt in einem zukünftigen Energiesystem eine zentrale Rolle. Zudem ermöglichen Stromanwendungen in den anderen Sektoren, wie z. B. Wärmepumpen im Wärmesektor oder Elektromobilität im Verkehrssektor eine höhere Effizienz, was in einem erneuerbaren Energiesystem eine sehr wichtige Rolle spielt, um den Zubau von regenerativen Erzeugungsanlagen gering zu halten. Bei erneuerbaren Energien handelt es sich in der Regel um fluktuierende Energieträger. Fluktuierend bedeutet, dass die Erzeugung und der Bedarf zeitlich nicht kontinuierlich übereinstimmen. Die Sektorenkopplung hilft dabei Erzeugung und Bedarf aufeinander abzustimmen und einen Ausbau mit erneuerbaren Energien zu ermöglichen, da die Integration erhöht wird. In Zeiten mit z. B. hoher Solarstrahlung entstehen bei geringer Nachfrage Erzeugungsüberschüsse im Stromnetz. Bei geringer Erzeugung und hoher Nachfrage wird hingegen nicht genug Leistung bereitgestellt. Durch Sektorenkopplung in Kombination mit Energiespeichern können diese Probleme minimiert werden.

Die Sektorenkopplung bietet außerdem die Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit von Projekten (mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien) zu steigern. Es werden Erzeugungsspitzen innerhalb des Quartiers abgefangen und somit die Netzbelastung verringert. In Kombination mit Lastmanagement und einem Erzeugungsmanagement (BHKW) können zudem die auftretenden Lastspitzen in Grenzen gehalten werden. Lastmanagement funktioniert immer in Verbindung mit Energiespeicher. Im Wärmesektor ist dies ein Pufferspeicher, den die Wärmepumpe bei Stromüberschüssen speisen kann, und im Strom oder Verkehrssektor ist dies der Batteriespeicher der Elektroautos.

Die Netzanschlusskosten werden anhand der maximalen Leistung und der Energiemenge, die über den Netzanschlusspunkt fließen berechnet. Eine Senkung bzw. ein Gleichbleiben der Netzanschlussleistung spart dementsprechend Kosten.

Durch eine Steigerung des Eigenverbrauches wird weniger Strom über externe Stromlieferanten hinzugekauft und die Wirtschaftlichkeit steigt.

### 13.5.1.2 Sektorenkoppelnde Maßnahmen

Das Energiekonzept der Prinz-Leopold-Kaserne beinhaltet folgende Sektoren [55]:

- Stromsektor
- Wärmesektor
- Gassektor
- Verkehrssektor

Der Stromsektor (Photovoltaikanlagen und BHKWs) ist über die Wärmepumpen mit dem Wärmesektor verknüpft. Bei überschüssiger Stromproduktion kann somit Strom in Wärme umgewandelt werden, welche sich in den Pufferspeichern speichern lässt, bis sie benötigt wird.

Das BHKW koppelt mehrere Sektoren miteinander. Mit Hilfe von Gas lässt sich Strom und Wärme gewinnen. Da der Gassektor nicht an Wetterbedingungen wie die Solarstrahlung oder dem Windaufkommen gebunden ist, kann die Umwandlung jederzeit stattfinden.

Der Elektrolyseur koppelt den Strom- mit dem Gassektor. Überschüssiger Strom kann in Wasserstoff und anschließend in Methan umgewandelt werden, welcher gespeichert und im BHKW thermisch und elektrisch verwertet werden kann.

Der Verkehrssektor lässt sich über den Stromsektor in Form von Elektromobilität koppeln. Elektrofahrzeuge können in den Quartieren mit eigens erzeugtem grünem Strom geladen werden.

Durch die Nutzung der Sektorenkopplung ergeben sich enorme Flexibilitätsoptionen, wodurch der Eigenverbrauch der erzeugten Energie gesteigert wird. Dadurch steigt auch die Wirtschaftlichkeit der Erzeugungsanlagen.

