

Quartiere im klimaneutralen Stromsystem

Kurzgutachten anhand typischer Quartierskonzepte und Verteilnetzkategorien der Reiner Lemoine Institut gGmbH

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin

Tel.: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699

E-Mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de

Autorinnen und Autoren der Reiner Lemoine Institut gGmbH:

Marie-Claire Gering
Kilian Helfenbein
Editha Kötter
Birgit Schachler

Redaktion:

Dr. Andreas Koch, dena
Susanne Schmelcher, dena
Tim Sternkopf, dena

Bildnachweis:

©shutterstock/Zaur Rahimov

Stand:

6/2023

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.

Bitte zitieren als:

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023) „Quartiere im klimaneutralen Stromsystem – Kurzgutachten anhand typischer Quartierskonzepte und Verteilnetzkategorien der Reiner Lemoine Institut gGmbH“

Inhalt

1	Vorwort der dena	4
2	Zusammenfassung	6
3	Einleitung	7
4	Systematisierung typischer Quartierskonzepte	9
4.1	Klassifizierung von Quartierskonzepten	9
4.2	Festlegung der Quartierskonzepte	11
4.3	Berechnung der elektrischen Leistung der Wärmepumpen der Quartierskonzepte	13
5	Unterscheidung von Verteilnetzen	18
5.1	Verteilnetztyp „PV ländlich“	20
5.2	Verteilnetztyp „Wind ländlich“	21
5.3	Verteilnetztyp „Ausgeglichen halbstädtisch“	22
5.4	Verteilnetztyp „Last städtisch“	23
6	Netzanalyse und Szenariorahmen	24
6.1	Auswahl der zu untersuchenden Verteilnetze und Szenariorahmen	24
6.2	Netzanalyse	25
7	Zusammenspiel Quartierskonzept und Verteilnetz	27
7.1	Verteilnetztyp „PV ländlich“	28
7.2	Verteilnetztyp „Wind ländlich“	29
7.3	Verteilnetztyp „Ausgeglichen halbstädtisch“	30
7.4	Verteilnetztyp „Last städtisch“	31
8	Schlussbetrachtung und weiterer Forschungsbedarf	32
	Abbildungsverzeichnis	34
	Tabellenverzeichnis	36
	Literaturverzeichnis	37
	Abkürzungen	40

1 Vorwort der dena

Gut ausgebaute Stromverteilnetze sind eine notwendige Voraussetzung für die Steigerung des Anteils von erneuerbaren Energien im Wärme- und Mobilitätssektor. Dabei erhöht die Elektrifizierung durch Wärmepumpen und Elektromobile den Strombedarf und führt zu zusätzlichen Lastspitzen. Zwar liegen die Kosten für Stromnetzausbau und -betrieb in der Regel unter denen für Gas- und Wärmenetze, doch gibt es auch hier unterschiedliche Hemmnisse für einen beschleunigten Netzausbau. Neben hohen Investitionsbedarfen erfordert der Ausbau im Strom- und Wärmesektor Fachpersonal, technische Anlagen und Ressourcen sowie Flächen für die technische Infrastruktur. So sehen beispielsweise die Langfristszenarien (Sensfuß et al., 2021) eine Verdopplung der annuitätischen Kosten der Verteilnetze aufgrund des Ausbaubedarfs in zwei der betrachteten Szenarien vor. Wärmepumpen sind eine zentrale Technologie für das Gelingen der Wärmewende. Daneben sind Wärmenetze eine weitere wichtige Säule in der Transformation des Wärmesektors. Während sie bisher hauptsächlich durch fossile Energieträger in beispielsweise Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen gespeist werden, ist auch hier künftig eine verstärkte Nutzung von verschiedenen Umweltwärmequellen mithilfe von Großwärmepumpen zu erwarten. Aufgrund der unterschiedlichen Leistungsklassen der Wärmepumpen in gebäudeintegrierten Konzepten und wärmenetzbasierten Wärmeversorgungslösungen unterscheiden sich beide Konzepte auch in ihren Auswirkungen auf den Ausbaubedarf des lokalen Stromnetzes und die damit verbundenen Kosten.

Mit Blick auf das Stromnetz konnte im Rahmen dieser Studie gezeigt werden, dass wärmenetzbasierte Versorgungskonzepte in den meisten Verteilnetztypen geringere Netzausbaukosten verursachen. Zusätzlich führt die zentrale Planung und Umsetzung von Großwärmepumpen zu einer besseren Planbarkeit der künftigen Anschlussleistung. Während es bei dem ungesteuerten dezentralen Ausbau von Wärmepumpen zu einer kontinuierlichen Erhöhung der Netzanschlussleistung kommt, wird die Anschlussleistung bei wärmenetz-basierten Konzepten direkt mit der Inbetriebnahme für das Stromnetz realisiert. Wärmenetzbasierte Konzepte bieten durch die Verantwortlichkeit eines Wärmeversorgers eine bessere Regelungsmöglichkeit gegebenenfalls auch durch den Verteilnetzbetreiber. Ein auf unabhängigen Einzelentscheidungen beruhender Ausbau gebäudeintegrierter Wärmepumpen führt durch die Orientierung an den gebäudespezifischen Erneuerungszyklen der Heizungsanlagen zu einem graduellen Anstieg der Last. Kurzfristig ist dies kein Problem für robust ausgelegte Netze, jedoch zeigen sich die Herausforderungen über längere Zeiträume mit steigenden Penetrationsraten von gebäudeintegrierten Wärmepumpen. Die Energienetzplanung muss sich daher mit der kommunalen Wärmeplanung synchronisieren und einen integrierten Ansatz über die verschiedenen Infrastrukturen hinweg liefern. So lassen sich Effizienzpotenziale und Synergien heben, die für einen rapiden Umbau der Wärmeversorgung notwendig sind.

Während gebäudeintegrierte Wärmepumpen ihre Flexibilitäten nur über Dritte anbieten können, sind sie beim Betreiber von Großwärmepumpen gebündelt. Ein optimierter Betrieb kann hier sowohl strom- als auch flexibilitätsmarktorientiert sein und gleichzeitig netzorientiert Engpässe im Verteilnetz berücksichtigen. Diese Rolle eines Flexibilitätsaggregators kann durch weitere Technologien auf Quartiers- und Endkundenebene erweitert werden. Die wichtigsten Technologien sind hierbei thermische Speicher, Batteriespeicher und Ladesäulen. Großwärmepumpen können somit der Start- und Betriebspunkt für die Zusammenfassung von Flexibilitäten in räumlich zusammenhängenden Gebieten sein.

Wärmenetzbasierte Quartiersversorgung ermöglicht die Nutzung von komplexen Erzeugungsanlagen mit unterschiedlichen Wärmequellen. In kleinen Wohngebäuden sind die Installationskosten für verschiedene Erzeugungsanlagen meist zu hoch, während das Quartier die notwendige Mindestgröße aufweist, um auf bi- und multivalente Konzepte zurückzugreifen. Diese können wiederum die Stärken unterschiedlicher Erzeugungsanlagen sowie thermischer Speicher nutzen und optimieren. Solarthermie zum Beispiel zeichnet sich durch ihre geringen Grenzkosten aus und durch die Möglichkeit, Erd- und Grundwasserwärmequellen im Sommerhalbjahr zu regenerieren. Wärmepumpen, die über Erd- und Grundwasserwärme gespeist werden, haben auch bei tiefen Außentemperaturen weiterhin hohe Arbeitszahlen. Die Liste ließe sich für verschiedene Erzeugungstechnologien weiter fortführen, sodass ein Quartierskonzept je nach Gegebenheiten vor Ort und Größe unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten für Erzeugungstechnologien und Speicher bietet. Auch thermische Speicher zur Deckung von kurz- und langfristigen Bedarfsspitzen sind meist erst ab einer kritischen Größe im Quartier technisch und wirtschaftlich möglich. Ein optimierter Erzeugungsanlagenpark wiederum senkt aufgrund thermischer Gleichzeitigkeiten die benötigte Anschlussleistung im Vergleich zu gebäudeintegrierten Versorgungslösungen. Somit können Quartierskonzepte auch steigenden Netzausbau bedarfen entgegenwirken.

2 Zusammenfassung

Die Wärmewende stellt eine der zentralen Aufgaben innerhalb der Umstellung auf ein klimaneutrales Energiesystem dar. Wärmeversorgungskonzepte auf Quartiersebene nutzen gegenüber der Einzelgebäudeebene Synergien zwischen den einzelnen Verbrauchern. Hierdurch können Komponenten kleiner ausgelegt und die Effizienzvorteile von Großanlagen genutzt werden. Dieses Kurzgutachten zeigt die Auswirkungen verschiedener wärmepumpenbasierter Wärmeversorgungskonzepte auf den Netzausbaubedarf in gängigen Verteilernetztypen auf. Die Netzausbaukosten stellen einen Baustein einer ganzheitlichen Betrachtung einer klimaneutralen Wärmeversorgung von Quartieren dar und sollten in der Planung berücksichtigt werden.

Zunächst werden fünf Quartierskonzepte und vier Verteilernetztypen definiert und ihre Kombinationen betrachtet. Anschließend wird anhand einer Netzanalyse der Netzausbaubedarf in den vier Verteilernetztypen in Abhängigkeit vom jeweiligen Quartierskonzept bestimmt. Bei den Quartierskonzepten wird zwischen wärmenetzbasierten und gebäudeintegrierten Konzepten unterschieden. Die Wärmeversorgung der beiden untersuchten wärmenetzbasierten Konzepte erfolgt über eine Großwärmepumpe mit Nahwärmenetz. Bei den gebäudeintegrierten Konzepten entfällt das Nahwärmenetz, stattdessen werden dezentrale Wärmepumpen eingesetzt. Zusätzlich wird ein gemischtes Konzept untersucht, das auf einem kalten Nahwärmenetz und gebäudeintegrierten Wärmepumpen basiert.

Die Untersuchungen zeigen:

- Der Netzausbaubedarf ist am geringsten bei wärmenetzbasierten Quartierskonzepten, bei denen eine Großwärmepumpe als Grundlastherzeuger zum Einsatz kommt. Hierbei sinkt im Vergleich zur Versorgung durch dezentrale Wärmepumpen der Verteilnetzausbaubedarf vor allem auf der Niederspannungsebene deutlich.
- Ausgenommen hiervon sind Verteilnetze mit einer hohen Anzahl an Dach-Photovoltaikanlagen, aufgrund derer die Netze auf der Niederspannungsebene bereits stark ausgebaut sind. In diesem Verteilernetztyp liegt der Netzausbaubedarf bei gebäudeintegrierten Konzepten auf einem ähnlichen Niveau wie bei den wärmenetzbasierten Konzepten. Die geringsten Kosten werden bei dem gemischten Konzept erreicht, da dieses besonders geringe Wärmepumpenleistungen je Wohneinheit aufweist.
- Die Kosten des Netzausbaus je Wohneinheit machen im Vergleich zu den weiteren Kosten einer Umstellung der Wärmeversorgungskonzepte von Quartieren einen geringen Anteil aus. Die weiteren Kosten variieren stark je nach Quartierskonzept. Zu ihnen zählen unter anderem die Kosten für die Sanierung der Gebäude, eventuelle Kosten für die Einrichtung bzw. Ertüchtigung eines Wärmenetzes und die Bezugskosten für Energie.

3 Einleitung

Die Umstellung auf ein klimaneutrales Energiesystem führt bereits heute dazu, dass sich die Versorgungsaufgabe der Verteilnetze entscheidend verändert. So müssen für die Aufnahme von erneuerbaren Energien (EE) vor allem in ländlichen Regionen die Verteilnetze ertüchtigt werden (dena, 2021a). In den kommenden Jahren wird sich die Anzahl an dezentralen Erzeugungskapazitäten in den Verteilnetzen deutlich steigern und damit der Bedarf an Verteilnetzkapazitäten. Die Photovoltaik (PV) und Onshore-Wind-Kapazitäten sollen nach Plänen der Bundesregierung von Ende 2021 von 59 GW bzw. 56 GW (AEE, 2022) (Strom-Report.de, 2022) bis 2030 auf 215 GW bzw. 115 GW (Bundesregierung, 2023) erhöht werden. Dies entspricht beinahe einer Vervielfachung für PV bzw. einer Verdopplung für Wind.

Auch neue Lasten in Form von Elektromobilität und Wärmepumpen (WP) haben durch eine deutliche Erhöhung der Spitzenlast großen Einfluss auf die Verteilnetze. Vor allem in städtischen Netzgebieten, deren Ausbau beinahe ausschließlich lastgetrieben ist, führt die Erhöhung der Spitzenlast zu einem verstärkten Netzausbaubedarf (BNetzA, 2022). Aber auch in ländlichen Regionen können neue Lasten den Netzausbaubedarf erhöhen, da es vor allem aufgrund der großen Leitungslängen zu Spannungsproblemen kommen kann (BNetzA, 2022).

