

Kommunaler Wärmeplan Stuttgart

Modellierung des kommunalen Wärmeplans
(Online Kurzbericht)

Kommunaler Wärmeplan Stuttgart

Modellierung des kommunalen Wärmeplans
(Online Kurzbericht)

Impressum

Herausgeber



Am Blütenanger 71
80995 München
+49 (0)89 158121-0
info@ffe.de
www.ffe.de

Kurzbericht zum Projekt

Kommunaler Wärmeplan Stuttgart – Modellierung des kommunalen Wärmeplans

Veröffentlicht am

22.12.2023

Projektleitung

Andreas Möbius (FfE)

Bearbeiter:innen

Britta Kleinertz (FfE)
Simon Koderer (FfE)
Irène Apra (FfE)
Daniel Schwermann (LHS)
Serena Oberecker (LHS)
Pascal Makoski (LHS)
Laura Schacht (SWS)
Christian Adler (SWS)
Joshua Güsewell (SWS)

Stellv. Wissenschaftlicher Leiter

Dr.-Ing. Serafin von Roon

Geschäftsleitung

Dr.-Ing. Serafin von Roon
Dr.-Ing. Christoph Pellingner
Dr.-Ing. Anna Gruber
Dr.-Ing. Andrej Guminski

Projektpartner

Landeshauptstadt Stuttgart (LHS)
Stadtwerke Stuttgart GmbH (SWS)

Bitte zitieren als

FfE (2023): Kommunaler Wärmeplan Stuttgart – Modellierung des kommunalen Wärmeplans. Kurzbericht im Auftrag der Landeshauptstadt Stuttgart und den Stadtwerken Stuttgart

Versionsnummer Vorlage: TL20230613

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation der Stadt Stuttgart	6
2	Datenaufbereitung	8
3	Anwendung des FfE- Wärmetransformationstools auf Stuttgart	10
3.1	Inputdaten für die Simulation	10
3.1.1	Szenarioparameter - Übersicht und Logik	12
3.1.2	Statische Szenarioparameter	13
3.1.3	Dynamische Heizsystemwechselrate	14
3.1.4	Aufteilung der Sanierungsraten auf Flurstückebene	15
3.1.5	Rundungslogik der Szenarioparameter	15
3.2	Logik der Hauptsimulation im FfE-Wärmetransformationstool	17
3.2.1	Ablauf der Hauptsimulation	17
3.2.2	Berücksichtigung eines Klimafaktors	18
3.2.3	Sanierungen	18
3.2.4	Heizsystemwechsel	19
3.3	Ergebnisse aus dem FfE- Wärmetransformationstools	21
3.3.1	Berechnung der Endenergiebedarfe	21
3.3.2	Berechnung der CO ₂ -Emissionen	21
3.3.3	Speicherung der Ergebnisse	22
4	Beschreibung der angenommenen Kostenfunktionen	23
4.1	Kosten der dezentralen Systeme	23
4.1.1	Sanierungskosten	23
4.1.2	Heizsystem-Kosten	24
4.1.3	Variable Betriebskosten dezentraler Heizsysteme	24
4.2	Kosten der zentralen Systeme	25
4.2.1	Kosten für die Wärmenetze	25
4.2.2	Kosten für den zentralen Erzeugerpark	25
4.2.3	Variable Betriebskosten zentraler Wärmeerzeuger	25
5	Simulationsergebnisse	26
5.1	Wärmebereitstellung	26
5.2	Heizsystemwechselrate und Sanierungsrate	27
5.3	Spezifischer Wärmebedarf	28
5.4	Installation von Wärmepumpen	28
5.5	Treibhausgasemissionen	29
5.6	Kosten	29
6	Zusammenfassung und Ausblick	30

Literaturverzeichnis	31
Abkürzungsverzeichnis	33
Abbildungsverzeichnis	34
Tabellenverzeichnis	35
Anhang	36

1 Ausgangssituation der Stadt Stuttgart

Zur Erreichung der ambitionierten Klimaschutzziele wurde in Baden-Württemberg ein rechtlicher Rahmen geschaffen, in dem ein Großteil der Kommunen bis Ende 2023 die kommunale Wärmeplanung abgeschlossen haben muss. Eine kommunale Wärmetransformation und somit auch die Strategieerstellung hierfür können nur effizient gelingen, wenn kommunale Vertreter:innen und Stadtwerke an einem Strang ziehen. Die Stadt Stuttgart (LHS) hat sich dieser Aufgabe zusammen mit den Stadtwerken Stuttgart (SWS) und deren technischer Expertise angenommen. Hierbei hat die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE) als neutrale Instanz begleitet und mit ihrer fachlichen Expertise sowie Erfahrungen aus ähnlichen Projekten unterstützt. Die Modellierung der Szenarien zur Entwicklung der Wärmeversorgung in Stuttgart wurde ebenfalls von der FfE durchgeführt und steht im Mittelpunkt dieses Kurzberichtes.

Der Kurzbericht ist wie folgt gegliedert: Da dieser Bericht auf den Erkenntnissen auf Wissen aus dem übergeordneten Projektbericht fußt, sind hier in Kapitel 1 die relevantesten Aspekte kurz dargestellt. Kapitel 2 beschreibt die vorgenommen Datenaufbereitungen, die Voraussetzung für die Anwendung des FfE Wärmetransformationstools sind. Das Tool selbst und festgelegte Zielvorgaben in Form von Sanierungsraten und -tiefen sowie Heizsystemwechselraten werden in Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Kapitel 4 gibt einen weiteren Überblick über die angenommen Kostenfunktionen für die Modellierung. Während in den Bericht seitens der LHS auch die von der FfE generierten Ergebnisse je Quartier eingebunden sind, werden hier in Kapitel 5 ausschließlich die gesamtstädtischen Ergebnisse präsentiert. Den Abschluss bildet Kapitel 6, welches eine Zusammenfassung und einen Ausblick gibt. Die hier vorgestellten Methoden und Annahmen wurden gemeinsam zwischen LHS, SWS und FfE diskutiert und beschlossen.

Szenarien der Modellierung

Im Rahmen der Untersuchungen stehen zwei Szenarien im Mittelpunkt, die den Ist-Zustand (2024) bis zum Jahr 2035 beschreiben:

1. Im **Zielszenario** wird das Ziel der Klimaneutralität in 2035 erreicht und im

2. **Trendszenario** wird aufgezeigt, wie sich die Stadt entwickelt, wenn die Transformation mit geringer Beschleunigung voranschreitet.

Zu Grunde liegt beiden Szenarien eine zeitliche Einteilung in vier Zeiträume:

- Ist-Zustand bis 2027,
- 2027 bis 2030,
- 2030 bis 2033 und
- 2033 bis 2035.

Detailgrad der Analyse

Für die Erstellung und bessere Handhabung des Wärmeplans wurde die Stadt in insgesamt 56 Quartiere untergliedert. Die Methodik zur Identifikation dieser Quartiere basiert auf der Analyse der Potenziale und Flächen und der Bedarfsstruktur. Nähere Informationen zu diesem Prozess werden im Bericht von LHS und SWS veröffentlicht.

Die 56 Quartiere wurden für die Modellierung wiederum in 12 Cluster entsprechend ihren Charakteristika und der angestrebten Versorgungsentwicklung zusammengefasst (Details siehe Kapitel 3). Mit dieser Einteilung ergeben sich vier Ebenen, auf denen die Daten analysiert und aggregiert werden:

- Gesamtstadt,
- Cluster,
- Quartier und
- Flurstück.

Jedes Flurstück ist mit einer eindeutigen Identifikationsnummer (ID) gekennzeichnet und eindeutig einem Quartier sowie Cluster zugeordnet. Die darunter liegende Datenebene der Einzelgebäude wurde durch die LHS vorab jeweils auf ein Flurstück agglomeriert, bevor diese an die FfE gesendet wurden. Dabei wurden gewichtete Gebäudewerte verwendet, z. B. bei der Bestimmung des Hauptnutzungstyps des Flurstücks. Wo dies möglich war, wurden die Kennwerte direkt addiert, wie z. B. beim absoluten Wärmebedarf. Im weiteren Verlauf des Kurzberichtes wird daher auf den Begriff „Gebäude“ verzichtet.

Durch die Aggregation auf Ebene der Flurstücke ergibt sich auf der einen Seite der Vorteil, dass potenzielle Wärmequellen besser mit den Gebäudedaten

verschnitten werden können, da diese pro Flurstück analysiert wurden. Auf der anderen Seite ergibt sich der Nachteil, dass sich die angenommenen Sanierungen und Heizsystemwechsel auf gemittelte Gebäudeeigenschaften je Flurstück beziehen, sowie nur auf einen Energieträger pro Flurstück. Das FfE Wärmetransformationstool rechnet daher in den Simulationen auf Flurstückebene und alle Sanierungen und Heizsystemwechsel beziehen sich auf die Werte pro Flurstück. Bezogen auf die Gesamtergebnisse eines Quartiers, Clusters und letztendlich der Gesamtstadt muss diese Unschärfe in der Auswertung und Deutung der Ergebnisse berücksichtigt werden. In Anbetracht der generell recht hohen Unsicherheiten bereits für die Bestimmung des Status Quo der Eigenschaften aller Gebäude in einer Stadt, ist dies jedoch nicht von hoher Relevanz.

Die in diesem Kurzbericht verwendeten Abkürzungen sind gesammelt im Abkürzungsverzeichnis auf Seite 33 im Anhang.

2 Datenaufbereitung

Im Folgenden wird zunächst beschrieben, welche Daten von der LHS an FfE übermittelt wurden und welche Flurstücke für die Simulation mit dem FfE-Wärmetransformationstool verwendet wurden. Darüber hinaus werden die Methoden und Annahmen erklärt, welche in Absprache mit der LHS und den SWS verwendet wurden, um die Daten zu plausibilisieren, zu korrigieren und zu ergänzen.

Erhaltene Daten

Der von der LHS zur Verfügung gestellte Datensatz enthält einen Eintrag pro Flurstück mit Informationen zum Status Quo wie Clusterzuordnung, Quartierszuordnung, Netto-Energiebezugsfläche, Nutzungstyp, Baujahr, spezifischer Wärmebedarf, Wärmeverbrauch, Energieträger und abgeschätztes Baualter des Wärmeerzeugers. Die Daten stammen aus verschiedenen Quellen und Untersuchungen wie z. B. dem städtischen Vermessungsamt, dem Energieversorger oder den städtischen Kaminkehrerdaten (Details siehe Bericht der LHS).

Weiterhin sind die Potenziale für nachhaltig einsetzbare Heizsysteme enthalten, dies sind Luft-Wärmepumpen (WP LW), Erdsonden mit Wärmepumpen (WP ES), Flächenkollektoren mit Wärmepumpen (WP FK) und Photovoltaik-Thermie (PVT)-Systeme. Zusätzlich ist ein separater Datensatz (Shapefile) zur Geometrie der Flurstücke als Polygone enthalten. Die beiden Datensätze können über die eindeutige Kennung jedes Flurstücks miteinander verknüpft werden.

Initiale Aufbereitung der Daten

Im übergebenen Datensatz an die FfE existieren Flurstücke, die als Nutzungstyp „nicht beheizt“ kategorisiert sind und/oder keinen Wärmeverbrauch haben. Nachdem überprüft wurde, dass alle unbeheizten Flurstücke tatsächlich keinen Wärmebedarf haben, werden in einem initialen Schritt nicht beheizte Flurstücke und/oder Flurstücke ohne Wärmebedarf aus dem Betrachtungshorizont entfernt.

Darüber hinaus existieren Flurstücke, bei denen Informationen zur Geometrie, zum Baujahr, dem spezifischen Bedarf und zur Netto-Energiebezugsfläche fehlen. Diese wurden ebenfalls entfernt, bevor die verarbeiteten Daten für das Modell verwendet werden können.

Wärmebedarf und –verbrauch zu Endenergiebedarf

Während der Wärmeverbrauch den realen Verbrauch von Wärme durch einzelne Personen und deren Präferenzen darstellt, ist der Wärmebedarf ein theoretischer Wert, welcher unter anderem basierend auf Bauteileigenschaften und typischen Präferenzen bestimmt wird.

Von der LHS wurde wiederum der real gemessene Endenergiebedarf übermittelt, welcher den Wärmebedarf zuzüglich der Verluste des Heizsystems darstellt. Für die Anwendung des FfE Wärmetransformationstools ist der Wärmebedarf die ausschlaggebende Größe. Daher wurde der Endenergiebedarf mit den individuellen Nutzungsgraden verschiedener Heizsystemarten (Details siehe Kapitel 3) verschnitten, um den gewünschten Wert zu erhalten. Für die Flurstücke, bei denen keine Verbrauchsdaten erhoben werden konnten, sind in Abhängigkeit von den realen Leistungsdaten der Wärmeerzeuger, der Wärmebedarf über Nutzungstyp abhängige Volllaststundenzahl berechnet worden.

Baujahr

Bei 926 Flurstücken fehlen Informationen über das Baujahr. Um diese Anzahl zu reduzieren, wird zunächst eine auf der geografischen Nachbarschaft basierende Methode zur Schätzung des Baujahres angewandt. Für Flurstücke, bei denen innerhalb einer Pufferzone von 30 Metern mindestens drei benachbarte Flurstücke vorhanden sind und diese ein Baujahr haben, wird der Median des Baujahres dieser Nachbarn als Baujahr des Flurstücks angesetzt. Damit erhalten 416 Grundstücke ein Baujahr.

Andere Flurstücke, die isolierter liegen oder von Flurstücken umgeben sind, die ebenfalls keine Informationen zum Baujahr haben (siehe Abbildung 2-1), erhalten einen Wert, der auf dem „World Settlement Footprint“ DLR-Rasterdatensatz basiert /DLR-01 23/. Mit Hilfe des DLR-Rasters wird 436 Flurstücken ein Baujahr zugeordnet.

Die verbleibenden 74 Flurstücke ohne Angabe zum Baujahr werden mit dem gleichen Ansatz für die benachbarten Flurstücke aufgefüllt, allerdings mit einer Pufferzone von 100 m und ohne Berücksichtigung der fehlenden Baujahre der Nachbarflurstücke.



Abbildung 2-1: Beispiel von Flurstücken ohne Bualter (rot), die ein von den Nachbarn abhängiges Baujahr erhalten (links) bzw. aus dem DLR-Raster (rechts).

Baujahr des Wärmeerzeugers

Anschließend wird überprüft, ob das im vorangegangenen Schritt berechnete Bualter des Flurstücks älter oder gleich dem Baujahr des Wärmeerzeugers ist, sofern dieses angegeben wurde. Ist das Bualter jünger als das Baujahr der Wärmeerzeuger, wird das Bualter des Flurstücks so angepasst, dass es maximal dem Baujahr des Wärmeerzeugers entspricht. Das Bualter von 43 Flurstücken wird auf diese Weise korrigiert.

Die von der Stadt übergebenen Baujahre der Wärmeerzeuger, welche nicht flächendeckend vorliegen, werden ebenfalls im Abgleich mit dem Bualter der Flurstücke überprüft: 4.243 Baujahre von Wärmeerzeugern werden so korrigiert, dass kein Baujahr eines Wärmeerzeugers höher ist als das Bualter des Flurstücks. Das Bualter der Wärmeerzeuger ergibt sich durch die Subtraktion des Baujahres des Wärmeerzeugers vom Referenzjahr des Projekts.

Genutzte Energieträger

Wenn auf einem Flurstück mehrere Energieträger vorhanden sind, wurde ein Hauptenergieträger definiert, dem der gesamte Verbrauch zugerechnet wird. Bei Bestandsnahwärmenetzen (Cluster 10) wird der Gesamtwärmeverbrauch gewichtet nach der Netto-Energiebezugsfläche der angeschlossenen Flurstücke auf diese aufgeteilt. Damit ist auch hier eine eindeutige Zuordnung pro Flurstück vorhanden.

Sämtliche Heizsysteme, die den Energieträger Strom haben, bekommen als Heizsystem eine „Bestandswärmepumpe“ zugeordnet. Dieser Schritt wurde umgesetzt, da zum Zeitpunkt der Datenübergabe der Datensatz mit der Zuordnung von Nachtspeicherheizungen und spezifischen Wärmepumpenarten noch nicht vorlag. Im Zuge der Fortschreibung der Wärmeplanung wird dieser Datensatz Berücksichtigung finden.

