

MareEn

Standortgenaue Machbarkeitsstudie zur regenerativen Energieversorgung von Gebäuden mittels Grubenwassergeothermie in den durch die Folgen des Steinkohlebergbaus geprägten sächsischen Gemeinden Oelsnitz i.E., Lugau, Gersdorf und Hohndorf

Abschlussbericht



Impressum

Abschlussbericht

MareEn

Standortgenaue Machbarkeitsstudie zur regenerativen Energieversorgung von Gebäuden mittels Grubenwassergeothermie in den durch die Folgen des Steinkohlebergbaus geprägten sächsischen Gemeinden Oelsnitz i.E., Lugau, Gersdorf und Hohndorf

Erstellt im Auftrag von

Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft

Wilhelm-Buck-Straße 2
D-01097 Dresden

Tel: +49 351 564-0
Fax: +49 351 564-20007

Poststelle@smekul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de

Durchführung

Projektleitung

Dr.-Ing. Thomas Grab
Thomas.Grab@ttd.tu-freiberg.de
Tel: +49 3731 39-3004

Dipl.-Wi.-Ing. Thomas Wenzel
Thomas.Wenzel@dbi-gruppe.de
Tel: +49 3731 4195-369

Kontakte

TU Bergakademie Freiberg
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
Gustav-Zeuner-Straße 7
D-09599 Freiberg
www.geothermie.iwtt.tu-freiberg.de

DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH
Fachgebiet Energieversorgungssysteme
Karl-Heine-Straße 109/111
D-04229 Leipzig
www.dbi-gruppe.de

Autoren

TU Bergakademie Freiberg

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

Dr.-Ing. Thomas Grab
Dipl.-Wi.-Ing. Lukas Oppelt
MBA Timm Wunderlich
Tom Ebel, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Tobias M. Fieback



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



technische
THERMO
DYNAMIK

DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Fachgebiet Energieversorgungssysteme

Dipl.-Wi.-Ing. Thomas Wenzel
Patrick Heinrich, B.Sc.
Dipl.-Ing. (FH) Robert Manig



DBI GUT
Gas- und Umwelttechnik

Laufzeit

22.07.2021 bis 31.12.2022
Abgabe Bericht: 30.06.2023

Das diesem Forschungsbericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Freistaates Sachsen unter dem Förderkennzeichen **100593187** gefördert.

Zuwendungsgeber:

Sächsische Aufbaubank im Namen des Sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den o.g. Autoren.



SÄCHSISCHE
AUFBAUBANK



Sächsisches Staatsministerium für
Energie, Klimaschutz, Umwelt
und Landwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Kurzfassung / Abstract	III
Danksagung	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Hintergrund	1
1.2 Zielstellung der Studie	3
2 Lokale Modellierung und Prognose des Gebäudeenergiebedarfs über Tage	4
2.1 Räumliche und strukturelle Analyse zu relevanten Flächennutzungen im Untersuchungsgebiet	4
2.1.1 Definition des Betrachtungsgebietes und methodische Vorgehensweise	4
2.1.2 Auswertung für das Gemeindegebiet Oelsnitz/Erzgeb.	7
2.1.3 Auswertung für die Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz	10
2.1.4 Auswertung für das Gemeindegebiet Hohndorf	14
2.1.5 Auswertung für das Gemeindegebiet Gersdorf	18
2.1.6 Zusammenfassung der räumlich-strukturellen Analyse	21
2.2 Standortgenaue Modellierung der Energiebedarfe je Abnehmer	25
2.2.1 Methodik zur Modellierung der Energiebedarfe und Erläuterung der Datenbasis	25
2.2.2 Ergebnisdarstellung	36
2.3 Ermittlung von typischen Lastgängen je Abnehmergruppe	41
2.3.1 Vorgehensweise zur Erstellung der Heizlastprofile im Gebäudesektor	41
2.3.2 Vorgehensweise zur Erstellung der Kühllastprofile im Gebäudesektor	45
2.3.3 Ergebnisdarstellung für die Gemeinden im Untersuchungsgebiet	47
2.4 Erstellung und Bewertung von möglichen Versorgungsnetzen	51
2.4.1 Grundlagen zu Wärmenetzen und kalter Nahwärmeversorgung	51
2.4.2 Methodik zur Grobtrassierung möglicher Versorgungsnetze und Analyse zu potenziellen Versorgungsclustern je Gemeindegebiet	52
2.4.3 Auswertung für das Gemeindegebiet Oelsnitz/Erzgeb.	58
2.4.4 Auswertung für die Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz	59
2.4.5 Auswertung für das Gemeindegebiet Hohndorf	60
2.4.6 Auswertung für das Gemeindegebiet Gersdorf	61
2.4.7 Zusammenfassung und Vergleich der netzgebundenen Versorgungsmöglichkeiten	62

3	Analyse des untertägigen energetischen Potentials	64
3.1	Metastudie und Datenakquise zu bestehenden Messdaten	64
3.1.1	Zusammenfassung bereits bestehender Studien	64
3.1.2	Beschreiben der Bedingungen im Revier	66
3.2	Entwicklung einer Methodik zur Berechnung des verfügbaren untertägigen energetischen Potentials	73
3.2.1	Grundlegende Methodikentwicklung	73
3.2.2	Praktische Potentialermittlung – Beispiel Kaisergrubenschacht (KGS)	76
3.2.3	Zuströmendes Grubenwasser	78
3.3	Durchführung und Auswertung eines Wärmepumpenversuchs am Modellstandort Hohndorf	80
3.4	Potentialbestimmung der Standorte	88
4	Abgleich der untertägigen Potentiale mit obertägigen Wärmesenken	95
4.1	Gegenüberstellung des untertägigen und obertägigen Potentials	95
4.2	Identifizierung von geeigneten Standorten im Untersuchungsgebiet	96
5	Evaluierung von energetischen Versorgungskonzepten für geeignete Standorte	101
5.1	Bewertungsaspekte der ermittelten Versorgungsnetze	101
5.2	Energetische Versorgungskonzepte	102
5.3	Simulation beispielhaften Modellquartiers in Gersdorf	113
5.4	Sektorenkopplungspotential innerhalb des Netzes	116
6	Öffentlichkeitsarbeit und Bürgerbeteiligungen	120
7	Handlungsempfehlungen und Roadmap	122
	Literaturverzeichnis	124

Kurzfassung / Abstract

Deutsch

Das Untersuchungsgebiet, das dem Forschungsprojekt zu Grunde liegt, ist das ehemalige Steinkohlerevier Lugau-Oelsnitz in Südwestsachsen mit den angrenzenden Gemeinden. Es wurde über 100 Jahre durch den aktiven Bergbau geprägt. Der Strukturwandel erfordert Maßnahmen zur Nachsorge. Insbesondere der mögliche Austritt von Grubenwasser ab 2032 liegt hier im Fokus. Gleichzeitig stellen sich den Gemeinden im Untersuchungsgebiet – so wie nahezu allen Gemeinden in Deutschland – noch Herausforderungen bei der erneuerbaren Wärme- und Kälteversorgung im Gebäudesektor. Hier liegt Potential bei der Kombination von technisch nötigen Nachsorgemaßnahmen (Abpumpen der Grubenwässer, Sanierung von Stollen) und erneuerbarer Energieversorgung durch die Grubenwässer. Insbesondere Versorgungsnetze können in den durch den Strukturwandel betroffenen Gemeinden zukünftig Vorteile bei einer klimaneutralen Versorgung mit Wärme und Kälte generieren.

Im Rahmen der Mehrwert-Initiative »Nachhaltig aus der Krise« wurden in der vorliegenden Studie MareEn beide Fragestellungen beleuchtet und die nötigen Analysen im Untertage- sowie Übertagebereich miteinander gekoppelt. Dazu wurde neben Parametermessungen, sowie darauf aufbauenden Potentialerhebungen unter Tage, auch die Abnehmerseite über Tage intensiv beleuchtet. Für das etwa 70 km² große Untersuchungsgebiet – bestehend aus den Gemeinden Oelsnitz/Erzgeb., Gersdorf, Hohndorf sowie der Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz – konnten im Rahmen des Projektes detailliert die untätigen energetischen Potentiale ermittelt und potenzielle Entnahmestellen für Grubenwasseranwendungen identifiziert werden. Darüber hinaus hat die Analyse über Tage gezeigt, dass trotz der ländlichen Prägung des Gebietes auch eine netzgebundene Energieversorgung von Wohn- und Nichtwohngebäuden in vielen Gebieten im ehemaligen Steinkohlerevier Lugau-Oelsnitz sinnvoll ist. Hierzu wurde im Projektverlauf das gesamte Untersuchungsgebiet abnehmerseitig auf eine Eignung zur netzgebundenen Wärmeversorgung geprüft, via geometrischer Algorithmen mit den Grubenwasserentnahmepunkten verschnitten und technisch darstellbare Wärmenetze trassiert.

Im Ergebnis wurden zehn Gebiete identifiziert, an denen sowohl eine Entnahme und Rückspeisung des Grubenwassers möglich ist, als auch Abnehmerstrukturen über Tage existieren, an die die Wärmeenergie abgegeben werden kann. Erste grobe Energieversorgungskonzepte, welche für die zehn ausgewählten Gebiete erstellt wurden, haben gezeigt, dass eine hohe Deckung der Energiebedarfe mit Grubenwassergeothermie möglich ist. Im Vergleich zu konventionellen Technologien zur Beheizung können langfristig nicht nur Emissionen eingespart, sondern auch ökonomische Vorteile erzielt werden. Da in MareEn die Wärmeseite fokussiert wurde und die Potentialerhebung zudem konservativ erfolgt ist, ist davon auszugehen, dass die hier getätigten Aussagen zur energetischen Versorgung gut in die Praxis überführbar sind. Zudem bietet die Energieversorgung mit Grubenwässern langfristig Planungssicherheit – sowohl für die Kommunen als auch für die Bürgerinnen und Bürger. Die Analysen haben gezeigt, dass Grubenwassergeothermieanlagen bei einer möglichen Laufzeit von 50 Jahren oder länger langfristige und stabile Kostenstrukturen aufweisen, welche für bezahlbare und nachhaltige Energieversorgungskonzepte auch weit in der Zukunft sorgen können. Neben den positiven ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten ist die Unabhängigkeit von Import-Energieträgern zu betonen.

Auf Basis der Ergebnisse des Projektes MareEn ist im nächsten Schritt für die identifizierten Gebiete eine detaillierte Machbarkeitsanalyse bzw. ein Basic-Engineering zur Planung und Projektierung von konkreten Anlagenkonzepten durchzuführen. Die Einbindung weiterer erneuerbarer Energien (z.B. Photovoltaik, Solarthermie etc.) zur weiteren Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist analog zu prüfen. Auch die Möglichkeit der Untergrundwärmespeicherung sollte im Einzelfall geprüft werden. Das Thema Gebäudekühlung sollte bei der Anlagenauslegung für längere Planungshorizonte als die oben genannten 50 Jahre berücksichtigt werden. Im Fazit geben die Ergebnisse von MareEn einen ersten Impuls zu einer erneuerbaren Energieversorgung in Synergie mit dem Strukturwandel im Sektor Bergbau. Die energetische Nutzung der Grubenwässer ist eine realistische Chance zur sinnvollen Nutzung dieser Ewigkeitsaufgabe in Synergie mit einer klimaneutralen

Wärme- und Kälteversorgung. Die betreffenden Gebiete können Teile der Wärmeversorgung auf eine lokale und nachhaltige Technologie umstellen. Energiepolitische Debatten in den betreffenden Regionen sollten diese Vorteile betonen, um die Akzeptanz bei der Bevölkerung zu erhöhen.

Englisch

The communities bordering the former coal mining area of Lugau-Oelsnitz in south-west Saxony were shaped by active mining for over 100 years. Structural change requires measures for aftercare, especially considering the possible leakage of mine water from 2032 onwards. At the same time, the municipalities in the case study area – like almost every municipality in Germany – still have some challenges to undergo in terms of renewable heating and cooling in the building sector. The combination of technically necessary aftercare measures (pumping out the mine water, rehabilitating galleries) and renewable energy supply by mine water can create new chances for the region. In particular, energy supply networks (heating and/or cooling grids) can generate advantages in the future for a climate-neutral supply of heat and cold as well as anergy networks for local heating in the communities affected by structural change.

Within the framework of the added value initiative »Nachhaltig aus der Krise« (sustainably out of the crisis), both questions were examined in the MareEn study. The necessary analyses in the underground and surface areas were coupled with each other. For this purpose, in addition to parameter measurements and potential surveys based on the underground's nature, the consumer-side above ground was also intensively examined. For the approximately 70 km² study area - consisting of the municipalities of Oelsnitz/Erzgeb., Gersdorf, Hohndorf as well as the administrative community of Lugau/Erzgeb. and Niederwürschnitz - the underground energy potentials could be determined in detail and potential extraction points for mine water applications identified within the scope of the project. In addition, the above-ground analysis showed that, despite the rural character of the area, a grid-connected energy supply for residential and non-residential buildings also makes sense in many areas in the former Lugau-Oelsnitz coalfield. During the project, the entire case study area was checked on the customer side for its suitability for grid-bound heat supply, intersected with the mine water extraction points via geometric algorithms and technically representable heat networks were routed.

As a result, ten areas were identified where it is possible to extract and feed back the mine water, and where buildings (energy consumers) are available to use the thermal energy. Energy supply concepts, which were prepared for the ten selected areas, have shown that a respectable percentage of the energy demand can be covered by mine water geothermal energy. Compared to conventional technologies for heating, not only long-term emissions can be reduced, but also economic advantages can be achieved. Since MareEn focused on the heat side and the analysis were very conservative, it can be assumed that the statements made can be transferred into a practical implementation. In addition, the energy supply with mine water geothermal energy offers long-term planning security - both for the municipalities and for the citizens. The analyses have shown that mine water plants with possible lifetimes of 50 years or longer have long-term and stable cost structures that can provide affordable and sustainable energy supply far into the future. In addition to the positive ecological and economic aspects, the independence from energy source imports should be emphasized as well.

Based on the results of the MareEn project, the next step is to conduct a detailed feasibility analysis or basic engineering for the identified areas to plan and project specific system concepts. The integration of further renewable energies (photovoltaics, solar thermal energy etc.) can contribute to further improve the economic efficiency. The possibility of underground heat storage, which has already been considered in the project, should also be examined in individual cases. Additionally, the issue of cooling demands should be considered when designing systems for longer planning horizons than the 50 years mentioned above. In conclusion, the results of MareEn provide an initial impulse for a renewable energy supply in synergy with structural change in the former mining sector. Mine water geothermal energy is a realistic opportunity to benefit from the eternal task in synergy with a climate-neutral heating and cooling supply. Eligible areas can convert parts of the heat supply to a local and sustainable technology. Energy policy debates in the regions concerned should emphasize these advantages to increase acceptance among the population too.

Danksagung

Ohne die Unterstützung zahlreicher Akteure wäre es nicht möglich gewesen, das Projekt im anvisierten Zeitraum erfolgreich zu bewerkstelligen. Wir möchten daher gern die Gelegenheit nutzen, allen im Projekt beteiligten assoziierten Partnern und Mitstreitern zu danken und uns für das außerordentlich hohe Engagement und die Kooperationsbereitschaft erkenntlich zeigen.

So gilt unser Dank zunächst den beteiligten Bürgermeistern aus den einzelnen Gemeinden

- Bernd Birkigt & Thomas Lein aus Oelsnitz/Erzgeb.,
- Thomas Weikert aus Lugau/Erzgeb.,
- Erik Seidel aus Gersdorf sowie
- Matthias Groschwitz aus Hohndorf,

welche uns stets unkompliziert zur Seite standen und entweder persönlich oder über designierte Ansprechpartner den Projektfortschritt begleitet und stets hilfreichen Input oder Daten, welche in die Analysen einbezogen wurden, bereitgestellt haben.

Darüber hinaus möchten wir uns sehr bei der allen beteiligten Mitarbeitenden der Stadtverwaltung Oelsnitz, der Wohnungsgesellschaft Oelsnitz/Erzgeb. der Stadtverwaltung Lugau/Erzgeb. sowie dem Bergbaumuseum Oelsnitz bedanken, welche uns ebenfalls mit Daten im Projektverlauf unterstützt, sowie vielerlei Anregungen und Hinweise gegeben haben. Besonderer Dank gilt ebenso Herrn Sven Nagel der es uns ermöglicht hat, auf seinem Grundstück den Wärmepumpenversuchsstand zur Durchführung von Messungen im Gebiet Hohndorf abzustellen, anhand derer eine Vielzahl von Realdaten gewonnen werden konnte.

Ebenso möchten wir uns herzlich beim Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) für das stetige Interesse an den abgehaltenen Meetings und Workshops bedanken. Insbesondere Frau Maria Ussath und Frau Christin Jahns gebührt hierbei unser Dank. In diesem Zusammenhang gilt der Dank auch dem Sächsischen Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL), welches mit dem Förderprogramm „Nachhaltig aus der Krise“ über die Sächsische Aufbaubank (SAB) die finanziellen Mittel für dieses Vorhaben bereitgestellt hat.

Zuletzt danken wir ebenso allen im Projekt beteiligten wissenschaftlichen Hilfskräften, Studierenden und sonstigen Beteiligten, die zum erfolgreichen Abschluss dieses Vorhabens beigetragen haben. Insbesondere die Ergebnisse der zahlreichen studentischen Arbeiten brachten ebenfalls einen essentiellen Beitrag zu umfassenden Resultaten und dem Gelingen des Projekts. Im Besonderen gilt der Dank den folgenden Studierenden: Julia Balski, Undine Fleischmann, Marcus Fröhlich, Alexander Klein, Robin Klink, Susanne Lang, Vyshaali Subramanian, Rike Wiechmann.

Mit freundlicher Unterstützung der Gemeinden:



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Veranschaulichung des Reviers Lugau-Oelsnitz mit prognostiziertem Grubenwasseraustritt (ohne Gegenmaßnahmen) ab dem Jahr 2032 (eigene Darstellung)	2
Abbildung 2:	Darstellung des Untersuchungsgebietes im Projekt MareEn, eigene Darstellung nach [1], [2], [3]	5
Abbildung 3:	Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Stadt Oelsnitz/Erzgeb.	8
Abbildung 4:	Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im Gemeindegebiet Oelsnitz/Erzgeb.	9
Abbildung 5:	Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz	13
Abbildung 6:	Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im Gemeindegebiet der Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb	14
Abbildung 7:	Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Gemeinde Hohndorf	16
Abbildung 8:	Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im Gemeindegebiet Hohndorf	17
Abbildung 9:	Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Gemeinde Gersdorf	19
Abbildung 10:	Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im Gemeindegebiet Gersdorf	20
Abbildung 11:	Räumlich-Strukturelle Charakterisierung des gesamten Untersuchungsgebietes	22
Abbildung 12:	Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im gesamten Untersuchungsgebiet	23
Abbildung 13:	Analyse zur Verteilung der Anteile energetisch relevanter Flächennutzungen in den einzelnen Teilgebieten	24
Abbildung 14:	Systematisierung des DBI-Gebäudeatlas und Überblick über verfügbare gebäudescharfe Daten [3]	25
Abbildung 15:	Struktur des Wärmeenergiebedarfes nach Anwendungszweck für private Haushalte in Prozent (nach [7])	26
Abbildung 16:	Vereinfachte Methodik zur Modellierung des Wärmebedarfs auf Basis der vorgestellten Datengrundlagen sowie des DBI-Gebäudeatlas [3]	29
Abbildung 17:	Einflussfaktoren auf die Wärmeprognose, eigene Darstellung	31
Abbildung 18:	Äußere und Innere Kühllasten von Räumen [17]	32
Abbildung 19:	Jahresmittelwerte der Heizgradtagszahlen von 2001 bis 2018, eigene Berechnung auf Basis von Wetterstationsdaten des DWD nach [15]	35
Abbildung 20:	Jahresmittelwerte der Kühlgradtage von 2001 bis 2018, eigene Berechnung auf Basis von Wetterstationsdaten des DWD nach [15]	36
Abbildung 21:	Gegenüberstellung der Wärme- und Kältebedarfe für die Stadt Oelsnitz/Erzgeb	37
Abbildung 22:	Gegenüberstellung der Wärme- und Kältebedarfe für die Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Niederwürschnitz	38
Abbildung 23:	Gegenüberstellung der Wärme- und Kältebedarfe für die Gemeinde Hohndorf	39
Abbildung 24:	Gegenüberstellung der Wärme- und Kältebedarfe für die Gemeinde Gersdorf	40
Abbildung 25:	SLP des täglichen Bedarfs in einem Haushalt im EFH (HEF-03) (eigene Darstellung nach [23])	43

Abbildung 26:	Schema zum prinzipiellen Vorgehen zur Erstellung von Kühllastprofilen im Projekt MareEn	45
Abbildung 27:	Beispielhafte Darstellung der Zusammensetzung eines Kühllastprofils für ein Bürogebäude (Südausrichtung und 20 % Verschattung)	46
Abbildung 28:	Beispielhafte Darstellung der Zusammensetzung eines Kühlprofils für ein Mehrfamilienhaus anhand von Monitoringdaten	46
Abbildung 29:	Verteilung des jährlichen Wärmebedarfes in der Gemeinde Oelsnitz	47
Abbildung 30:	Verteilung des jährlichen Wärmebedarfs in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz	48
Abbildung 31:	Verteilung des jährlichen Wärmebedarfes in der Gemeinde Hohndorf	49
Abbildung 32:	Verteilung des jährlichen Wärmebedarfes in der Gemeinde Gersdorf	50
Abbildung 33:	Qualitative Darstellung der Entwicklung von Effizienz und Temperaturniveau von Wärmenetzen, nach [33]	51
Abbildung 34:	Darstellung der Wärmeabnehmer und des Straßennetzes sowie Auswahl lukrativer Netzabschnitte in einem Beispielgebiet	53
Abbildung 35:	Entwicklung der lukrativen Netzabschnitte für verschiedene Wärmebelegungen in einem Beispielgebiet	55
Abbildung 36:	Ergebnisse der Grobtrassierungen und netzgebundenen Versorgungsanalysen für das gesamte Untersuchungsgebiet (Gemeinden im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau-Oelsnitz/Erzgeb.) des Forschungsprojektes MareEn	57
Abbildung 37:	Kartografische Veranschaulichung der netzgebundenen Versorgungsanalyse in der Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb.	58
Abbildung 38:	Kartografische Veranschaulichung der netzgebundenen Versorgungsanalyse in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau und Niederwürschnitz	59
Abbildung 39:	Kartografische Veranschaulichung der netzgebundenen Versorgungsanalyse in der Gemeinde Hohndorf	60
Abbildung 40:	Kartografische Veranschaulichung der netzgebundenen Versorgungsanalyse in der Gemeinde Gersdorf	61
Abbildung 41:	Grubenwasseranstieg seit 1970 und Vergleich mit Messdaten der Grubenwassermessstellen (GRWM) [26]	67
Abbildung 42:	Streckenverlauf im Areal des Kaisergrubenschachtes	76
Abbildung 43:	Parameterstudie (Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, maximaler Entzugszeitraum) für die Strecke des Kaisergrubenschachts	78
Abbildung 44:	Wärmeleistung der Strecke bei variierenden Sekundärwasseranteilen für das Szenario des Standortes Kaisergrubenschacht aus Tabelle 15 ($Q_{\max, \text{nutz}} = 364,1 \text{ kW}$ - bei 0% Zustrom)	80
Abbildung 45:	Schematischer Aufbau eines Wärmeübertragers für die energetische Nutzung von Grubenwasser (a=neue, unverschmutzte Platte, b=genutzte, verschmutzte Platte, c=genutzte, gereinigte Platte) (nach [63])	81
Abbildung 46:	Mobiler Wärmepumpenversuchsstand für Pumpversuche im Projekt MareEn	82
Abbildung 47:	Versuchsstandort für den Wärmepumpenversuch mit dem Versuchsstand in der Gemeinde Hohndorf am Tiefenbrunnen	82

Abbildung 48:	Verlauf Wassertemperatur (Container) und der Volumenströme in den Wärmeübertrager für den Heiz- und Kühlmodus über den Versuchszeitraum (05/2022-10/2022) am Standort Hohndorf	84
Abbildung 49:	Verlauf der Druckdifferenz und der übertragenen Wärmeströme in den Wärmeübertragern für den Heiz- und Kühlmodus über den Versuchszeitraum (05/2022-10/2022) am Standort Hohndorf	84
Abbildung 50:	Gegenüberstellung der Heiz- und Kälteleistung in den Wärmeübertragern für den Heiz- und Kühlmodus mit dem unverschmutzten Zustand über den Versuchszeitraum (05/2022-10/2022) am Standort Hohndorf, basierend auf den Messwerten der nassen Gewichts Differenz und dem Verschmutzungsgrad	86
Abbildung 51:	Fall1 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Oelsnitz ausgehend von den Schächten	90
Abbildung 52:	Fall 2 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Oelsnitz ausgehend von durch Gemeinden definierten potentiellen Abnehmergebieten	90
Abbildung 53:	Fall 1 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Lugau/Niederwürschnitz ausgehend von den Schächten	91
Abbildung 54:	Fall 2 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Lugau/Niederwürschnitz ausgehend von durch Gemeinden definierten potentiellen Abnehmergebieten	91
Abbildung 55:	Fall 1 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Hohndorf ausgehend von den Schächten	92
Abbildung 56:	Fall 2 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Hohndorf ausgehend von durch Gemeinden definierten potentiellen Abnehmergebieten	92
Abbildung 57:	Fall 1 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Gersdorf ausgehend von den Schächten	93
Abbildung 58:	Fall 2 Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Gersdorf ausgehend von durch Gemeinden definierten potentiellen Abnehmergebieten	93
Abbildung 59:	Fall 3 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre im gesamten Revier ausgehend von der vom DBI GUT durchgeführten Clusterbildung	94
Abbildung 60:	Gegenüberstellung potenzieller Grubenwasser-Entnahmepunkte mit räumlichen Strukturen der Landnutzung und Wärmebedarfen auf Rasterebene in den betrachteten Gemeinden	95
Abbildung 61:	Analyse zur Netzmodellierung für verschiedenen Belegungsszenarien (Mindestwärmebelegung von 1.000, 1.500, 2.000 und 2.500 kWh/(a·m))	97
Abbildung 62:	Identifizierte und ausgewählte Ortsteile und Quartieren mit der höchsten wirtschaftlichen Relevanz und Zugang zu Grubenwasser-Entnahmepunkten.	98
Abbildung 63:	Identifizierung von fünf zusätzlichen Quartieren mit relevanten Standortfaktoren	99
Abbildung 64:	Grobtrassierung, Kennwertauswertung und Lastprofil für das Beispiel S4: Oelsnitz (Neu-Oelsnitz)	100
Abbildung 65:	Im Rahmen der Simulation definierte Gebäudeverteilung auf dem Gelände	114
Abbildung 66:	Anteil verschiedener Energieträger am deutschen Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte im Jahr 2020, nach [76]	116
Abbildung 67:	Bereitgestellte Temperaturniveaus verschiedener regenerativer Energieträger, nach [33], [78] und [79]	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Tabellarische Gegenüberstellung der Gemeinden im Untersuchungsgebiet	4
Tabelle 2:	Auswertung zur Landnutzung in der Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb.	7
Tabelle 3:	Auswertung zur Landnutzung in den Gemeinden Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz	10
Tabelle 4:	Auswertung zur Landnutzung in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz	11
Tabelle 5:	Auswertung zur Landnutzung in der Gemeinde Hohndorf	15
Tabelle 6:	Auswertung zur Landnutzung in der Gemeinde Gersdorf	18
Tabelle 7:	tabellarische Auswertung der Flächennutzung im Untersuchungsgebiet	21
Tabelle 8:	Spezifische Wärmebedarfe je Gebäudetyp (Einfamilienhäuser – EFH sowie Mehrfamilienhäuser – MFH) in Bestandsgebäuden nach [13]	29
Tabelle 9:	Spezifischer Kühlbedarf der verschiedenen Gebäudetypen, eigene Darstellung nach [21]	34
Tabelle 10:	Kennzeichnung der Ausprägung des Lastprofils (eigene Darstellung nach [23])	41
Tabelle 11:	Kennzeichnung der Lastprofilkategorie (eigene Darstellung nach [23])	42
Tabelle 12:	Übersicht über die identifizierten Versorgungskluster und Vergleich der Parameter bei einer hypothetischen Vollversorgung der Gemeinde via Wärmenetzen	62
Tabelle 13:	Untersuchte Strecken in der Nähe von Schachtstandorten im Revier Lugau/ Oelsnitz	72
Tabelle 14:	Für die Potentialberechnung der Strecken notwendige Ausgangsparameter	75
Tabelle 15:	Rechnerische Parameter im Areal Kaisergrubenschachtes (Gesteinswerte abgeleitet nach [58], [59])	76
Tabelle 16:	Verschmutzungsgrad und Gewichts differenzen zwischen unverschmutzter und verschmutzter Platte für den Pumpversuch in Hohndorf (rot markierte Zahlen: schlechteste Oberfläche in dieser Kategorie, grün markierte Zahlen: beste Oberfläche in dieser Kategorie)	85
Tabelle 17:	Gesamtbewertung der eingesetzten Materialien und Oberflächen am Versuchsstandort Hohndorf	87
Tabelle 18:	Ökonomische Betrachtung des Standortes Cluster Lugau mit 0 % Sekundärwasser (nach [71])	102

1 Einleitung

1.1 Motivation und Hintergrund

Um die Klimaschutzziele des Bundes und der Länder zu erreichen, muss die Integration von Erneuerbaren Energieträgern im gesamten Energiesystem weiter forciert werden. Während in den letzten Jahren der Anteil Erneuerbarer Energien bei der Stromversorgung stets deutlich gesteigert werden konnte, besteht bei der regenerativen Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden noch Nachholbedarf, um die sächsischen Klimaziele zu erreichen.

In Sachsen besteht aufgrund der historischen Prägung durch den Bergbau (elf große Bergbaureviere) ein einzigartiger Standortvorteil, der bei der Integration von regenerativen Energien eine große Rolle spielen kann. Zukünftig ist es für geeignete Gemeinden in Sachsen interessant, erneuerbare Energien durch die Nutzung des geothermischen Potentials von Grubenwässern bereitzustellen. Dies sind Wässer, die durch eine Wasserhaltung im Altbergbau nach der Schließung von Bergwerken weiterhin abgepumpt werden müssen oder über Entwässerungstollen abgeführt werden. Damit soll der Austritt und die Überflutung von ganzen Liegenschaften über Tage verhindert werden. Die Nachsorgemaßnahmen verursachen jährlich beträchtliche Kosten. Dabei können die durch die Flutung des Altbergbaus entstandenen unterirdischen Reservoirs als erneuerbare Energiequelle und Energiespeicher dienen. Grubenwassergeothermie kann somit als erneuerbare und lokale Energiequelle genutzt werden. Es stellt zudem aufgrund der ganzjährigen und witterungsunabhängigen Verfügbarkeit bei konstanten Wassertemperaturen eine grundlastfähige Energiequelle dar. Durch die Nutzung des Grubenwassers zur Gebäudekonditionierung kann aus der kostenintensiven Ewigkeitsaufgabe ein ökonomischer und ökologischer Synergieeffekt entstehen.