In Quartieren finden neue Lasten und EE zusammen. Die Umsetzung der Wärmeversorgung mit WP innerhalb der Quartiere hat durch die Erhöhung der Spitzenlast unmittelbaren Einfluss auf die Verteilnetze. Auswirkungen auf die Verteilnetze sollten deshalb Bestandteil einer ganzheitlichen Planung von Quartieren sein. Die Wärmeversorgung von Quartieren durch WP kann dabei grundlegend in wärmenetzbasierte und gebäudeintegrierte Konzepte unterteilt werden. Bei wärmenetzbasierten Konzepten werden alle Verbraucherinnen und Verbraucher eines Quartiers wärmenetzbasiert über eine Großwärmepumpe (GWP) mithilfe eines Nahwärmenetzes versorgt. In diesem Kurzgutachten wird unter GWP entweder eine Industrierärmepumpe oder eine Kaskadenschaltung von Kleinwärmepumpen verstanden, wobei die Kaskadenschaltung häufiger in Nahwärmenetzen von Quartieren Einsatz findet. Bei gebäudeintegrierten Konzepten entfällt das Nahwärmenetz und die Anschlussnehmerinnen und -nehmer werden mit einer eigenen WP versorgt.

Wärmenetzbasierte Systeme bieten gegenüber gebäudeintegrierten Systemen mehrere Vorteile. So können die Komponenten unter Berücksichtigung von maximalen thermischen Gleichzeitigkeiten in Summe kleiner ausgelegt werden als bei gebäudeintegrierten Lösungen, bei denen jede WP entsprechend der Spitzenwärmelast des versorgten Gebäudes ausgelegt werden muss. Auch handelt es sich bei GWP im Gegensatz zu gebäudeintegrierten WP in der Regel nicht um Luft-Wasser-WP, die eine geringere Effizienz (auch: Coefficient of Performance (COP)) aufweisen. Zudem gestaltet sich die Nutzung der Flexibilität bei GWP gegenüber gebäudeintegrierten Systemen aufgrund einer zentralen Steuerung deutlich einfacher. Nachteilig ist vor allem der hohe Aufwand für den Aufbau des Wärmenetzes und die Erschließung von Flächen.

In diesem Kurzgutachten sollen die Auswirkungen verschiedener Quartierskonzepte auf gängige Verteilnetze aufgezeigt werden. Die Quartierskonzepte und Verteilnetztypen sind frei miteinander kombinierbar. Dabei ergeben sich aufgrund von regionstypischen Eigenschaften mehr oder weniger sinnvolle Kombinationen. Im Rahmen dieser Untersuchung werden alle Kombinationsmöglichkeiten in einer Netzanalyse betrachtet. Ziel der Netzanalyse ist es, den Netzausbaubedarf aufgrund einer auf WP basierenden Wärmeversorgung von Quartieren in zuvor bestimmten Referenznetzgebieten und in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept zu bestimmen. Auf diese Weise soll in diesem Kurzgutachten ein Baustein für eine gesamtheitliche Betrachtung von Quartierskonzepten ermittelt werden. Es sollen die Vor- und Nachteile der einzelnen WP-basierten

Quartierskonzepte in Bezug auf die Rückwirkungen auf unterschiedliche Verteilernetztypen aufgezeigt werden. Das Kurzgutachten ist hierfür in folgende Kapitel unterteilt:

- In Kapitel 4 erfolgt eine Systematisierung von Quartierskonzepten. Dafür werden gängige Wärmeversorgungskonzepte von Quartieren identifiziert und klassifiziert. Anschließend wird der elektrische Leistungsbedarf der WP je Quartierskonzept und Versorgungsgebiet ermittelt. Dieser Wert wird für die nachfolgende Netzanalyse benötigt.
- Kapitel 5 stellt die Klassifizierung von Verteilnetzen anhand ihrer Versorgungsaufgabe und Erzeugungsstruktur dar.
- In Kapitel 6 wird die durchgeführte Simulation beschrieben, inklusive der Auswahl repräsentativer Netzgebiete und des Szenariorahmens.
- Kapitel 7 stellt die Ergebnisse der Simulation dar und geht auf ihre Bedeutung für das Zusammenspiel zwischen den Quartierskonzepten und Verteilernetztypen ein.
- Abschließend erfolgt in Kapitel 8 eine Schlussbetrachtung, inklusive einer Beschreibung der Einschränkungen der durchgeführten Untersuchung und des weiteren Untersuchungsbedarfs.

4 Systematisierung typischer Quartierskonzepte

Quartiere können durch die Nutzung von Synergien in der Energieversorgung zu Effizienzsteigerungen führen und den Handlungsspielraum auf lokaler und regionaler Ebene erweitern. Sie stellen daher ein wichtiges Instrument in der Energiewende dar (dena, 2021a).

In vielen Städten und Kommunen gibt es bereits erste Entwicklungen hin zu klimaneutralen Quartieren. So setzt das Quartier „Am Bergele“ in Schlier bei Ravensburg beispielsweise auf eine Wärme- und Stromversorgung, die komplett auf EE basiert. Mittels Erdwärmesonden wird die Wärme aus dem Erdreich über ein kaltes Nahwärmenetz an die Gebäude verteilt. Die in den Gebäuden installierten WP inklusive Pufferspeichern decken den Bedarf an Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW). Durch den geringen Temperaturhub von Erdwärme zu RW und WW arbeiten die WP besonders effizient (Schlier, 2019).

Innerhalb dieses Kapitels werden gängige Quartierskonzepte mit dem Fokus auf die Dekarbonisierung des Wärmesektors identifiziert und klassifiziert. Es werden klimaneutrale Quartierskonzepte gesucht, die sowohl heutige als auch zukünftige gängige Konzepte abdecken. Eine entscheidende Rolle für die Konzeptionierung spielen die Unabhängigkeit vom Rohstoff Gas und die Vorgabe des Sofortprogramms Gebäude, wonach neu eingebaute Heizungen mit mindestens 65 Prozent EE betrieben werden sollen (BMWK, BMWBS, 2022). Dies wurde für die Klassifizierung der Quartierskonzepte berücksichtigt, weshalb der Fokus auf WP-basierte Systeme gelegt wird. Alternative Systeme sind nicht Teil dieses Kurzgutachtens.

Quartiere werden in diesem Kurzgutachten als das jeweilige Versorgungsgebiet einer Ortsnetzstation definiert. Innerhalb des Versorgungsgebiets wird ausschließlich der Wärmebedarf von privaten Haushalten betrachtet. Wärmebedarfe des Gewerbes, des Handels, der Industrie und weiterer Verbraucher werden nicht berücksichtigt.

Abschnitt 4.1 gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der Klassifizierung von Quartieren. In Abschnitt 4.2 werden die identifizierten Quartierskonzepte dargestellt. Abschließend werden in Abschnitt 4.3 die für die nachfolgende Netzanalyse benötigten elektrischen WP-Leistungen je Quartierskonzept berechnet. Ziel der Netzanalyse ist es, die Rückwirkungen der verschiedenen Quartierskonzepte auf die Verteilnetze aufzuzeigen. Hierfür werden in Kapitel 5 gängige Verteilnetztypen definiert und in Kapitel 6 und Kapitel 7 wird der Netzausbaubedarf innerhalb der Verteilnetze aufgrund einer Umstellung des Wärmeversorgungskonzepts der Quartiere ermittelt.

4.1 Klassifizierung von Quartierskonzepten

Die WP-basierte Wärmeversorgung der Quartiere wird anhand von drei Kriterien systematisiert:

- Effizienzstandard des Gebäudes
- Vorlauftemperatur (VLT) der Heizungsanlage
- Art der Wärmeversorgung (wärmenetzbasiert oder gebäudeintegriert)

4.1.1 Effizienzstandard des Gebäudes

Vorerst erfolgt eine Einordnung der Gebäudesubstanz innerhalb der Quartierskonzepte. Hierfür werden die Quartiere in die Energieeffizienzklassen gemäß dem Gebäudeenergiegesetz eingeteilt. Der Effizienzstandard

der Gebäude im Quartier hat Einfluss auf die benötigte VLT der einzusetzenden Heizungssysteme, was in Abschnitt 4.1.2 aufgegriffen wird.

Tabelle 1 stellt die Energieeffizienzklassen von Gebäuden in Abhängigkeit vom spezifischen jährlichen Endenergiebedarf für RW dar (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz, 2020). Da in diesem Kurzgutachten gängige Quartierskonzepte abgebildet werden, werden Gebäude mit einer sehr hohen oder sehr niedrigen Energieeffizienzklasse nicht betrachtet. Das vorliegende Kurzgutachten konzentriert sich daher auf die Energieeffizienzklassen C, D und E.

Tabelle 1: Energieeffizienzklassen von Gebäuden entsprechend dem spezifischen jährlichen Endenergieverbrauch für Raumheizung

Energieeffizienzklasse	Endenergieverbrauch in kWh/m ² a
A+	≤ 30
A	≤ 50
B	≤ 75
C	≤ 100
D	≤ 130
E	≤ 160
F	≤ 200
G	≤ 250
H	> 250

Genauer wird der folgende jährliche spezifische Heizwärmebedarf pro Energieeffizienzklasse zur Unterscheidung der Quartierskonzepte angenommen:

Tabelle 2: Spezifischer jährlicher Heizwärmebedarf je Energieeffizienzklasse

Energieeffizienzklasse	C	D	E
Spezifischer Heizwärmebedarf in kWh/m ² a	80	120	150

4.1.2 Vorlauftemperatur der Heizungsanlage

Bei der Unterscheidung von Quartierskonzepten spielt das Temperaturniveau, auf dem die Heizungsanlage des Gebäudes arbeitet, eine wichtige Rolle. Die Wahl der VLT ist dabei hauptsächlich abhängig vom Gebäudetyp (Bestand oder Neubau), vom Effizienzstandard (dena, 2021b) (vgl. Abschnitt 4.1.1) und von der Art der Heizungsanlage zur Bereitstellung von RW und WW.

In dem vorliegenden Kurzgutachten werden den in Abschnitt 4.1.1 definierten Gebäudestandards die VLT wie folgt zugeordnet:

- Gebäude der **Energieeffizienzklasse C** (z. B. effiziente Gebäude) arbeiten mit einem Heizsystem mit einer VLT von unter 35 °C zur RW-Erzeugung und einer separaten WW-Bereitung mit einer VLT von unter 55 °C.
- Gebäude der **Energieeffizienzklasse D** (z. B. effizientere Bestandsgebäude oder Neubauten) arbeiten mit einem Heizsystem mit einer VLT zwischen 35 °C und 65 °C zur RW- und WW-Erzeugung.
- Gebäude der **Energieeffizienzklasse E** (z. B. Bestandsgebäude wie Altbauten) arbeiten mit einem Heizsystem mit einer VLT zwischen 65 °C und 90 °C zur RW- und WW-Erzeugung.

4.1.3 Art der Wärmeversorgung (wärmenetzbasiert oder gebäudeintegriert)

Grundsätzlich wird die Art der Wärmeversorgung in wärmenetzbasierte und gebäudeintegrierte Systeme gegliedert. Weiterhin werden die bei wärmenetzbasierten Systemen verwendeten Nahwärmenetze in die folgenden drei Typen unterteilt:

- Kaltes Nahwärmenetz (≤ 35 °C)
- Modernes Nahwärmenetz (≤ 65 °C)
- Hochtemperatur-Nahwärmenetz (≤ 80 °C)

4.2 Festlegung der Quartierskonzepte

Aus den Kombinationen der in Abschnitt 4.1 vorgenommenen Klassifizierung werden fünf Quartierskonzepte aufgestellt, die als Grundlage für die spätere Netzanalyse dienen:

- **NW75:** Das Quartier wird mithilfe einer Sole-Wasser-GWP über ein Hochtemperatur-Nahwärmenetz versorgt. Die VLT des Heizsystems liegt bei 75 °C.
- **NW50:** Das Quartier wird mithilfe einer Sole-Wasser-GWP über ein modernes Nahwärmenetz versorgt. Die VLT des Heizsystems liegt bei 50 °C.
- **KNW35:** Das Quartier wird mithilfe von gebäudeintegrierten Wasser-Wasser-WP versorgt. Ein kaltes Nahwärmenetz dient als Wärmequelle. Die VLT des Heizsystems liegt bei 35 °C.
- **WP50:** Das Quartier wird mithilfe von gebäudeintegrierten Luft-Wasser-WP versorgt. Ein Nahwärmenetz entfällt. Die VLT des Heizsystems liegt bei 50 °C.
- **WP35:** Das Quartier wird mithilfe von gebäudeintegrierten Luft-Wasser-WP versorgt. Ein Nahwärmenetz entfällt. Die VLT des Heizsystems liegt bei 35 °C.

Tabelle 3 stellt die Klassifizierungsparameter der Quartierskonzepte nach Abschnitt 4.1 dar. Hierzu zählen die Energieeffizienzklasse der Gebäude, die VLT der Heizungsanlage und die Art der Wärmebereitstellung.