3 Anwendung des FfE-Wärmetransformationstools auf Stuttgart

Für die Modellierung der Szenarien zur Entwicklung der Wärmeversorgung und der hiermit verbundenen Kosten in der Stadt Stuttgart wird das eigens weiterentwickelte FfE Wärmetransformationstool verwendet. Dieses Modell, welches in der Programmiersprache Python implementiert ist, und dessen Randbedingungen und Annahmen werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Der Simulationsablauf ist in Abbildung 3-1 veranschaulicht und wird in der gleichen Reihenfolge in den Unterkapiteln beschrieben. Zunächst werden benötigte Inputdaten sowie die Logik der Verteilung der Szenarioparameter auf die Cluster erläutert (Kapitel 3.1). Danach erfolgt die Beschreibung der Hauptsimulationslogik (Kapitel 3.2). Die aus der Simulation resultierenden Ergebnisse werden dann weiter aufbereitet, um die Vielzahl gewünschter Ergebnisse zu generieren (Kapitel 3.3).

Voraussetzung der Anwendung des FfE Wärmetransformationstools ist, dass alle Flurstücke der Stadt einem Cluster zugeordnet sind. Dadurch ist es möglich, die energetischen Kennwerte für jedes Jahr und jedes Flurstück in der Simulation zu aktualisieren. Zu den wichtigsten energetischen Kennwerten gehören der jährliche Wärmebedarf, die maximale Heizlast und der Heizsystemtyp. Auf Grundlage dieser energetischen

Ergebnisse werden die gekoppelten CO₂-Emissionen, anfallende Kosten und Förderungen berechnet.

Es ist nicht der Anspruch des FfE-Wärmetransformationstools, für jedes Flurstück eine abschließende Entscheidung über das Wärmeversorgungskonzept zu geben, dies ist Aufgabe einer Vor-Ort-Energieberatung.

3.1 Inputdaten für die Simulation

Vor der Eingabe in das Tool sind die Flurstückdaten in ihrer Vollständigkeit hinsichtlich der Flurstückcharakteristika, ihrer Eindeutigkeit in Bezug auf Flurstück-Zuordnungen sowie korrekte Einheiten, Formate und Benennungen zu prüfen. Andernfalls besteht die Möglichkeit, dass während der Simulation Fehler auftreten, die die Simulationsergebnisse stark beeinflussen. Daher sind sämtliche Inputdaten in der Zusammenarbeit zwischen LHS, SWS und FfE abgestimmt sowie plausibilisiert worden (siehe auch Kapitel 2). Somit sind die im Kapitel 2 beschriebenen Vorarbeiten ein zwingend benötigter Schritt für die Modellierung.

Das FfE Wärmetransformationstool benötigt differenzierte Inputdaten, die sich gemäß Abbildung 3-1 in die vier Kategorien Status Quo, Potenzielle Wärmequellen, Umfeldparameter und Einteilung in Cluster mit Szenarioparametern unterteilen lassen.

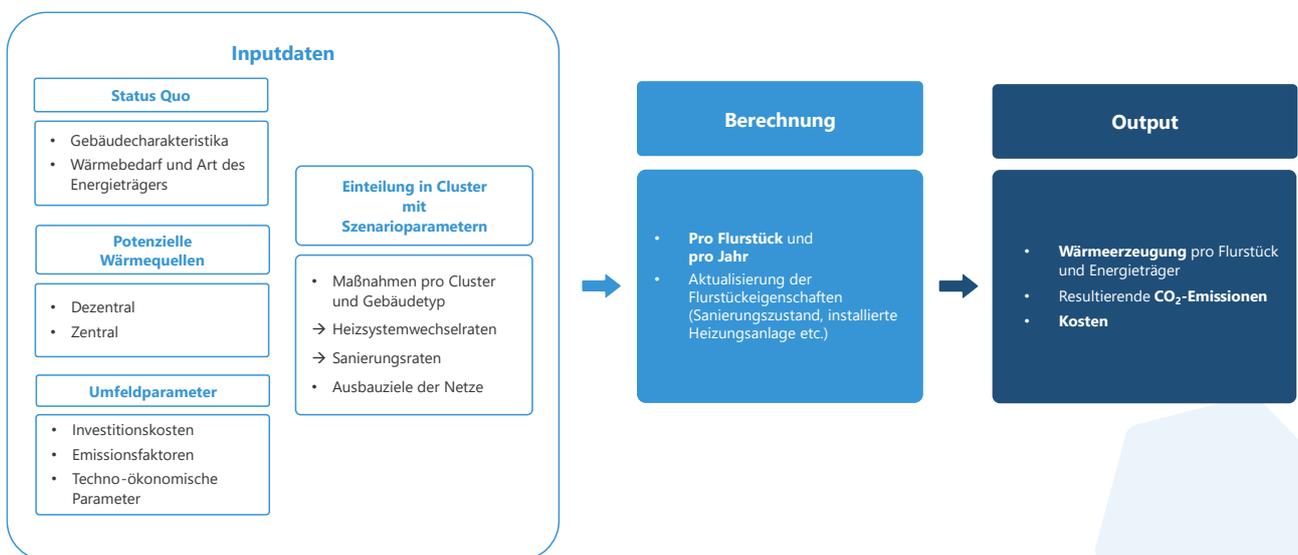


Abbildung 3-1: Input und Output des FfE Wärmetransformationstools

Umfeldparameter und Szenarioparameter einteilen lassen und hier nacheinander beschrieben werden.

Status-Quo

Als Inputdaten benötigt es Angaben zum Status Quo der Flurstücke. Dies beinhaltet u. a. Angaben zur beheizten Fläche, zum spezifischen Wärmebedarf, zum absoluten Wärmebedarf, zur Art des verbauten Heizsystems und die Angabe des Nutzungstyps. Ein beispielhafter Auszug aus diesen Inputdaten inklusive ihrer Benennung und Einheiten ist im Anhang in der Tabelle A 3 gegeben.

Potenzielle Wärmequellen

Um zu prüfen, ob sich Flurstücke selbst mit den Potenzialen auf ihrem eigenen Flurstück versorgen können, ist die Betrachtung von den beiden Größen Jahreswärmemenge und maximale Leistung essenziell. Bei der Jahreswärmemenge wird geprüft, ob die je Wärmeerzeuger jährlich bereitstellbare Wärmemenge ausreicht, um den jährlichen Wärmebedarf auf dem Flurstück bereitzustellen (Einheit: kWh / Jahr). In Bezug auf die maximale Heizleistung hingegen wird die benötigte Wärmeleistung auf dem Flurstück bei Normheizlast mit der maximal bereitstellbaren Leistung des Wärmeerzeugers verglichen (Einheit: kW). Dies ist notwendig, da manche Lösungen in ihrer Leistung begrenzt sind, jedoch ganzjährig betrieben werden können. Somit kann es dazu kommen, dass der Wärmebedarf gedeckt werden kann, jedoch nicht der hohe Leistungsbedarf der Heizung im Winter.

Diese Prüfung der Möglichkeit zur Bedarfsdeckung findet mit allen zur Verfügung gestellten Potenzialdaten zu den dezentralen Heizsystemen in einer Vorabrechnung statt (auch Preprocessing genannt). Dabei wurden die gelieferten Daten zu folgenden Heizsystemen in eine für das Modell geeignete Form überführt: WP LW, WP FK, WP ES und PVT. Beim Preprocessing werden alle Potenzialdaten daraufhin geprüft, ob sie

1. den jährlichen Wärmebedarf und die maximale Heizleistung decken können,
2. den Wärmebedarf und die Heizleistung nach einer Sanierung decken können (Sanierungstiefe entspricht der je Szenario maximal festgelegten Sanierungstiefen in A 1) oder
3. den jährlichen Wärmebedarf und die maximale Heizleistung trotz einer Sanierung nicht decken können.

Gemäß der in Tabelle A 1 festgehaltenen Ausgestaltung der Szenarien wird im Zielszenario für Stuttgart durchgehend eine gleichbleibende Sanierungstiefe

von KfW 55 angenommen. Im Gegensatz dazu wird im Trendszenario erwartet, dass nach einer geringen Sanierungstiefe aktuell (KfW 120) ab dem Jahr 2030 tiefer saniert werden kann (KfW 100). Dies hat zur Folge, dass die Potenziale der erneuerbaren Wärmeerzeuger mit der Zeit besser den Bedarf decken können. Dies ist entsprechend dynamisch in der Simulation des Trendszenarios berücksichtigt worden.

Ausgenommen hiervon sind denkmalgeschützte Flurstücke, welche unabhängig vom Zeitabschnitt und Szenario die Sanierungstiefe „KfW Denkmal“ erhalten.

Das Ergebnis des Preprocessing ist beispielhaft in der Tabelle 3-1 dargestellt. Dabei wurde jedem Flurstück für jedes mögliche Heizsystem ein Potenzialwert zugewiesen. Ist das Potenzial, das dem Flurstück zugeordnet wurde, ausreichend, so ist der Eintrag in der Tabelle mit einer 1 gekennzeichnet. Ist ein Flurstück erst nach seiner Sanierung für ein Heizsystem geeignet, so wird der spezifische Wärmebedarf angegeben, den das Flurstück durch eine Sanierung erreichen muss, um für das jeweilige Heizsystem geeignet zu sein. Beispielsweise indiziert die Zahl 46 kWh/m², dass jenes Ein- und Zweifamilienhaus auf KfW 55 Wert saniert werden müsste, um sich komplett über eine PVT-Anlage versorgen zu können. Andernfalls wird eine 0 zugewiesen.

Das von der Stadt übergebene Potenzial der WP LW liegt mit einer Eignungsangabe: „ja“, „bedingt“ und „nein“ vor. Die beiden Fälle „ja“ und „nein“ können während des Preprocessings direkt in das beschriebene Schema mit 1 und 0 übertragen werden. Wenn eine bedingte Eignung für eine Aufstellung einer WP LW vorliegt, wird angenommen, dass ein Deckungsanteil mit erneuerbarer Wärme von 65 % des Wärmebedarfes gemäß dem Gebäudeenergiegesetz 2023 (GEG) /GN2-01 23P/ im Ist-Zustand vorliegt. Für die Leistung wird ein Deckungsanteil von 30 % angenommen. Damit sind diese Systeme für ein Hybrid-System (WP LW mit ergänzendem Erdgaskessel) geeignet sowie nach einer Sanierung.

Für jedes der geplanten NW-Gebiete ist pro Jahr der Anlagenpark vorgegeben. Bei der zentralen FW in Stuttgart sei hiermit auf die entsprechenden Planungen im Rahmen des Transformationsplanes verwiesen. Im Zielszenario wurde für die Fernwärme eine Steigerung der bereitstellbaren Wärmemenge um 15 % angenommen, im Trendszenario hingegen keine Steigerung.

Da jedes Flurstück einem Quartier eindeutig zugeordnet ist, kann wiederum angegeben werden, ob für das Flurstück ein FW- oder NW-Anschluss potentiell

möglich ist. Dies ist mit der Spalte FW und NW in den Daten vermerkt (siehe Tabelle 3-1).

Umfeldparameter

Für die Auswertung werden über die flurstückspezifischen Daten hinaus weitere Umfeldparameter benötigt. Hierzu gehören Emissionsfaktoren und Nutzungsgrade, die je Endenergieträger und Heizsystem für die definierten Jahre vorgegeben werden müssen (Details siehe Kapitel 3.3). Außerdem werden diverse Kostenfunktionen der Wärmeerzeuger und techno-ökonomische Kennwerte benötigt (Details in Kapitel 4).

Für den Algorithmus, welcher die zu ersetzenden Wärmeerzeuger auswählt, benötigt es u. a. eine mittlere zu erwartende Lebensdauer je Heizsystem, welche auf Projekterfahrungen der FfE basieren.

Einteilung in Cluster mit Szenarioparameter

Gemäß Abbildung 3-1 müssen neben dem Datensatz zum Status Quo sowie den potenziellen Wärmequellen und den Umfeldparametern als vierter Inputblock die Szenarioparameter je Cluster vorgegeben werden. Hier wird beschrieben, wie die Quartiere in Cluster unterteilt wurden. In den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.5 ist dargestellt, wie die Szenarioparameter festgelegt werden.

Um die Verschneidung von Wärmebedarfen und -potenzialen regional differenziert umsetzen zu können, ist eine Einteilung der Stadt in Cluster für verschiedene Technologien wichtig. Diese Einteilung ist ein elementarer und aufwändiger Schritt, da die hier erarbeiteten Cluster als zentrales Ergebnis besagen, wo welche Lösung umgesetzt werden sollte. Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, wurden die 56 Quartiere (53 Wärmenetze und 3 Einzelversorgungsgebiete) der Stadt Stuttgart in

insgesamt 12 Cluster zusammengefasst. Eine Auflistung der Cluster mit ihren Eigenschaften und wie die Quartiere diesen zugeordnet sind, ist in Tabelle A 2 im Anhang zu finden.

Die resultierenden 12 Cluster wurden anhand der angestrebten Art der Wärmeversorgung, dem Quartiers-typ (Wärmenetzeignungsgebiet, Neubau, Fernwärme, Bestandsnetz oder Einzelversorgung) und ihres Sanierungsbedarfs (hoch, mittel, niedrig) differenziert. Außerdem wurden aktuell geplante und in der Umsetzung befindliche Projekte berücksichtigt.

3.1.1 Szenarioparameter - Übersicht und Logik

Verwendete Parameter

Zur Berechnung des Wärmetransformationspfades bis in das Jahr 2035 sind die drei Szenarioparameter „Heizsystemwechselrate“, „Sanierungsrate“ und „Sanierungstiefe“ exogen vorzugeben. Dabei beschreibt die Heizsystemwechselrate den Prozentsatz aller jährlich getauschten Heizsysteme. Die Sanierungsrate gibt vor, welcher prozentuale Anteil der Bestandsgebäude, nachfolgend Bestandsflurstücke genannt, jährlich energetisch saniert wird. Neben der Sanierungsrate spielt auch die Sanierungstiefe eine wichtige Rolle. Diese ist ein Indikator für den flächenspezifischen Wärmebedarf der jeweiligen Nutzungstypen und wird in Form eines KfW Effizienzhaus (KfW) Standards angegeben. Es wurde sich auf diese drei Szenarioparameter festgelegt, da sie maßgeblich den Transformationsprozess und dessen Tempo hin zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung bestimmen. Mit der Festlegung der Szenarioparameter werden das Trendszenario und das Zielszenario genauer spezifiziert. Neben den Szenarioparameter bestimmen die vorgegebenen

Tabelle 3-1: Beispielhafte Potenzial-Inputdaten

Bezeichnung	ID	Bio-masse ^{*1}	FW	NW	WP LW	WP ES	WP FK	PVT	Sonder-lösung ^{*2}
Einheit	-	GWh	0/1	0 oder Quartier	0/1 oder kWh/m ²	1			
Beispiel-daten	148200*	0	0	0	1	0	1	1	1
	148200*	0	0	0	46	0	0	46	1
	148000*	0	0	20	1	1	0	46	1

*¹ Für jede ID wird der Biomasseanteil in GWh für die Simulation für jedes Jahr mitgeführt. Der Grund dafür ist die Annahme, dass der Energieträger Biomasse nicht das Hauptheizsystem darstellt, sondern ergänzend als Komfortöfen.

*² Jedes Flurstück hat automatisch als Backup Technologie eine Sonderlösung.

unterschiedlichen Fertigstellungsjahre der Wärmenetze und Zielanschlussquoten der Quartiere das Zielbild.

Zusätzlich sind diverse weitere Modellparameter, die individuell auf die Gegebenheiten der Stadt Stuttgart angepasst wurden, hinterlegt. Diese sind in Tabelle A 4 aufgelistet und erläutert.

Differenzierte Anwendung der Parameter

Das Grundprinzip des entwickelten FfE Wärmetransformationstools ist, dass es von der möglichen Arbeitskraft aus gedacht aufgebaut ist. Dies bestimmt die Festlegung und spätere Verarbeitung der Szenarioparameter. Das Leitprinzip lässt sich wie folgt definieren:

Es benötigt für Sanierungen und Heizsystemwechsel qualifizierte Menschen und unterschiedliche zeitliche Aufwände, daher kann deren Arbeitskraft nicht kurzfristig erhöht oder beliebig verschoben werden.

