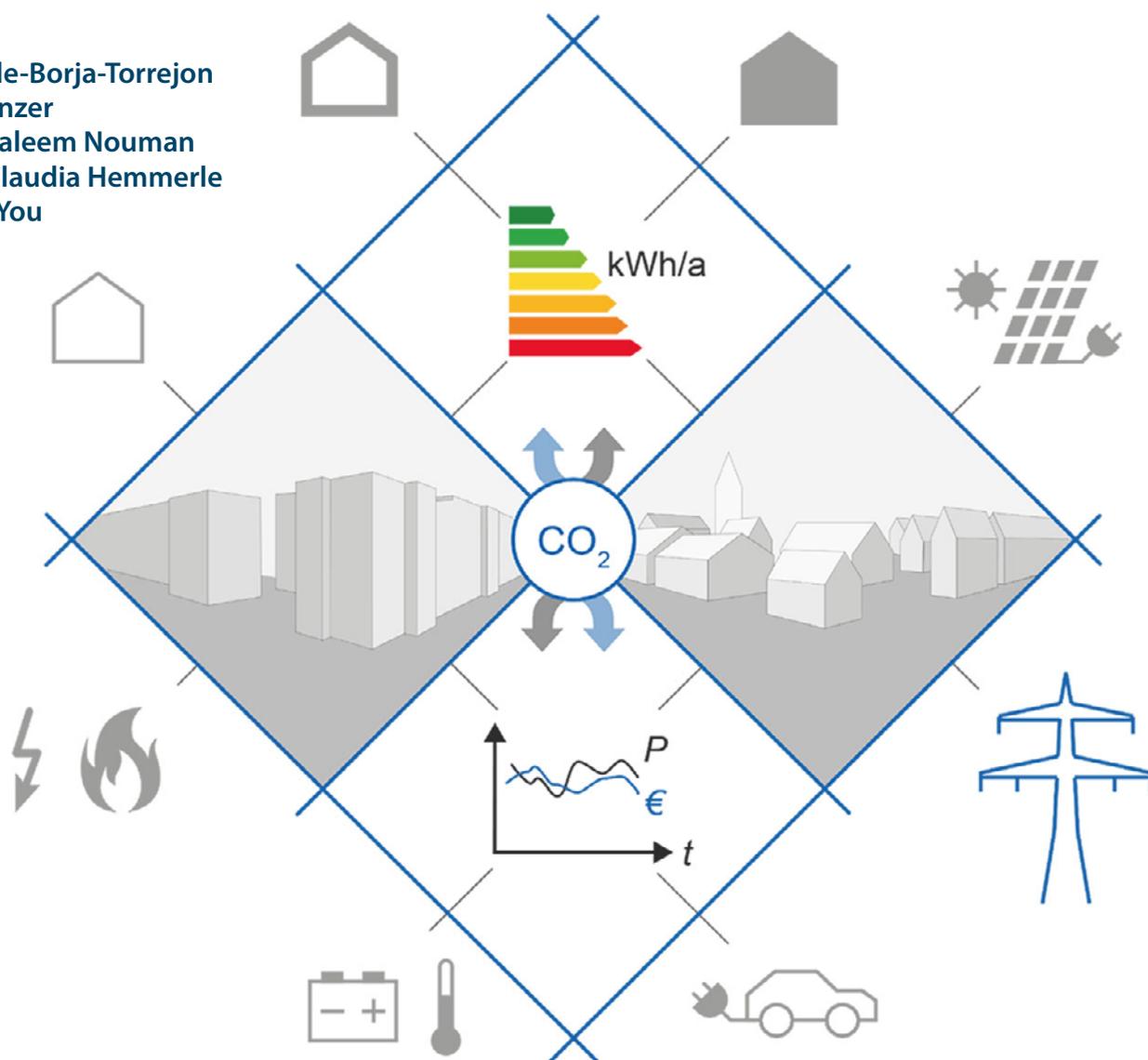


BBSR-
Online-Publikation
54/2024

Systemisch optimierte Sanierungsstrategien für energieflexible, CO₂-neutrale Quartiere

von

Manuel de-Borja-Torrejon
Paulo Danzer
Ahmad Saleem Nouman
Dr.-Ing. Claudia Hemmerle
Zhengjie You



Systemisch optimierte Sanierungsstrategien für energieflexible, CO₂-neutrale Quartiere

Projekt ReFlex

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.30

Projektlaufzeit: 09.2021 bis 11.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuerin

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Verena Kluth
verena.kluth@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München (TUM)
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Juniorforschungsgruppe Cleanvelope
Manuel de-Borja-Torrejón (Projektleitung)
manuel.de-borja-torrejón@tum.de

Paulo Danzer
Ahmad Saleem Nouman
Dr.-Ing. Claudia Hemmerle (Projektkoordination)
Professur für Energiemanagement-Technologien
Zhengjie You
zhengjie.you@tum.de

Redaktion

Technische Universität München (TUM)
Paulo Danzer

Stand

Mai 2024

Gestaltung

Technische Universität München (TUM)
Dr.-Ing. Claudia Hemmerle
Manuel de-Borja-Torrejón

Bildnachweis

Titelbild: Dr.-Ing. Claudia Hemmerle
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 59

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

de-Borja-Torrejón, Manuel; Danzer, Paulo; Nouman, Ahmad Saleem; Hemmerle, Claudia; You, Zhengjie, 2024: Systemisch optimierte Sanierungsstrategien für energieflexible, CO₂-neutrale Quartiere: Projekt ReFlex. BBSR-Online-Publikation 54/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract in English	7
Einführung	8
Hintergrund	8
Stand der Forschung und Forschungslücke	8
Forschungsfragen	8
Kernthesen	9
Ziele	9
Forschungsdesign	11
Methodischer Ansatz	11
Projektteam und Organisation	11
Projektverlauf und Arbeitsphasen	12
Beschreibung und Simulationsmethode der Quartiere	13
Auswahl der Quartierstypen	13
Definition der Quartierstypen	14
Größe der Quartiere	16
Gebäudedaten	16
Bauphysikalische Eigenschaften der Gebäudehülle	17
Kostenermittlung	17
Stromerzeugung mit Photovoltaik	18
Wetterdaten	19
RC-Modell und Energiebedarfsermittlung	19
Struktur des Energiesimulationsmodell	19
Lastprofile der Haushalte und Elektrofahrzeuge	21
Intelligente Laderegelung der Elektrofahrzeuge	21
Energiemanagementsystem	22
Lastmanagementstrategien	24
Szenariendefinition und Auswertungsmethoden	25
Parameter	25
Szenarien	25
Rückwirkung der Quartiere auf das übergeordnete Energiesystem	30
Key Performance Indicators (KPIs)	31
Flexibilitätsindikatoren - Netzdienlichkeit	32
Wirtschaftlichkeitsindikatoren	33
Gewichtung der KPIs – systemisches Optimum	33
Szenarienauswertung	35
Urbanes Quartier	35
Suburban und ländlich	41
Fallvergleich mit Fokus auf Sanierungspfade	41
Auswertung urbanes Quartier	41

Ergebnisse und Diskussion	44
Sanierungspfade	44
Finanzierungschancen	44
Bewertung der Ergebnisse und der Zielerreichung	47
Betrachtung der Erfolgsindikatoren	48
Schlussfolgerungen	50
Mitwirkende	53
Kurzbiographien	54
Verzeichnisse	55
Literaturverzeichnis	55
Abbildungsverzeichnis	59
Tabellenverzeichnis	61
Anlagen	62
Zusätzliche Grafiken – Urbanes Quartier	63
Zusätzliche Grafiken – Suburbanes Quartier	71
Zusätzliche Grafiken – Ländliches Quartier	79
Auswertung Suburban	87
Auswertung Ländlich	89

Kurzfassung

Das Projekt ReFlex behandelt Sanierungsstrategien für energieflexible und CO₂-neutrale Quartiere. Ziel ist es, systemisch optimierte Sanierungsstrategien zu erarbeiten, bei denen neben der Energieeinsparung und Nutzung erneuerbarer Energien auch die Energieflexibilität der Quartiere berücksichtigt wird.

Als Methodik wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das die relevanten Komponenten wie Gebäude, Anlagentechnik, Erzeugung und Verbrauch abbildet und parametrische Simulationen ermöglicht. Drei prototypische Quartiere (urban, suburban, ländlich) wurden modelliert und Simulationen verschiedener Sanierungsszenarien durchgeführt. Die Szenarien variieren in Parametern wie Wärmeschutzstandards, PV-Anteil und Elektromobilität. Zur Bewertung wurden Indikatoren der Energieflexibilität mit technischen, ökonomischen und ökologischen Kenngrößen entwickelt. Anhand der gewichteten Größen werden entsprechende systemische Sanierungsstrategien ausgewählt und optimierte Sanierungspfade für die unterschiedlichen Quartierstypen abgeleitet.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch Berücksichtigung der Energieflexibilität neben der Energieeffizienz sowohl die CO₂-Reduktion als auch die Netzdienlichkeit der Quartiere verbessert werden kann. Durch die Gesamtoptimierung auf Quartiersebene lassen sich zudem die Wirtschaftlichkeit der Lösungen erhöhen.

Abstract in English

The ReFlex project investigates renovation strategies for energy-flexible and CO₂-neutral neighborhoods. The aim is to develop systemically optimized renovation strategies that take into account not only energy savings and the use of renewable energies, but also the energy flexibility of the neighborhoods.

The methodology involved developing a simulation software that depicts the relevant components of neighbourhood models such as buildings, technical equipment, electromobility and local electricity grid, and enables parametric simulations. Three prototypical neighborhoods (urban, suburban, rural) were modeled and simulations of various renovation scenarios were carried out. The scenarios vary in parameters such as thermal insulation standards, PV share and electromobility. To evaluate the scenarios, indicators of energy flexibility were developed along with technical, economic and ecological parameters. Based on the weighted values, corresponding systemic renovation strategies are selected and optimized renovation pathways derived for the different neighborhood types.

The results show that by considering energy flexibility in addition to energy efficiency, both the CO₂ reduction and the grid-friendliness of the neighborhoods can be improved. Furthermore, the overall optimization at the neighborhood level can increase the cost-effectiveness of the solutions.

Einführung

Hintergrund

ReFlex verfolgt das Ziel eines CO₂-neutralen Gebäudebestands, bei dem nicht nur die Energieeffizienz der Gebäude sondern auch ihre Energieflexibilität im Fokus liegt. Bei bisherigen Betrachtung lag die Minimierung des jährlichen Energieverbrauchs einzelner Gebäude stets im Vordergrund. Angesichts der Umstellung auf eine erneuerbare und dezentrale Energieversorgung können Gebäude jedoch nicht mehr nur als passive Verbraucher betrachtet werden. Vielmehr müssen sie flexibel als Erzeuger, Speicher und Verteiler mit dem Energiesystem interagieren. Insbesondere die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen sowie die Elektromobilität bringt neue Herausforderungen für das Stromnetz und die Stromerzeuger mit sich.

Stand der Forschung und Forschungslücke

Studien zeigen, dass der Gebäudebestand ein hohes theoretisches Flexibilitätspotenzial für den Stromsektor darstellt, das auf der Nutzung der Gebäudemasse als thermischer Speicher und der Kopplung von thermischer und elektrischer Nachfrage basiert. Dabei bestimmen die Bauweise und der Energieeffizienzstandard eines Gebäudes wesentlich dessen Last- und Flexibilitätscharakteristik [1], [2], [3], [4]. Besonders hohe Flexibilitätspotentiale durch gebäudeübergreifende Lastmanagement- und Speicherstrategien ergeben sich daher in heterogenen baulichen Strukturen mit heterogenen Profilen [4], [5]. Die praktische Nutzbarkeit dieses Potenzials wurde insbesondere mit den Zielstellungen eines hohen Eigenverbrauchs von erneuerbaren Energien oder der Glättung von Lastspitzen auf Gebäudeebene bereits untersucht, teilweise auch im Quartiersverbund [6], [7]. Es wurden ebenfalls Energiemanagementsysteme für Liegenschaften modelliert, die neben der Optimierung des Betriebs energietechnischer Anlagen auch Flexibilitätsoptionen für den Netzbetrieb bereitstellen [8]. Auch für den netzunterstützenden Einsatz wurden entsprechende Indikatoren bereits entwickelt, der Markt und die regulatorischen Rahmenbedingungen müssen geeignete finanzielle Anreize erst noch schaffen [9], [10], [11].

Während bisherige Forschungsarbeiten ein netzdienliches Verhalten von Gebäuden und Quartieren vor allem durch entsprechende Betriebsstrategien und Regelkonzepte adressiert haben, bleibt die Frage offen, welche spezifischen Möglichkeiten die energetische Gebäudesanierung bietet, die Energieflexibilität des Gebäudebestands zu erhöhen und gezielt zu nutzen. Dabei ist von besonderem Interesse, wie durch angepasste Maßnahmen bzw. Strategien für homogene und heterogene Quartierssanierungen die Netzdienlichkeit erhöht, der Anteil fossiler Energieträger minimiert und neue Finanzierungspotenziale durch Energieproduktion und -verteilung erschlossen werden können.

Eine detaillierte Analyse der Flexibilität von Gebäudequartieren hinsichtlich unterschiedlicher städtischer und ländlicher Kontexte sowie eine Untersuchung optimierter Sanierungsstrategien stehen jedoch noch aus und sind Gegenstand dieses Forschungsprojekts.

Forschungsfragen

SANIERUNGSSTRATEGIEN

- Wie verändern sich die baulichen und anlagentechnischen Sanierungsstrategien und Zielstandards für Einzelgebäude, wenn der Bezugsrahmen auf Quartiersebene erweitert und die Netzdienlichkeit neben der CO₂-Neutralität als Optimierungsziel berücksichtigt wird?

- Wie lässt sich dabei die Rückwirkung eines Quartiers auf das übergeordnete Energiesystem einbeziehen, um ein Gesamtoptimum von jeweils quartiersbezogenen und übergeordneten CO₂-Emissionen und Netzdienlichkeit zu ermitteln?
- Welche Potenziale zur Erreichung dieses Gesamt-Optimums bietet eine gezielte Mischung unterschiedlicher Sanierungsstandards zur Diversifizierung des Lastmanagementpotenzials?

FINANZIERUNGSSCHANCEN

- Welche Aussagen lassen sich zur Wirtschaftlichkeit von energetischen Quartierssanierungen in Bezug auf zukünftige Erlösmöglichkeiten von Prosumenten ableiten?

SEKTORKOPPLUNG VERKEHR

- Wie wirkt sich die Berücksichtigung von Lastmanagementoptionen durch E-Fahrzeuge im Quartier auf die ermittelten Sanierungsstrategien aus?

Kernthesen

- Innovative systemische Sanierungsstrategien, die über die Energieeinsparung und Nutzung erneuerbarer Energien hinaus auch die Energieflexibilität gezielt berücksichtigen, können gleichzeitig die Transformation zum klimaneutralen Gebäudebestand und zu einem zukunftsfähigen Energiesystem optimieren sowie neue Finanzierungspotenziale durch Prosuming und Flexuming erschließen.
- Die Gesamtoptimierung auf Quartiersebene erhöht die Umsetzbarkeit, Bezahlbarkeit und Robustheit von Sanierungslösungen sowie die Resilienz der Energieversorgung.
- Im städtischen, suburbanen und ländlichen Raum ergeben sich dabei unterschiedliche Sanierungsstrategien entsprechend der spezifischen Quartierstrukturen und Netzanforderungen.

Ziele

Das Forschungsprojekt ReFlex zielt darauf ab, innovative Sanierungsstrategien für Quartiere zu entwickeln, die nicht nur den Energieverbrauch minimieren, sondern auch die Energieflexibilität berücksichtigen.

Das Projekt erforscht, wie Gebäude im Quartiersverbund einen konkreten Beitrag zur Netzstabilität und CO₂-Neutralität leisten können. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Größe der zeitlichen Lastverschiebung bei der elektrischen Wärmezeugung und damit die Energieflexibilität der Quartiere. Es werden Sanierungsmaßnahmen erarbeitet, die den Gebäudebestand und die Elektromobilität als Akteure in der Energieinfrastruktur CO₂-optimiert integrieren.

ReFlex beinhaltet simulationsbasierte Untersuchungen verschiedener Quartierstypen (städtisch, suburban, ländlich) unter Berücksichtigung ihrer spezifischen lokalen Netzanforderungen, Gebäudenutzungen und Strukturen. Ziel ist es, systemische Sanierungsstrategien abzuleiten, die über Energieeinsparung und Nutzung erneuerbarer Energien hinausgehen. Durch die Gesamtoptimierung auf Quartiersebene sollen die Umsetzbarkeit und Bezahlbarkeit von Sanierungslösungen sowie die Resilienz

der Energieversorgung erhöht werden. Das Projekt trägt somit zur Transformation zu einem klimaneutralen Gebäudebestand und einem zukunftsfähigen Energiesystem bei.

Die Untersuchung in dem Forschungsprojekt soll eine differenzierte Grundlage dafür schaffen, wie lokal angepasste Sanierungsmaßnahmen für Gebäudequartiere aussehen sollten, damit der Gebäudebestand seine neue Rolle als Akteur in der Energieinfrastruktur CO₂-optimiert spielen kann.

Forschungsdesign

Methodischer Ansatz

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein multidisziplinärer methodischer Ansatz verfolgt, der darauf abzielt, die CO₂-Bilanz und die Netzdienlichkeit urbaner, suburbaner und ländlicher Quartiere zu optimieren. Für die energetisch relevanten Komponenten der Quartiere werden einzelne Teilmodelle entwickelt, einheitlich in Python implementiert und in einem Gesamtsystemmodell des Quartiers zusammengeführt. So können Erzeugungs- und Verbrauchsprofile sowie Speicheroptionen in quartiersweiten Jahressimulationen kombiniert und die Energieflexibilität der Szenarien durch geeignete Regelungsstrategien dargestellt werden. Um eine Vielzahl von Simulationen mit verschiedenen Parametern zu ermöglichen, wird der Simulationsablauf und die Auswertung der Ergebnisse weitgehend automatisiert.

Modellierung und Simulation der Quartiere: Unter Anwendung generischer 3D-Modelle der Quartiere wird der Energiebedarf anhand von RC-Modellen simuliert. Diese Modelle berücksichtigen Gebäudetypologien sowie Energieinfrastrukturen und beinhalten Szenarien, die verschiedene Sanierungsgrade, den Einsatz von Photovoltaik, die Elektrifizierung der Wärmeversorgung und des motorisierten Individualverkehrs abbilden.

Implementierung eines Energiemanagementsystems (EMS): Das EMS zielt darauf ab, die Energieflüsse im Quartier zu optimieren, um ein Gleichgewicht zwischen Energieeffizienz, Reduzierung von CO₂-Emissionen und Netzdienlichkeit zu erreichen. Dies beinhaltet die Steuerung von Wärmepumpen, die Integration photovoltaischer Systeme und das Lademanagement von Elektrofahrzeugen. Die Regelung erfolgt über ein MPC-system (Model Predictive Control). Hierbei wird der erwartete Energiebedarf über einen Zeithorizont hinweg simuliert um die optimale Regelstrategie für den jeweiligen Zeitschritt zu berechnen.

Analyse von Lastmanagementstrategien: Es wurden Strategien des Lastmanagements untersucht, insbesondere die Nutzung von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen als flexible Lasten, um deren Einfluss auf die CO₂-Bilanz und Netzdienlichkeit des Quartiers zu bewerten.

Ökonomische Evaluierung: Die ökonomische Tragfähigkeit von Sanierungsmaßnahmen wurde analysiert, wobei Investitions-, Betriebskosten und flexible Strompreise berücksichtigt werden.

Entwicklung von Sanierungsstrategien: Auf Basis der Simulationsergebnisse wurden die Sanierungspfade für Quartiere ausgewertet und bewertet. Diese Pfade zeigen auf, wie eine sukzessive Implementierung von Sanierungsmaßnahmen die Gesamtpformance des Quartiers hinsichtlich Energieeffizienz, CO₂-Reduktion und Netzdienlichkeit schrittweise verbessern kann.

Projektteam und Organisation

Die Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, welcher in die Professur für Energiemanagement-Technologien übergegangen ist, und der Juniorforschungsgruppe Cleanvelope im Rahmen des Forschungsprojekts ReFlex erlaubte eine gemeinsame und interdisziplinäre Bearbeitung der Inhalte. Dabei lag die Projektleitung bei der Juniorforschungsgruppe Cleanvelope, die dem Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der TU München zugeordnet ist.

Die inhaltliche Verantwortung der Juniorforschungsgruppe Cleanvelope umfasste hauptsächlich die Quartiere, deren Sanierung und Anlagentechnik. Dies schließt die Untersuchung und Bewertung von

Sanierungsstrategien, Energieeffizienzmaßnahmen und die Integration von erneuerbaren Energiequellen ein.

Der Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik war in allen Arbeitspaketen hauptverantwortlich für die Themenbereiche, die mit den Anforderungen der Stromnetze und den Lasten durch Elektromobilität zusammenhängen. Dazu zählen beispielsweise die Analyse der Netzdienlichkeit, die Untersuchung von Lastmanagementstrategien, die Integration von E-Fahrzeugen in die Simulationen und die Bewertung und Weiterentwicklung von Energiemanagementsystemen.

Beide Lehrstühle arbeiteten eng zusammen, um die verschiedenen thematischen Bereiche zu verknüpfen und eine umfassende Analyse der Wechselwirkungen zwischen Gebäudesanierung, Stromnetzbelastungen und der Integration erneuerbarer Energien zu untersuchen. Diese Kooperation ermöglicht es, einen ganzheitlichen Ansatz für die energetische Quartierssanierung zu entwickeln, der sowohl bauliche als auch anlagentechnische Aspekte berücksichtigt und die Interaktionen zwischen Gebäude, Elektromobilität und Stromnetz einbezieht.

Projektverlauf und Arbeitsphasen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden mehrere konkrete Zwischenziele verfolgt. Erstens wurde ein Maßstab entwickelt, der die systemische Optimierung der Gesamt-CO₂-Emissionen ermöglicht. Dazu wurden alle relevanten Teilmodelle in einer Gesamtmodellstruktur implementiert. Diese Struktur erlaubt sowohl eine automatisierte Simulation als auch eine umfassende Ergebnisauswertung verschiedener Quartiersszenarien.

Zudem wurden im Projekt Sanierungsstrategien definiert und simuliert, um die Synergien und Wechselwirkungen ganzheitlicher Ansätze zu ermitteln. Drei Kernszenarien standen im Fokus: Die Abwägung zwischen Wärmeschutzstandard und Netzdienlichkeit hinsichtlich Kosteneffizienz und Emissionsminderung; die Untersuchung von netzdienlichen Lastmanagementpotentialen in Quartieren, die durch Kombination unterschiedlicher energetischer Gebäudestandards und Integration der Elektromobilität entstehen; und die Erkundung von Potenzialen durch Einbezug variabler Strompreise in Wirtschaftlichkeitsberechnungen.

Schließlich wurden basierend auf den Erkenntnissen des Projekts praxisorientierte Empfehlungen formuliert und Sanierungspfade für Quartiere entworfen.

In der ersten Arbeitsphase wurde durch Literaturrecherche das bestehende Wissen zu Flexibilitätspotenzialen und Quartiersmodellierung analysiert, um daraus die Anforderungen für ein eigenes Gesamtmodell abzuleiten. Dieses umfasste Teilmodelle für Gebäude, Mobilität und Netzinfrastruktur.

Die zweite Arbeitsphase beschäftigte sich mit der Modellierung und Kopplung dieser Bausteine zu einem Gesamtmodell. Die Teilmodelle wurden implementiert und mit realen Messdaten parametrisiert. In der dritten Arbeitsphase wurden verschiedene Lastmanagementstrategien simuliert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet. Dies erfolgte sowohl für die dezentrale Optimierung von Einzelkomponenten als auch zentral auf Quartiersebene.

Die vierte Arbeitsphase definierte konkrete Quartiere sowie Szenarien für die energetische Sanierung unter Einbezug der Netzanforderungen. Daraus wurden die Anforderungen für die Quartiersmodelle abgeleitet. In der fünften Arbeitsphase wurden die Quartiersmodelle detailliert ausgestaltet und zur Simulation der Szenarien aus der vierten Phase eingesetzt.

Die Ergebnisse aus der fünften und sechsten Arbeitsphase ermöglichten die Ableitung von Sanierungspfaden und Zielstandards für eine klimaneutrale Quartiersentwicklung unter Berücksichtigung der Netzaspekte.

Beschreibung und Simulationsmethode der Quartiere

Auswahl der Quartierstypen

Es wurden drei Typen von Quartieren (urban, suburban und ländlich) untersucht, welche sich deutlich voneinander unterscheiden und den deutschen Wohnbaubestand repräsentieren.

Als Entscheidungsgrundlage wurde die Untersuchung des Forschungsprojekts UrbanReNet [12] und der Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. (AGFW) [13] genutzt.

Energetischer Stadtraumtyp (EST):

Im Projekt UrbanRenet [12] wurden 13 energetische Stadtraumtypen (EST) definiert, ergänzt durch energetische Einzelelemente und energetische Straßenraumtypen. Das Ziel dieser Definition ist es, ein realitätsnahes Abbild der vorliegenden urbanen Bebauungsmuster in Deutschland zu erhalten. Dabei strebt man eine ganzheitliche Erfassung des gesamten Gebäudebestands Deutschlands an, und zwar unter stadträumlichen, energetischen und mikroklimatischen Aspekten. Dies dient zur Erstellung von Hochrechnungen bezüglich Bedarfen und Potentialen. Um dies zu erreichen, wurde eine groß angelegte Erhebung verschiedener Kenngrößen realer Stadträume durchgeführt. Im Rahmen dieses Prozesses fand die Anwendung und Aktualisierung der IWU-Gebäudetypologie statt, die zudem auf Quartiere erweitert wurde. Zusätzlich erfolgte eine Bewertung der energetischen Potentiale im Freiraum.

Siedlungstyp (ST):

Die Kombination der Siedlungstypenmethode (definiert nach AGFW [13]) mit der Gebäudetypenmethode erfolgt durch die Definition des prozentualen Anteils der verschiedenen Gebäudetypen in einem Siedlungstyp. Um die baulich konstruktiven Merkmale abzubilden, werden Gebäudetypen basierend auf Bauform und Baualtersklasse gebildet. Als Basis hierfür dient die deutsche Wohngebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) [14].

Gewählte Quartierstypen

Abbildung 1 zeigt die drei gewählten Quartierstypen. Die energetischen Stadtraumtypen (EST) nach UrbanReNet [12] entsprechen dabei den jeweiligen Siedlungstypen (ST) nach AGFW [13]. Die Erhebung der AGFW gibt die Verteilung der Gebäude nach Gebäudetyp und Baualtersklasse nach dem Tabula-System des IWU [15] an.

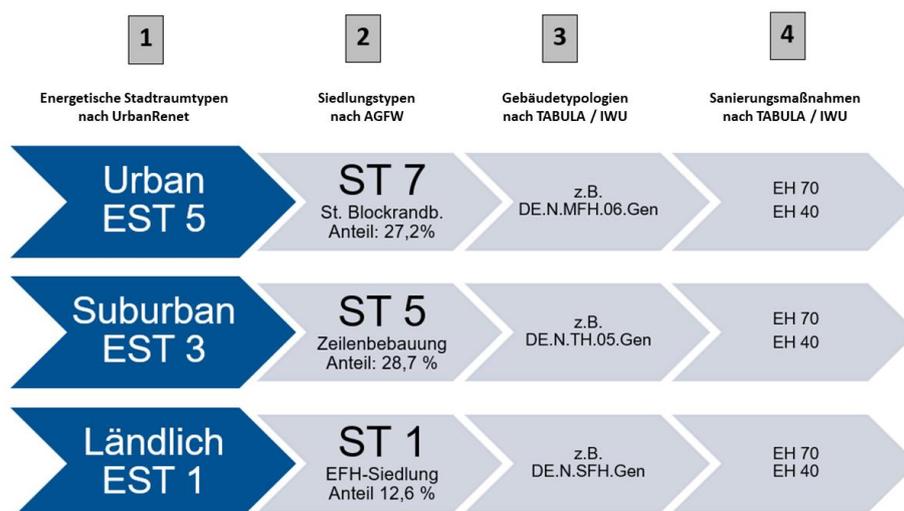


Abbildung 1: Quartierdefinition | Quelle: eigene Darstellung

Definition der Quartierstypen

Die gewählten Quartiere werden in der Literatur [12][13] wie folgt beschrieben:

Tabelle 1: Beschreibung der Quartierstypen | Quelle: AGFW [13], Hegger [12]

	Bezeichnung nach AGFW	Kurzbeschreibung nach AGFW	Bezeichnung nach UrbanReNet	Kurzbeschreibung nach UrbanReNet
Ländlich	ST 1	„Streusiedlung“ mit unregelmäßiger, lockerer Bebauung. Die Gebäude sind fast ausschließlich zweigeschossig und freistehend.	EST 1	Eine gering besiedelte, sehr regelmäßige Struktur mit großen Abständen. Die Gebäude sind bis zu 2,5- Vollgeschosse hoch und entweder freistehend oder einseitig gekoppelt.
Suburban	ST 5b	Grobmaschige Zeilenbebauung mit 3- bis 5-geschossigen Mehrfamilienbauten. Es sind 2 bis 4 Gebäuden aneinandergereiht, die grobmaschig erschlossen sind.	EST 3	Zeilenbebauung mit zwischen 4 und 6 Geschossen, die zueinander parallel angeordnet sind.
Urban	ST 7b	Dichte Blockrandbebauung, wo die Innenhöfe auch bebaut wurden. Die Straßenbebauung ist beinah quadratisch und die Gebäude meist 3-geschossig und weitestgehend aneinandergebaut	EST 5	3- bis 5-geschossige Blockrandbebauung mit einer fast geschlossenen Bebauungslinie. Innerhalb der Blöcke befindet sich untergeordnete Bebauung.

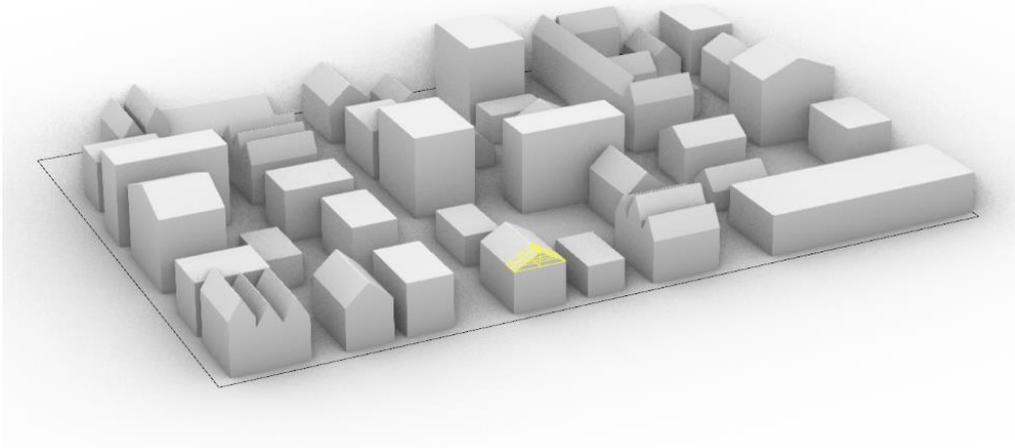


Abbildung 2: urbanes Quartier | Quelle: eigene Darstellung

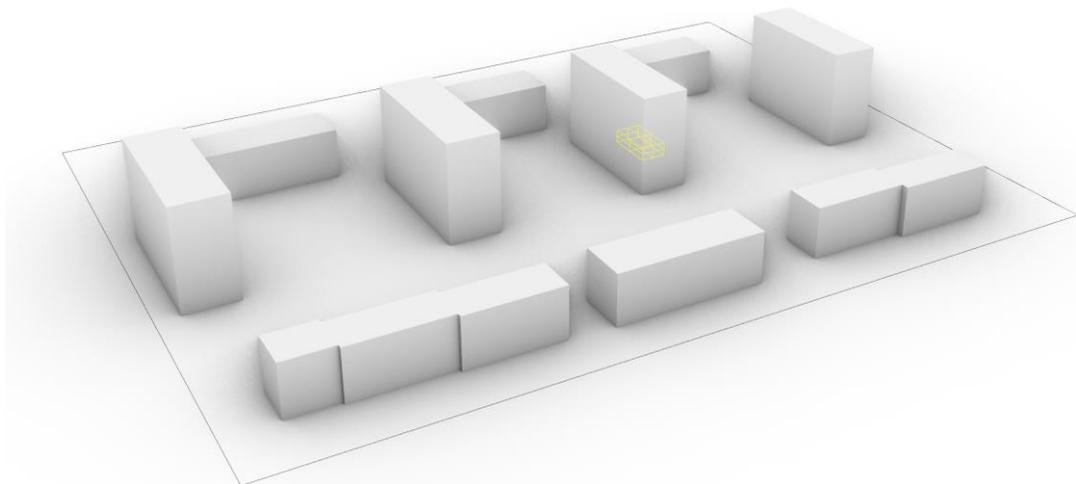


Abbildung 3: suburbanes Quartier | Quelle: eigene Darstellung

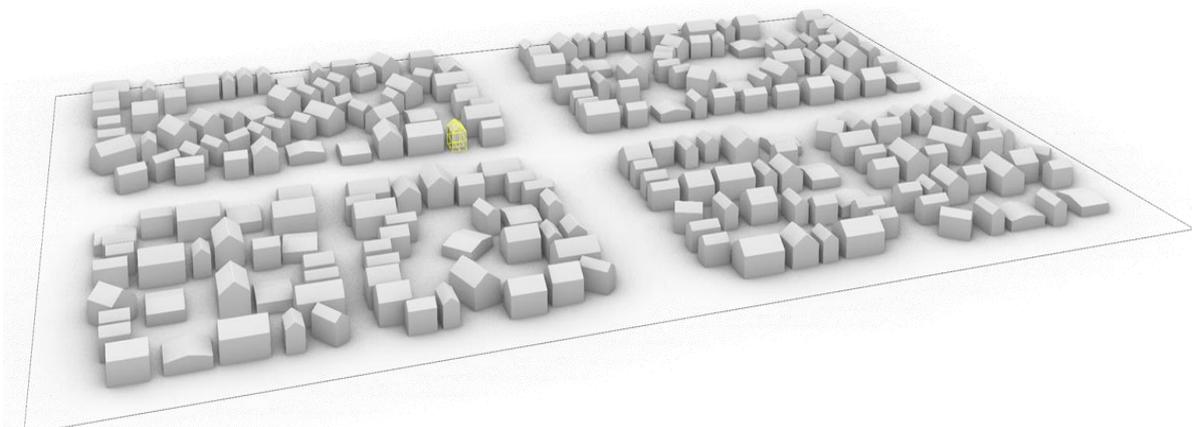


Abbildung 4: ländliches Quartier | Quelle: eigene Darstellung

Größe der Quartiere

Die Größe der Quartiere wurde anhand der mittleren Größe eines Verteilnetzes der Ortsnetztrafostationen ausgelegt. Um vergleichbare Quartiersgrößen zu erreichen, entspricht die Größe jeweils 3, 2 bzw. einer Ortsnetztrafostation.