Eine nachhaltige Energieversorgung bedingt neben der energetischen Verfügbarkeit unter Tage auch ein entsprechendes Abnahmepotential über Tage. Lokale Analysen, die eine untertägige Grubenwasserverfügbarkeit mit obertägigen Gebäudeenergiebedarfen zusammenführen sind somit von essentieller Bedeutung, wenn Energieversorgungskonzepte auf Basis von Grubenwassergeothermie geplant und umgesetzt werden sollen. Zielstellung des Projektes MareEn ist es, untertägige Potentiale mit übertägigen ortskonkreten Energiebedarfsanalysen zusammenzuführen. Außerdem muss dabei die Möglichkeit einer netzgebundenen Versorgung geprüft werden, da geothermische Energiequellen sehr häufig nicht sinnvoll für eine Einzelgebäudeversorgung (insbesondere im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich) geeignet sind. Die Analysen sollen somit u.a. eine Netzverlaufsplanung beinhalten (d.h. Trassierung möglicher geothermisch betriebener Energienetze), sodass im Ergebnis konkrete Standorte zur Energieabnahme in Abhängigkeit untertägiger Parameter und Verfügbarkeiten ausgewiesen werden können. In diesem Zusammenhang sollte auch untersucht werden, inwieweit die Nutzung des stillgelegten Bergwerkes als saisonaler Wärmespeicher möglich ist.

Um diese Analysen durchzuführen, wurden im Vorfeld des Projektes mehrere Gebiete in Sachsen identifiziert, die sich für eine derartige Energieversorgung grundsätzlich eignen würden. Nach Rücksprachen mit den entsprechenden Gemeindevertretern wurde das ehemalige Steinkohlerevier Lugau-Oelsnitz mit seinen vier Gemeinden (Oelsnitz/Erzgeb., Lugau/Erzgeb., Gersdorf und Hohndorf) als Modellgebiet ausgewählt, da hier aufgrund des ab 2032 bevorstehenden Austretens von Grubenwasser (ohne Gegenmaßnahmen) eine hohe Dringlichkeit und ein hohes öffentliches Interesse besteht.

Ein Querschnitt des Gebietes Lugau-Oelsnitz, welcher die Stelle sowie weitere Randbedingungen des möglichen Grubenwasseraustrittes veranschaulicht, ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

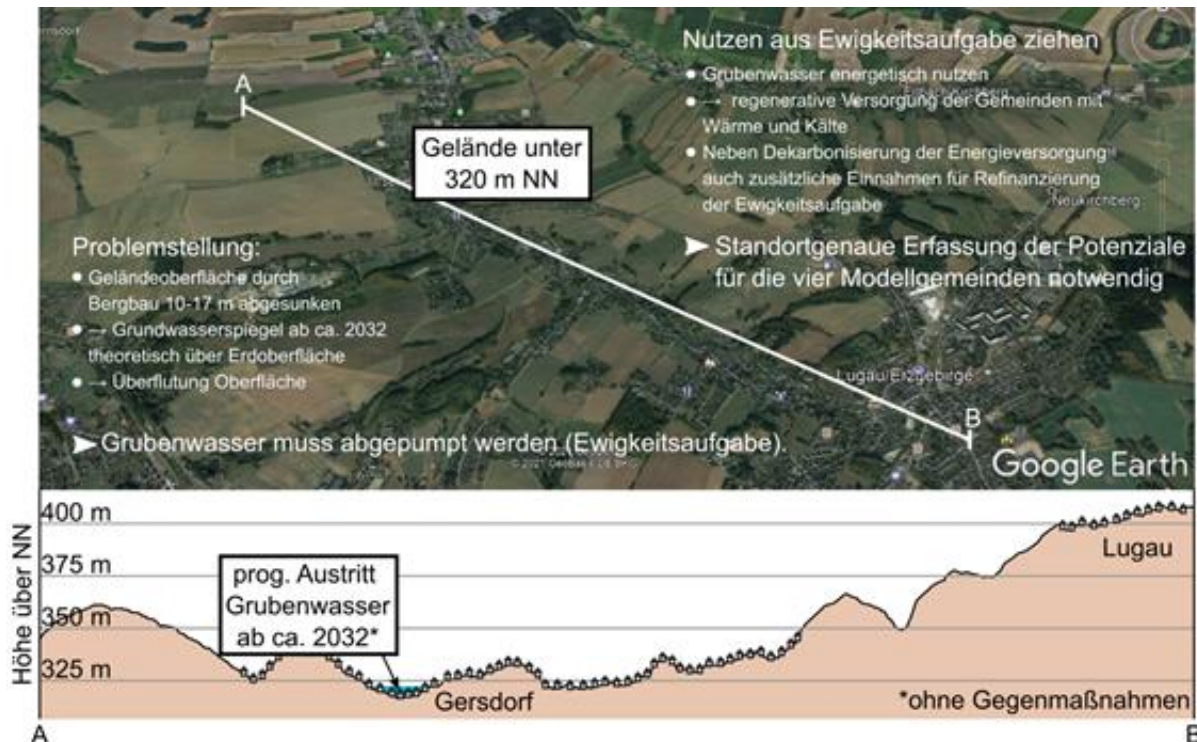


Abbildung 1: Schematische Veranschaulichung des Reviers Lugau-Oelsnitz mit prognostiziertem Grubenwasseraustritt (ohne Gegenmaßnahmen) ab dem Jahr 2032 (eigene Darstellung)

Die Geländeoberfläche im ehemaligen Steinkohlerevier ist durch den Bergbau um bis zu 17 m abgesunken. Dies hat zur Folge, dass der Grundwasserspiegel durch das Fluten der ehemaligen Bergwerke ab ca. 2032 theoretisch über der Erdoberfläche liegen würde. Ohne Ergreifung von Gegenmaßnahmen würden somit Teile der Umgebung mit Wasser überflutet werden, welches kontinuierlich aus dem Bergwerk austritt. Für die Gemeinden bedeutet dies, dass das Grubenwasser - analog bspw. zu Standorten im Ruhrgebiet - abgepumpt werden muss, was einen erheblichen energetischen Aufwand (und somit auch Kosten) für viele Folgegenerationen nach sich zieht. Das Grubenwasser hat an vielen Stellen im Revier ein hohes Temperaturniveau ($> 20\text{ °C}$), das bei einem einfachen Abpumpen ungenutzt verloren gehen würde. Da ohnehin ein Umgang mit dem Grubenwasser erforderlich ist, ist es zweckmäßig, einen bestmöglichen Nutzen aus dieser Ewigkeitsaufgabe zu ziehen, indem das Grubenwasser energetisch genutzt wird. Zugleich liegt ein großer Fokus auf der generellen Nutzbarmachung des untertägigen Potentials, so dass mehrere Standorte auf die zusätzliche Erschließung mittels Bohrungen untersucht wurden.

Hierbei kann eine regenerative Versorgung von Gebieten mit Wärme und Kälte - insbesondere im Gebäudesektor – ein sehr lukrativer Anwendungsfall sein, um die Ewigkeitsaufgabe mit einem Nutzen zur klimaneutralen Energieversorgung zu verbinden. Neben der Dekarbonisierung der Energieversorgung sind somit auch zusätzliche Einnahmen auf Basis der Energieversorgung denkbar, welche zur Refinanzierung der Ewigkeitsaufgabe genutzt werden können. Die Kommunen können somit einen Standortvorteil bei der Umstrukturierung des Wärmesektors auf erneuerbare Energien haben. Ebenso kann ein kommunaler Wärmeplan, der seitens der Bundesregierung künftig gefordert sein wird, zu erheblichen Teilen mit erneuerbaren Energien aus Grubenwässern ausgestaltet werden.

Aus diesem Grund hat sich die Studie „MareEn“ zum Ziel gesetzt, proaktiv zu handeln und für die beteiligten Stakeholder erste Informationen zur Energieversorgung mit Grubenwässern zu generieren. Ziel ist es, geeignete Gebiete im Untersuchungsgebiet zu identifizieren, an denen aufgrund der Beschaffenheit des Untergrundes sowie der Abnehmerstrukturen eine (netzgebundene) Energieversorgung mit Grubenwässern möglich ist. Dazu werden Handlungskonzepte ausgearbeitet, welche die vormals negativen Auswirkungen des Altbergbaus zur regenerativen Energieversorgung nutzen. Durch Workshops, Publikationen und eine Projektwebseite wird zudem die breite Öffentlichkeit informiert, sodass Hemmnisse abgebaut und die Chancen für eine erneuerbare Wärmeversorgung aus ökologischer, aber auch ökonomischer Sicht, gehoben werden.

1.2 Zielstellung der Studie

Hauptziel der Studie ist, Energiekonzepte für geeignete Standorte in den Modellgemeinden zu erstellen, welches untertägige Potentiale an Wärmeangebot mit übertägigen Bedarfen an Wärmenachfrage ökologisch und ökonomisch kombiniert. Zielstellung ist es, auf Basis der Projektergebnisse die konkrete Umsetzung in den Modellgemeinden voranzutreiben und geeignete Standorte zu lokalisieren, wo ein hoher Mehrwert durch die Errichtung von Grubenwassergeothermieranlagen realisiert werden kann.

Um dies zu gewährleisten wurden folgende Arbeitsschritte im Projektverlauf durchgeführt:

AP 1 - Analyse des untertägigen energetischen Potentials

- Recherche zu existierenden Messwerten im Steinkohlenrevier Lugau-Oelsnitz
- Durchführung eines Pumpversuches in Hohndorf zur Gewinnung von Realdaten
- Analyse von möglichen Ablagerungen in Wärmeübertragern und dem zu empfehlenden Wärmeübertragerdesign
- Berechnung und Simulation des theoretischen energetischen Potentials
- Identifikation von geeigneten Ein- und Ausspeisepunkten für Grubenwassergeothermieranlagen

AP 2 - Analyse und lokale Modellierung des Gebäudeenergiebedarfs über Tage

- Räumliche und strukturelle Analyse der Gegebenheiten über Tage im Steinkohlenrevier Lugau-Oelsnitz
- Identifizierung von potenziellen Energieabnehmern aus dem Wohn- und Nichtwohnsektor
- GIS-basierte, standortgenaue Modellierung von Gebäudeenergiebedarfen
- Abgleich der Modellierungsergebnisse mit Realdaten (Beistellung der assoziierten Partner)
- Analyse zu typischen sektorenspezifischen (Wohnen/Nicht-Wohnen) Lastgängen zur zeitlichen Charakterisierung der Energiebedarfe zur effizienten Gestaltung der Energieversorgung
- GIS-basierte Bewertung des gesamten Untersuchungsgebietes bzgl. der Eignung für eine netzgebundene Energieversorgung (Clusteranalysen)

AP 3 - Kombination der unter- und übertägigen Potentiale mit anschließender Versorgungsnetzberechnung

- GIS-basierte Verschneidung der Ergebnisse der Analysen unter Tage und über Tage
- Lokalisierung von grundsätzlich geeigneten Gebieten und Abnehmern für eine Versorgung mit Grubenwassergeothermie im Untersuchungsgebiet
- Auslegung und Grobtrassierung möglicher Wärmenetze auf Basis potenzieller Ein- und Ausspeisepunkte des Grubenwassers sowie der identifizierten Abnehmerstrukturen
- Bewertung potenzieller Standorte anhand technischer, ökonomischer und ökologischer Faktoren
- Evaluierung der Einbindung des Grubengebäudes als untertägiger Wärmespeicher
- Ableiten von Handlungsempfehlungen und Strategieoptionen für eine netzgebundene Versorgung mit Grubenwassergeothermie

AP 4 - Öffentlichkeitsarbeit und Exploitation der Ergebnisse

- Erstellung einer Projektwebseite
- Erstellung aussagekräftigen Kartenmaterials für alle Arbeitsschritte zur verbesserten Kommunikation und Dialog mit Stakeholdern
- Veranstellen eines Workshops für Kommunen, Bergwerksbesitzer, Energieversorger sowie weitere Entscheidungsträger / Stakeholder
- Präsentation der Ergebnisse auf Konferenzen und in Fachzeitschriften bzw. Fachartikeln
- Kontaktpflege zu Entscheidungsträgern in den Gemeinden

2 Lokale Modellierung und Prognose des Gebäudeenergiebedarfs über Tage

2.1 Räumliche und strukturelle Analyse zu relevanten Flächennutzungen im Untersuchungsgebiet

2.1.1 Definition des Betrachtungsgebietes und methodische Vorgehensweise

Im Mittelpunkt der Forschungsfragen des Projektes MareEn steht das ehemalige Steinkohlerevier „Lugau-Oelsnitz“, in welchem sich die Gemeinden Oelsnitz/Erzgeb., Lugau/Erzgeb. und Hohndorf im Erzgebirgskreis sowie die Gemeinde Gersdorf im Landkreis Zwickau befinden. Da in diesen Gemeinden bereits zu Projektstart ein erhebliches Interesse an den Forschungsergebnissen bestand, haben die Bürgermeister der benannten Gemeinden bereits zur Beantragung einen Letter of Intent (LOI) unterzeichnet, um im Projekt als assoziierte Partner mitzuwirken. Während der ersten Gespräche nach Projektstart wurde darüber hinaus die Gemeinde Niederwürschnitz im Erzgebirgskreis ebenso zum Betrachtungsgebiet ergänzt, da diese mit der Gemeinde Lugau/Erzgeb. eine Verwaltungsgemeinschaft bildet und ggf. bei Fragen bzgl. Energiepolitik und kommunaler Maßnahmen gemeinsam Entscheidungen getroffen werden. Final erstreckt sich somit das Untersuchungsgebiet im Projekt MareEn auf die folgenden fünf Gemeinden:

- Oelsnitz/Erzgeb.
- Lugau/Erzgeb.
- Niederwürschnitz (als Teil der Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb.)
- Hohndorf
- Gersdorf

In Tabelle 1 werden auf Basis amtlicher Statistiken erste Kennwerte des Untersuchungsraumes dargestellt. Daran anschließend erfolgt eine erste grafische Darstellung in Abbildung 2 auf nachfolgender Seite.

Tabelle 1: Tabellarische Gegenüberstellung der Gemeinden im Untersuchungsgebiet

Gemeinden		Oelsnitz	Lugau	Nieder- würschnitz	Hohndorf	Gersdorf	Summe / Mittelwert
Attribute							
Gesamtfläche [1]	km²	26,28	22,29	6,04	5,25	9,69	69,55
	Anteil	37,8 %	32,1 %	8,7 %	7,5 %	13,9 %	100,0 %
Einwohnerzahl [1]	Anzahl	10.902	7.824	2.563	3.441	3.825	28.555
	Anteil	38,2 %	27,4 %	9,0 %	12,0 %	13,4 %	100,0 %
Bevölkerungs- dichte [1]	Anzahl je km²	414,8	351,0	424,3	655,4	394,7	410,6
Gemeinde- schlüssel (AGS) [1]	Code	14521- 450	14521- 380	14521- 430	14521- 290	14524- 070	-
RegioStaR Typologie [2]	Text	städtisch- er Raum	kleinstädtischer, dörflicher Raum		städtischer Raum		-
Landkreis [1]	Text	Erzgebirgskreis				LK Zwickau	-

Untersuchungsgebiet im Forschungsprojekt MareEn

 Gebietsgrenze und beteiligte Gemeinden

RegioStaR Siedlungsstruktur

Städtischer Raum

kleinstädtischer, dörflicher Raum

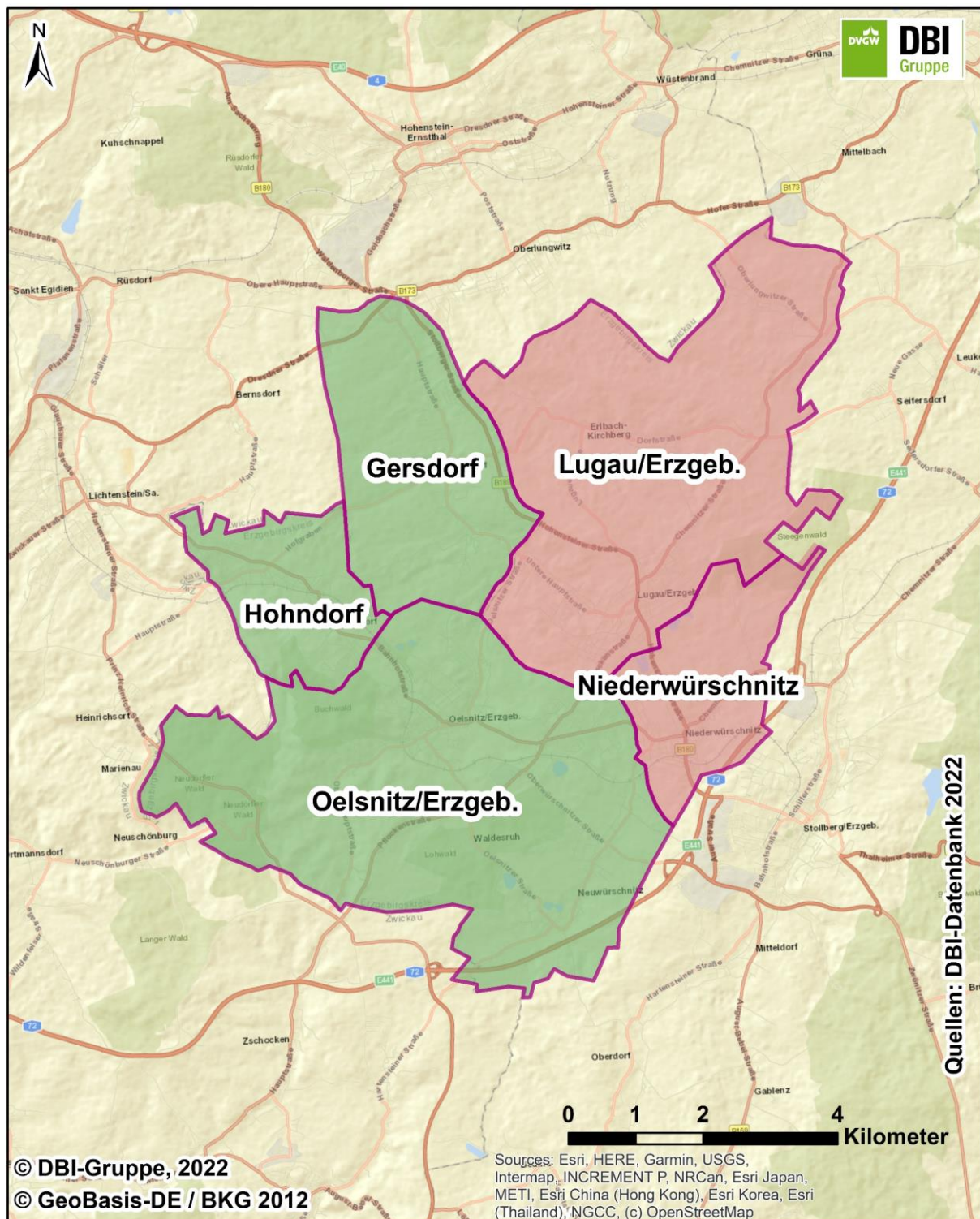


Abbildung 2: Darstellung des Untersuchungsgebietes im Projekt MareEn, eigene Darstellung nach [1], [2], [3]

Das betrachtete Untersuchungsgebiet umfasst in Summe eine Fläche von knapp 70 km². In Summe leben etwas mehr als 28.500 Einwohner in den betrachteten Gemeinden.

Alle außerhalb des abgesteckten Untersuchungsraumes befindlichen Gebietskörperschaften werden im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht näher betrachtet. Dies betrifft sowohl die Erhebung von untertägigen Potentialen als auch die Erstellung von Energiekonzepten, bei welchen ggf. erneuerbare Energien aus benachbarten Gemeinden einbezogen werden könnten. Ziel ist es, die im Forschungsprojekt zu erstellenden Konzepten innerhalb des Untersuchungsraumes auf Basis der verfügbaren Wärmequellen und Wärmesenken zu evaluieren. Hierbei werden zunächst die Gemeinden einzeln betrachtet, wobei im folgenden Verlauf auch mögliche Synergien und Potentiale bei gemeindeübergreifenden Lösungen geprüft werden können.

In einem ersten Schritt soll hierbei jede Gemeinde im Untersuchungsgebiet räumlich-strukturell bewertet werden, um Informationen zur Flächennutzung bzw. Flächenbeanspruchung der Gebiete zu erhalten. Ziel ist es, bebaute und unbebaute Gebiete zu identifizieren sowie eine gebäudescharfe Datengrundlage zu schaffen, auf deren Basis die spätere Abschätzung und Modellierung möglicher energetischer Konzepte erfolgen soll. Dabei ist es wichtig, die energetisch bedeutsamen Gebiete, z.B. Wohngebiete, Gewerbegebiete etc., von den energetisch weniger bedeutsamen Gebieten zu unterscheiden. Zur räumlich-strukturellen Bewertung werden geografische Daten genutzt, welche mit einem Geoinformationssystem erhoben, aufbereitet, systematisiert und ausgewertet werden können. Die berücksichtigten Datenquellen zur räumlich-strukturellen Charakterisierung sind hierbei unter anderem:

- DBI-Datenbank [3]
- OpenStreetMap – Deutschland [4]
- Höhen- und 3D-Stadtmodelle des Landes Sachsen [5]
- vielfältige Eigenrecherchen, welche in die DBI-Datenbank integriert wurden

Zur Verschneidung dieser Datenquellen wurden mehrere GIS-Modelle entwickelt, die die verschiedenen Datenformate und Datenquellen miteinander kombinieren und in einer einheitlichen Geodatenbank abspeichern. Das Modell ist in der Lage, auf Basis der Rohdaten einen Dateioutput zu generieren, welcher für alle Gemeinden im Untersuchungsgebiet eine einheitliche Bewertung ermöglicht. Darauf aufbauend wurde zudem ein automatisiertes Auswertetool via Python geschrieben, das die einzelnen Landnutzungsparameter erfasst, kategorisiert und in tabellarischer sowie kartografischer Form auswertet. Dieses Vorgehen wurde für alle fünf Gemeinden, die im Betrachtungsgebiet liegen durchgeführt. Aufgrund des modellhaften Ansatzes wird eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet, wenngleich nicht in allen Gemeinden die gleichen Flächennutzungsarten vorliegen. So kann es bspw. sein, dass in einer Gemeinde keine Industrieflächen existieren, während diese jedoch in anderen Gemeinden vorliegen. Um hierbei die Datenkonsistenz zu erhalten, wurde das Tool so generiert, dass eine einheitliche Auswertung ermöglicht wird. Um belastbare Ergebnisse zu generieren wurde zudem jedes Gebäude, das auf Basis der verfügbaren Geodaten erfasst wurde, mit Lage und Nutzungsart identifiziert. Hierbei besteht dennoch kein Anspruch auf Vollständigkeit, da insbesondere im Gebäudebereich Neubauten und/oder Abrisse nicht direkt in die verfügbaren Datenquellen eingepflegt werden können.

Im Folgenden werden die einzelnen Ergebnisse der räumlich-strukturellen Analyse für alle Gemeinden separat kartografisch dargestellt und tabellarisch bewertet sowie verbale Besonderheiten formuliert. Hierbei werden aus administrativen Gründen die Gemeinden Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz zusammengefasst. Diese stellen eine Verwaltungsgemeinschaft dar, was gemeinsame Entscheidungen bzgl. der Energieversorgung ermöglicht und eine spätere Prüfung von Konzepten über die Gemeindegrenze hinaus hinreichend wahrscheinlich macht. Bei den übrigen drei Gemeinden wird eine separate Bewertung durchgeführt und erst im Anschluss mögliche übergreifende Versorgungskonzepte geprüft, da diese hier nicht im Kern der Untersuchungen stehen sollen. Um eine Vergleichbarkeit der Analysen zu gewährleisten werden die folgenden Absätze gleich strukturiert aufgebaut abgehandelt.

2.1.2 Auswertung für das Gemeindegebiet Oelsnitz/Erzgeb.

Das Gemeindegebiet der Stadt Oelsnitz/Erzgeb. (AGS: 14251450) erstreckt sich auf eine Fläche von knapp 26,3 km². Im analysierten Gebiet leben knapp 11.000 Menschen. Gemessen am gesamten Untersuchungsgebiet nimmt das Gebiet Oelsnitz/Erzgeb. sowohl knapp 38 % der Gesamtfläche als auch der Einwohnerzahl ein. Die Bevölkerungsdichte liegt hierbei bei knapp 415 Einwohner pro km². Das Gebiet ist der RegioStaR Typologie „städtischer Raum“ zuzuordnen und liegt im Erzgebirgskreis.

Nachfolgend wurden via GIS die Landnutzungen innerhalb des Gemeindegebietes analysiert und tabellarisch sowie grafisch ausgewertet. Die Darstellungen finden sich in der nachfolgenden Tabelle 2 bzw. Abbildung 3.

Tabelle 2: Auswertung zur Landnutzung in der Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb¹.

Gemeindename		Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb.
Landnutzungstyp		
Wohngebiet	genutzte Fläche in km²	5,125
	Flächenanteil	19,7%
Industriegebiet	genutzte Fläche in km²	0,169
	Flächenanteil	0,7%
Gewerbe, Einzelhandel	genutzte Fläche in km²	0,913
	Flächenanteil	3,5%
Parks, Kleingärten,	genutzte Fläche in km²	0,558
	Flächenanteil	2,1%
Landwirtschaft, Bauernhof	genutzte Fläche in km²	7,714
	Flächenanteil	29,6%
Wald	genutzte Fläche in km²	8,638
	Flächenanteil	33,2%
Naturreservat, unkultiviertes Gras- und Heideland	genutzte Fläche in km²	2,510
	Flächenanteil	9,6%
Tagebau, Steinbruch	genutzte Fläche in km²	0,001
	Flächenanteil	<0,1%
Gewässer	genutzte Fläche in km²	0,356
	Flächenanteil	1,4%
Sonstige	genutzte Fläche in km²	0,039
	Flächenanteil	0,2%
Gebäudeflächen²	genutzte Fläche in km²	0,685
	Flächenanteil	2,6%
Summe analysierter Flächennutzungen	genutzte Fläche in km²	26,709
Gesamtfläche Gemeinde [1]	Gesamtfläche in km²	26,280

¹ Eine Summierung auf 100 % je betrachteter Gemeinde bzw. Verwaltungsgemeinschaft ist nicht zweckmäßig, da einerseits eine Überlagerung von mehreren Flächennutzungstypen (z.B. Wohngebiet und Gewässer / Wohngebiet und Parks etc.) vorliegen kann und andererseits keine vollständige Datenverfügbarkeit gewährleistet wird (unbekannte Flächennutzungen, die nicht beziffert werden können).

² Da Gebäudeflächen in allen Fällen innerhalb anderer Flächentypen liegen, werden diese für die Summierung der analysierten Flächennutzungen nicht berücksichtigt.

Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb.

Gebietsgrenze	Agrarflächen	Gewässer	Obstplantage
Gebäude	Bauernhöfe	Gewerbe-/Industriegebiet	Parkanlage
Schiene	Büro/Business	Gras	Wald
Autobahn	Einzelhandel	keine Informationen	Weide
Bundesstraße	Friedhof	Kleingärten	Wohngebiet
Sonstige Straße	Gestrüpp		

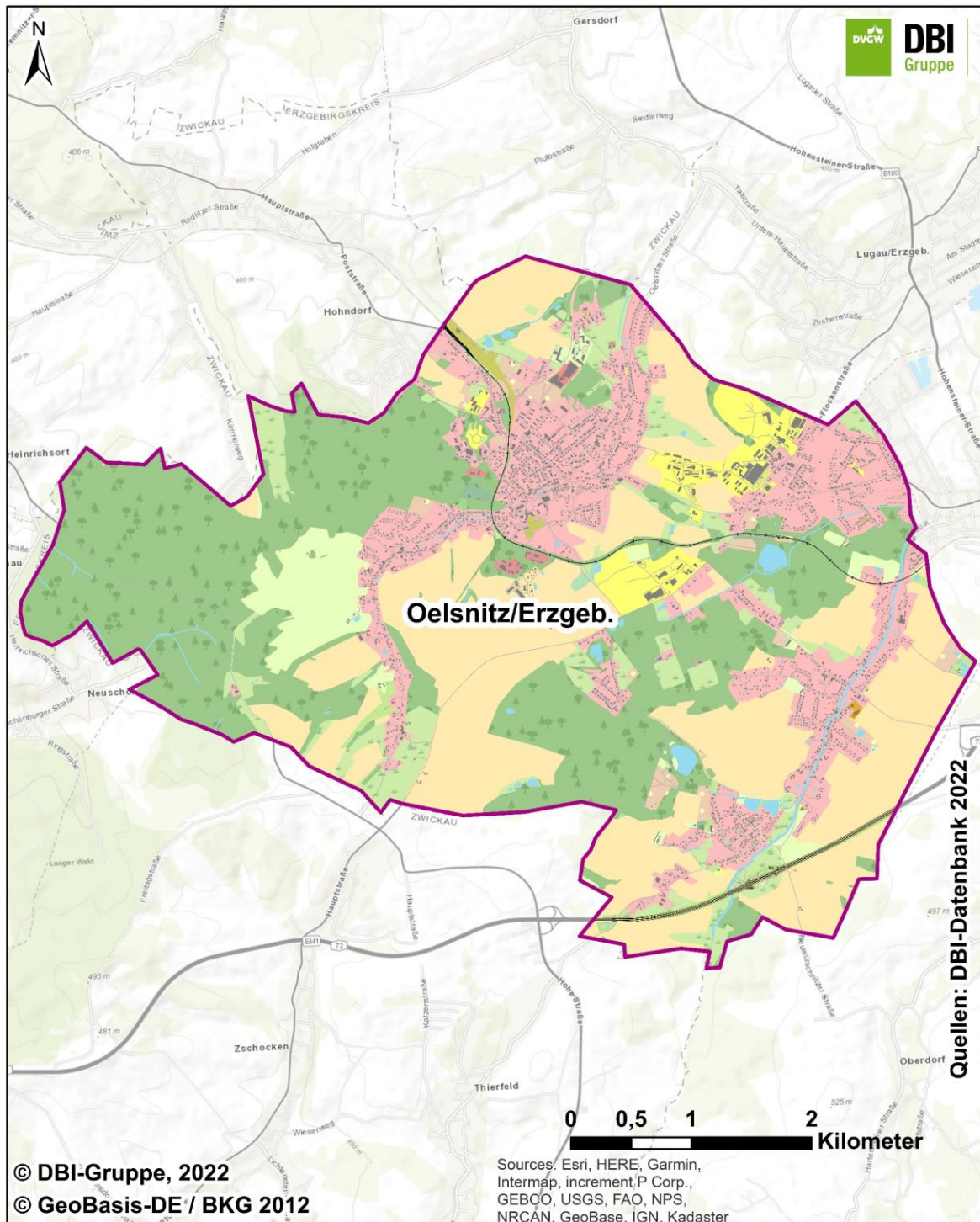


Abbildung 3: Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Stadt Oelsnitz/Erzgeb.

