

Andreas Stöger, BSc.

**Umsetzung von Alternativenprüfungen in einer  
Open-Source-WebGIS-Anwendung  
Ein Beitrag zur kommunalen Energieraumplanung  
in der Gemeinde Gleisdorf**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium

Geospatial Technologies

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

**Betreuer**

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Johannes Scholz

Institut für Geodäsie

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Text- dokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum, Unterschrift

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zuerst bei all jenen bedanken, die diese Arbeit ermöglicht und mich beim Verfassen unterstützt haben.

Ich bedanke mich beim Team der AEE - Institut für Nachhaltige Technologien (AEE INTEC) in Gleisdorf, dass sie diese Arbeit ins Leben gerufen haben und mich mit ihrer Expertise unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt hierbei Franz Mauthner, der mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. GleichermäÙ bedanke ich mich bei meinem Betreuer Johannes Scholz für sein unermüdliches Engagement für seine Student\*innen.

Ebenfalls möchte ich mich ganz herzlich bei jenen bedanken, die mich durch meine Masterstudienzeit begleitet haben.

Ein großes „Danke“ an Changer, Chris, David, Manu, Julian und Silvia. Ihr habt diese Zeit nicht nur zu einer lehrreichen, sondern auch zu einer schönen Zeit gemacht. Ich freue mich auch in Zukunft auf spannende Gespräche und interessante Debatten.

Zu Letzt (das beste kommt bekanntlich zum Schluss) danke ich jenen Menschen die mich mein ganzes Leben begleitet haben und hoffentlich noch lange werden.

Ich danke meinen Eltern, Andrea und Karl, dass sie mir die Zeit und die Sicherheit gegeben haben mich und meinen Weg zu finden. Auch meinem Bruder Florian möchte ich auf diesem Weg danken. Für einen gemeinsamen Weg der vielleicht nicht immer einfach war, aber uns schlussendlich dort hingeführt hat wo wir heute sind. Und es ist gut, wo wir heute sind.

Abschließend danke ich Lisa, die mich mittlerweile schon über 20 Jahre als Freundin und Partnerin begleitet. Danke für die Geduld mit mir, für die Liebe und Motivation die du mir schenkst, für die kleinen Arschritte wenn ich nicht in die Gänge komme, für das Entfliehen aus dem Alltag und dass du mir gezeigt hast wie schön es ist zu zweit die Welt zu erkunden.

## Kurzfassung

Die Klimaerwärmung ist eine der größten Herausforderungen in diesem Jahrhundert. Um die Erwärmung unter 2 Grad Celsius zu halten wurden Internationale und Nationale Klimaziele gesetzt. Ein großes Einsparpotential an klimaschädlichem Treibhausgas CO<sub>2</sub> wird in Österreich bei der Bereitstellung von Raumwärme gesehen. Durch den Ausstieg aus fossilen Energieträgern und die Reduzierung des Energieverbrauchs in der Wärmeversorgung sollen erste Schritte unternommen werden. Die räumliche Energieplanung wird hierbei als wichtiges Instrument für die Umsetzung und Gestaltung einer zukunftsorientierten Energieentwicklung angesehen.

In dieser Thesis wird eine Anwendung entwickelt, die als Werkzeug der räumlichen Energieplanung fungieren soll. Damit soll es möglich sein, Siedlungsentwicklung und Energiepotenziale aufeinander abzustimmen sowie die Versorgungsinfrastruktur zu optimieren. Eine weitere Funktion soll die Priorisierung von lokalen Energiepotentialen sowie die Definition von Eignungs- und Vorzugsgebieten sein. Ziel ist es, die räumliche Energieplanung zugänglicher und effizienter zu machen.

Die administrativen Grenzen der Stadtgemeinde Gleisdorf bilden das Untersuchungsgebiet, für das die gegenständliche Anwendung entwickelt wird. Die räumliche Datengrundlage der Applikation zur Charakterisierung des Gebäudebestandes, der leitungsgebundenen Energieinfrastruktur sowie der lokal verfügbaren erneuerbaren Energiepotenziale stammen überwiegend aus dem Forschungsprojekt S/E/P<sup>1</sup> in Kooperation mit AEE INTEC, Land Steiermark und Stadtgemeinde Gleisdorf. Ausgehend von den Anforderungen der räumlichen Energieplanung werden die Architektur und die Komponenten zur Umsetzung der Applikation gewählt. Ebenso werden das Design und die Funktionen auf die räumliche Energieplanung abgestimmt.

Das Ergebnis ist eine Open-Source-WebGIS-Anwendung, die es durch Visualisierung und statistische Auswertungen von räumlichen Daten bewerkstelligt, Informationen zu Wärmebedarf und den Potentialen für eine klimafreundliche (erneuerbare) Wärmebereitstellung zu präsentieren. Durch die integrierte Funktion der attributiven und räumlichen Selektion lassen sich (Ziel-) Bereiche individuell bestimmen und untersuchen. Die implementierte Alternativenprüfung ermöglicht es außerdem, das Wärmeversorgungssystem auf Grundstücksebene nach räumlichen, ökonomischen und ökologischen Kriterien zu prüfen, um daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten.

---

<sup>1</sup> S/E/P – [Spatial Energy Planing](#)

## **Abstract**

Global warming is one of the greatest challenges of this century. International and national climate targets have been set to keep warming below 2 degrees Celsius. A large savings potential of climate-damaging greenhouse gas CO<sub>2</sub> is seen in Austria in the provision of space heating. First steps should be taken by phasing out fossil fuels and reducing energy consumption in heat supply. Spatial energy planning is seen as an important instrument for the implementation and design of a future-oriented energy development.

In this thesis an application is developed which is supposed to function as a tool for spatial energy planning. It should enable the coordination of settlement development and energy potentials as well as the optimization of the supply infrastructure. Another function is the prioritization of local energy potentials as well as the definition of suitable and preferred areas. The aim is to make spatial energy planning more accessible and efficient.

The administrative boundaries of the municipality of Gleisdorf form the study area for which the present application is developed. The spatial data basis of the application for the characterization of the building stock, the grid-bound energy infrastructure as well as the locally available renewable energy potentials originate predominantly from the research project S/E/P in cooperation with AEE INTEC, the province of Styria and the municipality of Gleisdorf. Based on the requirements of spatial energy planning, the architecture and components for the implementation of the application are chosen. Likewise, the design and the functions are adapted to the spatial energy planning.

The result is an open source WebGIS application that manages to present information on heat demand and the potentials for climate-friendly (renewable) heat supply through visualization and statistical analysis of spatial data. Through the integrated function of attributive and spatial selection, (target-) areas can be individually determined and examined. The implemented alternative examination also allows to examine the heat supply system on the property level according to spatial, economic and ecological criteria in order to derive recommendations for action.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	iii
Abstract .....	iv
Inhaltsverzeichnis .....	v
Abbildungsverzeichnis .....	vii
Tabellenverzeichnis .....	viii
Glossar .....	ix
1. Einführung .....	1
1.1. Hintergrund .....	1
1.2. Ausgangslage .....	1
1.3. Forschungsfrage .....	2
1.4. Aufbau der Thesis .....	3
2. Grundlagen .....	5
2.1. Räumliche Energieplanung .....	5
2.2. Grundlagen WebGIS und CyberGIS .....	7
2.3. Alternativenprüfung .....	10
2.4. Exkurs: Projekt S/E/P - Spatial Energy Planning for Heat Transition .....	12
3. Methodik .....	13
4. Applikationsentwicklung .....	15
4.1. Anforderungsanalyse und -spezifikation .....	15
4.2. Entwurf Softwaredesign und Architekturentwicklung .....	21
4.3. Implementierung .....	28
5. Prototypische Anwendung .....	48
5.1. Fallbeispiel 1: Verortung und Analyse von Bestandsgebäuden mit Ölheizung .....	48
5.2. Fallbeispiel 2: energetische Ist-Analyse eines Stadtteils .....	50
5.3. Fallbeispiel 3: Alternativenprüfung an einem Bestandsgebäude .....	53
6. Diskussion .....	57
6.1. Reflexion .....	61

7. Fazit .....	65
7.1. Ausblick.....	65
Literaturverzeichnis .....	A1

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundlagen räumlicher Energieplanung und relevante Handlungsfelder (nach Mauthner 2019) .....	6
Abbildung 2: Handlungsfelder der räumlichen Energieplanung (Quelle: Projekt S/E/P).....	12
Abbildung 3: Applikationsentwicklungsmodell.....	13
Abbildung 4: Anforderungsspezifikation.....	15
Abbildung 5: ER_Diagramm Datenbank WebGIS .....	20
Abbildung 6: Wissenspyramide (nach Aamodt und Nygard 1995) .....	22
Abbildung 7: Webanwendung Client-Server Architektur.....	23
Abbildung 8: Benutzeroberfläche (Screenshot Webanwendung) .....	24
Abbildung 9: Benutzeroberfläche; Kartenansicht aktiv (Screenshot Webanwendung).....	28
Abbildung 10: Layerebenen (Mauthner 2019).....	29
Abbildung 11: Webservices (Screenshot Webanwendung) .....	31
Abbildung 12: Filteroptionen (Screenshot Webanwendung).....	32
Abbildung 13: Selektion mit Lasso-Funktion (Screenshot Webanwendung) .....	33
Abbildung 14: Sequence Diagramm Filterprozess.....	35
Abbildung 15: Dashboard Ansicht (Screenshot Webanwendung).....	36
Abbildung 16: Mittlere Wärmeenergiekennzahlen (Screenshot Webanwendung).....	37
Abbildung 17: Kreis-/Balkendiagramm (Download Webanwendung).....	38
Abbildung 18: Boxplotdiagramm (Download Webanwendung) .....	39
Abbildung 19: Sankey-Diagramm (Download Webanwendung) .....	40
Abbildung 20: Hauptschritte einer MCDA (In Anlehnung an Cajot et al. 2017) .....	40
Abbildung 21: Alternativenprüfung Sequence Diagramm.....	45
Abbildung 22: Alternativenprüfung-Ansicht mit Ergebnis (Screenshot Webanwendung).....	46
Abbildung 23: Beispiel Ergebnis für kombinierte Bewertung.....	47
Abbildung 24: Identifizierung von Ölheizungen in der Stadtgemeinde Gleisdorf (Screenshot Webanwendung).....	48
Abbildung 25: Wärmebereitstellung Öl Dashboard 1 (Screenshot Webanwendung).....	49
Abbildung 26: Gruppieren nach Baujahr (Screenshot Webanwendung) .....	50
Abbildung 27:Selektiere Bereich von Interesse (Screenshot Webanwendung).....	51
Abbildung 28: Anzahl der Gebäude im Untersuchungsgebiet (Screenshot Webanwendung). 51	
Abbildung 29: vorherrschende Energieträger für die Wärmebereitstellung (Screenshot Webanwendung).....	52
Abbildung 30: Sankey-Diagramm (Screenshot Webanwendung) .....	52

Abbildung 31: Ausreißer spezifischer Heizwärmebedarf (Screenshot Webanwendung) .....	53
Abbildung 32: Filter nach räumlichen und attributiven Parametern (Screenshot Webanwendung).....	53
Abbildung 33: Eingabe Formular Alternativenprüfung Szenario 1 (Screenshot Webanwendung) .....	55
Abbildung 34: Ergebnistabellen der Alternativenprüfung Szenario 2 (Screenshot Webanwendung).....	56

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Funktionen und Anforderungen .....	21
Tabelle 2: Grundfaktoren für Wärmeversorgung .....	41
Tabelle 3: Parameter Alternativenprüfung .....	43
Tabelle 4: Ergebnis Alternativenprüfung für Szenario 1 & 2 .....	54

# Glossar

**AJAX (Asynchrones Javascript und Xml):** Eine Reihe von Prozeduren, die es einem Client ermöglichen, Anfragen an einen Server zu senden und Daten als Antwort auf Benutzereingaben zu empfangen, ohne die gesamte Webseite neu laden zu müssen.

**Alternativenprüfung:** grundstücks- bzw. objektgenaue Prüfung von erneuerbaren bzw. klimafreundlichen Wärmeversorgungsoptionen unter Berücksichtigung technischer, ökonomischer und ökologischer Bewertungskriterien.

**Anwendungsentwicklung:** Schreiben von Computersoftwarecode zur Verwendung in Desktop-Softwareanwendungen, Internetbrowsern, über Anwendungsprogrammierschnittstellen, über virtuelle oder Cloud-basierte Computing-Umgebungen oder auf mobilen Geräten.

**Anwendungsprogrammierschnittstelle (API):** Ein Satz von Programmierkomponenten, die miteinander kommunizieren und zur Entwicklung von Anwendungen mit einer bestimmten Computersprache verwendet werden können (vgl. Quinn 2018).

**Benutzeroberfläche (UI):** Die Menge der Elemente auf der Seite, die der Benutzer sehen und/oder manipulieren kann.

**Benutzerzentriertes Design:** Ein iterativer Testprozess, an dem der Programmierer und die Endbenutzer beteiligt sind und der darauf abzielt, die Bedürfnisse und die beabsichtigte Zielgruppe bei der Erstellung der Benutzeroberfläche für ein Web-GIS-Programmierprojekt zu ermitteln (vgl. Roth et al. 2015).

**Bibliothek:** Eine Sammlung von gemeinsam genutzten Programmiercodes, wie z. B. Dateien, Programme, Routinen, Skripte oder Funktionen, die zur Erleichterung der Entwicklung anderer Softwareprogramme und Anwendungen verwendet werden können.

**Big Data:** Unstrukturierte oder strukturierte Datenmengen, die so groß sind, dass sie mit herkömmlichen Technologien nur schwer zu erfassen, zu speichern, zu analysieren, zu verwalten und zu verbreiten sind (Li et al. 2016).

**Client:** Computer-Hardware, z. B. ein Gerät, das auf einen von einem Server bereitgestellten Dienst zugreift, oder ein Client kann eine Softwareanwendung sein, die auf Computern wie Laptops und Handheld-Geräten installiert ist und ausgeführt wird, wie z. B. Web-GIS-Anwendungen, die Programmierung beinhalten.

**Client-Server-Architektur:** Ein System, das es Computern ermöglicht, über ein Netzwerk miteinander zu kommunizieren, bei dem ein Computerprogramm (der Server) Inhalte speichert und an ein empfangendes Programm (den Client) liefert.

**Document Object Model (DOM):** Die Sammlung von Elementen, Attributen, Stilen, Daten und Skriptobjekten und -prozeduren, die zur Anzeige einer Webseite im Browser verwendet werden.

**Fat Client:** Bietet Benutzerfunktionalität unabhängig von einem Server, z. B. über einen Browser, auch als Rich-, Thick- oder Heavy (Client) bezeichnet.

**Framework:** Ein Satz von Werkzeugen, der geschrieben wurde, um anderen Entwicklern zu helfen, und in der Regel eine Sprache modularisiert, damit andere die Werkzeuge verwenden können, um leichter anspruchsvolle Anwendungen zu erstellen.

**Gekachelte Webkarte (Slippy Map):** Eine interaktive Webkarte, die Bild- oder Datenkacheln verwendet, die bei Bedarf an den Browser des Benutzers gesendet werden und ein flüssiges, ununterbrochenes Zoomen und Schwenken ermöglichen.

**Hypertext Transfer Protocol (HTTP):** Fungiert als Anfrage-Antwort-Protokoll in Client-Server-Modellen und kann durch Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) für eine sichere oder geschützte Kommunikation über ein Computernetzwerk erweitert werden.

**Kartenlayout:** Die visuelle Anordnung der Elemente der Benutzeroberfläche (UI) auf und um eine Webkarte.

**Kartenserver:** Ein spezialisierter Webserver, der zur Veröffentlichung von Geodaten-Webdiensten verwendet wird.

**Map-Komposition:** Die Art und Weise, wie Webkarten visuell strukturiert sind, um dem Benutzer bestimmte Informationen zu vermitteln.

**Mashup:** Eine neue Datenquelle, Website oder ein Webdienst, der durch die Kombination vorhandener Daten oder Dienste von mehreren Anbietern entsteht.

**Netzwerk:** Digitale Telekommunikationstechnologien, einschließlich Software, Kabelhardware und drahtlose Medien, die zum Austausch von Daten und anderen Ressourcen zwischen Computern über Verbindungen verwendet werden.

**Open-Source-Software:** Softwarecode, der frei zur Verfügung gestellt wird und verändert und weiterverteilt werden darf.

**Optimierung:** Im Kontext der Web-GIS-Programmierung der Prozess der Einrichtung oder Skalierung einer hochleistungsfähigen Server- und Netzwerkkonfiguration zur Unterstützung der beabsichtigten Nutzung von Anwendungen.

**Programmierung:** Implementierung eines Algorithmus mit Hilfe einer Programmiersprache zur Ausführung durch einen Computer.

**REST:** Representational State Transfer (REST), ein Software-Architekturstil, der Regeln für die Erstellung von Webservices bereitstellt, die für die Übertragung von 2D- und 3D-Daten, die Geoverarbeitung und die Bereitstellung für Web-GIS-Programmierprojekte verwendet werden können (vgl. Fielding 2000). Webdienste, die diesem Stil entsprechen, werden als "Restful" bezeichnet.

**Restful-Webdienst:** Ein Restful-Webdienst stellt Anfragen an eine bestimmte Ressource, auf die typischerweise über einen Uniform Resource Locator (URL) zugegriffen wird, und erhält eine Antwort, die in einer Web-Skriptsprache wie Hypertext Markup Language (HTML), Extensible Markup Language (XML) oder Javascript Object Notation (JSON) formatiert ist.

**Skalierbarkeit:** Fähigkeit von Software- und Hardware-Architekturen, steigende Benutzeranforderungen zu bewältigen.

**Skriptsprache:** Eine interpretierte Computersprache, die Skripts unterstützt, d. h. Programme, die in einer Laufzeitumgebung ausgeführt werden und häufig zur Automatisierung mehrerer Aufgaben verwendet werden.

**Thin Client:** Ist für die Funktionalität auf einen Server angewiesen, z. B. für Berechnungen, auch als Zero, Slim oder Lean (Client) bezeichnet.

**Überdesign:** Die Einbeziehung von zu vielen Informationen, zu vielen visuellen Elementen oder zu viel Interaktivität in Anbetracht des Zwecks der Karte, was zu Unübersichtlichkeit und eingeschränkter Nutzbarkeit führt.

**Uniform Resource Locator (URL):** Ein Verweis auf eine Ressource, der ihren Standort in einem Computernetzwerk beschreibt, beginnend mit HTTP:// oder HTTPS://, benannt und definiert durch den Eigentümer der Ressource.

**Visuelle Hierarchie:** Die relative visuelle Dominanz von Objekten auf einer Karte, wobei wichtigere Objekte visuell dominanter sind.

**Web Application Framework:** Ein Framework, das Entwicklern bei der Erstellung von Webanwendungen wie Web-APIs und Webdiensten hilft und oft Bibliotheken zur Vereinfachung von Programmieraufgaben wie dem Zugriff auf und der Konfiguration von Daten bereitstellt.

**Webdienst:** Ein Dienst, der von einem Gerät, z. B. einem Server, einem anderen Gerät, z. B. einem Client, über das Internet zur Verfügung gestellt wird und oft den Zugriff auf entfernte Daten oder Berechnungsmöglichkeiten ermöglicht.

**Webkarte:** Eine Karte, die im Internet veröffentlicht wird und auf die über das Internet zugegriffen werden kann, normalerweise als Teil einer Webseite. Webkarten lassen sich in eine von zwei Kategorien einteilen:

**Statische Webkarten** sind Kartenbilder, die im Browser gerendert werden und sich bei Benutzereingaben nicht verändern. Dazu gehören Kartenbilder, die der Benutzer über eine Zoomfunktion im Browser vergrößern oder verkleinern kann, ohne das Bild selbst zu verändern.

**Dynamische Web-Karten** sind Web-Karten, die ihr Aussehen ändern, während sie vom Benutzer betrachtet werden. Es gibt zwei Untertypen von dynamischen Karten.

**Interaktive Webkarten** ändern sich als Reaktion auf Benutzereingaben. Aufgrund der Allgegenwärtigkeit dieses Kartentyps im Internet denken viele Menschen bei dem Begriff "Webkarten" zwanglos an interaktive Webkarten.

# 1. Einführung

Dieses Kapitel dient zur Abklärung der Rahmenbedingungen, zur Darstellung der Fragestellungen und Ziele, sowie zum Erläutern des Vorgehens und des Aufbaus der Arbeit.

## 1.1. Hintergrund

Die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung ist ein wichtiger Meilenstein der Wärmewende und ein bedeutsamer Schritt zum Erreichen von Klimazielen. In Österreich macht die Bereitstellung von Raumwärme rund ein Drittel des gesamten Energieeinsatzes aus und verursacht in etwa 20 % des heimischen CO<sub>2</sub> Ausstoßes. Im Jahr 2018 betrug die Nutzung fossiler Energie im Wärmebereich zirka 60 % (vgl. Kranzl et al. 2018).

Die Versorgung mit Wärmeenergie erfolgt, im Unterschied zu anderen Energiesektoren, vorwiegend lokal und dezentral. Um den Ausstieg aus fossilen Energieträgern, die Reduzierung von Kohlenstoffdioxid und des Energieverbrauchs in der Wärmeversorgung zu schaffen, wird daher die Zusammenarbeit von Akteuren auf mehreren administrativen Ebenen benötigt (vgl. Mauthner 2019).

Eine solche Kooperation bildet das Projekt „Spatial Energy Planning for Heat Transition“ kurz S/E/P (FFG Projektnummer 868850). Die daran beteiligten Bundesländer Wien, Salzburg und Steiermark arbeiten mit Mitwirkenden aus der Forschung und Gebietskörperschaften daran, notwendige digitale Grundlagen für die Einführung von räumlicher Energieplanung bereitzustellen und innovative und nachhaltige Wärmetechnologien in neue Marktmodelle zu integrieren (vgl. Green Energy Lab 2020).

Eine dieser mitwirkenden Forschungseinrichtungen ist AEE – Institut für Nachhaltige Technologien (AEE INTEC), die in Zusammenarbeit mit der Stadtgemeinde Gleisdorf an der Implementierung einer strategischen Energieraumplanung arbeitet, um die Entwicklung der Wärmeversorgung in Gleisdorf zu lenken und zu gestalten. Um die Herausforderungen der Wärmewende zu meistern, werden Geoinformationssysteme für die Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation von räumlichen Daten eingesetzt (vgl. Green Energy Lab 2020).

Im Rahmen dieser Masterarbeit entsteht in Kooperation mit AEE INTEC und der Stadtgemeinde Gleisdorf eine Webapplikation, mit der die räumlichen Datengrundlagen aus dem S/E/P Projekt für die Anwendung in der räumlichen Energieplanung nutzbar gemacht und in Wert gesetzt werden. Inputdaten umfassen Informationen zur Verortung und energetischen Charakterisierung des Gebäudebestandes, der leitungsgebundenen Energieinfrastruktur sowie der lokal verfügbaren erneuerbaren Energiepotenziale und stammen überwiegend aus dem Forschungsprojekt S/E/P in Kooperation mit AEE INTEC, Land Steiermark und der Stadtgemeinde Gleisdorf. Konkretes Ziel und Nutzen der Webapplikation besteht darin, das Potential lokaler erneuerbarer Energieressourcen auf Grundstücks-beziehungsweise Gebäudeebene zu erfassen, Alternativen in der Raumwärmebereitstellung aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen basierend auf technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Vergleichsparametern abzuleiten.

## 1.2. Ausgangslage

Die österreichische Regierung widmet dem Thema Raumwärme im aktuellen Regierungsübereinkommen ein eigenes Kapitel. Hier finden sich Pläne zum Ausstieg aus fossilen Energieträgern, die Forcierung von Nah- und Fernwärme sowie die Erstellung von Wärmestrategien zum Umstieg auf erneuerbare Energieträger. So sollen ab dem Jahr 2020 keine Öl- und Kohle-Heizungen in Neubauten oder bei einem Heizungswechsel installiert werden. Ein kompletter Ausstieg aus fossilen Energieträgern in der Raumwärme soll bis zum Jahr 2035 erfolgen (vgl. Regierungsprogramm 2020). Für die Steiermark hat die Landesregierung im Jahr 2017 die Klima- und Energiestrategien bis 2030 beschlossen. Als Ziele werden darin die Senkungen der Treibhausgasemission um 36 %, die Steigerung der Energieeffizienz um 30 % sowie die Anhebung

erneuerbaren Energieträger auf 40 % festgehalten. Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere die in den Strategien beschriebenen Maßnahmen „Wärmeatlas Steiermark“ und „Alternativenprüfung“ von Bedeutung (Land Steiermark, 2019).

Eine Studie der Technischen Universität Wien beschäftigt sich ebenfalls mit der Frage, wie eine Dekarbonisierung der Bereitstellung von Raumwärme in Österreich aussehen könnte und entwickelte hierfür unterschiedliche Zukunftsmodelle. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass durch strategische Wärme- und Kälteplanung sowie höhere Investitionen in Gebäudesanierung und erneuerbare Heizsysteme eine Dekarbonisierung von Raumwärme bis 2050 möglich ist (vgl. Kranzl et al. 2018).

In der Veröffentlichung vom Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus namens „#Mission2030“, sowie im Artikel „Ein Beitrag zum Örtlichen Entwicklungskonzept“ vom Land Steiermark finden sich ebenfalls Modelle zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung (vgl. #Mission2030 2018; Abart und Stöglehner 2019).

Die obengenannten Bestrebungen von Regierung, Ministerien, Gebietskörperschaften und Forschungseinrichtungen fördern die Entwicklung von Strategien für eine zukunftsfähige und CO<sub>2</sub>-reduzierten Wärmeversorgung. Das Projekt S/E/P als Zusammenschluss von Forschungseinrichtungen, Gebietskörperschaften und Interessensvertretungen, leistet mit der Bereitstellung von planungsrelevanten digitalen Datengrundlagen und der pilothaften Umsetzung von räumlicher Energieplanung in Verwaltungsprozessen einen konkreten Beitrag für die Umsetzung der kommunalen Wärmewende (siehe Kapitel 2.4). Für die S/E/P Demogemeinde Gleisdorf liegen als Startpunkt für die Thesis räumliche Daten zur energetischen Charakterisierung des Untersuchungsgebietes vor (Gebäude, Energieinfrastruktur, erneuerbare Potentiale), die in weiterer Folge den Ausgangspunkt für die gegenständliche Web-Applikationsentwicklung darstellen.

### **1.3. Forschungsfrage**

Im Rahmen der Masterarbeit erfolgt die Entwicklung eines interaktiven, Open Source basierten Planungstools für die grundstücksgenaue Alternativenprüfung klimafreundlicher Wärmeversorgungsoptionen zur Raumwärmebereitstellung. Aus dieser Zielsetzung leitet sich folgende Forschungsfragestellung ab:

Wie können die digitalen Planungsgrundlagen aus dem Projekt S/E/P zur Beschreibung der räumlichen Dimension von Energieversorgung und Energieverbrauch in der Stadtgemeinde Gleisdorf für die grundstücksgenaue Alternativenprüfung erneuerbarer Wärmeversorgungsoptionen als interaktive Web-Applikation performant und benutzerfreundlich für entsprechende Planungsprozesse nutzbar gemacht werden?

#### **1.3.1. Weitere Fragestellung**

Aus der Literaturrecherche und der Auseinandersetzung mit dem Forschungsprojekt haben sich folgende Fragen ergeben:

- Für welche Nutzer\*innengruppen auf kommunaler Ebene ist die avisierte Web-Applikation relevant und welche spezifischen Anforderungen ergeben sich aus Nutzer\*innensicht an die Applikation?
- Welche Anforderungen muss eine Webanwendung erfüllen, um als Instrument der räumlichen Energieplanung zu fungieren?
- Bei welchen Fragestellungen und Bedürfnissen der räumlichen Energieplanung kann eine WebGIS Applikation unterstützen?
- Welche Schritte benötigt eine Alternativenprüfung für Wärmeversorgungssysteme und welche Parameter und Kriterien spielen eine Rolle?

- Wie kann eine Alternativenprüfung in einer webbasierten Applikation eingebunden werden, um den/die Benutzer\*in Handlungsempfehlungen zur Wärmeversorgung einzelner Gebäude zu liefern?

### 1.3.2. Forschungsziel

Aus der Forschungsfrage und in Zusammenarbeit mit der AEE INTEC ergeben sich folgende Zielsetzungen der Masterarbeit.

Die Entwicklung einer webbasierten Anwendung, die einen Beitrag zum Projekt „S/E/P“ leistet und zukünftig der Gemeinde Gleisdorf als Werkzeug in der räumlichen Energieplanung dient. Dazu wird abgeklärt, welche Anforderungen eine Webanwendung erfüllen muss, um die Prozesse der räumlichen Energieplanung zu unterstützen. Ausgehend von diesen Anforderungen erfolgt die Entwicklung und programmiertechnische Umsetzung einer Open Source basierten WebGIS Anwendung mit interaktivem Dashboard. Die Applikation dient als Instrument für Stakeholder, um gezielt Entwicklung, Regulierung und Steuerung der Wärmeversorgung in Gleisdorf zu lenken. Dazu besteht die Notwendigkeit eine Methode für die Implementierung einer Alternativenprüfung zu entwickeln und umzusetzen.

## 1.4. Aufbau der Thesis

Das definierte Forschungsziel wird mit den folgenden Schritten verfolgt und die aufgeworfenen Fragen beantwortet:

### Kapitel 1: Einführung

Einleitend wird die Ausgangslage zu dieser Thesis beschrieben. Diese Ausgangslage ist Hintergrund der Motivation zur Untersuchung in welcher Form eine Anwendung bei der räumlichen Energieplanung unterstützen und somit zur Reduktion von Energie und CO<sub>2</sub> beitragen könnte.

### Kapitel 2: Grundlagen

Zum Verständnis der Thematik werden Grundsteine dieser Arbeit erklärt und die Komponenten beschrieben, die für den Aufbau einer WebGIS Anwendung notwendig sind. Dazu zählen:

- **Die räumliche Energieplanung.** Dieser Abschnitt zeigt Inhalte und Ziele der räumlichen Energieplanung auf und beschreibt das Potential, das ein solches Instrument in der zukünftigen Energieentwicklung hat.
- **WebGIS und CyberGIS.** Die Beschreibung der Entwicklung und der Komponenten von Geoinformationssystemen führt zu einem besseren Verständnis der entwickelten Anwendung.
- **Die Alternativenprüfung.** Hier werden die Richtlinien geklärt, die bei der Umsetzung einer Alternativenprüfung eingehalten werden müssen. Außerdem wird auf den aktuellen Forschungsstand und Einsatzbereich eingegangen.

### Kapitel 3: Methodik

Dieser Abschnitt erläutert das verwendete Modell und die verschiedenen Phasen zur Entwicklung der WebGIS Anwendung.

### Kapitel 4: Applikationsentwicklung

Basierend auf einer Anforderungsspezifikation (Lastenheft) werden Methoden, Funktionalitäten, Software-Design und Software-Architektur zur Bereitstellung der geforderten Funktionalitäten festgelegt und die WebGIS Anwendung programmiertechnisch umgesetzt. Wesentliche Funktionalitäten der umgesetzten WebGIS Anwendung umfassen Kartenvisualisierungen, Filtermöglichkeiten, statistische Auswertungen (Dashboard) sowie die Implementierung einer interaktiven Alternativenprüfung.

### **Kapitel 5: Prototypische Anwendung**

In Kapitel 5 werden die umgesetzten Funktionalitäten der prototypischen WebGIS Anwendung anhand fiktiver Fragestellungen bzw. Anwendungsfälle demonstriert und erläutert.

### **Kapitel 6: Reflexion / Diskussion**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert, Forschungsfragen beantwortet und Stärken und Schwächen der einzelnen Module und Funktionen diskutiert.

### **Kapitel 7: Fazit / Ausblick**

Ein Fazit und ein Ausblick in zukünftige Entwicklungen bilden den Abschluss der Thesis

## 2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden grundlegende Informationen vermittelt um einen besseren Einblick in die verschiedenen Thematiken zu geben, welche diese Thesis umfasst.

### 2.1. Räumliche Energieplanung

Die in dieser Arbeit entwickelte Anwendung soll zukünftig als Werkzeug in der räumlichen Energieplanung eingesetzt werden. Zum besseren Verständnis wird hierzu kurz umschrieben, was räumlichen Energieplanung bedeutet.

#### 2.1.1. Definition

Der in der Schweiz geprägte Begriff räumliche Energieplanung wird als Instrument beschrieben, um die Energieversorgung und die nachhaltige Entwicklung einer Gemeinde aufeinander abzustimmen und zu koordinieren. Der Fokus liegt hierbei auf der Nutzung regional verfügbarer Energiequellen zur Wärme- und Kälteversorgung von Kommunen. Räumliche Energieplanung kann somit als Koordinationsinstrument der Raumplanung angesehen werden, welches auf den Sektor Wärmeversorgung fokussiert ist (vgl. Energiestadt 2019, (Modul 1)).

Oft wird in der deutschsprachigen Literatur neben dem Begriff räumliche Energieplanung der Begriff Energieraumplanung verwendet. Der in Österreich gebräuchliche Begriff Energieraumplanung kann als ganzheitliches Energiekonzept gesehen werden. Er wird als verbindende Methode genannt, um die Bereiche Energie, Siedlung und Mobilität in der Stadt- beziehungsweise Gemeindeentwicklung zu bündeln (vgl. Vogl et al. 2019).

In der vorliegenden Thesis wird nicht näher auf ganzheitliche Energiekonzepte eingegangen und ausschließlich auf die Wärmeversorgung fokussiert, weshalb in dieser Arbeit bevorzugt der Begriff räumliche Energieplanung verwendet wird.