Für die Typologie des Stromnetzes werden die Werte der Studie „Infrastrukturbedarf E-Mobilität“ [16] als Referenz verwendet. Davon abgeleitet ergeben sich mit der oben genannten Anzahl von Ortsnetztrafostationen entsprechende Quartiersgrößen von 403, 336 und 166 Gebäuden für das urbane, suburbane und ländliche Quartier.

Tabelle 2: Größe der Quartiere | Quelle: eigene Daten

	Urban	Suburban	Ländlich
Gebäudeanzahl	403	336	166
Anzahl Gebäude je ha	270	104	21
Quartiersgröße in ha	1.5	3	7,9

Basierend auf den Ergebnissen des vorgehenden Dimensionierungs- und Charakterisierungsprozesses der 3 als Fallstudien verwendeten Quartiere wurden synthetische digitale Modelle erstellt. Die daraus resultierenden Modelle sowie die Verteilung der Gebäudetypologien und Haushalte, die als repräsentativ für die Nachbarschaften angesehen werden, sind in Abbildung 2, Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt.

Gebäudedaten

Die Verteilung der Gebäudetypologien folgt der von den in Kapitel „Auswahl der Quartierstypen“ dargestellten Quartierstypologien. Im Kapitel „Definition der Quartierstypen“ werden die entsprechenden Gebäudetypologien und deren prozentuale Verteilung dargestellt. Der Verwendete Code wurde dabei vom IWU-Institut in einer vorgehenden Untersuchung der europäischen Gebäudetypologie festgelegt [14].

Tabelle 3: Verteilung der Gebäudetypologien in den Quartieren | Quelle: IWU [17]

Quartier	Urban	Suburban	Ländlich
Anzahl der Haushalte	403	336	166
Anteil der Gebäudetypen	DE.N.MFH.04.Gen: 8.9% DE.N.MFH.05.Gen: 7.9% DE.N.AB.02.Gen: 7.4% DE.N.AB.02.Gen: 8.9% DE.N.AB.03.Gen: 11.2% DE.N.AB.04.Gen: 19.9% DE.N.AB.05.Gen: 23.8% DE.N.AB.06.Gen: 11.9%	DE.N.AB.05.Gen: 28.6% DE.N.AB.06.Gen: 28.6% DE.N.MFH.06.Gen: 21.4% DE.N.MFH.07.Gen: 21.4	DE.N.SFH.01.Gen: 4.85% DE.N.SFH.02.Gen: 4.85% DE.N.SFH.03.Gen: 20% DE.N.SFH.04.Gen: 24.85% DE.N.SFH.05.Gen: 24.85% DE.N.SFH.06.Gen: 10.3% DE.N.SFH.07.Gen: 10.3%

Der in Tabelle 3 gezeigte Code ist die Beschreibung der unterschiedlichen Gebäudetypologien. Dieser setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 4: Erläuterung Tabula Gebäudecode | Quelle: IWU [17]

Land	Region	Gebäudegröße	Baualterklasse	Weitere Parameter
Ländercode gem. ISO 3166-1 DE: Deutschland	N: National	SFH: Einfamilienhaus TH: Reihenhaus MFH: Mehrfamilienhaus AB: Wohnblock	01: .. 1859 02: 1860 .. 1918 03: 1919 .. 1948 04: 1949 .. 1957 05: 1958 .. 1968 06: 1969 .. 1978 07: 1979 .. 1983 08: 1984 .. 1994 09: 1995 .. 2001 10: 2002 .. 2009 11: 2010 .. 2015	Gen: generischer Typ

Bauphysikalische Eigenschaften der Gebäudehülle

Die Gebäude wurden in Gebäudetypologien gefasst und deren Eigenschaften der Datenbank Tabula [17] entnommen. Die vom IWU zur Verfügung gestellte Datenbank enthält Daten zu den konstruktiven und anlagentechnischen Details von Standardgebäuden nach Baualterklassen. Sie enthält auch Daten zu Sanierungsmaßnahmen zur Erreichung eines mittleren und eines hohen Effizienzstandards. Diese Effizienzstandards orientieren sich an den KfW-Effizienzhausstandards EH 40 und EH 70. Dazu wurde ebenfalls durch das IWU eine weitere Datenbank mit den Kosten der verschiedenen Sanierungsmaßnahmen veröffentlicht [18], vgl. Hierzu auch Seite 17. Diese Informationen passen zu den Anforderungen des Projekts und wurden als Referenz für die Entwicklung sowohl des Modellierungstools (Import und Verwendung der Daten, Implementierung parametrischer Funktionen usw.) als auch der Sanierungsszenarien für die drei Quartierstypologien (urban, suburban, ländlich) herangezogen.

Die Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität der einzelnen Schichten der Gebäudekomponenten entstammen vorrangig aus der DIN EN 12524 : 2000. Die verschiedenen Bauteilaufbauten sind in der Tabula-Datenbank entsprechend definiert. Baustoffe die nicht in der DIN EN 12524 vorhanden sind wurden über das Web-Tool Ubakus [19] ermittelt.

Kostenermittlung

Die Sanierungskosten der Gebäudehülle wurden anhand der Erhebungen des IWU [20], [18] ermittelt, sowie ergänzend dem Baupreislexikon [19] entnommen. Die Kostenkennwerte aus 2012 und 2020 wurden anhand der in [18] angegebenen Umrechnungsfaktoren und dem aktuellen Baupreisindex aktualisiert.

Die Maßnahmenkosten wurden entsprechend den in Tabula beschriebenen energetischen Sanierungsmaßnahmen ermittelt und sind als spezifische Kosten je Quadratmeter Bauteilfläche angegeben.

Die Kosten für die Gebäudetechnik umfassen Wärmepumpen und PV-Anlagen. Die Daten wurden dem Baupreislexikon [19] entnommen. Für Wärmepumpen sind die Kosten in Abhängigkeit der installierten Leistung angegeben (für 10, 20, 50 und 100 kW_{th}). Zwischenwerte wurden interpoliert. Für PV sind die Kosten mit der elektrischen Spitzenleistung verknüpft.

Fördermittel für Heizungstausch und Gebäudesanierung

Während der Projektlaufzeit haben sich die Förderrichtlinien und Förderhöhen der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) mehrmals geändert. Weiterhin ist eine Novelle zum 1.1.2024 mit angepassten Fördersätzen zu erwarten. Daher wurden keine Förderungen in den Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen berücksichtigt.

Stromerzeugung mit Photovoltaik

Die Bestimmung der Solarpotenziale der urbanen und suburbanen Quartierstypen erfolgte mit der Besonderheit, dass neben energetisch-wirtschaftlichen auch baukulturelle Belange Berücksichtigung fanden [21]. Mit Hilfe einer stichprobenartigen Analyse von Gebäudestrukturen und Fassadenrastern wurden sechs Fassadentypen mit unterschiedlichen Anteilen an Fenster- und Tür-, Balkon- und Brüstungs- sowie opaken Flächen identifiziert. Architektonische Belegungsstudien mit marktüblichen PV-Modulformaten ergaben Kennzahlen für eine aus gestalterischen Gesichtspunkten maximale Modulfläche je Fassadentyp. Durch eine Zuordnung der Fassadentypen und -häufigkeiten zu den Gebäudetypen der Quartiere konnte wiederum ein durchschnittlicher Belegungsfaktor für alle Fassaden je verwendetem Gebäudetyp ermittelt werden. Im ländlichen Quartier wurde ein pauschaler Belegungsfaktor für von 45 % gemäß [22] für Obergeschosse angesetzt, während die Erdgeschosse unbelegt bleiben. Für die Dachflächen wurden die Belegungs-faktoren aus Reduktionsfaktoren für solare Nutzungseinschränkungen von Dachflächen durch Begehrbarkeit, technische Aufbauten, Randbereiche etc. abgeleitet, die [22] aus Projekterfahrungen und Branchenexpertise für Schräg- und Flachdächer von Wohngebäuden unterschiedlicher Größe ermittelt hat. Um wirtschaftlich schwer erschließbare Flächen auszuschließen, wurden nur Flächen mit einer Einstrahlung mindestens 700 kWh/m²a berücksichtigt. Dieser Schwellenwert stellt einen Kompromiss zwischen klimapolitisch motivierten Ansätzen [23] und ordnungspolitisch durchsetzbarer Wirtschaftlichkeitsgrenze [24] dar. Die Kombination aus Belegungs-faktor und Ausschluss gering besonnener Flächen bildet das maximal nutzbare PV-Potential des Quartiers ab.

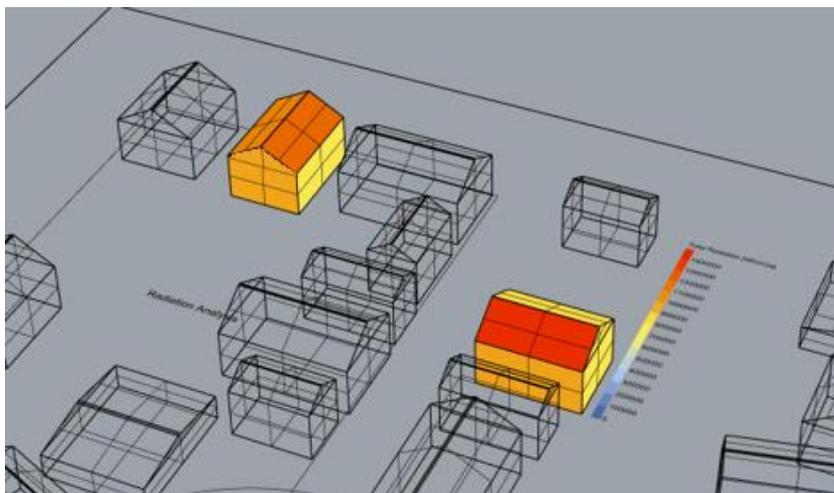


Abbildung 5: solare Einstrahlungswerte je Fläche | Quelle: eigene Darstellung

Grundlage für den PV-Ertrag ist das 3D-Quartiersmodell mit den entsprechenden Einstrahlungswerten je Fläche. Zunächst wurde die Geometrie in Rhinoceros [25] erstellt und jeder Hüllfläche des Gebäudes eine Zone zugewiesen. Durch eine Strahlungssimulation (vgl. Abbildung 5) wurde ermittelt wie hoch die Einstrahlung je Zeitschritt ist. Durch das Modell werden Verschattungen durch andere Gebäude entsprechend berücksichtigt. Die Datenverarbeitung erfolgte über die Rhinoceros-Plugins Grasshopper [26] und Ladybug-Tool [27]. Dabei wurde ein Modulwirkungsgrad von 15 % angenommen.

Wetterdaten

Als Wetterdatensatz wurde das DWD Testreferenzjahr für Potsdam [28] aus Meteonorm [29] genutzt. Für die Gegenwart wird die Periode 1991-2010 für die Strahlungsparameter genutzt und die Periode 2000-2009 für die Temperaturparameter. Für die Stützjahre der Zukunftsszenarien wird das Jahr 2050 mit Hilfe des Szenarios A2 des vierten Sachstandsberichtes des Weltklimarates [30] genutzt und entsprechend interpoliert.

RC-Modell und Energiebedarfsermittlung

Struktur des Energiesimulationsmodell

Die vorhandene Literatur [31], [32] teilt die Energiesimulationsmodelle in zwei Hauptkategorien ein: Bottom-up- und Top-down-Modelle. Die erste Art von Modellen stammt meist aus dem Bereich der Analyse des Gebäudesektors und zeichnet sich durch den Vorteil aus, die Gebäude in einem hohen Detaillierungsgrad abzubilden. Dazu gehört auch die Möglichkeit, das dynamische Verhalten der Wärmekapazität des Gebäudes zu modellieren, die eine der Hauptquellen für die Energieflexibilität ist.

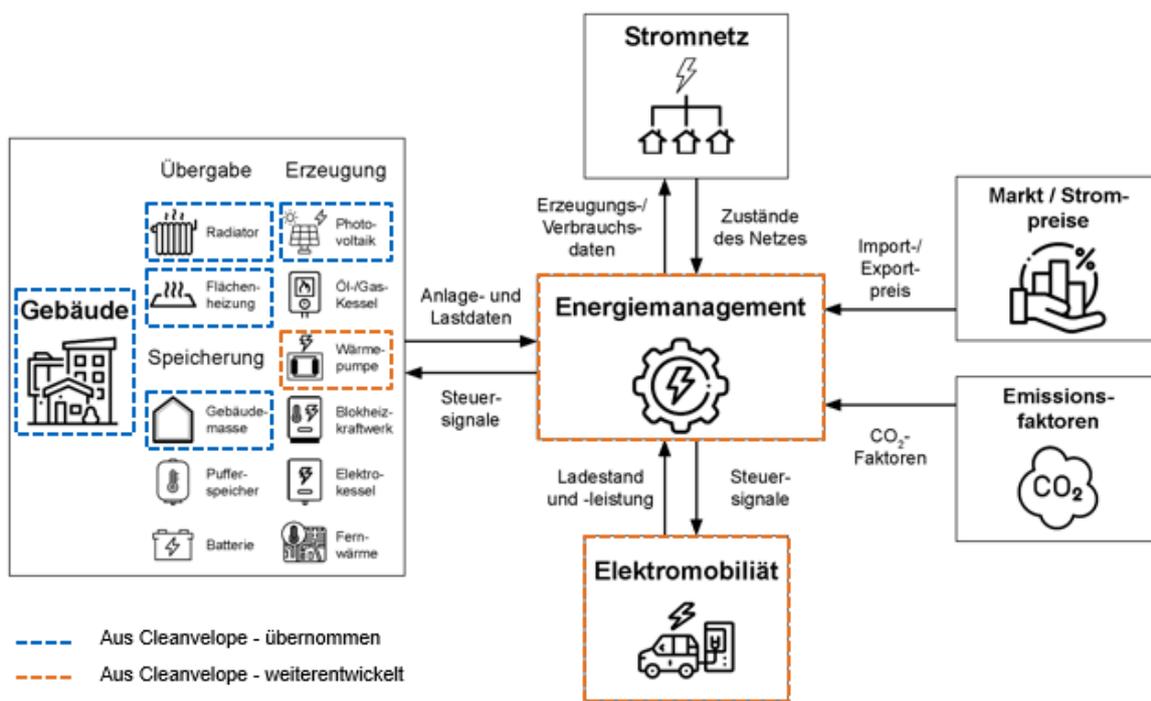


Abbildung 6: Funktionsschema des Simulationsmodells | Quelle: eigene Darstellung

Im Gegensatz dazu stammen die Top-Down-Modelle meist aus dem Arbeitsbereich des Stromsektors. Diese Modelle stellen das Stromsystem in den Vordergrund, während die Gebäude in der Regel auf sehr vereinfachte Weise durch statistische Energiebedarfsprofile integriert werden. Dies unterstreicht die

Wichtigkeit unserer Arbeit, ein „hybrides“ Modell zu entwickeln, welches das Stromnetz und das Energiemanagement wie in den Top-Down-Modellen richtig simulieren kann, aber auch die Modellierung der Gebäude und das Verhalten ihrer thermischen Masse wie im Fall der Bottom-Up-Modelle ermöglicht.

Dabei helfen uns die Top-Down-Modelle von OPEN [33] und Fonseca et. al [34] bei der Konzeption, Strukturierung und Implementierung des Hybridmodells. Diese sind geeignet, die betrachteten Module und deren Verknüpfung untereinander darzustellen. Eine direkte Verwendung dieser genannten Beispiele war im Projekt nicht möglich, da sie erst einer aufwändigen Anpassung unterworfen werden müssten. Das für dieses Projekt verwendete Simulationsmodell fußt auf dem Quartiersenergiemodell CleanMod von Bogischef et al. [35]. Dieses wurde hinsichtlich der Nutzung mit Wärmepumpen, Elektromobilität und Energiemanagement hin erweitert. Abbildung 8 zeigt die bestehenden und hinzugefügten Bausteine.

Grundlage des Simulationsmodells zur stundengenauen Abbildung der Wärmeenergieflüsse im Gebäude ist ein RC-Modell welches folgend näher beschrieben wird:

Zonierung des 3D-Modells:

Die modellierten Gebäude wurden gemäß den Zonierungskriterien von Hausladen et al. [2] modelliert. Dies beinhaltet die Betrachtung der Haushalte als Hauptnutzungseinheiten, die in Wohngebäuden als separate thermische Zonen abgebildet werden. Einfamilienhäuser wurden daher als einzelne thermische Zone modelliert, Mehrfamilienhäuser durch die Integration einer thermischen Zone pro Haushalt. Je Wohneinheit wurde eine thermische Zone modelliert. Dieser Ansatz stellt einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Simulationsaufwand dar. Eine detailliertere Zonierung auf Raum-Ebene würde den Simulationsaufwand bei der Optimierung negativ beeinflussen, ohne eine höhere Genauigkeit zu gewährleisten, da deutlich mehr Annahmen für die Definition erforderlich wären.

Grundlagen RC-Modell:

Wohngebäude werden durch eine Kombination von Wohneinheiten (Zonen) modelliert. Jede Zone wird als thermische Zone in Form eines RC-Modells abgebildet.

Das thermische Verhalten der Zonen wird in Anlehnung eines elektrischen Schaltkreises modelliert. Dabei stellen die Wärmekapazitäten der Bauteile, wie Wände, Decken und Böden, elektrische Kapazitäten (C) dar. Die Wärmedurchgangswiderstände bilden elektrische Widerstände (R) ab (vgl. Abbildung 7). Zwischen den Bauteilen findet ein Wärmeaustausch entsprechend einem elektrischen Stromfluss statt.

Die Vorteile des RC-Modells sind eine vereinfachte Modellierung bei gleichzeitig ausreichend genauer Abbildung der thermischen Trägheit durch Berücksichtigung der speicherwirksamen Massen. Dies ermöglicht einerseits schnellere Rechenzeiten und andererseits die Kopplung mit Optimierungsverfahren. In dieser Studie wurde das RC-Modell zur Gebäude- und Quartiersmodellierung mit dem Ziel der Optimierung von Sanierungsszenarien eingesetzt.

Das RC-Modell in CleanMod basiert auf dem Ansatz der VDI 6007-1. Es kombiniert Ersatz-RC-Modelle der einzelnen Bauteile mit einem RC-Modell der Zone. Während das VDI-Modell 2 Kapazitäten aufweist, wurde in CleanMod das Zonenmodell um 3 zusätzliche leere Kapazitäten erweitert, um die Kopplung mit einem Optimierer zu erleichtern. Abbildung 8 zeigt das Funktionsschema des RC-Modells. T_z ist dabei die Temperatur in der Zone und ist analog zur Innenraumtemperatur jeder Wohneinheit zu betrachten.

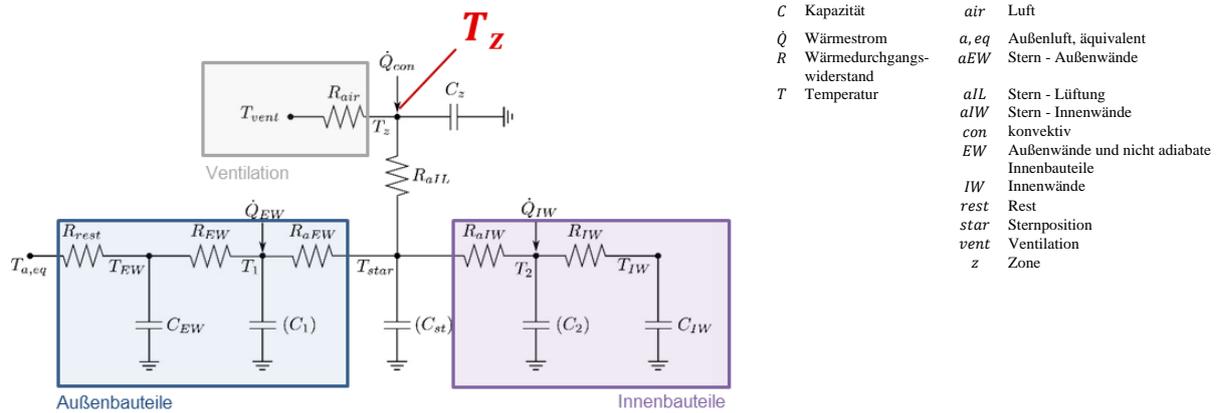


Abbildung 7: Schema des in diesem Projekt genutzten RC-Modell | Quelle: Bogischef et al. [36]

Validierung des Modells:

Die Validierung des Modells erfolgte dreistufig:

- Anhand von Beispielen aus den VDI-Richtlinie 6007: Die genannte Verordnung stellt Beispieldatensätze mit Eingangsdaten und Simulationsergebnissen bereit. Bei der Programmierung unseres R-C-Modells wurden diese Beispiele mit den vorgegebenen Eingangsdaten simuliert und die Ergebnisse mit den VDI-Werten verglichen. Der Vergleich zeigte eine erfolgreiche Replizierbarkeit der VDI-Beispielsergebnisse.
- Plausibilitätsprüfung bei der Simulation der Fallstudien: So wurde beispielsweise kontrolliert, ob die Werte und Zeitreihen der internen Lasten und solaren Gewinne während der dynamischen Simulationen plausibel sind.
- Vergleich des gesamten Energiebedarfs der modellierten Gebäude mit den charakteristischen Bedarfswerten aus Tabula gemäß der Gebäudetypologie. Dies diente als weitere Plausibilitätsprüfung bei der Simulation der Fallstudien.

Lastprofile der Haushalte und Elektrofahrzeuge

Neben den Wärmebedarfsprofilen aus den Simulationen auf Grundlage der RC-Modelle, wurden Verbrauchsprofile der Haushalte für die Bilanzierung der Gebäude berücksichtigt. Die Lastprofile der Haushalte ergeben sich aus statistischen Modellen der Software UrbanEnergyPro + REM [36] und bestehen aus den Teilen Haushaltsstromverbrauch und Warmwasserverbrauch. Das Energiemanagementsystem nimmt dabei keinen Einfluss auf die Profile. In den jeweiligen Quartierstypen sind die Lastprofile aller simulierten Szenarien gleich.

Die Lastprofile für Elektrofahrzeuge sind durch emobpy [37] erstellt. Emobpy ist ein Python-Tool zur Generierung der Ladeprofile elektrischer Fahrzeuge unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens.

Intelligente Laderegulierung der Elektrofahrzeuge

Ein intelligentes Laden der Elektroautos erlaubt eine vorteilhafte Steuerung des Ladevorgangs in Bezug auf das Stromnetz. Die Anpassungsfähigkeit der Ladeleistung beim intelligenten Laden hilft, den Anforderungen des Stromsystems und der Integration erneuerbarer Energien gerecht zu werden. Ein

optimiertes Ladeprofil kann die Ladeleistung entsprechend der vom Netz verfügbaren Leistung und den Bedarfen der Nutzer steuern. Zudem können durch intelligentes Timing signifikante finanzielle Einsparungen und geringere CO₂-Emissionen gegenüber Spotmarktpreisen bzw. Emissionsfaktoren erreicht werden [38]. Zusammenfassend kann intelligentes Laden in mehreren Schlüsselbereichen zur Emissionsreduktion und Netzstabilität beitragen:

- Vermeidung von Netzspitzen: Intelligentes Laden kann den Ladevorgang so steuern, dass dieser zu Zeiten geringer Netzauslastung stattfindet. Dies vermeidet Netzspitzen und reduziert somit den Bedarf an teuren und CO₂-intensiven Spitzenlastkraftwerken [39]
- Integration erneuerbarer Energien: Intelligentes Laden kann mit der Erzeugung aus erneuerbaren Energien, insbesondere Wind- und Solarenergie, synchronisiert werden. Bei hoher Solareinspeisung können somit verstärkt EVs geladen werden, wodurch der Anteil erneuerbarer Energien maximiert wird [40]
- Emissionsreduktion: Durch das optimierte Laden zu Zeitpunkten hoher Erneuerbarer-Verfügbarkeit wird der CO₂-Fußabdruck des EV-Ladens reduziert [41]

Insgesamt unterstützt intelligentes Laden von Elektrofahrzeugen somit eine effizientere Netznutzung, die Maximierung des Anteils erneuerbarer Energien und die Reduktion von CO₂-Emissionen. Im Folgenden werden die Auswirkungen von intelligentem Laden auf die jeweiligen Quartiere hinsichtlich dieser Aspekte analysiert. Abschließend wird der Gesamteinfluss auf die Sanierungsstrategie untersucht.

Da eine detaillierte Modellierung der Ladevorgänge nicht im Fokus dieser Arbeit stand, wurde eine Vereinfachung vorgenommen. In Szenarien mit intelligenter Ladung werden Elektrofahrzeuge in das Energiemanagement integriert, um eine kostenoptimierte Steuerung der Ladegänge zu erreichen. Diese Strategie ähnelt der intelligenten EMS-Steuerung für Wärmepumpen. Die Fahrzeuge können sich innerhalb bestimmter Zeitschritte aufladen, sofern ein Mindest-Ladezustand beim Verlassen der Ladesäule von 50 % angenommen wird. Weitere Details sind in Zade et al. [42] zu finden. Im Vergleich dazu verfolgen Elektrofahrzeuge in Szenarien ohne intelligentes Laden keine Preissignale. Stattdessen beginnen die Fahrzeuge nach Anschluss an die Ladesäule sofort mit der Aufladung. Die Ladezeit bis zur Vollladung beträgt 4 Stunden, womit die Ladeleistung stark von der gefahrenen Strecke und dem Ladebedarf abhängt.

Energiemanagementsystem

Um den Energiebedarf der Gebäudetemperierung zu decken, kommt zur Lastregelung ein Energiemanagementsystem (EMS) zum Einsatz. Dieses steuert Leistung und Zeitpunkt der Wärmeenergieabgabe in den Wohnraum. Weiterhin wird ebenfalls der Ladestrom für die Elektromobilität gesteuert. Wie die Verbraucher gesteuert werden, hängt von den Optimierungszielen ab, diese können technischen (CO₂-Reduktion, Netzdienlichkeit) oder/und wirtschaftlichen Ursprungs sein. Das EMS verwendet die modellbasierte prädiktive Steuerung (MPC) zur Ermittlung der optimalen Fahrpläne der technischen Energieanlagen. Bei MPC werden die physikalischen Komponenten so realitätsnah wie möglich digital abgebildet, um genaue Prognosen über Energieflüsse für die nächsten Zeitschritte der Simulation vorherzusagen. Im Projekt wurde das von der Juniorforschungsgruppe Cleanvelope entwickelte CleanMod-Modell [35] verwendet. Dieses erlaubt eine modellbasierte prädikative Steuerung. Abbildung 8 zeigt die vereinfachte Regellogik des Modells, was mithilfe einer logischen Schleife auf das RC-Gebäudemodell zurückgreift. Damit können die Auswirkungen (Temperaturänderung) der Regelung auf die Zonen des Gebäudes erst vorhergesagt und anschließend optimiert werden. In dem Fall ohne EMS wird regelbasierte Steuerungsstrategien (Rule-Based Control)

aufgrund ihrer Einfachheit implementiert. Dabei folgt die Regelung vorher definierten Vorgaben, z.B. bestimmte Warmwassertemperatur im Wärmespeicher.

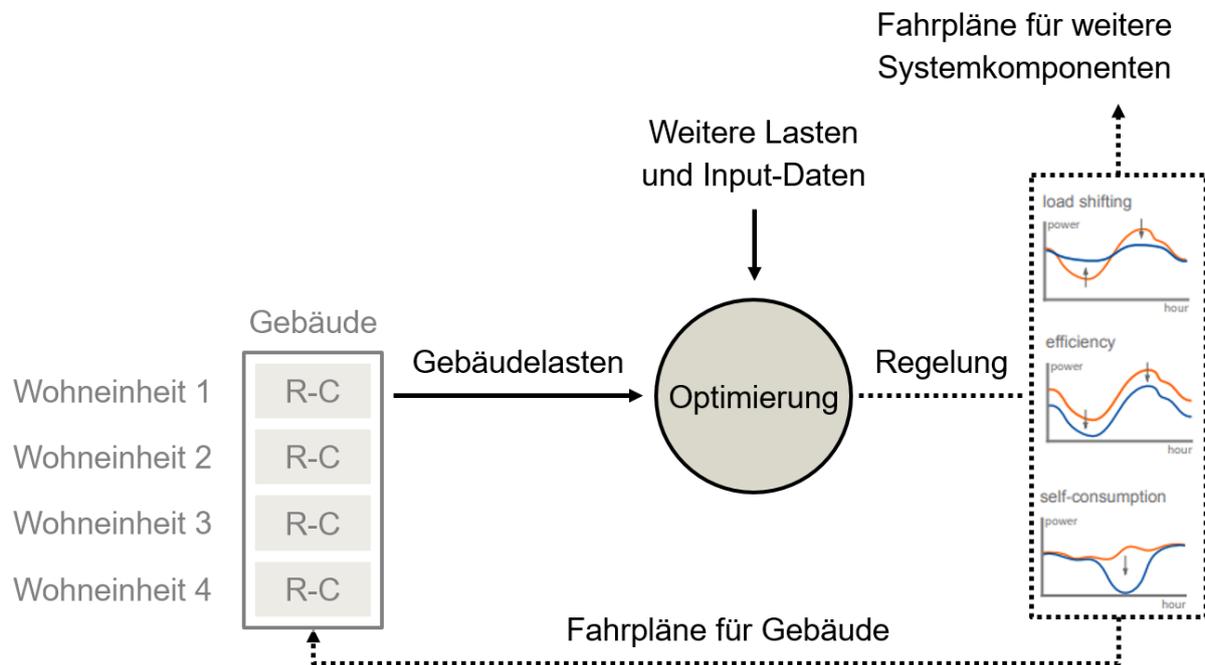


Abbildung 8: Schema des Optimierungsmoduls | Quelle: eigene Darstellung

Das Simulationsmodell für ReFlex berücksichtigt den Sektor Verkehr sowie weitere Einflussfaktoren auf die Regelung. Das Quartier wird als Summe von Einzelgebäuden, Elektromobilität und der Anlagentechnik abgebildet. Jedes Gebäude ist dabei wiederum in einzelne Zonen, jeweils eine pro Wohneinheit, unterteilt. Ein Energiemanagementsystem verknüpft und steuert die Einzelkomponenten über die Anlagenparameter und Lasten.

Das Optimierungsmodul des EMS basiert auf Pyomo [43], welches eine python-basierte, quelloffene Optimierungsmodellierungssprache ist. Wird ein MPC für das Lastmanagement eingesetzt, optimiert der Solver iterativ die Last der Verbraucher für jeden Prognosehorizont. Es werden nur die ersten Zeitschritte aus dem Optimierungsergebnis durchgeführt, dann wird der Zustand aller Parameter erneut berechnet. Die Berechnungen werden ausgehend vom neuen aktuellen Zustand wiederholt.