## 13.5.2 Analyse möglicher netzdienlicher Betriebsstrategien

### 13.5.2.1 Ziel netzdienlicher Betriebsstrategien

Ziel netzdienlicher Betriebsstrategien ist es, zum einen erneuerbare Energien besser in das System zu integrieren und zum anderen dabei den Netzausbau so gering wie möglich zu halten. Das Stromnetz wurde für den Netzbezug ausgelegt und weniger für eine Netzeinspeisung. Heute kommt es immer vermehrt zu Situationen, in denen das Netz überlastet ist. Dies kann sich entweder durch eine physikalische Überlastung ausdrücken, indem zu viel Leistung eingespeist wird. Auf der anderen Seite kann eine Spannungsband-Verletzung auftreten, da die Spannung innerhalb eines Bandes von  $230 \text{ V} \pm 10 \%$  gehalten werden muss. Eine Einspeisung erhöht die Spannung. Diese Erhöhung ist zum einen von der eingespeisten Leistung aber auch von der Entfernung zum Trafo abhängig.

Die netzdienlichen Betriebsstrategien bieten die Möglichkeit von zusätzlichen Einnahmequellen von flexiblen Verbrauchern, Erzeugern und Energiespeichern (Flexibilitätsoptionen). Dieser Punkt betrifft weniger die eigenen Netzanschlusskosten, sondern vielmehr ein systemdienlicher Mehrwert, um vermehrt erneuerbare Energien einzuspeisen und die Transformation des deutschen Energiesystems voranzutreiben.

### 13.5.2.2 Netzdienlichkeit der Prinz-Leopold-Kaserne

Das Energiekonzept der Prinz-Leopold-Kaserne koppelt die unterschiedlichen Sektoren miteinander und enthält (Strom-)Speicher. Damit wird erreicht, dass der in den Quartieren produzierte Strom aus PV und BHKW zunächst in den Eigenverbrauch fließt. Durch die bedarfsgerechte Stromerzeugung im BHKW, die flexible Wärmeerzeugung der Wärmepumpen und den Betrieb von Elektrolyseur und Elektromobilität werden Überschüsse bei der Stromproduktion vermieden. Somit wird das Netz entlastet, da z. B. in Zeiten hoher PV-Stromerzeugung die Wärmepumpen den PV-Strom zunächst verwenden, um die Wärmepufferspeicher aufzuladen. Der PV-Strom wird also in der Regel nicht zu Zeiten eingespeist, in denen die PV-Einspeisung generell hoch ist. Dieser Sachverhalt existiert gleichermaßen für den Fall, dass zu wenig Strom ins Netz fließt: In diesen Zuständen (z. B. wenn die Sonne nicht scheint) liegt die Stromerzeugung unter dem Soll. Die Stromabnahme aus dem Netz wäre jetzt ungünstig für die Netzstabilität. In diesem Fall kann das BHKW den benötigten Strom bereitstellen, damit der Netzbezug niedrig bleibt und die Netzstabilität nicht negativ beeinflusst wird.

Weiterhin können Erzeuger und Verbraucher netzdienlich agieren, indem die Anlagen je nach Netzbelastung entweder negativ geregelt werden (d. h. Strom verbrauchen oder Erzeugung reduzieren) oder positiv geregelt werden (d. h. Stromverbrauch reduzieren oder Strom erzeugen).

Folgende Anlagen sind negativ regelbar:

- Wärmepumpen (WP) in Verbindung mit Pufferspeichern
- Elektrolyseur in Verbindung mit Gasspeichern
- Elektromobilität
- BHKW-Erzeugung reduzieren, wenn Wärmeversorgung z. B. durch Pufferspeicher oder Wärmepumpen gewährleistet
- Batteriespeicher laden

Folgende Anlagen sind positiv regelbar:

- WP-Erzeugung reduzieren, wenn Wärmeversorgung z. B. durch Pufferspeicher oder BHKW gewährleistet

- Ladeleistung der Elektromobilität reduzieren, sobald Grundreichweite vorhanden
- BHKW in Verbindung mit Pufferspeichern
- Batteriespeicher entladen

### 13.5.3 Kundenstrommodell

#### 13.5.3.1 Aufgaben

An die Energieanlage (Stromnetz in der PLK) werden Letztverbraucher angeschlossen. Die Kundenanlage wird über einen Summenzähler vom Netz der allgemeinen Versorgung abgegrenzt. Zudem befindet sich die Energieanlage auf einem „räumlich zusammengehörenden Gebiet“.

Mögliche Betreiberkonzepte sind Eigenorganisation und Pachtmodell. Beim Pachtmodell fungiert ein Pächter als Anlagenbetreiber im Sinne des EEG. Die Rechte und Pflichten liegen dabei beim Anlagenbetreiber.