#### 2.1.2. Ziele und Inhalt

Mit der räumlichen Energieplanung wird versucht die Wärmeversorgung eines Gebietes zu optimieren und für die Zukunft zu rüsten. Zu den Zielen der räumlichen Energieplanung zählen:

- die Siedlungsentwicklung und Energiepotenziale aufeinander abzustimmen
- die Versorgungsinfrastruktur zu optimieren durch Unterstützung und Koordination
- fossile Energieträger durch erneuerbare zu ersetzen, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken
- Energieverbrauch verringern
- Basis schaffen beziehungsweise Steigerung der Verwendung von erneuerbarer Energien, Umweltwärme und Abwärme aus Industrie
- Unterstützung beim Forcieren von Wärme- und Kältenetze
- Maßnahmen setzen zur Steigerung der Energieeffizienz

Die räumliche Energieplanung dient ebenfalls als raumplanerisches Koordinationsinstrument und unterstützt somit die Siedlungsentwicklung. Dazu zählen die Bedarfsentwicklung für Wärme- und Kälteversorgung, Priorisierung von lokalen Energiepotentialen, Definition von Eignungs- und Vorzugsgebieten sowie die Standortsicherung für Anlagen und Infrastruktur (vgl. Marty 2013).

Diese Ziele werden im Einklang mit den festgelegten Kriterien Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit verfolgt.

Zum Erreichen dieser Ziele setzt die räumliche Energieplanung auf räumlich verortete Informationen. Zum einen um Detailanalysen und Prognosen zum aktuellen und zukünftigen Wärmebedarf zu erstellen und zum anderen um lokale Gegebenheiten wie Gebäudebestand, bestehende Wärmeversorgungsinfrastruktur sowie lokal verfügbare Energiepotenziale in Bezug zu bringen. Je nach Anwendungsfall werden diese Informationen in verschiedener Datentiefe (räumliche und zeitliche Auflösung) benötigt. So sind für die Erstellung von kommunaler Energie- und Klimaschutzpläne jährliche Energie- und Ökobilanzen sowie Potenzial- und Infrastrukturanalysen auf Gemeinde- oder Gebietsebene ausreichend. Für die Planung von Energiekonzepten für Quartiersentwicklung werden hingegen detailliertere Daten auf Grundstücks- oder Gebäudeebene benötigt (vgl. Mauthner 2019)

Die Ergebnisse dienen zur Koordination, als Grundlage für Finanzplanung und kommunale Klimapolitik sowie als Basis für die Beratung und Information der Bevölkerung (vgl. Energiestadt 2017).

### 2.1.3. Einbettung der Theses

Wie bereits in der Zielsetzung, Kapitel 1.3.2, erwähnt, wird in dieser Theses eine Anwendung entwickelt, die als Werkzeug der räumlichen Energieplanung fungieren soll. Durch die folgende Abbildung von Mauthner 2019 kann veranschaulicht werden, welche Teilaspekte und Handlungsfelder in der vorliegenden Theses angesprochen werden (Abbildung 1; gelbe Markierung).

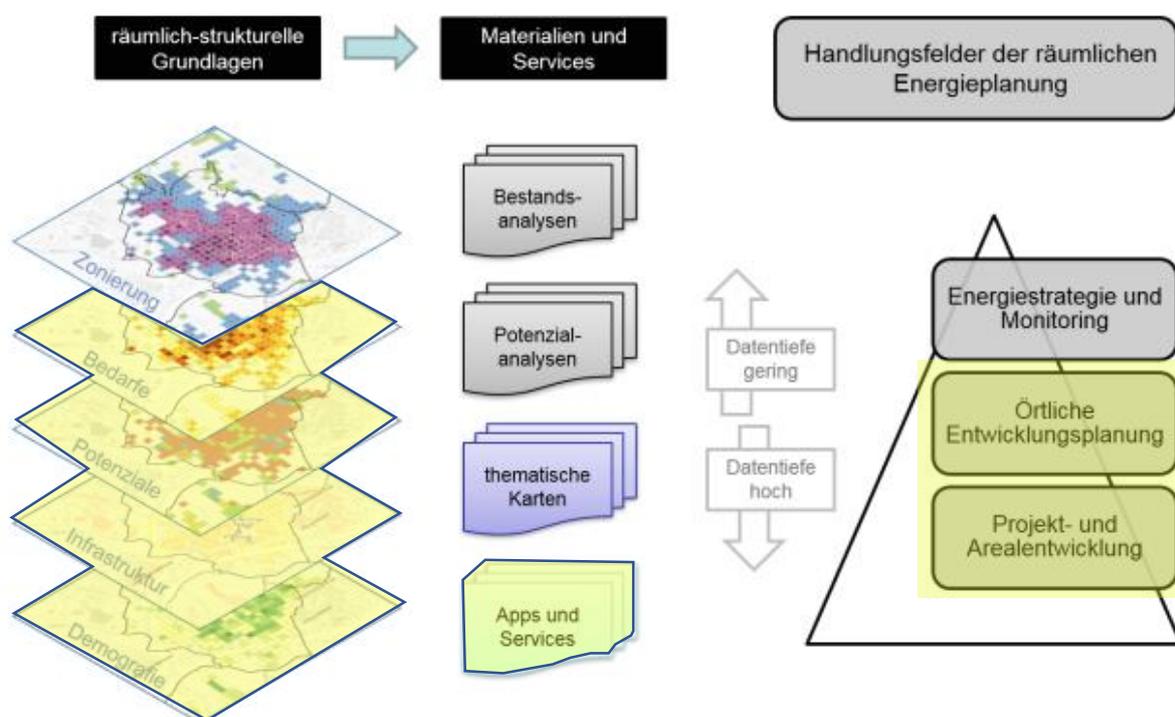


Abbildung 1: Grundlagen räumlicher Energieplanung und relevante Handlungsfelder (nach Mauthner 2019)

Es wird versucht durch die Entwicklung und Programmierung einer Anwendung verschiedenste Datengrundlagen zu verarbeiten um primär bei der örtlichen Entwicklungsplanung und der Projekt- und Arealentwicklung zu unterstützen.

## 2.2. Grundlagen WebGIS und CyberGIS

In diesem Kapitel werden der Begriff und die technische Entwicklung von Geografische Informationssystemen (GIS) erläutert. Diese Entwicklung ist eng mit dem Aufschwung des Internets und den Fortschritten der Webtechnologie verbunden.

### 2.2.1. Definition und Entwicklung

Es gibt verschiedene Definitionen für Geografische Informationssysteme (GIS), die jeweils aus einer anderen Perspektive oder disziplinären Herkunft entwickelt wurden. Im Buch *Geographic Information Systems and Science* wird geschrieben:

*„Everyone has their own favorite definition of a GIS, and there are many to choose from“* (Longley, et al. 2010: 16).

Eine dieser Definitionen stammt vom Environmental Systems Research Institute – ESRI und lautet wie folgt:

*„Ein geografisches Informationssystem (GIS) ist ein computergestütztes Werkzeug zur Abbildung und Analyse von Dingen, die auf der Erde existieren und Ereignissen, die auf der Erde passieren. Die GIS-Technologie integriert gängige Datenbankoperationen wie Abfragen und statistische Analysen mit den einzigartigen Visualisierungs- und geografischen Analysevorteilen von Karten“* (Environmental Systems Research Institute - ESRI).

Laut dieser und weiterer Definitionen wird zusammengefasst, dass ein GIS aus den folgenden Komponenten besteht

- Software
- Hardware
- Daten
- Personen

und zuständig ist für die

- Eingabe
- Bearbeitung
- Analyse
- Präsentation

von räumlichen Daten (vgl. Ershad 2020).

Mit der fortschreitenden Entwicklung der Technologie hat sich auch das Potential von GIS erweitert. Die Verlagerung der einzelnen Komponenten ins Web und der globale Austausch von Daten und Information ermöglicht es heute, GIS Produkte einer breiten Masse zugänglich zu machen. Diese Umstrukturierung führt nunmehr zunehmend zu einer Entwicklung vom Desktop GIS in Richtung WebGIS.

### 2.2.2. WebGIS

Der Begriff WebGIS führt keine neuen Komponenten oder Funktionen ein. Er beschreibt vielmehr, wo sich die Komponenten befinden (Web) und wie sie miteinander kommunizieren (Web-technologie). Somit wurde die Art und Weise, wie raumbezogene Informationen erfasst, übertragen, veröffentlicht, geteilt und visualisiert werden, verändert (vgl. Fu und Sun 2011).

Dieser Übergang von Desktop GIS zum WebGIS bietet eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden (vgl. ebd.):

- **Globale Reichweite:** GIS – Software muss nicht mehr lokal am Desktop installiert sein. WebGIS Applikationen können über Smartphones, Desktops oder direkt im Browser aufgerufen werden. Der globale Datenaustausch und vereinfachte Zugriff auf Daten spielen eine Rolle.
- **Einfach zu nutzen:** Die Anwendung von WebGIS Applikationen ist nicht mehr nur auf GIS Experten ausgelegt. Ein WebGIS bietet zwar meistens weniger Funktionen als ein Desktop GIS, dafür ist es meist so einfach zu bedienen, wie eine reguläre Webseite. Web-GIS ist in der Regel auf Einfachheit, Intuition und Bequemlichkeit ausgelegt, was es für den Anwender einfacher zu bedienen macht als Desktop GIS.
- **Große Anzahl von Nutzern:** Durch die einfache Nutzung von WebGIS und der Tatsache, dass mehrerer Anwender gleichzeitig dieselbe Applikation verwenden können, steigt die Anzahl von Nutzern. Von Bedeutung ist ebenfalls, dass räumliche Analysen und Darstellungen von geographischen Gegebenheiten eine immer größere Rolle in unserem Alltag spielen.
- **Interoperabilität:** Durch die Einführung von Standards und Normen wurde der Grundstein gelegt für den schnelleren Austausch und einfacherer Handhabung von GIS Daten. WebGIS können diese Vorteile nutzen und sind ebenfalls unabhängig bei der Wahl des Webbrowsers.
- **Geringere Kosten:** Der Umstand, dass ein WebGIS simultan von mehreren Anwendern genutzt werden kann verringert die Kosten pro Nutzer. Es werden auch keine rechenstarken Computer mehr benötigt da die meiste Datenverarbeitung am Server stattfindet.
- **Einheitliche Aktualisierung:** Im Gegensatz zum Desktop GIS muss nicht jeder Rechner aktualisiert werden. Wird das WebGIS am Server upgedatet, funktioniert es für alle Anwender. Diese einfache Wartung und verbesserte Aktualität macht es möglich auch Echtzeitdaten einzubinden.

Ein WebGIS ist eine Computer-Software- und Hardware-Konfiguration, welche die gemeinsame Nutzung von Karten, räumlichen Daten und geografischen Verarbeitungsoperationen im eigenen Netzwerk und darüber hinaus unter Verwendung gängiger Web-Kommunikationsprotokolle wie HTTP ermöglicht (Dragičević, 2004). In einem Web-GIS werden die Ressourcen oft von einem zentralen Rechner (Server) auf Anfrage gesendet. Organisationen können Web-GIS einsetzen, um Rechenkapazitäten und Ressourcen abteilungsübergreifend in einem lokalen Intranet gemeinsam zu nutzen, während andere Web-GIS als Mittel zur Verbreitung von Informationen an ein weltweites Publikum einsetzen (Plewe, 1997).

Web-GIS reduziert die Notwendigkeit für Endanwender, anspruchsvolle Software zu installieren, um mit geografischen Informationen zu arbeiten, da die meisten Operationen in Webbrowsern oder mobilen Apps durchgeführt werden können. Somit bietet das Web das Potenzial, die Zugänglichkeit und Bekanntheit von GIS in der Öffentlichkeit zu erhöhen. Die Implementierung von Web-GIS auf eigenen Servern erfordert eine Investition in Hardware, Software und Verbindungsinfrastruktur sowie die Fähigkeit, diese Komponenten zu verbinden und zu konfigurieren.

### 2.2.3. CyberGIS

CyberGIS - Cyber Geographic Information Science and Systems - ist definiert als GIS, das auf fortschrittlicher Computer- und Cyberinfrastruktur basiert (Wang 2010; Wang und Goodchild 2019).

Wie bei WebGIS bleiben auch die übergeordneten Komponenten beim CyberGIS großteils unverändert. Verändert sind die Ausmaße und Entwicklung dieser Komponenten. Daten werden durch ihre zeitliche und räumliche Auflösung immer größer (Big Data, Echtzeitdaten) und ihre Verarbeitung, Visualisierung und Analyse aufwendiger und rechenintensiver. Parallel dazu werden Computer leistungsstärker, die Aktivität von Nutzer\*innen und ihre Zusammenarbeit intensiver. Diese Herausforderungen und die Möglichkeiten für georäumliche Entdeckungen und Innovationen haben die Entwicklung von CyberGIS vorangetrieben (vgl. Wang und Goodchild 2019).

CyberGIS ist somit ein geographisches Informationssystem, das sich auf die Bestandteile und Ressourcen der Cyberinfrastruktur stützt, um neue Anforderungen zu meistern. Zusätzlich zu WebGIS umfasst es auch Hochleistungsrechenkapazitäten, fortschrittliche Hard- und Software, Datenrepositorien und Visualisierungselemente.

In einem Workshop der National Science Foundation (NSF) wurde Cyberinfrastruktur wie folgt definiert:

*„Die Bestandteile der Cyberinfrastruktur sind Menschen, Software, Hardware, Instrumente und andere Ressourcen, die so koordiniert werden, dass sie "Ende-zu-Ende" zusammenarbeiten und mehrere Benutzer gleichzeitig unterstützen. Im großen Maßstab muss diese komplexe Struktur geeignete Anreizstrukturen für die Benutzer, effektive organisatorische Rahmenbedingungen, politische und datenschutzrechtliche Beschränkungen und eine Fülle anderer sozialer Mechanismen umfassen um Stabilität, Leistung und Nützlichkeit zu gewährleisten (Stewart et al. 2010, 3)“.*

Cyberinfrastruktur wird durch die Verwendung mehrerer, miteinander verbundener Schichten von Software und Hardware mit Kommunikationsprotokollen implementiert, die zwischen ihnen vermitteln. Darüber hinaus bezieht sich Cyberinfrastruktur nach herkömmlicher Auffassung nicht nur auf abstrakte Maschinenbegriffe, sondern auch auf die menschlichen Ressourcen, die die Technologie unterstützen und nutzen. CI-Architekturen werden oft in Form der folgenden abstrakten Schichten beschrieben: Hardware, Software, Middleware und Humanressourcen. Cyberinfrastruktur kann als disruptive Technologie in dem Sinne bezeichnet werden, dass sie eine neue Art des Zugriffs auf Geodaten und Verarbeitungsdienste bietet. In Abkehr vom Single-Desktop-Modell verwendet Cyberinfrastruktur verteilte Verarbeitungsmodelle, die durch Hochgeschwindigkeitsnetzwerke und spezialisierte Middleware unterstützt werden, um die Palette der für die Benutzer verfügbaren Funktionen zu erweitern. Cyberinfrastruktur geht über die Möglichkeiten hinaus, die von Web-GIS geboten wurden, die hauptsächlich Informationen auf der Präsentationsebene veränderten. Mit der Entwicklung von CyberGIS und den dazugehörigen Softwareumgebungen fließen Informationen nun bidirektional. Anwendungen zur öffentlichen Entscheidungsunterstützung sind von dieser Art. Sie bieten die Möglichkeit für eine sinnvollere Beteiligung als traditionelle Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung. (vgl. Armstrong et al. 2011)

#### **2.2.4. Einbettung der Thesis**

Zum Erfüllen der Zielsetzung dieser Thesis wird eine Webapplikation programmiert, die als geographisches Informationssystem dient. Diese Anwendung wird auf einem Server laufen und über Webbrowser abrufbar sein. Dies entspricht einem Client-Server-Modell (nähere Informationen in Kapitel 4.2.1). Die Anwendung soll in der Lage sein die Zielsetzungen zu erfüllen und die aufgeworfenen Fragen zu beantworten. Dafür wird die Webapplikation als Prototyp konzipiert. Es werden nur jene Daten verwendet und Funktionen programmiert, die zu Beantwortung der Forschungsfragen benötigt werden. Durch diese Reduzierung auf das Wesentliche wird in dieser Arbeit von einem WebGIS und keinem CyberGIS gesprochen. Es werden alle Vorteile eines WebGIS genutzt, um den Nutzern einen einfachen Zugang zu gewähren. Durch das Eingrenzen der Funktionen und Daten wird keine Cyberinfrastruktur benötigt.

Die Umsetzung des WebGIS als Endprodukt, das exakte Ergebnisse liefert und große Regionen abdeckt, würde hingegen eine größere Datenmenge umfassen und weitere wichtige Aspekte berücksichtigen. Diese Anforderungen würden somit den Einsatz einer Cyberinfrastruktur erfordern um als Instrument der räumlichen Energieplanung zu fungieren.

Jedoch wird die Applikation neben den WebGIS Aspekten weitere Funktionen, wie Dashboard und Alternativenprüfung, umfassen. Diese Erweiterung kann als Aspekt eines CyberGIS angesehen werden.

## 2.3. Alternativenprüfung

In Hinblick auf die Implementierte Alternativenprüfung in der Webanwendung wird vorab geklärt, was eine Alternativenprüfung ist, wozu sie dient und welche Bestandteile benötigt werden

### 2.3.1. Definition und Richtlinien

Eine Alternativenprüfung beschreibt im Allgemeinen das Vergleichen von verschiedenen Möglichkeiten zum Erreichen desselben Ziels.

In der Thematik der Wärmeplanung wird mit der Alternativenprüfung eine Machbarkeitsstudie beschrieben, um über die technische, ökologische und wirtschaftliche Realisierbarkeit von nicht fossilen Systemen zur Wärmeversorgung von Gebäuden zu befinden (vgl. ÖGUT, 2019).

Dabei hat die Alternativenprüfung laut Klimaaktiv Initiative des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie folgendes zu beinhalten:

- Berechnung der Heizlast und ggfls. der Kühllast sowie des Heizenergie- und gegebenenfalls Kühlenergiebedarfs gemäß aktuellem Planungsstand
- Auslegung der alternativen Versorgungssysteme
- Technische, ökologische und wirtschaftliche Bewertung im Lebenszyklus (30a) unter Berücksichtigung sowohl der Errichtungs- als auch der Betriebsaufwendungen.

Die Alternativenprüfung soll sich außerdem an den Richtlinien der steiermärkischen Baugesetze (vgl. LandStmk 2019) orientieren und den Anforderungen des OIB (Österreichisches Institut für Bautechnik), konkret der OIB-Richtlinie 6 betreffend Energieeinsparung und Wärmeschutz (vgl. OIB RL6 2019) entsprechen.

Zum Einsatz wird sie bei Baueinreichung des Land Steiermark und Baubehörden im Rahmen der gesetzlichen Vorschrift kommen. Ein weiterer Anwendungsfall der Alternativenprüfung ist als Plausibilitätsprüfung für Planungsanlagen.

Der Anwendungsbereich der Alternativenprüfung wird sowohl Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude umfassen und soll beim Neubau wie auch bei umfassender Sanierung angewendet werden (vgl. Hofer 2020).

Laut steiermärkischem Baugesetz muss bei Neubauten die ökonomische, ökologische und technische Realisierbarkeit des Einsatzes von hocheffizienten alternativen Wärmeversorgungssystemen in Betracht gezogen und berücksichtigt werden. Zu diesen Systemen zählen (vgl. LandStmk 2019):

- dezentrale Versorgungssysteme auf Basis erneuerbarer Energieträger (Biomasse, erneuerbares Gas, Solarthermie)
- Kraft-Wärme-Koppelungsanlagen (KWK-Anlagen),
- Fern-/Blockheizung (insbesondere aus hocheffizienter KWK und / oder Abwärme),
- Wärmepumpen

Neben der Realisierbarkeit von alternativen Versorgungssystemen wird bei Neubauten auch ein Mindestmaß von Energie aus erneuerbaren Energiequellen verlangt. Dieses Mindestmaß wird vom österreichischen Institut für Bautechnik definiert und wird erfüllt, wenn mindestens einer der folgenden Punkte zur Anwendung kommt (vgl. OIB RL6 2019):

- Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf erfüllt die entsprechende Anforderung des Nationalen Plans an das Niedrigstenergiegebäude.
- Deckung von mindestens 80% des Wärmebedarfs durch Nutzung erneuerbare Quellen außerhalb der Systemgrenzen.
- Nutzung erneuerbarer Quellen durch Erwirtschaftung von Erträgen am Standort.

Diese Anforderungen und Richtlinien legen die Rahmenbedingungen und Kriterien für die Methodik der Alternativenprüfung fest.

In einer Alternativenprüfung werden mögliche Wärmeversorgungstechnologien anhand von mehreren Kriterien miteinander verglichen, um eine Entscheidungsunterstützung zu liefern (vgl. Wang et al. 2009). Durch die Abhängigkeit der Entscheidung für eine Wärmeversorgung von mehreren Faktoren, kann eine Alternativenprüfung als Multi-Kriterien-Analyseverfahren (Multi-criteria decision-analysis im Folgetext abgekürzt mit MCDA) angesehen werden. Die MCDA ermöglicht die Organisation und Strukturierung komplexer Entscheidungsprobleme, die durch mehrere, oft widersprüchlichen Zielen gekennzeichnet sind. Jedoch ist anzumerken, dass eine MCDA keine Technik zur Entscheidungsfindung ist, sondern eine Methode zur Analyse und Hilfestellung (vgl. Keeney 1982).

### **2.3.2.Forschung / Status Quo**

Die MCDA-Methoden kommen bereits in der Raumplanung zum Einsatz (vgl. Väisänen et al. 2016). Hierzu schreibt Sébastien Cajot im Artikel „Multicriteria Decision in Urban Energy System Planning“, dass die MCDA eine erforderliche und wichtige Rolle in der Zukunft der urbanen Energieplanung spielt (vgl. Cajot et al. 2017).

Die Verknüpfung von Geographischen Informationssystemen (GIS) und Multicriteria Decision Analysis (MCDA) wird neben den bereits erwähnten Themen behandelt. Die Literatur zeigt, wie die Kombination von Konzepten und Methoden aus zwei unterschiedlichen Bereichen neue Wege zur Lösung von Entscheidungsproblemen hervorbringen kann (vgl. Malczewski und Rinner 2015). Wie zum Beispiel der Einsatz von GIS in Kombination mit MCDA zum Ermitteln von geeigneten Gebieten für Windfarmen (vgl. Baseer et al. 2017) oder auch zur räumlichen Stadtentwicklung in der Mongolei (vgl. Myagmartseren et al. 2017). In einer Untersuchung in Dänemark wurden die Eignung von erneuerbaren Technologie zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden untersucht. Mittels MCDA wurden hierzu drei erneuerbare Heizungstechnologien (Solarthermie, Wärmepumpe und Holzpellets), die als Ersatz für fossile Energieträger fungieren, auf Aspekte der Ökonomie und Ökologie getestet (vgl. Yang et al. 2018).

### **2.3.3.Einbettung der Alternativenprüfung in dieser Thesis**

Die vorliegende Thesis beschreibt die Methodik und Umsetzung einer Alternativenprüfung klimafreundlicher Wärmeversorgungstechnologien in Gebäuden als funktionalen Bestandteil einer interaktiven WebGIS Anwendung. Der Mehrwert der realisierten Anwendung besteht darin, dass es Nutzer\*innen ermöglicht wird wesentliche Parameter zur Prozessierung der Alternativenprüfung per räumlicher Selektion auf einer Karte direkt für die weitere Berechnung zu übernehmen bzw. ggf. zu ändern oder zu ergänzen.

Die Berechnungsmethodik bzw. der Berechnungsalgorithmus für die implementierte Alternativenprüfung wurde dabei nicht im Rahmen der Thesis entwickelt, sondern basiert auf einer umfangreichen Excel Berechnung, die im Rahmen des Projektes S/E/P entwickelt wurde und den beschriebenen Anforderungen und Richtlinien des Landes Steiermark und der OIB Richtlinie 6 (siehe Kapitel 4.3.4.) entspricht.

Das Hauptaugenmerk liegt somit nicht in der Entwicklung, sondern in der Implementierung einer MCDA in ein WebGIS. Hierzu müssen Daten aus der Datenbank ausgelesen und für die Alternativenprüfung aufbereitet werden. Hinzukommen Parameter, die vom Anwender definiert werden können oder vordefiniert sind. Diese Informationen werden an den Server geschickt, der die Alternativenprüfung durchführt. Das Ergebnis wird schließlich an den/die Anwender\*in retourniert und in Form von Kartendarstellungen und Diagrammen visualisiert.

## 2.4. Exkurs: Projekt S/E/P - Spatial Energy Planning for Heat Transition

Das Projekt „Spatial Energy Planning for Heat Transition“, kurz S/E/P, ist Teil der Vorzeigeregion Energie „Green Energy Lab“, einer großangelegten Forschungsinitiative des Klima- und Energiefonds. Unter der Leitung des Salzburger Instituts für Raumordnung und Wohnen, wird in Zusammenarbeit mit Gemeinden und Forschungseinrichtungen an den Herausforderungen der Wärmeversorgung gearbeitet. Zu diesen Herausforderungen zählen die Entwicklung von Strategien für eine klimafreundliche Wärmeversorgung der Zukunft sowie konkret die schrittweise Transformation des Wärmesystems in Richtung hoher Energieeffizienz und minimalem Einsatz fossiler Energieträger („Wärmewende“).

Ein wichtiger Aspekt dieses Projektes ist die räumliche Komponente. Dieser räumliche Faktor ermöglicht es, erneuerbare Potenziale und die vorhandene Infrastruktur in Planungen von Wärmeversorgung miteinzubinden. Durch das Zusammenspiel von energierelevanten und räumlichen Informationen wird eine Datenbasis geschaffen, die für zukünftige strategische Planungen und Monitoringzwecke herangezogen werden. Geoinformationssysteme sind in der Lage diese Datenbasis zu erfassen, bearbeiten, analysieren und zu präsentieren. Der Wärme-Atlas des Projektes, der als Geoinformationssystem fungiert, visualisiert komplexe urbane Energiezusammenhänge, wie etwa erneuerbare Potenziale, Energieversorgungsinfrastruktur und Wärmenachfrage in hoher räumlicher Auflösung. Darauf aufbauend wird eine App von S/E/P entwickelt namens „Wärme-App“. Die „Wärme-App“ ermöglicht automatische Abfragen, zielorientierte Analysen sowie die automatisierte Erstellung von Berichten (vgl. Green Energy Lab 2020).

Das Hauptziel des Projektes ist es den Handlungsfeldern der räumlichen Energieraumplanung (siehe Abbildung 2) fundierte Daten und Planungsinstrumente bereit zu stellen um eine nachhaltige, zukunftsorientierte Wärmeversorgung zu gewährleisten (vgl. Green Energy Lab 2020).



Abbildung 2: Handlungsfelder der räumlichen Energieplanung (Quelle: [Projekt S/E/P](#))

### 3. Methodik

Um die Entwicklung der Applikation zu strukturieren wurden verschiedene Arbeitspakete definiert. Als Modell hierfür wurde ein adaptiertes Wasserfallmodell verwendet. Das Wasserfallmodell ist grundsätzlich ein lineares Vorgehensmodell, das Entwicklungsprozesse in aufeinanderfolgende Phasen unterteilt (vgl. Alshamrani und Bahattab 2015). Da ein lineares Modell es nicht beziehungsweise nur sehr eingeschränkt erlaubt, im Laufe des Projekts Änderungen aufzunehmen, wurde in dieser Arbeit ein iterativer Aspekt ergänzt. Dies erlaubt es bei Änderungen oder auftretenden Problemen nochmals Änderungen in vorherige Phasen durchzuführen. Kommt es zu Konflikten bei der Implementierung werden Änderung in der Architektur oder Komponenten vorgenommen. Auffälligkeiten im Testverfahren werden durch ein Überdenken der Implementierung oder Architektur bereinigt.

Das Prinzip des angewendeten Entwicklungsmodells im Rahmen der Thesis ist in Abbildung 3 dargestellt.

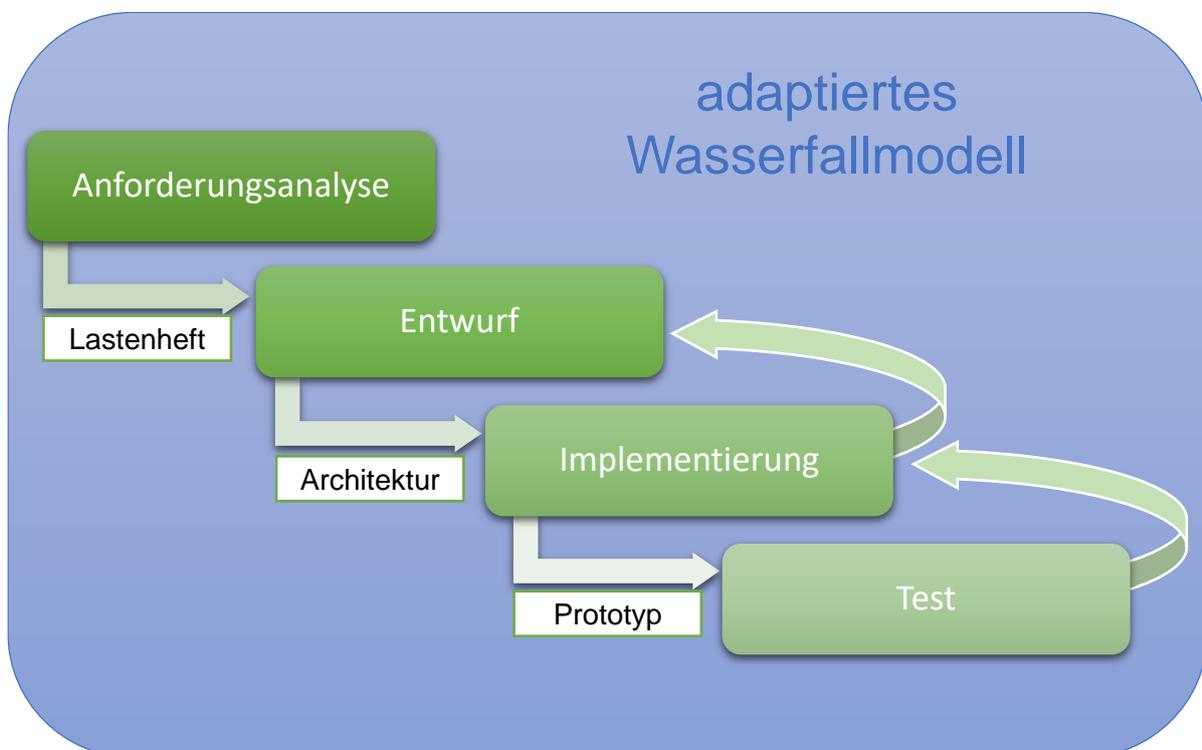


Abbildung 3: Applikationsentwicklungsmodell

Für diese Thesis wurden folgende vier Phasen definiert, welche die einzelnen Schritte der Applikationsentwicklung repräsentieren (siehe Abbildung 3):

#### I. **Anforderungsanalyse**

Damit die Webanwendung als Werkzeug in der räumlichen Energieplanung eingesetzt werden kann und einen Mehrwert für die Planung der Wärmeversorgung darstellt, wird als erster Schritt untersucht, welche Anforderungen ein solches Werkzeug erfüllen muss (Anforderungsspezifikation). Diese Anforderungen werden in Zusammenarbeit mit der AEE INTEC definiert und sind die Ausgangsbasis für die weiteren Phasen. Die Anforderungsanalyse beinhaltet ebenfalls eine Machbarkeitsstudie. Dazu wird untersucht ob Anforderungen realisierbar sind und wie sie realisierbar sind. In dieser Thesis unterliegt diese Phase keinen iterativen Prozess, da die Anforderungsspezifikation auch gleichzeitig die Zielsetzung der Thesis widerspiegelt. Für die zukünftige Entwicklung ist es jedoch möglich, dass die

Anforderungen ausgeweitet werden und die Anforderungsanalyse in den iterativen Prozess mit eingebunden wird. Die Anforderungsanalyse wird im Kapitel 4.1 näher beschrieben.

II. **Entwurf**

In dieser Phase wird ausgehend von den Anforderungsspezifikationen ein Entwurf gefertigt. In diesem Entwurf werden die Lösungen der funktionalen Anforderungen in Module gegliedert. Ebenfalls werden in dieser Phase die passende Programmiersprache zuzüglich Frameworks und Softwarebibliotheken gewählt um sowohl die Module und nicht funktionale Anforderungen umzusetzen. Das Ergebnis der Entwurfsphase ist eine geeignete WebGIS-Architektur samt Systemkomponenten um die Anwendung zu realisieren (siehe Kapitel 4.1.4).

III. **Implementierung**

In der Implementierungsphase wird die konzipierte WebGIS-Architektur realisiert und der Entwurf in der gewählten Programmiersprache umgesetzt. Zur Demonstration wird im Kapitel 4.3.1 die Implementierung und das Prinzip der vier Hauptmodule beschrieben.

IV. **Test**

Die Testphase beinhaltet die Überprüfung der Applikation auf Lauffähigkeit und Umsetzung der Anforderungen durch die programmierten Module. Ebenfalls wird in dieser Phase die Applikation potentiellen Nutzer\*innen präsentiert und Feedback umgesetzt. Diese Phase ist im Kapitel 5 Prototypische Anwendung eingegliedert. Hier werden Aufgabenstellungen mit Hilfe der Applikation gelöst. Dadurch werden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen überprüft.

## 4. Applikationsentwicklung

Die in Kapitel 3 Methodik genannten Phasen bilden die Unterkapitel des folgenden Abschnitts Applikationsentwicklung. In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte des Entwicklungsprozesses vermittelt.

### 4.1. Anforderungsanalyse und -spezifikation

In diesem Abschnitt werden alle Anforderungen an die Webanwendung aus den verschiedenen Bereichen zusammengefasst. Die Anforderungen an die Applikation stammen aus der Zusammenarbeit und Zielsetzungen der AEE INTEC. Ergänzt und komplementiert werden die Anforderungen aus den Ergebnissen der Arbeit „Grundlagen für die räumliche Energieplanung im WebGIS“ (Brunner, 2017, S.52).

Anhand dieser Anforderungen wurde definiert, welche Architektur und welche Komponenten für die technische Umsetzung zum Einsatz kommt/kommen. Dabei kann zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen unterschieden werden (siehe Abbildung 4). Das Ergebnis ist ein Lastenheft das für die späteren Phasen dient.

