

Kurzfassung des Abschlussberichtes

Im Rahmen der Förderrichtlinie zur Stärkung der Transformationsdynamik und Aufbruch in den Revieren und an den Kohlekraftwerkstandorten (STARK) des BMW.

ZellSys

Zellulare Energieversorgung zur Umgestaltung der Energieversorgung im suburbanen Raum

Förderkennzeichen: 46SKD186X

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Seifert / Prof. Dr.-Ing. P. Schegner

Bearbeiter: Dipl.-Wi.-Ing. P. Grun, Dr.-Ing. P. Seidel,
Dipl.-Ing. M. Kreutziger, Dipl.-Ing. Marta S. Potyka
Dipl.-Ing. J. Keller

Berichtszeitraum: 10/2022 - 12/2025

Datum: 30. März 2026

Copyright liegt beim Autor

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Abstract

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde die Transformation eines zellularen Energiesystems im suburbanen Raum am Beispiel der Stadt Wittichenau untersucht. Auf Basis einer räumlich und zeitlich hochaufgelösten Gebäudemodellierung konnten elektrische und thermische Energiebedarfe, die Eignung der Gebäude für Photovoltaik sowie der potenzielle Einsatz von Wärmepumpen und Elektromobilität bis zum Jahr 2050 analysiert werden. Die Szenarioentwicklung berücksichtigte hierbei unterschiedliche Bevölkerungsrückgänge, Leerstandsdynamiken und Sanierungsraten und umfasste jeweils 100 stochastische Simulationsläufe. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Rückgang des Wärmebedarfs infolge steigender Sanierungsquoten und zunehmenden Leerstands sowie einen parallelen Anstieg der elektrischen Lasten durch Wärmepumpen und Elektromobilität. Der Ausbau von Photovoltaik erhöht die lokale elektrische Einspeisung, führt jedoch zu stärkeren zeitlichen Diskrepanzen zwischen Erzeugung und Verbrauch. Die elektrische Netzanalyse zeigt, dass insbesondere in dichter besiedelten Bereichen ab etwa 2035 punktuelle Engpässe auftreten können, während die übergeordnete Infrastruktur überwiegend ausreichend dimensioniert bleibt. Die Studie verdeutlicht die Relevanz zellulärer Ansätze sowie gebäudebasierter Modellierungen für die vorausschauende Energie- und Netzplanung und zeigt, wie lokale Strukturmerkmale die Energiewende maßgeblich beeinflussen.

This research project investigated the transformation of a decentralised energy system in a suburban area, using the town of Wittichenau as a case study. Using spatially and temporally high-resolution building modelling, the study analysed electrical and thermal energy demands, the suitability of buildings for photovoltaic systems, and the potential use of heat pumps and electric mobility up to the year 2050. The scenario development took into account varying population declines, vacancy dynamics and renovation rates, and comprised 100 stochastic simulation runs in each case. The results show a significant decline in heating demand due to rising renovation rates and increasing vacancy rates, alongside a parallel rise in electrical loads from heat pumps and electric mobility. The expansion of photovoltaics increases local electricity feed-in but leads to greater temporal discrepancies between generation and consumption. The electricity grid analysis shows that, particularly in densely populated areas, localised bottlenecks may occur from around 2035 onwards, whilst the overarching infrastructure remains largely adequately dimensioned. The study highlights the relevance of cellular approaches and building-based modelling for forward-looking energy and grid planning, and demonstrates how local structural characteristics significantly influence the energy transition.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen zellularer Energiesysteme	3
2.1	Zellulares Energiesystem und Strukturierung	3
2.2	Untersuchungsraum und demografische Entwicklung	4
2.3	Energiesystem Wittichenau	4
3	Methodisches Vorgehen	6
3.1	Gebäudebasierte Modellierung des Energiebedarfs	6
3.1.1	Modellierung des elektrischen Haushaltsverbrauchs	7
3.1.2	Modellierung des Wärmebedarfs	7
3.2	Modellierung dezentraler Energietechnologien	9
3.3	Szenarienentwicklung	10
3.4	Analyse der Netzauswirkungen	12
3.5	Dissemination	12
3.5.1	Einbindung lokaler Akteure	13
3.5.2	Bürgerbefragung und -dialog	13
4	Ergebnisse	14
4.1	Energetischer Ist-Zustand	14
4.2	Entwicklungsszenarien bis 2050	15
4.3	Sensitivitätsanalysen zu Sanierungsraten	18
4.4	Veränderungen der Stromlasten	19
4.5	Auswirkungen auf die Netzinfrastruktur	20
4.6	Bedeutung für die zukünftige Energieplanung	21
5	Einordnung der Ergebnisse	23
6	Fazit	25
	Literaturverzeichnis	26
7	Abkürzungen	28

1 Einleitung

Die Transformation des Energiesystems stellt eine der zentralen Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte dar. Der steigende Anteil erneuerbarer Energien, die zunehmende Elektrifizierung der Wärmeversorgung sowie der wachsende Einsatz elektrischer Mobilität führen zu neuen Anforderungen an bestehende Energieinfrastrukturen. Insbesondere auf der Ebene der Verteilnetze entstehen neue Belastungen und komplexe Wechselwirkungen zwischen Strom-, Wärme- und Mobilitätssektor.

Ein möglicher Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderungen ist das Konzept der zellularen Energiesysteme. Dabei wird das Energiesystem in räumlich abgegrenzte Einheiten – sogenannte Energiezellen – unterteilt. Innerhalb dieser Zellen werden Energieerzeugung, -verbrauch und -speicherung möglichst lokal koordiniert. Ziel ist es, lokale Gleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage zu schaffen und dadurch die Komplexität des Gesamtsystems zu reduzieren. Energiezellen können unterschiedliche Größen aufweisen. Sie reichen von einzelnen Gebäuden über Quartiere bis hin zu ganzen Städten oder Regionen. Innerhalb einer Zelle werden verschiedene Technologien zur Energieerzeugung und -umwandlung eingesetzt, bspw. Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen oder elektrische Speicher. Gleichzeitig erfolgt eine Kopplung der verschiedenen Energiesektoren, sodass bspw. Strom zur Wärmebereitstellung genutzt oder elektrische Fahrzeuge als flexible Lasten in das Energiesystem integriert werden können.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Analyse lokaler Energiesysteme zunehmend an Bedeutung. Besonders im suburbanen und ländlichen Raum ergeben sich spezifische Herausforderungen und Chancen für die Umsetzung der Energiewende. Geringere Bebauungsdichten, ein hoher Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern sowie eine starke Nutzung individueller Mobilität prägen die Energiebedarfsstrukturen dieser Regionen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse eines zellularen Energiesystems im suburbanen Raum am Beispiel der sächsischen Stadt Wittichenau. Auf Basis einer detaillierten Untersuchung der bestehenden Energiebedarfe sowie der vorhandenen Infrastruktur wird ein Modell zur Beschreibung des lokalen Energiesystems entwickelt. Anschließend werden Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs sowie den Einsatz erneuerbarer Technologien bis zum Jahr 2050 untersucht. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Frage, welche Auswirkungen der verstärkte Einsatz von Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen und Elektromobilität auf die elektrische Energieinfrastruktur hat. Durch die Kombination von Gebäudeanalysen, Energiebedarfsmodellen und Netzanalysen soll bewertet werden, inwieweit bestehende Verteilnetze zukünftige Entwicklungen aufnehmen können.

Die Ergebnisse der Arbeit liefern sowohl Erkenntnisse über die Transformation lokaler Energiesysteme als auch Hinweise für die Planung zukünftiger Energieinfrastrukturen im suburbanen Raum. Gleichzeitig wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, der auf andere Regionen übertragbar ist.

2 Grundlagen zellularer Energiesysteme

2.1 Zellulares Energiesystem und Strukturierung

Der Begriff des zellularen Energiesystems ist aus der Biologie abgeleitet, in der Zellen die kleinsten funktionalen Einheiten darstellen. Übertragen auf die Energietechnik beschreibt eine Energiezelle die kleinste Einheit, in der Erzeugung, Speicherung und Verbrauch von Energie bilanziert werden. Analog zu biologischen Vielzellern zeichnen sich zellulare Energiesysteme durch eine dezentrale Struktur, funktionale Aufgabenteilung sowie Kommunikations- und Koordinationsfähigkeit aus [1, 2].

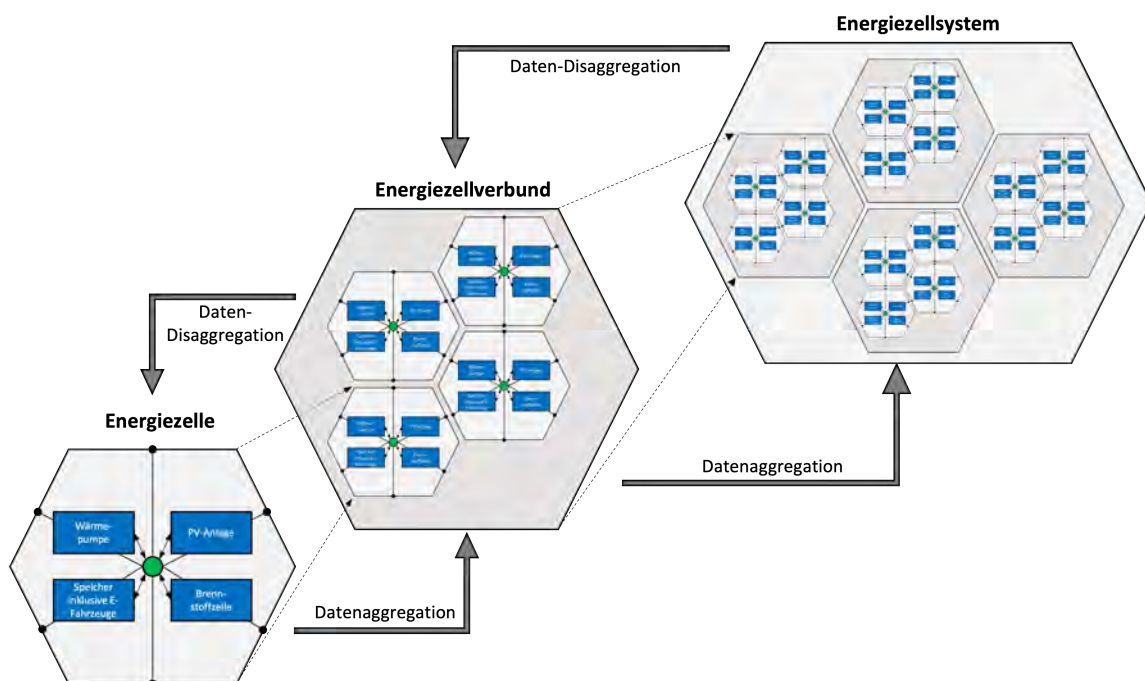


Abbildung 2.1: Struktur eines zellularen Energiesystems (Energiezelle, Zellverbund, Gesamtsystem)

Eine Energiezelle umfasst dabei Infrastrukturen zur Energiewandlung, -verteilung, -speicherung und zum Verbrauch. Über ein Energiemanagementsystem erfolgt sowohl die interne Koordination als auch der Austausch mit benachbarten Zellen. Die Größe einer Zelle ist nicht eindeutig definiert und kann von einzelnen Gebäuden bis hin zu Quartieren oder Städten reichen. Die Abbildung 2.1 teilt die Energiezelle, den Energiezellverbund und das Energiezellsystem strukturell ein. Wesentliche

Eigenschaften sind die lokale Bilanzierung von Erzeugung und Verbrauch, die Flexibilität im Umgang mit volatilen erneuerbaren Energien sowie ein bidirektionaler Energie- und Informationsaustausch. Zur Analyse des Energiesystems wird das Stromnetz in mehrere Zellebenen unterteilt. Diese orientieren sich an der bestehenden Netzstruktur und umfassen die Hochspannungs-, Mittelspannungs- und Niederspannungsebene sowie die Ebene einzelner Gebäude (Mikrozellen). Während höhere Ebenen der überregionalen Verteilung dienen, erfolgt auf unteren Ebenen die lokale Bilanzierung und Integration dezentraler Erzeuger. Diese hierarchische Struktur ermöglicht eine differenzierte Betrachtung von Energieflüssen und Systemzuständen.

