

EnEff:Stadt – SimStadt 2.0

Schlussbericht

im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

| | | |
|------------------------|---|-----------------------|
| Zuwendungsempfänger | Hochschule für Technik Stuttgart (HFT) – Zentrum für Geodäsie und Geoinformatik (ZGG) Zentrum für Nachhaltige Energietechnik (ZAFH) M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH (MOSS) GEF Ingenieur AG (GEF) Stadtwerke Stuttgart GmbH (SWS) Mainzer Stadtwerke AG (MSW) | A B C E F |
| Förderkennzeichen | 03ET1459 | |
| Vorhabenbezeichnung | EnEff:Stadt – 3D Simulation urbaner Energiesysteme (SimStadt 2.0) | |
| Laufzeit des Vorhabens | 01.07.2017 – 31.12.2020 | |
| Berichtszeitraum | 01.07.2017 – 31.12.2020 | |

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

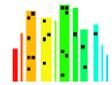


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Volker Coors, Preston Rodrigues, Matthias Betz, Sven Schneider (HFT-ZGG)
Verena Weiler, Eric Duminil, Bastian Schröter (HFT-ZAFH)
Andreas Klöber, Daniel Holweg (MOSS)
Thilo Brüggemann, Kerstin Bohn, Marc Rein (GEF)
Laura Goll (SWS)
Bodo Balbach, Florian Spath, Burkhard Gärtner (MSW)

Stuttgart / Dresden / Leimen / Mainz im Juni 2021

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

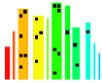


Kurzfassung

In dem Verbundprojekt SimStadt 2.0 erfolgte die Fortentwicklung einer 3D urbanen Energiesystemmodellierungsplattform, welche in der Praxis von Stadtplanern, Ingenieurbüros und Energieversorgern für die Energieanalyse und Auslegung von (erneuerbaren) Versorgungssystemen nutzbar wird. Basis bildeten die Ergebnisse des vorausgehenden Projektes SimStadt. Durch den Einsatz physikalischer Modelle für Gebäude, Energiesysteme und Verteilnetze sollten belastbare Aussagen über Entwicklungsszenarien für Stadtquartiere, Kommunen und Regionen getroffen und so die Planungssicherheit und Wirtschaftlichkeitsanalyse der Energiewende-Maßnahmen deutlich verbessert werden.

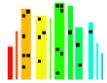
Hierbei war bewusst nicht das Ziel, ein weiteres möglichst exaktes Werkzeug zur Dimensionierung energietechnischer Anlagen und/oder der Wirtschaftlichkeitsberechnung energetischer Sanierungsoptionen eines Quartiers zu entwickeln – vielmehr sollte die Plattform erlauben, mittels standardisierter und gut verfügbarer Datenpunkte in Form von Datenbibliotheken und Geoinformationsdaten hinreichend exakte Ergebnisse zur Dimensionierung und Wirtschaftlichkeit zu liefern, so dass grundsätzliche Entscheidungen zur zukünftigen Wärmeversorgung des Quartiers früher als bisher im Planungsprozess üblich getroffen werden können. Die entwickelten Methoden wurden anhand von drei Szenarien „Quartierserwerb in Rüsselsheim“, „Peripheres Mischgebiet in Mainz“ und „Urbanes Mischnutzungsquartier in Stuttgart“ evaluiert.

Die Projektergebnisse tragen insofern zu den Zielen des 6. Energieforschungsprogramms bei, als dass städtische Quartiersplanungsprozesse insbesondere bei der Wärmeversorgung effizienter und günstiger durchgeführt werden können. Zudem ermöglichen die Werkzeuge, früh im Prozess alle denkbaren Energietechnologien „fair“ gegenüberzustellen und damit zu vermeiden, dass Ansätze aus nichtobjektiven Gründen im weiteren Planungsprozess keine Berücksichtigung finden. Die Energiewende im Quartier kann somit Bürgern in Partizipationsprozessen früher und plastischer nähergebracht werden als derzeit oft möglich.



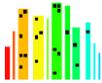
Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--|--|
| <i>ADE</i> Application Domain Extension: anwendungsbezogene Erweiterung des Austauschstandards CityGML | <i>IDE</i> Integrated Development Environment – Integrierte Entwicklungsumgebung |
| <i>AdV</i> Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland: Ständige Arbeitsgemeinschaft der für die Landesvermessung und das Liegenschaftskataster zuständigen Fachverwaltungen der Länder und des Bundes | <i>JAZ</i> Jahresarbeitszahl |
| <i>ALKIS</i> Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem | <i>KMR</i> Kunststoffmantelverbundrohr |
| <i>AWT</i> Abgaswärmetauscher | <i>KPI</i> Key Performance Indicator: Leistungskennzahl bzw. kritischer Erfolgsfaktor zur Bemessung der Wirtschaftlichkeit |
| <i>BGF</i> Brutto-Grundfläche nach DIN 277 | <i>KWK</i> Kraft-Wärme-Kopplung |
| <i>BHKW</i> Blockheizkraftwerk | <i>LoD</i> Level of Detail: definierte multiple Detaillierungsgrade bei 3D-Geomodellen |
| <i>BKG</i> Bundesamt für Kartographie und Geodäsie | <i>MFH</i> Mehrfamilienhaus |
| <i>CAD</i> Computer Aided Design: rechnergestütztes Konstruieren | <i>OGC</i> Open Geospatial Consortium: Internationales Standardisierungsgremium für Geodaten (OpenGIS®) |
| <i>CityGML</i> City Geography Markup Language: OpenGIS®-Standard für 3D Stadtmodelle | <i>P2G</i> Power-to-Gas |
| <i>COP</i> Coefficient of Performance: Leistungs- bzw. Heizzahl für mechanische Wärmepumpen | <i>PEF</i> Primärenergiefaktor |
| <i>CPU</i> Central Processing Unit - Zentrale Prozessor- /Recheneinheit (unterstützt serielles Rechnen) | <i>PV</i> Photovoltaik |
| <i>DWD</i> Deutscher Wetterdienst | <i>RDBMS</i> Relationales Datenbank- Managementsystem |
| <i>EFH</i> Einfamilienhaus | <i>SIG 3D</i> Special Interest Group 3D: Offener Arbeitskreis der GDI-DE zur Entwicklung der 3D- Geodateninfrastruktur |
| <i>EVU</i> Energieversorgungsunternehmen | <i>SOAP</i> Simple Object Access Protocol: standardisiertes Netzwerkprotokoll zum vereinfachten Austausch von Daten |
| <i>GeoSciML</i> Geoscience Markup Language: OpenGIS®-Standard für geologische Kartendaten | <i>Vbh</i> Vollbenutzungsstunden |
| <i>GIS</i> Geoinformationssystem | <i>WE</i> Wohneinheit |
| <i>GPU</i> Graphics Processing Unit: Grafikprozessor (unterstützt paralleles Rechnen) | <i>WFS</i> Web Feature Service: Erlaubt den Fernzugriff auf Geodaten in einem verteilten GIS |
| <i>GUI</i> Graphical User Interface / Grafische Benutzeroberfläche | <i>WSDL</i> Web Services Description Language: standardisierte, plattformunabhängige Beschreibungssprache für Netwerkdienste |
| | <i>ZSHH</i> Zentrale Stelle Kauskoordinaten und Hausumringe |



Inhaltsverzeichnis

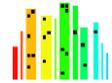
| | |
|---|----|
| Kurzfassung..... | 3 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 4 |
| Inhaltsverzeichnis..... | 5 |
| 1. Einleitung..... | 9 |
| 2. Zielsetzung..... | 10 |
| 3. Stand der Wissenschaft und Technik..... | 11 |
| 3.1 Stand der Wissenschaft | 11 |
| 3.1.1. Eigene Vorarbeiten | 11 |
| 3.1.2. Kontextuelle Forschungsaktivitäten zu Beginn des Vorhabens | 12 |
| 3.2 Stand der Technik | 13 |
| 3.3 Technischer Fortschritt seit Antragstellung..... | 15 |
| 4. Lösungsansatz..... | 16 |
| 5. Ergebnisse..... | 19 |
| 5.1 AP 1: Spezifikation der Szenarien | 19 |
| 5.1.1. AP 1.1: Daten- und Prozessanforderungsanalyse | 19 |
| 5.1.2. AP 1.2: Bewertungsverfahren für Planungsvarianten..... | 25 |
| 5.1.3. AP 1.3: Spezifizierung und Integration von Maßnahmen-Konzepten und eines Szenario- Managements | 33 |
| 5.2 AP 2: Integration von Sachdaten | 36 |
| 5.2.1. AP 2.1: Methoden der Datenintegration | 36 |
| 5.2.2. AP 2.2: Validierung und Plausibilisierung der Sachdaten | 44 |
| 5.2.3. AP 2.3: Erweiterung der Standards um Sachdatenobjekte und -attribute, OGC Aktivitäten .. | 47 |
| 5.3 AP 3: Integration von Monitoring-Daten | 48 |
| 5.3.1. AP 3.1: Organisation des Datenmanagements mit Sensor-/Messdaten | 48 |
| 5.3.2. AP 3.2: Erweiterung der Standards um Sensor-/Messdaten | 50 |
| 5.3.3. AP 3.3: Implementierung von Funktionalitäten zur Verarbeitung und Plausibilitätsprüfung von Sensor-/Messdaten | 52 |
| 5.3.4. AP 3.4: Metadaten | 52 |
| 5.4 AP 4: Fortentwicklung und Performance Optimierung der SimStadt-Plattform..... | 53 |
| 5.4.1. AP 4.1: Teststrategien, Qualitätssicherung und Optimierung der Softwarestruktur | 53 |
| 5.4.2. AP 4.2: Fortentwicklung der Datenverwaltung und -versionierung | 56 |
| 5.4.3. AP 4.3: Entwicklung von Web Services | 57 |



| | | |
|--------|--|-----|
| 5.4.4. | AP 4.4: Geschwindigkeitserhöhung durch verteiltes und paralleles Rechnen..... | 58 |
| 5.4.5. | AP 4.5: Nutzerbezogene Visualisierung in der SimStadt-Plattform und Reportgenerierung... | 59 |
| 5.4.6. | AP 4.6: Schnittstellen zum 3D-Geodatenserver der Stadt Mainz..... | 62 |
| 5.4.7. | AP 4.7: Standardisierung Energy ADE, Erweiterung des Standards, OGC Aktivitäten..... | 64 |
| 5.5 | AP 5: Erweiterung der Modellfunktionalitäten..... | 65 |
| 5.5.1. | AP 5.1: Gebäudenutzungs- und Lastprofile für Gebäude und Gebäudegruppen | 65 |
| 5.5.2. | AP 5.2: Dynamische Heizwärme- und Kühlbedarfssimulation | 67 |
| 5.5.3. | AP 5.3: Energieversorgungs- und Speichersimulation..... | 67 |
| 5.5.4. | AP 5.4: Wissenschaftlich-technische Studie für neue urbane Infrastruktur | 79 |
| 5.6 | AP 6: Szenarien, Methodenvergleich, Anwendung an Fallstudien | 80 |
| 5.6.1. | AP 6.1: Sachdatenerhebung und Monitoringkonzept Fallbeispiele | 82 |
| 5.6.2. | AP 6.2: Modellanwendung und Szenarienrechnung | 91 |
| 5.6.3. | AP 6.3: Methodenvergleich klassische Planung mit Szenarien der Plattform..... | 105 |
| 5.6.4. | AP 6.4: Visualisierung und Kommunikation | 124 |
| 5.7 | AP 7: Gebäudeenergie-Epidemiologie | 125 |
| 6. | Planung und Ablauf des Vorhabens | 127 |
| 6.1 | Durchführung der Arbeiten..... | 127 |
| 6.2 | Zusammenarbeit mit Dritten | 128 |
| 6.2.1. | Helper | 128 |
| 6.2.2. | Developer | 129 |
| 6.2.3. | User | 129 |
| 7. | Verwertung | 131 |
| 7.1 | Wirtschaftliche Erfolgsaussichten | 131 |
| 7.1.1. | HFT..... | 131 |
| 7.1.2. | MOSS | 132 |
| 7.1.3. | GEF..... | 132 |
| 7.1.4. | SWS..... | 133 |
| 7.1.5. | MSW | 133 |
| 7.2 | Wissenschaftliche und technische Verwertung..... | 134 |
| 7.2.1. | HFT..... | 134 |
| 7.2.2. | MOSS | 134 |
| 7.2.3. | GEF..... | 134 |
| 7.2.4. | SWS..... | 135 |



| | |
|--|-----|
| 7.2.5. MSW..... | 136 |
| 7.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit | 137 |
| 7.3.1. HFT | 137 |
| 7.3.2. MOSS..... | 138 |
| 7.3.3. GEF | 138 |
| 7.3.4. SWS | 139 |
| 7.3.5. MSW..... | 139 |
| 8. Dissemination | 140 |
| 8.1 Publikationen..... | 140 |
| 8.2 Vorträge..... | 140 |
| 8.3 Transfer in die Lehre..... | 142 |
| 8.4 Zugänglichmachung der Forschungsinhalte und Ergebnisse..... | 143 |
| 9. Zusammenfassung..... | 144 |
| 9.1 Fazit | 144 |
| 9.2 Ausblick..... | 144 |
| Abbildungsverzeichnis | 147 |
| Tabellenverzeichnis..... | 149 |
| Literaturverzeichnis | 151 |
| Anhang | 155 |

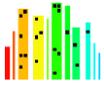


1. Einleitung

Der Endenergieverbrauch von privaten Haushalten benötigt jährlich 636 TWh und verursacht damit etwa 25 % des deutschen Endenergieverbrauchs. Ein Großteil dieser Emissionen entsteht hierbei durch die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Damit die klimapolitischen Zielsetzungen Deutschlands und der EU erreicht werden, ist eine rasche Umstellung auf eine nachhaltigere Versorgung von Bestands- und Neubauquartieren mit erneuerbarer Heizwärme – und zunehmend auch Kälte – von maßgeblicher Bedeutung. Projektentwickler, die öffentliche Hand, institutionelle Immobilienbesitzer oder andere Akteure, die eine Quartiersentwicklung vorbereiten, stehen vor der Herausforderung, sich einerseits frühzeitig auf passende energetischen Maßnahmen für ein Quartier festzulegen, um zeit- und kosteneffizient den weiteren Prozess durchzuführen, andererseits jedoch nicht auf einen etablierten Standardmix an aktiven und passiven Maßnahmen zurückgreifen zu können.

In solch frühen Phasen der energetischen Quartiersentwicklung setzt die urbane Energiesystemmodellierungsplattform SimStadt an. Die Software ermöglicht es, auf Basis weniger und allgemein früh im Planungsprozess verfügbarer Eingangsdaten, die wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit sowie raum- und bauplanerische Anforderungen von Wärmeversorgungskonzepten für Quartiere zu untersuchen. Vorrangiges Ziel von SimStadt ist dabei, energetische Aspekte früh in Entscheidungsprozessen berücksichtigen und bewerten zu können sowie im weiteren Planungsverlauf, unter sich erfahrungsgemäß öfter ändernden Rahmenbedingungen und Prioritäten, fortlaufend gegeneinander abzuwägen. Im Sinne eines domänenübergreifenden Planungsansatzes ist es damit möglich, integrierte Wärmeversorgungskonzept bereits in die städtebauliche und architektonische Quartiersausgestaltung einzubeziehen.

Die Entwicklung von SimStadt begann bereits im Jahr 2012 unter Federführung der Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart und wird seitdem kontinuierlich fortgeführt. Der jüngste Entwicklungsschritt erfolgte nun im Rahmen dieses Vorhabens in Kooperation mit der Mainzer Stadtwerke AG, der Stadtwerke Stuttgart GmbH, der GEF Ingenieur AG und der M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH. Kernziel dieses Entwicklungsschritts war die Etablierung eines Arbeitsprozesses und einer im Hintergrund agierenden Modell- und Toollandschaft, die eine automatische Dimensionierung von Wärmeversorgungskonzepten für Neubau- und Bestandsquartiere auf Basis von 3D-Gebäudemodellen ermöglicht.



2. Zielsetzung

Ziel des Vorhabens SimStadt 2.0 war die Fortentwicklung einer 3D urbanen Energiesystemmodellierungsplattform, welche in der Praxis von Stadtplanern, Ingenieurbüros und Energieversorgern für die Energieanalyse und Auslegung von (erneuerbaren) Versorgungssystemen genutzt werden kann. Durch den Einsatz physikalischer Modelle für Gebäude, Energiesysteme und Verteilnetze können belastbare Aussagen über Entwicklungsszenarien für Stadtquartiere, Kommunen und Regionen getroffen und so die Planungssicherheit und Wirtschaftlichkeitsanalyse gezielter Maßnahmen im Kontext der Energieverwendung deutlich verbessert werden.

Innerhalb der Plattform wurden verschiedene Verfahren evaluiert, die heute als Standard in der Planung, Überwachung und Steuerung der Energie-Infrastruktur eingesetzt werden. Alle verfügbaren Informationen werden in einer Softwareplattform integriert und für kurz-, mittel- und langfristige Szenarioberechnungen verwendet. Realdatenanreicherung ist dabei wichtig, um Simulationsszenarien validieren zu können. Als Anwender der integrierten Simulations- und Energiemanagement Plattform sind Energieversorger, Stadtplaner, Kommunen bis hin zu den Bürgern und Verbrauchern vorgesehen.

Die Fortentwicklung basierte auf den Arbeiten des Projektes SimStadt als einer Simulationsumgebung, welche die Realisierung vielfältiger Lösungen für die Energieanalyse von Stadtquartieren, ganzer Städte und sogar Regionen ermöglicht. Bisher wurde das Spektrum von der Diagnose des Heizwärmebedarfs, über Photovoltaik Potenzialstudien bis hin zur Simulation von Gebäudesanierungs- und erneuerbaren Energieversorgungszenarien betrachtet. Diese urbane Simulationsumgebung wurde an der HFT Stuttgart zusammen mit den Firmenpartnern MOSS und GEF prototypisch entwickelt und gemeinsam mit den Anwendungspartnern MSW und SWS anhand von Quartiersprojekten mit Monitoringdaten validiert. Ein produktiver Einsatz bei kommunalen oder gewerblichen Praxispartnern ist noch nicht erfolgt. Von der HFT Stuttgart in Kooperation mit den genannten Firmenpartnern wurde in den letzten Jahren die umfangreiche Software-Architektur von SimStadt entwickelt und deren prototypische Implementierung umgesetzt. Um diese Grundlagenarbeiten nun in die breite Anwendung zu führen, wurden konkretisierte Anwendungsszenarien entwickelt und evaluiert. Dabei lag die größte Schwierigkeit in der Datenerfassung für die Simulationen des urbanen Raumes. Besonders diesen Prozess galt es zu vereinfachen. In SimStadt 2.0 wurde die Möglichkeit genutzt, Basisdatensätze bereit zu stellen, mit denen die Simulationen vorgenommen und die Modellierungen kalibriert werden können. Exemplarisch wurden Wege aufgezeigt, wie die Datenbereitstellung so erfolgen kann, dass der Aufwand minimiert und zugleich ein angemessenes Qualitätsniveau der Daten gesichert werden kann. Ein wesentliches Teilziel war zugleich die Anreicherung der deutschlandweit verfügbaren Geometriedaten von Gebäuden, die wiederum eine Grundlage für die Simulationen darstellen.

Die entwickelten Methoden wurden anhand von drei Szenarien „Quartierserwerb in Rüsselsheim“, „Peripheres Mischgebiet in Mainz“ und „Urbanes Mischnutzungsquartier in Stuttgart“ evaluiert.



3. Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Stand der Wissenschaft

3.1.1. Eigene Vorarbeiten

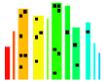
Im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundvorhabens „*SimStadt – Wärmebedarfssimulation von Stadtquartieren*“ (Dez. 2012 – Nov. 2015, FKZ 03ET4009) wurde die urbane Energiesimulationsumgebung SimStadt entwickelt und erprobt. Sie ermöglicht auf Basis dreidimensionaler Stadtmodelle vielfältige Energieanalysen im Maßstab von Quartieren, Kommunen oder ganzer Regionen.

SimStadt ist modular aufgebaut und prozessorientiert. Die einzelnen Module sind weitestgehend gekapselt und entsprechen den konkreten Anwendungsprozessen bzw. Prozessschritten (sog. *Workflows* bzw. *Workflow-Steps*). In ihnen sind alle anwendungsbezogenen Funktionalitäten, Algorithmen und Bibliotheken hinterlegt. Diese integrative Systemarchitektur erlaubt eine relativ einfache Weiterentwicklung, etwa durch die Ergänzung einzelner Workflow-Steps zu bestehenden Anwendungen oder eine Erweiterung um zusätzliche Anwendungskontexte durch Abbildung neuer Workflows.

Zu Beginn des Vorhabens waren folgende Workflows in SimStadt implementiert:

- Die Berechnung des Heizwärmebedarfs für jedes Gebäude, basierend auf dem Monatsbilanz-Verfahren (DIN V 18599).
- Die Berechnung des Warmwasser- und Strombedarfs auf Grundlage statistischer Referenzdaten für Einzelgebäude.
- Die Berechnung der Solarstrahlung auf jede Gebäudefassade und Dachfläche, anhand verschiedener Strahlungsmodelle mit oder ohne Verschattungsbetrachtung (*Simplified Radiosity Algorithm* bzw. *Hay Himmelsmodel*).
- Die Berechnung der Solarenergiepotenziale (Photovoltaik und Solarthermie), anhand Nutzerdefinierter Kriterien für die Selektion von geeigneten Dächern und Fassaden.
- Die optimierte Trassenführung und Dimensionierung von Nah-/Fernwärmenetzen, basierend auf dem berechneten Wärmebedarf und der Lage des lokalen Straßen- und Wegenetzes.
- Die Berechnung von CO₂ Ausstoß und Primärenergiebedarf.
- Die Simulation von Sanierungsszenarien, anhand Nutzerdefinierter Kriterien wie jährliche Sanierungsrate und Prioritätskriterien (ältere bzw. wenig energieeffiziente Gebäude zuerst, manuell definierte oder zufällige Zuordnung).

Alle Workflows sind aus hierarchischen Workflow-Steps aufgebaut. Die Ergebnisse jedes Teilprozesses werden grafisch aufbereitet und mittels Histogramm, Gebäudekarten, urbanen Rastern und Dichtekarten in einer Java-basierten Oberfläche dargestellt. Für die nutzerfreundliche Bearbeitung und Ergänzung der Gebäudebibliothek wurden zwei Editoren erstellt (zur Eingabe bauphysikalischer Kennwerte sowie zur Bestimmung der Gebäudenutzung).



SimStadt konnte im Projekt „*Integriertes Klimaschutzkonzept Landkreis Ludwigsburg*“ [1] bereits praktisch erprobt werden. Basierend auf dem 3D Stadtmodell ließen sich die Workflows Heizwärmebedarfsberechnung, Photovoltaik- und Solarthermiefpotenzialabschätzung sowie Sanierungsszenarien für die ca. 100.000 Gebäude der 34 Kommunen des Landkreises Ludwigsburg erfolgreich durchführen. Auf den mit SimStadt generierten Ergebnissen konnten sowohl die Energiediagnose als auch die Einsparungspotenzialstudie des Klimaschutzkonzepts schließlich realisiert werden.

3.1.2. Kontextuelle Forschungsaktivitäten zu Beginn des Vorhabens

Das Vorhaben *TransiEnt.EE* (2013-2016) der TU Hamburg Harburg entwickelte gekoppelte Energiesystem-Modelle mit zentralen und dezentralen Energieerzeugern, elektrischen und thermischen Netzen zur Analyse der optimalen Einbindung stark fluktuierender Energien. Alle Modelle sind in Modelica/Dymola implementiert. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Erzeuger- und Speicherseite, Verbraucher werden lediglich über Lastprofile bzw. Messdaten abgebildet. Die Anwendung ist auf Hamburg limitiert.

Für das Standardlastprofil werden Berechnungsalgorithmen verwendet, die aus Jahresenergieverbräuchen Zeitreihen berechnen (Verfahren der VDE, Gasindustrie etc.). Daraus werden randomisierte Zeitreihen erzeugt. Sowohl die erneuerbaren Energien Leistungen als auch die Verbrauchszeitreihen liegen fest und sind Eingangsgrößen in das Modell. Nach der Einsatzplanung der Wärmeerzeugung in Modelica wird die Einsatzplanung der Stromerzeuger in Matlab optimiert berechnet und anschließend als gekoppelte Systemsimulation wieder in Modelica zurückgeführt. Bei 15 minütiger Schrittweite rechnet das Systemmodell ca. 2 Stunden für eine Jahressimulation. SimStadt 2.0 mit seinem Fokus auf der Bedarfsimulation sowie der Netzgenerierung stellt eine hervorragende Ergänzung zur Erzeugungsoptimierung von TransiEnt.EE dar.

Im Rahmen des Verbundvorhabens *GEWISS* (2015-2017) wurde eine Komponenten- und Service-basierte Simulations-Framework Architektur („*Simulation as a Service*“) entwickelt, um makroskopische Modelle der Stadtentwicklung mit mikroskopischen Modellen in einer einheitlichen Simulationsumgebung zu integrieren. Dieser Ansatz greift Methoden aus dem Cloud Computing auf und verbindet dies mit lose gekoppelten, skalierbaren Simulationen. Die skalierbare Integration von Modellen basiert auf Web Services, welche die Funktionalität der Systeme (Matlab/Modelica o.ä.) kapselt und die Lasten der Berechnungen verteilt. Im Scenario Manager werden die Simulationsaufgaben über einen Service Bus verteilt.

Es sind eine Reihe von etablierten Cloud Computing Lösungen verfügbar, die Verteilungstransparenz, Skalierbarkeit und Robustheit beinhalten. Implementierungsalternativen sind z.B. *REST Web Services*, *Jadex NFP Service* aus dem Bereich der Multi Agenten Simulation oder der *Jadex Cloud Service Pool*. Dabei kann die Service Auswahl anhand von dynamisch ausgewerteten nichtfunktionalen Anforderungen erfolgen. SimStadt 2.0 kann diesen Ansatz durch aus der Praxis kommende Workflow Schritte konkretisieren. Einzelne Services werden dadurch mit GEWISS austauschbar.

Im Projekt *DeepCity3D* (September 2009 - August 2012) wurde am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) ein Modul für den CityServer3D entwickelt, mit dessen Hilfe Daten wie 3D-Stadtmodelle, Untergrundkonstruktionen und geologische Informationen miteinander verknüpft und



visualisiert werden können. Die Integration erfolgt auf Grundlage der beiden Datenmodelle CityGML und GeoSciML. Partnerstädte für die Umsetzung der Anwendungsfälle in DeepCity3D waren Mainz und Toulouse.

3.2 Stand der Technik

CityGML

Der fortschrittlichste Standard für 3D-Stadtmodelle ist das OpenGIS®-Format *CityGML* der OGC. Bei CityGML handelt es sich um ein frei verfügbares und quelloffenes GML Anwendungsprofil, das sowohl ein semantisches Datenmodell als auch ein XML-basiertes Datenaustauschformat spezifiziert. Neben der georeferenzierten 3D-Gebäudegeometrie wird in CityGML auch eine Objektbildung definiert, nach der die Objekte im Stadtmodell klassifiziert werden. Die aktuelle Version CityGML 2.0 unterscheidet dabei Gebäude, Brücken, Tunnel, Verkehrsflächen, Vegetation, Stadtmöblierung, Gewässer, Landnutzung und Gelände. Details zum CityGML Standard finden sich in Coors et al. [2].

In Deutschland hat sich die Nutzung von CityGML für 3D-Stadtmodelle in vielen Anwendungsbereichen etabliert. So hat die AdV Qualitätskriterien und Erfassungsvorschriften für ein flächendeckendes 3D-Gebäudemodell festgelegt. Seit 2020 ist neben einem einfachen „Klötzchenmodell“, der sog. Detaillierungsgrad *LoD 1* auch ein Modell im Detaillierungsgrad *LoD 2* für den gesamten Gebäudebestand erfasst. Im LoD 2-Modell ist die Dachform geometrisch ausmodelliert. Die großflächige Erfassung der Gebäudegeometrie in LoD 2 erfolgt in vollautomatisierten Verfahren, in die i. d. R. einerseits die Grundrisse der Gebäude aus dem Liegenschaftskataster und andererseits Punktwolken aus Laserscanbefliegungen eingehen.

Mit Hilfe einer *Application Domain Extension (ADE)* lässt sich der CityGML Standard anwendungsspezifisch erweitern. Die CityGML *Energy ADE* erweitert das CityGML Datenmodell um Objekte und Attribute, die für die energetische Simulation von Stadtquartieren relevant sind. Weiterhin können die Simulationsergebnisse in der CityGML Energy ADE gespeichert werden. Die wesentlichen Bestandteile der Energy ADE sind wiederum die Module *Building Physics*, *Occupant Behaviour*, *Material and Construction* sowie *Energy Systems*.

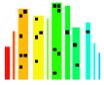
INSEL®

Die Software *INSEL* ist ein Blockdiagramm Simulationssystem zur Programmierung von Anwendungen aus dem gesamten Bereich der erneuerbaren Energietechnologien. Die Software wendet sich an Ingenieurbüros und Firmen, die komplexe Projekte bearbeiten und wird in Forschung und Lehre eingesetzt.

Anwender können dabei nicht nur auf vorgefertigte Simulationsmodelle zugreifen, sondern über einen integrierten grafischen Editor eigene Modellerweiterungen oder komplett neue Modelle für individuelle Fragestellungen entwerfen. Darüber hinaus bietet INSEL eine Schnittstelle zur Erweiterung der Bibliotheken in Programmiersprachen wie *Fortran* und *C/C++* an.

Die große Palette von INSEL Blöcken kann mit der Vielfalt der *MATLAB*® und *Simulink*® Funktionalitäten kombiniert werden und bietet damit ein großes Repertoire an Modellkomponenten für unterschiedlichste Simulationsanwendungen.

INSEL ist frei verfügbar und kann von der Website <https://insel.eu> heruntergeladen werden.



Erstellung und Bearbeitung von Planungsdaten in Varianten mit WEGA-Variant

WEGA ist ein Client-Server basiertes Web-GIS. Der Client steht ohne lokale Installationen an jedem Arbeitsplatz zur Verfügung. Eine Softwareaktualisierung erfolgt rein serverseitig.

Wenn es um Planung, Projektierung und Historisierung geht, ist neben der Verwaltung und Bearbeitung von frei modellierbaren Objekten auch die redundanzfreie Speicherung verschiedener Varianten des gleichen Objekts gefordert. Genau diese Anforderungen adressiert das WEGA-Modul Variant. WEGA-Variant unterstützt somit zum Beispiel optimal die anspruchsvolle Aufgabe, bei der entlang des Planungsprozesses verschiedenste Planungsvarianten u.a. auf Basis unterschiedlicher Konfiguration entstehen und fortgeschrieben werden.

Aus WEGA-Variant heraus können für die jeweilige Variante die erstellten Workflows gestartet werden. Die Ausführung, Protokollierung und Überwachung wird durch das gekoppelte *novaFACTORY* realisiert.

Bei der Software *novaFACTORY* handelt es sich um eine umfassende Lösung für die Verwaltung, Prozessierung und Bereitstellung von geotopographischen Daten. Das in *novaFACTORY* enthaltene Modul „Eigene Workflows“ eröffnet große Möglichkeiten der Prozessautomatisierung und entlastet damit sowohl Geodatenmanager als auch Fachanwender. Es beinhaltet Werkzeuge zur Ausführung, Steuerung und Überwachung beliebiger Prozesse oder Prozessketten.

Von einfachen Geodatenprozessierungen bis zur komplexen Abarbeitung externer Fachverfahren – einmal definiert können die Workflows von jedem Arbeitsplatz aus über die Browseroberfläche von *novaFACTORY*/WEGA-Variant gestartet und verwaltet werden.

Planungsinstrumente zur Auslegung rohrlungsgebundener Versorgungsinfrastrukturen

Für die physikalische Auslegung in der Planung (bspw. bzgl. Hydraulik bzw. Thermohydraulik und Rohrstatik) sowie die Einstellung der Fahrweise in bestimmten Betriebsituationen haben sich einige kommerzielle Softwareprodukte am Markt etabliert (bspw. *STANET*¹, *sisHYD*², *SIR 3S*³, *ROKA3*⁴, *NetSim*⁵ oder *GEF sisKMR*⁶). Es handelt sich dabei ausschließlich um komplexe Expertenwerkzeuge, die ein hohes Maß ingenieurtechnischer Fachkompetenz bzw. operativen Sachverstands im Detail voraussetzen. Sie sind daher einerseits nur mit großem Aufwand und unter Einsatz eines differenzierten Vorwissens anwendbar. Andererseits bedarf ihr Einsatz grundsätzlich auch einer umfangreichen, hinreichend detaillierten und exakten sowie konsistenten Datenbasis zur lokalen Situation und den konkreten Rahmenbedingungen.

Für den von SimStadt fokussierten Anwendungskontext sind diese Werkzeuge daher ungeeignet. In frühen Planungsphasen fehlt es zumeist noch an einer hinreichend präzisen und detaillierten Daten. Zudem handelt es sich bei den adressierten Anwendern nicht um operative Experten, sondern um oftmals fachfremde strategische Entscheidungsträger (bspw. auf politischer Ebene), die einen ganzheitlichen

¹ <http://www.stafu.de/de/home.html>

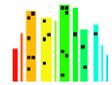
² <https://www.bentley.com/en/products/brands/openutilities>

³ <https://www.3sconsult.de/software/sir-3S>

⁴ <https://www.roka3.de/>

⁵ <https://www.vitecsoftware.com/en/product-areas/energy/products/netsim-grid-simulation>

⁶ <https://siskmr.com/>



Überblick über die örtliche Ausgangslage und mögliche Entwicklungspfade gewinnen wollen (vgl. dazu auch Kap. 5.1.1).

3.3 Technischer Fortschritt seit Antragstellung

Die seit einigen Jahren in der Entwicklung befindliche CityGML Version 3.0 wurde im Verlauf der Bearbeitung des Vorhabens bereits teilweise die Gremien der OGC verabschiedet. Eine wesentliche Neuerung ist dabei die Trennung von konzeptionellem Modell und dem sog. Encoding. Das konzeptionelle Modell definiert hierbei das Objektmodell, unabhängig von einem bestimmten Datenformat. Das XML-Encoding von CityGML 3.0 legt dagegen fest, wie dieses konzeptionelle Modell in XML gespeichert wird. Mit *CityJSON* kann dasselbe konzeptionelle Modell auch in der Notation JSON gespeichert werden. Dies ist insbesondere für webbasierte Anwendungen interessant.

Die Entwicklung von CityGML 3.0 wurde auch im Rahmen des Vorhabens aktiv unterstützt, der Verbundpartner HFT ist aktives Mitglied der *CityGML Standard Working Group* im OGC. So konnte bspw. das an die Energy ADE angelehnte Konzept der Building Subdivision in CityGML 3.0 eingebracht werden, um ein Gebäude thermale Zonen zu unterteilen. Dies ermöglicht erst die Modellierung von Mehrzonen-Modellen für die Wärmebedarfssimulation in CityGML 3.0. Auch das Innenraum-Modell wurde in CityGML 3.0 vollständig überarbeitet und ist für Simulationen nun besser geeignet.

Die Implementierung im Projekt SimStadt 2.0 erfolgte aufgrund der zu Beginn des Vorhabens in vielen Details noch unklaren Fassung der Folgeversion aber auf Basis der damals aktuellen Version CityGML 2.0.

4. Lösungsansatz

Um das Ziel einer urbanen Energiesystem-Plattform zur Planung, Überwachung und Steuerung einer dezentralen lokalen Energie-Infrastruktur zu erreichen, wurde zunächst eine Analyse der Anforderungen aus Anwendersicht durchgeführt. Dazu sollten typische Anwendungsfälle verschiedener lokaler Stakeholder analysiert und dokumentiert werden. Die beteiligten Praxispartner Stadtwerke Stuttgart und Mainzer Stadtwerke standen dabei im Mittelpunkt der Anforderungsanalyse. Konkret wurden folgende Anwendungsfälle im Detail untersucht:

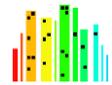
- Fernwärmenetzplanung in Abhängigkeit sich ändernder Wärmebedarfe
- Dezentrale Einspeisung thermischer Erzeuger (Solarthermie, BHKW, Wärmepumpen)
- Energie- und Speichermanagement (thermische Speicher und passive Gebäudemassenspeicher) für Demand Side Response
- Integration von Monitoringdaten zum Abgleich mit Szenarien

Basierend auf der Analyse der Anwendungsfälle wurden konkrete Praxisbeispiele herausgegriffen, um sie mit der SimStadt-Plattform umzusetzen. Zur Validierung mussten dieselben Anwendungsfälle parallel auch mittels klassischer Methoden (in der Praxis etablierte Vorgehensweisen) untersucht und verglichen werden. Die SimStadt-Plattform selbst wurde schrittweise für die gewählten Anwendungsfälle und die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Datenbereitstellung und Funktionalität qualifiziert. Der Idee der agilen Softwareentwicklung folgend ergab sich so ein iteratives Verfahrensmuster, um identifizierte Anforderungen aus den Praxisszenarien aufseiten der Implementierung sukzessive berücksichtigen zu können.

Grundsätzlich wurden bei den praktischen Anwendungsfällen neben einem Benchmark mit einem klassischen Vorgehen folgende Kriterien herangezogen, um neue Prinzipien bei Datenmanagement und Co-Simulation zu evaluieren:

- Serviceorientierte Datenintegration über standardisierte Schnittstellen
- Integration von mindestens zwei Simulationssystemen zur Co-Simulation über Systemgrenzen hinweg (bspw. Kopplung von Wärmebedarf und Fernwärmenetzsimulation)
- Einsatz dynamischer Simulation für Energiemanagementaufgaben
- Integration von Messdaten im Datenmanagementsystem

Die Herausforderung bei der Datenintegration lag darin, Daten aus verschiedenen und formal zumeist heterogenen Bezugsquellen über standardisierte Schnittstellen zusammenzuführen sowie fachlich-semantic miteinander zu verschneiden. Die Orchestrierung und Harmonisierung dieser Datendienste war im vorliegenden SimStadt-Workflow noch nicht vorhaben und musste im Zuge des Vorhabens entwickelt werden. Das Grundgerüst der neuen Komponente ließ sich über einen Webservice des 3D-Geodatenservers *novaFACTORY* realisieren, der das 3D-Gebäudemodell mit den zugehörigen Fachdaten zur Verfügung stellt. Informationen zu leitungsgebundenen Fernwärme- und Stromnetzen sowie Sensordaten zum Monitoring der Energie-Infrastruktur konnten dagegen nicht automatisiert eingebunden und mussten daher weitestgehend manuell über geeignete Schnittstellen hinzugefügt werden. Die Aufga-



ben der neuen Datenintegrationsplattform lagen jedoch nicht nur in der Zusammenführung der Eingangsdaten, sondern auch in die Berechnungen der Szenarien sowie in der Variantenbewertung aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht.

Da nicht alle benötigten serviceorientierten Datendienste operationell im Einsatz befindlich sind, sollten die nicht vorhandenen Dienste zu Evaluierungszwecken über die HFT und MOSS bzw. im Anwendungsszenario Mainz über das Fraunhofer IGD (CityServer3D) bereitgestellt werden. Die Integration des serviceorientierten Datendienstes über novaFACTORY diente dabei gleichzeitig auch als Test, um landesweite 3D Gebäudedatenbestände, wie sie mit novaFACTORY beispielsweise durch das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung bereitgestellt werden, einzubinden. Im Fall des Praxisszenario Stuttgarts sollte überprüft werden, ob dieser bundesweit verfügbare Datenbestand durch lokale Daten angereichert werden können. Der konkrete Vorteil läge darin, dass ein detailliertes 3D-Stadtmodell mit zahlreichen semantischen Gebäudeattributen wie Baujahr, Anzahl Stockwerke und teilweise auch ein Sanierungsjahr genutzt werden kann, wenn es – wie im Fall der Stadt Stuttgart - bereits vorhanden ist.

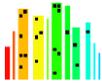
Im Rahmen des Vorhabens sollte, unter Einbindung aller involvierter Organisationen, ein Konzept erarbeitet werden, wie vorhandene Datendienste über standardisierte Methoden und Schnittstellen langfristig (auch über das Projektende hinaus) bereitgestellt werden können. Hierzu waren insbesondere die Zugriffsbedingungen, datenschutzrechtliche Belange und ein Preis- bzw. Lizenzmodell zu untersuchen bzw. zu klären.

Für die Umsetzung der ausgewählten Anwendungsfälle Stuttgart und Mainz war aufbauend auf der Datenintegrationsplattform folgender Workflow geplant:

- Datenbeschaffung durch Orchestrierung von Datendiensten (Stuttgart / Mainz)
- Spezifikation der Szenarien
- Datenaufbereitung für Szenarien (statistische Verteilung, Netzgenerierung)
- Referenzprozess: klassische Planung ohne SimStadt (GEF)
- Simulation von Szenarien mit SimStadt, Ergebnisse werden in novaFACTORY / WEGA gespeichert
- Analyse und Vergleich der Ergebnisse der Szenarien: SimStadt / Referenzprozess
- Reportgenerator für Ergebnisse (Dashboard, Übersicht)
- Dokumentation, wie diese Plattform von außen genutzt werden kann, z.B. web-basierte Definition eines Szenarios, Visualisierung der Ergebnisse (in Varianten / Variantenvergleich)

SimStadt war bereits dazu in der Lage, Daten der realen städtebaulichen Situation und eines Planungszustandes zu verwalten. Mit SimStadt 2.0 sollte darüber hinaus erreicht werden, die Plattform zur Evaluierung verschiedener Verfahren der Planung, Überwachung und Steuerung der Energieinfrastruktur auszubauen. In diesem Zusammenhang war SimStadt für folgende Aufgaben zu qualifizieren:

- Anlegen und Verwalten von beliebigen Szenarien zu einem Stadtgebiet
- Anlegen und Verwalten von Planungsvarianten innerhalb der Szenarien
- Anstoßen von Simulationen zu den einzelnen Szenarien/Varianten
- Verwalten der Daten, auch der Simulationsergebnisse, mit ihrem Szenarien-/Variantenbezug
- Visualisieren der Ergebnisse der einzelnen Szenarien und Varianten

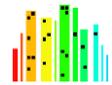


- Szenarien-/Variantenvergleiche und Darstellen/Visualisieren der Ergebnisse
- Anreichern mit Realdaten (z. B. Mess- und Sensordaten)
- Vergleich der Szenarien/Varianten mit der Ist-Situation
- Kurz-, mittel- und langfristige Szenariobetrachtungen, aufsetzend auf die übernommenen Realdaten.

Die etablierten Geodaten-Standards (CityGML, OGC) und GIS sind bislang nicht auf die Verwaltung dynamischer Daten ausgerichtet. Das trifft sowohl auf Versionsverwaltungen als auch auf zeitlich aufgelöste Informationen wie Sensordaten zu, so dass diese Daten mit den aktuellen Standards nicht verarbeitet werden können. Deshalb sollte mit SimStadt 2.0 ein System entwickelt, aufgestellt und konzipiert werden, dass diesem geplanten dynamischen Datenmanagement gerecht wird.

Das folgende Anwendungsprozedere soll die praktischen Anforderungen an ein dynamisches Datenmanagement mit SimStadt 2.0 verdeutlichen:

1. SimStadt verwaltet die städtebauliche Ist-Situation in einer Basisversion (avisiertes Ergebnis des Vorhabens).
2. Von dieser Basisversion können beliebige Szenarien aufgelegt und von jedem Szenario wieder neue Versionen für Planungsvarianten entwickelt werden. Jede Version übernimmt die Daten ihrer Vorgängerin, so dass diese lediglich um die geänderten Daten angereichert werden müssen. Parallel können die Veränderungen der Ist-Situation aufgenommen werden. Indem die Basisversion fortgeführt wird. Zu jedem beliebigen Zeitpunkt können wieder Szenarien mit Planungsvarianten erzeugt werden.
3. Zu jedem Szenario bzw. jeder Planungsvariante können Simulationen/Berechnungen angestoßen werden, die z. B. den Energiebedarf oder die Netzauslastung für die konkrete Version ermitteln und bewerten. Diese Daten können dann zur entsprechenden Version in die Plattform übernommen werden. Damit werden dann Variantenvergleiche zwischen den Ergebnissen und Bewertungen der einzelnen Versionen möglich. Ergänzend sollen auch Mess- und Sensordaten übernommen werden, die den Ist-Zustand beschreiben. Ein Vergleich der zeitlichen Veränderungen der realen Situation wird möglich. Darüber hinaus können die Planungsszenarien mit dem Ist-Zustand verglichen und validiert werden. Es wird des Weiteren möglich, aus den Ist-Daten (z. B. aktuelle Wetterprognosen) Szenarien zum kurz- und mittelfristigen Energiebedarf zu simulieren. Für den Datenaustausch wird weiterhin der OpenGIS-Standard CityGML, ergänzt um eine kontextuell im Rahmen des Vorhabens weiterentwickelte CityGML Energy ADE, verwendet.



5. Ergebnisse

Gegenüber der bei Antragstellung in der Gesamtvorhabenbeschreibung dargestellten Arbeits- und Zeitplanung ergaben sich im Zuge der Bearbeitung des Vorhabens sporadisch notwendige Anpassungen. Diese betreffen vornehmlich den zeitlichen Ablauf, aber zum Teil auch die inhaltliche Abgrenzung der einzelnen (Teil-)Arbeitspakete zueinander. Soweit möglich werden die erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse im Folgenden anhand der thematischen Zuordnung zum ursprünglichen Arbeitsplan dargestellt. Sofern hier im Einzelfall keine Eindeutigkeit gegeben ist, wird darauf explizit Bezug genommen.

5.1 AP 1: Spezifikation der Szenarien

Die Anforderungsanalysen zu Anwendungsszenarien (AP 1.1) und Bewertungsverfahren (AP 1.2) wurden methodisch durchgeführt. Die Erarbeitung erfolgte weitestgehend kollaborativ im Gesamtverbund. Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Teilarbeitspaketen wurden die Ergebnisse in einem gemeinsamen Dokument, dem Lastenheft (Anlage 1), zusammengeführt.

Das Lastenheft kategorisiert, spezifiziert und priorisiert alle technischen, inhaltlichen, funktionalen und qualitativen Anforderungen (Lasten) an das Produkt bzw. die im Rahmen des Vorhabens zu entwickelnde Lösung aus Sicht des designierten Anwenders in der Praxis. Bei dem so entstandenen Ergebnisdokument handelt es sich um einen Leitfaden für die technische Umsetzung. Die Lasten wurden jedoch generell lösungsneutral formuliert, um für die spätere Implementierung keine dezidierten Lösungswege oder Technologien vorab zu implizieren.

5.1.1. AP 1.1: Daten- und Prozessanforderungsanalyse

Methodik

Die angewandte Methodik der Daten- und Prozessanforderungsanalyse verfolgte einen Top-Down-Ansatz. Im ersten Schritt wurden zunächst der Anwendungszweck, die Fachdomäne und die designierten Anwender-Zielgruppen für das Planungshilfsmittel identifiziert. Auf dieser Grundlage konnten die übergeordneten Zielstellungen identifizierter Praxisanwender definiert werden und sich im Folgenden hierdurch auch das Anwendungsspektrum eingrenzen lassen. Dabei wurde die Verfahren in der Praxis auf diejenigen Teilprozesse heruntergebrochen, die der Zielerreichung dienen und in denen SimStadt als Instrument eingesetzt werden soll. Im folgenden Schritt konnten – anhand exemplarischer Betrachtung der konkreten Praxiszenarien der Verbundpartner – die situativen Anwendungskontexte genau beschrieben werden. Hierbei handelt es sich also um den eigentlichen Planungsgegenstand, d. h. den thematischen Inhalt der Planung.

Aus den Anwendungsfällen (Planungsprozesse) und dem inhaltlichen Planungsgegenstand ließen sich schließlich dezidierte Anforderungen an SimStadt ableiten. Aus der Analyse der Planungsprozesse ergeben sich funktionale (Bedienung, Berechnung und Bewertung) und technische (Interoperabilität und Integration) Kriterien, aus der Betrachtung des Gegenstands dagegen inhaltliche (Objekte und Eigenschaften) und qualitative (Ausprägung und Granularität). Diese Anforderungsdimensionen dienen auch der Gliederung des Lastenhefts. Abschließend wurden die Anforderungen priorisiert. Eine Priorisierung

ist v. a. dort erforderlich, wo sich verschiedene Anforderungen überschneiden oder ggf. widersprechen. Sie erfolgt in einer dreistufigen Skala:

- optionale Anforderungen (unverbindliche Kriterien);
- relevante Anforderungen (verbindliche Kriterien);
- obligatorische Anforderungen (Ausschlusskriterien).

Eingrenzung des Planungsgegenstands

SimStadt dient der Simulation energetischer Aspekte für die Planung und Bewertung urbaner Energiesysteme. Im Zuge des Verbundvorhabens SimStadt 2.0 liegt der Fokus bei der Ausarbeitung und Praxisevaluierung dabei in erster Linie auf dem Sektor Wärme, d. h. der Prozess- und Raumwärmebereitstellung sowie der Trinkwarmwasseraufbereitung. Eine isolierte Betrachtung von Wärmesystemen ist im Regelfall aufgrund der stark wechselwirkenden Kopplung zu anderen Energiesektoren (Zugang zu Brennstoffen für die Wärmeherzeugung, parallel anfallender Strom bei Kraft-Wärme-Kopplung, Einsatz von Power-to-Heat, Wasser als Wärmetransportmedium) jedoch nicht zielführend. Zur Wärmeherzeugung und -verteilung kommen grundsätzlich sowohl zentrale leitungsgebundene Systeme (Nah- und Fernwärmenetze) als auch dezentrale Lösungen (Mini-BHKW, Wärmepumpen, Solarthermie, industrielle Abwärme etc.) sowie Kombinationen aus beiden Optionen in Betracht.

Eingrenzung des Anwendungskontexts

An komplexen technischen Planungsaufgaben im urbanen Maßstab ist in der Regel eine Vielzahl von Stakeholdern und Experten unterschiedlicher Fachdisziplinen beteiligt. Für zielgerichtete Kreativ- und effiziente Bearbeitungsprozesse werden daher integrative methodische Ansätze verfolgt, sodass ganzheitliche Planungen im kommunalen Kontext immer auf verschiedenen hierarchischen Ebenen stattfinden (siehe **Abbildung 1**).

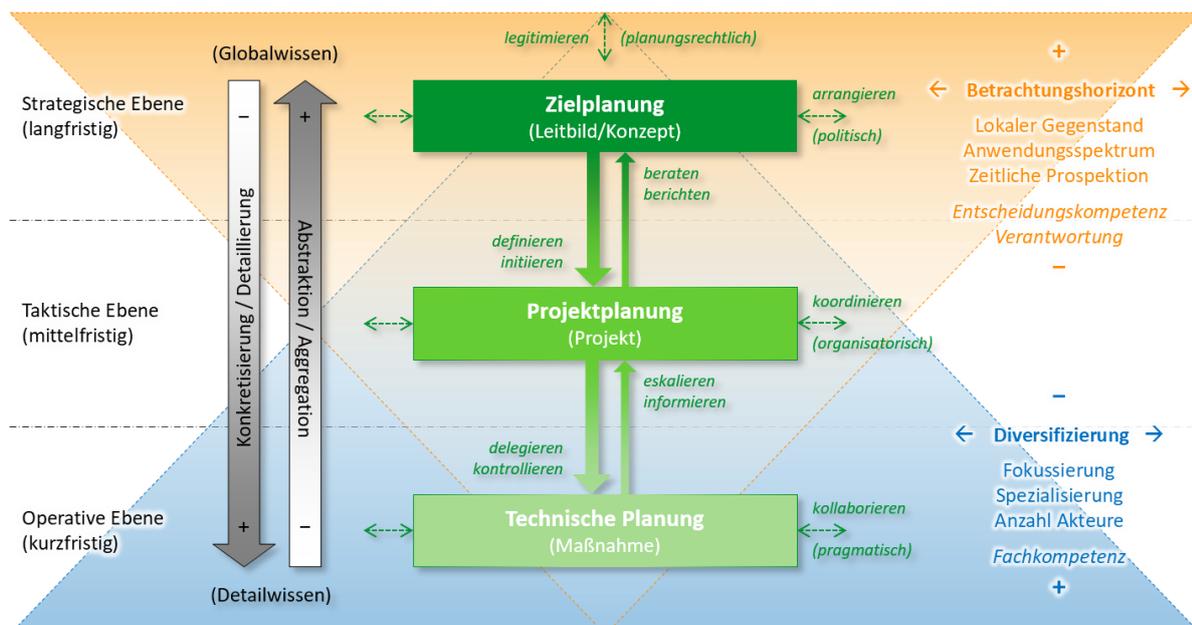
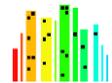


Abbildung 1: Systemische Ebenen der Planung [3]



Auf der obersten hierarchischen Ebene werden Planungsvorhaben bzw. Projekte initiiert. Dies umfasst die Definition der Projektziele, eine Festlegung konkreter Vorgaben und zu erfüllender Anforderungen sowie die Bereitstellung und Einsetzung der zur praktischen Umsetzung erforderlichen Ressourcen. Die strategische Ebene verfügt über einen weit gefassten Betrachtungshorizont; dieser umfasst lokal das gesamte Gebiet bzw. alle Objekte mit planungshoheitlichem Zugriff und muss darüber hinaus langfristige zukünftige Entwicklungen berücksichtigen. Dabei sind grundsätzlich alle relevanten thematischen Aspekte einzubeziehen, auch wenn diese kein dedizierter Bestandteil des eigentlichen Planungsgegenstands sind. Eine isolierte Betrachtung einzelner Teile des komplexen urbanen Systems ist aufgrund der zahlreichen Wechselwirkungen dagegen prinzipiell nicht zielführend. Wegen des zumeist sehr hohen Umfangs der multikriteriellen Betrachtungen können jedoch kaum technische Details aufgenommen und verarbeitet werden. Die wenigen Akteure auf der strategischen Ebene verfügen jedoch über weitreichende Entscheidungskompetenz, der Besitz planungsspezifischen Expertenwissens ist hingegen nicht zwingend erforderlich.

Auf der untergeordneten taktischen Planungsebene, der Projektplanung, werden alle strategischen Vorgaben administrativ umgesetzt. Die Projektstruktur (Phasen, Arbeitspakete, Rollen und Zuständigkeiten) wird definiert und während des Bearbeitungsprozesses sukzessive angepasst. Außerdem werden der Planungsgegenstand und die Anforderungen an die technische Umsetzung konkretisiert. Analog dazu nehmen Diversifizierung und Spezialisierung der Beteiligten zu. Die Akteure werden somit zahlreicher und verfügen sowohl über planungsspezifisches Fachwissen als auch administrative Kompetenz. Die taktische Ebene ist damit das zentrale Bindeglied eines Planungsvorhabens. Zum einen wird das Team der Projektbearbeitung aufgestellt und während des gesamten Planungsprozesses gesteuert; zum anderen fungieren die beteiligten Akteure auch als fachlicher Berater der strategischen Ebene und bereitet deren Entscheidungsgrundlagen vor.

Die detaillierte Ausarbeitung eines Planungsvorhabens findet schließlich auf der operativen Ebene statt. Hier beteiligte Akteure verfügen in der Regel über eine hohe fachliche Qualifikation für bestimmte Aufgabengebiete. Mit der zunehmenden Spezialisierung und Konzentration auf einzelne lokale und thematische Ausschnitte der Planung erreicht auch die Konkretisierung des Bearbeitungsgegenstands ihr Maximum. Der Detailreichtum nimmt also weiter zu. Ebenso wachsen auf der operativen Ebene die Anzahl der Akteure und ihre fachliche Diversifizierung, sodass sich auch der Organisations- und Koordinationsaufwand signifikant erhöht. Fachlich-technische Abstimmungsprozesse finden dabei im Regelfall untereinander statt (horizontale Kommunikation), die organisatorische Leitung und fachliche Kontrolle obliegen dagegen der taktischen Ebene.

Die vertikale Kommunikation innerhalb einer Planungshierarchie erfolgt grundsätzlich nach dem Prinzip „Delegieren – Eskalieren“. Die übergeordnete Ebene formuliert, terminiert und adressiert Aufgaben; ist es absehbar, dass der Adressat auf untergeordneter Ebene einen Auftrag nicht innerhalb der vorgegebenen Frist erfüllen kann, muss dies möglichst frühzeitig zur Reorganisation nach oben eskaliert werden.

Neben den in einen Planungsprozess involvierten Akteuren (Planern) kann es im Laufe eines Verfahrens außerdem erforderlich sein, die Interessen externer Stakeholder zu berücksichtigen. Dies ist bspw. der Fall, wenn unbeteiligte Dritte von den Maßnahmen oder Ergebnissen der Planung mittelbar betroffen oder aufgrund planungsrechtlicher Bestimmungen einzubeziehen sind. Eine aktive Beteiligung externer Stakeholder findet im Regelfall jedoch nicht statt.

Eingrenzung der Anwendungsfälle

Planer auf der operativen Ebene werden mit Detaillösungen konkreter technischer Probleme oder Fragestellungen beauftragt. Der Gegenstand ihrer Aufgaben zeichnet sich somit auch durch eine sehr hohe fachlich-technische Detaillierungstiefe aus. Zur professionellen Bearbeitung müssen daher geeignete Expertenwerkzeuge für fachspezifische Anwendungen eingesetzt werden. Die Ausführung erfolgt zu meist isoliert vom übergreifenden Projektkontext und konzentriert sich auf die jeweilige Aufgabenstellung. Der Einsatzzweck von SimStadt liegt dagegen in einer integrierten Simulation ganzheitlicher Entwicklungsszenarien im urbanen Maßstab, eine differenzierte Auflösung technischer Details einzelner Systemkomponenten und -fragmente ist dabei nicht vorgesehen. Die Anwendung in operativen Planungsprozessen ist somit nicht zielführend.

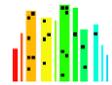
Einen holistischen Fokus auf den Planungsgegenstand nimmt die strategische Ebene ein, technische Details werden dagegen kaum berücksichtigt. Da die Entscheidungsträger oftmals über keine planungsspezifische Fachkompetenz verfügen, sollten adäquate Instrumente zu ihrer Unterstützung eingesetzt werden. Hierbei geht es vor allem darum, langfristige Effekte sowie nachhaltige Konsequenzen strategischer Weichenstellungen transparent, nachvollziehbar und (auf quantitativer oder indikativer Basis) bewertbar zu machen. Probate Mittel sind neben einer fachlichen Beratung bspw. Machbarkeitsstudien oder konzeptionelle Vorentwürfe; die entsprechende Unterstützung bzw. Vorbereitung kommt dabei vor allem von der taktischen Planungsebene.

Einen großen Fortschritt bei den strategischen Planungshilfsmitteln bringen jedoch computergestützte Prognose- und Simulationswerkzeuge, die Entwicklungsszenarien über einen längeren Zeitraum darstellen und dabei auch innere sowie äußere systemische Wechselwirkungen einbeziehen können. Die strategische Planungsebene stellt somit den für SimStadt prädestinierten Anwendungsfall dar. Ein signifikanter Mehrwert dabei läge darin, nicht nur ein bestimmtes Entwicklungskonzept isoliert zu simulieren, sondern mehrere alternierende Planungsvarianten durchzuspielen. Auf diese Weise können die strategischen Entscheider bereits in einer sehr frühen konzeptionellen Entwicklungsphase Planungsentwürfe oder deren Vorgaben und Rahmenbedingungen gegeneinander abwägen.

Die strategische und taktische Ebene komplexer Planungsvorhaben im urbanen Kontext können demnach als designierte Anwender identifiziert werden (s. **Abbildung 3**). Gemäß der beschriebenen Methodik eines hierarchischen Planungsprozesses ist die strategische Ebene der adressierte Nutzer generierter Simulationsergebnisse. Eine selbstständige Benutzung der Software zur Konfiguration der Szenarien ist aufgrund des fehlenden Fokus für technische Details jedoch nicht vorgesehen. Als Bediener fungiert somit die taktische Ebene, die über die notwendige Fachkompetenz verfügt und damit ihrer beratenden bzw. unterstützenden Funktion nachkommt. In die Definition der Szenarien können dabei die Ziele und Instruktionen der übergeordneten Instanz einfließen.

Eingrenzung der Anwender

Ziel des Verbundvorhabens ist die Fortentwicklung der Softwareplattform SimStadt für die 3D Simulation urbaner Energiesysteme zur Analyse und Auslegung von Versorgungsinfrastrukturen. Der Fokus liegt dabei sowohl auf Gebäuden (Verbraucherseite) als auch auf den Energiesystemen und -verteilnetzen (Erzeugung und Verteilung). Designierte Anwender (auf strategischer und taktischer Planungs-



ebene) sind damit kommunale bzw. regionale EVU als Entwickler und Betreiber der lokalen Versorgungsinfrastruktur sowie kommunale Gebietskörperschaften, denen die territoriale Planungshoheit in Städten und Gemeinden obliegt.

- **Energieversorgungsunternehmen (EVU)**

EVU werden als primäre Anwendergruppe identifiziert. Um ihren Versorgungsauftrag sowie betriebswirtschaftliche und ökologische Kriterien zu erfüllen, müssen die Energiesysteme fortlaufend angepasst, weiterentwickelt und optimiert werden. Dabei gilt es, sich ständig sowohl auf ändernde Kundenbedarfe als auch auf energie- und klimapolitische Rahmenbedingungen einzustellen.

Die EVU erfüllen die zur Anwendung von SimStadt erforderlichen Voraussetzungen. Sie verfügen im Regelfall über eine differenzierte Datengrundlage zu den lokalen Energiesystemen sowie über das erforderliche domänenspezifische Fachwissen zur Entwicklung von Erzeugeranlagen und Verteilnetzen.

- **Kommunale Gebietskörperschaften**

Städte und Gemeinden werden als sekundäre Anwendergruppe identifiziert. Für eine nachhaltige Stadtentwicklung gilt es, energetische Aspekte bereits in frühen Phasen der Bauleitplanung einzubeziehen und mit den lokalen EVU abzustimmen. Konkreter Anwendungskontext auf kommunaler Ebene ist damit die vorbereitende Bauleitplanung, d. h. insbesondere die Verfahren zur Aufstellung von Flächennutzungsplänen (FNP).

Adressiert werden auf kommunaler Seite somit insbesondere die administrative Stadtplanung auf taktischer sowie die politischen Entscheidungsgremien auf der strategischen Ebene. Die SimStadt-Plattform wäre darüber hinaus für den frühzeitigen planungsbezogenen Austausch zwischen Kommunen und EVU prädestiniert.

- **Energie-Consultings, Ingenieurbüros und freie Architekten/Stadtplaner**

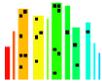
Insbesondere kleine Gemeinden und kommunale Versorger verfügen größtenbedingt über eine geringe fachliche Diversifizierung. Wenn in Ihren Organen planungsrelevantes Wissen oder benötigte Fähigkeiten fehlen, wird diese Expertise in der Regel durch eine Beauftragung externer Dienstleister ergänzt. Auf der strategischen Ebene werden zudem häufig professionelle Berater hinzugezogen, um die verantwortlichen Entscheidungsträger mit Ratschlägen, Analysen oder Studien zu unterstützen.

Sind externe Dienstleister direkt in den Planungs- und Abstimmungsprozess involviert, handeln diese jedoch grundsätzlich stellvertretend für ihre Auftraggeber. Aus diesem Grund wird die Gruppe nicht als expliziter Anwender der SimStadt-Software identifiziert.

Planungsziele und Anforderungsdimensionen

Die Anwender verfolgen mit ihrer Planung stets übergeordnete, d. h. strategische Zielsetzungen. Alle Instrumente, die im Zuge der Planungsprozesse eingesetzt werden, sind Mittel zur Erfüllung der festgelegten Ziele. Die übergeordnete Anforderung an jedes Planungshilfsmittel ist daher seine grundsätzliche Zweckdienlichkeit.

Bei der primären Zielgruppe der EVU lassen sich folgende übergeordneten Ziele identifizieren und priorisieren:



- Optimierung der Wirtschaftlichkeit des eigenen Betriebs (ökonomische Effizienz)
- Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit der eigenen Energiesysteme (ökologische Effizienz)
- Gewährleistung der Versorgungssicherheit
- Steigerung der öffentlichen Akzeptanz (kann als Teil der ökonomischen Effizienz betrachtet werden, speist sich in großem Maß aus ökologischer Effizienz und Versorgungssicherheit)

Bei der sekundären Zielgruppe der Stakeholder kommunaler Gebietskörperschaften werden vornehmlich die Zielstellungen einer nachhaltigen Stadtentwicklung verfolgt:

- Langfristiger Umwelt-, Natur- und Klimaschutz
- Langfristige wirtschaftliche Prosperität
- Langfristige soziale Sicherheit und sozialer Frieden
- Langfristige Bewahrung der soziokulturellen Identität und des historischen Erbes
- Kurzfristiger Wahlerfolg

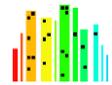
Des Weiteren könnte das SimStadt Tool sowohl der primären als auch sekundären Zielgruppe zur Unterstützung von KfW 432 Projekten dienen. Die Förderinitiative des Bundes bezuschusst die Erstellung von Konzepten zur energetischen Quartierssanierung.

Aufgrund der Zusammensetzung des SimStadt 2.0 Konsortiums und der verfügbaren Grundlage realer Praxisdaten konzentrieren sich die Verbundpartner bei der Spezifikation der Anforderungen in erster Linie auf die primäre Zielgruppe. Sollten dabei jedoch mögliche Konflikte mit den Anforderungsprofilen kommunaler Anwendungsfälle sichtbar werden, beabsichtigen die Verbundpartner auch einen Dialog mit entsprechenden Anwendern zu führen.

Identifikation exemplarischer Anwendungsfälle in der Praxis

Auf Grundlage der Eingrenzung konnten bei den Praxispartnern SWS und MSW bereits konkrete Anwendungsfälle zur weiteren Untersuchung und späteren Evaluierung von SimStadt identifiziert werden:

- **Neubau eines Quartiers:** Ein Bauträger möchte auf einem frei werdenden Areal den Neubau eines Quartiers realisieren und sucht einen Contracting Partner für die Wärme- und Stromversorgung der Liegenschaften.
- **Erweiterung eines Quartiers:** Der Bauträger möchte sich mit einem Neubau an ein bestehendes Nahwärmeversorgungsnetz anschließen und Wärme über einen Wärmeliefervertrag beziehen.
- **Erwerb einer Wärmezentrale und eines Nahwärmenetzes in einem bestehenden Quartier:** Der Besitzer mehrerer Liegenschaften möchte die in die Jahre gekommene Heizzentrale und das dazugehörige Nahwärmenetz veräußern. Eine Übernahme und die damit einhergehende Erneuerung soll geplant und kalkuliert werden.
- **Neubau eines Nahwärmenetzes in einem bestehenden Quartier:** Je ein Quartier werden bisher dezentral bzw. mit Strom beheizt. Im Zuge einer Sanierung soll nun geklärt werden, ob die Integration eines Nahwärmenetzes mit Heizzentrale sinnvoll erscheint.



- **Neues Stadtviertel:** Auf einer industriellen Konversionsfläche entsteht ein neues Stadtviertel. Dieses soll neben am Rande gelegenen Schulgebäuden hauptsächlich Geschosswohnungsbau und Flächen für Einzelhandelssortimenter aufweisen (Gewerbeflächen). Unterschiedliche Versorgungsvarianten sollen in Bezug auf die Gesamt-wirtschaftlichkeit hin gegenübergestellt werden. Das Ergebnis soll als Vorgabe in den städtebaulichen Vertrag mit den Erschließungsträgern eingestellt werden. Die Versorgungsvarianten schließen an das vorgelagerte Netz (Strom/Gas/Fernwärme) an. Entscheidungskriterien sind Ökologie, Wirtschaftlichkeit und Platzbedarf.
- **Baugebiet mit Fernwärme:** An ein bestehendes Fernwärme-Netzgebiet (Anschlusszwang und somit Investitionsdruck für den Fernwärmeversorger) in Randlage wird ein Baugebiet angeschlossen. Das Baugebiet befindet sich an einem hydraulisch schlechten Punkt. Durch den neuen Baustandard sind im Vergleich zur gelieferten Wärme hohe Netzverluste wahrscheinlich. Daher ist die Variante gegenüber dezentralen Varianten zu bewerten. Trotz des Benutzungszwanges gibt es i. d. R. Möglichkeiten der Befreiung von der Satzung bzw. die Anforderung an die Stadtplanung Derartiges zu ermöglichen. Die Wirtschaftlichkeit ist vor dem Hinblick der Anschlussquote darzustellen.
- Ein weiteres Szenario betrachtet ebenfalls ein Neubaugebiet. Dies umfasst **neben Einfamilienhäusern zusätzlich Büro- und Verwaltungsgebäude**. Das Gebiet ist bereits erschlossen und es liegen gemessene Verbrauchsdaten zur Validierung vor.
- **Umgestaltung eines bestehenden Fernwärmenetzes:** Ein bestehendes herkömmliches Fernwärmenetz soll zukünftig klimaneutral betrieben werden. Dabei stellt sich u. a. die Herausforderung der Realisierung eines „offenen“ Systems mit einer verteilten Einspeisung dezentraler – ggf. auch volatiler erneuerbarer – Energien. Hier sind bspw. die Fragen zu klären, wo ist eine Verdichtung des Netzes sinnvoll ist und ob es wirtschaftlich ist, ein Parallelnetz ohne die bisherigen Restriktionen aufzubauen.