Zur besseren Einordnung ist anzumerken, dass es durchaus möglich wäre, die Arbeitskraft über die beschriebenen Abgrenzungen der Tätigkeitsfelder zu verschieben, aktuell geschieht dies jedoch wenig bis garnicht. Die Gestaltung der Sanierungs- und Heizsystemwechsel im FfE Wärmetransformationstool soll somit ein möglichst realistisches Bild aus der Praxis abbilden. Die Angabe erfolgt in der Form „Anzahl an Flurstücken“. Diese Anzahlen werden im FfE Wärmetransformationstool in der Granularität benötigt: pro Zeitabschnitt, pro Cluster, pro Nutzungstyp, pro Denkmalschutz-Status und dem Kriterium, ob hin zu einem neuem dezentralem Heizsystem gewechselt wird oder ein Anschluss an ein Wärmenetz erfolgt. Diese Unterteilung stellt sicher, dass Sanierungen nicht zwischen denkmalgeschützten und nicht denkmalgeschützten Flurstücken sowie zwischen unterschiedlichen Nutzungstypen verschoben werden. Der Grund dafür ist, dass es einen unterschiedlich großen Aufwand und teilweise spezialisierte Handwerker:innen benötigt, um ein denkmalgeschütztes oder nicht denkmalgeschütztes Flurstück zu sanieren. Außerdem sind die Komplexität bzw. der Aufwand und die erreichbare Bedarfsreduktion durch die Flurstücksanierung abhängig vom Nutzungstyp (Ein- und Zweifamilienhaus im Vergleich zu Betriebsgebäude / Fabrik). Der gleiche Umstand begründet, dass bei der Verteilung der Heizsystemwechselraten darauf geachtet wird, dass zwischen einem Anschluss an ein Wärmenetz und ein dezentrales Versorgungssystem unterschieden wird.

Zusammenfassend wird er Input einer starken Aufgliederung unterzogen. Hier wird versucht, die zur Verfügung stehenden Randbedingungen in Form der

Cluster und Zeitabschnitte sinnvoll mit den unterschiedlichen Fertigstellungsjahren der Wärmenetze und Zielanschlussquoten der Quartiere zu verschneiden. Details der im Projekt verwendeten Logik für die Vorgabe der Sanierungs- und Heizsystemwechselrate werden in den Kapiteln 3.1.2 bis 3.1.5 erläutert.

3.1.2 Statische Szenarioparameter

Hier werden die gesamtstädtisch festgelegten Umsetzungsparameter dargestellt und in den Kontext zur Umsetzung eingebettet.

Heizsystemwechselrate

Für das Trendszenario wurde eine Heizsystemwechselrate von 5 % über den gesamten Zeitraum vom Ist-Zustand bis zum Jahr 2035 angenommen. Dies entspricht der natürlichen Heizsystemwechselrate, wenn konventionelle Heizsysteme wie Heizöl- und Erdgaskessel eine mittlere Lebensdauer von 20 Jahren besitzen. Diese rechnerische Lebensdauer für Erdgas- und Heizölkessel gilt als typisch nach /V2B-01 12P/. Aktuell liegt deren Lebensdauer im Durchschnitt zwar darüber (aus Gesprächen mit Handwerksbetrieben ist ein Erfahrungswert von 25 - 30 Jahren der FfE bekannt), praktische Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Lebensdauer neu eingebauter Heizöl- und Erdgaskessel nur noch 20 Jahre oder weniger beträgt.

Im Zielszenario wurde hingegen eine Heizsystemwechselrate von 8,33 % angesetzt. Diese ist nötig, um bis zum Jahr 2035 eine klimaneutrale Wärmeversorgung zu erreichen, sodass alle fossil befeuerten Heizsysteme bis 2035 ersetzt würden.

Für die Umsetzung einer Heizsystemwechselrate von 8,33 % bedeutet dies, dass fossile Heizsysteme im Durchschnitt 12 Jahre nach ihrem Einbau wieder ausgetauscht werden müssen, obwohl sie das Ende der Lebensdauer noch nicht erreicht haben. Somit sind die ursprünglichen Investitionen noch nicht abgeschlossen und es entstehen vorgezogene Investitionen. Weiterhin wird die angenommene Heizsystemwechselrate von der Verfügbarkeit der Heizsysteme, wie zum Beispiel von Wärmepumpen, und der Handwerker:innen maßgeblich beeinflusst. In Anbetracht des aktuell vorherrschenden Mangels an Handwerker:innen, braucht es somit zusätzliche Kapazitäten, um die angestrebten Heizsystemwechselraten zu erreichen.

Sanierungsrate und -tiefe

Bei der Spezifizierung der Sanierungsraten wurden die einzelnen Cluster gemäß ihres Sanierungsbedarfs vorab in die Kategorien hoch, mittel und niedrig eingeteilt. Je nach Kategorisierung und Szenario wurden somit unterschiedliche Sanierungsraten und -tiefen angesetzt. Die als sehr ambitioniert einzuordnenden

Sanierungsraten sind in der Tabelle im Anhang A 1 dargestellt. Es ist zu unterstreichen, dass zur Einhaltung dieser Annahmen umfassende politische Maßnahmen inklusive der Sicherung entsprechender Kapazitäten der Handwerker:innen sowie der Sicherstellung der Verfügbarkeit der Materialien umgesetzt werden müssen.

Für Flurstücke mit denkmalgeschützten Gebäuden gelten die Annahmen zur Sanierungstiefe aus der Tabelle im Anhang A 1 nicht. Diese Flurstücke werden auf den Standard KfW Denkmal saniert, was in etwa KfW 140 entspricht. Die angenommenen Sanierungsraten gelten hingegen auch für Flurstücke mit Denkmalschutz-Status.

3.1.3 Dynamische Heizsystemwechselrate

Entlang der Simulationen hat sich gezeigt, dass die Verwendung der zuvor beschriebenen statischen Heizsystemwechselraten nicht ausreicht. Hier wird zunächst der Hintergrund hierfür beschrieben und dann, wie diese konkret umgesetzt werden.

Hintergrund für dynamische Wechselraten

Im Zielszenario sollen im Jahr 2035 relevante Anteile des Wärmebedarfs der Stadt Stuttgart aus FW- und NW-Netzen gedeckt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, sind in Stuttgart 38 neue Nahwärmenetze geplant. Dabei ist die Fertigstellung der ersten Netze für das Jahr 2025 geplant. Die letzten Netze sollen im Jahr 2031 fertig gestellt werden. Zudem wird die Versorgungskapazität der Netze zwischen Netzbau und Zieljahr sukzessive erhöht, sodass mit der Zeit immer mehr Flurstücke an die Wärmenetze angeschlossen werden können. Aus diesem Grund ist eine statische Heizsystemwechselrate von 8,33 % jährlich für Quartiere mit einem geplanten Wärmenetz nicht zielführend. Eine statische Rate hätte zur Folge, dass zahlreiche Flurstücke bereits vor einem verfügbaren Wärmenetzanschluss und bevor das System dessen Lebensende erreicht hat ihr Heizsystem wechseln. Die Netzgebiete sind jedoch tendenziell dort verortet, wo geringe Potenziale für dezentrale Wärmequellen vorliegen, so dass diese recht teure Sonderlösungen nutzen müssen. Somit wäre der vorzeitige Wechsel aus ökonomischen Gründen nicht sinnvoll und würde auch nicht dem erwarteten Handeln entsprechen. Deshalb wurde in den Wärmenetzgebieten vom Vorgeben einer statischen Heizsystemwechselrate pro Cluster abgesehen und eine neue Methodik für dynamische Heizsystemwechselraten entwickelt. Diese unterscheiden sich in den einzelnen Zeitabschnitten und zwischen den Clustern und berücksichtigen den Wechsel hin zu einem neuen zentralen oder dezentralen Heizsystem.

Umsetzung der dynamischen Wechselraten

So lange in einem Cluster noch kein Wärmenetz realisiert wurde, sieht die Methodik der dynamischen Szenarioparameter eine reduzierte Heizsystemwechselrate von 3,3 % vor. Diese ist geringer als die gegenüber dem Status Quo leicht erhöhte natürliche Heizsystemwechselrate aus dem Trendszenario von 5 % und setzt damit voraus, dass defekte, fossile Heizsysteme instandgesetzt werden, solange kein Wärmenetzanschluss verfügbar ist. Dies entspricht dem angenommenen Verhalten und ist konform zur verabschiedeten Version des GEG /BMWI-01 23/ für verabschiedete Wärmenetzgebiete, wenn solch ein Vorhaben im Stadtrat verabschiedet wurde.

Wird innerhalb eines Clusters in einem Zeitabschnitt ein neues Netz erbaut, so steigt die Heizsystemwechselrate über die durchschnittlichen 8,33 %. Diese Erweiterung berücksichtigt, dass ein schneller flächendeckender Anschluss an die NW ermöglicht wird. In der Praxis liegt hier die Annahme zugrunde, dass bei einem Neubau eines Wärmenetzes potenzielle Anschlussnehmer:innen bereits vor dem Lebensende ihres Heizsystems an das Netz anschließen, um abgesichert zu sein.

Aus Sicht des Wärmenetz-Betreibers und auch aus systemischer Sicht ist es von Vorteil, direkt gesamte Straßenzüge anzuschließen, anstelle von einzelnen räumlich getrennten Flurstücken, da dies mit geringeren Kosten, personellem Aufwand und notwendigen Baustellen einhergeht. Von Verbraucherseite sehen Wärmenetzbereiter:innen aktuell eine hohe Nachfrage nach Anschlüssen, da die Gaskrise weiterhin eine Abkehr der Gebäudeeigentümer:innen vom Erdgas befeuert. Weiterhin können die Anforderungen des GEG so ggf. leichter erfüllt werden als durch den Aufbau eigener Anlagen. Damit diese beide Seiten vorteilig zueinander finden, braucht es eine geeignete Kommunikation, geeignete Geschäftsmodelle und technische Zwischenlösungen. Inwiefern hier politische und ordnungsrechtliche Anreize notwendig sind, ist im Einzelfall zu prüfen.

Die Heizsystemwechselrate wurde für jedes Wärmenetz-Cluster individuell berechnet, basierend auf der Zielanschlussquote der Quartiere. Damit wurde die von der Stadt Stuttgart durchschnittliche angestrebte Zielanschlussquote im Jahr 2035 in jedem Quartier erreicht. Diese durchschnittliche Zielanschlussquote auf Clusterebene ergibt sich aus den Zielanschlussquoten der im Cluster enthaltenen Quartiere, gewichtet mit der Anzahl an Flurstücken je Quartier.

Da es keine jahresscharfe Betrachtung gibt, sondern eine Untergliederung in Zeitabschnitte, kann es sein, dass für einen Zeitabschnitt eine erhöhte

Heizsystemwechselrate vorgegeben wird, obwohl das Wärmenetz erst am Ende des Zeitabschnittes fertig gestellt wird. In der Hauptsimulation wird die erhöhte Wechselrate auf andere Cluster verteilt, bei denen bereits Potenzial für einen Wärmenetzanschluss vorliegt (Details hierzu siehe Kapitel 3.2.4)

Ausnahmen der dynamischen Wechselraten

Ist in einem Cluster bereits ein Wärmenetz vorhanden, so wird im Zielszenario die ursprüngliche Heizsystemwechselrate von 8,33 % angesetzt.

Das Cluster 7 umfasst lediglich Neubauten, deren Transformationspfad durch die SWS berechnet wurde. Aus diesem Grund sind sie nicht Teil des hier simulierten Transformationspfades. Beim Cluster 10 handelt es sich um bestehende NW-Netze, deren Transformation in der Simulation nicht betrachtet wurden. Aus diesem Grund ist die Heizsystemwechselrate für dieses Cluster gleich null, auch wenn die Sanierung in diesem Cluster mit berechnet wurde. Bei den Clustern 11, 12 und 13 handelt es sich um vollständig dezentral versorgte Cluster, hier wurde konstant die Heizsystemwechselrate von 8,33 %/Jahr angenommen.

3.1.4 Aufteilung der Sanierungsraten auf Flurstückebene

Bei jedem der acht Nutzungstypen kann es sich zusätzlich um ein denkmalgeschütztes oder nicht denkmalgeschütztes Flurstück handeln. Hier wird davon ausgegangen, dass bei keinen Flurstücken mit Denkmalschutz-Status ein höherer Energiestandard als KfW Denkmal erreicht werden kann.

Für die Festlegung der jährlich sanierten Flurstücke wurde zunächst bestimmt, wie viele Flurstücke je Typ pro Cluster existieren. Dabei wurde zusätzlich unterschieden, ob es sich um denkmalgeschützte oder nicht denkmalgeschützte Flurstücke handelt. Die Sanierungsraten werden nach Anteil eines Typs an allen Flurstücken gewichtet auf die Nutzungstypen verteilt. Das Ergebnis ist eine Tabelle, die angibt, wie viele Flurstücke nach Typ, Denkmalschutz-Status und angestrebter Wärmeversorgungsart (zentral oder dezentral) jährlich pro Cluster und Zeitabschnitt saniert werden dürfen. Diese Tabelle wurde an das FfE Wärmetransformationstool als Eingabewert übergeben.

3.1.5 Rundungslogik der Szenarioparameter

Notwendigkeit der Rundung

Bevor die Szenarioparameter in die Hauptsimulation übergeben werden können müssen sie nachbearbeitet

werden. Dies bedeutet, dass diese auf ganzzahlige Werte bzw. Flurstücke gerundet werden müssen. Dieser Schritt wird vom FfE-Wärmetransformationstool in einem einmaligen Initialisierungsschritt ausgeführt (siehe hierzu Abbildung 3-2). Dabei korrigiert das Tool nicht plausible Eingangswerte. So werden z. B. Sanierungsraten, welche die Sanierung eines Bruchteils eines Flurstücks zur Folge hätten, durch das Tool angepasst. Die Rundungslogiken für Sanierung und Heizsystemwechsel unterscheiden sich und sind im Folgenden beschrieben.

Rundung der Sanierungsraten

Für die Rundungslogik der Sanierung gilt, dass zunächst pro Zeitabschnitt die berechneten Anzahlen sanierter Flurstücke pro Nutzungstyp und Denkmalschutz-Status nach dem Komma abgeschnitten werden. Damit erhält man ganzzahlige Werte. Die abgeschnittenen Nachkommastellen werden anschließend aufsummiert und auf einen ganzzahligen Wert gerundet. Dieser Wert wird dann gewichtet nach der Flurstückanzahl auf alle Cluster verteilt je Nutzungstyp und Denkmalschutz-Status.

Rundung der Heizsystemwechselraten

Auch bei den Eingabewerten für die Heizsystemwechsel ergibt sich die Herausforderung, dass es sich nicht um ganzzahlige Werte handelt. Die Rundungslogik ist allerdings bei den Heizsystemwechseln einfacher, da hier nur darauf geachtet werden muss, dass keine Heizsystemwechsel von der FW und NW zu dezentralen Technologien verschoben werden. Für die Rundungslogik der Heizsystemwechsel gilt, dass zunächst pro Zeitabschnitt die berechneten Anzahlen je Wechsel hin zu einer dezentralen bzw. zentralen Lösung nach dem Komma abgeschnitten werden. Damit erhält man ganzzahlige Werte. Die abgeschnittenen Nachkommastellen werden anschließend aufsummiert und auf einen ganzzahligen Wert gerundet. Dieser Wert wird dann, gewichtet nach der Flurstückanzahl aller Cluster je Wechsel hin zu einer dezentralen bzw. zentralen Lösung Priorisierung von dezentralen Technologien, verteilt.

Wenn mehrere Potenziale ausreichend vorhanden sind, ist eine Priorisierung der möglichen erneuerbaren Wärmeerzeuger untereinander notwendig. Diese wird der Hauptsimulation ebenfalls als Input vorgegeben. Damit kann im Tool festgelegt werden, welches der Heizsysteme tatsächlich eingebaut werden soll. Da nicht alle Flurstücke in Stuttgart ausreichende Potenziale für individuelle Wärmepumpen besitzen und auch nicht sichergestellt werden kann, dass jedes dieser Flurstücke an ein Wärmenetz angeschlossen werden kann, wurde die Heizsystemkategorie *Sonderlösungen* eingeführt.