2.2 Untersuchungsraum und demografische Entwicklung

Der Untersuchungsraum umfasst den suburbanen Bereich der Stadt Hoyerswerda, der im Rahmen des Projekts vereinfacht als Radius von 15 km um die Kernstadt definiert wird. Dieser Raum beinhaltet mehrere umliegende Gemeinden mit überwiegend stagnierender oder leicht rückläufiger Bevölkerungsentwicklung [3]. Aufgrund der Analyse wurde die Stadt Wittichenau als repräsentatives Untersuchungsgebiet ausgewählt.

Wittichenau ist eine Kleinstadt in Sachsen im Landkreis Bautzen mit rund 5.760 Einwohnern und einer Fläche von 61,02 km². Die Siedlungsstruktur ist stark durch Ein- und Zweifamilienhäuser geprägt, bei gleichzeitig hoher Eigentumsquote und geringer Leerstandsrate [4, 5]. Die Bevölkerungsentwicklung zeigt ein Wachstum bis etwa zum Jahr 2000, gefolgt von einem Rückgang von rund 10 % bis 2020. Parallel dazu ist eine deutliche Alterung der Bevölkerung zu beobachten, was sich in einer Verschiebung der Altersstruktur hin zu höheren Altersklassen äußert [4]. Diese demografischen Veränderungen beeinflussen langfristig den Energiebedarf sowie die Anforderungen an die Energieinfrastruktur.

2.3 Energiesystem Wittichenau

Die Stadt Wittichenau ist vollständig an das öffentliche Stromnetz angeschlossen. Die Stromerzeugung erfolgt dezentral aus erneuerbaren Energien, insbesondere Photovoltaik, Biomasse und in geringem Umfang Wasserkraft. Insgesamt sind 213 Anlagen mit einer installierten Leistung von rund 4,3 MW vorhanden. In Tabelle 2.1 sind die Anlagen nach Energieträger gruppiert. Den größten Anteil (etwa 87 %) erzeugen Solaranlagen. Etwa 12 % beträgt der Energieanteil aus Biomasse und knapp 1 % aus Wasserkraft. Windenergieanlagen und Anlagen für Klär- und Deponiegas sind nicht vorhanden. [4] Im Bereich der Wärmeversorgung existiert kein Fernwärmenetz, sodass die Versorgung überwiegend über das Gasnetz erfolgt [4]. Aussagen zum tatsächlichen Energieverbrauch liegen nicht vor, weshalb im weiteren Verlauf des Projekts entsprechende Berechnungsmethoden entwickelt werden.

Hinsichtlich der Mobilität ist Wittichenau durch fehlende Schienenanbindung und eine überwiegende Nutzung des Straßenverkehrs geprägt. Öffentliche Ladeinfrastruktur für Elektromobilität ist

derzeit nicht vorhanden [6].

Tabelle 2.1: Übersicht Anlagen erneuerbarer Energien

Energieträger	Anzahl Anlagen	Bruttoleistung
Biomasse	1	537 kW
Solare Strahlungsenergie	210	3.731 kW
Wasser	2	22 kW
Wind	-	-
Summe	213	4.298 kW

Quelle: [7], [8]

3 Methodisches Vorgehen

Die Analyse des zellularen Energiesystems basiert auf einer räumlich und zeitlich hochaufgelösten Modellierung, die es ermöglicht, Energiebedarfe und -flüsse auf verschiedenen Ebenen des Systems präzise abzubilden. Im Zentrum steht ein hierarchisch aufgebautes Modell, das einzelne Gebäude als Mikrozellen betrachtet und diese zu lokalen Netzbereichen aggregiert. Diese Netzbereiche orientieren sich an der Struktur des elektrischen Niederspannungsnetzes und werden durch Ortsnetztransformatoren begrenzt. Dadurch können sowohl die energetischen Eigenschaften einzelner Gebäude als auch die aggregierten Lasten und Netzbelastungen auf lokaler Ebene analysiert werden. Die Gesamtheit dieser Netzbereiche bildet die Energiezelle der Stadt Wittichenau, wodurch lokale Effekte und übergeordnete Entwicklungen im gesamten Versorgungsgebiet untersucht werden können. Die räumliche Modellierung erfolgt mithilfe geographischer Informationssysteme (GIS), die Gebäudegrundrisse, Nutzungsarten und weitere raumbezogene Informationen miteinander verknüpfen. Dies ermöglicht eine präzise Zuordnung von Gebäuden zu Netzbereichen und bildet die Grundlage für die detaillierte Analyse von Energiebedarfen. Auf dieser Basis werden Strom- und Wärmebedarfe berechnet, technologische Entwicklungen modelliert und mögliche zukünftige Energiesystemzustände bis zum Jahr 2050 untersucht.

3.1 Gebäudebasierte Modellierung des Energiebedarfs

Ein zentraler Bestandteil der Analyse ist die gebäudebasierte Modellierung der Energiebedarfe. Dabei werden sowohl elektrische als auch thermische Energieverbräuche auf Gebäudeebene berechnet. Für jedes Gebäude werden zunächst grundlegende Eigenschaften ermittelt. Dazu zählen u.a. die Gebäudenutzung, die Gebäudegröße sowie die geschätzte Anzahl der Bewohnerinnen und Bewohner. Diese Informationen werden aus vorhandenen Gebäudedaten, statistischen Kennwerten sowie Bevölkerungsdaten abgeleitet. Auf Basis dieser Daten werden anschließend typische Energieverbrauchswerte zugeordnet. Dabei wird zwischen verschiedenen Gebäudetypen und Haushalts- und Gewerbelasten unterschieden.

Die resultierenden Energiebedarfe werden räumlich verortet und können anschließend auf verschiedenen Ebenen aggregiert werden. Dadurch ist es möglich, sowohl den Energiebedarf einzelner Gebäude als auch den Gesamtbedarf ganzer Netzbereiche zu analysieren.

3.1.1 Modellierung des elektrischen Haushaltsverbrauchs

Der elektrische Energieverbrauch von Haushalten wird mit Hilfe eines Bottom-Up-Ansatzes modelliert. Dabei wird der Gesamtstromverbrauch eines Haushalts aus einzelnen Verbrauchskomponenten zusammengesetzt. Grundlage bilden typische Verbrauchsstrukturen privater Haushalte. Diese umfassen u.a. Haushaltsgeräte, Beleuchtung sowie weitere elektrische Anwendungen. Für verschiedene Haushaltsgrößen werden charakteristische Jahresverbräuche angenommen.

Auf Basis der Geräte- und Haushaltsklassifizierung kann im nächsten Schritt die Zeitreihensynthese erfolgen. Abbildung 3.1 zeigt das Verfahren an einem Beispiel mit 5 Haushaltsgeräten. Eingangsdaten sind wie oben beschrieben die technischen und sozialen Kenngrößen mit denen die Einordnung des Haushalts durchgeführt wird. Anschließend werden künstliche Zeitreihen auf Basis stochastischer Kenngrößen für jedes Gerät generiert. Die überlagerten Einzellastgänge ergeben den Lastgang des Haushalts. Die Zeitreihen können als Jahresverlauf mit einer viertelstündlichen Auflösung generiert werden.

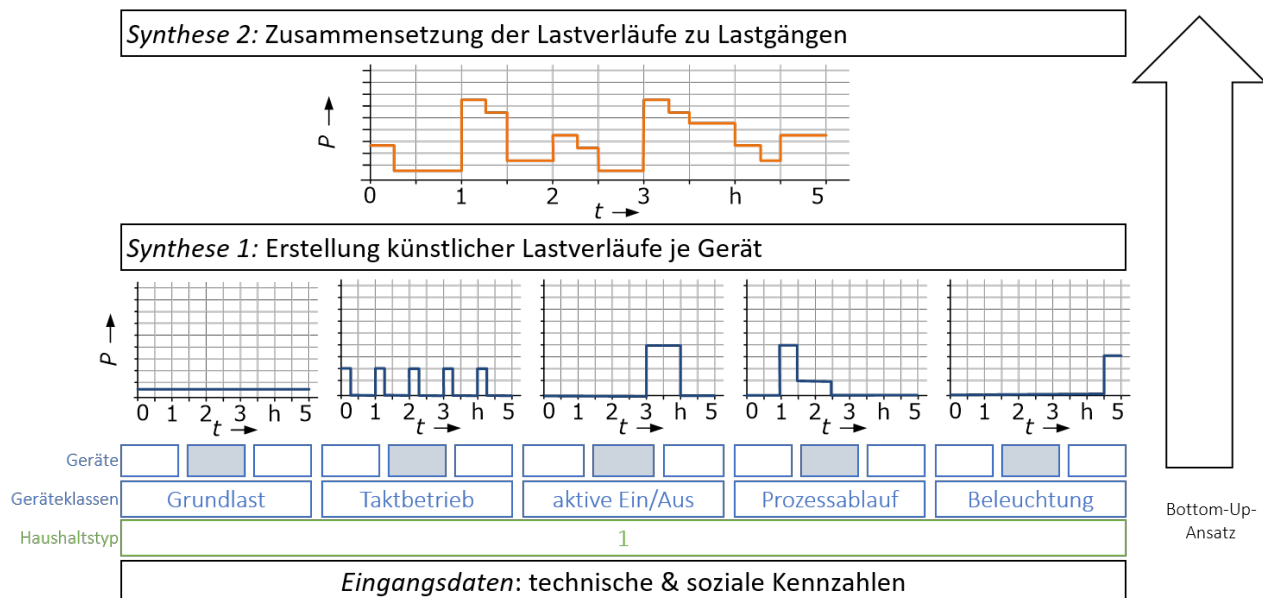


Abbildung 3.1: Generierung einer Haushaltslast am Beispiel von 5 Geräten, Quelle: [9]

Durch die Kombination von Jahresverbrauch und Lastprofil können stündliche Stromlasten für einzelne Gebäude berechnet werden. Die so erzeugten Lastprofile werden anschließend auf die jeweiligen Gebäude verteilt und innerhalb der Netzbereiche aggregiert. Dadurch entsteht ein zeitlich aufgelöstes Modell des elektrischen Haushaltsverbrauchs innerhalb der gesamten Stadt.