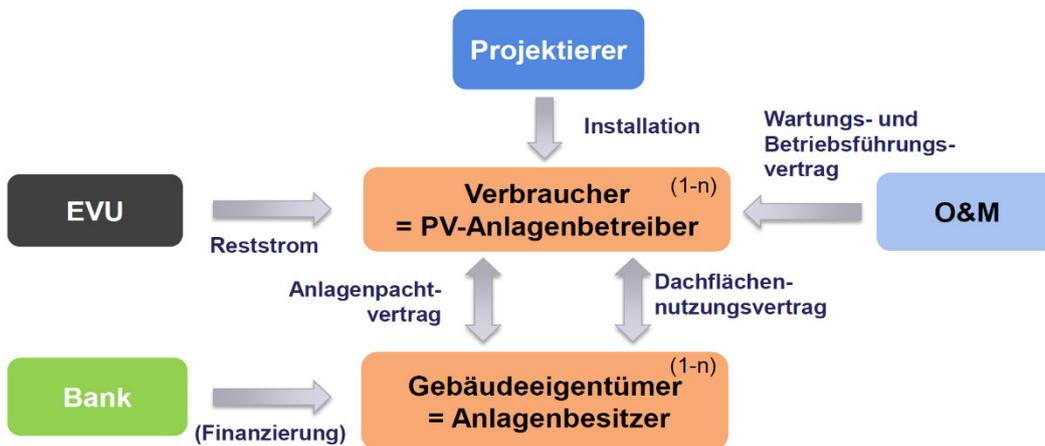


Abbildung 50: Eigentumsverhältnisse beim Pachtmodell

### 13.5.3.2 Chancen

Durch ein Kunden-, bzw. Mieterstrommodell kann der Mieter Stromkosten einsparen und der Vermieter kann eine höhere Wirtschaftlichkeit des Projektes erreichen. Der Bauherr erhält eine zusätzliche Einnahmequelle und die Attraktivität seiner Immobilie steigt, wodurch sich diese besser vermarkten lässt. Da der Mieterstrom mindestens zehn Prozent günstiger als die Grundversorgung sein muss, bedeutet die Teilnahme am Kundenstrommodell für den Mieter eine Ersparnis bei der Stromrechnung. Zudem erhält der Mieter Strom aus nachhaltiger, dezentraler Erzeugung. Dabei sind die Mieter nicht an das Mieterstromkonzept gebunden.

### 13.5.3.3 Risiken

Ein unternehmerisches Risiko besteht für den Fall, dass weniger Mieter als Stromkunden akquiriert werden können als kalkuliert. Es müsste ein Anteil von mindestens 50% der Bewohner gleichzeitig Stromkunde sein. Diesem Risiko soll durch hohe Nutzeraufklärung und -Kommunikation entgegengewirkt werden. Zudem muss der Vermieter die Anforderungen an ein Energieversorgungsunternehmen erfüllen, falls er keinen Dienstleister beauftragt.

### 13.5.3.4 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit des Kundenstrommodells ist abhängig von der Anlagengröße, bzw. dessen Stromerzeugung und dem Strombedarf der angeschlossenen Kunden. Den Nutzern des Kundenstrommodells muss ein Kostenvorteil von zehn Prozent gegenüber der Grundversorgung gewährt werden. Wird zum Großteil der eigenerzeugte Strom an die Mieter abgegeben, lässt sich der Kostenvorteil an die Mieter weitergeben. Sollte aber der Strombedarf der Mieter die Eigenerzeugung deutlich übersteigen, muss ein Großteil des Stroms von EVUs zu üblichen Marktpreisen zugekauft werden. Hierdurch sinkt die Wirtschaftlichkeit des Kundenstrommodells. Um das zu vermeiden, sollte frühzeitig das Optimum der Kundenstrom-Teilnehmerzahl ermittelt werden. Dabei hat jedes Kundenstrommodell sein eigenes Optimum. Mit der Kenntnis über die Optimale Teilnehmerzahl, kann bei der Akquise darauf geachtet werden, dass nicht zu viele Mieter ein Angebot erhalten, wodurch die Teilnehmerzahl beeinflusst werden kann.

### 13.5.3.5 Virtuelle Kraftwerke

Durch das Zusammenspiel der einzelnen Erzeugungsanlagen, Konversionstechnologien sowie der Verbraucher und Speicher werden im Quartier Flexibilitäten und Dienstleistungen für das umgebende Energiesystem erzeugt und gleichzeitig Strom aus erneuerbaren Quellen vollständig verwertet.