Tabelle 3: Energieeffizienzklasse, Vorlauftemperatur der Heizungsanlage und Art der Wärmebereitstellung je Quartierskonzept

Quartierskonzept	Energieeffizienzklasse			Vorlauftemperatur der Heizungsanlage für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW)			Art der Wärmebereitstellung	
	C	D	E	$T_{RW}^1 \leq 35$ °C $T_{WW}^2 \leq 55$ °C	35 °C $< T_{RW+WW} \leq$ 65 °C	65 °C $< T_{RW+WW} \leq$ 80 °C	Gebäudeintegriert	Wärmenetz-basiert
NW75			x			x		x
NW50		x			x			x
KNW35	x			x			x	x
WP50		x			x		x	
WP35	x			x			x	

¹ Temperatur Raumwärme

² Temperatur Warmwasser

Das Szenario KNW35 geht von einem kaltem Nahwärmenetz mit gebäudeintegrierten WP zur WW- und RW-Bereitstellung aus. Nachfolgend wird dies als gemischtes Konzept bezeichnet. Tabelle 4 verdeutlicht, welches Nahwärmenetz in den Szenarien mit wärmenetzbasierter Wärme zum Einsatz kommt.

Tabelle 4: Einordnung der Quartierskonzepte mit wärmenetzbasierter Wärme nach Nahwärmenetz-Typ

Quartierskonzept	Kaltes Nahwärmenetz	Modernes Nahwärmenetz	Hochtemperatur-Nahwärmenetz
NW75			X
NW50		X	
KNW35	X		

In Abbildung 1 bis Abbildung 5 werden die Quartierskonzepte schematisch dargestellt. Abbildung 1 zeigt die wärmenetzbasierte Wärmeversorgung von Gebäuden mit einer hohen VLT der Heizungsanlage. Abbildung 2 unterscheidet sich hiervon durch eine niedrigere VLT. Das gemischte Quartierskonzept mit kaltem Nahwärmenetz und gebäudeintegrierten WP ist in Abbildung 3 dargestellt. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die gebäudeintegrierten Lösungen, die sich durch verschiedene VLT des Heizungssystems unterscheiden.

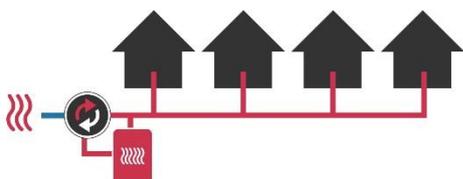


Abbildung 1: Quartierskonzept NW75

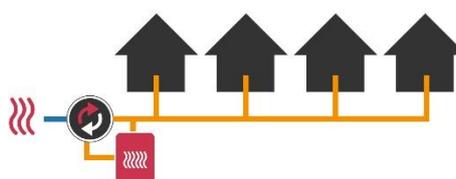


Abbildung 2: Quartierskonzept NW50

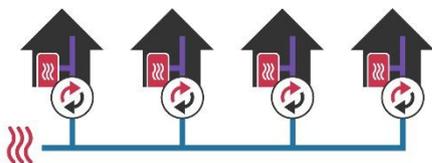


Abbildung 3: Quartierskonzept KNW35

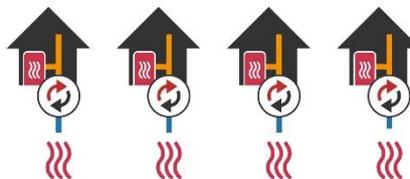


Abbildung 4: Quartierskonzept WP50

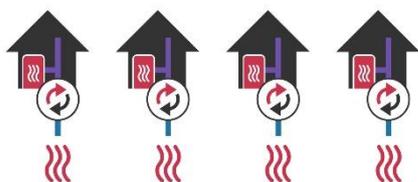


Abbildung 5: Quartierskonzept WP35

8-20°C	35-65°C
< 35°C	65-80°C
Kleinwärmepumpe	Großwärmepumpe
Kleinspeicher	Großspeicher
Wärmequelle	

In den einzelnen Konzepten kommen verschiedene WP-Typen mit unterschiedlichen COP zum Einsatz. Bei den Quartierskonzepten NW75 und NW50 werden Sole-Wasser-WP, bei KNW35 Wasser-Wasser-WP und bei WP50 und WP35 Luft-Wasser-WP verwendet. Alle Konzepte werden dabei monovalent durch WP versorgt. Spitzenlasttechnologien und thermische Speicher werden nicht berücksichtigt. In Tabelle 5 sind die eingesetzten Technologien gegenübergestellt.

Tabelle 5: Wärmepumpen-Technologien je Quartierskonzept

Quartierskonzept	Großwärmepumpen	Gebäudeintegrierte Wärmepumpen	
	Sole-Wasser	Wasser-Wasser	Luft-Wasser
NW75	x		
NW50	x		
KNW35		x	
WP50			x
WP35			x

4.3 Berechnung der elektrischen Leistung der Wärmepumpen der Quartierskonzepte

Für die Netzanalyse der Verteilnetze in den folgenden Kapiteln wird die elektrische Leistung der WP der Quartierskonzepte je Wohneinheit (WE) und Raumtyp (städtisch, halbstädtisch und ländlich) benötigt. Die Höhe der elektrischen Leistung der WP ist entscheidend für die Netzzrückwirkungen im Verteilnetz. Im Folgenden wird die elektrische Leistung der WP (\dot{P}_{el}) über den Quotienten aus Heizleistung (\dot{Q}_{el}) und den COP berechnet:

$$\dot{P}_{el} = \frac{\dot{Q}}{COP}$$

Für die Bestimmung der elektrischen Leistung erfolgt in Abschnitt 4.3.1 vorerst die Berechnung des Heizleistungsbedarfs einer WE je Raumtyp und Quartierskonzept. Anschließend werden in Abschnitt 4.3.2 die Annahmen für den COP erörtert. In Abschnitt 4.3.3 erfolgt abschließend die Berechnung der elektrischen Leistung der WP je WE.

4.3.1 Heizleistungsbedarf je Quartierskonzept

Der Heizleistungsbedarf entspricht dem maximalen thermischen Leistungsbedarf der WE für die Bereitstellung von RW und WW. Im Folgenden wird auf die Berechnung des Heizleistungsbedarfs für diese beiden Anwendungszwecke gesondert eingegangen.

Heizleistungsbedarf zur Raumwärmebereitstellung

In diesem Abschnitt wird der Heizleistungsbedarf für RW der Quartierskonzepte je WE und je Raumtyp berechnet. Für die Heizleistung zur RW-Bereitstellung wird vereinfachend der Quotient aus dem spezifischen jährlichen Heizwärmebedarf und der Anzahl an Laststunden angenommen:

$$\text{Heizleistung in } \frac{kW}{m^2} = \frac{\text{Heizwärmebedarf in } \frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot a}}{\text{Laststunden in } \frac{h}{a}}$$

Ausgehend von Tabelle 2 wird der spezifische Heizwärmebedarf dem jeweiligen Quartierskonzept zugeordnet. Die Zuordnung kann Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6: Spezifischer Heizwärmebedarf und Energieeffizienzklasse je Quartierskonzept

Quartierskonzept	Energieeffizienzklasse	Spezifischer Heizwärmebedarf in kWh/(m ² a)
NW75	E	150
NW50	D	120
KNW35	C	80
WP50	D	120
WP35	C	80

Mit einer angenommenen jährlichen Laststundenanzahl von 1.800 Stunden pro Jahr (LAGB, 2022) ergeben sich die in Tabelle 7 zusammengefassten Heizleistungen je Energieeffizienzklasse und Quartierskonzept.

Tabelle 7: Spezifischer Heizleistungsbedarf nach Quartierskonzept und Energieeffizienzklasse

Quartierskonzept	Energieeffizienzklasse	Spezifischer Heizleistungsbedarf in W/m ²
NW75	E	83
NW50	D	67
KNW35	C	44
WP50	D	67
WP35	C	44

Es wird davon ausgegangen, dass sich in ländlichen Regionen meist freistehende Häuser finden, während in halbstädtischen Regionen einseitig geschützte Häuser und in städtischen Regionen Reihenhäuser dominieren. Diese Unterscheidung hat aufgrund unterschiedlicher Windeinwirkungen und Wärmeverluste Einfluss auf den Heizleistungsbedarf. Um dies abzubilden, wird ein Abgleich der ermittelten Werte nach Tabelle 7 mit Literaturwerten nach (ThermoFlux Deutschland GmbH, 2020) vorgenommen, die die Gebäudeart berücksichtigen. Da die Literaturwerte nicht auf den Energieeffizienzklassen aufbauen, sondern nach Baujahren angegeben sind, wird unter der Annahme, dass die Werte aus Tabelle 7 mittleren Werten eines halbstädtischen Gebiets entsprechen, der jeweilige Bauzeitraum identifiziert, der den Werten der Energieeffizienzklassen nach Tabelle 7 am nächsten kommt. Es wurden die Baustandards „Neubau nach Energieeinsparverordnung (EnEV)“, „1994 – 1984“ und „1983 – 1978“ ausgewählt und den Energieeffizienzklassen wie folgt zugeordnet:

- Klasse C $\hat{=}$ Neubau nach EnEV
- Klasse D $\hat{=}$ 1994 – 1984
- Klasse E $\hat{=}$ 1983 – 1978

Der spezifische Heizleistungsbedarf je Baujahr bzw. Zeitpunkt der Sanierung gemäß (ThermoFlux Deutschland GmbH, 2020) ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Gängige Erfahrungswerte zum Heizleistungsbedarf nach Baujahr / Zeitpunkt der Sanierung

	Spezifischer Heizleistungsbedarf in W/m ² je Baujahr / Zeitpunkt der Sanierung		
	Neubau nach EnEV	1994 – 1984	1983 – 1978
Reihenhaus	40	60	80
Haus einseitig geschützt	45	70	90
Freistehendes Haus	50	80	100

Für die weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass für städtische Quartiere die Werte für Reihenhäuser, für halbstädtische Quartiere die Werte für einseitig geschützte Häuser und für ländliche Quartiere die Werte für freistehende Häuser relevant sind.

Der gesamte Heizleistungsbedarf je WE für RW wird durch Multiplikation des spezifischen Heizleistungsbedarfs mit der durchschnittlichen Wohnfläche im Regionstyp berechnet. So gibt es in Deutschland durchschnittlich 48 m² an Heizfläche pro Kopf (BMU, 2022). Dieser Mittelwert wird in unseren Betrachtungen für halbstädtische Gebiete angenommen. Für die Ermittlung der Heizfläche in ländlichen und städtischen Gebieten wird unter Zuhilfenahme der Verteilung in Bayern (StMWi, 2022) (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, 2022) interpoliert. Die Wohnfläche pro Kopf je Raumtyp, die sich daraus ergibt, ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Annahmen zur Heizfläche pro Kopf und Raumtyp

	Heizfläche pro Kopf in m ²
Städtisch	44
Halbstädtisch	48
Ländlich	51

Der gesamte Heizleistungsbedarf für RW-Bereitstellung je WE wird durch Multiplikation der spezifischen Heizleistung der WP mit der durchschnittlichen Wohnfläche pro Kopf und mit der durchschnittlichen Anzahl von zwei Personen pro WE (bpb, 2021) berechnet. Das Ergebnis ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Heizleistungsbedarf je Wohneinheit zur Raumwärmebereitstellung

Effizienzstandard	Heizleistungsbedarf je Wohneinheit in kW		
	Städtisch	Halbstädtisch	Ländlich
Klasse C (Neubau nach EnEV*)	3,5	4,3	5,1
Klasse D (1994 - 1984)	5,3	6,7	8,2
Klasse E (1983 - 1978)	7,1	8,6	10,2

Heizleistungsbedarf zur Warmwasserbereitstellung

Zusätzlich zum Heizleistungsbedarf für die Bereitstellung von RW muss der Heizleistungsbedarf für WW berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt wird ein konstanter Heizleistungsbedarf zur WW-Bereitstellung festgelegt. Nach (Greenhouse Media GmbH, 2019) wird von einem WW-Verbrauch von rund 100 Litern bei einer Temperatur von 45 °C pro Person und Tag ausgegangen. Inklusiv einer berücksichtigten Reserve ergibt sich eine Spitzenlast von 0,25 kW als Heizleistungsbedarf zur WW-Bereitstellung pro Person. Bei einer durchschnittlichen Anzahl von zwei Personen pro WE (bpb, 2021) beläuft sich die zusätzliche Gesamtheizleistung für die WW-Bereitstellung auf 0,5 kW je WE.

Gesamter Heizleistungsbedarf

Die gesamte benötigte Heizleistung ergibt sich aus der Addition des Heizleistungsbedarfs für RW und des Heizleistungsbedarfs für WW, die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelt wurden. Der für die Auslegung der WP relevante maximale Heizleistungsbedarf je WE in Abhängigkeit von der Energieeffizienzklasse und dem Regionstyp ist in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Gesamter Heizleistungsbedarf je Wohneinheit

Effizienzstandard	Heizleistungsbedarf je Wohneinheit in kW		
	Städtisch	Halbstädtisch	Ländlich
Klasse C (Neubau nach EnEV*)	4,0	4,8	5,6
Klasse D (1994 – 1984)	5,8	7,2	8,7
Klasse E (1983 – 1978)	7,6	9,1	10,7

4.3.2 COP

Der COP ist eine Kennzahl für die Effizienz einer WP und wird für die Ermittlung der elektrischen Leistung der WP je Quartierskonzept und Raumtyp benötigt. Um den Spitzenlastbedarf abzubilden, wird für die Auslegung der WP ein COP eines Betriebspunktes besonders niedriger Außentemperatur und gleichzeitig hoher VLT der WP gewählt.