5.1.2. AP 1.2: Bewertungsverfahren für Planungsvarianten

SimStadt soll als strategisches Planungshilfsmittel für urbane Entwicklungsvorhaben im energetischen Kontext mit zuvor angegebenen Zielstellungen zum Einsatz kommen. Entsprechend der Spezifikation des Anwendungsfalls werden die Eingabe- und Ausgabeseite differenziert betrachtet.

Dateneingabe (Input)

Eine Anwendung beginnt mit der Dateneingabe. Zunächst muss ein aktuelles virtuelles Geodaten- bzw. Stadtmodell der Gebietskörperschaft (Istzustand) eingespielt oder ein bereits eingespieltes aktualisiert werden. Mögliche Quellen neben dem Geodatenserver novaFACTORY von MOSS sind bspw. kommunale Geoinformationssysteme (GIS), das amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) oder das freie 3D Austauschformat CityGML.

Zu Beginn jedes urbanen Planungsvorhabens, das mit dem SimStadt-Tool analysiert oder entwickelt werden soll, muss zudem eine spezifische Projektkonfiguration durch einen fachlich versierten Anwender durchgeführt werden. Hier wird das Szenario definiert, d. h. der lokale Planungskontext eingegrenzt

sowie alle projektrelevanten Kriterien, Vorgaben und Einschränkungen festgelegt. Bei mehreren zeitlichen Simulationsschritten können ggf. auch Postkonfigurationen einzelner prospektiver Simulationsvarianten erforderlich werden.

Datenverarbeitung (Processing)

Nach erfolgter Dateneingabe und Projektkonfiguration kann die Simulation bzw. Variantenberechnung durchgeführt werden (siehe **Abbildung 2**). Bei Bedarf müssen in diesen Datenverarbeitungsprozess auch spezialisierte Fachanwendungen – bspw. eine thermohydraulische Netzberechnung mit STANET® – integriert werden. Die Integration erfolgt entweder durch direkte Einbindung in SimStadt (bspw. INSEL®) oder durch indirekte Anbindung (STANET®); bei der Anbindung werden mehrere Bedienschritte außerhalb des SimStadt-Tools durch einen versierten Fachanwender erforderlich.

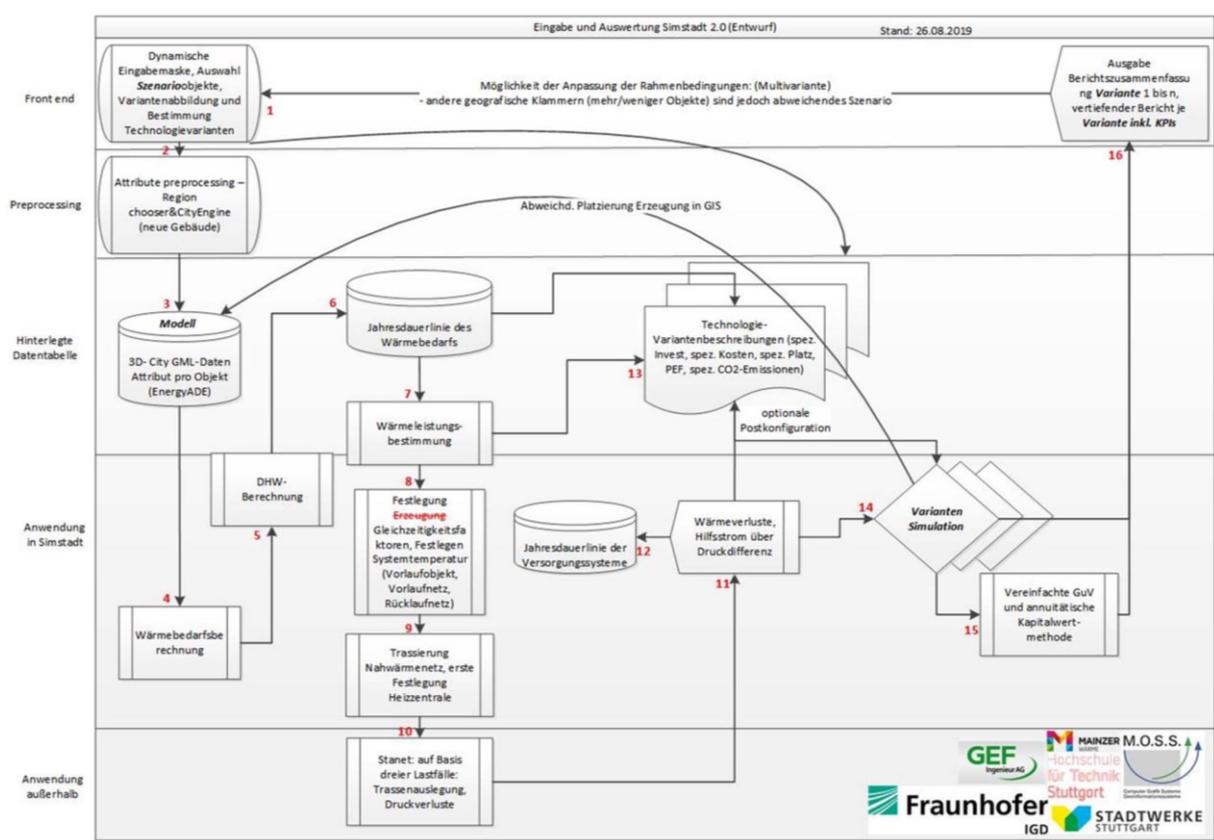
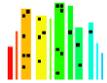


Abbildung 2: SimStadt Workflow

Datenausgabe (Output)

Die finalen Berechnungs- bzw. Simulationsergebnisse werden visualisiert.

Zur weiteren Verarbeitung sollte es zudem möglich sein, die Ergebnisse in den kommunalen Geodatenpool zurückzuspielen oder als Ausgangsbasis für weitere Simulationsschritte in SimStadt zu benutzen, bzw. in die WEGA_Variantenverwaltung zu übernehmen und dort für die weitere Bearbeitung bereitzustellen.



5.1.2.1. Gliederung des Bearbeitungsgegenstands

Bei kommunalen Entwicklungsvorhaben handelt es sich in der Regel um mehrstufige Planungsverfahren, die einen mittel- bis langfristigen urbanen Transformationsprozess zum Ziel haben. Planungsunterstützende Instrumente sollten daher nicht nur bestimmte (retrospektive, aktuelle oder prospektive) Zustände des inhaltlichen Gegenstands abbilden (deskriptiver Ansatz), sondern auch den Entwicklungsprozess selbst – seine Genese – beschreiben können (präskriptiver Ansatz).

Erläuterung und Definition der Begriffe

Das (Gesamt-)Modell bildet als Ausgangsbasis jeder Planung – je nach Datenverfügbarkeit und -qualität – den räumlichen, baulichen und energetischen Istzustand der gesamten Gebietskörperschaft ab. Es lässt sich nach Bedarf zu einzelnen räumliche Sektionen bzw. Ausschnitten disaggregieren. Diese Teilmodelle dienen der expliziten Darstellung lokal eingegrenzter Teile der kommunalen Gemarkungsfläche (bspw. urbane Entwicklungsflächen, Stadtteile, Liegenschaften oder Bestandsquartiere). Beim Gegenstand eines Planungsvorhabens, dem Projekt(-modell), handelt es sich im Regelfall also um ein Teilmodell der Gebietskörperschaft. Die Genese eines Planungsverfahrens wird durch verschiedene Versionen eines Projekts ausgedrückt. Jede Version hat eine designierte Bezugszeit und drückt entweder den gegenwärtigen Ist- oder einen zukünftigen Sollzustand aus. Versionen dienen jedoch lediglich der semantischen Abbildung einer Genese, nicht der Repräsentation des objektbezogenen Bearbeitungsgegenstands; daher handelt es sich bei einer Version also nicht um ein Teilmodell. Alle temporären oder finalen Sollzustände des Planungsgegenstands werden mittels Varianten erfasst. Eine Variante ist immer einer Version zugeordnet, wobei eine Version – z. B. zur Darstellung verschiedener Planungsalternativen oder bei alternierender Multivarianten-Simulationen – generell über mehrere Varianten verfügen können muss. Eine Variante kann dagegen in unterschiedlichen Zuständen in verschiedenen Versionen vorkommen; auf diese Weise sollen einzelne Zeitschritte eines Entwicklungsstrangs abbildbar gemacht werden. Zur vollständigen und konsistenten Darstellung der Genese muss jede Version eines prospektiven Soll- bzw. Prognosezustands die jeweilige Variante ihrer Vorgängerversion, auf der sie aufgebaut wurde, explizit referenzieren; lediglich beim initialen Istzustand entfällt diese notwendige Referenz.

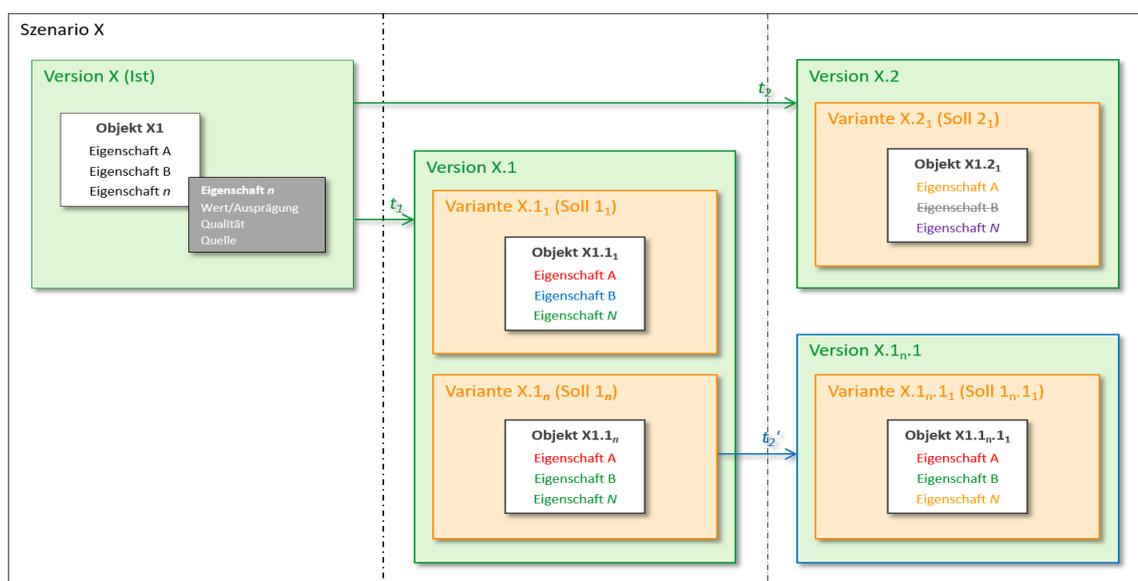


Abbildung 3: Genese alternierender Prognosevarianten

Ein dezidiertes Objekt oder eine Objekteigenschaft muss in verschiedenen Varianten unterschiedliche Ausprägungen einnehmen können. Gleichfalls ist es erforderlich, dass neue Objekte oder Eigenschaften im Zuge einer Genese hinzukommen oder bestehende entfernt werden (siehe **Abbildung 3**).

5.1.2.2. Spezifikation

Die Spezifikation des Lastenhefts ist multikriteriell und erfolgt in unterschiedlichen Kategorien, die den Anforderungsdimensionen – der funktionalen sowie den nicht-funktionalen, also der technischen, inhaltlichen und qualitativen – entsprechen. Dabei werden die Eingabe- und Ausgabeseite in allen Kategorien differenziert betrachtet, da jeweils unterschiedliche Aspekte relevant sind.

Funktionale Anforderungen der Eingabe- und Ausgabeseite werden aus den formulierten Anwendungsfällen sowie von den fachspezifischen Ansprüchen der identifizierten Anwendergruppen abgeleitet. Zur Darstellung wird dabei auf skizzenhafte Mockups (Anschauungsmodelle) einer grafischen Benutzeroberfläche zurückgegriffen. Die technischen Anforderungen spezifizieren die erforderlichen Datenschnittstellen auf der Eingabe- und Ausgabeseite, um SimStadt in die vorgesehenen Praxisprozesse integrieren zu können. Inhaltliche Anforderungen definieren die erforderlichen Datengrundlagen (Eingabeseite) und die gewünschten Kalkulationsergebnisse (Ausgabeseite). Qualitative Anforderungen sollen in erster Linie Rückschlüsse auf die Belastbarkeit einer Berechnung erlauben.

Funktional

Eine übergeordnete Anforderung an die Bedienbarkeit einer interaktiven Software ist ihre Benutzerfreundlichkeit (Usability). Darunter fallen die Aspekte Zweckmäßigkeit, Ergonomie, Effizienz, intuitive Erlernbarkeit, Plausibilität, Verständlichkeit und Transparenz. Konkrete funktionale Anforderungen lassen sich vorab jedoch nur anhand des formulierten Anwendungsfalls ableiten. Zur vereinfachten Veranschaulichung einer entsprechend anwendungsgerechten Funktionalität wurden Mockups für eine grafische Benutzeroberfläche erstellt. Sie bilden die Visualisierungs- und Steuerelemente zur Anlage eines neuen Projekts und zur Konfiguration des Entwicklungsszenarios ab. Da Anforderungen prinzipiell lösungsneutral zu definieren sind, haben alle Mockups lediglich exemplarischen Charakter. Sie sind daher weder bindend noch schließen sie alternative Lösungen aus.

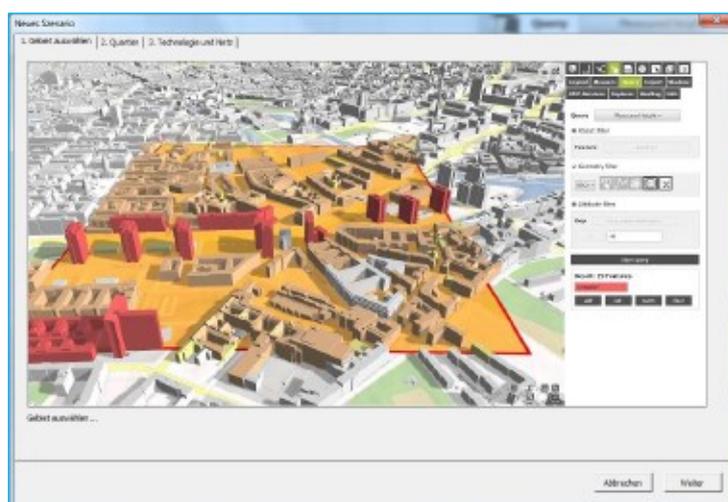


Abbildung 4: Lokale Eingrenzung (Mockup)



Wird ein neues Projekt in SimStadt angelegt, startet der Konfigurationsprozess des Szenarios mit der Definition bzw. Eingrenzung des lokalen Planungsgegenstands (siehe **Abbildung 4**). Hierbei kann es sich entweder um neu zu entwickelnde Flächen oder um Bestandquartiere handeln. Vom Vorhandensein einer adäquaten Datenbasis (ein aktuelles, vollständiges und konsistentes virtuelles Stadtmodell) wird an dieser Stelle ausgegangen. Die Auswahl sollte grafisch über eine Visualisierung des Stadtraums erfolgen, bspw. eine eingebundene 3D Ansicht des CityGML Gesamtmodells. Dabei muss es möglich sein, sowohl zusammenhängende Flächen über eine geschlossene polygonale Umrandung zu erfassen als auch bestehende Geoobjekte einzeln zu selektieren bzw. aus einer bestehenden Auswahl zu de-selektieren. Der lokale Gegenstand eines Projekts kann sich grundsätzlich aus mehreren Arealen zusammensetzen, die nicht zwingend in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander liegen müssen; entsprechend müssen mehrere serielle Auswahlsschritte möglich sein. Ggf. kann es auch erforderlich werden, den lokalen Kontext eines Projekts im Verlauf der Planung anzupassen, eine Auswahl also nachträglich zu ändern.

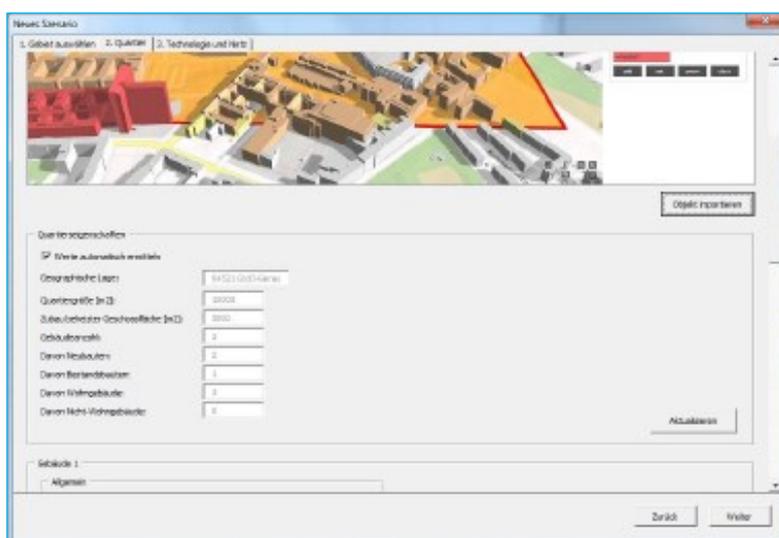


Abbildung 5: Konfiguration Quartierseigenschaften (Mockup)

In dem in **Abbildung 4** und **Abbildung 5** dargestellten Beispiel ist es zudem möglich, das vorhandene Stadtmodell bei Bedarf nachträglich zu editieren. Semantische Eigenschaften von Geoobjekten lassen sich manuell hinzufügen, bearbeiten oder löschen, überzählige Geoobjekte entfernen oder fehlende aus unterschiedlichen Quellen (bspw. CityGML, GIS oder STANET) einlesen und ergänzen. Außerdem werden die Eigenschaften einer aktuellen Benutzerauswahl angezeigt. Von Interesse könnten bspw. die Anzahl und summierte Größe der gewählten Flächen, die Anzahl selektierter Objekte sowie Aggregationen bestimmter semantischer Eigenschaften (Einwohnerzahl, Energiebedarf, Maß der baulichen Nutzung etc.) sein.

Nach der Auswahl des lokalen Planungsgegenstands beginnt die eigentliche Konfiguration eines Entwicklungsszenarios. Neben zahlreichen Angaben zur Definition der angestrebten Entwicklung – z. B. Ziele, Zeithorizonte, Anforderungen und Einschränkungen – kann es, bspw. bei Neubau- oder Sanierungsprojekten, erforderlich sein, die spezifischen Eigenschaften bestimmter Objekte für das Szenario vorzugeben (siehe **Abbildung 6**); diese Angaben beziehen sich auf ein Projekt und werden nicht in das

Gesamtmodell zurückgespielt. Ggf. sollte es zudem möglich sein, bestimmte Objekte (Gebäude, Liegenschaften, Versorgungsinfrastruktur) auch um individuelle generische Attribute oder Eigenschaften zu erweitern.

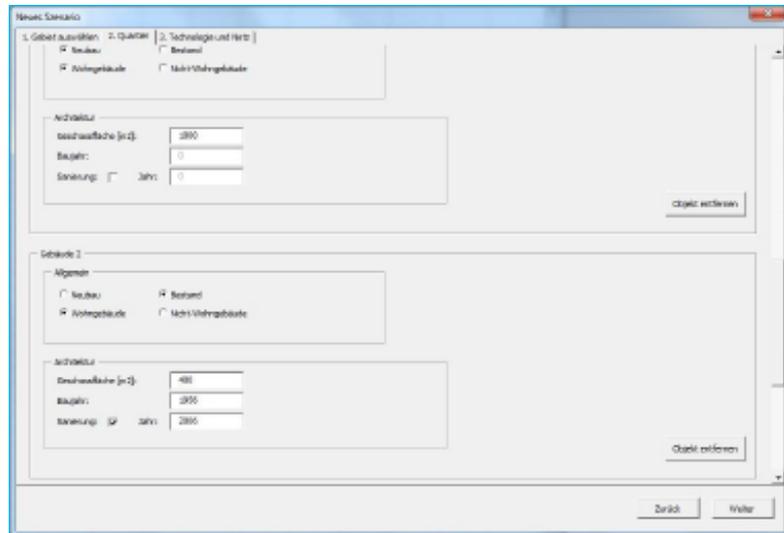


Abbildung 6: Definition Objektattribute (Mockup)

Im finalen Schritt zur Konfiguration eines Szenarios erfolgt eine Vorauswahl der Versorgungstechnologie (siehe **Abbildung 7**). Dabei handelt es sich in erster Linie um nicht zu unter- oder überschreitende Grenzwerte und optionale Einschränkungen (Constraints) der späteren Variantenberechnung. Auf diese Weise ließen sich limitierende Ausschlusskriterien vorgeben oder bestimmte, nicht infrage kommende Technologievarianten bereits vorab ausschließen.

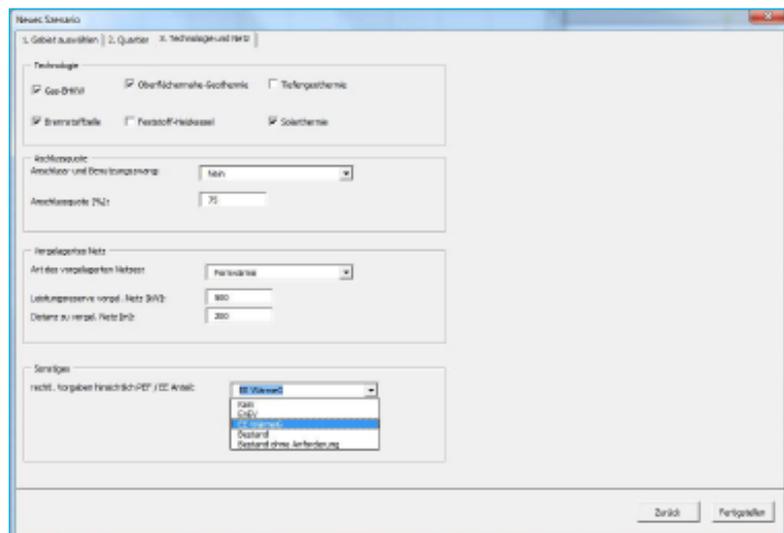
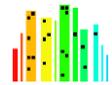


Abbildung 7: Einschränkung der Technologieauswahl und Rahmenbedingungen (Mockup)

Technisch

Der Datenverarbeitungsprozess in SimStadt erfolgt auf der Basis des virtuellen 3D Stadtmodells CityGML. In den als Anwendungsfall identifizierten Planungsprozessen der Praxispartner MSW, SWS und



GEF sind jedoch auch Werkzeuge etabliert, die auf abweichenden Schnittstellen bzw. Austauschformaten aufbauen.

Für die technische Einbettung des SimStadt-Tools in die Planungsprozesse der Praxispartner konnten die folgenden Schnittstellen identifiziert werden. Die Schnittstellen für Dateninput und -output werden differenziert betrachtet.

Input (Bestandsmodelle der Topografie, Gebäude, Verkehrs- und leitungsgebundenen Versorgungsinfrastruktur sowie Architektur- bzw. Ingenieursmodelle geplanter Gebäude und Infrastrukturobjekte):

- CityGML
- GIS: ESRI Shape
- Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS®): NAS als XML. Beim AAA-Output kann üblicherweise gewählt werden zwischen:
 - ALKIS® Bestandsdaten des Liegenschaftskatasters
 - ALKIS® Bestandsdaten des Liegenschaftskatasters ohne Buchungsstellen und Eigentümerangaben
 - ALKIS® Bestandsdaten des Liegenschaftskatasters, nur Flurstücke mit Buchungsstellen und Eigentümerangaben sowie die Objekte der tatsächlichen Nutzung
- STANET: ESRI Shape, CSV
- CAD: Autodesk DWG/DXF, Industry Foundation Classes (IFC)

Output (Simulationsvarianten):

- CityGML
- GIS: ESRI Shape
- ALKIS®: NAS als XML
- STANET: ESRI Shape, CSV
- Druckausgabe, PDF

Inhaltlich

Inhaltliche Anforderungen beschreiben die aus den identifizierten Praxisanwendungsfällen abgeleiteten Daten bzw. Informationen, die für die Verarbeitung in SimStadt erforderlich sind oder bei Bedarf herangezogen werden können. Auch bei Ihrer Spezifikation müssen die Dateneingabe- und Ausgabeseite (Input/Output) differenziert betrachtet werden.

Die Spezifikation wird zugunsten der Übersichtlichkeit tabellarisch dargestellt (vgl. Anlage 1 „Lastenheft“, S. 23 ff., siehe **Abbildung 8**). Auf diese Weise sind durchgehend einheitliche Gliederungen und Gruppierungen möglich. Mit Spalten und Zeilen verfügen Tabellen grundsätzlich nur über zwei Ordnungsdimensionen; da die Spezifikation auf der Dateneingabeseite jedoch mehrere Ordnungsdimensionen erfordert, erfolgen hier situativ zusätzliche Unterteilungen einzelner Zellen einer Zeile.

| Kriterium | Typ | KenngroÙe | |
|---|-------------|---|----------------|
| Wärmebedarf | Eigenschaft | Wärmebedarf bei Vollnutzung | KWh/a |
| Anschlussleistung | Eigenschaft | Max. Auslegungswert | KW |
| Wärme-Anschlussleitungstrasse | Objekt | Geometrie + geografische Lage | LOD1 K |
| Gas-Anschlussleitungstrasse | Objekt | Geometrie + geografische Lage | LOD0 K |
| Hilfsstrombedarf Wärmebereitstellung | Eigenschaft | Max. Auslegungswert | KWh (V |
| Wärmeverlust | Eigenschaft | Kritischer Maximalwert | KWh / l |
| Druckverlust | Eigenschaft | Kritischer Maximalwert | bar |
| Wärmeerzeugung | Eigenschaft | Erzeugertypen | (aus Bil |
| Wärmekapazität | Eigenschaft | Leistung (max.) | KW |
| Erfüllungsgrad | Eigenschaft | Erfüllungsgrad der Versorgung gem. EEWärmeG | % |
| Energetische Nachhaltigkeit | Eigenschaft | PEF | - |
| | | EE-Anteil | % |
| | | CO ₂ -Emissionen | t/a |
| Energieeinsatzkosten | Eigenschaft | Spezifische Energieeinsatzkosten | €/a |
| Platzbedarf Wärmeerzeugung | Eigenschaft | Brutto-Grundfläche | m ² |

Abbildung 8: Auszug inhaltlicher Anforderungen aus dem Lastenheft

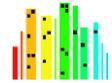
Qualitativ

Allgemeine Anforderungen an die Qualität einer Software liegen in der Zuverlässigkeit, Stabilität und Performanz ihrer Anwendung sowie in der Genauigkeit und Konsistenz der Berechnungsergebnisse. Um Letzteres beurteilen zu können, ist es ggf. notwendig, die Qualität der Daten zu beschreiben.

Die Anforderung zur Beschreibung der Datenqualität betrifft in erster Linie die Eingabeseite zur Abbildung eines Ist- bzw. Ausgangszustands (Bestandsdaten). Um die Belastbarkeit von Berechnungen oder Prognosen später bewerten zu können, ist es erforderlich, die Verlässlichkeit bestimmter Eingabedaten explizit auszuzeichnen. Diese Auszeichnung gibt darüber Aufschluss, wie akkurat, aktuell oder korrekt ein Datum die tatsächliche Realität beschreibt. Auf diese Weise soll – speziell im Kontext identifizierter Anwendungsfälle auf strategischer Planungsebene – u. a. sichergestellt werden, dass keine falschen Entscheidungen aufgrund unzureichender Informationsgrundlagen getroffen werden.

Skala zur Auszeichnung der Datenqualität:

- **Annahme:** Das Datum wurde ohne genauere Kenntnis der realen Situation festgelegt.
- **Schätzung:** Das Datum wurde mit ungefährender Kenntnis der realen Situation eingeschätzt.
- **Interpolation** bzw. **Extrapolation:** Das Datum wurde auf Basis der Kenntnis lokal benachbarter und/oder typologisch ähnlicher Situationen ermittelt.
- **Statistisch:** Das Datum wurde auf Basis vorhandener Teilinformationen unter Zuhilfenahme empirischer Typologien zugewiesen (bspw. Kennwerte aus der Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) auf Basis des Baujahrs, der Nutzung und der Morphologie).
- **Historisch:** Das Datum wurde alten Informationsquellen (Pläne, vergangene Messungen etc.) entnommen; seine Aktualität ist nicht bekannt und entspricht möglicherweise nicht oder nicht mehr der realen Situation.
- **Messung** bzw. **Aufnahme:** Das Datum wurde vor Ort abgebildet bzw. verifiziert und entspricht der aktuellen Realität.



Datenschutzrechtliche Aspekte

Bei Wärmebedarfsanalysen und der Planung urbaner Versorgungssysteme müssen ggf. auch sensible Daten verarbeitet werden. Hierzu zählen bspw. Aussagen zur energetischen Qualität einzelner Gebäude sowie alle Angaben zu Energieverbräuchen oder -bedarfen bei einer bestimmten Adressschärfe. Um Rückschlüsse auf sensible Informationen zu vermeiden, kann es bei der Ausgabe von Berechnung- bzw. Simulationsergebnissen daher erforderlich sein, Konzepte zur Datenanonymisierung, -aggregation oder -bereinigung umzusetzen. Dazu kann bspw. auch auf entsprechende Vorarbeiten des Verbundvorhabens GEWISS (siehe Kap. 3.1.2) zurückgegriffen werden.

Eine explizite Auszeichnung der datenschutzrechtlichen Sensibilität dezidierter Informationen auf der Eingabeseite ist dagegen nicht erforderlich, da dies nicht nur bestimmte Wertausprägungen einzelner Kriterien, sondern diese Kriterien insgesamt betrifft. Die Sensibilität lässt sich also strukturell verorten und in der SimStadt-Businesslogik berücksichtigen.

5.1.3. AP 1.3: Spezifizierung und Integration von Maßnahmen-Konzepten und eines Szenario-Managements

Zur kollaborativen Bearbeitung der Workflow-Prozesse zwischen der HFT und MOSS wurde auf Grundlage der Anforderungen des Lastenhefts eine Systemarchitektur konzipiert (siehe Abbildung 9). Die technologische Basis des Konzepts bilden dabei die Softwareumgebungen novaFACTORY(nF) und WEGA des Verbundpartners MOSS.

Eine übergeordnete Zielstellung des Entwicklungsverfahrens lag darin, dass sich einzelne Prozesse bzw. Abschnitte der Prozesskette in den technischen Umgebungen des fachlich jeweils zuständigen Verbundpartners ausführen lassen. Eine vollständige Realisierung dieses Ansatzes konnte im Bearbeitungszeitraum allerdings nicht erreicht werden. Die Umsetzung wurde weitestgehend auf der MOSS-Umgebung durchgeführt und dabei Teile der Bearbeitungstools der HFT eingebunden. Dezidierten Zugriff erhielt HFT dabei über einen Remote-Service.

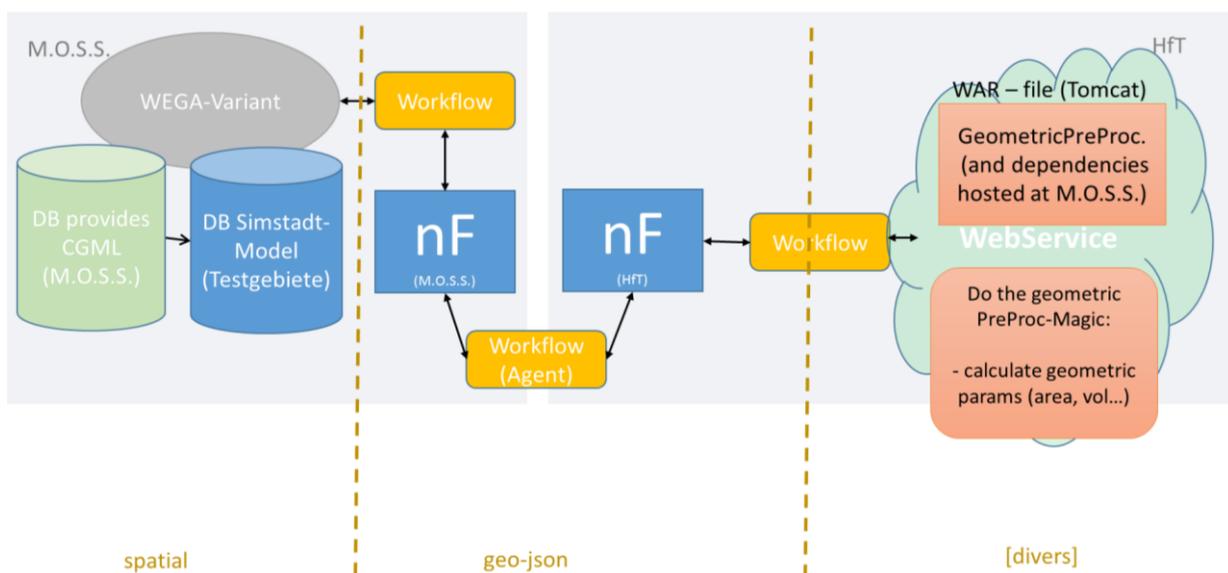


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Systemarchitektur

Szenario-Management

Für eine zentrale Speicherung der Ausgangsdaten, Zwischenergebnisse und der jeweiligen Simulationsergebnisse war es erforderlich eine Plattform zu schaffen, auf die alle Verbundpartner zugreifen können. Diese Plattform sollte auch eine einheitliche, einfache und effektive Verwaltung der Daten und Ergebnisse der Simulationen in den entsprechenden Varianten ermöglichen. Dazu wurde die bei MOSS bereits vorhandene und für Planungszwecke zugeschnittene Technologie WEGA-Variant/novaFACTORY erweitert und anforderungsgerecht angepasst.

Neben der Möglichkeit zur Speicherung der Daten in frei definierbaren Datenmodellen und dem Ableiten von (multiplen, alternierenden) Varianten stellt das System auch Schnittstellen bereit, um allgemeine und/oder spezielle Daten aus dem Modell zu exportieren bzw. in das Modell zu importieren. In diese Im- bzw. Exportfunktion können zusätzliche Schritte zur Bearbeitung der Daten (Fachprogramme) implementiert werden. So besteht letztlich die Möglichkeit, komplette Roundtrips (Datenkreisläufe) zusammenzustellen und zu verwenden.

Die Persistierung (Speicherung und Haltung) der Daten erfolgt in einem RDBMS (Relational Database Management System) mit einer adäquaten Spatial-Erweiterung (für die Handhabung raumbezogener Geodaten); damit können sowohl Geometrie- als auch Sachdaten in einer einzigen Datenbank zusammengeführt und verwaltet werden.

Die Beziehungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten werden in **Abbildung 10** über nummerierte Pfeile abgebildet.

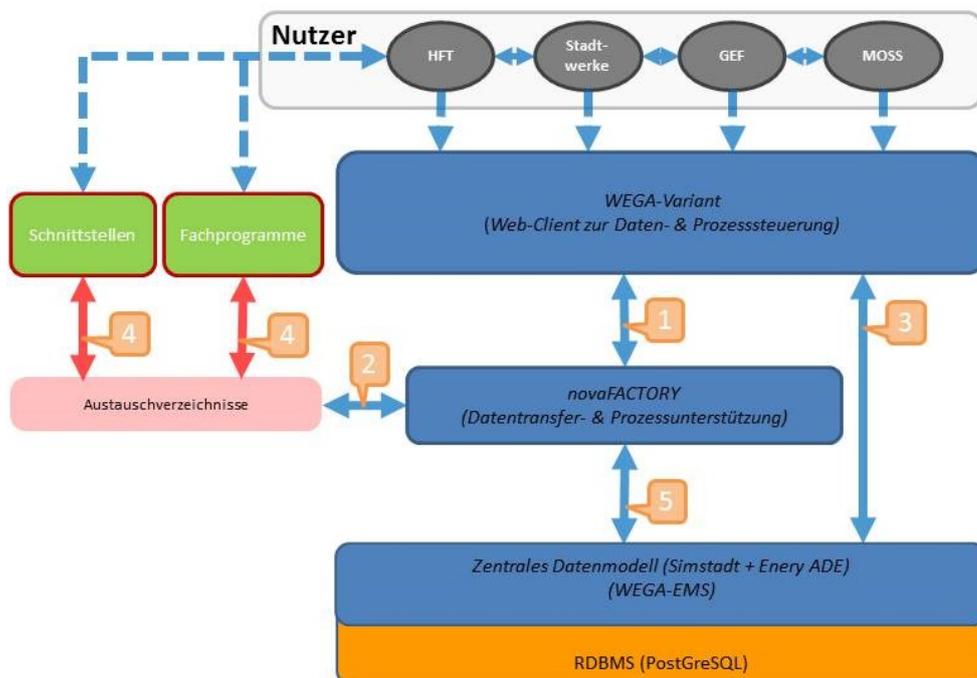
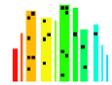


Abbildung 10: Systemarchitektur der (Multi-)Variantenverwaltung

1. WEGA kommuniziert mit novaFACTORY via http über die RemoteServlet-Schnittstelle von novaFACTORY. Hierüber werden insbesondere die folgenden Operationen durchgeführt:



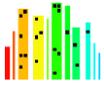
- Generierung einer Dateiauswahlliste für die Wahl einer zu importierenden Datei aus dem nutzerbezogenen Austauschverzeichnis,
 - Initialisierung eines Importprozesses oder
 - Initialisierung eines Exportprozesses.
2. novaFACTORY hat via Fileprotokoll lesenden und schreibenden Zugriff auf die nutzerbezogenen Austauschverzeichnisse, um die folgenden Operationen auszuführen:
 - Lesen des Verzeichnisinhaltes für die Import-Dateiauswahlliste in WEGA,
 - Abholen einer zu importierenden Datei im Rahmen des Importprozesses sowie
 - Ablegen einer exportierten Datei als Abschluss des Exportprozesses.
 3. WEGA kommuniziert mit WEGA-EMS via http über die EMS REST Schnittstelle, um:
 - Informationen zu existierenden Objektklassen, Projekten und Varianten zu ermitteln und anzuzeigen,
 - Geo- und Sachdaten aus Projekten und Varianten anzuzeigen oder
 - Editieroperationen auf diesen Daten durchzuführen.
 4. Die Fachanwendungen haben via Fileprotokoll lesenden und schreibenden Zugriff auf die nutzerbezogenen Austauschverzeichnisse, um die folgenden Operationen auszuführen:
 - Ablage eines Datenstandes, der in eine Variante des zentralen Datenbestandes überführt werden soll;
 - Lesen eines Datenbestandes, der aus dem zentralen Datenbestand exportiert wurde, um in einer der Fachanwendungen weiter verarbeitet zu werden.
 5. novaFACTORY kommuniziert via http mit WEGA-EMS über die EMS REST Schnittstelle, um:
 - Fachdaten in eine Variante zu importieren,
 - Fachdaten aus einer Variante zu exportieren sowie
 - Datenkreisläufe auszuführen.

Datenmodell

Bei der Erstellung des Datenmodells lag das Hauptaugenmerk auf der Objektklasse Gebäude, da diese bei den Berechnungen die größte Rolle spielten und dort das Gros der Ausgangsdaten gebunden ist. Die Ausgangsbasis dafür stellte die CityGML Energy ADE dar. Erweitert wurde das Datenmodell um Daten, die für die Berechnung des Wärme- und Heizungsbedarf sowie um deren Ergebnisse erforderlich sind.

Die anderen Objektklassen des Datenmodells bilden das Wärme-Leitungsnetz ab. Es sind die Klassen für die Repräsentation von

- Wärmeerzeugern („Heatgenerator“),
- Wärmeverbrauchern („Heatconsumer“),
- Wärmetauschern („Heatexchanger“),
- Wärmeleitungen („Heatpipe“) und
- Abzweigungs- oder Anschlusspunkten im Wärmeleitungsnetz („Heatnode“)



vorhanden. Für die anforderungsgerechte Beschreibung dedizierter Attribute (bspw. Gebäudefunktionen oder Leitungstypen) wurden Bibliotheken abgebildet. Das resultierende Datenmodellschema ist im Anhang „EMS-Datenmodell SimStadt“ vollständig abgebildet (siehe Anlage 2).

Das Softwaremodul zur Erstellung und Verwaltung von Datenmodellen für WEGA-Variant ist WEGA-EMS. Dort können über eine intuitiv zu bedienende grafische Benutzeroberfläche

- die Objektklassen,
- die Verbindungen zwischen den Objektklassen,
- die Katalogdaten der Bibliotheken,
- die Darstellungsebenen,
- die gewünschte grafische Ausprägung sowie
- sämtliche Elemente

festgelegt und angepasst werden. Über die Benutzeroberfläche lässt sich auch steuern, mit welchem Name die Attribute in der Bearbeitungsmaske von WEGA-Variant angezeigt werden sollen. Weiterhin kann festgelegt werden, welche Attribute als Pflichtfelder behandelt werden sollen, welche Attribute mit Katalogen verknüpft werden und welchen Datentyp die jeweiligen Attribute haben.

5.2 AP 2: Integration von Sachdaten

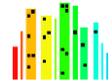
Für eine praxisnahe Berechnung bzw. Simulation des Energiebedarfs sind beschreibende Informationen zu den Gebäuden notwendig. Ziel des Arbeitspakets war es, Verfahren zur Integration von Sachdaten aus bestehenden Datenquellen und damit die Schließung von Datenlücken auszuarbeiten, zu testen und zu validieren. MSW und GEF leisteten Unterstützung für den Partner HFT bei der Organisation geeigneter Sachdaten für die Evaluierung. Für die Anwendungsszenarien des Partners MSW konnte ein Vertrag zur Bereitstellung und -nutzung von 3D-Geodaten mit der Stadt Mainz geschlossen werden. Daten für die semantische Anreicherung des Stadtmodells werden von MSW und GEF geliefert. Sachdaten für die definierten Anwendungsszenarien in Hessen können über den Projektpartner MOSS bezogen werden.

5.2.1. AP 2.1: Methoden der Datenintegration

5.2.1.1. Nutzung von Schrägluftbildern und Mobile Mapping-Daten zur Anreicherung von Fassaden im 3D-Gebäudemodell

Grundvoraussetzung für die Durchführung der Simulation ist das Vorhandensein von 3D-Gebäudedaten für das jeweilige Untersuchungsgebiet. Bei bereits vorhandenen Gebäuden können diese Ausgangsdaten bei den jeweiligen Kommunen oder bei den Ländern vorliegen. Die Bereitstellung und die Aufbereitung dieser Daten kann zeitaufwendig sein. Weiterhin erfordert es Expertenwissen in der Geodatenverarbeitung, was beim Endanwender nicht zwangsläufig vorliegt.

Um unabhängig von der jeweiligen Quelle und ohne lange Vorbereitungen Simulationen durchführen zu können, wird daher der Zugriff auf einen flächendeckenden und zentral verwalteten Datenbestand angestrebt.



Der Verbundpartner MOSS betreibt einen Dienst, der deutschlandweit 3D-Gebäudedaten bereitstellt. Diese Daten werden aus dem zentralen Datenbestand der **ZSHH** (Zentrale Stelle Hauskoordinaten und Hausumringe) aufgebaut. Die Speicherung der Daten erfolgt in eine zentrale Datenbank. Dazu werden die Daten entsprechend vorverarbeitet. Die Laufendhaltung findet jährlich statt.

Allerdings verfügt dieser zentrale Datenbestand nicht alle relevanten Sachdaten und Kenngrößen, die für Simulationen mit SimStadt erforderlich sind. Daher bestand die Notwendigkeit zur einer Anreicherung mit weiteren Sachdaten, bspw. der Stockwerksanzahl oder dem Fenster-Fassaden-Verhältnis, aus dritten Quellen.

Durch Annahme eines quartiersübergreifenden Mittelwerts (z. B. für das Fenster-Fassaden-Verhältnis) werden in Simulationen akzeptable Ergebnisse erreicht, jedoch ist die Aussagekraft für kleine Einheiten (z.B. einzelne Gebäude) mit relativ großen Unsicherheiten behaftet. Für eine möglichst realistische energetische Gebäudebetrachtung ist das Verhältnis von Fensterfläche zur Gesamtgebäudefläche relevant, da Fenster und Fassade in der Regel erheblich unterschiedliche Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) aufweisen. Erst die genaue Kenntnis der tatsächlichen Fensterflächenanteile einer Fassade liefert daher hinreichend exakte Ergebnisse bei einer Wärmebedarfsanalyse. Durch automatisierte Auswerteverfahren von photogrammetrisch gewonnenen Daten, beispielsweise Schrägluftbilder aber auch 3D Punktwolken, lassen sich entsprechende Sachdaten ergänzen. Auf diese Weise ist es möglich, Stadtmodelle in einem niedrigen Detaillierungsgrad (LOD 1 oder 2) nutzbar zu machen, obwohl aus diesen geometrischen Daten die nötigen Kennwerte i. d. R. nicht abgeleitet werden können.

Zu dem oben beschriebenen Zweck wurde eine hierarchische Methode zur Extraktion von Fenstern an Gebäudefassaden entwickelt. Die Grundlagen dieses Verfahrens wurden im Projekt *iCity*⁷ entwickelt und für die Nutzung in SimStadt erweitert. Das Verfahren besteht im Wesentlichen aus den folgenden Schritten:

- Filtern der Punktwolke, um Ausreißer und Rauschen zu entfernen und ggf. die Auflösung der Punktwolke zu reduzieren;
- Flächen detektieren, um Fassaden zu erkennen und Straßen zu entfernen;
- Inverse Punktwolke erstellen: Fenster sind meist „Löcher“ in der Punktwolke, die inverse Punktwolke beinhaltet dann nur Fenster;
- Fenster einhüllen: Kontur der Fenster aus der inversen Punktwolke ermitteln und ein Hüll-Rechteck bestimmen;
- Einlesen und Überführung der Fenster-Rohdaten in SimStadt Geometrieobjekte (Polygon). Dieser Schritt beinhaltet auch diverse Überprüfungen, z. B. zur Prüfung der korrekten Orientierung, etc.;
- Überprüfen der Validität des CityGML Models und Überführung in das SimStadt Datenmodell;
- Für jedes Gebäude im SimStadt Datenmodell wird überprüft, ob die detektierten Fenster zu einer Fassade (Wall-Surface) dieses Gebäudes passen;
- Eine Zuordnung per Fenster und Gebäudefläche und Gebäude über eine eindeutige Kennung (gmlID) wird durchgeführt und gespeichert.

⁷ <https://www.hft-stuttgart.de/forschung/i-city>

Das beschriebene Verfahren ist beispielhaft in **Abbildung 11** dargestellt. Es zeigt die automatisierte Detektion der Fensterflächen von Fassaden aus einer hochauflösenden Punktwolke, die mittels mobile Mapping für einen ganzen Straßenzug erfasst werden konnten. Eine detaillierte Beschreibung der Grundlagen des Verfahrens findet sich in Schneider und Coors [4]. Die Integration in SimStadt wurde auf dem Workshop *3D-Stadtmodelle* [5] vorgestellt.

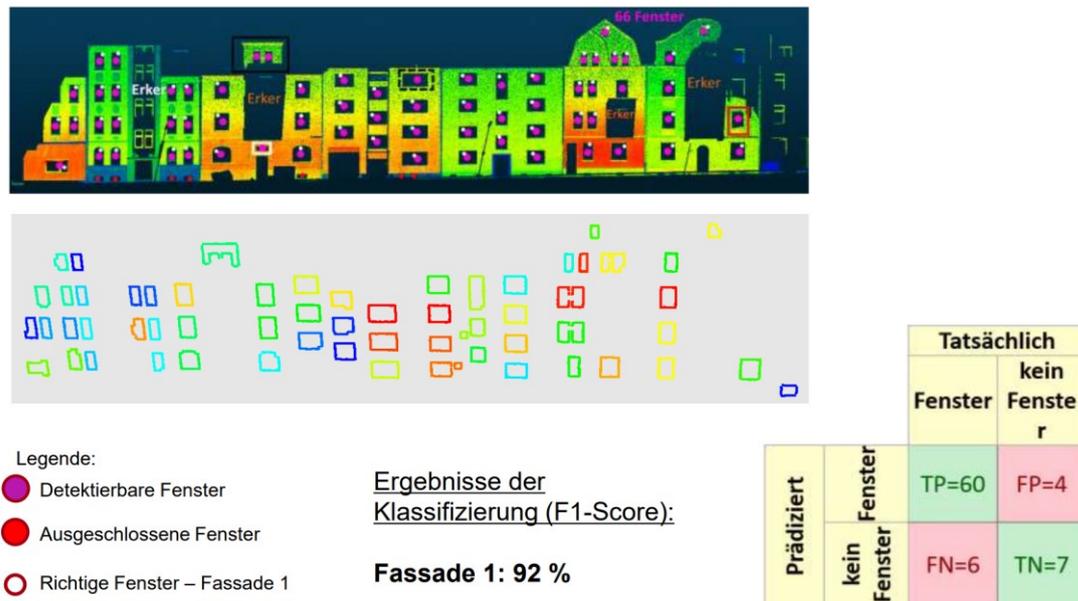


Abbildung 11: Fenster-Extraktion aus einer hochauflösenden Punktwolke von Gebäudefassaden

5.2.1.2. Einbindung von Fremddaten zur Ermittlung von Gebäudefunktionen

Neben den geometrischen Daten sind auch beschreibende Daten (Gebäudehöhe, Gebäudefunktion etc.) enthalten. Die Untersuchung dieser Daten hat gezeigt, dass der Inhalt der Gebäudefunktion (die für die Bedarfsberechnungen wichtig ist) in einigen Fällen nicht genügend differenziert vorliegt. Es wurde oft der Wert „_9998...“ (nach Quellenlage nicht zu spezifizieren) verwendet. Damit ohne zusätzlichen Aufwand für den Endbenutzer eine differenzierte Gebäudefunktion zur Verfügung steht, musste daher nach alternativen Möglichkeiten zur Ermittlung der Gebäudefunktion geforscht werden. Voraussetzung waren auch hierbei frei zugängliche und deutschlandweit verfügbare Daten.

Als Datenquelle, die diese Bedingungen erfüllt und auch eine Unterscheidung in der Gebäudefunktion möglich macht, wurde der Dienst *TopPlus* des *BKG* (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) identifiziert. In der für SimStadt verwendeten Zoomstufe werden die Gebäude anhand der Farbgebung (nach RGB Schema) bzgl. ihrer Funktion differenziert (siehe **Tabelle 1**).

In Gebieten, in den keine Einzelgebäudedarstellung vorhanden ist bzw. wo keine eindeutige Zuordnung nach den oben genannten Kriterien möglich war, wurde die umgebene Fläche zur Ermittlung der Gebäudefunktion herangezogen.

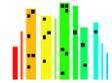


Tabelle 1: RGB-Werte für Gebäudefunktionen nach TopPlus

| | ROT | | GRÜN | | BLAU | |
|----------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| | von | bis | von | bis | von | bis |
| Wohngebäude | 214 | 255 | 167 | 175 | 151 | 159 |
| Wohngebäude | 240 | 252 | 210 | 220 | 200 | 210 |
| Wohngebäude | 225 | 235 | 185 | 201 | 169 | 185 |
| Wohngebäude | 231 | 236 | 200 | 210 | 190 | 195 |
| Wohngebäude | 240 | 255 | 215 | 226 | 205 | 221 |
| Wirtschaftsgebäude | 210 | 220 | 210 | 220 | 210 | 220 |
| öffentliches Gebäude | 245 | 255 | 210 | 220 | 175 | 185 |

Auch die bebauten Flächen werden hinsichtlich ihrer Funktion entsprechend farbig differenziert (siehe **Tabelle 2**).

Tabelle 2: RGB-Werte für Flächenfunktionen nach TopPlus

| | ROT | | GRÜN | | BLAU | |
|---------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| | von | bis | von | bis | von | bis |
| Wohnflächen | 248 | 251 | 243 | 245 | 239 | 241 |
| Gewerbeflächen | 243 | 247 | 243 | 247 | 243 | 247 |
| Öffentliche Flächen | 246 | 250 | 215 | 219 | 253 | 257 |

In einem speziellen Verfahren wurden die Grundrisse der Gebäude mit den aus den TopPlus-Dienst abgeleiteten Rasterdaten verschnitten. Über die Zuordnung der gefundenen Rasterfarbe zu dem entsprechenden Grundriss konnte die Funktion für das jeweilige Gebäude ermittelt werden. Bei Gebäudeflächen (ca. 5%) aus dem Dienst, die zu großen Teilen von anderen Kartenelementen (Beschriftungen, Symbole etc.) verdeckt sind, konnte keine Zuordnung ermittelt werden.

Die so ermittelten Gebäudefunktionen wurden in die oben genannte Gebäudedatenbank übernommen und stehen als zusätzlicher Parameter zur Verfügung (siehe **Abbildung 12**).



Abbildung 12: Gebäudedaten vor und nach Ermittlung der Funktionen

Die zusätzlichen Parameter berücksichtigen auch eine Möglichkeit zur Nutzung des Gebäudedienstes. Wenn in den Originaldaten als Gebäudefunktion „_9998...“ (nach Quellenlage nicht zu spezifizieren) eingetragen ist, wird der Wert aus der zusätzlich ermittelten Gebäudefunktion verwendet.

Innerhalb der Datenverwaltung (WEGA-Variant) wurde ein spezieller Workflow erstellt, der über die oben beschriebene Schnittstelle auf die Gebäudedatenbank zugreift. Es kann für jedes definiertes Untersuchungsgebiet der Gebäudedatenbestand (Grundriss und Sachdaten) gelesen und automatisch entsprechend der Datenstruktur in die EMS-Datenverwaltung gespeichert werden. Darauf aufbauend können die weiteren Schritte (z.B. Ermittlung der Einwohnerzahlen) der Bearbeitung bzw. Simulation erfolgen. Mit der Nutzung dieser Daten und der Workflows können so für beliebige Gebiete innerhalb Deutschlands die Voraussetzungen für die Berechnungen in SimStadt geschaffen werden.

5.2.1.3. Bereitstellung und Integration sozio-demographischer Daten

Um die gemäß Spezifikation des Lastenheftes erforderlichen sozio-demographischen Daten (bspw. Anzahl der Bewohner pro Gebäude) zu beschaffen, wurden verschiedene Quellen geprüft. Voraussetzung für die Nutzbarkeit der Daten sind:

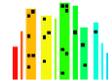
- deutschlandweite Verfügbarkeit;
- geografischer Bezug;
- freie Zugänglichkeit;
- Möglichkeit eines automatisierten Zugriffs;
- Auswertbarkeit mit statistischen Methoden.

Die einzige Datenquelle, die diese formalen und inhaltlichen Anforderungen erfüllten, sind die Daten des **ZENSUS 2011**. Sie werden frei zugänglich auf der Webseite der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder veröffentlicht⁸.

Tabelle 3: Kategorisierung der ZENSUS-Daten



⁸ <https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online/>



Neben den sozio-demographischen Daten sind bei ZENSUS auch semantische Gebäudeinformationen hinterlegt, die zur Verdichtung der SimStadt-Datenbank herangezogen werden können. Ein Vorteil der der ZENSUS-Daten liegt zudem auch darin, dass sie in einer kleinräumlichen Auflösung (pro Hektar) vorliegen. Damit ist eine relativ detaillierte Betrachtungsweise für das jeweilige Untersuchungsgebiet möglich.

Die ZENSUS-Daten sind in die Themenfelder „Bevölkerung“ (sozio-demografische Informationen) und „Gebäude/Wohnung“ (Gebäudeinformationen) gegliedert und in insgesamt 21 Unterkategorien differenziert (siehe **Tabelle 3**).

Im Anhang „Zensusthemen mit Gruppen“ (Anlage 3) sind die Themen mit den entsprechenden Daten-Gruppen aufgelistet. Die Daten liegen in einer tabellenartigen Struktur vor, die jedoch nicht direkt für die Datenübernahme verwendet werden konnte (siehe **Abbildung 13**).

| Gitter_ID_100m | Gitter_ID_100m_neu | Merkmal | Auspraegung_Code | Auspraegung_Text | Anzahl | Anzahl_q |
|------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|--|--------|----------|
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | INSGESAMT | 0 | Einheiten insgesamt | 8 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | ALTER_KURZ | 1 | Unter 18 | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | ALTER_KURZ | 3 | 30 - 49 | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | ALTER_KURZ | 5 | 65 und älter | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | FAMSTND_AUSF | 1 | Ledig | 4 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | FAMSTND_AUSF | 2 | Verheiratet | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | GEBURTLAND_GRP | 1 | Deutschland | 6 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | GEBURTLAND_GRP | 21 | EU27-Land | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | GESCHLECHT | 1 | Männlich | 4 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | GESCHLECHT | 2 | Weiblich | 4 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | RELIGION_KURZ | 1 | Römisch-katholische Kirche (öffentlich-rechtlich) | 4 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | RELIGION_KURZ | 3 | Sonstige, keine, ohne Angabe | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | STAATSANGE_GRP | 1 | Deutschland | 5 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | STAATSANGE_GRP | 21 | EU27-Land | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | STAATSANGE_HLND | 1 | Deutschland | 5 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | STAATSANGE_HLND | 8 | Österreich | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | STAATSANGE_KURZ | 1 | Deutschland | 5 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | STAATSANGE_KURZ | 2 | Ausland | 3 | 0 |
| 100mN26891E43370 | CRS3035RES100mN2689100E4337000 | STAATZHL | 1 | Eine Staatsangehörigkeit | 7 | 0 |
| 100mN26891E43411 | CRS3035RES100mN2689100E4341100 | INSGESAMT | 0 | Einheiten insgesamt | 7 | 0 |
| 100mN26891E43411 | CRS3035RES100mN2689100E4341100 | ALTER_10JG | 1 | Unter 10 | 3 | 0 |
| 100mN26891E43411 | CRS3035RES100mN2689100E4341100 | ALTER_10JG | 3 | 20 - 29 | 3 | 0 |
| 100mN26891E43411 | CRS3035RES100mN2689100E4341100 | ALTER_KURZ | 1 | Unter 18 | 3 | 0 |
| 100mN26891E43411 | CRS3035RES100mN2689100E4341100 | ALTER_KURZ | 2 | 18 - 29 | 3 | 0 |
| 100mN26891E43411 | CRS3035RES100mN2689100E4341100 | ALTER_KURZ | 3 | 30 - 49 | 3 | 0 |
| 100mN26891E43411 | CRS3035RES100mN2689100E4341100 | FAMSTND_AUSF | 1 | Ledig | 4 | 0 |

Abbildung 13: Ausschnitt einer originären ZENSUS-Datei

Deshalb wurden die Daten mittels spezieller Scripte so aufbereitet, dass sie, nach Themen separiert, in einzelne Datensätze aufgesplittet vorliegen. Vorhandene Differenzen (Gesamt/Einzelwerte) wurden ausgeglichen. Für die weitere Verwendung wurden die Daten in eine SQLite-Datenbank (Datenbanken dieses Typs sind in vielen Anwendungen leicht verwendbar) gespeichert. Auf diese Weise stehen die ZENSUS-Daten für eine performante Weiterverarbeitung in SimStadt zur Verfügung (siehe **Abbildung 14**).

Aus den gesamtdeutschen Daten müssen die Werte für das jeweilige Untersuchungsgebiet und für die Gebäude in diesem herausgelöst und in den Datenbestand übernommen werden. Dazu wurde ein spezieller Workflow erstellt. Folgende Schritte sind in diesem Workflow (am Beispiel der Anzahl von Bewohnern pro Gebäude) integriert:

- Informationen für das Untersuchungsgebiet (Sach- und Geometriedaten) aus zentralen Datenbestand lesen;

- Informationen für die Gebäude (Sach- und Geometriedaten) des Untersuchungsgebiets aus zentralen Datenbestand lesen;
- Benötigte ha-Zellen mit ZENSUS-Daten ermitteln, aus Datenbank lesen und Geokoordinaten in benötigtes Referenzsystem konvertieren (siehe **Abbildung 15**)
- Ermittlung der Anteile jede ha-Zelle am Untersuchungsgebiet;
- Ermittlung der Einwohnerzahl in jeder ha-Zelle in Abhängigkeit des Anteils am Untersuchungsgebiet;
- Aufteilung der Einwohnerzahlen auf die Gebäude (in jeder ha-Zelle) anhand des Gebäudevolumens unter Beachtung der Gebäudefunktion;
- Übernahme der ermittelten Bewohneranzahl in den zentralen Datenbestand.

| | koordinate | xwert | ywert | gesamt | AltJG1 | AltJG2 | AltJG3 | AltJG4 | AltJG5 | AltJG6 | AltJG7 | AltJG8 | AltJG9 |
|-----|----------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 181 | 26992004341600 | 4341600 | 2699200 | 17 | 0 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| 182 | 26992004341700 | 4341700 | 2699200 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| 183 | 26992004341800 | 4341800 | 2699200 | 13 | 0 | 3 | 0 | 0 | 7 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 184 | 26992004341900 | 4341900 | 2699200 | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 185 | 26992004342000 | 4342000 | 2699200 | 11 | 5 | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 186 | 26992004342100 | 4342100 | 2699200 | 69 | 5 | 8 | 10 | 6 | 13 | 7 | 7 | 9 | 4 |
| 187 | 26992004342200 | 4342200 | 2699200 | 35 | 3 | 5 | 6 | 3 | 9 | 0 | 3 | 6 | 0 |
| 188 | 26992004342300 | 4342300 | 2699200 | 46 | 7 | 3 | 6 | 9 | 3 | 3 | 5 | 7 | 3 |
| 189 | 26992004342400 | 4342400 | 2699200 | 22 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| 190 | 26992004342500 | 4342500 | 2699200 | 27 | 0 | 3 | 3 | 0 | 3 | 3 | 5 | 7 | 3 |
| 191 | 26992004342700 | 4342700 | 2699200 | 92 | 10 | 11 | 5 | 13 | 16 | 17 | 9 | 8 | 3 |
| 192 | 26992004342800 | 4342800 | 2699200 | 63 | 5 | 7 | 4 | 5 | 11 | 7 | 10 | 6 | 8 |
| 193 | 26992004342900 | 4342900 | 2699200 | 63 | 3 | 5 | 9 | 8 | 7 | 12 | 8 | 7 | 4 |
| 194 | 26992004343000 | 4343000 | 2699200 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 195 | 26992004416500 | 4416500 | 2699200 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 196 | 26992004416600 | 4416600 | 2699200 | 5 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 197 | 26993004333500 | 4333500 | 2699300 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 198 | 26993004333600 | 4333600 | 2699300 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 199 | 26993004338000 | 4338000 | 2699300 | 17 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0 | 3 | 0 |
| 200 | 26993004340700 | 4340700 | 2699300 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 | 0 |

Abbildung 14: Beispiel einer aus ZENSUS-Daten erzeugten Tabelle (Alter in 10er-Gruppen)

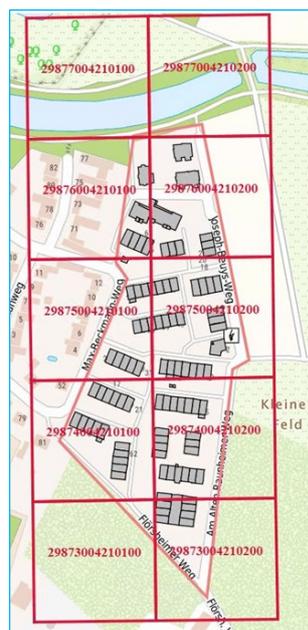
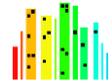


Abbildung 15: Untersuchungsgebiet mit raumbezogener Einteilung in ha-Zellen



Sollte es aufgrund einer unterschiedlichen Bebauung oder einer sehr heterogenen Gebäudestruktur in einer Zelle zu offensichtlich falschen Einwohnerzahlen kommen, kann über einen prozentualen Zellanteil die Einwohnerverteilung verbessert werden. Hierzu lässt sich eine Konfigurationsdatei verwenden, die dann bei der Berechnung berücksichtigt wird.

5.2.1.4. Daten zu Kosten und Ressourcen für Maßnahmen bzw. Szenarien

In Kooperation mit dem *MUSI*-Projekt⁹ wurde ein Workflowschritt in SimStadt integriert¹⁰, um die Eingabe der Wirtschaftlichkeitsparameter für Photovoltaikanlagen möglichst benutzerfreundlich gestalten zu können.

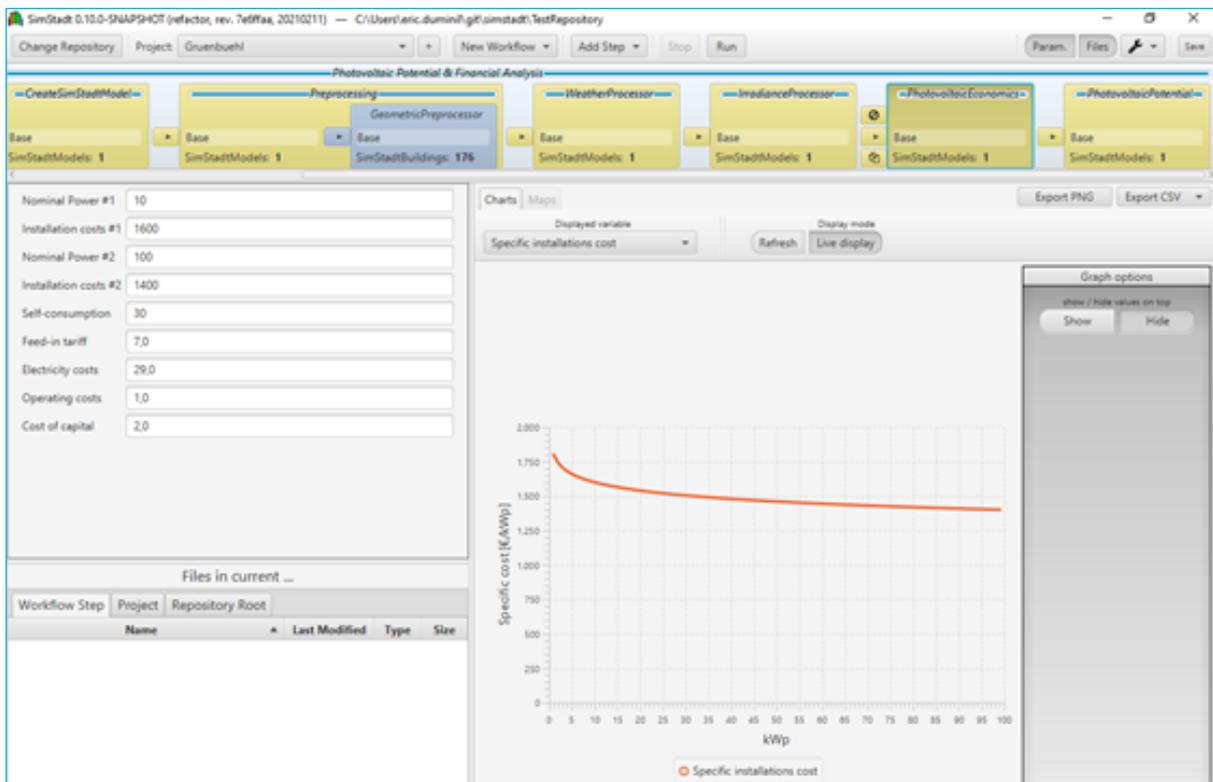


Abbildung 16: SimStadt-Tool – Konfiguration der Parameter für Photovoltaikanlagen

Die Potentialanalyse für Photovoltaikanlagen enthält dann Information zu Wirtschaftlichkeit, wie z.B. Stromgestehungskosten (LCOE), Amortisationszeit oder Kapitalrendite (ROI).