In der Stadt Oelsnitz/Erzgeb. existieren neben einer Vielzahl von Acker- und Waldflächen auch Gebiete, in denen eine Wohnbebauung vorliegt. Knapp 5 km² bzw. 20 % der Gesamtfläche der Gemeinde sind als Wohngebiete analysiert worden. Dazu kommen knapp 1 km² bzw. etwa 3 % Flächenanteil für als Gewerbegebiete ausgewiesene Flächen – Industriegebiete spielen mit nur etwa 0,2 km² Gesamtfläche und einem Flächenanteil von etwa 1 % nur eine untergeordnete Rolle. Auf Basis dieser Analysen wurde die energetisch bedeutsame, d.h. für die Energieversorgung relevante Fläche der Gemeinde ermittelt. Dies ist in nachfolgender Abbildung veranschaulicht.

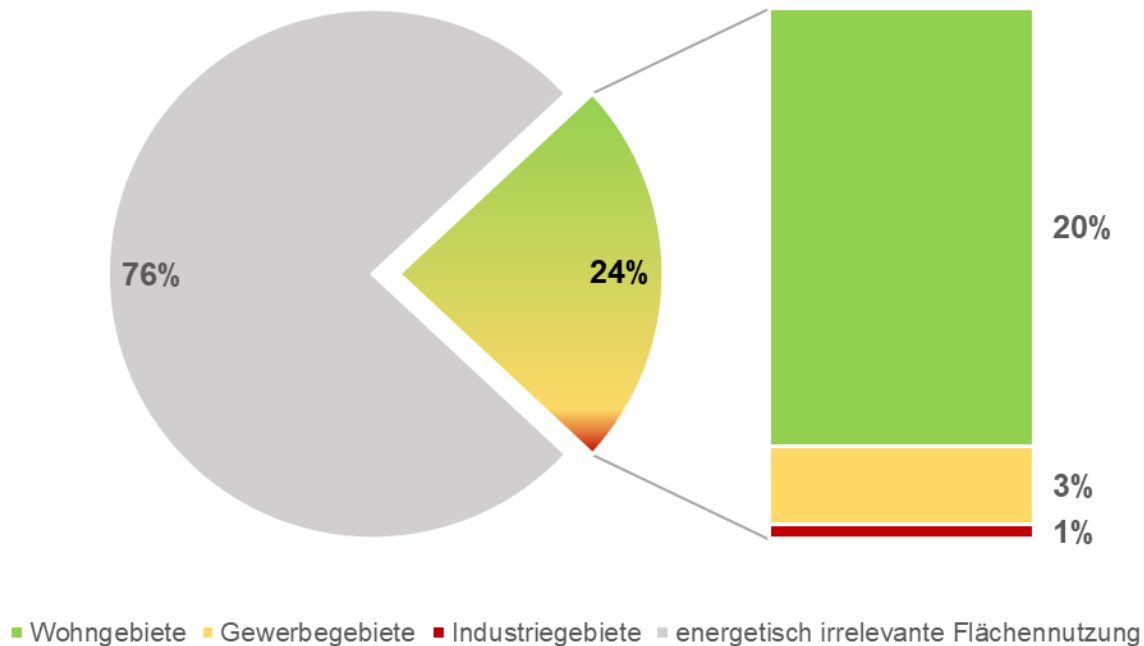


Abbildung 4: Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im Gemeindegebiet Oelsnitz/Erzgeb.

Der Flächenanteil von 76 %, welcher für die Wärmeversorgung der Gebäude in der Gemeinde irrelevant ist (Wald, Gräser etc.), wird im Folgenden nicht näher analysiert. Auch die Industriegebiete spielen für die Wärmeanalysen primär keine Rolle, wenngleich diese jedoch ein Potential zur Energienutzung bieten – sofern die Industriegebiete lukrative Standorte im Sinne der Untersuchung darstellen, werden die am Ende dieser Studie noch einmal kurz diskutiert und mögliche Handlungsempfehlungen abgeleitet. Der Fokus der Analysen wird jedoch in den Wohn- und Gewerbegebieten liegen, weshalb die Wärmebedarfsanalysen und Netzsimulationen für Gebäude durchgeführt werden, die sich in diesen Gebieten befinden.

In Summe bedecken die in der Gemeinde befindlichen Gebäude eine Fläche von knapp 0,7 km², was ca. 2,6 % der gesamten Gemeindefläche ausmacht. Hierbei ist durch die Analysen und durch die bereits vorliegenden Datenbestände der DBI-Datenbank eindeutig zuordenbar, ob es sich um ein Wohn- bzw. Nichtwohngebäude handelt und welche Art des Gebäudes vorliegt. Dies wird für die Wärmeanalysen (vgl. Kapitel 2.2) von Bedeutung sein.

2.1.3 Auswertung für die Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz

Die Verwaltungsgemeinschaft Lugau besteht aus den beiden Gemeinden Lugau/Erzgeb. sowie Niederwürschnitz. Zu Beginn werden die Flächennutzungen beider Gemeinden kurz einzeln analysiert, bevor schließlich das Zusammenfügen zur gemeinsam betrachteten Verwaltungsgemeinschaft erfolgt.

Gemeindegebiet Lugau/Erzgeb.

Das Gemeindegebiet der Gemeinde Lugau/Erzgeb. (AGS: 14251380) erstreckt sich auf eine Fläche von ca. 22,3 km². Im analysierten Gebiet leben etwas mehr als 7.800 Menschen. Gemessen am gesamten Untersuchungsgebiet nimmt das Gebiet Lugau/Erzgeb. etwa 32,1 % der Gesamtfläche sowie gut 27 % der Einwohnerzahl ein. Die Bevölkerungsdichte liegt hierbei bei etwa 351 Einwohnern pro km². Das Gebiet ist der RegioStaR Typologie „kleinstädtischer, dörflicher Raum“ zuzuordnen und liegt im Erzgebirgskreis.

Gemeindegebiet Niederwürschnitz

Das Gemeindegebiet der Gemeinde Niederwürschnitz (AGS: 14251430) erstreckt sich auf eine Fläche von ca. 6,0 km². Im analysierten Gebiet leben knapp 2.600 Menschen. Gemessen am gesamten Untersuchungsgebiet nimmt das Gebiet Niederwürschnitz etwa 8,7 % der Gesamtfläche sowie etwa 9 % der Einwohnerzahl ein. Die Bevölkerungsdichte liegt hierbei bei etwa 424 Einwohnern pro km². Das Gebiet ist der RegioStaR Typologie „kleinstädtischer, dörflicher Raum“ zuzuordnen und liegt im Erzgebirgskreis.

Nachfolgend wurden via GIS die Landnutzungen innerhalb der zwei Gemeinden der Verwaltungsgemeinschaft analysiert und tabellarisch ausgewertet. Eine Darstellung kann der nachfolgenden Tabelle 3 entnommen werden. Auf eine nähere Erläuterung wird hierbei verzichtet, da die Verwaltungsgemeinschaft in Summe im Anschluss ausgewertet wird. Ebenso erfolgt keine separate Visualisierung der einzelnen Gemeinden (kartografische Darstellung des gesamten Verwaltungsgebietes: vgl. Abbildung 5).

Tabelle 3: Auswertung zur Landnutzung in den Gemeinden Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz³

Gemeindename		Gemeinde Lugau/Erzgeb.	Gemeinde Nieder- würschnitz
Landnutzungstyp			
Wohngebiet	genutzte Fläche in km²	3,170	1,227
	Flächenanteil	14,7%	26,7%
Industriegebiet	genutzte Fläche in km²	0,282	0,205
	Flächenanteil	1,3%	4,5%
Gewerbe, Einzelhandel	genutzte Fläche in km²	0,110	0,035
	Flächenanteil	0,5%	0,8%
Parks, Kleingärten,	genutzte Fläche in km²	0,410	0,152
	Flächenanteil	1,9%	3,3%
Landwirtschaft, Bauernhof	genutzte Fläche in km²	11,830	1,840
	Flächenanteil	54,8%	40,0%
Wald	genutzte Fläche in km²	2,614	0,706
	Flächenanteil	12,1%	15,4%
Naturreservat, unkultiviertes	genutzte Fläche in km²	2,965	0,250

³ Eine Summierung auf 100 % je betrachteter Gemeinde bzw. Verwaltungsgemeinschaft ist nicht zweckmäßig, da einerseits eine Überlagerung von mehreren Flächennutzungstypen (z.B. Wohngebiet und Gewässer / Wohngebiet und Parks etc.) vorliegen kann und andererseits keine vollständige Datenverfügbarkeit gewährleistet wird (unbekannte Flächennutzungen, die nicht beziffert werden können).

→ Fortsetzung der Tabelle auf nachfolgender Seite.

Gemeindenname		Gemeinde Lugau/Erzgeb.	Gemeinde Nieder- würschnitz
Landnutzungstyp			
Gras- und Heideland	Flächenanteil	13,7%	5,4%
Tagebau, Steinbruch	genutzte Fläche in km²	0,007	-
	Flächenanteil	<0,1%	0,0%
Gewässer	genutzte Fläche in km²	0,190	0,171
	Flächenanteil	0,9%	3,7%
Sonstige	genutzte Fläche in km²	0,015	0,008
	Flächenanteil	0,1%	0,2%
Gebäudeflächen ⁴	genutzte Fläche in km²	0,588	0,204
	Flächenanteil	2,7%	4,4%
Summe analysierter Flächennutzungen	genutzte Fläche in km²	22,179	4,799
Gesamtfläche Gemeinde [1]	Gesamtfläche in km²	22,290	6,040

Zusammenfassung für die Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz

Das Gebiet der Verwaltungsgemeinschaft Lugau erstreckt sich in Summe auf eine Fläche von ca. 28,3 km². In der Verwaltungsgemeinschaft leben ca. 10.400 Menschen. Gemessen am gesamten Untersuchungsgebiet nimmt die Verwaltungsgemeinschaft Lugau etwa 40,8 % der Gesamtfläche sowie etwa 36 % der Einwohnerzahl ein. Die Bevölkerungsdichte liegt hierbei bei etwa 366 Einwohnern pro km². Das gesamte Gebiet ist der RegioStaR Typologie „kleinstädtischer, dörflicher Raum“ zuzuordnen und liegt im Erzgebirgskreis.

Nachfolgend wurden via GIS die Landnutzungen innerhalb des Gemeindegebietes analysiert und tabellarisch sowie grafisch ausgewertet. Die Darstellungen finden sich in der nachfolgenden Tabelle 4 bzw. Abbildung 5.

Tabelle 4: Auswertung zur Landnutzung in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz⁵

Gemeindename		Verwaltungs- gemeinschaft Lugau/Niederwürschnitz
Landnutzungstyp		
Wohngebiet	genutzte Fläche in km²	4,397
	Flächenanteil	16,8%
Industriegebiet	genutzte Fläche in km²	0,487
	Flächenanteil	1,9%
Gewerbe, Einzelhandel	genutzte Fläche in km²	0,145
	Flächenanteil	0,6%

⁴ Da Gebäudeflächen in allen Fällen innerhalb anderer Flächentypen liegen, werden diese für die Summierung der analysierten Flächennutzungen nicht berücksichtigt.

⁵ Eine Summierung auf 100 % je betrachteter Gemeinde bzw. Verwaltungsgemeinschaft ist nicht zweckmäßig, da einerseits eine Überlagerung von mehreren Flächennutzungstypen (z.B. Wohngebiet und Gewässer / Wohngebiet und Parks etc.) vorliegen kann und andererseits keine vollständige Datenverfügbarkeit gewährleistet wird (unbekannte Flächennutzungen, die nicht beziffert werden können).

→ Fortsetzung der Tabelle auf nachfolgender Seite.

Gemeindenname		Verwaltungs- gemeinschaft Lugau/Niederwürschnitz
Landnutzungstyp		
Parks, Kleingärten,	genutzte Fläche in km²	0,562
	Flächenanteil	2,1%
Landwirtschaft, Bauernhof	genutzte Fläche in km²	13,670
	Flächenanteil	52,2%
Wald	genutzte Fläche in km²	3,319
	Flächenanteil	12,7%
Naturreservat, unkultiviertes Gras- und Heideland	genutzte Fläche in km²	3,215
	Flächenanteil	12,3%
Tagebau, Steinbruch	genutzte Fläche in km²	0,007
	Flächenanteil	0,0%
Gewässer	genutzte Fläche in km²	0,361
	Flächenanteil	1,4%
Sonstige	genutzte Fläche in km²	0,023
	Flächenanteil	0,1%
Gebäudeflächen ⁶	genutzte Fläche in km²	0,793
	Flächenanteil	3,0%
Summe analysierter Flächennutzungen	genutzte Fläche in km²	26,980
Gesamtflächen Verwaltungsgemeinschaft [1]	Gesamtfläche in km²	28,330

⁶ Da Gebäudeflächen in allen Fällen innerhalb anderer Flächentypen liegen, werden diese für die Summierung der analysierten Flächennutzungen nicht berücksichtigt.

Räumlich-Strukturelle Charakterisierung von Lugau und Niederwürschnitz

Gebietsgrenze	Agrarflächen	Gewässer	Parkanlage
Gebäude	Bauernhöfe	Gewerbe-/Industriegebiet	Wald
Schiene	Büro/Business	Gras	Weide
Autobahn	Einzelhandel	keine Informationen	Wohngebiet
Bundesstraße	Friedhof	Kleingärten	
Sonstige Straße	Gestrüpp		

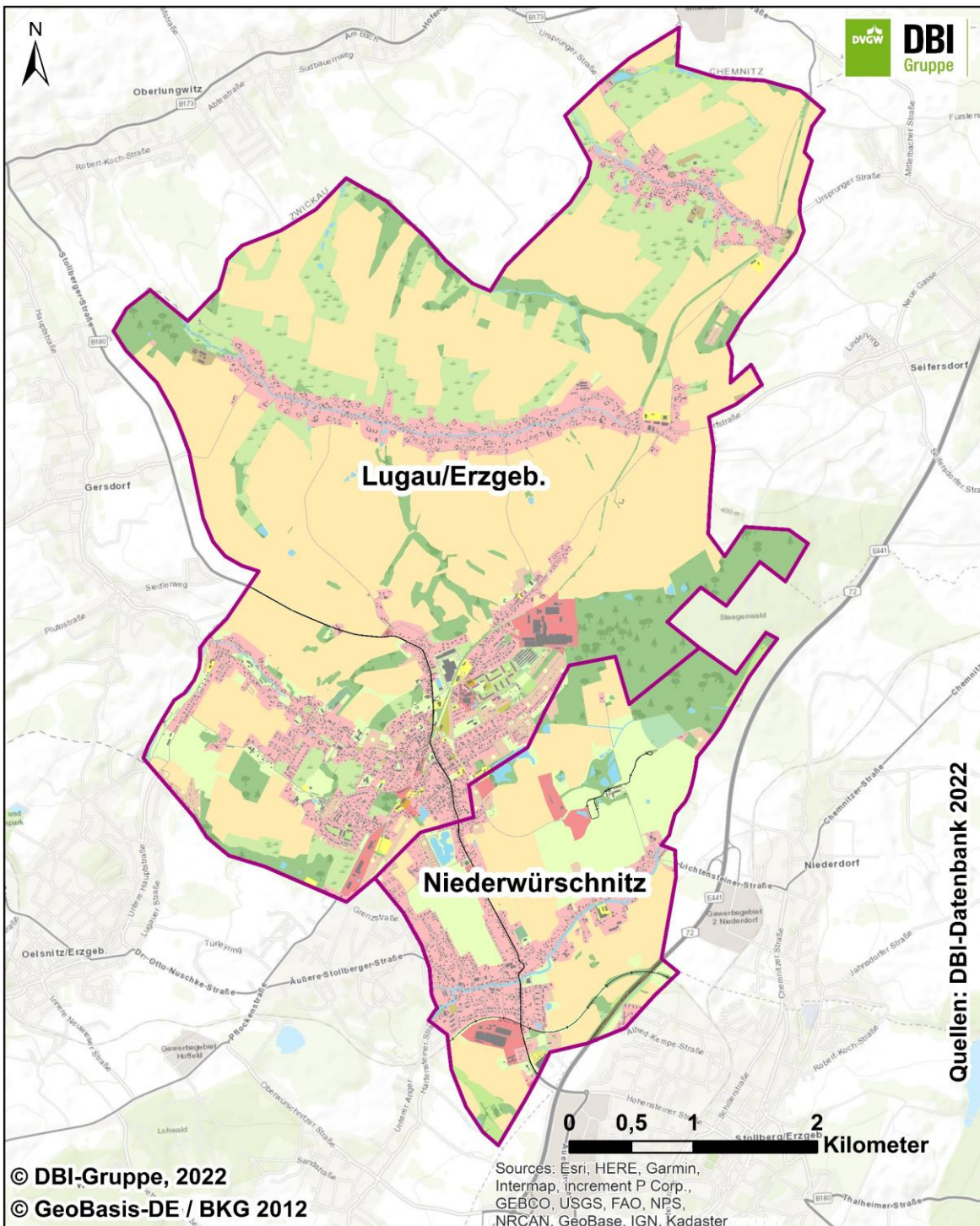


Abbildung 5: Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz

In der Verwaltungsgemeinschaft Lugau und Niederwürschnitz existieren neben einer Vielzahl von Acker- und Waldflächen auch Gebiete, in denen eine Wohnbebauung vorliegt. Knapp 4,4 km² bzw. 17 % der Gesamtfläche der Gemeinde sind als Wohngebiete analysiert worden. Dazu kommen nur knapp 0,2 km² bzw. etwa 0,6 % Flächenanteil für als Gewerbegebiete ausgewiesene Flächen – Industriegebiete spielen hier mit etwa 0,5 km² Gesamtfläche und einem Flächenanteil von etwa 2 % eine etwas bedeutsamere Rolle. Auf Basis dieser Analysen wurde die energetisch bedeutsame, d.h. für die Energieversorgung relevante Fläche der Verwaltungsgemeinschaft ermittelt. Dies ist in nachfolgender Abbildung veranschaulicht.

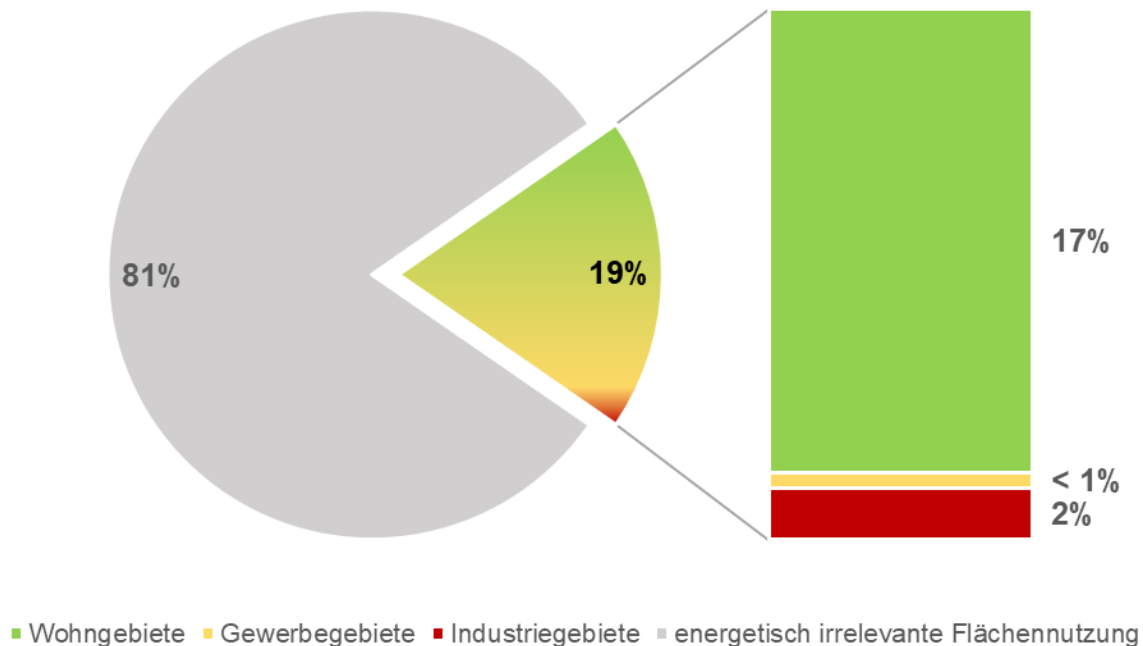


Abbildung 6: Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im Gemeindegebiet der Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb

Der Flächenanteil von 81 %, der für die Wärmeversorgung der Gebäude in der Verwaltungsgemeinschaft irrelevant ist (Wald, Gräser etc.), wird im Folgenden nicht näher analysiert. Auch die Industriegebiete spielen für die Wärmeanalysen primär keine Rolle, wenngleich diese jedoch ein Potential zur Energienutzung bieten – sofern die Industriegebiete lukrative Standorte im Sinne der Untersuchung darstellen, werden die am Ende dieser Studie noch einmal kurz diskutiert und mögliche Handlungsempfehlungen abgeleitet. Eine Besonderheit in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau und Niederwürschnitz ist hierbei, dass der Anteil der Industriegebiete größer ist als der der gewerblich genutzten Flächen. Dies ist in keinem anderen analysierten Untersuchungsgebiet der Fall. Dennoch wird der Fokus der Analysen aufgrund der Homogenität der sektorspezifischen Energieversorgung im Gebäudesektor primär in den Wohn- und Gewerbegebieten liegen. Die Wärmebedarfsanalysen und Netzsimulationen werden somit für Gebäude durchgeführt, die sich in diesen Gebieten befinden. Die Industrie als potentieller Abnehmer für eine Prozesswärmeversorgung mit Grubenwassergeothermie wurde in dieser Studie nicht näher untersucht.

In Summe bedecken die in der Verwaltungsgemeinschaft befindlichen Gebäude eine Fläche von knapp 0,8 km², was ca. 3 % der gesamten Fläche der Verwaltungsgemeinschaft Lugau und Niederwürschnitz ausmacht. Hierbei ist durch die Analysen und durch die bereits vorliegenden Datenbestände der DBI-Datenbank eindeutig zuordenbar, ob es sich um ein Wohn- bzw. Nichtwohngebäude handelt und welche Art des Gebäudes vorliegt. Dies wird für die Wärmeanalysen (vgl. Kapitel 2.2) von Bedeutung sein.

2.1.4 Auswertung für das Gemeindegebiet Hohndorf

Das Gemeindegebiet der Gemeinde Hohndorf (AGS: 14251290) erstreckt sich auf eine Fläche von ca. 5,3 km². Im analysierten Gebiet leben knapp 3.500 Menschen. Gemessen am gesamten Untersuchungsgebiet nimmt

das Gebiet Hohndorf etwa 7,5 % der Gesamtfläche sowie gut 12 % der Einwohnerzahl ein. Die Bevölkerungsdichte liegt hierbei bei etwa 655 Einwohnern pro km². Das Gebiet ist der RegioStaR Typologie „städtischer Raum“ zuzuordnen und liegt im Erzgebirgskreis.

Nachfolgend wurden via GIS die Landnutzungen innerhalb des Gemeindegebietes analysiert und tabellarisch sowie grafisch ausgewertet. Die Darstellungen finden sich in der nachfolgenden Tabelle 5 bzw. Abbildung 7.

Tabelle 5: Auswertung zur Landnutzung in der Gemeinde Hohndorf⁷

Gemeindename		Gemeinde Hohndorf
Landnutzungstyp		
Wohngebiet	genutzte Fläche in km²	1,776
	Flächenanteil	31,9%
Industriegebiet	genutzte Fläche in km²	0,000
	Flächenanteil	0,0%
Gewerbe, Einzelhandel	genutzte Fläche in km²	0,010
	Flächenanteil	0,2%
Parks, Kleingärten,	genutzte Fläche in km²	0,134
	Flächenanteil	2,4%
Landwirtschaft, Bauernhof	genutzte Fläche in km²	1,961
	Flächenanteil	35,2%
Wald	genutzte Fläche in km²	0,950
	Flächenanteil	17,0%
Naturreservat, unkultiviertes Gras- und Heideland	genutzte Fläche in km²	0,703
	Flächenanteil	12,6%
Tagebau, Steinbruch	genutzte Fläche in km²	0,000
	Flächenanteil	0,0%
Gewässer	genutzte Fläche in km²	0,026
	Flächenanteil	0,5%
Sonstige	genutzte Fläche in km²	0,011
	Flächenanteil	0,2%
Gebäudeflächen ⁸	genutzte Fläche in km²	0,194
	Flächenanteil	3,5%
Summe analysierter Flächennutzungen	genutzte Fläche in km²	5,571
Gesamtfläche Gemeinde [1]	Gesamtfläche in km²	5,250

⁷ Eine Summierung auf 100 % je betrachteter Gemeinde bzw. Verwaltungsgemeinschaft ist nicht zweckmäßig, da einerseits eine Überlagerung von mehreren Flächennutzungstypen (z.B. Wohngebiet und Gewässer / Wohngebiet und Parks etc.) vorliegen kann und andererseits keine vollständige Datenverfügbarkeit gewährleistet wird (unbekannte Flächennutzungen, die nicht beziffert werden können).

⁸ Da Gebäudeflächen in allen Fällen innerhalb anderer Flächentypen liegen, werden diese für die Summierung der analysierten Flächennutzungen nicht berücksichtigt.

Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Gemeinde Hohndorf

	Gebietsgrenze		Agrarflächen		Gewässer		Parkanlage
	Gebäude		Büro/Business		Gras		Wald
	Schiene		Friedhof		keine Informationen		Weide
	Autobahn		Gestrüpp		Kleingärten		Wohngebiet
	Bundesstraße						
	Sonstige Straße						

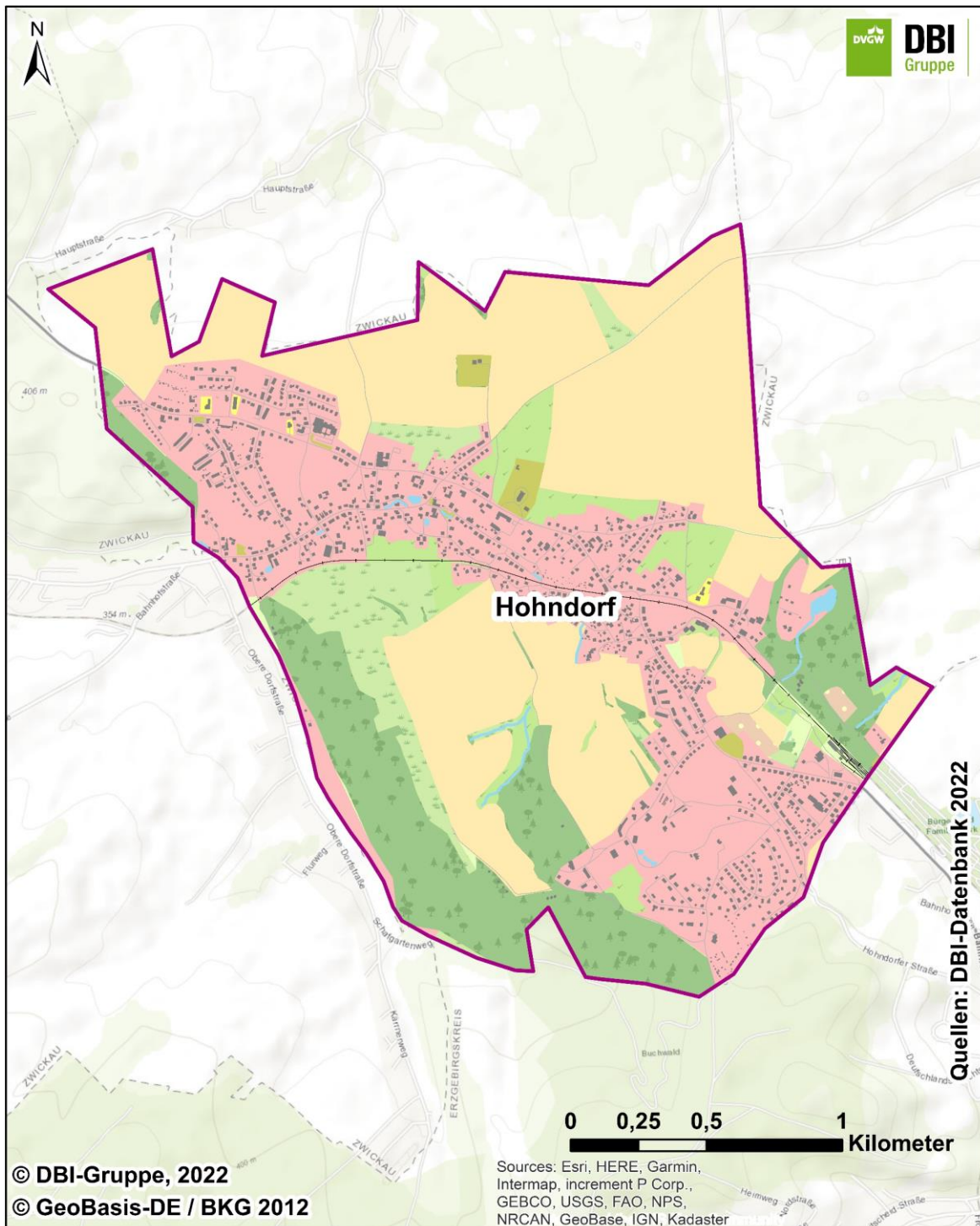


Abbildung 7: Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Gemeinde Hohndorf

In der Gemeinde Hohndorf existieren neben einer Vielzahl von Acker- und Waldflächen auch Gebiete, in denen eine Wohnbebauung vorliegt. Knapp 1,8 km² bzw. 32 % der Gesamtfläche der Gemeinde sind als Wohngebiete analysiert worden. Dazu kommen nur 0,01 km² bzw. etwa 0,2 % Flächenanteil für als Gewerbegebiete ausgewiesene Flächen – Industriegebiete existieren in Hohndorf nicht, weshalb der Flächenanteil hier mit 0 % liegt. Auf Basis dieser Analysen wurde die energetisch bedeutsame, d.h. für die Energieversorgung relevante Fläche der Verwaltungsgemeinschaft ermittelt. Dies ist in nachfolgender Abbildung veranschaulicht. Aus Gründen der Einheitlichkeit der Darstellung und Kommunalität mit den anderen Abbildungen in den vorangegangenen Abschnitten zu den anderen analysierten Gebietskörperschaften sind die Industriegebiete in der Legende (< 1 %) mit enthalten, wenngleich diese in Hohndorf nicht vorkommen.