Die verwendete Reihenfolge orientiert sich an den abgeschätzten CO₂-Verminderungskosten der Heizsysteme und lautet: WP ES, WP FK, WP LW, PVT und Sonderlösung. Damit wird die Sonderlösung nur verwendet, wenn kein anderes Potenzial zum gegebenen Zeitpunkt ausreicht. Die Möglichkeiten zur technischen Umsetzung dieser Systeme (z. B. bezogen auf Systemtemperaturen) wurden dabei nicht mit betrachtet.

3.2 Logik der Hauptsimulation im FfE-Wärmetransformationstool

Mit den zuvor beschriebenen Inputdatensätzen und nach der Initialisierung der Modellparameter wird in die Hauptsimulation übergegangen. In dieser wird versucht, die Vorgaben durch die Szenarioparameter möglichst auszureizen. Dabei wird über eine mehrstufige Selektion pro Jahr und pro Flurstück ermittelt, welches Flurstück saniert wird oder sein Heizsystem wechselt. Wie dieser Entscheidungsprozess abläuft wird nachfolgend und mit der Visualisierung in Abbildung 3-2 beschrieben. Die jährliche ablaufende Hauptsimulation ist in drei Abschnitte untergliedert: Berücksichtigung eines Klimafaktors, Sanierungen und Heizsystemwechsel. Nachdem die übergeordnete Logik beschrieben wurde (Kapitel 3.2.1), werden diese drei Schritte nacheinander in den weiteren Kapiteln 3.2.2 - 3.2.4 erklärt. Über mehrstufige Selektionen werden die entsprechenden Flurstücke ermittelt. Diese Auswahlprozesse werden in den nachfolgenden Abschnitten ebenfalls näher beschrieben.

3.2.1 Ablauf der Hauptsimulation

Das Programm durchläuft verschiedene Filter bzw. Auswahlen und gewichtet die Flurstücke, um letztlich diejenigen zu bestimmen, die mit den vorgegebenen Randbedingungen als erste saniert werden und/oder ihr Heizsystem wechseln würden.

Für Heizsystemwechsel und Sanierungen werden vor allem Flurstücke mit fossilen Heizsystemen (Heizöl-, Erdgas- und Kohlekessel) ausgewählt, um sie durch einen Anschluss an ein Wärmenetz oder eine erneuerbare Eigenversorgung klimaneutral zu gestalten.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, werden in der Simulation bei jeder Auswahl die zur Verfügung stehenden Untergliederungen je Zeitabschnitt, je Cluster, je Nutzungstyp, je Denkmalschutz-Status und angestrebte Versorgungsart (dezentrale Eigenversorgung oder Wärmenetz) angewendet.



Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Logik der Hauptsimulation des FfE-Wärmetransformationstools mit Einbezug des Input und Output. Für die Simulation der Stadt Stuttgart wird mit Flurstücken statt mit Gebäuden gerechnet. Die Logik ist hiervon nicht betroffen.

3.2.2 Berücksichtigung eines Klimafaktors

Zu Beginn jedes Durchlaufes wird der Klimafaktor berücksichtigt, welcher die jährliche Abnahme des Wärmebedarfes aufgrund steigender Außentemperaturen abbildet. Der Klimafaktor von 0,22 %/Jahr entstammt einer Metaanalyse, erarbeitet durch die Stadtwerke München /SWM-04 20/, basierend auf verschiedenen Quellen /HAUSL-01 18/, /OLON-01 16/, /EPL-01 17/, /ALUF-01 09/, /PIK-01 11/, /KOLB-02 17/. Während der Raumwärmebedarf in den Szenarien hierdurch jährlich reduziert wird, bleibt der Trinkwarmwasserbedarf hingegen konstant. Dieser Faktor wird auf alle Flurstücke der Stadt Stuttgart angewendet.

3.2.3 Sanierungen

Die Sanierung ist ein zentraler Bestandteil der Simulation und deren Anwendung geschieht in den zwei Schritten Sanierung ohne Heizsystemwechsel und Sanierung mit Heizsystemwechsel (siehe Abbildung 3-2). Der zweite Schritt wird wiederum für beide möglichen Kategorien Eigenversorgung (dezentral) und FW/NW (zentral) angewendet. Hier wird zuerst das übergeordnete Vorgehen bei ausgewählten Flurstücken beschrieben und dann auf die zwei Schritte der Auswahl eingegangen. Wie bereits in Abschnitt 3.1 erläutert, wurden die Inputdaten heruntergebrochen, so dass eine Unterscheidung zwischen dezentral und zentral möglich ist.

Übergeordnetes Vorgehen

Im FfE-Wärmetransformationstool werden derzeit ausschließlich Vollsanierungen betrachtet. Jede Anwendung einer Sanierung findet auf die gleiche Weise statt, indem der spezifische Raumwärmebedarf reduziert wird. Je Zeitabschnitt ist eine vorgegebene Sanierungstiefe definiert (Tabelle A 1), deren spezifische Kennwerte wiederum vom jeweiligem Nutzungstyp abhängig ist. Außerdem wird der spezifische Trinkwarmwasserbedarf gesenkt (siehe Tabelle A 4). Letzterer ist durch ein effizienteres Zirkulationssystem, besser gedämmte Leitungen, höhere Temperaturen in den Wänden sowie effizientere Technik (Trinkwarmwasserspeicher/ Frischwasserstation) aufgrund der Sanierungsmaßnahmen begründet. Der in der Simulation verwendete Wert der Effizienzsteigerung um 15 % basiert auf Ergebnissen von Simulationsmodellen für Trinkwarmwassersysteme in Gebäuden /BMVI-02 05/.

Logischerweise wird bei einer Sanierung neben den spezifischen Bedarfen auch der absolute Wärmebedarf aktualisiert. Weiterhin wird das Sanierungsalter auf Null gesetzt und das Flurstück fällt, bis zum Überschreiten des Mindestalters für eine Sanierung, nicht mehr in eine Auswahl für Sanierungen.

Sanierung ohne Heizsystemwechsel

In diesem Schritt wird ein gewisser Anteil der zur Verfügung stehenden Sanierungen für reine Sanierungen ohne gleichzeitigen Heizsystemwechsel reserviert. Dieser Anteil wird über die Modellparameter aus Tabelle A 4 vorgegeben.

Für die Sanierung ohne Heizsystemwechsel werden nur Flurstücke selektiert, wenn die Anwendung der Sanierung zu einer Mindesteinsparung im Wärmebedarf führt und ein Mindestalter der letzten Sanierung erreicht ist. Bei beiden Werten handelt es sich um einstellbare Modellparameter (siehe Tabelle A 4). Über diese Selektion der möglichen Flurstücke hinaus muss weiter gefiltert werden, welche Flurstücke priorisiert zu sanieren sind.

Die Gewichtung funktioniert so, dass Flurstücke mit einem höheren spezifischen Raumwärmebedarf eine höhere Gewichtung erhalten und so prioritär für eine Sanierung ausgewählt werden. Für diese Verteilungsfunktion wird die *pandas sample* Funktion von *Python* verwendet. Über eine weitere Spezifizierung der *sample* Funktion bleibt die Zufallsziehung gleich und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird gesichert. Generell ist es möglich, auch nach anderen Kriterien zu filtern wie zum Beispiel:

- spezifischem Wärmebedarf,
- absolutem Wärmebedarf,
- Baualter des Wärmeerzeugers,
- Sanierungsalter oder
- zufällig.

Sanierung auf vorgegebene Sanierungstiefe mit Eigenversorgung

Im zweiten Schritt werden die nach Abzug der Sanierung ohne Heizsystemwechsel verbleibenden Sanierungen auf die restlichen Flurstücke angewendet. Wobei die in diesem Schritt sanierten Flurstücke auch das Heizsystem wechseln sollen. Für Flurstücke, die eigenversorgt bleiben, erfolgt die oben beschriebene Selektion nach Mindestalter und Mindesteinsparung zur Auswahl der Flurstücke. Diese werden nach spezifischem Raumwärmebedarf gewichtet, saniert und dann das Heizsystem gewechselt.

Bei einer Einzelversorgung ist ein Heizsystemwechsel stets möglich, da jedes Flurstück mindestens für die Sonderlösung geeignet ist. Wenn ein Flurstück saniert wird, das eine Hybridlösung als Heizsystem hat, wird der fossile Anteil (Erdgaskessel) abgetrennt.

Sanierung auf vorgegebene Sanierungstiefe mit netzbasierter Versorgung

Die Herausforderung bei einem Anschluss an die FW bzw. NW liegt darin, dass die Information, ob ein Netz bereits zur Verfügung steht, relevant ist. So sollten priorisiert die Flurstücke saniert und wechseln, die dann auch direkt an das Netz angeschlossen werden können.

Es wurde in Kapitel 2 beschrieben, dass jedes Flurstück eine eindeutige Zuordnung zu einem FW- oder NW-Netz hat. Damit besteht allerdings noch keine Zuordnung eines energetischen Potenzials der Wärmebereitstellung für individuelle Flurstücke. Dieses Potenzial unterscheidet sich nach Wärmenetz und Jahr. Aufgrund dieser Unterschiede und der verschiedenen Startjahre der Netze, wird bei jedem Anschluss eines Flurstücks an ein Wärmenetz erneut geprüft, ob die Kapazität des Netzes ausreicht. Weiterhin werden durch Sanierungen im Bestand Kapazitäten wieder frei, so dass weitere Flurstücke an das Netz angeschlossen werden können.

Daher wurde in der Auswahl der Sanierungen für Flurstücke, die an ein Wärmenetz angeschlossen werden, eine zusätzliche Selektion implementiert. Es werden nur Flurstücke ausgewählt, bei denen geprüft wurde, dass ihr Wärmebedarf auch vom jeweiligen Netz gedeckt werden kann. Dies sorgt dafür, dass möglichst nur Flurstücke saniert werden, die dann gleichzeitig auch ihr Heizsystem wechseln. Erst nach dieser Vorselektion werden die möglichen Flurstücke nach dem höchsten spezifischen Raumwärmebedarf gewichtet.

Umgang mit nicht ausgereizten Raten (Vorgaben)

In der Hauptsimulation werden diese Inputs vom Tool so gut es geht auf die Flurstücke angewendet. Wenn die vorgegebenen Anzahlen in spezifischen Fällen nicht ausgeschöpft werden, findet eine sogenannte *Verteilung der Anzahlen* statt. Dies kann den Grund haben, dass beispielsweise die gesamten Flurstücke einer Kategorie bereits einen so guten Energiestandard haben, dass diese nicht mehr in die Auswahl für Sanierungen reinkommen.

Falls nach Abfolge der Schritte noch Anzahlen für Sanierungen übrigbleiben, werden diese weiter verteilt. Diese Verteilungslogik sieht für Sanierungen vier Ebenen vor. Bei jeder Ebene wird darauf geachtet, dass keine Kapazitäten zwischen verschiedenen Nutzungstypen und Denkmalschutz-Status verteilt werden.

Zunächst wird im Bestand des gleichen Clusters saniert. Wenn danach weiterhin Anzahlen übrigbleiben, wird auf andere Cluster verteilt. In der nächsten Ebene werden die Anzahlen an den Bestand im Gesamtgebiet

übergeben. Zuletzt verfallen noch die übrigen Anzahlen.

3.2.4 Heizsystemwechsel

Die Heizsystemwechsellogik ist gemäß Abbildung 3-2 in zwei nacheinander aufbauende Schritten gegliedert: *Ausfall von Heizsystemen* und *Freiwillige Tausche der Heizsysteme*. Nachdem bereits Heizsystemwechsel in Verbindung mit Sanierungen getätigt wurden, muss die restliche verfügbare Anzahl an Heizsystemwechseln damit verrechnet werden.

Nach einem Wechsel/Erneuerung des Heizsystems wird der Heizsystemtyp aktualisiert und das Baujahr des Wärmeerzeugers auf Null gesetzt.

Ausfall von Heizsystemen

In einer initialen Selektion wird pro Jahr ermittelt, welche Flurstücke ihr Heizsystem aufgrund eines wahrscheinlichen Ausfalls wechseln müssen. Wenn dies ein fossiles Heizsystem betrifft, wird dieses bei einem Heizsystemwechsel ersetzt (z. B. Erdgaskessel wird getauscht zu WP ES). Wenn in einem netzbasiert versorgten Flurstück oder mit dezentralen erneuerbaren Wärmequellen ein neues Heizsystem erforderlich ist, wird dieses erneuert (z. B. WP LW wird getauscht zu WP LW bzw. NW 28 wird getauscht zu NW 28).

Für diesen Zweck wird eine pro Heizsystem parametrisierte Ausfallwahrscheinlichkeitsfunktion (basierend auf einer Gamma-Verteilung) verwendet. Sie berücksichtigt die durchschnittliche Lebensdauer pro Heizsystem. Im Anhang sind zwei exemplarische Graphen gegeben (siehe Abbildungen A 5 und A 6), die das Konzept der Ausfallwahrscheinlichkeit im FfE-Wärmetransformationstool verdeutlichen. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten werden als Gewichtung auf das Alter und die Art des individuellen Heizsystems aller Flurstücke angewendet. Unabhängig davon kommen alle Heizsysteme in die Auswahl, die älter als ein maximal festgelegtes Heizsystemalter sind (Modellparameter, siehe Tabelle A 4). Dieses Alter ist unabhängig von der Art des Heizsystems und beträgt 45 Jahre.

Wie aus Abbildung A 5 ersichtlich, gibt es drei typische Phasen für den Verlauf einer Technologie bezogen auf ihre Ausfallwahrscheinlichkeit. Solch ein Kurvenverlauf wird auch als *Badewannenkurve* bezeichnet. Direkt nach der Installation kann es zu frühen Ausfällen in der ersten Phase kommen. Diese werden in der Simulation nicht abgebildet. Die zweite Phase ist durch eine konstante Ausfallrate. Typischerweise ist hier die Ausfallwahrscheinlichkeit sehr gering und das Heizsystem fällt in seltenen Fällen aus. Die dritte Phase ist für die Simulation am relevantesten. Die Ausfallrate steigt zunächst exponentiell an, ihre Steigung nimmt dann jedoch

wieder ab, bis eine Ausfallrate von nahezu 100 % erreicht wird. Durch Ausreißer und gute Wartung ist es möglich, dass Heizsysteme das durchschnittliche Lebensende um einige Jahre übertreffen. In Abbildung A 6 ist dies für den Erdgaskessel exemplarisch visualisiert. Bei Hybridsystemen wird das klimaneutrale Heizsystem als Referenz verwendet.

Mit Hilfe der Gewichtung werden 80 % der wahrscheinlichsten Ausfälle als Auswahl ermittelt. Anschließend wird diese Anzahl mit der Gesamtanzahl der verfügbaren Heizsystemwechsel abzüglich des Anteils der kombinierten Heizsystemwechsel mit den Sanierungen verschnitten. Falls die Auswahl größer sein sollte (dies kann in den ersten Jahren der Simulation passieren), können nur so viele Heizsysteme ersetzt werden, wie es noch Kapazität gibt. Falls nach diesem Schritt noch Anzahlen zur Verfügung stehen, wird zu den freiwilligen Tauschen übergegangen.

Fehlinvestitionen

In der Simulation ist ein Anteil an Fehlinvestitionen berücksichtigt worden. Dies wird von folgenden drei Modellparametern bestimmt: Jahr des Inkrafttretens des GEG und Anteil an Fehlinvestitionen vor bzw. nach GEG. Dabei werden nur Flurstücke ausgewählt, die einen Erdgas- oder Heizölkessel haben und ein definiertes Mindestalter und einen spezifischen Wärmebedarf überschreiten (Modellparameter Schwellwert für Fehlinvestitionen und Mindestalter für eine Fehlinvestition, siehe Tabelle A 4 im Anhang).

Freiwillige Tausche der Heizsysteme

Pro Cluster, pro Denkmalschutz-Status, pro Nutzungstyp und pro Unterscheidung von Heizsystemwechseln hin zu einer erneuerbaren Eigenversorgung oder FW/NW-Anschluss wird nun die verbleibende Heizsystemwechselrate ausgeschöpft. Die Heizsysteme kommen in die Auswahl, wenn sie derzeit mit fossilen Brennstoffen beheizt werden und das Mindestalter für einen Heizungswechsel überschritten haben. Das Gewichtungskriterium ist das Alter des Heizsystems, so dass eher die ältesten Heizsysteme getauscht werden.