Tabelle 4: Aspekte der PV-Analyse

| PV potential nominal power [kWp] | PV potential yield [MWh/a] | Total investment [€] | Maintenance costs [€/a] | LCOE [c€/kWh] | Net present value [€] | Internal rate of return [%] | Payback period [a] | Discounted payback period [a] | Financial feasibility [0/1] |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 3 | 3,03 | 5114 | 51 | 11,99 | 799 | 3,56 | 14,1 | 16,8 | 1 |
| 92 | 93,07 | 129466 | 1295 | 9,9 | 56330 | 6,08 | 11,4 | 13,1 | 1 |
| 8 | 8,1 | 12955 | 130 | 11,38 | 2934 | 4,22 | 13,3 | 15,7 | 1 |

⁹ <https://www.hft-stuttgart.de/forschung/projekte/aktuell/icity-musi>

¹⁰ <https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/workflowsteps/photovoltaic-economics/>

5.2.2. AP 2.2: Validierung und Plausibilisierung der Sachdaten

Zur Validierung und Plausibilitätsprüfung von Sachdaten wurden zwei Methoden entwickelt: Nutzung der an der HFT entwickelten Software CityDoctor und ein BestGuess Verfahren. Für CityDoctor wurde ein Prüfplan definiert, mit dem die Eingangsdaten für verschiedene Workflows wie Heizwärmebedarf in SimStadt validiert werden können. Die Prüfung von Sachdaten erfolgt hierbei über eine Spezifikation in Schematron. Der Prüfplan wurde in gitlab unter <https://gitlab.com/volkercoors/CiD4Sim/wikis/home> öffentlich zugänglich gemacht. Das öffentliche gitlab Projekt ersetzt die online Dokumentation: „Integration von Plausibilitätsprüfungsfunktionen in den Datenerhebungsverfahren“. Testmodelle werden mit dem Prüfplan zur Verfügung gestellt. Die Prüfergebnisse werden in SimStadt objektbezogen als Metadaten übernommen.

5.2.2.1. Ergebnisse der Validierung mit CityDoctor

Die 3D-Gebäudemodelle der Fallstudien wurden validiert und ggf. repariert. Das Ergebnis soll exemplarisch für Szenario 6 (siehe **Kapitel 5.6**) dargestellt werden. Der detaillierte Prüfbericht der Validierung anhand des o. g. Prüfplans findet sich im Anhang (Anlage 4).

Zusammenfassend sind die häufigsten geometrischen Fehler aufeinanderfolgende doppelte Punkte bei der Definition von Polygonen. Dabei ist zu beachten, dass zwei Punkte als gleich angesehen werden, wenn sie weniger als 0.0001 m voneinander entfernt liegen. Diese Fehler verhindern die Ausführung der meisten nachfolgenden Prüfungen, daher sind weitere Fehler nicht in der Fehlerübersicht aufgelistet. Weiterhin war auffällig, dass vorhandene Dachgauben nicht mit der Gebäudegeometrie verbunden waren (siehe **Abbildung 17**, vgl. **Abbildung 18**). Dadurch konnten diese Dachgauben in SimStadt nicht in der Simulation berücksichtigt werden bzw. führten bei der Simulation zu Fehlern (bspw. bei der Berechnung geometrischer Eigenschaften wie dem Gebäudevolumen).

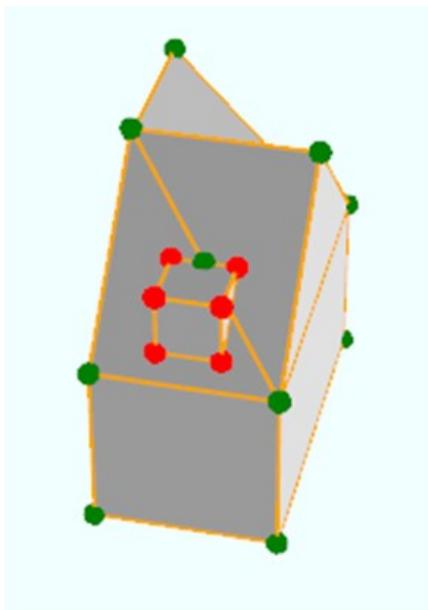


Abbildung 17: Von der Gebäudegeometrie getrennte Dachgaube

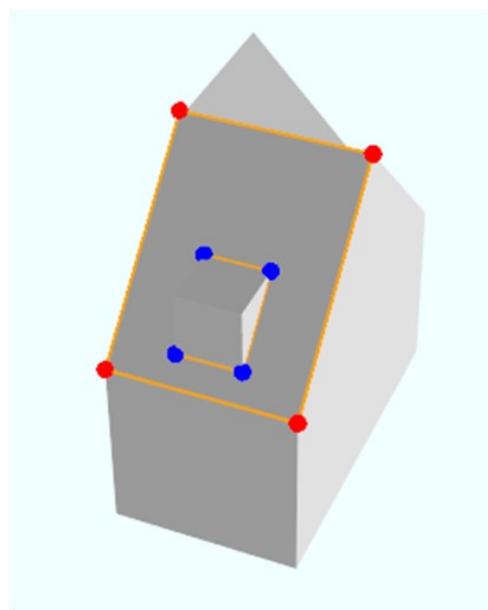
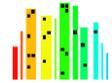


Abbildung 18: Korrekte Modellierung einer Dachgaube



Aufgrund der aufgetretenen geometrischen Fehler war eine Reparatur der Geometrie notwendig. Um die Probleme in der Gebäudegeometrie zukünftig bereits im Modellierungsprozess zu vermeiden, wurde ein Workshop mit der zuständigen Stelle am Umweltamt Mainz durchgeführt.

5.2.2.2. Plausibilitätsprüfung von Sachdaten

Im Sinne der Validierung der Daten sieht die Systemarchitektur die manuelle Verbesserung sowie eine Schnittstelle zur automatischen Validierung der Daten vor. Die Implementierung von Verfahren zum Lückenschluss bzw. zur Generierung vollständiger bestmöglicher Eingangsdaten ist durch den *BestGuess*-Ansatz gewährleistet.

In diesem Zusammenhang wurde eine weitere Methode zur Plausibilitätsprüfung entwickelt, die den o. g. Ansatz über Schematron ergänzt. Diese Methode dient der Erkennung von Ausreißern von Sachdaten eines Gebäudes anhand der vorliegenden Attribute mittels Modellierung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Verschiedene Datensätze wurden analysiert um festzustellen, ob die bereitgestellten Daten plausibel sind. Dies kann nützlich sein, wenn Eingaben, die z. B. von einem Nutzer manuell in ein Formular eingegeben wurden, überprüft werden sollen, um unrealistische Gebäudeeigenschaften in Datenbanken zu vermeiden.

Beispielsweise würde ein Gebäude als Anomalie klassifiziert werden, wenn ein Einfamilienhaus (EFH) eine Höhe von 30 Metern aufweisen (z. B. „measured height“ bzw. Firsthöhe) würde. Die Analyse der Datensätze lehnt sich an Algorithmen des maschinellen Lernens an. Im Speziellen wird hier auf einen Algorithmus der Anomalie-Detektion zurückgegriffen. Dabei werden für alle Variablen eines Datensatzes die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen berechnet. Obwohl eine stochastische Unabhängigkeit der Variablen vorausgesetzt ist, und dies in vorhandenen Datensätzen nicht für alle Variablen zutrifft, hat das Verfahren – in der Literatur – dennoch eine gute Trefferquote beim Detektieren von Anomalien oder Fehleingaben. Daher wurde es in diesem Anwendungsfall getestet. Die kombinierten Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Attribute (Variablen) erhöht die Robustheit beim Detektieren von Ausreißern. Das Verfahren wird noch ausführlichen Tests unterzogen um die Methode ggf. im Hintergrund eines Online-Szenarioeditors für Ressourcen und Kosten einer Maßnahme durchzuführen.

Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichte

Zunächst werden die statistischen Parameter, wie Mittelwert und Standardabweichung jedes einzelnen Attributes (Features) geschätzt. Dazu wird angenommen, dass die Verteilung jedes Attributs normalverteilt ist; dabei gilt $x_1 N(\mu_1, \sigma_1)$, $x_2 N(\mu_2, \sigma_2), \dots, x_n N(\mu_n, \sigma_n)$.

Die Parameter μ und σ werden über bekannte Formeln für Mittelwert und Standardabweichung bestimmt. Multivariate Wahrscheinlichkeitsdichte wird bestimmt durch:

$$P(x) = \prod_{j=1}^n (x_j; \mu_j, \sigma_j^2) = \prod_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} * \exp$$

Danach kann ein Wahrscheinlichkeits-Test für eine neue Variable durchgeführt werden, um zu testen, ob die Wahrscheinlichkeit $P(X) < \varepsilon$ ist. Wobei ε ein selbst definierter Schwellwert für die minimale Wahrscheinlichkeit ist, um noch als „in Ordnung“ klassifiziert zu werden.

Beispielhafte Verwendung der Methode

Es werden zufällig 100 Datenpunkte einer 2D-Normalverteilung generiert, mit Werten von $x_1 \sim N(5,2)$, $x_2 \sim N(3,1)$ für beide Variablen. Die Verteilung kann in der linken Grafik in **Abbildung 19** betrachtet werden. Zusätzlich werden 2 Punkte hinzugefügt (rote Markierungen).

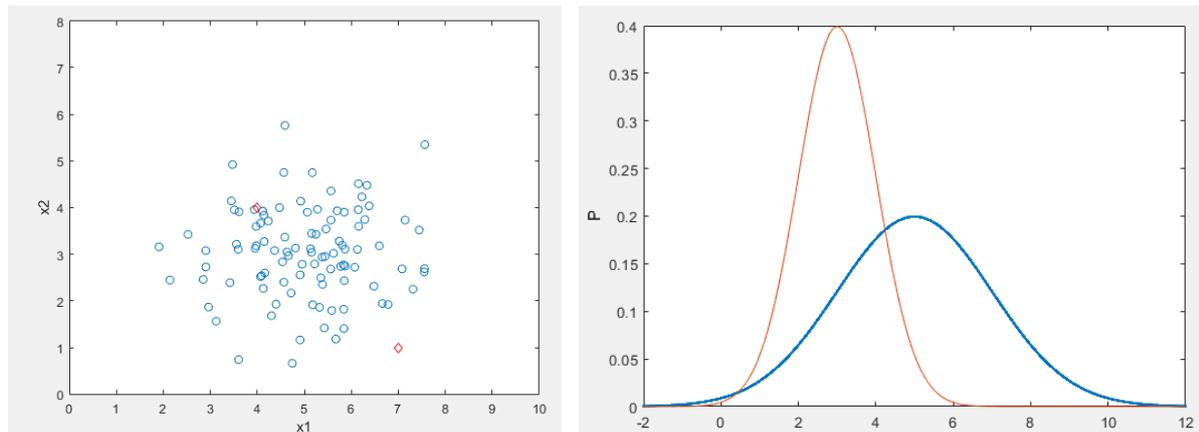


Abbildung 19: Plausibilitätsprüfung

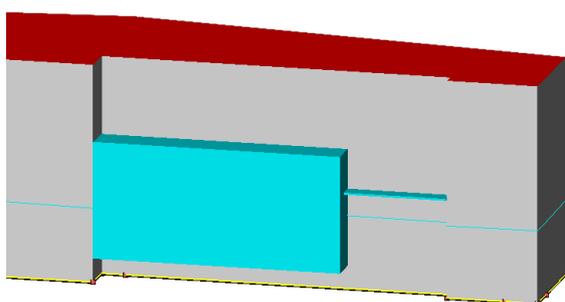
Ein Punkt stellt einen Ausreißer dar, z.B. durch eine Fehleingabe, $P1(x)=7$, $P1(y)=1$; der andere Punkt ist eine korrekte Eingabe ($P2(x)=4$, $P2(y)=4$). Für beide Punkte wird die Wahrscheinlichkeit mit obiger Formel berechnet um zu prüfen, ob die Punkte innerhalb der Verteilung zu liegen. Für den Punkt P1 wird eine Wahrscheinlichkeit von 0,00053 berechnet und für Punkt 2 eine Wahrscheinlichkeit von 0,042. Um zu entscheiden, ob es sich um eine richtige oder eine falsche Eingabe handelt, wird die berechnete Wahrscheinlichkeit gegen ϵ verglichen. Der Wert muss manuell gesetzt und idealerweise über ein empirisches Verfahren bestimmt werden, bei dem die Klassifizierungsrate mittels Receiver Operating Characteristics (ROC) getestet wird. Ist die berechnete Wahrscheinlichkeit $< \epsilon$, wird diese Eingabe folglich als falsch gewertet.

Test der Methode an Stöckach Daten

Folgende Attributdaten wurden aus der Datenbank eines 3D-Gebäudemodells von Stuttgart-Stöckach in LoD 2 extrahiert:

- Eindeutiger Schlüsselwert (**GmlID**);
- Baujahr (**YoC**);
- Umbautes Volumen (**Volume**);
- Verhältnis Außenfläche zu Volumen (**SurfaceAreaToVolumeRatio**);
- Grundfläche (**FootPrintArea**);
- Höhe (**Height**).

Aus diesem Datensatz konnten dann, entsprechend der obigen Beschreibung, die Mittelwerte und Varianzen der Variablen ermittelt werden. Der komplette Datensatz wurde dann mittels der dargestellten Formel getestet.



| P | YoC | Volume | SurfA2Vol | FootPrintA | Height |
|----------|------|--------|-----------|------------|--------|
| 7.52E-19 | 1860 | 3.25 | 10.11 | 14.72 | 0.2 |

Abbildung 20: Exemplarischer Testfall Stuttgart-Stöckach

Von 1296 Gebäuden (bzw. Gebäudeteilen) wurden 63 als anomal detektiert, obwohl diese aus der Verteilung stammten, gegen die sie getestet wurden. Einige Fälle wurden folgen dezidiert untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass es sich bei diesen Objekten zum Teil um ungewöhnlich Typen wie bspw. Kirchen oder um kleinere Anbauten (siehe **Abbildung 20**) handelte, die aufgrund ihrer Größe (Höhe bzw. Volumen) nicht in die Wahrscheinlichkeitsverteilung passten. Die Werte in **Abbildung 20** stehen für den betreffenden Anbau (blau markiertes Dach innerhalb der roten Markierung auf der rechten Abbildung); „p“ steht dabei für *Probability*, d. h. die Wahrscheinlichkeit, kein Ausreißer zu sein.

Zusammenfassung

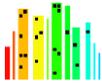
Die Methode wurde an einem Datensatz exemplarisch getestet. Damit ließ sich belegen, dass anomale Tabelleneinträge auf diese Weise detektiert werden können. In den gezeigten Beispielen handelt es sich zwar nicht um klassische Fehleingaben, jedoch um ungewöhnliche Gebäude bzw. Gebäudeteile, die bei einer Eingabe in einem Editor als Anomalie klassifiziert würden.

Das Verfahren soll weiter verbessert werden. Dazu ist vorgesehen, auf die Codes von Gebäudetypologien zurückzugreifen, mit deren Hilfe sich „ungewöhnliche“ Eingaben rationalisiert ließen. Hierfür werden noch weitere Testreihen notwendig.

5.2.3. AP 2.3: Erweiterung der Standards um Sachdatenobjekte und -attribute, OGC Aktivitäten

Die HFT Stuttgart hat sich im Rahmen des Vorhabens aktiv an der Weiterentwicklung der CityGML Energy ADE beteiligt. 2019 wurde der *CityGML Energy ADE Workshop* an der HFT Stuttgart durchgeführt. Die Ergebnisse konnten in den Bericht zum Stand der CityGML Energy ADE auf dem Technical Committee Meeting des Open Geospatial Consortiums im Juni 2020 eingebracht werden [6].

Die Nutzbarkeit der aktuellen Version 1.0 der Energy ADE ist für die im Projekt benötigten Anforderungen der "vereinfachten" und "detaillierten" Simulationen nur eingeschränkt möglich. Daher wurde der Vorschlag eingebracht, diese in zwei entsprechende Anwendungsprofile aufzuteilen. Diese könnten dann nach Bedarf angepasst werden, um die Instanzen auf das neue SimStadt 2.0 Datenmodell abzubilden (zu "mappen").



Die Integration der Utility Network ADE in die SimStadt Struktur wurde nicht weiterverfolgt, da für diese ADE noch keine ausreichende Software-Unterstützung vorhanden ist. Stattdessen wurde der Fokus auf die Schnittstelle des Fernwärmenetz-Modells mit STANET gelegt. Hierzu wird die native STANET Schnittstelle im Austauschstandard *Shapefile* verwendet. Dabei handelt es sich zwar um ein proprietäres Datenformat des Herstellers ESRI®, das gegenwärtig jedoch de facto den Industriestandard für Geodaten bzw. GIS darstellt.

5.3 AP 3: Integration von Monitoring-Daten

Die Datenbereitstellung für die Simulationsberechnung basiert auf der Zusammenführung aus unterschiedlichen Quellen. Die gemeinsam erarbeitete Lösungsarchitektur sieht die Pflege wesentlicher Daten in der Szenario-Verwaltung und deren Zusammenführung mit 3D Gebäudedaten im Rahmen der Eingangsdatenbereitstellung für die Simulation vor. Das Datenmodell der Szenario Verwaltung wurde hierzu entsprechend erweitert und der Zusammenführungsprozess mit 3D Gebäudedaten realisiert. Für die Integration von Sensordaten bzw. deren Metadaten sind ebenfalls Erweiterungen am Datenmodell erfolgt, sodass Messdaten für die Prozesse mit bereitgestellt werden können.

Als Quelle für Mess- bzw. Sensordaten wurden Klimadaten des *DWD* verwendet. Im *CDC* (Climate Data Center) sind verschiedenste Klimadaten für sämtliche deutsche Wetterstationen durch den entsprechenden Download (auch tagesaktuell) abrufbar.

Die Kopplung des Datenmanagements mit Sensordatensystemen (z.B. Lösung der Fa. *Pikobytes*) wurde im Berichtszeitraum konzeptionell betrachtet und getestet. Die Untersuchung erfolgt mit vorliegen Wetterdaten (Temperatur, Niederschlag, Windstärke). Das Konzept der Anbindung sah die Berücksichtigung weiterer Sensordaten vor. Allerdings konnte auch in diesem keine weiteren relevanten Daten bereitgestellt werden, weshalb dieser Ansatz im Projekt nicht weiterverfolgt wurde.

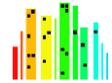
5.3.1. AP 3.1: Organisation des Datenmanagements mit Sensor-/Messdaten

Für die Nutzbarkeit von Messdaten im Bereich Klimadaten wurden verschiedene Quellen untersucht. Voraussetzung war, dass die Daten

- frei zugänglich sind (OpenData),
- kleingliedrig sind (Tags/Stundenweise),
- sich über mehrere Jahre erstrecken,
- ständig aktualisiert werden,
- für ganz Deutschland vorliegen sowie
- eine einfache Weiterverarbeitung ermöglichen.

Diese Anforderungen wurden durch die Daten des DWD erfüllt. Der Zugang zu den Daten erfolgt über das CDC. Nach Angaben des DWD bietet das Climate Data Center einen offenen Zugang zu vielfältigen Klimadaten des DWD an.

Dazu stehen, laut Hinweis des DWD insbesondere folgende Zugangswege zur Verfügung:



- Der OpenData-Bereich erlaubt direkten Download der Daten und ist per HTTPS oder FTP erreichbar;
- Interaktiver Zugriff über das CDC-Portal, insbesondere auf die Stationsdaten des DWD.

Die Daten des CDC (siehe **Abbildung 21**) lagen zum Untersuchungszeitpunkt deutschlandweit für ca. 550 aktive Stationen vor. Für jede dieser Stationen können, als aktuelle, stündliche Werte die Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlagshöhe, Sonnenscheindauer, Windrichtung und Windgeschwindigkeit für die letzten 18 Monate heruntergeladen werden.

| STATIONS_ID | MESS_DATUM | QN_9 | TT_TU | RF_TU | eor |
|-------------|------------|------|-------|-------|-----|
| 4928 | 2019060600 | 3 | 20.9 | 58.0 | eor |
| 4928 | 2019060601 | 3 | 18.9 | 71.0 | eor |
| 4928 | 2019060602 | 3 | 18.1 | 73.0 | eor |
| 4928 | 2019060603 | 3 | 16.6 | 77.0 | eor |
| 4928 | 2019060604 | 3 | 15.0 | 79.0 | eor |
| 4928 | 2019060605 | 3 | 14.4 | 79.0 | eor |
| 4928 | 2019060606 | 3 | 13.8 | 76.0 | eor |
| 4928 | 2019060607 | 3 | 13.4 | 73.0 | eor |
| 4928 | 2019060608 | 3 | 13.7 | 67.0 | eor |
| 4928 | 2019060609 | 3 | 13.0 | 69.0 | eor |
| 4928 | 2019060610 | 3 | 12.7 | 69.0 | eor |
| 4928 | 2019060611 | 3 | 13.1 | 66.0 | eor |
| 4928 | 2019060612 | 3 | 13.9 | 64.0 | eor |
| 4928 | 2019060613 | 3 | 13.8 | 65.0 | eor |

Abbildung 21: Ausschnitt der Klimadatendatei

Als *Proof-of-concept* wurde eine Methode entwickelt und als Python-Script implementiert, um auf die öffentliche WFS-Schnittstelle des DWD-Servers zugreifen zu können. Mit genauer Kenntnis der Schnittstellen-Spezifikation sowie der Lagen und spezifischen IDs der erfassten Wetterstationen erhält man bspw. folgende Daten (siehe **Abbildung 22**).

```
download_dwd_data(
    '4928', # Stuttgart
    'CDC:VGSL_MO_TT_MN004', # 'Monatsmittel der Lufttemperatur auf 2 m
    'Temperature',
    '2020-01-01',
    '2021-01-01')
```

| Month | Temperature |
|------------|-------------|
| 2020-01-01 | 4.0 |
| 2020-02-01 | 6.7 |
| 2020-03-01 | 6.8 |
| 2020-04-01 | 13.1 |
| 2020-05-01 | 14.0 |
| 2020-06-01 | 17.6 |
| 2020-07-01 | 20.7 |
| 2020-08-01 | 21.5 |
| 2020-09-01 | 16.9 |
| 2020-10-01 | 11.1 |
| 2020-11-01 | 7.0 |
| 2020-12-01 | 4.1 |

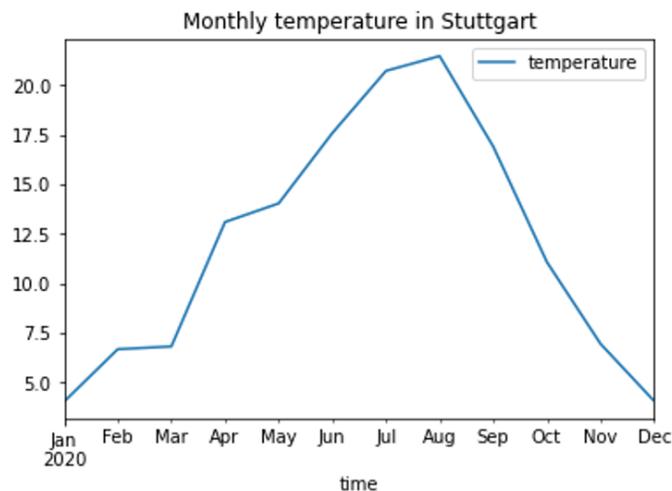


Abbildung 22: Wetterdaten des DWD zur Umgebungstemperatur in Stuttgart

Auf diese Weise ist es nun möglich, automatisiert detaillierte Wetter- bzw. Klimadaten für einen beliebigen Standort in Deutschland herunterzuladen und in den SimStadt-Workflow einzubinden. Lässt sich ein abgefragter Standort keiner vorhandenen Wetterstation eindeutig zuordnen, können die Werte benachbarter Stationen relativ zur Lage interpoliert werden.

Jedoch stehen gegenwärtig noch nicht alle für den SimStadt-Workflow benötigten Daten auf dem DWD-Server zur Verfügung. So fehlt bspw. noch die Globalstrahlung auf horizontaler Ebene. Laut DWD werden fehlende Daten jedoch sukzessive im Laufe des Jahres 2021 ergänzt, sodass sich eine vollständige Integration in SimStadt mittelfristig realisieren lassen wird.

5.3.2. AP 3.2: Erweiterung der Standards um Sensor-/Messdaten

Das Datenmodell wurde für das Untersuchungsgebiet so erweitert, dass die entsprechende Wetterstation eingetragen werden kann. Um die Auswahl bzw. Zuordnung der Station zum Untersuchungsgebiet zu vereinfachen wurde eine Karte der Wetterstationen (SHP-Datei) erzeugt. Diese Datei kann bei Bedarf in die Bearbeitungsoberfläche (WEGA) eingeblendet werden und somit die in Frage kommenden Wetterstationen zu Auswahl anbieten (siehe **Abbildung 23**).

Die direkte Erweiterung des Datenmodells für die sehr vielen, einzelnen Klimadaten wurde verworfen, da es eine zu hohe Dynamik in diesen Daten gibt und sie dann jeweils an das aktuelle Datum angepasst werden müssten. Die Möglichkeit, sich die oben genannten Daten jederzeit herunter laden zu lassen wurde hier als bessere Möglichkeit gesehen.

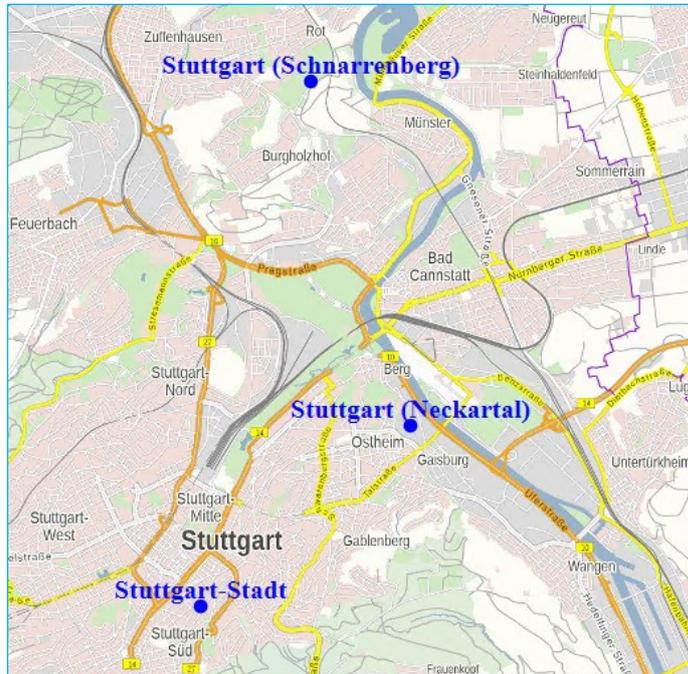


Abbildung 23: Ausschnitt WEGA mit überlappender Stationskarte

Mit der Datenmodellerweiterung der der damit verbundenen (generischen) Erweiterung der GUI kann die nächstliegende bzw. passende Station von entsprechend kompetenten Bearbeitern ausgewählt wer-



den und in die Daten für das Untersuchungsgebiet eingetragen werden (siehe **Abbildung 24**). Eine automatische Auswahl (z. B. über die kürzeste Entfernung) ist nicht sinnvoll, da eine Vielzahl von anderen Faktoren (bspw. die Höhenlage) dabei eine Rolle spielen.

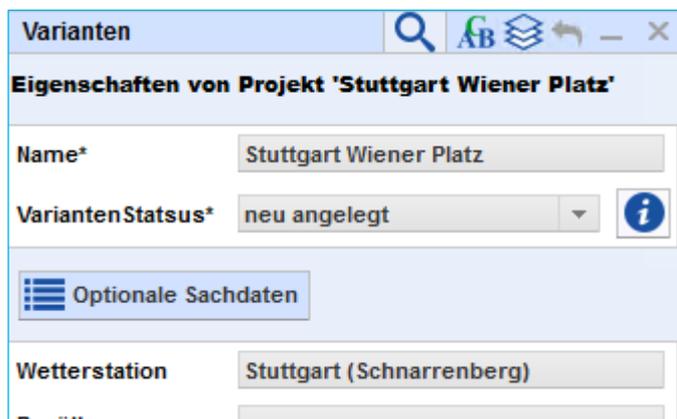


Abbildung 24: Projekt mit zugeordneter Wetterstation

Damit sind die Voraussetzungen geschaffen um für das jeweilige Untersuchungsgebiet die Klimadaten abzufragen. Die Abfrage selbst erfolgt über einen speziellen Workflow aus der Variantenverwaltung heraus.

In einer für den Nutzer zugänglichen Steuerdatei kann vor Aufruf des Workflows der Zeitraum und das Thema für die abzufragenden Klimadaten festgelegt werden. Für zukünftige Erweiterungen wäre hier eine Erweiterung des Workflows in der Form vorstellbar, dass der Zeitraum und das Thema interaktiv (ohne Dateieintrag) durch den Benutzer vorgegeben werden.

Hinsichtlich der Nutzung und Kopplung von Sensordaten wurde das *CityThings-Konzept* [7] untersucht. Dieses vereinfacht die Verbindung zwischen dem Sensorsystem und 3D-Stadtmodell unter Verwendung offener OGC Quelldatenstandards, einschließlich *SensorThings* und CityGML. Mittels CityThings können Forscher und Entwickler dynamische Abfragen von Zeitreihenbeobachtungsdaten aus heterogenen Systemen und Attributinformationen des 3D-Stadtmodells, die in verwendet werden können viele verschiedene Domänen und Anwendungen auf bequeme Weise.

Im Rahmen der Masterarbeit „*Deriving Schedule Information from Electricity Load Profiles*“ [8] wurden elektrische Profile von Smart-Meter Zählern verwendet, um daraus Histogramme zu erstellen. Diese werden dann als Grundlage für die Erstellung von synthetischen, pseudo randomisierten elektrischen Lastprofilen herangezogen. Solche Lastprofile haben den Vorteil, dass sie zwar statistisch mit typologischen Standardlastprofile übereinstimmen, sich individuelle jedoch deutlich unterschiedlich können. Auf diese Weise lassen sich Simulationen sehr viel realistischer durchführen.

Ferner wurde eine Methode entwickelt, um mit SimStadt berechnete Simulationsdaten mithilfe der Energy ADE in Form von TimeSeries wieder in CityGML Dateien zurückschreiben. In der *Usage Library* können verschiedene Standardprofile zu bestimmten Nutzungsbereichen festgelegt werden. Dabei wird grundsätzlich zwischen dem Gebäudetyp und Art der Nutzung unterschieden. So lassen sich für Wohngebäude bspw. verschiedene Profile für die Anwesenheit von Personen oder die Warmwassernutzung erstellen.

5.3.3. AP 3.3: Implementierung von Funktionalitäten zur Verarbeitung und Plausibilitätsprüfung von Sensor-/Messdaten

Für das Abrufen und Auswerten der oben genannten Daten (in aggregierter Form) wurden spezielle Workflows geschaffen. Damit können für jedes Untersuchungsgebiet die verschiedenen Daten zu den gewünschten Zeiträumen abgerufen, aufbereitet und in speziell vorbereiteten Berichten ausgegeben werden oder in tabellarischer Form für weitere Bearbeitungen bereitgestellt werden.

Entsprechend der für das Untersuchungsgebiet festgelegten Wetterstation, des gewünschten Themas und des gewünschten Zeitraums werden die Klimadaten von den Webseiten des CDC-Portals heruntergeladen. Die gewünschten Informationen

- Lufttemperatur,
- Luftfeuchte,
- Niederschlagshöhe,
- Sonnenscheindauer,
- Windrichtung und
- Windgeschwindigkeit

sowie der Zeitraum werden gezielt über eine Parameterdatei, die beim Start des Workflows auswählbar ist, festgelegt.

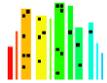
Nach dem automatischen Herunterladen über die WFS-Schnittstelle werden die Daten entpackt und liegen anschließend, wie in **Abbildung 21** gezeigt, in Listenform vor. Für die Bereitstellung an den Nutzer können die Daten individuell aufbereitet (z. B. themenspezifisch aggregiert) und an ein vorbereitetes Ausgabememplate übergeben werden. Ein exemplarisches Beispiel dafür ist im Anhang „Stündliche Temperatur“ dargestellt (Anlage 5). Zusätzlich wird auch eine Datei im CSV-Datenformat erzeugt, die alle Messdaten enthält und detailliert (ohne Aggregation) abbildet. Diese Daten können sodann als Informationsbasis für die Simulationen in SimStadt herangezogen werden.

5.3.4. AP 3.4: Metadaten

Für alle integrierten Messdaten müssen Metadaten zur Beschreibung der Art und Weise der Datenerhebung strukturiert zur Verfügung gestellt und abgelegt werden. Die Metadaten werden mit den 3D Gebäudemodellen verknüpft, um das Zusammenwirken von Metadaten und 3D Daten zu ermöglichen. Im Rahmen der Bearbeitung konnten verschiedene Ansätze zur Modellierung von Metadaten analysiert sowie eigene Lösungen entwickelt werden.

So wurde zunächst der Ansatz eines vereinheitlichten Metadatenstandards für CityGML untersucht. In Kooperation mit der TU Delft erfolgte daraufhin die Entwicklung eines konkreten Umsetzungskonzepts, wie und in welcher Form sich die Ergebnisse der Qualitätsprüfung als Feature-bezogene Metadaten in das Datenmodell integrieren lassen. Die Ergebnisse liegen als Modellschema im UML-Format vor [9].

Mit der offenen Programmierschnittstelle *SensorThings API* der OGC wurden zudem bereits Datenstrukturen zur Speicherung Sensor-bezogener Metadaten definiert [10]. Diese können im vorliegenden Kontext verwendet werden, um dezidierte Informationen zu Ort, Art und Zweck des Sensors zu speichern.



Die eindeutige Zuordnung einer GebäudeID zu einem Sensor lässt sich dabei über Link-Tabellen realisieren.

Wie in CityThings verwendet Simstadt die in der OGC SensorThings API integrierte Funktion zum Speichern von Metadaten über Messdaten. Darüber hinaus haben wurden in Simstadt-Programm auch der Web-Feature Service des DWD für Wetterdaten und die dazugehörigen Metadaten integriert.

5.4 AP 4: Fortentwicklung und Performance Optimierung der SimStadt-Plattform

Gegenstand des Arbeitspakets waren vornehmlich Implementierungsaufgaben zur Optimierung der Software-Struktur sowie die Entwicklung von Teststrategien, die methodische Durchführung von Softwaretests und die Qualitätssicherung.

5.4.1. AP 4.1: Teststrategien, Qualitätssicherung und Optimierung der Softwarestruktur

Zunächst musste eine angepasste Methodik zur Qualitätssicherung entwickelt werden, der Sourcecode-Analyse und die spezifische Teststrategien für jeden Workflow-Schritt umfasst. In der Vorbereitung wurde bewusst ein hoher Aufwand investiert, um die Softwarestruktur zu optimieren, die Integrität der Sourcecodes sicherzustellen sowie potenzielle Fehlerquellen schnellstmöglich detektieren und eliminieren zu können. Ziel dabei war es, ein hohes Qualitätsniveau bei gleichzeitig möglichst geringem Entwicklungsaufwand erreichen zu können sowie eine zeitlich und lokal verteilte, kollaborative Implementierung zu unterstützen. **Abbildung 25** zeigt den strukturierten Ablauf des resultierenden Qualitätssicherungsprozesses in der Softwareentwicklung. Die Evaluierung der Simulationsergebnisse erfolgt in anderen Arbeitspaketen.

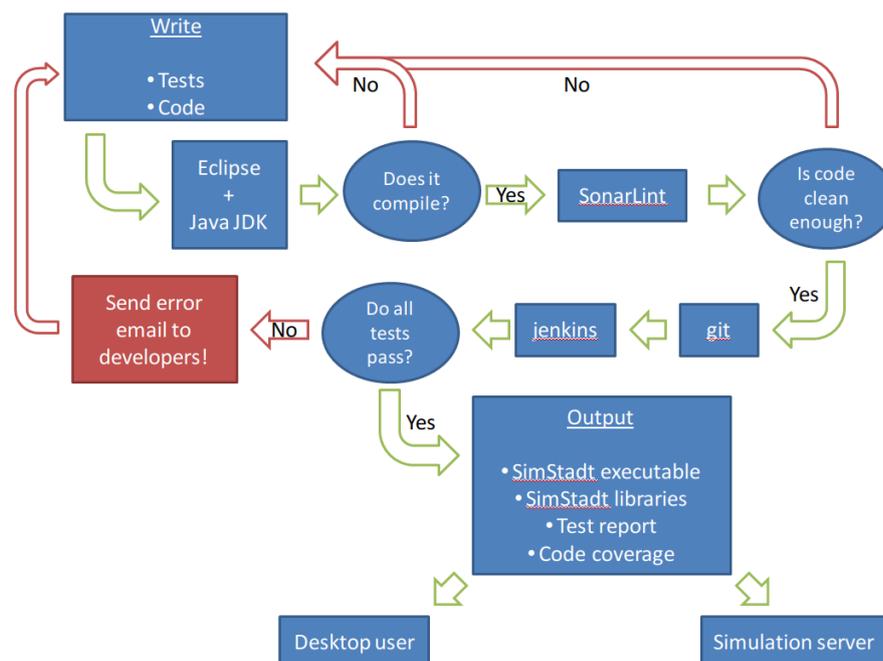
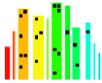


Abbildung 25: Strukturierter Entwicklungsprozess mit methodischer Qualitätssicherung



Die Implementierung der SimStadt-Software erfolgte in der Programmiersprache Java. Als Entwicklungsumgebung (IDE) wurde das freie und quelloffene Werkzeug *Eclipse* eingesetzt. Für die Persistierung, Verwaltung und fortlaufende Dokumentation des Quellcodes einigten sich die Verbundpartner auf die gemeinsame Verwendung der Software *Git*. Dabei handelt es sich um ein freies und quelloffenes Werkzeug zur verteilten Entwicklungskollaboration und integrierten Versionsverwaltung. Ihr Einsatz vereinfacht die Erstellung von Software-Releases und erlaubt das parallele Arbeiten an Entwicklungsversionen sowie die Erstellung von Prototypen einer Release-Version, die von Anwendern zu Testzwecken genutzt werden können. Zudem wurde ein sog. *Maven Repository* eingerichtet, um die bei HFT entwickelten Bibliotheken zu verwalten.

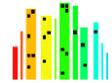
Zur regelmäßigen Kontrolle der Quellcodes wurde mit der IDE-Erweiterung *SonarLint* eine statische Code-Analyse integriert. Sie überprüft neue Codefragmente nach definierten Regeln, bevor sie in das gemeinsame Git Repository übertragen werden. Zudem wurden nach jeder Übertragung weitere automatische Testroutinen durchgeführt, um ungewollte Nebeneffekte bei Änderungen zu vermeiden. Hierzu wurden für jeden Workflowstep bzw. Workflow sog. *JUnit* Tests implementiert, wofür die ebenfalls freie Software *Jenkins* zum Einsatz kam. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass alle Tests und Routinen planmäßig ausgeführt und der Entwickler über mögliche Fehler informiert wird. Die Messung der Testabdeckung erfolgte mit der Software *JaCoCo*. Damit ließ sich überprüfen und dokumentieren, ob alle relevanten Bereiche der SimStadt-Software im Entwicklungsstadium permanent getestet wurden.

Sowohl für die JUnit- als auch die Integrationstests wurden Modelle der exemplarischen Anwendungsfälle bzw. Szenarien (siehe Kap. 5.6) verwendet. Da die Daten der Szenarien im Einzelfall jedoch nicht frei verfügbar bzw. hinsichtlich des Datenschutzes sensibel zu behandeln waren, wurde als alternatives Testszenario das frei verfügbare Open Data Modell des Campus-Geländes der HFT genutzt. Dieses Modell wurde in SimStadt bereits als Testbeispiel aufgenommen und über die Plattform bereitgestellt. Weitere, manuell erstellte Testdaten, konnten zudem über das Gitlab Projekt *CiD4Sim* (siehe Kap. 5.2.2) als Open Data bereitgestellt und für Unit-Tests in der internen SimStadt Entwicklungsumgebung verwendet werden.

Durch die beschriebenen Routinen zur Qualitätssicherung und Optimierung ließen sich sowohl die Effektivität als auch Effizienz des SimStadt Entwicklungsprozessen maßgeblich steigern. Bspw. konnten unbenutzte oder wiederholte Abschnitte im Code automatisch erkannt und entfernt werden. Der gesamte Quellcode wurde im Zuge der Optimierung außerdem sinnvoll modularisiert und funktionsbezogen in kleinere, spezifischere Bibliotheken aufgeteilt. Des Weiteren konnten unperformante Abschnitte der Workflows durch Analyse mit dem in die Java-Umgebung integrierten Profiler *VisualVM* detektiert und zur gezielten Verbesserung isoliert werden. So hat sich z. B. die Laufzeit des Workflows „Monthly Energy Balance“ zur Berechnung von Wärmebedarfen nach der Optimierung halbiert. Für die Berechnung des Wärmebedarfs von ca. 1.200 Gebäuden benötigt die SimStadt-Software auf einem handelsüblichen Business-Laptop im Mittel nun nur noch etwa 20 Sekunden.

Ein weiterer Fokus des Software-Qualitätsmanagements lag auf dem zugrundeliegenden SimStadt-Datenmodell. Es wurde im Zuge der Optimierung nahezu vollständig neu entwickelt, um

- die Strukturen zu vereinfachen und damit den gezielten Zugriff zu erleichtern;



- sowohl Gebäudezonen- als auch Mehrzonen-Modelle betrachten zu können;
- eine dedizierte, funktionale Schnittstelle für jeden Workflowstep bereitstellen zu können;
- einen gleichzeitigen, verteilten Zugriff zu erlauben und so zu ermöglichen, dass Workflows auf verschiedenen Servern berechnet werden können.

Das SimStadt Datenmodell spezifiziert die Klassen für alle Schreib- und Lesezugriffe auf das 3D-Gebäudemodell. Es bildet damit die Datenbasis für alle Workflowschritte. Im Laufe des Projekts wurde der Modellentwurf in mehreren Iterationszyklen angepasst und sukzessive verfeinert, um die Repräsentation und Persistierung der kontextuellen 3D-Daten sowohl für Desktop- und als auch für webbasierte Anwendungen zu optimieren. Ein Auszug aus dem graphischen UML-Schema ist in **Abbildung 26** dargestellt.

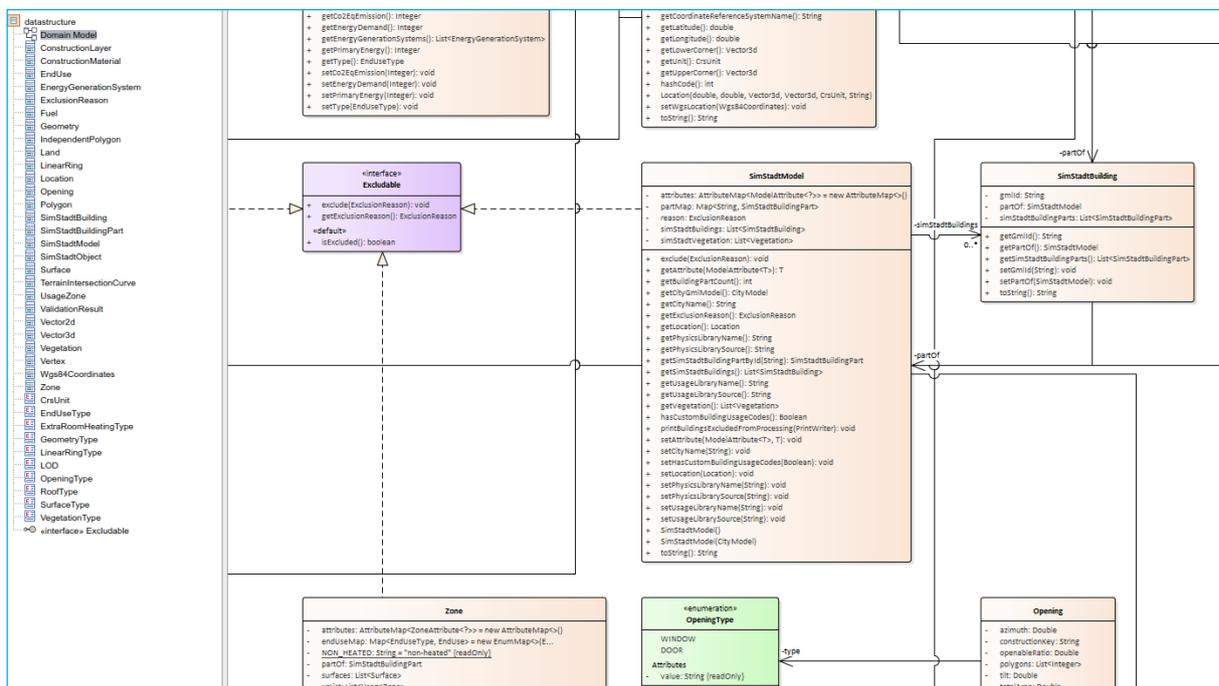


Abbildung 26: Auszug aus der UML Schemadefinition des SimStadt-Datenmodells

In der vorliegenden Version der SimStadt-Software werden das ursprüngliche und neue Datenmodell parallel eingesetzt. Eine vollständige Ablösung des alten Modells war im Rahmen des Vorhabens noch nicht möglich. Zunächst sind weitere Entwicklungsschritte und Tests erforderlich, bevor das neue SimStadt-Datenmodell die bisherige Version vollständig ersetzen kann.

Eine detaillierte Online-Dokumentation zum entwickelten Datenmodell wurde auf der Webseite

<http://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/advanced-topics/new-data-model>

frei zugänglich bereitgestellt.

Das vollständige Datenmodell ist als UML-Diagramm ferner unter der Webadresse

<https://simstadt.hft-stuttgart.de/datamodel>

verfügbar.

Um weitere Testdaten für die Evaluierung der SimStadt-Software zu erzeugen, wurde im Zuge der Bearbeitung außerdem ein generisches 3D-Stadtmodell entwickelt, das auf standardisierten Gebäudetypen der IWU Gebäudetypologie [11] basiert. Aus gegebenen Gebäudegrundrissen und bestimmten beschreibenden Attributen (bspw. Gebäudehöhe, Dachform oder Gebäudefunktion) wurden eine entsprechende Einordnung in – vorläufig – drei Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Reihenhaus und großes Mehrfamilienhaus) umgesetzt (siehe **Abbildung 27**).

Die erläuterte Problemstellung wurde auch im Rahmen einer Masterarbeit bearbeitet [12].

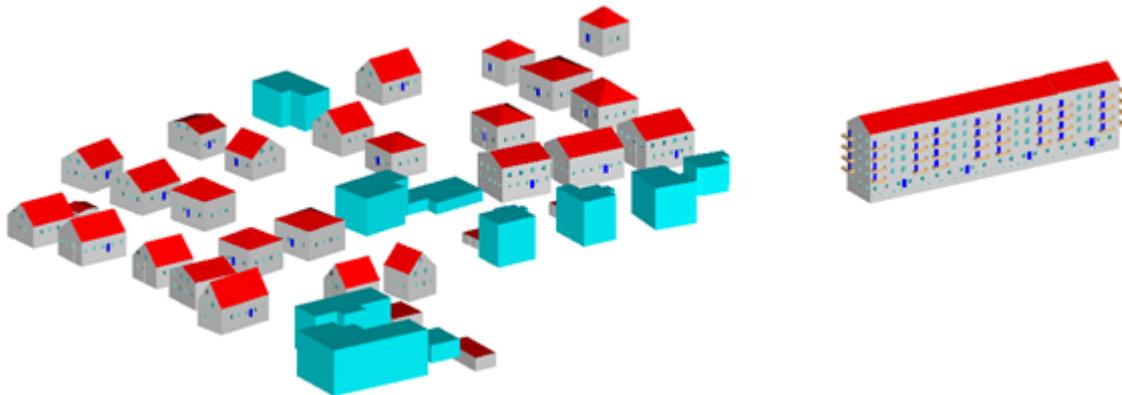


Abbildung 27: Typisierung eines Wohngebietes in SimStadt

5.4.2. AP 4.2: Fortentwicklung der Datenverwaltung und -versionierung

Die im Rahmen des Vorhabens spezifizierten bzw. entwickelten Datenmodelle und Funktionen bzgl. Sach- und Sensordaten mussten in die Szenariokonfiguration integriert werden. Dabei ging es einerseits darum, zeitaufgelöste Simulationsergebnisse, Monitoringdaten, Metadaten oder szenariobezogene Parameter verwalten und speichern zu können. Andererseits waren auch Voraussetzungen zu schaffen, um nicht nur einzelne Zustände eines Szenarios abzubilden, sondern auch ihre Genese lückenlos darstellen sowie ggf. rückverfolgen oder revidieren zu können. Hierfür wurde ein konsequentes Versionierungskonzept umgesetzt.

Die Verwaltung und Bearbeitung der Versionen erfolgt mit der Software **WEGA-Variant** (siehe **Abbildung 28**, eine detaillierte Darstellung des WEGA Konzepts befindet sich im Anhang unter Anlage 6).

Zur Einbindung in die SimStadt-Workflows musste zunächst ein adäquates Datenmodell in WEGA erstellt werden, das alle Anforderungen aus

- der Energy ADE (bautechnische Gebäudedaten),
- der Anwendung SimStadt (Daten zur Bedarfsberechnung)
- der STANET-Schnittstelle (Daten zum Leitungsnetz)

berücksichtigt.

Mit WEGA-Variant lassen sich sowohl der Gesamtprozess als auch einzelne Schritte eines Szenarios bearbeiten. Bei der initialen Konfiguration kann, als generische Ausgangsbasis, dabei auf den in WEGA-



Variante gespeicherten Datenbestand zurückgegriffen werden, der Deutschland nahezu vollständig abdeckt. Die Ergebnisse der Simulationsschritte werden ebenfalls mittels WEGA-Variante gespeichert. Hierbei kann individuell festgelegt werden, ob eine neue Version angelegt oder eine alte überschrieben werden soll. Auf diese Weise können für einen lokalen Anwendungsfall auch unterschiedliche, divergierende Szenarien (mit unterschiedlichen Parametern) berechnet werden. Alternierende Simulationsergebnisse werden dann hierarchisch in WEGA-Variante gespeichert und stehen bei Bedarf auch für weitere Bearbeitungs- und Simulationsschritte bereit.

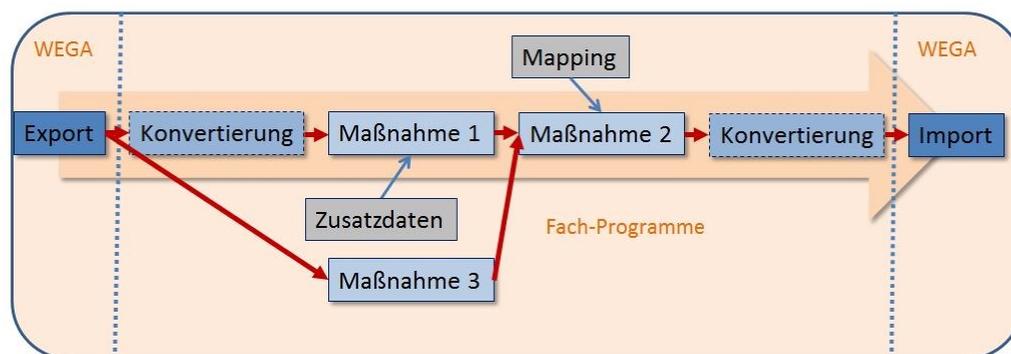


Abbildung 28: Einbettung von WEGA-Variante in den SimStadt-Anwendungsprozess

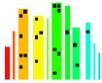
WEGA-Variante fungiert somit als zentrales Datenhaltungsinstrument in SimStadt. Es gestattet den Anwendern die Bearbeitung von Daten, die Durchführung bzw. das Auslösen von Berechnungen und die Auswertung der Berechnungsergebnisse.

In Anlage 7 wird ein typisches Vorgehensmuster ausführlich beschrieben.

5.4.3. AP 4.3: Entwicklung von Web Services

Im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens wurden Web-Services entwickelt, um die SimStadt-Workflows und Daten lokal verteilt bereitstellen bzw. nutzen zu können. Die Verfügung der Daten unterliegt dabei jedoch teilweise expliziten Nutzungsbedingungen der Dateninhaber. Bei den exemplarischen Anwendungsfällen Szenario 6 und 7 (vgl. dazu Kap. 5.6) war die Nutzung bestimmter verwendeter Daten nur projektintern gestattet; eine Weitergabe ist den Verbundpartnern ohne Einwilligung der Dateninhaber daher nicht erlaubt. Wo möglich wurden jedoch auf offene und frei verfügbare Quellen (Open Data) zurückgegriffen, so dass hierzu alle Eingangsdaten und Berechnungsergebnisse ohne Einschränkungen veröffentlicht werden können. Für die Datenbereitstellung wurden unterschiedliche Server genutzt, die in Abhängigkeit der Datennutzungslizenzen entweder nur projektintern oder öffentlich zugänglich sind. Dabei wurde neben einer einfachen Datei-basierten Bereitstellung auch ein *OGC WebFeature Service* sowie die sich noch in der Entwicklung befindliche *OGC 3D GeoVolume API* genutzt und evaluiert.

Um SimStadt-Workflows als Web-Services bereitzustellen, wurde der „SimStadt Web Service“ auf Basis des Simple *Object Access Protocols* (SOAP) entwickelt. Spezifiziert wurde er mittels der *Web Services Description Language* (WSDL). Ein Client-Programm, das eine Verbindung zum Webservice herstellt, kann die WSDL-Datei lesen, um festzustellen, welche Vorgänge auf dem Server verfügbar sind. Alle ver-



wendeten Datentypen werden außerdem in Form einer XML-Schemadefinition in die WSDL-Datei eingebettet. Der Client verwendet schließlich SOAP, um einen der in der WSDL-Datei deklarierten Vorgänge aufzurufen, beispielsweise mithilfe von XML über HTTP.

Die Entwicklung der Web-Services erfolgte auf Grundlage der Anforderungen aus den SimStadt-Workflows. Folgende Services wurden auf einem öffentlich zugänglichen Server bereitgestellt:

- **Web Feature Service:** Zugriff auf 3D-Gebäudemodelle [CityGML] aus einer Datenbank an (gemäß Nutzungsvereinbarung derzeit nur projektinterner Zugriff möglich). Ressource: <http://193.196.137.147:8080/simstadt/services/SimStadtWFS?wsdl>
- **Geometric Processing Service:** Führt den Workflow zur geometrischen Vorverarbeitung des CityGML-Modells aus, um z. B. Volumina und Flächenorientierung berechnen zu können. Ressource: <http://dmz02.rz.hft-stuttgart.de:8080/simstadt/services/SimStadt2GeometricPreProcessing?wsdl>
- **WeatherDataset Service:** Stellt lokale Wetterdateien bereit (monatlich oder stündlich). Ressource: <http://dmz02.rz.hft-stuttgart.de:8080/simstadt/services/SimStadt2WeatherDataPreProcessing?wsdl>
- **BuildingPhysicsLibrary Service:** Bietet Zugriff auf Gebäudedaten, bspw. zu konstruktiven Aspekten, Bauteilen, Fenstern oder Materialien (REST-Service). Ressource: <http://dmz02.rz.hft-stuttgart.de:8080/simstadtlibrary/buildingphysics>
- **MonthlyEnergyBalance Service:** Berechnet den Heiz- und Kühlbedarf mit Unterstützung für Benutzereingaben. Ressource: <http://dmz02.rz.hft-stuttgart.de:8080/simstadt/services/SimStadt2Simulation?wsdl>
- **Photovoltaic Potential Service:** Berechnet das Solarpotenzial für Photovoltaic oder Solarthermie mit Unterstützung für Benutzereingaben. Ressource: <http://dmz02.rz.hft-stuttgart.de:8080/simstadt/services/SimStadt2Simulation?wsdl>

Im Rahmen eines studentischen Projekts wurde ferner auch eine *RESTful API* für SimStadt konzipiert und prototypisch umgesetzt. Diese API verfügt über den Reifegrad einer Machbarkeitsstudie entwickelt worden und wurden bislang nicht veröffentlicht. Sie diente primär Lehrzwecken und dem Transfer von Forschungsergebnisse in die Lehre.

5.4.4. AP 4.4: Geschwindigkeitserhöhung durch verteiltes und paralleles Rechnen

Das Ziel dieses Teilarbeitspakets lag in einer maßgeblichen Steigerung der Performanz (Berechnungszeit) von SimStadt, um die Software auch für Simulationen größerer Siedlungsgebiete oder ganzer Städte einsetzen zu können.

Hierfür wurden zunächst alle Workflowsteps dahingehend analysiert, ob eine Parallelisierung der Berechnung grundsätzlich möglich ist und ob sie den Berechnungsprozess entscheidend beschleunigen



würde. Auf Basis dieser Untersuchung konnten folgende Workflowsteps identifiziert und mittels Parallelisierung hinsichtlich ihrer Rechenperformanz optimiert werden:

- *GeometricPreprocessor*. Ressource:
<https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/workflowsteps/geometric-preprocessor>
- *PhysicsPreprocessor*. Ressource:
<https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/workflowsteps/physics-preprocessor>
- *UsagePreprocessor*. Ressource:
<https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/workflowsteps/usage-preprocessor>
- *MonthlyEnergyBalance*. Ressource:
<https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/workflowsteps/monthly-energy-balance>
- *IrradianceProcessor*. Ressource:
<https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/workflowsteps/irradiance-processor>

Im Zuge der Durchführung wurden zusätzliche Tests benötigt, da unbeabsichtigte Wettlaufsituationen (sog. "Race conditions") ein häufiger Grund für schwer auffindbare Programmfehler sind.

Im Jahr 2020 wurde an der HFT ein speziell für paralleles Rechnen ausgelegter Server (Fujitsu RX 2540 M5 GPU Server mit 2 CPU Intel Xenon Gold 6226R Prozessoren, 768 GB RAM und 2 NVidia Quadro RTX8000 48 GB GPUs) beschafft. Auf dieser Hardware wurde ein neuer Workflowschritt zur Verschattungsberechnung durchgeführt, der zwecks Parallelisierung auf den GPUs durchgeführt wird. Auf diese Weise konnten Gebäude in SimStadt parallel importiert und gleichzeitig analysiert werden. Die Tests haben gezeigt, dass die Simulationsergebnisse sich gegenüber einer seriellen Berechnung auf CPUs nicht geändert haben, die Simulation selbst jedoch deutlich schneller geworden ist.

Im Rahmen einer Masterarbeit an der HFT konnte die Anwendung von SimStadt für große Stadtmodelle untersucht werden. Hierbei wurden verschiedene Szenarien zur CO₂ Einsparung bis 2035 für die Stadt Helsinki simuliert. Die Ergebnisse wurden auch in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht [12].

5.4.5. AP 4.5: Nutzerbezogene Visualisierung in der SimStadt-Plattform und Reportgenerierung

Für den Vergleich der Szenarien ist ein detailliertes Reporting notwendig. Hierfür wurde eine nutzerbezogene Visualisierung sowie die automatisierte Ableitung von Reports bzw. Textbausteinen und Grafiken für Reports entwickelt.

Nutzerbezogene Visualisierung

Die geografischen Daten in WEGA-Variant können in unterschiedlichen Modellen dargestellt werden. Für jede Objektklasse lässt sich dabei eine spezifische Darstellung festlegen. Dabei kann auch eine Auswertung von Eigenschaften der Objekte in die Visualisierung integriert werden.

Diese Darstellungsmodelle können im Datenbestand und/oder in benutzerspezifischen Dateien erstellt und verwaltet werden und während der Bearbeitung für den entsprechenden Zweck angezeigt werden. Die Erstellung und Anpassung der Darstellungsmodelle erfolgt über die WEGA-EMS-Administrations-Oberfläche oder direkt in den JSON-Dateien.

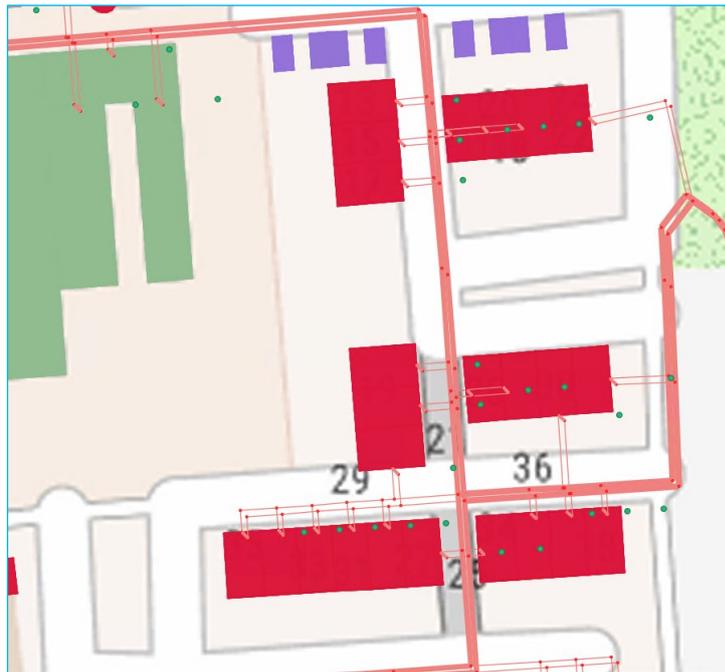


Abbildung 29: Darstellung der Gebäude nach Funktion und Leitungen nach Nennweite



Abbildung 30: Darstellung nach gruppiertem jährlichem Warmwasserbedarf

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden Darstellungsmodelle

- für Gebäudefunktionen und Leitungsnennweiten bzw. -durchmesser (siehe **Abbildung 29**),
- für den jährlichen Warmwasserbedarf (siehe **Abbildung 30**) sowie
- für den spezifischen Heizwärmebedarf (siehe **Abbildung 31**)

vordefiniert und erstellt (detaillierte Erläuterungen im Anhang unter Anlage 8).

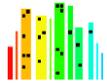


Abbildung 31: Darstellung mit gruppiertem spezifischem Heizwärmebedarf

Bei den gezeigten Darstellungen handelt es sich lediglich um Beispiele, mit denen die Möglichkeiten aufgezeigt werden sollen. Individuelle Darstellungsmodelle können durch entsprechend geschulte Mitarbeiter jederzeit erstellt und implementiert werden.

Reporting

Um die Vergleichbarkeit der Varianten und eine nachvollziehbare Darstellung der Ergebnisse (auch für externe Mitarbeiter) zu ermöglichen sind Reports und Statistiken erforderlich. Aus den Varianten heraus lassen sich durch die flexiblen Möglichkeiten der Datenabgabe in speziellen Workflows zudem auch aktuelle Reports und Statistiken erstellen.

Grundlage dieser für das Projekt entwickelten Workflows ist ein Export der Daten aus der jeweiligen Variante. Diese werden entsprechend der gewünschten Ausgabekonfiguration weiterverarbeitet und in die jeweilige Vorlage übernommen. Die Ausführung der Workflows und damit auch die Erstellung der Reports erfolgen direkt aus der WEGA-Oberfläche. Die Reporting-Funktion steht somit allen autorisierten Benutzern zur Verfügung.

Die im folgendem beschriebenen vier Reportausgaben wurden innerhalb der Projektbearbeitung exemplarisch erstellt:

- Export in eine CSV-Datei für eine weitere externe Verarbeitung in Programmen zur Tabellenkalkulation (siehe **Abbildung 32**)
- Export in eine CSV-Datei zum Import in ein vorgefertigtes Template zur Tabellenkalkulation
- Vorgefertigte Reporting-Templates direkt aus WEGA-Variant befüllen
- In Anlage 9 ist ein Beispiel für eine statistische Auswertung eines Untersuchungsgebiets hinsichtlich der Gebäudefunktionen gezeigt
- Befüllen eines vorgefertigten Reporting-Templates mit exportierten CSV-Dateien

- In Anlage 10 zeigt ein Beispiel für eine Reporting sämtlicher Gebäude eines Untersuchungsgebiets hinsichtlich des Heiz- und Warmwasserbedarfs

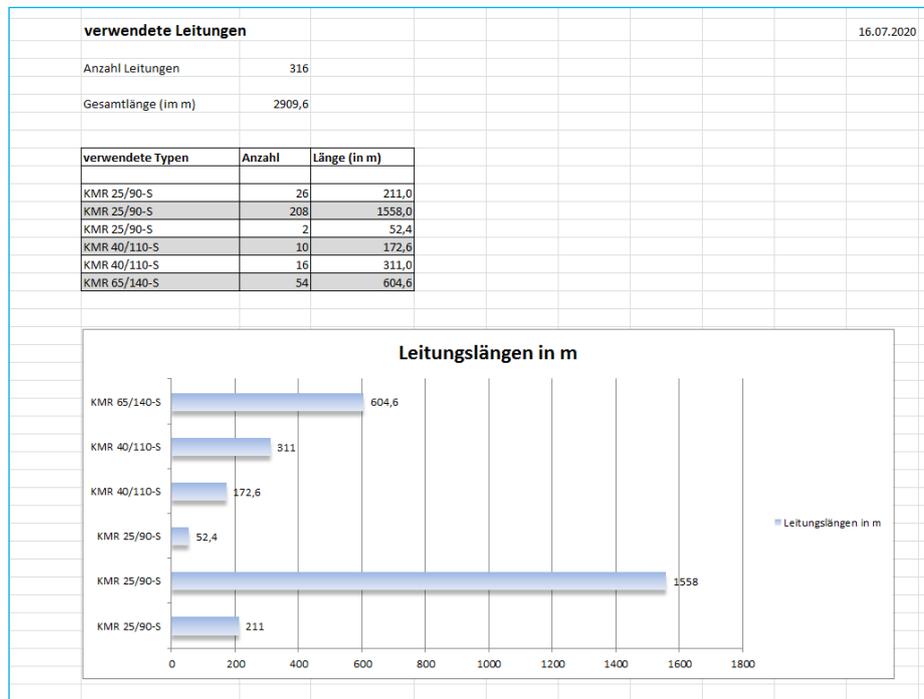


Abbildung 32: Statistik In MS Excel aus exportierten CSV-Dateien

5.4.6. AP 4.6: Schnittstellen zum 3D-Geodatenserver der Stadt Mainz

Die Anbindung von SimStadt an den 3D-Geodatenserver der Stadt Mainz wurde an der Fallstudie Mainz (Szenario 6, siehe Kap. 5.6) prototypisch implementiert. Die Stadt Mainz nutzt für die Verwaltung ihres 3D Stadtmodells Technologien des Fraunhofer IGD. Für die Anbindung an die SimStadt Plattform wurde von der HFT daher das Fraunhofer IGD als beauftragt.

Zwecks des Unterauftrags an Fraunhofer IGD war es, eine technische Anbindung des von der Stadt Mainz eingesetzten 3D-Geodatenservers *GeoRocket* an die SimStadt Plattform zu realisieren. Dafür wurde der Cloud-basierte Datenspeicher GeoRocket¹¹ für die Speicherung und Indexierung der im SimStadt-Projekt entwickelten Energy ADE erweitert. Damit kann ein sehr schneller und performanter Datenzugriff auf die 3D Stadtmodelle realisiert werden und es werden auch bereits zukünftige Nutzungsszenarien in Cloud-basierten Umgebungen abgedeckt.

Im Rahmen der Bearbeitung wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Anforderungsanalyse für die Erweiterung der CityGML-Schnittstelle zur Speicherung und Indexierung von Energy ADE;
- Umsetzung der spezifischen Schnittstelle und Indexer in GeoRocket;
- Teststellung und Nutzerevaluierung.

¹¹ <https://github.com/georocket/georocket>

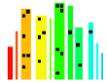


Abbildung 33 zeigt die realisierte Software-Architektur. CityGML-Daten aus Mainz werden auf dem Georocket-Server gespeichert. Anschließend fordert SimStadt über die von Georocket bereitgestellte HTTP-Schnittstelle (sog. *CityGML Web Feature Service, WFS*) diese Daten an. Nach Abschluss einer Simulation werden die Ergebnisdaten als CityGML Energy ADE über die HTTP-Schnittstelle wieder in Georocket zurückgespeichert. Zu diesem Zeitpunkt generiert ein interner Prozess in Georocket ein hierarchisches Modell für eine Streaming-fähige webbasierte 3D Visualisierung. Hierzu wird der OGC Community Standard 3D-Tiles genutzt. Diese *3D-Tiles* können zusammen mit energiespezifischen Daten abschließend über den 3D Webclient *CesiumJS* visualisiert werden.