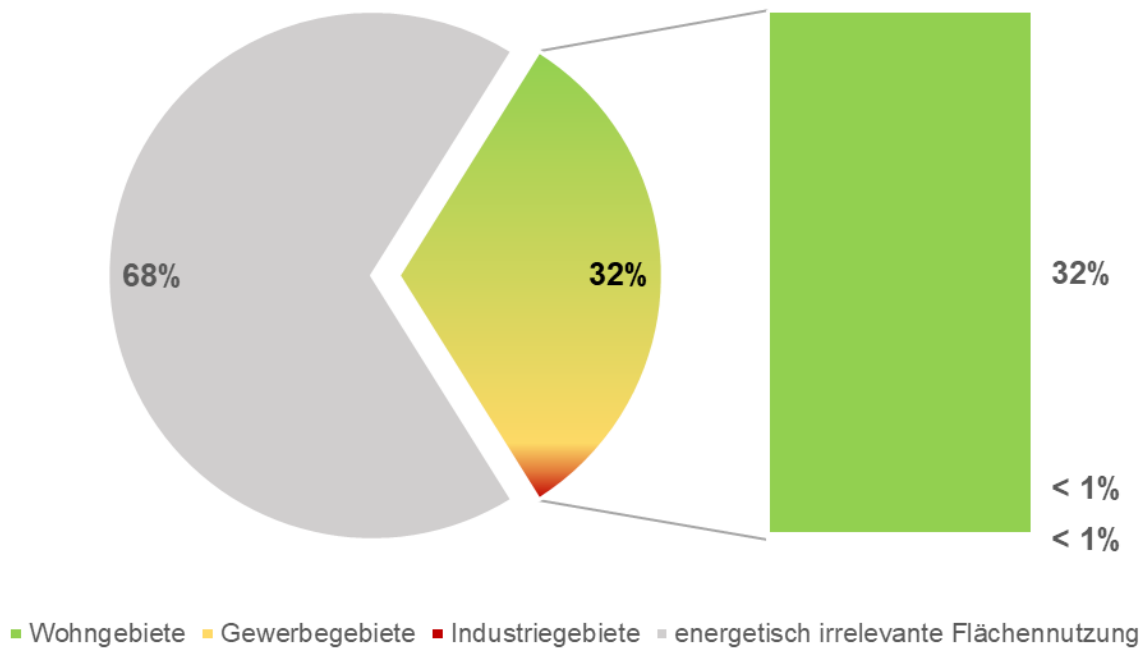


Abbildung 8: Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im Gemeindegebiet Hohndorf

Der Flächenanteil von 68 %, welcher für die Wärmeversorgung der Gebäude in der Verwaltungsgemeinschaft irrelevant ist (Wald, Gräser etc.), wird im Folgenden nicht näher analysiert. Der Anteil der Wohnbebauung an der zur Energie- bzw. Wärmeversorgung relevanten Fläche ist hierbei in Hohndorf mit knapp einem Drittel der Gesamtfläche im Vergleich zu den anderen Kommunen am größten. Eine weitere Besonderheit in der Gemeinde Hohndorf ist zudem, dass keine als Industriegebiet ausgewiesene Flächennutzung analysiert wurde, weshalb die in den anderen Gemeinden grundsätzlich möglichen Nutzungen von Grubenwassergeothermie im industriellen Sektor für Hohndorf irrelevant sind. Auch der gewerbliche Sektor ist im Vergleich zu den anderen Gemeinden eher unterrepräsentiert, wenngleich Gewerbeflächen analysiert wurden. Der Fokus der Analysen wird somit ebenso im Gebäudesektor primär in den Wohn- und Gewerbegebieten liegen. Die Wärmebedarfsanalysen und Netzsimulationen werden somit für Gebäude durchgeführt, die sich in diesen Gebieten befinden.

In Summe bedecken die in der Gemeinde Hohndorf befindlichen Gebäude eine Fläche von knapp 0,2 km², was ca. 3,5 % der gesamten Fläche der Gemeinde ausmacht. Hierbei ist durch die Analysen und durch die bereits vorliegenden Datenbestände der DBI-Datenbank eindeutig zuordenbar, ob es sich um ein Wohn- bzw. Nichtwohngebäude handelt und welche Art des Gebäudes vorliegt. Dies wird für die Wärmeanalysen (vgl. Kapitel 2.2) von Bedeutung sein.

2.1.5 Auswertung für das Gemeindegebiet Gersdorf

Das Gemeindegebiet der Gemeinde Gersdorf (AGS: 14254070) erstreckt sich auf eine Fläche von ca. 9,7 km². Im analysierten Gebiet leben etwas mehr als 3.800 Menschen. Gemessen am gesamten Untersuchungsgebiet nimmt das Gebiet Gersdorf etwa 14 % der Gesamtfläche sowie gut 13 % der Einwohnerzahl ein. Die Bevölkerungsdichte liegt hierbei bei knapp 395 Einwohnern pro km². Das Gebiet ist der RegioStaR Typologie „städtischer Raum“ zuzuordnen und liegt im Landkreis Zwickau.

Nachfolgend wurden via GIS die Landnutzungen innerhalb des Gemeindegebietes analysiert und tabellarisch sowie grafisch ausgewertet. Die Darstellungen finden sich in der nachfolgenden Tabelle 6 bzw. Abbildung 9.

Tabelle 6: Auswertung zur Landnutzung in der Gemeinde Gersdorf⁹

Gemeindename		Gemeinde Gersdorf
Landnutzungstyp		
Wohngebiet	genutzte Fläche in km²	2,242
	Flächenanteil	22,2%
Industriegebiet	genutzte Fläche in km²	0,131
	Flächenanteil	1,3%
Gewerbe, Einzelhandel	genutzte Fläche in km²	0,068
	Flächenanteil	0,7%
Parks, Kleingärten,	genutzte Fläche in km²	0,069
	Flächenanteil	0,7%
Landwirtschaft, Bauernhof	genutzte Fläche in km²	5,775
	Flächenanteil	57,2%
Wald	genutzte Fläche in km²	0,589
	Flächenanteil	5,8%
Naturreservat, unkultiviertes Gras- und Heideland	genutzte Fläche in km²	1,140
	Flächenanteil	11,3%
Tagebau, Steinbruch	genutzte Fläche in km²	0,000
	Flächenanteil	0,0%
Gewässer	genutzte Fläche in km²	0,086
	Flächenanteil	0,8%
Sonstige	genutzte Fläche in km²	0,000
	Flächenanteil	0,0%
Gebäudeflächen ¹⁰	genutzte Fläche in km²	0,258
	Flächenanteil	2,6%
Summe analysierter Flächennutzungen	genutzte Fläche in km²	10,099
Gesamtfläche Gemeinde [1]	Gesamtfläche in km²	9,690

⁹ Eine Summierung auf 100 % je betrachteter Gemeinde bzw. Verwaltungsgemeinschaft ist nicht zweckmäßig, da einerseits eine Überlagerung von mehreren Flächennutzungstypen (z.B. Wohngebiet und Gewässer / Wohngebiet und Parks etc.) vorliegen kann und andererseits keine vollständige Datenverfügbarkeit gewährleistet wird (unbekannte Flächennutzungen, die nicht beziffert werden können).

¹⁰ Da Gebäudeflächen in allen Fällen innerhalb anderer Flächentypen liegen, werden diese für die Summierung der analysierten Flächennutzungen nicht berücksichtigt.

Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Gemeinde Gersdorf

Gebietsgrenze	Agrarflächen	Gewässer	Parkanlage
Gebäude	Bauernhöfe	Gewerbe-/Industriegebiet	Wald
Schiene	Büro/Business	Gras	Weide
Autobahn	Gestrüpp	keine Informationen	Wohngebiet
Bundesstraße	Kleingärten		
Sonstige Straße			

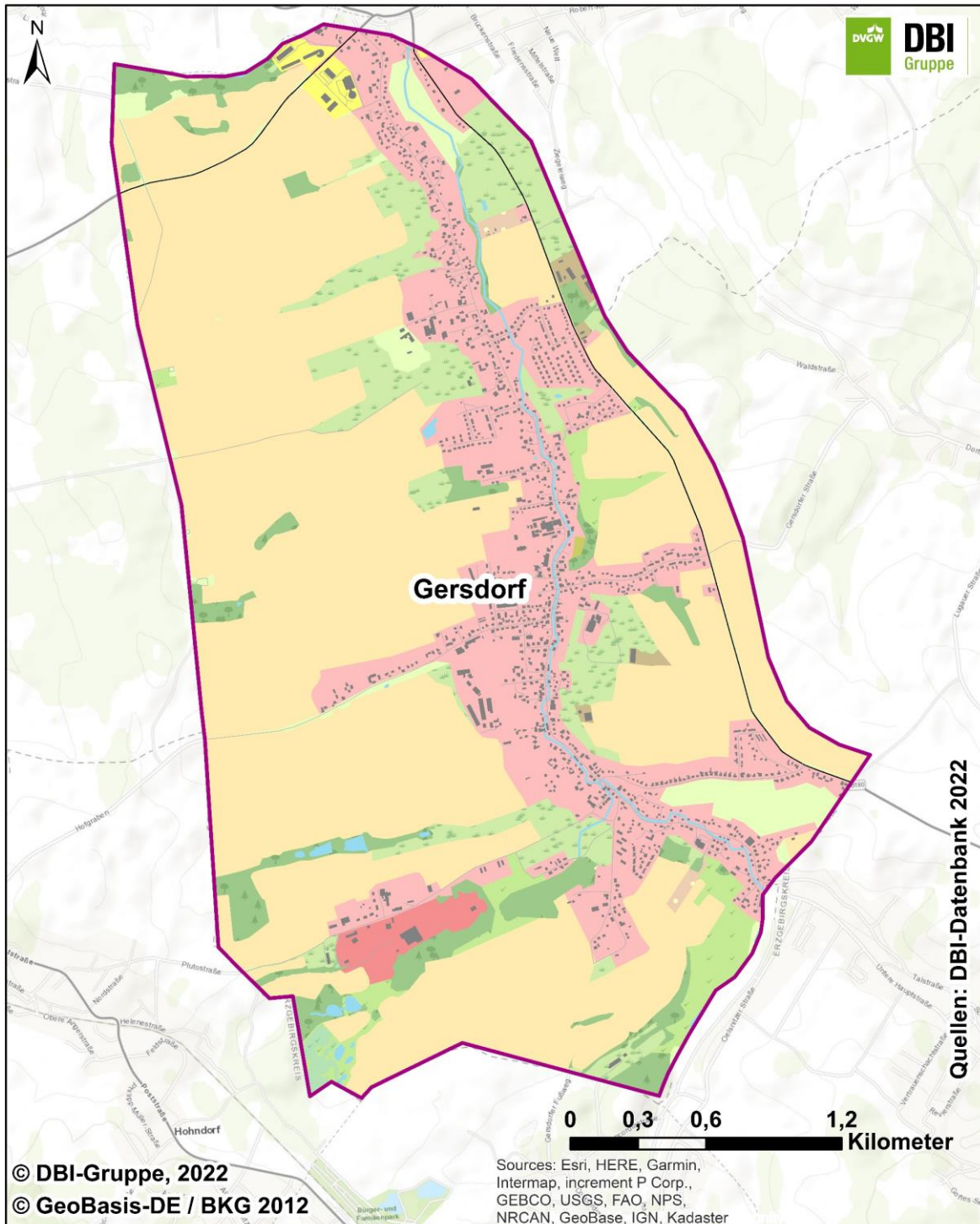


Abbildung 9: Räumlich-Strukturelle Charakterisierung der Gemeinde Gersdorf

In der Gemeinde Gersdorf existieren neben einer Vielzahl von Acker- und Waldflächen auch Gebiete, in denen eine Wohnbebauung vorliegt. Knapp 2,3 km² bzw. 22 % der Gesamtfläche der Gemeinde sind als Wohngebiete analysiert worden. Dazu kommen 0,7 km² bzw. etwa 0,7 % Flächenanteil für als Gewerbegebiete ausgewiesene Flächen – Industriegebiete nehmen in Gersdorf mit 1,3 km² bzw. 1,3 % noch eine geringfügig höhere Flächennutzung ein. Auf Basis dieser Analysen wurde die energetisch bedeutsame, d.h. für die Energieversorgung relevante Fläche der Gemeinde Gersdorf ermittelt. Dies ist in nachfolgender Abbildung veranschaulicht.

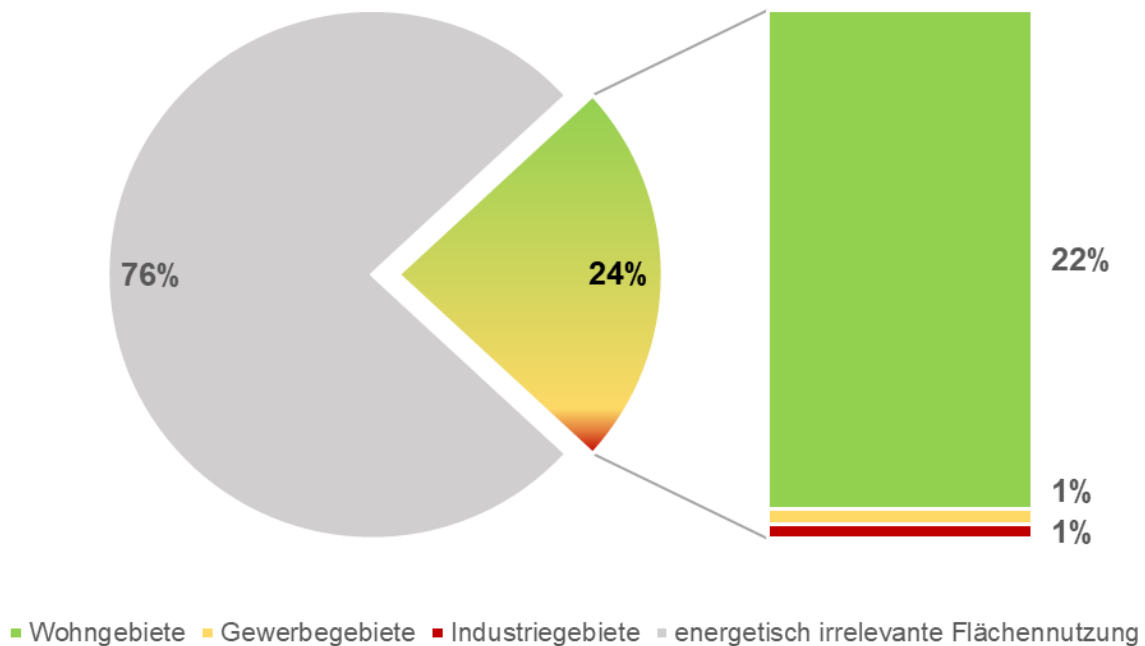


Abbildung 10: Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im Gemeindegebiet Gersdorf

Der Flächenanteil von 76 %, welcher für die Wärmeversorgung der Gebäude in Gersdorf irrelevant ist (Agrarflächen, Gräser etc.), wird im Folgenden nicht näher analysiert. Auch die Industriegebiete spielen für die Wärmeanalysen primär keine Rolle, wenngleich diese jedoch ein Potential zur Energienutzung bieten – sofern die Industriegebiete lukrative Standorte im Sinne der Untersuchung darstellen, werden die am Ende dieser Studie noch einmal kurz diskutiert und mögliche Handlungsempfehlungen abgeleitet. Eine Besonderheit in Gersdorf ist hierbei, dass der Anteil der Industriegebiete größer ist als der der gewerblich genutzten Flächen. Dies ist nur in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau und Niederwürschnitz gleichermaßen der Fall, wenngleich dort die Anteile von Gewerbe und Industrie noch stärker voneinander abweichen. Dennoch wird der Fokus der Analysen aufgrund der Homogenität der sektorspezifischen Energieversorgung im Gebäudesektor primär in den Wohn- und Gewerbegebieten liegen. Die Wärmebedarfsanalysen und Netzsimulationen werden somit für Gebäude durchgeführt, die sich in diesen Gebieten befinden. Die Industrie als potenzieller Abnehmer für eine Prozesswärmeversorgung mit Grubenwassergeothermie wurde in dieser Studie nicht näher untersucht.

In Summe bedecken die in der Verwaltungsgemeinschaft befindlichen Gebäude eine Fläche von knapp 0,26 km², was ca. 2,6 % der gesamten Fläche der Gemeinde Gersdorf ausmacht. Hierbei ist durch die Analysen und durch die bereits vorliegenden Datenbestände der DBI-Datenbank eindeutig zuordenbar, ob es sich um ein Wohn- bzw. Nichtwohngebäude handelt und welche Art des Gebäudes vorliegt. Dies wird für die Wärmeanalysen (vgl. Kapitel 2.2) von Bedeutung sein.

2.1.6 Zusammenfassung der räumlich-strukturellen Analyse

In den vorangegangenen Analysen wurde jede der im Untersuchungsgebiet befindlichen Gemeinde räumlich-strukturell charakterisiert. Auf dieser Basis wurden die für die Wärme- bzw. Energieversorgung relevanten Flächen und Flächennutzungen gemeindescharf identifiziert und lokalisiert. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse final gegenübergestellt und die Gemeinden untereinander verglichen.

Das betrachtete Untersuchungsgebiet umfasst in Summe eine Fläche von knapp 70 km². In Summe leben etwas mehr als 28.500 Einwohner in den betrachteten Gemeinden – eine Kurzvorstellung des gesamten Gebietes ist bereits im Abschnitt 2.1.1 erfolgt. Nachfolgend wurden die via GIS analysierten Landnutzungen innerhalb des Gemeindegebietes zusammengefasst, gegenübergestellt und tabellarisch sowie grafisch ausgewertet. Die Darstellungen finden sich in der nachfolgenden Tabelle 7 bzw. Abbildung 11. Dabei wird im Unterschied zu den einzelnen Analysen auch eine anteilige Gesamtauswertung aller Flächennutzungen vorgenommen, um das gesamte Untersuchungsgebiet zu charakterisieren. (vgl. Spalte „Anteil Summe“).

Tabelle 7: tabellarische Auswertung der Flächennutzung im Untersuchungsgebiet

Gemeinden		Oelsnitz	Lugau	Niederwürschnitz	Hohndorf	Gersdorf	Summe	Anteil Summe
Landnutzungstypen								
Wohngebiet	km ²	5,125	3,170	1,227	1,776	2,242	13,539	19,9%
	Anteil	37,9%	23,4%	9,1%	13,1%	16,6%	100,0%	-
Industriegebiet	km ²	0,169	0,282	0,205	0,000	0,131	0,788	1,2%
	Anteil	21,5%	35,8%	26,1%	0,0%	16,7%	100,0%	-
Gewerbe, Einzelhandel	km ²	0,913	0,110	0,035	0,010	0,068	1,137	1,7%
	Anteil	80,3%	9,7%	3,1%	0,9%	6,0%	100,0%	-
Parks, Kleingärten,	km ²	0,558	0,410	0,152	0,134	0,069	1,323	1,9%
	Anteil	42,2%	31,0%	11,5%	10,1%	5,2%	100,0%	-
Landwirtschaft, Bauernhof	km ²	7,714	11,830	1,840	1,961	5,775	29,120	42,9%
	Anteil	26,5%	40,6%	6,3%	6,7%	19,8%	100,0%	-
Wald	km ²	8,638	2,614	0,706	0,950	0,589	13,496	19,9%
	Anteil	64,0%	19,4%	5,2%	7,0%	4,4%	100,0%	-
Naturreservat, unkultiviertes Gras- und Heideland	km ²	2,510	2,965	0,250	0,703	1,140	7,568	11,1%
	Anteil	33,2%	39,2%	3,3%	9,3%	15,1%	100,0%	-
Tagebau, Steinbruch	km ²	0,001	0,007	0,000	0,000	0,000	0,008	0,0%
	Anteil	13,1%	86,9%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	-
Gewässer	km ²	0,356	0,190	0,171	0,026	0,086	0,830	1,2%
	Anteil	43,0%	22,9%	20,6%	3,2%	10,3%	100,0%	-
Sonstige	km ²	0,039	0,015	0,008	0,011	0,000	0,073	0,1%
	Anteil	53,7%	20,0%	10,8%	15,5%	0,0%	100,0%	-
Summe	km ²	26,025	21,592	4,596	5,571	10,099	67,883	100,0%
	Anteil	38,3%	31,8%	6,8%	8,2%	14,9%	100,0%	-
Gebäudeflächen ¹¹	km ²	0,685	0,588	0,204	0,194	0,258	1,930	-
	Anteil	35,5%	30,5%	10,6%	10,1%	13,4%	100,0%	-

¹¹ Da Gebäudeflächen in allen Fällen innerhalb anderer Flächentypen liegen, werden diese für die Summierung der analysierten Flächennutzungen nicht berücksichtigt.

Räumlich-Strukturelle Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Gebietsgrenze	Agrarflächen	Gewässer	Obstplantage
Gebäude	Bauernhöfe	Gewerbe-/Industriegebiet	Parkanlage
Schiene	Büro/Business	Gras	Wald
Autobahn	Einzelhandel	keine Informationen	Weide
Bundesstraße	Friedhof	Kleingärten	Wohngebiet
Sonstige Straße	Gestrüpp		

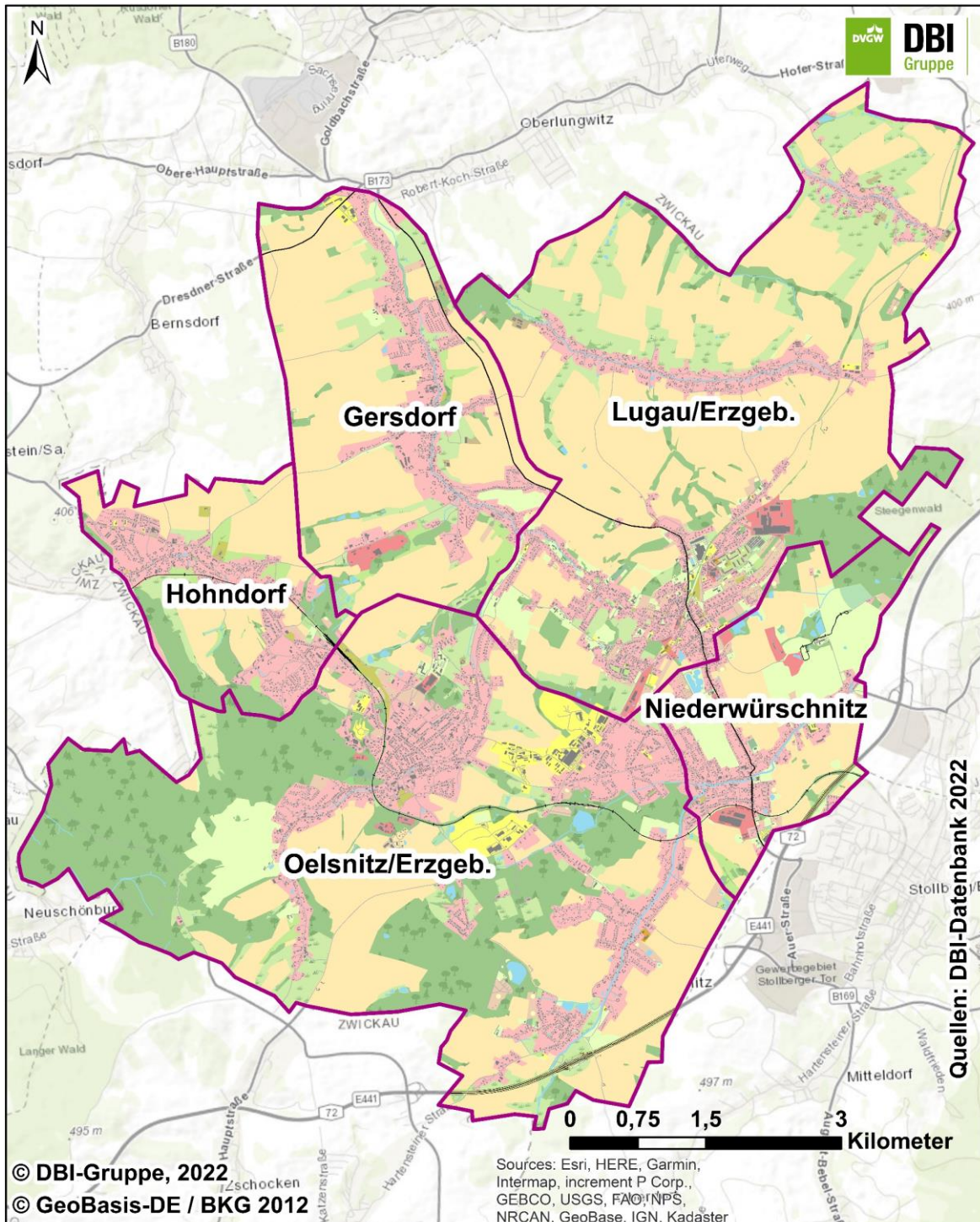


Abbildung 11: Räumlich-Strukturelle Charakterisierung des gesamten Untersuchungsgebietes

Wenngleich das gesamte Untersuchungsgebiet eher ländlich geprägt ist, konnten dennoch in den einzelnen Gemeinden erhebliche Anteile von Flächennutzungen identifiziert werden, die für die Energie- bzw. Wärmeversorgung der einzelnen Gemeinden relevant sind. Über 13,5 km² bzw. 20 % der Gesamtfläche des untersuchten Gebietes sind als Wohngebiete analysiert worden. Dazu kommen gut 1,1 km², welche als Gewerbeflächen identifiziert wurden. Diese machen einen Flächenanteil von etwas weniger als 2,0 % aus. Die vorhandenen Industriegebiete sind mit knapp 0,8 km² Fläche bzw. einem Flächenanteil von knapp 1,0 % die geringsten, für die Wärmeversorgung relevanten Gebiete. Auf Basis dieser Analysen wurde die energetisch bedeutsame, d.h. für die Energieversorgung relevante Fläche des gesamten Untersuchungsgebietes analog zu den vorangegangenen Analysen der einzelnen Gemeinden ermittelt. Dies ist in nachfolgender Abbildung veranschaulicht.

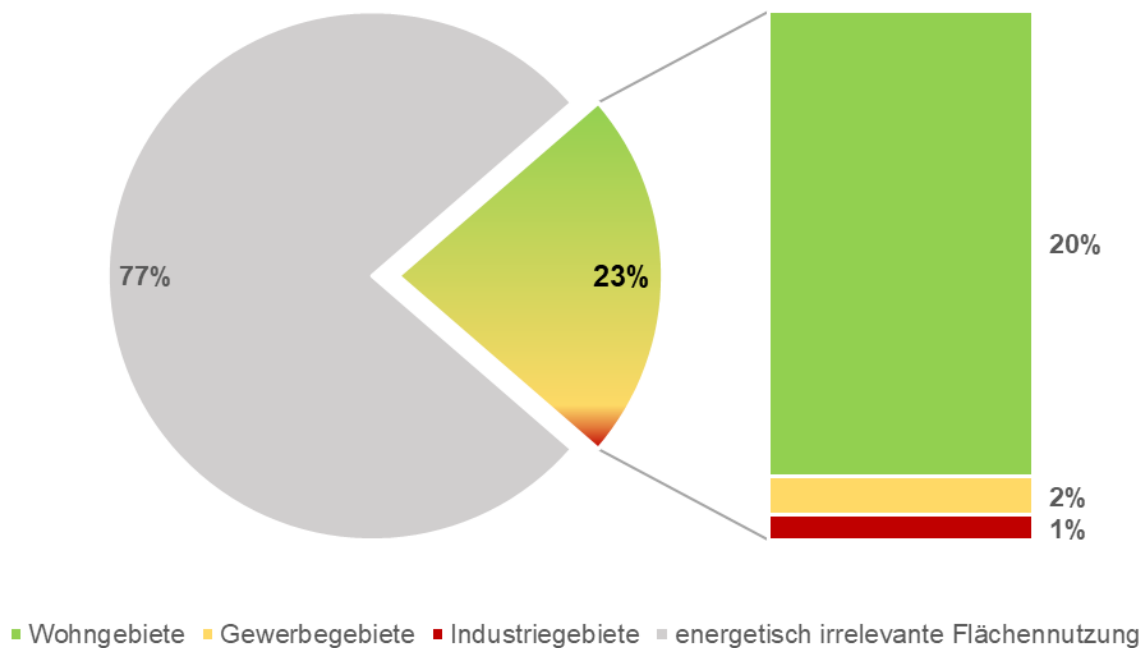


Abbildung 12: Analyse zur energetisch relevanten Flächennutzung im gesamten Untersuchungsgebiet

Auf eine nähere Bewertung der Gesamtfläche wird in diesem Kontext verzichtet und auf die vorangegangenen Kapitel zu den einzelnen Gemeinden verwiesen.

Um die Gebiete, welche eine energetisch relevante Flächennutzung aufweisen, gemeindespezifisch besser miteinander vergleichen zu können, wurde abschließend eine Analyse durchgeführt, wie die Anteile der Flächennutzungen Wohnen, Gewerbe und Industrie in den einzelnen Gemeinden bzw. Gebietskörperschaften verteilt sind. Eine Darstellung dieser Analyse kann der Abbildung 13 auf nachfolgender Seite entnommen werden. Hierbei zeigt sich, dass 70 % aller Wohngebiete auf die Stadt Oelsnitz und die Verwaltungsgemeinschaft Lugau und Niederwürschnitz verteilt sind. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die beiden „kleineren“ Gemeinden Hohndorf und Gersdorf gemeinsam dennoch etwa 30 % - und somit knapp ein Drittel – aller analysierten Wohngebiete beherbergen. Die Wohnnutzung in den Gemeinden ist demnach für die Energieversorgung gleichermaßen relevant, auch wenn die Einwohnerzahl in den beiden Gemeinden geringer ist, als in den Städten. Der Analysefokus muss demnach nicht nur auf den Städten bzw. Orten mit leichten Verdichtungsansätzen liegen, sondern ebenso kleinere Gemeinden mitberücksichtigen.