Generell gilt mit der Temperatur T_l des niedrigen Temperaturniveaus (Temperatur der Umweltwärmequelle) und der Temperatur T_h des hohen Temperaturniveaus (VLT):

$$COP = \eta \cdot \frac{T_h}{(T_h - T_l)}$$

Hierbei entspricht η dem Gütegrad. Er ist von der Technologie der WP abhängig. In Tabelle 12 ist der angenommene Gütegrad basierend auf (oemof developer group, 2019) aufgeführt.

Tabelle 12: Gütegrad der Wärmepumpen je Technologie

Für das	WP-Technologie	Gütegrad η
		Luft-Wasser
	Wasser-Wasser	0,5
	Sole-Wasser	0,55

Quartierskonzept NW75 wird mit einer maximalen VLT von 75 °C, für NW50 und WP50 mit einer maximalen VLT von 50 °C sowie für KNW35 und WP35 mit einer maximalen VLT von 35 °C gerechnet. Minimale Temperaturen des niedrigen Temperaturniveaus werden wie folgt angenommen:

Tabelle 13: Minimale Temperatur des niedrigen Temperaturniveaus der Wärmepumpe nach Wärmequelle

Wärmequelle	T_l in °C
Luft	-13
Wasser	0
Erdreich	6

Die verwendete Technologie je Konzept kann Tabelle 5 entnommen werden. Demnach kommen in den gebäudeintegrierten Quartierskonzepten Luft-Wasser-WP, in den wärmenetzbasierten Quartierskonzepten Sole-Wasser-WP und in dem gemischten Quartierskonzept Wasser-Wasser-WP zum Einsatz. Damit ergeben sich die folgenden COP je Quartierskonzept nach Tabelle 14:

Tabelle 14: Coefficient of Performance je Quartierskonzept

Quartierskonzept	COP
NW75	2,8
NW50	4,0
KNW35	4,4
WP50	2,1
WP35	2,6

4.3.3 Elektrische Leistung der Wärmepumpe je Quartierskonzept

Die elektrische Leistung der WP je Quartierskonzept und Gebiet wird durch Division der gesamten Heizleistung (vgl. Tabelle 11) und des COP berechnet (vgl. Tabelle 14). Der für die nachfolgende Netzanalyse relevante elektrische Leistungsbedarf der WP je WE in Abhängigkeit vom Quartierskonzept und Regionstyp ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Elektrische Leistung der Wärmepumpe je Wohneinheit und Quartierskonzept

Quartierskonzept	Elektrische Leistung der Wärmepumpe je Wohneinheit in kW		
	Städtisch	Halbstädtisch	Ländlich
NW75	2,7	3,3	3,9
NW50	1,4	1,8	2,2
KNW35	0,9	1,1	1,3
WP50	2,8	3,5	4,2
WP35	1,6	1,9	2,2

5 Unterscheidung von Verteilnetzen

Die in Kapitel 4 definierten Quartierskonzepte haben aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Leistungsbedarfe und Anschlussebenen individuelle Rückwirkungen auf die Verteilnetze. Diese Rückwirkungen sind zusätzlich von der Art des Verteilnetzes abhängig. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel gängige Verteilnetztypen identifiziert und klassifiziert. Diese Klassifizierung dient anschließend als Grundlage für die Netzanalyse, die in Kapitel 6 erläutert und in Kapitel 7 ausgewertet wird.

Verteilnetze lassen sich anhand ihrer Versorgungsaufgabe und ihrer Erzeugungsstruktur klassifizieren (dena, 2012). Im Rahmen dieses Kurzgutachtens werden vier gängige Verteilnetztypen definiert. Dabei wird ein Verteilnetz als das Versorgungsgebiet eines Hochspannungs-/Mittelspannungs-Umspannwerks (HS/MS-UW) definiert. Die Verteilnetze umfassen somit die Spannungsebenen Mittelspannung (MS) und Niederspannung (NS) wie auch die Umspannebenen Hochspannung/Mittelspannung (HS/MS) und Mittelspannung/Niederspannung (MS/NS).

Die Versorgungsaufgabe ist in erster Linie von der Einwohnerdichte abhängig. Diese kann in die Kategorien städtisch (> 1.000 EW/km²), halbstädtisch (< 1.000 und > 150 EW/km²) und ländlich (< 150 EW/km²) unterteilt werden (dena, 2012). Vor allem die Sektorkopplung führt zu einer Veränderung in der Versorgungsaufgabe der Verteilnetze. Im Fokus aktueller Untersuchungen (Schachler et al., 2021) (NRW, 2021) (Agora, 2019) stehen neue Lasten wie Wärmepumpen (WP) und die Elektromobilität. Sie führen durch eine Erhöhung der Spitzenlast auf allen Spannungsebenen zu einem erhöhten Bedarf an Verteilnetzkapazitäten. Da die neuen Lasten vermehrt in der NS-Ebene angeschlossen werden, fallen auch die Auswirkungen auf die unteren Spannungsebenen am größten aus (Agora, 2019) (NRW, 2021). Neue Lasten werden in allen drei Verteilnetzkategorien starken Einfluss auf den notwendigen Netzausbau haben. An dieser Stelle soll ausschließlich auf den Einfluss der Elektromobilität eingegangen werden, da WP Teil der Untersuchungen der nachfolgenden Kapitel (vgl. Kapitel 6 und 7) sind.

In ländlichen, aber auch in halbstädtischen Regionen sind der Anteil an Besitzerinnen und Besitzern von Personenkraftwagen (Pkw) und die jährliche Fahrleistung pro Person im Vergleich zum städtischen Raum hoch (MiD, 2018). Somit erhöht eine Umstellung auf Elektromobilität den Bedarf an elektrischer Energie in ländlichen und halbstädtischen Regionen vergleichsweise stärker. Gleichzeitig sind in ländlichen Regionen die Stromkreislänge (BNetzA, 2022) und die durchschnittliche Leitungslänge (Fraunhofer ISI, 2016) am größten. Da eine größere Leitungslänge zu einem höheren Spannungsabfall führt, wird vor allem in ländlichen Regionen mit lastbedingten Spannungsproblemen auf der NS-Ebene gerechnet (BNetzA, 2022). Demgegenüber wird im halbstädtischen und städtischen Raum vermehrt mit lastbedingten Kapazitätsengpässen gerechnet (BNetzA, 2022) (Schachler et al., 2021) (Heider et al., 2022).

Durch den Ausbau der EE hat sich die Erzeugungsstruktur bereits grundlegend verändert. Im Rahmen der Energiewende wird sich die Menge an dezentralen Erzeugungskapazitäten in den Verteilnetzen noch deutlich steigern und somit den Bedarf an Verteilnetzkapazitäten erhöhen. So sollen sich die PV- und Onshore-Wind-Erzeugungskapazitäten nach Plänen der Bundesregierung von Ende 2021 von 59 GW bzw. 56 GW (AEE, 2022) (Strom-Report.de, 2022) bis 2030 auf 215 GW bzw. 115 GW (Bundesregierung, 2023) steigern. Dies entspricht beinahe einer Vervierfachung für PV bzw. einer Verdopplung für Wind. Der Anstieg der PV-Erzeugungskapazitäten wirkt sich vorrangig auf die unteren Spannungsebenen der Verteilnetze aus, da sie meist in der MS- und NS-Ebene angeschlossen werden (Agora, 2017). So werden kleine Dachanlagen meist in der NS- und

größere Freiflächenanlagen in der Regel in der MS-Ebene angeschlossen. Der Anstieg der PV-Erzeugungskapazitäten betrifft vornehmlich ländliche und halbstädtische Netzgebiete, wobei größere Freiflächenanlagen in erster Linie im ländlichen Raum vorzufinden sind (Fraunhofer ISI, 2016). 96 Prozent der Wind-Erzeugungskapazitäten sind in den Verteilnetzen angeschlossen und nur 4 Prozent im Übertragungsnetz (BWE, 2022). Dies hat vor allem in den ländlichen Regionen im Norden und im Osten Deutschlands große Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf der MS-Ebene und darüber liegender Spannungsebenen, da Windkraftanlagen (WKA) überwiegend auf der MS- und HS-Ebene angeschlossen werden (BWE, 2022).

Für die anschließenden Untersuchungen werden vier Verteilnetztypen definiert und in den folgenden Unterkapiteln (Abschnitt 5.1 bis 0) genauer beschrieben. Die Umstellung der Wärmeversorgung wird in diesem Abschnitt ausdrücklich nicht berücksichtigt, da sie Teil der nachfolgenden Netzanalyse in Kapitel 6 und Kapitel 7 ist. Die Auswahl der Verteilnetztypen basiert auf Auswertungen eines deutschlandweiten Datensatzes von über 3.000 synthetischen MS-Netzgebieten. Die synthetischen Netzgebiete wurden mithilfe des Open-Source-Tools ding0 (open_eGo-Team, 2018) im Rahmen des Projekts open_eGo (Müller et al., 2019) erstellt. In *Assessing the impacts of market-oriented electric vehicle charging on german distribution grids* (Schachler et al., 2021) wurde eine Clusteranalyse für die Identifikation von 15 Referenznetzgebieten durchgeführt. Die 15 Referenznetzgebiete lassen sich grob in die vier Kategorien „PV ländlich“, „Wind ländlich“, „Ausgeglichen halbstädtisch“ und „Last städtisch“ einteilen, was im Folgenden den vier identifizierten Verteilnetztypen entspricht.

5.1 Verteilnetztyp „PV ländlich“

Der Verteilnetztyp „PV ländlich“ ist durch eine geringe Einwohnerdichte, einen hohen Anteil an Einfamilienhäusern (EFH) und einen starken Ausbau an Dach- und Freiflächen-Photovoltaikanlagen (PVA) geprägt. Die starke Zunahme an PVA bedingt einen erhöhten Netzausbaubedarf vor allem bei der MS und NS. Gleichzeitig steigt die Spitzenlast im Netzgebiet durch die starke Zunahme an neuen Lasten deutlich, jedoch übertrifft die maximale Einspeiseleistung die Spitzenlast in den meisten Abschnitten des Netzgebiets um ein Vielfaches. Abbildung 6 stellt stilistisch die Erzeugungsstruktur und die Versorgungsaufgabe des Verteilnetztyps „PV ländlich“ durch Freiflächen-PVA, WKA, Elektromobilität und Dach-PVA dar. Der Netzausbaubedarf ist in diesem Verteilnetztyp prädominant einspeisegetrieben. Verteilnetze dieses Typs befinden sich bisher meist im Süden Deutschlands.

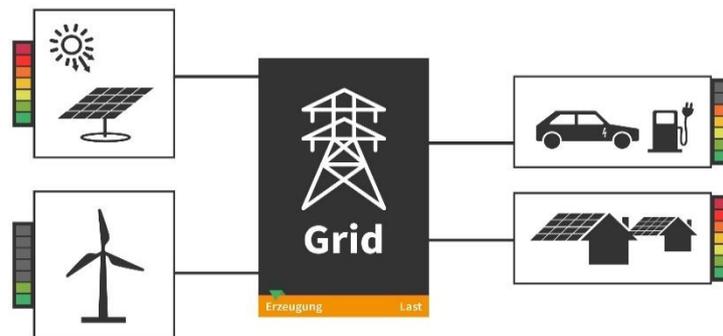


Abbildung 6: Erzeugungsstruktur und Versorgungsaufgabe im Verteilnetztyp „PV ländlich“

5.2 Verteilnetztyp „Wind ländlich“

Der Verteilnetztyp „Wind ländlich“ weist lastseitig eine ähnliche Struktur wie der Verteilnetztyp „PV ländlich“ auf. Erzeugungsseitig finden sich in diesen Netzen aber eine im Vergleich geringe Anzahl an Dach-PVA und meist keine Freiflächen-PVA. Aufgrund günstiger Windbedingungen gibt es eine sehr hohe Anzahl an WKA, die auf der MS-Ebene und darüber angeschlossen werden. Dies führt vor allem auf diesen Netzebenen zu einem erhöhten Netzausbaubedarf. Die WKA befinden sich in der Regel örtlich nicht in denselben Abschnitten des Netzgebiets wie die neuen Lasten. Auf der NS-Ebene sorgen vor allem die neuen Lasten für einen erhöhten Netzausbaubedarf. Der Netzausbaubedarf ist in diesen Netzgebieten somit sowohl einspeise- als auch lastgetrieben. In Abbildung 7 sind die Erzeugungsstruktur und die Versorgungsaufgabe des Verteilnetztyps „Wind ländlich“ dargestellt. Verteilnetze dieses Typs befinden sich meist im Norden und Osten Deutschlands.