Die Umstellung auf ein dezentrales System erfolgt in der Weise, dass die Potenziale in der Reihenfolge der Priorisierung der Heizsysteme (WP ES, WP FK, WP LW, PVT oder Sonderlösung) abgearbeitet werden. Das in der Reihenfolge erste ausreichend verfügbare Heizsystem wird eingesetzt. Somit ist die Umsetzung eines dezentralen Wechsels immer möglich. Bei einem Wechsel hin zu einem Wärmenetz werden nur die Flurstücke ausgewählt, die sich aufgrund der zur Verfügung gestellten Netzkapazität anschließen können. Dies wird individuell für alle 53 Wärmenetze für jedes Flurstück und Jahr geprüft.

Berücksichtigung von Hybridlösungen

Als Hybridlösungen sind nur Kombinationen aus einem erneuerbaren Heizsystem (WP ES, WP FK, WP LW, PVT oder Sonderlösung) mit einem Erdgaskessel möglich. Bei der Auswahl der Hybridsysteme wird ein vorgegebener Anteil pro Wechsel berücksichtigt bzw. untersucht. Dieser Anteil wird durch einen Modellparameter berücksichtigt (Tabelle A 4). Er legt den Anteil der Flurstücke fest, die tatsächlich eine hybride Lösung erhalten, wenn die Möglichkeit dazu besteht. Hierbei wird auch ein Schwellwert für den spezifischen Wärmebedarf berücksichtigt. Somit werden vornehmlich Flurstücke mit einem hohen spezifischen Wärmebedarf priorisiert. Ein Hybridsystem wird nur installiert, wenn keines der Wärmepumpen-Systeme direkt möglich ist ohne eine spätere Sanierung umzusetzen. Die stattgefundenen Tauschvorgänge von Hybridsystemen werden von der Gesamtzahl der Tauschvorgänge abgezogen.

Umgang mit nicht ausgereizten Raten (Vorgaben)

Falls nach Abfolge der zwei Schritte noch Anzahlen übrigbleiben, werden diese weiter verteilt. Diese Verteilungslogik sieht für Heizsystemwechsel vier Ebenen vor. Bei allen Ebenen werden die Anzahlen nicht zwischen dezentralem und zentralem Wechsel verteilt. Zunächst werden die Raten an das in der Simulation nachfolgende Cluster des gleichen Nutzungstyps übergeben. Die Simulation erfolgt hierbei chronologisch nach numerischer Benennung des Clusters. Wenn danach Anzahlen übrigbleiben, wird gleichzeitig auf andere Cluster sowie andere Nutzungstypen verteilt. In der nächsten Ebene werden die Anzahlen unabhängig vom Denkmalschutz-Status übergeben. Zuletzt verfallen die Anzahlen, falls noch welche übrig sind.

3.3 Ergebnisse aus dem FfE-Wärmetransformationstools

Zu den wichtigsten energetischen Simulationsergebnissen der vorangegangenen Schritte gehören der jährliche Wärmebedarf, die maximale Heizlast und der Heizsystemtyp. Auf Grundlage dieser energetischen Ergebnisse werden die gekoppelten Endenergiebedarfe (siehe Kapitel 3.3.1) und daraus die CO₂-Emissionen (siehe Kapitel 3.3.2) berechnet. Die Kostenfunktionen zur Bestimmung der anfallenden Kosten und Förderungen werden in Kapitel 4 dargestellt.

3.3.1 Berechnung der Endenergiebedarfe

Zur Berechnung der Endenergiebedarfe wurden die jährlichen Wärmebedarfe des jeweiligen Flurstücks durch den Nutzungsgrad bzw. die Jahresarbeitszahl (JAZ) des jeweiligen Heizsystems geteilt. Eine Übersicht der Faktoren ist in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Überblick zu technologiespezifischen Nutzungsgraden und Jahresarbeitszahlen

Heizsystem	Nutzungsgrad / JAZ
WP LW	3,5
WP FK	4
WP ES	4
WP PVT	4
Sonderlösung	4
Elektrischer Heizstab	1
Erdgaskessel	0,9
Ölkessel	0,87
Kohlekessel	0,5
Biomasse	0,8
Klärgas	0,86
Bestandswärmepumpe	3
NW	0,85
FW	0,85

Die JAZ der neu verbauten Wärmepumpen wurden dabei so gewählt, dass sie den Mindestanforderungen des städtischen Förderprogramms entsprechen. Zusätzlich wurde gemäß des Technikkatalogs der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA) die Annahme getroffen, dass sich die JAZ mit jedem Installationsjahr um 1 % steigert /KEA-01 23/. Alle weiteren Nutzungsgrade und JAZ entsprechen den Annahmen von LHS und SWS. Für Wärmepumpen wurde neben dem Strom auch die Umweltwärme als Endenergieträger ausgewiesen. Für Flurstücke, die durch ein Wärmenetz versorgt werden, wurde gemäß Abstimmung mit LHS und SWS diese leitungsgebundene Wärme als Endenergiebedarf ausgewiesen.

Bei den Wärmenetzen wurde zwischen der NW, den Bestandsnetzen und der FW unterschieden. Für die FW und die Bestandsnetze wurden keine Endenergiebedarfe bestimmt, da hier der angestrebte Anlagenpark noch nicht bekannt ist. Für NW hingegen wurden im Projektkreis typische Verluste für die NW festgelegt sowie die jeweils angestrebten Zusammensetzungen der einzelnen Erzeugerparks. Mit den für die hier enthaltenen Anlagen wurden ebenfalls Nutzungsgrade festgelegt.

Der jährliche Wärmebedarf aller an das jeweilige Wärmenetz angeschlossenen Flurstücke zuzüglich der angenommenen Verluste der Wärmenetze wurde dann gemäß der je Erzeuger prognostizierten Wärmeerzeugung aufgeteilt. Durch Verschnitte mit den Nutzungsgraden konnte somit auch für die netzbasierte Versorgung ein Endenergiebedarf ermittelt werden. Da die Versorgungskonzepte noch detaillierter ausgegeben werden müssen, wurden diese nicht explizit ausgewiesen, jedoch in Emissionen und Kosten umgerechnet.

3.3.2 Berechnung der CO₂-Emissionen

Mit Hilfe der Endenergiebedarfe konnten die dadurch bedingten Treibhausgasemissionen berechnet werden. Dazu wurden die Endenergiebedarfe mit den im KEA-Technikkatalog vorgegebenen Emissionsfaktoren multipliziert /KEA-01 23/.

Bei den Emissionsfaktoren für den Strom wurde dabei zwischen dem Trend- und Zielszenario unterschieden. Während beim Trendszenario die jährliche Entwicklung des Emissionsfaktors für den Strom unverändert aus dem KEA-Technikkatalog übernommen wurde, wurde sie für das Zielszenario nach Vorgaben der LHS und SWS angepasst. Dabei wurde davon ausgegangen, dass das deutsche Stromsystem bereits im Jahr 2035 vollständig klimaneutral ist und sich die Degression des Emissionsfaktors für Strom entsprechend beschleunigt /IINAS-01 22/.

Bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen bedingt durch die netzbasierte Wärmeversorgung wurde zwischen der NW, den Bestandsnetzen und der FW unterschieden. Für die FW und die Bestandsnetze wurden die Treibhausgasemissionen auf Grundlage von den durch die LHS bereitgestellten Emissionsfaktorzeitreihen berechnet. Für die NW-Netze wurden die Treibhausgasemissionen basierend auf den jährlichen Endenergiebedarfen je Energieträger individuell berechnet.

3.3.3 Speicherung der Ergebnisse

Nach Abschluss der Berechnung der Hauptsimulation werden die Ergebnisse erfasst und in die Ergebnistabellen angehängt. Die Ergebnistabellen werden in Excel gespeichert. Abschließend werden die Simulationsergebnisse in Form von Balken- und Flächendiagrammen visualisiert und die Diagramme ebenfalls gespeichert.

4 Beschreibung der angenommenen Kostenfunktionen

Neben dem Aufzeigen möglicher Transformationspfade (Ziel- und Trendszenario) sind für die kommunale Wärmeplanung die Kosten, welche für die Transformationspfade anfallen, von Bedeutung. Um aus den Transformationspfaden Kostenabschätzungen zu generieren, kommen Kostenfunktionen zum Einsatz. Dabei handelt es sich bei den hier dargestellten Kosten um Nettokosten, sofern es nicht anders erklärt wird. Weiterhin sind hier ausschließlich Realwerte dargestellt, sodass keine Annahmen zur Inflation in der Zukunft integriert sind. Bei der Erläuterung der Kostenfunktionen und Förderungen wird unterschieden, ob diese dezentral in den Flurstücken (Kapitel 4.1) oder zentral in den Wärmenetzen (Kapitel 0) anfallen.

Zum Abschluss des Projektes waren die neuen Regelungen zur Förderung von Heizung und Sanierung noch nicht final vom Bundestag abgestimmt. Daher wurde auf dem bestehenden Förderregime aufgebaut.

4.1 Kosten der dezentralen Systeme

Die dezentralen Kosten fallen durch den Austausch von Heizsystemen und durch die Sanierung von Flurstücken an. Dies basiert dabei auf den flurstückscharfen Simulationsergebnissen des Wärmetransformationstools (Beschreibung siehe Kapitel 3), Kostenfunktionen aus dem KEA-Technikkatalog /KEA-01 23/ und eigenen Annahmen von LHS, SWS und FfE, die auf

Projekterfahrungen basieren. Der schematische Ablauf der Kostenberechnung für jedes einzelne Flurstück ist in Kapitel 4.1 dargestellt. Hier wird erst auf Sanierungskosten eingegangen (Kapitel 4.1.1), dann auf die fixen Kostenbestandteile (Kapitel 4.1.2) und abschließend auf die variablen Betriebskosten (Kapitel 4.1.3).

4.1.1 Sanierungskosten

Zur Berechnung der Sanierungskosten wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt. Der erste Ansatz gibt die Sanierungsvollkosten aus. Dies sind die insgesamt bei der Sanierung entstehenden Kosten. Der zweite Ansatz gibt nur die energiebedingten Mehrkosten der Sanierung aus. Bei diesem Ansatz werden nur die in direktem Zusammenhang mit der energetischen Sanierung entstandenen Kosten ausgegeben (z. B. Kosten für Dämmmaterial). Weitere Kosten, die auch im Falle einer turnusmäßigen Modernisierung entstehen, werden hier vernachlässigt. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass Bestandsgebäude unabhängig von ihrem energetischen Zustand zur Erhaltung der Bausubstanz und aus optischen Gründen regelmäßig modernisiert werden müssen. Die Kosten für die ohnehin notwendigen Maßnahmen der Modernisierung werden von den Sanierungsvollkosten abgezogen.

Die Sanierungsvollkosten und die energiebedingten Mehrkosten wurden auf Grundlage von spezifischen Kosten aus dem Jahr 2015 berechnet /ÖKO-01 19/.

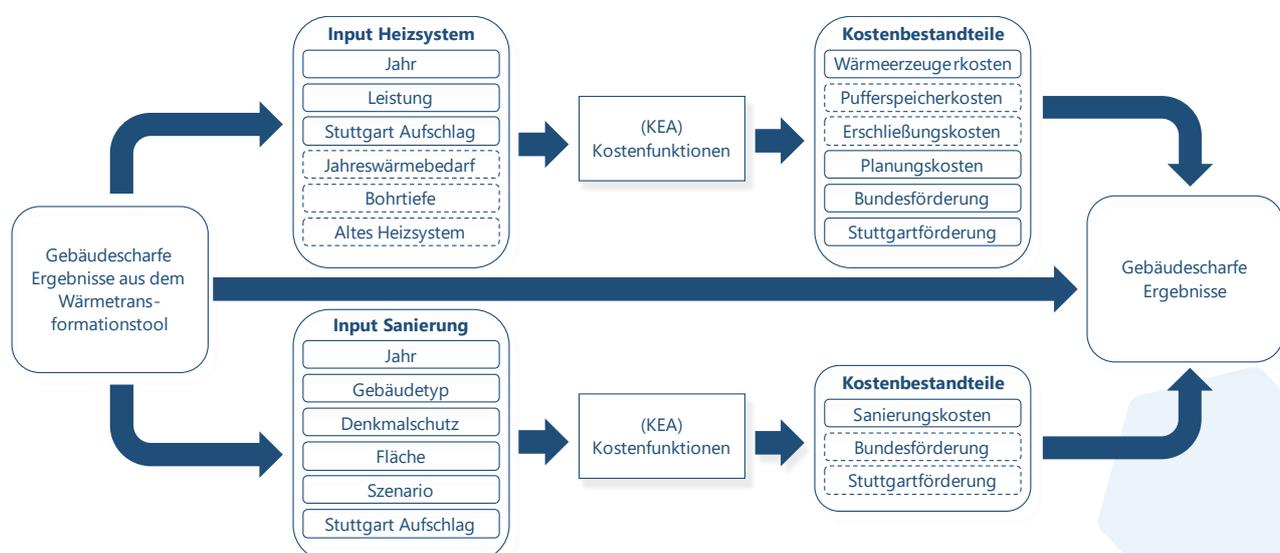


Abbildung 4-1: Schematischer Ablauf der dezentralen Kostenberechnung auf Flurstückebene

Diese spezifischen Kosten wurden auf Basis des Baupreisindex auf das Jahr 2022 hochgerechnet /BFS-01 23/. Diese Kosten wurden mit einem Faktor von 20 % beaufschlagt, was das in Stuttgart höhere Preisniveau im Vergleich zum deutschen Durchschnitt widerspiegeln soll. Verschnitten mit den Energiebezugsflächen der sanierten Flurstücke können somit die Sanierungsvollkosten und die energiebedingten Mehrkosten berechnet werden.

Zur Berechnung der annuitätischen Kosten für die Sanierung wurde eine durchschnittliche Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt. Dies entspricht dem normalen Modernisierungszyklus von Gebäuden.

Bundesförderung

Zur Berechnung der Bundesförderung für die Sanierung der Flurstücke wurden die Tilgungszuschüsse auf einen KfW-Kredit angesetzt. Für den Zeitabschnitt von 2023 bis 2030 wurde die Förderung als konstant auf dem heutigen Niveau angenommen. Da gemäß früherer Entwicklungen davon auszugehen ist, dass die Förderungen in der Zukunft reduziert werden, wurde die Förderung ab dem Jahr 2030 und für die folgenden Jahre abgeschätzt, basierend auf Annahmen in /FFE-79 21/.

Förderung der Stadt Stuttgart

Neben der Förderung zum Einbau von Wärmepumpen hat die Stadt Stuttgart auch ein Förderprogramm zur Sanierung von Gebäuden aufgelegt. Die Förderquoten wurden dabei bewusst über den gesamten Betrachtungszeitraum als konstant angenommen. Dadurch soll ermittelt werden, welche finanziellen Mittel durch die Stadt Stuttgart für die Sanierung bereitgestellt werden müssen, wenn die aktuellen Förderquoten beibehalten werden.

4.1.2 Heizsystem-Kosten

Die Kosten für das gesamte Heizsystem eines Flurstücks setzen sich in den hier beschriebenen Berechnungen aus zwei bis vier Kostenbestandteilen zusammen (Kosten für Wärmeerzeuger, Planung, Pufferspeicher und Erschließung). Die Anzahl der anfallenden Kostenbestandteile hängt von der Art des Heizsystems ab. Für die in diesem Bericht aufgezeigten Transformationspfade wurden insgesamt zehn unterschiedliche Heizsysteme betrachtet. Diese teilen sich auf in fünf erneuerbare Heizsysteme und fünf Hybrid-systeme mit einer zusätzlichen Gasheizung.

Übergeordnete Annahmen

Grundsätzlich wurden die Kostenfunktionen der Anlagen prioritär aus dem KEA-Technikkatalog /KEA-01 23/ herangezogen, wenn nicht, ist dies im Folgenden explizit erwähnt. Die Kostenfunktionen wurden zusätzlich

mit einem Faktor von 20 % beaufschlagt, was das in Stuttgart höhere Preisniveau im Vergleich zum deutschen Durchschnitt widerspiegeln soll.