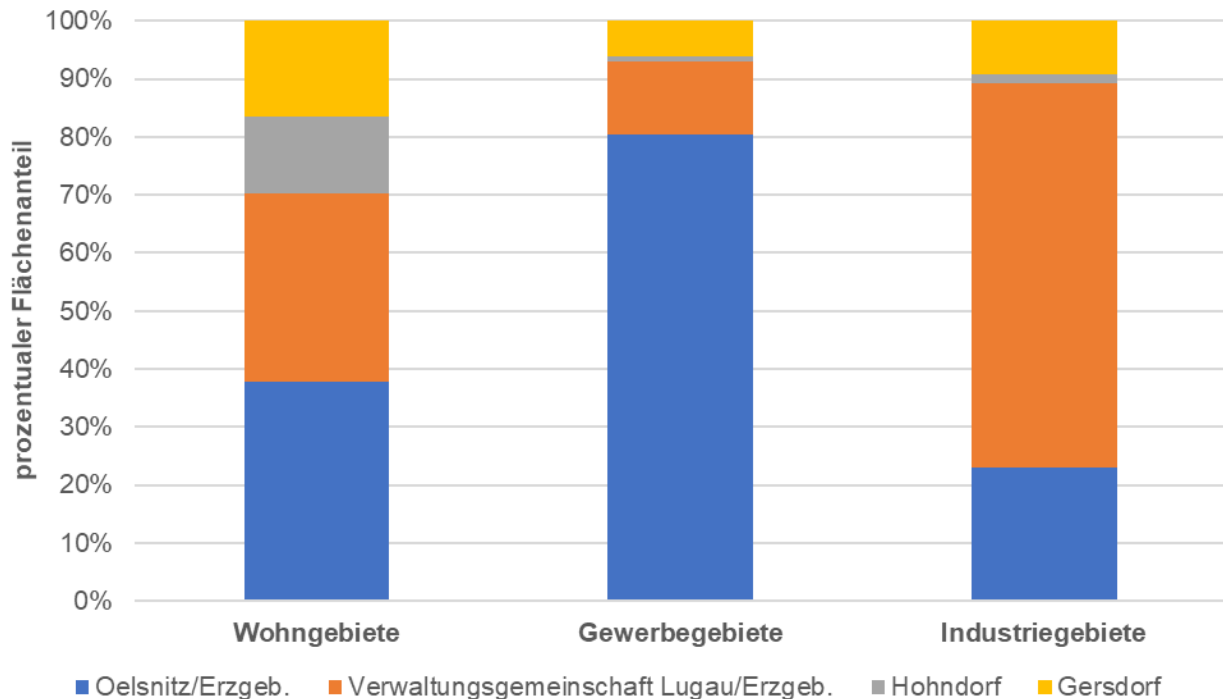


Abbildung 13: Analyse zur Verteilung der Anteile energetisch relevanter Flächennutzungen in den einzelnen Teilgebieten

Bei den Gewerbegebieten hingegen zeigt sich ein anderes Bild. Hier sind in der Stadt Oelsnitz knapp 80 % aller im Untersuchungsgebiet analysierten Gewerbeflächen zu finden. Dies spiegelt sich in den Verdichtungsansätzen in der Stadt wider, da es im Gegensatz zu den umliegenden Dörfern eine Infrastruktur im Gewerbebereich gibt (z.B. große Supermärkte, Baumärkte etc.). In der Verwaltungsgemeinschaft Lugau liegen noch über 10 % aller Gewerbeflächen, während in Gersdorf und insb. Hohndorf nahezu keine als Gewerbegebiete ausgewiesene Flächen analysiert werden konnten. Auch bei Industriegebieten zeigt sich eine ähnliche Konzentration in einer Gebietskörperschaft – so liegen mehr als zwei Drittel aller analysierten Industriegebiete in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau und Niederwürschnitz, was im Vergleich zu den übrigen Flächennutzungen jedoch im Wesentlichen auf zwei Standorte zurückzuführen ist: das Edelstahlwerk in Lugau sowie das Maschinenbauunternehmen im Süden von Niederwürschnitz. Während in Oelsnitz ebenso über 20 % der analysierten Industrieflächen liegen (u.a. auch vereinnahmt von einer Herstellerfabrik für Maschinenteile), sind auch in der Gemeinde Gersdorf knapp 10 % aller industriellen Flächen aufzufinden. Diese werden durch im Wesentlichen durch das ortsansässige Betonwerk vereinnahmt. Im Gegensatz zu den Wohn- und Gewerbeflächen, die sich über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilen, sind die vorhandenen Industriegebiete in wenigen (großen) Standorten konzentriert.

Ziel der weiteren Untersuchung ist es, die Analysen zur Flächennutzung für Energiebedarfsmodellierung (Kenntnis der einzelnen Abnehmer) sowie die Energienetzmodellierung zu nutzen. Hierbei liegt der Fokus auf den Wohn- und Gewerbegebieten, da diese ein ähnliches Anforderungsprofil hinsichtlich Temperaturniveau zur Wärmeversorgung aufweisen. Es ist somit eher denkbar, ein Gewerbe sowie ein Wohngebiet mit einer gemeinsamen Infrastruktur zu versorgen als ein Wohn- mit einem Industriegebiet bzw. Gewerbe- mit Industriegebiet. Die Umstellung des Industriesektors auf erneuerbare Energien ist zudem stark von unternehmensinternen Entscheidungen eines Großverbrauchers abhängig, hingegen die Wohn- und Gewerbegebäude eine Vielzahl von Eigentümern und somit möglichen Entscheidern haben. Aus diesem Grund wurde bereits vor Projektbeginn festgelegt, die Industrie im Projektvorhaben nur nachrangig zu behandeln und sich ggf. auf qualitative Handlungsempfehlungen am Ende dieser Studie zu beschränken. Die analysierten Wohn- und Gewerbeflächen bilden somit die Basis für den weiteren Fortgang der Modellierung.

2.2 Standortgenaue Modellierung der Energiebedarfe je Abnehmer

2.2.1 Methodik zur Modellierung der Energiebedarfe und Erläuterung der Datenbasis

2.2.1.1 Erläuterung der Datenbasis des DBI-Gebäudeatlas

Ein wesentliches Ziel des Projektes **MareEn** ist die Evaluierung möglicher Versorgungskonzepte (Einzelversorgung und/oder Netzversorgung via Wärmenetz) auf Basis der verfügbaren Energien aus Grubenwassergeothermie. Um dies zu analysieren, müssen die Energiebedarfe der einzelnen Gebäude im Untersuchungsgebiet bekannt sein. Dies betrifft sowohl gebäudescharfe Heiz-, als auch Kühlbedarfe. Um im Projekt eine entsprechende Detailschärfe abbilden zu können, wurden in den Gemeinden Realdaten verwendet, wo dies möglich war. Die assoziierten Partner haben hierbei eine Vielzahl von Energiewerten und Realdaten, insbesondere zu kommunalen Gebäuden, zur Verfügung gestellt.

Da die Beistellungen der assoziierten Partner jedoch nur einen geringen Anteil der gesamten Energiebedarfe des Untersuchungsgebietes abgedeckt haben, mussten zur Abschätzung der energetischen Versorgungslage des gesamten Gebietes, Modellierungen durchgeführt werden. Um die Gesamtheit des Untersuchungsgebietes abbilden zu können, werden hierzu DBI-interne Daten zu Grunde gelegt [3]. In nachfolgender Abbildung 14 ist die Bandbreite der verfügbaren Daten des DBI-Gebäudeatlas, welcher den ergänzenden Modellierungen zu Grunde liegt, dargestellt. Die Datenbasis wird nachfolgend erläutert.

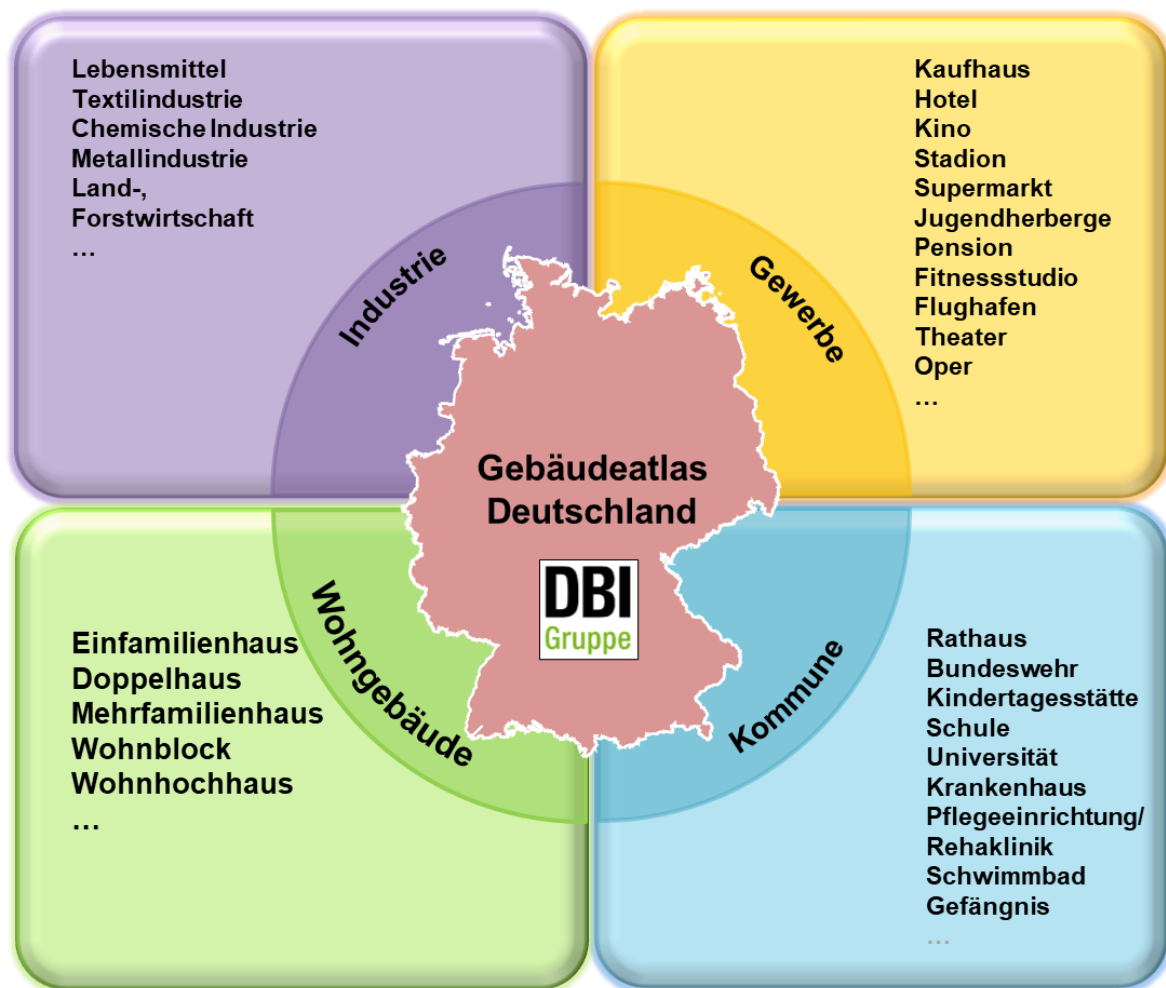


Abbildung 14: Systematisierung des DBI-Gebäudeatlas und Überblick über verfügbare gebäudescharfe Daten [3]

Die DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH hat aus einer Vielzahl von vergangenen Projekten den DBI-Gebäudeatlas entwickelt [3]. Im kompletten Bundesgebiet liegen im DBI-Gebäudeatlas standortgenaue Daten von etwa 21 Mio. Wohngebäudeadressen vor. Dazu ergänzend sind weitere Adressen aus dem kommunalen Sektor, dem Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor sowie der Industrie recherchiert, georeferenziert und in die Datenbank integriert worden. In Summe ergeben sich somit knapp 23 Mio. Adresspunkte, die im DBI-Gebäudeatlas vorliegen. Diese Daten beinhalten Informationen zum Gebäudeaufbau, wie beispielsweise den Gebäudetyp, Baujahr und Anzahl der Wohnungen. Die Quellen der DBI-GIS-Datenbank sind vielfältig, von statistischen Ämtern, Bund, Land und Städten bis hin zu wirtschaftlichen Institutionen, Verbänden, Marktbefragungen und einer Vielzahl von Eigenrecherchen [3]. Dies wird ergänzt durch dreidimensionale Stadtmodelle, welche eine Basis der Modellierung von Energiebedarfen bilden.

2.2.1.2 Randbedingungen und Methodik zur Modellierung des Wärmebedarfes je Gebäude

Exkurs: Wissenschaftliche Grundlagen zum Wärmeenergieverbrauch im Gebäude- bzw. Wohnsektor

Die Bestimmung des standortgenauen Wärmebedarfes bildet die Basis für die nachfolgenden Analysen zu möglichen energetischen Versorgungskonzepten. Da im Projektverlauf bis auf einige gebäudespezifische Ausnahmen keine Realdaten zur Verfügung stehen, ist es nötig, einen gebäudescharfen Wärmebedarf hinreichend genau zu modellieren. Für eine realitätsnahe Modellierung ist die Identifikation von einzelnen Anwendungsbereichen des Wärmesektors notwendig. Aus diesem Grund soll in diesem Abschnitt ein kurzer wissenschaftlicher Exkurs gegeben werden, welche Einflussfaktoren den Wärmebedarf bestimmen und wie auf deren Basis eine näherungsweise Methodik und Modellierung durchgeführt wurde.

Neben den Bereichen Raumwärme und Warmwasser zählt auch Prozesswärme und Prozesskälte sowie Klimakälte zum Wärmesektor [6]. Die Prozesswärme und Prozesskälte spielen im Rahmen des Vorhabens keine Rolle, auf den Aspekt Klimakälte zur Kühlung von Gebäuden wird noch einmal gesondert eingegangen. Dieser ist jedoch dem Wärmebedarf untergeordnet zu bewerten, da die Erstellung der Versorgungskonzepte (vgl. Kapitel 2.4) auf Basis der Wärmebedarfe erfolgen muss, denn die Wärme wird im Vergleich zur Kälte insbesondere im hier betrachteten Untersuchungsgebiet übers Jahr gesehen einen deutlich größeren Anteil am Nutzenergieverbrauch einnehmen. Die Verteilung des Wärmebedarfes anhand der einzelnen Wärme- bzw. Kälteanwendungen ist in Abbildung 15 dargestellt.

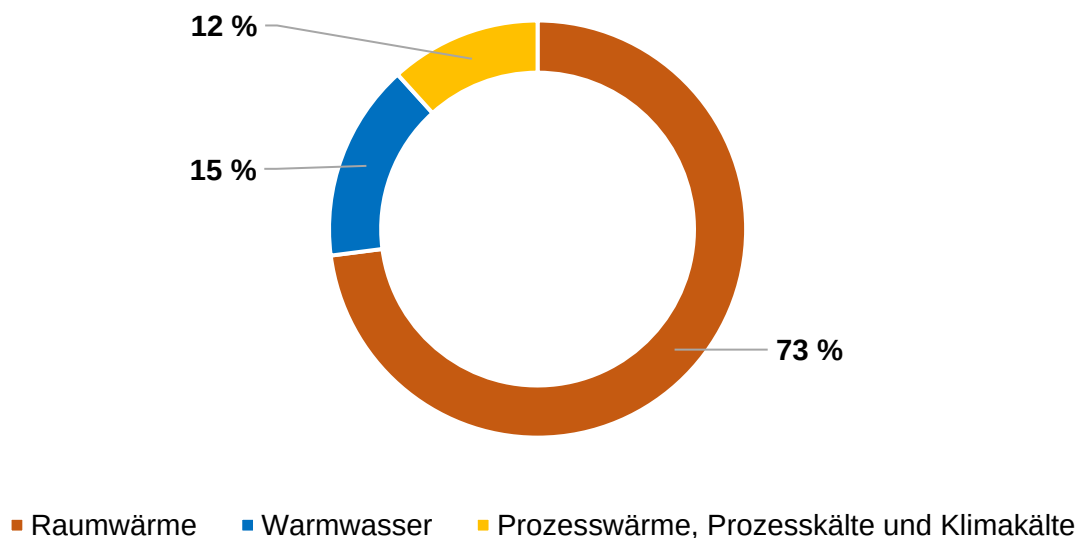


Abbildung 15: Struktur des Wärmeenergiebedarfes nach Anwendungszweck für private Haushalte in Prozent (nach [7])

Der Wärmebedarf privater Haushalte ist maßgeblich von Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung abhängig. Insbesondere der Raumwärmebedarf macht mit nahezu drei Vierteln des gesamten Wärmeenergieverbrauches den entscheidenden Anteil aus. Dieser wird im Wohnbereich hauptsächlich mittels der Energieträger Erdgas und Öl gedeckt [7]. Anhand der beiden Faktoren Raumwärme und Warmwasser sollen die wesentlichen Treiber bzw. Einflussfaktoren auf den Wärmeenergiebedarf aufgezeigt werden. Diese sowie deren Strukturierung werden größtenteils analog zur Dissertation von *Jungbluth* beschrieben [8]. Entscheidend für die Wärmebedarfe sind hierbei drei Faktoren: Gebäudespezifische Faktoren, Nutzerspezifische Faktoren und Allgemeine Faktoren wie bspw. das Klima. Der Warmwasserbedarf wird analog in drei Kategorien eingeteilt, wenngleich die nutzerspezifische Komponente bedeutsamer ist. Nachfolgend werden die Einflusskriterien, welche den Wärmeenergieverbrauch beeinflussen, beschrieben.

- **Allgemein**

- Raumwärmebedarf:

In die Kategorie Allgemein fallen alle Einflussfaktoren, die mit dem Klima und der Witterung zusammenhängen, welche insbesondere für die Ermittlung der Heizlast bzw. Heiztage eine Rolle spielen. Diese werden u.a. wetterstationsspezifisch durch den Deutschen Wetterdienst erfasst und geben eine erste Tendenz, wie intensiv in bestimmten Regionen Deutschlands geheizt werden muss. Zusätzlich spielen saisonale und tageszeitliche Schwankungen der Witterung eine Rolle.

- Warmwasserbedarf:

Die Kategorie *Allgemein* beschreibt hauptsächlich, wie - das heißt mit welcher Anlage - das Warmwasser erzeugt wird. Außerdem wird berücksichtigt, ob es sich um dezentrale oder zentrale Versorgungsstrukturen handelt. Zusätzlich haben wochentagspezifische Einflüsse eine Bedeutung, da am Wochenende der Warmwasserbedarf in Wohn- und Nichtwohngebäuden einer anderen zeitlichen Verteilung folgt als unter der Woche.

- **Gebäudespezifisch**

- Raumwärmebedarf:

Die Kategorie *Gebäudespezifisch* beinhaltet alle dem jeweiligen Gebäude zuordenbaren Einflüsse. Als wichtigstes Merkmal ist hier die Wohnfläche zu nennen, die zu beheizen ist. Eine größere Grundfläche führt zu einem höheren Bauvolumina und dementsprechend zu mehr Wärmeenergie, die zur Heizung des Raumes benötigt wird. Neben der beheizten Fläche bzw. dem Bauvolumen sind auch Wärmegewinne bzw. Wärmeverluste zu berücksichtigen. Die Wärmegewinne werden nach DIN V 4108-6 [9] bzw. DIN/TS 18599-12:2021-04 [10] in interne und solare Wärmegewinne eingeteilt. Interne Wärmegewinne sind beispielsweise die vom Menschen abgestrahlte Wärme bzw. Abwärme von Elektrogeräten oder Beleuchtungsmitteln. Gleichmaßen wird auch Wärme, die durch in der Wohnung verlaufende Warmwasserleitungen abgegeben wird, als interner Wärmegewinn bilanziert. Als solare Wärmegewinne hingegen werden bspw. das Aufheizen des Mauerwerks oder der Wärmedurchgang durch die Fenster infolge von Sonneneinstrahlung bilanziert. Während die internen Wärmegewinne im Gebäudesektor eher weniger bedeutsam sind, sind solare Wärmegewinne beispielsweise durch die Einbauweise von Fenstern oder auch die Farbe des Mauerwerkes gut adaptierbar und dementsprechend zu berücksichtigen [9]. Den Gewinnen stehen die Wärmeverluste aufgrund der Gebäudehülle, insbesondere Transmissions- und Lüftungswärmeverluste gegenüber [9]. Diese werden in der Bauphysik über den Wärmedurchgangskoeffizienten („U-Wert“) abgebildet [11]. Das bedeutet, dass Wärme über die Außenwände des Gebäudes nach außen geleitet wird. Dabei ist zu berücksichtigen, wie gut das Gebäude gedämmt ist, denn hier kann der Wärmedurchgang durch die Außenwand entscheidend beeinflusst werden. Große Fensterflächen wirken sich zusätzlich negativ auf den Raumwärmebedarf aus. Die Dichtheit des Gebäudes (u.a. an Fenstern) ist gleichmaßen wichtig, sodass möglichst wenig Wärmeenergie aufgrund von Undichtigkeiten nach Außen abgegeben wird. Die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes ist aufgrund dessen Beschaffenheit und Lage auch bei den *gebäudespezifischen* Merkmalen zu beachten.

- Warmwasserbedarf:
Der Kategorie *Gebäudespezifisch* wird hier als einziger Faktor die Warmwasserverteilung im Gebäude zugerechnet. Dabei wird berücksichtigt, wie die Warmwasserleitungen im Gebäude verlaufen, um die Transportwege des Warmwassers zu kennen.
- **Nutzerspezifisch**
 - Raumwärmebedarf:
Die Kategorie *Nutzerspezifisch* beinhaltet alle Faktoren, die aufgrund der Bewohner einen Einfluss auf den Raumwärmebedarf nehmen. Einerseits betrifft dies den Tagesrhythmus der Bewohner, das heißt zu welchen Tageszeiten vornehmlich geheizt werden muss. Ebenso beeinflusst das individuelle Lüftungsverhalten den Raumwärmebedarf. Die gewünschte Raumtemperatur hängt ebenfalls stark von den individuellen Bedürfnissen der Bewohner ab. Insbesondere ältere Menschen haben oftmals eine höhere Wohlfühltemperatur als jüngere Menschen, was übers Jahr gesehen den Heizwärmebedarf an einem Standort erhöht. Bereits eine um 1 K gewählte höhere gewünschte Innenraumtemperatur erhöht den jährlichen Heizwärmebedarf um etwa 6 % - bei der Auslegung von Heizsystemen kann dies berücksichtigt werden [12].
 - Warmwasserbedarf:
Die Kategorie *Nutzerspezifisch* ist, wie eingangs erwähnt, der wichtigste Faktor bei der Ermittlung des Warmwasserbedarfes. Hier gehen die Personenanzahl sowie die einzelnen Bedürfnisse der Bewohner ein. Außerdem wird der Tagesrhythmus berücksichtigt, da der Warmwasserbedarf stark mit der Zeit fluktuiert. Unter den Bedürfnissen der Bewohner sind all diese Tätigkeiten zu verstehen, die mit dem Verbrauch von Warmwasser verbunden sind. Dazu zählen das Baden oder Duschen, aber auch Wohnungsreinigung oder Küchentätigkeiten. Zudem variiert die eingestellte Wassertemperatur personenspezifisch, sodass sich Veränderungen beim Warmwasserbedarf ergeben. Individuelle soziodemografische Präferenzen spielen demnach für die Bestimmung des Warmwasserbedarfes eine große Rolle – diese im Rahmen einer Modellierung abzubilden ist jedoch oftmals eine große Herausforderung bzw. stark annahmebehaftet möglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Einflussfaktoren bzgl. der Ermittlung des Wärmebedarfes je Gebäude vielschichtig und teils heterogen ausfallen. Die Erhebung einzelner Wärmebedarfe durch Befragungen etc. ist somit immer ein besser geeignetes Mittel, einen genauen Wärmebedarf zu erhalten. Während dies für einzelne Liegenschaften bzw. Quartiere noch gut möglich ist, ist es im Rahmen des Projektes nicht sinnvoll, alle ca. 28.000 Einwohner nach ihrem Wärmebedarf zu befragen. Zudem ist der Rücklauf bei solchen Befragungen fraglich, sodass dennoch zum „Lücken auffüllen“ stets auf eine gute Modellierung zurückgegriffen werden muss. Das Projektziel ist es, jedem Gebäude einen gebäudescharfen Wärmebedarf zuzuordnen zu können, welcher die Basis für die Prüfung der Machbarkeit zur energetischen Versorgung mit Grubenwassergeothermie bildet. Aus diesem Grunde wurde unter bestmöglicher Berücksichtigung der eingangs beschriebener Faktoren zum Einfluss des Heizwärmebedarfes eine Methodik entwickelt, die auf Basis vorliegender Geodaten, Literaturdaten sowie weiterer Datenquellen (z.B. soziodemografischer Daten) in der Lage ist, gebäudescharf Wärmebedarfe zu berechnen.

Methodik zur Modellierung und Prognose gebäudescharfer Wärmebedarfe im Wohnsektor

Basierend auf den beschriebenen Daten werden die Wärmebedarfe nach einer eigens entwickelten Methodik modelliert und prognostiziert. Diese bilden die Basis für die Wärmenetzverlaufsplanung im Quartier. Dabei wird ausschließlich der Gebäudesektor für die Analysen berücksichtigt. Das heißt, eine Analyse der Industrie findet nicht statt, da sich die Temperaturniveaus hinsichtlich der Wärmeversorgung zwischen dem Industrie- und dem Gebäudesektor stark unterscheiden, was eine gemeinsame Netzversorgung nicht ermöglicht.

Die Grundlage für die Modellierung bilden in erster Linie die Adresskoordinaten der einzelnen Punkte, für die die Wärmebedarfe modelliert werden. Diese werden mit weiteren standortspezifischen Kennwerten angereichert. Zum einen betrifft dies bspw. Informationen zur Gebäudeabmessung wie bspw. 3D-Gebäudedaten (Level of Detail 1 bzw. Level of Detail 2), Gebäudehöhe, Grundfläche etc. Zum anderen sind dies spezifische Wärmebedarfe pro Quadratmeter, welche in Abhängigkeit anderer Merkmale wie bspw.

Gebäudetyp oder Gebäudealter bestimmt werden. Diese wurden für die einzelnen betrachteten Sektoren zusammengestellt, welche im Rahmen der räumlich-strukturellen Analyse als Gebäude- bzw. Adressdaten analysiert und in einer Geodatenbank auf Basis des DBI-Gebäudeatlas abgelegt wurden. Dabei ist es wichtig, zwischen den Haustypen zu unterscheiden. Ziel ist es, jedem Standort auf Basis des DBI-Gebäudeatlas einen spezifischen Wärmebedarf zuordnen zu können, nach dem unter Berücksichtigung der Gebäudeparameter (Wohnfläche, Anzahl Haushalte usw.) ein Wärmebedarf modelliert wird. Zur Anreicherung der Daten mit werden u.a. Literaturwerte des IWU verwendet [13]. Diese sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Spezifische Wärmebedarfe je Gebäudetyp (Einfamilienhäuser – EFH sowie Mehrfamilienhäuser – MFH) in Bestandsgebäuden nach [13]

Unterkategorie		spezifischer Wärmebedarf
EFH	freistehendes Gebäude mit einer oder zwei Wohneinheiten	158 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$
	gereihtes Haus und Doppelhaushälften mit einer oder zwei Wohneinheiten	126 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$
MFH	kleines Mehrfamilienhaus mit drei bis sechs Wohneinheiten	144 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$
	mittleres Mehrfamilienhaus mit sieben bis zwölf Wohneinheiten	143 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$
	großes Mehrfamilienhaus mit 13 und mehr Wohneinheiten	125 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$

Der gesamte Modellierungsprozess inkl. aller berücksichtigten Einflüsse ist schematisch-vereinfacht in Abbildung 16 veranschaulicht.

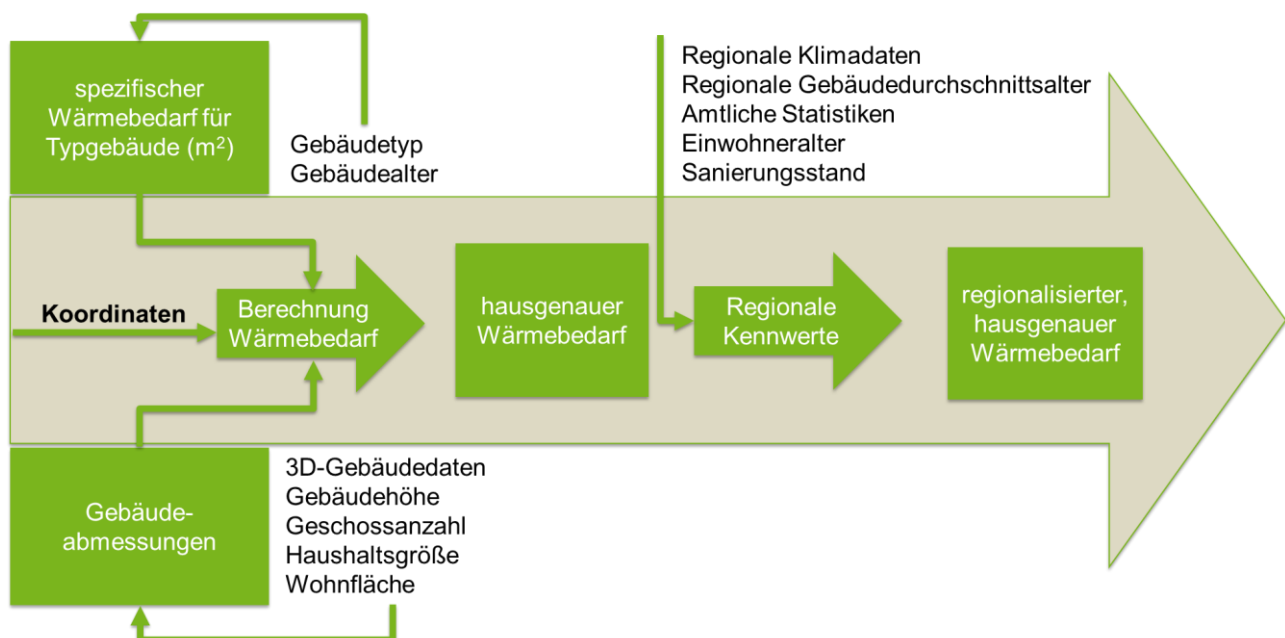


Abbildung 16: Vereinfachte Methodik zur Modellierung des Wärmebedarfs auf Basis der vorgestellten Datengrundlagen sowie des DBI-Gebäudeatlas [3]

Die Unterkategorie zu den jeweiligen Gebäudetypen in Tabelle 8 entspricht der IWU-Definition. Im Zuge der Modellierung werden die Unterkategorien jeweils einem Haustyp zugeordnet. Dabei wird zur Modellierung der spezifische Wärmebedarf verwendet, der mit der im Gebäude lebenden Anzahl Haushalte korreliert. Denn es ist davon auszugehen, dass je ein Haushalt eine Wohneinheit bewohnt. So wird für ein Mehrfamilienhaus mit 13 und mehr Haushalten ein anderer spezifischer Wärmebedarf verwendet, als für ein Mehrfamilienhaus mit

sieben bis zwölf Haushalten. Die Unterscheidung wird ebenso für Einfamilienhäuser getroffen, indem anhand der Georeferenzierung überprüft wird, ob das Gebäude freistehend ist oder nicht. Freistehende Gebäude bedürfen eines größeren spezifischen Wärmebedarfes, da die Heizwärme über alle Außenwände – im Gegensatz bspw. zu gereihten Häusern – nach außen abstrahlen kann. Nachdem standortgenau zu jedem Typgebäude ein spezifischer Wärmebedarf zugeordnet worden ist, wird anhand der Gebäudeabmessungen und daraus abgeschlossener Ableitung der Wohnfläche ein hausgenauer Wärmebedarf mittels eines eigens programmierten Modells in ArcGIS berechnet.