3.1.2 Modellierung des Wärmebedarfs

Neben dem Stromverbrauch spielt der thermische Energiebedarf der Gebäude eine zentrale Rolle für die Analyse zukünftiger Energiesysteme. Die Abschätzung des Wärmebedarfs erfolgt gebäudescharf auf Basis verfügbarer Geodaten sowie typologischer Annahmen. Aufgrund der begrenzten

und teilweise inkonsistenten Datenverfügbarkeit zu gebäudespezifischen energetischen Eigenschaften war die Entwicklung einer eigenen Methodik erforderlich, um den Wärmebedarf der Gebäude näherungsweise bestimmen zu können. Ziel ist dabei eine möglichst realitätsnahe Abbildung des jährlichen Wärmebedarfs auf Gebäudeebene für die Stadt Wittichenau.

Grundlage bilden öffentlich verfügbare Geodaten, insbesondere zu Gebäudeumringen, Grundflächen, Höheninformationen sowie Nutzungen, u.a. aus Geodaten Sachsen und OpenStreetMap. Darüber hinaus werden zur Wärmebedarfsabschätzung weitere Parameter benötigt, wie in Abbildung 3.2 dargestellt. Da diese Informationen häufig nicht direkt verfügbar sind, wurden zentrale Einflussgrößen – insbesondere Gebäudetyp, energetischer Standard (Wärmeschutzklasse) und Sanierungszustand – im Rahmen einer eigenen Klassifikationsmethodik bestimmt.

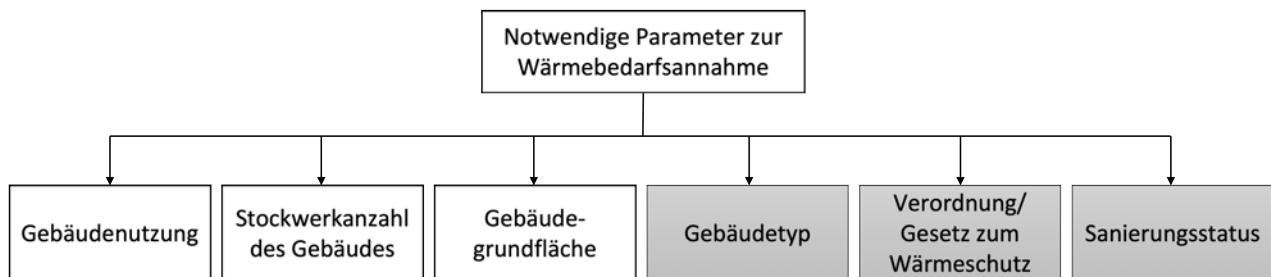


Abbildung 3.2: Übersicht der benötigten Parameter zur Wärmebedarfsannahme, grau markierte Parameter wurden durch die angewandte Methodik identifiziert, **Quelle:** Eigene Darstellung

Die Klassifizierung der Gebäude erfolgte anhand äußerlich erkennbarer Merkmale. Hierzu wurde die Stadt Wittichenau mithilfe digitaler Werkzeuge (u. a. Apple Karten mit „Look-Around“-Funktion) sowie ergänzender Vor-Ort-Begehungen systematisch erfasst. Auf dieser Grundlage wurden Gebäude in Kategorien wie Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser unterschiedlicher Größe, Reihenhäuser sowie Sonderbauten eingeteilt. Parallel dazu erfolgte eine Zuordnung zu energetischen Klassen basierend auf Baualtersstufen und typischen Wärmeschutzstandards (z. B. Wärmeschutzverordnung (WSVO) und Energieeinsparverordnung (EnEV)-Generationen bis hin zum Gebäudeenergiegesetz (GEG)). Die Methodik orientiert sich dabei an etablierten Gebäudetypologien, insbesondere nach TABULA [7].

Zur Sicherstellung der Datenqualität wurden die erhobenen Klassifikationen mit bestehenden Geodaten abgeglichen und anhand repräsentativer Gebäudebeispiele validiert. Auf Basis dieser konsolidierten Datengrundlage erfolgt die Ableitung spezifischer Heizwärmebedarfe für die einzelnen Gebäudekategorien.

Zusätzlich werden klimatische Einflüsse berücksichtigt, indem meteorologische Datensätze zur Berechnung temperaturabhängiger Lastgänge herangezogen werden. Dadurch können zeitlich hochaufgelöste Wärmebedarfsprofile generiert werden, die als Grundlage für die Simulation von Heiztechnologien – insbesondere Wärmepumpen – dienen.

Zur Veranschaulichung der entwickelten Klassifikationsmethodik wird exemplarisch ein Gebäude aus der Stadt Wittichenau betrachtet (vgl. Abbildung 3.3). Ziel ist es, die drei zentralen Klassifizierungsschritte – Gebäudetyp, Wärmeschutzstandard und Sanierungszustand – nachvollziehbar darzustellen.



Abbildung 3.3: Gebäudebeispiel zur Validierung der Methodik, hier: Einfamilienhaus (gelbe Markierung), 1. WSVO (hellblaue Markierung), Saniert (dunkelblaue Markierung), **Quelle:** Foto aus [10]

Im *ersten Schritt* erfolgt die Einordnung des Gebäudetyps anhand äußerlich erkennbarer Merkmale sowie geometrischer Kenngrößen. Im vorliegenden Beispiel deuten Gebäudegröße, Struktur und Nutzung auf ein Einfamilienhaus hin. Ergänzend wird aus den Geodaten eine beheizte Fläche von etwa 128 m² abgeleitet.

Im *zweiten Schritt* wird der energetische Standard des Gebäudes abgeschätzt. Anhand von Bauform, Fensterstruktur sowie historischen Geodaten wird das Gebäude der ersten WSVO (1977) zugeordnet. Abschließend erfolgt die Bewertung des Sanierungszustands. Sichtbare Merkmale wie erneuerte Fenster, Dach und Fassadenelemente weisen auf eine energetische Sanierung hin, sodass das Gebäude entsprechend klassifiziert wird.

Das Beispiel verdeutlicht das grundlegende Vorgehen der Methodik: Durch die Kombination aus Geodatenanalyse und visueller Klassifikation können fehlende Gebäudedaten systematisch ergänzt und für die Wärmebedarfsabschätzung nutzbar gemacht werden.

3.2 Modellierung dezentraler Energietechnologien

Zur Analyse zukünftiger Energiesysteme werden verschiedene dezentrale Energietechnologien berücksichtigt. Dazu zählen insbesondere Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen sowie elektrische Fahrzeuge.

Zur Abschätzung des potenziellen jährlichen Energieertrags von Photovoltaikanlagen wurden bspw. simulationsbasierte Jahresrechnungen auf Gebäudeebene durchgeführt. Hierfür kam die am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) der Technischen Universität Dresden entwickelte Open-Source-Toolbox [11] in Kombination mit meteorologischen Daten des Testreferenzjahres 2016 des Deutschen Wetterdienstes [12] zum Einsatz. Als Referenz wurde eine

ideal ausgerichtete Photovoltaik (PV)-Anlage definiert, deren maximaler Jahresertrag mit 100 % normiert wurde. Der spezifische Energieertrag in Abhängigkeit von Dachausrichtung und -neigung ist in Abbildung 3.4 dargestellt; Dachflächen mit mehr als 60 % des Referenzertrags werden als geeignet klassifiziert. Auf dieser Grundlage wurden die technisch nutzbaren Dachflächen identifiziert und das installierbare Leistungspotenzial unter Annahme einer mittleren Leistungsdichte von 200 W m^{-2} bestimmt [13, 14]. Für das Untersuchungsgebiet ergibt sich daraus ein Gesamtpotenzial von etwa 15,3 MW installierter Leistung sowie ein jährlicher Stromertrag von rund 13,2 GW h.

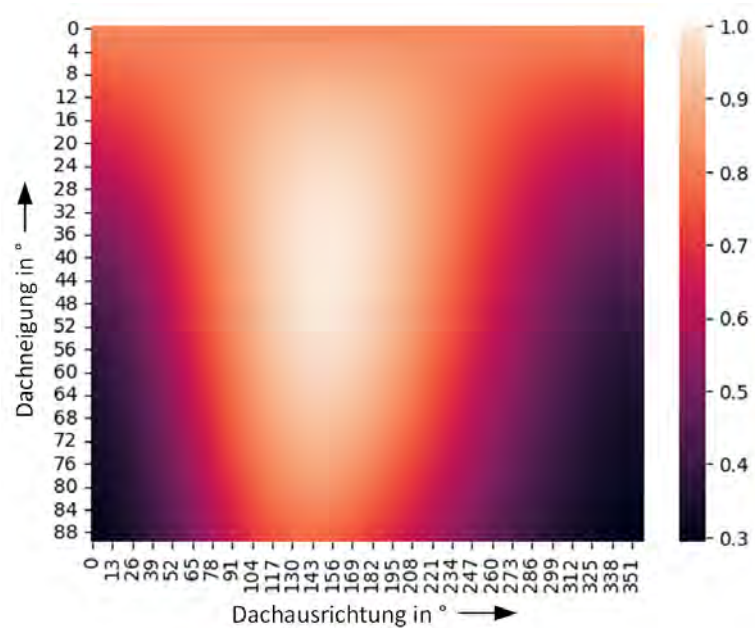


Abbildung 3.4: Spezifischer PV-Ertrag in Abhängigkeit von Dachausrichtung und Dachneigung

Der Einsatz von Wärmepumpen wird über Szenarien zur zukünftigen Entwicklung der Wärmeversorgung modelliert. Dabei wird angenommen, dass ein zunehmender Anteil der Gebäude von fossilen Heizsystemen auf elektrische Wärmepumpen umstellt. Der daraus resultierende zusätzliche Strombedarf wird aus dem zuvor berechneten Wärmebedarf der Gebäude abgeleitet.

Auch die Elektrifizierung des Verkehrssektors wird berücksichtigt. Für Elektrofahrzeuge werden typische Ladeprofile angenommen, die auf statistischen Mobilitätsdaten basieren. Die Ladeleistung wird den jeweiligen Haushalten zugeordnet und in die Stromlastberechnung integriert.

3.3 Szenarienentwicklung

Um mögliche zukünftige Entwicklungen des Energiesystems zu untersuchen, werden verschiedene Szenarien bis zum Jahr 2050 entwickelt. Ziel ist es, konsistente und realistische Zukunftspfade bis zum Jahr 2050 abzuleiten, die als Grundlage für die Bewertung von Energiesystementwicklungen und Infrastrukturbedarfen dienen. Die Szenarienbildung integriert zentrale Einflussgrößen wie

Bevölkerungsentwicklung, Leerstandsdynamik, Sanierungsraten im Gebäudebestand sowie technologiespezifische Ausbaupfade. Ausgangspunkt bildet die Zusammenführung der Datengrundlagen aus Wärme- und Stromanalysen in einem integrierten Energieatlas. Darauf aufbauend werden die relevanten Randbedingungen für jedes Szenario jährlich fortgeschrieben. Der prinzipielle Berechnungsablauf ist der Abbildung 3.5 zu entnehmen.