Mehrere Cluster oder auch Quartiere lassen sich zu einem virtuellen Kraftwerk bündeln. Das virtuelle Kraftwerk wird dann als dynamisches Portfolio bewirtschaftet. Es kann Dienstleistungen für den dezentralen Energiemarkt der Zukunft erbringen. Das virtuelle Kraftwerk wird mit Intelligenz und Hardware ausgestattet und besitzt damit einen größeren Umfang an Erzeugungsleistung als ein einzelner Erzeuger. Die minimale Menge, die day ahead an der Europäischen Strombörse (EPEX) gehandelt werden kann, ist 0,1 MW. Bei Regelleistung sind es mindestens 1 MW, die angeboten werden müssen. Durch das Portfolio eröffnen sich neue Geschäftsmodelle und damit Möglichkeiten der Optimierung, welche nicht nur den Day-Ahead- und den Regelleistungsmarkt einschließen. Für Übertragungsnetzbetreiber kann der Schwarm aus Quartieren Redispatch-Maßnahmen anbieten oder für Bilanzkreisverantwortliche aktiv in den Intraday-Handel einsteigen.

Es lässt sich feststellen, dass sich mit einem Schwarm von Quartieren mit einem hierarchisch skalierbaren System verschiedene Szenarien und Produkte, aber auch Dienstleistungen ermöglichen [56].