Unter Berücksichtigung regionaler Kennwerte kann abschließend der regionalisierte hausgenaue Wärmebedarf abgeleitet werden, der das standortgenaue Ergebnis beschreibt. Insbesondere der Sanierungsstand sowie die klimatischen Faktoren spielen bei der Regionalisierung eine entscheidende Rolle. Die Sanierungsquoten reduzieren den nötigen Wärmebedarf, da sich die Wärmeverluste der Gebäude mit steigender Sanierung reduzieren. Zusätzlich wird eine Klimabereinigung der Standorte durchgeführt, wodurch der Wärmebedarf standortabhängig ansteigt („kalte Umgebung“) oder absinkt („warme Umgebung“). Hintergrund der Klimabereinigung ist, dass zwei sonst identische Gebäude (Abmessung, Wohnfläche, Sanierung, Alter, ...) trotzdem aufgrund ihrer geografischen Lage unterschiedliche Wärmebedarfe aufweisen. So ist ein Gebäude, was bspw. in Höhenlage steht anderen jährlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt als ein Gebäude, was in der Stadt steht. Aufgrund dessen wird die Klimabereinigung unter Zuhilfenahme von Gradtagszahlen vorgenommen. Das heißt, dass die langfristigen Mittelwerte eines Standortes auf die langfristige Referenzgradtagszahl für Deutschland normiert werden. Die Referenzgradtagszahl wird dazu anhand von Wetterstationsdaten der Wetterstation Potsdam ermittelt, da dieser Standort seit 2016 die Basis für Klimabereinigungen darstellt [14]. Um die Referenzgradtagszahl zu ermitteln, wurden vom Deutschen Wetterdienst die Temperaturdaten der Wetterstation von 1995 bis 2012 zu Grunde gelegt, denn dieser Zeitraum wurde zuvor als langjähriges Mittel in den TRY-Klimaregionen festgelegt, an welchem Klimabereinigungen vorzunehmen sind. Die Stationsdaten stehen georeferenziert kostenfrei im „Climate Data Center“ des DWD zur Verfügung [15]. Die Referenz, die sich anhand der Klimastationsdaten von Potsdam für die Berechnung des gegenwärtigen Wärmebedarfes ergibt, liegt bei 3.667 Kd (Kelvintage) [14]. Die Klimabereinigung wird folglich mit einem Quotienten vorgenommen, der das langjährige Mittel eines Standortes durch die Referenzgradtagszahl teilt. Dadurch ergeben sich Faktoren größer als 1 für Gebiete, an denen durchschnittlich mehr geheizt werden muss bzw. kleiner 1, wo weniger geheizt werden muss. Dieser Wert fungiert als Korrekturfaktor für den Wärmebedarf, das heißt, er bewertet die Lage des Gebäudes anhand der klimatischen Faktoren. Das Ergebnis der Wärmebedarfsberechnung beschreibt den gegenwärtigen, regionalisierten und hausgenauen Wärmebedarf für jeden einzelnen Adresspunkt im Untersuchungsgebiet.

Damit die erstellte Simulation der ermittelten Wärmebedarfe verschiedene Berechnungsaspekte und die sozio-demografische Entwicklung der Bevölkerung und der zu betrachtenden Haushalte einbezieht, wurde eine Formel anhand der oben erläuterten Inputfaktoren erstellt:

$$WB_i = A_{HHi} * A_{Wohni} * \left(\text{spez. Heiz}_i * \frac{GTZ_i}{GTZ_{\text{Vergleich}}} + \text{spez. WW} * \left(1 + \sum_{\text{Status quo}}^i \text{proz. EW} \right) \right) \quad (1)$$

Oben beschriebene Formel gibt den berechneten Wärmebedarf (WB) für ein beliebiges Stützjahr (i) wieder. Die Kriterien für die Berechnung beginnen mit der Anzahl der Haushalte pro Jahr (A_{HHi}) und der Wohnfläche pro Haushalt und Jahr (A_{Wohni}). Ebenso wird der spezifische Heizwärmebedarf (spez. Heiz_i, vgl. Tabelle 8) für die unterschiedlichen Häusertypen beachtet. Im Anschluss wird die Gradtagszahl (GTZ_i) für das Modellierungsjahr durch den zur Normierung ($GTZ_{\text{Vergleich}}$) notwendigen Wert geteilt und mit dem spezifischen Heizwärmebedarf multipliziert. Die Normierung ist zur Bereinigung des Klimas und für den Vergleich der Standorte erforderlich. Danach erfolgt die Addition des spezifischen Warmwasserbedarfs (spez. WW.). Der Warmwasserbedarf ist dabei unabhängig von Jahr, Dämmung oder GTZ, da nur die Einwohner der Wohnung Einfluss aus das Warmwasser ausüben. Eine Veränderung in der Zukunft kann bei Bedarf durch den prozentualen Anteil der Einwohnerveränderung (proz. EW) in der Formel abgebildet werden, für den Status quo ist der Faktor Null zu setzen. Im Ergebnis liegt für jedes Wohngebäude ein Heizwärmebedarf in kWh/a vor.

Adaptierung der Methodik zur Berechnung gebäudescharfer Wärmebedarfe für Nichtwohngebäude (GHD und Kommune)

Für Nichtwohngebäude erfolgt aufbauend auf der Berechnung für Wohngebäude eine Zuordnung spezifischer Wärmebedarfskennwerte, der mit einem oder mehreren einzigartigen Branchenkennwerten aus dem DBI-Gebäudeatlas (z.B. Wärmebedarf pro Bett und Patient in einem Krankenhaus, Wärmebedarf pro Schüler in einer Schule, Wärmebedarf pro m² Verkaufsfläche in einem Elektrofachgeschäft etc.) kombiniert werden. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist zu der Berechnung der Wohngebäude identisch, die spezifischen Werte beziehen sich hierbei jedoch nicht zwangsläufig auf eine beheizte Fläche, sondern können auch auf andere Bezugseinheiten normiert werden. Auf dieser Basis wird die erste Näherungsmodellierung für einen Wärmebedarf durchgeführt. In einem weiteren Schritt wird dieser Wärmebedarf auf Grundlage von Gebäudedaten aus dem DBI-Gebäudeatlas für Nicht-Wohngebäude (z.B. Gebäudehöhe, Geschossanzahl etc.) validiert, bei erkannten Unplausibilitäten angepasst und ggf. aus dem Datenbestand entfernt.

In einem zweiten Schritt wird dieser Wert mit weiteren Kennwerten – analog zur Wohngebäudesimulation – angereichert. Das heißt, dass bspw. regionale Klimadaten, Kenntnisse zum Sanierungsstand des Gebäudes oder weitere amtliche Statistiken (z.B. Zensus) einfließen, um den Wärmebedarf zu regionalisieren. Insbesondere topografische Daten spielen hierbei eine wesentliche Rolle. Die Ergebnisse werden stichprobenartig geprüft und anhand von einschlägiger Primär- und Sekundärliteratur bewertet. Bei Bedarf erfolgt eine händische Nachkontrolle für einzelne Gebäudestandorte. In jedem Falle erfolgt auch ein Abgleich mit den durch die Gemeinden zur Verfügung gestellten Werten, welche insbesondere bei der Modellierung von kommunalen Gebäudestandorten eine sehr gute Validierungs- und Anpassungsbasis dargestellt haben. Im Ergebnis liegt für jedes Gebäude ein Heizwärmebedarf vor.

Einflussfaktoren für die Prognose des Heizwärmebedarfes

Um den Heizwärmebedarf für die nächsten Jahre prognostizieren zu können, gilt es, die wichtigsten Einflussparameter zu erkennen und deren Auswirkung zu ermitteln. Demnach wurden unterschiedliche Aspekte im Kontext des Gebäudebereiches (Wohnen und Nichtwohnen) berücksichtigt.

Grundsätzlich lassen sich fünf wesentliche Parameter bestimmen, die einen Einfluss auf den künftigen Wärmebedarf je Gebäude bzw. in einem bestimmten Gebiet haben. Diese sind in Abbildung 17 veranschaulicht.

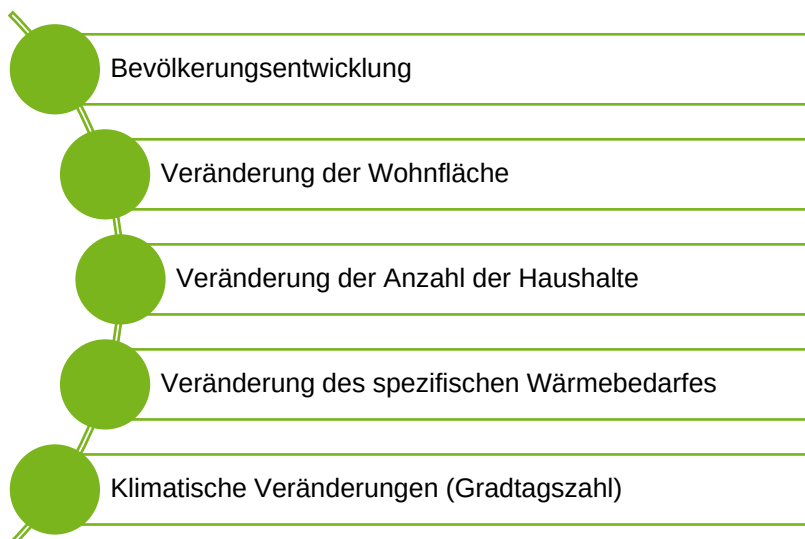


Abbildung 17: Einflussfaktoren auf die Wärmeprognose, eigene Darstellung

So zählen zu den wichtigsten Einflussfaktoren neben den direkt mit dem Gebäude verbundenen Faktoren wie Wohnfläche, Anzahl der Haushalte und spezifischer Wärmebedarf, auch demografische Faktoren wie die Bevölkerungsentwicklung.

Entscheidenster Parameter zur Prognose des Heizbedarfs ist die Gradtagszahl. In folgenden Kapiteln wird detaillierter auf die Größe, Inhalt und deren Einfluss auf die Wärmeprognose eingegangen. Der spezifische Heizbedarf gibt Auskunft über den notwendigen Heizbedarf, der für verschiedene Gebäude pro Quadratmeter notwendig ist und hängt unter anderem vom Dämmtyp, vom Alter des Gebäudes und damit auch vom Sanierungsstand ab [16]. Unter Berücksichtigung der Urbanisierung und der Entwicklung der Gesellschaft spielt der demografische Wandel auch bei der Ermittlung des Wärmebedarfes eine Rolle. Zusätzlich führen sinkende Einwohnerzahlen zu einem Rückgang des Wärmebedarfes, da die Nachfrage für Heizen oder Warmwasser sinkt. In direktem Zusammenhang dazu steht die Anzahl der Wohnungen, welche bei einem Rückgang der Einwohnerzahl ebenfalls sinken. Bei Betrachtung der Wohnfläche sind Zusammenhänge von steigender Wohnfläche zu steigendem Wärmebedarf bekannt.

2.2.1.3 Randbedingungen und Methodik zur Modellierung des Kältebedarfes je Gebäude

Der Energiebedarf eines Gebäudes kann neben dem Wärmeenergiebedarf auch durch den Kühlenergiebedarf beschrieben werden. Dieser Energieaufwand ist abhängig von der Kühllast eines Gebäudes [17]. Die Kühlung eines Wohngebäudes ist in Mitteleuropa jedoch bisher nicht typisch. Durch die in Deutschland vorherrschende gemäßigte Klimazone ist das Heizen von essenziellerer Bedeutung. Jedoch werden in Gebäuden immer mehr Kühleysteme installiert. Dies liegt zum einen an den gestiegenen Komfortansprüchen und zum anderen an den erhöhten Kühllasten [17]. Folgende Darstellung visualisiert anfallende Kühllasten eines Raumes.

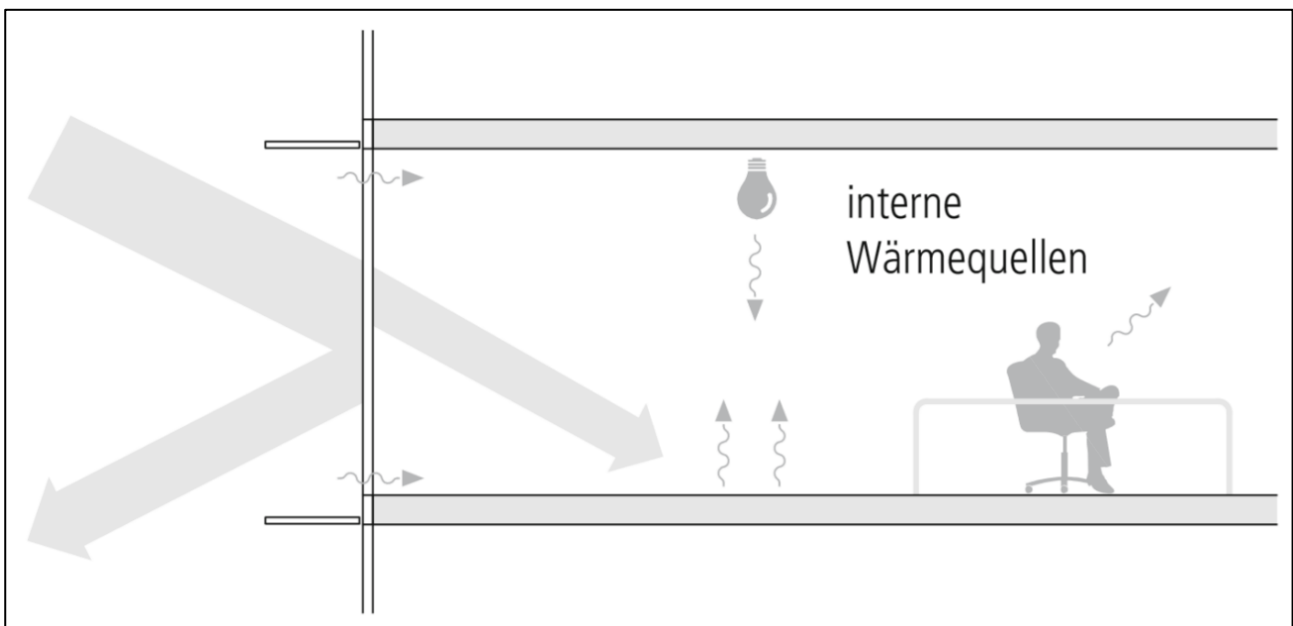


Abbildung 18: Äußere und Innere Kühllasten von Räumen [17]

Die Bestimmung der Kühllast eines Gebäudes wird in der VDI- Richtlinie 2078 [18] beschrieben und kann anhand dieser Einflussfaktoren simuliert werden. Diese Berechnungsgrundlagen sind bei einer Einzelfallprüfung zu berücksichtigen und bieten einen guten Überblick zur Bestimmung der Einflussfaktoren. Diese lassen sich in äußere und innere Einflussfaktoren unterteilen [19]. In den folgenden Abschnitten werden diese erläutert.

Äußere Kühllasten von Räumen

Äußere Kühllasten beschreiben die Wärmeströme, welche durch Transmission oder Strahlung über die Wände in den Raum gelangen oder Stoffströme, wie warme Luft, die durch Fenster oder Fugen den Raum erwärmen können [17]. Folglich leiten erwärmte Bauteile die Wärme in den Raum. Eine gute Gebäudedämmung hat den Vorteil dies zu verhindern. Die Dämmung verhindert somit ein Eindringen der Wärme in den Raum und hält an kühlen Tagen die Wärme in diesem [20]. Bei einer Überhitzung des Raumes sorgt eine gute Dämmung jedoch dafür, dass die Wärme in dem Raum erhalten bleibt. Die Folge ist ein zusätzlicher Kühlbedarf [21]. Das durch Fenster einfallende Tageslicht erwärmt ebenfalls den Raum. Ein äußerer baulicher Sonnenschutz, wie Jalousien, Rollläden oder Markisen können die Einstrahlung des Tageslichts um bis zu 80 % mindern [17]. Daher ist die Nutzung eines Fensters mit einem Glas von geringem Energiedurchlassgrad sinnvoll. Hierbei besteht die Schwierigkeit, dass die Tönung des beschichteten Glases den Raum nicht zu wenig, aber auch nicht zu stark verdunkelt. Wenn zu wenig Tageslicht in den Raum gelangt, muss elektrische Beleuchtung zugeschaltet werden. Dies verursacht eine größere innere Kühllast, wie im Folgenden beschrieben wird [17].

Bei der Berechnung des Kühlbedarfs kann die Überhitzung des Raumes durch diese Einflussfaktoren nicht berücksichtigt werden. Der Grund findet sich in dem Fakt, dass die Datenlage zu den stattgefunden Gebäudesanierungen und Neubauten, wie auch der Gebäudearchitektur nicht eindeutig ist. Darüber hinaus ist der Einfluss des Klimas und der Witterung hauptauschlaggebend, weshalb der Fokus auf diesen gelenkt werden muss. Um den Kühlbedarf ermitteln zu können, wurden Kühlgradtagszahlen (GTZ_K) über das Hilfsmittel der Kühltage bestimmt. Ein Kühltage ist ein Tag, an dem die durchschnittliche Außentemperatur $\overline{T_{a,i}}$ über der Kühlgrenztemperatur (291,45 K) liegt. Folglich muss die Tagesmitteltemperatur über 18,3 °C liegen. Die Kühlgradtagszahl ist die Summe aller Differenzen von Tagesmitteltemperatur und Kühlgrenztemperatur für alle Kühltage im Jahr [22].

$$GTZ_{K_{18,3/18,3}} = \sum_{i=1}^{Z_{18,3}} (\overline{T_{a,i}} - 291,45 \text{ K}) \quad (2)$$

Hierbei ergibt sich eine methodische Abweichung zur Berechnung der Heizgradtagszahlen, bei der die Differenz zwischen Soll-Rauminnentemperatur (20 °C) und Tagesmitteltemperatur aufsummiert wird. Würde dieses Vorgehen auf die Ermittlung der Kühlgradtagszahlen übertragen werden, so entstünden negative Werte für die Gradtagszahl in allen Fällen, in denen die Heizgrenztemperatur von 18,3 °C zwar überschritten wird, die Außentemperatur aber unter den geforderten 20 °C liegt. Aus diesem Grund wurde statt der Soll-Rauminnentemperatur die Kühlgrenztemperatur als Zielwert eingesetzt, wodurch keine Kühlgradtagszahlen nach dem Vorbild der Heizgradtagszahlen, sondern Kühlgradtage berechnet werden. Das unterschiedliche methodische Vorgehen wird bei der Berechnung des Kühlbedarfs dadurch ausgeglichen, dass die berechneten Kühlgradtage wieder auf das langjährige Mittel normiert werden. Diese Referenzkühlgradtagszahl (bzw. Referenzkühlgradtage) werden entsprechend der hier beschriebenen Methodik auf Grundlage der Wetterdaten des DWD für die Wetterstation in Potsdam berechnet.

Innere Kühllasten von Räumen

Innere Kühllasten beschreiben die Wärmeströme, welche durch interne sensible und latente Wärmequellen den Raum erwärmen. Interne sensible Wärmequellen sind Personen und elektrische Anlagen, wie Computer, Fernseher, Tablet, Beleuchtung und andere Maschinen. Im Gegensatz zu latenten Quellen sind sie fühl- und messbar und sollten bei Nichtnutzung ausgeschaltet werden, damit neben dem alltäglichen Energiebedarf auch die notwendige Kühlleistung von Kühlanlagen reduziert werden kann. Eine Person muss sich bewusst sein, dass sie ebenfalls kontinuierlich Wärme an ihre Umgebung abgibt [17].

Der Einfluss der abgegebenen Wärme interner sensibler Quellen kann durch die bauteilbedingte thermische Speichermasse eines Raumes reduziert werden. Folglich weisen Baumaterialien eine unterschiedliche spezifische Wärmeeindringgeschwindigkeiten auf. Im Vergleich zu Luft erwärmen sich Wände, Decken und Estrich sehr langsam und dämpfen somit die auftretende Kühllast. Dieser Einfluss wird, wie der Einfluss der Gebäudedämmung nicht berücksichtigt, da der Effekt im Wesentlichen vom Material, der Masse und

Oberfläche der Bauteile wie auch deren Dicke abhängt. Dazu liegen keine flächendeckenden Daten für das Untersuchungsgebiet vor [17].

Weiterhin ist der Warmwasserbedarf aufgrund der Leitungslegungen durch Gebäude als Wärmequelle zu berücksichtigen. Da dieser jedoch, wie im vorherigen Kapitel, gebäudespezifisch ist, ist ein Einfluss auf den Kühlbedarf nicht eindeutig. Daher kann dieser ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Die Lüftung einer Wohnung ist aus hygienischen und bauphysikalischen Gründen erforderlich. Bei einem geringen Luftwechsel kann eine hohe Luftfeuchte durch Schimmelpilzbildung etc. das Gesundheitsrisiko fördern. Des Weiteren sollten Gerüche, CO₂ und ggfs. Schadstoffe durch unverbrauchte und sauerstoffreiche Luft ersetzt werden. Jedoch kommt es bei einer Dauerlüftung zu einem Austausch des Wärmeinhalts in der Luft. Folglich wird in dieser Arbeit die Annahme getroffen, dass alle Haushalte die energetisch sinnvolle Variante des Stoßlüftens nutzen, um ausreichend zu lüften. Beim Stoßlüften werden Fenster bei Bedarf für eine kurze Zeit geöffnet. Dabei fließt ein zeitlich begrenzter Stoffstrom, bei welchem aufgrund der geringen Masse der Luft die Wärmeübertragung zwischen den Luftmassen vernachlässigbar ist [17].

Spezifische Kühllast von Gebäuden

Da die Einflüsse der äußeren und inneren Kühllasten von Räumen im speziellen Fall modelliert werden sollten, werden zur Modellierung des Kühlbedarfs spezifische Kühlbedarfe verwendet, welche die eingangs definierten Parameter in standardisierter Form abbilden können. Diese stellen einen gebäudespezifischen Kennwert dar. Dieser Kennwert ist flächennormiert [21]. Folgende Tabelle stellt eine Übersicht dar.

Tabelle 9: Spezifischer Kühlbedarf der verschiedenen Gebäudetypen, eigene Darstellung nach [21]

Gebäudetyp	Altbau	Standard	Niedrigenergie
Einfamilienhäuser	1,1 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$	2,2 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$	3,0 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$
Mehrfamilienhäuser	0,5 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$	1,1 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$	1,7 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$
Bürogebäude	1,6 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$	4,4 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$	6,1 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}$

Unter Zuhilfenahme der obigen Tabelle werden den Gebäudetypen gemäß DBI-Datenbank [3] spezifische Kühlbedarfe zugeordnet. Als Altbau gilt jedes Gebäude, das vor 1945 errichtet wurde. Gebäude, die von 1946 bis einschließlich 2010 entstanden, sind unter der Kategorie Standard geführt. Ab dem Baujahr 2011 gilt für die Gebäudetypen die Energieklasse Niedrigenergie. Ersichtlich ist, dass sowohl bei Einfamilienhäusern wie auch bei Mehrfamilienhäusern der spezifische Kühlbedarf mit jüngeren Baujahren zunimmt. Ein Grund dafür findet sich in der veränderten Gebäudearchitektur. Niedrigenergiehäuser weisen oft große Fensterflächen auf, um das Tageslicht optimal nutzen zu können. Wie gezeigt wurde, wirkt sich das jedoch als zusätzliche äußere Kühllast aus. Weiterhin hat sich die Qualität der Baumaterialien verändert. Des Weiteren zeigt die Tabelle 9, dass Mehrfamilienhäuser einen geringeren spezifischen Kühlbedarf aufweisen als Einfamilienhäuser. Dies liegt zum Beispiel an der höheren thermischen Speichermasse eines Mehrfamilienhauses [17]. Zudem ist der Tabelle 9 zu entnehmen, dass Bürogebäude einen wesentlich höheren spezifischen Kühlbedarfs im Vergleich zu Ein- und Mehrfamilienhäusern aufweisen. Maßgeblich dafür sind die im vorherigen Kapitel vorgestellten inneren Kühllasten. Demnach werden neben Wohnhäusern vor allem Nicht-Wohngebäude, wie Bürogebäude hinsichtlich des Kühlbedarfs zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Vorgehensweise zur standortgenauen Modellierung des Kühlbedarfes

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt sind die wichtigsten Parameter zur Berechnung des Kühlbedarfs eines Gebäudes der spezifische Kühlbedarf und die Kühlgradtage. Diese werden analog zur Berechnung des Wärmebedarfs auf das langjährige Mittel bezogen. Für die Prognose bedarf es weiterhin der Wohnfläche des Gebäudes, dargestellt analog zur Berechnung des Wärmebedarfs durch die spezifische Wohnfläche pro Haushalt und die Anzahl der Haushalte.

Der Zusammenhang und die Berechnungsvorschrift sind in nachfolgender Formel dargestellt:

$$KB_i = A_{HHi} * A_{Wohni} * \left(\text{spez. K\"uhl} * \frac{GTZ_{K_{18,3/18,3}}}{157 \text{ Kd}} \right) \quad (3)$$

Haushaltszahl und Wohnfläche pro Haushalt wurden zur Berechnung des Kühlbedarfs analog zum Vorgehen zur Bestimmung des Wärmebedarfs verwendet. Für die spezifische Kühllast wurden die Studienergebnisse aus Tabelle 9 verwendet. Final kann für jedes der benannten Gebäude ein Kühlbedarf abgeschätzt werden.

Einflussfaktoren für die Prognose des Kühlbedarfes

Analog zur Wärmeprognose ist die Entwicklung der spezifischen Kühllast in den kommenden Jahren fraglich und sehr individuell zu beantworten. Durch Sanierungen werden künftig mehr Wohngebäude von der Kategorie Altbau in die Kategorie Standard und von der Kategorie Standard in die Kategorie Niedrigenergie wechseln. Durch Abrisse werden Gebäude aus den Kategorien Altbau und Standard verschwinden und Gebäude in den Kategorien Niedrigenergie und Passivhaus dazukommen. Diese Effekte werden im Rahmen dieser Arbeit nicht quantifiziert, müssen jedoch zukünftig berücksichtigt werden. Offen ist aus Sicht der Autoren außerdem welche Effekte energetische Sanierungsmaßnahmen tatsächlich auf den Kühlbedarf von Wohngebäuden haben und haben werden. Eine entsprechende Literaturrecherche ergab außer der oben zitierten Studie keine belastbaren Ergebnisse. Allgemeine Empfehlung ist es, den sommerlichen Wärmeschutz soweit möglich bereits durch den Aufbau des Gebäudes oder durch Verschattungseinrichtungen zu gewährleisten.

Der Ermittlung der Kühlgradtagszahl kommt bei der Berechnung des Kühlbedarfes eine besondere Bedeutung zu, da diese einen deutlich höheren Einfluss auf die Kühlbedarfe nimmt, als die Heizgradtagszahl die Heizbedarfe beeinflusst. Die höhere Sensitivität des klimatischen Einflusses im Bereich Kühlen bzw. der Kühlgradtage lässt sich gut veranschaulichen, indem die Heiz- und Kühl Gradtagszahlen gegenübergestellt werden. Abbildung 19 zeigt die Jahresmittelwerte der Heizgradtagszahlen (Einheit Kd = Kelvin*Tage) in den Jahren von 2001 bis 2018 gemittelt über alle deutschen Wetterstationen. Erkennbar ist eine leichte Streuung um das langjährige Jahresmittel von 3661 Heizgradtagen, die Standardabweichung als Maß der Streuung beträgt rund 210 Heizgradtage. Die Wahl einer geringeren Heizgrenztemperatur zeigt zudem nur geringe Veränderungen.

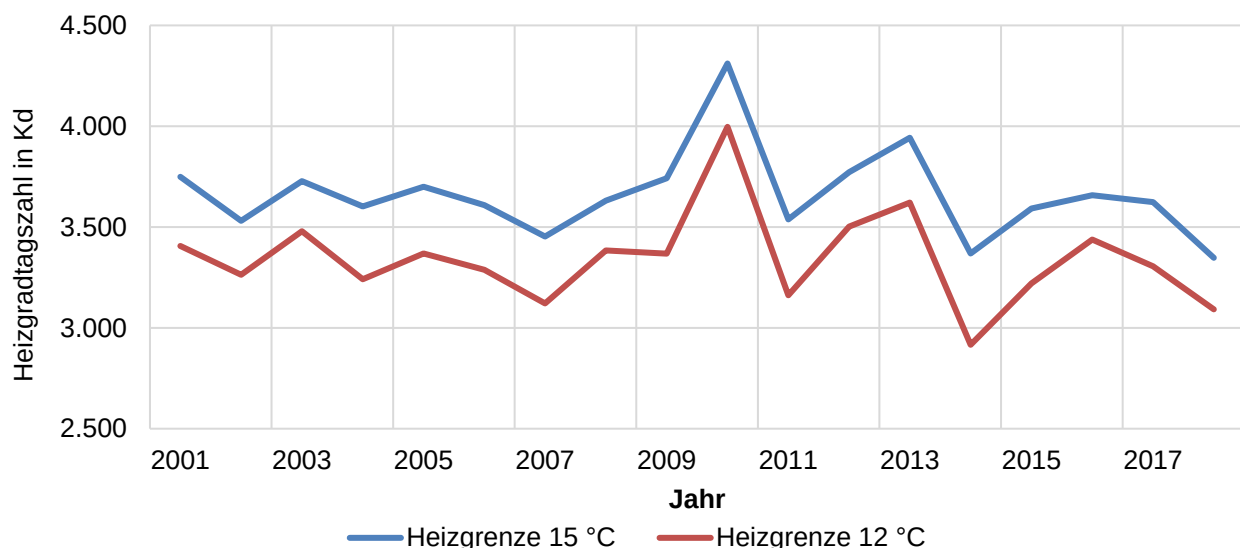


Abbildung 19: Jahresmittelwerte der Heizgradtagszahlen von 2001 bis 2018, eigene Berechnung auf Basis von Wetterstationsdaten des DWD nach [15]

Abbildung 20 hingegen zeigt die Jahresmittelwerte der Kühlgradtagszahlen bzw. Kühlgradtage im selben Zeitraum gemittelt über alle deutschen Wetterstationen. Die Standardabweichung beträgt hier nur rund 41 Kühlgradtage, allerdings bei einem langjährigen Mittel von rund 118 Kühlgradtagen.