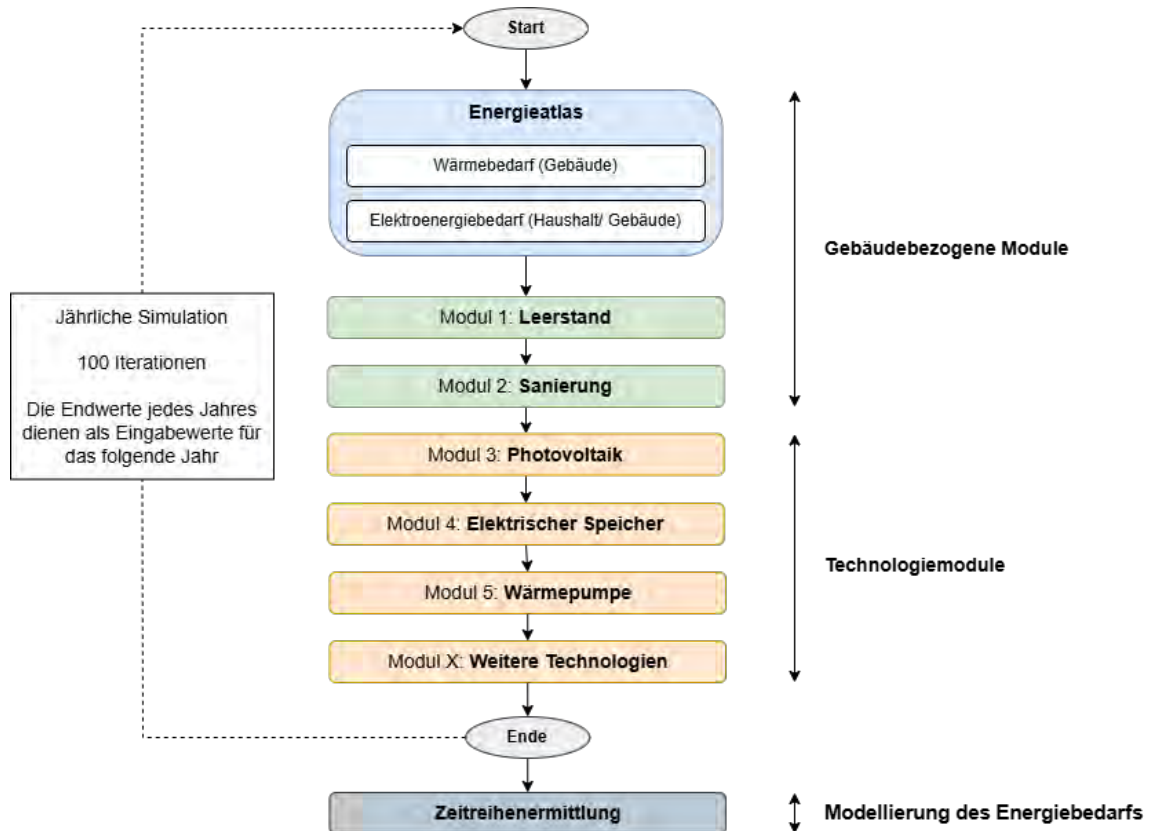


Abbildung 3.5: Struktur des Berechnungsablaufs, Quelle: Eigene Darstellung

Die Simulation erfolgt iterativ in zwei Dimensionen: Zum einen werden die Entwicklungen jährlich bis 2050 abgebildet, zum anderen werden insgesamt 100 stochastische Durchläufe durchgeführt, um Unsicherheiten und Variabilitäten in der Systementwicklung zu berücksichtigen. Auf diese Weise entsteht eine statistisch belastbare Bandbreite möglicher Entwicklungspfade.

Ein zentraler Bestandteil der Szenarienentwicklung ist die gebäudescharfe Verteilung von Technologien. Hierzu wird ein attributbasiertes Verfahren verwendet, das auf einer Kombination aus Ausschluss- und Wichtungskriterien basiert. Zunächst werden ungeeignete Gebäude anhand technischer oder regulatorischer Randbedingungen ausgeschlossen. Für die verbleibenden Gebäude erfolgt anschließend eine Bewertung anhand technologiespezifischer Kriterien, wie bspw. Gebäudetyp, energetischer Zustand oder vorhandene Infrastruktur. Die Gesamtbewertung eines Gebäudes ergibt sich aus der Kombination der Einzelkriterien und wird normiert, sodass eine vergleichbare Verteilung über den gesamten Gebäudebestand gewährleistet ist. Auf dieser Grundlage erfolgt eine gewichtete Zufallsziehung, bei der Gebäude mit höherer Eignung eine entsprechend höhere Wahrscheinlichkeit für die Zuweisung einer Technologie aufweisen. Dieser Prozess wird iterativ

durchgeführt, bis die jeweiligen Ausbauziele eines Szenarios erreicht sind. Durch die stochastische Komponente entstehen unterschiedliche, jedoch konsistente Technologieverteilungen, die reale Entscheidungsunsicherheiten widerspiegeln. Die resultierenden Szenarien ermöglichen somit eine differenzierte Analyse möglicher Transformationspfade sowie deren Auswirkungen auf Energiebedarf, Erzeugung und Netzauslastung.

3.4 Analyse der Netzauswirkungen

Ein zentrales Ziel der Untersuchung besteht darin, die Auswirkungen zukünftiger Energieentwicklungen auf die elektrische Netzinfrastruktur zu bewerten. Hierzu wurde ein zeitlich hochaufgelöster, gebäudescharfer Modellierungsansatz verwendet. Im Gegensatz zu vereinfachten Standardlastprofilen ermöglicht dieser die realistische Abbildung von Lastspitzen und Gleichzeitigkeitseffekten verschiedener Technologien. Hierzu wurden die zuvor entwickelten Technologiemodelle mit den Szenarien verknüpft.

Für jeden Hausanschluss wird ein synthetischer Summenlastgang erzeugt, der sich aus der Überlagerung einzelner zeitaufgelöster Komponenten ergibt. Dazu zählen insbesondere Haushaltslasten, PV-Einspeisung, der elektrische Leistungsbedarf von Wärmepumpen sowie Ladeprofile von Elektrokraftfahrzeug (EKFZ). Abbildung 3.1 zeigt schematisch diesen Ansatz. Durch die zeitgleiche Modellierung dieser Komponenten können typische Lastkonstellationen, wie paralleler Verbrauch bei geringer Einspeisung, realitätsnah erfasst werden. Der Ansatz erlaubt somit die Abbildung dynamischer Lastverläufe, einschließlich Lastspitzen und Rückspeisungen, und bildet eine robuste Grundlage für die Analyse von Netzbelastungen.

Die Analyse der Szenarien erfolgte sowohl auf aggregierter Ebene als auch exemplarisch für ausgewählte Niederspannungsnetze. Die zugrunde liegenden Netzdaten und Transformatorparameter wurden vom Verteilnetzbetreiber bereitgestellt, wobei die Darstellung der Ergebnisse bewusst anonymisiert erfolgte. Die Kombination aus gebäudebasierter Modellierung, technologischer Szenarioanalyse und netzbezogener Auswertung ermöglicht somit eine umfassende Bewertung zukünftiger Entwicklungen des lokalen Energiesystems.

3.5 Dissemination

Im Rahmen des Forschungsprojektes hat die Dissemination und damit der Transfer der Forschungsergebnisse in die Öffentlichkeit sowie die Berücksichtigung der lokalen Randbedingung für die Szenarienentwicklungen einen hohen Stellenwert. In diesem Zusammenhang wurden einerseits regelmäßige Workshops mit lokalen Akteuren aus Wirtschaft, Politik und engagierten Bürgern durchgeführt. Andererseits wurden zwei Bürgerbefragungen zum Abgleich der getroffenen Randbedingungen durchgeführt sowie regelmäßig im lokalen Ortsblatt über aktuelle Ergebnisse informiert.

3.5.1 Einbindung lokaler Akteure

Ziel war es die lokalen Prozessträger in einer Expertengruppe zusammenzubringen, d.h. Wissenschaftler:innen bzw. Expert:innen, teils aus Forschungsinstitutionen des Projektteams, teils aus Unternehmen mit Bezug zur Energiewirtschaft, teils mit Bezug zur Region sowie Teilnehmern aus der lokalen Politik. Inhaltlich lag der Schwerpunkt hierbei die verschiedenen Akteure über aktuelle Schritte zu informieren, zu integrieren, lokale Einflüsse zu berücksichtigen und damit eine höhere Akzeptanz bei den in der Region lebenden Personen zu schaffen. Dies erfolgte innerhalb regelmäßiger Treffen mit den genannten Vertretern. Hierdurch erfolgte ein direkter gegenseitiger Transfer zwischen aktuellen Informationen bzw. Gegebenheiten vor Ort und Forschungsergebnissen, wodurch insgesamt die entwickelten Szenarien positiv validiert wurden.

3.5.2 Bürgerbefragung und -dialog

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zwei Befragungen der Bürger:innen sowie mehrere direkte Befragungen von größeren Unternehmen vor Ort durchgeführt.

Die Bürgerbefragungen in der Stadt Wittichenau verfolgten zugleich mehrere Ziele. Zum Einen diente die Befragung der Datenerhebung zu Themen wie der allgemeinen Wohnsituation (Gebäudetyp, Anzahl Bewohner, Sanierungszustand, Ortsteil etc.) und der energetischen Versorgung (verwendeter Strommix, Heizungsanlagentyp, Nutzung regenerativer Technologien usw.). Daten, welche für die weiteren Bearbeitungsschritte im Projekt hinsichtlich der Analyse des energetischen Ist-Zustandes von Relevanz waren und folglich inhalts- und systembezogene Wirksamkeitsfaktoren darstellten. Es wurden aber auch prozessbezogene Daten erhoben, wie etwa Bedürfnisse/ Wünsche in der Versorgung/ Infrastruktur, Anforderungen, Akzeptanz für neue Technologien und Versorgungsansätze, Verhalten während der Energiewende und Wissensstand zu Fördermöglichkeiten. Die angeschnittenen Themen dienten zum einen dazu, Einblick in die bisherigen Prozessaktivitäten und der Analyse des Ist-Standes aus Sicht der Bürger der Stadt Wittichenau zu erhalten. Zum anderen sollten Daten zum Befinden und Transparenz während des Projektes erfahren werden, um das Projektmanagement stetig zu eruieren und anzupassen.

Insgesamt wurden Daten hinsichtlich eventueller Informationsdefizite, Verständnis/ Toleranz gegenüber neuen Ansätzen, Einstellung zum persönlichem Beitrag zur Energiewende, Impulse, Bedarfe/ Bedürfnisse, möglicher Flexibilitäten uvm. zu erhoben.

Die in dem Projekt umgesetzte Informationsstrategie und Transparenz durch die regelmäßige Veröffentlichung von Ergebnissen erfuhr durch die Bürger und Bürgerinnen eine positive Resonanz. Dies spiegelt sich ebenfalls in den positiven Ergebnissen der Bürgerbefragungen wieder, in denen einen Rücklaufquote von über 25% erreicht wurde.

Ein Weiterer Punkt hierbei war der Bürgerdialog. In zwei Veranstaltungen wurden interessierte Bürger über das Projekt, Ergebnisse sowie allgemeine Fragen zur Transformation von Energiesystemen informiert werden sowie selber einen Input für das Projekt durch eigene lokale Erkenntnisse beitragen.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchung umfassen zunächst die Analyse des energetischen Ist-Zustands der Stadt Wittichenau. Darauf aufbauend werden mögliche zukünftige Entwicklungen des Energiesystems bis zum Jahr 2050 untersucht. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der zunehmenden Elektrifizierung der Wärmeversorgung, dem Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung sowie der Verbreitung von Elektromobilität. Abschließend werden die daraus resultierenden Auswirkungen auf die elektrische Netzinfrastuktur analysiert.