### 13.6 Anhang 6: Clusterbilanzierung



# Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Kartografische Darstellung von Regensburg, Markierung der relevanten Stadtgebiete PLK und Margaretenau (MAGGIE-Projekt) .....   | 10 |
| Abbildung 2: Temperaturszenarien gemäß des IPCC mit und ohne drastische Veränderungen im Emissionsausstoß .....                              | 11 |
| Abbildung 3: Rahmenplan der PLK mit Cluster und Baubereiche des 1. Bauabschnitts .....   | 14 |
| Abbildung 4: Energieflüsse des Cluster A (Wohnen ohne Kühlung) ..  | 16 |
| Abbildung 5: Stellplatzschlüssel der PLK und der Vergleich mit weiteren Beispielen .....   | 18 |
| Abbildung 6: Kartografische Darstellung der PV-Flächen im Gesamtquartier PLK .....   | 21 |
| Abbildung 7: Erneuerbare Energieerzeugung in Regensburg, relevant PV-Erzeugung (gelb) mit und ohne PLK .....                                 | 22 |
| Abbildung 8: Kanalabschnitte für eine mögliche Abwassernutzung und erste Wohnbebauung .....  | 24 |
| Abbildung 9: Kartografische Darstellung der geothermischen Energiequellen nach ersten Untersuchungen im Gebiet der PLK .....                 | 26 |
| Abbildung 10: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur in Regensburg der letzten 30 Jahre .....  | 27 |
| Abbildung 11: Vergleich von regenerativen Energiequellen und Energieverbrauch im Wohnsektor in Deutschland für die Jahre 2018 und 2050 ..... | 28 |
| Abbildung 12: Ausrichtungsvarianten des Ausgangsmoduls .....   | 30 |
| Abbildung 13: Gegenüberstellung der Bedarfswerte der einzelnen Varianten .....   | 31 |
| Abbildung 14: Flächenermittlung des Quartiers .....  | 32 |
| Abbildung 15: Einsparungen im Bereich Warmwasser Endenergiebedarf für die Wärmebereitung und -Verteilung                                     | 35 |
| Abbildung 16: 3-Leiter-System für die Nahwärmeversorgung .....   | 36 |
| Abbildung 17: Grafische Darstellung der Funktion von thermodynamischer Gebäudesimulation .....   | 36 |
| Abbildung 18: Peakshaving durch perspektivische Heizungssteuerung .....  | 38 |
| Abbildung 19: Einsparung des Heizendenergiebedarf für Wohngebäude .....  | 39 |
| Abbildung 20: Einsparung des Heizendenergiebedarf für Nichtwohngebäude .....   | 39 |
| Abbildung 21: Funktionsschema Variante "BHKW" .....  | 42 |
| Abbildung 22: Funktionsschema Variante "Wärmepumpen-System" ..   | 43 |
| Abbildung 23: Energieflüsse beispielhaft für Cluster A und Darstellung der Überschussenergie (rot) .....                                     | 44 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 24: Schematische Darstellung der Variante "Power-to-X-System" .....  | 44  |
| Abbildung 25: Darstellung des Wärmenetzes (Kaltes Nahwärmenetz und Niedertemperatur-Nahwärmenetz) .....                  | 46  |
| Abbildung 26: Einteilung des Quartiers in funktionale Einheiten von ca. 360 Wohneinheits-Äquivalente .....               | 48  |
| Abbildung 27: Aufstellung der Gasspeicher in Quartiersgaragen.....   | 48  |
| Abbildung 28: Unterirdische Aufstellung der Gasspeicher mit gleichzeitiger Überflutungsmöglichkeit .....                 | 49  |
| Abbildung 29: Vorschlag der Energetischen Verknüpfung der Sektoren des ersten Bauabschnitts.....                         | 50  |
| Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung des Wärmenetzes im energie-Cluster A-B-C mit Energiezentrale .....               | 52  |
| Abbildung 31: Charakterisierung der verschiedenen Rohrsysteme für Nahwärmenetze [57] .....                               | 53  |
| Abbildung 32: Kälteversorgung des Quartiers im Sommerfall .....  | 57  |
| Abbildung 33: Vereinfachte Unterteilung des Quartiers in Wohnbereich und Gewerbegürtel .....                             | 58  |
| Abbildung 34: Erdsondenfläche für Kühlen (links) und Ausnutzung der Geothermiequelle für Heizen und Kühlen (rechts)..... | 59  |
| Abbildung 35: Schematische Darstellung des Stromnetzes für die PLK .....   | 60  |
| Abbildung 36: Flächige und Punktuelle Stromerzeugungsanlagen im Gebiet der PLK .....                                     | 61  |
| Abbildung 37: Monatliche Energiekosten pro Wohneinheit.....  | 71  |
| Abbildung 38: Monatliche Energiekosten pro WE .....  | 77  |
| Abbildung 39: Monatliche Energiekosten pro WE in 15 Jahren.....  | 77  |
| Abbildung 40: Monatliche Energiekosten pro Wohneinheitsäquivalent .....  | 77  |
| Abbildung 41: Vergleich des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes der einzelnen Varianten .....                                     | 78  |
| Abbildung 42: Gegenüberstellung von Energieerzeugung und Energiebedarf des Quartiers .....                               | 85  |
| Abbildung 43: Untersuchungsgebiet für die thermisch dynamische Gebäudesimulation.....                                    | 104 |
| Abbildung 44: Simulationsmodell des Wohngebäudes als 1-Zonen-Modell, Vergleich mit DIN 4108 .....                        | 105 |
| Abbildung 45: Simulationsmodell des Nichtwohngebäudes als Mehr-Zonen-Modell, Vergleich mit DIN 18599 .....               | 105 |
| Abbildung 46: Monatliche Außenlufttemperaturen der jeweiligen Klimadateien.....  | 107 |
| Abbildung 47: Monatliche Strahlungsintensitäten der jeweiligen Klimadateien.....   | 108 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 48: Vergleich von EnEV-Berechnung und Gebäudesimulation des Nichtwohngebäudes anhand des jährlichen Heizenergiebedarfs..... | 110 |
| Abbildung 49: Vergleich von EnEV-Berechnung und Gebäudesimulation des Wohngebäudes anhand des jährlichen Heizenergiebedarfs.....      | 110 |
| Abbildung 50: Eigentumsverhältnisse beim Pachtmodell .....  | 114 |

## Tabellenverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 1: Übersicht der Potenziale mit Leistung und Verfügbarkeit .. | 28  |
| Tabelle 2: Teilenergiekennwerte [MWh/a].....                          | 33  |
| Tabelle 3: Rahmenbedingungen .....                                    | 33  |
| Tabelle 4: Übersicht der Wärmeversorgungsvarianten.....               | 41  |
| Tabelle 5 :Eingesparte Strompreisbestandteile bei Direktleitung ..... | 70  |
| Tabelle 6: Baukonstruktionen für Wohngebäude.....                     | 104 |
| Tabelle 7: Baukonstruktionen für Nichtwohngebäude.....                | 105 |
| Tabelle 8: Wärmegewinne der jeweiligen Zonen .....                    | 106 |