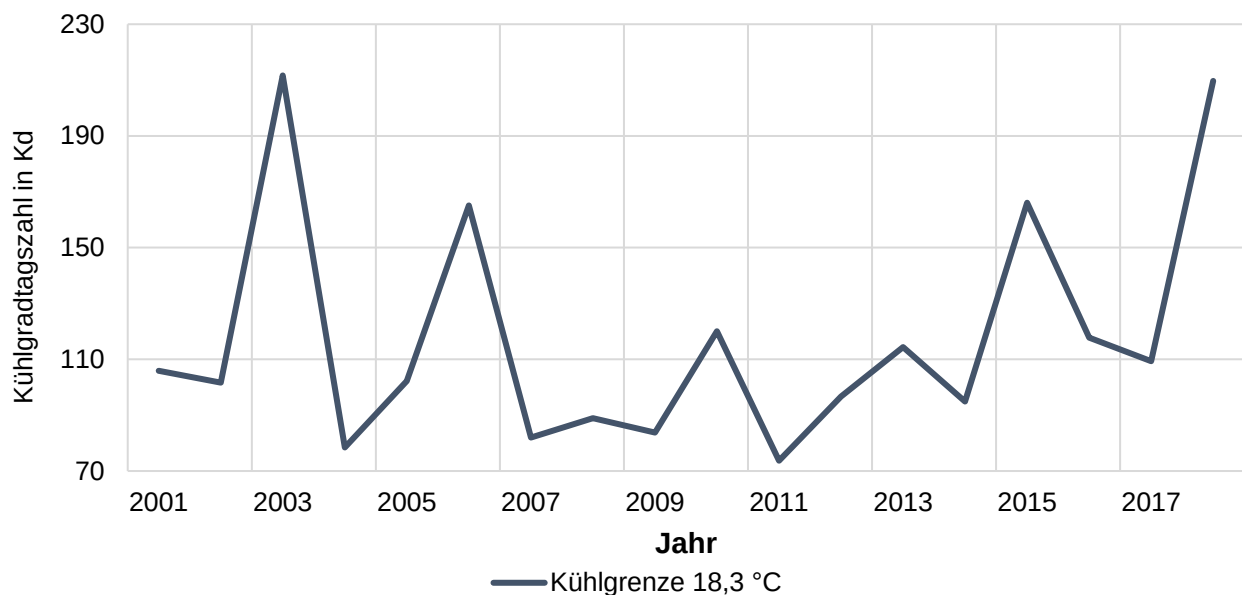


Abbildung 20: Jahresmittelwerte der Kühlgradtage von 2001 bis 2018, eigene Berechnung auf Basis von Wetterstationsdaten des DWD nach [15]

Historisch betrachtet schwanken die Kühlgradtage demnach wesentlich stärker um ihr langjähriges Mittel als die Heizgradtagszahlen. Extremwetterereignisse und langanhaltende Hitzeperioden haben also einen starken Einfluss auf den jährlichen Kühlbedarf. Danach Prognosen des IPCC auch in Mitteleuropa Extremwetterereignisse durch den Einfluss des Klimawandels eher zunehmen werden, ist eine jährliche Betrachtung nicht geeignet einen mittel- oder langfristigen zukünftigen Trend in Bezug auf die Kühlgradtagszahlen abzubilden.

Um valide eine Kühlbedarfsprognose durchführen zu können und somit auch den Einfluss des Kühlens auf die Energieversorgungskonzepte abschätzen zu können, sind weitreichende Analysen nötig – die hier gezeigten Einflussfaktoren können für zukünftige Versorgungskonzepte einen ersten methodischen Input geben. Die Fokussierung im Projekt MareEn liegt weiterhin auf dem Wärmebedarf sowie den Status quo-Bedarfen, um insbesondere die Bestandsgebäude für die kommenden Analysen zu beleuchten. Die späteren Wärmenetauslegungen werden – wie eingangs bereits erwähnt – ebenso anhand der aktuell berechneten Wärmebedarfe erfolgen.

2.2.2 Ergebnisdarstellung

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Wärme- und Kältebedarfsberechnungen kartografisch dargestellt und miteinander verglichen. Dies erfolgt - analog zu den Analysen im Kapitel 2.1 - für jede Gemeinde bzw. die Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz analog, um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Zudem werden neben einer kartografischen Darstellung der Wärme- und Kältebedarfe auch die summierten Wärmebedarfe für die drei Sektoren

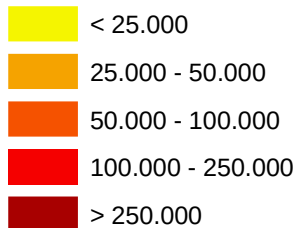
- Ein- und/oder Zweifamilienhäuser
- Mehrfamilienhäuser
- GHD und Kommune

getrennt ausgewertet. Diese Struktur wird im weiteren Verlauf der Studie erneut aufgegriffen, wenn zum einen die Lastgänge und zum anderen die Wärmenetze berechnet und ausgewertet werden. Auf eine Einteilung der Kältebedarfe wird vor diesem Hintergrund verzichtet, da die Kältebedarfe für die Trassierung und Auslegung der Wärmenetze nicht maßgeblich sind und eine untergeordnete Rolle spielen. Zudem ist die Methodik der Abschätzung deutlich „gröber“, weshalb die Werte zum Kühlen lediglich als Größenordnung für die einzelnen Gebiete interpretiert werden sollten, die im Nachgang an das Projekt einer Detailprüfung bedarf.

2.2.2.1 Oelsnitz/Erzgeb.

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Gemeinde Oelsnitz dargestellt. Dazu ist in untenstehender Abbildung der Wärme- und Kältebedarf, welcher hausgenau modelliert wurde, auf ein 50m x 50m Hexagon-Raster, das am DBI erstellt wurde, abstrahiert worden. Dies dient der besseren Sichtbarkeit und Veranschaulichung und gewährleistet zudem die Anonymität der Daten, was insbesondere beim Einbeziehen von realen Verbrauchsdaten, welche durch die ass. Partner übergeben wurden, zu berücksichtigen ist. Für die Darstellungen gilt, je dunkler die Farbe, desto höher der Wärme- bzw. Kältebedarf.

Wärmebedarf in kWh/a



Kältebedarf in kWh/a

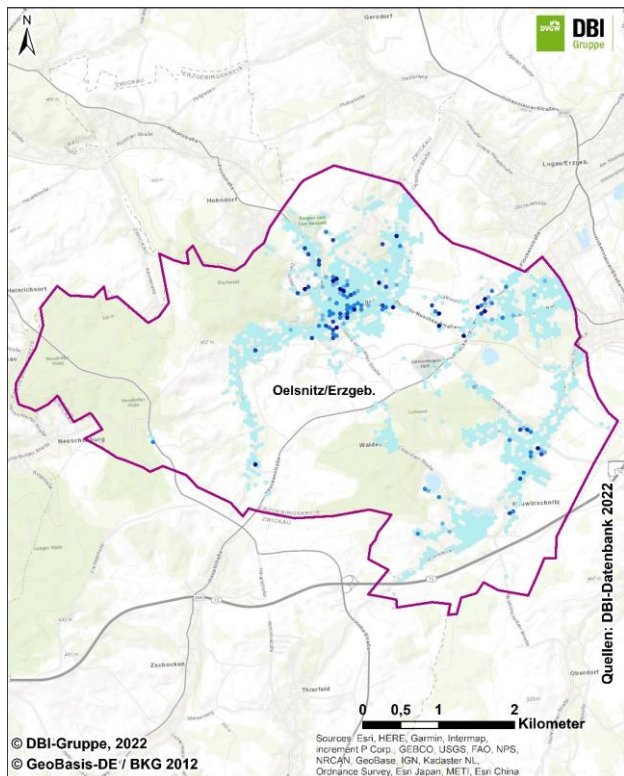
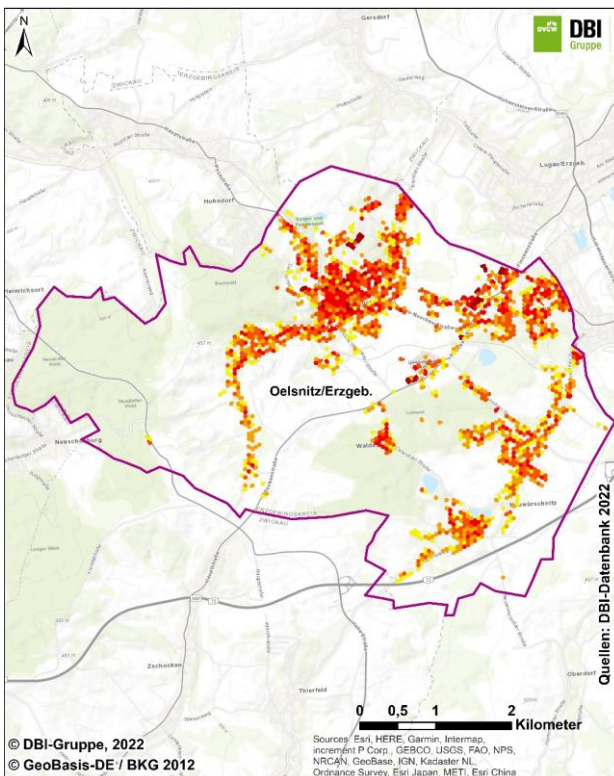
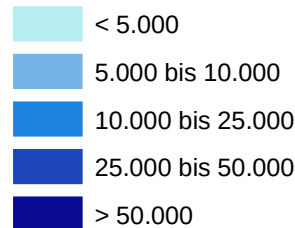


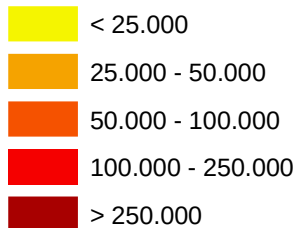
Abbildung 21: Gegenüberstellung der Wärme- und Kältebedarfe für die Stadt Oelsnitz/Erzgeb

Die Analysen zeigen leichte Verdichtungsansätze im Zentrum der Stadt Oelsnitz, sowie im östlichen Teil der Gemeinde. In Summe ergibt sich für die analysierten Ein- und Zweifamilienhäuser ein Wärmebedarf von etwa 47 GWh/a, welcher sich auf ca. 2.100 Adresspunkte verteilt. Die etwa 1.000 analysierten Mehrfamilienhäuser kommen auf einen ähnlichen Wärmebedarf von ca. 44 GWh/a. Pro Ein- und Zweifamilienhaus ergibt sich somit ein gemittelter Wärmebedarf von ca. 22.000 kWh/a. Je Mehrfamilienhaus fällt ein Wärmebedarf von ca. 44.000 kWh/a an. Zudem wurden knapp 200 Gebäude aus dem GHD- und kommunalen Sektor analysiert, welche einen Bedarf von knapp 10,0 GWh/a aufweisen. Pro Gebäude des GHD- und kommunalem Sektor kann somit ein Durchschnittswärmebedarf von etwa 51.000 kWh/a angegeben werden. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass insbesondere im GHD- und kommunalen Sektor die Bedarfe teils deutlich schwanken können, während im Wohngebäudesektor die Durchschnittsbedarfe je Gebäude eher homogener ausfallen und somit eher als „Größenordnung“ herangezogen werden können. Dies gilt insbesondere für die Einfamilienhäuser. Als Kühlbedarf im gesamten Gebiet ergeben sich über alle Gebäude ca. 12,0 GWh/a.

2.2.2.2 Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Niederwürschnitz

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Niederwürschnitz dargestellt. Dazu ist in untenstehender Abbildung der Wärme- und Kältebedarf, der hausgenau modelliert wurde, auf ein 50m x 50m Hexagon-Raster, das am DBI erstellt wurde, abstrahiert worden. Dies dient der besseren Sichtbarkeit und Veranschaulichung und gewährleistet zudem die Anonymität der Daten, was insbesondere beim Einbeziehen von realen Verbrauchsdaten, die durch die ass. Partner übergeben wurden, zu berücksichtigen ist. Für die Darstellungen gilt, je dunkler die Farbe, desto höher der Wärme- bzw. Kältebedarf.

Wärmebedarf in kWh/a



Kältebedarf in kWh/a

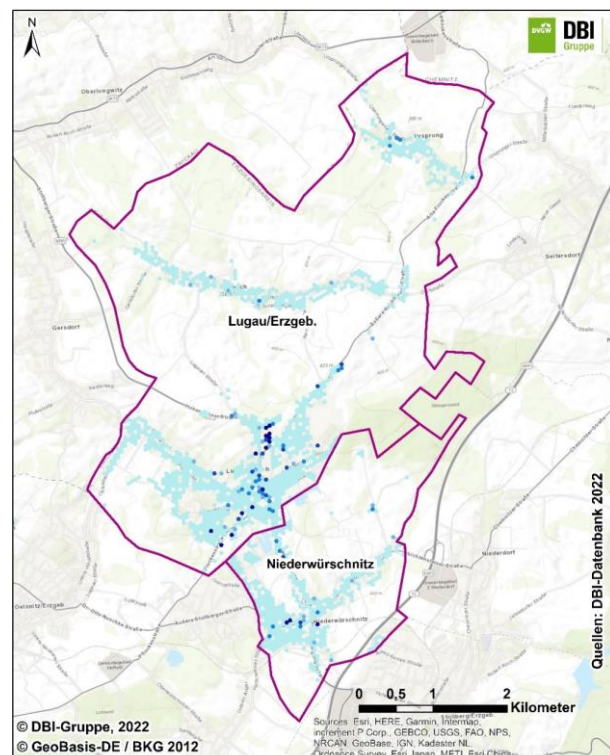
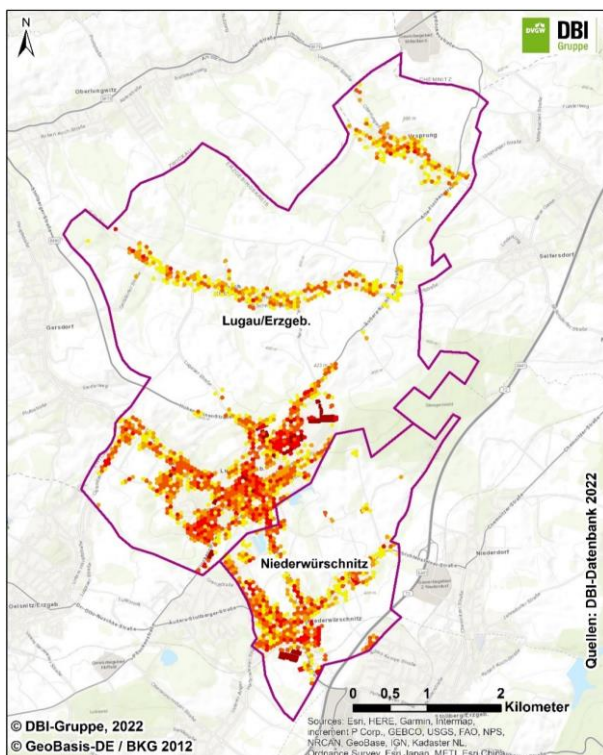
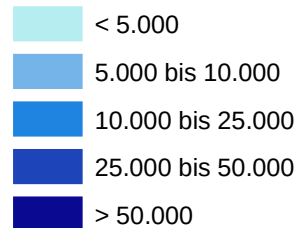


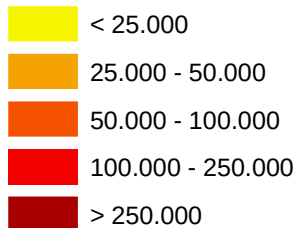
Abbildung 22: Gegenüberstellung der Wärme- und Kältebedarfe für die Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Niederwürschnitz

Die Analysen zeigen Verdichtungsansätze an der Grenze zwischen Lugau und Niederwürschnitz sowie im Süden der Gemeinde Lugau. In Summe ergibt sich analog zu Oelsnitz für die analysierten Ein- und Zweifamilienhäuser ein Wärmebedarf von etwa 47 GWh/a, welcher sich auf ca. 2.100 Adresspunkte verteilt. Die etwa 700 analysierten Mehrfamilienhäuser kommen auf einen Wärmebedarf von ca. 36 GWh/a. Pro Ein- und Zweifamilienhaus ergibt sich ein gemittelter Wärmebedarf von ca. 22.000 kWh/a. Je Mehrfamilienhaus fällt ein Wärmebedarf von ca. 51.000 kWh/a an. Zudem wurden ca. 150 Gebäude aus dem GHD- und kommunalen Sektor analysiert, welche einen Bedarf von knapp 8,0 GWh/a aufweisen. Pro Gebäude des GHD- und kommunalem Sektor kann ein Durchschnittswärmebedarf von etwa 47.000 kWh/a angegeben werden. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass insbesondere im GHD- und kommunalen Sektor die Bedarfe teils deutlich schwanken können, während im Wohngebäudesektor die Durchschnittsbedarfe je Gebäude homogener ausfallen und somit eher als „Größenordnung“ herangezogen werden können. Dies gilt insbesondere für Einfamilienhäuser. Als Kühlbedarf wurden über alle Gebäude ca. 17 GWh/a modelliert.

2.2.2.3 Gemeinde Hohndorf

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Gemeinde Hohndorf dargestellt. Dazu ist in untenstehender Abbildung der Wärme- und Kältebedarf, welcher hausgenau modelliert wurde, auf ein 50m x 50m Hexagon-Raster, welches am DBI erstellt wurde, abstrahiert worden. Dies dient der besseren Sichtbarkeit und Veranschaulichung und gewährleistet zudem die Anonymität der Daten, was insbesondere beim Einbeziehen von realen Verbrauchsdaten, die durch die ass. Partner übergeben wurden, zu berücksichtigen ist. Für die Darstellungen gilt, je dunkler die Farbe, desto höher der Wärme- bzw. Kältebedarf.

Wärmebedarf in kWh/a



Kältebedarf in kWh/a

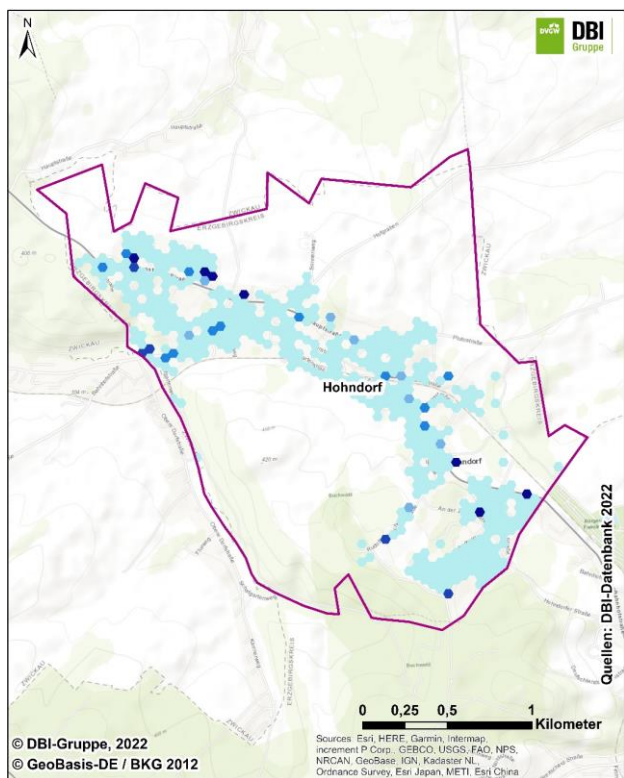
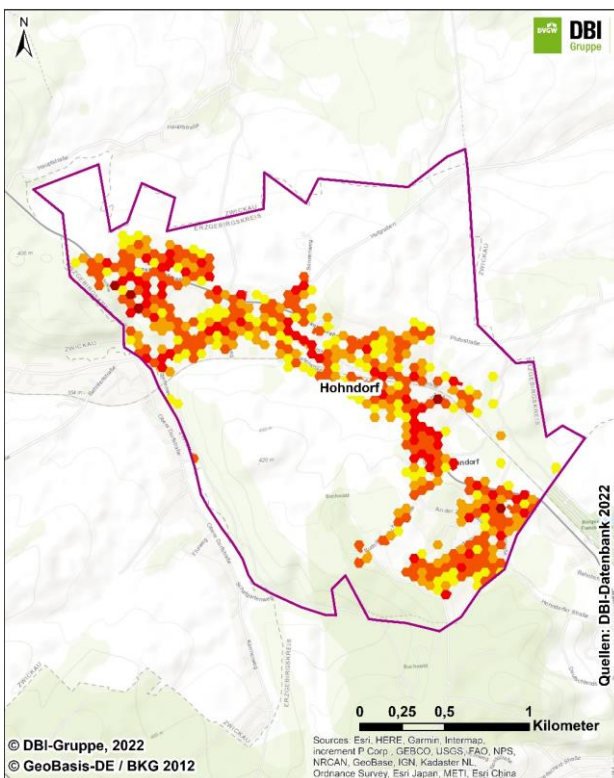
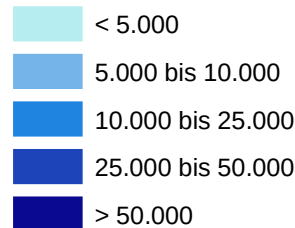


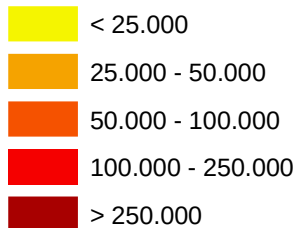
Abbildung 23: Gegenüberstellung der Wärme- und Kältebedarfe für die Gemeinde Hohndorf

Die Analysen zeigen eine homogene Verteilung der Wärmebedarfsschwerpunkte entlang des Dorfes mit wenigen hohen Bedarfsschwerpunkten im Norden. In Summe ergibt sich für die analysierten Ein- und Zweifamilienhäuser ein Wärmebedarf von etwa 16 GWh/a, der sich auf ca. 750 Adresspunkte verteilt. Die etwa 250 analysierten Mehrfamilienhäuser kommen auf einen Wärmebedarf von ca. 12 GWh/a. Pro Ein- und Zweifamilienhaus ergibt sich ein gemittelter Wärmebedarf von ca. 21.000 kWh/a. Je Mehrfamilienhaus fällt ein Wärmebedarf von ca. 48.000 kWh/a an. Zudem wurden ca. 50 Gebäude aus dem GHD- und kommunalen Sektor analysiert, die einen Bedarf von knapp 2,0 GWh/a aufweisen. Pro Gebäude des GHD- und kommunalem Sektor kann somit ein Durchschnittswärmebedarf von etwa 36.000 kWh/a angegeben werden. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass insbesondere im GHD- und kommunalen Sektor die Bedarfe teils deutlich schwanken können, während im Wohngebäudesektor die Durchschnittsbedarfe je Gebäude homogener ausfallen und somit eher als „Größenordnung“ herangezogen werden können. Dies gilt insbesondere für Einfamilienhäuser. Als Kühlbedarf wurden über alle Gebäude ca. 6,0 GWh/a modelliert.

2.2.2.4 Gemeinde Gersdorf

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Gemeinde Gersdorf dargestellt. Dazu ist in untenstehender Abbildung der Wärme- und Kältebedarf, der hausgenau modelliert wurde, auf ein 50m x 50m Hexagon-Raster, das am DBI erstellt wurde, abstrahiert worden. Dies dient der besseren Sichtbarkeit und Veranschaulichung und gewährleistet zudem die Anonymität der Daten, was insbesondere beim Einbeziehen von realen Verbrauchsdaten, die durch die assoziierten Partner übergeben wurden, zu berücksichtigen ist. Für die Darstellungen gilt, je dunkler die Farbe, desto höher der Wärme- bzw. Kältebedarf.

Wärmebedarf in kWh/a



Kältebedarf in kWh/a

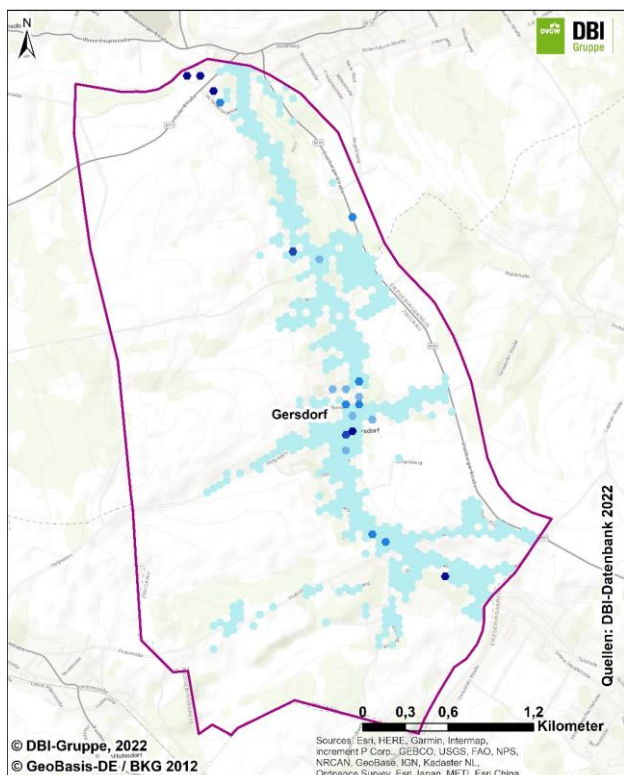
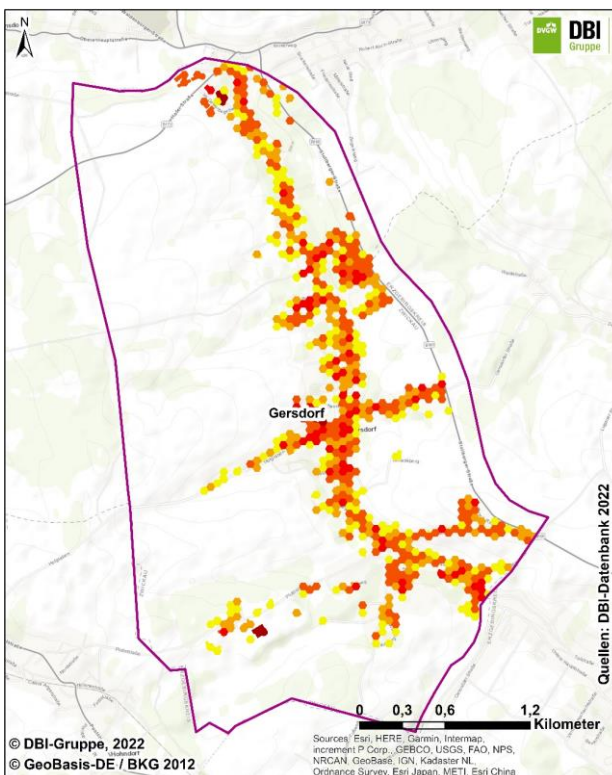
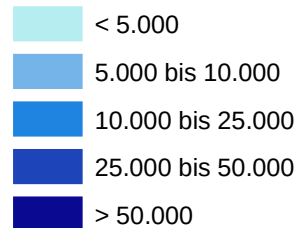


Abbildung 24: Gegenüberstellung der Wärme- und Kältebedarfe für die Gemeinde Gersdorf

Die Analysen zeigen eine homogene Verteilung der Wärmebedarfsschwerpunkte entlang des Dorfes mit einem zusätzlichen Bedarfsschwerpunkt im Süd-Westen (Betonwerk). In Summe ergibt sich für die analysierten Ein- und Zweifamilienhäuser ein Wärmebedarf von etwa 19 GWh/a, der sich auf ca. 900 Adresspunkte verteilt. Die ca. 250 analysierten Mehrfamilienhäuser kommen auf einen Wärmebedarf von ca. 11 GWh/a. Pro Ein- und Zweifamilienhaus ergibt sich ein gemittelter Wärmebedarf von ca. 20.000 kWh/a. Je Mehrfamilienhaus fällt ein Wärmebedarf von ca. 44.000 kWh/a an. Zudem wurden ca. 30 Gebäude aus dem GHD- und kommunalen Sektor analysiert, die einen Bedarf von knapp 1,5 GWh/a aufweisen. Pro Gebäude des GHD- und kommunalem Sektor kann somit ein Durchschnittswärmebedarf von etwa 44.000 kWh/a angegeben werden. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass insbesondere im GHD- und kommunalen Sektor die Bedarfe teils deutlich schwanken können, während im Wohngebäudesektor die Durchschnittsbedarfe je Gebäude homogener ausfallen und somit eher als „Größenordnung“ herangezogen werden können. Dies gilt insbesondere für Einfamilienhäuser. Als Kühlbedarf wurden über alle Gebäude ca. 2,0 GWh/a modelliert.

2.3 Ermittlung von typischen Lastgängen je Abnehmergruppe

2.3.1 Vorgehensweise zur Erstellung der Heizlastprofile im Gebäudesektor

Eine zeitliche Auflösung der Energiebedarfe ist für eine jahreszeitspezifische Auslegung von Energienetzen unumgänglich. Da im Projekt vorwiegend die Sektoren private Haushalte, Kommunen und Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (GHD) adressiert werden, für die eine gemeinsame netzgebundene Versorgung aufgrund der Temperaturniveaus und Anforderungen möglich ist, werden Lastprofile für diese Sektoren zu Grunde gelegt.

In der Praxis hat es sich hierbei bewährt, mit Standardlastprofilen, die den Gasbedarf abbilden, zu arbeiten, da diese mit der Nachfrage nach Wärmeenergie korrelieren (saisonale Gasverbräuche implizieren Wärmeverbräuche und umgekehrt). Die Lastganglinien für Gas können demnach aufgrund gleicher Beschaffenheit analog für den Wärmebedarf angenommen werden. Ferner können die Lastprofile auch für einzelne Tage dargestellt werden. Zu Beginn soll hierbei auf Basis einer literaturbasierten Zusammenstellung die Erstellung von Wärmelastprofilen erläutert werden, wobei die theoretischen Grundlagen der Erstellung von Standardlastprofilen (SLP) für den Gas- bzw. Wärmebedarf im Fokus stehen. Im Anschluss erfolgt eine Übertragung der Erkenntnisse für die benannten Gebäudesektoren Wohnen, Kommune sowie GHD auf die einzelnen Abnehmerstrukturen in den Gemeinden. Ziel ist es, ein Summenlastprofil je Gemeinde zu erhalten. Dafür bildet das DBI-Know-How aus der Gasbranche die Basis, da die Gasnachfrage mit der Wärmenachfrage im weitesten Sinne korreliert.

Theoretische Grundlagen zur Erstellung von Standardlastprofilen für den Wärmebedarf

Um die Gasnachfrage zu quantifizieren werden unter Verwendung des Leitfadens „Praxisinformation P2007/13 – Abwicklung von Standardlastprofilen“ des Bundesverbandes der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW) SLP für den Gasbedarf erstellt [23]. Der Leitfaden basiert auf Untersuchungen der TU München, die im Rahmen einer Dissertation durchgeführt wurden [24]. SLP ersetzen bei nicht leistungsgemessenen Verbrauchern den Lastgangverlauf durch eine berechnete Prognose des Gasbedarfs in Abhängigkeit der Außentemperatur. Die Verlaufsscharakteristik der repräsentativen Lastprofile ist hierbei abhängig vom jeweiligen Verbrauchstyp, dessen prognostizierten Tages- bzw. Stundenverbrauches und der Tagesmitteltemperaturen am jeweiligen Standort. Unterschiedliche Ausprägungen des Bedarfs an Prozessgas oder Heizgas (vgl. Tabelle 10) bergen durch die Berücksichtigung der Parameter A, B, C, und D die Möglichkeit noch weitere Feinheiten der Verbrauchscharakteristik zu simulieren. Die jeweiligen Parameter des Profiltyps können dem Anhang A des Leitfadens in der genannten Literaturstelle (s. oben) entnommen werden. Der Tagesbedarf ist je nach erforderlicher Energiemenge sowie Anforderungsprofil mehr oder weniger von der Tagesmitteltemperatur abhängig.

Tabelle 10: Kennzeichnung der Ausprägung des Lastprofils (eigene Darstellung nach [23])

Ausprägung	Beschreibung	
01	[--]	hoher Prozessgasanteil
02	[-]	
03	[0]	normal
04	[+]	
05	[++]	Hoher Heizgasanteil

Der auf der Folgeseite dargestellten Tabelle 11 ist die Nomenklatur der darstellbaren Lastprofile zu entnehmen, wobei die Kürzel „H“ für Haushalte und das Kürzel „G“ für Gewerbe stehen.