Wie im KEA-Technikkatalog vorgegeben wird für alle Wärmepumpen eine Kostendegression von 1 % jährlich angesetzt.

Bei allen Wärmepumpen wurde die Annahme getroffen, dass diese nicht den gesamten Wärmebedarf der Flurstücke decken sollen. Die Wärmepumpen werden so ausgelegt, dass sie 95 % des Wärmebedarfs decken. Die restlichen 5 % des Wärmebedarfs sollen aus einer Stromdirektheizung gedeckt werden. Dadurch ist es möglich, die Wärmepumpe auf nur 60 % der Heizlast des Flurstücks auszulegen, die verbleibenden 40 % werden durch die Stromdirektheizung gedeckt. Durch die Leistungsreduktion der Wärmepumpe können relevante Investitionen eingespart werden. Der geringere Nutzungsgrad der Stromdirektheizung fällt aufgrund des geringen jährlichen Deckungsbeitrags deswegen nur wenig ins Gewicht.

Es wurde angenommen, dass ein jedes Wärmepumpensystem, zusätzlich zur Stromdirektheizung, einen Pufferspeicher besitzt. Dieser ist so ausgelegt, dass er die Leistung der Wärmepumpe für zwei Stunden puffern kann. Die Kosten für die Pufferspeicher wurden auf Grundlage einer von der Stadt Stuttgart definierten Funktion berechnet. Diese beruht auf Erfahrungswerten der LHS und SWS. Auch hier wurden die Kosten wieder mit dem Faktor 20 % beaufschlagt.

Für die fixen Betriebskosten (O&M Kosten) der Wärmepumpen wurden gemäß des KEA-Technikkatalogs angesetzt.

Wie in Abbildung 4-1 zu sehen ist, sind die Planungskosten ein weiterer Kostenbestandteil. Diese werden im KEA-Technikkatalog nicht explizit aufgeführt, sollen aber für die Kostenrechnung der kommunalen Wärmeplanung der Stadt Stuttgart berücksichtigt werden. Die Planungskosten fallen für die Kostenbestandteile Heizsystem, Pufferspeicher und Erschließung an.

Zusätzlich wurden für alle Kostenbestandteile die annuitätischen Kosten berechnet.

4.1.3 Variable Betriebskosten dezentraler Heizsysteme

Die variablen Betriebskosten für jedes Flurstück und jedes Jahr wurden auf Basis der Endenergiebedarfe bestimmt (vgl. Kapitel 3.3.1). Dazu wurden die Endenergiebedarfe mit den jeweiligen jährlichen Endenergieträgerpreisen multipliziert. Die Endenergiepreise wurden aus dem KEA-Technikkatalog

übernommen und mit der Mehrwertsteuer und weiteren Abgaben und Umlagen, falls diese im Technikcatalog noch nicht enthalten sind, beaufschlagt. So wurden die Erdgaspreise mit weiteren Abgaben und Umlagen (Vermarktung, Konzessionsabgabe, Erdgassteuer, Netzentgelte, Gasspeicherumlage, Emissionskosten BEHG) beaufschlagt. Für die Nutzungstypen EFH und MFH wurden die im KEA-Technikkatalog hinterlegten Haushaltsstrompreise verwendet. Für alle anderen Nutzungstypen wurde der Mittelwert aus Haushaltsstrompreis und GHD Strompreis verwendet.

4.2 Kosten der zentralen Systeme

Die zentralen Kosten fallen für den Bau der Leitungen und Peripherie neuer Wärmenetze sowie für die Erweiterung bestehender Netze (Kapitel 4.2.1) und den Bau zentraler Wärmeerzeuger (Kapitel 4.2.2.1) an. Weiterhin fallen auch für diese Anlagen variable Betriebskosten an (Kapitel 4.2.3). Grundlage für diese Berechnungen sind ebenfalls der KEA-Technikkatalog /KEA-01 23/ sowie eigene Annahmen aus Projekterfahrungen von LHS, SWS und FfE.

4.2.1 Kosten für die Wärmenetze

Bei der Berechnung der Kosten für Wärmenetze werden für den Bau neuer Wärmenetze und die Erweiterung bestehender Wärmenetze unterschiedliche Kostenannahmen zugrunde gelegt. Ein weiterer Bestandteil der Wärmenetzkosten sind Kosten für die Peripherie, worin u. a. Kosten für Netzpumpen, Messeinrichtungen und Steuerungselektronik enthalten sind.

4.2.2 Kosten für den zentralen Erzeugerpark

Die Kosten für den zentralen Erzeugerpark wurden für jedes Quartier bzw. NW-Netz individuell berechnet. Grundlage für die Berechnung war die Planung der Erzeugerparke der LHS bzw. SWS. Diese gibt jahresscharf die Ausbaustufen der geplanten Wärmenetze an, inklusive der zugebauten Leistung je Erzeugertechnologie. Es werden Planungskosten je Erzeugertechnologie berücksichtigt, sowie Förderungen der Stadt Stuttgart und Bundesförderungen. Neben der Heizzentrale und dem Pufferspeicher werden folgende Erzeugertechnologie erfasst:

- PVT-Anlagen
- Stromdirektheizungen
- Luft-Wasser-Wärmepumpen
- Flächenkollektor-Wärmepumpen
- Erdsonden-Wärmepumpen
- Flusswasser-Wärmepumpen
- Abwasser-Wärmepumpe

- Abwärme-Wärmepumpe
- Agrothermie-Wärmepumpe
- Hackschnitzelheizungen

4.2.3 Variable Betriebskosten zentraler Wärmeerzeuger

Bei der Berechnung der variablen Betriebskosten für zentrale Wärmeerzeuger wurde zwischen den neu angedachten Wärmenetzen, den Bestandswärmenetzen und dem FW-Netz unterschieden. Für die Bestandswärmenetze und das FW-Netz wurden keine variablen Betriebskosten berechnet, da hier die angestrebte Entwicklung des jeweiligen Erzeugerparke nicht bekannt war. Für die neu angedachten Wärmenetze wurde der berechnete Endenergiebedarf genutzt. Verschnitten mit den Energieträgerpreisen aus dem KEA-Technikkatalog konnten so die variablen Betriebskosten berechnet werden. Dabei wurden die GHD-Strompreise verwendet.

5 Simulationsergebnisse

Dieses Kapitel liefert einen Überblick über die Simulationsergebnisse der Gesamtstadt. Hierbei werden das Zielszenario, in welchem die klimaneutrale Wärmeversorgung im Jahr 2035 erreicht wird, und das Trendszenario gegenübergestellt. Eine detaillierte Diskussion und Analyse der Ergebnisse sind nicht Teil des Kurzberichts. Im Laufe des Projektes wurden die Zwischen- und Endergebnisse im Detail besprochen und weiterführende Auswertungen durchgeführt sowie übergeben.

Sämtliche in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse liegen auf Flurstückebene sowie auf Quartiers- und Clusterebene vor und sind der LHS als Graphen und Excel-Dateien übergeben worden. In den übermittelten Daten der Flurstücke ist eine eindeutige ID-Kennzeichnung vorhanden, die mit einer Geometrieangabe verknüpft ist. Somit können die Ergebnisse bei Bedarf in GIS-Anwendungen räumlich aufgelöst dargestellt werden.

In den Unterkapiteln 5.2 bis 5.6 wurden Neubauquartiere nicht berücksichtigt, da diese separat von den SWS simuliert und in die KWP eingebunden wurden.

5.1 Wärmebereitstellung

Die jeweiligen Entwicklungen der Wärmebereitstellung je Wärmeerzeuger für das Zielszenario (siehe Abbildung 5-1) und Trendszenario (siehe Abbildung 5-2) zeigen merkbare Unterschiede auf. Diese sind vor allem auf die unterschiedlichen Randbedingungen der Szenarien zurückzuführen, wie beispielsweise die Vorgabe der Heizsystemwechselrate, Sanierungsrate und Sanierungstiefe.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied in den Annahmen der Szenarien ist die Entwicklung und Einbindung von Wärmenetzen. Für das Trendszenario wurde kein weiterer Ausbau der Kapazitäten des Fernwärmenetzes und weiterer Bestandsnetze angenommen. Leichte Schwankungen im Verlauf der Wärmebereitstellung durch Wärmenetze im Trendszenario erklären sich damit, dass Flurstücke innerhalb des Fernwärmenetzes saniert werden und neue Flurstücke aufgrund freiwerdender Kapazitäten angeschlossen werden können. Des Weiteren wurden neu zu erschließende Fernwärme/Nahwärmegebiete im Trendszenario nicht weiter betrachtet.

Diese Annahmen tragen dazu bei, dass im Jahr 2035 im Zielszenario der Anteil der leitungsgebundenen

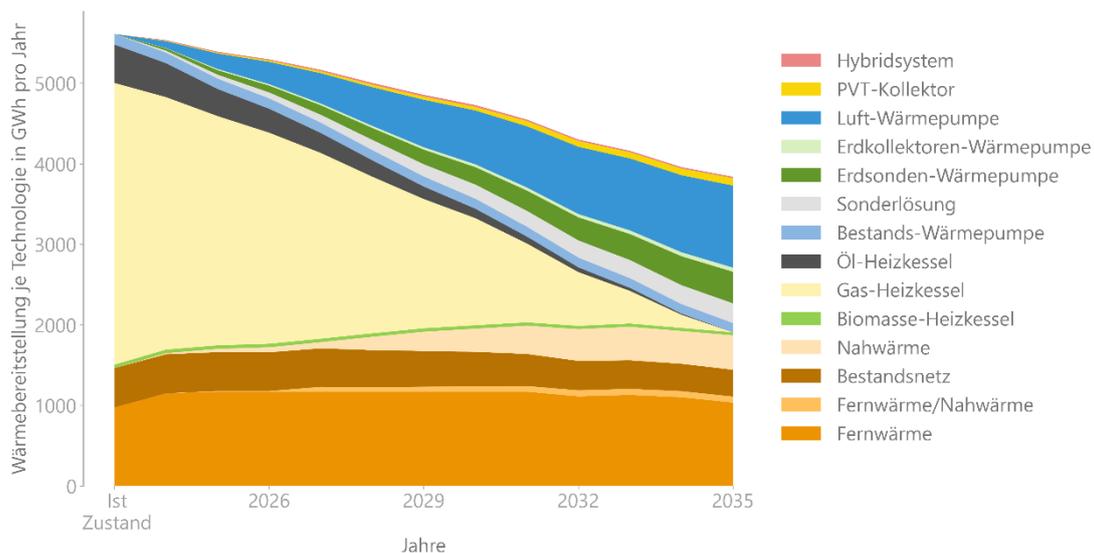


Abbildung 5-1: Entwicklung der Wärmebereitstellung je Technologie im Zielszenario vom Ist-Zustand bis zum Jahr 2035

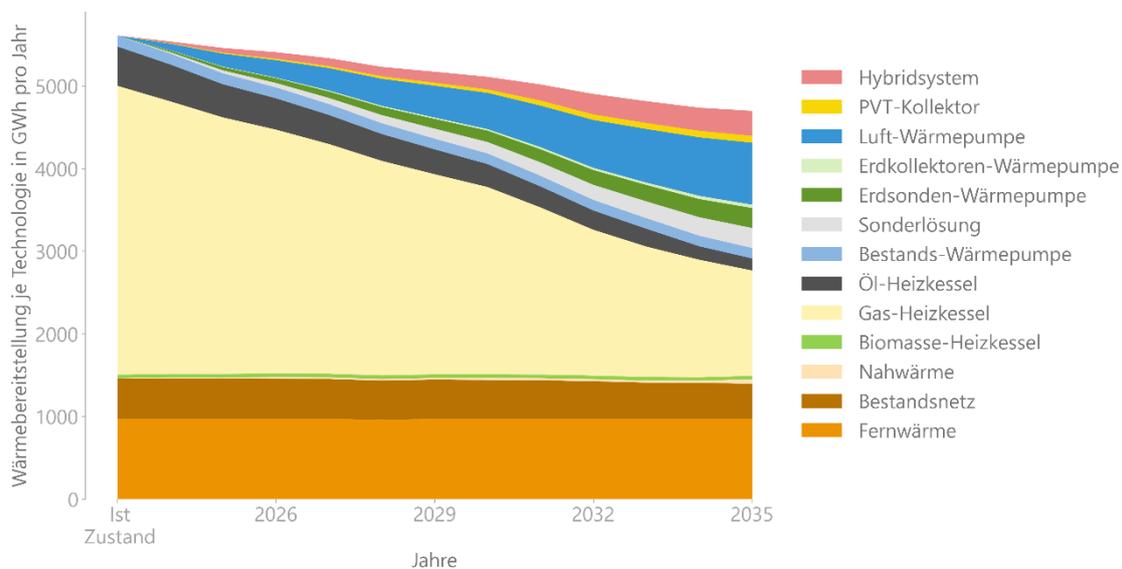


Abbildung 5-2: Entwicklung der Wärmebereitstellung je Technologie im Trendszenario vom Ist-Zustand bis zum Jahr 2035

Wärmebereitstellung an der Gesamtwärmebereitstellung signifikant höher ist als im Trendszenario.

Im Zielszenario wird der Gesamtwärmebedarf durch eine erhöhte Sanierungsrate und -tiefe um 33 % reduziert. Im Trendszenario wird eine Bedarfsreduktion von 17 % erreicht.

Neben diesen Auffälligkeiten nimmt im Zielszenario der Anteil fossiler Wärmebereitstellung schneller ab als im Trendszenario. Hauptgrund dafür ist das vorgegebene schnellere Ausbautempo der klimaneutralen Wärmeversorgung (dezentral und zentral) in Kombination mit einer parallel ablaufenden sowie effizienteren Sanierung. Dieser Effekt spiegelt sich auch in der später gezeigten Entwicklung der Treibhausgasemissionen wider (siehe Abbildung 5-7).

Auf Seiten der Einzelversorgung ist zu sehen, dass WP LW den größten Anteil einnehmen, gefolgt von WP ES und durch WP FK ergänzt.

Im fFE-Wärmetransformationstool ist es möglich, den Auswahlprozess der Sanierungen projektspezifisch einzustellen. Im Verlaufe des Projektes wurde sich dazu entschieden, bei der Auswahl der zu sanierende Flurstücke diejenigen zu priorisieren, die einen höheren spezifischen Wärmebedarf haben. Dies wurde gemacht, da angenommen wird, dass diese Flurstücke den größten Handlungsbedarf haben und so eine relevante Höhe an Energiekosten einsparen können. Folgende Alternative wurde ebenfalls untersucht: Als Auswahlkriterium wurde festgelegt, dass diejenigen Flurstücke priorisiert werden, welche einen höheren absoluten Wärmebedarf haben. Anhand des Cluster 5 wird der

Effekt sehr gut veranschaulicht und ist in Abbildung A 8 im Anhang dargestellt.

5.2 Heizsystemwechselrate und Sanierungsrate

In den Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 sind die in den Simulationen resultierenden Heizsystemwechsel- und Sanierungsraten dargestellt. Diesen Raten werden die zuvor für das Ziel- und Trendszenario festgelegten Heizsystemwechsel- und Sanierungsraten (siehe Kapitel 3) gegenübergestellt. Sie sind in der Legende mit dem Vermerk „Vorgabe“ gekennzeichnet.

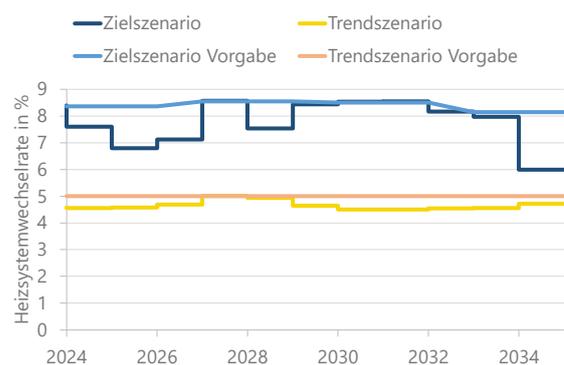


Abbildung 5-3: Auswertung der Heizsystemwechselrate pro Jahr

Abweichungen zu den vorgegebenen Raten haben verschiedene Gründe. Die Hauptursache für die nicht vollausgeschöpfte Heizsystemwechselraten im Zielszenario liegt in der Vielzahl der untersuchten Wärmenetze, den unterschiedlichen Netzausbaujahren, sowie

den geplanten Kapazitäten der Netze. Der Abfall im Zieljahr 2035 ist damit zu begründen, dass bereits die meisten fossilen Heizsysteme ausgetauscht wurden und keine weitere Ratensteigerung benötigt wird.