# Literaturverzeichnis

- [1] Stadt Regensburg, „Auslobung Städtebaulicher Wettbewerb PLK 2020“, 2020.
- [2] Stadt Regensburg, „Beschluss des Stadtrates“, 2018.
- [3] O. Prof. Dr. Steffens, *MAGGIE - Modernes Wohnen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://solares-bauen-maggie.de/>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [4] Dr. Hahn, Reinhard et al., „Leitbild Energie und Klima der Stadt Regensburg“, 2016.
- [5] *Bewertungsgesetz (BewG)*.
- [6] *DIN EN 12831-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*, EN 12831-1, 2017.
- [7] H. Dr.-Ing. Ruf, *Anwendungsorientierte Informationen für moderne Heizsysteme im Neubau für Planung und Betrieb: Klimadatenanalyse*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.unw-ulm.de/wp-content/uploads/2018/09/AxIOME\\_BAR\\_Bericht\\_Klimadaten.pdf](https://www.unw-ulm.de/wp-content/uploads/2018/09/AxIOME_BAR_Bericht_Klimadaten.pdf). Zugriff am: 20. August 2020.
- [8] Team für Technik GmbH, „Energienutzplan Stadt Regensburg Teilbericht A - Grundlagenermittlung“, 28. Apr. 2014.
- [9] Team für Technik GmbH, „Energienutzplan Stadt Regensburg Teilbericht B - Ist- Zustand Verbrauch“, 28. Apr. 2014.
- [10] Energie-und Klimaschutzmanagement Stadt Regensburg, „Monitoringbericht 2019 im Energie-und Klimaschutzmanagement der Stadt Regensburg“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.regensburg-effizient.de/fileadmin/Downloads/Monitoringbericht\\_Energie-und\\_Klimaschutzmanagement\\_\\_der\\_Stadt\\_Regensburg\\_Januar2020.pdf](https://www.regensburg-effizient.de/fileadmin/Downloads/Monitoringbericht_Energie-und_Klimaschutzmanagement__der_Stadt_Regensburg_Januar2020.pdf).
- [11] Team für Technik GmbH, „Energienutzplan Stadt Regensburg Teilbericht C - Ist- Zustand Erzeugung“, 28. Apr. 2014.
- [12] Stromspiegel, „Stromspiegel Deutschland 2019“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stromspiegel.de/fileadmin/ssi/stromspiegel/Broschuere/Stromspiegel-2019-web.pdf>.
- [13] Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr., „e% - Energieeffizienter Wohnungsbau: Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung des Modellvorhabens“, München, 2017.

- [14] Alexander Oehlmann, „Smart Mobility HafenCity: Von nachhaltiger Stadtentwicklung zu nachhaltigen Mobilitätsstrukturen und -optionen“, 8. Juni 2017.
- [15] Technische Universität München Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, „Gemeinschaftlich nachhaltig bauen: Forschungsbericht der ökologischen Untersuchung des genossenschaftlichen Wohnungsbauprojektes wagnisART“.
- [16] Westfälische Nachrichten, *374 Autos pro 1000 Münsteraner - Pkw-Quote in Münsterland-Kreisen höher*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wn.de/Muenster/2012/09/Bundesweit-liegt-der-Schnitt-bei-472-Wagen-374-Autos-pro-1000-Muensteraner-Pkw-Quote-in-Muensterland-Kreisen-hoehler>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [17] DWD-Deutscher Wetterdienst, „Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten\\_su.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_su.html).
- [18] EnergyWatchGroup, „Energy Transition in Europe Across Power, Heat, Transport and Desalination Sectors“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/2018/12/EWG-LUT\\_Full-Study\\_Energy-Transition-Europe.pdf](http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/2018/12/EWG-LUT_Full-Study_Energy-Transition-Europe.pdf).
- [19] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, „Bayerischer Solaratlas“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user\\_upload/stmwi/Publikationen/2015/2015-11-09-Bayerischer\\_Solaratlas.pdf](https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Publikationen/2015/2015-11-09-Bayerischer_Solaratlas.pdf).
- [20] Plant for the planet, *Nachhaltige Forstwirtschaft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plant-for-the-planet.org/es/informate/produkte-aus-holz/uid-c14d5350-b69d-11e4-a0ac-902b34544d94>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [21] energie-experten.org, *Holz-Brennwert: Tabellen-Werte für alle Brennholzarten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/heizung/holzheizung/brennholz/brennwert-holz.html>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [22] Deutsche Bundesstiftung Umwelt, „Heizen und Kühlen mit Abwasser“, 2009. [Online]. Verfügbar unter: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mum/intern/Dateien/Dokumente/5\\_Energie/Energieeffizienz/Abwasserwaerme\\_nutzung/Leitfaden\\_Ratgeber/Ratgeber\\_Heizen\\_und\\_Kuehlen.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mum/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Energieeffizienz/Abwasserwaerme_nutzung/Leitfaden_Ratgeber/Ratgeber_Heizen_und_Kuehlen.pdf).
- [23] Bayerisches Landesamt für Umwelt, *Oberflächennahe Geothermie*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_107\\_oberflaechennahe\\_geothermie.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_107_oberflaechennahe_geothermie.pdf). Zugriff am: 20. August 2020.