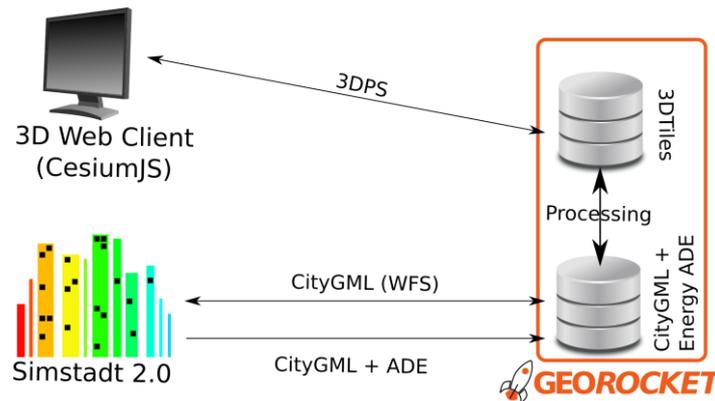


Abbildung 33: Anbindung von SimStadt an den 3D-Geoserver GeoRocket

Die Ergebnisse sind auf einem für SimStadt eingerichteten GeoRocket Server unter der Webadresse <https://simstadt.igd.fraunhofer.de/georocket> verfügbar. Es wurde jedoch ein Passwort-Schutz eingerichtet, der den Zugriff auf die Inhalte nur autorisierten Benutzern erlaubt.

Abbildung 34 gibt einen Eindruck der interaktiven webbasierten Nutzerschnittstelle. Neben der gezeigten exemplarischen Fallstudie Szenario 6 sind auch die Modelle für die Szenarien 3 und 7 auf dem GeoRocket Server verfügbar und können in SimStadt genutzt werden. Der Zugriff auf die CityGML Daten erfolgt direkt über den sog. *Store* (für den Anwendungsfall in Mainz bspw. <https://simstadt.igd.fraunhofer.de/georocket/store/mainz>).

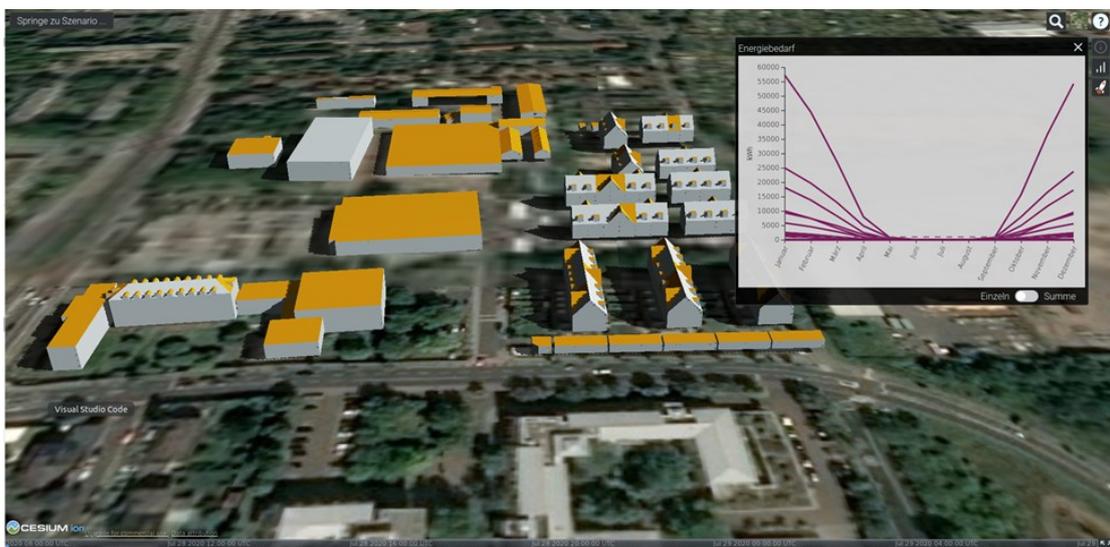
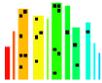


Abbildung 34: Interaktive 3D-Visualisierung der Fallstudie Szenario 6 über den Geodatenserver GeoRocket



Vgl. hierzu auch Kap. 5.4.3 zu AP 4.3 sowie die Online-Dokumentation zu GeoRocket unter der Webadresse

<https://georocket.io/docs/user-documentation/>.

5.4.7. AP 4.7: Standardisierung Energy ADE, Erweiterung des Standards, OGC Aktivitäten

Im Zuge der Bearbeitung des Vorhabens erfolgte auch eine aktive Mitarbeit in den Standardisierungsgremien der SIG 3D zur Weiterentwicklung der CityGML Energy ADE sowie, auf internationaler Ebene, in der CityGML Standard Working Group und der 3D Portrayal Service Standard Working Group der OGC. Im Einzelnen wurden Ergebnisse des Vorhabens bei folgenden OGC-Aktivitäten eingebracht:

- OGC TC Meetings in Orleans (Frankreich) im März 2018 und Ft. Collins (USA) im Juni 2018.
- OGC TC Meeting im September 2018 an der HFT in Stuttgart.
- 10. CityGML Energy ADE Workshop an der TU Delft (Niederlande) im Dezember 2018.
- 11. CityGML Energy ADE Workshop am 24. und 25. Oktober 2019 an der HFT in Stuttgart.
- OGC TC Meeting (virtuell) im Juni 2020 zur CityGML Energy ADE.

Parallel zu der Spezifikation der CityGML Energy ADE wurde ein Workflowstep *CityGmlWriter*¹² im Rahmen des Vorhabens entwickelt, mit dem CityGML-Dateien um Energy-ADE Attribute erweitert werden können. Beispielsweise kann der CityGmlWriter eine gültige CityGML Datei mit folgenden Attributen schreiben:

- Gebäudehöhe,
- Geschosszahl,
- Baujahr,
- Beheizte Wohnfläche (als EnergyADE Attribut),
- Monatlicher Wärmebedarf (als EnergyADE attribut) sowie
- Jährlicher Warmwasserbedarf (als EnergyADE Attribut).

Der CityGmlWriter lässt sich außerdem beliebig erweitern, um zusätzliche Energy-ADE Attributen zu unterstützen.

Weiterhin wurden die Arbeiten zu SimStadt und der CityGML Energy ADE im „Request for Information“ des OGC und *Natural Resources Canada* (NRCan) für eine Studie zu „Building Energy Mapping and Analytics“¹³ eingebracht und als eines von fünf Projekten in einem internationalen Webinar vorgestellt. Die Ergebnisse der Studie, die auch SimStadt und die CityGML Energy ADE berücksichtigt, werden als OGC Public Engineering Report veröffentlicht [6].

¹² <http://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/workflowsteps/city-gml-writer/>

¹³ <https://www.ogc.org/projects/initiatives/bdgenergvcds>

5.5 AP 5: Erweiterung der Modellfunktionalitäten

5.5.1. AP 5.1: Gebäudenutzungs- und Lastprofile für Gebäude und Gebäudegruppen

Die Arbeiten zu Gebäudenutzungs- und Lastprofilen in diesem Arbeitspaket wurden in mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen sowie in einer Masterarbeit beschrieben.

Stromlastprofile

Es wurde ein Algorithmus entwickelt, der anhand von existierenden elektrischen Lastprofilen für Einfamilienhäuser eine statistische Erstellung von Lastprofilen ermöglicht. Dieser Algorithmus wurde in SimStadt integriert. Anhand der Gebäude GML-ID wird eine Hash-Zahl generiert, die als Input für einen Pseudozufallsgenerator dient, mit dem die Lastprofile erzeugt werden. Das ermöglicht die Generierung derselben Lastprofile in verschiedenen Simulationsdurchläufen. Die Auflösung der Lastprofile erfolgt in 15 Minuten Schritten. Diese Arbeiten entstanden unter anderem im Rahmen der Masterarbeit *“Deriving Schedule Information from Electricity Load Profiles”* im Studiengang Software Technology.

Abbildung 35 zeigt ein Beispiel eines solchen Lastprofils.

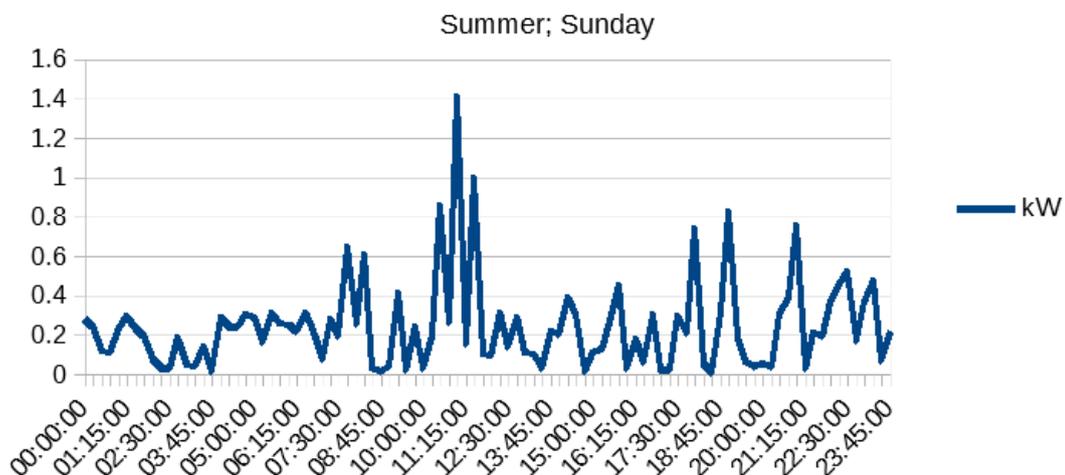


Abbildung 35: Beispiel eines elektrischen Lastprofils

Die Integration in SimStadt ermöglicht einen CSV-Export in dem für einen spezifizierten Zeitraum für alle simulierten Gebäude die elektrischen Lastprofile zu schreiben. Die Auflösung von 15 Minuten kann dabei erhöht werden auf. Falls Profile für ein gesamtes Jahr erzeugt wurden, so kann zusätzlich eine Jahresdauerlinie exportiert werden.

Darauf aufbauend wurde der Konferenzbeitrag *„Stochastic generation of household electricity load profiles in 15 minute resolution on building level for whole city quarters“* veröffentlicht. [13]

Der elektrische Lastprofilgenerator wurde erweitert, sodass er alle Wohngebäudetypen generieren kann, nicht nur Einfamilienhäuser. Durch neue Rohdaten können jetzt außerdem 5 Sekunden aufgelöste Lastprofile erzeugt werden. Der Algorithmus wird zurzeit noch angepasst und verändert, sodass die erzeugten Profile sich näher an realen Profilen orientieren.

Warmwasserprofile

Die Notwendigkeit für stündlich aufgelöste Warmwasserprofile wurde im Paper „*Individual Domestic Hot Water Profiles for Building Simulation at Urban Scale*“ [14] thematisiert. Viele urbane Simulationstools konzentrieren sich hauptsächlich auf die Berechnung des Raumwärmebedarfs und nicht auf den Warmwasserbedarf. Stattdessen wird der Trinkwarmwasserbedarf oft als ein konstanter Wert angenommen, der sich während des Tages oder Jahres nicht verändert. In der Publikation wird die Bedeutung differenzierter, stündlicher Trinkwarmwasserprofile für Wohngebäude in urbanen Energiebedarfsimulationen aufgezeigt. Der Vergleich zwischen der Verwendung von Trinkwarmwasserprofilen und der Verwendung eines konstanten Wertes für den Trinkwarmwasserbedarf zeigt eine hohe Unterschätzung des Trinkwarmwasserbedarfs während der morgendlichen Spitzenzeiten an Wochentagen und am Nachmittag an Wochenenden sowie eine hohe Überschätzung des Bedarfs während der Nacht. Es besteht auch ein bemerkenswerter Unterschied zwischen Sommer- und Wintertagen, der bei Verwendung eines konstanten Wertes nicht dargestellt wird.

Das Tool *DHWcalc* [15] (siehe **Abbildung 36**) wurde mittels eines Soft Link mit SimStadt verbunden, so dass stündliche Trinkwarmwasserprofile für alle Gebäude ermittelt werden konnten. Die Annahmen, die zur Berechnung in *DHWcalc* benötigt werden, kommen wenn möglich aus der usage library von SimStadt. Dazu zählen z.B. der Gebäudetyp, Nutzungszeiten für Warmwasser und ein Gesamtwarmwasserbedarf pro Tag. *DHWcalc* berechnet Trinkwarmwasserprofile aus Zapfereignissen in Litern je Zeiteinheit, d. h. für die Bestimmung des Energiebedarfs zur Bereitstellung dieser Warmwassermengen wird ein zusätzlicher Berechnungsschritt nötig, um Liter in kWh umzurechnen. Dabei wird ein Temperaturunterschied ΔT zwischen Eingangs- und Zieltemperatur von 30 K angenommen.

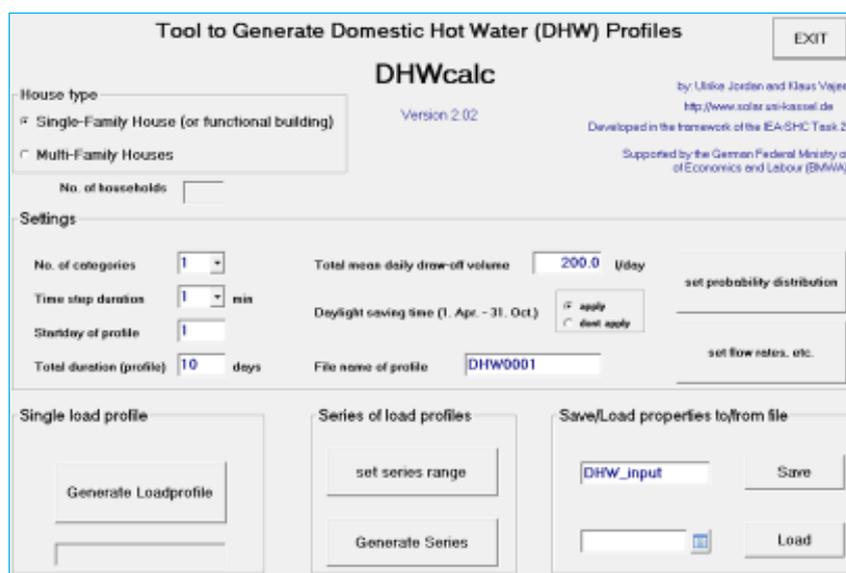
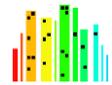


Abbildung 36: Benutzeroberfläche von DHWcalc

DHWcalc ist spezialisiert auf die detaillierte Berechnung des Trinkwarmwasserbedarfs in Wohngebäuden, jedoch nicht für Nichtwohngebäude. Daher werden hierfür Annahmen aus der DIN V 18599-10 [16] bzw. der Usage Library von SimStadt verwendet, unter anderem Nutzungszeiten und Belegungsdichten



von Büros um einen Warmwasserbedarf für Nichtwohngebäude in stündlicher Auflösung berechnen zu können.

5.5.2. AP 5.2: Dynamische Heizwärme- und Kühlbedarfssimulation

Im Zuge der Bearbeitung wurde für die Simulation ein neues, dynamisches Gebäudebedarfsmodell entwickelt. Es erlaubt automatisierte bzw. generische Gebäudedefinitionen. Erst auf dieser Grundlage sind Wärmebedarfssimulationen in einem großstädtischen Maßstab ohne großen anwenderseitigen Aufwand möglich [17].

In dieser Veröffentlichung wird das dynamische physikalische Gebäudemodell zur Simulation des Energiebedarfs von Städten vorgestellt. Zunächst wird eine Begründung für die Notwendigkeit eines neuen Gebäudemodells und die Vorteile der Verwendung einer modularen Gebäudesimulation beim Umgang mit einer großen Anzahl von Gebäuden in einem städtischen Kontext gegeben. Die Hauptmotivation war ein flexibles und sehr modulares Zusammenspiel von 3D-Stadtgeometriebeschreibung mit dem CityGML-Datenformat und energiebezogenen Attributen für Gebäudeteile. Der Beitrag stellt dann das modulare dynamische Gebäudemodell und seine Validierung mit einem realen Studienfall für Einzelgebäude vor. Die Modellintegration SimStadt wird mit den notwendigen Eingabedaten für eine städtische Wärmebedarfsberechnung erläutert.

Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung des Detaillierungsgrades des Heizwärmebedarfs ist die Ableitung von stündlichen Werten aus den zuvor berechneten monatlichen Bilanzen. Die in SimStadt integrierte Berechnung ist angelehnt an die Berechnung der Gradtage in der VDI 4710. Dabei werden die monatlichen Werte anhand der Außentemperatur und weiteren Randbedingungen der Gebäude auf die 8760 Stunden eines Jahres verteilt. Die benötigten Informationen zu Heizgrenztemperatur, Soll-Innentemperatur sowie die Dauer der Nachtabschaltung werden je nach Gebäudenutzungstyp aus der SimStadt Usage Library abgerufen. Die Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur und Heizgrenztemperatur bzw. Soll-Innentemperatur, abhängig von der Stunde des Tages, wird für jede Stunde berechnet. Diese Werte werden für jeden Monat aggregiert anschließend wird der Quotient aus dem monatlichen Heizwärmebedarf und der Summe der Stundengradzahlen für jeden Monat gebildet und mit der Stundengradzahl der jeweiligen Stunde multipliziert, was den stündlichen Heizwärmebedarf ergibt.

Der Gegenstand des Teilarbeitspaketes wird auch ausführlich in der Doktorarbeit von Pilar Monsalvete mit dem Titel „*Multiscale Framework for Predicting Distributed Renewable Thermal Energy Integration*“ (University of Nottingham 2020) behandelt [18].

5.5.3. AP 5.3: Energieversorgungs- und Speichersimulation

5.5.3.1. Energiesystemmodellierung

In Abstimmung mit den in den Fallstudien vorhandenen Systemen bzw. deren Planungen wurden die folgenden Energieversorgungssystemmodelle entwickelt und in SimStadt integriert:

- zentrales BHKW (Grundlast), Gaskessel (Spitzenlast), Pufferspeicher
- zentrale Wärmepumpe (Wasser / Wasser oder Sole / Wasser, Grundlast), Gaskessel (Spitzenlast), Pufferspeicher

- zentraler Biomassekessel (Grundlast), Gaskessel bzw. Ölkessel (Spitzenlast)
- dezentrale Wärmepumpen (auch Luft / Wasser) mit Pufferspeicher

Die Versorgungssysteme sind in INSEL modelliert als je ein Modell bestehend aus den verschiedenen System-Komponenten. In jedem Modell können die Nebenerzeuger und thermischen Speicher optional genutzt oder nicht genutzt (im Modell aktiviert oder deaktiviert) werden, so dass eine Vielzahl von tatsächlichen Systemkonfigurationen aus diesen vier Modellen entsteht.

Die Regelung ist so modelliert, dass zunächst versucht wird, den Wärmebedarf aus dem thermischen Speicher zu decken. Wenn dieser nicht ausreicht, werden mehrere Fälle unterschieden.

Wenn der Bedarf größer oder gleich ist dem aktuellen Speicherinhalt plus der Nennleistung des Haupterzeugers, dann wird der Haupterzeuger aktiviert. Es wird ebenfalls berücksichtigt, ob ein eventueller Überschuss des Haupterzeugers zwischengespeichert werden kann.

Wenn der Bedarf unterhalb dieses Modulierungsbereichs liegt, aber der Speicherinhalt nicht ausreichen würde, um den Bedarf zu decken, wird der Neben-Erzeuger aktiviert, der in allen Modellen ein Gas- bzw. Ölkessel ist. Dieser wird auch dann zusätzlich zum Haupterzeuger aktiviert, wenn sonst der Bedarf nicht komplett gedeckt werden kann.

In **Abbildung 37** ist das INSEL Modell „BHKW + Gaskessel + Speicher“ zu sehen. Nicht dargestellt ist jedoch die Berechnung der Speicherverluste, die anhand der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf sowie der Geometrie des Speichers selbst (Volumen, Höhe) berechnet wird.

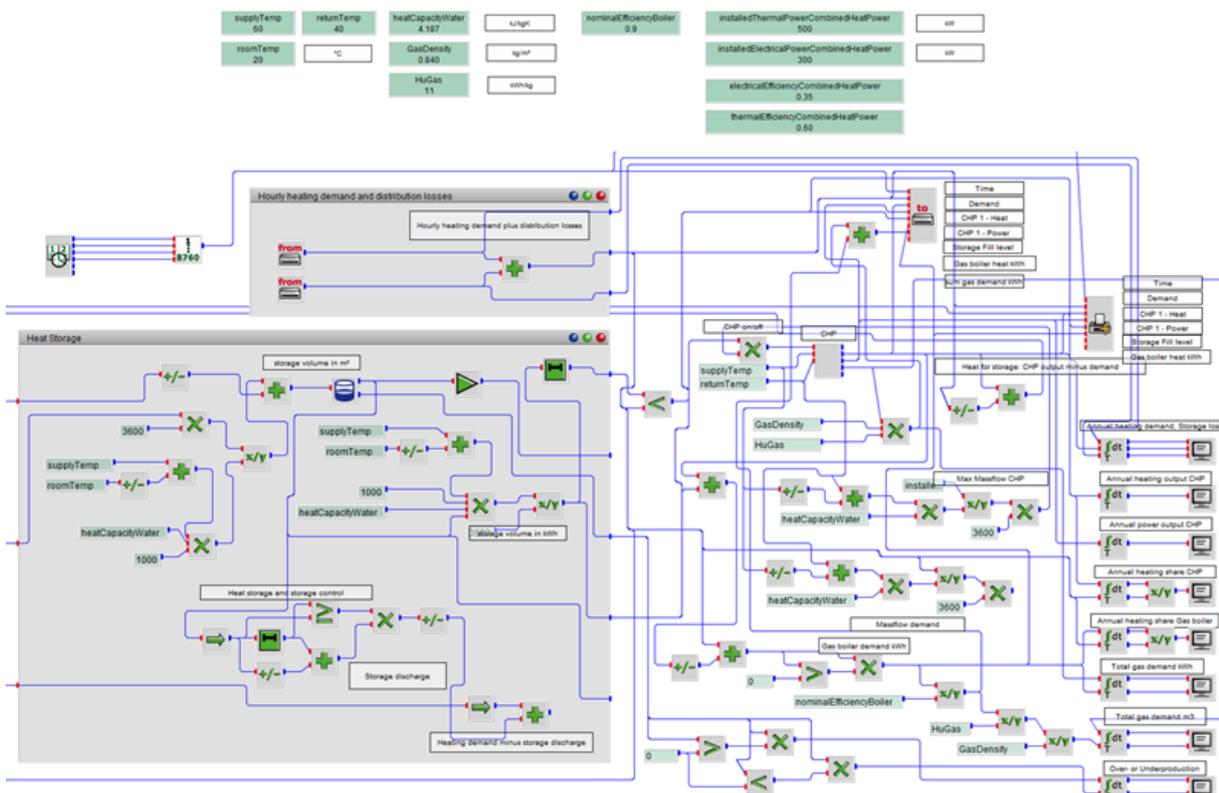


Abbildung 37: Ausschnitt aus INSEL Modell BHKW + Gaskessel + Speicher

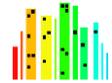


Abbildung 38 zeigt das INSEL Modell „Biomassekessel + Gaskessel“. Hier wird eine Minimalleistung des Biomassekessels von 35 % der Nominalleistung berücksichtigt. Dies ist erforderlich, um eine vermehrte Rauchentwicklung bei Betrieb unterhalb dieser Schwelle zu verhindern.

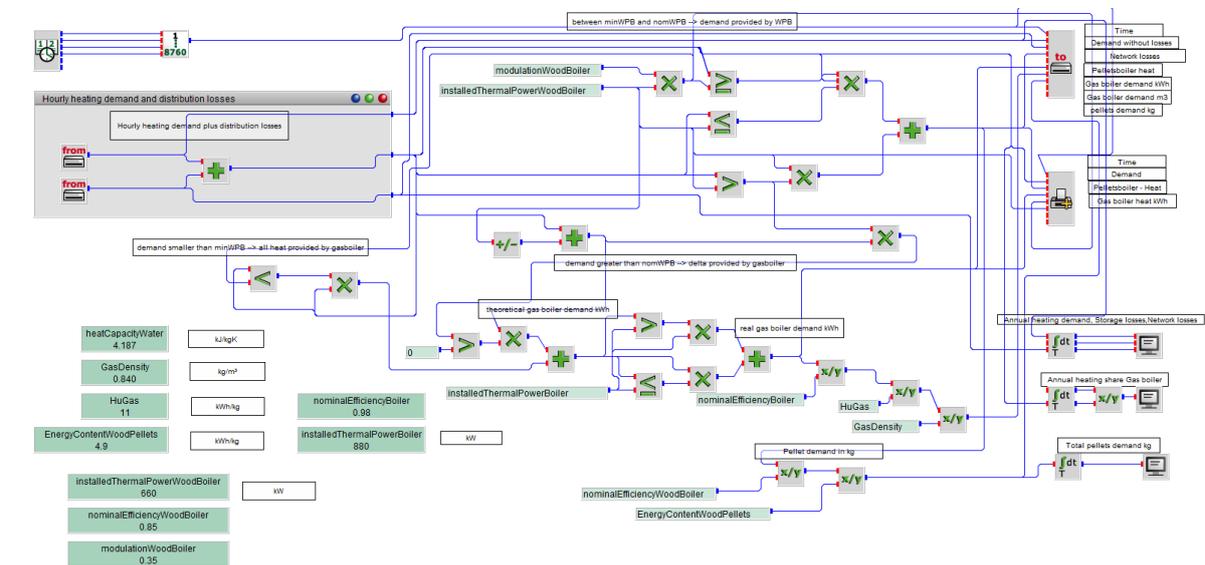
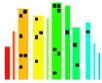


Abbildung 38: INSEL Modell Biomassekessel + Gaskessel

In der projektbegleitenden Publikation „*Multiscale Framework for Predicting Distributed Renewable Thermal Energy Integration*“ [19] wurden zwei der anschließend noch weiterentwickelten Modelle vorgestellt und auf eine Fallstudie angewandt. Dabei wurde eine Methode entwickelt, um auf Basis von 3D-Gebäudemodellen im CityGML-Format und deren simuliertem Wärmebedarf zentrale Energieerzeugungs- und -versorgungsszenarien mit einem Fernwärmesystem für Städte automatisch zu dimensionieren und zu berechnen. Zusätzlich wird die Dachgeometrie jedes einzelnen Gebäudes zur Modellierung des PV Potenzials verwendet. Zwei Arten von Versorgungssystemen, nämlich ein zentrales Wärmepumpensystem und ein großes Kraft-Wärme-Kopplungs-System (beide mit zentralem Speicher und Wärmenetz), werden modelliert, um den Wärmebedarf des Untersuchungsgebiets zu decken. Beide Energieerzeugungsmodelle wurden zu Testzwecken auf eine Fallstudie mit 1610 Gebäuden im Landkreis Ludwigsburg angewandt. Für das Wärmepumpen -Szenario kann gezeigt werden, dass der Wärmebedarf der Fallstudie durch ein monovalentes Niedertemperatursystem mit Speicher gedeckt werden kann, die PV jedoch nur 15 % zur Deckung des Strombedarfs der Wärmepumpe beiträgt. Für das KWK-Szenario können nur 61 % des Wärmebedarfs durch das BHKW gedeckt werden, da es für ein Minimum von 4000 Betriebsstunden ausgelegt wurde. Der restliche Bedarf wird über einen Gaskessel gedeckt. Sowohl der PV- als auch der BHKW-Überschussstrom werden vollständig in das Netz eingespeist. Der primärenergetische Vergleich der beiden Systeme hängt daher stark von dem jeweilig gewählten Primäreinsatz mit seinem zugeordneten Primärenergiefaktor (PEF) ab: Bei den gegebenen deutschen Vorschriften schneidet das BHKW-System besser ab als das WP-System, da der ins Netz eingespeiste Strom einen PEF von 2,8 hat. In der Zukunft, mit zunehmend niedrigeren PEFs für Strom, kehrt sich die Situation um, und die KWK-Anlage schneidet schlechter ab, insbesondere wenn die KWK-Anlage weiterhin Erdgas verwendet. Selbst wenn erneuerbares Gas aus einem Power-to-Gas (P2G)-Prozess für die KWK verwendet wird, ist die Primärenergiebilanz des Wärmepumpen -Systems besser, da die Umwandlungsverluste im P2G-Prozess hoch sind.



Der Anwender benötigt darüber hinaus gewisse Grundkenntnisse über die Technologievarianten und deren sinnvolle Dimensionierung. Um die Dimensionierung zu erleichtern, wurden im Rahmen der Praxisbearbeitung plausible und typische Grenzparameter für die Erzeugerdimensionierung in **Tabelle 5** erstellt.

Tabelle 5: Typische Grenzparameter zur Erzeugerdimensionierung

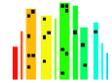
| Erzeugerdimensionierung | | | | | | | |
|---|----------------------------|--|--|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| typische Startwerte für Erzeuger (Anfang eines iterativen Erzeugerauswahlprozesses in Abh. v. PEF und Wirtschaftlkt.) | | | | | | | |
| Systemkombinationen | Lastanteil | Leistungsanteil Grundlast/ EE | Leistungsanteil Spitzenlast | Vollbenutzungsstunden Grundlast | Vollbenutzungsstunden Mittellast | Vollbenutzungsstunden Spitzenlast | Wärmemengenanteil (bzw. spez. Anteil) Grundlast |
| BHKW + Kessel | Grund- und Mittellast | 15-30% | Gesamtlast abzgl. Grundlast, abzgl. Mittellast | 4.500-8.000 Vbh | 4.500-6.500 Vbh | - | 50-80% |
| Luft-Wasser-Wärmepumpe | Grund- oder Mittellast | 20-40% | | 4.500 Vbh | 3.000 - 4.500 Vbh | - | 70-85% |
| Wasser-Wasser-Wärmepumpe (Abwasser / Grundwasser) | Grund- oder Mittellast | 20-30% | | 5.000 Vbh | 3.500 - 5.000 Vbh | - | 20-50 % |
| Sole-Wasser-Wärmepumpe (Geothermie) | Grund- oder Mittellast | 20-30% | | 5.000 Vbh | 3.500 - 5.000 Vbh | - | 20-50 % |
| dez. Luft-Wasser-Wärmepumpe | monovalent | 90-100% (el. TW-Unterstützung) | | - | - | 7.000 - 8.000 Vbh | 95-100% |
| | Grund- und/oder Mittellast | 35-100% (ggf. zzgl. zusätzlicher Erzeuger) | | - | - | - | - |
| Holzkessel | Grund- und/oder Mittellast | 35-100% (ggf. zzgl. zusätzlicher Erzeuger) | | 1.600-2.300 Vbh | 1.200-1.600 Vbh | 850-1.200 Vbh | 50-90% |
| Solarthermie | Grundlast | 10%-30% | | - | - | - | 15-30% |

Die automatische Dimensionierung der Komponenten mit Hilfe von Regeln sowie einem genetischen Algorithmus wird ausführlich in der projektbegleitenden Publikation „*Automatic Dimensioning of Energy Generation Components and System Simulation*“ [20]. Hier wird die Dimensionierung der Systemkomponenten anhand zwei verschiedener Methoden vorgenommen, auf eine Fallstudie angewandt und anschließend verglichen.

In dieser Veröffentlichung wird einen Ansatz zur automatischen Modellierung und Simulation von Energiesystemen vorgestellt. Verwendet werden dabei zwei verschiedene Methoden zur Dimensionierung der Komponenten eines Systems: Ein Ansatz ist eine einfach zu bedienende und anpassbare regelbasierte Methode, bei der die Größe der Komponenten z. B. auf dem Wärmebedarf der Gebäude basiert. Der zweite Ansatz ist die Dimensionierung der Komponenten mit einem genetischen Algorithmus und einer Zielfunktion zur Reduzierung der jährlichen Gesamtkosten. Beide Methoden für zwei verschiedene Systemdesigns angewendet und in einer Fallstudie verglichen. Ein System ist ein dezentrales Wärmepumpensystem mit Back-up-Gaskessel, thermischem und elektrischem Speicher und PV, das andere System ist ein wasserstoffbasiertes zentrales Brennstoffzellensystem mit Elektrolyse, thermischem und elektrischem Speicher und PV. Verglichen wurden beide Systeme auf der Basis von aktuellen (2020) und zukünftigen (2050) Rahmenbedingungen. Die Ergebnisse zeigen höhere Kosten für das Wärmepumpensystem mit regelbasierter Dimensionierung, während der genetische Algorithmus den Gaskessel gegenüber der Wärmepumpe bevorzugt, um die jährlichen Gesamtkosten zu senken. Das Wasserstoffsystem mit optimierter Dimensionierung ist unter den Bedingungen des Jahres 2050 wirtschaftlich tragfähig. Je nach Anwendungsfall haben beide Ansätze ihre Vorzüge: Die regelbasierte Dimensionierung kann schnell eine Vielzahl unterschiedlicher Szenarien simulieren, der genetische Algorithmus kann wirtschaftlich optimale Systemauslegungen erreichen, allerdings mit längerer Rechenzeit, insbesondere bei unbekanntem Rahmenbedingungen.

5.5.3.2. Flächenbedarfsermittlung für Heizzentralen bzw. Heizwerke

Zur Ermittlung des notwendigen Flächenbedarfes der Technikräume für Öl- und Gasbefeuerte Heizwerke, sowie für Fernwärmeübergabestationen wurde folgende Standardliteratur herangezogen:



- Richtlinie „VDI 2050 Blatt 1 – Anforderungen an Technikzentralen – Technische Grundlagen für Planung und Ausführung“ [22]
- „Gebäudetechnik: Leitfaden für Architekten und Ingenieure“ [23]

Für Biomassebrennstofflager (Pellets, Holzhackschnitzel) sowie zur Tankauslegung von Öltanks wurde folgende Grundlage verwendet:

- Richtlinie „Heizanlagenbau 2016 - Hinweise zum Planen und Bauen von Wärmeversorgungsanlagen für öffentliche Gebäude“ [24]

Der Flächenbedarf für eine Heizzentrale ohne Warmwasserbereitung lässt sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$A_{\text{Heizzentrale, ohne WW}} = 1,151 \cdot X^{0,5688}$$

Der Flächenbedarf für eine Heizzentrale mit Warmwasserbereitung hingegen wurde mit der nachfolgenden, abweichenden Formel berechnet:

$$A_{\text{Heizzentrale, mit WW}} = 1,0337 \cdot X^{0,6133}$$

In beiden Fällen steht „X“ für die thermische Leistung in [kW_{th}]. Zusätzlich wurden jeweils 10 % der oben berechneten Grundflächen für Druckhalte- und Nachspeiseanlagen ab einer thermischen Leistung von 150 kW veranschlagt. Sofern die Kessel nicht mit Gas, sondern mit Öl betrieben werden kann über die folgende **Tabelle 6** der zusätzliche Platzbedarf für das Öllager bestimmt werden:

Tabelle 6: Abschätzung der Lagerbevorratung für Heizöl in Abhängigkeit der Kesselleistung

| Kesselleistung | Lagermenge |
|----------------------|--------------------------------------|
| ≤100 kW | 1-facher Jahresbedarf ca. 1.200 Vbh |
| >100 kW bis 1.000 kW | 0,5-facher Jahresbedarf ca. 600 Vbh |
| >1.000 kW | 0,15-facher Jahresbedarf ca. 180 Vbh |

Vbh steht hierbei für Vollbenutzungsstunden. Diese errechnet die gesamte erzeugte Energiemenge über die Formel Kesselleistung [kW] * Vbh [h/a] = Energiemenge in [kWh/a].

Zugrunde liegt hier die Annahme, dass die Energiemenge eines Liters Heizöl ca. 10 kWh entspricht und eine Dichte von ca. 860 kg/m³ aufweist. Um aus der Bevorratungsmenge eine Tank-Grundfläche zu berechnen wurde ein geo-metrisches Verhältnis angesetzt:

$$A_{\text{Heizöltank}} = \sqrt{V_{\text{Lagermenge}} [m^3] \cdot 10}$$

Flächenbedarfsermittlung für gasmotorenbetriebene Blockheizkraftwerke

Zu dem benötigten spezifischen Flächenbedarf einer BHKW-Anlage konnten keine Literaturwerte gefunden werden, lediglich eine Informationsbroschüre der „Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.“ (ASUE) mit Angaben zu den Aggregatdaten verschiedener Anlagenhersteller in Abhängigkeit der Leistungen. Für den Flächenbedarf des Moduls wurde ergänzend zu den Maßen aus bekannten Aggregatdaten der Praxispartner eine umlaufende Arbeitsfläche von 1,0 m sowie Platzbedarf für einen Pufferspeicher sowie weitere periphere Systeme berücksichtigt. Daraus konnten die folgenden Formeln abgeleitet werden:

- BHKW Grundfläche: $A_{BHKW-Grundfläche} = 1,2036 \cdot X^{0,4821}$
- Raum für Elektrotechnische Anlagen: $A_{BHKW-Grundfläche-Elektro} = 15 [m^2/MW_{el}]$

Hier wurde abgeschätzt, dass pro Megawatt installierter elektrischer BHKW-Leistung ca. 15 m² benötigt werden.

- Raum für Periphere Systeme (Schmierölbevorratung, Gasdruckregelstrecke, Startsystem (Batterie bzw. Druckluft), Steuerschränke, etc.): $A_{BHKW-Grundfläche-Peripherie} = A_{BHKW-Grundfläche} \cdot 0,5$
- Fläche für Rückkühler (ohne Notkühlung): $A_{BHKW-Rückkühler} = 0,01 \cdot X - 1$

Diese Fläche wird im Außenbereich benötigt, wobei Anlagen < 200 kW in der Regel keinen Rückkühler im Außenbereich benötigen.

Für die Ermittlung des Flächenbedarfes der Pufferspeicher wurde ein empirischer Ansatz zu Grunde gelegt. Der Ansatz verfolgt unter anderem, dass größere Netze oft eine höhere Temperaturspreizung fahren und aufgrund der Speicherwirkung des Rohrleitungsnetzes ein geringeres Speichervolumen im Pufferspeicher benötigen, um die Anzahl der Starts- und Stopps der BHKW-Anlage auf ein materialschonendes Maß zu minimieren. Das Verhältnis Speicherradius zur -Höhe wurde mit 1:4 angesetzt. Das Pufferspeichervolumen bestimmt sich aus der nachfolgenden **Tabelle 7**:

Tabelle 7: Auslegungsparameter für den Pufferspeicher einer BHKW-Anlage zur Ermittlung des Flächenbedarfs

| thermische Leistung | Temperaturspreizung | Max. Speicherbeladungszeitraum unter Volllast |
|---|---------------------|---|
| < 150 kW _{th} | 20 K | 2,5 Vbh |
| > 150 kW _{th} ... < 1.500 kW _{th} | 20 K | 2,0 Vbh |
| > 1.500 kW _{th} | 30 K | 2,0 Vbh |

Aus diesen Annahmen ergibt sich die folgende Formel zur Flächenermittlung des Pufferspeichers, die in der folgenden **Abbildung 39** grafisch dargestellt ist: $A_{BHKW-Pufferspeicher} = 0,2336 \cdot X^{0,5456}$

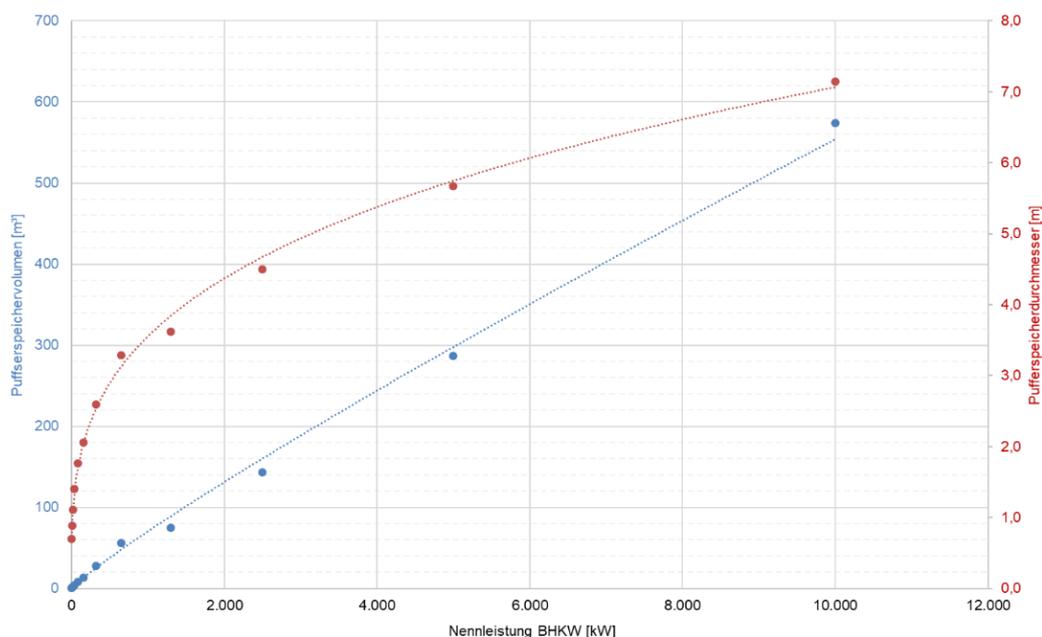
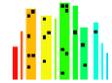


Abbildung 39: Darstellung der berechneten Pufferspeichervolumina und -durchmesser in Abhängigkeit der BHKW-Leistung.



Flächenbedarf für Lüftungsanlagen

Kleinst-BHKW-Anlagen sind raumluftabhängig und benötigen keine separaten Lüftungsanlagen. Bei BHKW-Aggregaten ab einer elektrischen Leistung von etwa 50 kW werden kleinere Abluftanlagen im Deckenbereich der Heizzentrale eingesetzt. Die Lüftungsanlagen bei großen BHKW-Anlagen befinden sich in der Regel im Stockwerk direkt über dem Motorenaggregat. Da die Lüftungskanäle mit Einbauelementen wie Schalldämpfer, Filter, Ventilatoren, usw. viel Raum einnehmen, wird der gesamte Raum über dem Motorenaggregat für die Lüftungsanlagen genutzt. Hier wurde der folgende Ansatz gewählt:

- Für BHKW-Anlagen bis 1.000 kW_{el}: Erforderliche lichte Raumhöhe 3,5 m
- Für BHKW-Anlagen >1.000 kW_{el}: Erforderliche lichte Raumhöhe 7,0 m (= 2. Ebene für die Lüftungsanlagen).

Flächenbedarfsermittlung für Biomasseheizwerke

Besonders bei Biomasseheizanlagen lässt sich der Flächenbedarf nicht präzise berechnen. Zu einem gibt es eine Reihe von verschiedenen Fördertechniken zum Transport des Brennstoffs von der Bunkeraustragung bis in den Kessel sowie nach der Verbrennung für den Transport der anfallenden Asche aus dem Kessel. Zum anderen ist die Abgasreinigung aufwendig und sehr individuell. In der Literatur konnten keine Empfehlungen für Raumgrößen gefunden werden. Um dennoch einen groben Ansatz zu erhalten, wurden die Ist-Daten aus vorhandenen Quartieren der Praxispartner tabellarisch zusammengetragen und deren Flächenbedarf betrachtet. Dabei wurden Anlagen aus dem Bereich zwischen 60 kW_{th} und 10.000 kW_{th} untersucht.

Die Grundfläche für Biomasseheizwerke, ohne Brennstofflager lässt sich demnach mit folgender Formel bestimmen: $A_{BMK-Grundfläche} = 0,0711 \cdot X + 20,8$. Hinzu kommen noch die Brennstofflagerflächen, welche je nach eingesetztem Brennstoff (Holzhackschnitzel oder Pellets) unterschiedlich ausfallen. Der Heizwert, die Feuchtigkeit sowie die Schnitzelgröße bei Holzhackschnitzelanlagen variieren stark, sodass jede Anlage gesondert betrachtet werden muss und der eingesetzte Brennstoff bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden kann. Für eine grobe Abschätzung wurden die in **Tabelle 8** aufgeführten Werte und Formeln zur Berechnung der Grundfläche des Brennstofflagers genutzt.

Tabelle 8: Abschätzung der Lagerbevorratung von Biomasse in Abhängigkeit der Kesselleistung und Brennstoffart

| | Pellets | Holzhackschnitzel |
|--|--|--|
| Heizwert [kWh/kg] | 4,9 | 3,5 ¹⁴ |
| Schüttraumdichte [kg/Sm ³] | 650 | 312 ¹⁵ |
| Lagermenge (monovalent) | ≤ 150 kW _{th} = 1.500 Vbh > 150 kW _{th} = 750 Vbh | ≤ 100 kW _{th} = 1.200 Vbh > 100 kW _{th} = 600 Vbh |
| Lagermenge (bivalent) | | 360 Vbh (ca. 15 Tage) |
| Lagervolumen [m ³] | $V_{Br-Lager,Pellet} = \frac{X \cdot Vbh}{3.185}$ | $V_{Br-Lager,HHS} = \frac{X \cdot Vbh}{1.092}$ |
| Grundfläche [m ²] | $A_{Brennstoff-Lager} = \frac{V_{Br-Lager} [m^3]}{4 [m]}$ | |

¹⁴ Der Heizwert ist stark Brennstoff- und Feuchteabhängig. Gewählter Ansatz: Pappel, Buche oder Fichte mit einem Wassergehalt von ca. 20 - 30 %.

¹⁵ Die Schüttraumdichte ist stark Brennstoff- und Feuchteabhängig. Wert kann für Pappel und ggf. Fichte angesetzt werden.

Flächenbedarfsermittlung für Fernwärmeübergabestationen

Für den Flächenbedarf von Fernwärmeübergaberäumen konnten tabellarische Werte als Empfehlung gefunden werden. Mit folgendem Term können annähernd die in der Tabelle gefundenen Werte nachgebildet werden:

$$A_{FW\text{-Übergabestation}} = 0,5117 \cdot X^{0,4648}$$

5.5.3.3. Einbindung der thermohydraulischen Simulation

Entsprechend der Spezifikation des SimStadt-Workflows (vgl. **Abbildung 2**) werden Teile des Arbeitsschritts 7 sowie der Arbeitsschritt 10 mit dem externen Expertentool STANET umgesetzt (siehe **Abbildung 40**). Aufgrund der hohen Komplexität thermohydraulischer Simulationen ist direkte Integration bzw. Einbettung solcher Rechenoperationen nicht sinnvoll oder der primären Zielstellung des Vorhabens angemessen.

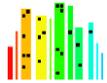
Für die thermohydraulischen Netzberechnungsprogramm mit STANET ist eine geografisch verortete Wärmebedarfsermittlung erforderlich. Diese umfasst die Summe aus der Warmwasserbereitung und der Heizlast für jedes Objekt in den Maximal- bzw. Minimallastfällen Sommer und Winter sowie für den Lastfall Übergangszeit. Zudem müssen bereits vor der Netzsimulation der Einspeisepunkt bzw. der Standort der Wärmeerzeugungsanlagen festgelegt werden. Anhand dieser Eingangsgrößen wird in STANET mithilfe des SimStadt-Tools das Netzmodell erzeugt, mit welchem anschließend drei Lastfälle berechnet werden. Die Dimensionierung der Rohrleitungen erfolgt ausschließlich bei Wärmehöchstlast. Es sind keine Lastprofile notwendig, da aus der Wärmebedarfsermittlung fertige Lastwerte übermittelt werden.

Der Output aus der STANET-Simulation sind zum einen die Netzverluste und relevante Ergebnisse zur Ermittlung des Pumpstromaufwands (Fördermenge, Förderhöhe) und zudem ein Nennweitengerüst, aus welchem die Netzinvestitionen kalkuliert werden können.



Abbildung 40: SimStadt Workflow-Steps 9 bis 11 mit STANET-Anwendung

Die Ergebnisse der Netzberechnung sind somit Eingangsgrößen für die erneute Wärmebedarfsermittlung (Netzverluste) und für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Nennweitengerüst, Pumpstromaufwand).



Presetting

Bevor in STANET mit der Netzberechnung begonnen werden kann, sind nach dem Datenimport folgende Voreinstellungen vorzunehmen (vgl. **Abbildung 41**):

- Auswahl der Berechnungsmethodik (z. B. Prandtl-Colebrook)
- Vorgabe der Rohrtypen (KMR Standarddämmung) und Freigabe zur Dimensionierung
- Druckhaltung (wird über SimStadt-Tool festgelegt, ist ggf. manuell anzupassen)
- Vorlauf- und Rücklauftemperaturen in Abhängigkeit des jeweiligen Lastfalls
- Rohrrauigkeit (Standardeinstellung 0,07 mm)
- Außentemperatur in Abhängigkeit des Lastfalls (Winter, Sommer, Übergangszeit)
- Grenzparameter zur Netzdimensionierung (max. spezifischer Druckverlust 1,5 bar/km, max. Strömungsgeschwindigkeit 5 m/s)

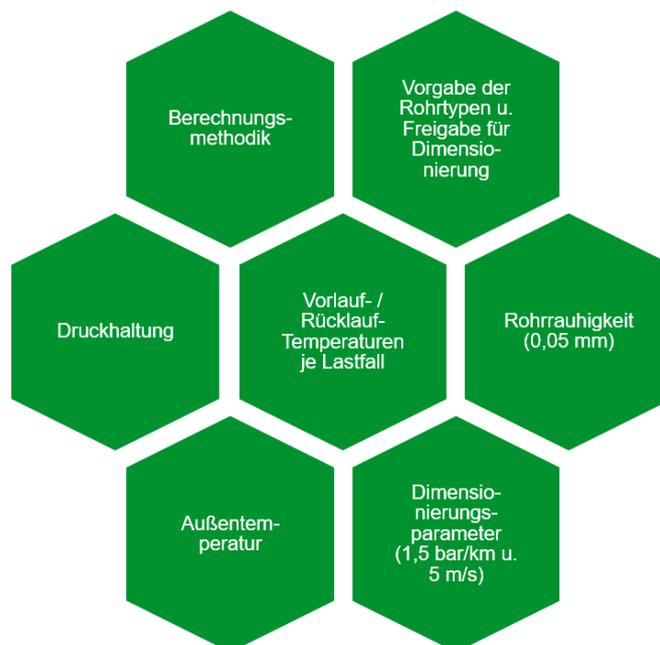
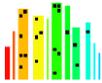


Abbildung 41: STANET Presetting

Datenimport nach STANET

Die Importdaten für einen Anwendungsfall (Szenario) werden durch SimStadt auf Grundlage des 3D-Stadtmodells in Form einer CSV-Datei zur Verfügung gestellt. Diese Datei enthält die folgenden Netzelemente inkl. erforderlicher Attribuierung:

- Knoten: Knotenname, x-Geokoordinate, y-Geokoordinate, Teilnetz, Kategorisierung in VL bzw. RL.
- Leitungen: Zuordnung Anfangs- und Endknoten, Länge, Innendurchmesser, Teilnetz, Wärmedurchgangszahl, Material, Nennweite, Layer. Für die Rohrrauigkeit erfolgt eine einheitliche Annahme von 0,7 mm.
- Abnehmer: Knotenname und -nummer, Name, Normverbrauch Layer, ggf. STANET-ID, Ausrichtung, ggf. RL-Temperatur, Einheit kW.



- Wärmetauscher: Anfangs- und Endknoten, Layer.
- Einspeisewerke: Anfangs- und Endknoten, Druckhaltung J, Wärmeleistung unbekannt J, Soll-druck VL, Solldruck RL, Solltemperatur VL.
- Sonstige Simulationsvorgaben wie bspw. die angesetzte Rücklauftemperatur.

Als Default-Eintrag in STANET für das Verlegesystem wird, sofern keine konkreten Informationen vorliegen, der Rohrtyp KMR mit Standarddämmung angenommen. Abweichende Einstellungen können bei Bedarf auch gezielt angepasst werden. Die Formatierung der CSV-Importdatei ist durch die Spezifikation der in STANET integrierten SDF/CSV-Schnittstelle vorgegeben und muss dieser entsprechen. Der hierüber importierte SimStadt-Trassenentwurf kann dann automatisch um Rücklaufleitungen inklusive Wärmetauscher für jeden Abnehmer ergänzt werden. Das resultierende Netzmodell ist bereits vollständig rechenfähig.

Über den gewählten Rohrtyp werden in STANET automatisch die Nennweite (der Innendurchmesser), die Rauigkeit und die Wärmedurchgangszahl definiert. Der Verlustfaktor (15 % = Erfahrungswert) zur Abbildung zusätzlicher Druckverluste über Einbauteile wie Bögen und Armaturen ist abhängig von der Leitungslänge, der Nennweite und dem Dämmstandard des Rohrs. Er wird mittels folgender Formel ermittelt:

$$\frac{0,023 * 0,15 * \text{Länge}}{\text{Innendurchmesser}}$$

Die Berechnung erfolgt iterativ und abschnittsweise in Abhängigkeit des jeweiligen Rohrtyps.

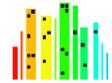
Die Lage der Erzeugeranlagen wird gemäß Workflow im Regelfall bereits bei der initialen Szenario-Konfiguration definiert und mit den Importdaten an STANET übermittelt. Dabei werden georeferenzierte Koordinaten des Einspeisepunktes, bspw. einer Heizzentrale, in Form von Längen- und Breitengrad übergeben. Ist die Lage dagegen unbekannt oder noch nicht festgelegt, wird eine zentrale Erzeugereinheit automatisch in der geometrischen Mitte des Auswahlgebietes platziert.

Die Abnehmer werden mit ihren individuellen Leistungsbedarfen (für die Lastfälle Winter, Übergangszeit und Sommer) bereits in SimStadt berechnet und nach STANET importiert. Da die jeweiligen Lastannahmen dabei auch die Gleichzeitigkeiten einbeziehen müssen, wurde ein entsprechender vorgelagerter Berechnungsschritt im SimStadt Workflow vorgesehen (Step 8). Das bedeutet jedoch, dass bei der Simulation in STANET zusätzlich weder ein Lastfaktor noch ein Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt werden muss. Somit erübrigt sich ferner auch eine Definition dedizierter Verbrauchsprofile.

Eine Betrachtung topographischer Aspekte ist beim definierten Roundtrip zwischen SimStadt und STANET vorerst nicht vorgesehen. Bei Quartierskonzepten sind die geodätischen Höhen im Regelfall irrelevant, da die Differenzen innerhalb der betrachteten Areale selten so groß werden, um sich entscheidend auf das Netzkonzept auswirken zu können. Sowohl die Netzdimensionierung als auch der Pumpstromaufwand sind von geodätischen Höhen ohnehin unabhängig.

Datenverarbeitung in STANET

Die Differenzierung zwischen Hausanschluss- und Verteilleitungen erfolgt in STANET nicht explizit am Objekt, sondern durch eine separate Repräsentation in unterschiedlichen Teilmodellen (Layern). Für die



thermohydraulische Auslegung lassen sich auf diese Weise unterschiedliche Gleichzeitigkeiten ansetzen. Hausanschlüsse können somit, abweichend vom übrigen Netz, mit einer maximalen Gleichzeitigkeit von 100 % dimensioniert werden. Da in SimStadt jedoch alle autogenerierten Rohrstränge in einem gemeinsamen Modell abgebildet werden, lassen sich Hausanschlüsse hier nicht mit einer abweichenden Gleichzeitigkeit dimensionieren.

Nach dem ersten Dimensionierungsdurchlauf zur automatischen Nennweitenbestimmung wird der Verlustfaktor über o.g. Formel zunächst angepasst und anschließend ein zweiter Dimensionierungsdurchlauf gestartet. Die Dimensionierung der Rohrleitungen erfolgt sodann unter Berücksichtigung folgender Randparameter:

- Maximaler Reibungsverlust 1,5 bar/km (entscheidende Dimensionierungsgröße);
- maximale Fließgeschwindigkeit 5 m/s.

Manuelle Eingriffe in die STANET-Operation bleiben an mehreren Stellen erforderlich. Zunächst müssen alle für die Dimensionierung relevanten Rohrtypen in STANET explizit freigegeben werden. Außerdem ist über die Leitungstabellen für jeden Abschnitt gesondert sicherzustellen, dass STANET keine Optimierung der vordefinierten Rohrtypen durchführt.

Die Druckhaltung ist beim Import vordefiniert (VL-/RL-Druck = 6,0/2,0 bar). Ebenso wird für die Rücklauftemperatur ein globaler Wert für alle Abnehmer angesetzt (standardmäßig beim Import übermittelte RL-Temperatur = 55 °C). Die Vorlauftemperatur am Einspeisepunkt beträgt unter Höchstlast 90 °C und wird ebenfalls bereits mit der Importdatei übergeben. Je nach Szenario- und Lastfallbetrachtung sind die Rücklauf- und Vorlauftemperaturen folgend manuell anzupassen.

Die Simulation bzw. die Netzdimensionierung wird für den Höchstlastfall (Winter, Lastfaktor = 100 %) durchgeführt. Die drei Lastfälle Höchstlast (Winter), Minimallast (Sommer) und Teillast (Übergangszeit) dienen zur Ermittlung der Netzverluste sowie zur Abschätzung des jährlichen Pumpstromaufwands. Für alle drei Lastfallberechnungen wird ein eigenes STANET-Projekt angelegt. Nach Durchführung der Höchstlastberechnung inklusive Dimensionierung werden zwei Kopien des STANET-Projektes erzeugt, eines zur Berechnung des Teillastfalls und eines zur Berechnung des Sommerlastfalls. Die jeweiligen Netzlasten werden bereits in SimStadt berechnet und mit der Importdatei an STANET übergeben.

Nach der Dimensionierung muss die Druckhaltung auf „Differenzdruck und Mitteldruck“ geändert werden, damit am Netzschlechtpunkt der Differenzdruck mit 1,0 bar vorgegeben werden kann. Diese Einstellungen entsprechen einer Rücklaufdruckhaltung mit einem Ruhedruck von 2,0 bar.

Datenexport aus STANET

Aus den drei STANET-Projekten Höchstlast, Teillast und Minimallast werden für jedes Szenario drei separate Shape-Dateien über die integrierte ArcView® Export-Schnittstelle erzeugt. Diese enthalten alle relevanten Informationen zur Netztopologie (Nennweitengerüst) sowie die Simulationsergebnisse. Daneben legt STANET für jedes Projekt jeweils 15 weitere Dateien an. Sie beinhalten dezidierte Informationen zu den Netzelementen Abnehmer („CONSUMER“), Wärmetauscher („HEATEXCHANGER“), Einspeisewerk („HEATGENERATOR“), Knoten („NODE“) und Kanten bzw. Leitungen („PIPE“). Zu jedem der Netzelemente werden jeweils drei Dateien in den Formaten *DBF*, *SHP* und *SHX* erzeugt.

Die Netzverluste [kW] (Spalte „Wärmeverl.leist.“) werden aus den Einzelwerten für die Leitungsabschnitte aggregiert. Der Pumpstromaufwand ermittelt sich bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung anhand der Ergebnisse für das Einspeisewerk. Relevant sind hierfür die Größen „Durchfluss“ (= FLUSS) [t/h] sowie „ Δp “ (= DP) [bar]. Es ist zu beachten, dass die Förderhöhe der Netzumwälzpumpe (= Δp) einen Differenzdruck am Netzschlechtepunkt von 1,0 bar enthält, nicht aber die internen Druckverluste des Einspeisewerkes.

Zusammenfassung

Während der Aufbau des Netzmodells mithilfe des SimStadt-Tools weitestgehend automatisiert erfolgt, bleiben in STANET gezielte manuelle Eingriffe erforderlich (siehe **Abbildung 42**).



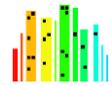
Abbildung 42: Manuelle Bearbeitungsschritte in STANET

Nach dem Import der Netzdaten wird bei den durch das SimStadt-Tool grob vordimensionierten Leitungsabschnitten der Verlustfaktor mittels o. g. Formel eingetragen. Somit kann die erste Iterationschleife zur Netzdimensionierung erfolgen. Mit den von STANET dimensionierten Nennweiten wird der jeweilige nennweitenabhängige Verlustfaktor angepasst und Simulation erneut durchgeführt.

Für die Netzberechnungen in der Übergangszeit und für den Sommerlastfall muss eine Kopie für das fertig dimensionierte STANET-Projekt erstellt werden. Die Wärmelast für die einzelnen Objekte im Sommer und in Teillast muss aus der Wärmebedarfsermittlung importiert werden. Somit können nun Netzberechnungen für alle drei Lastsituationen durchgeführt werden. Die Vorlauftemperatur ist ebenso wie die Außentemperatur für jeden Teillastfall entsprechend anzupassen.

Gemäß definierten Workflow liefert STANET für den Roundtrip mit SimStadt für jeden Lastfall eines Szenarios folgende Ergebnisse:

- Netzverluste [kW]
- Fördermenge [t/h]



- Förderhöhe [bar]

Das Nennweitengerüst bleibt dagegen für alle Lastfälle gleich und muss daher nur einmalig exportiert werden.

Die Netzverluste der drei Lastfälle Sommer – Winter – Übergangszeit müssen anschließend über das Jahr verteilt werden und zu einem stündlich aufgelösten Profil zusammengeführt werden. Dafür werden zunächst den drei Lastfällen Außentemperaturen zugeordnet. Der Winterlastfall tritt bei Außentemperaturen < -5 °C auf, der Sommerlastfall bei Temperaturen > 15 °C. Der Lastfall der Übergangszeit ist folglich bei einer Außentemperatur zwischen > -5 °C und > 15 °C anzunehmen. Um eine übermäßige Schwankung der Netzverluste durch kurzzeitige Temperaturschwankungen zu verhindern, wird der Wert der Netzverluste des entsprechenden Lastfalls zu jeder Stunde basierend auf der mittleren Außentemperatur der letzten 24 Stunden zugeordnet. Somit ergibt sich ein stündliches Profil der Netzverluste.

5.5.4. AP 5.4: Wissenschaftlich-technische Studie für neue urbane Infrastruktur

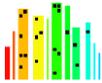
Die primäre Zielstellung des Teilarbeitspakets lag in der Erbringung eines universell anwendbaren Berechnungsmodells für das gesamte Spektrum der energetischen Quartiersentwicklung innerhalb des Kontexts, um auch bei der Simulation alternierender Planungsvarianten eine bestmögliche Vergleichbarkeit und Bewertbarkeit aller Ergebnisse sicherzustellen. Gleichzeitig mussten dabei alle im Lastenheft spezifizierten Anforderungen berücksichtigt bzw. erfüllt werden.

Unter diesen Vorgaben entwickelte GEF eine vereinheitlichte mathematische Methode zur Berechnung der ökologischen Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit in Anlehnung an VDI 2067. Die prototypische Implementierung zu Validierungszwecken erfolgte in *Microsoft Excel*. Da es sich bei dem entwickelten Rechenmodell um einen geschlossenen Algorithmus aus einer im Regelfall monokausalen oder chronologischen Abfolge von Einzelfunktionen handelt, ist eine vollständige Integration in den Code der SimStadt-Plattform unproblematisch.

Das Modell berechnet die im Lastenheft festgelegten KPIs zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und ökologischen Nachhaltigkeit. Hierfür sind, je nach Erzeugungsvariante, zunächst Angaben zahlreicher Eingangsparameter erforderlich. Hierzu zählen bspw. das Massengerüst des Wärmenetzes, Leistungskennzahlen und Vollbenutzungsstunden der Erzeugereinheiten sowie spezifische Energiekosten (z. B. Brennstoff- und Strompreise). Auf dieser Grundlage können sowohl die Investitions- als auch Betriebs- und spezifische Wärmegestehungskosten frei Kunde gemäß der Annuitätenmethode bestimmt werden. Zusätzlich liefert das Modell eine mittlere Abschätzung des Platzbedarfs für die gewählten Erzeugereinheiten. Zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit werden Primärenergie- und CO₂-Emissionsfaktor nach Stromgutschrift- bzw. der Carnot-Methode berechnet.

Neben der Berechnung von Planungsvarianten mit zentralen Erzeugereinheiten und leitungsgebundener Wärmeverteilung ist das Modell, der Spezifikation des Lastenhefts folgend, auch dazu in der Lage, dezentrale Versorgungsvarianten zu betrachten. Hierfür können bspw. Wärmepumpen unterschiedlicher Leistungsgröße angegeben werden.

Zur Bestimmung der Investitions- und Abschreibungskosten für leitungsgebundene Wärmenetze konnten langjährige Erfahrungswerte des Verbundpartners GEF eingebracht werden. Dazu wurden aktuelle



Abschätzungen der Kosten für erdverlegte KMR-Systeme bezogen auf die Längeneinheit Meter in Abhängigkeit verschiedener Nennweiten, Druckstufen und Dämmstandards zusammengefasst (Tabelle im Anhang unter Anlage 11). Da es sich hierbei um sensibles, geschäftsrelevantes Praxiswissen handelt, können die Daten in Abstimmung der Verbundpartner jedoch nicht veröffentlicht werden.

Neben der reinen Datenausgabe in unterschiedlichen Formatierungen können die Ergebnisse im Excel-Prototypen des Berechnungsmodells auch in tabellarischer (siehe **Abbildung 43**) oder graphischer Form visualisiert werden.

Wirtschaftliche Kennwerte

| | Investitionskosten [€] | Anteil an Gesteuerungskosten [€/MWh] | techn. Nutzungsdauer [a] |
|-------------------|---------------------------|---|-----------------------------|
| FW-Leitungsneubau | 1.014.758 | 35,45 | 40,00 |
| Grundstück | 160.000 | 5,25 | 50,00 |
| Gebäude | 320.000 | 11,18 | 40,00 |
| BHKW | 175.663 | 14,71 | 15,00 |
| Speicher | 18.160 | 0,87 | 20,00 |
| Kessel | 63.700 | 3,06 | 20,00 |
| Biomassekessel | 0 | 0,00 | 20,00 |
| Wärmepumpe | 0 | 0,00 | 15,00 |
| Anlagentechnik | 49.160 | 1,79 | 15,00 |
| Summe | 1.801.441 | 72,31 | |

Ökologische Kennwerte

| | | |
|---|--------|------------------------|
| Primärenergiefaktor $f_{p,FW}$ | 0,80 | |
| CO ₂ -Emissionsfaktor f_{WL} | 0,1930 | t CO ₂ /MWh |

Sonstige Kennwerte

| | | |
|---------------------------------------|-------|---------|
| Wärmeinspeisung | 1.985 | MWh |
| Wärmeabsatz | 1.668 | MWh |
| Netzverluste | 316 | MWh |
| Netzverluste, bezogen auf Einspeisung | 19% | |
| Trassenlänge (Neubau) | 1.805 | trm |
| Trassenlänge (Bestand) | 0 | trm |
| Linienlänge | 924 | kWh/trm |

| | Betriebskosten [€/a] | Anteil an Gesteuerungskosten [€/MWh] |
|-------------------------------------|-------------------------|---|
| W&I FW-Leitungen (Neubau) | 9.024 | 5,41 |
| W&I FW-Leitungen (Bestand) | 0 | 0,00 |
| W&I Kessel, Anlagentechnik, Gebäude | 2.841 | 1,70 |
| W&I BHKW | 13.019 | 7,80 |
| Pumpstrom | 5.359 | 3,21 |
| Brennstoff Kessel | 44.384 | 26,60 |
| Brennstoff Biomassekessel | 0 | 0,00 |
| Stromkosten Wärmepumpe | 0 | 0,00 |
| Brennstoff BHKW | 76.496 | 45,85 |
| Stromvergütung BHKW | -68.610 | -41,12 |
| Summe | 73.490 | 49,46 |

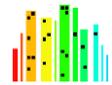
Summe Wärmegestehungskosten frei Kunde: **121,77 €/MWh**

Abbildung 43: Tabellarische Ergebnisdarstellung des Berechnungsmodells

Das entwickelte Modell wurde sowohl als Vorlage für die Weiterentwicklung der SimStadt-Plattform als auch zur Evaluierung von SimStadt anhand klassischer Methoden (AP 6.3) genutzt. Da das etablierte Praxisverfahren in SimStadt somit analog umgesetzt werden konnte, entsprechen sich beide Methoden. Eine dezidierte Validierung des SimStadt-Verfahrens (vgl. Kap. 5.6.3) an dieser Stelle ist aus diesem Grund überflüssig.