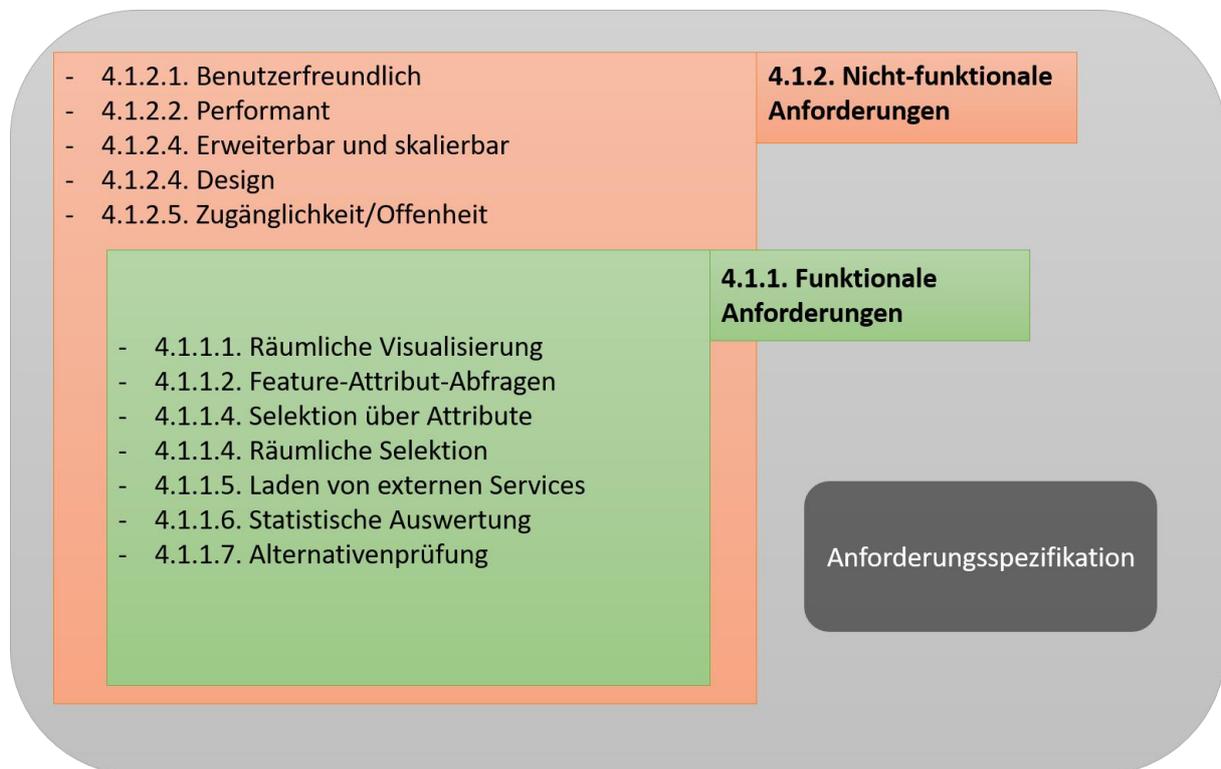


Abbildung 4: Anforderungsspezifikation

#### 4.1.1. Funktionale Anforderungen

Zu den funktionalen Anforderungen zählen jene, welche die räumliche Energieplanung, im konkreten Anwendungsfall die Alternativenprüfung klimafreundlicher Wärmeversorgungsoptionen, an eine Webanwendung stellt. Durch diese Funktionen unterscheidet sich eine Webanwendung für die räumliche Energieplanung von anderen GIS-Anwendungen.

##### 4.1.1.1. Räumliche Visualisierung

Alle verwendeten Daten sind räumlich verortet. Dies wird genutzt, um die Daten in einer Karte räumlich darzustellen. Die planungsrelevanten Energie- und Infrastrukturdaten im konkreten Anwendungsfall umfassen Gebäude, Fernwärme- und Erdgasnetze sowie lokale erneuerbare Energiepotentiale aus

Solarstrahlung, oberflächennaher Geothermie (Erdreich, Grundwasser) und Abwärme. Weitere relevante Datenschichten sind Klimadaten in räumlicher Auflösung (Heizgradtage, Kühlgradtage), administrative Grenzen sowie Nutzungs- und Grundstücksabgrenzungen aus der digitalen Katastermappe bzw. dem Flächenwidmungsplan der Gemeinde. Welche Datenebene oder welcher Layer gerade angezeigt wird, kann von dem/der Benutzer\*in gesteuert werden. Die räumliche Darstellung dieser Informationen erleichtert es dem/der Nutzer\*in räumliche Zusammenhänge zu erkennen und den Planungsgegenstand in einen entsprechenden Kontext zu setzen.

### **4.1.1.2. Abfrage von Einzelgebäude-Informationen (Feature-Attribut-Abfragen)**

Neben der Darstellung der Daten ist eine weitere Anforderung die Abfrage der visualisierten Gebäudeinformationen. Es wird ermöglicht, dass der/die Nutzer\*in durch Klick auf ein Gebäude, dessen Informationen, wie beispielsweise den Heizwärmebedarf, abrufen kann. Diese Funktion erlaubt es, alle Informationen, die mit dem Haus verknüpft sind, abzufragen. Bei diesen verknüpften Informationen kann es sich um Gebäudekennzahlen, Energiedaten oder auch erneuerbare Ressourcen, die an diesen Standort vorhanden sind, handeln.

### **4.1.1.3. Selektion über Attribute**

Die verwendeten, verorteten Objekte, wie zum Beispiel die Gebäude, haben charakteristische Eigenschaften, auch Attribute genannt, mit Hilfe derer Objekte beschrieben und kategorisiert werden können. Diese Attribute zeigen beispielsweise an, in welchem Jahr das Bauwerk errichtet worden ist oder welches Heizungssystem verwendet wird. Diese Informationen/Attribute können verwendet werden, um Filterungen auf Objektebene durchzuführen. Diese Filtermethoden oder auch räumliche Selektionen ermöglichen es, nur jene Gebäude darzustellen, die bestimmten Eigenschaften aufweisen. Darüber hinaus ermöglichen die Filterfunktionen beispielsweise die interaktive Berechnung von einfachen quantitativen Kennzahlen (z.B. Summen, Mittelwerte) oder Statistiken (z.B.: Boxplots und Histogramme) auf Basis der gewählten Teilmenge (und die Visualisierung der Ergebnisse im Dashboard siehe Kapitel 4.3.3).

### **4.1.1.4. Räumliche Selektion**

Ähnlich wie bei der Selektion nach Attributen lassen sich bei der räumlichen Selektion Daten nach einem Kriterium filtern. Hier ist das Kriterium die räumliche Lage der Objekte. Diese räumliche Selektion innerhalb der Webanwendung selektiert Objekte, die in einem definierten Gebiet liegen. Dieses Gebiet kann der aufgerufene Kartenausschnitt sein oder etwa auch ein selbst gezeichnetes Polygon auf der Karte. Durch eine solche räumliche Selektion können Bereiche von Interesse selbst definiert werden. Aber auch die Verarbeitungsprozesse können so beschleunigt werden, da nicht das ganze Gemeindegebiet untersucht wird, sondern nur der Kartenausschnitt oder der definierte Bereich.

### **4.1.1.5. Laden von externen Services**

Mit externen Services sind vorrangig Kartenservices gemeint. Diese Services werden auf Servern freigegeben und können abgegriffen werden. In der entwickelten Applikation betrifft dies primär Web Map Tile Service (WMTS), um Hintergrundkarten von verschiedenen Anbietern zu laden. Des Weiteren wird die Möglichkeit geboten, relevante und verfügbare Geodaten für das Gebiet Gleisdorf einfach einzubinden. Dieses externe Karten können als Layer ein-/ausgeblendet und über bestehende Daten gelegt werden, um den/die Nutzer\*in räumliche Gegebenheiten aufzuzeigen.

### **4.1.1.6. Statistische Auswertung (Online-Dashboarding)**

Neben der Visualisierung und dem Aufzeigen der räumlichen Gegebenheiten ist die Analyse der Daten eine wesentliche Anforderung an die Webanwendung. Dazu wird ein dynamisches Dashboard programmiert. Dieses soll statistische Auswertungen als Diagramme und Grafiken darstellen und dem/die Anwender\*in zur Verfügung stellen. Um dieses Dashboard dynamisch zu gestalten, wird es mit der Karte und seiner Selektionsmethoden gekoppelt. So wird gewährleistet, dass jene Daten statistisch

aufbereitet werden, die auch auf der Karte sichtbar sind. Mit dieser Funktion lässt es sich bewerkstelligen, dass räumliche und statistische Analysen gleichzeitig betrachtet werden können. Welche Auswertungen stattfinden, wird in Kapitel 4.3.3 näher erläutert.

### **4.1.1.7. Alternativenprüfung**

Wie bereits im Kapitel 2.3.1 Definition und Richtlinien erläutert, werden Alternativenprüfungen eingesetzt, um unterschiedliche Heizsysteme auf technische, ökologische und wirtschaftliche Kriterien zu prüfen. Für die Webanwendung wird auf eine im Projekt S/E/P entwickelte Alternativenprüfung zurückgegriffen (nähere Infos siehe Kapitel 4.3.4). Das bedeutet, es wird die Funktionsweise der Alternativenprüfung implementiert. Die benötigten Daten und Parameter für die Alternativenprüfung in der Webanwendung soll zum einen Teil direkt aus der Karte ausgelesen und zum anderen Teil manuell vom Anwender nachjustiert werden. So können Informationen (siehe 3.1.1.2) per Klick auf ein Gebäude oder Grundstück nicht nur angezeigt, sondern auch direkt in die Alternativenprüfung eingefügt werden.

### **4.1.2. Nicht-funktionale Anforderungen**

Zu den Anforderungen der Energieplanung müssen zusätzliche Details berücksichtigt werden. Es handelt sich hierbei um generelle Anforderungen an Webapplikationen (vgl. Escalona und Koch 2004).

#### **4.1.2.1. Benutzerfreundlich**

Die Benutzung der Webanwendung sollte für den/die User\*in so einfach wie möglich gestaltet werden. Der/die Nutzer\*in soll sich ohne Anleitung in der Anwendung zurechtfinden. Hierfür ist es notwendig, dass die Anwendung übersichtlich und gut strukturiert ist. Die Bedienung der implementierten Funktionen soll für den/die Anwender\*in evident/selbsterklärend sein. Dadurch wird sichergestellt, dass auch Nicht-Gis Experten oder Expertinnen die Applikation benutzen können und nicht vor einer Verwendung eines solchen Werkzeuges zurückschrecken.

#### **4.1.2.2. Performant**

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Performance der Webapplikation. Berechnungen müssen performant ausgeführt werden, um den/die Anwender\*in bei der Arbeit zu unterstützen und nicht zu beschränken. Die Performance ist abhängig von der verwendeten Hardware, der Internetverbindung sowie von der Architektur und den Verarbeitungsmechanismen der Webanwendung.

#### **4.1.2.3. Erweiterbar und skalierbar**

Die Webanwendung in ihrer jetzigen Umsetzung wird in der Lage sein, den aktuellen Datenbestand der Gemeinde Gleisdorf zu verarbeiten und durch wesentliche Funktionen dazu beitragen diese zu analysieren. Um auch für die Zukunft gerüstet zu sein, ist es notwendig, die Webanwendung so zu entwickeln, dass es möglich ist neue Funktionen zu implementieren und größere Datenbestände zu integrieren. Auch die Zunahme von User\*innen, die gleichzeitig auf die Anwendung zugreifen, muss beim Aufbau der Webapplikation berücksichtigt werden.

#### **4.1.2.4. Design**

Das Design der Webanwendung ist auf den ersten Blick zweitrangig, dennoch ist es eine wesentliche Anforderung. Es hat keinen Einfluss darauf, wie sehr sich die Webanwendung als Werkzeug für die räumliche Energieplanung eignet. Ein benutzerzentriertes Design bestimmt jedoch, wie gerne sich Anwender\*innen mit einer Anwendung beschäftigen, und trägt zur Orientierung auf der Seite und zur Benutzerfreundlichkeit bei.

#### **4.1.2.5. Zugänglichkeit/Offenheit**

Es ist wichtig, dass die Anwendung für Nutzer\*innen leicht zugänglich ist. Das bedeutet der/die Anwender\*in sollte ohne Installationen und ohne leistungsstarkes Endgerät die Webanwendung benutzen können. Diese Voraussetzung kann zu einer breiten Akzeptanz und Adaption der Anwendung führen.

### 4.1.3. Weitere berücksichtigte Fragestellungen

- Soll die Web-GIS-Systemarchitektur Client- oder Server-seitig sein?
- Was sind die Anforderungen an die Anwendungsleistung, Einschränkungen oder Begrenzungen?
- Welches Maß an Interaktivität für den Endbenutzer wird innerhalb der Anwendung erwartet?
- Soll die Anwendung nur in Browsern auf Desktops funktionieren, oder soll sie auch auf Tablets und mobilen Geräten funktionieren?
- Wie groß sind die räumlichen Datensätze, die in der Web-GIS-Anwendung angezeigt oder verwendet werden sollen, und kann das gewählte Datenspeicherformat die Leistungsanforderungen des Systems erfüllen, d. h. eine schnelle Reaktion der Webkarte?
- Wo befinden sich die räumlichen Datensätze, die in den Webkarten angezeigt werden sollen, und wie soll auf diese zugegriffen werden?
- Werden die Daten in einer Datenbank auf dem Server gespeichert, auf dem das Web-GIS-Programm läuft, oder werden sie als Webdienst von einem anderen Server zur Webkarte gestreamt?
- Welche Web-GIS- und unterstützenden Programmiersprachen können sowohl vom Anwendungsentwickler als auch von denjenigen, die die Anwendung angefordert haben, unterstützt werden, wenn die Wartung der Anwendung nach der Fertigstellung übergeben werden soll?

### 4.1.4. Datengrundlage

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnt, wird für unterschiedliche Services und Handlungsfelder in der räumlichen Energieplanung eine unterschiedliche Datentiefe benötigt. Die Umsetzung eines WebGIS, das in der Lage sein soll Alternativenprüfungen auf Grundstücks- beziehungsweise Gebäudeebene durchzuführen, benötigt eine solche räumliche Auflösung.

Zur Entwicklung des WebGIS wurden jene Daten verwendet, die durch das Projekt S/E/P und der AEE INTEC zur Verfügung gestellt wurden. Die Daten legen den Grundstein dieser Arbeit. Darauf aufbauend wurde das WebGIS entwickelt, um die Bearbeitung, Analyse und Visualisierung der enthaltenen Informationen zu ermöglichen. Dazu wurden die Daten aufbereitet und für die Anwendung in eine PostGIS-Datenbank abgelegt. Die Webanwendung wird mit dieser Datenbank verknüpft um die Daten für Berechnungen und Visualisierungen heranzuziehen.

Auf die Datenaufbereitung wird in dieser Thesis nicht näher eingegangen, da es den Rahmen der Arbeit überschreiten würde.

Folgende Datensätze befinden sich in der Datenbank:

#### **Gebäudedatensatz:**

Der Gebäudedatensatz beinhaltet Adressinformation und Energiekennzahlen zu den einzelnen Gebäuden sowie die Geometrie des Gebäudegrundrisses. Dieser Layer wird zur Visualisierung, zur statistischen Auswertung sowie als Grundlage der Alternativenprüfung herangezogen.

#### **Potentialdatensatz**

Die Potentiale sind die erneuerbaren Energieressourcen, die für die Alternativenprüfung genutzt

werden. Dazu stehen in der Datenbank räumliche Daten zur Solarstrahlung, Potential für oberflächennaher Geothermie (Erdreich, Grundwasser) zur Verfügung.

### **Infrastruktur**

Zur Visualisierung und Berücksichtigung der vorhandenen Infrastruktur in der Stadtgemeinde Gleisdorf liegen die Geometrien des Erdgas- und Fernwärmenetz in der Datenbank vor.

### **Restriktionen**

Die Restriktionen beschreiben Gebiete in denen erneuerbare Energieressourcen nicht genutzt werden können. Beispielsweise Wasserschutzgebiet (= Restriktion / Ausschlussgebiet für die Nutzung von beispielsweise Grundwasser-Wärmepumpen) oder Denkmalschutz (= Restriktion / Ausschlussgebiet für beispielsweise dachmontierte Solarthermie Kollektoren oder PV Paneele). Diese Informationen wurden aus dem Flächenwidmungsplan der Gemeinde Gleisdorf abgeleitet.

### **Administrative-Grenzen**

Zu diesen Daten zählen die administrativen Grenzen sowie Nutzungs- und Grundstücksabgrenzungen aus der digitalen Katastermappe bzw. dem Flächenwidmungsplan der Gemeinde.

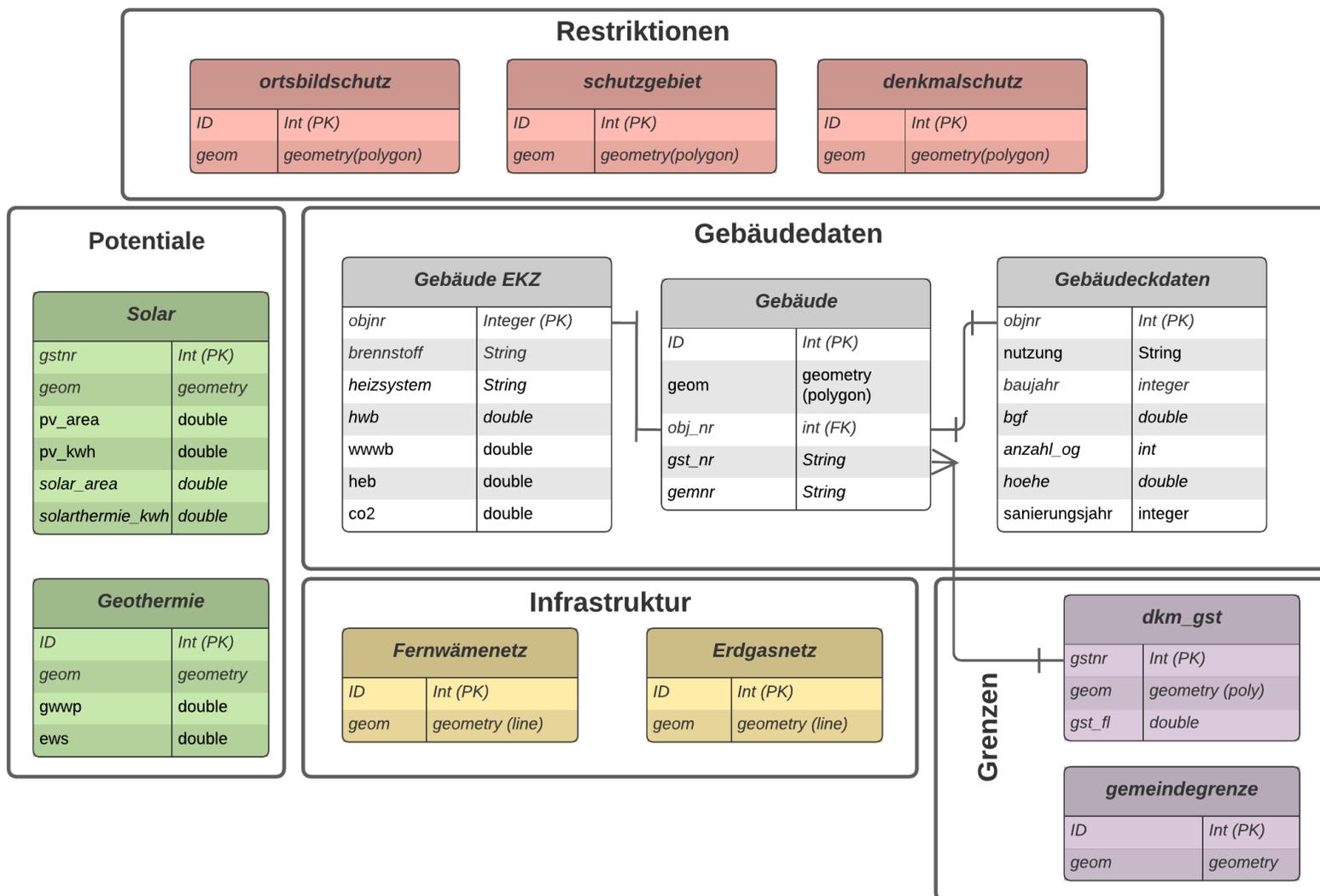


Abbildung 5: ER\_Diagramm Datenbank WebGIS

## 4.2. Entwurf Softwaredesign und Architekturentwicklung

Mit der Spezifikation der Anforderungen ist nachvollziehbar, welche Leistung die Webanwendung erbringen muss, um als nützliches Werkzeug der räumlichen Energieplanung zu fungieren. Eine übergeordnete Anforderung besteht darüber hinaus darin, die geforderten Funktionen ausschließlich mittels Open-Source-Software zu realisieren. Ausgehend von den Anforderungen wurden das Design, die Architektur und die Komponenten der zu entwickelnde Anwendung gewählt und ein Entwurf konzipiert.

Im Zuge des Softwaredesign und Architekturentwicklung wurden im ersten Schritt vier Hauptmodule für die Umsetzung der funktionalen Anforderungen entworfen. Diese Module sind die Hauptbestandteile der Webanwendung. Dazu zählen die Web-Karte, Filtermethoden, das Dashboard und die Alternativenprüfung.

Tabelle 1: Funktionen und Anforderungen

	Hauptmodule	funktionale Anforderungen	nicht funktionale Anforderungen
Webanwendung	Web-Karte	räumliche Visualisierung Abfrage von Einzelgebäude-Informationen	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Performant</li> <li>✓ Erweiterbar</li> <li>✓ Design</li> <li>✓ Zugänglichkeit</li> <li>✓ Benutzerfreundlich</li> </ul>
	Filtermethode	Selektion über Attribute Räumliche Selektion Laden von externen Services	
	Dashboard	Datenvisualisierung Statistische Auswertungen	
	Alternativenprüfung	Alternativenprüfungen	

Für die funktionalen Anforderungen wird eine dynamische Web-Karte benötigt. Diese soll auf Eingaben der Anwender\*innen reagieren und die Kartendarstellung entsprechend der Bedürfnisse anpassen. Durch das Zusammenwirken der Webkarte und der Filtermethoden wird ein auf die räumliche Energieplanung angepasstes WebGIS umgesetzt.

Durch das Dashboard, welches ebenfalls an die Filtermethoden geknüpft ist, wird die WebGIS Anwendung um interaktiv Diagramme und Grafiken ergänzt.

Mit der Alternativenprüfung wird versucht den Anwender\*innen eine Methode zu bieten, um verschieden Wärmeversorgungssysteme auf technische, ökonomische und ökologische Kriterien zu untersuchen. Hierzu werden grundstücks- und gebäudebezogene Daten aus der Datenbank ausgelesen und Parameter für die Alternativenprüfung automatisch gefüllt.

Diese Funktionen sollen in erster Linie die definierten, funktionalen Anforderungen erfüllen. Zu diesem Zweck werden die Hauptfunktionen miteinander gekoppelt. Das bedeutet, dass Filtermethoden sowohl Auswirkung auf das Kartenbild als auch auf die statistischen Auswertungen und somit auf das Dashboard haben. Das Interagieren mit der Karte soll zur Abfrage von räumlichen Potentialen und Gebäudedaten dienen. Diese Heteronomie soll die Webanwendung dynamisch und facettenreich machen, um eine Vielzahl von Anwendungsfällen abzudecken.

Das WebGIS unterstützt die Verarbeitungen von Daten und strukturiert diese, um daraus Informationen zu gewinnen. Diese Informationen werden anhand von Karten und Diagramme präsentiert. Dies soll den/die Anwender\*in dabei unterstützen Informationen zu verknüpfen. Bei der Kombination von Informationen zu einer Sachlage kann Wissen generiert werden. Dieses Wissen wird benötigt, um Strategien für eine zukunftsfähige und CO2-reduzierten Wärmeversorgung zu erarbeiten.

Die Wissenspyramide illustriert diesen Prozess, der bei der räumlichen Energieplanung stattfindet (siehe Abbildung 6). Als Instrument könnte die Webanwendung bei der räumlichen Energieplanung unterstützen und primär bei den ersten zwei Stufen der Wissenspyramide assistieren.

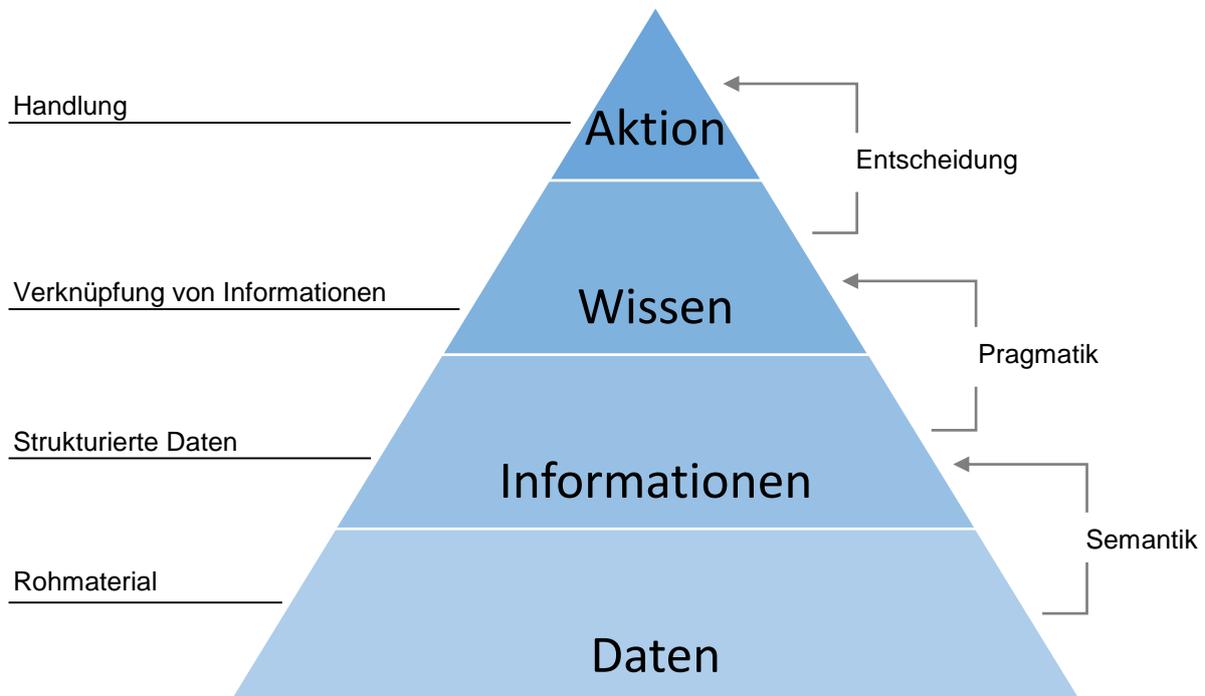


Abbildung 6: Wissenspyramide (nach Aamodt und Nygard 1995)

#### 4.2.1. Client-Server-Architektur

Die Umsetzung der Webapplikation basiert auf einer Client-Server Architektur. Die Bestandteile dieser Architektur sind mindestens ein Client und ein Server. Für die Anwendung ist diese Architektur um eine dritte Schicht erweitert. Die Datenbank ist von der Serverschicht getrennt und bildet auf einem weiteren Server die dritte Schicht (siehe Abbildung 7). Diese drei Schichten werden Client-, Anwendungs- und Datenschicht genannt. Jede dieser Schichten übernimmt einen Anteil der Aufgaben und ist separiert von den anderen Schichten.

Der Server ist eine Software, die auf einem Computer oder einer Gruppe von Computern installiert ist und Informationen, die auf dem lokalen Rechner gespeichert sind, an ein entferntes Gerät, den Client, sendet. Der Server empfängt Anfragen und Daten vom Client, führt Berechnungen durch und schreibt Daten in den Speicher auf seinem Rechner. Jeder Server hat seine eigene statische IP-Adresse (Internet Protocol), eine Zahlenfolge, über die der Client ihn findet. Der Client, ein Browser oder eine App, die auf dem Gerät des/der Benutzer\*in gespeichert ist, fordert die auf dem Server gespeicherten Informationen an, indem er die IP-Adresse des Servers anruft. In der Regel über eine DNS-Adresse (Domain Name Server). Der Server sendet dem Client die HTML-Dokumente, CSS-Stylesheets, JavaScript-Programmanweisungen und andere notwendige Daten zurück, die im Verzeichnis der Website gespeichert sind. Der Client setzt dann diese Daten und Anweisungen zu der vom Benutzer betrachteten Webseite zusammen.

Auf der Client-Seite rendert der Browser die Seiten und führt die an ihn gesendeten Programme mithilfe des Document Object Model (DOM) aus, dass alle Elemente, Attribute, Stile, Daten und Skriptobjekte und -prozeduren organisiert, die zur Anzeige der Webseite benötigt werden (vgl. Sack 2017; Roth 2017).

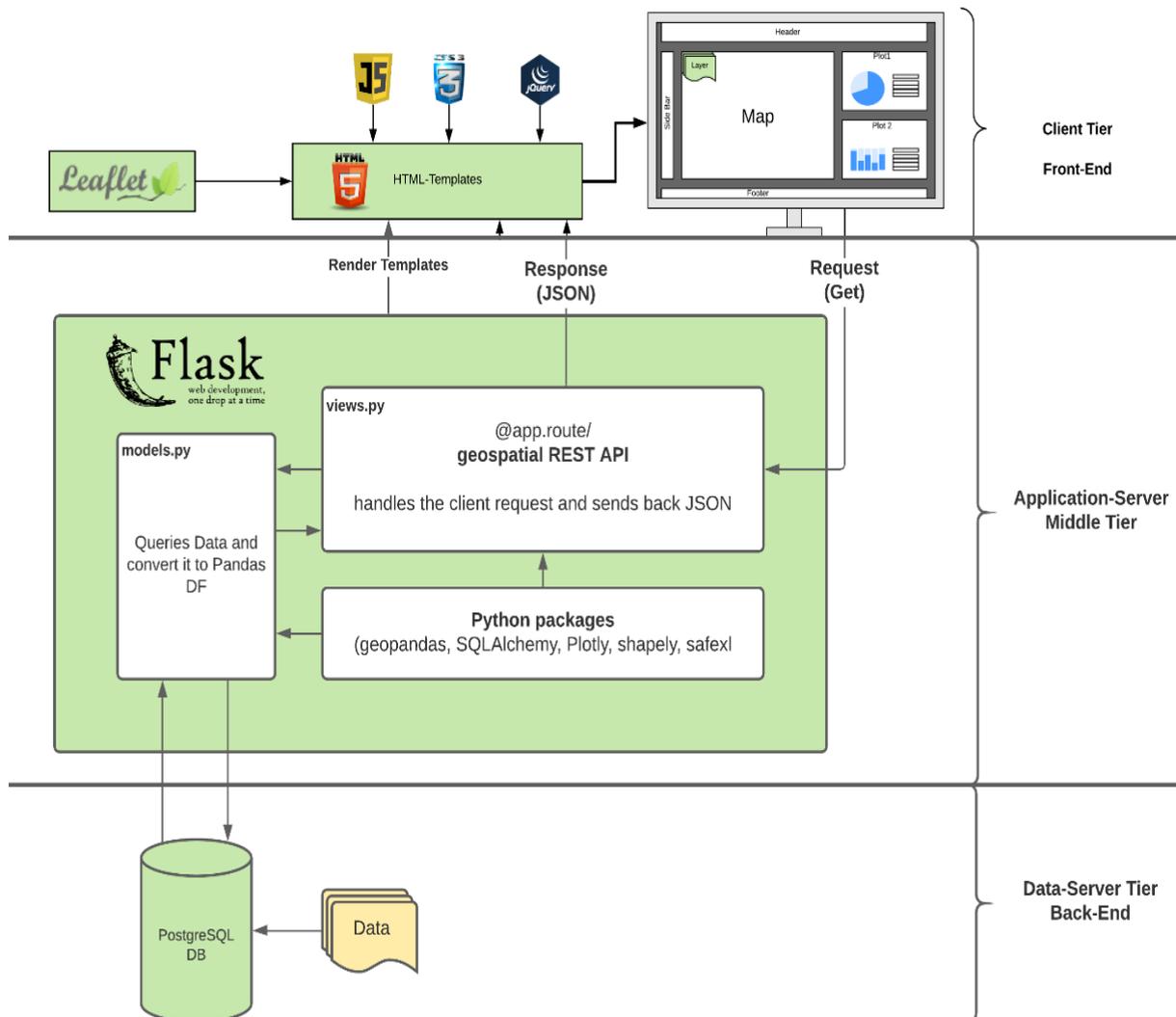


Abbildung 7: Webanwendung Client-Server Architektur

Die Drei-Schichten-Architektur bietet viele Vorteile, darunter Entwicklungsgeschwindigkeit, Skalierbarkeit, Leistung und Verfügbarkeit. Die Modularisierung der verschiedenen Schichten einer Anwendung ermöglicht es, eine bestimmte Schicht mit minimalen Auswirkungen auf die anderen Schichten zu aktualisieren. Darüber hinaus kann es dazu beitragen, die Entwicklungseffizienz zu verbessern, da unterschiedliche Entwickler verschiedenen Schichten weiterentwickeln können. Skalierbarkeit ist ein weiterer großer Vorteil einer 3-Schichten-Architektur. Durch die Trennung der verschiedenen Schichten kann jede unabhängig skaliert werden, je nach dem, was gerade benötigt wird. (vgl. Sack 2017).

#### 4.2.1.1. Clientschicht

Die Clientschicht wird auch Präsentationsschicht oder Front-End bezeichnet und ist für die Repräsentation der Daten, Benutzereingaben und die Benutzerschnittstelle vorgesehen.

Mit dieser Schicht kann der/die User\*in über einen Browser (Client) interagieren. Hierzu werden vom Server die benötigten Komponenten gesendet und die Seite mittels HTML, JavaScript und CSS gerendert.