Für das Zielszenario ergibt sich eine durchschnittliche Heizsystemwechselrate von 7,8 % über den gesamten Zeitraum.

Heizsystemwechselrate

Zum Erreichen einer klimaneutralen Wärmeversorgung im Jahr 2035 müssen täglich die Heizsysteme von 15 Flurstücken ausgetauscht werden.

Im Gegensatz zum Zielszenario, weichen beim Trendszenario die Heizsystemwechselraten nur geringfügig von den Vorgaben ab. Dies ist damit begründet, dass stets genügend fossile Heizsysteme vorhanden sind, die die Kriterien eines Heizsystemwechsels erfüllen.

Die Sanierungsrate wird im Trendszenario nahezu vollständig ausgeschöpft. Im Zielszenario kommt es abgesehen vom im letzten Jahr des Betrachtungszeitraums ebenfalls. Die Abweichung liegt daran, dass hier nicht mehr ausreichend viele sanierungsbedürftige Flurstücke vorhanden sind.

Sanierungsrate

Zum Erreichen einer klimaneutralen Wärmeversorgung im Jahr 2035 müssen täglich 7 Flurstücke saniert werden.

Um die Ergebnisse der Sanierungen weiter einordnen zu können, ist ergänzend in Abbildung A 7: Pro Jahr sanierte Fläche im Ziel- und Trendszenario A 7 im Anhang die einhergehende kumulierte sanierte Fläche je Szenario visualisiert.

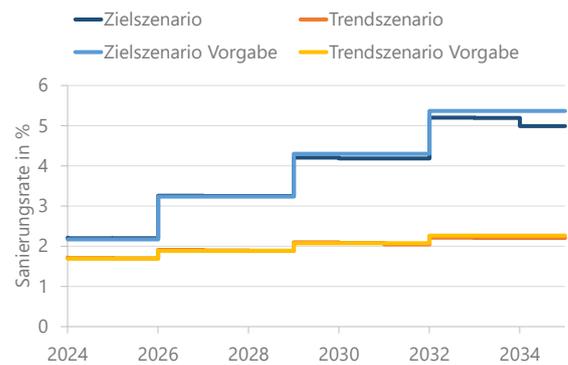


Abbildung 5-4: Auswertung der Sanierungsrate pro Jahr

5.3 Spezifischer Wärmebedarf

Eine weitere Möglichkeit, die städtische Entwicklung näher zu betrachten, ist ein Blick auf die Entwicklung des spezifischen Wärmebedarfs in kWh/m² (siehe Abbildung 5-5: Entwicklung des gesamtstädtischen spezifischen Wärmebedarfs). Auch hier ist die stärkere Bedarfsreduktion im Zielszenario mit der vorgegebenen Sanierungstiefe und -rate zu begründen. Die Bedarfsreduktion im Zielszenario ist prozentual annähernd doppelt so hoch wie im Trendszenario (ca. 28 % im Ziel- gegenüber 15 % im Trendszenario).



Abbildung 5-5: Entwicklung des gesamtstädtischen spezifischen Wärmebedarfs

5.4 Installation von Wärmepumpen

Für die zukünftige Belastung des Stromnetzes auf der Niederspannungsebene und dem damit verbundenen Ausbaubedarf ist die Entwicklung der Anschlussleistung der dezentral installierten Wärmepumpen von hoher Relevanz. Zu diesem Zweck zeigt Abbildung 5-6 die Gesamtanzahl an neu zu installierenden Wärmepumpen pro Jahr. Der deutliche Unterschied zwischen Ziel- und Trendszenario ist erneut auf die unterschiedlichen Heizsystemwechselraten zurückzuführen.

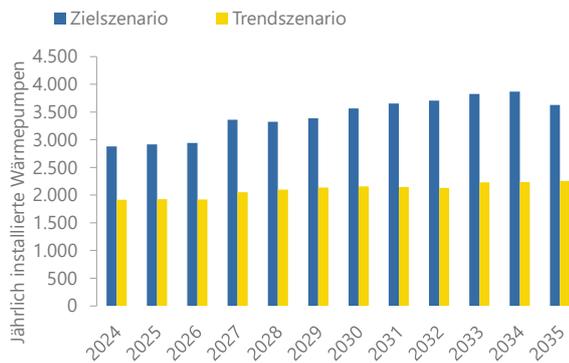


Abbildung 5-6: Anzahl an pro Jahr neuinstallierten Wärmepumpen

5.5 Treibhausgasemissionen

Ein besonderes Augenmerk bei der kommunalen Wärmeplanung liegt auf der Auswertung der Treibhausgasemissionen auf Basis von CO₂-Äquivalenten. Es ist in Abbildung 5-7 deutlich zu sehen, dass die Emissionen im Zielszenario nahezu auf null zurückgehen. Die verbleibenden Emissionen ergeben sich aus den Vorketten der erneuerbaren Energieträger (Scope 3 Emissionen).

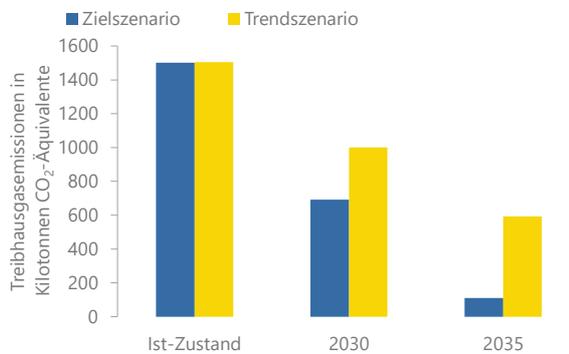


Abbildung 5-7: Entwicklung der gesamtstädtischen Treibhausgasemissionen

5.6 Kosten

Im Kapitel 4 wurde die Methodik zur Kostenberechnung ausführlich erläutert. Die einzelnen Kostenbestandteile wurden in den drei Gruppen Erzeugung, Wärmenetze und Sanierung aggregiert. Wie in Abbildung 5-8 zu erkennen ist, betragen die Sanierungsvollkosten exklusive Mehrwertsteuer im Zielszenario fast 13 Mrd. € und dominieren somit alle anderen Kostenbestandteile.

Neben den Kosten wurden in dieser Studie auch die Förderungen durch die Stadt Stuttgart und den Bund untersucht. Diese sind ebenfalls aggregiert über alle Förderungen für Sanierung und Wärmeerzeuger in Abbildung 5-8 zu sehen. Aufgrund der hohen Förderquoten für die Sanierung in der Förderung der Stadt Stuttgart wird der größere Anteil der Fördersumme durch die Stadt Stuttgart selbst bereitgestellt. Die insgesamt bereitgestellte Fördersumme durch den Bund und die Stadt Stuttgart beträgt insgesamt 6 Mrd. €.

Förderung durch die Stadt Stuttgart

Für die Wärmetransformation muss die Stadt Stuttgart jährlich durchschnittlich 300 Mio. € an Fördermitteln zur Verfügung stellen.

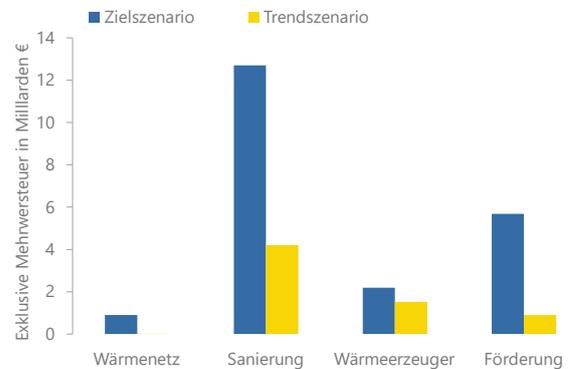


Abbildung 5-8: Gesamtstädtische Kosten und Förderungen über den gesamten Zeitraum der Simulation

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes *Kommunaler Wärmeplan Stuttgart – Modellierung des kommunalen Wärmeplans* wurden als Hauptergebnis zwei Szenarien aufgebaut, simuliert und ausgewertet. Das Zielszenario rückt dabei in den Vordergrund, da es gemäß den gesetzlichen Anforderungen des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg einen Weg zur klimaneutralen Wärmeversorgung aufzeigt. Neben den energetischen Ergebnissen und der Clusterung der Stadt wurden notwendige Investitionen auf Seiten des Versorgers und der privaten Haushalte berechnet. Darüber hinaus wurden auch der aktuelle Förderrahmen der LHS und des Bundes mit einbezogen.

Bereits während des Projektzeitraumes wurden die Ergebnisse am 29. September 2023 im Amt für Umweltschutz der LHS und in Anschluss in einer öffentlichen Informationsveranstaltung zur Kommunalen Wärmeplanung am 5. Oktober 2023 /AULS-01 23/, /AULS-02 23/ vorgestellt.

Das Trendszenario zeigt einen Weg auf, bei dem die Wärmewende in der Landeshauptstadt Stuttgart mit nur leicht gesteigertem Tempo vorangetrieben wird. Aus den Simulationsergebnissen wird deutlich, dass damit das Ziel der Landeshauptstadt Stuttgart, im Jahr 2035 klimaneutral zu werden, deutlich verfehlt wird.

Auf der anderen Seite werden für die Umsetzung des Zielszenarios relevante Investitionen und eine Vielzahl an Facharbeiter:innen benötigt, die die Wärmewende vor Ort umsetzen. Im Zielszenario sollen über die Stadt verteilt 43 neue Wärmenetze innerhalb der kommenden 12 Jahre entstehen. Dies verdeutlicht einen Teil der Maßnahmen, welche für die Transformation nötig sind. Das Zielszenario wird aus Sicht der FfE vor dem Hintergrund der derzeit realisierten Sanierungsraten und der Umstellung der Heizungssysteme auf vollständig erneuerbare Technologien als sehr ambitioniert eingeschätzt.

Die Ergebnisse der Simulation und Analysen erlauben verschiedene Abschätzungen. Die kommunale Wärmeplanung ist jedoch ein kontinuierlicher Prozess und damit nicht nach Beendigung des erstmaligen Erstellens eines Wärmeplans abgeschlossen. Beispielsweise konnten bisher nicht alle der nachfolgend genannten Punkte abschließend analysiert werden:

- Abschätzung der benötigten Arbeitskraft, differenziert nach Qualifikationsebene, um die Wärmewende umzusetzen
- Berechnung der Wärmegestehungskosten der Wärmenetze
- Ableitung lokaler Maßnahmen und Auswirkungen des Baubeginns von Wärmenetzen auf die finale Wärmeversorgung
- Aufzeigen einer gesamtheitlichen Transformation: Systemisch gemeinsame Simulation von dezentraler und zentraler Wärmeversorgung inklusive der Betrachtung von Strom- und Gasnetzen

Weiterhin werden im Zuge der Fortschreibung der Wärmeplanung weitere und aktualisierte Datensätze Berücksichtigung finden. Weitere Auswertungen können dazu beitragen, den Wärmeplan in Zukunft noch umsetzungsnaher auszugestalten:

- GIS-Anbindung des Simulationstools zur Ermöglichung eines lokal gesteuerten Netzausbaus
- Sektorenkopplung: Analysen der Rückwirkungen auf das Stromnetz und Ableitung von Maßnahmen
- Einbindung des Emissionsbudgets der Stadt im Trend- und Zielszenario
- Durchführung diverser Sensitivitätsanalysen, z. B. bezogen auf die angesetzten Emissionszeitreihen.

Literaturverzeichnis

- ALUF-01 09** Mayer, Helmut et al.: Klimawandel und Heizgradtage in Freiburg im Breisgau, Südwestdeutschland. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 69 (2009) Nr. 7/8. Berlin: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Meteorologisches Institut, 2009.
- AULS-01 23** Landeshauptstadt Stuttgart - Amt für Umweltschutz: Präsentationsfolien aus dem Ausschuss für Klima und Umwelt vom 29.09.2023 zum Thema kommunale Wärmeplanung. Stuttgart: Amt für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart, 2023.
- AULS-02 23** Amt für Umweltschutz - Landeshauptstadt Stuttgart: Präsentationsfolien der Info - Veranstaltung zur kommunalen Wärmeplanung vom 5.10.2023. Stuttgart: Amt für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart, 2023.
- BFS-01 23** Baupreisindex (2022): <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=0&levelid=1697704165809&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&code=61261-0014&auswahltext=&werteabruf=Werteabruf#abreadcrumb>; Wiesbaden: Bundesamt für Statistik (BFS), 2023.
- BMVI-02 05** Maßnahmen zur Minimierung von Reboundeffekten bei der Sanierung von Wohngebäuden (MARES). Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2005.
- BMWI-01 23** Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG). Ausgefertigt am 2020-11-01, Version vom 2023-01-01; Berlin: BMSB, 2023.
- DLR-01 23** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: EOC Geoservice. In <https://geoservice.dlr.de/web/maps/eoc:wsfevolution>. (Abruf am 2023-12-15); Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 2023.
- EPL-01 17** Gonseth, Camille et al.: Impacts of Global Warming on Energy Use for Heating and Cooling with Full Rebound Effects in Switzerland. In: Swiss Journal of Economics and Statistics Vol. 153 (4), 2017. Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2017.
- FFE-79 21** Kleinertz, Britta et al.: Klimaneutrale Wärme München 2035 - Ermittlung der Möglichkeiten zur Umsetzung von Lösungspfaden für eine klimaneutrale Wärmeversorgung in der Landeshauptstadt München. München & Freiburg: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH & Öko-Institut e.V., 2021.
- HAUSL-01 18** Hausl, Stephan: Auswirkungen des Klimawandels auf regionale Energiesysteme - Modellierung und Optimierung regionaler Energiesysteme unter Berücksichtigung klimatischer und räumlicher Aspekte. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität München, geprüft von Hamacher, Thomas und Streicher, Wolfgang: München, 2018.
- IINAS-01 22** Fritsche, Uwe R.: Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG- Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2021 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050 - Bericht für die HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. Darmstadt: Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH, 2022.
- KEA-01 23** Technikkatalog zur Kommunalen Wärmeplanung: <https://www.kea->

- bw.de/waermewende/wissensportal/technikkatalog; Karlsruhe: Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg, 2023.
- KERN-01 23** PVT- Kollektoranlagen. In https://www.bauphysik-software.de/downltutor/KERN_PVT-Fachbeitrag_07.23.pdf. (Abruf am 2023-10-20); Berlin: KERN Ingenieurskonzepte, 2023.
- KOLB-02 17** Kolbinger, Maximilian: Bestimmung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs des GHD-Sektors. Masterarbeit. Herausgegeben durch Technische Universität München, betreut durch Wagner, Ulrich: München, 2017.
- ÖKO-01 19** Repenning, Julia et al.: Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung. Freiburg: Öko-Institut e.V., 2019.
- OLON-01 16** Olonscheck, Mady: Climate change impacts on electricity and residential energy demand. Dissertation. Herausgegeben durch die Universität Potsdam, geprüft von Kropp, Jürgen und Schneider, Christoph: Potsdam, 2016.
- PIK-01 11** Olonscheck, Mady et al.: Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change. In: Energy Policy 39 (2011). Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2011.
- RAM-01 22** Klimaneutrale Fernwärme in Stuttgart. Stuttgart, Germany: Ramboll, 2022.
- SWM-04 20** Auswirkungen des Klimawandels auf den Wärmebedarf. München: Stadtwerke München, 2020.