Neben den Modellbausteinen werden in die Optimierung noch relevanten Einschränkungen hinzugefügt:

- Strom- und Wärmebilanz
- Komfortbereich der Raumtemperatur

Die Strom- und Wärmebilanz stellt sicher, dass die elektrischen und thermischen Lasten von Gebäuden abgedeckt werden können. Die Einschränkung für die Raumtemperatur gewährleistet, dass die Raumtemperatur immer zwischen 20 und 25 Grad liegen muss. Außerdem muss noch die mittlere Raumtemperatur für jeden Prognosehorizont über 22 Grad sein, um den Temperaturabfall zu verhindern.

Lastmanagementstrategien

Die vom EMS gesteuerten Lasten folgen unterschiedlichen Strategien und Zielen. Zum Energiemanagement eines Quartiers wurden folgende Optimierungsziele definiert und implementiert:

- Minimierung der Kosten
- Minimierung der CO₂-Emissionen
- Minimierung der Spitzenlasten

Wenn die Gesamtkosten als Optimierungsziel für das Energiemanagement festgelegt werden, optimiert das Simulationsmodell die Lasten dahingehend, dass diese in Zeiträumen der günstigsten Strompreise anfallen. Falls variable Tarife eingesetzt werden, werden alle flexiblen elektrischen Verbraucher bei möglichst niedrigen Tarifen betrieben. Ein Beispiel ist der Nachtstrom, welcher in der Nacht wesentlich geringere Kosten als der Normaltarif hat.

In Bezug auf den CO₂-Ausstoß der Stromerzeuger des übergeordneten Systems wird die spezifische CO₂-Emission anhand vom stündlichen Strom-Mix berechnet.

Um die Ausbaurkosten des Stromnetzes zu minimieren, werden die Spitzenlasten ebenfalls als Optimierungsziel berücksichtigt. Der Einfachheit halber wird das primäre Optimierungsziel so gestaltet, dass die Spitzenlast im betrachteten Zeitraum möglichst klein sein soll. Dieses Ziel führt zu einem flacheren Lastgangprofil.

Szenariendefinition und Auswertungsmethoden

Parameter

Tabelle 5 zeigt das Zusammenspiel der in den Simulationen berücksichtigten Parameter und Ihre Varianten. In den unterschiedlichen Szenarien werden unter anderem die Auswirkungen verschiedener Regelungsstrategien, Sanierungsstände und PV-Durchdringung dargestellt.

Da nicht in jedem Simulationsszenario das volle PV-Potential genutzt wird, wurde eine entsprechende Datenbank erstellt. Diese Datenbank beschreibt für verschiedene Gebäudetypologien den Anteil der Gebäudehülle, der für die Installation von PV-Modulen geeignet ist. Die Datenbank unterscheidet zwischen Dach- und vertikalen Wandflächen.

Tabelle 5: Auswahl der simulierten Parameter | Quelle: eigene Daten

Stützjahr	2020	2030	2045
Gebäudehülle	Unsaniert	KfW70	KfW40
Photovoltaik	Kein PV	Min. PV-Potential (Dach)	Max. PV-Potential (Dach + Fassade))
Wärmeerzeuger	Gaskessel (GK)	GK / WP	Wärmepumpe (WP)
Steuerung	konventionell (Rule-Based + fix € Tarif)	Intelligent (EMS + fix € Tarif)	Intelligent+ (EMS + var. € Tarif)

In den Stützjahren ändert sich die Datengrundlage für das Wetter, die Energiepreise, CO₂-Emissionen und den Ausbau der Elektromobilität.

Die Steuerung der Wärmeerzeuger übernimmt dabei stets das Energiemanagementsystem (EMS) mit verschiedenen Ansätzen. Entweder Rule-based oder als intelligente Steuerung mit einem bestimmten Optimierungsziel (vgl. Kapitel Energiemanagementsystem).

Stützjahre

Für die simulierten Szenarien wurden die Stützjahre 2020, 2030 und 2045 gewählt. Die Auswahl dieser Jahre basiert auf den aktuellen politischen Entscheidungen [44] in Deutschland. Die aktuelle politische Agenda hat zum Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bis 2030 auf 80% und bis 2045 auf 100% zu steigern. Aus diesem Grund wurden die Jahre 2030 und 2045 für die Simulationen gewählt, um die Ziele der Regierungsagenda widerzuspiegeln. Durch die Verwendung der politischen Vorgaben als Referenzpunkte können die Simulationsergebnisse besser mit den angestrebten Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Energien abgeglichen werden.

Szenarien

Die Szenarien wurden durch die Kombination der im Abschnitt Parameter beschriebenen Parameter erstellt. Darauf ableitend wurden 130 Szenarien simuliert und untersucht. In diesem Bericht gehen wir auf die aussagekräftigsten Szenarien ein. Diese strukturierte Auswahl ermöglicht es, die wesentlichen Erkenntnisse aufzuarbeiten und darzustellen. Dazu wurde eine Abfolge von Fragestellungen genutzt, um den Auswahl- und Analyseprozess zu leiten. Zunächst werden einzelne Szenarien betrachtet, danach

wird die Analyse von Sanierungspfaden fortgeführt. Diese wiederum werden als Kombinationen von einzelnen Szenarien aufgebaut.

Folgende Leitfragen leiten durch die Auswertung der Ergebnisse:

- 1) Wo stehen wir heute?
- 2) Welche zukünftigen Folgen erwarten uns, wenn wir nichts unternehmen?
- 3) Was könnten wir in der Zukunft erreichen, wenn wir nur Effizienzmaßnahmen umsetzen?
- 4) Was könnten wir in einem zukünftigen Szenario erreichen, wenn wir zusätzlich die Potenziale der Energieflexibilität nutzen würden?
- 5) Welche Auswirkungen hat eine Umsetzung verschiedener Energiestandards auf das Energieflexibilitätspotenzial des Quartiers?
- 6) Wie könnte ein geeigneter Pfad aussehen, um ein optimales Szenario für die Zukunft zu erreichen?

Tabelle 6: Auswahl der wichtigsten Szenarien | Quelle: eigene Daten

Szenarien							
ID	Parameterkombination						
	Stutzjahr	Gebäudehülle (Gebäudeanteil im Quartier)			PV	Wärmesystem	Steuerung
		Unsaniert	KfW70	KfW40			
S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
S115	2030	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
S117	2030	0	0	100	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
S120	2030	100	0	0	Max. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
S101	2030	100	0	0	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell
S121	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
S116	2045	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
S22	2045	0	100	0	Max. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
S36	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
S26	2045	0	100	0	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
S122	2045	0	33	67	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
S123	2045	0	17	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
S113	2045	17	0	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+

Tabelle 6 zeigt die ausgewählten Szenarien mit der jeweiligen Parameterkombination welche bei den Simulationen als Eingabedaten fungieren. Diese Szenarien wurden ausgewählt, um die leitenden Fragestellungen zu adressieren. Dabei wurden folgende Kriterien zugrunde gelegt:

Die erste Leitfrage wird anhand des Szenarios S0 im Jahr 2020 behandelt:

- **S0** stellt das Basis-Szenario für das Jahr 2020 dar. Alle Gebäude sind nicht saniert und PV, Wärmepumpen und intelligente Regelung werden nicht berücksichtigt.

Die dritte Leitfrage wird durch die Szenarien S36 und S22 im Jahr 2045 adressiert:

- **S36** stellt ein Szenario für 2045 dar, bei dem alle Gebäude auf den Standard KfW40 saniert wären, Wärmepumpen eingebaut und das maximale PV-Potenzial im Quartier ausgeschöpft würde, jedoch ohne intelligente Laststeuerung. Dieses Szenario gilt als bestmöglich erreichbares Szenario mit konventionellen Maßnahmen ohne Nutzung der Energieflexibilität.
- **S22** stellt ein ähnliches Szenario für 2045 wie S36 dar, jedoch mit Sanierung auf KfW70 anstatt KfW40.

Die vierte Leitfrage wird durch die Szenarien **S40** und **S26** im Jahr 2045 behandelt:

- **S40** und **S26** entsprechen ähnlichen Szenarien für 2045 wie S36 und S22, implementieren aber zusätzlich intelligente Laststeuerung als Teil der Sanierungsmaßnahmen, um das Energieflexibilitätspotenzial des Quartiers zu nutzen. S40 stellt das bestmögliche Zukunftsszenario dar, da es alle konventionellen Maßnahmen (S36) mit intelligenter Steuerung und dynamischem Stromtarif kombiniert.

Die fünfte Leitfrage wird durch die Szenarien S122, S123 und S113 im Jahr 2045 adressiert:

- In **S122**, **S123** und **S113** haben alle Gebäude Wärmepumpen und nutzen ihr maximales PV-Potenzial. Intelligente Laststeuerung ist implementiert. Allerdings sind nicht alle Gebäude im Quartier auf den gleichen Standard saniert, sondern unterschiedliche Anteile im Originalzustand oder auf KfW70/40, um das Energieflexibilitätspotenzial zu diversifizieren:
 - S122: alle Gebäude saniert; Verhältnis 1 KfW70 (33%) zu 2 KfW40 (67%)
 - S123: alle Gebäude saniert, Verhältnis 1 KfW70 (17%) zu 5 KfW40 (83%)
 - S113: nicht alle Gebäude saniert, Sanierung auf KfW40, Verhältnis 1 nicht saniert (17%) zu 5 KfW40 (83%)

Die sechste Leitfrage wird beantwortet, indem die zuvor beschriebenen Szenarien für 2045 sowie die zusätzlichen Szenarien S115, S117, S120, S101, S118, S121 und S119 im Jahr 2030 betrachtet werden. Die Sanierungspfade bestehen aus zwei Phasen: Phase 1 bis 2030 und Phase 2 von 2030 bis 2045. Die Pfade werden durch Kombination von jeweils einem Szenario aus den drei betrachteten Referenzjahren aufgebaut. Das Szenario von 2020 stellt den Ausgangszustand dar, das Szenario von 2045 den Endzustand und das Szenario von 2030 einen möglichen Zwischenzustand. Daraus folgt:

- **S115** repräsentiert wie S0 2020 und S116 2045 ein Szenario ohne Eingriff und dient zur Bewertung der Sanierungspfade.

- **S117, S120 und S101** stellen Extremsituationen dar, bei denen nur konstruktive oder nur technische Maßnahmen umgesetzt werden:
 - **S117:** Fokus auf konstruktive Sanierung, alle Gebäude auf KfW40, aber keine Maßnahmen bei Wärmepumpen, PV und Laststeuerung.
 - **S120:** Gegensatz zu S117, Fokus auf technische Maßnahmen, keine konstruktive Sanierung, aber maximaler Einsatz von Wärmepumpen und PV.
 - **S101:** Wie S120, zusätzlich mit intelligenter Laststeuerung.
- **S118, S121 und S119** repräsentieren Mischsituationen aus konstruktiven und technischen Maßnahmen:
 - **S118:** Fokus auf Energiedeckung durch PV, 33% der Gebäude auf KfW40, PV zur Ausschöpfung des maximalen PV-Potenzials.
 - **S121:** Fokus auf Reduktion des Energiebedarfs, 67% der Gebäude auf KfW40, PV zur Ausschöpfung des minimalen PV-Potenzials in Kombination mit Wärmepumpen.
 - **S119:** Wie S121, zusätzlich mit intelligenter Laststeuerung.

Mit den Szenarien für 2030 soll analysiert werden, welchen Einfluss die Abfolge der Maßnahmen in der ersten und zweiten Sanierungsphase bis zum Erreichen des Endzustands 2045 auf die im Projekt betrachteten Key Performance Indicators (KPIs) hat, wenn der gesamte Sanierungspfad berücksichtigt wird. Damit können zusätzliche Fragen beantwortet werden, wie: Ist es am besten, sich in der ersten Phase nur auf die Verbesserung der konstruktiven Standards oder eher auf die vollständige Installation von Wärmepumpen und PV zu konzentrieren? Ist eine Kombination der Maßnahmen besser als diese beiden Extremfälle? Welches Verhältnis zwischen konstruktiven und technischen Maßnahmen liefert die besten Ergebnisse? Ist ein Pfad, der im besten Einzelszenario 2045 endet, auch dann am optimalsten, wenn dieser Endzustand in Kombination mit den Szenarien des Zustands 2030 betrachtet wird?

Folgende Tabelle fasst die in diesem Bericht dargestellten Sanierungspfade zusammen:

Tabelle 7: Übersicht der gewählten Sanierungspfade | Quelle: eigene Daten

Sanierungspfade								
ID	Szenarien							
	ID	Stutzjahr	Gebäudehülle (Gebäudeanteil im Quartier)			PV	Wärmesystem	Steuerung
			Unsaniert	KfW70	KfW40			
SP0	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S115	2030	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S116	2045	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
SP1	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell
	S122	2045	0	33	67	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+

SP2	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell
	S123	2045	0	17	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP3	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell
	S113	2045	17	0	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP4	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP5	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S122	2045	0	33	67	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP6	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S123	2045	0	17	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP7	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S113	2045	17	0	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP8	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP9	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S101	2030	100	0	0	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP10	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S117	2030	0	0	100	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP11	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S117	2030	0	0	100	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S36	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
SP12	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S120	2030	100	0	0	Max. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
	S36	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
SP13	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S121	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
	S122	2045	0	33	67	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+

SP14	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S121	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
	S123	2045	0	17	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP15	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S121	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
	S113	2045	17	0	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP16	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S121	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP17	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S121	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
	S36	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Konventionell
SP18	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell
	S36	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Konventionell

Rückwirkung der Quartiere auf das übergeordnete Energiesystem

Um die Rückwirkung eines Quartiers auf das übergeordnete Energiesystem zu quantifizieren, werden zwei wesentliche Punkte betrachtet: die Emissionen und die Netzstabilität. Die Emissionen, die aus dem Strombezug des Quartiers resultieren, werden basierend auf zeitlich hochaufgelösten Emissionsfaktoren berechnet und berücksichtigen auch nicht-lokale CO₂-Emissionen durch vorgelagerte Prozessketten zur Stromproduktion wie z.B. Kohle- oder Gaskraftwerke. Diese Faktoren berücksichtigen die Entwicklung sowohl der konventionellen als auch der erneuerbaren Energien in der Zukunft. Ebenso werden die Emissionen aus der lokalen Erdgasnutzung in die Bilanz einbezogen. Der Export von im Quartier erzeugtem Strom an das übergeordnete Netz wird dabei als Emissionsminderung berücksichtigt. Um diese Effekte abbilden zu können, wurden Methoden und Bilanzräume (vgl. Abbildung 10) festgelegt. Die Simulationen berücksichtigen die sich in der Zukunft ändernden CO₂-Emissionen. Grafik Abbildung 9 zeigt die Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes über eine Woche in den Stützjahren 2020, 2030 und 2045.

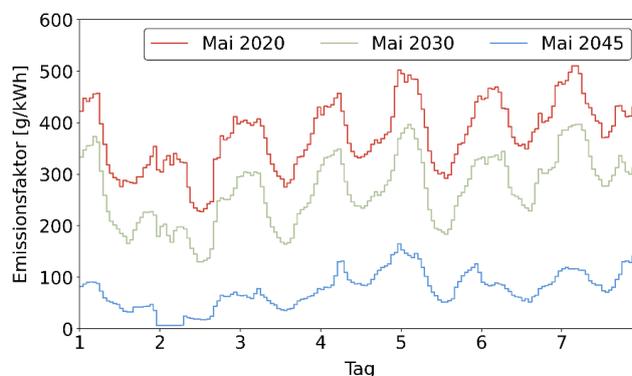


Abbildung 9: Tagesverläufe der CO₂-Emissionen von Netzstrom in den Jahren 2020, 2030 und 2045 | Quelle: eigene Darstellung

Während der Stromimport Emissionen verursacht, mindert der Export von lokal erzeugtem Strom den Erzeugungsbedarf im übergeordneten Netz und damit die Gesamtemissionen. Dieser Effekt wird durch negative Emissionen im Quartier berücksichtigt. Zusätzlich zu den Emissionen des Strombezugs entstehen bei der Erdgasnutzung für Heizzwecke ebenfalls CO₂-Emissionen, die in die Bilanz einfließen. Insgesamt ergibt sich so folgende Struktur für die CO₂-Bilanz des Quartiers:

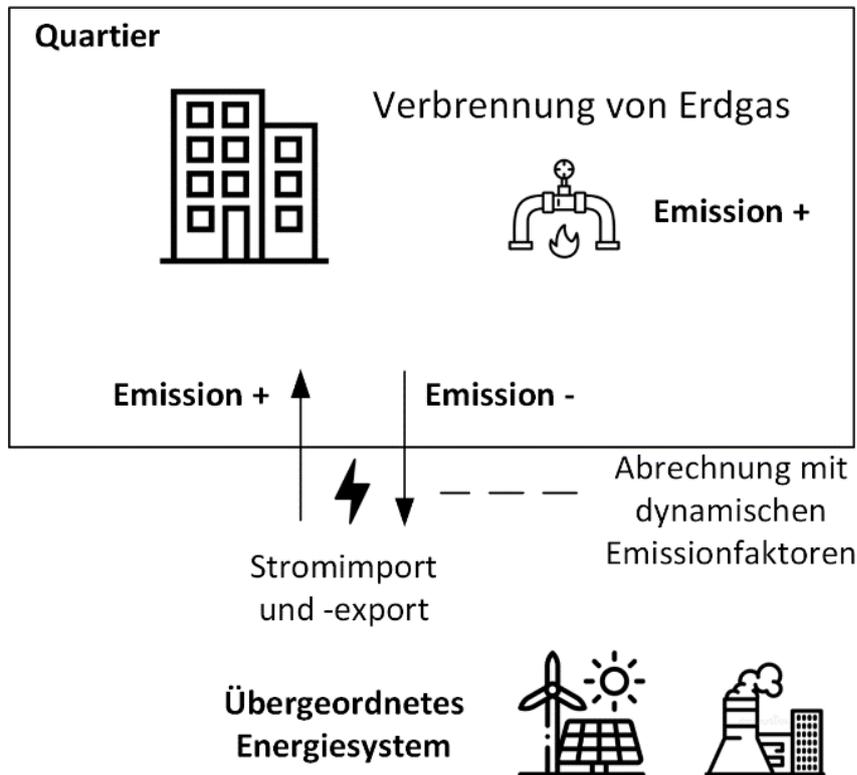


Abbildung 10: Bilanzraum der Betrachtung | Quelle: eigene Darstellung

Key Performance Indicators (KPIs)

KPIs dienen im Allgemeinen dazu, eine Zielerreichung quantifizierbar zu machen. Im Projekt ReFlex stehen Ziele in Bezug auf CO₂-Emissionen und Rückwirkung auf das Verteilnetz im Vordergrund, dementsprechend wurden die KPIs wie in diesem Kapitel beschreiben gewählt.

Die folgende Tabelle zeigt die KPIs, die zur Bewertung der Ergebnisse verwendet werden. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Effizienz und Flexibilität. Bei den effizienzbezogenen KPIs wird unterschieden zwischen KPIs, die mit Umweltfaktoren zusammenhängen, und solchen, die sich auf die Wirtschaftlichkeit beziehen. Hinsichtlich der Flexibilität wird ebenfalls differenziert zwischen quartiersinternen und verteilnetzbezogenen Faktoren, um KPIs aus Bottom-up- und Top-down-Perspektive zu unterscheiden.

Tabelle 8 gewählte Key Performance Indicators (KPIs) | Quelle: eigene Daten

Effizienz				
Umweltfaktoren	CO ₂	CO ₂ Emissions	CO ₂ -Emissionen	[t]
	PED	Primary Energy Demand	Primärenergiebedarf	[MWh]
Wirtschaftlichkeit	OPC	Operating Costs	Betriebskosten	[k€]
	EAC	Equivalent Annual Costs	Äquivalente Jahreskosten	[k€]
Flexibilität				
Quartiersintern	SCR	Self-consumption Rate	Eigenverbrauch	[%]
	SSR	Self-sufficiency Rate	Autarkiegrad	[%]
Verteilnetz	SCR	Self-consumption Rate	Eigenverbrauch	[%]
	SSR	Self-sufficiency Rate	Autarkiegrad	[%]
	FLR	Flexible Load Ratio	Verhältnis der flexiblen Lasten	[%]

Flexibilitätsindikatoren - Netzdienlichkeit

Die Sanierungspfade beeinflussen nicht nur den Eigenverbrauch und den Energiedeckungsgrad eines Quartiers, sondern auch die Rückwirkung auf das übergeordnete Energiesystem. Um diese Effekte angemessen zu quantifizieren, wurden folgende Kenngrößen verwendet:

- 1) Eigenverbrauchsanteil / Self-Consumption-Ratio (SCR): Der Anteil der lokalen Erzeugung, der vor Ort verbraucht wird.
- 2) Autarkiegrad / Self-Sufficiency Ratio (SSR): Der Anteil des Strombedarfs, der durch lokale Erzeugung gedeckt wird.
- 3) Netzinteraktionsindex / Grid-Interaction-Index (GII): Die Variabilität des Energieflusses mit dem Netz, normiert mit der Trafokapazität.
- 4) Anteil flexibler Lasten / Flexible-Load-Rate (FLR): Der Anteil flexibler Lasten an der Gesamtlast.
- 5) Anteil hoher Lasten / High-Load-Ratio (HLR): Der Anteil der Zeit, in der die Trafoauslastung 60% oder mehr beträgt, bezogen auf den Gesamtzeitraum.

Der Eigenverbrauchsanteil (#1: SCR) und der Autarkiegrad (#2: SSR) beschreiben die Nutzung erneuerbarer Energien sowie die Inselbetriebsfähigkeit des Quartiers und sind daher Indikatoren für das lokale Netz. Ein hoher Eigenverbrauch bedeutet, dass mehr lokal erzeugter PV-Strom direkt vor Ort genutzt wird. Ein hoher Autarkiegrad zeigt an, dass weniger Strom extern bezogen werden muss.

Der Netzinteraktionsindex (#3: GII), der Anteil flexibler Lasten sowie der Anteil hoher Lasten erfassen die Rückwirkungen auf das übergeordnete Netz. Der Netzinteraktionsindex quantifiziert die Variabilität der Energieflüsse. Hohe Werte deuten auf volatile Lasten hin, die nur schwer durch Grundlastkraftwerke abgedeckt werden können. Ein hoher Anteil flexibler Lasten (#4: FLR) zeigt das Potential für netzdienliches Lastmanagement. Der Anteil hoher Lasten (#5: HLR) gibt an, wie häufig die Trafoauslastung kritische Werte erreicht. In dieser Studie werden vor allem Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge als flexible Lasten betrachtet. Abbildung 11 illustriert die Berechnungsgrundlage der Indikatoren.

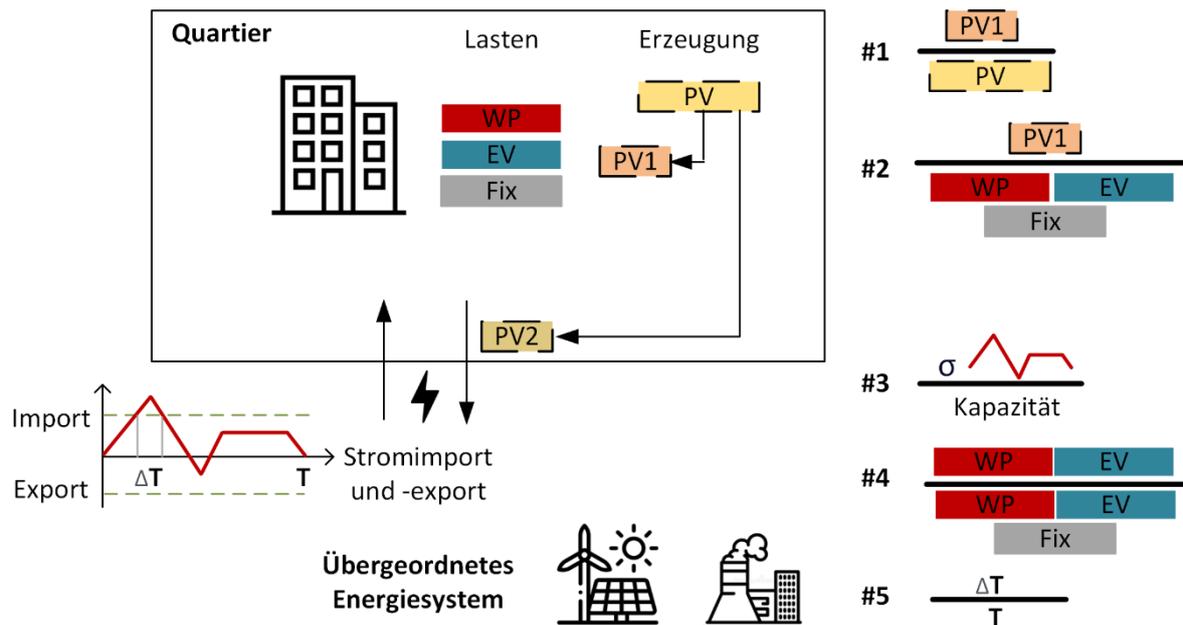


Abbildung 11: Kenngrößen zur Abbildung der Netzdienlichkeit | Quelle: eigene Darstellung

Wirtschaftlichkeitsindikatoren

Um die Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen vergleichen zu können, wurden die in Tabelle 8 genannten Kenngrößen verwendet. Dabei wurden neben den Investitionskosten auch die Lebensdauer der Maßnahmen, die Inflation sowie die jährlichen Energiekosten berücksichtigt. Dies erfolgte über die Berechnung der Äquivalenten Jahreskosten (Equivalent Annual Costs, EAC) gemäß folgender Gleichung:

$$EAV_{overall} = \frac{EAC_{S1} * 10 + \frac{EAC_{S2} * 25}{1,41}}{35}$$

Für die Berechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Lebensdauer der Sanierung der Gebäudehülle: 35 Jahre [45], [46]
- Lebensdauer Anlagentechnik (PV/WP): 20 Jahre [47],
- Zinssatz für Kapitalkosten 3,5 % p.a. und Inflation 2 %

Gewichtung der KPIs – systemisches Optimum

Die Auswertung der Szenarien und Pfade erfolgt mithilfe der folgend dargestellten Tabellen und Diagramme. Die Diagramme basieren auf den Simulationsergebnissen der jeweiligen Szenarien.

Ein Beispiel für die Graphen ist in Abbildung 12 zu sehen. Die Graphen bestehen aus zweidimensionalen Streudiagrammen, wobei jeder dargestellte Punkt einem der simulierten Szenarien entspricht. Die Y-Achse des Graphen repräsentiert stets den Wert des Szenarios für den KPI CO₂-Emissionen und die X-Achse den Wert für einen der anderen KPIs. Zusätzlich zu den Hauptachsen sind in den Graphen auch Sekundärachsen dargestellt. Die dort angegebenen Werte entsprechen der relativen Veränderung im Vergleich zum Basis-Szenario S0. Pfade werden durch Verbindungslinien zwischen den Punkten der 3

Szenarien, aus denen sich der Pfad zusammensetzt, dargestellt. In den Graphen ist die ideale Ecke markiert, die die Richtung zu den optimaleren Szenarien angibt.

Ein Beispiel für die Tabellen ist in Tabelle 10 dargestellt. In den Tabellen sind die Szenarien bzw. Pfade aufgelistet und die Werte für die einzelnen Indikatoren angegeben. Beim Basis-Szenario S0 bzw. Basis-Pfad SP0 handelt es sich um die tatsächlichen Werte der KPIs. Bei den anderen Szenarien bzw. Pfaden sind die Ergebnisse als relative Veränderung zum Basis-Fall angegeben.

In der Tabelle der Sanierungspfade entsprechen die KPI-Werte einem Durchschnitt der KPIs über den gesamten Analysezeitraum von 25 Jahren von 2020 bis 2045. Die KPI-Werte der Zwischenjahre werden durch Interpolation der simulierten Referenzjahre 2020, 2030 und 2045 berechnet. Eine Ausnahme bildet der KPI AEC, bei dem keine Interpolation sondern eine Berechnung unter Berücksichtigung der zeitlichen Kostenentwicklung durchgeführt wurde.

In den Tabellen wird zusätzlich zu den KPI-Werten eine Rangfolge der Szenarien und Pfade vorgeschlagen. Dabei werden drei Rangfolgen berechnet: eine nur mit den Effizienz-KPIs, eine nur mit den Flexibilitäts-KPIs und eine globale Rangfolge mit allen KPIs.

Die Rangfolgen werden basierend auf dem Ansatz von Garcia & Torres [48] bestimmt. Zunächst werden die Ergebnisse der einzelnen KPIs separat rangfolgebestimmt, beginnend mit 1 für das beste Ergebnis. Anschließend wird eine gewichtete Summe der Ränge gebildet, wobei nur die Ränge der jeweils betrachteten KPIs gemäß den oben erläuterten Kriterien berücksichtigt werden. In allen drei Fällen beträgt die Summe der Gewichtungsfaktoren 1. Tabelle 9 zeigt die in dieser Arbeit verwendeten Gewichtungsfaktoren. Abschließend werden die Szenarien bzw. Pfade gemäß dem gewichteten Rang eingeordnet.

In den Tabellen ist zusätzlich zur Rangfolge eine farbliche Codierung von Grün nach Rot implementiert, um die besten Ergebnisse hervorzuheben.

Tabelle 9: Gewichtungsfaktoren für die Rangfolgenberechnung | Quelle: eigene Daten

Bezeichnung	CO2	PED	OPC	AEC	SCR	SSR	FLR	GII	HLR	Summe
Effizienz	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0	0	0	0	1
Flexibilität	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1
Global	0.125	0.125	0.125	0.125	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1

Szenarienauswertung

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse anhand der gewählten Sanierungsszenarien beschrieben.

Einleitend werden die Ergebnisse für das urbane Quartier im Detail dargestellt. Dazu werden zunächst die Tabellen und Grafiken abgebildet. Dann werden die Ergebnisse beschrieben, welche sich auf die Leitfragen beziehen und die Analyse der definierten Einzelszenarien und vorgestellten Sanierungspfade umfassen. Die detaillierte Beschreibung der suburbanen und ländlichen Quartiere werden im Anhang beschrieben.

Weiterhin wird ein Vergleich zwischen den drei Fällen (urban, suburban und ländlich) durchgeführt, um die Beschreibung der Ergebnisse zu ergänzen. Dieser Vergleich konzentriert sich auf die Sanierungspfade und hebt Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den Fällen hervor.

Urbanes Quartier

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für die drei Szenarien städtisches, suburbanes und ländliches Quartier erläutert. Für jedes Szenario werden zunächst Tabellen und Graphen gezeigt. Anschließend werden die Ergebnisse beschrieben, wobei auf die Leitfragen aus dem Abschnitt Ergebnisse eingegangen wird. Abschließend erfolgt ein Vergleich der drei Szenarien.

Auf den Diagrammen in Abbildung 12 und Abbildung 13 werden die Ergebnisse der einzelnen Szenarien für eine CO₂-optimierte Betriebsweise mit einem auf Netzdienlichkeit optimierter Betriebsweise eines Quartiers verglichen. Die bestplatzierten Sanierungspfade bezüglich Effizienz und Flexibilität sind markiert. Die Graphen mit den übrigen KPIs finden sich im Anhang.