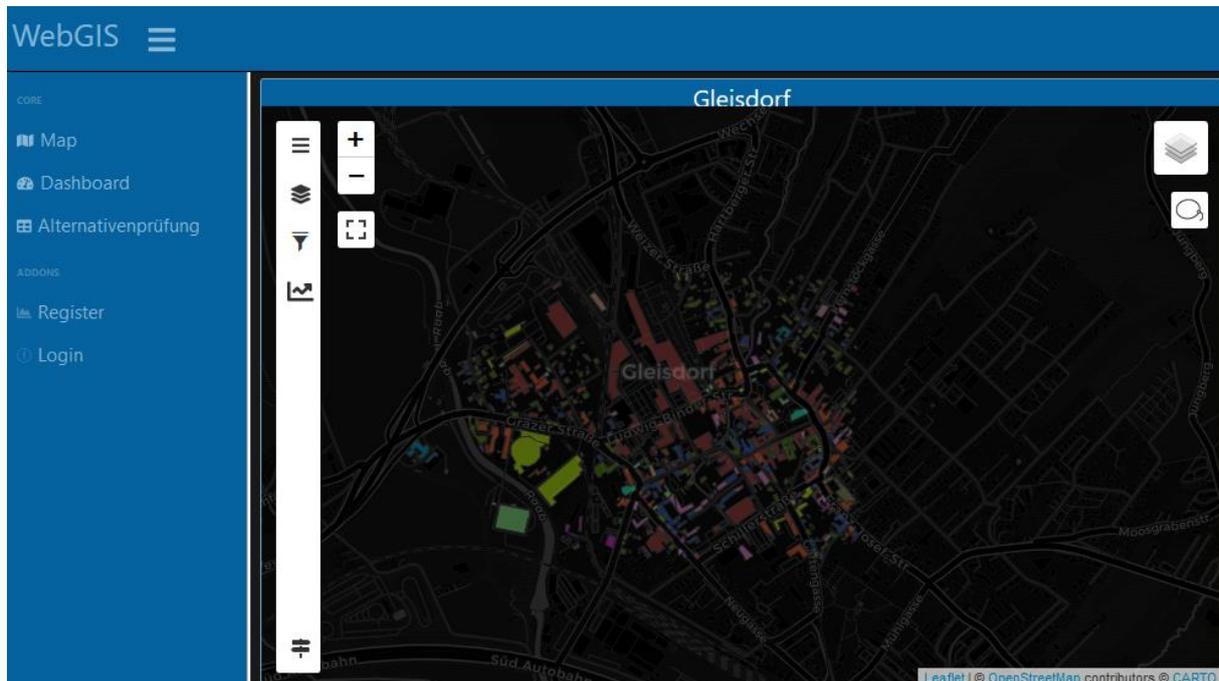


Abbildung 8: Benutzeroberfläche (Screenshot Webanwendung)

Die Applikation ist als single-page Applikation (SPA) konzipiert. Das bedeutet, die Seite und die meisten Ressourcen (HTML+CSS+Scripts) werden nur einmal bei der Benutzung der Anwendung geladen. Änderungen werden auf der Seite mit Hilfe von AJAX (Asynchrones Javascript und Xml) bewerkstelligt. Damit wird es dem Client ermöglicht, Anfragen an den Server zu senden und Daten als Antwort auf Benutzereingaben zu empfangen, ohne die gesamte Webseite neu laden zu müssen. Dies führt zu einer Performancesteigerung und einem dynamischen Erscheinen der Seiteninhalte. Durch diese asynchronen Ladevorgänge wird der Client entlastet und Arbeitsprozesse auf den Server ausgelagert. Während die Berechnungen am Server stattfinden, kann am Client ohne Einschränkungen weitergearbeitet werden. Ist die Berechnung am Server abgeschlossen, werden die Ergebnisse als Antwort an den Client retourniert. Der Client muss zur Visualisierung dieser Ergebnisse nicht die Seite neu laden, sondern ändert einzelne Erscheinungen auf der Seite. Dazu zählen beispielsweise die Karteninhalte oder das Dashboard.

Die Open Source Javascript Bibliothek Leaflet ermöglicht es, die Daten in einer dynamischen Karte zu visualisieren und dem Nutzer zur Verfügung zu stellen. Leaflet bietet dazu noch weitere Funktionen, die von der Anwendung verwendet werden. Diese werden im Kapitel 4.3.1 näher erläutert.

Die Grafiken des Dashboards werden mittels der Open Source JavaScript Grafikbibliothek Plotly erstellt. Zum Ablauf und zur Funktionsweise des Dashboards finden Sie in Kapitel 4.3.3 nähere Informationen.

#### 4.2.1.2. Anwendungsschicht

Die Anwendungsschicht oder auch Logikschicht genannt, koordiniert den Ablauf der Anwendung und beinhaltet alle Verarbeitungsmechanismen.

Diese Schicht wurde in der Programmiersprache Python umgesetzt. Python bietet eine Vielzahl von Packages um die Bearbeitung, Analyse und Visualisierung von räumlichen Daten zu ermöglichen.

In dieser Arbeit dient die Anwendungsschicht als GIS-Server. Ein GIS-Server hat die Aufgabe, Webservices für GIS und Mapping zu erstellen. Ein Webservice ist ein Stück Code, das auf dem Server

läuft und eine Aktion als Antwort auf eine Client-Anfrage ausführen kann. So kann ein Webservice beispielsweise einige Begrenzungskordinaten und ein Bildformat von einem Client erhalten, ein Kartenbild zeichnen und das Bild dann an den Client zurücksenden. Der Server kann Vektordaten an Client-Anwendungen entweder als eigenständige Datei oder als Streaming-Set von Features liefern.

Für solche Webservices wurde in der Anwendungsschicht ein benutzerdefiniertes raumbezogenes REST API programmiert. In dieser Anwendungsprogrammierschnittstelle (API) werden alle Webservices zusammengefasst. Je nach Anfrage und übergebenen Parameter werden Daten aus der Datenbank abgefragt und daraus Diagramme, Graphiken oder auch Kartenbilder erstellt. Hierfür werden Python Bibliotheken genutzt, um die räumlichen Daten zu lesen, zu bearbeiten und zu visualisieren. Die REST API gibt dem anfragenden Client die aufbereiteten und visualisierten Werte als Antwort in Form von JSON oder GeoJSON-kodierte Daten zurück.

Um eine schnelle Reaktion auf Benutzeranfragen sicherzustellen, wird die Anzahl der Transaktionen zwischen Clients und Servern sowie die Menge der Informationen in jeder Transaktion verringert. Nur die minimal notwendigen Kartenebenen und Attributdaten sollten in Serveranfragen und -antworten enthalten sein. Die Vereinfachung von Kartensymbolen, Vektorkoordinatengeometrien und Dezimalzahlen kann die Größe beziehungsweise die Nutzlast von Web-Transaktionen reduzieren.

Für diese Durchführung benötigt die Anwendungsschicht eine Verbindung zur räumlichen Datenbank. Dies wird mit GeoAlchemy und der Datenbank API Psycopy bewerkstelligt. Die Applikationsschicht fungiert somit als Bindeglied zwischen Clientschicht und Datenschicht.

### **4.2.1.3. Datenbankschicht**

Die Datenbankschicht wird auch als „Back-End“ bezeichnet. In diese Schicht werden die räumlichen Daten in einer PostGIS Datenbank gelagert. Die Anwendungsschicht kann eine Verbindung zur Datenschicht herstellen und SQL-Abfragen auslösen. Durch die PostGIS Erweiterung können direkt in der Datenbank räumliche Analysen durchgeführt werden. Diese Fähigkeit ermöglicht es, Arbeitsprozesse von der Anwendungsschicht auf die Datenbankschicht auszulagern. Die Datenschicht hält Daten unabhängig von Anwendungsservern oder Verarbeitungslogik und verbessert die Skalierbarkeit und Leistung.

### **4.2.2. Programmier- Skriptsprachen**

Die für den Aufbau der Webanwendung verwendeten Sprachen können in drei Bereiche aufgeteilt werden. Diese Bereiche bilden auch gleichzeitig die drei Schichten der Applikation (siehe Kapitel 4.2.1). Hierzu zählen die Client-Schicht (HTML, JavaScript, CSS), die Anwendungsschicht (Python) und die Datenbank-Schicht (SQL). Die Verarbeitung und Aufbereitung der Daten findet in der Anwendungsschicht statt. Hierzu wird die Programmiersprache Python verwendet. Python ist als Sprache für die Webprogrammierung noch nicht sehr geläufig, bietet aber Vorteile, um eine WebGIS Anwendung zu programmieren (vgl. Rey 2017).

Python ist eine flexible und vielseitige Programmiersprache, die für viele Anwendungsfälle genutzt werden kann, mit Stärken in den Bereichen Skripterstellung, Automatisierung, Datenanalyse, maschinelles Lernen und Back-End-Entwicklung (vgl. Bahgat 2015). Weitere Vorteile sind die Lesbarkeit, die plattformübergreifende Unterstützung und die niedrigen Einstiegskosten von Python.

Für diese Arbeit sind vor allem die Stärken bezogen auf die GIS-Programmierung relevant. Dazu zählen das Lesen, die Verarbeitung und die Darstellung von räumlichen Daten. Python bietet diesbezüglich eine Vielzahl von Bibliotheken, um diese Prozesse zu ermöglichen. Diese Eigenschaften machen Python zu einer hervorragenden Sprache für die Zusammenarbeit zwischen GIS-Anwendern (vgl. Rey 2017).

### 4.2.3. Softwarebibliotheken

Im folgenden Abschnitt werden jene Bibliotheken hervorgehoben, die für diese Arbeit von Bedeutung sind.

- **GDAL/OGR**  
Die Bibliothek „Geospatial Data Abstraction Library (GDAL)/OGR Simple Features Library“ fungiert als Übersetzer zum Lesen und Schreiben von Raster- und Vektordate. GDAL ist hierbei zuständig für Rasterdaten und unterstützt das Lesen und Schreiben von über 200 Rasterdateiformaten. OGR ist für Vektordatenformate verantwortlich und nutzt ein einheitliches Modell, um diese zu verwalten. Für diese Arbeit werden, aufbauend auf OGR, noch 3 weitere Bibliotheken verwendet, die zur Bearbeitung von Vektordaten dienen. Shapely, Fiona und GeoPandas (vgl. GDAL/OGR 2021).
- **Shapely**  
Shapely ist ein Python-Paket für die mengentheoretische Analyse und Manipulation von planaren Merkmalen unter Verwendung von Funktionen aus der bekannten und weit verbreiteten GEOS-Bibliothek. Die Bibliothek unterstützt acht Geometrietypen und ermöglicht es diese zu bearbeiten und zu analysieren. Shapely bietet keine Möglichkeiten zum Lesen und Schreiben von Geodaten und befasst sich nicht mit Datenformaten oder Koordinatensystemen, kann aber leicht in Pakete integriert werden, die dies tun (vgl. Sean 2020b).
- **Fiona**  
Fiona ist die API von OGR. Sie kann zum Lesen und Schreiben von Datenformaten verwendet werden. Es verwendet zwei Auszeichnungssprachen, Well Known Text (WKT) und Well Know Binary (WKB), zur Darstellung räumlicher Informationen in Bezug auf Vektordaten. Durch die Kombination von Fiona und Shapely werden die Funktionen Ein- und Ausgabe sowie die Erstellung und Bearbeitung von räumlichen Daten abgedeckt (vgl. Sean 2020a).
- **Pandas/GeoPandas**  
Pandas erleichtert es mit Daten zu hantieren. Die Bibliothek ist bekannt für die hohe Rechenleistung bei der Prüfung und Analyse bei Daten. Diese Eigenschaften und die von Pandas eingeführten Dataframes optimieren die Arbeit mit großen Daten. GeoPandas ermöglicht es diese Stärken auch auf räumliche Daten anzuwenden und fügt Funktionalitäten von geographischen Python-Paketen hinzu. GeoPandas bietet zwei Datenobjekte, GeoSeries und GeoDataFrame. Sowohl GeoSeries- als auch GeoDataFrame-Objekte können für die Verarbeitung räumlicher Daten verwendet werden, ähnlich wie bei räumlichen Datenbanken. Diese Ähnlichkeit erleichtert das Lesen und Schreiben in und aus einer räumlichen Datenbank (vgl. McKinney 2021).
- **SQLAlchemy/GeoAlchemy**  
SQLAlchemy ist eine Bibliothek, die die Kommunikation zwischen Python-Programmen und Datenbanken erleichtert. Zusammen mit der Datenbank API (DBAPI) Psycopg wird die Verbindung und der Datenaustausch mit der Datenbank bewältigt. GeoAlchemy 2 bietet Erweiterungen zu SQLAlchemy für die Arbeit mit räumlichen Datenbanken. Primär wird SQLAlchemy als ORM-Werkzeug (Object Relational Mapper) verwendet, das Python-Klassen in Tabellen auf relationalen Datenbanken übersetzt und Funktionsaufrufe automatisch in SQL-Anweisungen umwandelt (vgl. Bayer 2012). In dieser Anwendung übernimmt GeoPandas das Lesen aus der Datenbank und speichert die Daten in GeoDataframes anstelle von Klassen.
- **Plotly**  
Die Plotly Python-Bibliothek ist eine interaktive Open-Source-Bibliothek. Sie stellt Werkzeuge für die Datenvisualisierung zur Verfügung und ermöglicht in dieser Arbeit den Aufbau eines Dashboards. Plotly kann verschiedene Arten von Graphen und Diagrammen wie

Streudiagramme, Liniendiagramme, Balkendiagramme, Boxplots, Histogramme und Tortendiagramme darstellen. Der Vorteil von Plotly ist neben seiner einfachen Bedienbarkeit, die Tatsache, dass Plotly sowohl für Python als auch für JavaScript eine Bibliothek zur Verfügung stellt. Dies ermöglicht es, Graphen und Diagramme am Server zu erstellen, sie als JSON zu verpacken und an den Client zu schicken. Der Client kann mit Hilfe der JavaScript Plotly Bibliothek diesen Graphen oder Diagramm entpacken und an einer vorgeschriebenen Stelle auf der Seite visualisieren (vgl. Plotly Python Graphing Library 2021).

- **Safexl**

Safexl ist eine Erweiterung der Python Bibliothek pywin32. Diese Bibliothek mit Erweiterung ermöglicht es, Excel-Dateien sicher aufzurufen und nach Beenden des Prozesses ohne Rückstände zu schließen (vgl. Safexl 2021). Safexl wird in dieser Arbeit für die Implementierung der Alternativenprüfung benötigt. Diese Alternativenprüfung liegt als Excel-Datei vor.

#### **4.2.4. Webframework**

Ein Framework bietet ein Grundgerüst und einen Ordnungsrahmen für die Programmierung. Es kann als Code-Bibliothek angesehen werden, die für die Erstellung und Pflege von komplexen und dynamischen Websites geschrieben wurden. Dies erleichtert den Einstieg in die Programmierung (vgl. Crickard et al. 2018).

Zur Programmierung der Anwendung wird das in Python geschriebene Webframework Flask verwendet. Flask zielt darauf ab die Kernfunktionalität einfach, aber erweiterbar zu halten. Bestehende Bibliotheken können einfach integriert werden, um weitere Funktionalitäten zu erhalten. Der Fokus von Flask liegt auf der Erweiterbarkeit und der Dokumentation.

Flask hat zwei Haupt-Abhängigkeiten. Die Subsysteme für Routing, Debugging und Web Server Gateway Interface (WSGI) stammen von Werkzeug, während die Vorlagenunterstützung von Jinja2 bereitgestellt wird. Werkzeug und Jinja2 werden von dem Kernentwickler von Flask geschrieben. Es gibt in Flask keine native Unterstützung für den Zugriff auf Datenbanken, die Validierung von Webformularen, die Authentifizierung von Benutzern oder andere High-Level-Aufgaben. Diese und andere Dienste, welche die meisten Webanwendungen benötigen, sind über Erweiterungen verfügbar, die in die Kernpakete integriert werden (vgl. Grinberg 2014).

#### **4.2.5. Datenbank**

Für diese Anwendung wird eine PostgreSQL Datenbank mit der PostGIS Erweiterung als Back-End verwendet.

Diese Erweiterung fügt Unterstützung für geografische Objekte hinzu, wodurch Standortabfragen in SQL ausgeführt werden können.

Außerdem werden Funktionen, Operatoren und Indexerweiterungen integriert, die sich auf die räumlichen Typen beziehen. Diese zusätzlichen Funktionen, Operatoren, Indexbindungen und Typen erweitern die Leistungsfähigkeit des PostgreSQL-DBMS-Kerns und machen es zu einem funktionsreichen und robusten räumlichen Datenbankmanagementsystem.

### 4.3. Implementierung

In diesem Abschnitt wird die Realisierung der konzipierten WebGIS-Architektur in den gewählten Programmiersprachen beschrieben. Es wird auf die technische Umsetzung, die Komponenten, den Workflow und den Zweck der Module eingegangen, um einen Einblick in die Modularität der Webapplikation zu bekommen. Diese Hauptmodule/-funktionen werden über die Benutzeroberfläche von dem/der Anwender\*in gesteuert.

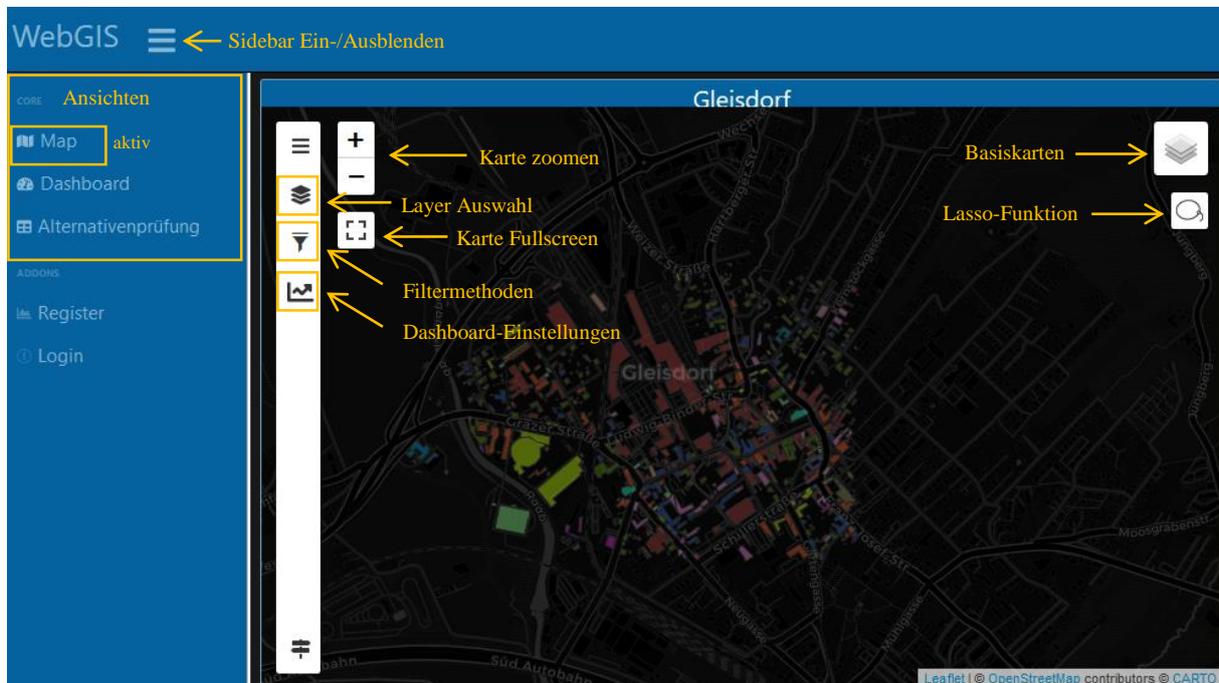


Abbildung 9: Benutzeroberfläche; Kartenansicht aktiv (Screenshot Webanwendung)

#### 4.3.1. Web-Karte

Die Darstellung einer Webkarte legt die Art und Weise fest, wie die kartierten Informationen von dem/der Benutzer\*in gesehen und interpretiert werden. Mit der Karte wird es ermöglicht, raumbezogene Daten mit ihren räumlichen Zusammenhängen darzustellen (vgl. Donohue 2014). Dies soll den Nutzern ermöglichen, Informationen leichter zu erfassen und räumliche Gegebenheiten zu erkennen. Dazu wird eine visuelle Hierarchie eingeführt und darauf geachtet, die Karte nicht zu überdesignen.

Für die technische Umsetzung der Implementierung der Karte wird Leaflet verwendet. Leaflet ist eine Open Source JavaScript-Bibliothek, die bei der Programmierung von interaktiven, webbasierten Karten unterstützt. Sie bietet eine Vielzahl an Komponenten und Bausteinen um eine individuelle Karte zu erstellen (vgl. Dorman 2020).

##### 4.3.1.1. Webservices

Die Webkarte wird aus mehreren Kartenschichten beziehungsweise Layern aufgebaut. Dabei wird auf mehrere Webservices/Webdienste gesetzt. Es wird hierbei unterschieden zwischen den externen Diensten und jenen Webservice, das in dieser Arbeit programmiert wurden.

Von externen Webdiensten können verschiedene Layer angefordert werden, um sie in der Karte einzubinden. Die Anforderung wird vom Client übernommen, der die Layer nach Erhalt zeichnet. Die Clientschicht kombiniert die Ebenen und ermöglicht es dem/der Endbenutzer\*in, ihre Sichtbarkeit oder Reihenfolge umzuschalten. In dieser Thesis werden Basiskarten von verschiedenen Webdiensten als WMTS angefordert und eingebunden. Diese Basiskarten dienen als Fundament der Kartendarstellung,

über welche die thematischen Daten als Vektorlayer gelegt werden. Diese übergelagerten Layer werden als interne Webservices zur Verfügung gestellt. Die Daten werden dazu je nach Anforderung aus der Datenbank ausgelesen und am Server der Webanwendung aufbereitet und gerendert. Der Server liefert anschließend diese Vektordaten als GeoJSON Datei an den Client.

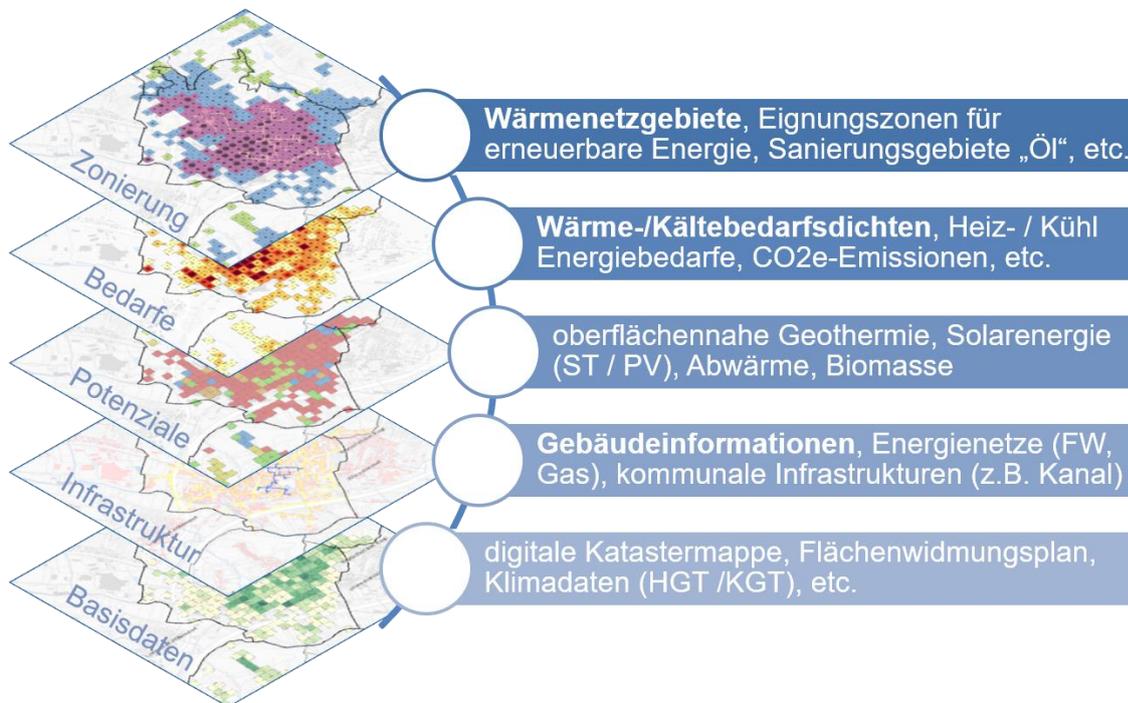


Abbildung 10: Layerebenen (Mauthner 2019)

In Abbildung 10 wird beispielhaft Dargestellt, welche Informationen als Layer überlagert werden können um räumliche Zusammenhänge zu erkennen.

Die Flexibilität dieses Modells erlaubt es den Anwender\*innen, ihre eigenen Karten zu erstellen, indem sie nur die für sie interessanten Ebenen auswählen, Kartenebenen von verschiedenen Servern integrieren sowie bei Bedarf lokale Daten verwenden.

Folgende Layer können in der Webkarte dargestellt werden (siehe Abbildung 11):

- **Externe Webservices**

- **Basiskarten von den Anbietern Basemap, Openstreet und CartoDB**  
Diese Basiskarten sind Rasterkarten in Form von vorgenerierten Kachel-Caches. Das bedeutet, die einzelnen Kacheln sind bereits vorgerechnet und ermöglichen dadurch ein schnelleres Laden und Zeichnen der Karte. Beim Laden der Karte werden nur jene Kacheln angefordert, die für den jeweiligen Ausschnitt benötigt werden. Die Rasterkarten stellen unterschiedliche Informationen dar. Diese reichen von einfachen Beschriftungen als Overlay bis hin zu detaillierten Verkehrsnetzen, Siedlungsstrukturen und Topografie.

- **Interne Webservices / thematische Kartenlayer**

- **Gebietsabgrenzung:** Zur Ersichtlichmachung des Untersuchungsgebietes werden einerseits die administrativen Grenzen als räumliche Kartenlayer bereitgestellt (Gemeinde und Katastralgemeindengrenzen der Stadtgemeinde Gleisdorf) sowie ich auszugsweise Informationen aus der digitalen Katastermappe (Flächenwidmungsplan,

Grundstücksgrenzen). Insbesondere die Grundstücksgrenzen sind für die Alternativenprüfung von besonderer Bedeutung, da sich die entsprechenden Berechnungen zu den klimafreundlichen Wärmeversorgungsoptionen auf diese räumliche Ebene beziehen. Dem/der Nutzer\*in können per Popup einerseits grundstücksgenaue Informationen bereitgestellt werden und darüber hinaus dienen die Grundstücksgrenzen als boundaries bei räumlichen Abfragen und Berechnungen.

- **Potentiale** Die in der Datenbank hinterlegten erneuerbare Energiepotentiale werden hauptsächlich für die integrierte Alternativenprüfung benötigt, jedoch bietet auch die Darstellung als Kartenlayer Möglichkeiten. Je nach Anwendungszweck wird dem/der Nutzer\*in sichtbar gemacht, welche Potentiale in den unterschiedlichen Gebieten dominieren und zugänglich sind. In dieser Thesis wurde das Potential des Erdreichs für die Wärmeversorgung visualisiert. Das Potential wird hierbei als Ampelkarte visualisiert. Es wird mittels Polygonen aufgezeigt, wo hohes Potential (grün), mittleres Potential (gelb) und kein Potential (rot) vorliegt.
- **Gebäude** Die Gebäude der Gemeinde Gleisdorf werden als Polygone visualisiert. Dies hat gegenüber einer Punktdarstellung den Vorteil, dass die Form und die relative Größe ersichtlich sind. Der Stil der Visualisierung kann an verschiedenen Attribute angepasst werden. Durch Einfärbung der Polygone wird eine Unterscheidung und Gruppierung der Gebäude beispielsweise nach Art der Gebäudenutzung oder klassifiziert nach der (absoluten oder spezifischen) Höhe des Heizwärmebedarfs ermöglicht. Weitere Informationen werden, wie bei den Grundstücksflächen, als Popupfenster dem/der Nutzer\*in präsentiert. Zu diesen Informationen zählen unter anderem Adresdaten, Informationen zur thermischen Qualität der Gebäudehülle, Informationen zum derzeitigen Heizungssystem und dem Brennstoff sowie zum Heizenergiebedarf des Gebäudes.

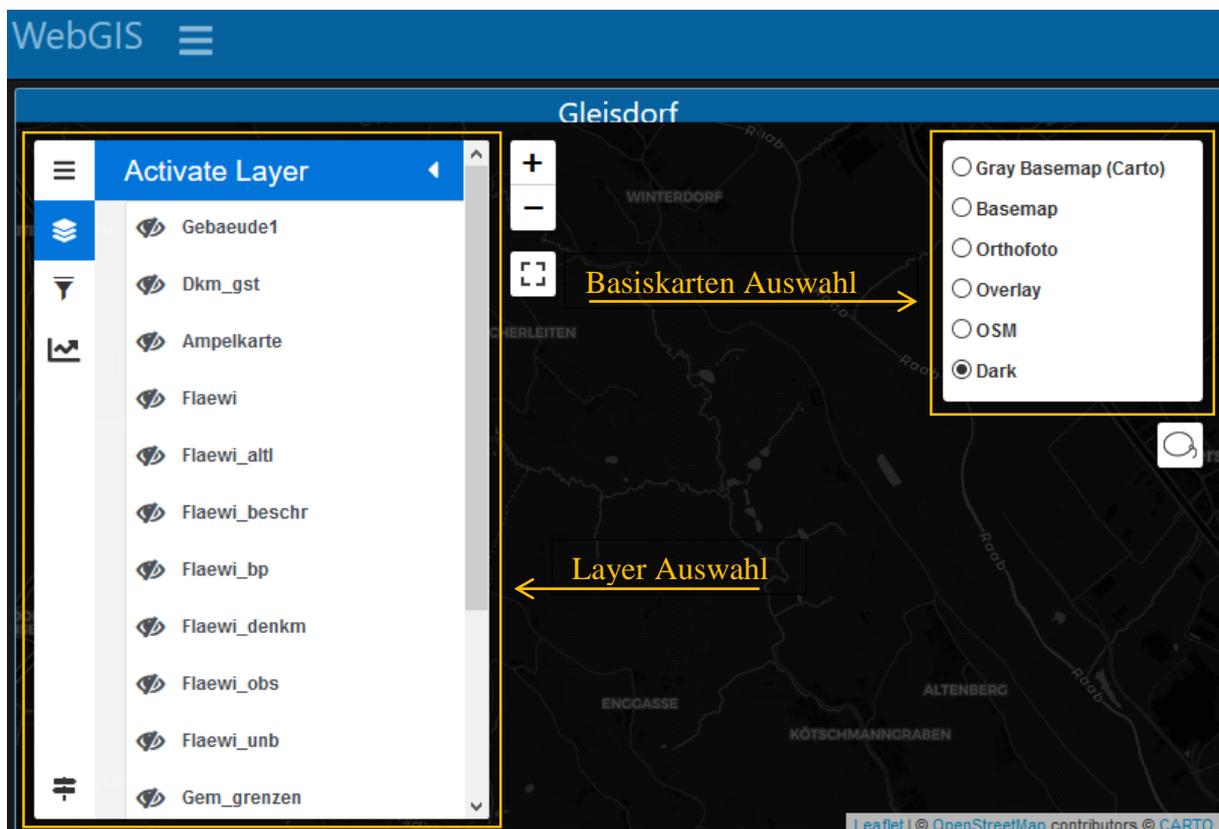


Abbildung 11: Webservices (Screenshot Webanwendung)

Diese Informationen sind für die räumliche Energieplanung von hoher Wichtigkeit, da sie die strategische Planung von Konzepten zur Optimierung der Wärmeversorgung ermöglichen. Um die Gebäude nach ihren Eigenschaften und Funktionen zu klassifizieren und zu unterteilen, kommt eine weitere Methode zum Einsatz.

### 4.3.2. Filtermethoden

Als Filtermethode wird eine Methode verstanden, die dem/der Anwender\*in hilft, die für Ihn/Sie wichtigen Gebäudeinformationen sichtbar zu machen. Es werden Daten nach vorgegebenen Kriterien überprüft. Zu diesen Kriterien zählen die Eigenschaften der Daten und ihre räumliche Lage. Jene Daten, die den Kriterien entsprechenden, werden weiterverarbeitet und dem/der Nutzer\*in präsentiert.

Diese Filtermethoden steuern, welche Daten auf der Karte visualisiert werden und welche Daten statistisch ausgewertet und im Dashboard angezeigt werden.

In der Benutzeroberfläche wurden hierfür Selektionsmethoden programmiert um dem/der User\*in eine Möglichkeit zu bieten, die Daten nach unterschiedlichen Kriterien zu filtern. Die Filterung kann hierbei unterschieden werden in Selektieren nach Attributen oder der räumlichen Selektion.

#### 4.3.2.1. Selektion nach Attributen

Bei der Selektion nach Attributen werden Daten nach ihren Eigenschaften unterschieden und ausgewählt. Für die räumliche Energieplanung wurde in dieser Arbeit der Fokus auf die Eigenschaften der Gebäude gelegt. Die implementierten Filtermethoden steuern somit, welche Gebäude selektiert werden. Es wurde für die Anwendung folgende Selektionen nach Attributen eingerichtet.

- Filter nach Energieträger

Um alle möglichen Energieträger aufzulisten, wird beim erstmaligen Laden der Anwendung in der Datenbank überprüft, welche Energieträger zur Auswahl stehen. Aus dieser Auswahl wird anschließend serverseitig eine Dropdownliste erstellt, in der die einzelnen Energieträger zur Option stehen. Die Dropdownliste wird daraufhin in die HTML Vorlage eingebunden und dem/der User\*in clientseitig in der Benutzeroberfläche zur Verfügung gestellt. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass auch bei Änderung der Datenbank alle möglichen Energieträger zur Auswahl stehen.

Diese Methode selektiert alle Gebäude, welche diesen Energieträger als Attribut aufweisen.

- Schieberegler

Ähnlich wie bei der Selektion nach dem Energieträger werden auch die Schieberegler dynamisch aus den Daten der Datenbank erstellt. Mit den Schieberegler wird, im Gegensatz zur Dropdownliste, nicht ein einzelner Wert gefiltert, sondern ein Bereich. Die Schieberegler kommen bei der Bereichsdefinition von Baujahr, Bruttogeschossfläche und Heizwärmebedarf der Gebäude zum Einsatz.