Abkürzungsverzeichnis

BM	Biomasse
FW	Fernwärme
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GIS	Geoinformationssystem
KEA	Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH
LHS	Landeshauptstadt Stuttgart
NW	Nahwärme
PVT	Photovoltaik-Thermie
SWS	Stadtwerke Stuttgart
WP	Wärmepumpe
WP ES	Wärmepumpe mit Erdsonden
WP FK	Wärmepumpe mit Flächenkollektoren
WP LW	Luftwärmepumpe

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Beispiel von Flurstücken ohne Baualter (rot), die ein von den Nachbarn abhängiges Baujahr erhalten (links) bzw. aus dem DLR-Raster (rechts).....	9
Abbildung 3-1:	Input und Output des FfE Wärmetransformationstools	10
Abbildung 3-2:	Schematische Darstellung der Logik der Hauptsimulation des FfE-Wärmetransformationstools mit Einbezug des Input und Output. Für die Simulation der Stadt Stuttgart wird mit Flurstücken statt mit Gebäuden gerechnet. Die Logik ist hiervon nicht betroffen.....	17
Abbildung 4-1:	Schematischer Ablauf der dezentralen Kostenberechnung auf Flurstückebene	23
Abbildung 5-1:	Entwicklung der Wärmebereitstellung je Technologie im Zielszenario vom Ist-Zustand bis zum Jahr 2035.....	26
Abbildung 5-2:	Entwicklung der Wärmebereitstellung je Technologie im Trendszenario vom Ist-Zustand bis zum Jahr 2035	27
Abbildung 5-3:	Auswertung der Heizsystemwechselrate pro Jahr..	27
Abbildung 5-4:	Auswertung der Sanierungsrate pro Jahr	28
Abbildung 5-5:	Entwicklung des gesamtstädtischen spezifischen Wärmebedarfs	28
Abbildung 5-6:	Anzahl an pro Jahr neuinstallierten Wärmepumpen	29
Abbildung 5-7:	Entwicklung der gesamtstädtischen Treibhausgasemissionen	29
Abbildung 5-8:	Gesamtstädtische Kosten und Förderungen über den gesamten Zeitraum der Simulation.....	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Beispielhafte Potenzial-Inputdaten	12
Tabelle 3-2:	Überblick zu technologiespezifischen Nutzungsgraden und Jahresarbeitszahlen	21

Anhang

A 1: Sanierungsraten und Sanierungstiefen je Szenario und Zeitabschnitt

	Zeitabschnitt	Sanierungsrate		Sanierungstiefe	
		Trendszenario	Zielszenario	Trendszenario	Zielszenario
Sanierungsbedarf niedrig	2024 – 2026	1,50 %	1,80 %	KfW 120 EH	KfW 55 EH
	2027 – 2029	1,60 %	2,50 %	KfW 120 EH	KfW 55 EH
	2030 - 2032	1,70 %	3,20 %	KfW 100 EH	KfW 55 EH
	2033 – 2035	1,80 %	3,90 %	KfW 100 EH	KfW 55 EH
Sanierungsbedarf mittel	2024 – 2026	1,65%	2,00%	KfW 120 EH	KfW 55 EH
	2027 – 2029	1,80%	2,90%	KfW 120 EH	KfW 55 EH
	2030 -2032	1,95%	3,80%	KfW 100 EH	KfW 55 EH
	2033 – 2035	2,10%	4,70%	KfW 100 EH	KfW 55 EH
Sanierungsbedarf hoch	2024 – 2026	1,70%	2,20%	KfW 120 EH	KfW 55 EH
	2027 – 2029	1,90%	3,30%	KfW 120 EH	KfW 55 EH
	2030 -2032	2,10%	4,40%	KfW 100 EH	KfW 55 EH
	2033 – 2035	2,30%	5,50%	KfW 100 EH	KfW 55 EH

Cluster-nummer	Clusterbeschreibung	Zugeordnete Quartiere
1	Wärmenetzungsgebiet (hohe Sanierung) – in vertiefter Untersuchung	Berg; Birkenäcker; Hausen;
2	Wärmenetzungsgebiet (hohe Sanierung) – vertiefte Untersuchung ausstehend	Dürrlewang; Fasanenhof; Hedelfingen; Heslach; Synergiepark; Untertürkheim; Wangen;
3	Klimaneutrale Wärmeversorgung besonders herausfordernd (hohe Sanierung)	Asemwald; Bebelstraße; Cannstatt-Mitte; Degerloch Mitte; Franz-Schubert-Straße Botnang; Gablenberg; Gaisburg; Lehen + Dobel; Möhringen Mitte; Obertürkheim; Ostheim; Plieningen; Seelberg; Stammheim-Süd; Vaihingen Mitte; Weilimdorf Mitte; Zuffenhausen Mitte;
4	Wärmenetzungsgebiet (mittlere Sanierung) – in vertiefter Untersuchung	Feuerbach; Heumaden-Süd; Mühlhausen; Stadtbad Zuffenhausen; Steinhaldenfeld; Waldau; Winterhalde;
5	Wärmenetzungsgebiet (mittlere Sanierung) – vertiefte Untersuchung ausstehend	Giebel; Münster;
6	Klimaneutrale Wärmeversorgung besonders herausfordernd (mittlere Sanierung)	Feuerbach-Ost; Hofen;
7	Neubau	Böckinger Straße; Bürgerhospital; Münster 2050; Neckarpark; Rosenstein; Rotweg; Wiener Platz;
8*	-	-
9	FW	Fernwärme;
10	Bestandsnetze	Bosch-Feuerbach; Burgholzhof; Hohenheim; Kelly-Barracks; Patch-Barracks; Porsche-Zuffenhausen; Vaihingen-Universität;
11	Einzelversorgung-Nord	Einzelversorgung-Nord;
12	Einzelversorgung-Mitte	Einzelversorgung-Mitte;
13	Einzelversorgung-Süd	Einzelversorgung-Süd;

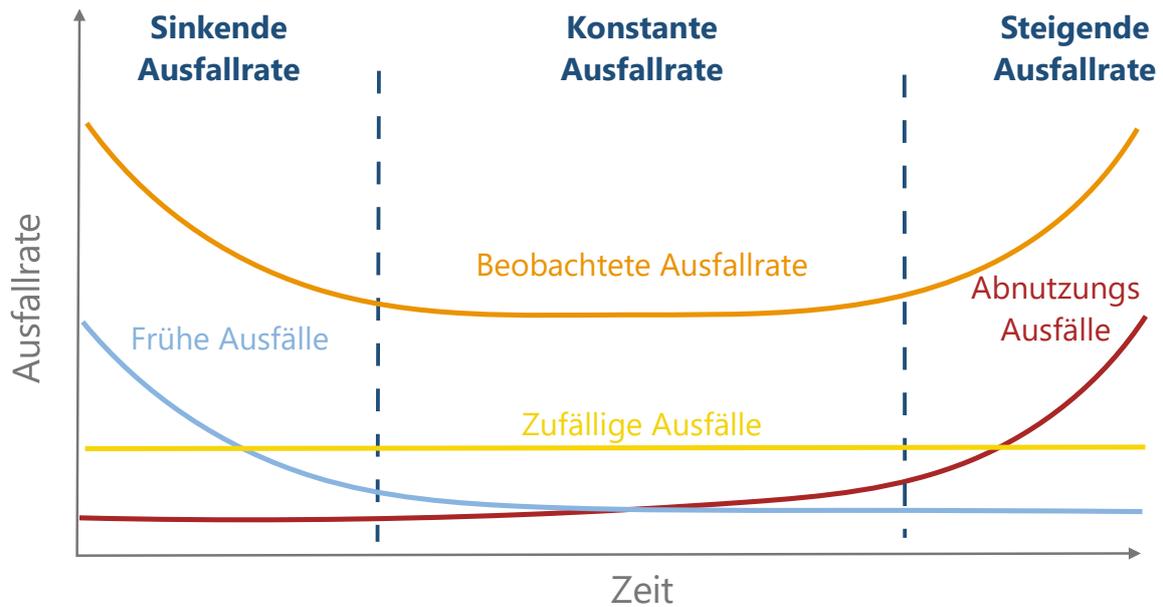
*Das Cluster 8 wurde in der finalen Fassung aufgelöst und die entsprechenden Quartiere wurden auf die anderen Cluster aufgeteilt. Es wurde an der Bezeichnung der Cluster 1-13 festgehalten, weswegen in dieser Tabelle Cluster 8 zur Vollständigkeit aufgenommen wurde. In der energetischen Simulation wurde das Cluster 7 und deren zugeordnete Flurstücke nicht weiter betrachtet. Dieses wurde separat von den SWS untersucht.

Bezeichnung	ID	Baujahr	Netto-Energie-bezugs-fläche	Nut-zungstyp	Denk-malsta-tus	Energie-träger	Wärme-bedarf	Spezifi-scher Wärme-bedarf	Bualter des Wär-meer-zeugers
Einheit	-	-	m ²	-	0/1	-	GWh	kWh/m ²	Jahre
Beispiel-daten	1482000005*	1992	2057,94	MFH	0	Gas	0,1903	92,50	31
	1482000004*	1999	181,72	EFH	1	Gas	0,0130	71,57	25
	1480000042*	1998	184,8	EFH	0	Gas	0,0154	83,47	5

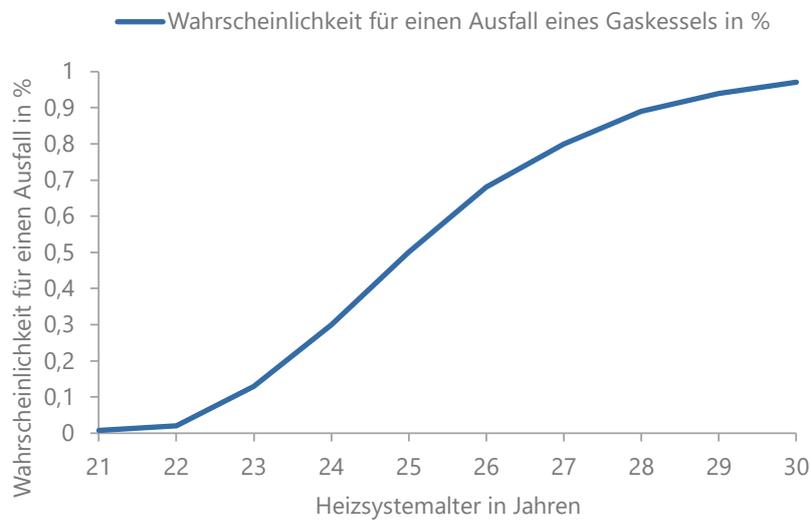
Zu den in dieser Tabelle aufgelisteten Spalten kommen folgende Spalten als Input dazu:

- Cluster ID
- Quartier ID
- Anteil des spezifischen Raumwärmebedarfs in %
- Anteil des spezifischen Trinkwarmwassers in %
- Spitzenlast in kW
- Das Alter der letzten Sanierung
- Angabe der Postleitzahl
- Geometrische GIS Daten

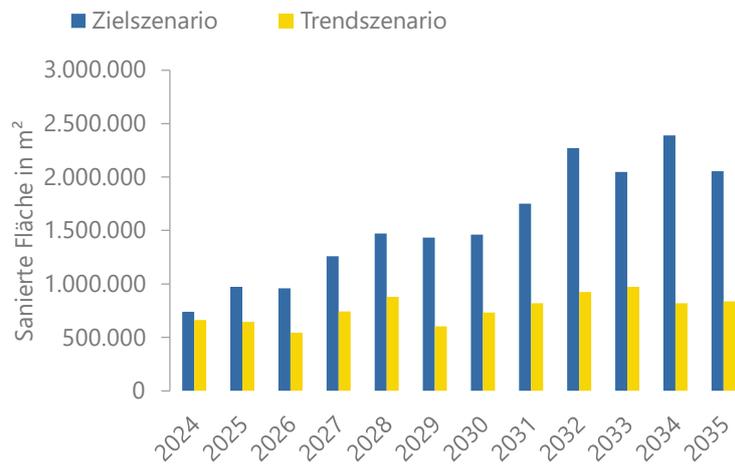
Modellcodeparameter	Einheit	Beschreibung
Bestandsrenovierungsanteil	-	Setzt den Anteil der Flurstücke, die im Bestand sanieren können, ohne das Heizsystem zu wechseln
Klimafaktor	%	Abnahme des Raumwärmebedarfs aller Wärmeverbräuche
Mindesteinsparung je Sanierung	%	Mindesteinsparung im Wärmebedarf, so dass eine Sanierung durchgeführt wird.
Maximales Heizsystemalter	a	Alle Heizsysteme älter als der vorgegebene Wert können in die Auswahl kommen.
Mindestalter für Heizsystemtausch und Sanierung	a	Alle Heizsysteme müssen mindestens ein gewisses Alter haben, bevor sie freiwillig das Heizsystem wechseln. Dies gilt auch für Sanierungen.
Triggerjahr für Mindestheizsystemalter	-	Ab diesem Jahr gilt das definierte Mindestheizsystemalter ab Triggerjahr. Damit sollen die letzten fossilen Energieträger beseitigt werden.
GEG-Jahr	-	Inkrafttreten des Gebäudeenergiegesetzes (GEG), ab diesem Jahr gilt der entsprechende Fehlinvestitionsanteil
Fehlinvestitionsanteil vor GEG	%	Anteil an den vorgegebenen Tauschen, die bis zum GEG-Jahr in neue fossile Kessel investieren
Fernwärmeschwellwert für Fehlinvestitionen	GWh	Grenzwert des absoluten Wärmebedarfs, um einen wirtschaftlich sinnvollen Anschluss an die FW zu berücksichtigen
EE-Hybridanteil	%	Mindestanteil des erneuerbaren Heizsystems in Anlehnung an die GEG Vorgabe
Hybridanteil	-	Legt den Anteil der Flurstücke fest, die tatsächlich eine hybride Lösung erhalten, wenn sie die Möglichkeit dazu haben (im Allgemeinen ist 1 am sinnvollsten, da nur Flurstücke ausgewählt werden sollten, die keine andere Möglichkeit haben)
Trinkwarmwasserreduktion	%	Senkung des Trinkwarmwasserverbrauchs bei der Sanierung eines Flurstückes
Maximales Heizsystemalter	a	Ab dem Überschreiten des maximalen Heizsystemalters wird das Heizsystem sehr wahrscheinlich erneuert bzw. getauscht



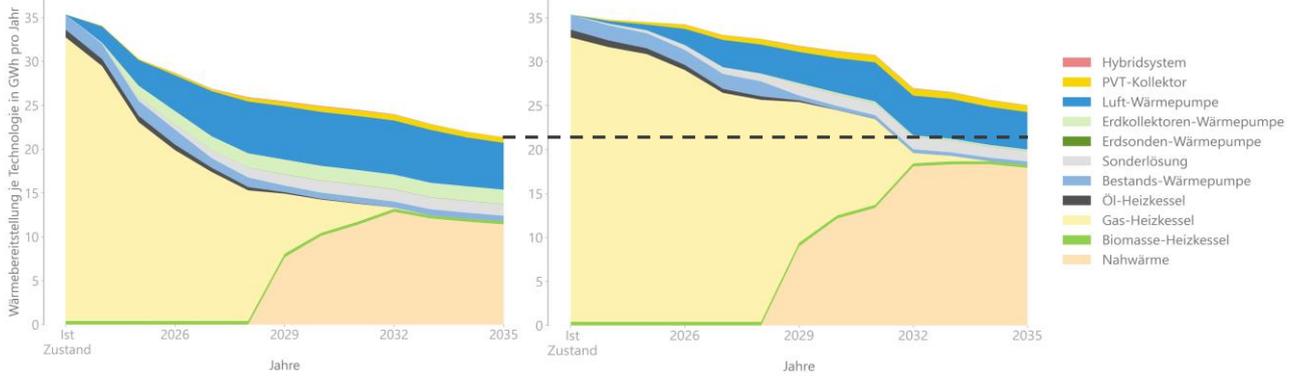
A 5: Schematische Darstellung einer Badewannenkurve, die allgemein zur Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit einer technischen Anlage (in diesem Fall Heizsystem) verwendet wird.



A 6: Kumulatives Beispiel der Verteilungsfunktion für Gasparameter (Parameter der Python gamma Funktion: $a=5$, $scale = 0,85$, $loc=21$) mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 Jahren (diskretisiert pro Jahr)



A 7: Pro Jahr sanierte Fläche im Ziel- und Trendszenario



A 8: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Auswahlgewichtung bei der Sanierung für das Cluster 5: Wärmenetz Eignungsgebiet (mittlere Sanierung) – vertiefte Untersuchung ausstehend. Links ist das Ergebnis für eine Priorisierung des höchsten absoluten Wärmebedarfs und rechts für den höchsten spezifischen Wärmebedarf zu sehen.