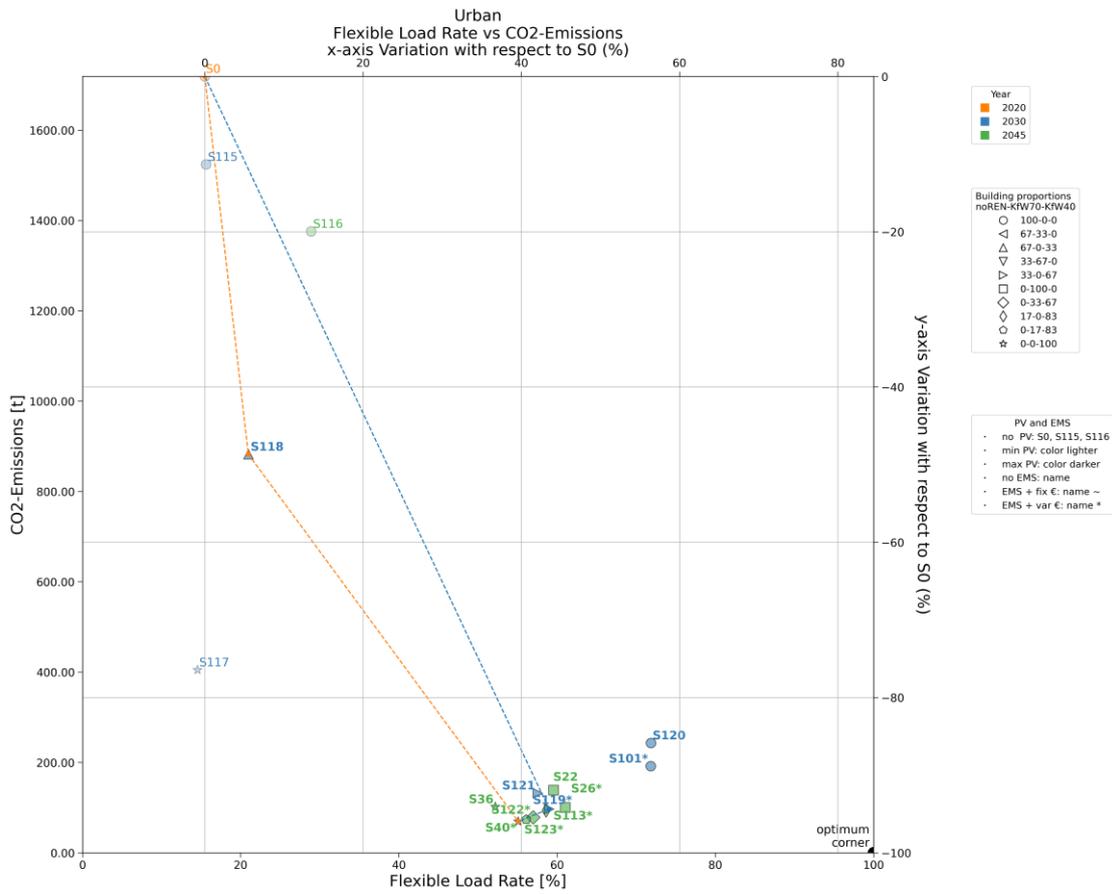


Abbildung 12: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der FLR | Quelle: eigene Darstellung

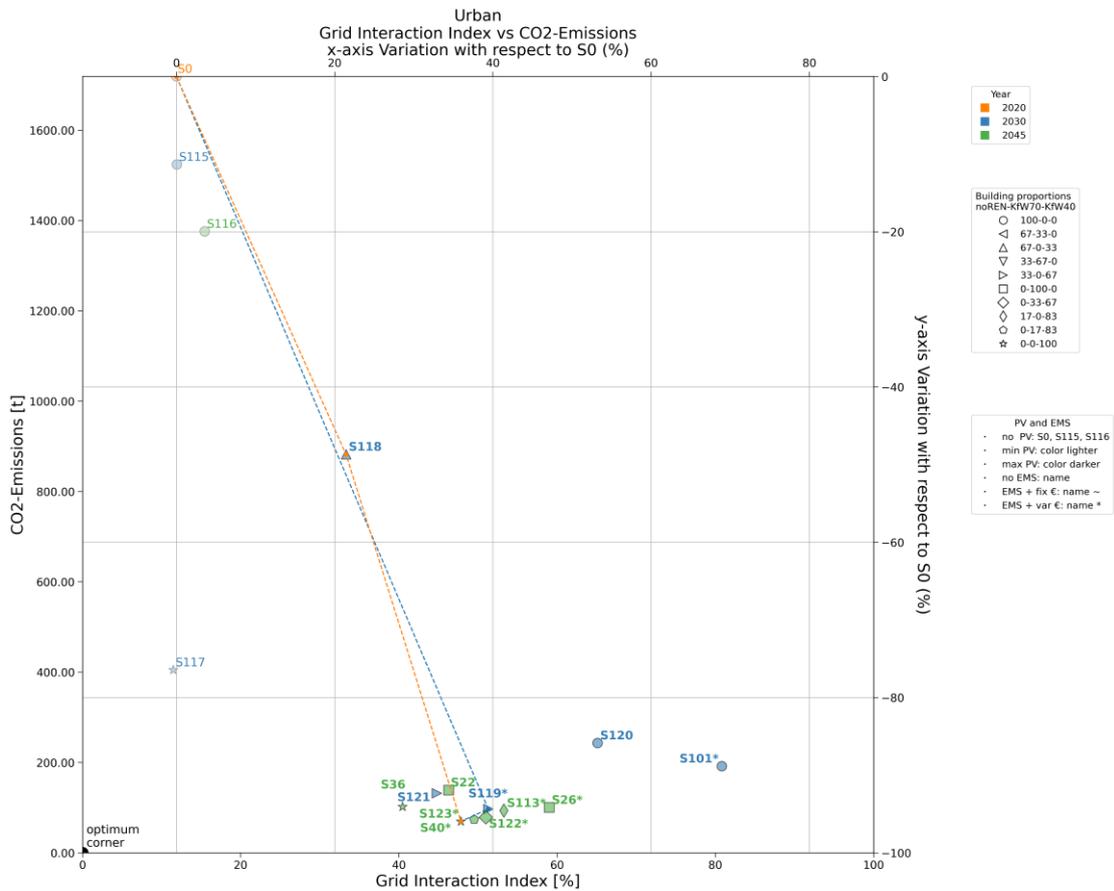


Abbildung 13: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber dem GII | Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 10: Ergebnisse der Szenarien für die Jahre 2020 und 2045 | Quelle: eigene Daten

Szenario	Effizienz				Flexibilität					Rang		
	Umweltfaktoren		Wirtschaftlichkeit		Quartiersintern		Verteilnetz			Effizienz	Flexibilität	Global
	CO ₂	PED	OPC	EAC	SCR	SSR	FLR	GII	HLR			
	[t]	[MWh]	[k€]	[k€]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
S0	1719	9355	643	682	0	0	15.47	11.88	0.48			
% Variation gegenüber Basisszenario S0												
S116	-20	0.5	17.2	9.6	0	0	13.44	3.57	2.48	7	5	7
S22	-91.9	-68	-39.4	23.7	60.54	27.84	44.08	34.41	17.55	8	5	8
S36	-94.1	-74.9	-54.1	25.8	58.53	31.82	36.7	28.57	9.95	6	6	6
S26	-94.2	-74.8	-53	16.1	77.9	34.5	45.57	47.12	11.79	5	4	5
S40	-96	-81.1	-65.8	19.2	76.21	38.92	39.62	35.95	8.29	1	1	1
S122	-95.4	-79.3	-62.1	18.5	76.7	37.52	41.5	39.1	9.32	3	3	3
S123	-95.7	-80.2	-63.9	18.8	76.44	38.16	40.61	37.62	8.81	2	2	2
S113	-94.6	-76.1	-55.8	17.7	77.29	36.17	43.12	41.37	11.07	4	4	4

Tabelle 11: Ergebnisse der vorgestellten Sanierungspfade unter Berücksichtigung der Szenarien der Stützjahre 2020, 2030 und 2045 | Quelle: eigene Daten

Pfad	Effizienz				Flexibilität					Effizienz		
	Umweltfaktoren		Wirtschaftlichkeit		Umweltfaktoren		Wirtschaftlichkeit			Effizienz	Flexibilität	Global
	CO2	PED	OPC	EAC	SCR	SSR	FLR	GII	HLR			
[t]	[MWh]	[k€]	[k€]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]				
SP0	1580	9563	499	579	0	0	20.46	13.52	1.3			
% Variation gegenüber Basissanierungspfad SP0												
SP1	-46.6	-41.5	-42.6	8.2	47.79	32.89	11.66	22.06	2.11	11	3	9
SP2	-46.7	-41.8	-43.1	8.3	47.7	33.09	11.38	21.59	1.95	10	2	8
SP3	-46.3	-40.5	-40.7	7.7	47.98	32.46	12.18	22.79	2.67	13	7	12
SP4	-46.8	-42.1	-43.6	8.6	47.63	33.34	11.06	21.06	1.78	9	1	6
SP5	-71.4	-60	-49.1	12.6	61.21	28.18	30.66	31.06	8.61	3	4	3
SP6	-71.5	-60.3	-49.6	12.7	61.13	28.39	30.38	30.58	8.45	2	5	2
SP7	-71.1	-59	-47.3	12.1	61.4	27.75	31.18	31.78	9.17	4	6	4
SP8	-71.6	-60.6	-50.2	13	61.06	28.63	30.06	30.05	8.28	1	3	1
SP9	-68.6	-50.8	-32.2	8.4	63.39	24.95	36.48	44.8	13.11	10	10	13
SP10	-61.9	-53.2	-44	16.3	24.39	12.45	7.84	10.13	1.69	11	13	14
SP11	-61.2	-51.2	-40.7	20.2	18.73	10.18	6.91	7.77	2.22	14	14	17
SP12	-66.3	-45	-21.1	15	50.28	20.29	35.56	34.58	20.42	14	15	18
SP13	-70.3	-57	-43.6	14.5	53.92	25.42	29.94	27.8	10.31	7	11	10
SP14	-70.4	-57.3	-44.1	14.6	53.84	25.63	29.66	27.32	10.15	6	10	7
SP15	-70	-56	-41.8	14	54.11	24.99	30.46	28.52	10.88	8	12	11
SP16	-70.5	-57.6	-44.7	14.9	53.77	25.87	29.34	26.79	9.98	5	9	5
SP17	-69.8	-55.6	-41.3	18.8	48.11	23.6	28.41	24.43	10.52	12	14	16
SP18	-46.1	-40.2	-40.3	12.5	41.97	31.07	10.13	18.69	2.32	15	8	15

Auswertung anhand der Leitfragen

Wo stehen wir heute?

Die Ergebnisse des Basis-Szenarios S0 aus Tabelle 10 zeigen einen jährlichen CO₂-Ausstoß (CO₂) von 1719 t in Verbindung mit einem jährlichen Primärenergiebedarf (PED) von 9355 MWh. Bezüglich der Kosten ergeben sich jährliche Betriebskosten (OPC) von 643 k€ und Äquivalente Jahreskosten (EAC) von 682 k€. Hinsichtlich der Energieflexibilität aus Quartierssicht betrachtet, weist das Basis-Szenario einen Eigenverbrauchsanteil (SCR) und eine Eigenversorgungsrate (SSR) von 0% auf, da keine PV-Anlage berücksichtigt wird. Bezüglich der Netzflexibilität ergeben sich ein Flexibilitätsanteil der Last (FLR) von 20,46%, hauptsächlich durch die Elektromobilität, sowie Netzinteraktionsindex (GII) und Höchstlastanteil (HLR) von 13,52% bzw. 1,3%, die auf moderate Lastschwankungen und keine Überlastung des Ortsnetztransformators hindeuten.

Welche zukünftigen Folgen erwarten uns, wenn wir nichts unternehmen?

Die Ergebnisse von Szenario S116 aus Tabelle 10 zeigen, dass sich der jährliche CO₂-Ausstoß bis 2045 gegenüber S0 um 20% reduziert, hauptsächlich durch die flexible Stromnutzung zu Zeiten mit einer Stromproduktion mit niedrigen spezifischen CO₂-Emissionen. Höhere Temperaturen durch Klimawandel tragen ebenfalls zur Reduktion bei. Mehr E-Autos erhöhen die elektrische Speicherkapazität und damit den FLR. Dies führt zu einer CO₂-Reduktion des genutzten Stromes. PED und OPC steigen ebenfalls leicht um 0,5% bzw. 17,2%. Der FLR nimmt bedingt durch die Speicherkapazität der Elektroautos um 13,44% zu. Trotz höherer Speicherkapazität erhöhen die E-Autos den GII um 3,57% und HLR um 2,48%.

Was könnten wir in der Zukunft erreichen, wenn wir nur Effizienzmaßnahmen umsetzen?

Wie die Ergebnisse von Szenario S22 in Tabelle 10 zeigen, würde eine Komplettsanierung auf Kf W70 zu einer Reduktion von CO₂ und PED um 91,9% bzw. 68% gegenüber S0 führen. Die Betriebskosten sinken um 39,4%, allerdings steigen dabei die Sanierungskosten die äquivalenten Jahreskosten um 23,7%. PV würde einen SCR von 60,54% und SSR von 27,84% ermöglichen. Der FLR steigt auf 44,08%. GII und HLR erhöhen sich ebenfalls.

Im Fall einer ähnlichen Sanierung, bei der jedoch der KfW40-Standard erreicht wird (vgl. Szenario S36), wurden die Ergebnisse in den meisten Kennzahlen weiter verbessert. So würde die Reduktion im Vergleich zu S0 bei den Effizienzfaktoren 94,2% für CO₂, 74,9% beim Primärenergiebedarf und 54,1% bei den Betriebskosten betragen. In Bezug auf die Flexibilitätsfaktoren steigt der SSR um 31,82%, während die Zunahme beim Grid Integration Index und HLR auf 28,57% bzw. 9,95% begrenzt wäre. Diese Verbesserungen sind jedoch mit einem höheren Anstieg der AEC um 25,8% (2,1% mehr als S22) verbunden. Darüber hinaus ist ein geringerer Anstieg auf 58,36% beim SCR (2% weniger als S22) und von 36,7% beim FLR (7,38% weniger als S22) zu beobachten.

Daraus lässt sich ableiten:

Eine Steigerung der Effizienz der Gebäudehülle führt zu einer Verringerung von CO₂-Emissionen, des Primärenergieverbrauchs und der Betriebskosten (OPC). Gleichzeitig erhöhen sich jedoch die äquivalenten Jahreskosten (EAC) und der Autarkiegrad (SSR), während die Selbstverbrauchsrate abnimmt (SCR).

Im Vergleich zur höchsten Effizienz der Gebäudehülle bietet ein System mittlerer Effizienz den Vorteil einer flexibleren Lastenverteilung im Netz (FLR). Dies geht jedoch mit erhöhten Anforderungen an das Verteilnetz in Bezug auf Lasteninteraktion (GII) und Spitzenlasten (HLR) einher.

Was könnten wir in einem zukünftigen Szenario erreichen, wenn wir zusätzlich die Potenziale der Energieflexibilität nutzen würden?

Die Ergebnisse aus Szenario S26 (KfW70 mit EMS) aus Tabelle 10 zeigen, dass sich durch intelligente Lastregulierung zusätzlich zu Sanierungsmaßnahmen alle KPIs bis den GII gegenüber S22 ohne

Laststeuerung verbessern lassen. Bei den Effizienz-KPIs erreicht S26 eine Reduktion von CO₂ um 94,2% (2,3% mehr als S22), von PED um 74,8% (6,8% mehr als S22), von OPC um 53% (13,6% mehr als S22) sowie eine Steigerung von EAC um nur 16,1% (7,6% weniger als S22). Bei den Flexibilitäts-KPIs erreicht S26 einen Anstieg von SCR um 77,9% (17,36% mehr als S22), von SSR um 34,5% (6,66% mehr als S22), von FLR um 45,57% (1,49% mehr als S22) und eine Reduktion von HLR um 11,79% (5,76% weniger als S22). Dies geht mit einem Anstieg von GII um 47,12% (12,71% mehr als S22) einher. Der höhere GII-Wert resultiert jedoch aus einem angepassten Verhalten des Quartiers, um auf die Netzbedürfnisse zu reagieren, was positiv zu bewerten ist. Dies lässt sich anhand der niedrigeren OPC bestätigen.

Auch beim Vergleich von S40 (KfW40 mit Laststeuerung) gegenüber S36 ohne Laststeuerung zeigen sich Verbesserungen in allen KPIs bis auf den GII. Da S36 bereits bessere Effizienz-KPIs als S22 aufweist, fallen hier die Verbesserungen durch Laststeuerung (S40) geringer aus als von S22 auf S26. Bei den Flexibilitäts-KPIs sind die Verbesserungen generell höher. Insgesamt bietet S40 die besten Ergebnisse und belegt Rang 1.

Die gezielte Nutzung der Energieflexibilität durch intelligente Steuerung bringt verschiedene Vorteile mit sich. Zum einen trägt sie zur Dekarbonisierung bei, indem sie die CO₂-Emissionen reduziert. Gleichzeitig verbessert sie die Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen, was sich in den äquivalenten Jahreskosten (EAC) niederschlägt.

Des Weiteren führt diese intelligente Steuerung dazu, dass im Quartier eine erhöhte Verfügbarkeit flexibler Lasten (FLR) gegeben ist, was die Anpassungsfähigkeit des Energiesystems steigert. Gleichzeitig werden die Spitzenlasten für die Trafostationen (HLR) optimiert, was die Effizienz des Verteilnetzes erhöht.

Allerdings ist zu beachten, dass diese Maßnahme auch zu einer verstärkten Interaktion der Lasten zwischen dem Quartier und dem Netz führt (GII). Dies erfordert eine sorgfältige Planung und Koordination, um eine stabile Energieversorgung sicherzustellen.

Der Vergleich von S36 ohne Laststeuerung mit S26 mit Laststeuerung zeigt zudem, dass die Effizienz-KPIs von S26 trotz schlechterem Energiestandard nahe an S36 liegen. Intelligente Laststeuerung könnte also bei einem niedrigeren Sanierungsstandard ähnliche Effizienz wie ein höherer Standard ohne Laststeuerung ermöglichen.

Die Laststeuerung in S40 verbessert nicht nur die KPIs gegenüber S36, sondern begrenzt auch die Kostensteigerung über den Gesamtzeitraum. Intelligente Lastregulierung ist daher eine zielführende Maßnahme, um die Vorteile von Sanierungsmaßnahmen zu maximieren und Investitionskosten zu begrenzen.

Die Ausnutzung der Energieflexibilität im Quartier kann eine niedrige Gesamteffizienz kompensieren. Der geringe CO₂-Ausstoß nicht durchsanierter Quartiere wird durch optimierte Betriebsweisen der Wärmepumpen (intelligente Steuerung) erreicht.

Welche Auswirkungen hat eine Umsetzung verschiedener Energiestandards auf das Energieflexibilitätspotenzial des Quartiers?

Die Auswertung in Tabelle 10 zeigt, dass Szenario S123 den zweiten Rang einnimmt, S122 Rang 3 und S113 Rang 4. S123 hat bis auf EAC, SCR und FLR die besten Werte. Im Vergleich zu S40 haben S123, S122 und S113 bessere EAC-Werte, dafür schlechtere andere KPIs. Generell gilt: Je besser CO₂, desto besser PED, OPC, SSR, GII und HLR, aber schlechter EAC, SCR und FLR.

S113 stellt eine mögliche Situation dar, in der nicht alle Gebäude saniert werden können, beispielsweise aus Gründen des Denkmalschutzes. Es erreicht eine Reduktion von CO₂ um 94,6%, von PED um 76,1% und von OPC um 55,8% sowie einen hohen SCR von 77,29% und FLR-Anstieg um 43,12% gegenüber S0. Auch die unsanierten Gebäude tragen durch ihre Flexibilität weiterhin zur Dekarbonisierung des

Quartiers bei. S113 zeigt, dass auch ohne umfassende Sanierung gute Reduktionen bei CO₂-, PED- und OPC möglich sind, wenn die Flexibilitätspotenziale der Bestandsgebäude genutzt werden.

Wie könnte ein geeigneter Pfad aussehen, um ein optimales Szenario für die Zukunft zu erreichen?

In Tabelle 11 zeigt, dass die Pfade SP8 bezüglich Effizienz und SP4 bezüglich Flexibilität am besten abschneiden. Beide enden im Optimum Szenario S40. SP8 beinhaltet in der ersten Phase jedoch S119 mit Fokus auf Nachfragereduktion und Laststeuerung, SP4 dagegen S118 mit Fokus auf PV-Ausbau. Insgesamt hat SP8 die beste Bewertung nach der dargestellten Rangfolge.

Wie erwähnt stellt S113 eine mögliche Option für denkmalgeschützte Gebäude dar. Der ähnliche Pfad SP7 endet in S113 statt S40. SP7 erreicht bezüglich Effizienz ähnliche Werte wie das Optimum SP8 und bewahrt teilweise die Flexibilitätsvorteile von SP4.

SP7 könnte damit eine gute Option für Quartiere mit teilweise denkmalgeschützten Gebäuden darstellen, bei denen nicht alle Gebäude saniert werden können. SP7 kombiniert gute Effizienz mit genutzten Flexibilitätspotenzialen der Bestandsgebäude und stellt einen guten Kompromiss für diese Quartiere dar.

Suburban und ländlich

Die Ergebnisse für das suburbane und ländliche Quartier finden sich im Anhang.

Fallvergleich mit Fokus auf Sanierungspfade

Diese Analyse konzentriert sich auf die vier besten Sanierungspfade in der Rangliste. Zunächst werden die vier führenden Pfade in der Kategorie Effizienz hervorgehoben. Anschließend werden die vier Bestplatzierten in der Kategorie Rangordnung identifiziert und mit der vorherigen Kategorie verglichen. Abschließend werden die vier Spitzenreiter in der Kategorie Global überprüft, um Sanierungspfade zu ermitteln, die in den Top 4 aller Kategorien vertreten sind. Die Analyse beginnt mit dem städtischen Fallbeispiel und setzt sich mit den urbanen- und ländlichen Quartieren fort, wobei die Ergebnisse dabei untereinander verglichen werden. Besondere Aufmerksamkeit gilt den Sanierungspfaden, die für alle drei Fälle gleich sind.

Auswertung urbanes Quartier

Nachfolgende Tabelle zeigt die in den vorgestellten Sanierungspfaden erhaltenen Ergebnisse unter Berücksichtigung der Szenarien für die Jahre 2020, 2030 und 2045.

Tabelle 12: Ergebnisse der Sanierungspfade für das urbane Quartier

Pfad	Effizienz				Flexibilität					Ranking		
	Umweltfaktoren		Wirtschaftlichkeit		Quartiersintern		Verteilnetz			Effizienz	Flexibilität	Global
	CO2	PED	OPC	EAC	SCR	SSR	FLR	GII	HLR			
[t]	[MWh]	[k€]	[k€]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]				
SP0	1580	9563	499	579	0	0	20.46	13.52	1.3			
% Variation gegenüber Basissanierungspfad SP0												
SP1	-46.6	-41.5	-42.6	8.2	47.79	32.89	11.66	22.06	2.11	11	3	9
SP2	-46.7	-41.8	-43.1	8.3	47.7	33.09	11.38	21.59	1.95	10	2	8
SP3	-46.3	-40.5	-40.7	7.7	47.98	32.46	12.18	22.79	2.67	13	7	12
SP4	-46.8	-42.1	-43.6	8.6	47.63	33.34	11.06	21.06	1.78	9	1	6
SP5	-71.4	-60	-49.1	12.6	61.21	28.18	30.66	31.06	8.61	3	4	3
SP6	-71.5	-60.3	-49.6	12.7	61.13	28.39	30.38	30.58	8.45	2	5	2
SP7	-71.1	-59	-47.3	12.1	61.4	27.75	31.18	31.78	9.17	4	6	4
SP8	-71.6	-60.6	-50.2	13	61.06	28.63	30.06	30.05	8.28	1	3	1
SP9	-68.6	-50.8	-32.2	8.4	63.39	24.95	36.48	44.8	13.11	10	10	13
SP10	-61.9	-53.2	-44	16.3	24.39	12.45	7.84	10.13	1.69	11	13	14
SP11	-61.2	-51.2	-40.7	20.2	18.73	10.18	6.91	7.77	2.22	14	14	17
SP12	-66.3	-45	-21.1	15	50.28	20.29	35.56	34.58	20.42	14	15	18
SP13	-70.3	-57	-43.6	14.5	53.92	25.42	29.94	27.8	10.31	7	11	10
SP14	-70.4	-57.3	-44.1	14.6	53.84	25.63	29.66	27.32	10.15	6	10	7
SP15	-70	-56	-41.8	14	54.11	24.99	30.46	28.52	10.88	8	12	11
SP16	-70.5	-57.6	-44.7	14.9	53.77	25.87	29.34	26.79	9.98	5	9	5
SP17	-69.8	-55.6	-41.3	18.8	48.11	23.6	28.41	24.43	10.52	12	14	16
SP18	-46.1	-40.2	-40.3	12.5	41.97	31.07	10.13	18.69	2.32	15	8	15

Das systemische Optimum ist SP8, welches auch dem effizienzbezogenen Optimum entspricht. Das flexibilitätsbezogene Optimum ist SP4. Der einzige Sanierungspfad, der in den Top 4 der drei Ansätze (effizienzbezogen, flexibilitätsbezogen und systemisches Optimum) enthalten ist, ist SP5.

Tabelle 13: Ergebnisse der Sanierungspfade für ausgewählte Szenarien im urbanen Quartier

Sanierungspfade										
ID	Szenarien									
	ID	Parameterkombination						PV	Wärmesystem	Steuerung
		Stutzjahr	Gebäudehülle (Gebäudeanteil im Quartier)							
			Unsanier	KfW70	KfW40					
Efficiency-related Optimum & Systemic Optimum										
SP8	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell		
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		
Flexibility-related Optimum										
SP4	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell		
	S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell		
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		
Within Top 4 in all three approaches										
SP5	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell		
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		
	S122	2045	0	33	67	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		

Ergebnisse und Diskussion

Sanierungspfade

Die Sanierungspfade (SP0 bis SP18) in der Tabelle 7 repräsentieren verschiedene Szenarien (S0 bis S123) für energetische Quartierssanierungen, wobei SP0 als Referenzszenario ohne Optimierung oder Sanierung dient. Diese Pfade unterscheiden sich hinsichtlich der Gebäudehülle, des Einsatzes von Photovoltaik (PV), des Wärmesystems und der Steuerung.

Der Referenzpfad SP0 besteht aus Szenarien, die durchgehend unsanierte Gebäude mit konventioneller Gaskesselheizung und ohne PV darstellen. Es repräsentiert den aktuellen Zustand ohne jegliche Sanierungsmaßnahmen. Die Szenarien S0, S116 und S115 unterscheiden sich lediglich in den zugrundeliegenden Wetterdaten, Stromemissionen und -preisen für die Simulation.

Die anderen Sanierungspfade (SP1 bis SP18) zeigen eine fortschreitende Entwicklung hin zu energieeffizienteren Quartieren. Sie beinhalten unterschiedliche Kombinationen aus unsanierten Gebäuden und solchen, die nach KfW70 oder KfW40 Standards saniert wurden. Die Integration von PV-Systemen variiert von keinem PV (wie im Referenzszenario) bis hin zum maximalen Potential. Bei den Wärmesystemen wechselt die Konfiguration von Gaskesseln zu Wärmepumpen, und die Steuerung variiert zwischen konventionell und intelligent.

Der Sanierungspfad, der den höchsten Effizienzstandard betrachtet, ist derjenige, bei dem alle Gebäude im Quartier auf den KfW40-Standard saniert werden. Unter den aufgeführten Pfaden ist dies beispielsweise bei SP4, SP8, SP9, SP10, SP11, SP12, SP16, SP17 und SP18 der Fall, wo im Jahr 2045 100% der Gebäude auf den KfW40-Standard saniert sind. Diese Pfade beinhalten den Wechsel zu effizienten Wärmepumpen-Systemen und maximalen PV-Potenzialen, zusammen mit einer intelligenten oder konventionellen Steuerung.

Die Auswertung der verschiedenen Sanierungspfade und Szenarien für das Ziel Jahr 2045 zeigt auch, dass die Szenarien mit der höchsten Effizienz auch die besten Ränge in Bezug auf Flexibilität erreichen. Die Szenarien S40, S122, S123 und S113 stellen damit gewissermaßen den Zielstandard für die Sanierungsstrategien dar. Bei der Auswahl der optimalen Sanierungspfade geht es nun vorrangig darum, die besten Zwischenschritte und Maßnahmenreihenfolgen zu finden, um diese Top-4-Szenarien zu erreichen. Daraus lässt sich ableiten, dass in Energienetzen der Zukunft eine Maximierung der Energieeffizienz keine Probleme mehr verursacht. Eine systemische Optimierung ist dann nur noch für die Übergangsphase relevant. In dieser Phase kommt es darauf an, die Sanierungsmaßnahmen so aufeinander abzustimmen, dass Effizienz und Flexibilität gleichermaßen berücksichtigt werden.

Finanzierungschancen

Dieses Kapitel untersucht das Potenzial zukünftiger Erlösmöglichkeiten von Quartieren mit hohem Anteil erneuerbarer Energien und elektrischer Wärmeerzeugung zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von energetischen Sanierungen. Analysiert werden die Teilnahme an lokalen Energie- und Flexibilitätsmärkten sowie Direktvermarktung über Laststeuerung.

Lokale Energiemärkte (LEM): Laut Weinhardt et al. [49] sind LEM Plattformen, die den Handel von lokal erzeugter Energie innerhalb einer Gemeinschaft ermöglichen. Sie erlauben Stromendverbrauchern und Kleinproduzenten die direkte Marktteilnahme und fördern den Ausbau lokaler erneuerbarer Energien. Mengelkamp et al. [50] heben die Informationsfunktion der LEM durch variable Preise hervor, die Angebot und Nachfrage widerspiegeln.

Lokale Flexibilitätsmärkte (LFM): Unter Demand-Response-Programmen erlauben diese Märkte, wie Jin et al. [51] ausführen, den Handel mit elektrischer Flexibilität in begrenzten geografischen Bereichen.

Verteilte Energieressourcen wie Speicher, Laststeuerungsteilnehmer oder Elektrofahrzeuge können hier ihre Flexibilität auf lokaler Ebene anbieten.

Direkte Laststeuerung (DLC): Dies ermöglicht Systembetreibern, elektrische Lasten in Zeiten hoher Nachfrage oder Netzungleichgewicht direkt zu steuern. Tahersima et al. [52] stellen fest, dass DLCs Kostensenkungen erlauben, indem der Bedarf an teurer Spitzenenergie reduziert und Netzungleichgewichte abgeschwächt werden.

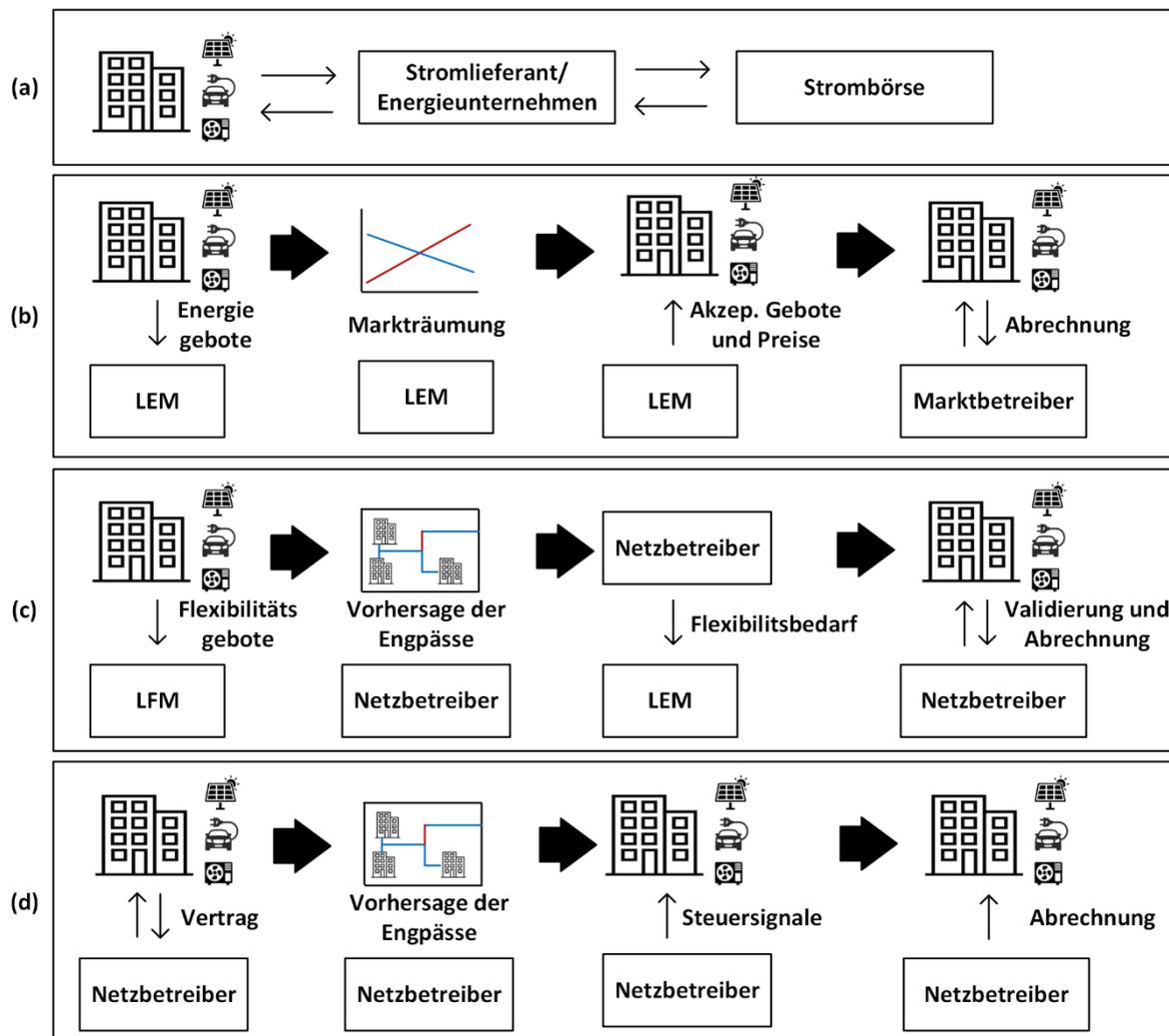


Abbildung 14: Abwicklung der Geschäftsmodelle für Quartiere in der Zukunft | Quelle: eigene Darstellung

Durch die Beteiligung an einem lokalen Energiemarkt die Wirtschaftlichkeit des Quartiers verbessert werden. Die wirtschaftlichen Vorteile ergeben sich entweder aus günstigeren Strombezugskosten oder aus höheren Einspeisevergütungen. Forschungen von You et al. [53] haben diese Vorteile bereits quantifiziert. Wir nutzen diese Ergebnisse als Referenz, obwohl die Rahmenbedingungen leicht abweichen. Abbildung 15 zeigt, dass bei einer Wärmepumpendurchdringung von 60% eine Kosteneinsparung von 6,8% erreicht wurde. In dieser Betrachtung gehen wir jedoch von einer 100%igen Ausstattung der Haushalte mit Wärmepumpen aus. Eine Extrapolation deutet darauf hin, dass bei 100% Wärmepumpen eine Einsparung von 7,2% möglich wäre.