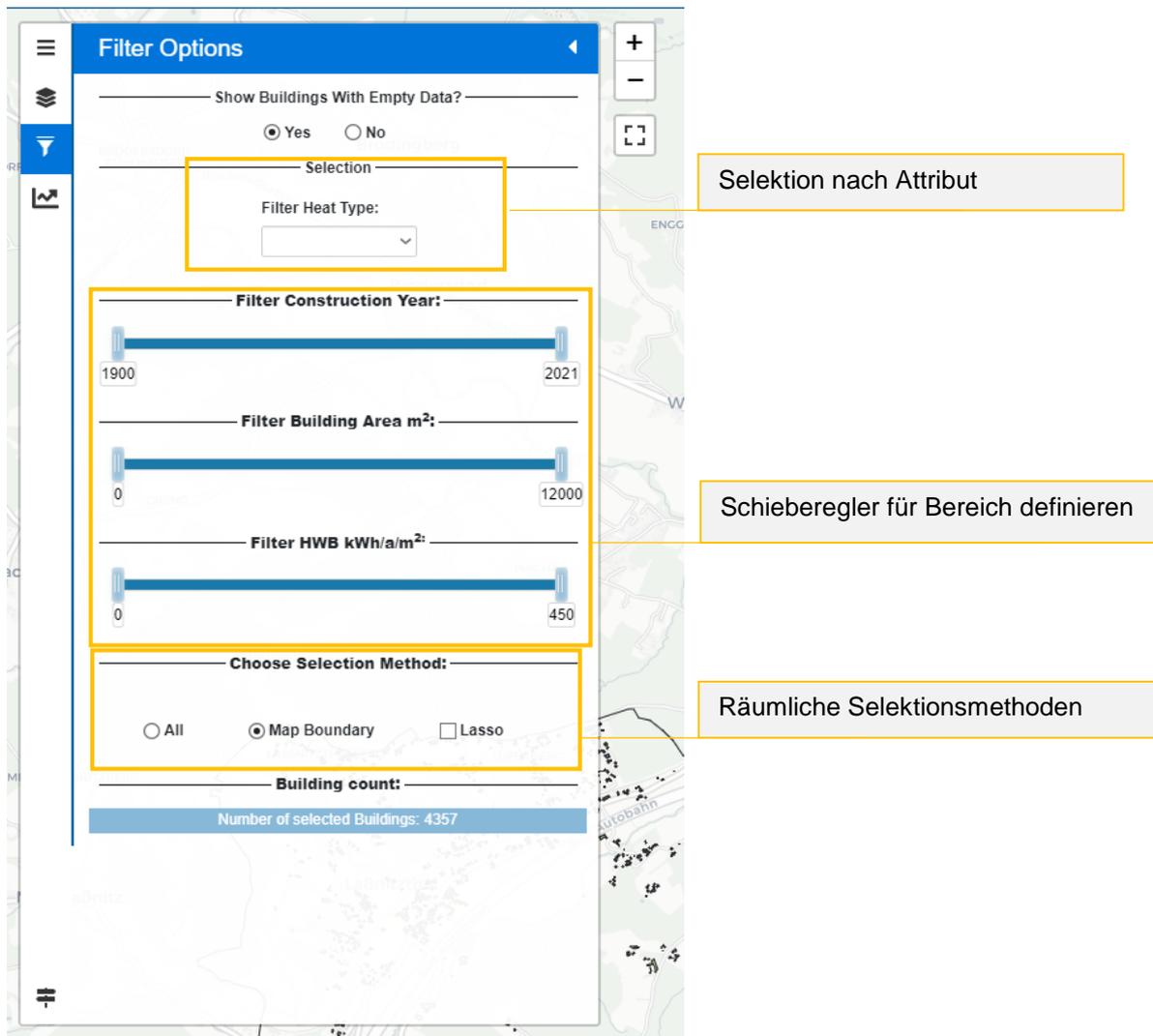


Abbildung 12: Filteroptionen (Screenshot Webanwendung)

#### 4.3.2.2. Räumliche Selektion

Bei der räumlichen Selektion werden die Daten nach ihrer räumlichen Lage gefiltert. Dazu wird ein Gebiet oder eine räumliche Ausdehnung definiert und überprüft, welche Daten innerhalb dieser Definition verortet sind. Die räumliche Selektion wird in Kombination mit der Filterung nach Eigenschaften ausgeführt. Dies führt zu einer performanteren Abfrage der Daten, da nicht mehr alle Daten in der Datenbank auf gewisse Eigenschaften überprüft werden müssen.

Dem/der Anwender\*in werden in dieser Applikation drei Optionen zur räumlichen Selektion zur Auswahl gestellt.

- Keine räumliche Selektion

Bei dieser Auswahl wird keine räumliche Abfrage definiert. Es werden somit alle Daten im Projektgebiet nach den definierten Attributen gefiltert.

- Selektion nach Kartenbegrenzung

Bei dieser Methode wird der für den/die User\*in sichtbare Bereich der Karte als Gebiet definiert, das für die Selektion verwendet wird. Dazu werden die Eckkoordinaten der Kartenbegrenzung zusammen mit den Filtereinstellungen nach Attributen an den Server geschickt. Durch die Koordinaten und den

attributiven Kriterien kann sowohl eine räumliche als auch eine attributive Selektion in der Datenbank vorgenommen werden.

Ist diese räumliche Selektionsmethode aktiv, werden bei Veränderung des Kartenausschnitts durch den/die User\*in, die Daten der neuen Kartenbegrenzung wiederholt geladen.

- Selektion mit Polygon

Dem/der User\*in wird mit dieser Methode ermöglicht einen Bereich zu definieren, für den er/sie eine Selektion starten will. Dies ermöglicht es Areas of Interest (Aoi) selbst zu definieren und in der Karte einzuzichnen (siehe Abbildung 13). Diese Funktion wird mit der Leaflet Funktion „Lasso“ ermöglicht. Die gezeichneten Koordinaten werden in einer Variabel gespeichert und können so samt anderen Parametern an den Server übergeben werden.



Abbildung 13: Selektion mit Lasso-Funktion (Screenshot Webanwendung)

#### 4.3.2.3. Prozess der Filterung

Das Verfahren der Filterung betrifft alle Schichten und dient zur Selektion der Daten, zur Kartenvisualisierung und zum Berechnen der Statistik für gewählte Gebiete und/oder für Gebäude mit bestimmten Eigenschaften. Die Parameter der Filtermethode werden von dem/der User\*in selbst gewählt und bieten so jeweils ein individuelles Karten- und Dashboardbild.

Ausgelöst wird der Prozess bei jeder Änderung der Filterparameter oder auch bei verschieben des Kartenbilds bei der Einstellung „Selektion nach Kartenbegrenzung“. Dies ermöglicht eine dynamische Karten- und Dashboard Erscheinung.

Wird der Prozess gestartet, werden alle Parameter aus den verschiedenen Filtereinstellungen ausgelesen und als HTTP GET Request an den Server gesendet. Dazu dient AJAX. Da es sich um einen asynchronen Prozess handelt kann der/die User\*in weiter mit dem Seiteninhalt interagieren. Die am Server programmierte REST API kann die Anfrage empfangen und die mitgelieferten Parameter auslesen. Anhand der verwendeten Adresse der Anfrage, weiß die Schnittstelle, welche Arbeitsprozesse durchgeführt werden müssen und was der Client als Antwort erwartet. Um mit der

Datenbank zu interagieren, wird aus den ausgelesenen Parametern eine SQL-Abfrage generiert. Der Server stellt sodann eine Verbindung zur räumlichen Datenbank her und übergibt die Abfrage. Dieser Arbeitsschritt wird vom Datenbank Server übernommen. Die Daten werden je nach Anweisung nach räumlichen und attributiven Ausprägungen selektiert und an den Server als Tabelle retourniert. Diese Tabelle mit Geometriedaten wird am Anwendungsserver mit Hilfe von GeoPandas in eine Geodataframe umgewandelt, um weiter Operationen in Python durchzuführen. Für die Berechnung der Statistik werden einzelne Spalten aus dieser Dataframe ausgelesen und als Parameter für die Funktionen zur Erstellung der Grafiken und Diagramme für das Dashboard übergeben. Hierzu dient die Python Bibliothek Plotly (nähere Informationen zum Dashboard in Kapitel 4.3.3 Dashboard). Um die erstellten Diagramme, Grafiken und Kartenlayer an den Client zu retournieren werden die einzelnen Objekte in eine JSON-Datei gepackt. Diese JSON-Datei beinhaltet somit weitere JSON-Dateien, in denen die Grafiken verpackt sind und eine GeoJSON-Datei, welche den Kartenlayer beinhaltet.

Der Client erhält diese verschachtelte JSON-Datei und entpackt diese. Die GeoJSON-Datei wird von Leaflet ausgelesen und überzeichnet den vorherigen Gebäudelaye mit dem neuen.

Die verpackten Grafiken werden von Plotly.js entpackt. Durch die mitgesendete Bezeichnung und Metadaten werden die Grafiken im Dashboard zugeordnet und die alten Diagramme ersetzt (siehe Abbildung 14).

Da dieser Prozess asynchron und kein neues Laden der Seite erfordert, kann der/die Anwender\*in währenddessen weiterhin mit der Seite interagieren.

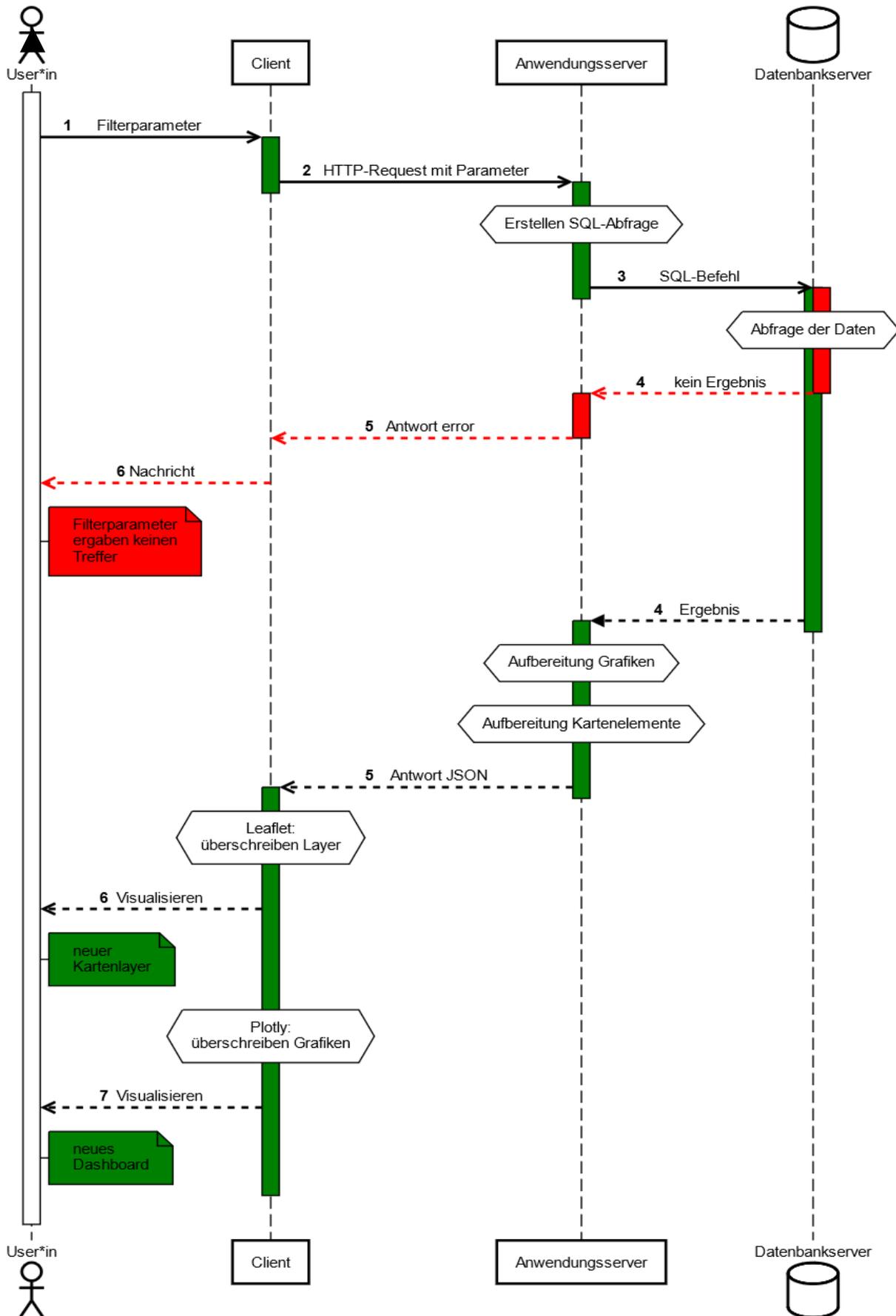


Abbildung 14: Sequence Diagramm Filterprozess

### 4.3.3. Dashboard

Mit Hilfe des Dashboards wird es ermöglicht, die in der Datenbank hinterlegten Daten in einem Kontext darzustellen. Durch diesen Kontext werden aus den Daten Informationen rekonstruiert oder abgeleitet die für den/die Anwender\*in verständlich sind.

In der entwickelten Anwendung sind vier Grafiken implementiert, die zusammen den visualisierten Teil des Dashboards bilden (siehe Abbildung 15). Gesteuert werden diese Grafiken über die in Kapitel 4.3.2.3 beschriebenen Filtermethoden. Je nach Fragestellung können somit aus den Daten verschiedene Informationen als dynamisches Diagramm oder Grafik visualisiert werden.

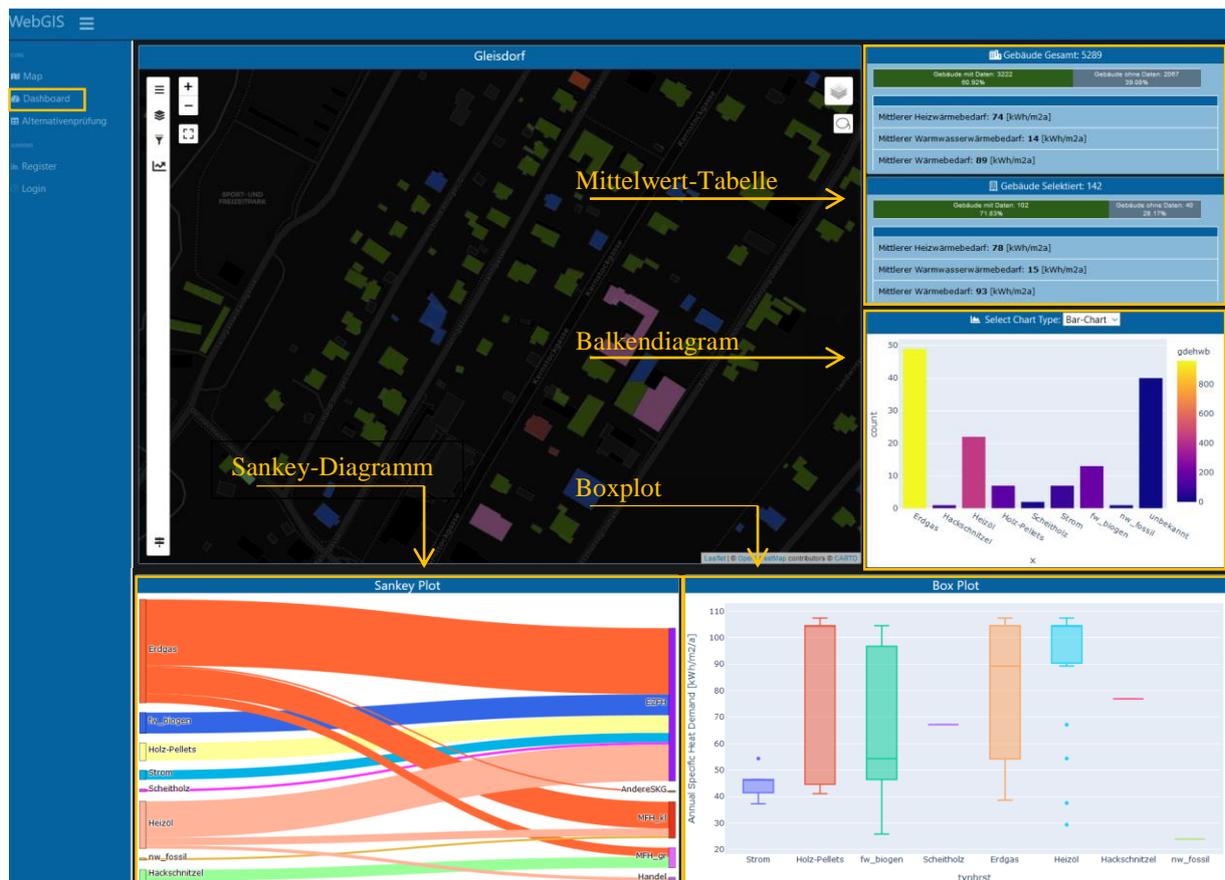


Abbildung 15: Dashboard Ansicht (Screenshot Webanwendung)

Für die Konstruktion der einzelnen Diagramme wurden Funktionen programmiert, die am Anwendungsserver ausgeführt werden. Diese Funktionen benötigen verschiedene Parameter um die Diagramme zu zeichnen. Zu diesen Parametern zählen die Daten und Anweisungen des/der Users\*in, wie die Daten dargestellt werden sollen.

Der Prozess der Grafikerstellung ist dabei stark an den Prozess der Filtermethode gekoppelt. Für das Dashboard werden jene Daten genutzt, die von der Datenbank, als Ergebnis der Selektion, an den Anwendungsserver retour gegeben werden (siehe Abbildung 14; Schritt 4). Die fertigen Grafiken und Diagramme werden als JSON-File verpackt und an den Client geschickt. Somit werden bei jeder Änderung der Filterung neben dem Kartenbild auch die Diagramme des Dashboards an die selektierten Daten angepasst.

Im Folgenden werden die Aufbereitung und der Nutzen der programmierten Grafiken und Diagramme beschrieben.

#### 4.3.3.1. Mittelwert Tabelle

Diese Grafik besteht aus zwei Bereichen. Der obere Bereich stellt die mittleren Wärmeenergiekennzahlen der Gebäude der gesamten Region dar, der untere Bereich jene der selektierten Bauwerke. Für beide Tabellen wird angegeben, um wie viele Gebäude es sich handelt und welche davon Daten zur Wärmeenergie aufweisen (siehe Abbildung 16).



Abbildung 16: Mittlere Wärmeenergiekennzahlen (Screenshot Webanwendung)

In den Tabellen der einzelnen Bereiche werden folgende spezifische Wärmeenergiekennzahlen <sup>[2]</sup> der Gebäude dargestellt:

- Mittlerer spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/m2a]
- Mittlerer spezifischer Warmwasserwärmebedarf [kWh/m2a]
- Mittlerer spezifischer Wärmebedarf [kWh/m2a]
- Mittlerer spezifischer Heizenergiebedarf [kWh/m2a]
- Mittlerer spezifischer Heiztechnikenergiebedarf [kWh/m2a]
- Mittlere spezifischer CO<sub>2</sub>e Emission [kg/m2a]

<sup>2</sup> Bei den ausgewiesenen Ergebnissen handelt es sich um in der Energie- und Gebäudetechnik gängige spezifische (flächenbezogene) Kennzahlen, die einen Vergleich von Energiebedarfen und korrespondierenden Treibhausgasemissionen von Gebäuden unterschiedlicher Größe ermöglichen. Zur Ermittlung wird der absolute Gebäude-Wärmebedarf in kWh/a durch die jeweilige beheizte Brutto-Geschoßfläche (BGF) des Gebäudes dividiert und man erhält den flächenbezogenen Gebäude-Wärmebedarf in kWh/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>-a. Diese Kennzahl dient Energie- und Gebäudetechnikern als wichtiger Indikator zur Bewertung der Energieeffizienz bzw. der Qualität der Gebäudehülle sowie in weiterer Folge zur Ermittlung der gebäudespezifischen Treibhausgasemissionen in kgCO<sub>2</sub> äquivalente pro Jahr (kgCO<sub>2</sub>e/a). Effiziente Gebäude im Neubau erreichen beispielsweise spezifische Wärmebedarfe (Raumwärme + Brauchwarmwasser) von 40-60 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>-a wohingegen ältere Gebäude mit schlechter ohne fehlender Wärmedämmung 150 und bis zu 300 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>-a benötigen.

Durch das Gegenüberstellen der Werte für die gesamte Gemeinde und der Selektion erhält der/die Anwender\*in die Information, ob der gewählte Bereich ober oder unter dem Gemeindedurchschnitt bei den einzelnen Kennzahlen liegt.

Die Tabellen werden für beide Bereiche durch die gleichen Funktionen generiert. Der Unterschied besteht darin, dass die Berechnung der Statistik für den gesamten Gemeindebereich einmalig, für alle Gebäude, beim Aufrufen der Anwendung, stattfindet. Bei den selektierten Bereichen hingegen werden die Grafiken bei jedem Ausführen der verschiedenen Filtermethoden für die selektierten Gebäude berechnet.

Wie schon in Kapitel 4.3.2 erwähnt, werden jene Daten, die den Kriterien der Selektion entsprechen, aus der Datenbank abgefragt und in eine Geopandas Dataframe überführt.

Aus dieser Dataframe werden die jeweiligen Mittelwerte berechnet und in Variablen gespeichert. Dabei unterstützt die Python Bibliothek numpy. Die Mittelwerte dienen als Parameter für die programmierte Funktion zur Erstellung der Tabelle. In dieser Funktion wird mittels Plotly die Tabelle samt Layout erstellt und in ein JSON-File verpackt.

Für die Berechnung, wie viele Gebäude mit und ohne Informationen in diesem Datensatz liegen, wird zuerst die Länge der Dataframe ausgegeben. Dies gibt Aufschluss darüber, wie viele Gebäude selektiert wurden. Um zu erfahren, welche Gebäude Informationen zum Wärmebedarf aufweisen, werden jene Reihen mit Einträgen gezählt. Die Differenz aller Gebäude und jene mit Informationen ergeben die Bauwerke die keine Informationen aufweisen. Anhand dieser Informationen wird ein gestapeltes, horizontales Balkendiagramm erstellt.

#### 4.3.3.2. Kreis-/Balkendiagramm

Bei dieser statistischen Auswertung werden die Daten nach einer auswählbaren Kategorie gruppiert und summiert. Der/die User\*in hat in der Benutzeroberfläche die Möglichkeit die Kategorie zu wählen nach der gruppiert werden soll und ob das Ergebnis als Kreisdiagramm oder als Balkendiagramm dargestellt werden soll. Als Kategorie kann zwischen Nutzung des Gebäudes, Baujahr, Energieträger und Sanierungsstatus gewählt werden.

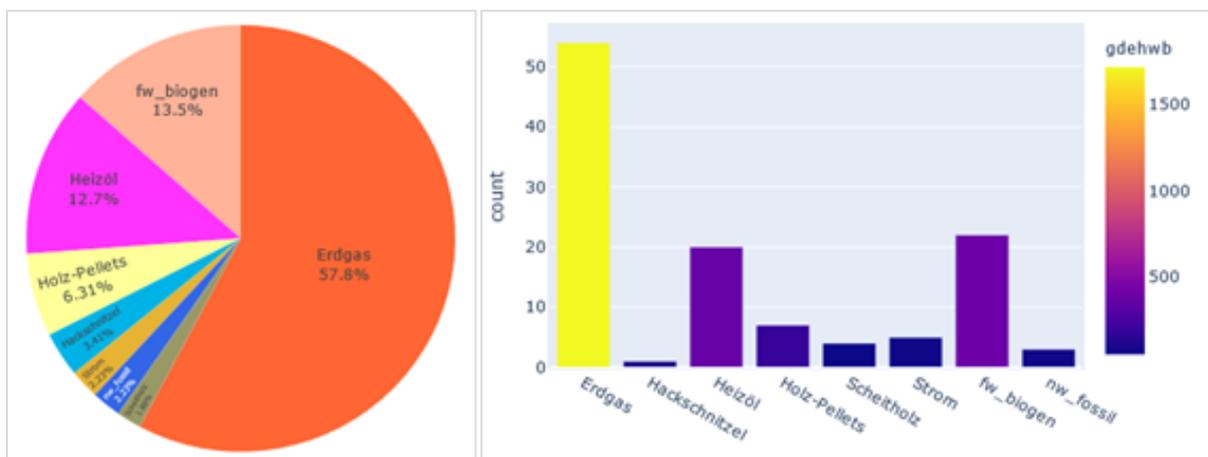


Abbildung 17: Kreis-/Balkendiagramm (Download Webanwendung)

Sowohl beim Kreisdiagramm als auch beim Balkendiagramm wird für die gewählte Kategorie der Heizwärmebedarf pro Jahr aufsummiert. Für die Darstellung wird beim Kreisdiagramm der Heizwärmebedarf als Segment mit prozentuellem Anteil des Gesamtbedarfs dargestellt (siehe Abbildung 17, links). Wird die Maus über das Kreissegment gesteuert kann die Anzahl der gruppierten Kategorie abgelesen werden. Das Balkendiagramm visualisiert den Heizwärmebedarf als Farbverlauf. Die Länge der Balken gibt die Anzahl der Gebäude, die in diese Kategorie fallen, an (siehe Abbildung 17, rechts).

### 4.3.3.3. Box-Plot

Der Box-Plot oder auch Box-Whisker-Plot genannt, zeigt die Verteilung einer Merkmalsausprägung an und ist ein wichtiger Lageparameter in der Statistik. Dargestellt als Box beinhaltet die Darstellung den Median Q2 (= *Mitte* eines Datensatzes) sowie das 25%-Quantil Q1 (= Wert, für den gilt, dass 25 % aller Werte der betrachteten Datenreihe kleiner sind als dieser Wert) und das 75%-Quantil Q3 (= Wert, für den gilt, dass 75 % aller Werte kleiner sind als dieser Wert). Werte außerhalb dieses Bereichs werden mit der Antenne (Whisker) dargestellt. Die Länge der Whisker wird auf maximal das 1,5-Fache des Interquartilsabstands (IQA = Q3-Q1) beschränkt. Werte außerhalb der Whisker bezeichnet man als Ausreißer und sind als Punkte dargestellt (vgl. Lane 2008).

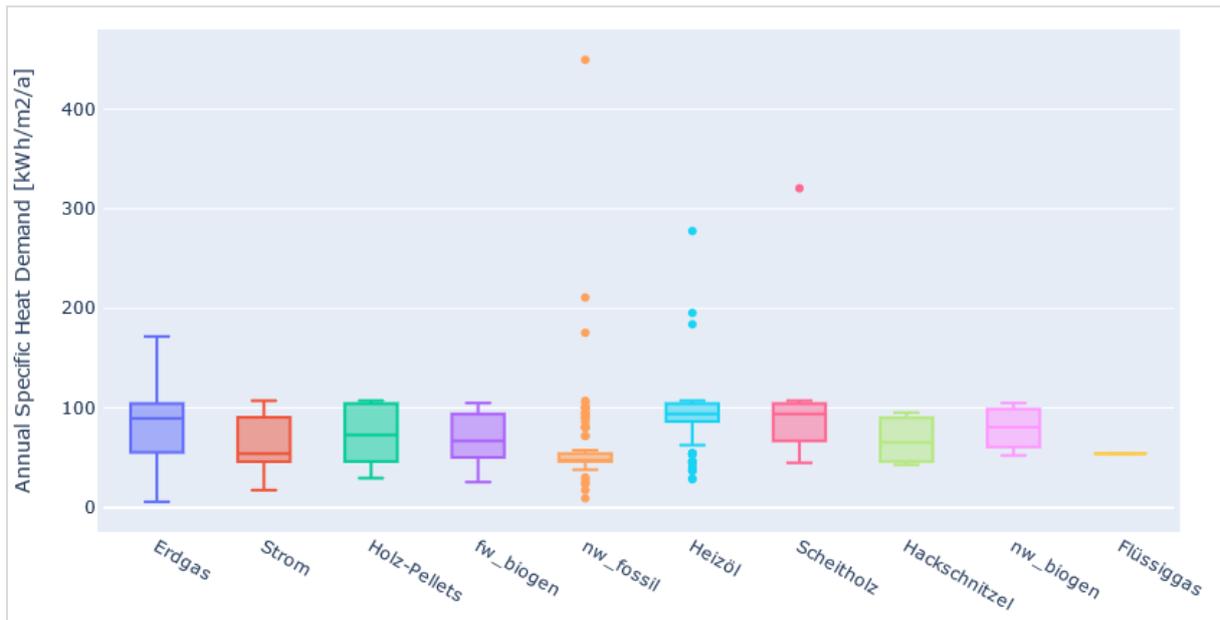


Abbildung 18: Boxplotdiagramm (Download Webanwendung)

In dem Dashboard des WebGIS ist ein Box-Plot-Diagramm implementiert, das dem/der Anwender\*in die Verteilung des jährlich, spezifischen Heizwärmebedarfs der Gebäude in Kilowattstunden anzeigt. Die Gebäude können hierbei gleich wie beim Kreis- und Balkendiagramm in Kategorien unterteilt werden, um Aussagen darüber zu treffen, ob verschiedenen Bauwerkstypen Unterschiede beim Heizwärmebedarf aufweisen (siehe Abbildung 18).

Die Python Bibliothek Plotly benötigt zum Erstellen dieses Diagramms Daten zum Heizwärmebedarf sowie die von dem/der Benutzer\*in gewählte Kategorie.

### 4.3.3.4. Sankey-Diagramm

Ein Sankey-Diagramm stellt Mengenflüsse graphisch dar. In der entwickelten Anwendung wird die Menge an Energie visualisiert, die benötigt wird um den Heizwärmebedarf von Gebäudetypen zu decken. Dabei wird dargestellt, welcher Energieträger die Heizwärme bereitstellt und wie dieser auf die verschiedenen Gebäude, gruppiert nach Nutzung, verteilt ist. Für das Kreieren des Sankey Diagramms werden drei Informationen zu jedem Gebäude benötigt:

- Verwendeter Energieträger
- Heizwärmebedarf pro Jahr [kWh/Jahr]
- Nutzung des Gebäudes

Der Energieträger bildet beim Sankey-Diagramm die Quelle und die Gebäudetypologie die Senke. Jede Kombination von Quelle und Senke ist ein Strang im Diagramm. Die Stärke des Strangs wird durch die Summe des Heizwärmebedarfs der Gebäude dargestellt, welche die Kombination von Quelle und

Senke aufweisen. Die Menge an bereitgestellter Energie pro Energieträger wird durch die Summe der ausgehenden Stränge ermittelt. Andersrum wird die Menge an Energie für die Deckung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden, gegliedert nach Nutzung, über die Summe der eingehenden Stränge analysiert (siehe Abbildung 19).

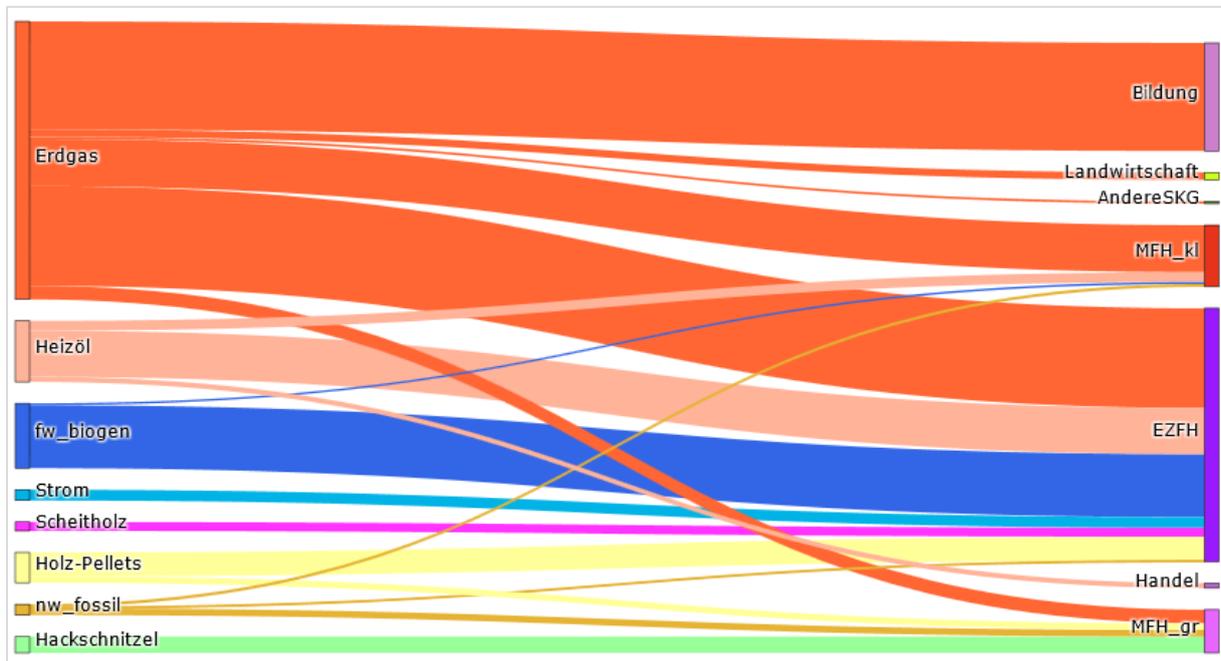


Abbildung 19: Sankey-Diagramm (Download Webanwendung)

Wie bei den anderen Grafiken, werden die Daten für das Diagramm durch die Selektion des/der Users\*in bestimmt. Der/die Anwender\*in kann durch die selbst definierten Bereiche erkennen, wie hoch der Heizwärmebedarf ist und durch welche Energieträger dieser gedeckt wird.

#### 4.3.4. Alternativenprüfung

Die Grundlagen zur Alternativenprüfung sind in Kapitel 2.3 erläutert. Die Entwicklung einer Berechnungsmethodik bzw. der Berechnungsalgorithmus für die Alternativenprüfung war nicht Gegenstand der Thesis, sondern basiert auf einer umfangreichen Excel Berechnung, die im Rahmen des Projektes S/E/P entwickelt wurde. Das vorliegende Kapitel fokussiert daher auf die Vorgehensweise bei der Implementierung des verfügbaren Berechnungstools in die WebGIS Anwendung. Darüber hinaus ist der daraus resultierende Nutzen für Anwender\*innen beschrieben.

##### 4.3.4.1. Methodik

Bei der realisierten Alternativenprüfung werden konventionelle, fossile Wärmeversorgungsoptionen basierend auf Erdöl, Erdgas und Strom (Stromdirektheizungen) klimafreundlichen Wärmeversorgungsoptionen basierend auf Biomasse, oberflächennaher Geothermie oder Solarstrahlung gegenübergestellt (vgl. Hofer 2020).