5.6 AP 6: Szenarien, Methodenvergleich, Anwendung an Fallstudien

Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurde das praktische Anwendungsspektrum für SimStadt bereits zielführend eingegrenzt und spezifiziert (siehe Kap. 5.1.1 und 5.1.2). Auf dieser Grundlage konnten konkrete Anwendungsfälle (Szenarien) beim Praxispartner SWS und den zum Verbund der MSW gehörenden *Mainzer Wärme GmbH* (MW) sowie *Überlandwerk Groß-Gerau GmbH* (ÜWG) identifiziert und definiert werden. Aufgrund der hohen Spezifität bzw. des ausgeprägten Unikatscharakters jedes Anwendungsszenarios in der Praxis wurden die einzelnen Fallstudien dabei so gewählt, dass sie in ihrer gesam-



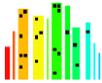
ten Bandbreite exemplarisch einen möglichst umfassenden Teil des potenziellen Anwendungsspektrums von SimStadt repräsentieren. Bei urbanen Entwicklungsprojekten in Kooperation mit lokalen Bau-genossenschaften oder kommunalen Gebietskörperschaften wird in der Regel die übergeordnete Zielstellung einer langfristig wirtschaftlichen, energetisch nachhaltigen und sozial akzeptierten Energieversorgung an das beteiligte EVU gestellt. Die Zusammenstellung wurde auch daraufhin überprüft und ausgerichtet.

Auf diese Weise konnten für die Evaluation von SimStadt adäquate reale bzw. realistische Praxisszenarien definiert werden. Sie resultieren alle aus aktuellen, geplanten bzw. in Planung befindlichen oder historischen Projekten der beteiligten Praxispartner und beziehen sich auf einen konkreten lokalen Planungsgegenstand.

Folgende Praxisszenarien konnten identifiziert und definiert werden:

- Szenario 1** Quartiersentwicklung (MSW/ÜWG): Neubau eines Stadtquartiers mit ca. 1.130 m² BGF in zentraler Lage zur überwiegenden Wohnnutzung durch einen Bauträger
- Szenario 2** Quartierserweiterung (MSW/ÜWG): Erweiterung eines bestehenden Stadtquartiers um ein MFH mit 12 WE
- Szenario 3** Quartierserwerb (MSW/ÜWG): Übernahme eines ca. 20 Jahre alten Stadtquartiers mit 91 WE inkl. Nahwärmenetz mit Anschluss- und Benutzungszwang
- Szenario 4** Stadtteilentwicklung (MSW/MW): Entwicklung eines neuen Stadtteils auf einer 34 Hektar umfassenden industriellen Konversionsfläche in zentraler Lage
- Szenario 5** Baugebiet mit Fernwärme (MSW/MW): Erweiterung eines bestehenden großstädtischen Fernwärmenetzes um ein Baugebiet zur überwiegenden Wohnnutzung mit 5,4 Hektar
- Szenario 6** Peripheres Mischgebiet (MSW/MW): Mischgebiet mit 56 EFH, Bürogebäuden und Werkstätten sowie Gewächshaus in der unmittelbaren urbanen Peripherie (Stadtrandlage)
- Szenario 7** Urbanes Mischnutzungsquartier (SWS): Erweiterung eines hochverdichteten urbanen Mischnutzungsquartiers mit Büros, Gewerbe, Wohnen und öffentlichen Nutzungen (Schule und Hallenbad)
- Szenario 8** Städtisches Wohnquartier (SWS): Reines Wohnquartier mit gemischter Eigentümerstruktur und Gasversorgung in der unmittelbaren urbanen Peripherie
- Szenario 9** Stromheizquartier (SWS): Reines Wohngebäudequartier mit gemischter Eigentümerstruktur und überwiegend Stromheizungen (Nachtspeicheröfen) in der mittelbaren urbanen Peripherie
- Szenario 10** Fernwärmenetz (SWS): Dezentralisierung und Dekarbonisierung eines großstädtischen Fernwärmenetzes

Zugunsten einer besseren Vergleichbarkeit wurden alle Szenarien in formal vereinheitlichten Steckbriefen beschrieben (siehe Anlagen 12 bis 21). Die aufgelisteten Kriterien entsprechen den Datenbasen und gewünschten Ergebniswerten, die, je nach individuellem Informationsstand und Entwicklungsfortschritt, für die Berechnung und Planung Verwendung finden bzw. erforderlich sind.



Im Zuge der Anforderungsanalyse wurde der Einsatz von SimStadt auf bestimmte, für die Praxispartner relevante Anwendungskontexte eingegrenzt (vgl. Kap. 5.1.1). Die Szenarien lassen sich diesen wie folgt zuordnen:

- Neubau eines Quartiers → Szenario 1 und 7
- Erweiterung eines bestehenden Quartiers → Szenario 2
- Erwerb einer Wärmezentrale und eines Nahwärmenetzes → Szenario 3
- Neubau eines Nahwärmenetzes → Szenario 8 und 9
- Neues Stadtviertel → Szenario 4
- Baugebiet mit Fernwärme → Szenario 5
- Umgestaltung eines bestehenden Fernwärmenetzes → Szenario 10

Auswahl der Fallbeispiele (Szenarien)

Die formulierten Anwendungskontexte und Szenarien dienen zunächst der allgemeinen Anforderungsanalyse sowie der Spezifikation zielführender Bewertungsverfahren. Für den weiteren Evaluierungs- und Validierungsprozess war aufgrund der Projektkapazitäten jedoch eine Konzentration auf max. drei Fallbeispiele erforderlich. Bei der Fokussierung spielten sowohl eine hinreichende Datenverfügbarkeit und individuelle datenschutzrechtliche Aspekte als auch ein möglichst großes exemplarisches Anwendungsspektrum sowie die Abbildung aller Praxispartner eine Rolle. Die Auswahl fiel auf folgende Szenarien:

- **Szenario 3:** Quartierserwerb in Rüsselsheim (MSW/ÜWG)
- **Szenario 6:** Peripheres Mischgebiet in Mainz (MSW/MW)
- **Szenario 7:** Urbanes Mischnutzungsquartier in Stuttgart (SWS)

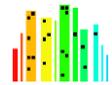
Da bei MSW als reine Holding selbst keine Projekte durchgeführt werden, wurden zur Bearbeitung des Vorhabens die Tochtergesellschaften Mainzer Wärme GmbH (MW) und Überlandwerke Groß-Gerau GmbH (ÜWG) eingebunden. Für das Szenario 7 ist SWS als Praxispartner verantwortlich.

Die unterschiedlichen Fokussierungen und Detaillierungsgrade bei der Ausarbeitung erklären sich durch abweichende lokalspezifische Rahmenbedingungen, individuelle Prioritäten der Praxispartner (situative Einschränkungen der optionalen Technologievarianten) sowie die jeweiligen Datenverfügbarkeiten und -qualitäten.

5.6.1. AP 6.1: Sachdatenerhebung und Monitoringkonzept Fallbeispiele

Die Szenarien beschreiben exemplarische Anwendungsfälle für den späteren Einsatz von SimStadt. Jedes Szenario hat einen konkreten lokalen Anwendungsbezug und kann damit räumlich und geographisch auch durch ein virtuelles 3D Stadtmodell repräsentiert werden, dessen Gebäude mit georeferenzierter Lage und Ausrichtung, Geometrie und Raumvolumen sowie, in detaillierten Modellen, auch mit Dachform, Stockwerken und Fassadendetails definiert sind.

Jedes Szenario beschreibt ein Quartier bzw. Quartierskonzept mit seinen multikriteriellen Rahmenbedingungen, Vorgaben und Einschränkungen und dient der Definition urbaner Entwicklungsvorhaben.



Die im Lastenheft bzw. den beinhalteten Szenario-Steckbriefen spezifizierten Kriterien und Parameter dienen damit gleichfalls auch der Konfiguration eines Projektes in SimStadt.

Reale Messdaten zu den Szenarien sind aufgrund der zugrunde gelegten Betrachtung von sowohl Bestands- als auch Neubauquartieren nicht flächendeckend und für beliebige Zeiträume vorhanden. Eine flächendeckende Einbindung von Messdaten der Verteilnetzbetreiber scheidet zudem auch aufgrund der vom Gesetzgeber geforderten Entflechtung von Netz-, Erzeugungs- und Vertriebsgesellschaften im Strom-, Gas- und Wärmesektor. Trotz dieser grundlegenden Schwierigkeiten ist es gelungen, für eine hinlängliche Verfügung von realen Messdaten bzw. Ist-Daten zur Bearbeitung des Vorhabens akzeptable Vorgehensweisen zu etablieren.

Sofern Ist-Daten zu Energieverbräuchen bzw. -bedarfen bei den Praxispartnern vorhanden waren, wurden diese auf dem Aggregationsniveau von kWh in stündlicher Auflösung zur Verfügung gestellt. Hintergrund ist die Darstellbarkeit von Gaslastgängen im Stundenbereich und die allgemeine Trägheit von Heizsystemen, welche eine höhere Auflösung nicht erlauben. Wo keine Ist-Daten vorhanden waren, konnten statistische Bedarfe auf der Basis der Flächen bzw. Volumina, der Nutzung und der Altersklassen von Gebäuden simuliert werden (siehe dazu Kap. 5.5).

Zur vergleichbaren Bewertung der Wirtschaftlichkeit und ökologischen Nachhaltigkeit von Planungsvarianten dienen die im Lastenheft spezifizierten KPI's (siehe Anlage 1, S. 25 ff.). Die Zweckmäßigkeit eines KPI ist dabei von der jeweiligen Technologievariante abhängig (vgl. dazu Kap. 5.6.2 und 5.6.3).

5.6.1.1. Vorhandene Informationen Szenario 3 (MSW/ÜWG)

Aufgrund der hohen Spezifität der einzelnen Anwendungsfälle wird folgend für jedes Szenario gesondert Bezug genommen.

Stadtmodell

Das Szenario der ÜWG beschreibt ein bestehendes Stadtquartier mit Nahwärme-Inselnetz, welches mittels Kraft-Wärme-Kopplung betrieben wird. Das Wohnquartier in peripherer Lage entstand vor ca. 20 Jahren besteht aus insgesamt 94 Wohneinheiten in 23 Gebäuden. Dabei handelt es sich um Einfamilienreihen- und Mehrfamilienhäuser sowie eine Kindertagesstätte. Da Bebauungsstruktur und -morphologie sehr homogen sind, können ähnliche energetische Baustandards angenommen werden. Die Dachausführungen bestehen zum überwiegenden Teil aus Satteldächern und Flachdächern. Es sind keine zusätzlichen Wärmeerzeuger im Baugebiet erlaubt.

Das 3D-Stadtmodell des Quartiers wurde vom Liegenschaftskatasterdienst des Landes Hessen über den Verbundpartner MOSS im Format CityGML zur Verfügung gestellt. Anhand vorhandener Luftbilder konnte die genaue Anzahl an Gebäuden und Wohneinheiten bestimmt bzw. überprüft werden.

Der Bebauungsplan des Quartiers datiert aus 2000. In der Folge sind die Gebäude in den darauffolgenden 1-3 Jahren entstanden. Ob Sanierungen innerhalb der ersten 15 Jahre durchgeführt wurden ist nicht bekannt.

Plan des Nahwärmenetzes

Die im SimStadt-Workflow verwendete Software STANET ermöglichte die Trassierung und Dimensionierung des Wärmenetzes sowie eine hydraulische Auslegung der Pumpen durch den Verbundpartner GEF.

Die generierte Auslegung des Netzes bindet alle Gebäude ein und ist aus fachlicher Sicht plausibel. Es wurde ein Heizkreis für das gesamte Netz generiert.

Verbrauchsdaten

Der Eigentümer des Quartiers konnte für den Zeitraum von 3 Jahren Ist-Daten zu den bezogenen Gas-mengen und abgerechneten Wärmemengen zur Verfügung stellen. Die installierte Heizleistung und die Anlagentechnik sind ebenfalls bekannt.

Einschränkung möglicher Technologievarianten

Mittels SimStadt wurde eine Erneuerung der vorhandenen Technologievariante aus Gaskessel mit KWK ausgelegt und berechnet. Als alternative Variante wurde eine Wärmepumpe als Ergänzung zum Gaskessel simuliert.

5.6.1.2. Vorhandene Informationen zu Szenario 6

Das gewählte Quartier in Mainz zeichnet sich dadurch aus, dass für die Szenarienrechnungen und den Methodenvergleich tatsächliche Wärmeverbrauchsdaten der Nutzer vorliegen. Die Mainzer Wärme betreibt dort seit mehreren Jahren eine Heizzentrale und ein Nahwärmenetz. Die Gebäude lassen sich hinsichtlich ihrer Nutzung und des zugehörigen Wärmeverbrauchs klar differenzieren. Erzeugungslastgänge liegen ebenfalls vor. Da vor Ort eine Holzhackschnitzelanlage betrieben wird, jedoch auch alternative Energieträger verfügbar wären, können auf fundierter Grundlage mehrere Technologievarianten evaluiert und validiert werden.

Stadtmodell

Von der Stadt Mainz wurde ein 3D-Gebäudemodell des Quartiers zur Verfügung gestellt (siehe **Abbildung 44**) und folgend in einem aufwändigen Prozess vom Verbundpartner HFT für die Weiterbearbeitung qualifiziert. Es mussten sowohl fehlende oder fehlerhafte Attribute ergänzt bzw. korrigiert als auch geometrische Fehler und Inkonsistenzen repariert werden.

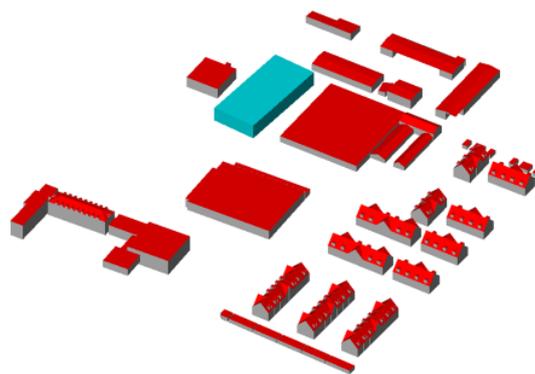
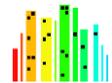


Abbildung 44: City GML Modell in LoD2 von Szenario 6

Im ursprünglichen Modell erwies sich u. a. das Attribut Baualter als überwiegend fehlerhaft. Die zugrundeliegenden Informationen entstammten aus der Auswertung von Luftbildern verschiedener Jahre. Eine korrekte Baualtersbestimmung war in Mainz jedoch nicht überall möglich, weil für bestimmte Zeitabschnitte keine flächendeckenden Luftbilder vorliegen.



Da auf Grundlage falscher oder fehlerhafter Baualtersklassen keine hinreichend exakte Abschätzung des Wärmebedarfes möglich ist, mussten die Baujahre zunächst überprüft und angepasst werden. Eine weitere Herausforderung stellte ein Büro- und Veranstaltungskomplex dar, für welchen zwar Wärmeverbrauchsdaten vorlagen, der jedoch aus mehreren Gebäuden und Gebäudeabschnitten unterschiedlicher Baujahre besteht. In solchen Fällen ist zu entscheiden, ob man den Gesamtkomplex zu einem Gebäude aggregiert und beim Baualter einen Mittelwert ansetzt oder ob die einzelnen Abschnitte als Einzelgebäude abgebildet werden und der Gesamtverbrauch aufgeteilt wird.

Der vorhandene Lageplan und frei zugängliche Satellitenfotos gaben eine Möglichkeit, zur Postbearbeitung des Modells auf Baustandard und Anschlussystematik zu schließen. An einer Stelle wurde ein Gebäude als solches erkannt. Bei näherer Betrachtung fiel jedoch auf, dass es sich um eine offene und somit unbeheizte Garage handelt. Allgemein konnte festgestellt werden, dass eine Nachbearbeitung zur Fehlerüberprüfung und -korrektur des Modells notwendig ist, um eine hinreichende Genauigkeit zu erhalten.

Plan des Nahwärmenetzes

SimStadt verfügt über die integrierte Funktion, für die leitungsgebundene Wärmeversorgung von Quartieren automatisch Trassenverläufe zu generieren. Als Ursprungs- bzw. Ausgangspunkt verwendet der Algorithmus dabei den geographischen Mittelpunkt des zu berechnenden Quartiers. Lokale Eigentumsverhältnisse oder Hindernisse erlauben in der Realität jedoch selten eine zentrale Platzierung der Erzeugungseinheit.

Daher musste eine andere Methode entwickelt werden, um die Lage der Wärmeerzeugungseinheit festzulegen und eine konzentrische Trassenführung von diesem Punkt ausgehend zu generieren. Diese wurde einerseits mit dem bestehenden Trassenplan und andererseits mit der Straßen- und Wegeführung im Quartier abgeglichen. Auch wenn eine Trassenführung über privates Gelände im Einzelfall möglich ist, wurde der Orientierungsfokus auf das öffentliche Straßen- und Wegenetze gelegt.

Verbrauchsdaten

Aus den Betriebsjahren 2012 bis 2018 wurden die jährlichen Wärmeverbräuche an den indirekten Wärmeübergabestationen ausgewertet. Diese sind geeicht gemessen. Aufgrund datenschutzrechtlicher Bestimmungen wurden jeweils 3-4 EFH zu einem Verbraucher aggregiert (geclustert). Des Weiteren wurde explizit festgehalten, welche Wärmeleistung und welche Wohnfläche jedem der EFH-Cluster zuzuordnen ist.

Die Sondernutzungen (5 Bürogebäude, 2 Werkstätten und ein Gewächshaus) wurden separat betrachtet. Diese werden durch einen separaten Strang des Nahwärmenetzes versorgt und sind von der Wohnbebauung somit topologisch entkoppelt.

Leistungsdaten (Wärmemengen)

In der Steuerung der Heizzentrale und des Wärmenetzes besteht die Möglichkeit, den Erzeugungszähler des Holzkessels und die Netzabgangszähler der Wärmenetzteile Neubausiedlung und Sondernutzung separat auszuwerten. Die Zuschaltleistung des Heizöl-Spitzenlastkessels konnte hingegen nur indirekt über eine Auswertung des Ölverbrauchs ermittelt werden, da hier kein Wärmemengenzähler installiert war.

Um die Ist-Daten mit den Monatsbilanzwerten aus der Kalkulation des Wärmebedarfs nach DIN 18599 vergleichend zu validieren, wurden die vorhandenen Viertelstundenwerte mit einer Tabellenkalkulation in Stundenmittelwerte umgerechnet. Die Netzlastgänge weisen jedoch tageweise Ausfälle der Datenerhaltung auf. Diese wurden mit dem Mittelwert der vorangehenden Werte interpoliert. Es wurde jeweils ein Mittelwert über so viele Werte, wie es leere Datensätze gibt, errechnet, um tageszeitliche Schwankungen zu berücksichtigen. Die interpolierten Werte sind in der Anlage 22 „Lastgang 2014_2018_interpol“ (rot markiert). Ab dem 05.11.2018 sind die ausgefallenen Werte zahlenmäßig größer als gespeicherte Istwerte. Falsche Werte (bspw. negative Daten) wurden gelöscht und unplausibel hohe Werte dahingehend geprüft, ob sie aufgrund fehlerhafter Zeitstempel ggf. zwei Stundenwerte tragen. Zudem wurden Ausreißerwerte bereinigt (siehe **Abbildung 45**, rote Markierungen) und Fehlstellen interpoliert (siehe **Abbildung 46**).

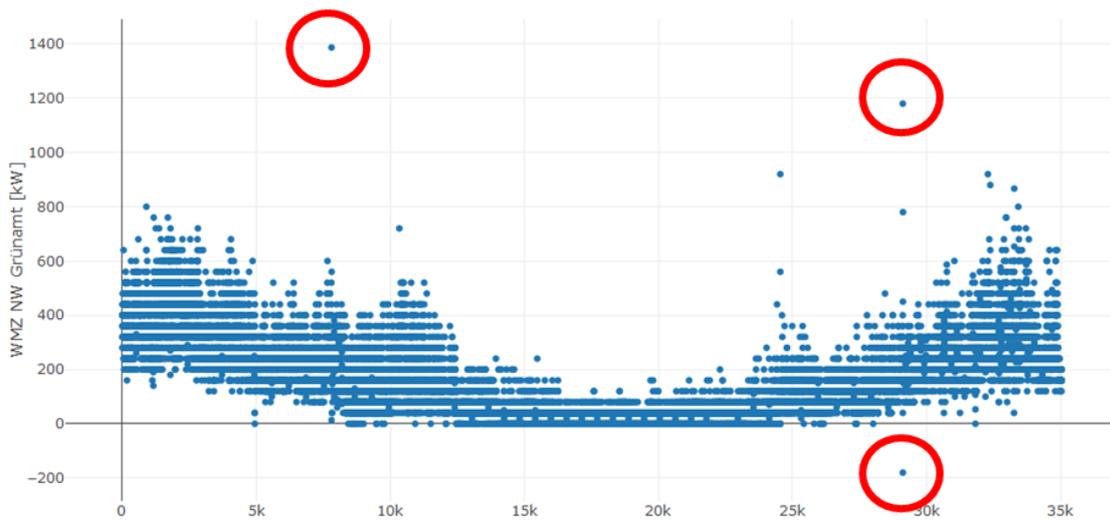


Abbildung 45: Messwerte Erzeugung Szenario 6 inkl. Ausreißer

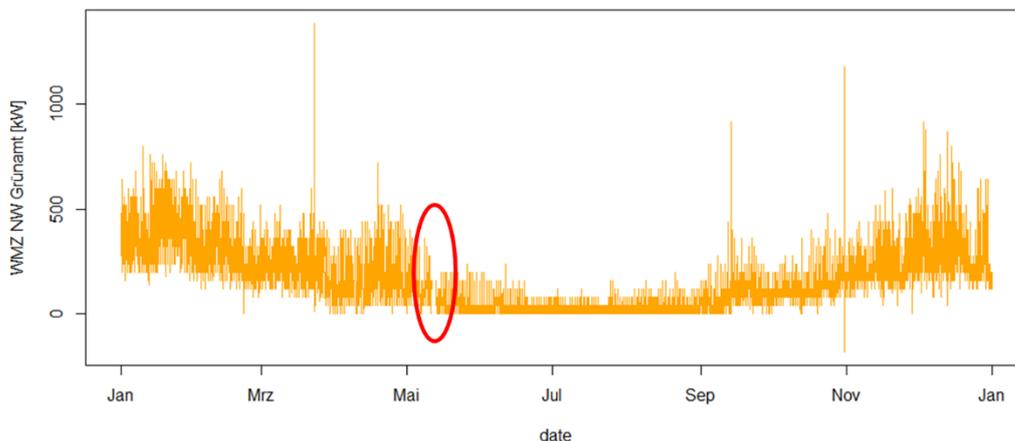
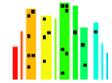


Abbildung 46: Messwerte Erzeugung Szenario 6 inkl. Fehlstellen

Der Bereich wurde daher komplett aus dem Jahr 2014 übernommen, welches eine ähnliche Gradtagzahlenverteilung im November/Dezember aufweist (2018/2014 → Nov: 388 zu 347, Dez: 499 zu 473 Kd). Betrachtet man den Mittelwert, so sind 5,67 % der Werte des Heizwerksabgangs interpoliert. Schließlich konnte so ein realistisches Gesamtprofil erzeugt werden.



Einschränkung möglicher Technologievarianten

Die von 2010 bis 2012 technisch erbaute Technologievariante umfasst einen Holzhackschnitzelkessel (naturbelassenes Holz) mit 660 kW Leistung und einen Öl-Spitzenlastkessel mit 1.600 kW Leistung. Die Heizzentrale ist am Rande des Quartiers untergebracht, sodass keine entsprechende Zuwegung innerhalb des Quartiers erforderlich war. Durch die sehr eng angrenzende Wohnbebauung wurden seitens der Bewohner Befindlichkeiten aufgrund der Emissionen geäußert. Eine emissionsärmere Erzeugungsvariante ist daher grundsätzlich zu bevorzugen.

In ca. 30 m Entfernung zum Quartier existiert ein Niederdruck-Gasnetz. Ein vorgelagertes Fernwärmenetz ist in ca. 500 m Entfernung vorhanden. Die Ausrichtung der Heizzentrale und weiterer Dächer für eine solare Abschätzung ist im Modell gegeben.

5.6.1.3. Vorhandene Informationen zu Szenario 7 (SWS)

Das Szenario in Stuttgart zeichnet sich durch abweichende Rahmenbedingungen aus. Die künftige Wärmeversorgung für das geplante innerstädtische Neubau-Quartier soll vollständig CO₂-neutral erfolgen. Dazu soll in einem benachbarten Abwasserkanal mithilfe eines Abwasserwärmetauschers Umweltwärme genutzt werden. Ergänzt werden soll das System durch eine Wärmepumpe sowie ein Blockheizkraftwerk und ein Gasbrennwertkessel, welche jeweils mit Biomethan betrieben werden (siehe **Abbildung 47**). Die Wärmeverteilung erfolgt über ein Nahwärmenetz zu den einzelnen Wärmeübergabestationen im Areal.

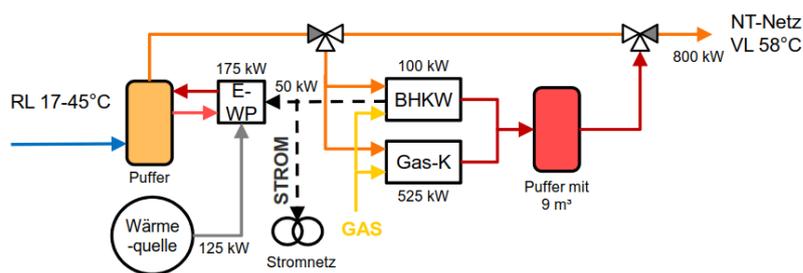


Abbildung 47: Geplantes Anlagensystem Szenario 7

Das Projekt soll auf einer industriellen Brachfläche (ca. 1,6 ha) realisiert werden. Die Landeshauptstadt Stuttgart (LHS) hat das Areal im Herbst 2011 zwecks städtebaulicher Entwicklung erworben und in einer umfangreichen Bodensanierung von Altlasten befreit. LHS plant, hier nun ein urbanes Quartier zu entwickeln. Das Areal soll in einzelnen Tranchen an verschiedene Bauträger und Baugemeinschaften vermarktet werden. Die Ausschreibung wurde Anfang 2018 begonnen. Der Baubeginn für die ersten Baufelder ist für das Jahr 2021 vorgesehen. Die Energiedienste der Landeshauptstadt Stuttgart GmbH, eine Tochter der Stadtwerke Stuttgart GmbH (SWS) werden die Wärmeversorgung zur Heizung und Brauchwassererwärmung im Quartier übernehmen. Aktuell ist die Vorplanung abgeschlossen. Der Montagebeginn der Heizzentrale wird voraussichtlich im Jahr 2022 stattfinden.

Stadtmodell

Da es sich bei Szenario 7 im Wesentlichen um eine Neubebauung handelt, sind zu den Gebäuden keine Ist-Daten verfügbar. Es liegt ein Bebauungsplan vor, der Lage, Nutzung, Kubatur, Flächen und Raumvolumina der Bebauung einschränkt, jedoch nur bedingt vorgibt. Ein detailliertes CityGML Stadtmodell der

umgebenden Bebauung und Verkehrswegeinfrastruktur war bereits vorhanden, Modelle der neuen Gebäude wurden auf Grundlage des Bebauungsplans ergänzt. Detaillierte Architekturpläne zu den einzelnen Bauabschnitten waren im Zuge der Bearbeitung jedoch noch nicht vollständig verfügbar.

Abbildung 48 zeigt die geplante Aufteilung der Nutzung und der Bruttogeschossfläche des Quartiers. Die Gebäude einer Firma, rot markiert, werden nicht an das Nahwärmenetz angeschlossen.

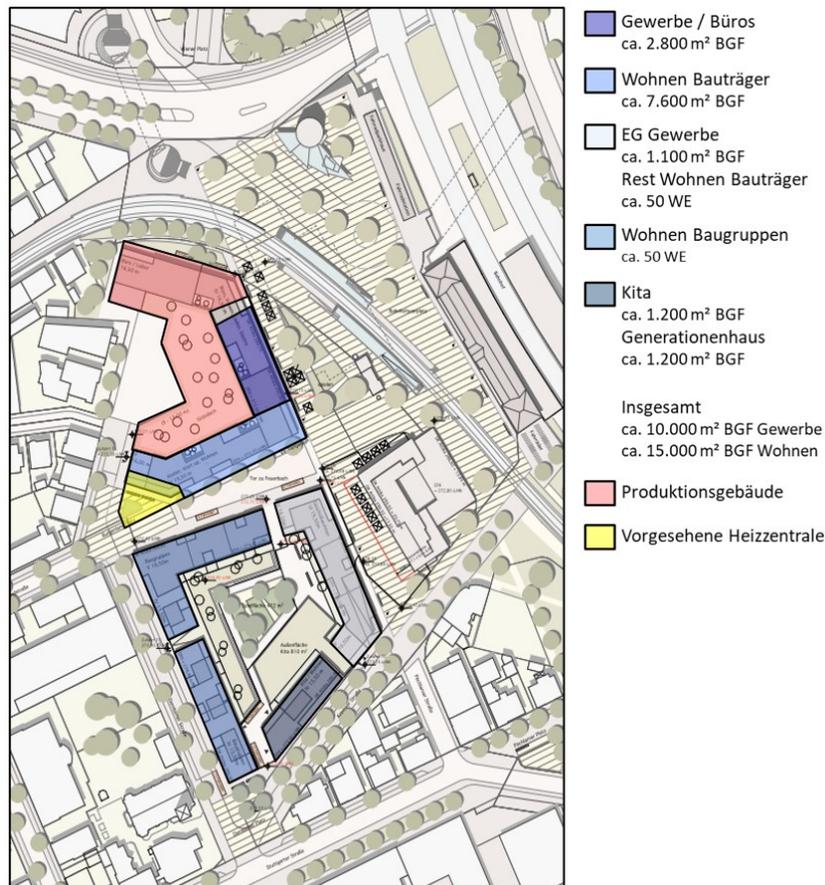


Abbildung 48: Lageplan und Nutzung Szenario 7

Plan des Nahwärmenetzes

Im Abwasserkanal südlich des Quartiers (siehe **Abbildung 49**, blau markiert) soll Umweltwärme durch einen Abwasserwärmetauscher genutzt werden. Die Leistung beträgt nach aktuellem Planungsstand 125 kW. Vom zentralen Heizraum (siehe **Abbildung 49**, rot markiert) ausgehend erfolgt die Wärmeverteilung über Heizwasserverteilungen, welche auf privatem Grund der Grundstückserwerber verlegt werden. Die Heizwasserverteilungen verlaufen im Wesentlichen gebäudeverlegt im Untergeschoss oder in der Tiefgarage zu den angeschlossenen Gebäuden.

Die Hausanschlüsse und Übergabestationen werden mit primärseitiger Volumenstrombegrenzung sowie einem Regler und einem Wärmezähler je Übergabepunkt errichtet. Die maximale sekundärseitige Vorlauftemperatur des Heizwassers liegt primärseitig bei 58 °C.

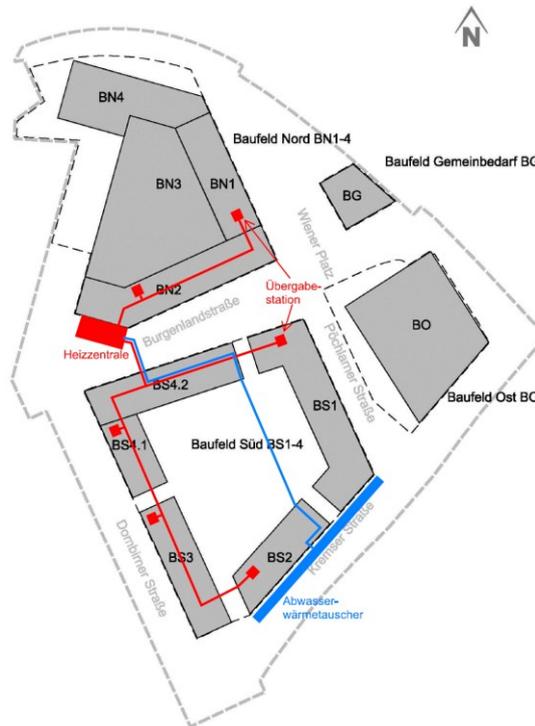
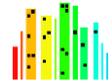


Abbildung 49: Netzplan Szenario 7

Wärmebedarf

Auf Basis der bekannten Bruttogeschossfläche und des bekannten Gebäudeenergiestandards KfW-Effizienzhaus 55 erfolgten im Zuge der Vorplanung der Stadtwerke Stuttgart spezifische Annahmen der Gebäudeheizlast und des Wärmebedarfs zum Energiekonzept (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Abschätzung von Wärmeleistung und -bedarf zu Szenario 7

| | beheizte BGF | Faktor NGF/BGF | beheizte NGF | Gebäudeheizlast | | Fernwärme | | Endenergie Gebäudegrenze | | | | Fernwärme | | |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------|--------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|
| | | | | spezifisch | absolut | Netzverluste | Leistung Zentrale | Heizwärme spez. | Heizwärme absolut | Wärme TWW spez. | Wärme TWW absolut | Summe Endenergie | Netzverluste | Wärme ab Zentrale |
| | m ² | | m ² | W/m ² | kW | kW | kW | kWh/m ² ·a | MWh/a | kWh/m ² ·a | MWh/a | kWh/a | MWh/a | MWh/a |
| Baufeld Nord | | | | | | | | | | | | | | |
| Wohnen | 6.200 | 0,85 | 5.270 | 40 | 210 | | | 50 | 264 | 25 | 132 | 396 | | |
| Büro | 2.100 | 0,85 | 1.785 | 50 | 90 | | | 40 | 71 | 3 | 5 | 76 | | |
| Laden / Gastronomie | 700 | 0,85 | 595 | 65 | 40 | | | 85 | 51 | 15 | 9 | 60 | | |
| Summe | 9.000 | | 7.650 | | 340 | 3 | 343 | | 386 | | 146 | 532 | 26 | 558 |
| Baufeld Süd | | | | | | | | | | | | | | |
| Wohnen | 8.800 | 0,85 | 7.480 | 40 | 300 | | | 50 | 374 | 25 | 187 | 561 | | |
| Büro | 0 | 0,85 | 0 | 50 | 0 | | | 40 | 0 | 3 | 0 | 0 | | |
| Laden / Gastronomie | 1.100 | 0,85 | 935 | 64 | 60 | | | 80 | 75 | 15 | 14 | 89 | | |
| Kita | 1.200 | 0,85 | 1.020 | 45 | 50 | | | 50 | 51 | 10 | 10 | 61 | | |
| Summe | 11.100 | | 9.435 | | 410 | 8 | 418 | | 500 | | 211 | 711 | 69 | 780 |
| Wohnen | 15.000 | | 12.750 | | 510 | | | | 638 | | 319 | 957 | | |
| Büro | 2.100 | | 1.785 | | 90 | | | | 71 | | 5 | 76 | | |
| Laden / Gastronomie | 1.800 | | 1.530 | | 100 | | | | 126 | | 23 | 149 | | |
| Kita | 1.200 | | 1.020 | | 50 | | | | 51 | | 10 | 61 | | |
| Summe | 20.100 | | 17.085 | | 750 | 11 | 761 | | 886 | | 357 | 1.243 | 95 | 1.338 |

Erforderliche max. Heizleistung ab Zentrale: rd. 770 kW
 Schätzung Jahreswärmelieferung: rd. 1.250 MWh
 davon Heizwärme: rd. 890 MWh
 davon TWW-Bereitung: rd. 360 MWh
 Schätzung Jahreswärmeeinspeisung Wärmenetz: rd. 1.400 MWh

Technologievarianten

Als **Versorgungsvariante 1** bzw. Referenzsystem wurde die Versorgung mit einem zentralen Gaskessel mit 600 kW Leistung und dezentralen PV-Anlagen auf den Dachflächen der Gebäude festgelegt (siehe **Abbildung 50**). Der Gaskessel speist das Nahwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 75 °C. Die Rücklauftemperatur beträgt 45 °C. Der Wirkungsgrad des Kessels inkl. Abgaswärmetauscher beträgt 98 % (bezogen auf Hs).

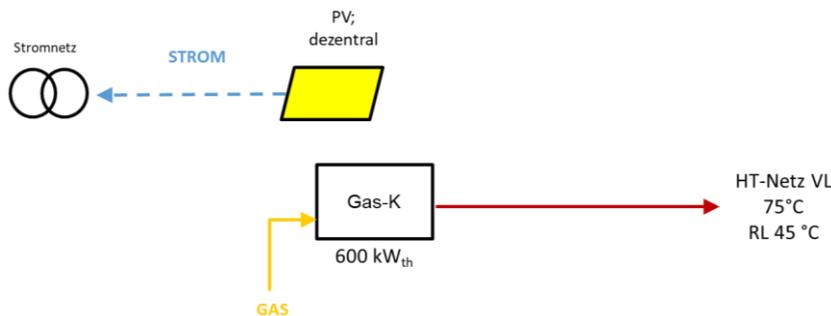


Abbildung 50: Schema der Versorgungsvariante 1 im Szenario 7

Als **Versorgungsvariante 2** wurde die Kombination eines zentralen BHKW mit 140 kW thermischer bzw. 207 kW elektrischer Leistung gewählt (siehe **Abbildung 51**). Die Reserveleistung für Spitzenlasten wird durch einen Gaskessel mit 600 kW realisiert. Das Wärmeerzeugungssystem speist ein Nahwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 75 °C und einer Rücklauftemperatur von 45 °C. Der Wirkungsgrad von Kessel und BHKW inkl. Wärmetauscher beträgt 98 % (bezogen auf Hs).

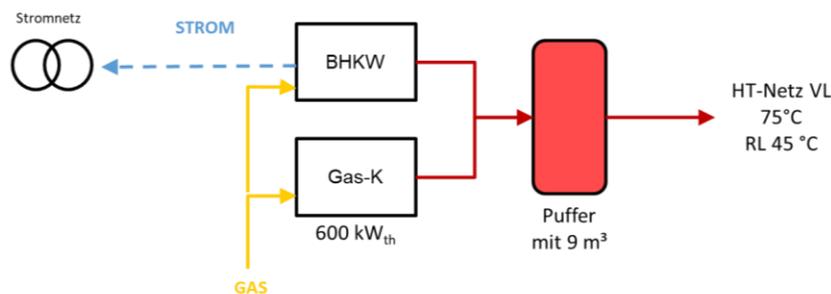


Abbildung 51: Schema der Versorgungsvariante 2 im Szenario 7

Die **Versorgungsvariante 3** sieht eine zentrale Wärmepumpe mit 175 kW Leistung sowie einem Gaskessel mit 600 kW Leistung vor (siehe **Abbildung 52**).

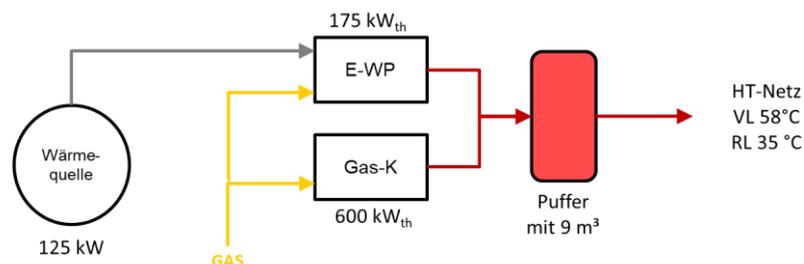


Abbildung 52: Schema der Versorgungsvariante 3 im Szenario 7



Als Umweltwärmequelle dient der an das Baugebiet grenzende Abwasserkanal mit einer mittleren Mediumtemperatur von 12,5 °C. Die Wärmepumpe erzeugt daraus eine resultierende Temperatur von 45 °C, die durch den Kessel auf die benötigte Vorlauftemperatur von 58 °C angehoben wird. Die Wärmeverteilung erfolgt schließlich durch ein Nahwärmenetz mit einer Rücklauftemperatur von 35 °C.

Der Wirkungsgrad des Kessels beträgt 98 % (bezogen auf Hs). Die JAZ der Wärmepumpe inkl. Pumpe AWT-Kreis liegt bei ca. 3,8 (mit Kältemittel R 513a, Quelle 10 °C, Vorlauf 45 °C). Die Wärmepumpe wurde für eine Laufzeit von mind. 6.000 Vollbenutzungsstunden ausgewählt. Der Gaskessel dient auch zur Deckung des Spitzenlastbedarfs.

5.6.2. AP 6.2: Modellanwendung und Szenarienrechnung

Die Definition der Szenarien in Kap. 5.6.1 ist exemplarisch und stellt aus Sicht der Verbundpartner einen repräsentativen Querschnitt für aktuelle und zukünftige Quartiersentwicklungen dar. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurde im Rahmen von AP 1.2 eine einheitliche Methodik für die Szenarienberechnung entwickelt, die sich trotz lokalspezifischer Rahmenbedingungen und Vorgaben für alle Fallbeispiele (Modelle) gleichermaßen anwenden lässt (siehe Kap. 5.1.2).

Die Modellanwendung und Berechnung der Szenarien erfolgt gemäß definiertem SimStadt-Workflow in mehreren Arbeitsschritten bzw. Workflow-Steps (vgl. dazu **Abbildung 2**). Der Workflow besteht aus insgesamt 16 Steps, wobei ein Berechnungsprozess grundsätzlich jedoch auch mehrere Iterationsschleifen enthalten kann. Ein Teil der Arbeitsschritte erfolgt bereits ganz oder teilweise automatisiert; für bestimmte Rechenschritte bleiben jedoch manuelle Eingaben oder Zwischenschritte erforderlich.

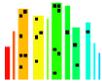
5.6.2.1. Technikoptionen

In den ersten beiden Arbeitsschritten erfolgt die Konfiguration des Szenarios. Hier werden zunächst der lokale Ausschnitt und die Auswahl der Szenarien festgelegt. Nach der raum- bzw. objektbezogenen Eingrenzung können die einzelnen Kriterien der örtlichen Rahmenbedingungen spezifiziert werden.

In diesem Zuge erfolgt auch die Selektion bzw. Einschränkung der im Szenario zu berechnenden Technologievarianten für die Wärmeerzeugung und -bereitstellung. Grundsätzlich steht eine Vielzahl alternativer Möglichkeiten zur Auswahl, eine Energie- bzw. Wärmeversorgung monovalent, bivalent oder multivalent aufzustellen. Aus Praxisbeispielen und Pilotprojekten ist dazu bereits eine nahezu unüberschaubare Zahl von Konzepten bekannt. Um den Fokus zielführend zu schärfen, wurden die zum gegenwärtigen Zeitpunkt aussichtsreichsten und gebräuchlichsten Technologievarianten im Lastenheft spezifiziert (siehe **Tabelle 10**).

Tabelle 10: Exemplarische Eingrenzung möglicher Technologievarianten

| Technologiesammlung Energieerzeugung | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|----------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Nummer | Anlagenkonzept | Energieträgereinsatz | Umweltwärme | Primärer Wärmeerzeuger | Sekundärer Wärmeerzeuger | Lokale Stromerzeugung | Speicher |
| Basisvariante | Gas-Brennwertkessel + PV | Erdgas | - | Gas-Brennwertkessel | - | PV-Anlage | Pufferspeicher + Batteriespeicher |
| Variante 1 | Gas-Brennwertkessel + Solarthermie | Erdgas | - | Gas-Brennwertkessel | Solarthermie | - | Pufferspeicher |
| Variante 2 | BHKW + Gas-Brennwertkessel | Erdgas | - | BHKW | Gas-Brennwertkessel | - | Pufferspeicher |
| Variante 3a | Luft/Wasser-WP + Gas-Brennwertkessel | Erdgas + Strom | Außenluft | Wärmepumpe | Gas-Brennwertkessel | - | Pufferspeicher |
| Variante 3b | Wasser/Wasser-WP + Gas-Brennwertkessel | Erdgas + Strom | Abwasser/Grundwasser | Wärmepumpe | Gas-Brennwertkessel | - | Pufferspeicher |
| Variante 3c | Sole/Wasser-WP + Gas-Brennwertkessel | Erdgas + Strom | Erdwärme | Wärmepumpe | Gas-Brennwertkessel | - | Pufferspeicher |
| Variante 4 | Kessel Biofestbrennstoff | Biofestbrennstoff | - | Kessel | - | - | Pufferspeicher |



Neben einer grundsätzlich realisierbaren Wirtschaftlichkeit lag ein weiteres Hauptkriterium dabei auf der ökologischen Nachhaltigkeit; energie- und förderpolitische Rahmenbedingungen wurden ebenso berücksichtigt, unterliegen wie der technologische Fortschritt jedoch einem stetigen Wandel. Die Erzeugervorauswahl stellt jedoch nur eine Momentaufnahme dar und ließe sich bei Bedarf jederzeit ergänzen oder anpassen.

Für jede im Lastenheft definierte Variante wurde eine spezifische Methode zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit und ökologischen Nachhaltigkeit hinterlegt. Im Wesentlichen unterscheiden sich zentrale Systeme, welche die Gebäude über eine leitungsgebundene Infrastruktur (Wärmenetz) versorgen von dezentralen Lösungen. Um, unabhängig von der getroffenen Variantenauswahl, eine szenarioübergreifende Vergleichbarkeit sowie stringente Anhaltspunkte zur Bewertung sicherzustellen, wurde eine globale Referenz- bzw. Basisvariante festgelegt. Hierbei handelt es sich um das Anlagenkonzept Gas-Brennwertkessel in Kombination mit PV. Diese Variante wird immer berechnet, auch wenn vor Ort kein Gasanschluss zur Verfügung steht und damit keine praktische Realisierbarkeit gegeben ist.

Gegenüber der Referenzvariante werden die individuell ausgewählten Vergleichsvarianten abgebildet. Gemeinsamkeiten liegen in der Anzahl n der Energieeinsatzströme (inkl. Abbildung von Umweltwärme oder Strahlungsenergie) sowie der erforderlichen Wärmeaufbringung. Bei einigen Erzeugeranlagen bzw. -anlagenteilen (PV und BHKW) wird zusätzlich zur Eigenstromversorgung auch der Teilmengenstrom bilanziert, der in das allgemeine Netz eingespeist wird. Der Energieträger Strom wird mittels deutschen Strom-Mix abgebildet; abweichende Eingaben werden nur ermöglicht, sofern dies eine Auswirkung auf gängige Begutachtungen (bspw. FW 309) hat.

Die spezifischen Leistungsdaten verwendeter Anlagen bzw. Anlagenteile können stark variieren und müssen daher ggf. dezidiert ermittelt werden. Die prinzipielle Effizienz bestimmter Technologien lässt sich jedoch schon im Ansatz bemessen. Bspw. unterscheidet sich die Jahresarbeitszahl (über den Temperaturverlauf eines Jahres gemittelter COP) einer Luft-Wasser-Wärmepumpe je nach Temperaturhub deutlich von einer Sole-Wasser-Wärmepumpe. Bei den Wärmeleitungsnetzen können die Verluste überschlägig berechnet werden. Als Eingangsdaten werden dazu der Trassenverlauf, die Rohrnennweiten und -qualitäten (Dämmstandard bei KMR) sowie das Temperaturgefälle von der Vor- und Rücklaufleitung zum Erdboden (bei mittlerem Temperaturniveau von 10 °C) angesetzt.

5.6.2.2. Szenario 3

Aus den 3D Daten, welche zur Verfügung stehen, werden insgesamt 24 zu beheizende Gebäude identifiziert und daraus mit SimStadt der Wärmebedarf errechnet. Die Reihenhäuser im Quartier werden als solche erkannt und die Anzahl der Wohneinheiten in den jeweiligen Komplexen richtig erfasst. Auch die Mehrgeschossbauten sowie die Kindertagesstätte wurden richtig erfasst. Zwei Objekte im 3D Modell wurden fälschlicherweise als Gebäude identifiziert, in Wirklichkeit handelt es sich um einen Carport bzw. einen asphaltierten Stellplatz.

Der Bebauungsplan des Quartiers stammt aus dem Jahr 2000. In der Folge sind die Gebäude in den darauffolgenden 1-3 Jahren entstanden. Ob Sanierungen, innerhalb der ersten 15 Jahre durchgeführt wurden ist nicht bekannt. Es ist aber nicht davon auszugehen, dass Sanierungen in nennenswertem Umfang erfolgt sind, die einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch haben.

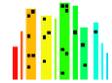


Abbildung 53 zeigt die simulierten Werte für Wärme und Warmwasserbedarf (konstant) sowie Netzverluste. Ebenfalls zu sehen ist die resultierende Jahresdauerlinie.

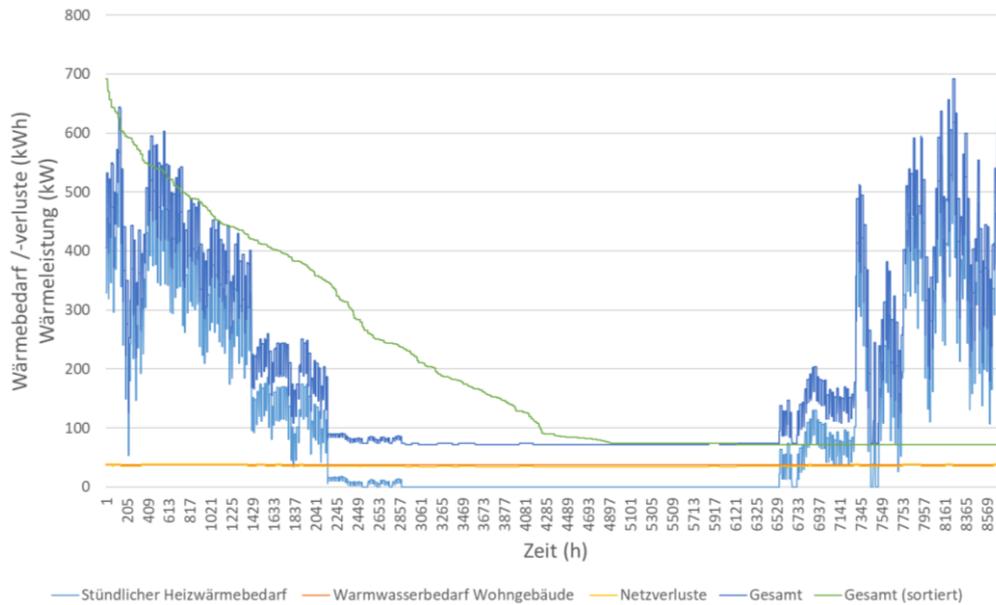


Abbildung 53: Ermittelte stündliche Wärmebedarf, Warmwasserbedarf, Netzverluste sowie resultierende Jahresdauerlinie in Szenario 3

Im Szenario 3 wurden zwei Technologievarianten, wie zuvor in der Szenariobeschreibung definiert, betrachtet. Die Variante 1 ist eine Kombination aus BHKW und Gas-Brennwertkessel inkl. Nahwärmenetz (VL-Temperatur 90 °C) und thermischem Speicher, Variante 2 kombiniert eine Wasser/Wasser-Wärmepumpe mit einem Gas-Brennwertkessel im Nahwärmenetz (VL-Temperatur 80 °C), ebenfalls inkl. Speicher. Die im Prozessworkflow beschriebenen Abläufe wurden für die jeweiligen Technologievarianten durchlaufen und das Ergebnis zum nächsten Arbeitsschritt automatisiert oder manuell weitergegeben.

Variante 1

Das gewählte BHKW hat eine elektrische Leistung von 50 kW und eine thermische Leistung von 92 kW bei elektrischem und thermischem Wirkungsgrad von 32 bzw. 59 %. Der Gesamtwirkungsgrad des Kessels beträgt 98 %, der Speicher hat ein Volumen von 5000 l.

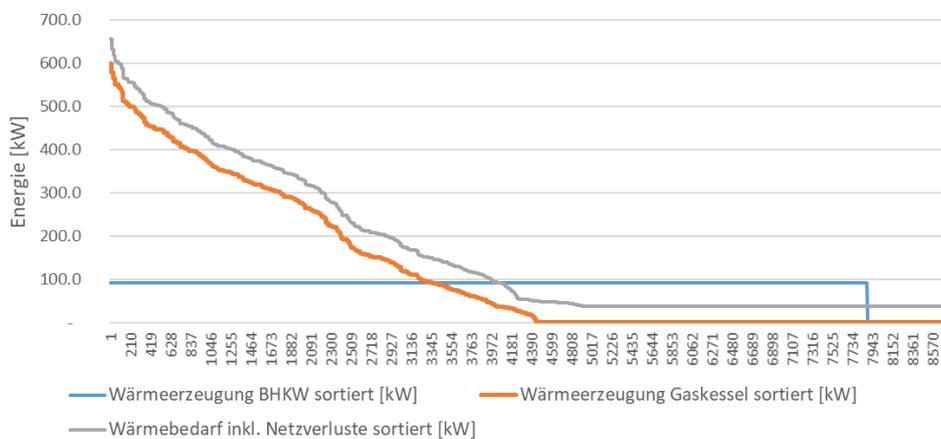


Abbildung 54: Erzeugung Variante 1 (BHKW + Gasboiler + Speicher) in Szenario 3

Eine vergleichende Betrachtung der Wärmepumpen- und Wärmenetzvariante mit einer Vorlauftemperatur von kleiner 60 °C zur Optimierung der Jahresarbeitszahlen konnte in der Projektlaufzeit nicht mehr abgebildet werden. Dies könnte jedoch in einer eigenen Variante im Nachgang simuliert bzw. berechnet werden. Wie in **Abbildung 54** zu erkennen ist, stellt das BHKW nur knapp 15 % der maximalen Leistung von 656 kW bereit. Aufgrund der Speichergröße beläuft sich der Anteil an der Gesamtwärmemenge hingegen auf knapp 50 %.

Variante 2

Abbildung 55 zeigt die Spezifikationen der gewählten Hochtemperatur-Wärmepumpe des Herstellers OCHSNER.

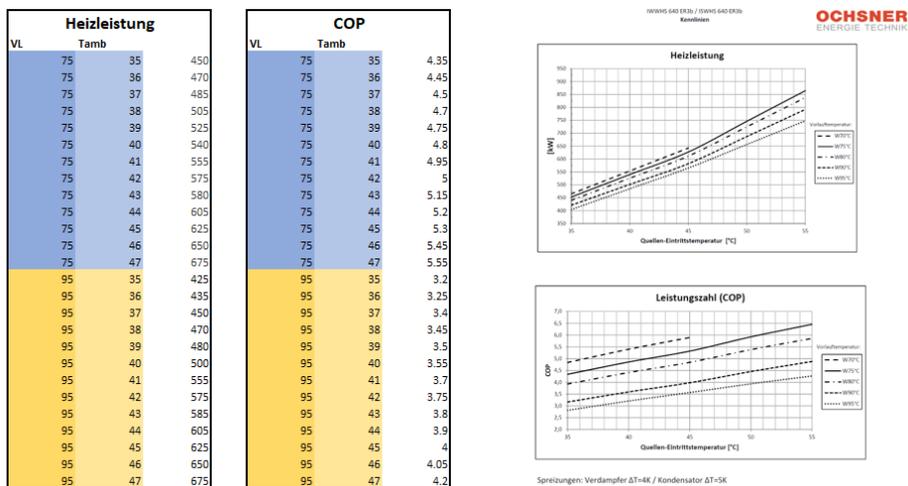


Abbildung 55: Spezifikationen Wärmepumpe in Szenario 3 Variante 2

In **Abbildung 56** werden die Simulationsergebnisse von Variante 2 dargestellt. Über das gesamte Jahr kann durch die Verwendung der Wärmepumpe anstatt des BHKW in Variante 1 die Laufzeit des Gaskessels reduziert werden.

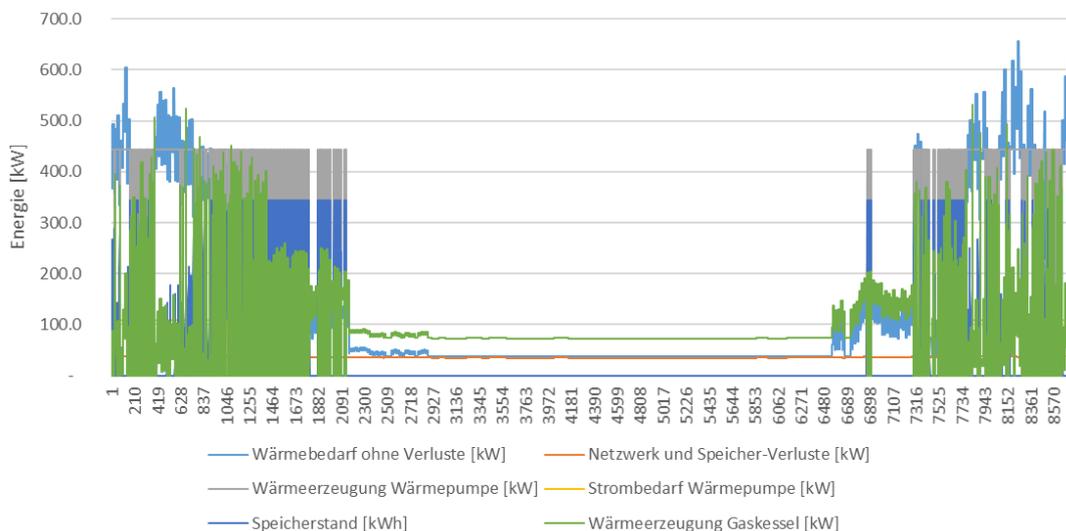
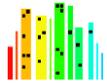


Abbildung 56: Erzeugung Variante 2 (WP + Speicher + Netz) in Szenario 3



5.6.2.3. Szenario 6

Bei Szenario 6 handelt es sich um eine bereits abgeschlossene Quartiersentwicklung, für die zahlreiche historische Realdaten vorlagen. Da der verfügbare Datenbestand, im Vergleich zu Szenario 3 und 7, der bei weitem vollständigste und detaillierteste war, konnte anhand des Fallbeispiels auch die umfangreichste Evaluierung des SimStadt-Prototypen durchgeführt und im Zuge der Bearbeitung von AP 6.3 anschließend mittels klassischer Praxismethoden validiert werden.

Das von der Stadt Mainz zur Verfügung gestellte 3D-Stadtmodell enthielt zu Beginn jedoch noch zahlreiche geometrische Inkonsistenzen sowie unzureichende oder fehlende semantische Informationen, bspw. zu den Baualterklassen. Zur Qualifizierung des Modells für SimStadt war daher vorab ein aufwändiges Preprocessing seitens HFT erforderlich. Hierfür wurde u. a. das Tool *CityDoctor* wie in Kapitel 5.2.2.1 beschrieben eingesetzt.

In den ersten Arbeitsschritten erfolgte gem. SimStadt-Workflow (vgl. Kap. 5.1.2) die Konfiguration des Szenarios. Zunächst wurde im Stadtmodell das zu untersuchende Gebiet eingegrenzt und die einzubeziehenden Objekte ausgewählt (vgl. **Abbildung 44**). Anschließend erfolgten eine Definition der spezifischen Eingangsparameter sowie die Präselektion der zu berechnenden Erzeugungsvarianten.

In den nächsten Arbeitsschritten wurden auf Grundlage der verfügbaren Eingangsdaten mittels SimStadt die Wärmebedarfe ermittelt. Das Ergebnis der Wärmebedarfsberechnung (Workflow Step 4) nach DIN V 18599 ist in **Abbildung 57** dargestellt.

Der Folgeschritt (Step 5) sieht die Kalkulation des Brauchwarmwasserbedarfs vor. Diese Zwischenberechnung wurde nicht im SimStadt-Workflow implementiert, sondern über eine Anwendung des externen Tools DHWcalc für Wohngebäude realisiert (siehe Kapitel 5.5.1). Eine vollständige integrale Verknüpfung mit DHWcalc war planmäßig nicht vorgesehen. Für Nichtwohngebäude wurde eine manuelle Berechnung eines stündlichen Profils basierend auf Annahmen aus der DIN V 18599-10 durchgeführt.



Abbildung 57: Wärmebedarfsberechnung gem. DIN V 18599 zu Szenario 6

Folglich konnte der stündliche Wärme- und Warmwasserbedarf summiert und sortiert und somit und somit eine Jahresdauerlinie der Gesamlast erzeugt werden (Step 6). Im Folgeschritt Step 7 erfolgte auf dieser Grundlage anschließend die Auslegung der maximal erforderlichen Wärmeleistung. In Step 8 ließen sich die Gleichzeitigkeitsfaktoren ermitteln sowie die Systemtemperaturen für den Netzvor- und -rücklauf auslegen. Im Szenario 6 wurden Bestandsgebäude an das Netz angeschlossen, welche im Auslegungsfall eine bestimmte Heizungsvorlauf- Temperatur benötigen, um die Heizwärmeleistung über Bestandswärmetauscher, wie Heizkörper, Lufterhitzer, Konvektoren, Flächenheizungen etc. zu übertragen. Deren Heizleistung ist auf eine Differenz der Vorlauftemperatur zur Medientemperatur berechnet. Anhand dieser Werte stellt sich nach Wärmeübertragung eine Rücklauftemperatur ein. Gebäudetechnische Anlagen aus den 1960/1970er Jahren sind in der Regel noch mit Anlagentechnik ausgestattet, welche 70°C an den Heizkörpern benötigen und so ausgelegt, dass sie etwa 20 K Auskühlung ermöglichen.

Im Anschluss (Step 10 und 11) konnte das Wärmenetz in SimStadt trassiert sowie dessen Netzverluste in STANET berechnet werden. Zugrunde gelegt wurden die definierten Lastfälle Winter, Sommer und Übergangszeit. Zur Berechnung der Netzverluste beim Wärmetransport und des Pumpstrombedarfs wurde gemäß Workflow-Definition das Expertentool STANET extern angebunden und die Ergebnisse in SimStadt zurückgespielt. **Abbildung 58** zeigt die durch STANET festgelegten Nennweiten der Rohre des Wärmenetzes.

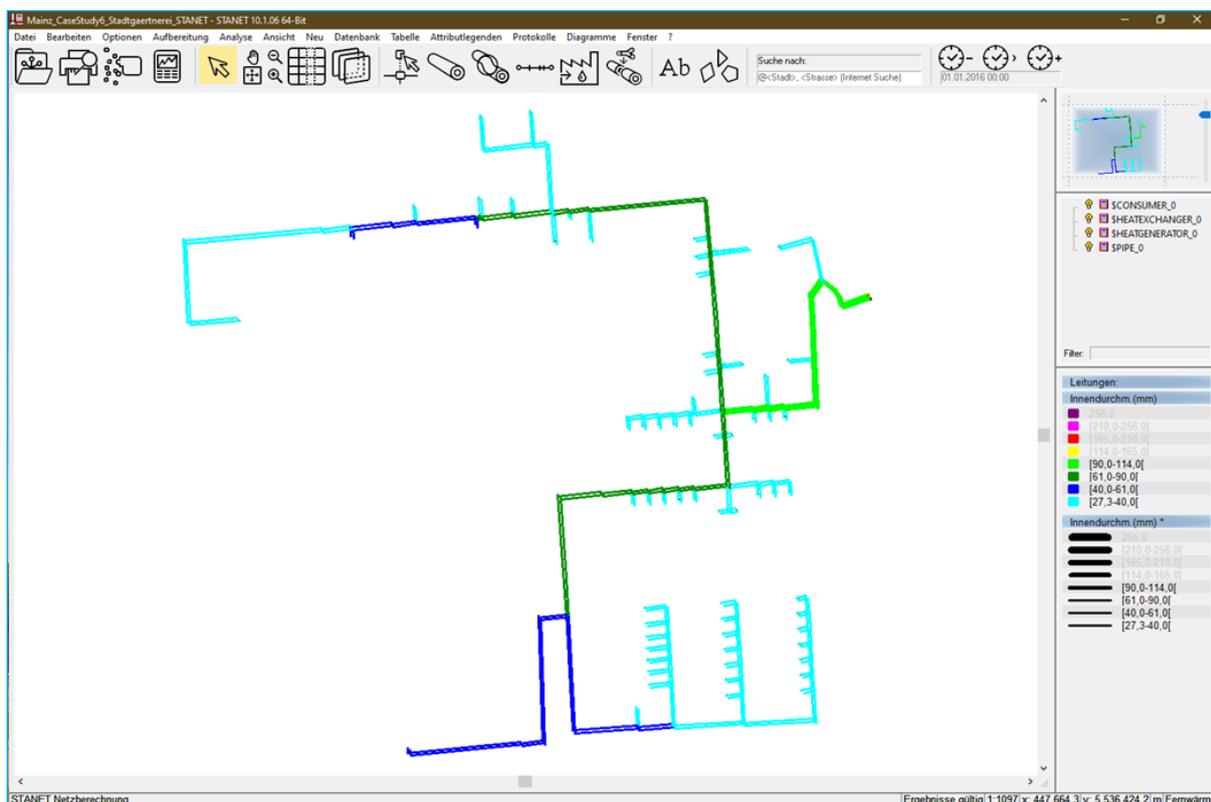


Abbildung 58: Bestimmung der Leitungsdurchmesser in STANET für Szenario 6

Die resultierende Lastkurven von Wärmebedarf, Warmwasserbedarf, Netzverlusten sowie der geordneten Jahresdauerlinie (Step 12) werden in **Abbildung 59** dargestellt.

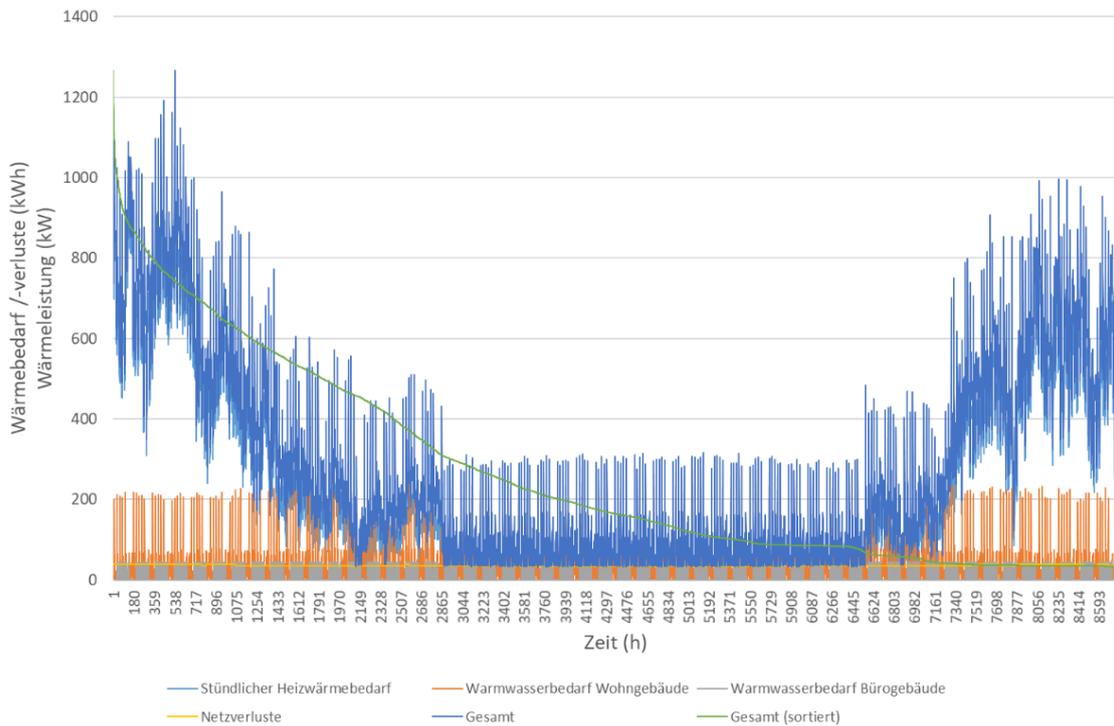
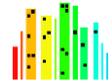


Abbildung 59: Ermittelter stündlicher Wärmebedarf, Warmwasserbedarf, Netzverluste sowie resultierende Jahresdauerlinie in Szenario 6

In den nächsten beiden Steps 13 und 14 werden die Technologievarianten mit ihren entsprechenden Kennzahlen beschrieben und schließlich simuliert. Dabei werden drei Varianten zur Wärmeherzeugung simuliert und bewertet:

- **Variante 1:** Zentrales BHKW mit Gaskessel und thermischem Speicher
- **Variante 2:** Zentraler Biomassekessel mit Gaskessel
- **Variante 3:** Dezentrale Wärmepumpen mit thermischen Speichern

Für alle Modelle sind stets auch individuelle Angaben z. B. zur installierten Leistung der Erzeuger sowie deren Effizienzen als Input ins Modell relevant.