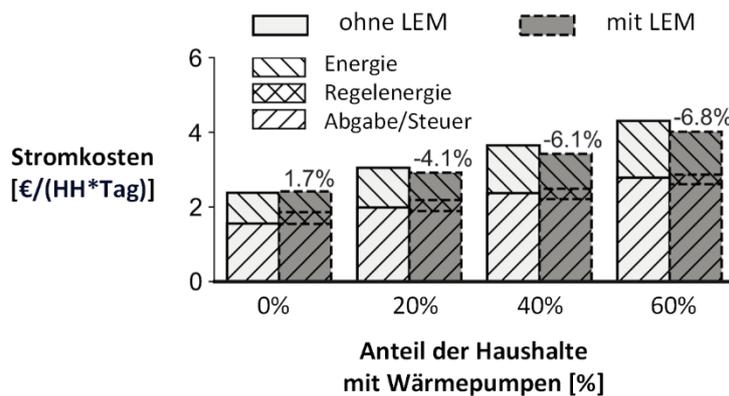


Abbildung 15: Einsparung der Stromkosten durch einen lokalen Energiemarkt in einem Quartier mit Wärmepumpen | Quelle: eigene Darstellung

Für ein urbanes Quartier übersteigen die Annuitäten der Investitionskosten die jährlichen Energiekosten um das Dreifache. Daher führt die 7,2 %-ige Einsparung bei den Energiekosten durch einen lokalen Energiemarkt nur zu einer Reduktion der gesamten Annuität um 1,8%.

Die zusätzlichen Gewinne in einem lokalen Flexibilitätsmarkt hängen stark von den Flexibilitätspreisen und dem Flexibilitätsbedarf des Netzbetreibers ab. Da sich lokale Flexibilitätsmärkte derzeit noch in der Anfangsphase befinden, existiert keine feste Regulierung bezüglich der Kosten für eine Einheit Flexibilität. Eine Annahme für die Flexibilitätspreise wird von You et al. [54] beschreiben. Demnach betragen die Gewinne circa 15% der ursprünglichen Strompreise. Das heißt, bei einer Bereitstellung von 1 kW Flexibilität für eine Stunde ist ein monetärer Vorteil von 5 Cent zu erwarten. Entscheidend ist auch der Flexibilitätsbedarf des Netzbetreibers, der die abgerufene Flexibilitätsmenge und -häufigkeit bestimmt. Dieser ist von vielen Faktoren wie Integration erneuerbarer Energien, steigender Nachfrage, Elektrofahrzeugen und veralteter Infrastruktur abhängig. Zur groben Abschätzung wird im Durchschnitt zweistündig 2 kW Flexibilität pro Haushalt abgerufen, was 20 Cent pro Tag und 73 Euro pro Jahr entspricht. In einem Quartier mit circa 400 Haushalten ergibt sich daraus eine Reduktion der äquivalenten jährlichen Kosten um 3,6%.

Bei direkter Laststeuerung wird vertraglich festgelegt, welche Vergütung der Netzbetreiber den Teilnehmenden monatlich oder jährlich zahlt. Wie bei Flexibilitätsmärkten ist die Höhe stark situationsabhängig. Xu et al. [55] stellen fest, dass die Festlegung des Anreizbetrags oft willkürlich ist. Versorger in den USA bieten \$25 bis \$100 pro Jahr bzw. \$5 bis \$20 pro Monat. Ahmed et al. [56] nehmen 12,50 Euro pro elektrischer Heizung an. Basierend auf der Literatur erscheint hier ein jährlicher Anreiz von 30 Euro angemessen, da mehrere Anlagen wie Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge und Batterien für Laststeuerung zur Verfügung stehen.

Basierend auf die Einsparung der Stromkosten in unterschiedlichen Geschäftsmodellen kann die relative Änderung in äquivalenten jährlichen Kosten und neue Amortisationszeit abgeleitet werden. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 14: Erlösmöglichkeiten der Flexibilität | Quelle: eigene Daten

Erlösmöglichkeit	Äquivalente jährliche Kosten [Euro/a]
Lokaler Energiemarkt	-1,8 %
Lokaler Flexibilitätsmarkt	-3,6 %
Direkte Laststeuerung	-1,6 %

Die Teilnahme eines Quartiers an einem lokalen Energiemarkt kann, wie die Untersuchung zeigt, deutliche wirtschaftliche Vorteile bieten. Der höhere Durchdringungsgrad von Wärmepumpen ermöglicht entsprechende Einsparungen bei den Energiekosten. Durch die hohen Investitionskosten wirken sich die Einsparungen nur begrenzt auf die Gesamtannuität aus.

Lokale Flexibilitätsmärkte bergen ein hohes wirtschaftliches Potential, befinden sich jedoch noch in der Aufbauphase und werden durch viele externe Faktoren beeinflusst. Es ist eine genaue Beobachtung des Marktes erforderlich, die wirtschaftlichen Vorteile abschließend festzustellen.

Die direkte Laststeuerung stellt eine weitere Option dar, Erlöse zu erzielen, wenngleich die schwer abschätzbare Festlegung der Vergütung im Vertrag problematisch ist. Ein zu niedriger Erlös durch den Netzbetreiber kann nur wenige Nutzer motivieren, an Laststeuerungsprogrammen teilzunehmen.

Es ist zudem hervorzuheben, dass bei allen Geschäftsmodellen zusätzliche Investitionskosten beispielsweise für Regelungs- und Kommunikationssysteme entstehen. Während lokale Energie- und Flexibilitätsmärkte eine zusätzliche Plattform erfordern, ist der Mehraufwand bei der direkten Laststeuerung am geringsten. Sie lässt sich ohne Weiteres in das Energiemanagementsystem der Studie integrieren.

Die Berechnungen zeigen, dass lokale Flexibilitätsmärkte das größte Potenzial bieten. Diese Schlussfolgerung basiert jedoch auf Annahmen, die angesichts der komplexen Situation stark variieren können. Die Ergebnisse und Diskussion dienen daher nur zur groben Abschätzung der Erlösgrößenordnungen und deren möglichen Einfluss auf die energetische Sanierung.

Bewertung der Ergebnisse und der Zielerreichung

Hypothese: **Innovative systemische Sanierungsstrategien, die über die Energieeinsparung und Nutzung erneuerbarer Energien hinaus auch die Energieflexibilität gezielt berücksichtigen, können gleichzeitig die Transformation zum klimaneutralen Gebäudebestand und zu einem zukunftsfähigen Energiesystem optimieren sowie neue Finanzierungspotenziale durch Prosuming und Flexuming erschließen.**

Die Ergebnisse des Projekts stützen die Hypothese, dass durch Ausnutzung der Energieflexibilität der Gebäudebestand effektiver dekarbonisiert werden kann. Dies kann ohne zusätzliche Belastungen für das Stromnetz erfolgen. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse wirtschaftliche Vorteile. Die Quantifizierung der Finanzierungspotenziale soll Bestandteil zukünftiger Forschung sein.

Hypothese: **Die Gesamtoptimierung auf Quartiersebene erhöht die Umsetzbarkeit, Bezahlbarkeit und Robustheit von Sanierungslösungen sowie die Resilienz der Energieversorgung.**

Die Ergebnisse bestätigen, dass bestehende Sanierungsstrategien durch eine quartiersweite Optimierung wirtschaftlich effizienter gestaltet werden können, ohne dass grundlegend neue Konzepte erforderlich sind.

Die Umsetzbarkeit quartiersweiter Sanierungsstrategien kann durch die Entwicklung und Anwendung replizierbarer Modelle, Pfade und Lösungen weiter vereinfacht werden. Ein zusätzlicher finanzieller Anreiz für die Umsetzung ergibt sich durch die Möglichkeiten des Prosumings, welches die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen erhöht.

Die Sanierungsansätze auf Quartiersebene konnten durch die Anwendung von Indikatoren quantitativ bewertet werden. Dabei zeigte sich, dass eine nicht bei allen Gebäuden durchgeführte Vollsanierung nur marginale Auswirkungen auf die Reduktion der CO₂-Emissionen hat. Gleichzeitig lassen sich Abstriche beim Sanierungsgrad einzelner Gebäude durch eine optimierte Betriebsweise des Gesamtquartiers ausgleichen. Somit ergibt sich ein breiterer Bereich für die Optimierung der CO₂-Emissionen und die Robustheit gegenüber unvollständigen Quartierssanierungen erhöht sich.

Der Aspekt der Bezahlbarkeit bestätigte sich, was sich in den verbesserten Ergebnissen der Äquivalenten Jahreskosten (EAC) bei der Implementierung optimierter Lastregelung widerspiegelte.

Hypothese: Im städtischen, suburbanen und ländlichen Raum ergeben sich dabei unterschiedliche Sanierungsstrategien entsprechend der spezifischen Quartierstrukturen und Netzanforderungen.

Die Hypothese, dass sich aufgrund spezifischer Quartiersstrukturen und Netzanforderungen grundsätzlich unterschiedliche Sanierungsstrategien ergeben, konnte nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede zwischen den Sanierungsstrategien für die verschiedenen Quartierstypen nicht signifikant sind. Im ländlichen Raum besteht zwar ein größerer Gestaltungsspielraum, doch tendieren die Strategien über alle Raumtypen hinweg zur Konvergenz.

Es stellte sich heraus, dass die idealen Sanierungsstrategien generell für städtische, suburbane und ländliche Quartiere gleich sind, wenn das Ziel eine Balance zwischen CO₂-Neutralität und Netzverträglichkeit ist. Dennoch zeigten sich Unterschiede in den Strategien, wenn eine Vollsanierung aufgrund bestimmter Einschränkungen, nicht möglich ist.

Betrachtung der Erfolgsindikatoren

Für typische Verteilnetzstrukturen in städtischen, suburbanen und ländlichen Siedlungen sind die jeweiligen Flexibilitätsanforderungen spezifiziert.

Bei der Untersuchung generischer Bestandsnetze wurde deutlich, dass keine Engpässe innerhalb der Verteilnetzstrukturen identifiziert werden konnten. Der begrenzende Faktor lag stets beim Ortsnetztransformator, dessen maximale Kapazität als kritische Grenze vorgegeben und in den Simulationen nicht überschritten werden durfte.

Es wurden zwar relevante Indikatoren für die Anforderung und Auslastung des Ortsnetztransformators abgeleitet, jedoch ließen sich daraus keine speziellen Flexibilitätsanforderungen für ein generisches Verteilnetz ableiten. Dieses Ergebnis impliziert, dass die Flexibilitätsanforderungen primär durch die Kapazitäten und die Betriebsweise des Ortsnetztransformators determiniert sind und weniger durch die spezifischen Verteilnetzstrukturen selbst. Folglich ergibt sich der Schluss, dass die Flexibilitätsanforderungen nur teilweise spezifiziert werden konnten und weiterführende Untersuchungen spezieller Verteilnetze im Detail erforderlich sind.

Ein Maßstab zur systemischen Optimierung der Gesamt-CO₂-Emissionen unter Berücksichtigung der Rückwirkungen eines Quartiers auf die Netzstabilität und CO₂-Bilanz des Energiesystems steht zur Verfügung.

Durch die Entwicklung und Anwendung von Indikatoren und einem Bewertungssystem ermöglichen eine umfassende Beurteilung und Rangfolge der Quartiere hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Energienetz und deren CO₂-Effizienz.

Die Indikatoren CO₂-Emission (CO₂), Primärenergieverbrauch (PED), Betriebskosten (OPC), äquivalente Jahreskosten (EAC), Eigenverbrauchsanteil (SCR), Autarkiegrad (SSR), Netzinteraktionsindex (GII), Anteil flexibler Lasten (FLR), Anteil hoher Lasten (HLR) wurden ermittelt und ergeben über eine gewichtete Formel einen quantitativen Vergleichswert bezogen auf die Auswirkung des Quartiers auf Stromnetz und Emissionen sowie die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen.

Alle relevanten Teilmodelle sind entwickelt und in einer Gesamtmodellstruktur implementiert, die eine automatisierte Simulation und Ergebnisauswertung der Quartiersszenarien erlaubt.

Die durchgeführten Simulationen basieren hauptsächlich auf eigens entwickelten Softwareprogrammen. Der zugehörige Quellcode wurde unter https://gitlab.lrz.de/quarter_tools/cleanmod veröffentlicht. Eine

umfassende Dokumentation sowie eine Anleitung zur Benutzung der Software sind im Anhang beigefügt, diese ist auch https://gitlab.lrz.de/quarter_tools/cleanmod/-/blob/main/README.md abrufbar

Anhand der definierten und simulierten Sanierungsstrategien wurden die Synergien und Wechselwirkungen von ganzheitlichen Strategien (Quartiersverbund statt Einzelgebäude, Einbezug der Interaktionen zwischen Gebäude, Elektromobilität und Stromnetz) für die drei Szenarien spezifiziert:

- **Abwägung von Wärmeschutzstandard und Netzdienlichkeit hinsichtlich Kosteneffizienz und Emissionsminderung**
- **Netzdienlichkeits- und Lastmanagementpotentiale von Quartieren bei gezielter Kombination unterschiedlicher energetischer Gebäudestandards und durch den Einbezug der Elektromobilität im Quartier**
- **Potenziale, die Vermarktung von eigenerzeugtem Strom und Energieflexibilität in Wirtschaftlichkeitsberechnungen anzusetzen und dadurch die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen zu verbessern**

Diese Indikatoren wurden nicht nur spezifiziert, sondern auch in simulierten Sanierungsszenarien abgebildet und durch eine Reihe von Schlüsselindikatoren (KPIs) sowie einem Ranking bewertet.

Die Bewertung und Gewichtung dieser KPIs erfolgt nach einem festgelegten Schema, das im Abschnitt Key Performance Indicators (KPIs) näher beschrieben ist. Dieses Schema ermöglicht es, die unterschiedlichen Sanierungsszenarien ganzheitlich zu bewerten und zu vergleichen, um die effektivsten Strategien hinsichtlich eines Gesamtoptimums zu identifizieren.

Die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen wird in den Simulationen durch die Berücksichtigung der flexiblen Strompreise und dem Energiebedarf bewertet.

Die genauen Parameter und die Methodik der Simulation sowie die daraus resultierenden Ergebnisse und Rankings bieten somit eine fundierte Grundlage für die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Sanierungsstrategien auf Quartiersebene.

Die Erkenntnisse aus den simulierten Sanierungsszenarien ermöglichten es, quartiersspezifische Wege für den spezifizierten Gebäudebestand abzuleiten. Diese Pfade zeigen die Unterschiede auf, wie eine schrittweise Sanierung unter Berücksichtigung verschiedener Regelungsstrategien, Ausbau von Photovoltaik und energetischer Standards über die Zeit auf die KPIs auswirken. Für die Darstellung der Sanierungsszenarien wurden Stützjahre wie 2030 und 2045 gewählt, welche als Meilensteine für die Bewertung des Fortschritts der Sanierungsmaßnahmen dienen.

Durch die Festlegung dieser Stützjahre können zeitabhängige Veränderungen und die Entwicklung der Sanierungsmaßnahmen im Quartier präzise abgebildet und bewertet werden. Dies schließt die Entwicklung der Energieeffizienz, die Integration von Elektromobilität und die Möglichkeiten der Eigenstromvermarktung sowie die Nutzung von Energieflexibilität ein.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des Projekts ReFlex zeigen, dass Nutzung von Energieflexibilität durch intelligente Steuerung der elektrifizierten Wärmeerzeuger und Laderegulierung von Elektrofahrzeugen eine niedrige Gesamteffizienz des Quartiers kompensieren kann. Intelligente Steuerung optimiert dabei die Betriebsweise der Wärmepumpen, dass durch die Anpassung der Zeitpunkte des Verbrauchs eine hohe Dekarbonisierung erreicht wird. Der Verbrauch kann in anderen Szenarien auch dahingehend optimiert werden, dass er sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen auswirkt. Dabei werden preisflexible Stromtarife bestmöglich genutzt, um die Betriebskosten zu reduzieren. Dadurch sinkt nicht der Energieverbrauch, sondern es verschiebt sich immer nur der Zeitpunkt, an dem Energie verbraucht wird.

Auch inhomogene Sanierungsstrategien mit unterschiedlichen Sanierungsgraden im Quartier kann hohe Emissions-Einsparungen erzielen, selbst wenn nicht alle Gebäude auf den höchsten Energiestandard gebracht werden. Die Sanierungsstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz unterschieden sich zu denen, die eine CO₂-Einsparung durch Flexibilisierung der Lasten optimieren.

Ein Quartier mittlerer Durchdringung der Sanierungsquote bietet ein höheres Energieflexibilitätspotenzial für das Verteilnetz als eine homogene Sanierung auf den KfW-Effizienzhausstandard 40, erzeugt allerdings auch höhere Anforderungen ans Netz. Das Lastmanagement kann dabei die Flexibilitätspotenziale weitergehend und zielgerichtet nutzen und so die Höchstlastanforderungen reduzieren.

Insgesamt zeigt sich, dass Sanierungsstrategien mit einer frühzeitigen Ausschöpfung der Flexibilitätspotenziale zusammen mit mittelfristig moderaten Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich Emissionseinsparung und Amortisation vergleichbar mit einer Maximierung der Energieeffizienz aller Gebäude sind.

[Wie verändern sich die baulichen und anlagentechnischen Sanierungsstrategien und Zielstandards für Einzelgebäude, wenn der Bezugsrahmen auf Quartiersebene erweitert und die Netzdienlichkeit neben der CO₂-Neutralität als Optimierungsziel berücksichtigt wird?]

Die baulichen und anlagentechnischen Sanierungsstrategien sowie die Zielstandards für Einzelgebäude erfahren eine neue Bedeutung, sobald der Bezugsrahmen auf die Quartiersebene erweitert wird und Netzdienlichkeit neben CO₂-Neutralität als Optimierungsziel integriert wird. Die Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass konstruktive Sanierungsmaßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs auch zu einem globalen Optimum zwischen Energieeffizienz und Netzdienlichkeit führen. Demnach ist eine kontinuierliche Anhebung des Energiestandards bestehender Gebäude essenziell. Die Ergebnisse der untersuchten Sanierungspfade zeigen, dass konstruktive Sanierungsmaßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs auch zu einem globalen Optimum zwischen Energieeffizienz und Netzdienlichkeit führen.

Die Beibehaltung fossiler Heizkessel limitiert die Dekarbonisierung stark. Gleichzeitig führt ein sofortiger Umstieg auf elektrische Wärmepumpen zu einer höheren Belastung des Stromnetzes. Diese Belastung kann durch Beibehaltung von Gaskesseln in wenigen unsanierten Gebäuden vorübergehend zu einer besseren Gesamtbilanz des Quartiers führen, da die Wärmepumpen in den sanierten Gebäuden besser geregelt werden können. Eine kombinierte bauliche Sanierung und Installation von Wärmepumpen kann das Ausmaß der mit dem Netz interagierenden Lasten begrenzen und so die Netzdienlichkeit des Quartiers im Vergleich zu einer vollständigen Sanierung des Wärmeerzeugungssystems allein optimieren.

Konstruktive Maßnahmen hin zu einem Effizienzhaus 40 Standard und die Installation von Wärmepumpen erfordern höhere Investitionen im Vergleich zu allen anderen betrachteten Szenarien. Jedoch kann die Nutzung des lokalen PV-Potenzials und eine intelligente Steuerung der Wärmepumpen die Gesamtleistung des Quartiers verbessern - nicht nur in Bezug auf Energieeffizienz und Netzdienlichkeit, sondern auch hinsichtlich der jährlichen Kosten und somit der wirtschaftlichen Machbarkeit der Sanierung. Frühzeitige komplementäre Maßnahmen steigern das Potenzial für Energieflexibilität im Quartier und optimieren die Performance zwischen Netzdienlichkeit und CO₂-Neutralität.

Die Optimierung der Energieflüsse setzt voraus, dass ein globales Optimum angestrebt wird. Dieses globale Optimum lässt sich nur erreichen, wenn die Betrachtung auf der Quartiersebene stattfindet, da nur hier die Wechselwirkungen und das Zusammenspiel der Maßnahmen in ihrer Gesamtheit berücksichtigt werden können. Maßnahmen an der Gebäudehülle sind bei individueller- und quartiersweiter Betrachtung sinnvoll, hier korreliert die Einzeleffizienz mit der Quartierseffizienz.

[Wie lässt sich dabei die Rückwirkung eines Quartiers auf das übergeordnete Energiesystem einbeziehen, um ein Gesamtoptimum von jeweils quartiersbezogenen und übergeordneten CO₂-Emissionen und Netzdienlichkeit zu ermitteln?]

Die Rückwirkung auf das Energiesystem ließ sich nicht quantitativ ermitteln. Es konnte aber eine qualitative Einordnung durch Indikatoren aufgestellt werden. Da jedes Netz unterschiedliche Anforderungen hat, müssen diese Indikatoren jeweils individuell gewichtet werden um daraus das Gesamtoptimum abzuleiten. Im Projekt wurde das Niederspannungsnetz im Quartier bis zum Ortnetztrafo betrachtet, da sich dieses Netz gut generisch abbilden lässt.

Der Einfluss einzelner Quartiere auf den CO₂-Ausstoß des übergeordneten Stromsystems wurde über die zeitlich flexiblen Emissionsfaktoren berücksichtigt. Welche Auswirkungen eine Skalierung von Lastmanagementsysteme auf das Gesamtstromnetz hat, muss in weiteren Untersuchungen betrachtet werden.

[Welche Potenziale zur Erreichung dieses Gesamt-Optimums bietet eine gezielte Mischung unterschiedlicher Sanierungsstandards zur Diversifizierung des Lastmanagementpotenzials?]

Eine gezielte Mischung unterschiedlicher Sanierungsstandards in einem Quartier bietet signifikante Potenziale, um ein Gesamtoptimum in Bezug auf Energieeffizienz, CO₂-Neutralität und Netzdienlichkeit zu erreichen. Obwohl hohe Effizienzstandards grundsätzlich das Ziel sind, ist es nicht immer möglich, diese zu erreichen – sei es aus wirtschaftlichen Gründen oder um historische Bausubstanz zu erhalten. In solchen Fällen ermöglicht eine heterogene Sanierungsstrategie einen ausgewogenen Beitrag zur CO₂-Reduktion und zu einem netzdienlichen Ausbau der Wärmepumpen.

Nicht sanierte Gebäude, die nicht hohen Energiestandards entsprechen, können eine wichtige Rolle im lokalen Lastmanagement spielen. Sie bieten die Möglichkeit, flexibel auf Strompreissignale zu reagieren und können durch eine erhöhte Selbstverbrauchsrate von lokal produziertem Photovoltaik-Strom die CO₂-Emissionen und Betriebskosten reduzieren. Durch die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung und ein optimiertes Energiemanagement kann die begrenzte Energieeffizienz dieser Gebäude kompensiert werden.

Die Integration von Gebäuden mit unterschiedlichen Sanierungsstandards kann somit die Netzdienlichkeit des Quartiers vergrößern, indem sie zum einen die Spitzenlasten glättet und zum anderen die Nutzung erneuerbarer Energien maximiert. Dies fördert ein flexibleres und belastbareres

Energiesystem, das in der Lage ist, auf die dynamischen Anforderungen des übergeordneten Netzes zu reagieren und trägt so zu einem nachhaltigeren Energiekonzept bei.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass in urbanen, und in geringerem Maße in suburbanen, Quartieren eine nicht vollständige Sanierung zu einer Verschlechterung der CO₂-Bilanz führt. Außerdem besteht es in ländlichen Gebieten ein größerer Spielraum für die Integration unsanierter Gebäude im Quartier in Kombination mit einem intelligenten Lastmanagementsystem.

[Welche Aussagen lassen sich zur Wirtschaftlichkeit von energetischen Quartierssanierungen in Bezug auf zukünftige Erlösmöglichkeiten von Prosumenten ableiten?]

In ReFlex wurden Einnahmen und Einsparungen durch die heutigen Geschäftsmodelle Eigenverbrauch und Einspeisung von Solarstrom sowie direkte Laststeuerung (DLC) zur Ausnutzung flexibler Stromtarife berücksichtigt. Zukünftige Erlösquellen wie lokale Energiemärkte (LEM) und lokale Flexibilitätsmärkte (LFM) können die Wirtschaftlichkeit solcher Sanierungen weiter erhöhen. Da sich diese Märkte noch nicht etabliert haben, lassen sich dazu jedoch nur qualitative Aussagen treffen.

LEMs ermöglichen den Handel mit lokal erzeugter Energie und fördern so den Ausbau erneuerbarer Energien, während LFM den Handel mit elektrischer Flexibilität in begrenzten geografischen Bereichen erlauben. DLCs bieten Systembetreibern die Möglichkeit, elektrische Lasten direkt zu steuern, was Kostensenkungen durch Reduzierung des Bedarfs an teurer Spitzenenergie mit sich bringt.

In einem lokalen Energiemarkt kann ein saniertes Quartier direkt mit lokal erzeugter Energie handeln, was zu günstigeren Strompreisen und Einsparungen bei Netzgebühren führt. Auf einem lokalen Flexibilitätsmarkt können Quartiere mit vielen Wärmepumpen ihre Lastflexibilität „verkaufen“, was zusätzliche Einnahmen generiert. Bei der direkten Laststeuerung erhalten die Teilnehmer eine feste monatliche Bezahlung für die Übertragung der Kontrolle über ihre flexiblen Lasten an den Netzbetreiber. Diese Geschäftsmodelle bieten unterschiedliche Erlösmöglichkeiten, wobei die genaue Höhe der Ersparnis von verschiedenen Faktoren wie Flexibilitätspreisen, Flexibilitätsbedarf des Netzbetreibers und der Integration erneuerbarer Energien abhängt.

[Wie wirkt sich die Berücksichtigung von Lastmanagementoptionen durch E-Fahrzeuge im Quartier auf die ermittelten Sanierungsstrategien aus?]

Intelligentes Laden von Elektroautos ermöglicht es, den Ladevorgang in Bezug auf das Stromnetz und die Integration erneuerbarer Energien zu optimieren. Dies führt zur Vermeidung von Netzspitzen, einer besseren Integration erneuerbarer Energien und damit zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen. Die Einbindung von EVs in das Energiemanagementsystem eines Quartiers ermöglicht eine Optimierung der Ladevorgänge zur Minimierung der Energiekosten, ähnlich wie beim Lastmanagement der Wärmepumpen.

Im Vergleich zu Szenarien ohne intelligentes Laden erhöht sich der Eigenverbrauch und der Autarkiegrad. Des Weiteren führt intelligentes Laden zu einer Einsparung der Energiekosten von mindestens 5% durch flexible Stromtarife. Je höher die Energieeffizienz der Gebäude, umso höher die erwartete Einsparung der Energiekosten. Insbesondere bei einem Sanierungsniveau von KfW-40 sind Einsparungen von 15% bei den Betriebskosten und 18% beim Emissionsausstoß zu erwarten. Intelligentes Laden ist besonders effektiv in Kombination mit einer geringeren Stromlast, die durch konventionelle Heizsysteme mit Gaskesseln oder energieeffizienten Gebäuden erreicht werden kann. Bei preisorientiertem intelligentem Laden könnte es jedoch zu Konflikten mit anderen Lasten im Verteilnetz kommen, was die Netzstabilität beeinträchtigt.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Dr.-Ing. Claudia Hemmerle (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Dipl.-Ing. Manuel de-Borja-Torrejon, M.Sc (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Paulo Danzer, M.Sc (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Ahmad Saleem Nouman, M.Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Dipl.-Ing. Zhengjie You (Professur für Energiemanagement-Technologien, TUM)

Weitere Mitwirkende

Prof. Thomas Auer (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Michelle Kahn, B.Sc. (Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TUM)

Prof. Dr. Christoph Goebel (Lehrstuhl Energiemanagement-Technologien, TUM)

Dr.-Ing. Peter Tzscheuschler (Lehrstuhl Energiemanagement-Technologien, TUM)

Fachliche Betreuung

Verena Kluth

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn

Kurzbiographien



Prof. Thomas Auer

Prof. Auer studierte Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart und beschäftigte sich im Anschluss bei der Transsolar Energietechnik GmbH mit dem Thema Energieeffizienz und Nutzerkomfort. Von 2001 bis 2008 hatte Prof. Auer einen Lehrauftrag an der Yale University. Seit 2014 ist er Professor an der TUM.



Dr.-Ing. Claudia Hemmerle

Dr. Hemmerle studierte Umwelttechnik / Regenerative Energien an der HTW Berlin. Sie promovierte 2015 am Institut für Baukonstruktion der Technischen Universität Dresden. Seit Oktober 2018 leitet sie die Juniorforschungsgruppe Cleanvelope des Bayerischen Klimaforschungsnetzwerks an der TUM.



Dipl.-Ing. Manuel de-Borja-Torrejon, M.Sc

Nach dem Studium in Architektur an der Universidad de Sevilla schloss Herr de-Borja-Torrejon 2013 einen zweiten Master in Clima Design an der TUM ab. Seit 2015 forscht er am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen.



Paulo Danzer, M.Sc

Nach dem Studium für Energie- und Gebäudetechnik sowie Klimagerechtes Bauen und Betreiben ist Herr Danzer seit 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen.



Ahmad Saleem Nouman, M.Sc

Nach seinem Studium der Elektrotechnik erlangte Herr Nouman 2018 seinen Master in Clima Design an der TUM. Seit 2019 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen tätig.



Prof. Dr. Christoph Goebel

Prof. Dr. Goebel studierte Informationswirtschaft an der KIT. 2009 promovierte er am Institut für Informationssysteme der Humboldt Universität. Seit 2016 ist er Leiter der Professur für Energiemanagement Technologien an der TUM.



Dr.-Ing. Peter Tzscheutschler

Nach seinem Studium der Elektro- und Informationstechnik an der TUM promovierte Dr. Tzscheutschler am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik zum Thema „Globales technisches Potenzial solarthermischer Stromerzeugung“.



Dipl.-Ing., Zhengjie You

Nach dem Studium der Energietechnik in TU Dresden begann Zhengjie You eine Promotion am Lehrstuhl Energiewirtschaft und Anwendungstechnik mit dem Fokus auf Wärmepumpenflexibilität. Er ist auf dem Feld der Optimierungsalgorithmen und Energiemärkten spezialisiert.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

1. Auer, T., Hamacher, T., Wagner, U., Atabay, D., de-Borja-Torrejón, M., Dornmair, R., Kuhn, P., Maderspacher, J., Sängler, F., *Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem: Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland*. Forschungsinitiative Zukunft Bau. 2017, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 89.
2. Hausladen, G., Auer, T., Schneegans, J., Klimke, K., Riemer, H., Trojer, B., Quian, L., de-Borja-Torrejón, M., *Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme. Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden*. 2014, Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart.
3. Jensen, S.Ø., Marszal-Pomianowska, A., Lollini, R., Pasut, W., Knotzer, A., Engelmann, P., Stafford, A., Reynders, G., *IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings*. Energy and Buildings, 2017. **155**: p. 25-34. .
4. Arteconi, A., Polonara, F., and Brandoni, C., *Demand Side Management Of The Built Environment For Sustainable Energy*. WIT Press, 2014: p. 723 - 734.
5. Bergmann, A., Erhorn, H., Reiß, J., Sinnesbichler, H., Sedlmair, W., *Praxis-Vergleich verschiedener Speicherstrategien für Plusenergiehäuser in exemplarischen Wohnsiedlungen - Living Lab Plusenergiesiedlung Wuppertal*. 2019, Fraunhofer IRB.
6. Arnaudo, M., Topel, M., Puerto, P., Widl, E., Laumert, B., *Heat demand peak shaving in urban integrated energy systems by demand side management - A techno-economic and environmental approach*. Energy, 2019. **186**.
7. Diekerhof, M., *Distributed optimization for the exploitation of multi-energy flexibility under uncertainty in city districts*. 2018, RWTH Aachen.
8. Zade, M., Incedag, Y., El-Baz, W., Tzscheutschler, P., Wagner, U., *Prosumer Integration in Flexibility Markets: A Bid Development and Pricing Model*, in *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2018.
9. Kalz, D., *Netzdienliche Gebäude und Quartiere: Gebäude entlasten Stromnetze*. 2018, FIZ Karlsruhe.
10. Klein, K., *Quantifying the grid support of building energy systems*. 2017, Fraunhofer ISE.
11. Wang, Y., Mauree, D., Wennersten, R., Scartezzini, J.-L., Sun, Q., *Improving self-consumption of on-site PV generation through deploying flexibility in building thermal mass*, in *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019.
12. Hegger, M., Dettmar, J., *Energetische Stadtraumtypen: Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen*. 2014: Fraunhofer IRB Verlag.
13. Neuffer, H., Witterhold, F.-G., *AGFW-Hauptstudie: Pluralistische Wärmeversorgung*. 2020: Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V.
14. Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N., Born, R., *Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. 2015, IWU - Institut Wohnen und Umwelt.