4.1 Energetischer Ist-Zustand

Die Analyse des aktuellen Energiesystems zeigt, dass der Energieverbrauch der Stadt Wittichenau stark durch den Gebäudebestand geprägt ist. Insgesamt wurden für den Wärmeatlas 1.176 Gebäude im Stadtkern Wittichenau und dem Ortsteil Keula aufgenommen, analysiert und klassifiziert. Diese Gebäude weisen eine Gesamtnutzfläche von $A_{ges} = 268.790 \text{ m}^2$ auf, bei der ein jährlicher Gesamtwärmebedarf von $Q_{ges} = 26.443 \text{ MWh/a}$ ermittelt wurde. Der durchschnittliche spezifische Wärmebedarf liegt bei $q_{spez} = 100,88 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$. Diese Daten reflektieren die energetische Struktur des Gebäudebestands und verdeutlichen die Relevanz der Wärmeversorgung für die Energieplanung der Stadt. Nachfolgend ist ein Ausschnitt des entwickelten Energieatlas in Abbildung 4.1 (links der gebäudescharfe Wärmeatlas, rechts der Elektroenergieatlas) für die Zelle Wittichenau dargestellt. Die dargestellten Energiebedarfe stellen keine gemessenen Endenergieverbräuche dar. Gemäß §10 Absatz 2 des Wärmeplanungsgesetz (WPG) ist die gebäudescharfe Darstellung berechneter Wärmebedarfe zulässig, da die Aggregationspflicht ausschließlich für gemessene Verbrauchsdaten gilt. Personenbezogene Daten wurden nicht verarbeitet [15].

Der Stromverbrauch verteilt sich räumlich relativ gleichmäßig über das Stadtgebiet, wobei höhere Lasten insbesondere in dichter bebauten Bereichen sowie in Zonen mit gewerblicher Nutzung auftreten. Die aggregierte Betrachtung der Gebäude ermöglicht die Erstellung eines räumlich aufgelösten Energieatlas, der den Energiebedarf auf Gebäude- und Netzebene darstellt.

Im Bereich der Wärmeversorgung dominiert weiterhin die Nutzung fossiler Energieträger. Viele Gebäude werden mit Erdgas- oder Ölheizungen beheizt. Gleichzeitig ist jedoch bereits eine zunehmende Verbreitung alternativer Heizsysteme zu beobachten. Insbesondere Wärmepumpen

gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung darstellen. [16]

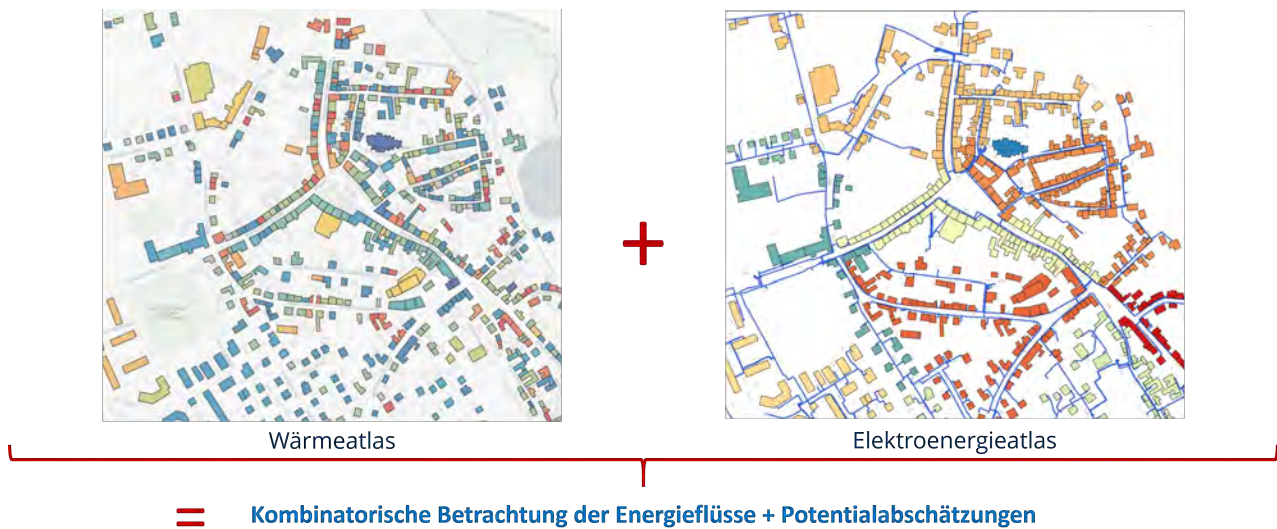


Abbildung 4.1: Zusammensetzung Energieatlas Wittichenau aus Wärmeatlas und Elektroenergieatlas, **Quelle:** Eigene Darstellung

Auch im Bereich der Stromerzeugung zeigt sich bereits eine wachsende Bedeutung dezentraler Anlagen. Photovoltaikanlagen auf Gebäudedächern stellen den größten Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung dar. Dennoch deckt die lokale Stromproduktion aktuell nur einen begrenzten Anteil des gesamten Strombedarfs. [4]

4.2 Entwicklungsszenarien bis 2050

Auf Basis der beschriebenen Modelle wurden verschiedene Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems bis zum Jahr 2050 erstellt. Diese Szenarien unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Geschwindigkeit der technologischen Transformation.

Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf der gekoppelten Simulation der Module Leerstand und Sanierungsrate, die aufgrund ihrer funktionalen Abhängigkeiten gemeinsam ausgewertet werden. Während die Sanierung ausschließlich auf bewohnte Gebäude angewendet wird, beeinflusst der zunehmende Leerstand direkt die Anzahl potenziell sanierbarer Gebäude und damit die Entwicklung des Wärmebedarfs. Die Analyse erfolgt für zwei Szenarien mit unterschiedlichen, jeweils abfallenden Bevölkerungsentwicklungen: Szenario V1: BevMax und Szenario V2: BevMin. Diese Annahmen beruhen auf der Analyse in Grun [PGrün]. Szenario V1 (BevMax) zeigt dabei den geringeren Bevölkerungsrückgang, während Szenario V2 (BevMin) einen stärkeren Rückgang und damit die minimale Bevölkerungsanzahl abbildet. Für beide Szenarien wurden jeweils 100 stochastische Simulationsdurchläufe durchgeführt, um Unsicherheiten in der Entwicklung von Leerstand und Sanierungsdynamik abzubilden. Die Auswertung konzentriert sich auf die Entwicklung des summierten Wärmebedarfs sowie des spezifischen Wärmebedarfs der bewohnten Gebäude.

Abbildung 4.2 zeigt die Entwicklung des jährlichen Gesamtwärmebedarfs für alle Simulationsläufe. In beiden Szenarien ist ein deutlicher Rückgang des Wärmebedarfs bis 2050 zu beobachten. Dieser resultiert aus zwei wesentlichen Effekten: dem steigenden Leerstand, der die beheizte Gebäudefläche reduziert, sowie der fortschreitenden energetischen Sanierung, die den spezifischen Wärmebedarf senkt. Die größte Streuung der Simulationsergebnisse tritt im Zeitraum zwischen 2030 und 2040 auf, da in dieser Phase sowohl verstärkte Sanierungsaktivitäten als auch zunehmende Leerstände gleichzeitig wirksam werden.

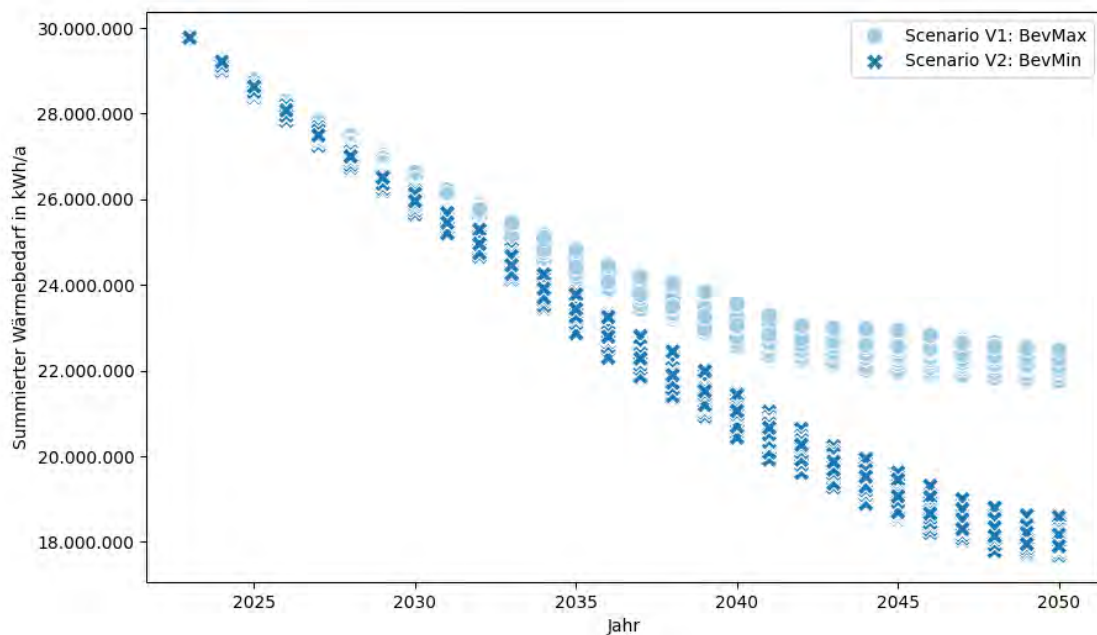


Abbildung 4.2: Entwicklung des summierten jährlichen Wärmebedarfs der betrachteten Zelle je Simulationsdurchlauf ($n = 100$) für die Szenarien V1: BevMax (hellblau) und V2: BevMin (dunkelblau) im Zeitraum 2023 bis 2050, **Quelle:** Eigene Darstellung

Die aggregierten Ergebnisse zeigen, dass der Gesamtwärmebedarf der betrachteten Zelle bis 2050 signifikant sinkt. Im Szenario V1 reduziert sich dieser von rund 29,8 GWh im Jahr 2023 auf etwa 21,7 GWh, während im Szenario V2 ein Rückgang auf etwa 17,7 GWh zu verzeichnen ist. Parallel dazu führt der Bevölkerungsrückgang zu einem deutlichen Anstieg der Leerstandsquote.

Am Beispiel des Szenarios V2 zeigt sich, dass im Jahr 2050 nur noch etwa 76 % der Gebäude bewohnt sind. Der Gesamtwärmebedarf sinkt in diesem Fall um rund 40 %, während sich der durchschnittliche spezifische Wärmebedarf der bewohnten Gebäude um etwa 30 % reduziert. Dies verdeutlicht die kombinierte Wirkung von strukturellem Wandel (Leerstand) und energetischer Effizienzsteigerung (Sanierung).