Variante 1

Zunächst kommt das in **Kapitel 5.5.3.1** beschriebene INSEL Modell zur Simulation eines BHKWs mit Gaskessel und thermischem Speicher zur Anwendung. Eine erste Dimensionierung des BHKW erfolgte auf maximale Vollbenutzungsstundenzahl und ohne die Kenntnis der ganzjährigen Netzverluste. Mit 100 kW_{el} / 130 kW_{th} war der Effekt, also der Anteil der KWK-Wärme und der sich mit der Stromgutschriftmethode einstellende Primärenergiefaktor mit 0,96 nicht zufriedenstellend. Erst nach Erledigung der vorgelagerten Prozessschritte in der Simulation konnte eine geeignete Dimensionierung auf 250 kW_{el} / 264 kW_{th} erfolgen. Durch diese Anpassung, welche in der Projektierung nicht unüblich ist, verändern sich grundlegend die Parameter und Kennzahlen, welche der Variante zugrunde liegen.

Abbildung 60 stellt die Ergebnisse der INSEL Simulation des Modells BHKW + Gaskessel + Speicher über das Jahr verteilt dar. Die Teilabbildungen **a** und **b** zeigen dabei die simulierten Werte über ein ganzes Jahr, die Teilabbildungen **c** und **d** zeigen Details für eine geringer Anzahl Stunden, um die Steuerung der Erzeugung und deren Abhängigkeit vom Wärmebedarf zu zeigen.

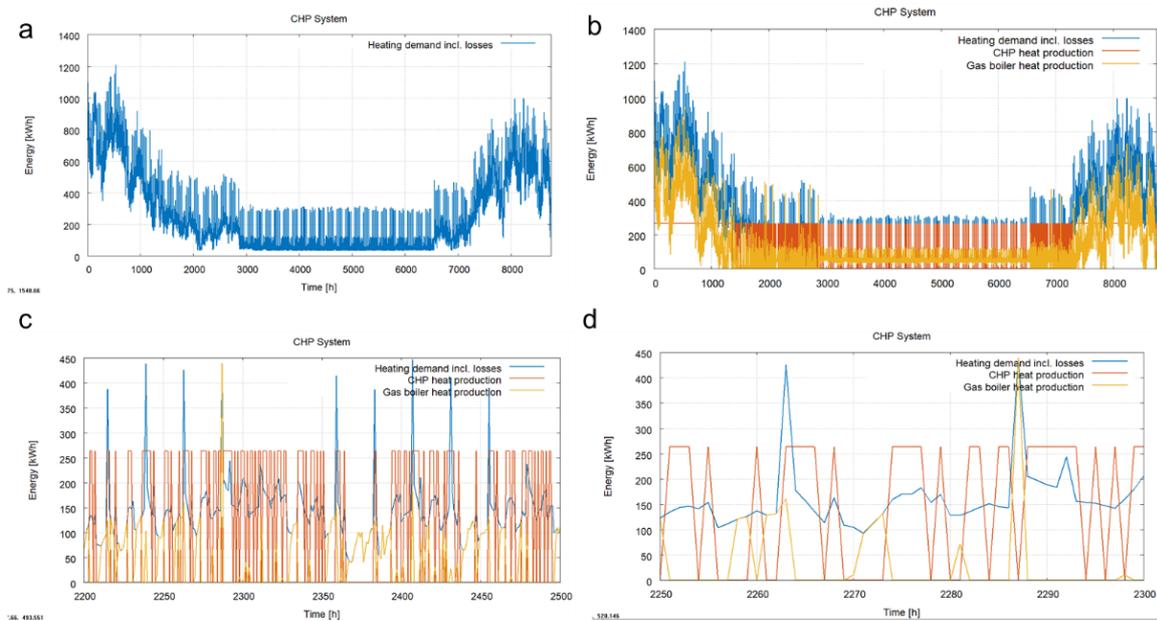
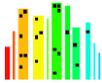


Abbildung 60: Ergebnisse Wärmeerzeugung BHWK + Gaskessel + Speicher für Szenario 6¹⁶

Variante 2

Das zweite simulierte System ist das eines Biomassekessels mit Gas- bzw. Ölkessel. Dieses System repräsentiert das real vorhandene System mit Ausnahme des Austauschs des Spitzenlast-Brennstoffes. Dies wurde zur wirtschaftlichen Vergleichbarkeit der Varianten so abgebildet, da der Ölpreis eine volatile Größe darstellt. In der Simulationslogik ergibt sich durch diesen Brennstoffaustausch kein Nachteil.

Die Ergebnisse der Simulation sind in den folgenden Abbildung 61 und Abbildung 62 abgebildet.

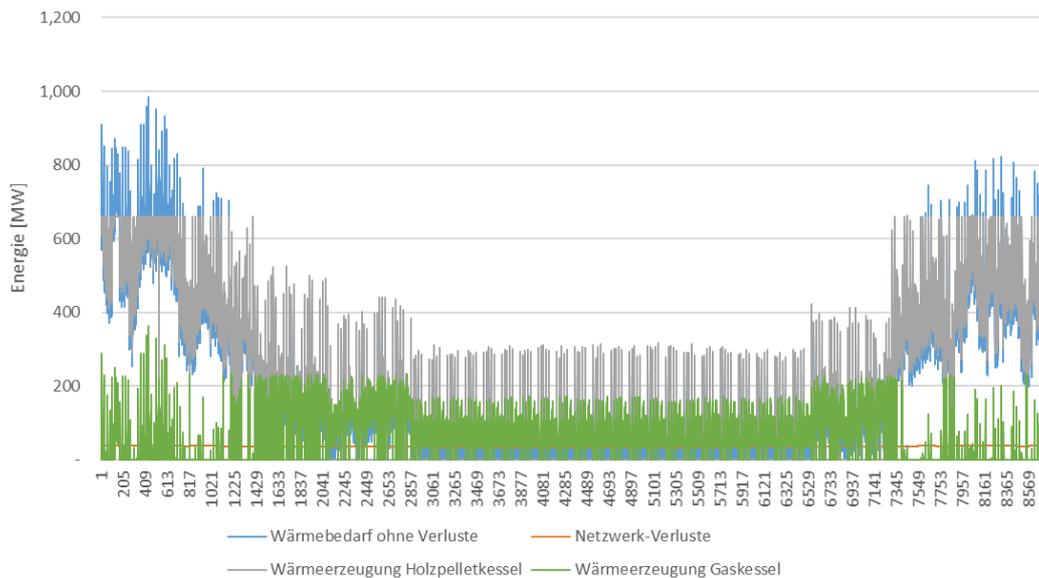


Abbildung 61: Ergebnisse Wärmeerzeugung Biomassekessel u. Gaskessel Szenario 6

¹⁶ a: Wärmebedarf 8760 Stunden, b: Wärmebedarf und -erzeugung 8760 Stunden, c: Wärmebedarf und -erzeugung 300 Stunden Detailsicht, d: Wärmebedarf und -erzeugung 50 Stunden Detailsicht

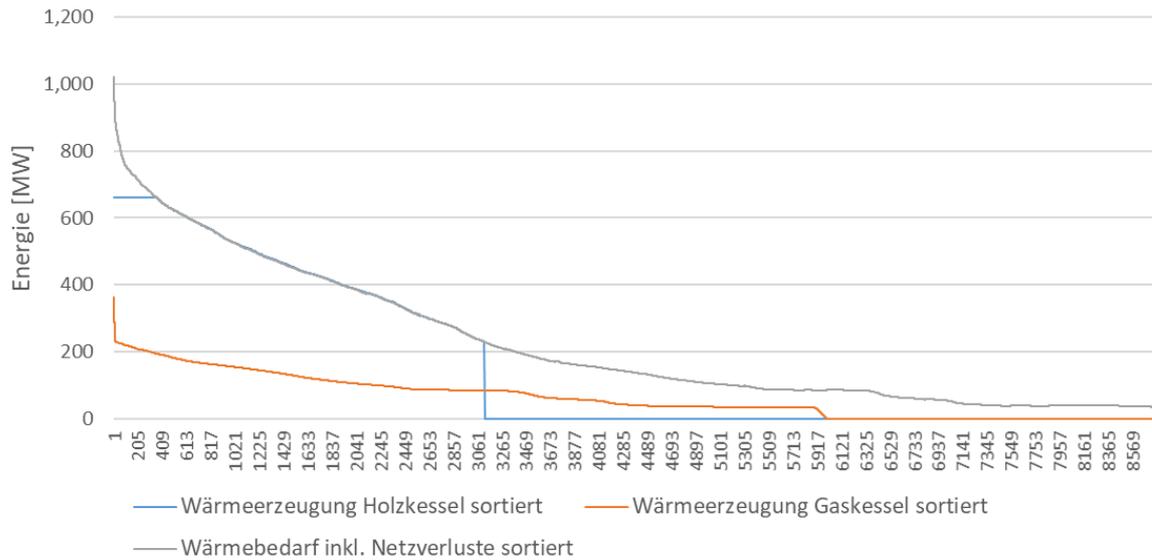
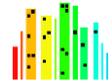


Abbildung 62: Jahresdauerlinie Biomassekessel u. Gaskessel Szenario 6

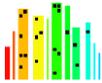
Variante 3

Die dritte Versorgungsvariante, die für das Szenario 6 simuliert werden soll, sind dezentrale Wärmepumpen mit thermischen Pufferspeichern. Hier haben sich im Laufe des Projektes mehrere Entwicklungsschritte vollzogen, mit denen die Aussagekraft und Genauigkeit der Simulationsergebnisse verbessert werden konnte. Zunächst war eine automatische Simulation für jedes einzelne Gebäude mit einer jeweils individuellen Komponentendimensionierung nicht möglich. Daher wurden die Gebäude anhand der Höhe ihres Wärmebedarfs in vier Gruppen eingeteilt. Für jede Gruppe kann eine ökologische und ökonomische Bewertung erfolgen (siehe **Tabelle 11**).

Tabelle 11: Gewählte Wärmepumpen für Szenario 6

| | Gruppe 1 | Gruppe 2 | Gruppe 3 | Gruppe 4 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| Anzahl Gebäude | 30 | 23 | 6 | 6 |
| Spitzenlast Summe aller Bedarfe | 107 | 113 | 63 | 321 |
| Mittlere Spitzenlast pro Gebäude (= Nennleistung WP) | 4 | 5 | 10 | 54 |
| Mittelwert stündliche Leistung | 24 | 25 | 15 | 81 |
| 3h mittlere Leistung | 72 | 74 | 46 | 244 |
| gewählte Wärmepumpe | Dimplex LA 4 TU | Dimplex LA 6 TU | Dimplex LA 9 PS | Stiebel Eltron WPL 130 AC |

Eine Erhebung von Netzverlusten oder Pumpstrom erfolgt nicht, da kein Fernwärmenetz vorhanden ist und die Schnittstelle auf der versorgten Hausseite am abgehenden Flansch der Wärmepumpe bzw. des Pufferspeichers zu finden ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Heizkreispumpe, welche die Wärme aus dem Puffer zieht und entsprechende Hydraulikventile zur Umschaltung Heizung und Warmwasserbereitung, auf Kundenseite vorhanden sind. Strom zur Regelung der Wärmepumpe selbst wird in dem Ansatz der Jahresarbeitszahl der jeweiligen Wärmepumpe abgebildet und wirkt sich so auf die benötigte Strommenge aus.



Die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe beschreibt dabei, im Unterschied zum „coefficient of performance (COP)“ oder „Leistungszahl“ den jahreszeitlichen Verlauf der Effizienz der Wärmepumpe unter Annahme eines typischen Abnahmeverhaltens. Dabei sind Stillstandszeiten berücksichtigt; aber auch Zeiträume mit unterschiedlichen Temperaturverhältnissen in den thermodynamischen Kreisen der Wärmepumpe, welche durch das Zusammenspiel der benötigten Temperaturen zur Heizung oder Warmwasserbereitung genauso bestimmt sind, wie die Temperaturen der Wärmequelle (Außenluft). Über die Jahresarbeitszahl kann der Stromverbrauch bilanziell pro Jahr ermittelt werden.

Zur Bewertung der 4 Gruppen von dezentralen Wärmepumpen wurden die Gebäude in Cluster von 4 kW, 5,6 kW und 10 kW Wärmepumpen (bezogen auf eine Außentemperatur von -7 °C) eingeteilt. 5 Sonder- Wärmepumpen mit je 47,3 kW wurden für Nichtwohngebäude angesetzt.

Die COP- Kennlinie der Wärmepumpen wurden nach Außentemperatur (bei Luft- Wasser-WP Umwelt- Quelltemperatur) auf Basis von bis zu 8 Kennlinienpunkten der Herstellerdatenblätter interpoliert und in die Simulation aufgenommen. Es resultieren über die 8760 Jahresstunden COP-Werte pro Stunde, woraus der stündliche Strombedarf berechnet werden kann.

Zusätzlich zur Versorgung des Wärmebedarfs ist eine Wärmemenge für Pufferspeicherverluste einzuberechnen. Zur Erhöhung der Laufzeitstunden und der Jahresarbeitszahl wird ein Pufferspeicher verwendet, welcher so ausgelegt ist, dass er bei 20 K Spreizung auf der Heizseite über sein Volumen die Wärmemenge aus 3 Stunden Wärmepumpen-Nennbetrieb zwischenspeichern kann. Der Wärmeverlust gegen eine Heizraumtemperatur von 20 °C beträgt etwa 22 W oder 22 Wh/h; auf 8760 Jahresstunden bezogen also etwa 194 kWh.

In einem zweiten Entwicklungsschritt wurde die Variante auf Basis einer Einzelgebäude-Simulation neu mit je einer für das Gebäude individuell und automatisch ausgewählten Wärmepumpe dargestellt. Dabei kamen 6 verschiedene Wärmepumpen-Fabrikate zur Anwendung; das Gewächshaus ist weiterhin außen vor, da es eine Sondernutzung mit hohem Temperaturbedarf darstellt.

Basierend auf der in der SimStadt GUI anzugebenden Dimensionierung als Anteil an der Spitzenlast (z.B. Wärmepumpe soll 70 % der Spitzenlast des Gebäudes abdecken) wird eine Ziel-Nennleistung für jedes Gebäude errechnet. In der Energiesystemkomponentenbibliothek, die eine Datenbank mit einer Vielzahl an Komponenten von Herstellern darstellt, wird das jeweils passende Fabrikat ausgewählt und deren Spezifikationen in das Simulations-Modell geschrieben. Anschließend kann die Simulation für jedes Gebäude mit den individuellen Spezifikationen durchgeführt werden.

Tabelle 12 zeigt die ausgewählten Komponenten in der dezentralen Wärmepumpenvariante. In **Tabelle 13** wird die Auswahl berechneter Kennzahlen des dezentralen Wärmepumpensystems für einige Gebäude des Szenarios dargestellt.

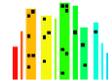


Tabelle 12: Automatisch ausgewählte Komponenten in der dezentralen Wärmepumpenvariante für Szenario 6

| | A | B | C |
|----|---|---------------------------------|---|
| 1 | Building ID | Main energy system | Water tank |
| 2 | _Oberstadt4736_BD.IY97lvxhDa68mrWMMDE7 | | |
| 3 | _Oberstadt4736_BD.CJ2FA0jJ0SAAHo95pLQ | | |
| 4 | _Oberstadt4736_BD.D57nsh99VQZSKgcs2lhj | WPL 130 AC (75.6 kW) | Oskar 10 (4 m³) |
| 5 | _Oberstadt4736_BD.rqcnLIZ67k5da6kn2Kcm | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 6 | _Oberstadt4736_BD.imUWPJhE9zsqU08Wz1X6 | | |
| 7 | _Oberstadt4736_BD.F50RImNNFtph2NE1lz7Q | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 8 | _Oberstadt4736_BD.mxrQlr6BLAjmxZYsJ6x | | |
| 9 | _Oberstadt4736_BD.4xTIAO0h0qMssTpQ6pqf | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 10 | _Oberstadt4736_BD.nPBI5H7YyKxy3n0yiYeI | alira LW 310A-LUX 2.0 (19.4 kW) | PS-T 1500 (1.5 m³) |
| 11 | _Oberstadt4736_BD.JPNcMmcRcONImC8YObGW | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 12 | _Oberstadt4736_BD.kcQFE1auobwtEscOhoTC | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 13 | _Oberstadt4736_BD.fgUHPq9d3VitOo6Ngw44 | AP CP 45a (32.5 kW) | Oskar 10 (4 m³) |
| 14 | _Oberstadt4736_BD.xZcjze9hkAdLULpJG | AP CP 45a (32.5 kW) | Oskar 10 (4 m³) |
| 15 | _Oberstadt4736_BD.4jtbUWEbZwNaezQQunhF | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 16 | _Oberstadt4736_BD.X0paknNFid2tpQVCJMMs | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 17 | _Oberstadt4736_BD.hi1YAm6OE4eXhYOXyxAr | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 18 | _Oberstadt4736_BD.upSliID0xHHyoXdfIgc5e | F 2040-6 (6 kW) | Vitocell 100-E, Typ SVPA, 400l (0.4 m³) |
| 19 | _Oberstadt4736_BD.4AxE9Nr0j1pkwuOvuUH | | |
| 20 | _Oberstadt4736_BD.tyNGgR116kOlR0GxIxiK | F 2040-6 (6 kW) | EPS 120 (0.12 m³) |

Tabelle 13: Kennzahlen der dezentralen Wärmepumpenvariante für Szenario 6

| | Summe Wärmebedarf | Spitzenleistung | Summe Wärmeproduktion Gasboiler | Summe Speicherverluste | Summe Netzverluste | Summe Wärmeproduktion Wärmepumpe | Summe Strombedarf Wärmepumpe | Nutzungsstunden Wärmepumpe |
|--|-------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Oberstadt4736_BD.0KMQRUMNpdOYvavWGg | 7,119.0 | 4.1 | - | 120.5 | - | 11,172.5 | 3,324.8 | 1,789.0 |
| Oberstadt4736_BD.2SrUoPJQPLG6nXGxulW | 5,976.2 | 3.5 | - | 120.5 | - | 9,911.4 | 2,948.4 | 1,584.0 |
| Oberstadt4736_BD.3GskIGWPigmromkHKHb | 5,245.6 | 3.1 | - | 120.5 | - | 9,093.4 | 2,704.9 | 1,450.0 |
| Oberstadt4736_BD.46wysaSncZSUWDI7KEaw | 98,921.8 | 51.3 | - | 485.1 | - | 86,523.3 | 21,485.2 | 3,008.0 |
| Oberstadt4736_BD.4jtbUWEbZwNaezQQunhF | 7,121.7 | 4.1 | - | 120.5 | - | 11,172.5 | 3,324.8 | 1,789.0 |
| Oberstadt4736_BD.4xTIAO0h0qMssTpQ6pqf | 7,836.7 | 4.7 | - | 120.5 | - | 11,428.0 | 3,458.9 | 1,870.0 |
| Oberstadt4736_BD.7nTouUq0ZLe24ACVA9fv | 5,866.9 | 3.5 | - | 120.5 | - | 9,762.7 | 2,907.0 | 1,561.0 |
| Oberstadt4736_BD.8lhUzx94waYivlClnlwZ | 7,567.7 | 4.5 | - | 120.5 | - | 11,296.7 | 3,397.3 | 1,833.0 |
| Oberstadt4736_BD.A86QsOHOQFVCaeJixQhW | 183,750.6 | 94.5 | - | 485.1 | - | 20,031.3 | 271.3 | 5,072.0 |
| Oberstadt4736_BD.BFvU5WhNZuxOnLd6sqKq | 58,286.9 | 30.6 | - | 408.1 | - | 61,790.2 | 15,443.7 | 2,163.0 |
| Oberstadt4736_BD.bgrYWnyEtp81V1JcymBE | 5,840.5 | 3.4 | - | 120.5 | - | 9,765.8 | 2,903.4 | 1,559.0 |
| Oberstadt4736_BD.CsmDynUaAVSKLImvHXg | 5,837.1 | 3.4 | - | 120.5 | - | 9,761.3 | 2,898.3 | 1,556.0 |
| Oberstadt4736_BD.CwEkqF9O7AJ2zy8pBC4q | 5,139.6 | 3.0 | - | 120.5 | - | 9,025.5 | 2,671.8 | 1,431.0 |
| Oberstadt4736_BD.D57nsh99VQZSKgcs2lhj | 215,103.5 | 118.2 | - | 485.1 | - | 20,021.5 | 271.2 | 5,070.0 |
| Oberstadt4736_BD.djGxw1TKjju3Qxv90T0M | 5,910.4 | 3.5 | - | 120.5 | - | 9,826.7 | 2,917.7 | 1,566.0 |
| Oberstadt4736_BD.edSdq49wlvwi1Ndm08rYF | 5,871.1 | 3.5 | - | 120.5 | - | 9,811.7 | 2,916.0 | 1,565.0 |
| Oberstadt4736_BD.etB8RsvjsMEK1d7unLCW | 5,651.4 | 3.3 | - | 120.5 | - | 9,582.6 | 2,850.7 | 1,529.0 |
| Oberstadt4736_BD.EuUL2nsQv3p4WKIOOFWu | 6,185.8 | 3.8 | - | 120.5 | - | 9,895.8 | 2,976.3 | 1,603.0 |
| Oberstadt4736_BD.F50RImNNFtph2NE1lz7Q | 5,806.9 | 3.4 | - | 120.5 | - | 9,707.6 | 2,892.2 | 1,553.0 |

5.6.2.4. Szenario 7

Die automatische Erstellung des 3D Gebäudemodells in CityGML erfolgte auf Grundlage des Bebauungsplans (Plan der Ansichten und Außenanlagen inkl. Anzahl Geschosse und Höhen) und hat zunächst keine zufriedenstellenden Ergebnisse hervorgebracht. Wie in **Abbildung 63** zu sehen, sind die Neubauten im Modell deutlich zu hoch.

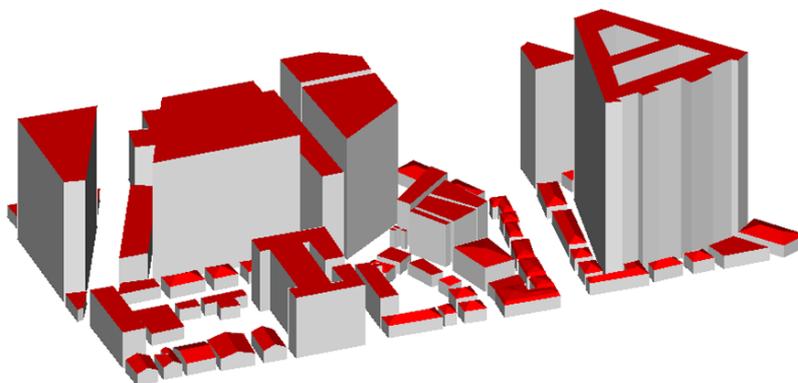


Abbildung 63: Automatisch Generiertes CityGML Modell Szenario 7

Nach der Behebung dieser Fehler und damit teilweise manueller Erstellung des CityGML Modells des Szenarios konnte die Wärmebedarfssimulation mit SimStadt durchgeführt werden. **Abbildung 64** zeigt die monatliche Aufteilung von Wärme- und Warmwasserbedarf, sowie die Netzverluste von Variante 2.

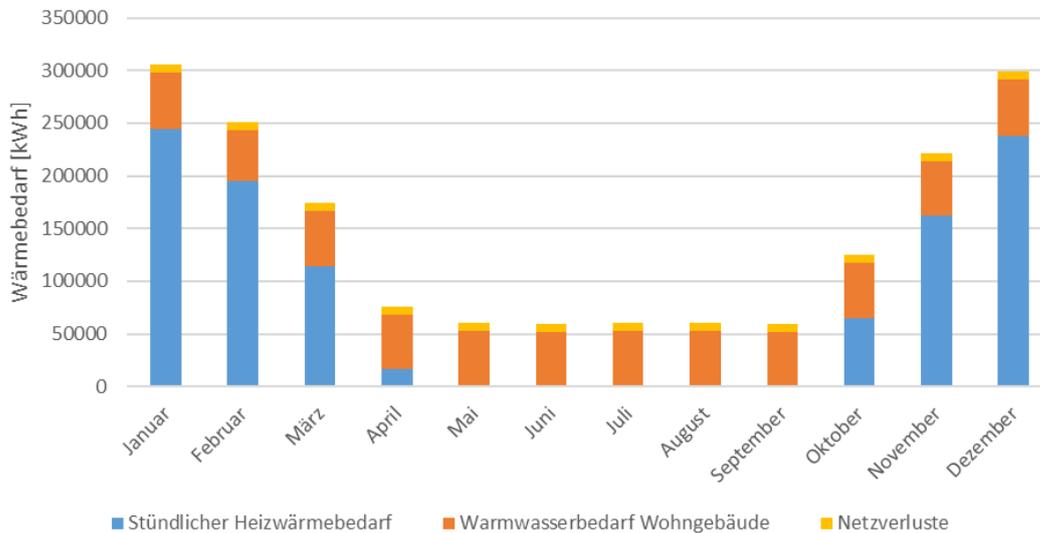


Abbildung 64: Monatlicher Gesamtwärmebedarf Szenario 7

Die automatische Generierung eines Layouts für das Wärmenetz war im Fall des Neubaugebiets von Szenario 7 nicht ohne weiteres möglich. Da sich der Algorithmus am Straßennetz von OpenStreetMap orientiert, hat das automatische Layout keinen Bezug zu den neu geplanten Gebäuden bzw. Straßen. Das Ergebnis ist in **Abbildung 65** zu sehen.

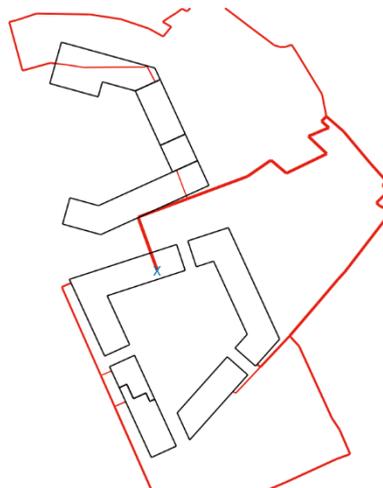
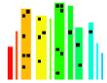


Abbildung 65: Automatisches Netzlayout Szenario 7

Um ein realistischeres Ergebnis zu erhalten, wurden in diesem Fall die Koordinaten der neu geplanten Straßen bzw. ihre Knoten manuell ermittelt und als Input in den Workflow eingefügt. Das Ergebnis ist in **Abbildung 66** zu sehen.

Die Versorgungsszenarien orientieren sich am tatsächlich geplanten Versorgungssystem für das Areal. Bei der Basisvariante 1 handelt es sich um zentrale Gaskessel und dezentralen PV-Anlagen. Die Variante



2 versorgt das Areal mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) und einem Gaskessel über ein Nahwärmenetz. Die Variante 3 nutzt eine Wärmequelle wie den Abwasserkanal und bringt diese zusammen mit einer Elektrowärmepumpe in Ergänzung mit einem Gaskessel auf die benötigte Vorlauftemperatur von 58 °C.

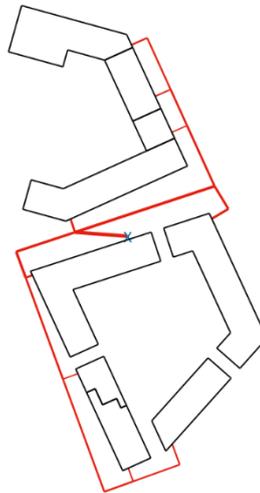


Abbildung 66: Automatisches Netzlayout Szenario 7 nach Überarbeitung des Algorithmus

Variante 1 (Referenzvariante)

Für die Simulation der Photovoltaik-Potenzials wurden die folgenden, zum gegenwärtigen Planungsstand realistischen Parameter angenommen:

- Absolutes Minimum für PV nutzbare Dachfläche: 40 m²
- Relativer Anteil für PV nutzbare Dachfläche: 30 % bei Flachdach, ansonsten 40 %
- Neigungswinkel auf Flachdach: 25°
- Minimale jährliche Sonneneinstrahlung: 950 kWh/m²
- Moduleffizienz: 17 %
- Gesamt-Performance: 85 %

Für alle 9 Gebäude beläuft sich der Stromertrag auf 327 MWh/a, die installierte Leistung beträgt 303 kWp. **Abbildung 67** zeigt die Stromerzeugung aller Anlagen über ein Jahr.

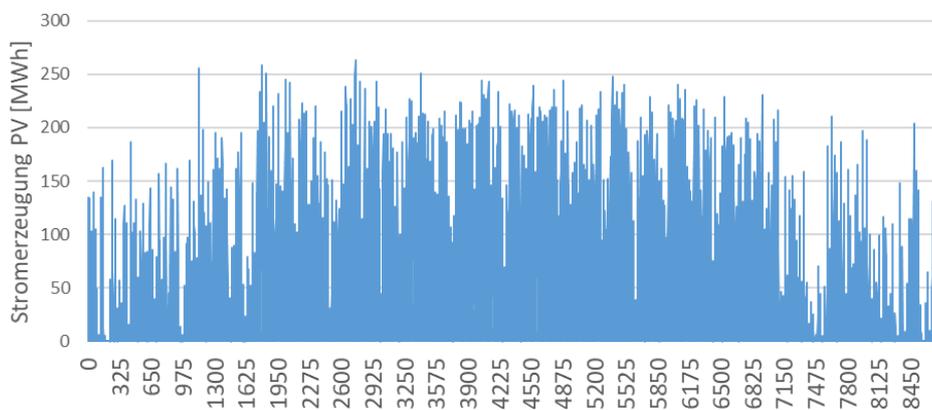


Abbildung 67: PV-Stromerzeugung Szenario 7

Die Wärmeversorgung durch den zentralen Gaskessel ist in **Abbildung 68** zu sehen.

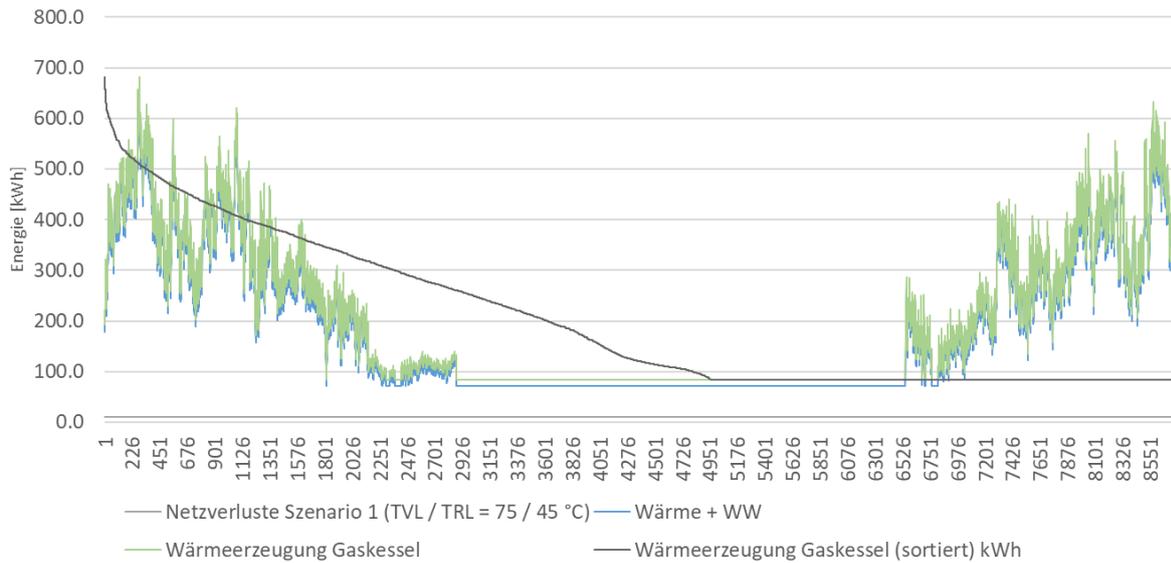


Abbildung 68: Simulationsergebnis der Versorgungsvariante 1 im Szenario 7

Variante 2

Die Auslegung der Wärmeerzeuger ist in **Abbildung 69** dargestellt. Der BHKW-Typ wurde für eine Laufzeit von mind. 6.000 Vollbenutzungsstunden für die Grundlastenerzeugung ausgewählt. Das gewählte BHKW hat eine elektrische Leistung von 140 kW sowie eine thermische Leistung von 209 kW. Der elektrische sowie thermische Wirkungsgrad liegt bei 36,5 % bzw. 54,4 %. Der Kessel hat einen Gesamtwirkungsgrad von 98 %. Das Volumen des thermischen Speichers beträgt 9 m³. Die Vorlauftemperatur im Netz liegt bei 75 °C.

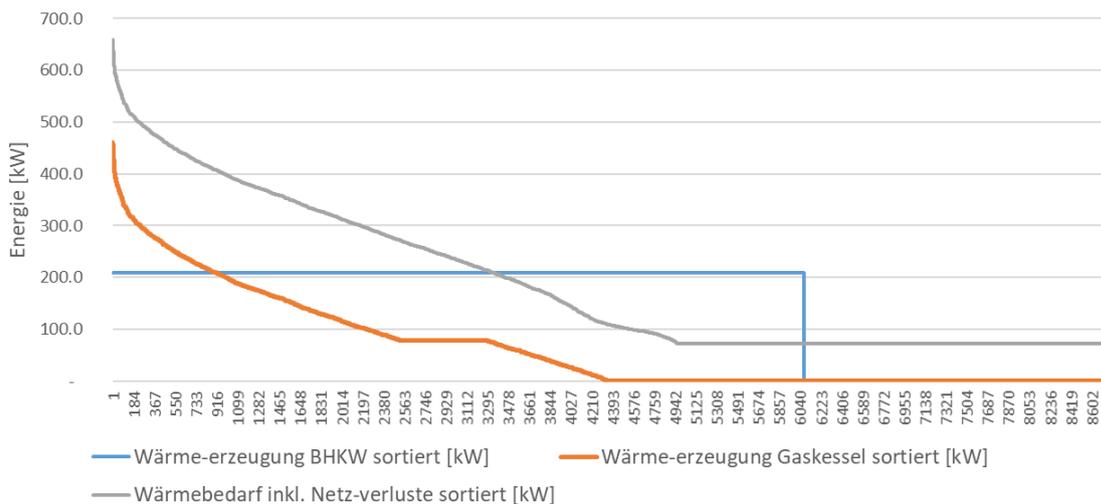


Abbildung 69: Auslegung der Wärmeerzeuger bei Versorgungsvariante 2 in Szenario 7

Der Wärmebedarf wird zunächst, wenn möglich, aus dem Speicher gedeckt, das BHKW startet wenn der Bedarf größer ist als der momentane Speicherinhalt, der Restbedarf wird durch den Gaskessel gedeckt. Die Steuerung der Anlagen ist in **Abbildung 70** zu sehen.

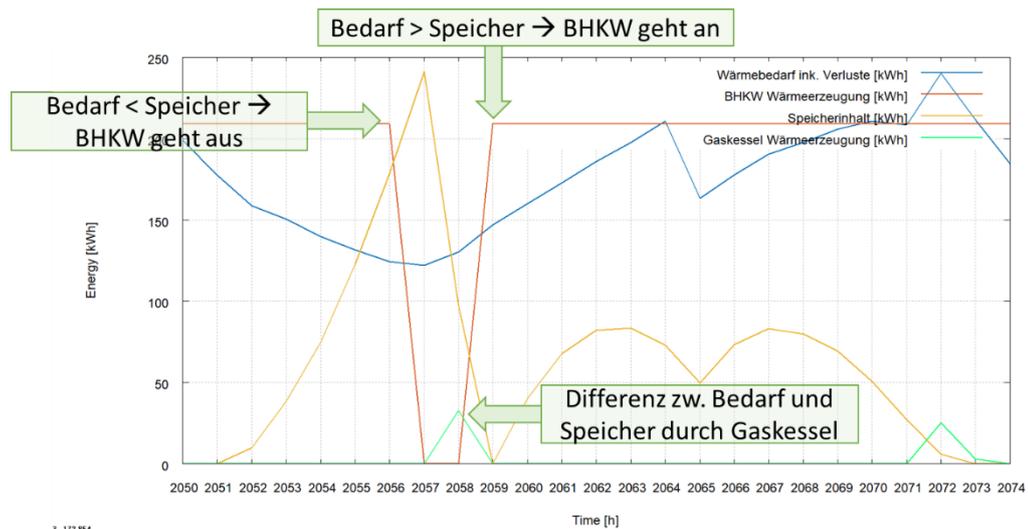
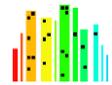


Abbildung 70: Steuerung der Komponenten in Variante 2 von Szenario 7

Variante 3

In der dritten betrachteten Versorgungsvariante hat die Wärmepumpe eine Heizleistung von 175 kW_{th} und einen COP von 3,8 bei einer Wassertemperatur des Abwasserkanals von 12,5 °C im Mittel über das gesamte Jahr. Kessel und Speicher sind gleich wie in der Variante 2, lediglich die Vorlauftemperatur des Netzes liegt jetzt nur noch bei 58 °C. **Abbildung 71** zeigt die Jahresdauerlinie dieser Variante. Die Wärmepumpe wurde für die Laufzeit größer 6.000 Benutzungsstunden als Grundlasterzeugung ausgewählt. Der Gaskessel deckt den ebenfalls den Spitzenlastbedarf.

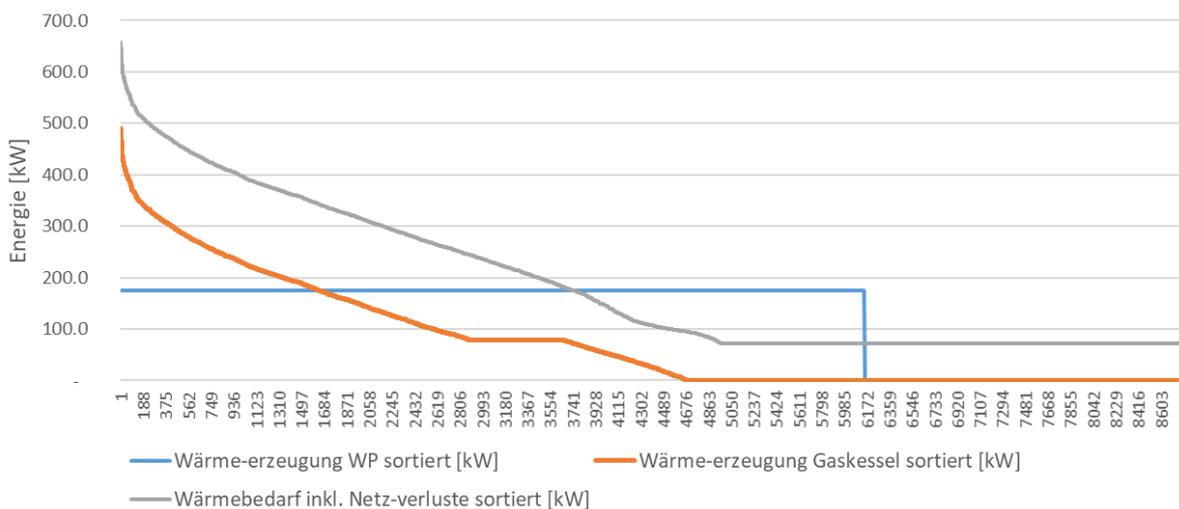
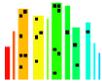


Abbildung 71: Auslegung der Wärmeerzeuger bei Versorgungsvariante 3 in Szenario 7

5.6.3. AP 6.3: Methodenvergleich klassische Planung mit Szenarien der Plattform

Die detaillierteste Validierung fand aufgrund der ausführlichen Datengrundlage anhand von Szenario 6 statt. Partiiell ergänzende Validierungen konnten auch für die anderen Szenarien durchgeführt werden. Die Reihenfolge der Dokumentation wurde daher folgend entsprechend angepasst.



5.6.3.1. Szenario 3

Wärmebedarf

Zugrunde gelegt werden die Gradtage aus dem Jahr 2015, da auch aus dieser Heizperiode reale Verbrauchszahlen vom Betreiber der Quartiersversorgung übermittelt worden waren. Die monatliche Wärmebedarfsberechnung aus SimStadt für das Szenario 3 ergibt eine Wärmemenge zur Raumbeheizung i. H. v. 1.143.355 kWh pro Jahr. Der Warmwasserbedarf wird mit 330.948 kWh angegeben und die mit der Expertensoftware STANET berechneten Netzleitungsverluste belaufen sich auch 311.702 kWh, so dass ein effektiver Gesamtwärmebedarf von 1.786.092 kWh für das Quartier kalkuliert wurde.

Insgesamt liegen vom Betreiber Zahlen über die verbrauchte Gasmenge im Abrechnungszeitraum 2014 bis 2016 und die mit den Kunden abgerechneten Wärmemengen vor. Die übermittelten Daten unterscheiden nicht zwischen Bedarf für Warmwasserbereitung und Heizwärmebedarf, sodass nur der Wärmebedarf des Quartiers in Gänze vorliegt. Die Zahlen zur verwendeten Gasmenge und den tatsächlich verkauften Wärmemengen lassen einen Schluss zu den Leitungsverlusten zu.

Insgesamt wurden in drei auseinanderfolgenden Heizperioden 2014-2016 die in **Tabelle 14** gelisteten Zahlen übermittelt.

Tabelle 14: Gemessene Wärmemengen in Szenario 3

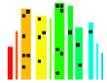
| REALITÄT | | | | | |
|----------|------------------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------|
| | Gaseinkauf [kWh] | berechnete produzierte Wärmemengen | abgerechnet Wärmemengen | berechnete Leitungsverluste | % |
| 2014 | 1.521.321,00 | 1.353.975,69 | 877.740,00 | 476.235,69 | 35,2% |
| 2015 | 1.585.886,00 | 1.411.438,54 | 945.747,00 | 465.691,54 | 33,0% |
| 2016 | 1.657.903,00 | 1.475.533,67 | 999.547,00 | 475.986,67 | 32,3% |

Die mit SimStadt berechneten Wärmemengen sind in der folgenden **Tabelle 15** abgebildet. Die Abweichungen liegen zwischen 21 und ca. 36 %.

Tabelle 15: Berechnete Wärmemengen in Szenario 3

| SIMSTADT | | | | | |
|---------------------|--|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------|
| | | berechnete produzierte Wärmemengen | abgerechnet Wärmemengen SIMSTADT | berechnete Leitungsverluste | % |
| 2015 | | 1.786.092,00 | 1.474.390,00 | 311.702,00 | 17,5% |
| ABWEICHUNGEN | | | | | |
| absolut | | 374.653,46 | 528.643,00 | 153.989,54 | |
| relativ | | 21,0% | 35,9% | 33,1% | |

Der Wärmebedarf wurde um 21 % zu hoch simuliert, durch die errechneten Wärmeverluste ergeben sich die abgerechneten Wärmemengen. Die Leitungsverluste fallen mit 17 zu 33 % in der Simulation geringer aus, als in der realen Abbildung des Vergleichsjahrs 2015. Vermutlich ist das Wärmenetz in SimStadt bzw. STANET mit einer höheren Wärmedämmung angenommen worden, als das im Jahr 2000 verlegte Wärmenetz tatsächlich aufweist. Die Wärmeverluste im Netz fallen mit >30 % in den drei betrachteten Jahren sehr hoch aus. Dies lässt, auf Grundlage von Betriebserfahrungen mit anderen Nahwärmenetzen, auf einen niedrigen Dämmstandard bei den verlegten KMR-Leitungen schließen. SimStadt bzw. STANET kalkulieren die Wärmeverluste des Nahwärmenetzes relativ moderat. Es wurden die Wärmeverluste von einem Hochtemperaturnetz mit 90/55 °C berechnet. In der Realität dürften



diese Temperaturen darunter liegen und werden vom Betreiber mit 80/60 °C angegeben. Die bestimmende Temperatur für den Wärmeverlust kann einzeln je Strang oder als mittlere Temperatur der Fernwärmetrasse angenommen werden. Dabei liegt diese in der Simulation um 2,5 K über den Betreiberdaten, die einem höheren Wärmeverlust aufweisen.

Wärmenetz

Ausgehend von dem vorhandenen Straßen- und Wegenetz im Quartier in Rüsselsheim hat SimStadt basierend auf den vorhandenen 3D Daten eine Länge des notwendigen Wärmenetzes von 1,7 km errechnet. Im Quartier sind nach überschlägigen Betrachtungen ca. 1,9 km Wärmeleitungen verlegt worden. In **Abbildung 72** sieht man die Unterschiede in den Wegstrecken.

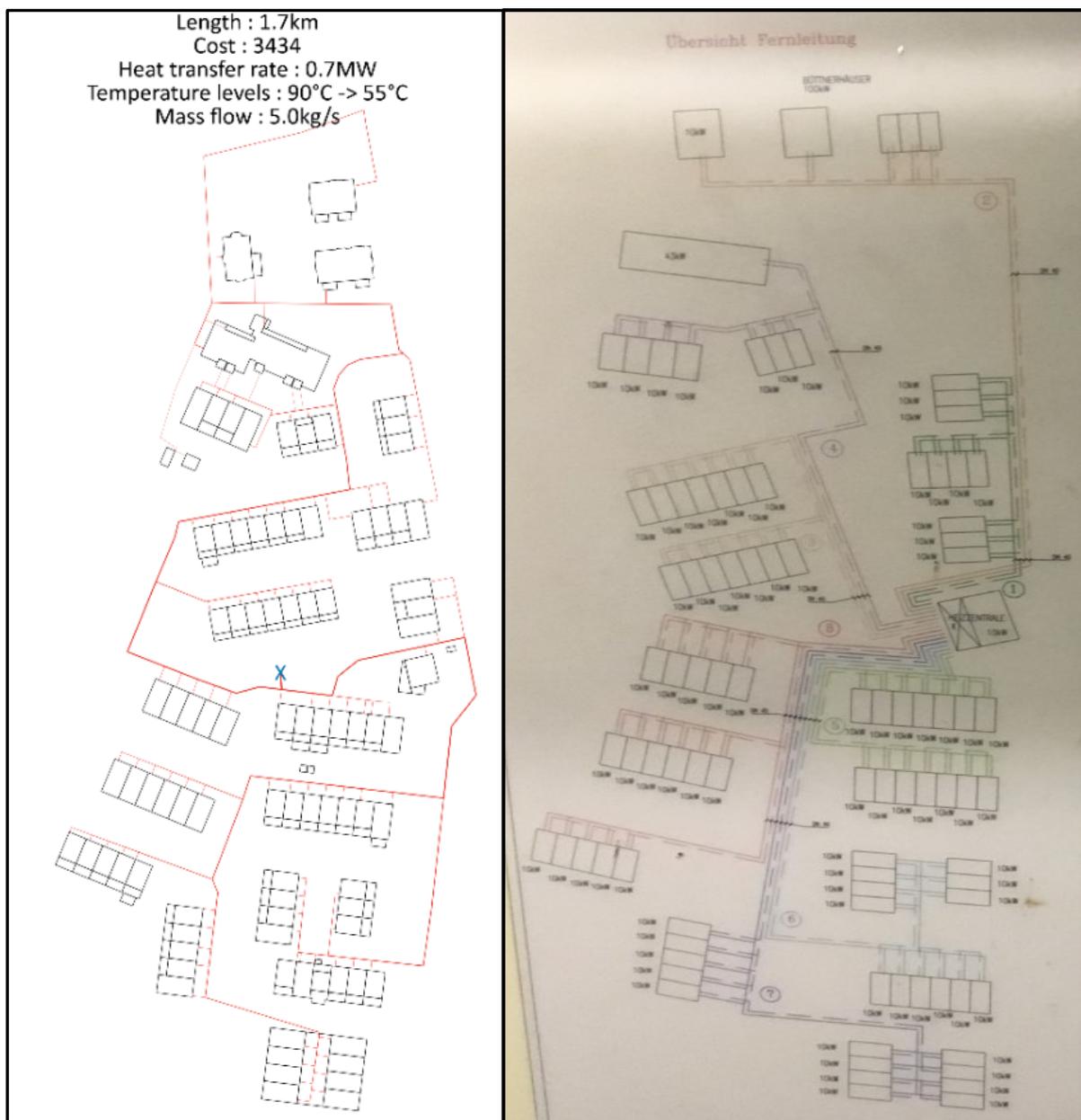


Abbildung 72: Mit Sim Stadt simulierter und realer Wärmenetzplan in Szenario 3

Es kann festgestellt werden, dass SimStadt eine um gut 0,2 km kürzere Wegstrecke errechnet hat. SimStadt, welches STANET für die Auslegung des Wärmenetzes verwendet, berechnet nur einen Abgang aus der Heizzentrale und eine Leitung für das gesamte Quartier. Dies ist unter Gesichtspunkten einer Leckagesuche und der Notwendigkeit verschiedene Heizkreise zu bilden, um diese im Notfall abschließen zu können, nachteilig. Aus der Abbildung des Quartiers geht hervor, dass in der Realität sieben verschiedene Heizkreise mit einem hohen Grad an möglicher Einzelversorgung im Fehlerfall gebaut wurden. Die Heizkreise nutzen in drei Abschnitten vermutlich dieselbe Trasse, so konnten in der Bauphase Kosten bei der Verlegung eingespart werden. Derartige Abbildungen sind in der Simulation nicht möglich. Sie sind jedoch auch eher Gegenstand der Detailplanung und es steht im Raum, dass die überschlägig simulierte Leitungslänge einen ausreichenden Genauigkeitsgrad aufweist, um Netzverluste und minimale Leitungsinvestitionen abzuschätzen. Wohl deutet die verzweigte Realverlegung mit mehreren parallelen Heizkreisen auf kleinere Leistungsquerschnitte mit spezifisch höherem Wärmeverlust hin, als in einer Grundauslegung einer Fernwärmetrasse in Strahlenform simuliert werden. Dies erklärt teilweise (neben der Annahme zum Dämmstandard) den real höheren Netzverlust.

Wärmeerzeugung

Die Stunde des höchsten Verbrauchs aus der Jahresdauerlinie kann vereinfachend zur Wärmeleistungsbestimmung genutzt werden. Wie zuvor schon ausgeführt, wird der Gesamtwärmebedarf in SimStadt zu hoch kalkuliert. Es wäre demnach plausibel, wenn auch die benötigte Wärmeleistung zu hoch wäre.

Ergebnis der angestellten Betrachtung in SimStadt sind 618,4 kW benötigte Wärmeleistung bei einer Außentemperatur von +2 °C. Vergleicht man dies mit dem kältesten Tag des Jahres 2015 mit -2,4 °C und der dabei kalkulierten Wärmelast von 567,4 kW, erscheint es unplausibel, dass zur Simulation keine geringeren Außentemperaturen angenommen wurden. Die im Quartier vom Errichter der Heizzentrale kalkulierte Wärmeleistung der Erzeuger wird mit 1.033 kW angegeben und liegt damit um 40,1 % höher als die durch SimStadt errechnete Wärmeleistung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Auslegungstemperatur zum Zeitpunkt der Erbauung bei -12 °C gelegen haben dürfte. Dadurch wirkt die ermittelte Leistung zunächst unplausibel. Die Erkenntnis ging validierend in spätere Simulationen ein.

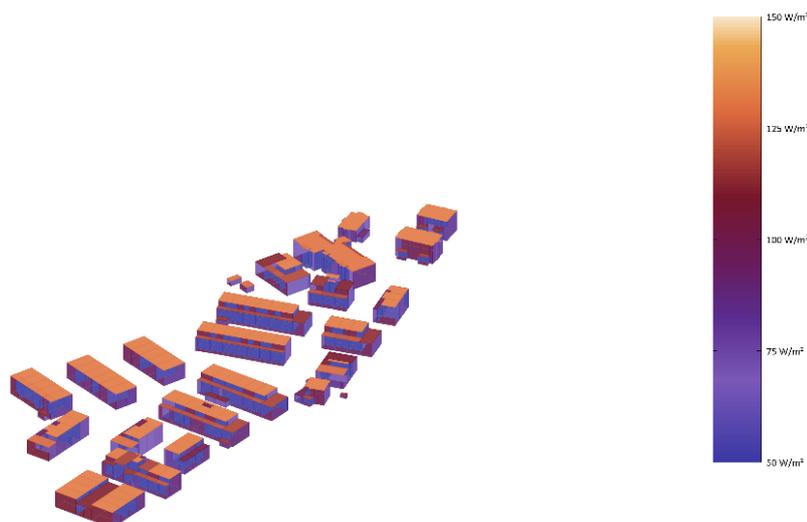


Abbildung 73: Solarpotential Szenario 3



Das Solarpotential wird von SimStadt wie folgt anhand der 3D Daten ausgegeben. Die **Abbildung 73** zeigt in farblichen Abstufungen das Solarpotential der 3D Gebäude. Die Dachflächen haben das höchste Potential (150 W/m^2) und sind orange dargestellt. Seitenwände haben geringes Potential (50 W/m^2) und sind lila eingefärbt. Zu erkennen ist, dass alle Dachflächen als Flachdach ausgeführt sind. Dies ist insoweit nicht korrekt, als dass die mehrgeschossigen Gebäude (3 Stück) im Norden und die Reihenhäuser im Süden (4 Stück) als Satteldach ausgeführt sind. Auch Dachaufbauten, wie Gauben und Fenster, die nicht für eine PV Belegung geeignet sind, werden nicht erkannt.

Wirtschaftlichkeit

Bei der Kostenberechnung der benötigten Wärmetrassen werden die Leitungslänge in ein EXCEL Datenblatt übertragen. Hier kam es zu Fehlern in der Datenweitergabe, da bei der Kostenberechnung eine Leitungslänge von ca. 3,4 km weitergeben wurde statt der kalkulierten 1,7 km. Die Leitungslänge wurde additiv für den Vor- und den Rücklauf kalkuliert, tatsächlich nutzen VL und RL die gleiche Trasse, sodass die Länge zu halbieren ist. Daher fallen die Kosten für die Leitung auch ca. doppelt so hoch aus.

Setzt man die richtigen Größen ein, reduzieren sich die Kosten der Leitung gem. **Tabelle 16**.

Tabelle 16: Leitungskosten Szenario 3

| Nennweite | Verlegesyst | Länge [m] | Eingabewerte aus Stanet-csv | △ KMR | €/trm befestigt € | | |
|-----------|-------------|--------------|-----------------------------|--------|-------------------|------------------|----------------|
| DN 20 | | 166,00 | 83 | DN 20 | 435 | 72.210 | 36.105 |
| DN 25 | | 936,60 | 468,3 | DN 25 | 435 | 407.421 | 203.711 |
| DN 32 | | 0,00 | 0 | DN 32 | 445 | 0 | 0 |
| DN 40 | | 0,00 | 0 | DN 40 | 445 | 0 | 0 |
| DN 50 | | 1439,00 | 719,5 | DN 50 | 478 | 687.842 | 312.983 |
| DN 65 | | 0,00 | 0 | DN 65 | 522 | 0 | 0 |
| DN 80 | | 0,00 | 0 | DN 80 | 612 | 0 | 0 |
| DN 100 | | 923,60 | 461,8 | DN 100 | 723 | 667.763 | 200.883 |
| DN 125 | | 0,00 | 0 | DN 125 | 823 | 0 | 0 |
| DN 150 | | 0,00 | 0 | DN 150 | 923 | 0 | 0 |
| DN 200 | | 0,00 | 0 | DN 200 | 988 | 0 | 0 |
| DN 250 | | 0,00 | 0 | DN 250 | 1198 | 0 | 0 |
| DN 300 | | 0,00 | 0 | DN 300 | 1419 | 0 | 0 |
| DN 350 | | 0,00 | 0 | DN 350 | 1572 | 0 | 0 |
| DN 400 | | 0,00 | 0 | DN 400 | 1847 | 0 | 0 |
| | | 3.465 | 1.733 | | | 1.835.236 | 753.681 |

Beide Technologie-Varianten weisen sehr hohe Wärmegestehungskosten auf ($141,93 \text{ €/MWh}$ zu $123,95 \text{ MWh}$). Diese sind vor allem dem hohen Invest für das Fernwärmenetz für den Fall eines Neubaus geschuldet. Die Netzkosten machen $>50 \%$ der Investitionen aus. Die BHKW-Variante endet ökologisch günstiger, was in der Hauptsache auf die Stromgutschrift aus dem BHKW zurückzuführen ist.

5.6.3.2. Szenario 6

Modellierung und Szenariodefinition

Zunächst erfolgte die selektive Auswahl der einzubeziehenden Objekte. Bei Szenario 6 handelt es sich um ein Bestandsnetz der MSW-Tochtergesellschaft Mainzer Wärme GmbH (MW). Somit waren auch – im Gegensatz zu den anderen Fallstudien – reale und in Teilbereichen granulare Verbrauchsdaten vorhanden. Der Methodenvergleich umfasst bei diesem Szenario daher auch nicht die planerische Betrachtung eines Neubauquartiers, sondern den Vergleich der Simulationsergebnisse mit Realdaten aus dem Bestand. Für beide Fälle wurden dieselben Gebäude betrachtet (siehe **Abbildung 74**).



Abbildung 74: Grafische Darstellung von Szenario 6 in SimStadt

Die jährlichen Wärmeverbräuche für Heizwärme und Warmwasserbereitung sind bekannt, jedoch nicht als Istwerte voneinander abgrenzbar. Bei der energetischen Betrachtung werden die Gebäude sowie deren Verbräuche dargestellt. Die Reihenhäuser sind verbrauchsseitig aus datenschutzrechtlichen Gründen zu je einem Block von etwa 3 Gebäuden zusammengefasst, damit kein Rückschluss auf individuelle Einzelverbräuche gezogen werden kann.

Im nächsten SimStadt-Workflowschritt erfolgt das **Attribute Processing**. Aufgrund der gegebenen Ist-Situation ist dies im Bereich 3D GIS jedoch nicht erforderlich. Methodenseitig würde ohne Simulation in der Regel ein Lageplan zu Rate gezogen, welcher es erlaubt, die Straßenführung zu erkennen und auf dieser Basis eine Trassenführung, vornehmlich im öffentlichen Bereich, zu skizzieren.

In der Praxis werden für Quartiersbetrachtung im Regelfall noch keine CityGML-Daten verwendet. Erschließungsträger oder Kommunen stellen stattdessen aktuelle Lagepläne zur Verfügung. Georeferenzierte 2D-Daten werden bspw. in der Koordinierung von Leitungstrassen (Fernwärme, Strom, Gas, Telekommunikation) verwendet. Die Leitungstiefe als dritte Dimension wird normalerweise punktuell als semantisches Attribut notiert, das den Höhenabstand zur Geländeoberkante (GOK) anzeigt; auf voller Länge sind diese Informationen im Regelfall nicht verfügbar und müssen bei Bedarf demnach interpoliert werden.

Wärmebedarfsberechnung

Eine erste Wärmebedarfsabschätzung auf Grundlage unbearbeiteter 3D-Rohdaten ergab einen Wärmebedarf von 4.800 MWh im Jahr. Dieses Ergebnis konnte als unplausibel bewertet werden und führte zur Erkenntnis, dass die vorliegenden 3D-Daten auch hinsichtlich ihrer Validität zu überprüfen waren (bspw. bzgl. der Nutzung oder Konditionierung).

Die detaillierte Wärmebedarfsberechnung in SimStadt erfolgt strikt nach der Methodik gem. DIN V 18599. Anhand der vorliegenden 3D-Daten konnten 20 Objekte (Gebäude oder typologisch differenzierbare Gebäudeteile bzw. -abschnitte) als unbeheizt identifiziert werden. Bei vier Objekten handelt es sich um das Gewächshaus. 13 Objekten konnte eine Büronutzung zugewiesen und 56 wurden als Wohngebäude klassifiziert. Die Anzahl der Reihenhäuser erwies sich somit als korrekt. Ebenso konnte eine korrekte Zuweisung beheizter Flächen attestiert werden.



Die monatliche Wärmeharftsberechnung auf dieser Grundlage ergab für Szenario 6 eine Wärmemenge zur Raumbeheizung in Höhe von 2.057.828 kWh pro Jahr (siehe **Tabelle 17**). Hierbei nicht berücksichtigt wurde jedoch die benötigte Wärme zur Warmwasserbereitung.

Tabelle 17: Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Ist-Daten zum Heizwärmebedarf in Szenario 6

| Vergleich Simstadt Simulation mit tatsächlichem Wärmeverbrauch in 5 aufeinander folgenden Jahren | | | | | | |
|--|----------------|-----------------------------|---|---------------------------------------|----------|---------------|
| | Anzahl Gebäude | Anzahl Gebäudeteile erkannt | mittlerer echter Wärmebedarf 2014-2018 m. WWB | mittlerer Wärmebedarf Simstadt o. WWB | | Abweichung |
| Reihenhäuser | 56 | 56 | 487824,4 | 490.315 | kWh p.a. | 0,51% |
| Gewächshaus | 1 | 4 | 421284 | 406.208 | kWh p.a. | -3,58% |
| Bürogebäude | 7 | 13 | 736547 | 1.161.305 | kWh p.a. | 57,67% |
| nicht beheizt | 1 | 20 | | 0 | | |
| Summe | | | 1.645.655,40 | 2.057.828 | kWh p.a. | 25,05% |

Der direkte Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Ist-Daten zeigt bei dem Gewächshaus (tatsächlich ohne Trinkwarmwasser-Erwärmung) eine hohe Genauigkeit. Auch die Reihenhäuser wurden hinreichend exakt abgebildet. Da jedoch der Trinkwarmwasseranteil in der Berechnung fehlt, ist davon auszugehen, dass das Monatsbilanzverfahren die Wärmeverbräuche im Vergleich zu den Jahren 2014-2018 als insgesamt zu hoch angibt.

Dies ließ den Rückschluss zu, dass die Bürogebäude zunächst mit einem zu hohen Wärmeverbrauch abgebildet wurden. In weiteren Iterationsschleifen wurde daher versucht, diesen Fehler zu korrigieren bzw. zu eliminieren.

Bei der vor Ort ansässigen Akademie der Wissenschaften handelt es sich um einen historisch gewachsenen Gebäudekomplex aus mehreren Abschnitten. SimStadt erkannte sieben abgrenzbare Objekte. Die Attribute zeigen ein Baualter zwischen 1960 und 1990. Eine Sanierung wurde nicht explizit erfasst.

Der Wärmebedarf wurde tatsächlich nur für einen Teilabschnitt erfasst. Reale Verbrauchsdaten liegen dagegen nur für den gesamten Komplex vor. Ähnlich stellt sich die Abbildung der Bürogebäude dar. Diese wurden in Baualtern zwischen 1970 und dem Jahr 2000 abgebildet. Eine Sanierung, insbesondere der älteren Abschnitte ist nicht eingeflossen. Tatsächlich ist jedoch von bis zu zwei Teilsanierungen auszugehen (typischerweise wären an dieser Stelle Fenstersanierungen und außenliegende Dämmung zu nennen). In einem zweiten Simulationsdurchlauf wurde der Raumheizwärmebedarf der Bürogebäude daher unter der Annahme einer Sanierung ermittelt.

Anschließend wurde der Wärmebedarf um einen rechnerisch nicht durch Mittelung beeinflussten Anteil für das Jahr 2017 validiert berechnet. Grundlage der Simulation waren die an der Anlage bekannten Temperaturen (Raumtemperatur zur jeweiligen Außentemperatur im Stundenmittel). Eine Gegenüberstellung zur Validierung erfolgte zu den gelieferten Wärmemengen in dem Bestandsmischgebiet (siehe **Tabelle 18**). Hierbei wurde der Anteil Raumwärme und Warmwasserwärme rechnerisch separiert und die Bürogebäude werden sowohl mit und als auch ohne erfolgter Teilsanierung dargestellt.

Für das Jahr 2017 stellt sich der Wärmebedarf der Raumheizung der Bürogebäude vorerst um 38,89 % zu hoch dar, wenn vereinfachend angenommen wird, dass der tatsächliche Wärmeverbrauch der Gebäude zu 15 % der Warmwasserbereitung zuzuordnen ist. Unter der Annahme einer Vollsanierung (Kellerdecke, Dach, Fenster, Vollwärmeschutz) unterschreitet die Simulation den tatsächlichen Wärmebedarf dagegen um 13,9 %. Da diese Komplettsanierung jedoch wenig plausibel ist, erscheint die Sensibilität des Raumwärmebedarfs in Abhängigkeit vom Sanierungsgrad valide. Die Bürogebäude sind in öffentlicher Hand und höchst wahrscheinlich in den vergangenen 50 Jahren nur eingeschränkt saniert worden (bspw. Fenster/Dach).

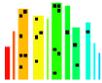


Tabelle 18: Validierung der Simulationsergebnisse zum Heizwärmebedarf in Szenario 6

| Vergleich Simstadt Simulation mit tatsächlichem Wärmeverbrauch 2017 | | | | | | | |
|---|----------------|--|---|--|-------------------------------------|----------|------------|
| Wärmebedarf ohne Warmwasser | | | | | | | |
| | Anzahl Gebäude | Anzahl Gebäudeteile erkannt | mittlerer echter Wärmebedarf 2017 gesamt | mittlerer echter Wärmebedarf 2017 o. WWB | 2017 Wärmebedarf Simstadt o. WWB | | Abweichung |
| Reihenhäuser | 56 | 56 | 509.607 | 509.607 | 354.725 | kWh p.a. | -0,55% |
| Gewächshaus | 1 | 4 | 409.080 | 409.080 | 406.210 | kWh p.a. | -0,70% |
| Bürogebäude | 7 | 13 | 829.882 | 705.400 | 979.713 | kWh p.a. | 38,89% |
| Bürogebäude <i>saniiert</i> | 7 | 13 | 829.882 | 705.400 | 607.335 | kWh p.a. | -13,90% |
| nicht beheizt | 1 | 20 | 0 | 0 | 0 | | |
| Summe unsaniert | | | 1.748.569,00 | 1.471.204,60 | 1.740.690 | kWh p.a. | 18,32% |
| Summe saniert | | | 1.748.569,00 | 1.471.204,60 | 1.368.312 | | -6,99% |
| Warmwasserbedarf | | | | | | | |
| | Anzahl Gebäude | geschätzter WW-Verbrauch an Jahresmenge (Mainz) | mittlerer echter Wärmebedarf 2017 gesamt | mittlerer echter Wärmebedarf 2017 nur WWB (geschätzt, nicht gemessen) | Simstadt / DHWcalc nur WWB | | Abweichung |
| Reihenhäuser | 56 | 0,30 | 509.607 | 152.882,10 | 182.838,36 | kWh p.a. | 19,59% |
| Gewächshaus | 1 | | 409.080 | - | - | kWh p.a. | |
| Bürogebäude | 7 | 0,15 | 829.882 | 124.482,30 | 129.272,00 | kWh p.a. | 3,85% |
| nicht beheizt | 1 | | - | - | - | | |
| Summe | | | 1.748.569,00 | 277.364,40 | 312.110 | kWh p.a. | 12,53% |
| Gesamtwärmebedarf | | | | | | | |
| | Anzahl Gebäude | Anzahl Gebäudeteile erkannt | mittlerer echter Wärmebedarf 2017 | mittlerer Wärmebedarf Simstadt m. WWB | | | Abweichung |
| Reihenhäuser | 56 | 56 | 509.607 | 537.605 | kWh p.a. | | 5,49% |
| Gewächshaus | 1 | 4 | 409.080 | 406.210 | kWh p.a. | | -0,70% |
| Bürogebäude | 7 | 13 | 829.882 | 1.108.985 | kWh p.a. | | 33,63% |
| Bürogebäude <i>saniiert</i> | 7 | 13 | 829.882 | 736.607 | kWh p.a. | | |
| nicht beheizt | 1 | 20 | 0 | - | | | |
| Summe unsaniert | | | 1.748.569,00 | 2.052.800 | kWh p.a. | | 17,40% |
| Summe saniert | | | 1.748.569,00 | 1.680.422 | | | -3,90% |

Auf der anderen Seite ist es unwahrscheinlich, dass alle Bürogebäude eine zentrale Warmwasserbereitung besitzen. Unter der Annahme einer Teilsanierung – Mittelwert Raumwärmebedarf: $(979.713 + 607.335) / 2 \text{ kWh} = 793.524 \text{ kWh}$ und dem Wegfall der Warmwasserbereitung in 5 der 7 Nicht-Wohngebäude, also 36.935 kWh Warmwasserwärme – ergäbe sich ein Simulationsergebnis von 830.459 kWh für die Bürogebäude. Dies entspricht tatsächlich dem gemessenen Wert.