- [24] Tewag GmbH, „Ersteinschätzung Erdwärmenutzung in der Prinz Leopold Kaserne für Luxgreen Climadesign“, 2020.
- [25] Fraunhofer ISE, „Gestiegene Effizienz: Feldtests bestätigen Potenzial von Wärmepumpen als wichtigster Heiztechnik der Zukunft“, 2017.
- [26] Deutsche Energie-Agentur, *dena-Gebäudereport: Energiewende im Gebäudebereich stagniert*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/dena-gebäudebericht-energiewende-im-gebäudebereich-stagniert/>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [27] Dr. Matthes, Felix Chr. et al., *ZUKUNFT STROMSYSTEM II – Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung: Vom Ziel her denken*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-II-Regionalisierung-der-erneuerbaren-Stromerzeugung.pdf>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [28] M. Beer, *Energiezukunft 2050*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ffe.de/download/kurzberichte/Kurzbericht\\_Energiezukunft\\_2050.pdf](https://www.ffe.de/download/kurzberichte/Kurzbericht_Energiezukunft_2050.pdf). Zugriff am: 20. August 2020.
- [29] A. Bunzel, „Klimaschutz in der verbindlichen Bauleitplanung“, Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH, 2017.
- [30] Technische Universität München, „FERD. TAUSENDPFUND Lebenszyklusanalyse und Gebäudemonitoring“, 2019.
- [31] *DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland*, DIN 4710, 2003.
- [32] Deutsches Institut für Normungen, „DIN 4710-1: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland“, Deutsches Institut für Normungen, 2003.
- [33] D. W. Passipedia, *Besonderheiten und Eigenschaften erdberührter Bauteile*. [Online]. Verfügbar unter: [https://passipedia.de/grundlagen/bauphysikalische\\_grundlagen/waermebruecken/wbberechnung/erdreich/eigenschaften](https://passipedia.de/grundlagen/bauphysikalische_grundlagen/waermebruecken/wbberechnung/erdreich/eigenschaften). Zugriff am: 20. August 2020.
- [34] Stadtwerke München, „Fernkälte: Klimatisierungssystem der Zukunft“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.swm.de/magazin/energie/fernkaelte.html>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [35] H. Viole und D. Richard, *Stromlieferungen im Quartier: Teil 1: Voraussetzungen von Kundenanlagen gemäß § 3 Nr. 24a Energiewirtschaftsgesetz in Abgrenzung zum Stromnetz der allgemeinen*

- Versorgung*. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.roedl.de/themen/kursbuch-stadtwerke/juni-2018/stromlieferungen-quartier>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [36] Deutscher Industrie- und Handelskammertag, *Merkblatt Kunden anlage und geschlossenes Verteilernetz: Abgrenzungen | Voraussetzungen | Empfehlungen*. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.dihk.de/resource/blob/2602/d87c75d2167bc9237e6d4750dc946814/dihk-merkblatt-kundenanlage-und-geschlossenes-verteilernetz-data.pdf>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [37] e.on, *Erfolgreiche EEG-Direkt-vermarktung für Unternehmer*. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.eon.de/de/gk/energieloesungen/energievermarktung/eeg-direktvermarktung.html>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [38] T. S. A. Geiger, *Netzintegration im Rahmen der Direktvermarktung in Deutschland*. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://www.transnetbw.de/downloads/eeg-kwk-g/eeg/TransnetBW-DFBEE-netzintegration\\_im\\_rahmen\\_der\\_direktvermarktung\\_in\\_deutschland.pdf](https://www.transnetbw.de/downloads/eeg-kwk-g/eeg/TransnetBW-DFBEE-netzintegration_im_rahmen_der_direktvermarktung_in_deutschland.pdf). Zugriff am: 20. August 2020.
- [39] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG): § 3 Begriffsbestimmungen*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/enwg\\_2005/\\_3.html](https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/_3.html). Zugriff am: 20. August 2020.
- [40] C. Prof. Dr. Moench, J. Dr. Wagner, M. Schulz und J. Wrede, *Gutachterliche Stellungnahme "Rechtsfragen des Eigenverbrauchs und des Direktverbrauchs von Strom durch Dritte aus Photovoltaikanlagen"*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Gutachten/pv\\_anlagen\\_bf\\_langfassung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Gutachten/pv_anlagen_bf_langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Zugriff am: 20. August 2020.
- [41] Bundesverband Windenergie, *Erlösoptionen außerhalb des EEG: Eigenversorgung – Direktlieferung – Power-to-X und Regelleistung: Wie sie umgesetzt werden können und was dabei zu beachten ist*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/03-sektorenkopplung/20180115-erloesoptionen-ausserhalb-des-eeg.pdf>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [42] Bundesnetzagentur, *KWKG-Umlage: Wie hoch ist die Umlage zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)?* [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/PreiseUndRechnungen/KWK\\_Umlage.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/PreiseUndRechnungen/KWK_Umlage.html). Zugriff am: 20. August 2020.