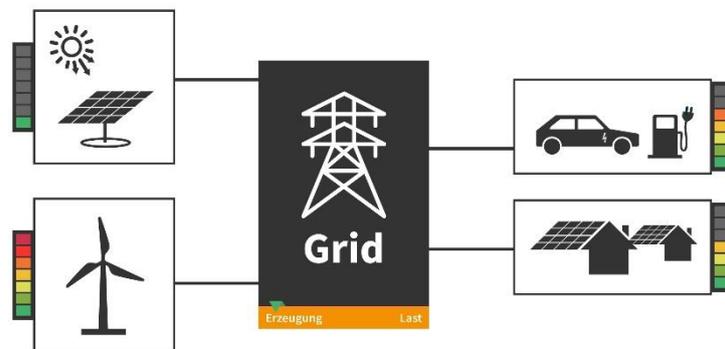


Abbildung 7: Erzeugungsstruktur und Versorgungsaufgabe im Verteilnetztyp „Wind ländlich“

5.3 Verteilnetztyp „Ausgeglichen halbstädtisch“

Der Verteilnetztyp „Ausgeglichen halbstädtisch“ wird als solcher definiert, weil die Spitzenlast und die maximale Einspeiseleistung im Netzgebiet ungefähr auf demselben Niveau liegen. Hierbei handelt es sich in der Regel um halbstädtische Netzgebiete mit sowohl EFH als auch Mehrfamilienhäusern (MFH). Das Dachflächen-Potenzial und die Anzahl installierter Dach-PVA fallen in diesen Netzgebieten geringer aus als in den zuvor beschriebenen ländlichen Netzgebieten. Freiflächen-PVA und WKA gibt es innerhalb dieses Verteilnetztyps nicht. Gleichzeitig ist der Pkw-Besitz nur unwesentlich geringer als in ländlichen Netzgebieten. Der Netzausbaubedarf ist in diesen Netzgebieten somit sowohl einspeise- als auch lastgetrieben und abhängig vom betrachteten Netzabschnitt. In Abbildung 8 sind die Erzeugungsstruktur und die Versorgungsaufgabe des Verteilnetztyps „Ausgeglichen halbstädtisch“ dargestellt. Netzgebiete dieses Typs finden sich in ganz Deutschland.

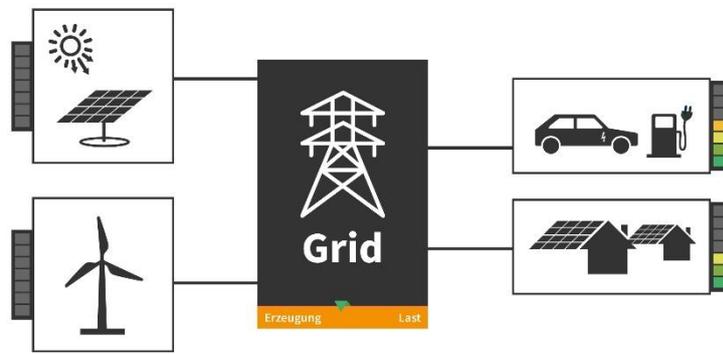


Abbildung 8: Erzeugungsstruktur und Versorgungsaufgabe im Verteilnetztyp „Ausgeglichen halbstädtisch“

5.4 Verteilnetztyp „Last städtisch“

Der Verteilnetztyp „Last städtisch“ beschreibt Netzgebiete in städtischen und Metropolregionen. Die Erzeugung fällt in diesen Gebieten im Verhältnis zur Last am geringsten aus, da das Dachpotenzial und somit die Anzahl installierter Dach-PVA im Vergleich zum Energiebedarf aufgrund der hohen Einwohnerdichte gering ist. Freiflächen-PVA und WKA gibt es innerhalb dieses Verteilnetztyps nicht. Der Netzausbaubedarf ist beinahe ausschließlich lastgetrieben. Vor allem die neuen Lasten führen in diesem Verteilnetztyp zu Netzausbaubedarf, während der Anstieg an Dach-PVA nur selten den Netzausbaubedarf beeinflusst. In Abbildung 9 sind die Erzeugungsstruktur und die Versorgungsaufgabe des Verteilnetztyps „Last städtisch“ dargestellt. Netzgebiete dieses Typs finden sich in ganz Deutschland.

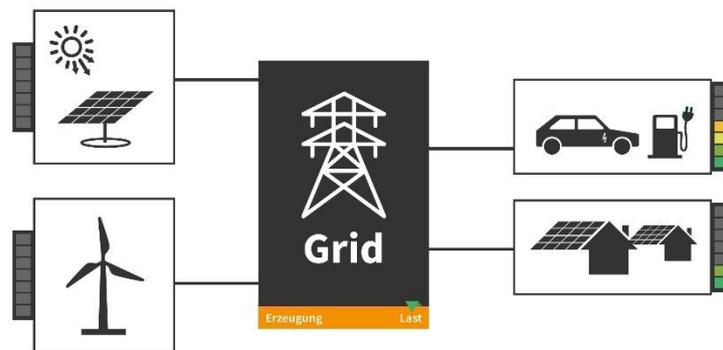


Abbildung 9: Erzeugungsstruktur und Versorgungsaufgabe im Verteilnetztyp „Last städtisch“

6 Netzanalyse und Szenariorahmen

Das Ziel der Netzanalyse ist es, den Einfluss der verschiedenen Wärmeversorgungskonzepte von Quartieren (vgl. Kapitel 4) auf den Netzausbaubedarf in den unterschiedlichen Verteilnetztypen (vgl. Kapitel 5) aufgrund der Erhöhung der Spitzenlast aufzuzeigen. Die Kosten dafür werden im Rahmen der Netzentgelte auf alle Verbraucherinnen und Verbraucher des Versorgungsgebiets eines Verteilnetzbetreibers umgelegt und müssen bei einer ganzheitlichen Planung von Quartieren berücksichtigt werden. In diesem Kapitel wird die für die konkreten Rechnungen notwendige Auswahl eines Referenznetzgebiets je Verteilnetztyp vorgestellt. Gleichzeitig werden der untersuchte Szenariorahmen und die Netzanalyse erläutert.

6.1 Auswahl der zu untersuchenden Verteilnetze und Szenariorahmen

Um konkrete Rechnungen zu ermöglichen, erfolgt in diesem Kapitel die Auswahl eines Referenznetzgebiets je Verteilnetztyp. Die gängigen Verteilnetztypen wurden auf Basis von Vorarbeiten ausgewählt, die durch Schachler et al. (2021) durchgeführt wurden. Die über 3.000 synthetischen MS-Netzgebiete inklusive der 15 Referenznetzgebiete umfassen sowohl die HS/MS- und MS-Ebene als auch die untergelagerten NS-Netze einschließlich der MS/NS-Umspannebene. Eine genauere Beschreibung des Datensatzes kann dem Abschlussbericht des Projekts *open_eGo* (Müller et al., 2019) entnommen werden. Für die in diesem Kurzgutachten durchgeführten Untersuchungen wurde je Verteilnetztyp ein repräsentatives Netzgebiet von den Clusterergebnissen von Schachler et al. (2021) ausgewählt, das am ehesten den in Kapitel 5 beschriebenen Verteilnetztypen entspricht. Zu beachten ist, dass im Projekt *open_eGo* keine städtischen Netzgebiete zur Verfügung standen, weshalb ersatzweise ein Last-dominiertes Netzgebiet als Referenznetzgebiet für den Verteilnetztyp „Last städtisch“ ausgewählt wurde.

Tabelle 16: Installierte Erneuerbare-Energien-Anlagen und Anzahl an Elektrofahrzeugen im betrachteten Zukunftsszenario

Energieträger bzw. Treiber Sektorkopplung	Installierte Leistung bzw. Anzahl
Onshore-Wind	98,4 GW
Photovoltaik	97,8 GW
Biomasse	27,8 GW
Wasserkraft	3,2 GW
Elektromobilität	5,0 Mio. Elektrofahrzeuge

Die Untersuchungen sollen einen nahen zukünftigen Zustand der Verteilnetze widerspiegeln. Zu diesem Zweck werden die Netze entsprechend dem Szenario *eGo_100* des Projekts *open_eGo* mit Erzeugungsanlagen ausgestattet. Das Szenario *eGo_100* nach Tabelle 16 entspricht aus heutiger Sicht einem nahen Zukunftsszenario für EE. Das Szenario *eGo_100* enthält jedoch keine Sektorkopplung. Um den Einfluss der Elektromobilität mit zu berücksichtigen, wird von einem Hochlauf von 5,1 Millionen Elektrofahrzeugen für Deutschland ausgegangen. Die konkrete Verteilung der EE-Anlagen auf die einzelnen Netzgebiete entspricht der Verteilung des Szenarios *eGo_100*, während die Verteilung der Elektrofahrzeuge anhand der Bevölkerungszahl in den einzelnen Netzgebieten vorgenommen wird.

Entsprechend dem beschriebenen Szenariorahmen werden die EE-Anlagen und Elektrofahrzeuge in die Referenznetzgebiete integriert. Um die neue Versorgungsaufgabe erfüllen zu können, werden die Referenznetzgebiete ausgebaut, damit im nachfolgenden Schritt der notwendige Netzausbau aufgrund der Wärmeversorgung von Quartieren getrennt ermittelt werden kann. In Abbildung 10 sind die wichtigsten Charakteristika der vier Referenznetzgebiete nach der Ausstattung mit EE und Elektromobilität entsprechend dem Szenariorahmen dargestellt. Hierzu zählen die kumulierten Wirkleistungen der installierten Erzeugungsanlagen sowie die konventionelle und die mobilitätsbedingte Spitzenlast unter Berücksichtigung der maximalen Gleichzeitigkeitsfaktoren (vgl. Tabelle 17) im MS-Netzgebiet.

6.2 Netzanalyse

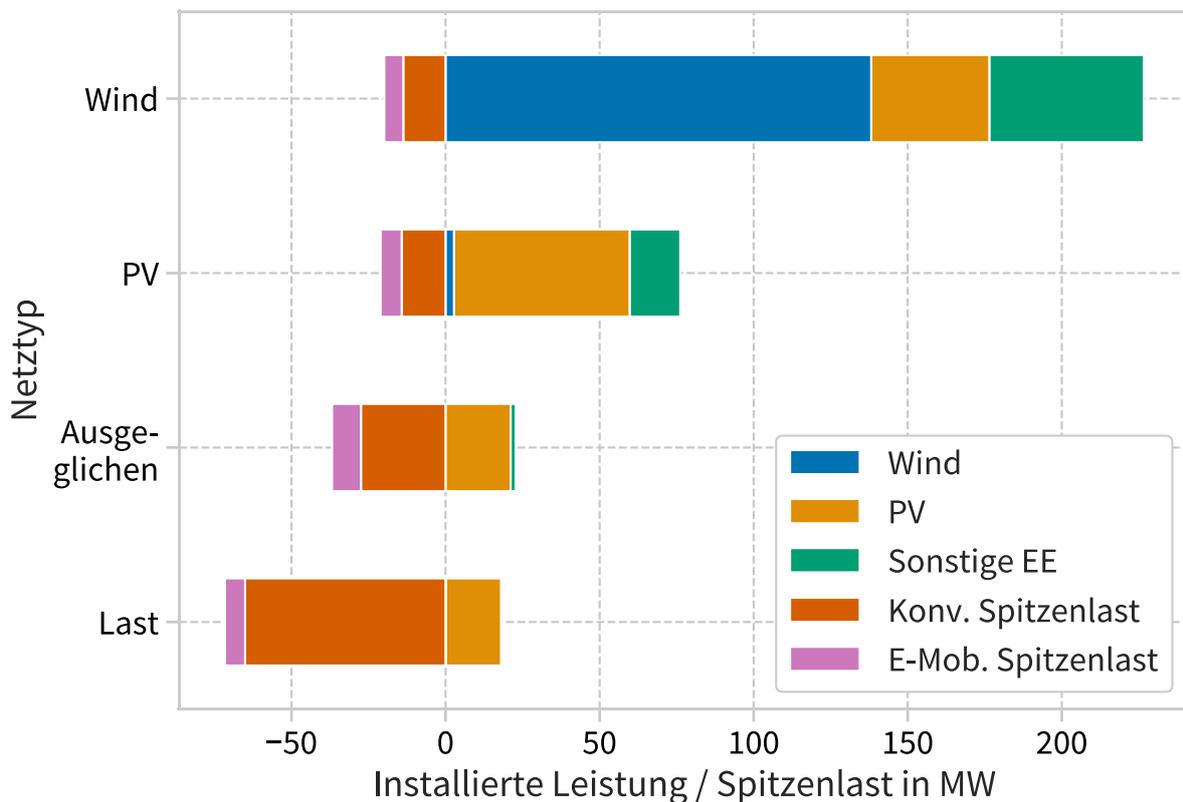


Abbildung 10: Kumulierte Wirkleistung von Photovoltaik-, Wind- und sonstigen Erzeugungskapazitäten sowie die kumulierte konventionelle und mobilitätsbedingte Spitzenlast in den Referenznetzgebieten

Mithilfe der Netzanalyse sollen Unterschiede in den Netzzrückwirkungen der Quartierskonzepte innerhalb der Referenznetzgebiete aufgezeigt werden. Die Netzanalyse erfolgt mittels des Open-Source-Tools *eDisGo* (open_eGo-Team, 2018) (open_eGo-Team, 2017). Damit können Betriebsmittelüberlastungen und Spannungsbandverletzungen automatisiert erkannt und durch Netzausbaumaßnahmen behoben werden. Konkret wird innerhalb der Netzgebiete inkrementell die Wärmeversorgung der NS-Netze auf das neue Quartierskonzept umgestellt. Je nach Konzept unterscheidet sich die benötigte WP-Leistung je WE (vgl. Tabelle 15) und die Anschlussebene der WP. So werden GWP wärmenetzbasierter Konzepte auf der MS-Ebene angeschlossen, während gebäudeintegrierte WP auf der NS-Ebene angeschlossen werden. Nach jeder Umstellung des Versorgungskonzepts eines Quartiers wird der Netzausbaubedarf bestimmt. Auf diese Weise wird der Netzausbaubedarf in Abhängigkeit von durch WP versorgten WE bestimmt. Es ist zu beachten, dass ausschließlich NS-Netze mit mindestens 20 WE und fünf Wohngebäuden als Quartiere betrachtet und mit WP ausgestattet

werden, da eine wärmenetzbasierte Versorgung von weniger WE und Wohngebäuden als nicht realistisch eingestuft wird und ein Vergleich somit entfällt.