Die räumliche Verteilung dieser Entwicklungen ist exemplarisch in Abbildung 4.3 dargestellt. Diese zeigt für ausgewählte Jahre die gebäudescharfe Entwicklung des spezifischen Wärmebedarfs sowie die zunehmende Bedeutung leerstehender Gebäude im Betrachtungsgebiet.

Weiterhin ist ein zentraler Bestandteil der Szenarien die zunehmende Elektrifizierung der Wärmeversorgung. Mit steigenden Sanierungsraten im Gebäudebestand wird angenommen, dass ein wachsender Anteil der Gebäude mit elektrischen Wärmepumpen ausgestattet wird (Vgl. Abbildung

4.4). Dadurch sinkt zwar der Bedarf an fossilen Energieträgern, gleichzeitig steigt jedoch der Stromverbrauch insbesondere in den Wintermonaten.

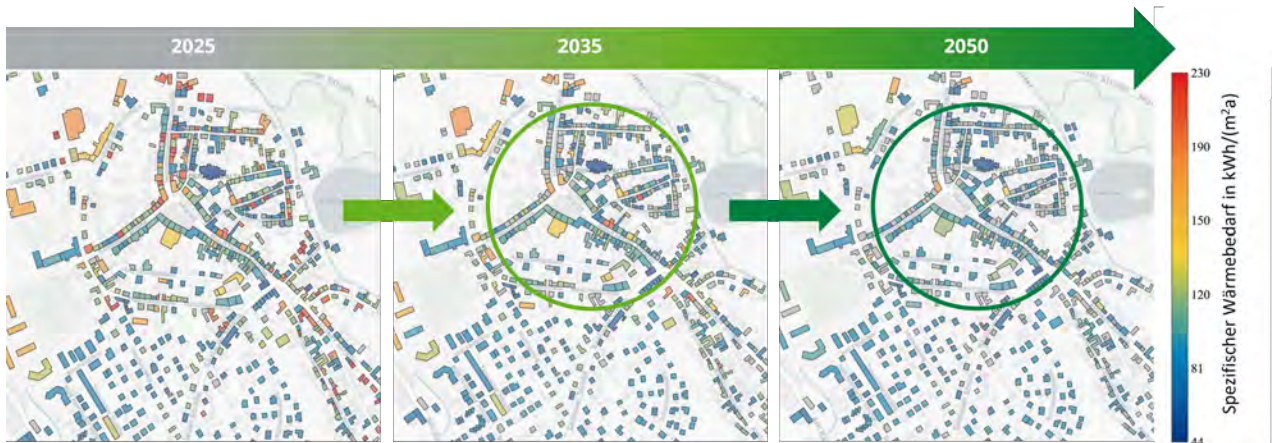


Abbildung 4.3: Simulierter Wärmebedarf im Gebäudebestand der Stadt im Szenario V1: BevMax für die Jahre 2025, 2035 und 2050 für einen beispielhaften Simulationsdurchlauf. Die Darstellung basiert auf einer realisationsbezogenen Simulation und berücksichtigt nicht die Streuung bzw. Unsicherheit aus der zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung. **Quelle:** Eigene Darstellung



Abbildung 4.4: Simulierter Wärmepumpen-Zubau im Gebäudebestand der Stadt im Szenario V1: BevMax für die Jahre 2025, 2035 und 2050 für einen beispielhaften Simulationsdurchlauf. Die Darstellung basiert auf einer realisationsbezogenen Simulation und berücksichtigt nicht die Streuung bzw. Unsicherheit aus der zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung. **Quelle:** Eigene Darstellung

Auch der Ausbau von Photovoltaikanlagen wird in den Szenarien deutlich vorangetrieben. Ein zunehmender Anteil der Gebäude nutzt Dachflächen zur lokalen Stromerzeugung. Dadurch steigt die installierte Leistung erneuerbarer Energien innerhalb der Stadt deutlich an. Unter Annahme typischer Installationsdichten kann ein bedeutender Anteil des zukünftigen Strombedarfs lokal durch Photovoltaik gedeckt werden. Besonders Ein- und Zweifamilienhäuser bieten aufgrund ihrer Dachflächen gute Voraussetzungen für die Installation solcher Anlagen, siehe Abbildung 4.5. Die Stromerzeugung aus Photovoltaik weist jedoch eine starke zeitliche Variabilität auf. Während in den Sommermonaten hohe Erträge erzielt werden, ist die Stromproduktion im Winter deutlich geringer. Gleichzeitig fällt ein Großteil der Stromerzeugung in die Mittagsstunden, während der Strombedarf häufig in den Morgen- und Abendstunden höher ist. Diese zeitlichen Unterschiede zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauch stellen eine zentrale Herausforderung für zukünftige

Energiesysteme dar und können zu neuen Anforderungen an Speichertechnologien sowie an die Netzinfrastruktur führen.

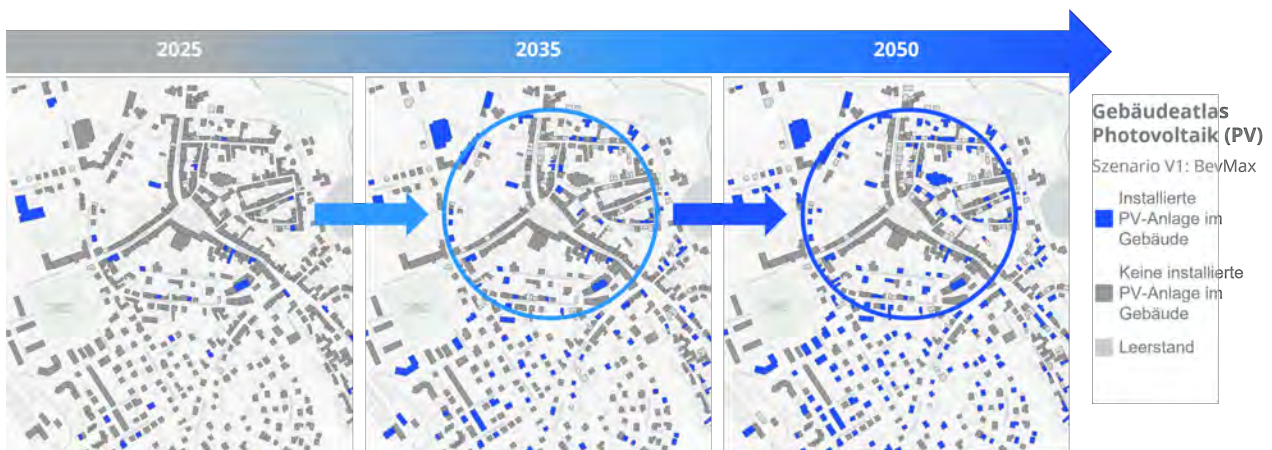


Abbildung 4.5: Simulierter PV-Zubau im Gebäudebestand der Stadt im Szenario V1: BevMax für die Jahre 2025, 2035 und 2050 für einen beispielhaften Simulationsdurchlauf. Die Darstellung basiert auf einer realisationsbezogenen Simulation und berücksichtigt nicht die Streuung bzw. Unsicherheit aus der zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung.
Quelle: Eigene Darstellung

Darüber hinaus wird eine zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs angenommen. Mit wachsendem Anteil von Elektrofahrzeugen entstehen zusätzliche Stromlasten durch Ladevorgänge im privaten und öffentlichen Bereich. Diese treten häufig in den Abendstunden auf und können die bestehende Laststruktur der Stromnetze verändern. Die Kombination dieser Entwicklungen führt zu einer stärkeren Kopplung der Energiesektoren Strom, Wärme und Mobilität. Dadurch entstehen neue Wechselwirkungen innerhalb des lokalen Energiesystems.

4.3 Sensitivitätsanalysen zu Sanierungsraten

Um eine Aussage über die Robustheit der Ergebnisse bei einer angenommenen Sanierungsrate von 1 % im sächsischen Gebäudebestand zu machen, wurden ergänzend Sensitivitätsanalysen mit alternativen Sanierungsraten durchgeführt. Gemäß [17] lag die durchschnittliche Sanierungsrate im deutschen Gebäudebestand im Jahr 2024 lediglich bei 0,69 %. Gleichzeitig wird eine jährliche Sanierungsrate von etwa 2 % als notwendig erachtet, um die nationalen Klimaziele bis 2030 zu erreichen.

In diesem Zusammenhang wurden zusätzliche Simulationen für die Szenariovariante V2: BevMin mit einer 0,7 %-igen und einer 2 %-igen jährlichen Sanierungsrate durchgeführt. Die Abbildung 4.6 zeigt den Verlauf des summierten jährlichen Wärmebedarfs der betrachteten Zelle in den Kernjahren 2025, 2035 und 2050 für jeweils 100 Simulationsdurchläufe pro Sanierungsrate. Leerstehende Gebäude wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Deutlich wird, dass bei einer niedrigeren Sanierungsrate von 0,7 % der Rückgang des summierten Wärmebedarfs deutlich langsamer verläuft, während bei einer 2 %-igen Rate ein spürbar stärkerer Rückgang erzielt wird. Dies unterstreicht den Einfluss der Sanierungsdynamik auf die zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs im Gebäudebestand und bestätigt zugleich die Plausibilität

der Ergebnisse der angenommenen 1 %-Rate im Kontext aktueller und politisch angestrebter Zielgrößen.

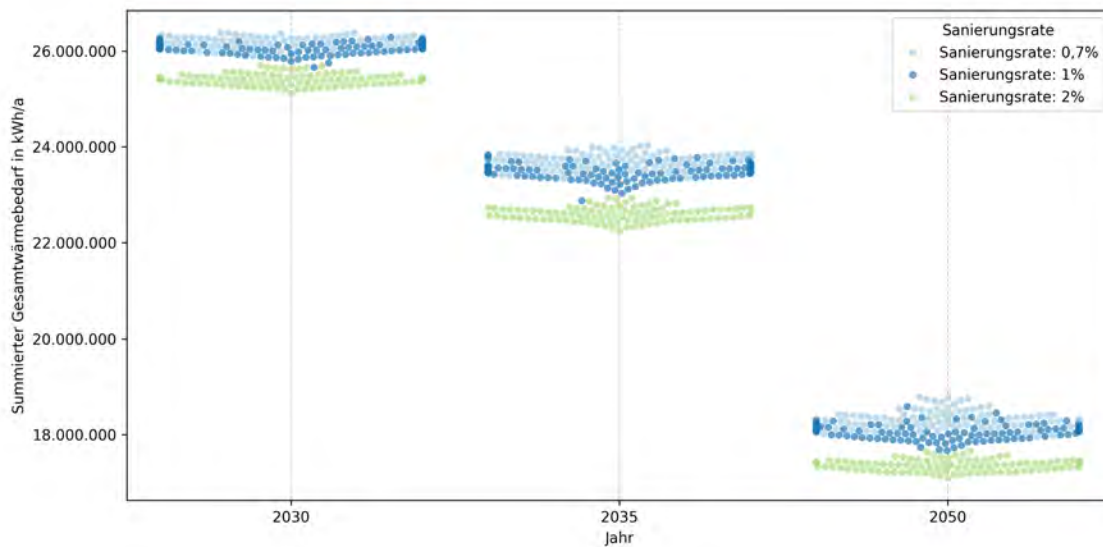


Abbildung 4.6: Entwicklung des summierten jährlichen Wärmebedarfs der betrachteten Zelle für verschiedene Sanierungsraten (0,7 %, 1 % und 2 %) im Szenario V2: BevMin in den Jahren 2025, 2035 und 2050. Jeder Punkt repräsentiert einen Simulationsdurchlauf, **Quelle:** Eigene Darstellung

4.4 Veränderungen der Stromlasten

Die Analyse der zukünftigen Stromlasten zeigt, dass in beiden betrachteten Szenarien ein deutlicher Anstieg der Netzbelastung bis zum Jahr 2050 zu erwarten ist. Treiber dieser Entwicklung sind insbesondere der zunehmende Einsatz von Wärmepumpen zur Deckung des Wärmebedarfs, die wachsende Elektromobilität sowie der Ausbau von Photovoltaikanlagen.