- [43] Bundesnetzagentur, *Offshore-Netzumlage: Warum gibt es diese Umlage und wie hoch ist sie für Stromkunden?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/PreiseUndRechnungen/OffshoreNetzumlage.html>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [44] Bundesnetzagentur, *§ 19 StromNEV-Umlage: Was wird mit dieser Umlage ausgeglichen und wie hoch ist sie?* [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/PreiseUndRechnungen/§19\\_strom\\_nev\\_umlage.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/PreiseUndRechnungen/§19_strom_nev_umlage.html). Zugriff am: 20. August 2020.
- [45] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Verordnung über Konzessionsabgaben für Strom und Gas (Konzessionsabgabenverordnung - KAV): § 2 Bemessung und zulässige Höhe der Konzessionsabgaben.* [Online]. Verfügbar unter: [http://www.gesetze-im-internet.de/kav/\\_\\_2.html](http://www.gesetze-im-internet.de/kav/__2.html). Zugriff am: 20. August 2020.
- [46] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Stromsteuergesetz (StromStG): § 9 Steuerbefreiungen, Steuerermäßigungen.* [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/\\_\\_9.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/__9.html). Zugriff am: 20. August 2020.
- [47] Bundesministerium der Finanzen, *Stromsteuer.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Glossareintraege/S/Stromsteuer.html?view=renderHelp>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [48] BAFA, „Deutschland machts´s effizient: Förderung Wärmenetze 4.0“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.deutschland-machtseffizient.de/KAENEF/Redaktion/DE/Standardartikel/Dossier/waermentetze-4-0-waermeinfrastruktur.html>.
- [49] R. Nagel, *Baukultur Bericht 2018/19: Erbe - Bestand - Zukunft*, 2018. Aufl. Berlin: Bundesstiftung Baukultur, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bundesstiftung-baukultur.de/sites/default/files/medien/4649/downloads/baukulturbericht201819\\_0.pdf](https://www.bundesstiftung-baukultur.de/sites/default/files/medien/4649/downloads/baukulturbericht201819_0.pdf)
- [50] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, „Graue Energie im Ordnungsrecht/Förderung: Endbericht“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/Endbericht.html?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/Endbericht.html?__blob=publicationFile&v=3).
- [51] U. Klar, „Die Ökologische Mustersiedlung im Prinz Eugen Park München“, München, 2020.

- [52] EQUA Solutions AG, „Firmengeschichte“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.equa.se/de/about-us/history>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [53] N. Björzell *et al.*, „IDA INDOOR CLIMATE AND ENERGY“, 1999.
- [54] Deutsches Institut für Normungen, „DIN V 18599-1: Energetische Bewertung von Gebäuden“, Deutsches Institut für Normungen, 2018.
- [55] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., *Sektorenkopplung: Synergien sinnvoll nutzen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/sectorenkopplung/>. Zugriff am: 20. August 2020.
- [56] K. N. Graf, „Dank Schwarmintelligenz und einer smarten Servicewelt in der Energiewirtschaft zum Stromnetz der Zukunft“, Wiesbaden, 2019.
- [57] Fraunhofer Umsicht – Leitfaden Nahwärme