Die Ermittlung des Netzausbaubedarfs mithilfe von *eDisGo* erfolgt anhand eines Starklast- und eines Rückspeisefalls, die sich je Spannungsebene unterscheiden. Hierbei werden die einzelnen Komponenten unter Beachtung von maximalen Gleichzeitigkeiten bei der Netzanalyse berücksichtigt. Liegt die maximale Gleichzeitigkeit von WP im Starklastfall in der MS-Ebene beispielsweise bei 80 Prozent, so wird eine 4-kW-WP bei der Netzplanung mit 3,2 kW berücksichtigt. In Tabelle 17 sind die maximalen Gleichzeitigkeiten nach (dena, 2021a) und (dena, 2018) der einzelnen Erzeugungsanlagen und Lasten dargestellt.

Tabelle 17: Gleichzeitigkeitsfaktoren von Lasten und Erzeugungsanlagen

	Rückspeisefall		Starklastfall	
	MS	NS	MS	NS
Konventionelle Lasten	0,15	0,1	1	1
Ladepunkte zu Hause und am Arbeitsplatz	0,15	0	0,2	1
Öffentliche Ladepunkte	0,15	0	1	1
Wärmepumpen	0	0	0,8	1
Photovoltaikanlagen	0,85	0,85	0	0
Windkraftanlagen	1	1	0	0
Sonstige Erzeugungsanlagen	1	1	0	0

7 Zusammenspiel Quartierskonzept und Verteilnetz

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulation dargestellt und kritisch eingeordnet. Die identifizierten fünf Quartierskonzepte (vgl. Kapitel 4) und vier Verteilnetztypen (vgl. Kapitel 5) sind frei miteinander kombinierbar. Dabei ergeben sich aufgrund von regionstypischen Eigenschaften mehr oder weniger sinnvolle Kombinationen. Im Rahmen dieser Untersuchung werden alle Kombinationsmöglichkeiten simulativ betrachtet, auch wenn einzelne Kombinationen in der Realität als technisch nicht sinnvoll einzustufen sind. Auf diese Einschränkungen wird in den jeweiligen Unterkapiteln (Abschnitt 7.1 bis 7.4) zu den einzelnen Verteilnetztypen eingegangen.

Die in der Netzanalyse ermittelten Netzausbaukosten sind in Abbildung 11 relativ zum maximalen Netzausbaubedarf eines Quartierskonzepts im Referenznetzgebiet in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept der Quartiere und von der Anzahl an durch WP versorgten WE dargestellt. Zusätzlich sind in Tabelle 18 die maximalen Netzausbaukosten des teuersten Konzepts in den Referenznetzgebieten angegeben. Es zeigt sich ein eindeutiger Trend: Die wärmenetzbasierten Quartierskonzepte NW75 und NW50 verursachen im Vergleich zu den gebäudeintegrierten Quartierskonzepten geringere Netzausbaukosten. Ausgenommen hiervon ist der Verteilnetztyp „PV ländlich“, bei dem das gebäudeintegrierte Quartierskonzept WP35 und das gemischte Konzept KNW35 niedrigere Netzausbaukosten verursachen als die wärmenetzbasierten Quartierskonzepte. Größere Sprünge in den Netzausbaukosten werden ausgelöst, wenn es durch die Umstellung des Wärmeversorgungskonzepts eines Quartiers auf WP dazu kommt, dass teure MS-Komponenten ertüchtigt werden müssen.

Tabelle 18: Maximale Netzausbaukosten des teuersten Konzepts in den Referenznetzgebieten

Verteilnetztyp	Maximale Kosten	
	Konzept	Netzausbaukosten in T€
PV ländlich	WP50	6.549
Wind ländlich	WP50	2.471
Ausgeglichene halbstädtisch	WP50	6.893
Last städtisch	WP50	889

In Abschnitt 7.1 bis 7.4 wird auf die Ergebnisse innerhalb der einzelnen Verteilnetztypen eingegangen. Die Ergebnisse gelten innerhalb der untersuchten Referenznetzgebiete und sollten durch breitere Untersuchungen erweitert werden. Gerade ein Vergleich der Kosten der einzelnen Verteilnetztypen sollte ausschließlich auf Grundlage einer größeren Anzahl von Referenznetzgebieten durchgeführt werden, um den Einfluss individueller Charakteristika der einzelnen Netzgebiete innerhalb ihres Verteilnetztyps nicht überzubewerten.

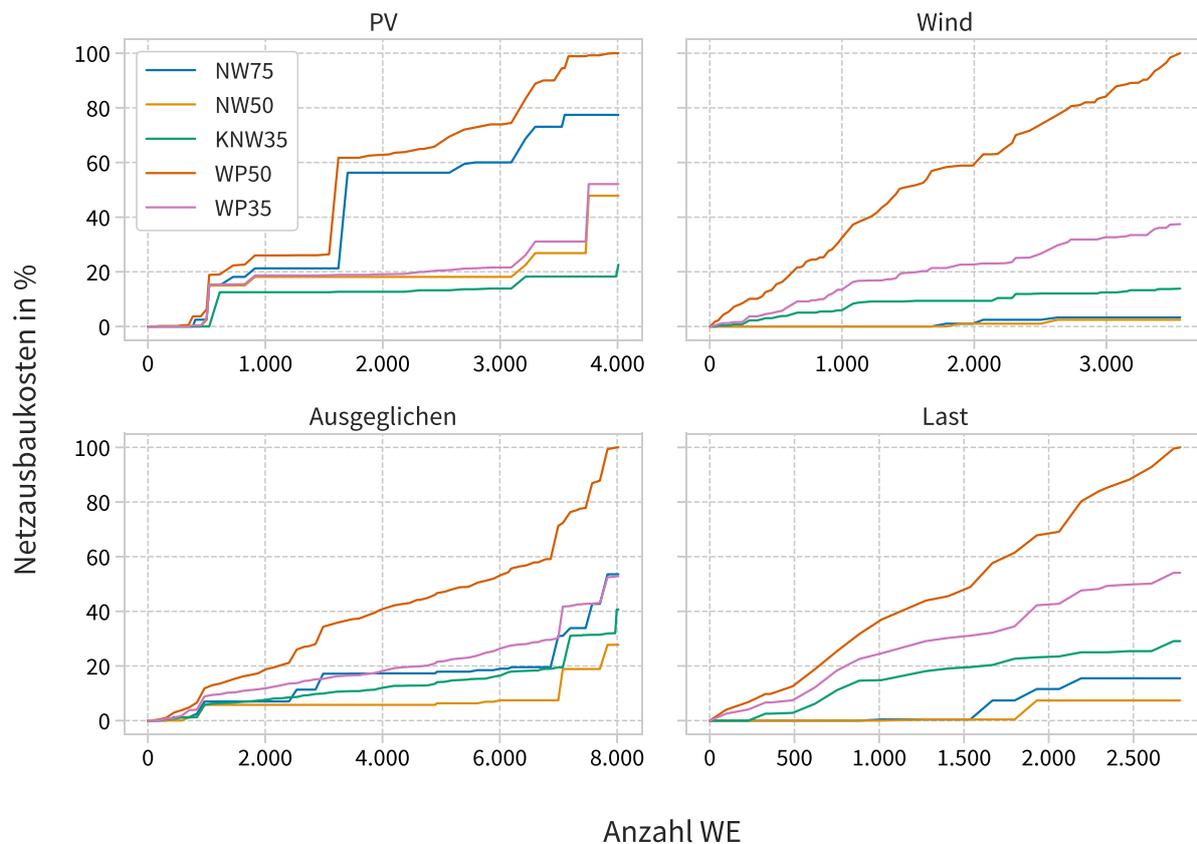


Abbildung 11: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten in den Referenznetzgebieten

7.1 Verteilnetztyp „PV ländlich“

Quartiere innerhalb des Verteilnetztyps „PV ländlich“ setzen sich in der Regel aus Einfamilienhäusern (EFH) und Zweifamilienhäusern (ZFH) zusammen. Aufgrund der hohen Anzahl an Dach-PVA ist die NS in dem Netzgebiet sehr gut ausgebaut. Dieser Umstand spiegelt sich in den Ergebnissen des Referenznetzgebiets wider. In Abbildung 12 (rechts) sind die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom Quartierskonzept dargestellt. Es zeigt sich, dass der Netzausbaubedarf im Referenznetzgebiet beinahe ausschließlich auf der MS-Ebene besteht. Auch liegen nach Abbildung 12 (rechts) die Netzausbaukosten der Quartierskonzepte WP35 und KNW35 auf einem niedrigeren Niveau als die des wärmenetzbasierten Konzepts NW50. Die höheren Leistungen der WP des Konzepts WP50 erhöhen den Ausbaubedarf hingegen erheblich, was für das wärmenetzbasierte Konzept NW75 nur in einem geringeren Maße gilt. Der erhöhte Ausbaubedarf des Konzepts WP50 ist auch hier in erster Linie durch Netzausbaumaßnahmen auf der MS-Ebene getrieben. Grund hierfür ist, dass auch in dem Photovoltaik-dominierten Referenznetzgebiet der Netzausbau in einzelnen Netzabschnitten prädominant lastgetrieben stattfindet. In diesen Gebieten führt die höhere Last des Quartierskonzepts WP50 zu einem deutlich erhöhten Netzausbaubedarf.

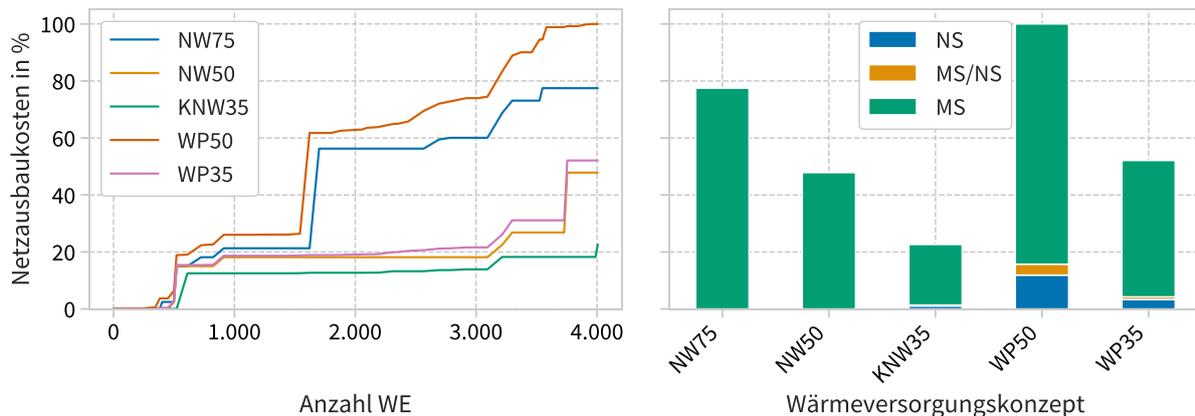


Abbildung 12: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungs-konzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten (links) und die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungs-konzept im Referenznetzgebiet „PV ländlich“

7.2 Verteilnetztyp „Wind ländlich“

Quartiere im Verteilnetztyp „Wind ländlich“ weisen ähnliche Siedlungsstrukturen auf wie Quartiere innerhalb des Verteilnetztyps „PV ländlich“. Der Netzausbauzustand der NS-Ebene ist jedoch deutlich weniger vorangeschritten, da es nur eine geringe Anzahl an Dach-PVA innerhalb des Verteilnetztyps „Wind ländlich“ gibt. Dies führt dazu, dass die NS-Ebene in diesem Verteilnetztyp im Vergleich zum Verteilnetztyp „PV ländlich“ schwächer ausgebaut ist. Die Ergebnisse der Netzanalyse des Referenznetzgebiets spiegeln diesen Umstand wider (vgl. Abbildung 13). So liegen die Netzausbaukosten der gebäudeintegrierten Quartierskonzepte deutlich über den Kosten der wärmenetzbasierten Konzepte. Auch verursachen die wärmenetzbasierten Konzepte insgesamt nur sehr geringe Netzausbaukosten. Grund hierfür ist der allgemein hohe Ausbauzustand der MS-Ebene aufgrund der WKA im Netzgebiet. So findet der Netzausbau in den gebäudeintegrierten und in dem gemischten Quartierskonzept beinahe ausschließlich auf der NS- und MS/NS-Ebene statt, was Abbildung 13 (links) entnommen werden kann.