Abbildung 4.7 zeigt die aggregierte Entwicklung der Transformatorbelastung im gesamten Versorgungsgebiet. Dabei wird deutlich, dass die maximale Auslastung in beiden Szenarien zunimmt, im Szenario mit maximaler Bevölkerungsentwicklung (V1) jedoch deutlich stärker als im Szenario V2. Während der überwiegende Anteil der Netzzustände weiterhin innerhalb eines unkritischen Bereichs von etwa –100 bis 100 % liegt, treten insbesondere im Szenario V1 ab etwa 2035 vermehrt Überschreitungen der Auslastungsgrenze auf, die im Extremfall bis zu rund 190 % erreichen können. Neben der steigenden Last ist auch eine zunehmende Rückspeisung in das Netz zu beobachten, die auf den Ausbau von PV-Anlagen zurückzuführen ist. Diese tritt vor allem in den Sommermonaten auf, während Lastspitzen hauptsächlich in den Wintermonaten und Abendstunden entstehen. Die zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch führt zu einer zunehmenden Spreizung der Lastbereiche.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass das Stromsystem künftig deutlich dynamischer belastet wird. Während typische Betriebszustände weiterhin unkritisch bleiben, nehmen Extremwerte und damit potenzielle Engpasssituationen insbesondere im Szenario V1 deutlich zu.

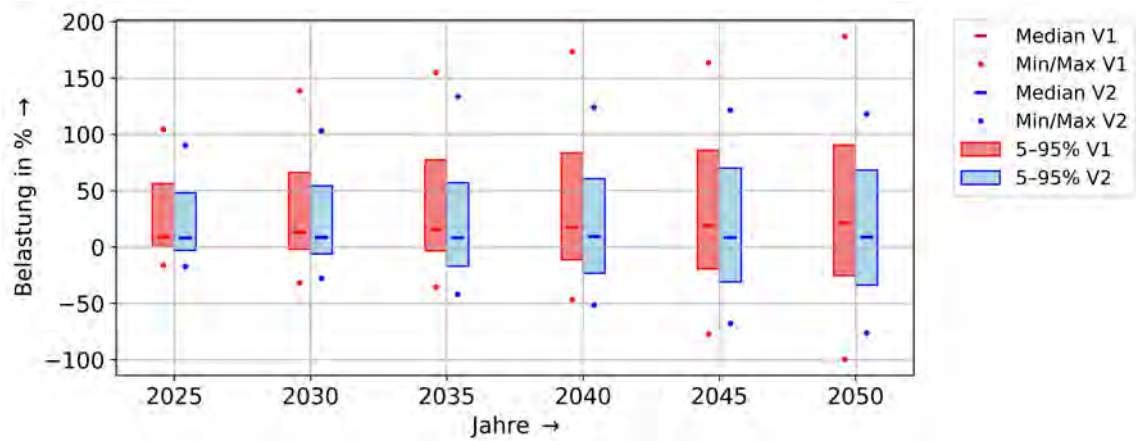


Abbildung 4.7: Entwicklung der aggregierten Transformatorbelastung im gesamten Versorgungsgebiet

4.5 Auswirkungen auf die Netzinfrastruktur

Die steigenden und zunehmend volatilen Stromlasten wirken sich direkt auf die Netzinfrastruktur aus. Sowohl Transformatoren als auch Leitungen werden stärker beansprucht, wobei die Auswirkungen stark von der lokalen Netzstruktur abhängen. Am Beispiel eines Stadtkernnetzes mit hoher Lastdichte zeigt sich, dass Transformatorüberlastungen ohne Optimierungsmaßnahmen ab etwa 2035 auftreten und bis 2050 deutlich zunehmen können (vgl. Abbildung 4.8). Ursache hierfür ist insbesondere die Kombination aus hohem Wärmebedarf unsanierter Gebäude, zunehmender Elektromobilität und vergleichsweise geringem PV-Ausbau. Maßnahmen wie Lademanagement und Speicheroptimierung können zwar Einspeisespitzen reduzieren, haben jedoch nur begrenzten Einfluss auf die Lastspitzen.

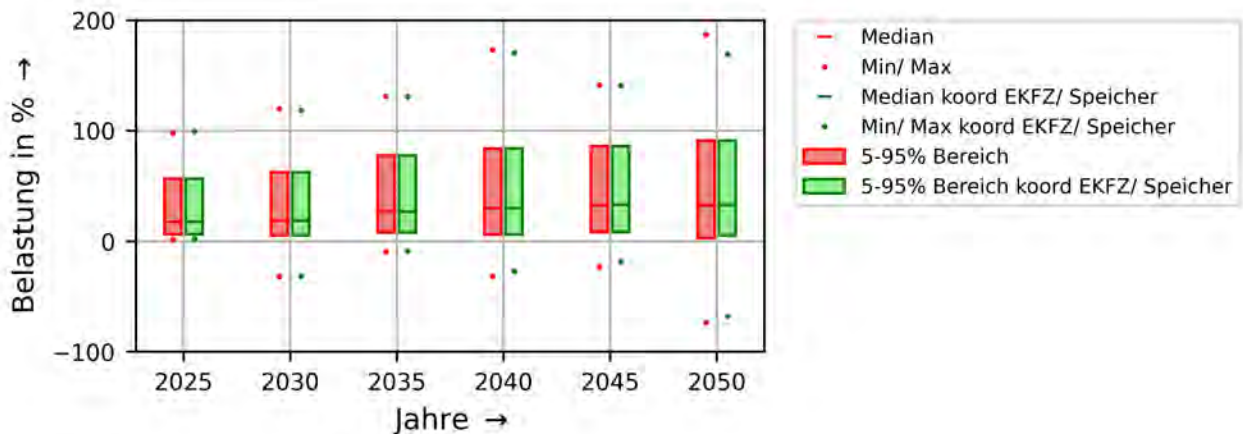


Abbildung 4.8: Transformatorbelastung im Beispielnetz (Stadtkern), Szenario V1

Die Analyse der Leitungsbelastungen zeigt ebenfalls einen deutlichen Anstieg bis 2050 (vgl. Abbildung 4.9). Besonders betroffen sind einzelne Hausanschlussleitungen, bei denen sowohl die Maximalwerte als auch die typischen Belastungen zunehmen. Dennoch bleiben die thermischen Belastungsgrenzen der Leitungen in allen untersuchten Fällen eingehalten.

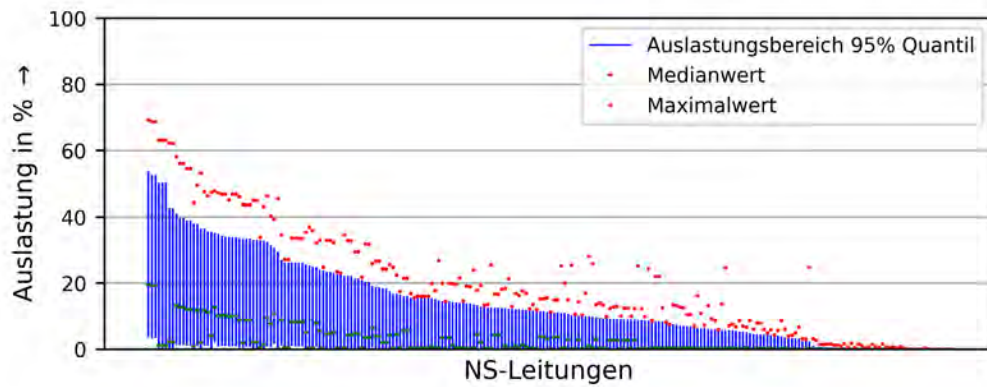


Abbildung 4.9: Leitungsbelastung im Stadtkernnetz im Jahr 2050 (Szenario V1)

Auch die Knotenspannungen verändern sich infolge der steigenden Lasten und Einspeisungen. Im Stadtkernnetz nehmen insbesondere die Spannungsabfälle zu, während lokal auch Spannungsanhebungen durch PV-Einspeisung auftreten (vgl. Abbildung 4.10). Trotz dieser Veränderungen werden die zulässigen Spannungsgrenzen im gesamten Untersuchungsgebiet eingehalten.

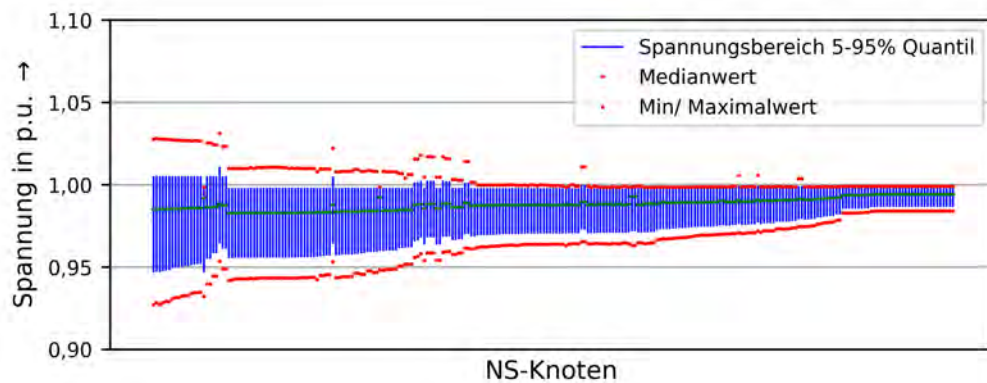


Abbildung 4.10: Knotenspannungen im Stadtkernnetz im Jahr 2050 (Szenario V1)

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Netzinfrastruktur insgesamt weiterhin funktionsfähig bleibt, jedoch punktuell zunehmenden Belastungen ausgesetzt ist. Während großflächige Überlastungen nicht zu erwarten sind, können lokal begrenzte Engpässe insbesondere in stark belasteten Netzbereichen auftreten. Diese erfordern perspektivisch entweder netztechnische Maßnahmen oder eine stärkere Integration netzdienlicher Betriebsstrategien.

4.6 Bedeutung für die zukünftige Energieplanung

Die Ergebnisse der Analyse verdeutlichen, dass die Transformation lokaler Energiesysteme erhebliche Auswirkungen auf bestehende Infrastrukturen haben kann. Gleichzeitig zeigen sie, dass eine detaillierte räumliche Modellierung notwendig ist, um diese Entwicklungen frühzeitig zu erkennen. Durch die gebäudebasierte Modellierung können potenzielle Netzengpässe bereits im Voraus identifiziert werden. Dies ermöglicht es Netzbetreibern und kommunalen Planern,

geeignete Maßnahmen zur Anpassung der Infrastruktur zu entwickeln. Dazu zählen bspw. der gezielte Netzausbau, der Einsatz von Speichern, die Steuerung flexibler Verbraucher oder auch die räumliche Planung erneuerbarer Energieanlagen. Die Kombination solcher Maßnahmen kann dazu beitragen, die Transformation des Energiesystems effizient und netzverträglich zu gestalten. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass zellulare Energiesysteme einen geeigneten Rahmen bieten, um lokale Energieflüsse zu analysieren und zukünftige Entwicklungen systematisch zu bewerten.