15. Issermann, M., Chang, F.J., and Kow, P.Y., *Interactive urban building energy modelling with functional mockup interface of a local residential building stock*. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2021. **289**.
16. Bünger, U., Nicolai, S., Zerhusen, J., Monsalve, C., Kharboutli, S., Michalski, J., Ruhe, S., Albrecht, U., *Infrastrukturbedarf E-Mobilität*. 2019, Ludwig Bölkow Stiftung, ADAC.
17. Loga, T.S., B., Diefenbach, N., Born, R., *Deutsche Wohngebäudetypologie*. 2015: Institut für Wohnen und Umwelt, IWU.
18. Koch, T., Achenbach, S., and Müller, A., *Anpassung der Kostenfunktionen energierelevanter Bau und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten auf das Preisniveau 2020*. Institut Wohnen Und Umwelt GmbH, 2021.
19. u-wert.net GmbH 2023; Available from: <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/>.
20. Hinz, E., *Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten*. 2014, Institut für Wohnen und Umwelt, IWU.
21. Hemmerle, C., *Cleanvelope – Energieaktive Gebäudehüllen als Baustein klimaorientierter Stadtentwicklung. Ergebnisbericht*. 2023, Technische Universität München.
22. Portmann, M., Galvagno-Erny, D., Lorenz, P., Schacher, D., Heinrich, R., *Sonnendach.ch und Sonnenfassade.ch: Berechnung von Potenzialen in Gemeinden*. 2019: Bern.
23. Eggers, J.-B., Behnisch, M., Eisenlohr, J., Poglitsch, H., Phung, W.-F., Münzinger, M., Ferrara, C., Kuhn, T.E., *PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland*. in *35. PV-Symposium: 01./02. September 2020*. 2020.
24. Stryi-Hipp, G., Leuchtner, J., and Longo, F., *Praxisleitfaden zur Photovoltaik-Pflicht: Ein Ratgeber für Ihre solare Zukunft*. 2023.
25. McNeel, R., and Associates, *Rhinoceros 3d: Rhino*. Available from: <https://www.rhino3d.com/>.
26. Davidson, S., *Grasshopper for Rhino 5.0*. Available from: <https://www.grasshopper3d.com/page/download-1>.
27. Roudsari, M.S., Mackey, C., *Ladybug Tool*. Available from: <https://www.ladybug.tools/>.
28. *DWD Klimafaktoren*. 2023; Available from: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimafaktoren/klimafaktoren.html>.
29. Meteonorm AG, *Meteonorm Software 7.3.4*. 2017; Available from: <https://meteonorm.com/>.
30. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., und Miller, H.L, Eds., *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen; Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*. 2007, Cambridge University Press, .
31. Talebi, B., Haghghat, F., and Mirzaei, P.A., *Simplified model to predict the thermal demand profile of districts*. Energy and Buildings, 2017. **145**: p. 213-225.
32. Ruusu, R., Cao, S., Manrique Delgado, B., Hasan, A., *Direct quantification of multiple-source energy flexibility in a residential building using a new model predictive high-level controller*. ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT, 2019. **180**: p. 1109-1128.
33. Morstyn, T., Collett, K.A., Vijay, A., Deakin, M., Wheeler, S., Bhagavathy, S.M., Fele, F., McCulloch, M.D., *OPEN: An open-source platform for developing smart local energy system applications*. Applied Energy, 2020. **275**.

34. Fonseca, J.A., and Schlueter, A., *Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts*. Applied Energy, 2015. **142**: p. 247-265.
35. Bogischef, L., De-Borja-Torrejón, M., and Hemmerle, C., *Residential buildings as a flexibility component in the district network - Development of a modelling approach / Wohngebäude als Flexibilitätsbaustein im Quartiersverbund – Entwicklung eines Modellierungsansatzes*, T.U.o. Munich, Editor. 2020.
36. Jambagi, A., *Integration of Decentralized Battery Storage in Low Voltage Systems*. 2021.
37. Gaete-Morales, C. *emobpy 0.6.2*. 2021; Available from: <https://pypi.org/project/emobpy/>.
38. Deb, S., M. Pihlatie, and M. Al-Saadi, *Smart Charging: A Comprehensive Review*. IEEE Access, 2022. **10**: p. 134690-134703.
39. Chen, L. and Wu, Z., *Study on the Effects of EV Charging to Global Load Characteristics via Charging Aggregators*. Energy Procedia, 2018. **145**: p. 175-180.
40. Brown, T., Schlachtberger, D., Kies, A., Schramm, S., Greiner, M., *Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system*. Energy, 2018. **160**: p. 720-739.
41. Huber, J., Lohmann, K., Schmidt, M., Weinhardt, C., *Carbon efficient smart charging using forecasts of marginal emission factors*. Journal of Cleaner Production, 2021. **284**.
42. Zade, M., You, Z., Nalini, B.K., Tzscheutschler, P., Wagner, U., *Quantifying the Flexibility of Electric Vehicles in Germany and California—A Case Study*. Energies, 2020. **13**(21).
43. *Pyomo Software*. 2023; Available from: <http://www.pyomo.org/>.
44. *Beschluss des Bundeskabinetts am 6. April 2022*. Available from: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310>.
45. Menkoff, H., *Wärmeschutzverordnung und Wirtschaftlichkeit*, in *unipor-Fachtagung* 1994.
46. Lengsfeld, K., Krus, M., and Künzel, H., *Beurteilung des Langzeitverhaltens ausgeführter Wärmedämmverbundsysteme* 2015.
47. Jordan, D.C., and Kurtz, S.R., *Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review*. Photovoltaics: Research and Applications, 2012.
48. Garcia, I., and Luis Torres, J., *Assessment of the adequacy of EN ISO 15927-4 reference years for photovoltaic systems*. Progress in Photovoltaics, 2015. **23**(12): p. 1956-1969.
49. Weinhardt, C., Zade, M., Mengelkamp, E., Cramer, W., Hambridge, S., Hobert, A., Kremers, E., Otter, W., Pinson, P., and Tiefenbeck, V., *How far along are Local Energy Markets in the DACH+ Region?* in *Tenth ACM International Conference on Future Energy Systems*. 2019. Phoenix, USA.
50. Mengelkamp, E., Gärtner, J., Weinhardt, C., *Intelligent Agent Strategies for Residential Customers in Local Electricity Markets*, in *The Ninth International Conference on Future Energy Systems*. 2018: Karlsruhe.
51. Jin, X., Wu, Q., and Jia, H., *Local flexibility markets: Literature review on concepts, models and clearing methods*. Applied Energy, 2020. **261**.
52. Tahersima, F.M., Printz, P., and Palle, A., *An intuitive definition of demand flexibility in direct load control*, in *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*. 2013, 521-526: Hyderabad, India.

-
53. You, Z., Lumpp, S.D., Doepfert, M., Tzscheutschler, P., Goebel, C., *Leveraging flexibility of residential heat pumps through local energy markets*. 2024: Applied Energy.
 54. You, Z., Zade, M., Nalini, B.K., Tzscheutschler, P., *Flexibility Estimation of Residential Heat Pumps under Heat Demand Uncertainty*. Energies, 2021. **14**(18).
 55. Xu, X., Chen, C., Zhu, X., Hu, Q., *Promoting acceptance of direct load control programs in the United States: Financial incentive versus control option*. Energies, 2018.
 56. Ahmed, M.T., Faria, P., Vale, Z., *Financial Benefit Analysis of an Electric Water Heater with Direct Load Control in Demand Response*, in *2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*. 2018: Aalborg. p. 1-6.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Quartierdefinition Quelle: eigene Darstellung	13
Abbildung 2: urbanes Quartier Quelle: eigene Darstellung	15
Abbildung 3: suburbanes Quartier Quelle: eigene Darstellung	15
Abbildung 4: ländliches Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	15
Abbildung 5: solare Einstrahlungswerte je Fläche Quelle: eigene Darstellung.....	18
Abbildung 6: Funktionsschema des Simulationsmodells Quelle: eigene Darstellung	19
Abbildung 7: Schema des in diesem Projekt genutzten RC-Modell Quelle: Bogischef et al. [36]	21
Abbildung 8: Schema des Optimierungsmoduls Quelle: eigene Darstellung	23
Abbildung 9: Tagesverläufe der CO ₂ -Emissionen von Netzstrom in den Jahren 2020, 2030 und 2045 Quelle: eigene Darstellung.....	30
Abbildung 10: Bilanzraum der Betrachtung Quelle: eigene Darstellung.....	31
Abbildung 11: Kenngrößen zur Abbildung der Netzdienlichkeit Quelle: eigene Darstellung	33
Abbildung 12: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der FLR Quelle: eigene Darstellung	36
Abbildung 13: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber dem GII Quelle: eigene Darstellung	37
Abbildung 14: Abwicklung der Geschäftsmodelle für Quartiere in der Zukunft Quelle: eigene Darstellung	45
Abbildung 15: Einsparung der Stromkosten durch einen lokalen Energiemarkt in einem Quartier mit Wärmepumpen Quelle: eigene Darstellung	46
Abbildung 16: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der PED im urbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	63
Abbildung 17: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der OC im urbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	64
Abbildung 18: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der EAC im urbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	65
Abbildung 19: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der SCR im urbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	66
Abbildung 20: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der SSR im urbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	67
Abbildung 21: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der FLR im urbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	68
Abbildung 22: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der GII im urbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	69
Abbildung 23: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der HLR im urbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	70
Abbildung 24: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der PED im suburbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung	71

Abbildung 25: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der OC im suburbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	72
Abbildung 26: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der EAC im suburbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung	73
Abbildung 27: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der SCR im suburbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung	74
Abbildung 28: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der SSR im suburbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung	75
Abbildung 29: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der FLR im suburbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung	76
Abbildung 30: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der GII im suburbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	77
Abbildung 31: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der HLR im suburbanen Quartier Quelle: eigene Darstellung	78
Abbildung 32: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der PED im ländlichen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	79
Abbildung 33: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der OC im ländlichen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	80
Abbildung 34: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der EAC im ländlichen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	81
Abbildung 35: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der SCR im ländlichen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	82
Abbildung 36: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der SSR im ländlichen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	83
Abbildung 37: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der FLR im ländlichen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	84
Abbildung 38: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der GII im ländlichen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	85
Abbildung 39: Diagramm zur Abbildung der CO ₂ -Emission gegenüber der HLR im ländlichen Quartier Quelle: eigene Darstellung.....	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der Quartierstypen Quelle: AGFW [13], Hegger [12]	14
Tabelle 2: Größe der Quartiere Quelle: eigene Daten	16
Tabelle 3: Verteilung der Gebäudetypologien in den Quartieren Quelle: IWU [17]	16
Tabelle 4: Erläuterung Tabula Gebäudecode Quelle: IWU [17]	17
Tabelle 5: Auswahl der simulierten Parameter Quelle: eigene Daten	25
Tabelle 6: Auswahl der wichtigsten Szenarien Quelle: eigene Daten	26
Tabelle 7: Übersicht der gewählten Sanierungspfade Quelle: eigene Daten	28
Tabelle 8 gewählte Key Performance Indicators (KPIs) Quelle: eigene Daten	32
Tabelle 9: Gewichtungsfaktoren für die Rangfolgenberechnung Quelle: eigene Daten	34
Tabelle 10: Ergebnisse der Szenarien für die Jahre 2020 und 2045 Quelle: eigene Daten	37
Tabelle 11: Ergebnisse der vorgestellten Sanierungspfade unter Berücksichtigung der Szenarien der Stützjahre 2020, 2030 und 2045 Quelle: eigene Daten	38
Tabelle 12: Ergebnisse der Sanierungspfade für das urbane Quartier	42
Tabelle 13: Ergebnisse der Sanierungspfade für ausgewählte Szenarien im urbanen Quartier	43
Tabelle 14: Erlösmöglichkeiten der Flexibilität Quelle: eigene Daten	46
Tabelle 15: Beispiel der Verteilung der Gebäudetypen in den jeweiligen Quartieren Quelle: AGFW	62
Tabelle 16: Ergebnisse der Sanierungspfade für das suburbane Quartier	87
Tabelle 17: Ergebnisse der Sanierungspfade für ausgewählte Szenarien im suburbanen Quartier	88
Tabelle 18: Ergebnisse der Sanierungspfade für das ländliche Quartier	89
Tabelle 19: Ergebnisse der Sanierungspfade für ausgewählte Szenarien im ländlichen Quartier	90

Anlagen

Tabelle 15: Beispiel der Verteilung der Gebäudetypen in den jeweiligen Quartieren | Quelle: AGFW

		ST 1	ST 2	ST 3a	ST 3b	ST 4	ST 5a	ST 5b	ST 6	ST 7a	ST 7b	ST 8	ST 9	ST 10a	ST 11b
		Lockere offene Bebauung (Streusiedlung)	Einfamilienhäuser- & Doppelhäuser-Siedlung	Städtischer Dorfkern	Ländlicher Dorfkern	Reihen- häuser	Siedlung kleiner Mehrfamili- enhäuser	Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamili- enhäusern	Zeilenbebauung mit großen Mehrfamili- enhäusern oder Hochhäusern	Blockbebauung niedriger Dichte	Blockbebauung hoher Dichte	City- bebauung	Historische Altstadt	Öffentliche Sonderbauten (groß)	Gewerbliche Sonderbauten/ Dienstleistungsbaute n
EFH bis 1918	[%]	10	10	30	10	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0
EFH 1918-48	[%]	20	20	10	10	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
EFH 1949-57	[%]	25	35	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EFH 1958-68	[%]	25	25	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EFH 1969-78	[%]	10	10	5	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EFH 1979-83	[%]	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EFH 1984-94	[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EFH ab 1995	[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RDH bis 1918	[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RDH 1918-48	[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RDH 1949-57	[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RDH 1958-68	[%]	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RDH 1969-78	[%]	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RDH 1979-83	[%]	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RDH 1984-94	[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RDH ab 1995	[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Zusätzliche Grafiken – Urbanes Quartier

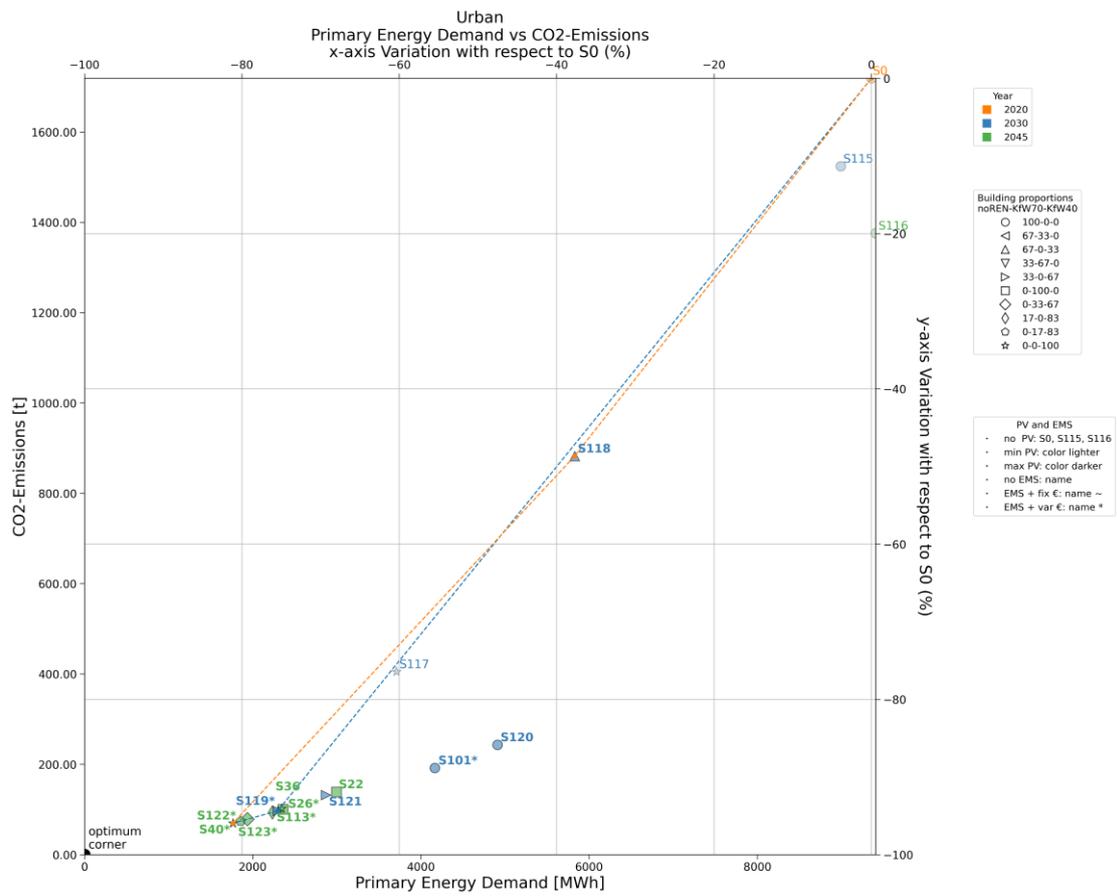


Abbildung 16: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der PED im urbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

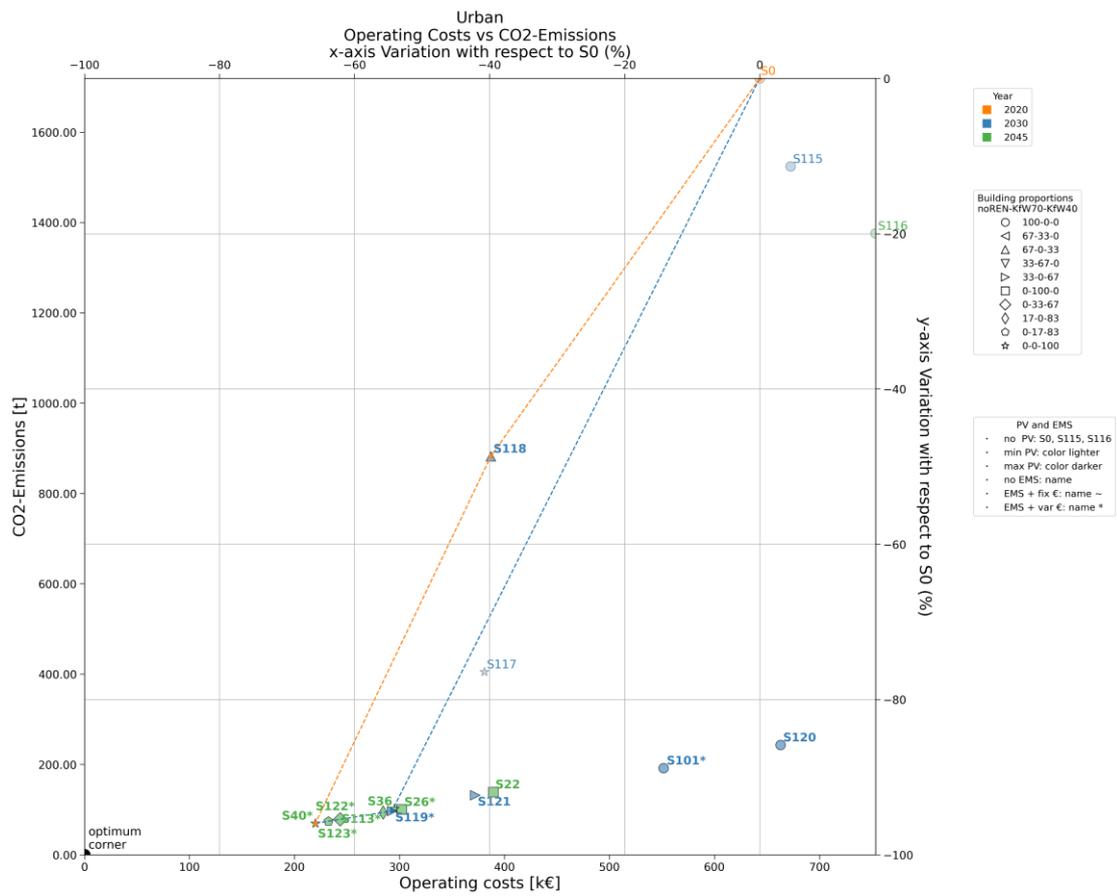
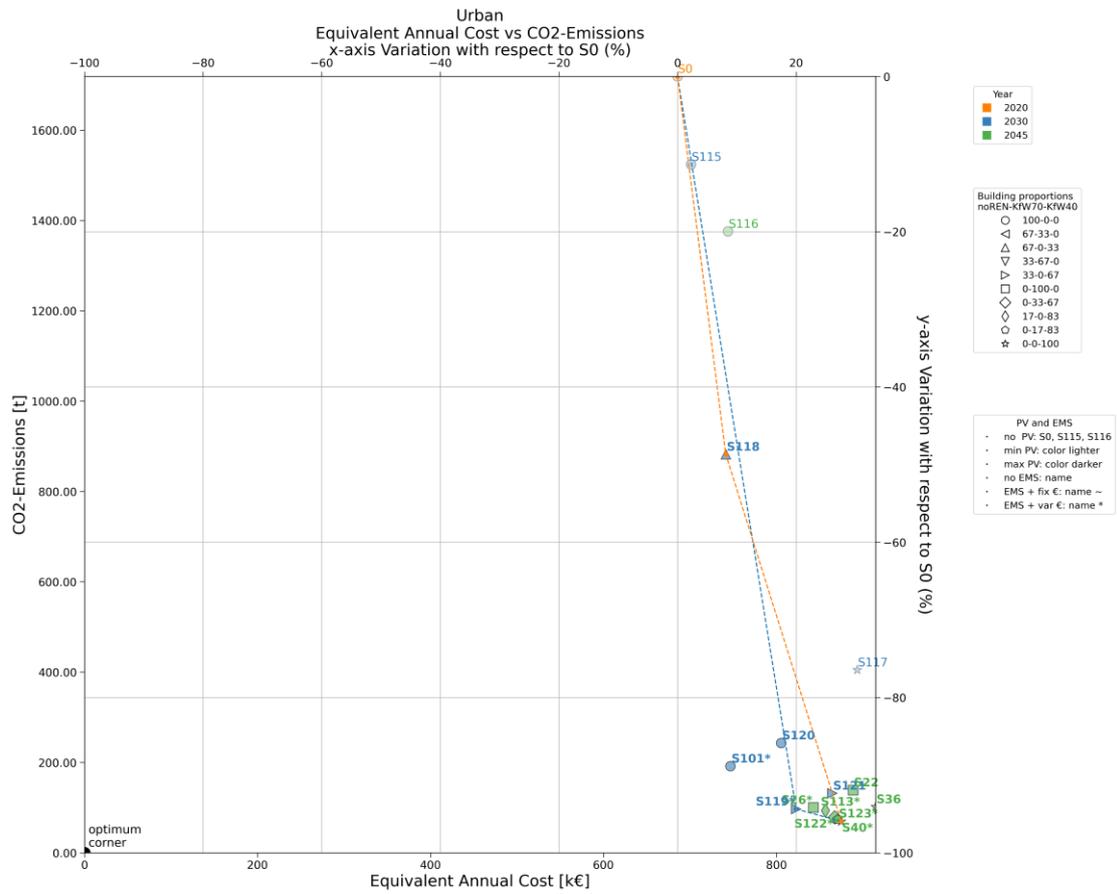


Abbildung 17: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der OC im urbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung



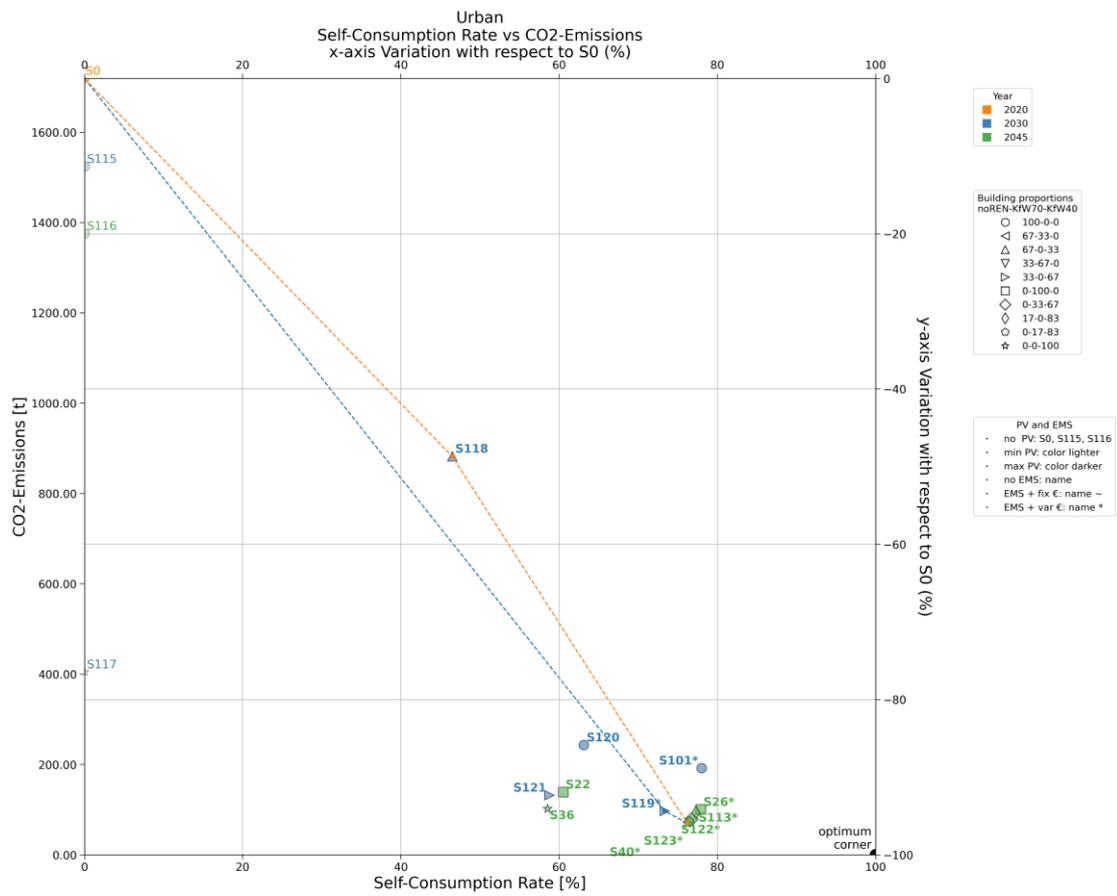


Abbildung 19: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der SCR im urbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

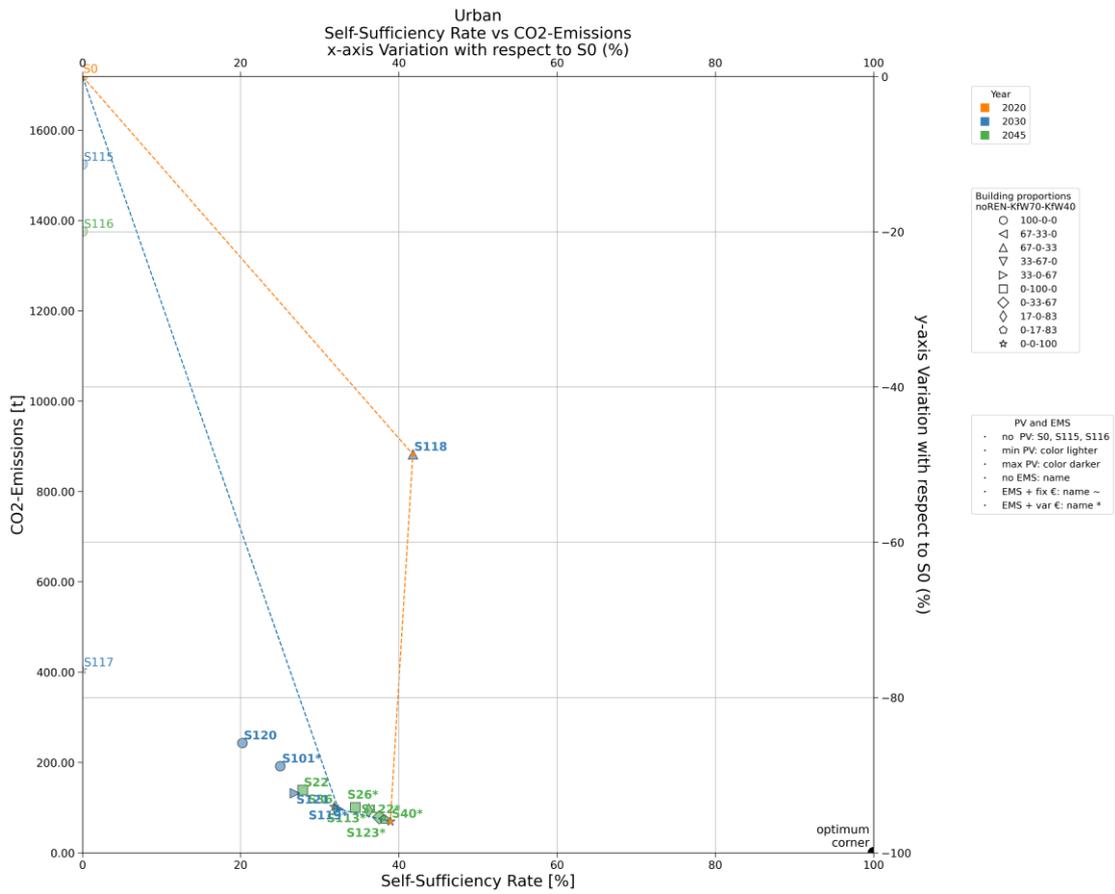


Abbildung 20: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der SSR im urbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

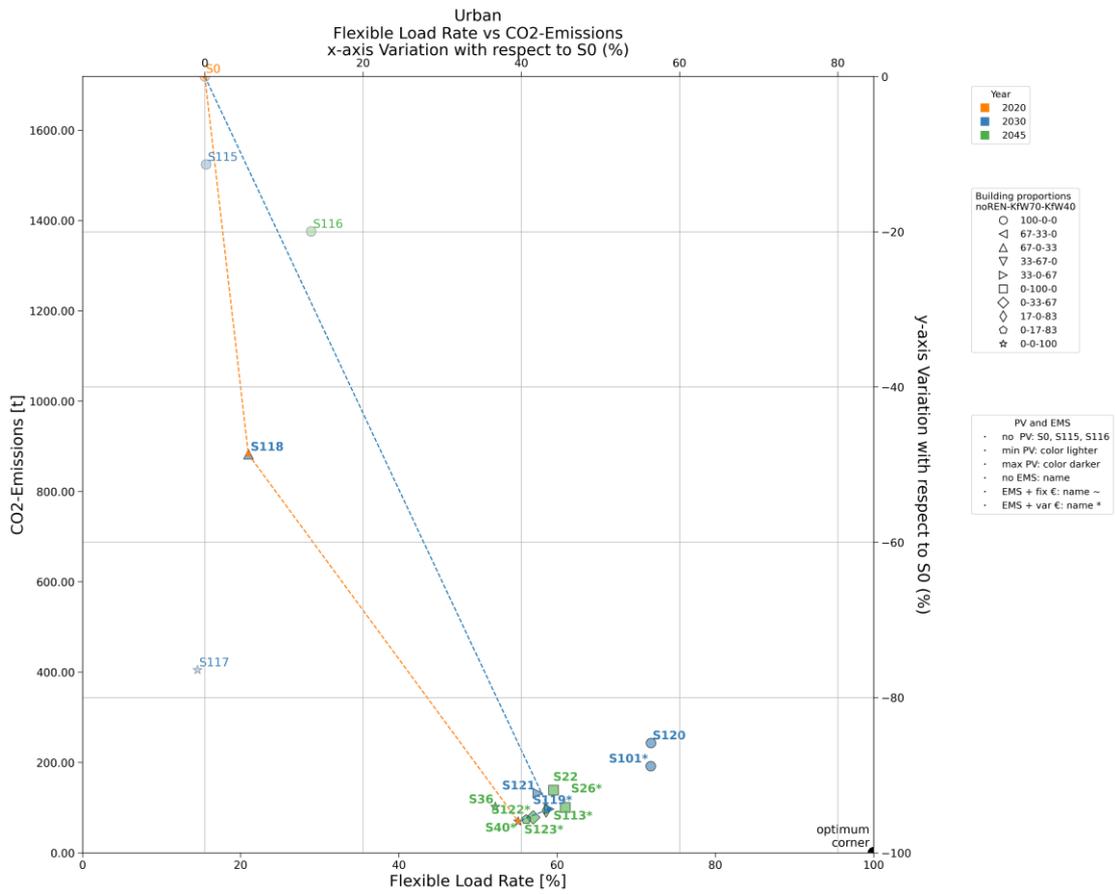


Abbildung 21: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der FLR im urbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