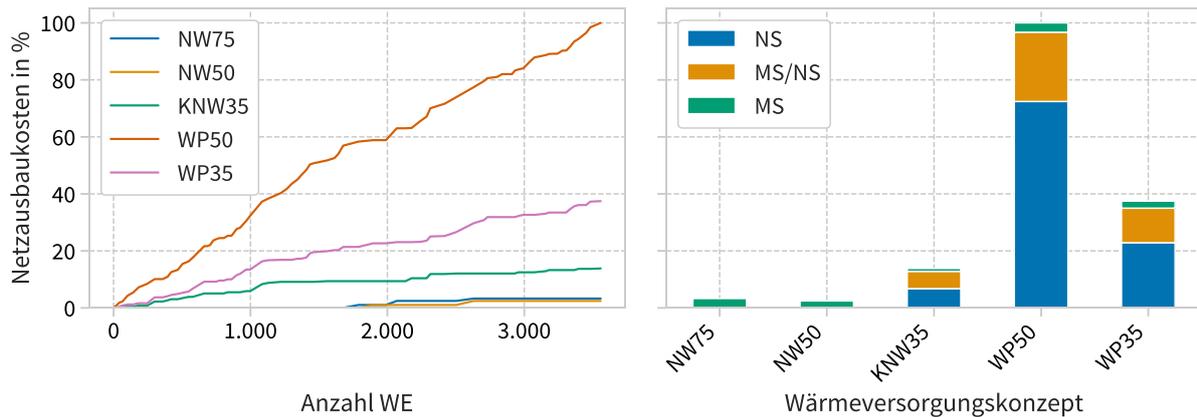


Abbildung 13: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten (links) und die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept im Referenznetzgebiet „Wind ländlich“

7.3 Verteilnetztyp „Ausgeglichen halbstädtisch“

Der Verteilnetztyp „Ausgeglichen halbstädtisch“ weist gegenüber den ländlichen Netzgebieten eine deutlich höhere Einwohnerdichte auf. Quartiere in diesem Verteilnetztyp können sich aus EFH, ZFH und MFH zusammensetzen. Das wärmenetzbasierte Konzept NW50 weist im Referenznetzgebiet nach Abbildung 14 die geringsten Netzausbaukosten auf. Es folgt das gemischte Konzept KNW35, das geringere Netzausbaukosten verursacht als die Konzepte NW75 und WP35. Durch die niedrigen benötigten WP-Leistungen des gemischten Konzepts KNW35 können im Vergleich zum Konzept NW75 einzelne teure MS-Maßnahmen vermieden werden. Aber auch der Ausbaubedarf auf der NS-Ebene fällt im Vergleich zu den gebäudeintegrierten Konzepten geringer aus. Die Konzepte NW75 und WP35 weisen hingegen beinahe den gleichen Netzausbaubedarf auf, wenn auch auf verschiedenen Spannungsebenen. Das gebäudeintegrierte Konzept WP50 verursacht durch die hohen WP-Leistungen, die in der NS-Ebene integriert werden, im Vergleich zu den anderen Konzepten deutlich erhöhte Netzausbaukosten.

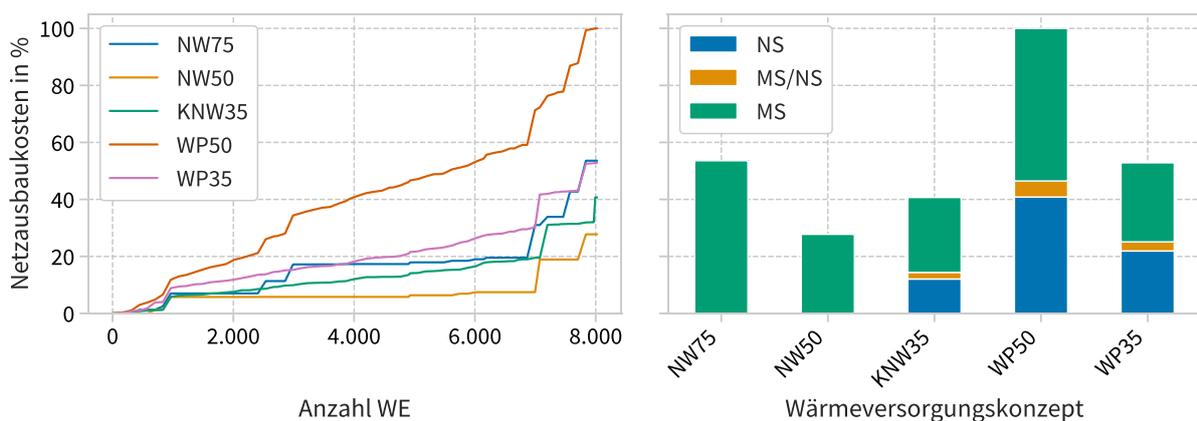


Abbildung 14: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten (links) und die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept im Referenznetzgebiet „Ausgeglichen halbstädtisch“

7.4 Verteilnetztyp „Last städtisch“

Quartiere im Verteilnetztyp „Last städtisch“ setzen sich beinahe ausschließlich aus MFH zusammen. Der Netzausbaubedarf ist in diesen Netzen in der Regel ausschließlich lastgetrieben. Die Ergebnisse des Referenznetzgebiets nach Abbildung 15 (links) zeigen in erster Linie für die gebäudeintegrierten, aber auch für das gemischte Quartierskonzept einen deutlich erhöhten Netzausbaubedarf gegenüber den wärmenetz-basierten Konzepten. Der zusätzliche Netzausbaubedarf fällt gegenüber den wärmenetzbasierten Konzepten bei den gebäudeintegrierten Szenarien und bei dem gemischten Szenario beinahe ausschließlich auf NS- und MS/NS-Ebene an. Die Netzausbaumaßnahmen auf der MS-Ebene entfallen bei dem gemischten Konzept KNW35 demgegenüber sogar vollständig. Das Quartierskonzept NW50 weist gegenüber NW75 eine reduzierte Spitzenlast auf, was sich in den geringeren Netzausbaukosten widerspiegelt. In der Realität führen im städtischen Raum häufig Platzrestriktionen dazu, dass gebäudeintegrierte Lösungen mit WP technisch nicht umsetzbar sind.

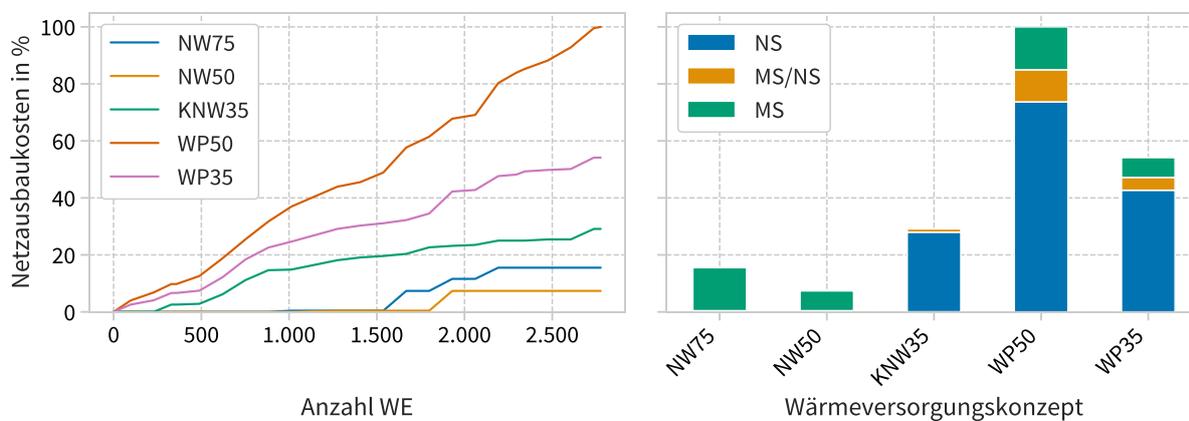


Abbildung 15: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten (links) und die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept im Referenznetzgebiet „Last städtisch“

8 Schlussbetrachtung und weiterer Forschungsbedarf

Ziel dieses Kurzgutachtens ist es, die Auswirkungen verschiedener WP-basierter Quartierskonzepte auf gängige Verteilnetztypen aufzuzeigen. Speziell werden die Stromnetzausbaukosten in den vier Verteilnetztypen „PV ländlich“, „Wind ländlich“, „Ausgeglichen halbstädtisch“ und „Last städtisch“ in Abhängigkeit vom Quartierskonzept bestimmt. Die Netzausbaukosten stellen dabei einen Baustein einer ganzheitlichen Betrachtung einer klimaneutralen Wärmeversorgung von Quartieren dar und sollten in der Planung berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse (vgl. Kapitel 7) der Netzanalyse zeigen einen beinahe eindeutigen Trend auf. Wärmenetz-basierte Quartierskonzepte können im Vergleich zu gebäudeintegrierten Konzepten den Netzausbaubedarf reduzieren, wofür es vor allem zwei Gründe gibt: Zum einen kommen bei wärmenetzbasierten Konzepten in der Regel effizientere WP-Technologien zum Einsatz, die die Spitzenlast senken. Zum anderen werden GWP häufig auf der MS-Ebene angeschlossen und belasten somit nicht zusätzlich die NS-Ebene.

Ausgenommen hiervon sind Netzgebiete mit einer hohen Anzahl an Dach-PVA. In diesen Netzgebieten ist die NS-Ebene aufgrund der hohen maximalen Rückspeiseleistung gut ausgebaut und gebäudeintegrierte Konzepte verursachen ähnliche Ausbaukosten wie wärmenetzbasierte Konzepte. In dem untersuchten Photovoltaik-dominierten Referenznetzgebiet werden durch das gemischte Quartierskonzept auf Grundlage eines kalten Nahwärmenetzes und gebäudeintegrierter WP die geringsten Netzausbaukosten verursacht. Dies begründet sich mit dem geringen elektrischen Leistungsbedarf der WP dieses Konzepts.

Die Netzausbaukosten je umgerüsteter WE in den Netzgebieten liegen maximal im niedrigen vierstelligen Bereich. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass diese Kosten im Vergleich zu den weiteren Kosten einer ganzheitlichen Betrachtung der Umstellung der Wärmeversorgungskonzepte von Quartieren einen geringen, jedoch nicht vernachlässigbaren Anteil ausmachen. Zu den weiteren Kosten zählen unter anderem und vor allem die vom Konzept abhängigen Kosten für die Sanierung der Gebäude, eventuelle Kosten für die Einrichtung bzw. Ertüchtigung eines Wärmenetzes und die Bezugskosten für Energie.

Hierbei kommt es zu einem Zielkonflikt zwischen den betroffenen Parteien, da die verschiedenen Kostenbestandteile durch unterschiedliche Personengruppen getragen werden. Beispielsweise werden die Netzausbaukosten in Form der Netzentgelte auf alle Verbraucherinnen und Verbraucher innerhalb des Versorgungsgebiets eines Verteilnetzbetreibers umgelegt. Die Energiekosten werden hingegen ausschließlich durch die Bewohnerinnen und Bewohner innerhalb der Quartiere getragen. Kapitalintensive Sanierungskosten von Gebäuden, Kosten für den Netzanschluss von GWP und Kosten für Wärmenetze tragen vorerst die Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer sowie die Quartiers- bzw. Wärmenetzbetreiber. Anschließend werden diese Kosten ebenfalls auf die Bewohnerschaft bzw. die Anschlussnutzerinnen und -nutzer umgelegt.

Ziel weiterführender Untersuchungen sollte es sein, auf diesen Zielkonflikt einzugehen und die einzelnen Kostenbestandteile der Quartiersplanung transparent zu beziffern und darzustellen. Auch die Unterscheidung direkter Investitionskosten für die Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer und Investitionen in zentrale Erzeuger sollte dabei berücksichtigt werden, da Letztere über den Grundpreis der Versorgung unter Umständen durch die Nutzerinnen und Nutzer neben dem Arbeitspreis zu tragen sind. Auf der einen Seite können auf diese Weise volkswirtschaftlich möglichst sinnvolle Quartierskonzepte in Abhängigkeit von den

örtlichen Gegebenheiten bestimmt und auf der anderen Seite aktuelle regulatorische Fehlanreize aufgezeigt werden.