5 Einordnung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analyse zeigen deutlich, dass die Transformation lokaler Energiesysteme im suburbanen Raum mit tiefgreifenden Veränderungen der bestehenden Energieinfrastrukturen verbunden ist. Insbesondere die zunehmende Elektrifizierung der Wärmeversorgung sowie der Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung führen zu neuen Anforderungen an das elektrische Verteilnetz. Ein zentrales Ergebnis der Untersuchung ist die starke Bedeutung der Gebäudestruktur für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems. In Städten wie Wittichenau im suburbanen Raum dominieren Ein- und Zweifamilienhäuser, die häufig über individuelle Heizsysteme verfügen und gleichzeitig über große Dachflächen für Photovoltaikanlagen. Diese Kombination bietet einerseits gute Voraussetzungen für eine dezentrale Energieversorgung, führt andererseits jedoch zu einer starken räumlichen Streuung von Energieerzeugung und Energieverbrauch.

Die Szenarioanalysen zeigen, dass insbesondere der zunehmende Einsatz von Wärmepumpen zu einer deutlichen Verschiebung der Stromlasten führen kann. Während der heutige Stromverbrauch vergleichsweise gleichmäßig über das Jahr verteilt ist, entstehen zukünftig höhere Lasten während der Heizperiode. Diese zusätzlichen Lasten können insbesondere in kalten Winterperioden zu erhöhten Anforderungen an die Netzkapazitäten führen. Gleichzeitig führt der Ausbau von Photovoltaikanlagen zu einer stärkeren lokalen Stromerzeugung. In Zeiten hoher Sonneneinstrahlung kann die Stromproduktion zeitweise den lokalen Verbrauch übersteigen. Diese Entwicklungen verdeutlichen die zunehmende Bedeutung von Flexibilitätsoptionen innerhalb des Energiesystems. Dazu zählen bspw. elektrische Speicher, flexible Verbrauchssteuerung oder intelligente Ladestrategien für Elektrofahrzeuge. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die räumliche Heterogenität der beobachteten Effekte. Die Analysen zeigen, dass die Auswirkungen der Energiewende nicht gleichmäßig über das Stadtgebiet verteilt sind. Vielmehr treten potenzielle Netzengpässe häufig nur in bestimmten Teilbereichen auf, die durch eine besonders hohe Gebäudedichte oder eine hohe Konzentration bestimmter Technologien geprägt sind.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung räumlich hochaufgelöster Analysen für die Planung zukünftiger Energiesysteme. Aggregierte Betrachtungen auf regionaler oder nationaler Ebene können wichtige lokale Effekte häufig nicht ausreichend abbilden. Eine gebäudebasierte Modellierung ermöglicht hingegen eine deutlich differenziertere Bewertung möglicher Entwicklungen.

Gleichzeitig sind mit der gewählten Methodik auch gewisse Einschränkungen verbunden. Einige Annahmen, bspw. zur zukünftigen Verbreitung bestimmter Technologien oder zur Entwicklung des Energieverbrauchs, basieren auf Szenarien und statistischen Durchschnittswerten. Tatsächliche

Entwicklungen können hiervon abweichen, insbesondere wenn sich politische Rahmenbedingungen oder technologische Entwicklungen verändern.

Darüber hinaus wurden einige potenzielle Flexibilitätsoptionen in der vorliegenden Analyse nur eingeschränkt berücksichtigt. Dazu zählen bspw. dynamische Stromtarife, netzdienliche Steuerung von Wärmepumpen oder bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen. Diese Technologien könnten zukünftig eine wichtige Rolle bei der Integration erneuerbarer Energien spielen und sollten in zukünftigen Studien vertieft untersucht werden.

Trotz dieser Einschränkungen liefert die Untersuchung wichtige Erkenntnisse über die Transformation lokaler Energiesysteme im suburbanen Raum. Der vorgestellte methodische Ansatz ermöglicht eine detaillierte Analyse von Energiebedarfen, technologischen Entwicklungen und Netzauswirkungen und kann grundsätzlich auch auf andere Städte und Regionen übertragen werden.

6 Fazit

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt leistet einen zentralen Beitrag zur Weiterentwicklung zellularer Energiesysteme, die insbesondere für Transformationsprozesse in ehemaligen Kohleregionen von hoher Relevanz sind. Ein wesentliches Ergebnis ist die Entwicklung einer Methodik zur systematischen Erhebung und Verarbeitung technischer, ökonomischer und demografischer Daten. Darauf aufbauend wurde ein modulares, integratives Framework konzipiert, das die Erstellung und Bewertung regionaler Transformationsszenarien auf Basis öffentlich zugänglicher Bevölkerungs- und Gebäudedaten sowie aus Bürgerbefragungen abgeleiteter Parameter ermöglicht. Die Szenarien sind flexibel an lokale Gegebenheiten anpassbar. Für die Stadt Wittichenau wurde der aktuelle energetische Zustand analysiert und mögliche Entwicklungen bis 2050 bewertet. Die Ergebnisse zeigen die hohe Bedeutung des Gebäudebestands für die Struktur des lokalen Energiesystems. Besonders Ein- und Zweifamilienhäuser prägen Wärme- und Strombedarf und bieten zugleich Potenziale für dezentrale Photovoltaikerzeugung. Die Szenarioanalysen verdeutlichen, dass Elektrifizierung der Wärmeversorgung und zunehmende Elektromobilität zu erheblichen Laststeigerungen führen können, während der Ausbau erneuerbarer Erzeugung die Einspeisung in die Netze erhöht. Dies verstärkt die Dynamik der Stromflüsse und kann insbesondere in Niederspannungsnetzen zu einer Annäherung an technische Kapazitätsgrenzen führen. Die räumlich heterogene Ausprägung dieser Effekte unterstreicht die Notwendigkeit hochaufgelöster Analysen. Gebäudebasierte Modellierungen ermöglichen die frühzeitige Identifikation potenzieller Netzengpässe und die Ableitung geeigneter Infrastrukturmaßnahmen.

Der vorgestellte Ansatz zellularer Energiesysteme bietet einen geeigneten Rahmen zur systematischen Analyse lokaler Energieflüsse und zur Bewertung zukünftiger Entwicklungen. Die Kombination aus räumlicher Modellierung, Szenarioanalyse und Netzauswertung erlaubt eine ganzheitliche Betrachtung der energetischen Transformation. Perspektivisch sind eine stärkere Integration von Flexibilitätsoptionen sowie detailliertere Untersuchungen zu Netzsteuerungsstrategien vielversprechend. Der methodische Ansatz ist auf andere Regionen übertragbar und unterstützt die Analyse regionaler Unterschiede im Transformationsprozess. Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass die Energiewende auf lokaler Ebene sowohl Herausforderungen als auch Chancen birgt und eine frühzeitige, integrierte Infrastrukturplanung entscheidend für eine nachhaltige Systemtransformation ist.

Literatur

- [1] Joachim Seifert und Peter Schegner: *Zellulare Energiesysteme*. VDE Verlag, 2023. 230 S. ISBN: 978-3-8007-5557-8.
- [2] Anna Traupmann, Julia Vopava und Thomas Kienberger: „Wirk- und blindleistungsgenaue Modellierung von reduzierten Netzen im zellularen Ansatz“. In: (2019), S. 7.
- [3] Statistik Sachsen Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen: *Einwohnerzahlen nach Gemeinden als Excel-Arbeitsmappe*. 2022. URL: <https://www.statistik.sachsen.de/html/bevoelkerungsstand-einwohner.html> (besucht am 03. 11. 2022).
- [4] Martin Neumann et al.: *Integriertes Gemeindeentwicklungskonzept Wittichenau*. Juni 2022. URL: https://wittichenau.de/wp-content/uploads/2022/08/2022_GEK_Wittichenau_Endversion_komplett.pdf (besucht am 13. 02. 2023).
- [5] Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen Statistisches Landesamt: *Sächsische Gemeindezahlen: Ausgewählte Strukturdaten zum Bestand an Wohngebäuden und Wohnungen (Fortschreibung)*. 2021. URL: <https://www.statistik.sachsen.de/html/wohnungsbestand.html> (besucht am 19. 03. 2023).
- [6] Marina Botta und Kathleen Schwengberg: *Flächennutzungsplan mit integriertem Landschaftsplan der Stadt Wittichenau (Město Kulow)*. 2022. URL: <https://buergerbeteiligung.sachsen.de/portal/bplan/beteiligung/themen/1032202> (besucht am 16. 02. 2023).
- [7] Pauline Grun: „Analyse eines zellularen Energiesystems im suburbanen Raum am Beispiel der Stadt Wittichenau (südlich von Hoyerswerda)“. Diplomarbeit. 2023.
- [8] SAENA GmbH Sächsische Energieagentur: *Energieportal Sachsen*. 2023. URL: <https://www.energieportal-sachsen.de> (besucht am 20. 03. 2023).
- [9] J. Dickert: *Synthese von Zeitreihen elektrischer Lasten basierend auf technischen und sozialen Kennzahlen*. Dresden: TUDpress, 2016.
- [10] Apple Inc. Apple Inc.: *Apple Maps-Bilderfassungen*. 2023. URL: <https://maps.apple.com/imagecollection/> (besucht am 09. 01. 2023).
- [11] Sasan J. Rasti und Florian Flatter: *Pyramecium Technology Models*. URL: <https://github.com/sasanjac/pyramecium-technology-models> (besucht am Feb. 2024).

- [12] Deutscher Wetterdienst: *Testreferenzjahre*. URL: <https://kunden.dwd.de/obt> (besucht am Feb. 2024).
- [13] Dawnice: *Solar Panel Output Per Square Meter*. URL: <https://www.energydawnice.com/solar-panel-output-per-square-meter/> (besucht am Jan. 2024).
- [14] PV Magazine: *Assessing the area intensity of PV*. 2023. URL: <https://www.pv-magazine.com/2023/03/23/assessing-the-area-intensity-of-pv/> (besucht am Jan. 2024).
- [15] *Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz - WPG)*. <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/>. In Kraft getreten am 1. Januar 2024. 2023.
- [16] „Bauen und Wohnen - Mikrozensus-Zusatzerhebung 2014“. In: 5.1 (Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte 2014). Hrsg. von Statistisches Bundesamt.
- [17] Bundesverband energieeffiziente Gebäudehülle e.V., Hrsg.: *Sanierungsquote*. URL: <https://buveg.de/sanierungsquote/> (besucht am März. 2025).

7 Abkürzungen

EKFZ	Elektrokraftfahrzeug	NS	Niederspannung
EnEV	Energieeinsparverordnung	PV	Photovoltaik
GEG	Gebäudeenergiegesetz	WPG	Wärmeplanungsgesetz
IEEH	Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik	WSVO	Wärmeschutzverordnung