Wie in den Studien von Dodgson et al. (2009) und Wang et al. (2009) diskutiert, sollten von der Definition des Problems bis zum gewünschten Ergebnis der Entscheidungsanalyse vier Hauptschritte befolgt werden (siehe Abbildung 20).

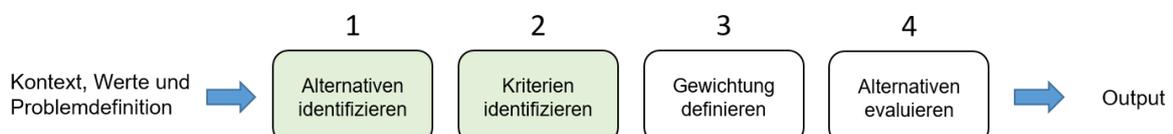


Abbildung 20: Hauptschritte einer MCDA (In Anlehnung an Cajot et al. 2017)

**Schritt 1: Alternativen identifizieren**

Die Alternativen können anhand der verfügbaren Daten und den Vorgaben der AEE INTEC identifiziert werden. Diese wären für das Untersuchungsgebiet Gleisdorf folgende:

- Pelletskessel
- Stückgutkessel
- Hackgutkessel
- Luft/Wasser Wärmepumpe
- Sole/Wasser Wärmepumpe (Flachkollektor)
- Sole/Wasser Wärmepumpe (Tiefensonde)
- Grundwasser Wärmepumpe
- Nahwärme (erneuerbar)
- Nahwärme (hocheffiziente KWK)

**Schritt 2: Kriterien identifizieren**

Aus der Literatur ist ersichtlich, dass vor allem drei Faktoren bei der Wahl der Wärmerversorgung von Bedeutung sind - ökonomische, ökologische und technische (vgl. Kranzl et al. 2018; Themeßl 2018, Yang et al. 2018). Zu diesen drei Faktoren kommt in dieser Arbeit noch der räumliche Faktor hinzu. Durch die Bindung an technischen sowie örtlichen Kriterien, kann nicht überall jedes Heizsystem eingesetzt werden (vgl. Themeßl 2018). Somit ist die räumliche Eignung eines der wichtigsten technischen Kriterien, die bei der standortgenauen Alternativenprüfung evaluiert wird.

Des Weiteren fließen die Anforderungen der OIB in die Kriterien ein (siehe Definition und Richtlinien).

*Tabelle 2: Grundfaktoren für Wärmeversorgung*

<b>Wirtschaftliche Faktoren</b>	<b>Technische Faktoren</b>	<b>Ökologische Faktoren</b>
Investitionskosten	Leistung	Treibhausgasemissionen
Energiekosten	Lokale Verfügbarkeit	Primärenergiebedarf
betriebsgebundene Kosten	Räumliche Konflikte	
Energiepreissteigerung		
CO2-Folgekosten		
Förderungen		
Betrachtungszeitraum		
Kalkulationszinssatz		
Restwerte und Ersatzinvestitionen		

Bei der lokalen Verfügbarkeit wird überprüft, ob folgende erneuerbarer Energieressourcen für ein bestimmtes Gebiet geeignet sind:

- Solarpotential: Globalstrahlung auf Gebäudehülle oder Freiflächen
- oberflächennahe Geothermie (inkl. Grundwasser)
- Nah- und Fernwärme
- Biomasse
- Abwärme

Die räumlichen Konflikte teilen sich in Rechtliche und Technische.

**Rechtliche:** z.B.: Wasserschutzgebiet, Feinstaubschutzgebiet, Altstadtschutzzone, Schallemissionsgrenzwerte

**Technische:** z.B.: Leistungsbedarf übersteigt technisches Potential, Energiebedarf übersteigt technisches Potential, Verschattung (Photovoltaik und Solarthermie nicht geeignet), Durchfluss zu gering oder chemische Signatur des Grundwassers ungeeignet für Grundwasserwärmepumpen, Anlieferung von Biomasse nicht möglich.

### **Schritt 3: Gewichtung definieren**

Die Gewichtung der einzelnen Kriterien wird durch die im Projekte S/E/P entwickelte Methode übernommen. Diese Methode wurde nach den Anforderungen des Land Steiermark und den Vorgaben der OIB Richtlinie entwickelt (siehe Kapitel 2.3).

### **Schritt 4: Alternativen evaluieren**

Die Ergebnisse müssen von dem/der Anwender\*in selbst evaluiert werden. Dazu werden ihm/ihr als Ergebnis mehrere Tabellen zur Verfügung gestellt, die Auskunft darüber geben, wie die entsprechenden alternativen Wärmeversorgungssysteme unter ökologischen und ökonomischen Aspekten eingestuft wurden.

#### **4.3.4.2. Alternativenprüfung des Projektes S/E/P**

Die Alternativenprüfung des Projektes S/E/P wurde noch nicht veröffentlicht und befindet sich zum Zeitpunkt des Schreibens in der Entwicklungsphase. Für diese Thesis liegt eine lauffähige Prototypversion vom 12.Juni.2020 als Excel-Datei vor.

Diese Excel-Datei bietet eine Vielzahl an Parameter, um ein präzises Ergebnis zu erzielen. Für die Umsetzung in der Webanwendung wurden einige Parameter übernommen, um sie dem/der Anwender\*in über die Benutzeroberfläche zur Manipulation zur Verfügung zu stellen. Andere Parameter werden als Standardwerte definiert, die über die Anwendung nicht veränderbar sind. Ebenfalls wird in der Webapplikation die Möglichkeit geboten über die Karte, Gebäudedaten direkt in die Eingabemaske der Alternativenprüfung zu übertragen. So wird versucht die Eingabe einfach zu halten und dennoch ein gutes Ergebnis zu erwirken. In der folgenden Abbildung ist ersichtlich, welche Parameter über die Eingabemasken zu editieren sind und welche davon zusätzlich automatisch aus den in der Datenbank hinterlegten Gebäudedaten befüllt werden können (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Parameter Alternativenprüfung

Kategorie	Bezeichnung		Optionen	Datenbank	
Eckdaten	Gebäudeart		<ul style="list-style-type: none"> <li>Text</li> </ul>	✓	
	Adresse		<ul style="list-style-type: none"> <li>Text</li> </ul>	✓	
	Baujahr		<ul style="list-style-type: none"> <li>Jahr</li> </ul>	✓	
	Bruttogeschossfläche		<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl [m2]</li> </ul>	✓	
Potential	Solar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja</li> <li>Nein</li> </ul>	Solar Kollektorfläche	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl [m2]</li> </ul>	✓
		Solarthermie Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl [kWh/a]</li> </ul>	✓	
		PV Leistung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl [kWp]</li> </ul>	✓	
		Pv Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl [kWh/a]</li> </ul>	✓	
	Erdreich		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	✓	
	Grundwasser		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	✓	
	Außenluft		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	x	
	Biomasse		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	x	
	Nah-/Fernwärme		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	✓	
	Bestandsgebäude	Anlass Alternativenprüfung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Sanierung</li> <li>Neubau</li> </ul>	x
Energieträger		<ul style="list-style-type: none"> <li>Öl</li> <li>Gas</li> <li>Strom</li> <li>Biomasse</li> <li>Sonstiges</li> </ul>	✓		
Wärmebereitstellung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Öl-Kessel</li> <li>Gas-Kessel</li> <li>Strom-Direktheizung</li> <li>Biomasse-Kessel</li> <li>Sonstiges</li> </ul>	x		
Verteilleitungen		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	x		
Verteilleitungen sanierungsbedürftig		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	x		
Heizraum vorhanden		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	x		
Lagerraum vorhanden		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ja / Nein</li> </ul>	x		
Energiedaten		Gebäudekategorie		<ul style="list-style-type: none"> <li>Wohngebäude mit einer oder zwei Nutzungseinheiten</li> <li>Wohngebäude mit drei bis neun Nutzungseinheiten</li> <li>Wohngebäude mit zehn und mehr Nutzungseinheiten</li> </ul>	✓
	Bruttogeschossfläche		<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl [m2]</li> </ul>	✓	
	Heizwärmebedarf		<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl [kWh/a]</li> </ul>	✓	
	Anzahl Obergeschosse		<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl</li> </ul>	✓	
	Dachform		<ul style="list-style-type: none"> <li>Pultdach - Orientierung S,W,O</li> <li>Sonstiges</li> </ul>	x	
	Raumheizung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Öl-Kessel</li> <li>Gas-Kessel</li> <li>Strom-Direktheizung</li> <li>Biomasse-Kessel</li> </ul>	x	
	Warmwasserbereitung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Zentral mit Heizung (2-Leiter)</li> <li>Zentral mit Heizung (4-Leiter)</li> <li>Elektroboiler</li> <li>WP-Boiler</li> </ul>	x	

Realisierbarkeit	Wärmeverteilsystem		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hochtemperaturheizkörper &gt; 40°C</li> <li>● Niedertemperaturheizkörper ≤ 40°C</li> <li>● Fußbodenheizung</li> <li>● Fan Coil Hochtemperatur &gt; 40°C</li> <li>● Fan Coil Niedertemperatur ≤ 40°C</li> <li>● Zweileitersystem Hochtemperatur &gt; 50°C</li> </ul>	x
	Ausschlussgrund	W/W Wärmepumpe	● Ja / Nein	x
		S/W Wärmepumpe	● Ja / Nein	x
		L/W Wärmepumpe	● Ja / Nein	x
	Biomasse Liefermöglichkeit		● Ja / Nein	x
	Nahwärme Kapazität		● Ja / Nein	x
Kosten	CO2 Preis		● Zahl [€]	x
	Betrachtungszeitraum		● Jahre	x

#### 4.3.4.3. Ablauf

Dem/der Anwender\*in wird in der Webanwendung eine Eingabemaske zur Verfügung gestellt, um die in Tabelle 3 beschriebenen Parameter zu definieren. Neben dem manuellen Ausfüllen des Formulars wird auch die Möglichkeit geboten, jene Felder zu befüllen, für die Informationen in der Datenbank hinterlegt sind. Hierzu kann entweder ein Gebäude oder ein Grundstück ausgewählt werden. Bei Auswahl eines Grundstückes werden die Potentiale für alternative Energieträger in der Datenbank abgerufen. Bei der Wahl eines Gebäudes werden zusätzlich zu den Potentialen, Informationen zu den Gebäuden geprüft (vgl. Abbildung 21; Schritt 1-3). Die Ergebnisse werden über den Anwendungsserver an den Client retourniert und für den/die Anwender\*in die Eingabemaske der Alternativenprüfung eingefügt (vgl. Abbildung 21; Schritt 4-6).

Bevor die Alternativenprüfung gestartet wird, können die Parameter angepasst (überschrieben oder bei NULL Wert manuelle Eingabe) werden. Beim Absenden des Formulars werden die Daten an den Anwendungsserver übermittelt (vgl. Abbildung 21; Schritt 4-8). Wie bei der Filtermethode wird dieser Prozess asynchron durchgeführt, sodass der/die Anwender\*in weiter mit dem Client interagieren kann, während er/sie auf das Ergebnis wartet.

Der Anwendungsserver verarbeitet die Daten und ruft die hinterlegte Excel-Datei auf. Dazu wird safexl benutzt. Zellen werden so mit den Daten versehen und die Alternativenprüfung gestartet. Die Ergebnisse können aus den jeweiligen Zellen ausgelesen werden und in Python als Variablen gespeichert werden. Excel wird anschließend sicher geschlossen. Die Ergebnisse werden am Anwendungsserver als Tabellen und Diagramme aufbereitet (vgl. Abbildung 21; Schritt 9-10). Als JSON-Datei verpackt werden diese an den Client übermittelt und dem/der Anwender\*in präsentiert (vgl. Abbildung 21; Schritt 11-12).

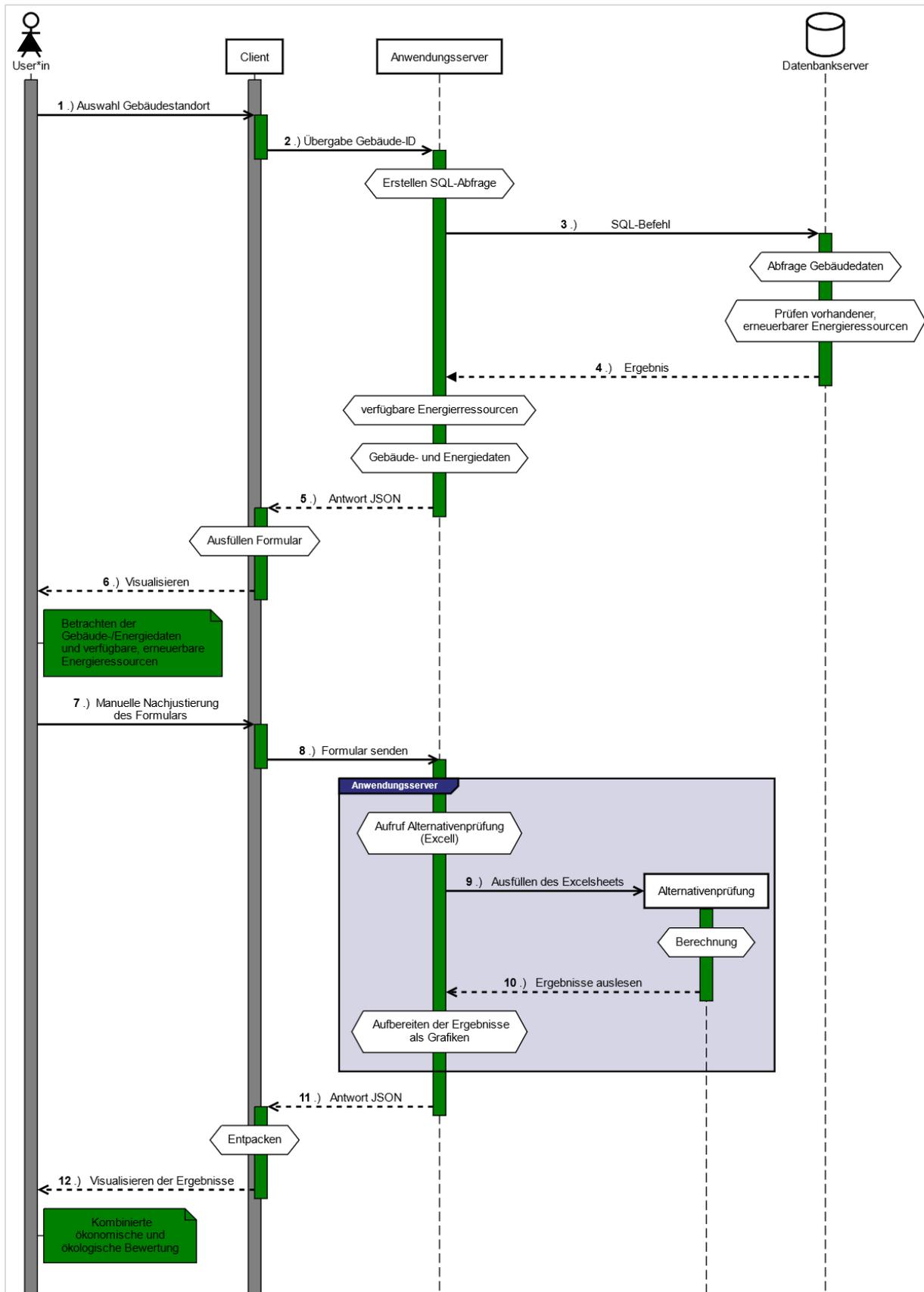


Abbildung 21: Alternativenprüfung Sequence Diagramm

#### 4.3.4.4. Ausgabe der Ergebnisse

Als Ergebnis werden in Abhängigkeit des Grundstücks jene Wärmeversorgungs-lösungen geliefert, für welche die notwendigen Ressourcen lokal (am Grundstück) verfügbar sind und welche technisch realisierbar sind. Diese potenziellen Wärmeversorgungs-systeme werden in der Alternativenprüfung auf ökonomische und ökologische Kriterien geprüft und gereiht. Das Abschneiden der jeweiligen potenziellen Wärmeversorgungs-systeme wird dem/der Anwender\*in in sechs Tabellen und Diagrammen präsentiert, um die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme sichtbar zu machen.

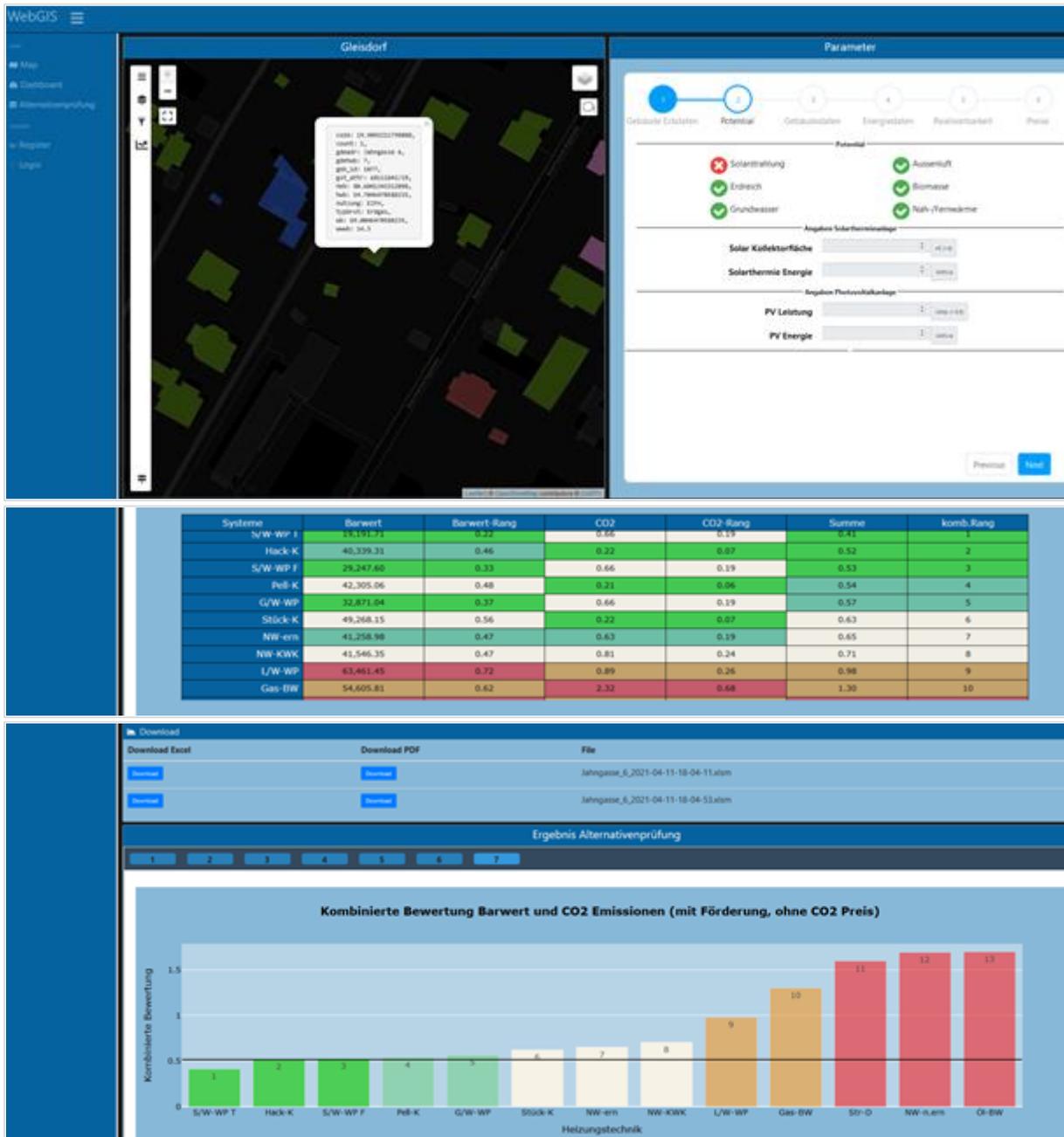


Abbildung 22: Alternativenprüfung-Ansicht mit Ergebnis (Screenshot Webanwendung)

Folgende Tabellen werden dem/der Anwender\*in zur Verfügung gestellt, um die Ergebnisse zu evaluieren:

- Barwert in € gesehen auf 30 Jahre, jeweils inkl. oder exklusive Förderung sowie inkl. oder exkl. CO2-Vermeidungskosten (entsprechend der Parametrierung)
- CO2e Emissionen in Tonnen pro Jahr
- (nicht erneuerbarer) Primärenergiebedarf in kWh/a
- Gegenüberstellung von Kosten und CO2e Emissionen (Streudiagramm)
- Kombinierte Bewertung Barwert und CO2 Emissionen



Abbildung 23: Beispiel Ergebnis für kombinierte Bewertung

## 5. Prototypische Anwendung

Nachfolgend werden die umgesetzten Funktionalitäten der prototypischen WebGIS Anwendung anhand fiktiver Aufgabenstellungen für das Untersuchungsgebiet Gleisdorf demonstriert und erläutert. Folgende Fallbeispiele, wie sie beispielsweise für eine(n) Nutzer\*in aus dem Bereich Stadt- oder Energieplanung relevant sind, werden beispielhaft betrachtet:

1. Verortung und Analyse von Bestandsgebäuden mit Ölheizung
2. (energetische) Ist-Analyse eines Stadtteils
3. Alternativenprüfung an einem Bestandsgebäude

### 5.1. Fallbeispiel 1: Verortung und Analyse von Bestandsgebäuden mit Ölheizung

Gebäude mit heizölbasierten Wärmebereitstellungssystemen können mittels Selektion nach Attributen identifiziert werden (siehe Kapitel 4.3.2.1). Der/die Nutzer\*in stellt hierzu den Filter „Heat Type“ auf Heizöl. Um die Selektion auf die ganze Stadtgemeinde zu erwirken ist die räumliche Selektion inaktiv – None - gestellt (siehe Abbildung 24).

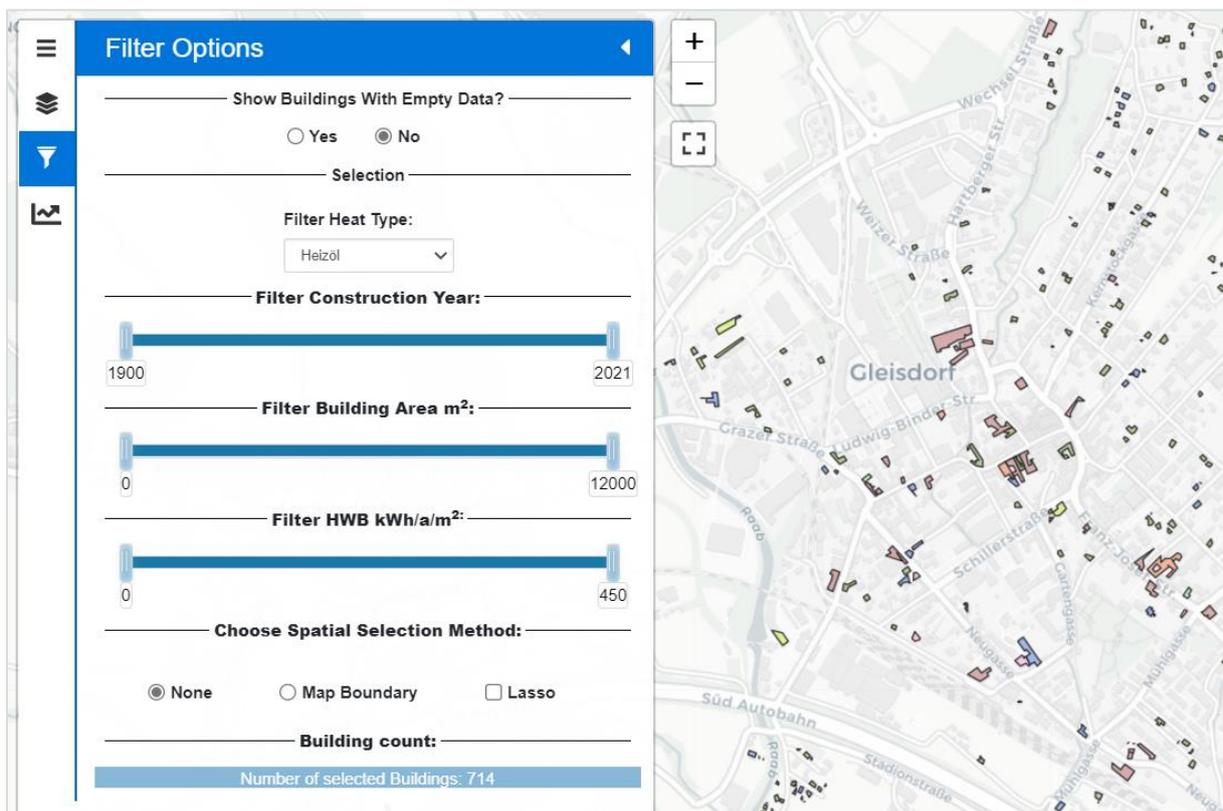


Abbildung 24: Identifizierung von Ölheizungen in der Stadtgemeinde Gleisdorf (Screenshot Webanwendung)

Die Auswahl wird an die Anwendungsschicht gesendet. Diese erstellt automatisch eine Abfrage, um die notwendigen Daten aus der Datenbank auszulesen. Das Ergebnis wird visualisiert und statistisch ausgewertet. Auf der Karte sind nun jene Gebäude sichtbar die mit Öl geheizt werden. Im unteren Bereich kann abgelesen werden wie viele Gebäude diesem Kriterium in der Stadtgemeinde Gleisdorf entsprechen. Auf der Karte werden diese Gebäude verortet und visualisiert. Anwendungsfall 1 lässt sich mit dieser Funktionalität sehr intuitiv und übersichtlich bewerkstelligen und die Filtermöglichkeiten sind auf eine Reihe weitere, für die räumliche Energieplanung relevante, Attribute anwendbar.

Für weiterführende Analysen am ausgewählten Datensatz können mithilfe des Dashboards einfach weitere Fragestellungen bearbeitet werden, beispielsweise:

**a. Wie viele Gebäude werden mit Ölheizungen geheizt?**

Diese Information lässt sich direkt aus der Ansicht der Filteroption oder am Dashboard ablesen. Von jenen 3222 Gebäuden in der Stadtgemeinde Gleisdorf, für die Informationen in der Datenbank hinterlegt sind, werden 714 mit Heizöl versorgt (siehe Abbildung 25).

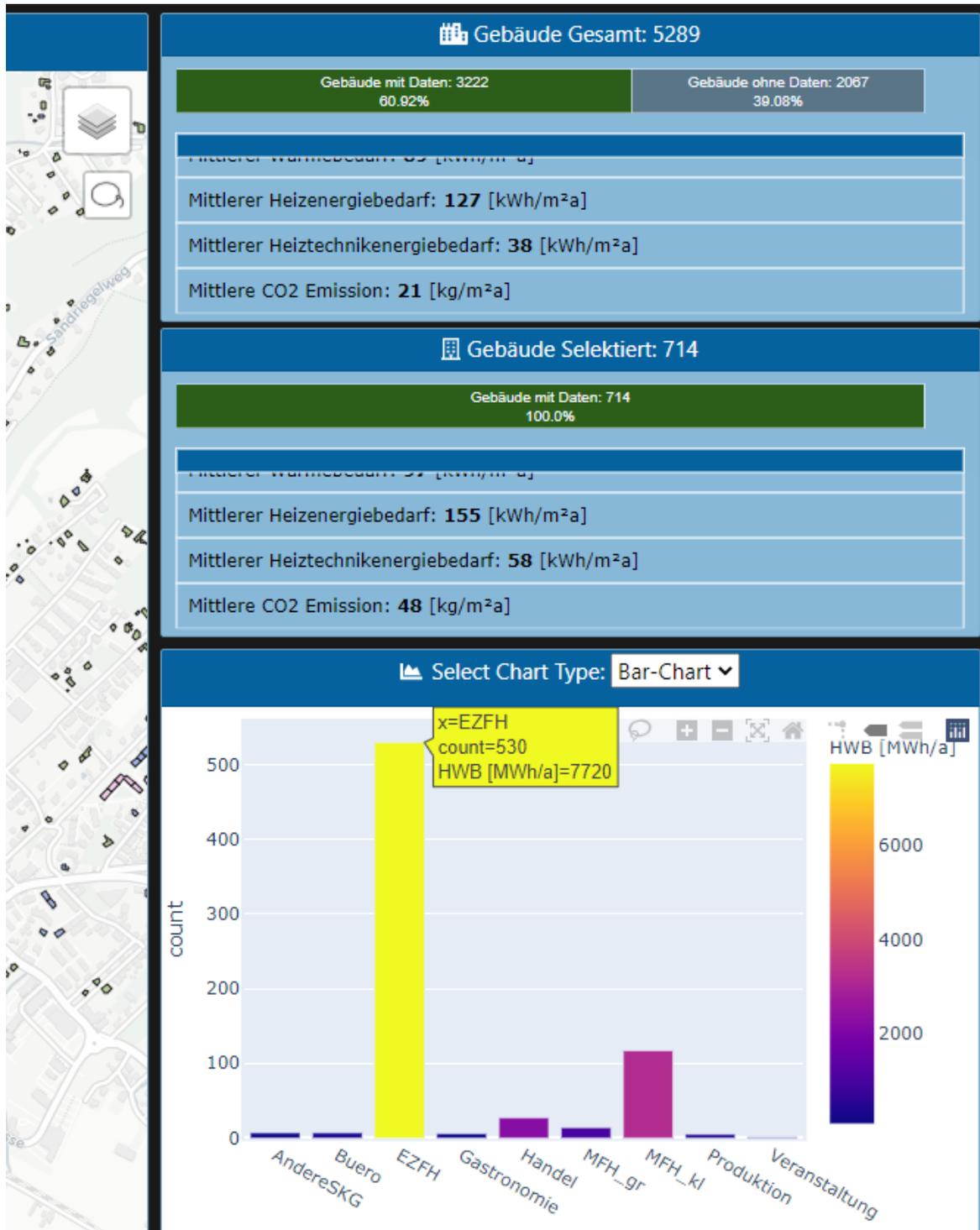


Abbildung 25: Wärmebereitstellung Öl Dashboard 1 (Screenshot Webanwendung)

**b. Wie hoch ist bei diesen Gebäuden die CO<sub>2</sub> Emission pro Quadratmeter verglichen mit der restlichen Gemeinde?**

Die Fragestellung, wie es mit der CO<sub>2</sub> Emission pro Quadratmeter bei diesen Gebäuden verglichen mit dem Durchschnitt der gesamten Stadtgemeinde aussieht, kann ebenfalls mit dem Dashboard beantwortet werden. Im Durchschnitt werden in Gleisdorf 21 kg CO<sub>2</sub> pro Quadratmeter im Jahr emittiert. Betrachtet man jedoch nur Gebäude, die bei ihrer Wärmebereitstellung auf den Energieträger Öl setzen, liegt dieser Wert bei 48 kg pro Quadratmeter im Jahr (siehe Abbildung 25).

**c. Welche Gebäudekategorie verwendet vorwiegend Heizöl als Energieträger?**

Diese Information wird über das Balkendiagramm abgelesen. Im Konkreten Beispiel Gleisdorf bilden Einfamilienhäuser mit 530 Häusern den größten Anteil an Gebäuden mit Ölheizung. Bei dieser Gebäudekategorie macht der Heizwärmebedarf 7720 MWh im Jahr aus (siehe Abbildung 25). Je nach Wahl der Kategorie in den Dashboard-Optionen können die Daten unterschiedlich gruppiert werden. Um Zusammenhänge von Baujahr und Ölheizungen zu erkennen wird in den Dashboard-Optionen von Nutzen auf Gebäudebaujahr umgestellt und der Chart Typ auf ein Kreisdiagramm geändert. Es wird erkennbar, dass circa 75% der Gebäude, die bei der Wärmebereitstellung auf Heizöl setzen, vor 1990 erbaut wurden (siehe Abbildung 26).

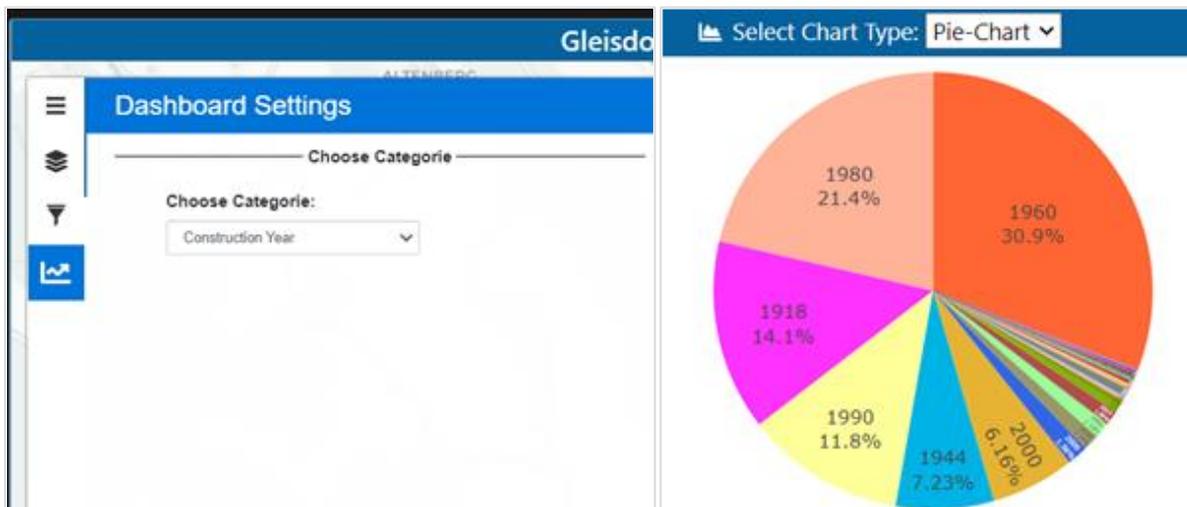


Abbildung 26: Gruppieren nach Baujahr (Screenshot Webanwendung)

## 5.2. Fallbeispiel 2: energetische Ist-Analyse eines Stadtteils

Fallbeispiel 2 behandelt eine mögliche Fragestellung in der Stadt- und Energieplanung, die sich auf ein konkretes zusammenhängendes Gebiet (Stadtteil, Quartier, Gebäudeverbund, Areal) bezieht. Für die strategische Planung eines Arealentwicklungsgebietes in Gleisdorf soll der energetische IST-Zustand der bestehenden Gebäude erhoben, analysiert und interpretiert werden. Folgende Fragestellungen lassen sich für diesen Anwendungsfall mithilfe der WebGIS Anwendung rasch und benutzerfreundlich ermitteln:

**a. Wie viele Gebäude liegen in diesem Gebiet?**

Um herauszufinden wie viele Gebäude in dem gewählten Gebiet liegen, werden alle Filterparameter zurückgestellt um keine Gebäude auszuschließen. Um auch jene Gebäude anzuzeigen für die keine Daten vorhanden sind, wird der Parameter „Show Building With Empty Data“ auf ‚ja‘ gesetzt. Mit der Auswahl „Lasso“ wird die räumliche Selektion mittels eines selbstdefinierten Bereichs freigeschaltet.