Hierfür sollten unter anderem auch die Ergebnisse dieses Kurzgutachtens durch weitere Netzanalysen erweitert und überprüft werden. Zusätzlich kann die Netzanalyse durch die Beachtung weiterer technischer und betrieblicher Maßnahmen optimiert werden. Hierzu zählen in erster Linie folgende Punkte:

- Die Auslegung der Quartierskonzepte kann durch die Berücksichtigung von auslegungsrelevanten Spitzentechnologien, thermischen Speichern und etwaigen speziellen Wärmequellen wie beispielsweise Industrieabwärme für vor allem GWP erweitert werden.
- Zeitreihenbasierte Untersuchungen bieten die Möglichkeit, die Flexibilität von WP zu berücksichtigen. Die Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien auf den Netzausbaubedarf sollten ermittelt werden. Diese Untersuchungen könnten durch eine Variation der Speichergröße erweitert werden.
- Die Wärmebedarfe anderer Sektoren wie von Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sollten ebenfalls berücksichtigt werden.
- Neben den untersuchten Quartierskonzepten sind weitere Wärmeversorgungskonzepte denkbar, die ebenfalls betrachtet werden sollten. Hierzu zählt beispielsweise eine Kombination von WP mit Solarthermie sowie Hybridlösungen mit Wärmespitzenlastdeckung durch unterschiedliche Energieträger.
- Die Ergebnisse dieses Kurzgutachtens und besonders eventueller erweiternder Untersuchungen sollten für einen Wissenstransfer aufbereitet werden. Hierfür bietet sich unter anderem die Visualisierung von Ergebnissen in Web Apps an, die verschiedenste Darstellungsmöglichkeiten bieten.

Abbildungsverzeichnis

1

Abbildung 1: Quartierskonzept NW75.....	12
Abbildung 2: Quartierskonzept NW50.....	12
Abbildung 3: Quartierskonzept KNW35	12
Abbildung 4: Quartierskonzept WP50	12
Abbildung 5: Quartierskonzept WP35.....	12
Abbildung 6: Erzeugungsstruktur und Versorgungsaufgabe im Verteilnetztyp „PV ländlich“ ...	20
Abbildung 7: Erzeugungsstruktur und Versorgungsaufgabe im Verteilnetztyp „Wind ländlich“	21
Abbildung 8: Erzeugungsstruktur und Versorgungsaufgabe im Verteilnetztyp „Ausgeglichen halbstädtisch“	22
Abbildung 9: Erzeugungsstruktur und Versorgungsaufgabe im Verteilnetztyp „Last städtisch“	23
Abbildung 10: Kumulierte Wirkleistung von Photovoltaik-, Wind- und sonstigen Erzeugungskapazitäten sowie die kumulierte konventionelle und mobilitätsbedingte Spitzenlast in den Referenznetzgebieten	25
Abbildung 11: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten in den Referenznetzgebieten.....	28
Abbildung 12: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten (links) und die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept im Referenznetzgebiet „PV ländlich“	29
Abbildung 13: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten (links) und die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept im Referenznetzgebiet „Wind ländlich“	30
Abbildung 14: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten (links) und die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept im Referenznetzgebiet „Ausgeglichen halbstädtisch“	30
Abbildung 15: Relative Netzausbaukosten in Abhängigkeit vom Wärmeversorgungskonzept sowie von der Anzahl an durch Wärmepumpen versorgten Wohneinheiten	

(links) und die Netzausbaukosten je Spannungsebene in Abhängigkeit vom
Wärmeversorgungskonzept im Referenznetzgebiet „Last städtisch“ 31

Tabellenverzeichnis

1

Tabelle 1: Energieeffizienzklassen von Gebäuden entsprechend dem spezifischen jährlichen Endenergieverbrauch für Raumheizung.....	10
Tabelle 2: Spezifischer jährlicher Heizwärmebedarf je Energieeffizienzkategorie.....	10
Tabelle 3: Energieeffizienzkategorie, Vorlauftemperatur der Heizungsanlage und Art der Wärmebereitstellung je Quartierskonzept.....	11
Tabelle 4: Einordnung der Quartierskonzepte mit wärmenetzbasierter Wärme nach Nahwärmenetz-Typ	12
Tabelle 5: Wärmepumpen-Technologien je Quartierskonzept	13
Tabelle 6: Spezifischer Heizwärmebedarf und Energieeffizienzkategorie je Quartierskonzept	14
Tabelle 7: Spezifischer Heizleistungsbedarf nach Quartierskonzept und Energieeffizienzkategorie	14
Tabelle 8: Gängige Erfahrungswerte zum Heizleistungsbedarf nach Baujahr / Zeitpunkt der Sanierung.....	14
Tabelle 9: Annahmen zur Heizfläche pro Kopf und Raumtyp	15
Tabelle 10: Heizleistungsbedarf je Wohneinheit zur Raumwärmebereitstellung	15
Tabelle 11: Gesamter Heizleistungsbedarf je Wohneinheit	16
Tabelle 12: Gütegrad der Wärmepumpen je Technologie	16
Tabelle 13: Minimale Temperatur des niedrigen Temperaturniveaus der Wärmepumpe nach Wärmequelle.....	16
Tabelle 14: Coefficient of Performance je Quartierskonzept	17
Tabelle 15: Elektrische Leistung der Wärmepumpe je Wohneinheit und Quartierskonzept.....	17
Tabelle 16: Installierte Erneuerbare-Energien-Anlagen und Anzahl an Elektrofahrzeugen im betrachteten Zukunftsszenario	24
Tabelle 17: Gleichzeitigkeitsfaktoren von Lasten und Erzeugungsanlagen.....	26
Tabelle 18: Maximale Netzausbaukosten des teuersten Konzepts in den Referenznetzgebieten.....	27

Literaturverzeichnis

- AEE (2022): *foederal-erneuerbar.de* (Agentur für Erneuerbare Energien, Herausgeber). Abgerufen am 08.12.2022 von: <https://www.foederal-erneuerbar.de/startseite>
- Agora (2017): *Energiewende und Dezentralität. Zu den Grundlagen einer politisierten Debatte*. Agora Energiewende. Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2016/Dezentralitaet/Agora_Dezentralitaet_WEB.pdf
- Agora (2019): *Verteilnetzausbau für die Energiewende – Elektromobilität im Fokus*. Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Regulatory Assistance Project (RAP). Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/EV-Grid/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_EV-Grid_WEB.pdf
- BMJ, BfJ (2020): *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG) – Anlage 10 (zu § 86) – Energieeffizienzklassen von Wohngebäuden*. Abgerufen von: Gesetze im internet: https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_10.html
- BMU (2022): *Wohnfläche*. Abgerufen von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche>
- BMWK, BMWSB (2022): *Sofortprogramm gemäß § 8 Abs. 1 KSG für den Sektor Gebäude*. Abgerufen in 02/2023 von: https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/baue_n/sofortprogramm-sektor-gebaeude.pdf
- BNetzA (2022): *Bericht zum Zustand und Ausbau der Verteilernetze 2021*. Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/ZustandAusbauVerteilernetze2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- bpb (2021): *Soziale Situation in Deutschland – Haushalte nach Zahl der Personen*. Abgerufen von: <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61587/haushalte-nach-zahl-der-personen/>
- BReg (30.01.2023): *bundesregierung.de*. Abgerufen am 08.12.2022 von: Mehr Energie aus erneuerbaren Quellen | Bundesregierung: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310>
- BWE (2022): *wind-energie.de* (Bundesverband WindEnergie, Herausgeber). Abgerufen am 08.12.2022 von: <https://www.wind-energie.de/themen/netze/>
- dena (2012): *dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030*. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9100_dena-Verteilnetzstudie_Abschlussbericht.pdf
- dena (2018): *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende*. Abgerufen von: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
- dena (2021a): *Abschlussbericht, Klimaneutrale Quartiere und Areale, S.6*. Deutsche Energie-Agentur. Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-Abschlussbericht_Klimaneutrale_Quartiere_und_Areale.pdf

- dena (2021b): *Quartiers- und Arealkategorien*. Deutsche Energie-Agentur. Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/Urbane_Energiewende/FINAL-KNQA-Typen-Paket.pdf
- Fraunhofer ISI (2016): *Auswirkungen von Elektromobilität und Photovoltaik auf die Finanzierung deutscher Niederspannungsnetze*. Endbericht im Auftrag der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg. Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2016/SEF_Endbericht.pdf
- Greenhouse Media GmbH (2019): *energie-experten.de*. Abgerufen von: <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/leistung/heizleistung>
- Heider, A., Helfenbein, K., Schachler, B., Röpcke, T., Hug, G. (2022): *On the Integration of Electric Vehicles into German Distribution Grids through Smart Charging*. Abgerufen am 08.12.2022 von: <https://doi.org/10.1109/SEST53650.2022.9898464>
- LAGB (2022): *sachsen-anhalt.de* (Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Herausgeber). Abgerufen von: <https://www.geodaten.lagb.sachsen-anhalt.de/wilma.aspx>
- MiD (2018): *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht*. infas, DLR, IVT und infas 360. Bonn, Berlin: im Auftrag des BMVI. Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf
- Müller, U. P., Schachler, B., Bunke, W.-D., Bartels, J., Glauer, M., Büttner, C., . . . , Wendiggensen, J. (2019): *open_eGo Projektabschlussbericht*. Abgerufen von: <https://www.uni-flensburg.de/fileadmin/content/abteilungen/industrial/dokumente/downloads/veroeffentlichungen/forschungsergebnisse/20190426endbericht-openego-fkz0325881-final.pdf>
- NRW (2021): *Gutachten zur Weiterentwicklung der Strom-Verteilnetze in Nordrhein-Westfalen auf Grund einer fortschreitenden Sektorenkopplung und neuer Verbraucher*. ef.Ruhr, IAEW der RWTH Aachen, Bergische Universität Wuppertal. Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Abgerufen am 08.12.2022 von: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/documents/210609_nrw_verteilnetzstudie_final.pdf#page=119
- oemof developer group (2019): *Compression heat pump and chiller*. Abgerufen von: https://oemof-thermal.readthedocs.io/en/latest/compression_heat_pumps_and_chillers.html
- open_eGo-Team (2017): *documentation of eDisGo*. Abgerufen von: <https://edisgo.readthedocs.io/en/dev/>
- open_eGo-Team (2018): *ding0*. DLR, University of Flensburg, Flensburg University of Applied Sciences, Fraunhofer IEE, OvGU. Abgerufen von: <https://github.com/openego/ding0>
- Schachler, B., Heider, A., Röpcke, T., Reinke, F., Bakker, C. (2021): *Assessing the impacts of market-oriented electric vehicle charging on german distribution grids*. Abgerufen am 08.12.2022 von: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/icp.2021.2515>
- Schlier, G. (2019): *Quartier am Bergle in Schlier*. Abgerufen am 08.12.2022 von: <https://quartier-am-bergle-schlier.de/energiekonzept/>
- Sensfuß, F., Lux, B., Bernath, C., Kiefer, C., Pfluger, B., Kleinschmitt, C., von Mikulicz-Radecki, F. (2021): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland*. Abgerufen von: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3-Langbericht-Stromnetze-final.pdf>
- StMWi (2022): *Wohnungen – Statistiken zu der Anzahl der Wohnungen in Bayern*. Abgerufen von: <https://www.stmwi.bayern.de/landesentwicklung/raumb Beobachtung/daten-zur-raumb Beobachtung/wohnungen/>
- Strom-Report.de. (2022): *strom-report.de*. Abgerufen am 08.12.2022 von: <https://strom-report.de/photovoltaik/>

ThermoFlux Deutschland GmbH (2020): *Wie viel Heizleistung (Heizlast) braucht meine Wärmepumpe?*
Abgerufen von: KlimaWorld:
https://www.klimaworld.com/blog/heizlast_stromverbrauch_waermepumpe

Abkürzungen

AEE	Agentur für Erneuerbare Energien
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
BNetzA	Bundesnetzagentur
BWE	Bundesverband WindEnergie
COP	Coefficient of Performance
EE	Erneuerbare Energien
EFH	Einfamilienhaus
EW	Einwohner
GW	Gigawatt
GWP	Großwärmepumpe
HS	Hochspannung
HS/MS-UW	Hochspannungs-/Mittelspannungs-Umspannwerk
km²	Quadratkilometer
KNW	Kaltes Nahwärmenetz
kW	Kilowatt
kWh/m²a	Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr
LAGB	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt
m²	Quadratmeter
MFH	Mehrfamilienhaus
MiD	Mobilität in Deutschland
MS	Mittelspannung
MW	Megawatt
NS	Niederspannung
NW	Nahwärmenetz
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaikanlage
RW	Raumwärme
T	Temperatur
T€	Tausend Euro

VLT	Vorlauftemperatur
W	Watt
WE	Wohneinheit
WKA	Windkraftanlage
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
ZFH	Zweifamilienhaus