Daher ist auch beim Gesamtwärmebedarf davon auszugehen, dass die Simulation des Wärmebedarfs auf Grundlage der 3D-Daten gem. DIN V 18599 (Monatsbilanzverfahren) ein hinreichend genaues Ergebnis liefert. Der Sanierungsgrad besitzt eine hohe Sensitivität. Gerade bei den Nicht-Wohngebäuden sind korrekte Angaben zur Warmwasserbereitung (zentral oder dezentral, z. B. elektrisch) erforderlich, um eine Genauigkeit kleiner $\pm 15 \%$ Abweichung zu erhalten.

Die Abweichung bei der Simulation des Raumwärmebedarfs der Reihenhäuser in 2017, die sich mit nur $5,49 \%$ auf einem hohen Genauigkeitsniveau befindet, vergleichmäßiggt sich bei einem mehrjährigen Mittelwertvergleich.

Warmwasserbedarfsberechnung

Die Warmwasserberechnung erfolgte separat im Tool *DHWcalc*.

Die Annahmen sind von Wohngebäuden und Nicht-Wohngebäuden differenziert zu treffen. Bei den Bürogebäuden sind laut DIN V 18599 eine Belegung von $0,1$ Personen pro m^2 Fläche und ein WW-Verbrauch von $0,4 \text{ kWh}$ pro Person und Tag anzusetzen. Diese Annahme ist jedoch stark abhängig davon, wie sich die genaue Nutzung des jeweiligen Gebäudes gestaltet. Vereinfachend wurden hier Werkstattgebäude, Bürogebäude und Sozialräume der Werkstätten gleichartig als Bürogebäude zusammengefasst. Aufgrund dieser Unschärfe sind deutliche Abweichungen nicht überraschend (siehe Tabelle 19).

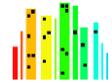


Tabelle 19: Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Ist-Daten zum Trinkwarmwasserbedarf in Szenario 6

| Warmwasserbedarf | | | | | | | | Anteil WWB an Simulation Simstadt | Anteil WWB als Abschätzung DHW-Sim zu Ist-Wärmeverbrauch |
|------------------|----------------|-----------------------------|--|---------------------------------------|-----------------|------------|--|-----------------------------------|--|
| | Anzahl Gebäude | geschätzter WW-Verbrauch an | mittlerer echter Wärmebedarf 2014-2018 nur WWB | mittlerer Wärmebedarf Simstadt o. WWB | | Abweichung | | | |
| Reihenhäuser | 56 | 30% | unbekannt | 182.837 | kWh p.a. | 24,93% | | 27% | 37% |
| Gewächshaus | 1 | | unbekannt | - | kWh p.a. | 0,00% | | | |
| Bürogebäude | 7 | 15% | unbekannt | 129.272 | kWh p.a. | 17,01% | | 10% | 18% |
| nicht beheizt | 1 | | unbekannt | - | | 0,00% | | | |
| Summe | | | | 312.109 | kWh p.a. | | | | |

Da die genaue Menge des Wärmeverbrauchs für Warmwasserbereitung auch für die Reihenhäuser nicht bekannt ist, musste eine Abschätzung getroffen werden. Aus Mehrfamilienhäusern, bei denen ein Warmwasseranteil bekannt ist, beläuft sich dieser auf 20-50 % des gesamten Wärmebedarfs. Durch die geringere Dichte der Bebauung bei den EFH wird gem. praktischer Betriebserfahrung mit Bebauung gleicher Baualtersgruppe ein Anteil von 30 % angesetzt, bei den Nichtwohngebäuden werden 15 % angenommen. Dies resultiert daraus, dass in den Bürogebäuden neben wenigen Sozialräumen und einigen Toiletten-Waschbecken keine Warmwasserzapfstellen zu vermuten sind.

Die Stunde des höchsten Verbrauchs kann vereinfachend zur Wärmeleistungsbestimmung genutzt werden. Wie bereits zuvor ausgeführt, ist der erste Wärmebedarf vor der Validierung über den Sanierungsgrad als zu hoch erkannt. Es wäre demnach plausibel, wenn auch die benötigte Wärmeleistung zu hoch wäre.

Ergebnis der Betrachtung sind 1.266,82 kW benötigte Wärmeleistung mit 1.850 Vollbenutzungsstunden (Vbh). Die Vbh ergeben sich aus dem Verhältnis der ermittelten Jahresmenge geteilt durch die maximale Leistung.

Die tatsächliche Messung der Jahre 2014 (Summe aus Netzteilen NWG und Neubaugebiet) ergibt einen Maximalwert von 1.120 kW am 29.12.2014. Also ist das Simulationsergebnis um 13,1 % höher als der tatsächliche Verbrauch. Interessant ist, dass sich wohl durch die Verteilung von Netzteilen aber auch Warmwasser- zu Heizwärmeverbräuchen die Überhöhung des Wärmeverbrauchs auf lediglich 13 % beschränkt.

Es ist daher angedacht, in einem weiteren Durchlauf der Wärmebedarfsbestimmung die Wärmemenge der Simulation abzusenken und das Durchschlagen der Wärmeleistung nachzuvollziehen.

Wärmenetz

Das Design des Wärmenetzes erfolgt in der Regel auf Basis der benötigten oder vorgesehenen Temperaturen bei den Wärmeabnehmern. Zur Trinkwarmwasserbereitung werden Temperaturen >60 °C benötigt. Berücksichtigt man 5 K „Grädigkeit“ an den Wärmeübertragern, so wären min. 65 °C Vorlauftemperatur aus dem Wärmenetz primär erforderlich. Erfahrungswerte zeigen, dass ein Nahwärmenetz ungefähr weitere 1- 5 K Verlusttemperatur durch Wärmeübergang durch die Isolierung an den Boden besitzt. Zur einfachen Darstellung würde man das Netz auf 70 °C Vorlauftemperatur auslegen oder unter Wahrung der Möglichkeit einer thermischen Desinfektion auf 80 °C (70 °C Warmwassertemperatur im Desinfektionsfall). Die Auskühlung durch die Kunden ergibt rechnerisch das Maß an Leistung, welches durch einen bestimmten Volumenstrom transportiert werden kann:

$$\dot{Q} = \dot{m} * c * \Delta T = \dot{m} * c * (T_{\text{Vorlauf}} - T_{\text{Rücklauf}})$$

Gebäudetechnische Anlagen aus den 1960/1970er Jahren sind in der Regel noch mit Anlagentechnik ausgestattet, welche 70 °C an den Heizkörpern benötigen und so ausgelegt, dass sie etwa 20 K Auskühlung ermöglichen. Da das Quartier derartige Bestandsgebäude einschließt, würde eine Auslegung 80 °C $T_{\text{Vorlauf}} / 60 \text{ °C } T_{\text{Rücklauf}}$ unter Berücksichtigung der Grädigkeit typisch gewählt werden. Kühlen neue Gebäude den Vorlauf stärker aus, so sinkt im tatsächlichen Betrieb die Gesamtrücklauftemperatur. Mit dem gepumpten Volumenstrom ist eine größere Leistung möglich. Er könnte reduziert werden.

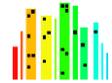
Im Zuge der Anlagenplanung wird der Verlauf der Trassierung des Nahwärmenetzes skizziert und entsprechend den Eigentumsverhältnissen und Ansprüchen der Eigentümer festgelegt. Bei kleineren Quartieren mit einer festgelegten Anzahl von Abnehmern wird der jeweilige Netzteil auf die Leistung der dahinterliegenden Verbraucher abgestimmt. Da die Erfahrung im Betrieb von Fernwärmenetzen eine sich einstellende Gleichzeitigkeit erkennen lässt, wird ein entsprechender Faktor angesetzt. Typisch wäre der pauschale Ansatz von 80 % der maximal gleichzeitig benötigten Wärmeleistung der Abnehmer. Der Wert variiert mit der Anzahl der Abnehmer.

Das Netz wird entsprechend dem erforderlichen Volumenstrom und den bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten höheren Druckverlusten technisch nach seiner Dimension in den Teilbereichen ausgelegt. Spezifische Werte von Druckverlusten zwischen 80 und 200 Pa/m kommen zur Anwendung.

Je nach geforderter Lebensdauer, möglicher Vorlauftemperatur und der eventuell späteren Einbindung von Kunden wird das Leitungsmaterial gewählt. Wenn zum Anschluss von Einzelgebäuden eine schnelle oder flexible Verlegung erforderlich ist, kann auch ein Übergang des Rohrleitungsmaterials zwischen Haupttrasse und Abgängen, wie Hausanschlüssen, notwendig oder sinnvoll sein. Am aktuellen Beispiel wurden neben Kunststoffverbundmantelrohr (KMR) bei den Heizwerkabgängen und Haupttrassen Edelstahl-Wellrohr und vernetztes Polyethylen (PEX) eingesetzt. Diese Aufteilung begründet, dass ein direkter Vergleich der Netzerstellungskosten mit den simulierten Netzerstellungskosten nicht möglich ist. Auch sind die historischen Daten der Kostenaufteilung nicht direkt auf das Netz anwendbar. Darüber hinaus wurden in Wirklichkeit die Netzteile nach Abnehmern aufgetrennt. Es wurden zwei Netzteile realisiert, was tendenziell zu spezifisch höheren Kosten als die Trassierung durch SimStadt und anschließenden Berechnung in STANET führen dürfte. In der klassischen Planung findet in der Regel keine Unterscheidung nach den Anwendungsfällen statt. Typisch sind aus der Erfahrung heraus die Annahmen nach ganzjährig bilanziellem Netzverlust (bspw. 15 % bei gleichzeitiger Warmwasserbereitung) und den Strombedarf für Erzeugung und Pumpstrom i. H. v. 1,5-2 % der erzeugten und somit gepumpten Wärmemenge.

Wärmeerzeugung

Die Ist-Verbräuche der Abnehmer stehen bei dem betrachteten Nahwärmenetz der Summe aus beiden geeichten Wärmenetzählern gegenüber. Diese wurden aus der Anlagen- und Netzregelung ausgewertet. Die Stundenleistungen wurden für alle 5 betrachteten Jahre aufaddiert und auf einen Jahresmittelwert berechnet (korrespondierend zum 5-Jahresmittelwert der Verbräuche). Durch diese Abbildung ist keine Witterungsbereinigung notwendig. Die mittlere Menge der Wärmeerzeugung entspricht demnach 1.903.770 MWh. Der rechnerische Netzverlust 13,6 % ergibt sich aus der Differenz dieser Menge und der mittleren verkauften Wärmemenge 2014-2018 (plausibel für ein gemischtes Netz mit Baualter



1960 bis 2010). Die Simulation hat 14,5 % ergeben, was auf der konservativen Seite ist und als Abweichung absolut in den plausiblen Rahmen passt. Der Pumpstrom wird in der Wirtschaftlichkeitsrechnung (WiRe) gleichermaßen über die analog zu der FW 309-1 entstammenden Ansatzbetrachtung 1,5 % mal Wärmeenergieerzeugung errechnet. Durch die in der Realität um 11,86 % geringere Wärmeenergieerzeugung, fällt auch der notwendige Pumpstrom proportional geringer aus.

Die Jahresdauerlinie würde bei einem herkömmlichen Projekt anhand einer generischen Jahresdauerlinie ermittelt (vgl. Szenario 3). Im vorliegenden Szenario 6 ist der Lastgang hingegen vorhanden und es wird zum Vergleich der weiteren Erzeugungssysteme der Lastgang Erzeugung des Jahres 2017 gewählt.

Variante 1

Das gewählte BHKW wird so gewählt, dass es zwischen 4.750 und 7.500 Vbh bzw. zwischen 15 und 25 % der thermischen Leistung aufbringen kann. Mit den o.g. Grenzwerten wäre eine Auswahl wie bei der SimStadt-Simulation anhand des Leitfadens ASUE BHKW Kennzahlen 2014/2015 auf das 250 kW_{el} / 264 kW_{th} BHKW gefallen. Auch der Kessel hätte die gleiche Größe mit 945 kW. Redundanzgedanken bleiben bei der Betrachtung vorerst außer Acht, da die zusätzliche Kesselleistung Betriebspolitik ist und ohne Redundanzgedanken eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Energiesystemen möglich wird. Die gewählten Erzeuger werden in die Jahresdauerlinie (2017) eingebunden und die Vollbenutzungsstunden ermittelt. Im Vergleich zur Simulation mit SimStadt (4.258 Vbh) betragen die anhand des Ist-Lastganges ermittelten Vollbenutzungsstunden 4.762 Vbh (+11,8 %). Über die sogenannte „Stromgutschriftmethode“ hat dies direkten Einfluss auf den erreichbaren Primärenergiefaktor. Da, wie bereits zuvor beschrieben, der von SimStadt simulierte Wärmebedarf aufgrund fehlender Berücksichtigung von Sanierungsmaßnahmen der Bürogebäude zu hoch ist, fällt auch die Wärmemenge der Simulation deutlich größer als die Ist-Wärmemenge des Heizwerks.

Die Heizraumfläche der bivalenten Wärmeenergieerzeugung (BHKW und Spitzenlastkessel) wird anhand der Anlagenteile berechnet. Die Ist-Betrachtung baut auf dem Erdgas-BHKW mit 250 kW_{el} eines Bestandsheizwerkes der Mainzer Wärme auf. Hinzu kommen Platz für den Anschlussraum, die Brennstoffversorgung und den Pufferspeicher. Der Gaskessel wird aus einer Anlage mit 1.480 kW auf Basis von Gaskesseln einer Beteiligungsgesellschaft der ÜWG angesetzt (42 m²). Als Summe ergeben sich 99,9 m² Flächenbedarf. Die Ausgabe der Simulation ergibt 108 m² Fläche. Da in der Ist-Betrachtung keine genaue Aussage darüber getroffen werden kann, ob Nebenanlagen, wie Pumpen und Druckhaltung für das hydraulische System in den einzelnen Anlagenteilen untergebracht sind, wird der Wert der Simulation als plausibel und auskömmlich validiert.

Dieselbe Flächenbetrachtung wird mit dem Tool erneut durchgeführt. Dabei wird für die Spitzenkesselleistung die Gesamtleistung angegeben. Damit wäre das BHKW redundant abgesichert. Der Flächenbedarf ergibt sich zu 116 m² (+21,8 % Leistungserhöhung auf der Spitzenlastseite erwirken +7,4 % Flächenbedarf für den Spitzenkessel). Diese Validierung lässt vermuten, dass wenn man als direkte Kostenvergleichbarkeit zu dezentralen Varianten bei der Erzeugungstechnik nur auf die maximal benötigte Wärmeleistung abstellt (ohne Berücksichtigung von Redundanzleistungen für den Grundlasterzeuger durch den Spitzenlastkessel), man nur einen kleinen Fehler in einer zu klein bemessenen Erzeugerfläche begeht, der in Größenordnung der Flächenoptimierung der Nebenanlagen liegt.

Variante 2

In der Simulation der Erzeugervariante Holzkessel + Gaskessel erreicht der Holzkessel 2.634 Vbh mit einem Anteil von 74 % Wärme (1.738 MWh) aus Biomasseerzeugung. Der Gaskessel übernimmt 26 % der Wärmemenge (605 MWh). Der Holzkessel erreicht in der Validierung 1.073 MWh Wärmeerzeugung bei 1.625 Vollbenutzungsstunden und somit nur 56 % der Wärmeerzeugung.

In **Abbildung 75** werden die simulierten Ergebniswerte und die gemessenen Realdaten auf monatlicher Basis abgebildet, wobei der gemessene bzw. gezählte Verbrauch nur in jährlicher Auflösung vorliegt. Die Simulation in SimStadt überschätzt dabei den Bedarf in den Wintermonaten, während der Bedarf in den Monaten der Übergangszeit unterschätzt wird. Die Differenzen zwischen Verbrauch bzw. Bedarf und Erzeugung sind jeweils durch Netzverluste verursacht. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messdaten liegen hier im Jahresmittel bei nur 6 %.

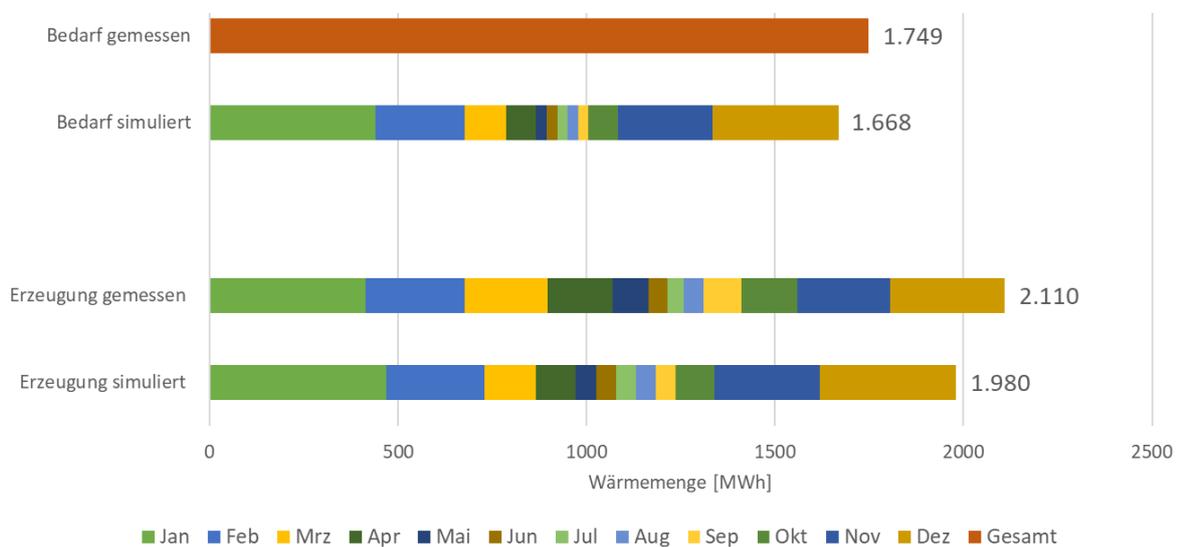
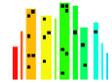


Abbildung 75: Gemessener Verbrauch und simulierter Bedarf sowie gemessene und simulierte Erzeugung für Szenario 6

Variante 3

Dezentrale Wärmepumpen zeichnen sich dadurch aus, dass ein Teil der Erzeugung sich im Bilanzkreis des Wärmekunden (in seinen Räumlichkeiten) befindet. Die Erzeugerfläche liegt also im Bereich der Kunden. Möchte man diese vergleichend zu zentralen Erzeugungseinheiten ausweisen, müsste man diese bei den Kunden zzgl. des erforderlichen großen Trinkwarmwasser- oder Pufferspeichers darstellen. Die bei der Wärmenetzvariante erforderliche Fernwärme- Übergabestation wäre dem entgegen zu stellen. Baukosten für diesen Raum lassen sich für beide Varianten nur schwer ausweisen bzw. sind zu diskutieren, da diese regelmäßig unentgeltlich durch den Kunden zur Verfügung gestellt werden. Dennoch wird auf dieser Basis festgelegt, dass in allen Technologievarianten eine Fläche ausgewiesen wird, welche sich auf die zentrale Erzeugung bezieht und eine Fläche, welche sich auf Flächen in den versorgten Liegenschaften bezieht. Diese „kundeneigenen“ Flächen können bei netzbezogenen Varianten die Fläche für die Fernwärmeübergabestation umfassen; bei dezentralen Versorgungsvariante (bspw. dezentrale Luft-Wasser-Wärmepumpen) wäre es deren Aufstellfläche und die Fläche für einen Außenaufsteller (Verflüssiger).



Die Summe der jährlichen Wärmeerzeugung durch die 8760 Strombedarfswerte aufsummiert geteilt, ergibt einen mittleren COP. Dieser geht davon aus, dass die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe ganzjährig 35 °C beträgt. Für die kleinen Wärmepumpen beträgt der COP demzufolge ungefähr 4,0 bis 4,1; für die größeren Wärmepumpen 3,5 – 3,9. Dabei handelt es sich jedoch nicht um eine Jahresarbeitszahl, da die variierenden Heizsolltemperaturen nicht berücksichtigt sind. Es eignen sich zwei Verfahren, diesen Fehler rechnerisch zu korrigieren:

- Man teilt die Jahresmenge in einen sinnvollen Ansatz, der mit 35 °C Vorlauftemperatur beheizt werden kann (Flächenheizung vorausgesetzt) und nimmt an, dass der übrige Teil der Wärme zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser, also die Aufheizung von 35 °C auf 55 °C, mit einer reinen Stromheizung (bspw. mittels Heizstabs) geleistet wird.
- Man nimmt einen weiteren Korrekturfaktor zwischen dem COP und einer genäherten Jahresarbeitszahl (JAZ) an, der sich auf Basis einer weiteren Kennlinienfunktion mit fixer Quelltemperatur und variabler Heiztemperatur ergibt. Dafür muss ein jahreszeitlicher Verlauf abgeschätzt und zusätzlich rechnerisch angewendet werden.

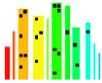
Das Datenblatt der 4 kW-Wärmepumpe stellt den COP von 2,9 bei -7 °C Außentemperatur und 35 °C Heiztemperatur einem COP von 1,81 gegenüber, wenn die Heiztemperatur 55 °C entspricht (Warmwasserbereitung). Der Korrekturfaktor betrage, eine lineare Funktion vereinfachend vorausgesetzt, $(2,9 - 1,81) / 2,9 = 37,6 \%$. Bei 10 °C Außentemperatur betragen die COP-Werte demnach 4,7 zu 2,83 (Diff: 39,8 %). Da beide Abweichungen sich nur um etwa 5 % unterscheiden, wird vereinfachend der Mittelwert der Abweichung mit 38,7 % angenommen. Die Jahresarbeitszahl kann für weitere Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen demnach 38,7 % geringer als der Jahresmittlere COP abgeschätzt werden:

Die Summe der Wärmepumpen der 4 Gruppen erzeugen 1.274,184 MWh Wärme pro Jahr bei einem mittleren COP von 3,9. Die mittlere JAZ errechnet sich dabei wie folgt: $3,9 * (1 - 38,7 \%) = 2,39$.

Dabei unberücksichtigt sind Stillstandsverluste der Wärmepumpe. Geht man davon aus, dass eine Fernwärmestation auch zumindest elektrische Stillstandsverluste und einen geringen thermischen Verlust bei Nicht-Betrieb aufweist, können diese im Variantenvergleich vernachlässigt werden.

Augenscheinlich ist die Abweichung zwischen diesen erzeugten Wärmemengen und der validierten Bedarfswärmemenge aller Gebäude saniert i. H. v. 1.680,422 MWh p.a. Die Abweichung nach unten lässt sich dadurch erklären, dass das Gewächshaus bei dieser Variante ausgeblendet wurde, da zu dessen Versorgung zu hohe Temperaturen benötigt würden. Man könnte alternativ zur Darstellung der kompletten Wärmeversorgung eine Hochtemperaturwärmepumpe mit niedrigerem COP ansetzen. Die Summe der ausgewerteten Wärmeproduktion des zweiten Simulationsdurchlaufs für die dezentrale Wärmepumpenvariante, ergibt ebenfalls unplausibel geringe Gesamtwärme-Produktionsmengen. Nach der Auswertung können die folgenden Gründe identifiziert werden:

- Die Simulation des Warmwasserbedarfs ist in SimStadt nicht voll integriert und daher in der automatischen System-Simulation nicht enthalten
- Die Wärmepumpen laufen gemäß Simulation immer eine Stunde lang. Dadurch wird nicht immer genau die tatsächliche Wärmenachfrage produziert.

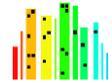


- Durch die aktuell nur mit einigen wenigen Einträgen ausgestattete Bibliothek und die automatisierte Auswahl der nächst-passenden Wärmepumpe wählt die Simulation ggf. eine Wärmepumpe aus, welche zu klein oder zu groß ist und die benötigte Leistung nicht bereitstellt oder zu viel Wärme produziert. Mit Erweiterung der Bibliothek löst sich dieses Problem von selbst. In einer Größenordnung von deutlich >100 kW gibt es keine Luft/Wasser-WP mehr. Daher wurde sich fortfolgend in der Validierung auf die EFH beschränkt.
- Bei Wärmepumpen ist die vom Hersteller angegebene Nennleistung i. d. R. nicht die Auslegungsleistung, wie sie von Kesseln oder BHKW bekannt ist: Wir legen einen Wärmeerzeuger nach Auslegungstemperatur aus (bspw. Klimatablelle DIN TS 12831 für Mainz -10°C). Die Wärmepumpe wird bspw. mit Leistung A7/35 angegeben (+7 °C Außentemperatur als Wärmequelle, 35 °C Vorlauftemperatur). Die aktuell größte WP in der Bibliothek als 75 kW Luft-Wärmepumpe A7/35 leistet bei -10/35 °C nur knapp über 40 kW.
- Wenn die WP für die laut Wärmebedarf geforderte Spitzenleistung zu klein ist, fehlen alle Stunden mit einer Leistung > der gemäß Außentemperatur möglichen Leistung dieser Wärmepumpe in der Summe der Wärmeproduktion. Es fehlen bei den EFH in Summe 41 % der Wärmemengen.
- Für einen vergleichbar gestalteten Variantenvergleich müssten die fehlenden Mengen aufaddiert werden. Dies kann aufgrund der zum Zeitpunkt der Entwicklung dieser Simulation endenden Projektlaufzeit nicht mehr vollendet werden.

Da im Bereich von aktuellen Neubauten der Warmwasser-Wärmeanteil bereits > 50 % des Gesamtwärmebedarfs entsprechen kann, wird als Validierungsergebnis festgehalten, dass in der Variante dezentrale Wärmepumpe zum Vergleich mit der Netzvariante die Wärme zur Warmwasserbereitung abweichend zur Raumheizung anzusetzen ist.

Betrachtet man nur die Einfamilienhäuser, so ergibt sich eine Wärmebedarfsmenge in Höhe von 353,062 MWh zzgl. Speicherverlusten von 0,209 MWh. Dies ist ohne WWB (laut SimStadt Simulation zzgl. 182,838 MWh) zu werten. Der COP bei 35 °C zur Raumheizung beträgt simuliert über die Außentemperaturen eines Jahres 3,35. Der COP des Nenndatenblattes der Wärmepumpen beträgt etwa 4,0. Der COP im Auslegungszustand bei -7/35 °C beträgt 2,9, also interpoliert auf -10 °C etwa 2,66. Der resultierende COP von 3,35 rein für die Raumheizung nach Außentemperatur ermittelt über ein Jahr, wirkt demnach plausibel.

Um eine reale Jahresarbeitszahl anzusetzen, wäre die Betrachtung von Stillstandsverlusten und dem Warmwasseranteil erforderlich. Würde man die Einfamilienhäuser für sich betrachten und ersetzt man die „Summe Wärmeproduktion“ der WP durch Wärmebedarf zzgl. Speicherverluste, so schließt man den Fehler durch die zwingende Mindestlaufzeit der WP von 1 h aus. Das wirkt korrekt, da eine Mindestlaufzeit sich zur Speicherfüllung auswirken müssten und in Realität, sollte der Speicher bereits voll sein, aufgrund einer Temperaturabhängigkeit die WP eben doch abgeschaltet wird. Einer bereinigten Wärmeproduktion i. H. v. 536,109 MWh (inkl. WWB) steht ein Stromverbrauch von 196.732 kWh gegenüber (siehe **Tabelle 20**). Dieser resultiert aus dem COP 3,35 für Raumheizwärme, dem Anteil WWB 10-35 °C geteilt durch eben diesen COP und den Anteil WWB 35-45 °C geteilt durch einen COP 1 eines



Elektroheizstabes. Teilt man die gesamte bereinigte Wärmeproduktion durch den gesamten Strombedarf, so errechnet man einen COP, der der Jahresarbeitszahl relativ nahe kommen dürfte i. H. v. 2,73 [EFH-JAZ]. Lediglich die Stillstandsverluste bleiben unberücksichtigt.

Tabelle 20: Kalkulierte Werte für Szenario 6 Variante 3

| Warmwasserbereitung | gesamte Erzeugung ohne Abweichung | Wärmeanteil WWB bis 35°C | Wärmeanteil WWB 35 bis 45°C | Strom für Raumheizung und WWB bis 35°C | Strom für Heizstab (35-45°C) | Gesamtstromverbrauch | resultierender COP (nur EFH) |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|----------------------|------------------------------|
| 182.838,00 | 536.109,30 | 130.598,57 | 52.239,43 | 144.492,53 | 52.239,43 | 196.731,96 | 2,73 |

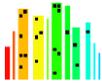
In der Variante der dezentralen Wärmepumpenversorgung wird auf den COP, der für die gesamte Erzeugungsmenge zu einer Heizsolltemperatur von 35 °C angesetzt wurde, der Korrekturfaktor von -38,7 % angewandt um auch die höhere Temperatur für die Warmwasserversorgung bereitstellen zu können. Es ergibt sich also ein COP $3,82 * (1 - 38,7 \%) = 2,34$. Dieser ist um etwa 16 % geringer, als die oben ermittelte EFH-JAZ. Dies wirkt unplausibel, da der zugrundeliegende COP aller Wärmepumpen mit 3,82 deutlich höher war, als der EFH-COP mit 3,35. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei Warmwasserbereitungsanlagen >3 Liter Wasserinhalt zwischen WWB und Zapfstelle (i. d. R. keine EFH) die Warmwassertemperatur von 60 °C gemäß Trinkwasserverordnung gefordert ist und somit der Anteil WWB über 35 °C auf bis zu 50 % steigt, welcher mit einer geringeren Leistungszahl erzeugt werden muss.

Die Betrachtung von COP und Jahresarbeitszahl ist Gegenstand und Fokus anderer Forschungsprojekte und in diesem Rahmen weiter zu betrachten. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass sich eine reale Jahresarbeitszahl für die oben beschriebene Technik zwischen diesen beiden Kennwerten ergibt. Für die aktuelle Variantenrechnung und das Berichtswesen bleibt lediglich festzuhalten, dass zum Vergleich von ökologischen und ökonomischen Kennzahlen von netzgebundenen Wärmeversorgungs-lösungen und dezentralen Wärmepumpenlösungen auf eine Jahresarbeitszahl abzustellen ist.

Tabelle 21: Ermittelte Flächenbedarfe für Szenario 6 Variante 3

| | | | | |
|----------------------|---------------------------|-----|----------|-----------------------|
| WPL 130 AC (75.6 kW) | green house | RH | 3,742575 | 9,07192 |
| WPL 130 AC (75.6 kW) | office and administration | RH | 3,742575 | 9,07192 |
| WPL 130 AC (75.6 kW) | office and administration | RH | 3,742575 | 9,07192 |
| WPL 130 AC (75.6 kW) | office and administration | MFH | 3,742575 | 9,07192 |
| Summe dez. Fläche: | | | | 433,59 m ² |

Über die Planungsvorgaben der Hersteller für die dezentralen Wärmepumpen werden Aufstellflächen für Wärmepumpe und ggf. separatem Außenaufsteller herausgelesen und um die angegebenen Abstands- bzw. Wartungsflächen erweitert. Tabelle 21 zeigt die größte der Wärmepumpen mit dem jeweiligen Flächenansatz innen (kleinere Fläche) und außen. In Summe beträgt die auf dem Grundstück des Kunden benötigte Fläche 433,59 m².



Diese Fläche wird nicht validiert, da die Typenaufteilung der Liegenschaften, wie oben beschrieben aufgrund der eingeschränkten Datenbank noch nicht aussagekräftig ist. Da tendenziell Wärmepumpen zu klein ausgewählt wurden, wird der Flächenbedarf höher sein.

Wirtschaftlichkeit

Variante 1

Ein eklatanter Unterschied besteht in dem Anteil der KWK-Wärme in Höhe von real abgeschätzt 69,5 % und errechneten 51,3 % bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung, welche auf den SimStadt-Simulationsergebnissen aufbaut. Hintergrund ist die hohe Wärmeerzeugungsmenge und bei gleicher BHKW-Leistung sowie -Arbeit der höhere Kesselwärmeanteil. Da aktuelle Rechts- und Fördergrundlagen einen KWK-Anteil in Höhe von 75 % bzw. eine Kombination aus KWK und erneuerbarer Energie fordern, wäre an dieser Stelle eine Anpassung der Dimensionierung in der Simulation nötig.

Dies wirkt sich auch auf den Primärenergiefaktor der Erzeugung aus. Auf Basis des Ist-Lastganges der Erzeugung wäre dieser bei 0,38, auf Basis der Simulation bei 0,66. Bezogen auf die CO₂-Emissionen der Erzeugung ergeben sich 128,53 zu 166,26 g/kWh spezifischer CO₂-Emissionen der Erzeugung und somit in der Simulation um 29,4 % erhöhte Emissionen.

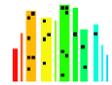
Kostenseitig sind beide Varianten gleichwertig. Die Wärmegestehungskosten sind in der Simulation geringer, da zur Refinanzierung der gleichen Investitionen eine höhere Wärmemenge herangezogen werden kann (110,15 €/MWh). Basierend auf dem Ist-Lastgang der Erzeugung stellt sich ein höherer Preis von 115,21 €/MWh ein. Da dieser Unterschied jedoch auch bei den anderen Technologievarianten zugrunde liegt, würde im Variantenvergleich der Unterschied nicht ins Gewicht fallen. Wohl aber in der ökologischen Bewertung im Vergleich mit monovalenten Vergleichsvarianten, wie Wärmepumpen.

Variante 2

Die Wärmegestehungskosten der Variante Holzkessel und Gaskessel ergeben sich in der Ist-Darstellung der Validierung mit 128,31 €/MWh etwas höher als die Vergleichsvariante BHKW mit Spitzenkessel. Die Kosten für das Wärmenetz (HT-Netz, Wärmeverluste, Pumpstrom) sind identisch zur Variante 1 ermittelt. Der Biomassekessel schlägt mit etwas günstigeren Investitionskosten (10,62 €/MWh), im Vergleich zu dem BHKW (14,91 €/MWh) zu Buche. Dabei wird die Anlagentechnik entsprechend den Afa-Tabellen annuisiert. Dadurch schlägt der Investitionsanteil des BHKW noch höher zu Buche. Durch die gleichzeitige Stromvergütung schafft es das BHKW plausibler Weise unter dem Einfluss eines in Bezug auf den Energieinhalt günstigeren Gaspreises im Vergleich zum Biomassepreis, einen günstigeren Wärmegestehungspreis zu erreichen.

Mit 44,0 % fossilem Anteil erreicht die Technologievariante einen PEF von 0,8 bei einer spezifischen CO₂-Emission in Höhe von 111 g/kWh.

Wiederum zeigt sich die Auswirkung einer absolut eher hoch simulierten Wärmeerzeugung. Die Jahresdauerlinie verschiebt sich parallel nach oben. Die ökologische Abweichung von Simulation und Validierung ist umgekehrt. Die dadurch höheren erreichten Vollbenutzungsstunden des Grundlasterzeugers sind ausschlaggebend für 63,19 g/kWh spezifische CO₂-Emissionen im Vergleich zu 111,83 g/kWh in der



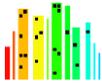
Validierung. Daneben steht ein PEF von 0,59 im Vergleich zu 0,80. Die spezifischen Wärmegestehungskosten werden in der Simulation durch die hohe Wärmemenge mit 13 % zu gering angesetzt (keine Auswirkung auf den Variantenvergleich).

Hinsichtlich der benötigten Fläche für die Wärmeerzeugung wird das Kalkulationstool Anlage 24 mit den Leistungsgrößen befüllt. Es ergeben sich in der ersten Validierung für die Holzvariante 128 m² Heizraumfläche (ohne Kamin), davon 51 m² für den Brennstoffbunker. Das Heizwerk umfasst neben dem Heizraum und dem Brennstoffbunker einen Büroraum, der auch die NSHV und Steuerungsschränke umfasst sowie eine kleine Toilette mit Waschbecken für Betriebspersonal. Die Ist-Fläche des Heizraumes ist brutto mit 162,75 m² inkl. außenliegendem Kaminfundament um 67,8 % größer als über das Tool ermittelt. Das Tool arbeitet proportional auf der Grundlage der Leistung. Gibt man darin die Ist-Leistung der überdimensionierten Erzeuger in Höhe von 2.260 kW ein, so wäre die Heizzentrale nur mit 106,7 m² inkl. Platz für den Pufferspeicher zu berücksichtigen (37 % kleiner als im Ist). Die Brennstoffbunkerung wird im Tool mit 51 m² Flächenbedarf bemessen. In der Realität wurde ein Bunker mit 78,6 m² zzgl. 18,6 m² für die Brennstoffaustragung und Beschickung zum Kessel errichtet. In Summe sind dies 90 % mehr als vom Tool vorgeschlagen. Auch wenn die Größe des Lagerraumes Teil der Betriebsstrategie ist, so wären vor dem Hintergrund der Logistik die Annahmen im Tool zu hinterfragen (Bunkergröße reicht für 5 Tage und 24 h Betrieb Nennleistung). Es ist an dieser Stelle zur Umrechnung in Brennstoffwärme ein Kesselnutzungsgrad (z. B. 88 %) anzusetzen und ein Abschlagsfaktor, da die Bunkergröße in der Regel durch geometrische Grenzen bei der Befüllung (Schuttberg) nicht zu 100 % zu nutzen ist (Vorschlag: 15 % Zuschlag). Da die bestehende Heizzentrale zwar ausreichend groß gebaut, jedoch vor dem Hintergrund eventuell notwendiger Revisionsflächen nicht üppig dimensioniert ist, ist davon auszugehen, dass das Tool für den Einsatz von Festbrennstoffen nachzuschärfen ist. Empfohlen wird der Ansatz 15 Tage Volllastbetrieb. In den Investitionskosten ist das Brennstofflager nicht enthalten (müsste extra über Gebäudezusatzkosten gefasst werden¹⁷).

Dabei unberücksichtigt ist die Fläche, welche Flurförderfahrzeuge bzw. Sattelzüge benötigen, die eine Brennstoffbeschickung durchführen. Im Sinne des Vergleichs mit anderen Technologien wird empfohlen, dies nicht einzurechnen (etwa 300 m²), sondern als Hinweis in der Variantenerstellung dem Anwender mitzuteilen, dass die Brennstoffbeschickung mit Großfahrzeugen an der Grundstücksgrenze separat ermöglicht und vorgesehen werden muss. Dies wird auch in der realen Umsetzung so durchgeführt (bspw. Parken eines Pellet-LKW ähnlich früherer Öltankwagen auf der öffentlichen Straße). Bei Hackschnittbelieferung ist dieser Platz bspw. über Einfahrten o. ä. zu gewähren.

Im Zuge der Szenariorechnungen der Variante dezentrale Wärmepumpe wurde erkannt, dass diese mit dem dezentralen Flächenbedarf einen Nachteil gegenüber der Netzvariante aufweist. Als Basis eines fundierten, vergleichenden Berichtswesens wären jedoch auch für die Netzvarianten die dezentralen Flächen für Fernwärmeübergabestationen inkl. Wartungsbereiche (i. d. R. heute indirekte Übergabestationen mit hydraulischer Trennung) abzubilden. Bei allen Netzvarianten wären diese Flächen etwa gleich, so dass diese beispielhaft einmal dargestellt wird. Dabei wird der Übergabestation Fernwärme die Nennleistung der EFH-WP mit 6 kW gegeben, was über das Berechnungstool der Heizraumgröße einen Flächenbedarf pro EFH von etwa 1 m² ergibt. Auch wenn in der Regel heute diese Station sehr

¹⁷ Ansatz: Baukosten pro m³ umbauten Raums massiver Bauart



eng und sogar in Vorwänden eingebaut werden können, so bleibt mit dem Arbeitsraum davor eine notwendige zugängliche Fläche von $1 * 1$ m plausibel. Bei 56 EFH ergibt dies einen Bedarf von 56 m^2 . Bei den Büros ergeben sich mit $75,6 \text{ kW}$ Anschlussleistung Flächenbedarfe bis zu 4 m^2 .

Das Gewächshaus, welches in Realität mit einer 810 kW Fernwärmestation beheizt wird, würde anhand dieser Betrachtung 12 m^2 Fläche benötigen. In Summe stellt sich eine Fläche von 102 m^2 in den einzelnen 64 belieferten Liegenschaften Gebäuden dar. Die Simulation teilt die Akademie und das Gewächshaus jeweils in mehrere einzelne Gebäude auf. Die Abweichung bestünde darin, dass in den zusätzlichen 9 Gebäuden jeweils Übergabestationen kleinerer Leistung vorgesehen würden, die in Summe am Beispiel Gewächshaus mit $20, 13, 16$ und 198 kW ermittelten Einzelleistungen entsprechend des Heizraumgrößentools wiederum 12 m^2 Flächenbedarf ergeben. Dabei unberücksichtigt ist, dass im Gewächshaus eigentlich eine größere Leistung benötigt wird, als durch die Wärmepumpenbibliothek aktuell abbildbar wäre. Daher würde die simulierte Einzeldarstellung der dezentralen Flächen bei Ansatz der real benötigten Leistungen eine tendenziell zu hohe benötigte Fläche aufweisen. Beispielhaft: 810 kW aufgeteilt auf 4 FW-Stationen mit je $203,3 \text{ kW}$ ergäbe einen Flächenbedarf von $4 * 6 = 24 \text{ m}^2$, was einer 100%igen Überplanung entspricht. Im Zuge des Preprocessing wäre im Sinne der Genauigkeit also je nach Planungsstand sukzessive die Anzahl der Gebäude in der Szenariobetrachtung genauer abzubilden.

Variante 3

Die erstellte Wirtschaftlichkeitsrechnung ist nicht direkt mit den anderen Versorgungsvarianten vergleichbar, da nicht alle Liegenschaften mit den zur Verfügung stehenden Wärmepumpen versorgt werden können. Für einen Anteil des simulierten Wärmeverbrauchs von $1.165,92 \text{ MWh}$ wird in eine Versorgung über vier Wärmepumpentypen mit insgesamt 69 Wärmepumpen vorgesehen, welche in Summe eine Leistung von $591,4 \text{ kW}$ Leistung abdecken. Die größte Einzel- Wärmepumpe besitzt eine Leistung von $32,5 \text{ kW}$ thermisch. Dem entsprechend sind insbesondere die Nichtwohngebäude leistungs- und mengentechnisch nicht ausreichend berücksichtigt.

Die Hauptsensitivität der Wärmegestehungskosten liegt auf den Stromkosten, welche in erster Linie durch die Effizienz (vgl. Jahresarbeitszahl) und den Strompreis dominiert werden. Der Mischpreis von $193,7 \text{ €/MWh}$ liegt deutlich über den Mischpreisen der netzgebundenen Wärmeversorgungsvarianten. Für den Strompreis sind 20 ct/kWh netto inkl.- der Abgaben und Umlagen angenommen. Dieser Preis für dezentrale Wärmepumpen beinhaltet einen um 5 ct/kWh geringeren Ansatz von Netznutzungsentgelten der Haushaltskunden-Stromtarife bei möglicher Abschaltung durch den Verteilnetzbetreiber (Abdeckung durch die Pufferspeichergröße). Dies vorausgesetzt machen die Stromkosten bei einer mittleren Arbeitszahl von $2,34$ einen Vollkostenanteil von $46,2 \%$ aus (Investition $40,9 \%$, Wartung und Instandhaltung $12,8 \%$).

Die Investition tritt demzufolge in den Hintergrund. Dem entsprechend ist der Vergleich von Technologievarianten insofern leicht in Frage gestellt, als innerhalb der technischen Lebensdauer von den Wärmepumpen sich die Strompreise abweichend zu Fernwärmepreisen entwickeln können. Auch hinkt der direkte Vergleich, da ein Wärmenetz und eine zentrale Erzeugung eine technische Lebensdauer von min. 40 Jahren, dezentrale Wärmepumpen von max. 20 Jahren besitzen dürfte.



Um die vertraglich ungebundene Umsetzung abzubilden, wird empfohlen, den Stromverbrauch im bundesdeutschen Strommix anzusetzen (PEF 1,8). Die tatsächliche Umsetzung durch die späteren Gebäudeeigentümer (Ökostrom) ist nicht beeinflussbar.

Es bleibt bei der dezentralen Variante festzuhalten, dass der Primärenergiefaktor als Quotient aus Primärenergieeinsatz und Endenergieübergabe an der Bilanzkreisgrenze Gebäudeeintritt um den nicht vorhandenen Wärmenetzverlust besser abgebildet sein wird. Der resultierende Primärenergiefaktor der Erzeugung (bzw. Anlagenaufwandszahl) basiert demnach rein auf der Wärmepumpe, ggf. einem Elektroheizstab und seiner Regelung. Er erreicht bei den realistisch angenommenen Jahresarbeitszahlen jedoch nur einen Wert von 0,8. Dies ist schlechter (höher), als mit der Variante Nahwärmenetz mit BHKW (unter Anwendung der Stromgutschriftmethode) und Variante Nahwärmenetz mit Holzkessel erreichbar ist. Und dies obwohl der Ansatz der real erwartbaren Wärmenetzverluste in die Berechnung eingeflossen ist.

Die Praxiserfahrung zeigt, dass über die standardisierten Berechnungsprogramme zur Erstellung von sog. EnEV-Gutachten deutlich geringere Anlagenaufwandszahlen für dezentrale Wärmepumpenheizungen errechnet werden.

Folglich wird ein ökologisch korrekter Vergleich nur gelingen, wenn die Wärmepumpen entsprechend des Anwendungsfalls und unter Einbeziehung der bereits veröffentlichten Erfahrungsberichte (niedrige Jahresarbeitszahlen durch hohen Temperaturhub) abgebildet werden. Dagegen steht zukünftig die Verbesserung der Anlagenaufwandszahl/ Primärenergiefaktor, da die Bewertung des deutschen Strommixes als Primärenergieeinsatz über den steigenden Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung verbessert wird.

5.6.3.3. Szenario 7

Da sich das Szenario 7 derzeit in der Planungsphase befindet, können die Zahlen aus der Entwurfsplanung gut mit den Ergebnissen der Simulation verglichen werden. Vergleiche mit der Vorplanung zu Wärmebedarf und -erzeugung liefern eine gute Übereinstimmung.

In den folgenden Tabelle 22 für Variante 2 und Tabelle 23 für Variante 3 können die absoluten Werte für Bedarf und Erzeugung der Komponenten sowie deren Abweichungen zwischen Simulation und Entwurfsplanung entnommen werden.

Tabelle 22: Vergleich Simulation und Entwurfsplanung Szenario 7 Variante 2

| | SimStadt | Planung SWS | Abweichung |
|-------------------------------------|----------|-------------|------------|
| Wärmebedarf (Heizung und TWW) [MWh] | 1.662 | 1.310 | 21 % |
| Spitzenlast [kW] | 659 | 770 | 17 % |
| Erzeugte Wärme BHKW [MWh] | 1.076 | 1.035 | 18 % |
| Erzeugte Wärme Gaskessel [MWh] | 687 | 275 | 52 % |
| Stromerzeugung BHKW [MWh] | 283 | 700 | 18 % |
| Vollbenutzungsstunden BHKW | 6.115 | 5.000 | 18 % |
| Vollbenutzungsstunden Kessel | 1.145 | 458 | 52 % |

Tabelle 23: Vergleich Simulation und Entwurfsplanung Szenario Variante 3

| | SimStadt | Planung SWS | Abweichung |
|-------------------------------------|----------|-------------|------------|
| Wärmebedarf (Heizung und TWW) [MWh] | 1.662 | 1.310 | 21 % |
| Spitzenlast [kW] | 659 | 770 | 17 % |
| Erzeugte Wärme WP [MWh] | 1.076 | 875 | 19 % |
| Erzeugte Wärme Gaskessel [MWh] | 687 | 435 | 37 % |
| Strombedarf WP [MWh] | 283 | 230 | 19 % |
| Vollbenutzungsstunden WP | 6.115 | 5.000 | 18 % |
| Vollbenutzungsstunden Kessel | 1.145 | 725 | 37 % |

5.6.4. AP 6.4: Visualisierung und Kommunikation

Für die Fallstudien wurden mittels WEGA-Variant ein webbasiertes Kartendienst (siehe **Abbildung 76**, vgl. **Kap. 5.4.2**) sowie 3D-Visualisierungen mit Cesium.js (vgl. **Kap. 5.4.6**) erstellt. Diese sind grundsätzlich auch für Präsentationen auf einem Touchlab geeignet. Aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen konnten jedoch die geplanten Workshops mit interessierten Benutzergruppen nicht durchgeführt werden, um die Funktionalität auf einem Touchlab anschaulich zu demonstrieren.

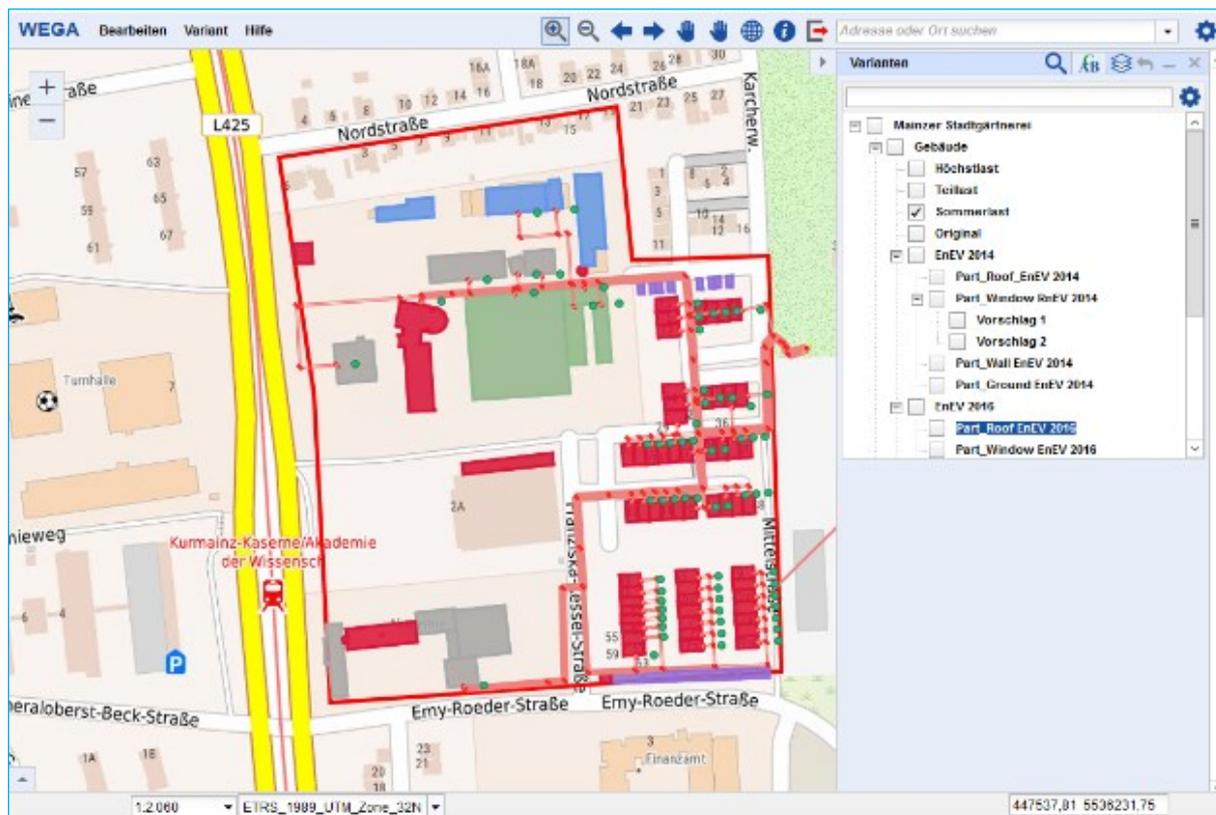
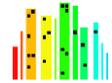


Abbildung 76: Visualisierung einer SimStadt Fallstudie mit WEGA

SimStadt wurde jedoch auf mehreren nationalen und internationalen Tagungen sowie Anwender-Workshops im Rahmen von Video-Konferenzen vorgeführt und diskutiert.



Eine detaillierte Übersicht über diese Aktivitäten ist in **Kapitel 8** dokumentiert.

5.7 AP 7: Gebäudeenergie-Epidemiologie

Im Rahmen des IEA Annex 70 wurde eine Sensitivitätsanalyse der Fallstudie Rüsselsheim durchgeführt. Dabei konnten u. a. die folgenden Parameter und ihr Einfluss auf die Ergebnisse von Wärme- und Kältebedarf untersucht werden:

- Warmwassertemperatur
- Luftwechselrate
- Personenanzahl pro m²
- Setpoint-Temperatur (SHT) Heizen
- Setpoint-Temperatur (SHT) Kühlen
- U-Wert Außenwand
- U-Wert Kellerdecke
- Wärmebrücken des Gebäudes
- Thermische Speichermasse des Gebäudes

Die Parameter mit dem höchsten Einfluss auf die Ergebnisse des Heizwärmebedarfs sind dabei der Setpoint für Heizen (siehe **Abbildung 77**) und die Luftwechselrate sowie der Setpoint für Kühlen mit einem hohen Einfluss auf den Kältebedarf. Bei der in **Abbildung 1** beschriebenen Untersuchung zum Setpoint Heizen ist der Basiswert 20 °C; dieser Wert wird in Schritten von je einem Kelvin nach oben und unten geändert, und die korrespondierenden Ergebnisse des Heizwärmebedarfs verglichen. Eine Veränderung z. B. von 2 K nach oben (von 20 °C zu 22 °C) hat einen Einfluss von + 17 % auf den Heizwärmebedarf.

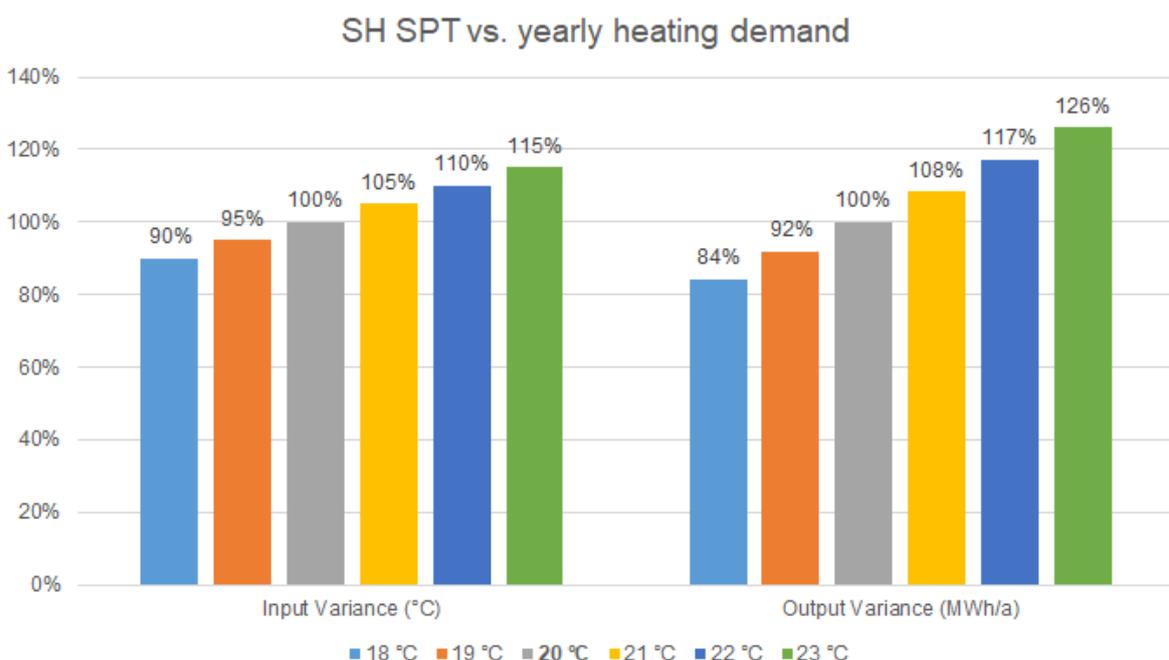
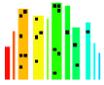
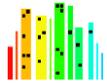


Abbildung 77: Einfluss der Veränderung des Parameters "Setpoint Heizen" auf den Heizwärmebedarf



Eine Bewertung fand anhand des Vergleichs der Unterschiede in mehreren geometrischen Parametern, U-Werten und dem Wärmebedarf statt. Zusätzlich wurde analysiert, ob die Fenstererkennung auf Luftbildtexturen und Oberflächentemperaturen aus der Luft-Infrarot-Thermografie die in den ersten beiden Methoden angenommenen Fenster-Wand-Verhältnisse und U-Werte verbessern kann. Die beiden Wärmebedarfsansätze führten zu unterschiedlichen Ergebnissen für einzelne Gebäude. Mittelungseffekte reduzieren die Unterschiede auf aggregierter Ebene. Die Fernerkundung kann also dazu verwendet werden, einige geometrische Parameter zu verbessern, die für die Modellierung benötigt werden. Jedoch bedarf es noch zusätzlicher Forschung hinsichtlich der Abschätzung von U-Werten.



6. Planung und Ablauf des Vorhabens

Aufgrund eines sehr pragmatischen und ergebnisoffenen sowie in weiten Teilen auch programmatisch-reflektierten und iterativen Vorgehensmusters musste die ursprüngliche Arbeits- und Zeitplanung (finaler Stand siehe **Abbildung 78**) mehrmals reorganisiert und angepasst werden. Um die Ziele des Vorhabens nicht zu gefährden, war zudem eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um insgesamt sechs Monate erforderlich. Die Ursache hierfür lag jedoch vornehmlich in personellen Wechsels aufgrund des kurzfristigen Ausscheidens von Projektmitarbeitern.

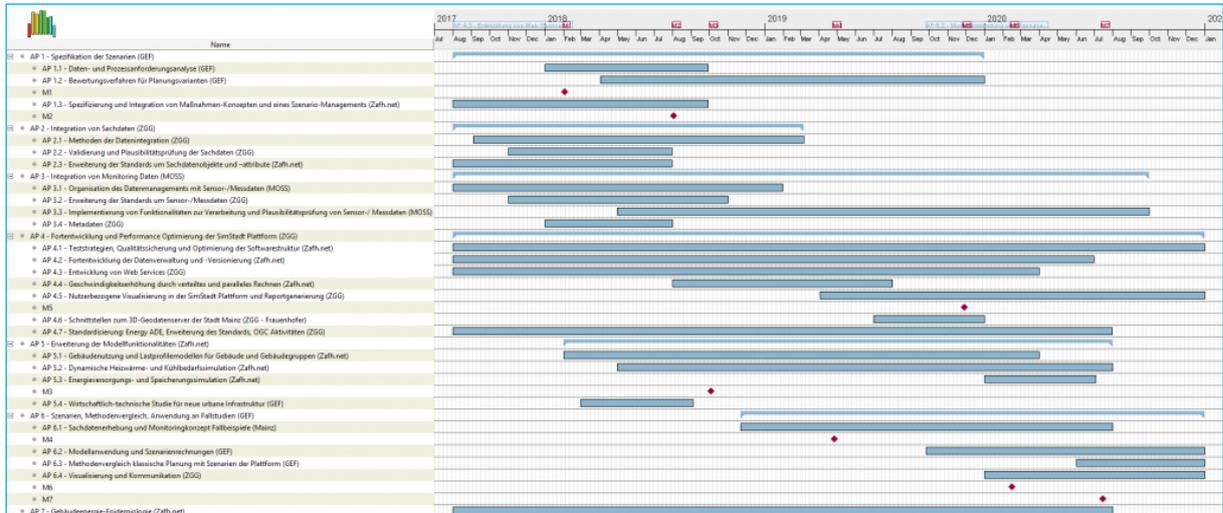


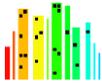
Abbildung 78: Finaler Stand der angepassten Zeit- und Meilensteinplanung

Die ursprüngliche Ressourcen- und Kostenplanung konnte dagegen bei allen Verbundpartnern weitestgehend eingehalten werden.

6.1 Durchführung der Arbeiten

Für die Durchführung der Arbeiten wurde von Beginn an ein kollaborativer Ansatz verfolgt, bei dem alle Verbundpartner in alle Phasen des Vorhabens aktiv eingebunden waren. Die erfolgreiche Zusammenarbeit war durchweg geprägt von einer hohen sachlichen und fachlichen Konstruktivität, gegenseitigem Vertrauen sowie einer starken Partizipations- und Einsatzbereitschaft.

Für die inhaltliche Diskussion und Bearbeitung der Aufgabenstellungen wurden themenspezifisch und je nach erforderlichen Fachkompetenzen interdisziplinäre Gruppen zusammengestellt, die sich zumeist auch aus Vertretern mehrerer Verbundpartner zusammensetzten. So fanden neben regelmäßigen Projekttreffen auf Konsortialebene im sechsmonatigen Rhythmus auch zahlreiche Workshops auf inhaltlich-fachlicher Ebene statt, die sich aufgabenbezogen aus unterschiedlichen Teilnehmern zusammensetzten. Im Regelfall konnten diese Termine virtuell in Form von Webmeetings durchgeführt werden; zur Lösung komplexerer bzw. abstimmungsintensiver Problemstellungen wurden jedoch auch mehrere ein- bis zweitägige Präsenztreffen an abwechselnden Orten ausgetragen. Darüber hinaus zeichnete sich die Kooperation im Verbund durch kontinuierliche multi- oder bilaterale Abstimmungsprozesse bei der operativen Bearbeitung aus.



Für eine gleichfalls effiziente wie effektive Bearbeitung des Vorhabens wurde ein methodischer Ansatz gewählt und in einem strukturierten Vorgehensmodell umgesetzt. Als Grundlage hierfür diente die initiale Spezifikation eines multikriteriellen Lastenhefts (vgl. **Kap. 5.1**, siehe Anlage 1), in dem alle Anforderungen an den Forschungsgegenstand aus Sicht der adressierten Anwender lösungsneutral spezifiziert und priorisiert wurden. Im weiteren Verlauf der Vorhabensbearbeitung konnten auf dieser Basis konkrete Anforderungen an die technische Umsetzung abgeleitet werden. Durch das fokussierte Vorgehen ließ sich letztlich ein hoher Zielerfüllungsgrad mit einer adäquaten Zweckmäßigkeit der Ergebnisse erreichen.

6.2 Zusammenarbeit mit Dritten

Im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens fanden zahlreiche Kollaborationen der Verbundpartner mit anderen Forschungsprojekten bzw. -einrichtungen statt. Dabei wird die Zusammenarbeit nach Zweck kategorisiert:

- **Helper:** Projekte, in denen Tools und Schnittstellen entwickelt wurden, die in SimStadt genutzt werden.
- **Developer:** Projekte, in den weitere Funktionalitäten von SimStadt entwickelt wurden.
- **User:** Anwendung von SimStadt in Fallstudien.

6.2.1. Helper

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Durch einen Senior Developer vom Deutschen Wetterdienst wurden dem Konsortium die Möglichkeiten vorgestellt, lokale Wetter- und Klimadaten direkt über die Server des DWD zu beziehen. Dabei handelt es sich zwar um offene Daten, die über standardisierte Schnittstellen (OGC Web Feature Service) bereitgestellt werden. Angesichts der Vielzahl gelisteter Messstellen in Deutschland sowie zahlreicher verfügbarer Attribute war diese Unterstützung jedoch sehr hilfreich, um schnell und gezielt an die situativ benötigten Daten zu kommen.

Auf Grundlage dieser Wissensbasis konnte schließlich eine eigene Schnittstelle zu DWD-Daten implementiert und in SimStadt integriert werden (vgl. **Kap. 5.3**).

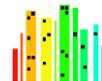
Fraunhofer IGD und Stadt Mainz

Gemeinsam mit dem Fraunhofer IGD wurde eine prototypische Anbindung von SimStadt an den Geodatenserver GeoRocket entwickelt (vgl. **Kap. 5.4.6**).

Diese Entwicklung zeigt auf, wie das 3D-Gebäudemodell der Stadt Mainz über einen Geodatenserver zukünftig bereitgestellt und bspw. von MSW genutzt werden kann.

CityDoctor 2.0

Die im Projekt *CityDoctor 2.0* entwickelten Methoden zur Qualitätsprüfung von 3D-Stadtmodellen wurden im Rahmen der Vorhabensbearbeitung genutzt, um die Eingangsdaten von SimStadt zu validieren und ggf. so aufzubereiten, dass sie in SimStadt nutzbar sind. Dazu wurde auch ein dedizierter CityDoctor-



Prüfplan für SimStadt entwickelt. Die Ergebnisse sind im Wiki „*CityDoctor for SimStadt*“ (CiD4Sim) dokumentiert.

Das Projekt CityDoctor 2.0 wird vom BMBF gefördert (FKZ 13FH179PB6).

6.2.2. Developer

MUSI

Im Projekt *Multi-scale Urban Scenario Interface (MUSI)*¹⁸ wurde ein webbasiertes Softwaresystem entwickelt, das sowohl wirtschaftliche als auch energetische Analysen von Sanierungs- und Energieeffizienzmaßnahmen z. B. bei der Energieberatung erlaubt. Die webbasierte Software nutzt dabei den in SimStadt 2.0 entwickelten Webservice zur Simulation von Wärmebedarfen und Photovoltaik-Potenzialen. Gleichzeitig wurde ein Workflowschritt zur finanziellen Bewertung von Photovoltaik-Potenzialen implementiert, der in SimStadt integriert wurde [22].

Das Projekt MUSI wird vom BMBF gefördert (FKZ 13FH9E02IA).

IN-SOURCE

Im Projekt *Integrated analysis and modeling for the management of sustainable urban FWE ReSOURCES (IN-SOURCE)*¹⁹ wird SimStadt u. a. in einer Fallstudie in New York genutzt, um ein Null-Energie-Quartier in Brooklyn zu planen [23]. Weiterhin wurde ein SimStadt-Workflow zur Berechnung von Biomasse-Potential implementiert. Gemeinsam mit den AIT Wien wird eine Schnittstelle zwischen der am AIT entwickelten Software Urbanica und SimStadt entwickelt.

Das deutsche Teilprojekt in IN-SOURCE wird vom BMBF gefördert (FKZ 01LF1802A).

NeqModPlus

Im Projekt *NeqModPlus* wurde SimStadt für verschiedene Fallstudien genutzt. Ein Workflowschritt zur Nutzung von INSEL-Templates wurde gemeinsam entwickelt. Mit diesem Workflowschritt können beispielsweise verschiedene Energiesysteme mit vordefinierten INSEL Templates simuliert werden, um nicht für jedes Gebäude ein individuelles INSEL-Modell erstellen zu müssen.

Das Projekt NeqModPlus wird vom BMWi gefördert (FKZ 03ET1618B).

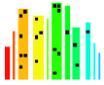
6.2.3. User

EnSysLE

Im Projekt *EnSysLE* wird SimStadt in verschiedenen Fallstudien auf Landkreisebene genutzt. Ziel von EnSysLE ist es, regionale Energiesysteme am Beispiel von drei deutschen Landkreisen sowohl energietechnisch als auch -wirtschaftlich zu untersuchen. Insbesondere werden die Potenziale für Aufdach-PV, Biomasse oder die Strom- und Wärmebedarfe der Gebäude mittels SimStadt entwickelt.

¹⁸ <https://www.hft-stuttgart.de/forschung/projekte/aktuell/icity-musi>

¹⁹ <https://www.hft-stuttgart.de/forschung/projekte/aktuell/in-source>



Die Ergebnisse werden beim Projektpartner Energiewirtschaftliches Institut der Universität zu Köln (ewi) in die Marktsimulationstools *COMODO* und *DIMENSION* eingespeist, um bspw. lokale Energieautarkiepotenziale zu ermitteln.

EnSysLE wird vom BMWi im 6. Rahmenforschungsprogramm Energie gefördert (FKZ 03ET4061B).

Energy and Location Pilot

Im *Energy and Location Pilot des EU Joint Research Centers (JRC)* wird SimStadt in verschiedenen Fallstudien in den Niederlanden, Spanien und Deutschland genutzt. Es wurde eine Building Physics Bibliothek für die Niederlande entwickelt, die quelloffen verfügbar ist.

Bei Energy and Location Pilot handelt es sich um eine nicht-monetäre Kooperation, die vom JRC koordiniert wird.

iCity

Im Teilprojekt 2.3 des vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens *iCity* (FKZ 13FH9I01IA) wird SimStadt für Bedarfs- und Potenzialanalysen aller 39 Kommunen im Landkreis Ludwigsburg eingesetzt.

In Abstimmung mit dem Landkreis Ludwigsburg werden darüber hinaus verschiedene Zukunftsszenarien zur Energieversorgung diskutiert. Nach ihrer Festlegung sollen diese im weiteren Verlauf des Vorhabens ebenfalls mittels SimStadt simuliert werden.