Der/die Anwenderin ist nun in der Lage auf der Karte ein Polygon zu zeichnen, dass die Begrenzung des zu untersuchenden Areals bildet (siehe Abbildung 27).

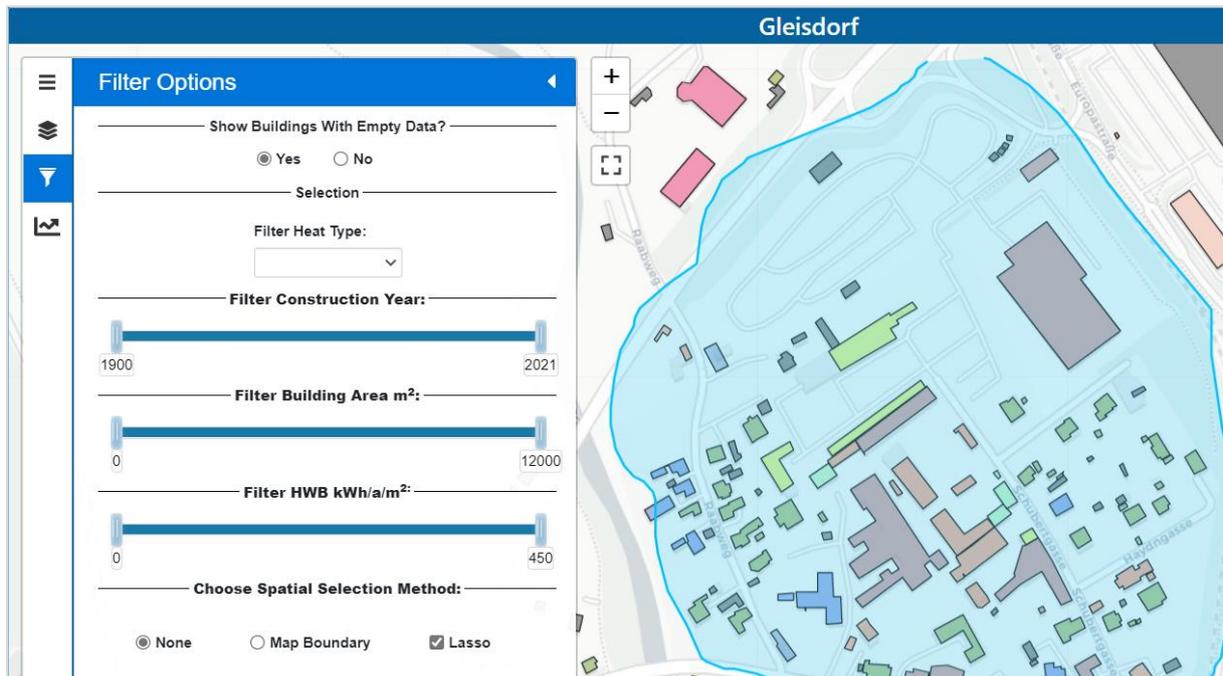


Abbildung 27:Selektiere Bereich von Interesse (Screenshot Webanwendung)

Statt einer attributiven Selektion wird nun eine räumlichen Selektion durchgeführt (siehe Kapitel 4.3.2.2). Das Ergebnis kann von dem/der Anwender\*in, gleich wie bei der attributiven Selektion, vom Dashboard abgelesen werden. Im Fallbeispiel gewählten Areal befinden sich insgesamt 85 Gebäude. Bei 34 davon sind keine Daten in der Datenbank hinterlegt (siehe Abbildung 28).

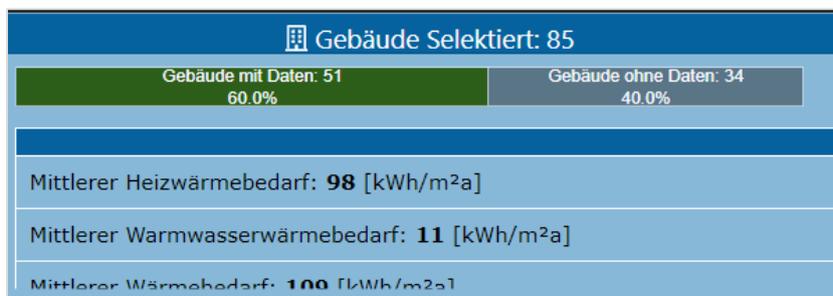


Abbildung 28: Anzahl der Gebäude im Untersuchungsgebiet (Screenshot Webanwendung)

**a. Was ist der vorherrschende Energieträger für die Wärmebereitstellung?**

Gemessen an der Anzahl sind über 25 Gebäude, der 51 mit Informationen behafteten Bauwerke, an das lokale Erdgasnetz angeschlossen (siehe Abbildung 29).

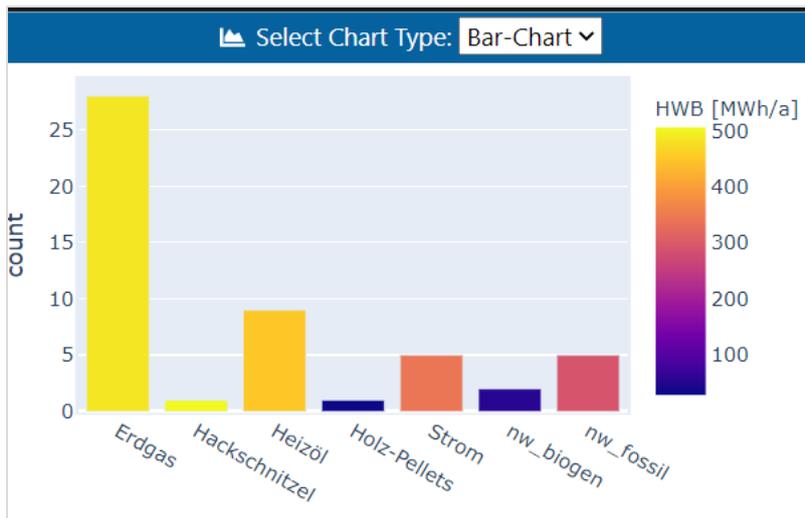


Abbildung 29: vorherrschende Energieträger für die Wärmebereitstellung (Screenshot Webanwendung)

**b. Wie groß ist der Heizwärmebedarf des Gebietes und wie verteilt er sich?**

Um den gesamten Heizwärmebedarf des Gebietes zu ermitteln, kann von dem/der Anwender\*in die einzelnen, ausgehenden Bedarfsströme im Sankey-Diagramm summiert werden. Der gesamte Heizwärmebedarf beträgt in diesem Beispiel 2148 MWh im Jahr.

In diesem Diagramm kann ebenfalls abgelesen werden, welche Gebäudekategorien mit welchem Energieträger geheizt werden. In diesem konkreten Beispiel wird der Handel mit Strom, Biomasse und fossiler Nahwärme versorgt, um den Heizwärmebedarf zu decken. Wohngebäude (Ein- und Mehrfamilienhäuser) setzen dabei vorzugsweise auf Erdgas und Heizöl (siehe Abbildung 30)

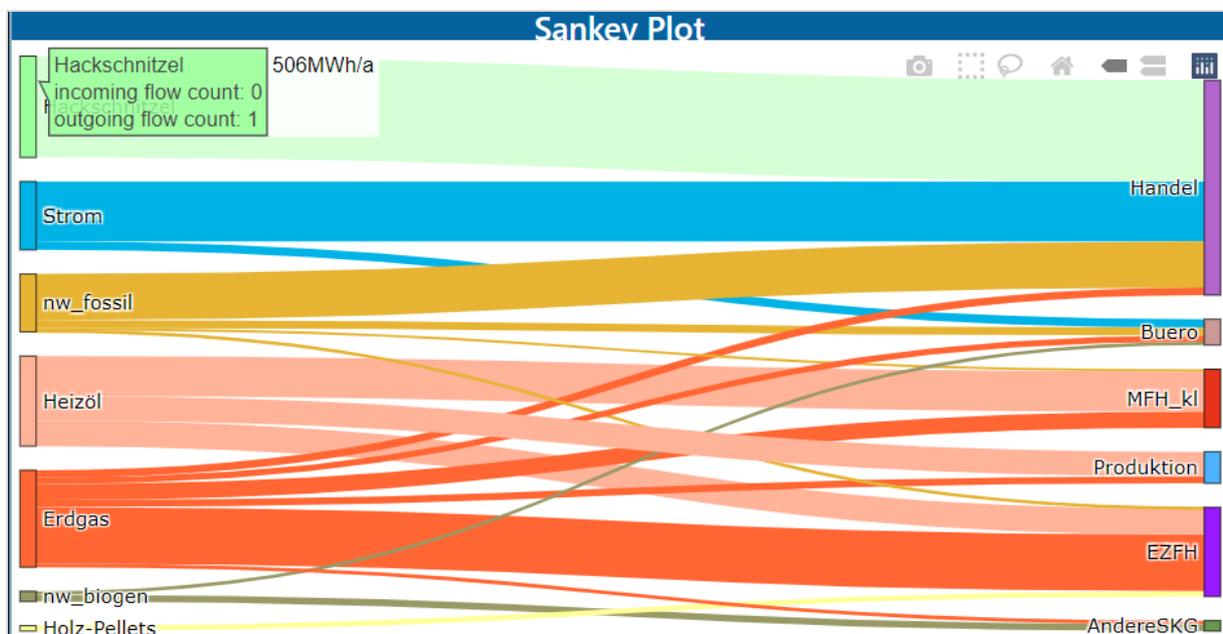


Abbildung 30: Sankey-Diagramm (Screenshot Webanwendung)

### 5.3. Fallbeispiel 3: Alternativenprüfung an einem Bestandsgebäude

Fallbeispiel 3 behandelt die Alternativenprüfung anhand eines Bestandsgebäudes, das derzeit gemäß der Analyse des Areals aus Fallbeispiel 2 eine geringe Energieeffizienz (spezifischer Heizwärmebedarf = 277.7 kWh/m<sup>2</sup>BGF) aufweist und zudem noch mit einem erdölbefeuerten Kessel beheizt wird (siehe Abbildung 31). Der ermittelte Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalente beträgt für dieses Gebäude 148kg/m<sup>2</sup>. Unter Berücksichtigung der lokal vorliegenden erneuerbaren Energiepotenziale zur Wärmebereitstellung soll nun geprüft werden, welche klimafreundlichen Wärmeversorgungsoptionen sich bei einem Heizungstausch unter Berücksichtigung ökonomischer sowie ökologischen Kriterien lokal anbieten.

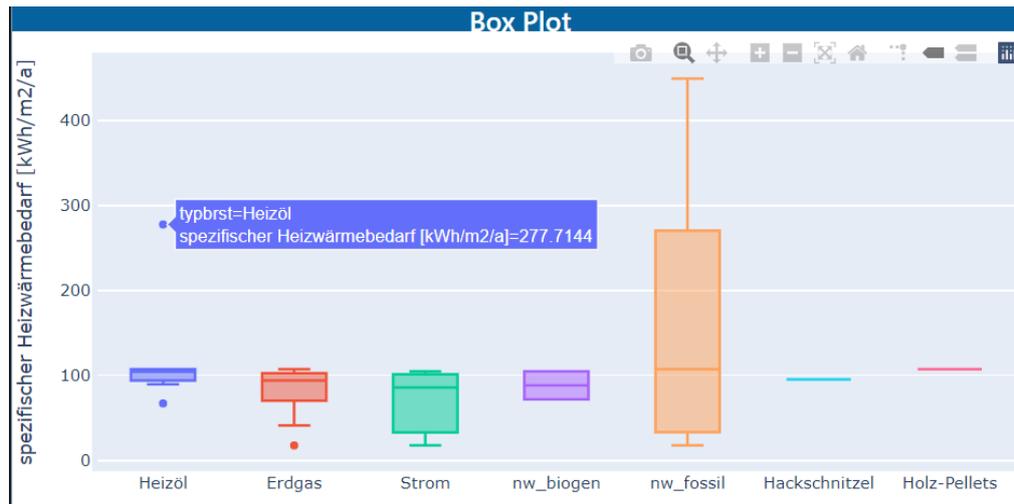


Abbildung 31: Ausreißer spezifischer Heizwärmebedarf (Screenshot Webanwendung)

Für dieses Beispiel werden zwei Szenarien durchgespielt. Beim ersten Szenario wird eine Alternativenprüfung durchgeführt ohne die Gebäudedaten zu verändern. Beim Zweiten wird eine umfassende Sanierung des Gebäudes simuliert. Dazu wird im Prozess der Alternativenprüfung der Heizwärmebedarf manuell von 277.7 kWh/m<sup>2</sup>a auf 85 kWh/m<sup>2</sup>a gesetzt. Das Gebäude wird über die Informationen zu Heizwärmebedarf und Energieträger mit Hilfe der Filteroptionen ausfindig gemacht werden (siehe Abbildung 32).

**Filter Options**

Show Buildings With Empty Data?  Yes  No

Selection

Filter Heat Type: Heizöl

Filter Construction Year: 1900 - 2021

Filter Building Area m<sup>2</sup>: 0 - 12000

Filter HWB kWh/a/m<sup>2</sup>: 250 - 450

Choose Spatial Selection Method:  None  Map Boundary  Lasso

Building count: 1

**127.0.0.1:5000 enthält**

Potential auf diesem Grundstück:  
 Auf diesem Grundstück gibt es Restriktionen für Photovoltaik- und Solaranlagen.  
 Erdreich Potential vorhanden!  
 Grundwasser Potential vorhanden  
 Es gibt keine Anschlussmöglichkeit für Nah-/Fernwärme.

OK

```

co2e: 148.357055470035,
count: 1,
gde_baujahr: 1918,
gdeadr: Grazer Straße 40,
gdehub: 191,
geb_id: 1706,
gst_attr: 69111225/4,
hebt: 478.57146677534,
hub: 277.714394117647,
nutzung: WFH_kl,
typbrst: Heizöl,
wb: 295.714394117647,
wwwb: 18
    
```

Abbildung 32: Filter nach räumlichen und attributiven Parametern (Screenshot Webanwendung)

**Szenario 1:**

Es werden die Bestandsgebäudedaten aus der Datenbank ohne Änderungen für die Alternativenprüfung übernommen. Das bedeutet es soll nur das Heizungssystem umgestellt werden ohne das Gebäude zu sanieren (siehe Abbildung 33, Seite 55). Die Ergebnisse der Alternativenprüfung präferieren den Umstieg auf Biomasse, aber auch Erdwärmekollektoren können angedacht werden (siehe Abbildung 34, Seite 56). Bei der Biomasse spielt vor allem die geringe CO<sub>2</sub> Emission eine Rolle. Die Erdwärmekollektoren punkten mit den geringsten Kosten betrachtet auf 30 Jahre. In der kombinierten Bewertung (Preis und CO<sub>2</sub>e Emission) schneidet der Hackgutkessel am besten ab. Die CO<sub>2</sub>e Emission dieses Systems wird mit 5,18 t/a berechnet. Das entspricht 7,5 kg/m<sup>2</sup>a und damit einer CO<sub>2</sub>e Einsparung von 140,5 kg/m<sup>2</sup>. Die Kosten für dieses System, gesehen auf die nächsten 30 Jahre (Umbau und Folgekosten), werden mit Förderungen auf rund 727.000 € geschätzt (siehe Abbildung 34, Seite 56).

**Szenario 2:**

In diesem Szenario wird das Gebäude umfassend saniert. Es wird angenommen, dass die Verteilleitungen sanierungsbedürftig sind und daher soll auf Fußbodenheizung als Wärmeverteilsystem umgestellt werden. Der angepeilte Heizwärmebedarf soll 85kWh/m<sup>2</sup>a betragen. Diese angenommenen Daten werden in der Alternativenprüfung manuell eingetragen und die Berechnung gestartet.

Die Ergebnisse präferieren, gleich wie in Szenario 1, den Hackgutkessel, der neben den Pelletskessel die niedrigsten CO<sub>2</sub>e Emissionen aufweist. Ebenfalls gute Lösungen nach der Sanierung sind Sole/Wasser Wärmepumpen. Sowohl Flachkollektoren als auch Tiefensonden. Diese Systeme schneiden bei den Kosten, gesehen auf 30 Jahre, am besten ab. Der Hackgutkessel emittiert in diesem Szenario, nach einer umfassenden Sanierung des Gebäudes und einem angenommen Heizwärmebedarf von 85kWh/m<sup>2</sup>a, 1,6 t/a CO<sub>2</sub>e. Das entspricht 2,32kg/m<sup>2</sup> und einer Einsparung von 145,68 kg/m<sup>2</sup>a CO<sub>2</sub>e zum Bestandsgebäude und 5,18 kg/m<sup>2</sup> zu Szenario 1. Die Kosten für dieses System, gesehen auf die nächsten 30 Jahre (Umbau und Folgekosten), werden auf mit Förderungen auf rund 238.000 € geschätzt. Was in diesem Szenario nicht berechnet werden kann sind die Kosten für die Sanierung.

*Tabelle 4: Ergebnis Alternativenprüfung für Szenario 1 & 2*

Top 3 / Szenario	Heizungssystem	Barwert [€]	CO <sub>2</sub> e [t/a]
Szenario 1	1. Hackgutkessel	727.000	5,18
	2. Pelletskessel	855.000	4,88
	3. Stückgutkessel	885.000	5,18
Szenario 2	1. Hackgutkessel	238.000	1,6
	2. Tiefensonde	194.000	3,98
	3. Flachkollektor	196.000	3,98

**Parameter**

1 Gebäude Eckdaten 2 Potential 3 Gebäudedaten 4 Energiedaten 5 Realisierbarkeit 6 Preise

**Gebäude Eckdaten**

Gebäudeart: Mehrfamilienhaus (klein)

Adresse: Grazer Straße 40

Baujahr: 1918

Brutogeschossfläche: 688,24 m<sup>2</sup>

Previous Next

**Parameter**

1 Gebäude Eckdaten 2 Potential 3 Gebäudedaten 4 Energiedaten 5 Realisierbarkeit 6 Preise

**Potential**

Solarstrahlung  Aussenluft

Erdreich  Biomasse

Grundwasser  Nah-/Fernwärme

**Angaben Solarthermieanlage**

Solar Kollektorfläche: m<sup>2</sup> (>4)

Solarthermie Energie: kWh/a

**Angaben Photovoltaikanlage**

PV Leistung: kWp (>0,6)

PV Energie: kWh/a

**Parameter**

1 Gebäude Eckdaten 2 Potential 3 Gebäudedaten 4 Energiedaten 5 Realisierbarkeit 6 Preise

**Anlass für Alternativenprüfung**

Sanierung

**Bestandsgebäude**

Energieträger: Öl

Wärmebereitstellung: Öl-Kessel

Verteilungen?

Verteilungen Sanierungsbedürftig?

Heizraum Vorhanden?

Lagerraum Vorhanden?

**Parameter**

1 Gebäude Eckdaten 2 Potential 3 Gebäudedaten 4 Energiedaten 5 Realisierbarkeit 6 Preise

**Energiedaten**

Gebäudekategorie: Wohngebäude mit 3 bis 9 Nutzungseinheit

Brutogeschossfläche: 688,24 m<sup>2</sup>

Heizwärmebedarf: 277,714394117647 kWh/m<sup>2</sup>

Anzahl Obergeschosse: 2

Dachform: Pultdach - Orientierung S,W,O

Raumheizung: Öl-Kessel

Warmwasserbereitung: zentral mit Heizung (2-Leiter)

**Parameter**

1 Gebäude Eckdaten 2 Potential 3 Gebäudedaten 4 Energiedaten 5 Realisierbarkeit 6 Preise

**Technische Realisierbarkeit**

Wärmeverteilsystem: Zweileitersystem Hochtemperatur > 50°C

**Wärmepumpen Ausschlussgrund**

W/W  S/W  L/W

**Biomasse**

Liefermöglichkeit: Ja

**Nahwärme**

Kapazitäten: Ja

**Parameter**

1 Gebäude Eckdaten 2 Potential 3 Gebäudedaten 4 Energiedaten 5 Realisierbarkeit 6 Preise

**CO2 Preis**: 30 €

**Betrachtungszeitraum**: 30 Jahre

Abbildung 33: Eingabe Formular Alternativenprüfung Szenario 1 (Screenshot Webanwendung)



Abbildung 34: Ergebnistabellen der Alternativenprüfung Szenario 2 (Screenshot Webanwendung)

## 6. Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Arbeit interpretiert, in Bezug zu bestehenden Arbeiten wie auch Literatur gesetzt, mögliche Implikationen diskutiert und die Umsetzung der Applikation beurteilt beziehungsweise bewertet. Hierzu wird die Forschungsfrage zuerst knapp beantwortet und danach in verschiedene Teilaspekte aufgeteilt, um diese partial zu beantworten und die Diskussion zu gliedern.

Beantwortung der Forschungsfrage:

*Wie können die digitalen Planungsgrundlagen aus dem Projekt S/E/P zur Beschreibung der räumlichen Dimension von Energieversorgung und Energieverbrauch in der Stadtgemeinde Gleisdorf für die grundstücksgenaue Alternativenprüfung erneuerbarer Wärmeversorgungsoptionen als interaktive Web-Applikation performant und benutzerfreundlich für entsprechende Planungsprozesse nutzbar gemacht werden?*

Um die Forschungsfrage beantworten zu können, wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt. In dieser wurde ermittelt, welche Beschaffenheit und Funktionen eine Webanwendung aufweisen muss, um sowohl die räumliche Dimension von Energieversorgung und Energieverbrauch in der Stadtgemeinde Gleisdorf darzustellen als auch grundstücksgenaue Alternativenprüfung erneuerbarer Wärmeversorgungsoptionen performant durchzuführen.

Aus dieser Analyse heraus und aus den Planungsgrundlagen des Projektes S/E/P wurden die Architektur, die Komponenten und Programmiersprachen der zu entwickelnde Anwendung gewählt und ein Entwurf konzipiert. Die Verwendung von open-source Komponenten verleiht der Anwendung Interoperabilität und Erweiterbarkeit. Zusätzlich ermöglicht die Abstimmung der Funktionalitäten und Benutzeroberfläche auf die räumliche Energieplanung eine performante und benutzerfreundliche Handhabung der Anwendung.

Die Ausprogrammierung dieses Entwurfs lieferte eine WebGIS Anwendung, welche eine Möglichkeit bietet, die digitalen Planungsgrundlagen aus dem Projekt S/E/P zur Beschreibung der räumlichen Dimension von Energieversorgung und Energieverbrauch in der Stadtgemeinde Gleisdorf zu nutzen. Außerdem wurde eine Alternativenprüfung auf Grundstücks- und Gebäudeebene in der Web-Applikation implementiert. Dazu wurde die Alternativenprüfung mit der Datenbasis in der Webanwendung verbunden um die den Prozess der Alternativenprüfung zu vereinfachen und zu beschleunigen. Bei der gesamten Entwicklung wurde dabei auf die Performance und Skalierbarkeit der Webanwendung geachtet.

Die in dieser Thesis entwickelte und realisierte Webanwendung ist somit eine mögliche Antwort auf die Forschungsfragen. Mit Hilfe der entwickelten Webanwendung können die digitalen Planungsgrundlagen aus dem Projekt S/E/P zur Beschreibung der räumlichen Dimension von Energieversorgung und Energieverbrauch in der Stadtgemeinde Gleisdorf für die grundstücksgenaue Alternativenprüfung erneuerbarer Wärmeversorgungsoptionen für entsprechende Planungsprozesse nutzbar gemacht werden. Anzumerken ist, dass diese Webanwendung eine von vielen Möglichkeiten zur Beantwortung der Forschungsfrage ist.

## **Beschreibung der räumlichen Dimension von Energieversorgung und Energieverbrauch mit Hilfe von digitalen Planungsgrundlagen**

Ein Ergebnis dieser Arbeit ist Visualisierung und Beschreibung der räumlichen Dimension von Energieversorgung und Energieverbrauch durch eine programmierte Anwendung. Grundlage hierfür sind räumliche Daten, die für Analysen und Planungen, Transport oder Speicherung von Energie sowie zur Verortung und Charakterisierung des Gebäudebestandes und der vorhandenen kommunalen Energieinfrastruktur wie beispielsweise Erdgas- und Wärmenetze notwendig sind.

In der räumlichen Energieplanung und in der Energieraumplanung ist das Sammeln und Aufbereiten von Energiedaten eine der größten Herausforderungen. Im Jahr 2016 wurde im Workshop „*Energiedaten und Monitoring*“, veranstaltet vom Österreichischem Städtebundes in Kooperation mit dem Klima- und Energiefonds und der Stadt Wien, festgehalten, dass kein Tool zur Unterstützung der Energieraumplanung entwickelt werden kann, wenn die Datenqualität so bleibt wie sie ist (vgl. Österreichische Städtebund, 2016). Als Vorzeigeregion wurde damals der Kanton Zürich gesehen, der durch das Energiegesetz Energieversorgungsunternehmen und Verbraucher\*innen zur Datenlieferung verpflichtete.

Da es in Österreich keine Datenquelle gibt, die alle erforderlichen Informationen für räumliche Energieplanung bereitstellt, wurde im Rahmen des S/E/P Projektes gemeinsam mit Vertreter\*innen der öffentlichen Verwaltung, der Forschung sowie von Planungsbüros im Jahr 2018 erörtert, welche digitalen Planungsgrundlagen für Energieraumplanung grundsätzlich relevant sind und wie diese räumlichen Informationen aus verfügbaren Datengrundlagen generiert werden können. Es wurden 80 relevante Datengrundlagen festgestellt. Zu den wichtigsten Datengrundlagen, die zusammengeführt wurden, zählen die digitale Katastralmappen der Bundesländer, das adressbezogene Gebäude und Wohnungsregister (AGWR), die ZEUS Energieausweisdatenbank, digitale Leitungskataster, Flächenwidmungspläne und erhobene, verortete erneuerbare Energieressourcen zur Wärmebereitstellung (vgl. Schardinger et al., 2021). Diese Daten dienen in dieser Thesis als digitale Planungsgrundlage zur Beschreibung der räumlichen Dimension von Energieversorgung und Energieverbrauch in der Stadtgemeinde Gleisdorf.

Die programmierte Anwendung ermöglicht mithilfe dieser Grundlagen neben der räumlichen Darstellung der Energieversorgung und des Energieverbrauchs auch Informationen zu den Gegebenheiten abzufragen. Beispielsweise können von Gebäuden mit hohem Wärmebedarf der Sanierungsstatus und das vorhandene Heizungssystem abgerufen werden. Diese Faktoren sind ausschlaggebend für einen erhöhten Wärmebedarf beziehungsweise Energiebedarf. Ein weiterer Vorteil einer breiten Datenbasis ist es, Alternativen zur vorherrschenden Lage bieten zu können. Durch die räumliche Verortung von erneuerbaren Ressourcen oder bestehender Infrastruktur wie beispielsweise Gas- oder Wärmenetz werden Möglichkeiten aufgezeigt, um die Energieversorgung und Wärmebereitstellung nachhaltiger zu Planen und zu gestalten. Die Planungsgrundlagen aus dem Projekt S/E/P bietet somit eine Vielzahl an Optionen, um bei der räumlichen Energieplanung zu unterstützen und relevante Themen abzubilden.

Das Sammeln und Aufbereiten von Energiedaten zur Schaffung einer harmonisierten, laufend aktuellen und zugänglichen Datengrundlage ist einer der wichtigsten Schritte zur Optimierung der räumlichen Energieplanung und zu einer nachhaltigen Wärmebereitstellung. Dafür ist zu klären, wer dieses ressourcenintensive Unterfangen leitet, die Datenmengen koordiniert und sich um die Datenqualität und Datenpflege kümmert. Auch der Datenschutz darf nicht außer Acht gelassen werden, um die Bürger\*innen zu schützen. Das Projekt S/E/P ist durch die Zusammenarbeit auf mehreren administrativen Ebenen auf einen guten Weg einen Grundstein zu setzen um diese Fragen zu klären. Auch die Aarhus-Konvention könnte den Zugang zu Energiedaten erleichtern. Laut diesem ist jeder verpflichtet, umweltrelevante Daten zu veröffentlichen und Bürger\*innen den Zugang zu diesen Informationen zu gewähren (vgl. Winter, 2020).

### **Grundstücksgenaue Alternativenprüfung zur Ermittlung von erneuerbaren Wärmeversorgungsoptionen**

Die Alternativenprüfung kann auch als Multi-Kriterien-Analyseverfahren (MCDA) gesehen werden. In Österreich muss die Alternativenprüfung gewisse Richtlinien erfüllen (siehe Kapitel 2.3.1). In Hinblick auf diese Richtlinien und der Tatsache, dass bereits ausgereifte Methoden für Alternativenprüfungen entwickelt wurden (Beispiel Energie Tirol<sup>3</sup>), ist in dieser Thesis von der Entwicklung einer eigenen MCDA Methode abgesehen worden. Es wurde auf der im Projekt S/E/P entwickelten Methode aufgebaut und diese in die entwickelte Anwendung integriert.

Über die Verknüpfung der Datenbank, welche die relevanten Daten zur räumlichen Energieplanung enthält, mit der Alternativenprüfung, vereinfacht sich die Eingabe der Parameter, die zur Ausführung der MCDA benötigt werden. Der/die User\*in hat die Möglichkeit über die Auswahl von Gebäuden oder Grundstücke in der Karte, die hinterlegten Daten direkt in die Alternativenprüfung einzubinden. Im entwickelten Prototyp wurden 35 variable Parameter definiert, die für die MCDA von dem/der Anwender\*in geändert werden können. Von diesen 35 Parametern können mit der vorliegenden Datengrundlage 17 Parameter über die Datenbank befüllt werden (siehe Tabelle 3:Parameter Alternativenprüfung). Die restlichen Parameter der Alternativenprüfung enthalten, zur vereinfachten Anwendung, Defaultwerte. So wird es ermöglicht, Wärmeversorgungssysteme auf Gebäude- bzw. Auswahlniveau miteinander zu vergleichen und auf ökonomische und ökologische Kriterien, wie beispielsweise Gesamtkosten gesehen auf 30 Jahre oder CO<sub>2</sub> Emission [t/a], zu untersuchen.

Der Vorteil der Integration von Alternativenprüfungen in ein WebGIS zu herkömmlichen Methoden, wie beispielsweise Excel-Tabellen, ist die (räumliche) Darstellungsmöglichkeit von anderen wichtigen Aspekten der Wärmebereitstellung. So kann beispielsweise überprüft werden, welche Wärmebereitstellungssystem in der Umgebung vorzugsweise verwendet werden, welche erneuerbare Energieressourcen auf Grundstücken verfügbar sind oder ob sich ein vorhandenes Gas- oder Wärmenetz in der Umgebung des untersuchten Grundstücks oder Gebäude befindet. All diese Informationen unterstützen bei der Wahl des Wärmebereitstellungssystems und werden zum Teil bei der Alternativenprüfung benötigt. Bei herkömmlichen Alternativenprüfungen müssen diese Informationen separat beschaffen werden. Eine Webapplikation kann mit einer entsprechenden Datenbasis all diese Informationen vereinen und somit den Prozess der Alternativenprüfung vereinfachen und beschleunigen.

In dieser Arbeit wurde eine open-source Anwendung entwickelt und programmiert, um unter anderem zu beantworten, ob und wie eine vorhandene Methode der Alternativenprüfung in eine Webapplikation integriert werden kann. Mit der entwickelten Anwendung wird demonstriert, dass die Verknüpfung von räumlichen Informationen, wie beispielsweise Gebäudecharakteristika und Energiepotentiale, mit herkömmlichen Alternativenprüfungen den Prozess zur Ermittlung von erneuerbaren Wärmeversorgungsoptionen durch die Bereitstellung der notwendigen Daten, vereinfacht und beschleunigt.

### **Optimierung von Wärmeplanungsprozessen durch interaktive WebGIS-Applikationen**

Gis-Software insbesondere WebGIS Applikationen, die ohne Installation auskommen und einfach aufzurufen sind, werden bereits in der räumlichen Energieplanung und in der übergeordneten Raumplanung eingesetzt. Dort werden sie zur räumlichen Darstellung, Analyse, Bearbeitung und zur Bereitstellung von raumplanerischen relevanten Daten und Karten verwendet. Damit sind sie geeignete Tools, um bei der räumlichen Energieplanung und beim Wärmeplanungsprozess zu unterstützen (vgl. Brunner, 2017). Bei der Anzahl an Funktionalität und Gestaltungsmöglichkeiten der Benutzeroberfläche stoßen proprietärer Software aber auch vorgefertigte open-source WebGIS Lösungen an ihre Grenzen. Funktionen wie beispielsweise die Durchführung einer Alternativenprüfung sind nicht oder nur schwer

<sup>3</sup> [Alternativenprüfung Energie Tirol](#)

in vorgefertigte WebGIS Applikationen zu integrieren. So werden viele verschiedene Funktionen und Berechnungen, die zwar die gleiche Datenbasis wie auch die Ergebnisse und Analysen des GIS nutzen, ausgelagert und extra entwickelt da es kaum Anwendungen gibt, die GIS Funktionalitäten mit Werkzeugen der räumlichen Energie verbindet.