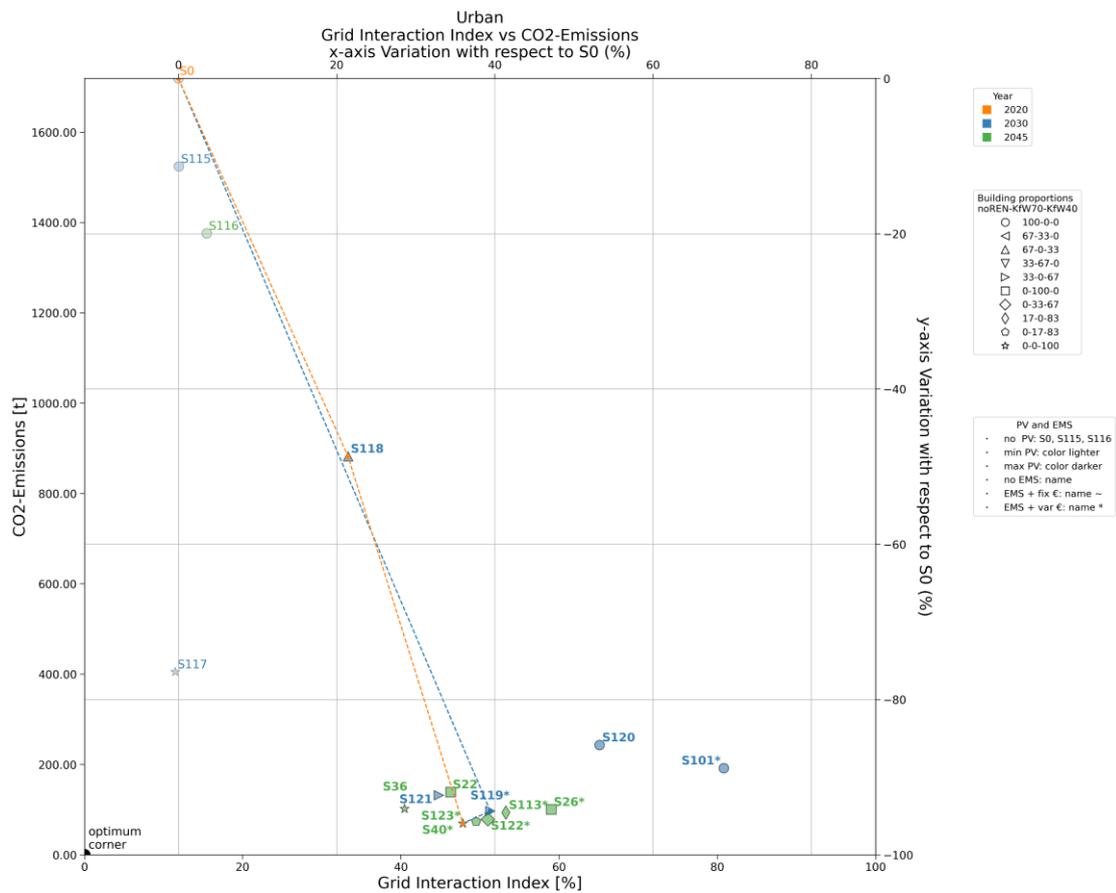


Abbildung 22: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der GII im urbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

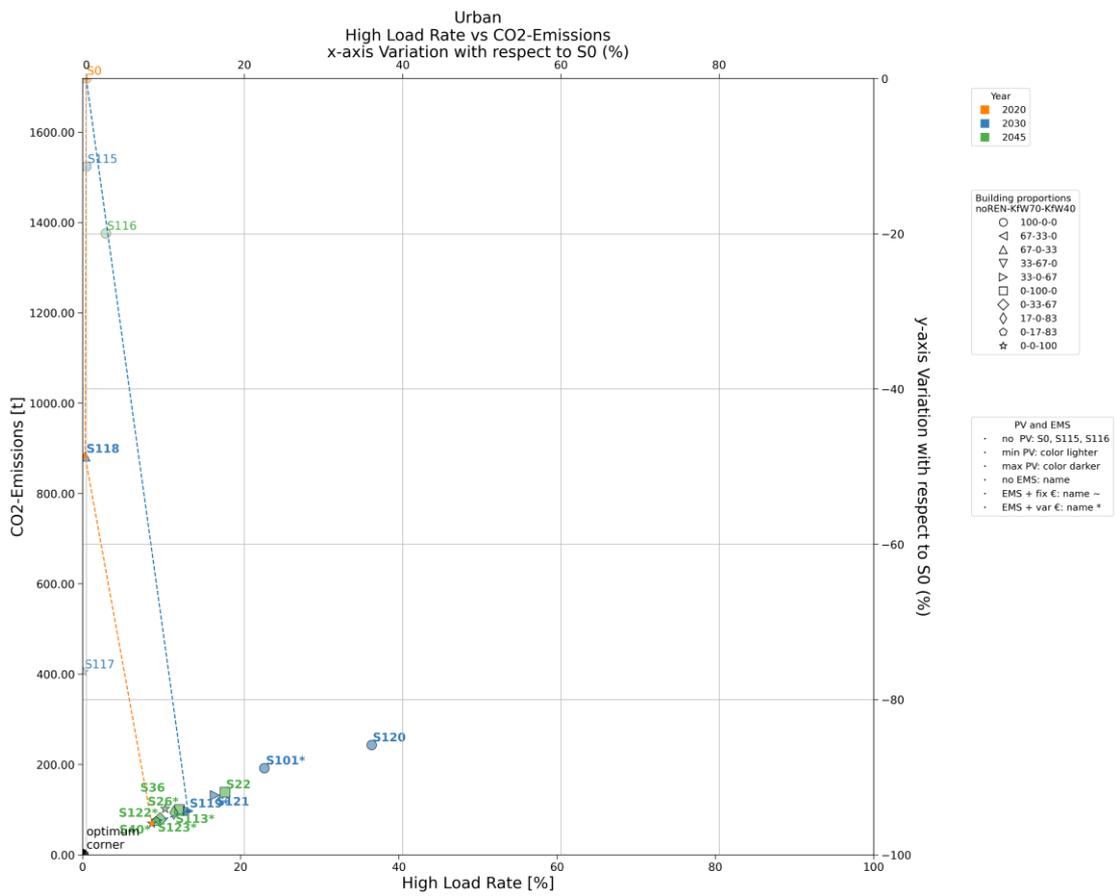


Abbildung 23: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der HLR im urbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

Zusätzliche Grafiken – Suburbanes Quartier

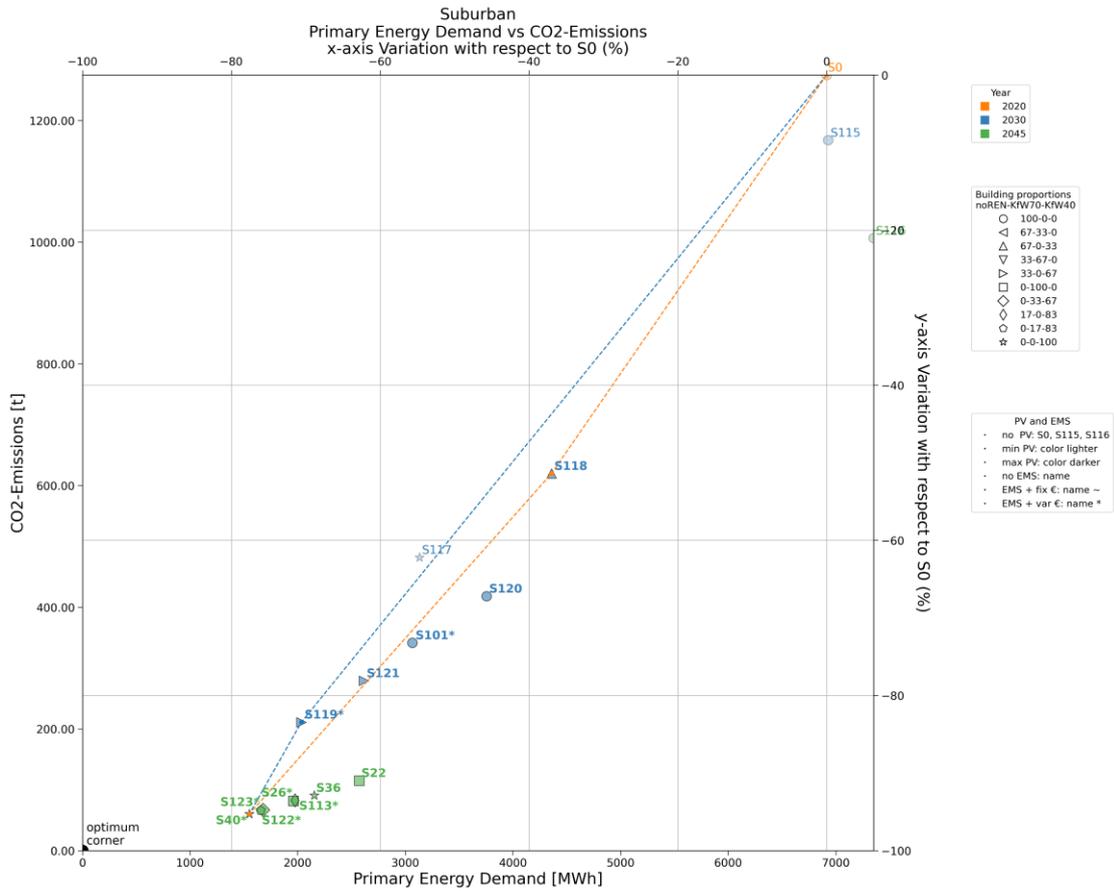


Abbildung 24: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der PED im suburbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

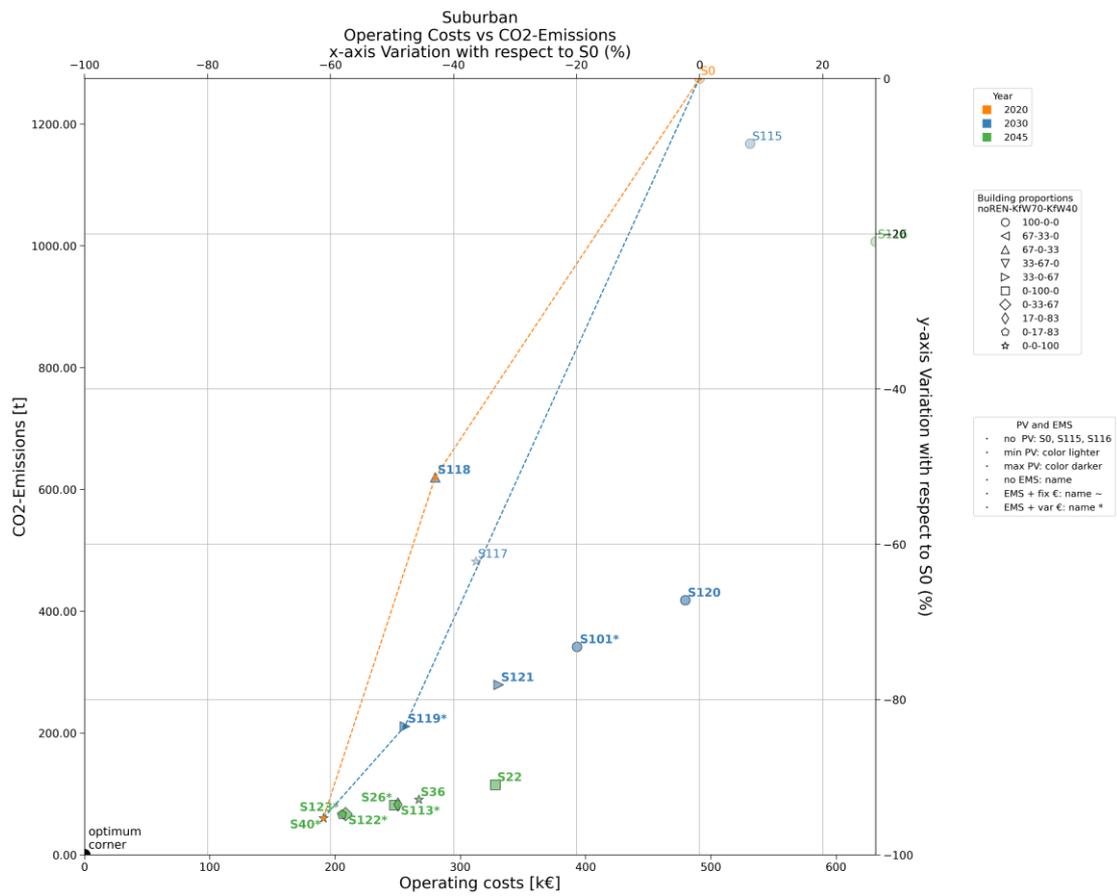


Abbildung 25: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der OC im suburbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

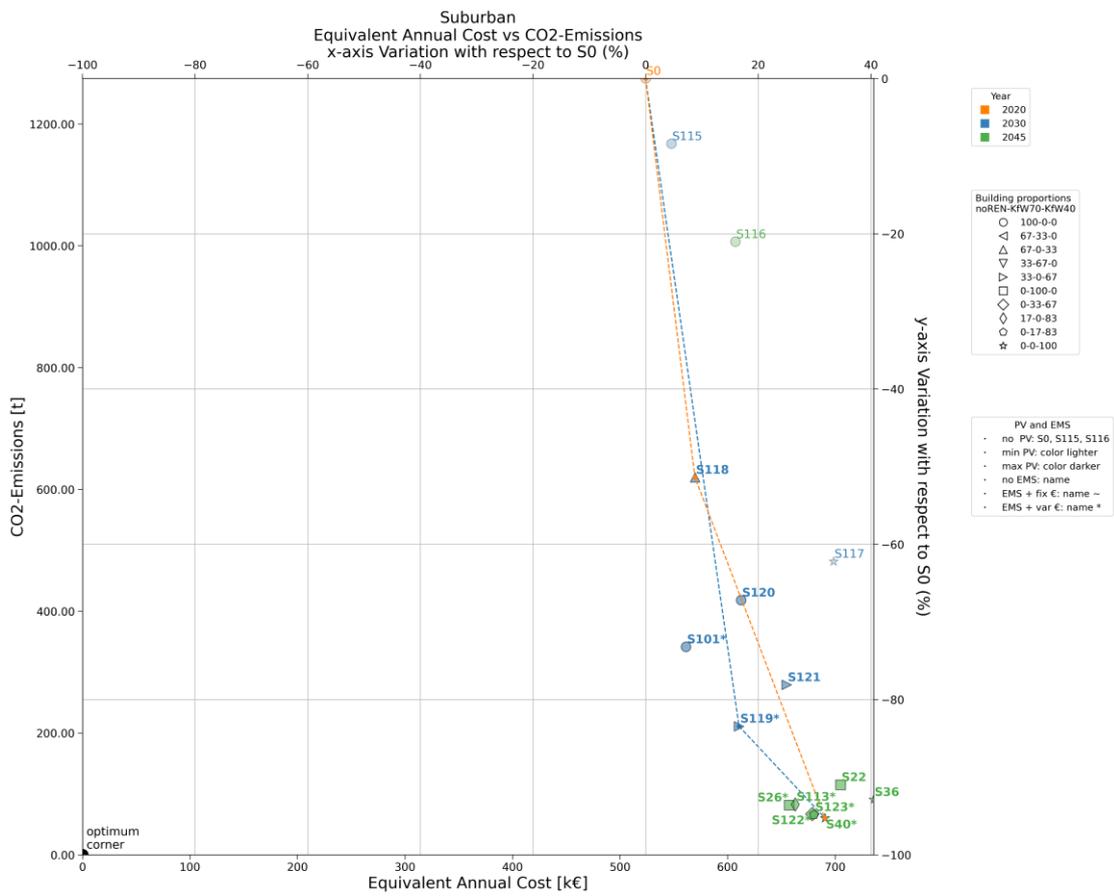


Abbildung 26: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der EAC im suburbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

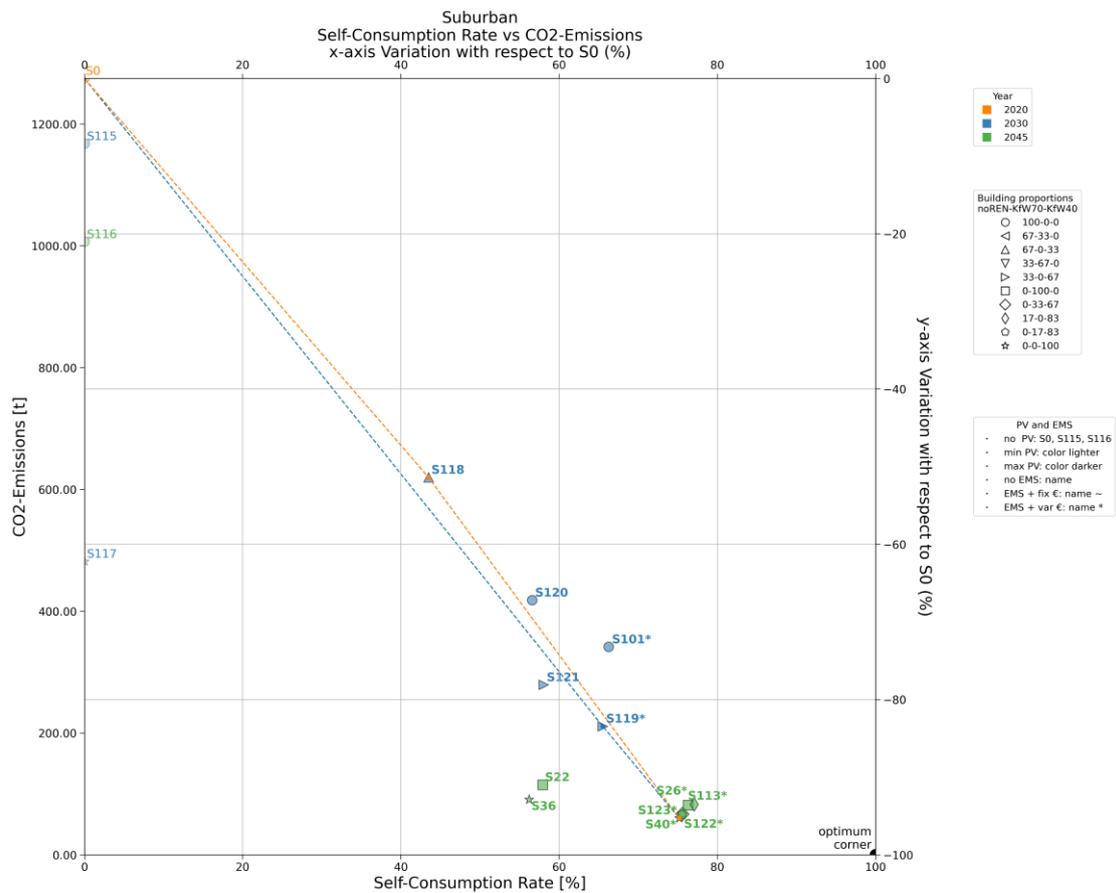


Abbildung 27: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der SCR im suburbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

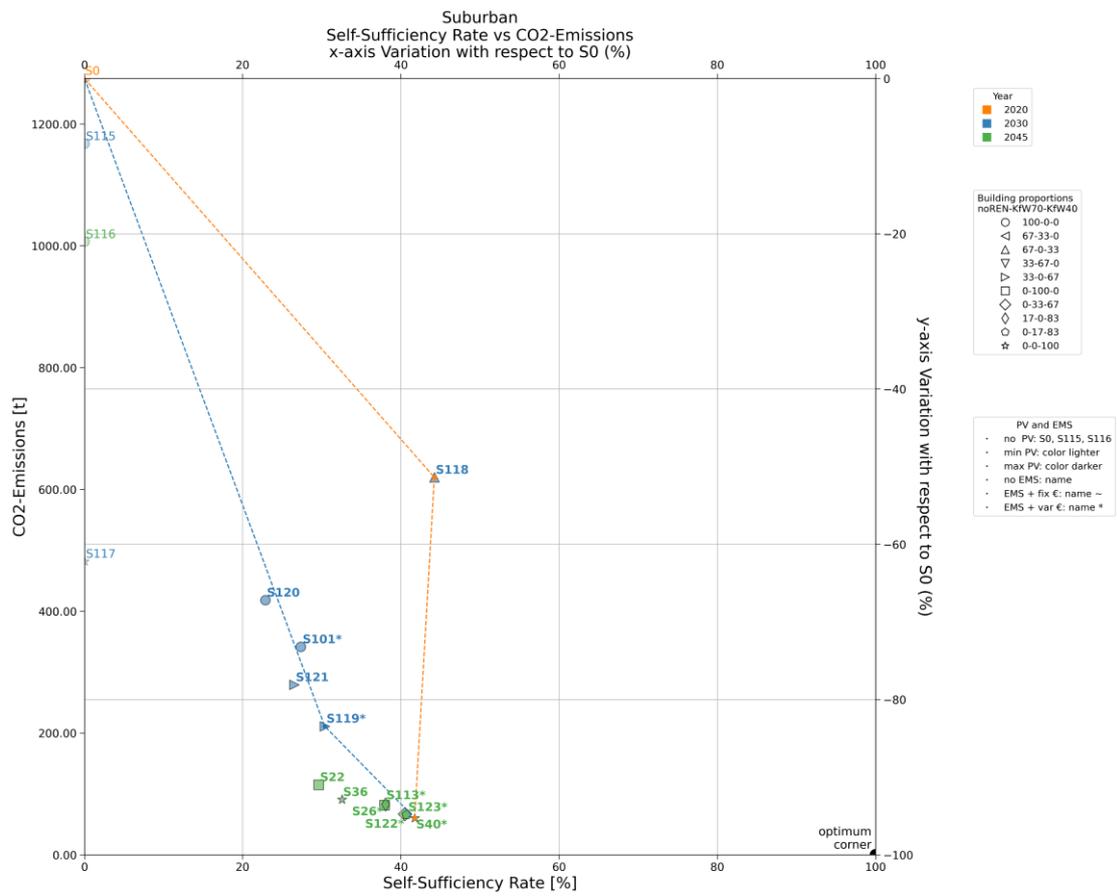


Abbildung 28: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der SSR im suburbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

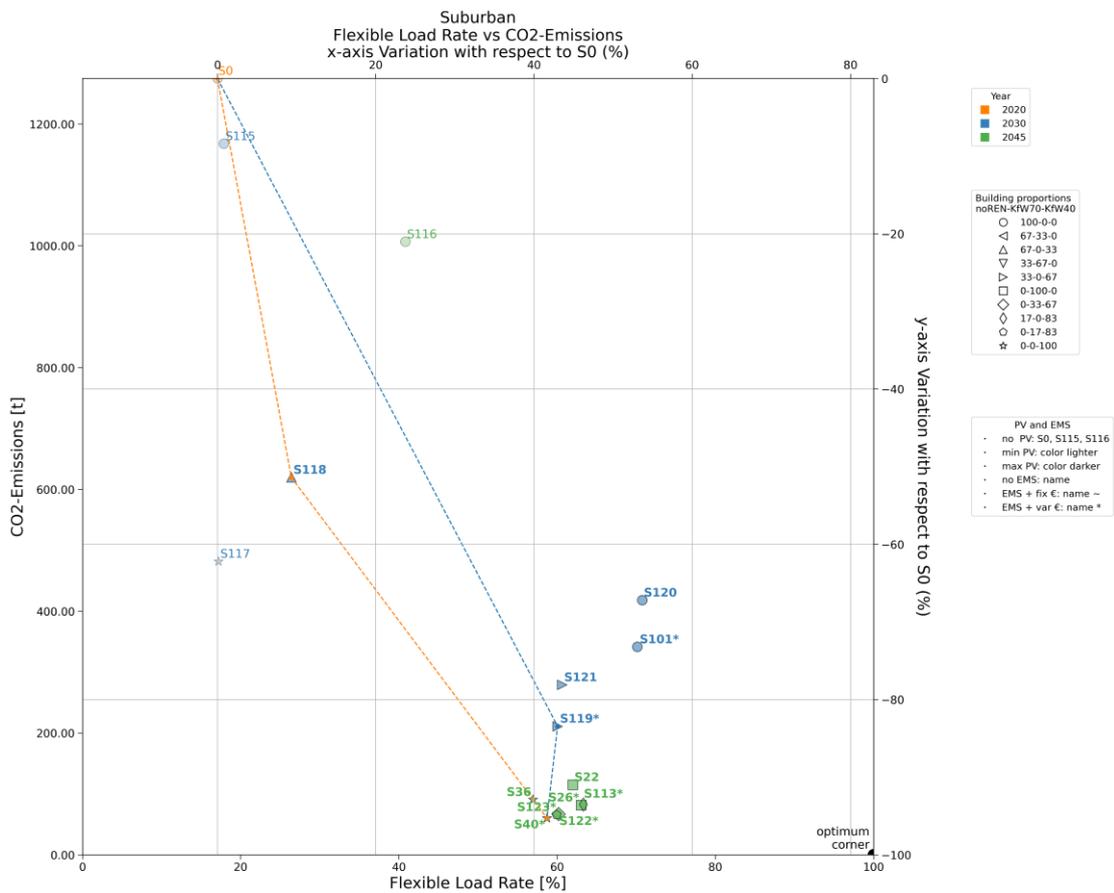


Abbildung 29: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der FLR im suburbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

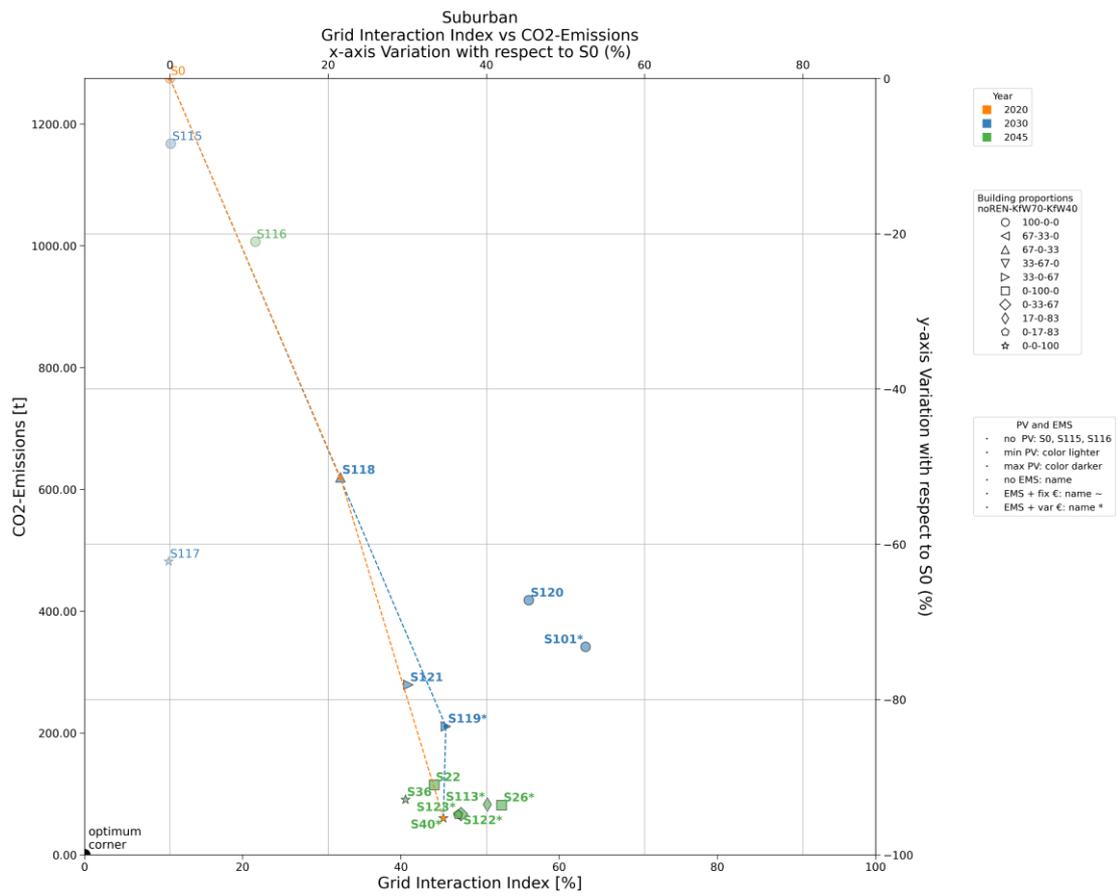


Abbildung 30: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der GII im suburbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

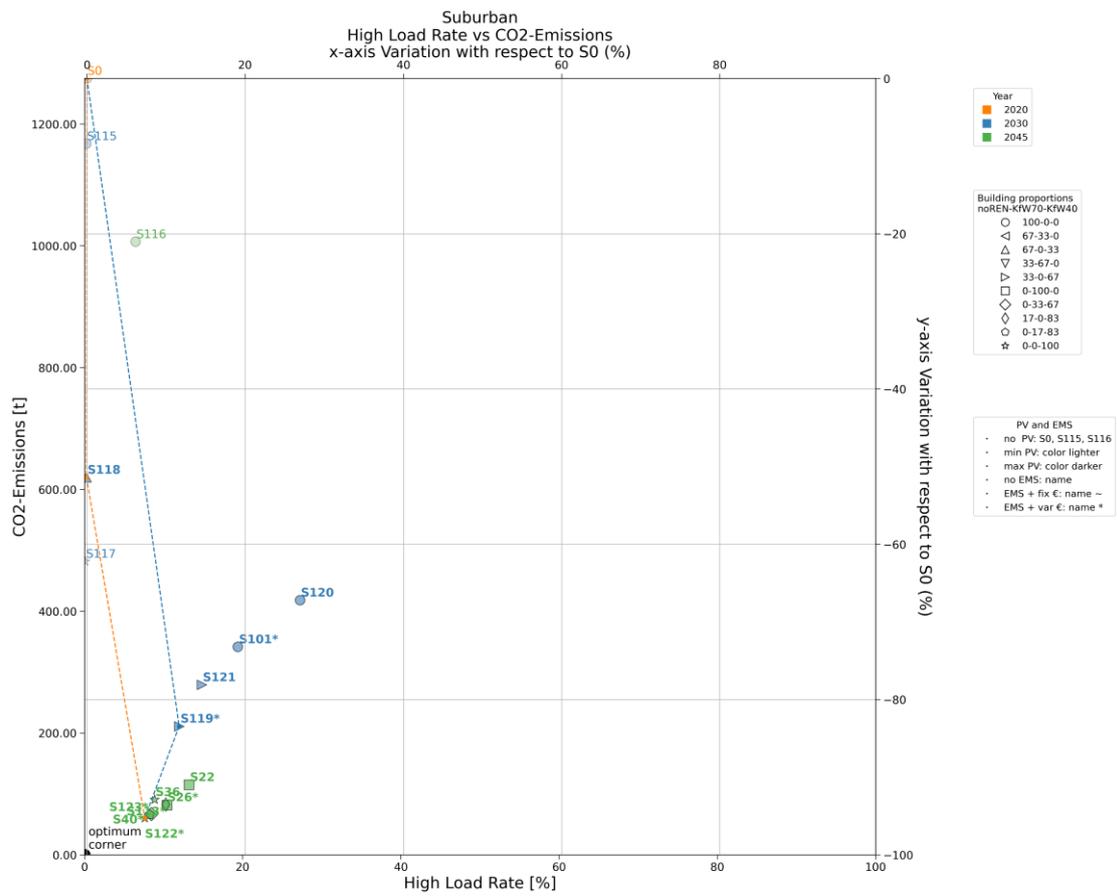


Abbildung 31: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der HLR im suburbanen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