ENsource

Im Verbundvorhaben *ENsource* (FKZ FEIH_ZAFH_562822) leitete die HFT von 2014 bis 2020 ein Konsortium von zehn Forschungseinrichtungen aus Baden-Württemberg. Gegenstand war die Entwicklung städtischer Simulations-, Automatisierungs- und Optimierungswerkzeuge mit den dazugehörigen Geschäftsmodellen. In diesem Zusammenhang wurde auch SimStadt untersucht [24] [25].

Concordia University, Montreal

Zwischen HFT und dem *Canada Excellence Research Chair (CERC)* für *Smart, Sustainable and Resilient Cities and Communities* der Concordia University besteht ein enge Kooperation mit einem stetigen wissenschaftlich-fachlichen Austausch. In diesem Zuge wurde auch SimStadt diskutiert [26] [27].



7. Verwertung

Ziel des Verbundprojekts SimStadt 2.0 war die Weiterentwicklung einer Plattform zur urbanen Energiesystemanalyse, die Entscheidern im Bereich Energietechnik, Stadtplanung, Verwaltung oder Projektentwicklung erlaubt, Stadtquartiere energetisch zu untersuchen. Hierbei war bewusst nicht das Ziel, ein weiteres möglichst exaktes Werkzeug zur Dimensionierung energietechnischer Anlagen und/oder der Wirtschaftlichkeitsberechnung energetischer Sanierungsoptionen eines Quartiers zu entwickeln – vielmehr sollte die Plattform erlauben, mittels standardisierter und gut verfügbarer Datenpunkte in Form von Datenbibliotheken und Geoinformationsdaten hinreichend exakte Ergebnisse zur Dimensionierung und Wirtschaftlichkeit zu liefern, so dass grundsätzliche Entscheidungen zur zukünftigen Wärmeversorgung des Quartiers früher als bisher im Planungsprozess üblich getroffen werden können.

Um dies zu bewerkstelligen, wurden seitens HFT insbesondere die Analysewerkzeuge, Workflows und Bibliotheken in der bestehenden SimStadt-Umgebung erweitert und anhand dreier Fallbeispielquartiere getestet. Im Projekt zeigte sich, dass die entwickelten Werkzeuge in den Quartieren ähnlich gute Ergebnisse im Sinne der Genauigkeit von technischen Dimensionierungs- und Kostenparametern liefern können wie hierauf spezialisierte Ingenieurbüros, denen ein ähnliches Detailniveau an Informationen zur Verfügung gestellt wurde. Damit trägt das Projekt insofern zu den Zielen des 6. Energieforschungsprogramms bei, als dass energetische Quartiersplanungsprozesse effizienter und günstiger erfolgen können. Zudem ermöglichen die Werkzeuge, früh im Prozess alle relevanten Energietechnologien „fair“ gegenüberzustellen und damit zu vermeiden, dass Ansätze aus nichtobjektiven Gründen im weiteren Planungsprozess keine Berücksichtigung finden. Die Energiewende im Quartier kann somit Bürgern in Partizipationsprozessen früher und plastischer nähergebracht werden als heute oft möglich.

Mit Blick auf die Dimension minimaler Betriebsemissionen oder -kosten steht damit nun eine umfassende Toollandschaft zur Verfügung, die zudem über Projektpartner gut mit bestehenden Geodatenbanken und Tools verknüpft ist (MOSS und GEF) und andererseits eine umfassende Validierung erfahren hat (MSW und SWS).

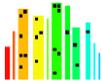
Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit allen anderen Projektpartnern bearbeitet. Eine umfassende Aufarbeitung aller Bearbeitungsschritte und Ergebnisse des Gesamtvorhabens erfolgt im gemeinsam erstellten Abschlussbericht.

7.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

7.1.1. HFT

Als öffentliche Hochschule verfolgte und verfolgt die HFT Stuttgart keine originären wirtschaftlichen Interessen mit dem Projekt. Die im Projekt entwickelte Software SimStadt wird als Desktop App und als Software-Bibliothek kostenfrei bereitgestellt.

Nichtsdestotrotz hat die entwickelte Plattform durch das Projekt einen Stand erreicht, dass eruiert werden kann/konnte, ob Vermarktungspotenziale z.B. über Beratungsprojekten für Stadtwerke, Stadtplaner, Kommunen oder Immobilienentwickler bestehen. Über Schulungen erfolgt auch nach Projektende ein Wissenstransfer, um die Nutzung der Software SimStadt in der Praxis zu etablieren.



Getestet wurde ein Vermarktungsansatz mit der *ECO2NOMY GmbH* in Stuttgart. Es handelt sich um ein StartUp, welches Besitzern von Immobilienensembles bei der Erstellung von Sanierungsfahrplänen unterstützt. Hier zeigte sich, wie oben angedeutet, dass eine Errechnung der Gebäudebedarfe und eine Dimensionierung energietechnischer Anlagen mit in diesem Falle meist vorliegenden Verbrauchskennwerten genauer und einfacher als eine bedarfsseitige Analyse; weiterhin zeigte sich jedoch auch, dass der verfolgte Beratungsansatz in der kommunalen Wärmeleitplanung, in welcher Verbrauchswerte meist nicht vorliegen, durchaus erfolgreich sein kann.

7.1.2. MOSS

Der Fokus der wirtschaftlichen Verwertung der Projektergebnisse durch die Firma M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH liegt in der Nutzung des durch das Projekt gewonnenen Know-Hows sowie der Operationalisierung der aus dem Vorhaben und von M.O.S.S. erzeugten resultierenden technischen Ergebnisse.

Auf Basis der Ergebnisse des Vorhabens erfolgt die Umsetzung der Projektergebnisse in den oben beschriebenen Softwarekomponenten. Geplant ist die Realisierung / Weiterentwicklung eines Softwaremoduls zur Variantenverwaltung, das die webbasierte Verwaltung und Anreicherung von Varianten und hieraus realisierter Szenarien ermöglicht. Dies erfolgt zunächst prototypisch, um die Machbarkeit und Nutzbarkeit darzustellen und als Unterstützung der unten genannten möglichen Consultingleistungen.

Der perspektivischen Verwertung liegt dabei voraussichtlich ein klassisches Softwarelizenz- und Wartungsmodell, gegebenenfalls im jeweiligen Kontext und im Zusammenspiel mit Beratungen und Dienstleistungen, auf Basis des im Projekt gewonnenen Know-Hows.

Den Projektpartnern werden die aus dem Projekt resultierenden Softwarebausteine auf Wunsch weiterhin für die Nutzung zur Verfügung stehen.

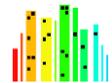
Auch in weiteren Bereichen ist von einer potentiellen Verwertbarkeit der Projektergebnisse auszugehen. In diesem Zusammenhang ist es vorgesehen qualifizierte Consultingleistungen zum Datenmanagement und fachspezifischer Datenaufbereitung auf Basis vorhandener Basisdaten anzubieten. Die Übertragbarkeit der Konzepte und Verfahren auf die Fragestellungen in anderen Anwendungssegmenten steht daher im Mittelpunkt. Auf dieser Basis können Dienstleistungen angeboten und effektiv umgesetzt werden. Diese Dienstleistungen können sich von der reinen Dienstleistung zur fachspezifischen Aufbereitung von Daten für spezifische Fragestellungen bis hin zum Aufbau eigener Varianten und Szenario Verwaltungen erstrecken.

Ein Zeithorizont für das sich einstellen von messbaren wirtschaftlichen Erfolgen in diesem Bereich kann nicht benannt werden.

7.1.3. GEF

Kurzfristig (bis 2 Jahre nach Projektabschluss):

Ein wichtiges Geschäftsfeld der GEF Ingenieur AG besteht in der strategischen Beratung von Energieversorgungsunternehmen und kommunalen Gebietskörperschaften. Gegenstand dieser Aufträge sind



die Durchführung von Analysen oder die Erstellung von Machbarkeitsstudien und Entwicklungskonzepten. Relevante Erkenntnisse aus dem Vorhaben – v. a. im methodischen Bereich – wurden bzw. werden unmittelbar in diese Tätigkeiten eingebracht. Das Vorhaben konnte ferner dazu genutzt werden, die eigenen Kompetenzen im Kontext energetischer Simulation zu verdichten bzw. auszuweiten und in das Dienstleistungsportfolio einzubringen.

Mittelfristig (2 bis 5 Jahre nach Projektabschluss):

Für Studien zu Wärmeversorgungskonzepten gehören modellhafte Betrachtungen mit differenziertem Raumbezug zum Standardrepertoire der GEF. Hierbei gestaltet sich jedoch gerade die Datenakquise in der Regel sehr aufwendig und Lösungsanforderungen bleiben aufgrund der zeitlich bedingten Multivarianz in der Regel unscharf bzw. sind aufgrund einer unzureichenden Informationsgrundlage nicht hinreichend konkretisierbar. Bei der Weiterentwicklung der SimStadt-Software zu einem praktisch einsetzbaren Werkzeug besteht daher ein großes Potential v. a. darin, sowohl die Effizienz als auch der Effektivität dieser Dienstleistungen nachhaltig zu optimieren. Durch das modular erweiterbare Konzept der SimStadt-Plattform ergeben sich darüber hinaus zahlreiche weitere Anknüpfungspunkte im Dienstleistungsspektrum der GEF.

Langfristig (ab 5 Jahre nach Projektabschluss):

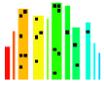
Vorbehaltlich einer auf technische Integration und praktische Usability bezogenen Weiterentwicklung sowie der obligatorischen Validierung bietet sich aus Sicht der GEF auch eine realistische Möglichkeit, die prototypische SimStadt-Software (in vollem Umfang oder partiell) kommerziell zu vermarkten. Hieraus könnten sich langfristig auch neue Methoden zur Modellierung alternierender Versorgungsvarianten in frühen Planungsphasen ableiten und etablieren lassen. Ferner bietet die modulare Architektur der Software mit ihren zahlreichen, sowohl internen als auch externen Schnittstellen die Option, neu zu entwickelnde oder bestehende eigene Softwareprodukte technisch an- bzw. einzubinden. Auf diese Weise ließen sich auch an spezifische eigene Anforderungen angepasste Workflows in SimStadt integrieren und für kommerzielle Zwecke einsetzen.

7.1.4. SWS

Kurzfristig können die Ergebnisse aus SimStadt für Plausibilisierungszwecke des Energiekonzepts genutzt werden. Zudem nützt der Know-How-Austausch im Projekt sinnvolle Versorgungskonzepte anzugehen. Mittel- und langfristig fordert eine nachhaltige Versorgung im urbanen Quartier kreative Lösungsmöglichkeiten, die einen dynamischen Energiekonzeptvergleich benötigen, um möglichst früh in den städtebaulichen Überlegungen mitsprechen zu können. Hierbei könnte die SimStadt-Software, unter Vorbehalt der weiteren Automatisierung, bei der Energiekonzepterstellung unterstützen und verschiedene Varianten oder Szenarien einheitlich und übersichtlich darzustellen. Das würde in der Entscheidungsfindung sehr unterstützen und zudem ggf. manuelle Arbeiten bei der Energiekonzepterstellung einsparen.

7.1.5. MSW

Aufgabe der Energieversorgungsunternehmen in den kommenden Jahren wird es sein, die Bestandsnetze entsprechend den sich ändernden Rahmenbedingungen rund um die Energiewende anzupassen.



Fragestellungen, wie die vorzugsweise auszugestaltenden Erdgas-, Strom und Fernwärmenetze stellen sich. Kommunen benötigen eine einfache Plattform, um Energiekonzepte von Erschließungsträgern zu plausibilisieren. Diese wiederum tun sich schwer damit, diese zu erstellen, da versierte Ingenieurbüros nicht in ausreichender Zahl zur Verfügung stehen bzw. Architekten und Ingenieurbüros zusammenarbeiten müssten. An erster Stelle haben die Mainzer Stadtwerke mit ihrem Tochtergesellschaften im Zuge der Bearbeitung des Forschungsvorhabens Know-How angleichen und ergänzen können.

Vorteil der frühen Betrachtungen in Szenarien und Variantenbetrachtungen könnte sein, zeitlich früher mit ökologisch effizienten, aber komplexen und ökonomisch sinnvollen Konzepten gegen vermeintlich einfachere Lösungen anzukommen. Insbesondere eine frühe Austauschbasis im Zuge der Beteiligung als Träger öffentlicher Belange wäre denkbar, um notwendige Straßenbreiten einzugeben, die bislang nicht begründbar waren. Man kann sich vorstellen, dass man sich mit den Vorinformationen günstig am Markt positionieren zu können.

Auch wäre es zumindest denkbar, sich gegenüber Erschließungsträgern mit der Szenario-Variantenbetrachtung als Dienstleister aufzustellen. Die Nutzung der Logiken setzt technisches Verständnis und energiewirtschaftliche Kenntnisse voraus, die ein Stadtwerk mitbringen. Diese Möglichkeit wäre jedoch kartellrechtlich (Wärme) oder entflechtungstechnisch (liberalisierte Netzbetreiber) zu prüfen.

7.2 Wissenschaftliche und technische Verwertung

7.2.1. HFT

Die im Projekt erarbeitete Plattform und die damit in Zusammenhang stehenden Datenverarbeitungswerkzeuge erlauben, das Aufgaben- und Projektspektrum z.B. in Anschlussprojekten zu erweitern. Es wurden und werden derzeit an der HFT Werkzeuge zur Erfassung von Gebäudestrom- und -wasserbedarfen auf Basis von 3D-Gebäudedaten entwickelt, was eine noch umfassende Analyse der Bedarfsseite von Stadtquartieren ermöglicht; parallel wird in zwei Projekten (EnSys-LE, 6. Rahmenforschungsprogramm Energie, FKZ 03ET4061B und INSOURCE, BMBF/Belmont-Forum, FKZ 01LF1802A) eine ebenso auf Geoinformationsdaten beruhende, „Bottom-up“-Analyse von lokalen Potenzialen erneuerbarer Energien entwickelt, was mittelfristig die umfassende Analyse von lokalen Energiesystemen ermöglicht. Damit können z.B. Unterschiede in der Energieautarkie bestimmter Regionen untersucht und deren Auswirkungen auf lokale und nationale Energiesysteme diskutiert werden.

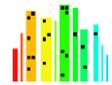
7.2.2. MOSS

Wesentliche Ergebnisse des Projektes können einer wirtschaftlichen Verwertung zugeführt werden. Darüber hinaus fließen die Ergebnisse in die Bearbeitung möglicher zukünftiger Projekte bei MOSS ein.

7.2.3. GEF

Kurzfristig (bis 2 Jahre nach Projektabschluss):

Aus praktischer Sicht stellen die vorliegenden Ergebnisse gegenüber bisherigen Methoden in frühen Planungsphasen bereits einen wesentlichen Mehrwert dar. Die SimStadt-Plattform ermöglicht es, die



verschiedenen Bearbeitungs- und Analyseprozesse im Zuge strategischer Konzeptstudien auf einer Plattform zusammenzuführen. Einen erheblichen Fortschritt gegenüber etablierten Analyse- und Konzeptfindungsmethoden sieht GEF in der Funktionalität, verschiedene Datenquellen unterschiedlicher Qualität zu integrieren und zu verschneiden.

Gemeinsam mit vereinheitlichten Modellansätzen, die in den Workflows anwendungs- und bedarfsgerecht zusammengeführt werden, verspricht dies sowohl nachvollziehbare als auch belastbare und damit praktisch nutzbare Erkenntnisse für den adressierten Anwenderkreis. Der direkte Zugang zu vereinheitlichten Datensätzen mit funktions- und kontextbezogenen Parametrierungen erlaubt es auf sehr einfache, schnelle und effiziente Art, Analyse- und Bewertungsprozesse anzustoßen und in einer gesicherten Qualität durchzuführen.

Mittelfristig (bis 2 bis 5 Jahre nach Projektabschluss):

Das Vorhaben führt einen bereits in weiteren Vorhaben sehr erfolgreichen Ansatz der GEF fort. So wurden in der Vergangenheit schon einige Planungsinstrumente in praxisnahen Vorhaben entwickelt und fortgeführt (bspw. *sisKMR*²⁰, *POLIS*²¹ oder *sisHYD*²²). Dadurch gelang es, Erkenntnisse aus FuE-Projekten gezielt, relativ zeitnah und sehr umfassend in die Planungs- und Beratungspraxis zu überführen. Aus technischer Sicht sind diese Instrumente somit Werkzeuge aus der Praxis für die Praxis. Dieses Prinzip befördert gleichermaßen zielgerichtete Entwicklungen mit hoher Praxisrelevanz als auch späterer Praxisakzeptanz.

Langfristig (ab 5 Jahre nach Projektabschluss):

Mit den entsprechenden technischen Vorkenntnissen sowie einer adäquaten Datengrundlage zur lokalen Ausgangssituation kann SimStadt bereits sehr effektiv und sinnvoll in der Praxis eingesetzt werden. Für einen breiten Praxistransfer ist die Software zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch noch zu prototypisch und hinsichtlich ihres Anwendungsspektrums lückenhaft.

Vorbehaltlich ergänzender Entwicklungsschritte – vor allem in den Bereichen Workflow-Integration und Benutzerfreundlichkeit – sowie einer erfolgreichen Praxisevaluierung bleibt es das mittel- bis langfristige Ziel, SimStadt fest als Standardwerkzeug für frühe Analyse- und Planungsphasen in der Praxis zu etablieren. Durch ihre modulare Architektur und zahlreiche Schnittstellen ist die Software ferner dazu geeignet, sukzessive auf neue Anwendungskontexte erweitert zu werden oder bestehende im Detaillierungs- bzw. Durchdringungsgrad zu vertiefen.

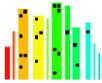
7.2.4. SWS

Kurzfristig kann die wissenschaftliche Verwertung durch die Erstellung einer Bachelorarbeit weiter gesichert werden. Die technische Verwertung erfolgt kurzfristig durch das Einbeziehen von 3D-Daten auch in anderen Quartiersvorhaben in Stuttgart und dem ggf. Einsatz von SimStadt-Erkenntnissen. Die SimStadt-Software bietet als Prototyp für die Stadtwerke Stuttgart einen guten Einblick und ggf. Einstieg in die dynamische Simulationsmöglichkeiten mit 3D-Daten. Mittelfristig könnten weitere Bachelor- und

²⁰ <https://sisKMR.com>

²¹ <https://www.gef.de/leistungen.html>

²² <https://www.bentley.com/en/products/brands/openutilities>



Masterarbeiten die Ergebnisse und Methodiken weiterverwenden und ein fortlaufender Wissenstransfer angeregt werden.

Zudem ist es denkbar, dass in vielen Spannungsfeldern der Flächenkonkurrenz, wie zum Beispiel bei der Nutzung der Dächer mit PV oder Solarthermie durch das dynamische Simulieren nachvollziehbare, mit Berechnungen hinterlegte Argumente geliefert werden können. Mittel- und langfristig könnten detaillierte, dynamische Simulationen wie die der SimStadt-Software vor allem auch zur Erreichung der Klimaschutzziele in Quartieren darzustellen sein.

7.2.5. MSW

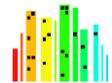
Die Mainzer Stadtwerke AG beheimatet mehrere Gesellschaften, welche sich mit Quartiersversorgungen befassen. Zwei davon sind die Mainzer Wärme GmbH sowie die Überlandwerke Groß Gerau (ÜWG). Die Mainzer Wärme GmbH projiziert vornehmlich in der Landeshauptstadt Mainz. ÜWG projiziert vornehmlich im Landkreis Groß Gerau. Beide Gesellschaften erhalten regelmäßig Anfragen von Erschließungsträgern oder den kommunalen Aufgabenträgern zur Erschließung von Wärmequartieren. Gemein sind diesen Vorplanungen, dass mit relativ wenig Informationen technisch komplexe Betrachtungen erstellt werden sollen, welche vergleichend Versorgungsvarianten gegeneinander aufzeigen. Die wichtigste Information ist eine nachvollziehbare benötigte Wärmeleistung und Wärmemenge für die zu versorgenden Gebäude. Oftmals verändern sich im Laufe der Betrachtungen Rahmenbedingungen, wie Anzahl und Lage der Gebäude, Baustandard etc. Zudem ergeben sich die Fragen nach einer Wärmeversorgung in der Regel erst relativ spät, wen bestimmende Faktoren, wie die Straßenbreite bereits durch ein bauleitplanerisches Verfahren festgelegt sind. Das heißt, ohne genaue Gebäudedaten müssten bereits gewisse Annahmen zum Wärmeverbrauch und benötigten Leitungstrassen bestehen.

Bewertungskriterien:

Um die Versorgungsvarianten der Quartiers-Szenarios miteinander zu vergleichen, wurden allgemeingültige Kriterien gefasst und deren Ermittlung ermittelt. Diese müssen in der Lage sein, dezentrale und zentrale Versorgungslösungen abzubilden und aktuelle Fragestellungen, wie der ökologische Fußabdruck einer Versorgungsvariante und ein sich einstellender Primärenergiefaktor/Anlagenaufwandszahl. Die Varianten lassen sich darüber hinaus über wenige aussagefähige Kennzahlen, wie Flächenbedarf und Gestehungskosten abbilden.

Mehrwert:

Für ein statisches Quartiersprojekt konnte auch vor SimStadt 2.0 bereits eine statische Betrachtung erstellt und eine Planung durchgeführt werden. Meist hat man dafür eine technische Vorzugsvariante im Sinn. Probleme stellen sich ein, wenn Alternativen gleichartig betrachtet werden sollen oder sich die grundlegenden Rahmenbedingungen ändern. Nachhaltige Versorgungslösungen zeichnen sich in der Regel durch individuelle technische Lösungen mit relativ hohen Investitionskosten aus. Da die Betrachtungen sich mit ändernden Rahmenbedingungen in ihren technischen, dem Platzbedarf, aber auch wirtschaftlichen Parametern ändern, ist eine integrierte Multivariantenbetrachtung notwendig. Der Aufbau auf dem 3D-GIS mit der Möglichkeit, gebäudespezifische Parameter zu speichern und anzupassen, bildet hierfür eine Grundlage. Die verfügbaren ALKIS-Daten ermöglichen das Einbinden öffentlicher Daten



zur Abbildung des Bestands in eine Lückenschluss-Bebauung oder ein Neubau-Quartier. Gerade mit Hinblick auf die Wärmewende im Bestand kann eine derartige Logik erstmals zusammenhängend und automatisiert einfache Variantenbetrachtungen für zusammenhängende oder bislang nicht zusammenhängende Quartiere erstellen. Bestandsdaten, wie 2D-Trassenpläne von Bestandsnetzen oder Vermessungsdaten der kommunalen Aufgabenträger und der Stadtwerke lassen sich einbinden. Es ließe sich sogar eine Basis schaffen, mit der Erschließungsträger, Stadtplanung und Stadtwerke gemeinsam Varianten bewerten.

Vorgehen:

Im Rahmen des Forschungsprojekts SimStadt 2.0 wurde der grundlegende Prozess der einzelnen Teilschritte von Festlegen des Gebäudeumfangs über die Wärmebedarfsberechnung, eine Netzsimulation, der Betrachtung möglicher Technologievarianten bis hin zur vergleichenden Berichtserstellung erarbeitet. Bereiche, welche bislang noch nicht gut abgeschätzt werden konnten, wie der Flächenbedarf für zentrale Erzeugung und Wärmetauscher beim Kunden bzw. Wärmepumpen bei dezentralen Versorgungslösungen wurden erarbeitet, wo nicht aus Erfahrungswerten verlässliche Daten zur Verfügung standen. Die Erstellung repräsentativer Szenarien, die Festlegung der Bewertungskriterien sowie die Erstellung des Durchlauf-Prozesses nahm 18 Monate des Forschungsprojekts in Anspruch. Anschließend konnten für die drei Szenarien 1. abgeschlossenes Bestandsquartier in Mainz (Mischnutzung, Szenario 6), 2. Bestandsquartier mit reiner Wohnnutzung in Rüsselsheim (Szenario 3) und 3. Bestandsquartier mit zu betrachtender Erweiterung in Stuttgart (Mischnutzung, Szenario 7 durch Stadtwerke Stuttgart) Szenariorechnungen durchgeführt werden. In 12 Monaten wurden jeweils passende Versorgungsvarianten mit Fernwärmeversorgung unter zentraler Erzeugung (je min. KWK-Lösung sowie Holzkessel oder Wärmepumpe), Niedertemperatur- Wärmenetz und dezentraler Wärmepumpenlösung berechnet. In den letzten 6 Monaten erfolgten Validierungsschritte entweder über die parallele Modellrechnung aus herkömmlichen Planungsansätzen oder im Fall 1. Aus Istdaten der Versorgung. Damit konnten die Annahmen verifiziert werden, Parameter geschärft und die sensitiven Betrachtungen herausgearbeitet werden. Mit ein Haupteffekt der interdisziplinären Bearbeitung aus Forschung, Praxispartnern (Stadtwerke aber auch Ingenieurbüro, Abgleich mit der Stadt Mainz) und MOSS als IT-Partner war die gegenseitige Darlegung der Betrachtungsweise und die Vertrauen schaffende Validierung auf Seiten der Stadtwerke für eine am Reißbrett erstellte vergleichende Vorplanung. Darüber hinaus lassen sich perspektivisch zusätzlich, bislang weniger im Fokus stehende Potenziale einbinden, wie solare Einstrahlungsgewinne bzw. PV-Potenzial, je nach Dachausrichtung.

7.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

7.3.1. HFT

Im Projekt SimStadt 2.0 ist ein Software-Prototyp entstanden, mit dem städtische Quartiersplanungsprozesse insbesondere im Bereich Wärmeversorgung unterstützt werden.

Im Nachgang des Projekts wurde mit dem Projekt „*IWAES – Integrative Betrachtung einer nachhaltigen Wärmebewirtschaftung von Stadtquartieren*“ (BMBF: Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft (RES:Z), FKZ 033W106A-G) bereits eine erste Fallstudie mit der Software SimStadt simuliert.

Weiterhin wurden mit potenziellen Nutzergruppen wie Energieagenturen und Stadtentwicklungsgesellschaften Gespräche geführt, wie SimStadt zur Unterstützung bei der Erstellung bzw. beim Qualitätsmanagement kommunaler Wärmepläne und bei der Durchführung von Maßnahmen in KfW 432 Quartieren genutzt werden kann.

Hier wurde aufgrund der umfänglichen Funktionalität der Software SimStadt ein hohes Potenzial identifiziert. Allerdings werden insbesondere hinsichtlich Reporting die Vorgaben bei der Erstellung kommunaler Wärmepläne in SimStadt bisher noch nicht abgebildet, auch muss eine weitere Anpassung an die Prozesse dieser Nutzergruppen erfolgen. Insgesamt wird aber ein großes Potenzial gesehen, mit Unterstützung der Software SimStadt die kommunale Wärmeplanung und energetische Sanierung von KfW-423-Quartieren effizienter zu gestalten und damit schneller umzusetzen.

7.3.2. MOSS

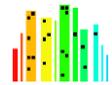
Im Hinblick auf die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit liegt der Hauptfokus seitens MOSS, analog der wirtschaftlichen Verwertung, auf dem Bereich Datenintegration und den daraus ableitbaren Ergebnissen. Im Projekt bzw. der zeitgleichen Entwicklung im Projektumfeld wurden auch neue Fragen aufgeworfen, die auf Basis der Ergebnisse des Vorhabens in Anschlussaktivitäten untersucht werden sollten. Insbesondere zu nennen ist die Integration von Daten aus verschiedenen Quellen und die KI basierte Beurteilung und gegebenenfalls Verbesserung der Qualität dieser Daten für fachliche Fragestellungen (automatische Ableitung von Trainingsdaten für KI Umgebung und hierauf aufbauende Qualitäts-/Änderungshinweisermittlungen).

7.3.3. GEF

Die vorliegenden Ergebnisse des Vorhabens bieten die Chance, sowohl das eigenen Aufgaben- und Projektspektrum zu erweitern als auch fortführende FuE-Projekte anzustoßen. Die Relevanz von SimStadt manifestiert sich deutlich vor dem Hintergrund eines stetig wachsenden Handlungsdrucks auf die Stadtentwicklung infolge struktureller Sanierungen und Konversionen sowie z. T. drastischer demographischer Veränderungen.

Die längerfristig angelegte Fortentwicklung und sukzessive Erweiterung der Software-Plattform zu einem praktisch einsetzbaren Softwaretool böte den Verbundpartnern grundsätzlich auch die Chance einer gemeinsamen Vermarktung. Auf dem Markt für Planungswerkzeuge fehlen bislang vergleichbare Ansätze, die sich über zahlreiche Schnittstellen funktional erweitern lassen und sowohl über flächendeckende Basisdaten verfügen als auch fallbezogen mit spezifischen Daten – bspw. Sensor- und Messdaten – erweitert und vertieft werden können. Die modulare Softwarearchitektur mit ihren offenen Schnittstellen bietet ferner zahlreiche Möglichkeiten, das Anwendungsspektrum von SimStadt im Zuge von Anschlussvorhaben zu erweitern oder kontextbezogen zu vertiefen.

Zudem bestehen viele mögliche Anknüpfungspunkte mit weiteren Forschungsvorhaben. So konnte die SimStadt-Software bereits im Zuge der Bearbeitung des Vorhabens erfolgreich in parallel laufenden FuE-Projekten eingesetzt werden (vgl. Kap. 6.2). Durch die Zielsetzungen im 6. und 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, bspw. im Bereich der Digitalisierung, sowie die Ausrichtungsschwerpunkte der Vorhaben in der BMWi Förderinitiative *ENERGIEWENDEBAUEN*, sind hier auch zukünftig vielfältige



Einsatz-, Verwendungs- und Entwicklungsmöglichkeiten für SimStadt gegeben. Dies gilt natürlich insbesondere für Vorhaben, an denen GEF oder andere Verbundpartner des Vorhabens aktiv beteiligt oder assoziativ involviert sind.

7.3.4. SWS

Kurzfristige können die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse dazu anregen bei neuen CO₂-reduzierte Energiekonzepten für Quartiere dynamische Simulationen durchzuführen. Durch die volatilen erneuerbaren Energieerzeuger ist eine detaillierte Energiekonzepterstellung für Energieversorger sinnvoll.

Perspektivisch kann der Prototyp mittel- bis langfristig mit noch mehr Varianten durch Praxispartner aus dem Energieversorgerumfeld oder Fachingenieurbüroumfeld ausgestattet werden. Auch den Einbezug der Sektorkopplung mit der dynamischen Simulation von Verbrauchsprofilen wie auch der Integration von Elektromobilitäts- und Stromspeicherprofilen und Erzeugungsprofilen von z. B. KWK- oder PV-Anlagen von ist bestimmt ein sinnvoller Ansatz. Zudem bietet das Thema Auslegung von großen thermischen Speichern für die Energieversorgern auch einen sehr interessanten Ansatz für weitere dynamische Variantenbetrachtungen.

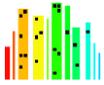
Eine Verwertung in weiteren Forschungs- und Entwicklungsprojekten dazu ist denkbar.

7.3.5. MSW

Die Mainzer Stadtwerke AG wird die integrierten Betrachtungen von Versorgungsszenarien im Zuge der Optimierung der Netze und Ergänzung der (Insel-) Quartiersvorhaben verwenden. Dies stellt einen Teil der Dekarbonisierungsbetrachtungen dar, welche in den kommenden Jahren verstärkt angegangen werden müssen. Auch wird die voranschreitende Betrachtung von Simulationen auf Basis großer Messdaten und künstlicher Intelligenz Einzug halten. Die Verbindung von Datentöpfen zwischen öffentlichen Aufgabenträgern, Stadtwerken und privaten Erschließungsträgern ist ein spannendes Betätigungsfeld für wissenschaftliche Ansätze, nicht zuletzt in Richtung open data und notwendiger Datenschutzbelange.

Die Zusammenarbeit der Stadt Mainz mit den Stadtwerken wird sinngemäß im Zuge des Projekts Mainz digital vorangetrieben. Es wird untersucht, die Simstadt-Ideen in einem zweiten Betrachtungsschritt als Anwendungsbereich gemeinsamer Datengrundlagen oder Schnittstellen einzubinden. Denkbar sind Simulationen, welche stadtplanerisch Einfluss besitzen, wie die Kombination aus Bewertung von Einflüssen auf Kaltlufteinbringung in Neubaugebieten oder andere Einflüsse.

Technisch werden sich neue Erzeugungsarten entwickeln, wie vermehrte Sektorkopplung, Nutzung von Abwärmepotenzialen, Ein- und Ausspeisen von Strom in starken PV-Zeiten oder Nutzung in der Elektromobilität. Die Verbindung der Variantentechnologie in technologischen Betrachtungen, die Zielnetzplanungen Gas, Strom und Fernwärme zum Inhalt haben, ist denkbar. Insbesondere dort sind Verbrauchs- und Potenzialstudien über die bisher meist getrennt betrachteten Sektoren Strom und Wärme notwendig.



8. Dissemination

8.1 Publikationen

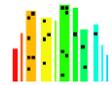
Im Rahmen des Vorhabens erfolgten zur wissenschaftlichen Dissemination und praktischen Verbreitung folgende Veröffentlichungen:

1. „Renewable Energy Generation Scenarios Using 3D Urban Modeling Tools — Methodology for Heat Pump and Co-Generation Systems with Case Study Application“ [19]
2. „A Method for Assessing Regional Bioenergy Potentials Based on GIS Data and a Dynamic Yield Simulation Model“ [23]
3. „On the design of an urban data and modeling platform and its application to urban district analyses“, [27]
4. „A Concept of Quality Management of 3D City Models Supporting Application-Specific Requirements“ [28]
5. „Concepts and Evaluation of Heating Demand Prediction Based in 3D City Models and the CityGML Energy ADE - Case Study Helsinki“ [12]
6. „Urban models enrichment for energy applications: Challenges in energy simulation using different data sources for building age information“ [24]
7. „Calculating urban heat demands: An analysis of two modelling approaches and remote sensing for input data and validation“ [21]
8. „Automatisierte Modellierung von Quartierswärmebedarfen auf Basis von 3D-Gebäudemodellen“ [29]
9. „Automatic Dimensioning of Energy Generation Components and System Simulation“ [20]

8.2 Vorträge

Folgende Vorträge auf Konferenzen, Kongressen und Symposien oder im Rahmen von Workshops wurden über bzw. im Rahmen von SimStadt 2.0 gehalten oder verweisen explizit auf Inhalte und Ergebnisse des Vorhabens:

1. Coors, V.: „SIMSTADT 2.0 – 3D Simulation urbaner Energiesysteme unter Nutzung von Sensor-/ Messdaten“ auf dem 15. Sächsischen GIS-Forum, 30.-31.01.2018 in Dresden
2. Coors, V.: „Geometrieprüfung von Gebäudemodellen der Länder“ auf dem AdV-Workshop der PG 3D-Geobasisdaten, 27.02.2018 in Limburg
3. „Using 3D CityGML Models for Building Simulation Applications at District Level“ auf der 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) in Stuttgart, 2018 [25]
4. „3D-Geodatenmanagement – Fortführung & Qualitätsmanagement“ beim M.O.S.S-Workshop und Anwendertreffen, 26.04.2018, Taufkirchen

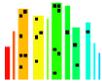


5. Coors, V.: „3D-Simulation urbaner Energiesysteme unter Nutzung von Sensor- und Gebäudedaten“ auf dem 10. Dresdner Flächennutzungssymposium, 17.05.2018 in Desden
6. Coors, V. et al.: „Workshop Smart Cities – Energy Efficient Buildings in a Renewable Energy Infrastructure“ auf der ICE / IEEE Conference, 20.06.2018 in Stuttgart
7. Brüggemann, T.: "Digitalization of DHC" Keynote on 16th International Symposium on District Heating and Cooling der IEA DHC|CHP, 10.09.2018 in Hamburg
8. „Methoden zur Integration von Sachdaten in CityGML Dateien zur Verbesserung der Energetischen Analyse von Stadtquartieren und deren Visualisierung“ auf der BauSIM 2018 – Deutsch-Österreichische IBPSA Konferenz [30]
9. „Automatische Extraktion von Fenstern in 3D Punktwolken zur Generierung von LoD3-Gebäudefassaden in CityGML“ beim Workshop 3D-Stadtmodelle der SIG 3D in Bonn, 2018 [5]
10. Rodrigues, P.: „Hackathon – Neue Wege für die Mobilität in Augsburg“, 23.-24.11.2018 in Augsburg²³
11. „Stochastic generation of household electricity load profiles in 15-minute resolution on building level for whole city quarters“ auf der 16th IAEE European Conference in Ljubljana, 28.08.2019 [31]
12. „A dynamic model for district-scale building demand simulation“ auf dem Dynastee Symposium „The Building as the Cornerstone of our Future Energy Infrastructure“ in Bilbao (Spanien), 2019 [17]
13. „Individual Domestic Hot Water Profiles for Building Simulation at Urban Scale“ auf der 16th IBPSA Building Simulation in Rom (Italien), 2019 [14]
14. „A multi-scale, web-based interface for strategic planning of low-carbon city quarters“ auf der 2nd International Conference on Urban Informatics in Hongkong, 2019 [22]
15. „SimStadt Workshop“ at AGSE 2019, 9./10.09.2019, Stuttgart²⁴
16. „11th Workshop on the CityGML Energy ADE“, 24./25.10.2019, Stuttgart²⁵
17. „On the design of an urban modelling platform and its application for a New York analysis“ auf der 16th IBPSA Building Simulation in Rom (Italien), 2019 [27]
18. Agugiaro, G., Malhotra, A.: „CityGML Energy ADE: Latest news!“ beim OGC TC Meeting, 15.06.2020 (virtuelle Veranstaltung)
19. Coors, V.: „Prediction of the Heating and Cooling demand and related CO₂ emissions using CityGML“ beim OGC-NRC Building Energy Webinar, 25.6.2020 (virtuelle Veranstaltung)
20. Duminil, E. und Klöber, A.: „Varianten und Workflows – Forschungsprojekt SimStadt 2.0“ beim Webinar M.O.S.S., 22.07.2020 (virtuelle Veranstaltung)
21. „Tool Development for Automatic Simulation of central and decentral Heat Supply Scenarios and Application to a district in the City of Mainz, Germany (SimStadt 2.0 project)“ [32]

²³ https://rundertischgis.de/nachwuchsfoerderung/rtgis-lab.html#a_ergebnisse

²⁴ <https://www.hft-stuttgart.de/Studienbereiche/Vermessung/Bachelor-Vermessung-Geoinformatik/Aktuell/veranstaltungen/simstadt2019/index.html>

²⁵ <http://en.wiki.energy.sig3d.org/index.php/Workshop>



8.3 Transfer in die Lehre

Vorlesungen

Ergebnisse aus dem Vorhaben konnten an der HFT direkt in die Lehre eingebracht werden.

So wird die erweiterte SimStadt-Plattform im Rahmen der Masterstudiengänge *SENCE* (Sustainable Energy Competence), *Vermessung* sowie *Photogrammetry and Geoinformatics* von Dozierenden und Studierenden mittlerweile bereits als Standardwerkzeug bspw. für Strahlungsanalysen, Wärmebedarfsberechnungen und Photovoltaikpotenzial eingesetzt. Hierüber kann mittel- bis langfristig auch eine breiter Praxisüberführung befördert werden.

Zudem wurde im Wintersemester 2020/21 erstmals das Seminar „*Urban Energy Modeling*“ an der Universität de La Réunion (Frankreich) gehalten, in welchem SimStadt zur Bestimmung von Wärme- und Kältebedarfen von Gebäuden auf der Insel La Réunion verwendet wurde. Das Seminar soll ab dem kommenden Wintersemester regelmäßig stattfinden.

Masterarbeiten

Im Zuge des Vorhabens konnte SimStadt erfolgreich für Masterarbeiten an der HFT verwendet und erweitert werden:

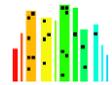
- Rossknecht, M.: „Concept and Evaluation of heating demand prediction based on 3D city models and the Energy ADE – case study Helsinki“²⁶ Master Thesis in Photogrammetry and Geoinformatics, SS 2020
- Fitzky, M.: „Simulation of Cooling Energy Demand Using the 3D Citymodel of Singapore“²⁷ Master Thesis in Photogrammetry and Geoinformatics, SS 2019
- Betz, M.: Deriving Schedule Information from Electricity Load Profiles, Master Software Technology, WS 2018/19
- Schwarz, M. “Simulation verschiedener Wärmepumpenszenarien für nachhaltige Quartierskonzepte mit INSEL“. Masterarbeit im Studiengang SENCE, SS 2018
- Klein, A.: „Modelling district heating networks using an urban simulation platform“. Masterarbeit im Studiengang SENCE, WS 2019/20

Bachelorarbeiten

- Wiedebusch, C.: „Solarthermie - Kostenbetrachtung Simstadt“. Bachelorarbeit im Studiengang Infrastrukturmanagement, SS 2018
- Pace, A.: „Integration einer Gebäudedämmung in SimStadt: Betrachtung der Kosten, Wirtschaftlichkeit und Energieeinsparung“. Bachelorarbeit im Studiengang Infrastrukturmanagement, SS 2018

²⁶ <https://www.coors-online.de/lehre/abschlussarbeiten/master-arbeit-maxim-rossknecht/>

²⁷ <https://www.coors-online.de/lehre/abschlussarbeiten/master-arbeit-matthias-fitzky/>



- Knott, F.: „Nahwärmenetze in 3D-Stadtmodellen – Kennzahlenbasierte Wirtschaftlichkeitsbewertung in der Simulationsumgebung SimStadt“. Bachelorarbeit im Studiengang Infrastrukturmanagement, SS 2018

Projektarbeiten

- Bopp, J.: „Typologisierung von Quartieren für eine nachhaltige Energieversorgung“ Projektarbeit im Master-Studiengang SENCE, WS 2017/18
- Garbas, M.: „Wärmepumpenszenarien auf Quartiersebene“. Projektarbeit im Master-Studiengang SENCE, SS 2018
- „Machbarkeitsstudie SimStadt API“. Informatik Projekt 2 (Projektgruppe von ca. 30 Studierenden) im Bachelor-Studiengang Informatik, WS 2020/21

8.4 Zugänglichmachung der Forschungsinhalte und Ergebnisse

Die Online-Dokumentation zum Vorhaben ist öffentlich unter

<https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/>

zugänglich. Auf dieser Webseite kann man unter anderem:

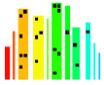
- die aktuelle Version der Software herunterladen²⁸;
- OpenData Modelle herunterladen²⁹;
- die kontinuierlich aktualisierte Liste der Veröffentlichungen im Kontext SimStadt einsehen³⁰;
- die komplette Dokumentation zur Software als PDF herunterladen³¹.

²⁸ <https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/getting-started/install-software/>

²⁹ <https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/getting-started/install-software/#test-repository>

³⁰ <https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/about/publications/>

³¹ https://simstadt.hft-stuttgart.de/doc/print_page/



9. Zusammenfassung

9.1 Fazit

Ziel des Verbundprojekts SimStadt 2.0 war die Weiterentwicklung einer Plattform zur urbanen Energiesystemanalyse, die Entscheidern im Bereich Energietechnik, Stadtplanung, Verwaltung oder Projektentwicklung erlaubt, Stadtquartiere energetisch zu untersuchen. Um dies zu bewerkstelligen, wurden seitens HFT insbesondere die bestehenden Analysewerkzeuge, Workflows und Bibliotheken in der bestehenden SimStadt-Umgebung erweitert und anhand der drei Fallbeispielquartiere Stadtgärtnerei Mainz, Wiener Platz Stuttgart und Wohnquartier Rüsselheim getestet.

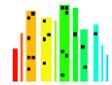
Aus technischer Sicht wurde die Architektur der Software SimStadt erheblich verbessert. Es wurden neue Workflows zur Simulation von Wärmeversorgungsoptionen und zur Dimensionierung und Trassierung von Wärmenetzen für Neubaugebiete entwickelt und anhand o.g. Fallstudien evaluiert. Durch die Anbindung an eine Datenbank mit einem deutschlandweiten Bestand von 3D-Gebäudemodellen, statistischen Methoden zur Schließung von Datenlücken und der Integration lokal verfügbarer Gebäudeinformationen und Messdaten über standardisierte Schnittstellen lassen sich die entwickelten Verfahren potenziell in einem beliebigen Bestandsquartier in Deutschland anwenden, ohne dass im ersten Schritt erheblicher Aufwand bei der Datenerfassung entsteht. Durch das entwickelte Variantenmanagement können unterschiedlichste Planungsvarianten erstellt und bewertet werden.

SimStadt unterstützt damit eine wesentliche Anforderung der o.g. Entscheider und Betroffenen im Stadtplanungsprozess, frühzeitig und standardisiert Transparenz bezüglich der Kosten, CO₂-Emissionen und technischer Eckparameter verschiedenster Wärmeversorgungsoptionen für ein Quartier zu gewinnen. Dadurch werden Kosten durch die Beauftragung stets neuer, maßgefertigter Gutachten vermieden. Zudem wird erreicht, dass alle Optionen gleichmäßig berücksichtigt werden können und nicht durch einen fortgeschrittenen Planungsprozess von vornherein ausgeschlossen werden müssen (bspw. Holzhackschnitzelanlagen aufgrund von fehlendem Stauraum und/oder Anlieferungswegen). Letztlich führt eine frühe Transparenz über verschiedene Optionen auch zu einem zügigeren Gesamtprozess, da aufwändige Umplanungen entfallen. Damit konnten die Projektziele vollumfänglich erreicht werden.

9.2 Ausblick

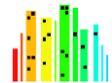
Im Projekt SimStadt 2.0 ist ein Software-Prototyp entstanden, mit dem städtische Quartiersplanungsprozesse insbesondere im Bereich Wärmeversorgung unterstützt werden.

Die Mainzer Stadtwerke AG wird die integrierten Betrachtungen von Versorgungsszenarien im Zuge der Optimierung der Netze und Ergänzung der (Insel-) Quartiersvorhaben verwenden. Dies stellt einen Teil der Dekarbonisierungsbetrachtungen dar, welche in den kommenden Jahren verstärkt angegangen werden müssen. Auch wird die voranschreitende Betrachtung von Simulationen auf Basis großer Messdaten und künstlicher Intelligenz Einzug halten. Die Verbindung von Datentöpfen zwischen öffentlichen Aufgabenträgern, Stadtwerken und privaten Erschließungsträgern ist ein spannendes Betätigungsfeld für wissenschaftliche Ansätze, nicht zuletzt in Richtung open data und notwendiger Datenschutzbelange.



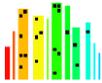
Die Zusammenarbeit der Stadt Mainz mit den Stadtwerken wird sinngemäß im Zuge des Projekts Mainz digital vorangetrieben. Technisch werden sich neue Erzeugungsarten entwickeln, wie vermehrte Sektorkopplung, Nutzung von Abwärmepotenzialen, Ein- und Ausspeisen von Strom in starken PV-Zeiten oder Nutzung in der Elektromobilität. Die Verbindung der Variantentechnologie in technologischen Betrachtungen, die Zielnetzplanungen Gas, Strom und Fernwärme zum Inhalt haben, ist denkbar. Insbesondere dort sind Verbrauchs- und Potenzialstudien über die bisher meist getrennt betrachteten Sektoren Strom und Wärme notwendig.

Mit den erzielten Projektergebnissen können auch neue potenziellen Nutzergruppen wie Energieagenturen und Stadtentwicklungsgesellschaften SimStadt zur Unterstützung bei der Erstellung bzw. beim Qualitätsmanagement kommunaler Wärmepläne und bei der Durchführung von Maßnahmen in KfW 432 Quartieren nutzen. Hier wird aufgrund der umfangreichen Funktionalität der Software SimStadt ein hohes Potenzial identifiziert. Allerdings werden insbesondere in Reporting die Vorgaben bei der Erstellung kommunaler Wärmepläne bisher in SimStadt nicht abgebildet. Auch muss eine Anpassung an die Prozesse dieser Nutzergruppen erfolgen. Insgesamt wird aber ein großes Potenzial gesehen, mit Unterstützung der Software SimStadt die kommunale Wärmeplanung und energetische Sanierung von KfW 423 Quartieren effizienter zu gestalten und damit schneller umzusetzen.

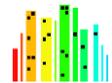


Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Systemische Ebenen der Planung [3]..... | 20 |
| Abbildung 2: SimStadt Workflow | 26 |
| Abbildung 3: Genese alternierender Prognosevarianten | 27 |
| Abbildung 4: Lokale Eingrenzung (Mockup)..... | 28 |
| Abbildung 5: Konfiguration Quartierseigenschaften (Mockup) | 29 |
| Abbildung 6: Definition Objektattribute (Mockup)..... | 30 |
| Abbildung 7: Einschränkung der Technologieauswahl und Rahmenbedingungen (Mockup) | 30 |
| Abbildung 8: Auszug inhaltlicher Anforderungen aus dem Lastenheft | 32 |
| Abbildung 9: Schematische Darstellung der Systemarchitektur | 33 |
| Abbildung 10: Systemarchitektur der (Multi-)Variantenverwaltung | 34 |
| Abbildung 11: Fenster-Extraktion aus einer hochauflösten Punktwolke von Gebäudefassaden | 38 |
| Abbildung 12: Gebäudedaten vor und nach Ermittlung der Funktionen..... | 39 |
| Abbildung 13: Ausschnitt einer originären ZENSUS-Datei | 41 |
| Abbildung 14: Beispiel einer aus ZENSUS-Daten erzeugten Tabelle (Alter in 10er-Gruppen)..... | 42 |
| Abbildung 15: Untersuchungsgebiet mit raumbezogener Einteilung in ha-Zellen | 42 |
| Abbildung 16: SimStadt-Tool – Konfiguration der Parameter für Photovoltaikanlagen..... | 43 |
| Abbildung 19: Plausibilitätsprüfung | 46 |
| Abbildung 20: Exemplarischer Testfall Stuttgart-Stöckach | 47 |
| Abbildung 21: Ausschnitt der Klimadatendatei | 49 |
| Abbildung 22: Wetterdaten des DWD zur Umgebungstemperatur in Stuttgart | 49 |
| Abbildung 23: Ausschnitt WEGA mit überlappender Stationskarte | 50 |
| Abbildung 24: Projekt mit zugeordneter Wetterstation | 51 |
| Abbildung 25: Strukturierter Entwicklungsprozess mit methodischer Qualitätssicherung | 53 |
| Abbildung 26: Auszug aus der UML Schemadefinition des SimStadt-Datenmodells..... | 55 |
| Abbildung 27: Typisierung eines Wohngebietes in SimStadt..... | 56 |
| Abbildung 28: Einbettung von WEGA-Variant in den SimStadt-Anwendungsprozess..... | 57 |
| Abbildung 29: Darstellung der Gebäude nach Funktion und Leitungen nach Nennweite..... | 60 |
| Abbildung 30: Darstellung nach gruppiertem jährlichen Warmwasserbedarf | 60 |
| Abbildung 31: Darstellung mit gruppiertem spezifischen Heizwärmebedarf..... | 61 |
| Abbildung 32: Statistik In MS Excel aus exportierten CSV-Dateien | 62 |
| Abbildung 33: Anbindung von SimStadt an den 3D-Geoserver GeoRocket..... | 63 |
| Abbildung 34: Interaktive 3D-Visualisierung der Fallstudie Szenario 6 über den Geodatenserver GeoRocket..... | 63 |
| Abbildung 35: Beispiel eines elektrischen Lastprofils | 65 |
| Abbildung 36: Benutzeroberfläche von DHWcalc | 66 |
| Abbildung 37: Ausschnitt aus INSEL Modell BHKW + Gaskessel + Speicher | 68 |
| Abbildung 38: INSEL Modell Biomassekessel + Gaskessel | 69 |
| Abbildung 39: Darstellung der berechneten Pufferspeichervolumina und -durchmesser in Abhängigkeit der BHKW-Leistung. | 72 |
| Abbildung 40: SimStadt Workflow-Steps 9 bis 11 mit STANET-Anwendung | 74 |
| Abbildung 41: STANET Presetting | 75 |

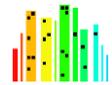


| | |
|--|-----|
| Abbildung 42: Manuelle Bearbeitungsschritte in STANET | 78 |
| Abbildung 43: Tabellarische Ergebnisdarstellung des Berechnungsmodells | 80 |
| Abbildung 44: City GML Modell in LoD2 von Szenario 6 | 84 |
| Abbildung 45: Messwerte Erzeugung Szenario 6 inkl. Ausreißer | 86 |
| Abbildung 46: Messwerte Erzeugung Szenario 6 inkl. Fehlstellen | 86 |
| Abbildung 47: Geplantes Anlagensystem Szenario 7 | 87 |
| Abbildung 48: Lageplan und Nutzung Szenario 7 | 88 |
| Abbildung 49: Netzplan Szenario 7 | 89 |
| Abbildung 50: Schema der Versorgungsvariante 1 im Szenario 7 | 90 |
| Abbildung 51: Schema der Versorgungsvariante 2 im Szenario 7 | 90 |
| Abbildung 52: Schema der Versorgungsvariante 3 in Szenario 7 | 90 |
| Abbildung 53: Ermittelte stündlicher Wärmebedarf, Warmwasserbedarf, Netzverluste sowie resultierende Jahresdauerlinie in Szenario 3 | 93 |
| Abbildung 54: Erzeugung Variante 1 (BHKW + Gasboiler + Speicher) in Szenario 3 | 93 |
| Abbildung 55: Spezifikationen Wärmepumpe in Szenario 3 Variante 2 | 94 |
| Abbildung 56: Erzeugung Variante 2 (WP + Speicher + Netz) in Szenario 3 | 94 |
| Abbildung 57: Wärmebedarfsberechnung gem. DIN V 18599 zu Szenario 6 | 95 |
| Abbildung 58: Bestimmung der Leitungsdurchmesser in STANET für Szenario 6 | 96 |
| Abbildung 59: Ermittelte stündlicher Wärmebedarf, Warmwasserbedarf, Netzverluste sowie resultierende Jahresdauerlinie in Szenario 6 | 97 |
| Abbildung 60: Ergebnisse Wärmeerzeugung BHKW + Gaskessel + Speicher für Szenario 6 | 98 |
| Abbildung 61: Ergebnisse Wärmeerzeugung Biomassekessel u. Gaskessel Szenario 6 | 98 |
| Abbildung 62: Jahresdauerlinie Biomassekessel u. Gaskessel Szenario 6 | 99 |
| Abbildung 63: Automatisch Generiertes CityGML Modell Szenario 7 | 101 |
| Abbildung 64: Monatlicher Gesamtwärmebedarf Szenario 7 | 102 |
| Abbildung 65: Automatisches Netzlayout Szenario 7 | 102 |
| Abbildung 66: Automatisches Netzlayout Szenario 7 nach Überarbeitung des Algorithmus | 103 |
| Abbildung 67: PV-Stromerzeugung Szenario 7 | 103 |
| Abbildung 68: Simulationsergebnis der Versorgungsvariante 1 im Szenario 7 | 104 |
| Abbildung 69: Auslegung der Wärmeerzeuger bei Versorgungsvariante 2 in Szenario 7 | 104 |
| Abbildung 70: Steuerung der Komponenten in Variante 2 von Szenario 7 | 105 |
| Abbildung 71: Auslegung der Wärmeerzeuger bei Versorgungsvariante 3 in Szenario 7 | 105 |
| Abbildung 72: Mit Sim Stadt simulierter und realer Wärmenetzplan in Szenario 3 | 107 |
| Abbildung 73: Solarpotential Szenario 3 | 108 |
| Abbildung 74: Grafische Darstellung von Szenario 6 in SimStadt | 110 |
| Abbildung 75: Gemessener Verbrauch und simulierter Bedarf sowie gemessene und simulierte Erzeugung für Szenario 6 | 116 |
| Abbildung 76: Visualisierung einer SimStadt Fallstudie mit WEGA | 124 |
| Abbildung 77: Einfluss der Veränderung des Parameters "Setpoint Heizen" auf den Heizwärmebedarf | 125 |
| Abbildung 78: Finaler Stand der angepassten Zeit- und Meilensteinplanung | 127 |



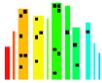
Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: RGB-Werte für Gebäudefunktionen nach TopPlus..... | 39 |
| Tabelle 2: RGB-Werte für Flächenfunktionen nach TopPlus..... | 39 |
| Tabelle 3: Kategorisierung der ZENSUS-Daten | 40 |
| Tabelle 4: Aspekte der PV-Analyse..... | 43 |
| Tabelle 5: Typische Grenzparameter zur Erzeugerdimensionierung | 70 |
| Tabelle 6: Abschätzung der Lagerbevorratung für Heizöl in Abhängigkeit der Kesselleistung..... | 71 |
| Tabelle 7: Auslegungsparameter für den Pufferspeicher einer BHKW-Anlage zur Ermittlung des Flächenbedarfs..... | 72 |
| Tabelle 8: Abschätzung der Lagerbevorratung von Biomasse in Abhängigkeit der Kesselleistung und Brennstoffart..... | 73 |
| Tabelle 9: Abschätzung von Wärmeleistung und -bedarf zu Szenario 7..... | 89 |
| Tabelle 10: Exemplarische Eingrenzung möglicher Technologievarianten..... | 91 |
| Tabelle 11: Gewählte Wärmepumpen für Szenario 6 | 99 |
| Tabelle 12: Automatisch ausgewählte Komponenten in der dezentralen Wärmepumpenvariante für Szenario 6 | 101 |
| Tabelle 13: Kennzahlen der dezentralen Wärmepumpenvariante für Szenario 6..... | 101 |
| Tabelle 14: Gemessene Wärmemengen in Szenario 3..... | 106 |
| Tabelle 15: Berechnete Wärmemengen in Szenario 3..... | 106 |
| Tabelle 16: Leitungskosten Szenario 3 | 109 |
| Tabelle 17: Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Ist-Daten zum Heizwärmebedarf in Szenario 6..... | 111 |
| Tabelle 18: Validierung der Simulationsergebnisse zum Heizwärmebedarf in Szenario 6 | 112 |
| Tabelle 19: Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Ist-Daten zum Trinkwarmwasserbedarf in Szenario 6..... | 113 |
| Tabelle 21: Kalkulierte Werte für Szenario 6 Variante 3..... | 119 |
| Tabelle 22: Ermittelte Flächenbedarfe für Szenario 6 Variante 3..... | 119 |
| Tabelle 23: Vergleich Simulation und Entwurfsplanung Szenario 7 Variante 2 | 123 |
| Tabelle 24: Vergleich Simulation und Entwurfsplanung Szenario Variante 3..... | 124 |

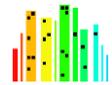


Literaturverzeichnis

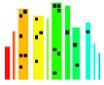
- [1] G. Grassl und weitere, „Landkreis Ludwigsburg: Klimaschutzkonzept Kurzfassung,“ https://www.landkreis-ludwigsburg.de/fileadmin/user_upload/seiteninhalte/natur-umwelt/umwelt/klimaschutz/20151007-kurzbericht-klimaschutzkonzept-ansicht.pdf, 2015.
- [2] V. Coors, C. Andrae und K.-H. Böhm, 3D-Stadtmodelle – Konzepte und Anwendungen mit CityGML, Berlin/Offenbach am Main: Wichmann, 2016.
- [3] T. Brüggemann und P. von Both, „Das integrierte Leitstand-Produktmodell - Multidimensionales AEC-Produktmodell für das Leitstand-basierte Baustellenmanagement großer Infrastrukturbaumaßnahmen,“ in *Autonome Steuerung in der Baustellenlogistik*, Göttingen, Cuvillier, 2013, pp. 73-91.
- [4] S. Schneider und V. Coors, „Automatische Extraktion von Fenstern un 3D Punktwolken mittels einer hierarchischen Methode,“ in *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und PFKG18*, München, 2018.
- [5] S. Schneider, „Automatische Extraktion von Fenstern in 3D Punktwolken zur GGenerierung von LoD3-Gebäudefassaden in CityGML,“ in *Workshop 3D-Stadtmodelle*, Bonn, 2018.
- [6] J. Lieberman, „Building Energy Mapping and Analysis: Concept Development Study Report,“ 30 09 2020. [Online]. Available: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=95237.
- [7] T. Santhanavanich und V. Coors, „CityThings: An integration of the dynamic sensor data to the3D city model,“ *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, pp. 1-16, 2021.
- [8] M. Betz, „Deriving Schedule Information from Electricity Load Profiles,“ 2018.
- [9] K. Kumar und A. Labetski, „CityGML 3D Metadata ADE,“ 29 08 2018. [Online]. Available: https://github.com/tudelft3d/3D_Metadata_ADE.
- [10] Open Geospatial Consortium (OGC), „OGC SensorThings API,“ 26 07 2016. [Online]. Available: <https://www.ogc.org/standards/sensorthings>.
- [11] Institut für Wohnen und Umwelt, „Gebäudetypologie und Daten zum Gebäudebestand,“ 10 02 2015. [Online]. Available: <https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/gebaeudetypologie>. [Zugriff am 26 05 2021].
- [12] M. Schultze, „Werkzeuge für eine workflowgesteuerte Erstellung für 3D Gebäudetypenmodelle,“ HTW Dresden, 2021.



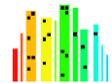
- [13] M. Rossknecht und E. Airaksinen, „Concepts and Evaluation of Heating Demand Prediction Based in 3D City Models and the CityGML Energy ADE - Case Study Helsinki,“ *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020.
- [14] S. Köhler, M. Betz und U. Eicker, „Stochastic generation of household electricity load profiles in 15 minute resolution on building level for whole city quarters,“ in *Proceedings of the 16th IAAE European Conference*, Ljubljana, 2019.
- [15] V. Weiler und U. Eicker, „Individual Domestic Hot Water Profiles for Building Simulation at Urban Scale,“ in *Building Simulation 2019 - 16th IBPSA International Conference*, Rom (Italien), 2019.
- [16] U. Jordan and K. Vajen, "Dhwcalc: Program to generate domestic hot water profiles with statistical means for user defined conditions," in *Proceedings ISES Solar World Congress*, Orlando, 2005.
- [17] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden,“ 10 2016.
- [18] P. Monsalvete und V. Coors, „A dynamic model for district-scale building demand simulation,“ in *Proceedings Dynastee Symposium The Building as the Cornerstone of our Future Energy Infrastructure*, Bilbao (Spanien), 2019.
- [19] P. Monsalvete, Multiscale Framework for Predicting Distributed Renewable Thermal Energy Integration, 2020.
- [20] V. Weiler, J. Stave und U. Eicker, „Renewable Energy Generation Scenarios Using 3D Urban Modeling Tools—Methodology for Heat Pump and Co-Generation Systems with Case Study Application,“ *Energies*, Bd. 12(3), 2019.
- [21] V. Weiler, D. Lust, M. Brennenstuhl, K.-H. Brassel, E. Duminil und U. Eicker, „Automatic Dimensioning of Energy Generation Components and System Simulation,“ *Frontiers in Sustainable Cities*, 2021, currently under review.
- [22] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, *VDI 2050 Blatt 1 - Anforderungen an Technikzentralen - Technische Grundlagen für Planung und Ausführung*, Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2013.
- [23] K. Daniels, *Gebäudetechnik: Ein Leitfaden für Architekten und Ingenieure*, München: R. Oldenbourg Verlag, 2001.
- [24] AMEV - Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen, „Wärmeversorgungsanlagen (WVA) - Teil 1: Planung und Bau 2021,“ Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), Berlin, 2021.



- [25] A. Mittelstädt, S. Köhler, C. Kesnar, R. Sihbomding, E. Duminil, V. Coors, U. Eicker und B. Schröter, „A multi-scale, web-based interface for strategic planning of low-carbon city quarters,“ in *2nd International Conference on Urban Informatics*, Hongkong, 2019.
- [26] K. Bao, P. Rushikesh, V. Coors, D. Thrän und B. Schröter, „A Method for Assessing Regional Bioenergy Potentials Based on GIS Data and a Dynamic Yield Simulation Model,“ *Energies*, Bd. 13 (24), 2020.
- [27] M. Zirak, V. Weiler, M. Hein und U. Eicker, „Urban models enrichment for energy applications: Challenges in energy simulation using different data sources for building age information,“ *Energy*, Bd. Volume 190, 2020.
- [28] R. Braun, V. Weiler, M. Zirak, L. Dobisch, V. Coors und U. Eicker, „Using 3D CityGML Models for Building Simulation Applications at District Level,“ in *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Stuttgart, 2018.
- [29] U. Eicker, J. Schumacher, V. Weiler und R. Braun, „On the design of an urban modelling platform and its application for a New York analysis,“ in *Building Simulation 2019 - 16th IBPSA International Conference*, Rom, 2019.
- [30] U. Eicker, V. Weiler, J. Schuhmacher und R. Braun, „On the design of an urban data and modeling platform and its application to urban district analyses,“ *Energy and Buildings*, Bd. Volume 217, 2020.
- [31] V. Coors, M. Betz und E. Duminil, „A Concept of Quality Management of 3D City Models Supporting Application-Specific Requirements,“ *FG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, Bd. Volume 88, 2020.
- [32] I. Dochev, P. Gorzalka, V. Weiler, E. Schmiedt, M. Linkiewicz, U. Eicker, B. Hoffschmidt, I. Peters und B. Schröter, „Calculating urban heat demands: An analysis of two modelling approaches and remote sensing for input data and validation,“ *Energy & Buildings*, 1 November 2020.
- [33] V. Weiler, E. Duminil, B. Schröter, V. Coors, T. Brüggemann, B. Balbach, L. Goll und A. Klöber, „Automatisierte Modellierung von Quartierswärmebedarfen auf Basis von 3D-Gebäudemodellen,“ *EuroHeat&Power*, Nr. 3/2021, 2021.
- [34] V. Weiler, P. Würstle, J. Stave, M. Zirak, V. Coors und U. Eicker, „Methoden zur Integration von Sachdaten in CityGML Dateien zur Verbesserung der Energetischen Analyse von Stadtquartieren und deren Visualisierung,“ in *BauSIM 2018 - 7. Deutsch-Österreichische IBPSA Konferenz*, Karlsruhe, 2018.
- [35] S. Köhler, M. Betz und U. Eicker, „Stochastic generation of household electricity load profiles in 15 minute resolution on building level for whole city quarters,“ in *Proceedings of the 16th IAEE European Conference "Energy Challenges for the Next Decade"*, Ljubljana (Slowenien), 2019.



- [36] V. Weiler, E. Duminił, B. Balbach und B. Schröter, „Tool Development for Automatic Simulation of central and decentral Heat Supply Scenarios and Application to a district in the City of Mainz, Germany (SimStadt 2.0 project),“ in *Building Simulation 2021 - 18th IBPSA International Conference*, Brügge (Belgien), 2021.



Anhang

| | | |
|-----------|---|------|
| Anlage 01 | Lastenheft SimStadt 2.0 | A1 |
| Anlage 02 | EMS-Datenmodell SimStadt | A34 |
| Anlage 03 | Zensusthemen mit Gruppen | A36 |
| Anlage 04 | CityDoctor Prüfbericht | A40 |
| Anlage 05 | Klimadaten zum Untersuchungsgebiet (Szenario 7) | A49 |
| Anlage 06 | Konzept WEGA-Variant / WEGA-EMS | A51 |
| Anlage 07 | WEGA Vorgehen Varianten | A58 |
| Anlage 08 | Darstellungsmodelle | A65 |
| Anlage 09 | Übersicht Untersuchungsgebiet (Szenario 7) | A69 |
| Anlage 10 | Auswertung Heizwärme- und Warmwasserbedarf (Szenario 3) | A73 |
| Anlage 11 | Längenbezogene Investitionskosten zur Herstellung von KMR-Leitungen | A186 |
| Anlage 12 | Steckbrief Szenario 1 | A188 |
| Anlage 13 | Steckbrief Szenario 2 | A190 |
| Anlage 14 | Steckbrief Szenario 3 | A192 |
| Anlage 15 | Steckbrief Szenario 4 | A194 |
| Anlage 16 | Steckbrief Szenario 5 | A196 |
| Anlage 17 | Steckbrief Szenario 6 | A199 |
| Anlage 18 | Steckbrief Szenario 7 | A201 |
| Anlage 19 | Steckbrief Szenario 8 | A203 |
| Anlage 20 | Steckbrief Szenario 9 | A205 |
| Anlage 21 | Steckbrief Szenario 10 | A207 |
| Anlage 22 | Lastgang 2014-2018 interpoliert (Szenario 6) | A209 |
| Anlage 23 | SimStadt Documentation (technische Dokumentation der SimStadt-Software) | A213 |
| Anlage 24 | Berechnungstool Flächenbedarf Wärmeerzeugung (Szenario 6) | A498 |