Eine selbst entwickelte open-source Anwendung, wie sie in dieser Arbeit entstanden ist, bietet die Möglichkeiten ein auf den Anwender und der räumlichen Energieplanung zugeschnittenes Werkzeug zu generieren. Eine Datenbasis wird für GIS Funktionalitäten wie beispielsweise Darstellung und räumliche Analyse, wie auch für Alternativenprüfung und Berechnungen von Statistiken verwendet. Diese Fusion der Funktionen in einer Anwendung und die nutzerzentrierte Oberfläche optimieren den Prozess der räumlichen Energieplanung und Wärmeplanung.

Der in dieser Thesis entwickelte Prototyp zeigt, wie ein Zusammenspiel von GIS Funktionen und raumplanerischen Berechnungen aussehen könnte. Eine open-source Anwendung ist zudem erweiterbar und kann an zukünftige Erwartungen angepasst werden. In der jetzigen Form ist der Prototyp ein Werkzeug der bei Bestandsanalysen, der örtlichen Entwicklungsplanung, Entwicklung von Energiestrategien und bei der Projekt- und Arealentwicklung unterstützen kann. Das größte Hindernis ist dabei, wie schon in Kapitel 7.1 erwähnt, die Datenbasis, die maßgeblich die Qualität der Ergebnisse bestimmt.

### **Weitere Fragestellungen**

1. Für welche Nutzer\*innengruppen auf kommunaler Ebene ist die avisierte Web-Applikation relevant und welche spezifischen Anforderungen ergeben sich aus Nutzer\*innensicht an die Applikation?

Nutzer\*innengruppen Mitarbeiter aus Gemeindeverwaltungen:

- Energie- und Umweltkommissionen
- Ingenieur- und Raumplanungsbüros
- Energieberater

Anforderungen speziell der Nutzer\*innengruppen:

- Benutzerzentriertes Design
- Benutzerfreundliche Oberfläche und Bedienung
- Performant
- Funktional (siehe Kapitel 4.1.1)

2. Welche Anforderungen muss eine Webanwendung erfüllen, um als Instrument der räumlichen Energieplanung zu fungieren?

Dazu muss die Webanwendung sowohl funktionale Anforderungen, also Anforderungen die speziell auf die räumliche Energieplanung ausgelegt sind, als auch nicht-funktionelle Anforderungen erfüllen. Die vollständige Auflistung aller Anforderungen ist im Kapitel 4 zu finden.

3. Bei welchen Fragestellungen und Bedürfnissen der räumlichen Energieplanung kann eine WebGIS Applikation unterstützen?

Die entwickelte WebGIS Applikation kann durch die implementierten Funktionen (siehe Kapitel 4.3) dabei unterstützen, die Siedlungsentwicklung und das Angebot nutzbarer Energiepotenziale aufeinander abzustimmen. Durch die Definition von Eignungs- und Vorzugsgebieten können Investitionen in die Versorgungsinfrastruktur optimiert und nachhaltig amortisiert werden. Dadurch sollen der Verbrauch fossiler Energie und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Gemeindegebiet reduziert werden. Neben der planerischen Fragestellung kann die Anwendung auch bei der Koordination oder auch der Kommunikation beziehungsweise Beratung der Bevölkerung dienen.

4. Welche Schritte benötigt eine Alternativenprüfung für Wärmeversorgungssysteme und welche Parameter und Kriterien spielen eine Rolle?
  - I. Alternativen identifizieren
  - II. Kriterien identifizieren
  - III. Gewichtungen definieren
  - IV. Alternativen evaluieren
5. Wie kann eine Alternativenprüfung in einer webbasierten Applikation eingebunden werden, um den/die Benutzer\*in Handlungsempfehlungen zur Wärmeversorgung einzelner Gebäude zu liefern?

Die Beantwortung zu dieser Frage findet sich im Kapitel 4.3.4. Dort wird beschrieben, wie eine bestehende Alternativenprüfung in das entwickelte WebGIS implementiert wurde. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine erprobte Alternativenprüfung mit einer Datenbank, welche relevante Daten für die Prüfung bereitstellt, verknüpft wurde. Die Anwendung ermöglicht diese Verknüpfung und erlaubt es dem/der Anwender\*in die Eingabeparameter zu wählen und zu manipulieren. Für die Alternativenprüfung kann der/die User\*in über die Karte objektbezogene Daten wählen. Durch eine Eingabemaske können weitere Parameter verändert werden. Die Alternativenprüfung wird über die Applikation gestartet und präsentiert die Ergebnisse dem/der Anwender\*in.

## 6.1. Reflexion

Die WebGIS Anwendung wurde zum Zeitpunkt des Verfassens der Arbeit noch nicht veröffentlicht und wurde auch noch nicht von potenziellen Anwender\*innen getestet. Die Bewertung der einzelnen Komponenten sowie Verbesserungsvorschläge gehen auf Literaturrecherche, prototypischen Anwendungen und Feedback von Mitarbeiter\*innen aus Gemeindeverwaltungen, Energie- und Umweltkommissionen, Ingenieur- und Raumplanungsbüros und Energieberater zurück. In Verbindung mit dem Prozess der Entwicklung wurde ersichtlich, wo Potenzial zu Verbesserung vorhanden ist und welche alternativen Ansätze verfolgt werden könnten, um ein ausgereiftes Werkzeug für die räumliche Energieplanung zu kreieren.

### Entwurf der Software-Architektur

Das Design der Software-Architektur basiert auf der Verwendung von Open-Source-Software, was nicht nur die Interoperabilität innerhalb der verschiedenen Programme ermöglicht, sondern auch die Erweiterung des Systems durch die Integration anderer Software zur Systemoptimierung und die Replikation für andere Projekte mit ähnlichen Zielen erleichtert.

Die Verwendung von proprietärer Software könnte jedoch den Entwicklungsprozess für einige spezifische Aufgaben verbessern, für die Open-Source-Software nicht speziell entwickelt wurde. Dies könnte es ermöglichen, diese Aufgaben einfacher oder effizienter zu lösen.

Als Skriptsprache wurde Python gewählt. Python bietet Flexibilität in den verschiedenen Entwicklungsmodalitäten für die raumbezogene Programmierung. In dieser Arbeit wurde Python und das Webframework Flask gewählt da sie folgende Stärken und Vorteile besitzen (vgl. Bahgat, 2015; Rey, 2017):

- Große Anzahl an verschiedene Bibliotheken - vor allem die Verfügbarkeit von Pakete, die es ermöglichen räumlichen Daten zu bearbeiten, visualisieren und räumlich statistisch zu analysieren waren ausschlaggebend für die Wahl von Python.
- Leicht zu interpretieren - Die Kodierung von Python gilt als vergleichsweise einfach. Diese Tatsache fördert die Adaption und ist für die zukünftige Weiterentwicklung der Anwendung von Bedeutung.

- Flexibel und erweiterbar - Python ist eine flexible Programmiersprache, die ohne großen Aufwand auf jede andere Sprache erweitert werden kann.
- Open-source mit großer Gemeinschaft.

Schwächen von Python:

- Langsame Ausführungsgeschwindigkeit - Die Python-Entwicklung ist im Vergleich zu Java, C# oder C/C++ etwas langsamer. Interpretierter Code ist ein Grund für langsameren Code.
- Python verbraucht sehr viel Speicher und es kann dadurch zu Speicherproblemen kommen, wenn eine große Anzahl von Objekten im RAM aktiv ist.

Die gewählte Drei-Schichten Architektur teilt die Aufgaben der Anwendung auf drei Server (Datenbank, Anwendung, Client) auf. Die Anwendungsschicht ist dabei das Bindeglied zwischen Client und Datenbank. Python mit der Möglichkeit zur Erweiterung durch Pakete und Bibliotheken erlaubt die Interoperabilität, damit Daten mittels SQL abgefragt werden können und diese auf dem Client mittels JavaScript visualisiert werden können. Ein Beispiel hierfür ist Plotly, das sowohl eine Python und JavaScript Bibliothek aufweist. Dies erleichtert die Kommunikation zwischen Anwenderschicht und Client und bewerkstelligt die einfache Visualisierung von Tabellen und Diagrammen.

In dieser Anwendung bildet der Anwendungsserver auch gleichzeitig den GIS Server. So werden die Rohdaten direkt aus der Datenbank ausgelesen und am Anwendungsserver zu einem Kartenlayer aufbereitet. Dies kann bei einer größeren Datenmenge zur Performanceverlust führen. Eine Alternative wäre es einen GIS-Server Anbieter wie beispielsweise GeoServer zu verwenden.

### **Bewertung des Softwarearchitekturentwurfs im Hinblick auf die Toolentwicklung**

Die Entwicklung des Prototyps wurde unter Berücksichtigung der verfügbaren Eingangsdaten und der Ergebnisse der Anforderungsanalyse konzipiert. Das Tool, die Webanwendung, besteht dabei aus dem Zusammenspiel von mehreren Funktionen. Zu den entwickelten Funktionen zählen:

- das Dashboard, das die statistische Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse ermöglicht.
- die räumliche und attributive Selektion von Daten
- die Webkarte zur Darstellung der räumlichen Daten
- die Alternativenprüfung

So wirkt sich die Selektion von Daten automatisch auch auf das Dashboard und Kartenbild aus. Auch die Auswahl der Daten für die Alternativenprüfung hängt von der Selektion ab.

Dieses Zusammenspiel ist durch die Modularität und Erweiterbarkeit von Python und Flask realisierbar (vgl. Grinberg, 2018). Andere Programmiersprachen wie R sind eventuell bei der Umsetzung von statistischen Auswertungen und Dashboards überlegen, haben dafür aber Schwächen in der Handhabung und Verarbeitung von räumlichen Daten. Bei der Wahl des Webframeworks könnte auch Django, das ebenfalls auf Python basiert, gesetzt werden, da es die gleichen Möglichkeiten bietet. Bei der Darstellung der Karte könnte auch die JavaScript Bibliothek OpenLayers verwendet werden. Aufgrund der Vertrautheit und dem Angebot an Funktionen, wie beispielsweise die implementierte Lasso Funktion, wurde Leaflet gewählt.

Weiter Funktionen die nützlich für die räumliche Energieplanung wären und in die Anwendung implementiert werden könnten:

- Abfrage von Web Map Services und Web Map Tile Services – dadurch könnten Zusatzinformationen (Karten) aus anderen Projekte in der Anwendung abgefragt werden
- Automatisches Erstellen von Berichten zu Gebäuden oder selbst definierten Bereichen

- Download der Alternativenprüfung Ergebnisse
- Möglichkeit Daten in der Datenbank zu bearbeiten/manipulieren
- Erstellen von Rollen zur Eingrenzung der Berechtigungen von User\*innen

### **Performance und Skalierbarkeit**

Eine Schätzung der potenziellen Anzahl von Benutzer\*innen ist entscheidend für die Planung der erforderlichen Infrastruktur. Bei der gewählten dreischichtigen Architektur können zusätzliche Ressourcen zur Bewältigung der Nutzung hinzugefügt werden, um eine leistungsstarke Bereitstellung zu unterstützen. Gängige Beispiele sind das Hinzufügen von redundanten Systemen, Load-Balancing, zusätzlicher Rechenleistung, Datenspeicherung oder Servern. Skalierbarkeit in einer Web-GIS-Programmierung impliziert, dass Anwendungen so konzipiert oder sogar gezielt kodiert werden, dass sie die Leistungsanforderungen der Website und der Webkartenfunktionalität dynamisch bewältigen können. Dynamische Computerleistung bezieht sich auf die Optimierung von Computerressourcen wie Speicher und Prozessoren, die normalerweise durch serverseitige Programmierung auf Betriebssystemebene erfolgt. Dies unterscheidet sich von der Programmierung von Webkartenfunktionen, die auf Benutzerinteraktionen reagieren, wie z. B. die Verbesserung der Funktionalität eines Web-GIS-Programms zur dynamischen Aktualisierung von Legenden und Symbolen, wenn eine in eine Website eingebettete Webkarte neu gezeichnet wird (Roth, 2017).

Weiters ist bei der Performance darauf zu achten, die Anzahl der Transaktionen zwischen Clients und Servern sowie die Menge der Informationen in jeder Transaktion zu reduzieren. Nur die minimal notwendigen Kartenebenen und Attributdaten sollten in Serveranfragen und -antworten enthalten sein. Die Vereinfachung von Kartensymbolen, Vektorkoordinatengeometrien und Dezimalzahlen (durch Runden) kann die Größe bzw. die Nutzlast von Web-Transaktionen reduzieren, wobei man sich bewusst ist, dass solche Maßnahmen zu Lasten der Präzision gehen (vgl. Quinn, 2018).

Zu den Strategien zur Beschleunigung der Webkartenleistung gehören die Verwendung von Tree Indexing, Multithreading und Clustercomputing (Yang et al., 2005). Eine weitere Taktik ist die Vorberechnung der Ergebnisse von häufigen Anfragen. Wenn Web-Benutzer zum Beispiel häufig die Flächenmaße von Polygonen anzeigen müssen, können diese Flächen mit einer Desktop-Software vorberechnet und in ein Attributfeld geschrieben werden. Der Server kann diesen Wert schneller zurückgeben, als er die Flächenberechnung durchführen könnte.

### **Alternativenprüfung**

Bei der Alternativenprüfung wird auf eine Excel Datei zugegriffen, die im Rahmen des Projektes S/E/P entstanden ist. Dies bietet zwar einen hohen Standard, jedoch ist das Aufrufen eines externen Dienstes (Excel) auch mit Problemen behaftet. Externe Programme können nicht von der Anwendung überwacht werden und Fehler in Excel führen zwangsweise zu Fehlern in der Anwendung. Des Weiteren konnte nicht überprüft werden, ob das Aufrufen der Excel Datei auch bei mehreren nutzenden Personen gleichzeitig funktioniert.

Eine Lösung wäre die vollständige Ausprogrammierung der Excel Datei in Python. Dies könnte etwaige Fehler vermeiden und zusätzlich die Performance steigern. Ein weiterer Punkt ist die Validierung der Ergebnisse. Die Alternativenprüfung, die in dieser Thesis umgesetzt wurde, bietet als Ergebnis mehrere Tabellen, die ein Vergleichen möglicher Wärmeversorgungssysteme in Hinsicht auf ökonomische und ökologische Kriterien zulassen. Das Ergebnis soll somit eine Entscheidungsunterstützung liefern und keine Verpflichtung sein.

Da in der Webanwendung Parameter sowohl manuell als auch automatisch aus der Datenbank definiert werden, ist es notwendig, dass der/die Anwender\*in mit diesem Prozess vertraut ist. Außerdem bietet die Webanwendung in der prototypischen Umsetzung nicht alle Parameter über die Eingabemaske zur Manipulation an. Durch weitere Daten zu Bestandsgebäuden wie Status zu Verteilleitungen, Heizraum,

Lagerraum und Dachform, könnte die Alternativenprüfung verbessert werden. Bei den Potentialdaten wird bis dato nur angegeben ob dieses Potential auf diesem Grundstück vorhanden ist oder nicht (ausgenommen Solarpotential). Bei Ausweisung der Eignung und Leistung von erneuerbaren Ressourcen könnte auch die Alternativenprüfung bessere Ergebnisse erzielen.

## 7. Fazit

Die Thesis zeigt, dass es mit einer, auf die räumliche Energieplanung abgestimmten Anwendung, realisierbar ist, die kommunale Energieplanung bezüglich der Wärmeversorgung von Gebäuden zu unterstützen. Dies wird durch verschiedene Faktoren erreicht.

Einer dieser Faktoren ist die Darstellung der Daten als Karten und Grafiken im WebGIS. Ein weiterer sind die Funktionalitäten, die es ermöglichen unterschiedliche Fragestellungen der Energieplanung zu behandeln. Dazu zählt die Selektion nach attributiven, wie auch räumlichen Kriterien oder die implementierten Alternativenprüfung. Diese Eigenschaften führen zu einer individuellen Nutzung und Gestaltung der Karte und des Dashboards.

Die einfach handhabbare und intuitive Bedienung des WebGIS trägt ebenfalls zu diesen Faktoren bei. Durch ein benutzerzentriertes Design wird es ermöglicht auch Akteur\*innen mit geringen GIS Kenntnissen einen Zugang zu einem Werkzeug zu geben, um einen Überblick über energieplanerische Inhalte zu erhalten. Das entwickelte WebGIS bietet somit eine Möglichkeit bei der Entwicklung, Regulierung und Steuerung der Wärmeversorgung von Gemeinden und Kommunen mitzuwirken.

Durch die Wahl von ausschließlich Open-Source-Produkten entstehen keine Kosten für die Software. Außerdem bietet dies die Möglichkeit die Anwendung individuell anzupassen. Des Weiteren wird damit sichergestellt, dass diese Anwendung in Zukunft weiterentwickelt und interoperabel damit gearbeitet werden kann.

### 7.1. Ausblick

Die räumliche Energieplanung ist meiner Ansicht nach ein sehr wichtiges Instrument um die Wärmeerzeugung in Gemeinden und Kommunen zu planen und zu optimieren. Ein WebGIS beziehungsweise ein CyberGIS bietet in meinen Augen eine gute Möglichkeit hierbei zu unterstützen. Durch die Visualisierung von räumlichen Gegebenheiten und die Auswertung von Statistiken, können solche Anwendungen die Arbeit erleichtern und beschleunigen. Wichtig ist hierbei nochmal anzumerken, dass die Datenbasis hierbei Vollständig und von hoher Qualität sein muss. Jedes Tool kann nur so gute Ergebnisse liefern, wie es die Datengrundlage hergibt. Aus diesem Grund müssen Ergebnisse, welche die Anwendung liefert, überprüft werden. Das in dieser Thesis entwickelte Werkzeug liefert bis dato Handlungsempfehlungen, Ergebnisse müssen nachgeprüft werden.

Im Projekt S/E/P wird zum Zeitpunkt des Schreibens an einer qualitativen hochwertigen Datenbasis für die Regionen Wien, Salzburg und Steiermark gearbeitet. Plan ist es aufbauend auf dieser Datengrundlage, Anwendungen zu entwickeln, um bei der räumlichen Energieplanung zu unterstützen.

Die entwickelte Anwendung kann von diesen Fortschritten des Projekts S/E/P profitieren und die Datenbasis nutzen, um Funktionen zu optimieren und auszubauen. Durch die vorliegende Arbeit kann aber auch das Projekt S/E/P profitieren. Die entwickelte Webanwendung kann als Vorlage für den Wärmeatlas des Projektes S/E/P dienen. Somit könnten Fehler vermieden aber auch Methoden, Funktionen oder andere positive Aspekte übernommen und erweitert werden.

Für die zukünftige Weiterentwicklung der Webanwendung ist ein Folgeprojekt angedacht. In diesem Folgeprojekt können Schwächen der Webanwendung ausgebessert und neue Funktionalitäten implementiert werden.

Als erster Schritt wäre es notwendig die Webanwendung über einen Webserver zu hosten und sie ausgiebig zu testen. Damit kann das Verhalten und die Performance der Anwendung im Multiuserbetrieb getestet werden. Zudem sollen weiter nützliche Layer in der Webkarte visualisiert werden. Dazu zählen Wärmeinfrastruktur wie Fernwärme- und Erdgasnetze sowie erneuerbare Energiepotentiale aus Solarstrahlung, oberflächennaher Geothermie (Erdreich, Grundwasser) und Abwärme. In diesem Schritt

könnte auch die Einbindung weiterer externe Web Map Services umgesetzt werden. Dies würde es ermöglichen Layer aus anderen Projekten für das Untersuchungsgebiet darzustellen.

Die Möglichkeit Daten zu editieren wäre eine zusätzliche wichtige Funktion der Webanwendung als Werkzeug in der räumlichen Energieplanung. So könnten ausgewählte Anwender\*innen Datenbestände ändern und somit Fehler bereinigen oder auch Gebäude abreißen und Neubauten planen.

Durch Verbesserung der Datengrundlage und der Implementierung von neuen Funktionen könnten die Webanwendung in Zukunft von einem Prototyp für die Gemeinde Gleisdorf zu einem ausgereiften Werkzeug der Energieraumplanung werden. Dazu ist es notwendig eine einheitliche Datenbasis zu schaffen und die Anwendung mit dieser zu versorgen. Bei einheitlicher Datenbasis kann die Webanwendung problemlos für andere Regionen eingesetzt werden. Mit der größeren Datenmenge müsste auch die Infrastruktur des WebGIS wachsen. Eine solche Infrastruktur wird auch Cyberinfrastruktur genannt (vgl Stewart et al. 2010). Diese Transformation würde von einem WebGIS zu einem CyberGIS führen.

## Literaturverzeichnis

- #Mission2030. Die österreichische Klima- und Energiestrategie (2018).
- Aamodt, A., Nygård, M. (1995): Different roles and mutual dependencies of data, information and knowledge. *Data & Knowledge Engineering* 16, Elsevier, Holland 1995, 191-222.
- Abart, Lore; Stöglehner, Gernot (2019): Sachbereitskonzept Steiermark Energie. Ein Beitrag zum Örtlichen Entwicklungskonzept.
- Alshamrani, A., & Bahattab, A. (2015). A comparison between three SDLC models waterfall model, spiral model, and Incremental/Iterative model. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 12(1), 106.
- Armstrong, Marc; Nyerges, Timothy; Wang, Shaowen; Wright, Dawn. (2011). Connecting geospatial information to society through cyberinfrastructure. 10.4135/9781446201046.n6.
- Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024 (2020). Online verfügbar unter [https://www.dieneuevolkspartei.at/Download/Regierungsprogramm\\_2020.pdf](https://www.dieneuevolkspartei.at/Download/Regierungsprogramm_2020.pdf).
- Bahgat, Karim (2015): Python geospatial development essentials. Utilize python with open source libraries to build a lightweight, portable, and customizable GIS desktop application. Birmingham, England, Mumbai [India]: Packt Publishing (Community Experience Distilled).
- Baseer, M. A.; Rehman, S.; Meyer, J. P.; Alam, Md. Mahbub (2017): GIS-based site suitability analysis for wind farm development in Saudi Arabia. In: *Energy* 141, S. 1166–1176. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.016.
- Bayer, Michael (2012): SQLAlchemy. The Architecture of Open Source Applications. Online verfügbar unter <http://aosabook.org/en/sqlalchemy.html>, zuletzt aktualisiert am 29.06.2016, zuletzt geprüft am 10.04.2021.
- Brunner, Sascha (2017): Grundlagen für die räumliche Energieplanung im WebGIS. <http://unigis.sbg.ac.at/files/Masterthesen/Full/103820.pdf>
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus; ÖGUT - Österreichische Gesellschaft für Umwelttechnik; pulswerk GmbH (2019): klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten, Neubau und Sanierung.
- Cajot, Sébastien; Mirakyan, Atom; Koch, Andreas; Maréchal, François (2017): Multicriteria Decisions in Urban Energy System Planning: A Review. In: *Front. Energy Res.* 5, S. 928. DOI: 10.3389/fenrg.2017.00010.
- Crickard, Paul; Toms, Silas; van Rees, Eric (2018): Mastering geospatial analysis with Python. Explore GIS processing and learn to work with GeoDjango, CARTOframes and MapboxGL-Jupyter. Birmingham, UK: Packt Publishing.
- Devillers, Rodolphe/Bédard, Yvan/Jeansoulin, Robert (2005). Multidimensional Management of Geospatial Data Quality Information for its Dynamic Use Within GIS. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71 (2), 205–215. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.2.205>.
- Dodgson, J & Spackman, Michael & Pearman, Alan & Phillips, Lawrence. (2009). *Multi-Criteria Analysis: A Manual*.
- Donohue, R. G. (2014). *Web Cartography with Web Standards: Teaching, Learning, and Using Open Source Web Mapping Technologies* (Dissertation). University of Wisconsin-Madison, Madison, WI.
- Dorman, Michael (2020): *Introduction to web mapping*. Boca Raton: CRC Press.
- Dragičević, S. (2004). The potential of Web-based GIS. *Journal of Geographical Systems*, 6(2), 79-81. DOI: 10.1007/s10109-004-0133-4
- Energiestadt. «Werkzeuge für die räumliche Energieplanung Modul 1-8.» 2019.<http://www.energiestadt.ch/instrumente-beispiele/raeumliche-energieplanung/>.
- Ershad, Ali (2020): *Geographic Information System (GIS): Definition, Development, Applications & Components*. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/340182760\\_Geographic\\_Information\\_System\\_GIS\\_Definition\\_Development\\_Applications\\_Components](https://www.researchgate.net/publication/340182760_Geographic_Information_System_GIS_Definition_Development_Applications_Components).
- Escalona, M.J. & Koch, Nora. (2004). Requirements Engineering for Web Applications - A Comparative Study.. *J. Web Eng.* 2. 193-212.
- Fielding, R. T. (2000). *Architectural styles and the design of network – based software architectures*. PhD Dissertation. University of California, Irvine.
- Fu, Pinde/Sun, Jiulin (Hg.) (2011). *Web GIS. Principles and applications*. Redlands, Calif., ESRI Press.

- GDAL/OGR contributors (2021). GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library. Open Source Geospatial Foundation. URL <https://gdal.org>
- Green Energy Lab, 2020, Spatial Energy Planning – Räumliche Energieplanung für die Wärmewende. <https://www.greenenergylab.at/projekt/spatial-energy-planning/>;
- Greene, Randal/Devillers, Rodolphe/Luther, Joan E./Eddy, Brian G. (2011). GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass* 5 (6), 412–432. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x>.
- Grinberg, M. (2018). Flask web development: developing web applications with python. " O'Reilly Media, Inc."
- Hofer, Gerhard (2020): Alternativenprüfung - Methode für Einsatz im HEATatlas. Berechnungsmethode für die Wirtschaftlichkeitsanalyse im Rahmen der Alternativenprüfung entsprechend OIB Richtlinie 6, integriert in den Wärmeatlas des Projektes Green Energy Lab, Spatial Energy Planning.
- Keeney, R. L. (1982): Decision analysis: an overview. In: *Operations research* 30 (5), S. 803–838. DOI: 10.1287/opre.30.5.803.
- Kranzl, Lukas; Müller, Andreas; Maia, Inà, Büchele, Richard; Hartner, Michael (2018): Wärmезukunft 2050. Erfordernisse und Konsequenzen der Dekarbonisierung von Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in Österreich.
- Land Steiermark (Hg.) (2019): Klima- und Energiestrategien Steiermark 2030. Aktionsplan 2019-2021. August 2019. Unter Mitarbeit von Gössinger-Wieser Andrea, Thyr Dieter, Preiß Dieter, Umgeher Marco und Weiland Adelheid. Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abteilung 15 - Energie, Wohnbau, Technik.
- LandStmk 2019. Steiermärkisches Baugesetz -Stmk. BauG. Das Land Steiermark
- Lane, David (2008): Introduction to Statistics. Unter Mitarbeit von David Scott, Mikki Hebl, Rudy Guerra, Dan Osherson und Heidi Zimmer. Rice University; University of Houston, Downtown Campus. Online verfügbar unter <https://onlinestatbook.com/>, zuletzt geprüft am 11.04.2021.
- Li, S., Dragicevic, S., Castro, F. A., Sester, M., Winter, S., Coltekin, A., Pettit, C., Jiang, B., Haworth, J., Stein, A., & Cheng, T. (2016). Geospatial Big Data Handling Theory and Methods: A Review and Research Challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115, 119–33. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.012 (link is external).
- Longley, Paul; Goodchild, Mike; Maguire, David; Rhind, David (2010): *Geographic Information Systems and Science*. 3., Auflage. New York, NY: Wiley, J.
- Malczewski, Jacek; Rinner, Claus (2015): *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Marty, Beat. «Energieplanung in den Gemeinden des Kantons Luzern.» 11. März 2013. <http://www.energie-aperoluzern.ch/pdf/Referat-Marty-130311.pdf>.
- Mauthner, Franz (2019): Vergleich von GIS-basierten Methoden zur Kartierung von Wärmebedarf. Grundlagen räumlicher Energieplanung am Beispiel der Stadtgemeinde Gleisdorf. Masterarbeit. Paris Lodron-Universität Salzburg, Salzburg. *Geographical Information Science & Systems*.
- McKinney, Wes (2021): pandas: powerful Python data analysis toolkit. Online verfügbar unter <https://pandas.pydata.org/docs/pandas.pdf>.
- Myagmartseren, Purevtseren; Buyandelger, Myagmarsuren; Brandt, S. Anders (2017): Implications of a Spatial Multicriteria Decision Analysis for Urban Development in Ulaanbaatar, Mongolia. In: *Mathematical Problems in Engineering* 2017 (3), S. 1–16. DOI: 10.1155/2017/2819795.
- OIB 2019. OIB-Richtlinie 6 – Energieeinsparung und Wärmeschutz. OIB Richtlinie 6 - Leitfaden: 2019 04 - OIB-330.6-026/19. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik
- Österreichische Städtebund (2016, 16.Februar). *Energieraumplanung: Städteplattform Smart Cities und „Transform +“*
- <https://www.staedtebund.gv.at/services/veranstaltungsergebnisse/veranstaltungsergebnisse-details/artikel/energieraumplanung-staedteplattform-smart-cities-und-transform/>
- Plewe, B. (1997). *GIS Online: Information Retrieval, Mapping, and the Internet* (1 edition). Santa Fe, NM: OnWord Press.
- Plotly Python Graphing Library (2021). Online verfügbar unter <https://plotly.com/python/>, zuletzt aktualisiert am 18.02.2021, zuletzt geprüft am 10.04.2021.
- PostGIS 3.0.0 Handbuch (2019). Online verfügbar unter <http://postgis.net/docs/manual-3.0/postgis-de.html>, zuletzt aktualisiert am 20.10.2019, zuletzt geprüft am 10.04.2021.

- Quinn, S. (2018). Web GIS. The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge (1st Quarter 2018 Edition), John P. Wilson (ed). DOI: 10.22224/gistbok/2018.1.11
- Rey, S.J. (2017). Python for GIS. The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge (3rd Quarter 2017 Edition), John P. Wilson (ed). DOI: 10.22224/gistbok/2017.3.4
- Roth, R. E. (2017). User Interface and User Experience (UI/UX) Design. *The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge* (2nd Quarter 2017 Edition), John P. Wilson (ed.). DOI: 10.22224/gistbok/2017.2.5 (link is external).
- Roth, R. E., Ross, K. S., & MacEachren, A. M. (2015). User-Centered Design for Interactive Maps: A Case Study in Crime Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 262–301. DOI: 10.3390/ijgi4010262
- Sack, C. (2017). Web Mapping. The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge (4th Quarter 2017 Edition), John P. Wilson (ed.). DOI: 10.22224/gistbok/2017.4.11
- Safexl (2021). Online verfügbar unter <https://pypi.org/project/safexl/>, zuletzt aktualisiert am 10.04.2021, zuletzt geprüft am 10.04.2021.
- Schardinger Ingrid, Biberacher Markus, Mauthner Franz. (2021). Digitale Grundlagen für die Energieraumplanung. Nachhaltige Technologien. 01|21. <https://www.aee.at/zeitschrift-erneuerbare-energie/10-allgemeines/1286-nt-01-2021-neue-impulse-fuer-die-energieraumplanung>
- Sean, Gillies (2020a): The Fiona User Manual. Online verfügbar unter <https://fiona.readthedocs.io/en/latest/manual.html>, zuletzt aktualisiert am 29.01.2021, zuletzt geprüft am 10.04.2021.
- Sean, Gillies (2020b): The Shapely User Manual. Online verfügbar unter <https://shapely.readthedocs.io/en/stable/manual.html>, zuletzt aktualisiert am 29.01.2021, zuletzt geprüft am 10.04.2021.
- Stewart, Craig A./Simms, Stephen/Plale, Beth/Link, Matthew/Hancock, David Y./Fox, Geoffrey C. (2010). What is cyberinfrastructure. In: Melissa Bauer/Miranda Carney-Morris/Trevor Murphy (Hg.). Proceedings of the 38th annual fall conference on SIGUCCS - SIGUCCS '10, the 38th annual fall conference, Norfolk, Virginia, USA, 24.10.2010 - 27.10.2010. New York, New York, USA, ACM Press.
- Themeßl, Nico (2019): Automatisierte Abfragen im Wärmeatlas zum Vergleich potenzieller Wärmeversorgungssysteme für Wohnareale. Darlegung einer Methode zur automatischen Abfrage potenzieller Wärmeversorgungssysteme für Wohnareale sowie deren ökonomischer- und ökologischer Vergleich mittels des Integrierten Wärmeatlas Salzburg. FH Technikum Wien, Wien.
- Väisänen, Sanni; Mikkilä, Mirja; Havukainen, Jouni; Sokka, Laura; Luoranen, Mika; Horttanainen, Mika (2016): Using a multi-method approach for decision-making about a sustainable local distributed energy system: A case study from Finland. In: *Journal of Cleaner Production* 137, S. 1330–1338. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.173.
- Vogl, Bernd; Geier, Stefan; Kinsperger, Andrea (2019): Fachkonzept Energieraumplanung. Wien: Magistratsabteilung 20 - Energieplanung (Werkstattbericht). Online verfügbar unter <http://media.obvsg.at/AC15452878-2001>.
- Wang, Jiang-Jiang; Jing, You-Yin; Zhang, Chun-Fa; Zhao, Jun-Hong (2009): Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (9), S. 2263–2278. DOI: 10.1016/j.rser.2009.06.021.
- Wang, Shaowen (2010): A CyberGIS Framework for the Synthesis of Cyberinfrastructure, GIS, and Spatial Analysis. In: *Annals of the Association of American Geographers* 100 (3), S. 535–557. DOI: 10.1080/00045601003791243.
- Wang, Shaowen; Goodchild, Michael F. (Hg.) (2019): *CyberGIS for Geospatial Discovery and Innovation*. Dordrecht: Springer Netherlands (GeoJournal Library).
- Winter, Madelein (2020) Aarhus-Konvention: Status Quo der Umsetzung in Österreich und der Eu. <https://epub.jku.at/obvulihs/download/pdf/5737580?originalFilename=true>
- Yang, Chaowei & Wong, David & Yang, Ruixin & Kafatos, Menas & Li, Qi. (2005). Performance-improving techniques in a Web GIS. *International Journal of Geographical Information Science*. 19. 319-342. DOI: 10.1080/13658810412331280202.
- Yang, Yingkui; Ren, Jingzheng; Solgaard, Hans Stubbe; Di Xu; Nguyen, Thong Tien (2018): Using multi-criteria analysis to prioritize renewable energy home heating technologies. In: *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 29, S. 36–43. DOI: 10.1016/j.seta.2018.06.005.