Zusätzliche Grafiken – Ländliches Quartier

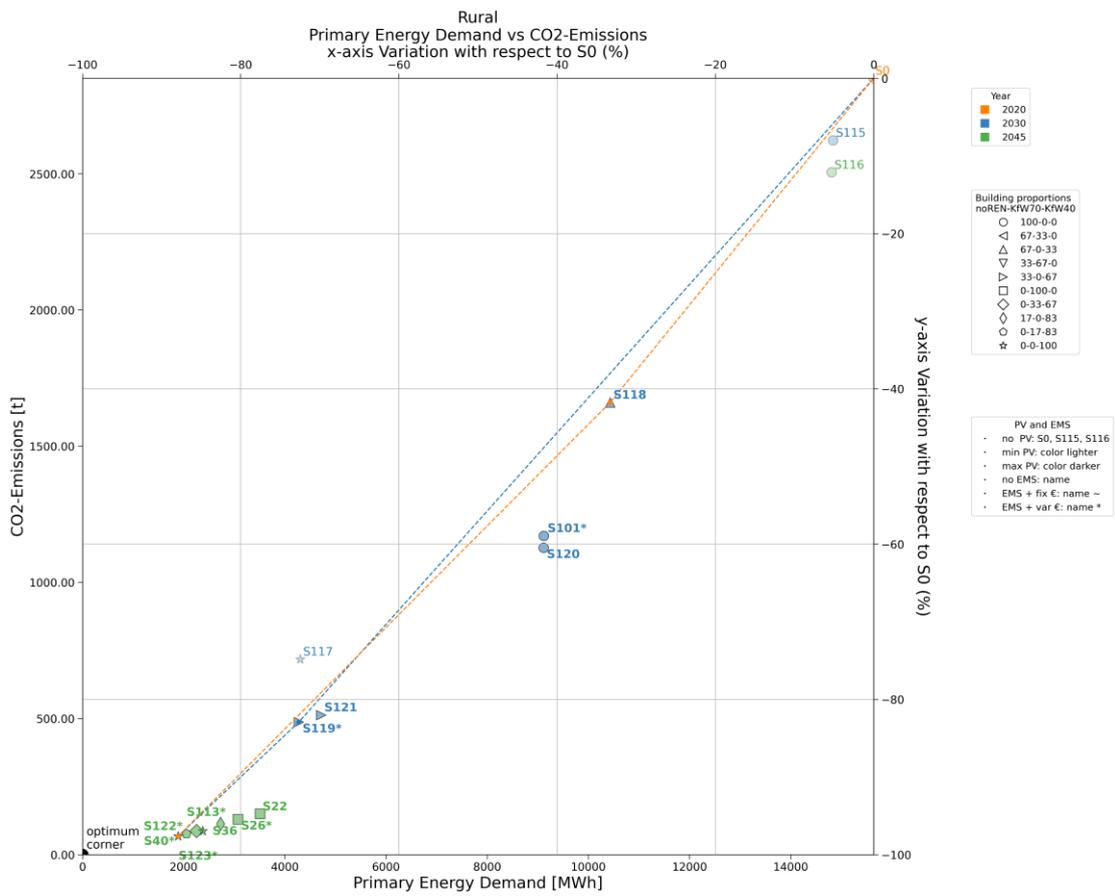


Abbildung 32: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der PED im ländlichen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

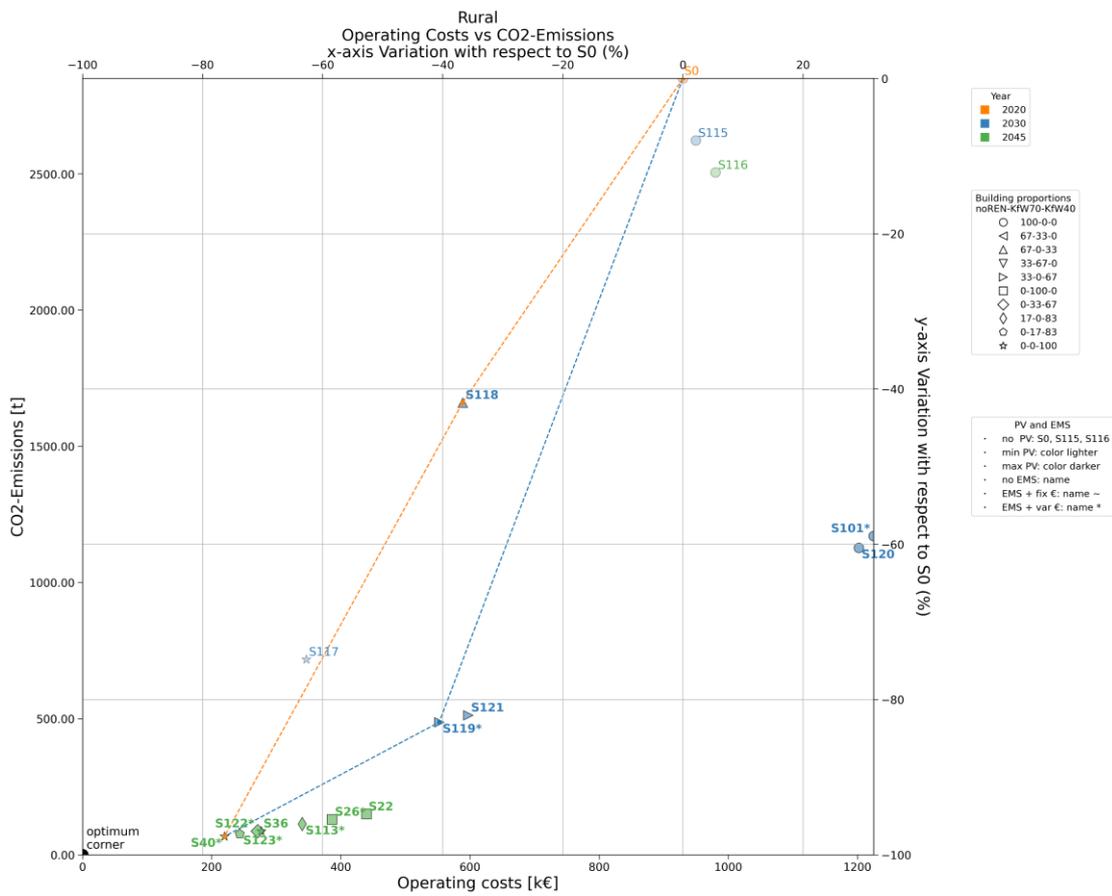


Abbildung 33: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der OC im ländlichen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

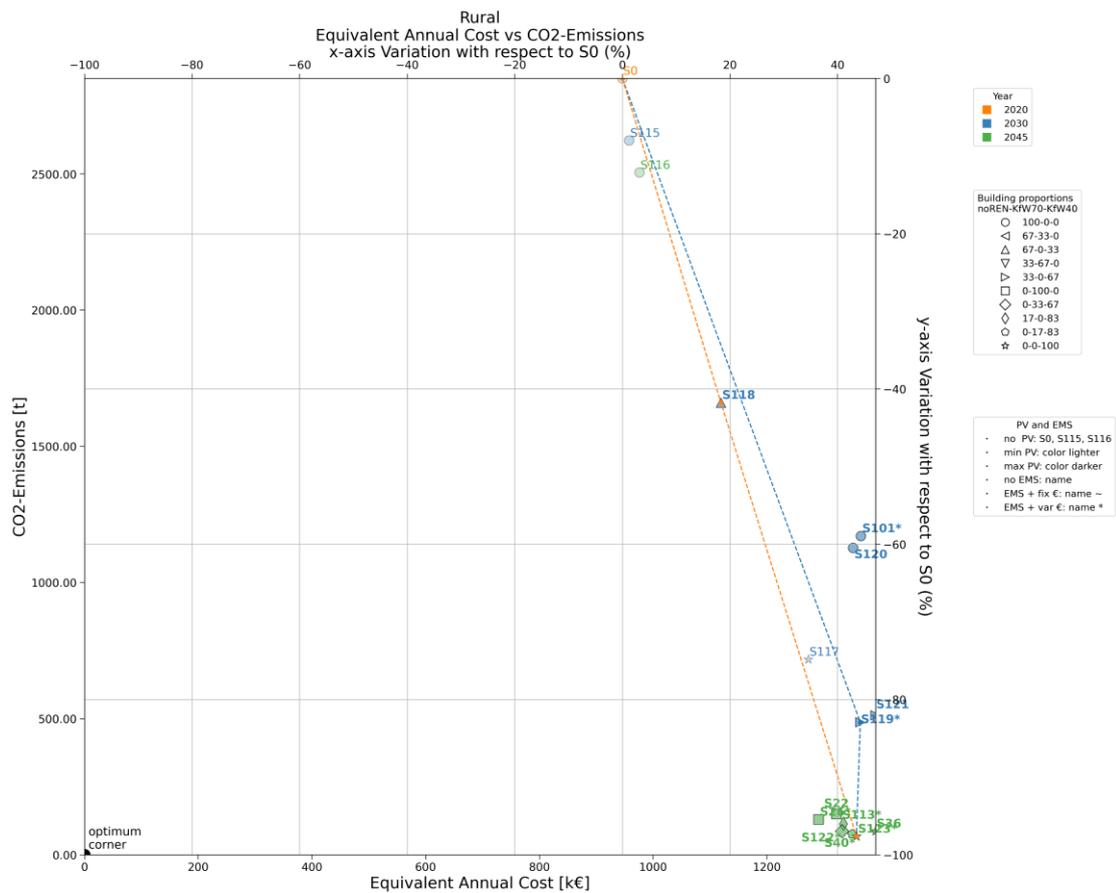


Abbildung 34: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der EAC im ländlichen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

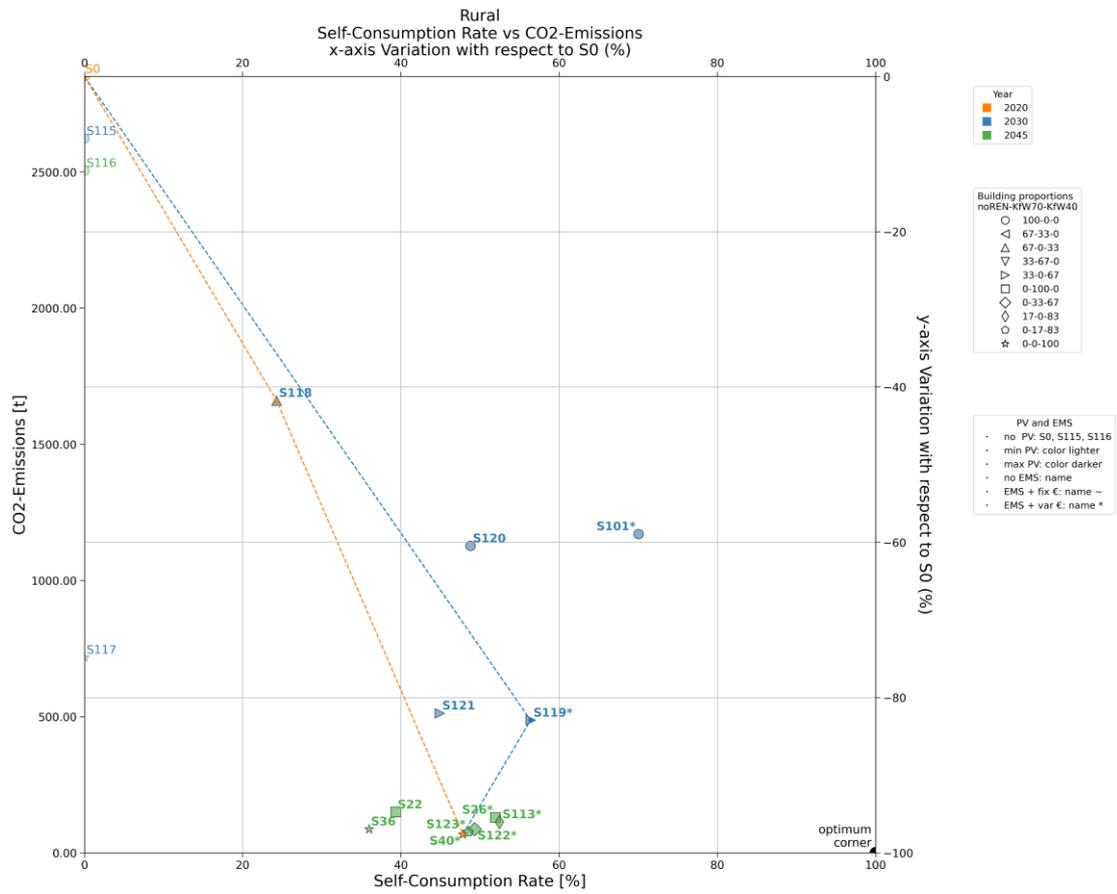


Abbildung 35: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der SCR im ländlichen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

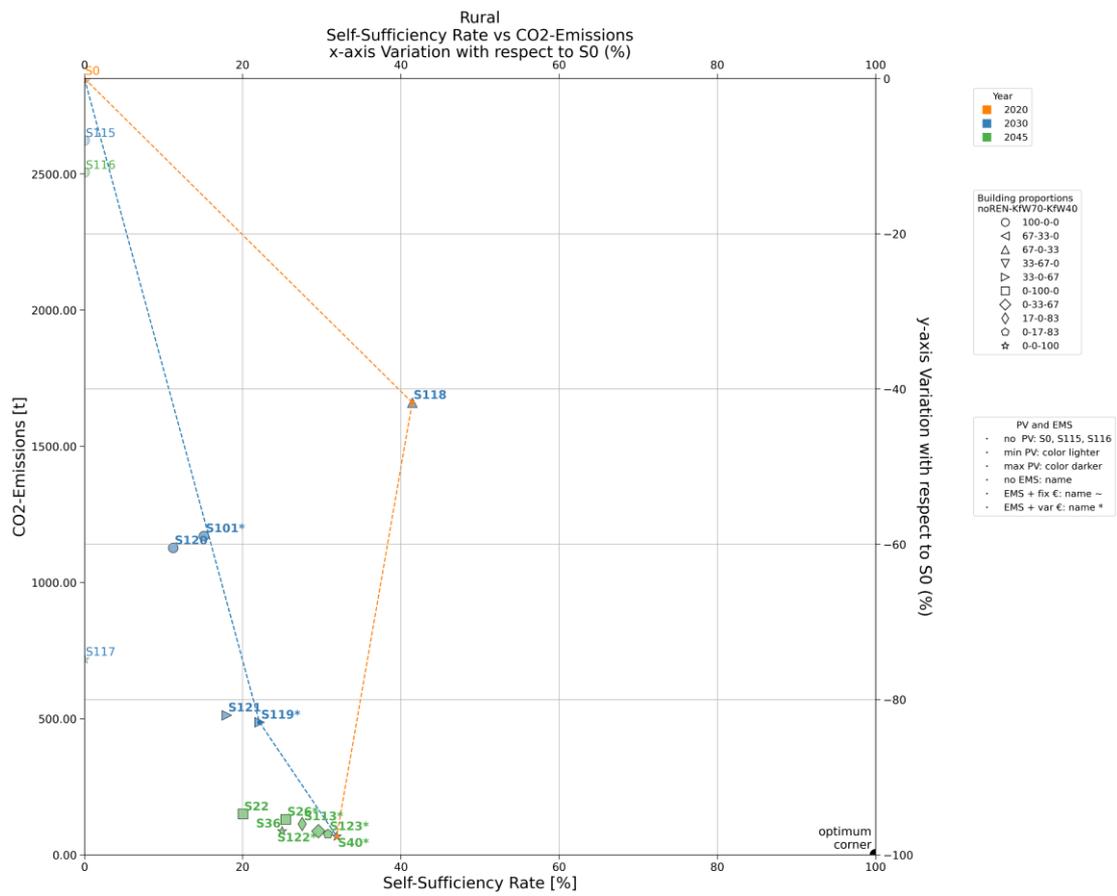


Abbildung 36: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der SSR im ländlichen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

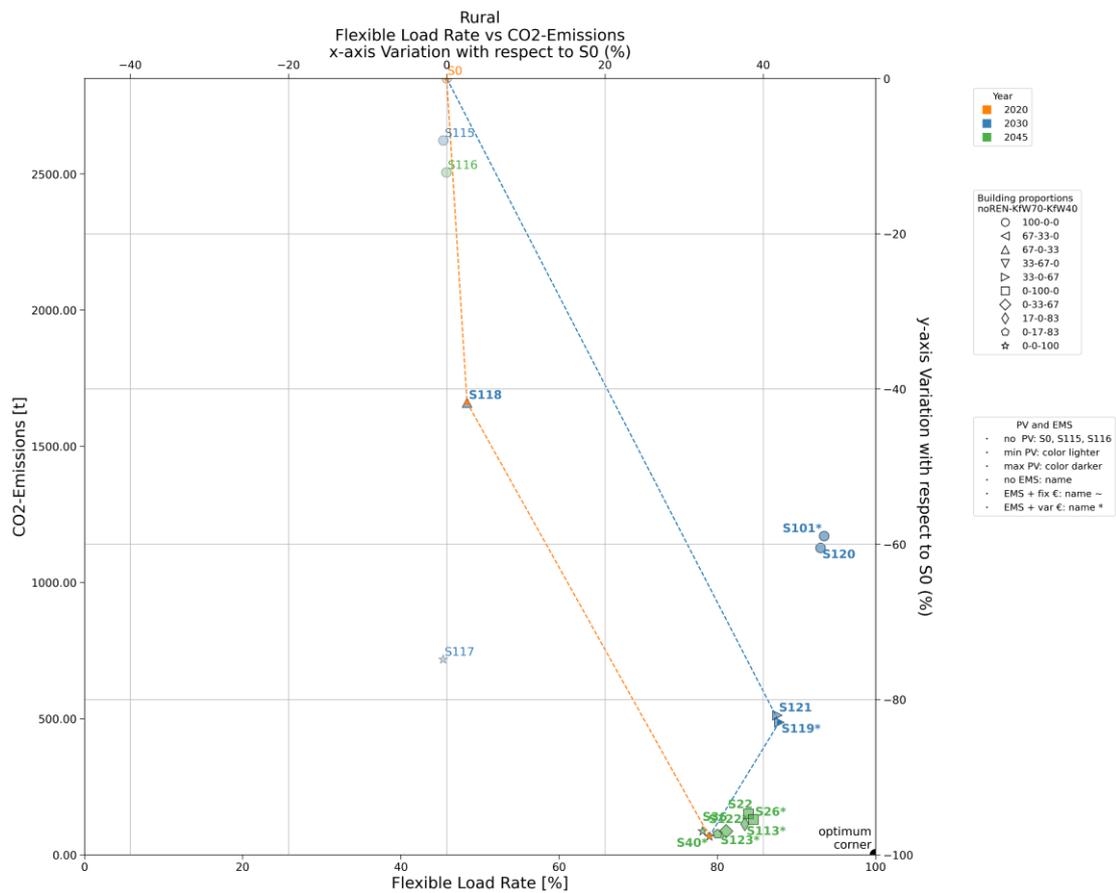


Abbildung 37: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der FLR im ländlichen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

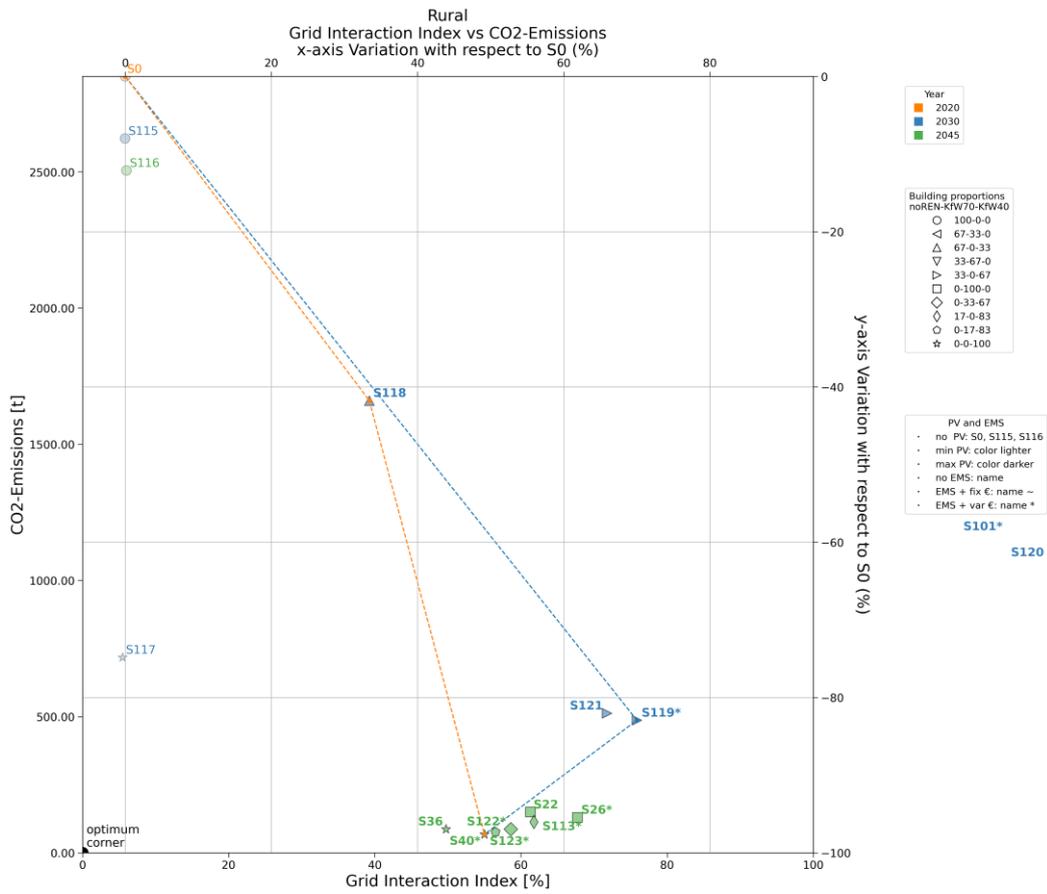


Abbildung 38: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der GII im ländlichen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

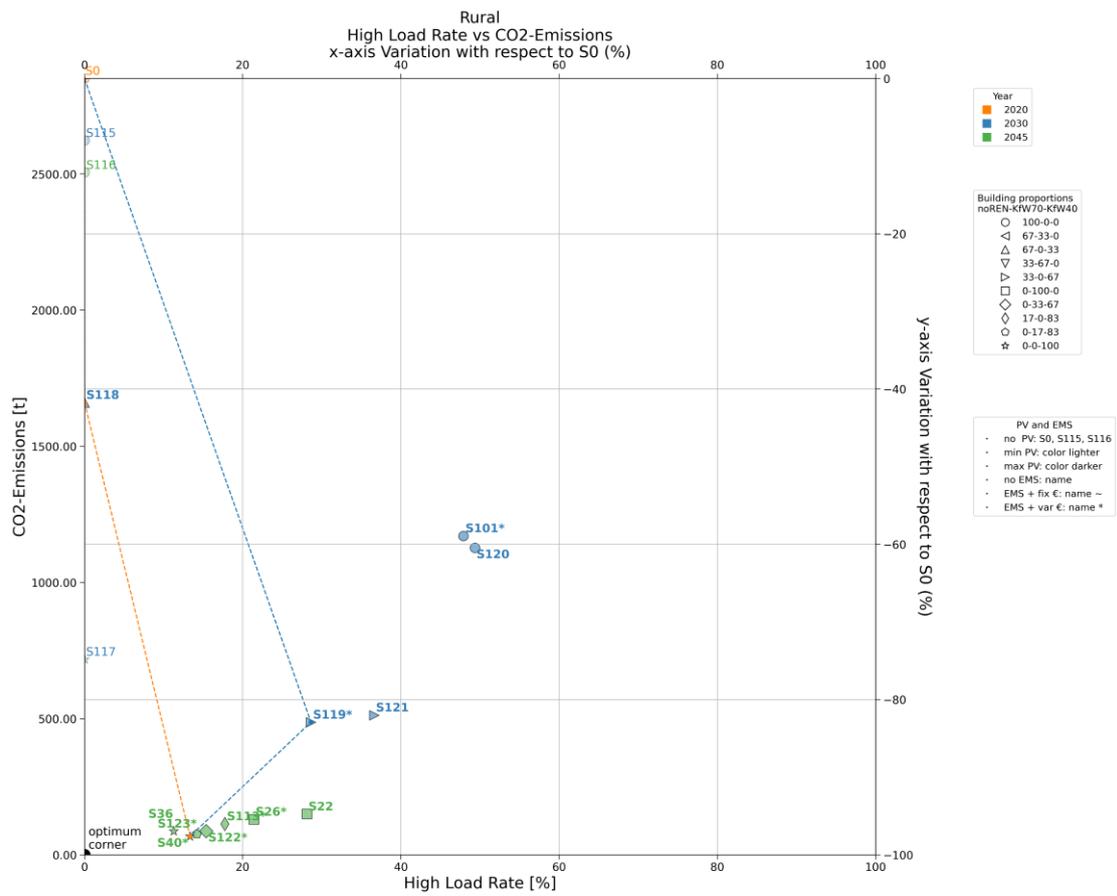


Abbildung 39: Diagramm zur Abbildung der CO₂-Emission gegenüber der HLR im ländlichen Quartier | Quelle: eigene Darstellung

Auswertung Suburban

Folgende Tabelle zeigt die für alle in Abschnitt Szenarienauswertung vorgestellten Sanierungspfade erhaltenen Ergebnisse unter Berücksichtigung der Szenarien für die Jahre 2020, 2030 und 2045.

Tabelle 16: Ergebnisse der Sanierungspfade für das suburbane Quartier

Pfad	Effizienz				Flexibilität					Effizienz		
	Umweltfaktoren		Wirtschaftlichkeit		Quartiersintern		Verteilnetz			Effizienz	Flexibilität	Global
	CO2	PED	OPC	EAC	SCR	SSR	FLR	GII	HLR			
[t]	[MWh]	[k€]	[k€]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]				
SP0	1186	7338	400	464	0	0	25.74	14.74	2.24			
% Variation gegenüber Basissanierungspfad SP0												
SP1	-48.4	-42.3	-45.3	12	45.92	35.07	10.47	19.04	0.66	11	3	7
SP2	-48.5	-42.3	-45.5	12.2	45.9	35.14	10.39	18.92	0.59	9	2	6
SP3	-48	-41	-43	10.3	46.4	34.29	11.47	20.11	1.24	12	5	10
SP4	-48.6	-42.8	-46.3	13.3	45.8	35.47	10	18.33	0.39	7	1	5
SP5	-65.7	-58.1	-47.4	15	56.94	28.15	27.3	25.71	6.52	3	7	3
SP6	-65.7	-58.2	-47.6	15.2	56.92	28.21	27.22	25.59	6.46	2	6	2
SP7	-65.2	-56.8	-45.1	13.3	57.42	27.36	28.3	26.77	7.1	4	4	4
SP8	-65.8	-58.6	-48.4	16.3	56.81	28.55	26.83	25	6.26	1	6	1
SP9	-60.3	-51.6	-36.5	11.5	57.18	27.03	31.87	33.82	9.96	9	9	11
SP10	-54.4	-51.2	-43.5	21.8	24.05	13.36	5.41	7.47	0.31	13	13	14
SP11	-53.6	-48.5	-39.3	26.7	17.98	10.42	4.84	5.94	0.71	15	15	17
SP12	-56.3	-44.3	-24.8	19	46.28	21.85	31.62	28.7	14.29	15	16	18
SP13	-62.8	-54.1	-41	17.3	53.21	26.22	27.59	23.33	7.95	8	11	12
SP14	-62.8	-54.2	-41.1	17.5	53.19	26.29	27.51	23.21	7.89	6	10	9
SP15	-62.4	-52.8	-38.6	15.6	53.69	25.44	28.59	24.4	8.54	10	12	13
SP16	-63	-54.7	-41.9	18.6	53.08	26.62	27.12	22.62	7.69	5	11	8
SP17	-62.2	-52.1	-37.7	23.5	47.01	23.68	26.56	21.09	8.09	14	14	16
SP18	-47.8	-40.2	-42.1	18.2	39.73	32.53	9.44	16.8	0.79	16	8	15

Wie auch im urbanen Quartier ist das systemische Optimum SP8, welches gleichzeitig auch dem effizienzbezogenen Optimum entspricht. Ebenso wie im städtischen Fall ist das flexibilitätsbezogene Optimum SP4. Im Gegensatz zum städtischen Fall ist der einzige Sanierungspfad, der in den Top 4 der drei Ansätze (effizienzbezogen, flexibilitätsbezogen und systemisches Optimum) enthalten ist, SP7.

Tabelle 17: Ergebnisse der Sanierungspfade für ausgewählte Szenarien im suburbanen Quartier

Sanierungspfade										
ID	Szenarien									
	ID	Parameterkombination						PV	Wärmesystem	Steuerung
		Stutzjahr	Gebäudehülle (Gebäudeanteil im Quartier)							
			Unsaniert	KfW70	KfW40					
Efficiency-related Optimum & Systemic Optimum										
SP8	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell		
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		
Flexibility-related Optimum										
SP4	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell		
	S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell		
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		
Within Top 4 in all three approaches										
SP7	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell		
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		
	S113	2045	17	0	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+		

Auswertung Ländlich

Nachfolgende Tabelle zeigt die in den Sanierungspfaden erhaltenen Ergebnisse unter Berücksichtigung der Szenarien für die Jahre 2020, 2030 und 2045.

Tabelle 18: Ergebnisse der Sanierungspfade für das ländliche Quartier

Pfad	Effizienz				Flexibilität					Effizienz		
	Umweltfaktoren		Wirtschaftlichkeit		Quartiersintern		Verteilnetz			Effizienz	Flexibilität	Global
	CO2	PED	OPC	EAC	SCR	SSR	FLR	GII	HLR			
[t]	[MWh]	[k€]	[k€]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]				
SP0	2741	15597	689	768	0	0	47.39	6.11	0.01			
% Variation gegenüber Basissanierungspfad SP0												
SP1	-45.8	-39.9	-41	32.5	27.92	30.18	12.82	33.56	4.92	10	4	9
SP2	-45.9	-40.3	-41.9	33.7	27.68	30.56	12.47	32.89	4.54	9	2	7
SP3	-45.5	-38.9	-38.8	32.7	28.93	29.52	13.57	34.57	5.68	13	6	14
SP4	-46	-40.6	-42.7	34.2	27.45	30.92	12.14	32.41	4.27	6	1	6
SP5	-67.2	-59.6	-42.8	42.9	43.98	20.52	32.55	51.87	19.23	2	4	2
SP6	-67.3	-60	-43.7	44	43.73	20.91	32.2	51.2	18.85	3	4	3
SP7	-66.9	-58.6	-40.6	43	44.98	19.87	33.3	52.88	19.99	5	4	5
SP8	-67.4	-60.4	-44.5	44.5	43.5	21.27	31.87	50.71	18.58	1	3	1
SP9	-55	-44.8	-10.6	40.2	50.33	17.75	34.7	76.06	28.2	11	7	15
SP10	-63.2	-60.3	-54.8	42.1	15.31	10.2	10.62	15.51	4.26	2	10	4
SP11	-63	-59.3	-53	44.3	11.51	7.99	10.35	13.83	3.6	4	11	10
SP12	-55.5	-43.8	-10	42.1	35.9	13.6	34.2	74.38	28.28	12	12	18
SP13	-66.7	-58.2	-40.6	43.7	38.23	18.45	32.42	49.82	23.22	8	8	12
SP14	-66.9	-58.6	-41.5	44.8	37.98	18.84	32.07	49.15	22.84	7	7	11
SP15	-66.4	-57.2	-38.4	43.8	39.24	17.8	33.18	50.83	23.98	11	9	16
SP16	-67	-58.9	-42.2	45.3	37.76	19.2	31.74	48.66	22.57	5	7	8
SP17	-66.7	-57.9	-40.4	47.6	33.96	16.98	31.47	46.98	21.91	12	11	17
SP18	-45.8	-39.6	-40.8	36.4	23.65	28.71	11.86	30.72	3.6	12	5	13

Wie auch in den urbanen und suburbanen Quartieren ist das systemische Optimum SP8, welches gleichzeitig auch dem effizienzbezogenen Optimum entspricht. Im Gegensatz zu den städtischen und vorstädtischen Fällen erreichen im ländlichen Fall 2 Pfade den Rang 2: SP5 und SP10. Ebenso wie in den städtischen und vorstädtischen Fällen ist das flexibilitätsbezogene Optimum SP4. Hervorzuheben ist, dass bis zu 4 Pfade den gleichen Rang 4 erreichen: SP1, SP5, SP6 und SP7. Im Gegensatz zu den städtischen und vorstädtischen Fällen sind im ländlichen Fall 3 Sanierungspfade in den Top 4 der drei Ansätze (effizienzbezogen, flexibilitätsbezogen und systemisches Optimum) enthalten. Beginnend mit dem bestplatzierten sind dies SP8 (das effizienzbezogene und systemische Optimum), SP5 (dies geschieht auch im vorstädtischen Fall) und SP6.

Tabelle 19: Ergebnisse der Sanierungspfade für ausgewählte Szenarien im ländlichen Quartier

Sanierungspfade								
ID	Szenarien							
	ID	Stutzjahr	Gebäudehülle (Gebäudeanteil im Quartier)			PV	Wärmesystem	Steuerung
			Unsaniiert	KfW70	KfW40			
Efficiency-related Optimum & Systemic Optimum								
SP8	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
Flexibility-related Optimum								
SP4	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S118	2030	67	0	33	Max. Potential	Gaskessel	Konventionell
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
Within Top 4 in all three approaches								
SP8	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S40	2045	0	0	100	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP5	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S122	2045	0	33	67	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
SP6	S0	2020	100	0	0	Kein PV	Gaskessel	Konventionell
	S119	2030	33	0	67	Min. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+
	S123	2045	0	17	83	Max. Potential	Wärmepumpe	Intelligent+