Tabelle 11: Kennzeichnung der Lastprofilkategorie (eigene Darstellung nach [23])

Profiltyp	Kürzel	Beschreibung
H	EF	Einfamilienhaushalt
H	MF	Mehrfamilienhaushalt
G	KO	Gebietskörperschaften, Kreditinstitute, Organisationen ohne Erwerbszweck
G	MK	Metall u. KFZ
G	HA	Einzel- und Großhandel
G	BD	sonst. betriebliche Dienstleistungen
G	GA	Gaststätten
G	BH	Beherbergung
G	BA	Bäckerei und Konditorei
G	WA	Wäscherei
G	GB	Gartenbau
G	PD	Papier und Druck
G	MF	haushaltsähnliche Gewerbegebiete
G	HD	Summenlastprofil GHD

Da der Verlauf des Lastprofils abhängig von der Außentemperatur ist, wurden die gemittelten Werte der Wettermessstation in Würzburg verwendet. Die Wahl der Wetterstation in Würzburg geht auf den VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. zurück, der diese Wetterstation für vergleichende witterungsbereinigte Bewertungen verwendet hat. Dabei wurden die Temperaturwerte in Grad Celsius von dem Jahr 1983 bis 2017 für jeden Tag gemittelt, um eine genauere Tagesmitteltemperatur für den jeweiligen Tag zu erhalten. Für weitere Berechnungen wird die geometrische Reihe aus vier Tagesmitteltemperaturen verwendet.

Die Gleichung ist aus dem Leitfaden „Abwicklung von Standardlastprofilen Gas“ [25] entnommen, die restlichen Formeln in diesem Abschnitt entstammen der zugrundeliegenden Dissertation [24].

$$T = \frac{T_t + 0,5 \cdot T_{t-1} + 0,25 T_{t-2} + 0,125 T_{t-3}}{1 + 0,5 + 0,25 + 0,125} \quad (4)$$

„Der „h-Wert“ $h(T)$ gibt den relativen Verbrauch pro Tag sowie pro Stunde, in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur an und ist durch die Sigmoidfunktion definiert:

$$h(T) = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{T-40}\right)^C} + D \quad (5)$$

Neben der Temperatur zur Ermittlung des Tagesbedarfs wird ergänzend der jeweilige Wochentag beachtet. Je nach Verbrauchsgruppe und Wochentag werden Wochentagsfaktoren $F(d)$ definiert, welche mit dem „h-Wert“ multipliziert werden.

$$h_{wo}(T,d) = F(d) \cdot h(T) \quad (6)$$

Um den Bedarf an den jeweiligen Stunden eines Tages zu ermitteln wurde der „h-Wert“ mit den zugehörigen Stundenfaktoren multipliziert. Mittels der Stundenfaktoren lässt sich die Tagesmenge über den gesamten Tag verteilen. Im letzten Schritt ist es notwendig, den relativen Zusammenhang zwischen Tages- bzw.

Stundenwerten und der Gesamtmenge zu berechnen. Wenn der Gesamtverbrauch des vorherigen Jahres bekannt ist und mit den jeweiligen relativen Werten multipliziert wird, kann der tages- bzw. stundengenaue Gasbedarf des jeweiligen Verbrauchers bestimmt werden. Mittels der berechneten „h-Werte“ können Lastverläufe der jeweiligen Verbraucher über das gesamte Jahr grafisch dargestellt werden.

Jahreslastprofile im Wohnsektor

Wohngebäude sind durch einen saisonabhängigen Heizwärmebedarf und einen ganzjährigen, kontinuierlichen Wärmebedarf zur Warmwasserbereitstellung gekennzeichnet. Bei der Wahl der Heiz- und Prozessgasparameter ist bei den privaten Haushalten lediglich eine Wahl zwischen den Ausprägungen 03 und 04 (s. Tabelle 10) möglich. Dies liegt darin begründet, dass private Haushalte keinen Bedarf an Prozessgas besitzen und kein starker Heizgasbedarf besteht. Ferner wird die Ausprägung 04 für Haushalte verwendet, deren Gebäude in windreichen Gebieten errichtet sind (klimatischer Einfluss auf den Wärmebedarf). Für den Bedarf der Verbrauchsgruppe „private Haushalte“ wird bei der Erstellung von Lastgängen zwischen Einfamilienhaushalten (HEF) und Mehrfamilienhaushalten (HMF) unterschieden (vgl. Tabelle 11). Diese Unterscheidung wird jedoch ausschließlich aufgrund der Höhe des Energiebedarfes vorgenommen und bezieht sich dabei nicht auf lastgangspezifische Unterschiede. Private Verbraucher mit einem Wärmebedarf, der geringer als 50 MWh/a ist, werden dem Lastprofil HEF zugeordnet, während die Verbraucher mit einem Bedarf über 50 MWh/a dem Lastprofil HMF zugeordnet werden. Allerdings wird in dem zugrunde liegenden Leitfaden für Gebäude, in denen eine Mischnutzung vorliegt (z.B. bei einem Mehrfamilienhaus mit einer Ladeneinheit), empfohlen, dass die Einordnung auf Basis der vorliegenden Nutzungsart abgeschätzt wird. Bei Kleinverbrauchern, deren Bedarf unter 4 MWh/a zur Warmwasserbereitung und der Kochgasbedarf bei bis 1 MWh/a liegt, wird empfohlen, diese ebenfalls dem Lastprofil HEF zuzuordnen. Abbildung 25 gibt Auskunft über den jährlichen prozentualen Verbrauch eines Einfamilienhaushalts abhängig von der Tagesmitteltemperatur des jeweiligen Standortes.

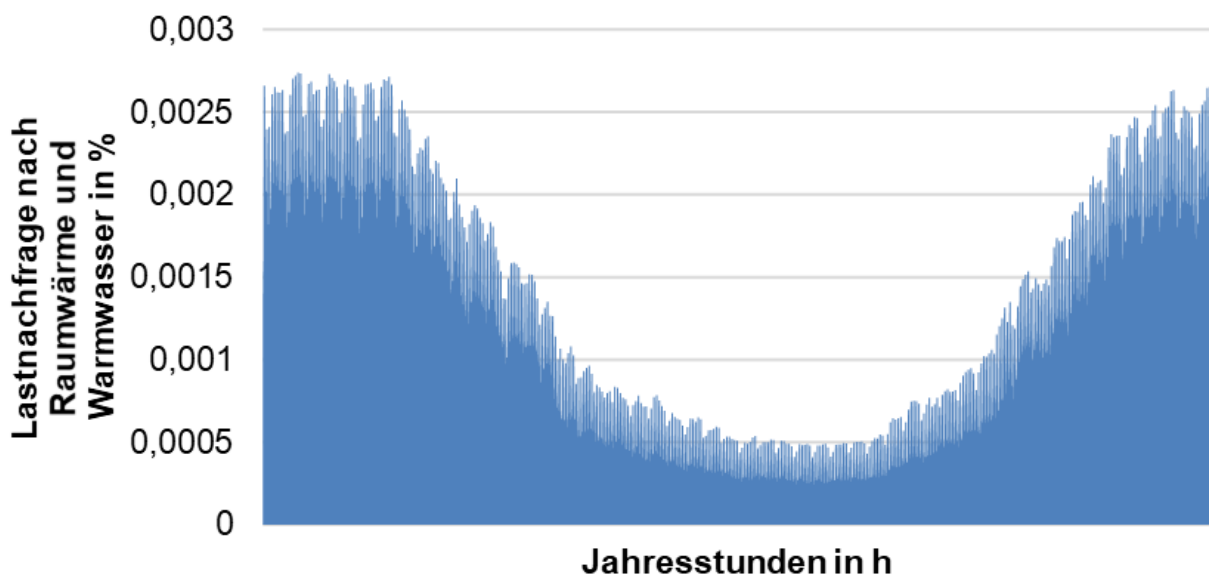


Abbildung 25: SLP des täglichen Bedarfs in einem Haushalt im EFH (HEF-03) (eigene Darstellung nach [23])

Die Ziffer 03 bezeichnet, wie in Tabelle 10 ersichtlich, eine Ausprägung mit ausgewogenen Heiz- und Prozessgasbedarf. In diesem Schaubild ist der Temperatureinfluss auf den Gasverbrauch gut erkennbar. In den Monaten mit niedrigen Tagesmitteltemperaturen ist der Gasbedarf deutlich höher als in Zeiträumen mit höheren Tagesmitteltemperaturen. Dadurch kommt es in den Sommermonaten zu einem „Tal“, das bei sinkenden Temperaturen in den kälteren Jahreszeiten wieder ansteigt. Insbesondere bei den Haushalten wird der Verbrauch in den wärmeren Monaten durch die Aufbereitung von Warmwasser bestimmt und ist durch eine fehlende Nachfrage für die Bereitstellung von Raumwärme gekennzeichnet. Dies hat zur Folge, dass bei EFH in den Sommermonaten, über einen ganzen Tag betrachtet, insbesondere in den morgendlichen Stunden von 6 Uhr bis 8 Uhr, prozentual mehr Gas verbraucht wird als in den kalten Wintermonaten. Den geringsten Gasverbrauch verzeichnen Einfamilienhaushalte, sowohl bei niedrigen und hohen Tagesmitteltemperaturen,

ab 22 Uhr bis 4 Uhr. Bei MFH verhält es sich ähnlich, doch ist die prozentuale Differenz geringer als bei EFH. Für die Lastprofile im Haushaltsbereich wurde bei den Untersuchungen der TU München zudem keine Abhängigkeit bzgl. des Wochentages festgestellt. Aus diesem Grund ist der Gas/Wärmebedarf an Werktagen, Samstagen und Sonntagen identisch. Der höchste Gasbedarf kann um 6 Uhr morgens festgestellt werden. Danach nimmt der Bedarf bis 13 Uhr wieder ab und steigt anschließend wieder an, bis von ca. 17 bis 19 Uhr die zweite Bedarfsspitze erreicht wird.

Jahreslastprofile im Nichtwohnbereich / GHD-Sektor

Im Gegensatz zum Wohnsektor ist der GHD-Sektor durch eine leichte Heterogenität gekennzeichnet, wodurch die benötigten Kenngrößen zu diesem Sektor nicht trivial zu erheben sind. Durch den Monitoring Bericht „Die Energie der Zukunft“ [26] des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz wird unter anderem versucht, die relevanten Energiemengen bezüglich des GHD-Sektors zu erfassen und maßgebliche Kennzahlen zur Verfügung zu stellen. Damit soll in diesem Bereich ein Monitoring hinsichtlich des Energieeffizienzfortschritts möglich sein. Im Forschungsbericht „Wärmeatlas Baden-Württemberg“ des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) wird der GHD-Sektor wie folgt definiert: „Beim Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung handelt es sich um einen Wirtschaftsbereich, indem alle nicht in der Güterproduktion tätigen, privatwirtschaftlich organisierten Unternehmen sowie die Betriebe des Handwerks zusammengefasst sind“ [27]. Darüber hinaus wird die begründete Annahme getroffen, dass die Wärmeversorgung kommunaler Liegenschaften der von typischen GHD-Gebäuden folgt, da die Beheizung und Warmwasserbereitstellung von GHD-Gebäuden und kommunalen Gebäuden gleichermaßen stark vom Wetter bzw. von klimatischen Bedingungen abhängig ist. Aus diesem Grunde gelten die hier getroffenen Annahmen für GHD-Gebäude gleichermaßen für Gebäude des kommunalen Sektors. Per Definition kann der kommunale Sektor als „betrieblicher Wärmeverbraucher ohne kommerziellen Hintergrund“ betrachtet werden [27]. Der GHD-Sektor ist von Betrieben gekennzeichnet, die Güter unter nicht-industriellen Bedingungen anfertigen. Das bedeutet, dass diese Betriebe von einem nahezu vollständig fehlenden Prozesswärmebedarf charakterisiert sind. Dies impliziert im Umkehrschluss, dass der Wärmebedarf lediglich vom Raumwärme- und Warmwasserbedarf abhängig ist. Der spezifische Wärmebedarf eines GHD-Betriebs ist dadurch wiederum abhängig von dessen Gebäudetyp und der Anzahl der Beschäftigten am jeweiligen Standort. Der Bedarf nach Strom eines GHD-Betriebes ist neben der Anzahl der Mitarbeiter auch von der jeweiligen Branche, sowie vom Gebäudetyp abhängig [27]. Je nach Gewerbeart kann dem jeweiligen Verbraucher ein Lastprofil mit der Kategorie G (vgl. Tabelle 11) zugeordnet werden. Eine genauere Zuordnung des Gewerbes kann durch die Datenblätter „Standardlastprofile Gas“ des BGW erreicht werden. Den Datenblättern sind Lastprofilanwendungen zu entnehmen, die eine genauere Spezifizierung der Gewerbebranchen enthalten.

Verglichen mit der Abbildung 25 (EFH) ist der Verlauf des Lastgangs ähnlich, was in der äquivalenten zeitlichen Verwendung der Wärmeenergie für Raumwärme und Warmwasser begründet liegt. Ebenso wie bei dem SLP der Einfamilienhäuser (vgl. Abbildung 25) ist beim Lastgang im GHD-Bereich ebenso ein „Tal“ über die Sommermonate hinweg zu beobachten. Bei sinkenden Außentemperaturen steigt der Gasbedarf wieder an. Im Gegensatz zu den betrachteten SLP für die privaten Haushalte ist der Gasverbrauch an Werktagen jedoch höher als am Wochenende, da die Energiebedarfe im GHD-Sektor stark mit den werktäglichen Arbeitszeiten (vorwiegend Mo.-Fr.) korrelieren. Grundsätzlich ähneln sich die Lastverhalten der Wohn- und Nichtwohngebäude sehr stark, was eine gemeinsame Netzversorgung ermöglichen kann. Auf eine erneute grafische Darstellung wird somit aufgrund der großen Ähnlichkeit zum Wohnbereich verzichtet.

2.3.2 Vorgehensweise zur Erstellung der Kühllastprofile im Gebäudesektor

Für Kühlen im Gebäudesektor existieren bisher noch keine allgemein verfügbaren und gültigen Lastprofile, wie die Standardlastprofile für den Gasbedarf bei Heizanwendungen (siehe Abschnitt 2.3.1). Im Projekt MareEn wurden deshalb auf Basis von Normen, Richtlinien sowie Monitoringdaten Lastprofile erstellt. Das Schema in Abbildung 26 zeigt die Zusammensetzung der Profile. Maßgebend für die notwendige Kühlleistung sind die internen Wärmegewinne (z.B. durch Menschen, die sich im Gebäude aufhalten oder Abwärme von elektrischen Geräten) sowie die Strahlungseinträge durch die Sonne. Für die Anwendungen im Projekt MareEn wurde vereinfachend angenommen, dass diese beiden Bestandteile zu gleichen Anteilen in das jeweilige Kühllastprofil eingehen.

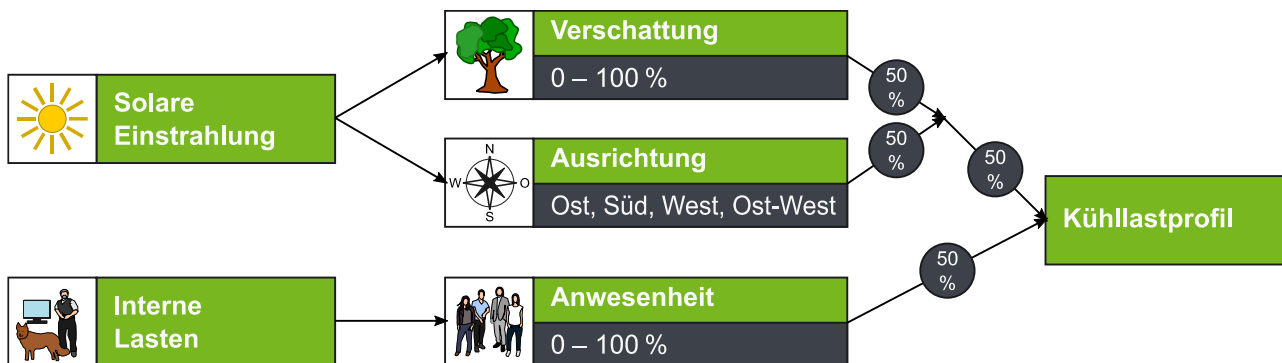


Abbildung 26: Schema zum prinzipiellen Vorgehen zur Erstellung von Kühllastprofilen im Projekt MareEn

Entscheidend für die Strahlungseinträge der Sonne sind dabei die Gebäudeausrichtung und mögliche Verschattungen (z.B. durch Bäume oder Nachbargebäude).

Parallel zu dem Kühllastprofil zur Abführung der solaren Strahlungseinträge wird ein Profil zur Abbildung der internen Lasten bestimmt, dieses basiert auf:

- DIN EN 15232-1: Energieeffizienz von Gebäuden– Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement [28]
- DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten [29]

Diesem Profil liegt die Annahme zugrunde, dass immer dann interne Lasten vorliegen und gekühlt werden muss, wenn Personen anwesend sind. DIN 15232-1 gibt dafür für verschiedene Raumtypen Belegungsgrade aus, z.B. Büro, Kantine, Klassenzimmer, Hotel, Restaurant, etc. vor. Um abschließend Lastprofile zu erstellen, gehen jeweils gleichwertig die entstandenen Profile für die Solare Einstrahlung und die internen Lasten ein. Abbildung 27 zeigt die Zusammenstellung der beiden Teillastprofile zum Gesamtkühllastprofil eines Bürogebäudes mit Südausrichtung und einer Verschattung von 20 %. Abschließend werden die Profile wieder auf 1 normiert, um sie dann mit der jeweils anliegenden Kühlleistung der zu betrachtenden Gebäude zu multiplizieren. Zur Bestimmung einer überschlägigen Kühlleistung kann dabei z.B. DIN V 18599-10 genutzt werden, da dort Werte für Interne Wärmequellen (anwesende Personen und Arbeitshilfen) gegeben sind [29].

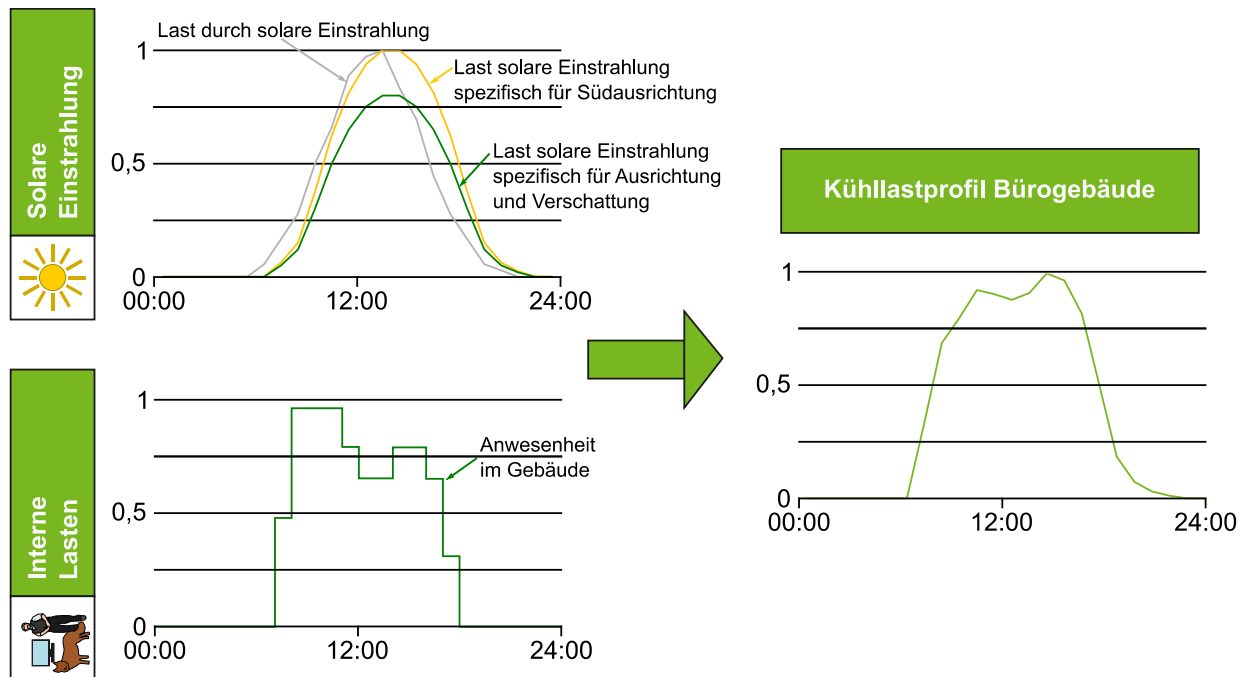


Abbildung 27: Beispielhafte Darstellung der Zusammensetzung eines Kühllastprofils für ein Bürogebäude (Südausrichtung und 20 % Verschattung)

Eine weitere Möglichkeit der Erstellung von Kühllastkurven besteht in der Möglichkeit Monitoringdaten zu verwenden. Seit 2019 begleitet der Lehrstuhl für technische Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg im Projekt EVERSOL (eversol.iwtt.tu-freiberg.de) zwei hochgradig solar versorgte Mehrfamilienhäuser mit einem Monitoringprogramm. Bei den Gebäuden besteht auch die Möglichkeit zu kühlen, indem im Sommer Wärme an eine Erdsonde abgeführt wird. Die Messwerte dieser Kühlung für die Sommer der Jahre 2019 und 2020 wurden beispielhaft genutzt, um daraus eine Kühllastkurve für ein Mehrfamilienhaus zu erstellen [30].

Dafür wurden die Messwerte der beiden Sommerperioden auf eine Woche verdichtet, dass bedeutet z.B., dass der Verlauf der Kühllastkurve für den Montag einen Mittelwert des Lastkurvenverlaufs für das Kühlen über alle Montage innerhalb der Messperiode darstellt. Die resultierende Kurve, sowie die daraus entstandene geglättete Kühllastkurve ist in Abbildung 28 dargestellt. Es sind klare Leistungsspitzen gegen 12:00 Uhr zu erkennen. Die Kühllastkurve folgt zudem leicht versetzt dem Verlauf der Außentemperatur. Es sind zudem keine großen Unterschiede zwischen Wochentagen und Wochenende zu erkennen.

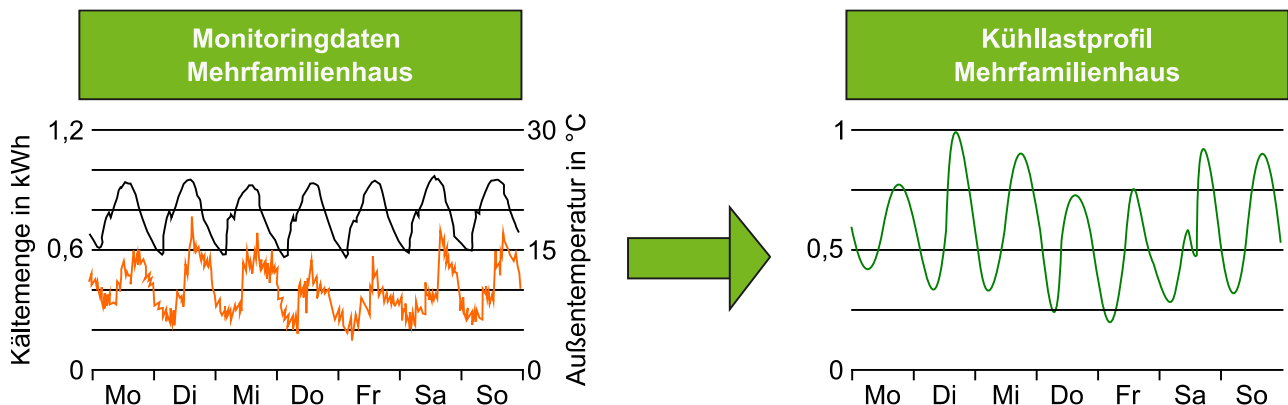


Abbildung 28: Beispielhafte Darstellung der Zusammensetzung eines Kühlprofils für ein Mehrfamilienhaus anhand von Monitoringdaten

Da die Kühlbedarfe für die Netzsimulation und die spätere Auswahl geeigneter Standorte vorerst keine Rolle gespielt haben, wird auf eine Detaillierung der Analyse verzichtet und der Fokus aufs Heizen gelegt. Für eine künftige Detailplanung der lukrativen Standorte (vgl. Kapitel 5) sollte der Kühlfall jedoch berücksichtigt werden.

2.3.3 Ergebnisdarstellung für die Gemeinden im Untersuchungsgebiet

Die Energienetze, welche im Projektverlauf modelliert und analysiert werden, werden aufgrund der Dominanz und Wichtigkeit der Wärmeverbräuche – gemessen am gesamten Gebäudeenergiebedarf – anhand der Wärmelastgänge ausgelegt. Aus diesem Grund werden nur die ermittelten Wärmelastgänge in diesem Kapitel ausgewertet und dargestellt, auf eine Veranschaulichung der Kältebedarfe wird in diesem Zusammenhang aufgrund der aktuell geringen Bedeutung auf den Gesamtenergiebedarf und der Nicht-Berücksichtigung der der späteren Netzberechnung verzichtet. Zur Berechnung der Lastgänge in den einzelnen Gemeinden wurden die im Kapitel 2.2 dargestellten Energiebedarfe mit dem eingangs erläuterten Vorgehen zur Lastgangerstellung angereichert und je Gemeinde ausgewertet. Im Folgenden finden sich die Abbildungen und Erläuterungen für jeden einzelnen Untersuchungsraum. Hierbei sei bereits angemerkt, dass die Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz als ein gemeinsames Betrachtungsgebiet zusammengefasst wurde, da auch die Wärmenetzberechnung für die Verwaltungsgemeinschaft gemeinsam erfolgt, d.h. es werden keine getrennten Wärmenetze für Lugau und Niederwürschnitz modelliert und trassiert. Dies wurde im Projektverlauf mit den Vertretern aus der Gemeinde so abgestimmt.

Die Basis für die Analysen bilden die unter Kapitel 2.1 analysierten räumlich-strukturellen, sowie gebäudetypspezifischen Energiebedarfsanalysen. Ziel ist es, die Lastgänge gemäß der vorgestellten Methodik in Wohngebäude und Nichtwohngebäude zu differenzieren. Dazu wurden zuerst die ermittelten Jahreswärmebedarfe gemäß der vorgestellten Methodik auf eine nachgefragte Energiemenge pro Stunde abstrahiert und anschließend zu Darstellungszwecken je Monat summiert. Die Analyse erfolgte hierbei getrennt in Wohngebäude und Nichtwohngebäude. Eine weitere Unterscheidung erfolgte im Wohnsektor in die Lastgänge von Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Mehrfamilienhäusern. Im Ergebnis liegen die Lastgänge für die genannten Gebäudetypen vor und können anhand der jeweiligen Anteile zum Gesamtwärmebedarf je Gemeinde aufsummiert werden. In den nachfolgenden Unterkapiteln finden sich die Ergebnisse zu den einzelnen Analysen analog zu den vorangegangenen Kapiteln, etwaige Wiederholungen in den Erklärungen sind der besseren Lesbarkeit bzgl. der einzelnen gemeindespezifischen Analysen geschuldet.

2.3.3.1 Lastprofildarstellung für die Abnehmer der Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb.

Der Jahreslastgang für die analysierten Gebäude in der Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb. ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die Vorgehensweise zur Erstellung der Lastprofile kann dem einleitenden Text unter Kapitel 2.3.3 bzw. den Grundlagen im Kapitel 2.3.1 entnommen werden.

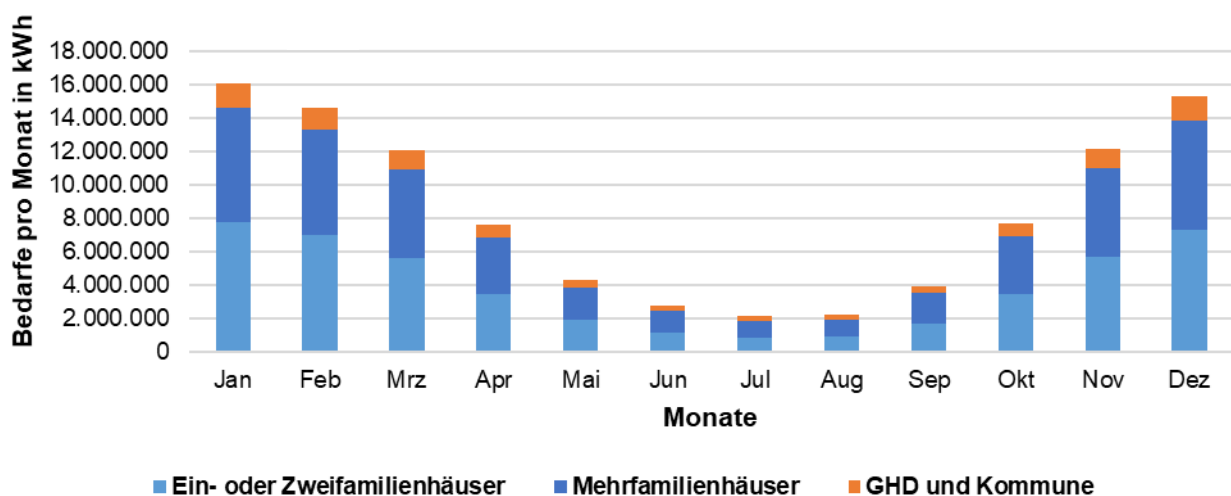


Abbildung 29: Verteilung des jährlichen Wärmebedarfes in der Gemeinde Oelsnitz

Das Übereinanderlegen der Lastgänge für Wohn- und Nichtwohngebäude zeigt, dass die Teillastgänge sehr

homogen ausfallen und somit eine gemeinsame Versorgung der analysierten Gebäude im Rahmen einer gekoppelten netzgebundenen Versorgung grundsätzlich möglich ist. Zudem zeigt sich der jahreszeitliche Einfluss durch das „Tal“ in den Sommermonaten, während die höchsten Bedarfe in den Wintermonaten anfallen. In Oelsnitz/Erzgeb. werden in den Monaten Januar und Dezember jeweils ca. 16 GWh Wärme nachgefragt, was im Vergleich zum Gesamtbedarf der Gemeinde (ca. 101 GWh/a, vgl. Kapitel 2.2) etwa ein Drittel des Gesamtbedarfes ausmacht. In welchem Maße Grubenwassergeothermieranlagen diese Spitzenlast im Winter decken können, werden die weiteren Analysen zeigen. Für die übrigen Monate, insbesondere die Übergangszeit und die Sommermonate, wo im Juli bspw. nur 2 GWh Wärmebedarf nachgefragt werden, lässt sich bei entsprechender untertägiger Verfügbarkeit (vgl. Kapitel 3) und Möglichkeiten der Energieverteilung über Tage (vgl. Kapitel 2.4) eine hohe Betriebsstundenanzahl der Anlagen sicherstellen. Da eine Vollversorgung der Gemeinde unrealistisch ist, wird für die näheren Analysen auf die in Kapitel 4 und Kapitel 5 identifizierten interessanten Gebiete verwiesen.

2.3.3.2 Lastprofilarstellung für die Abnehmer in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz

Der Jahreslastgang für die analysierten Gebäude in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die Vorgehensweise zur Erstellung der Lastprofile kann dem einleitenden Text unter Kapitel 2.3.3 bzw. den Grundlagen im Kapitel 2.3.1 entnommen werden.

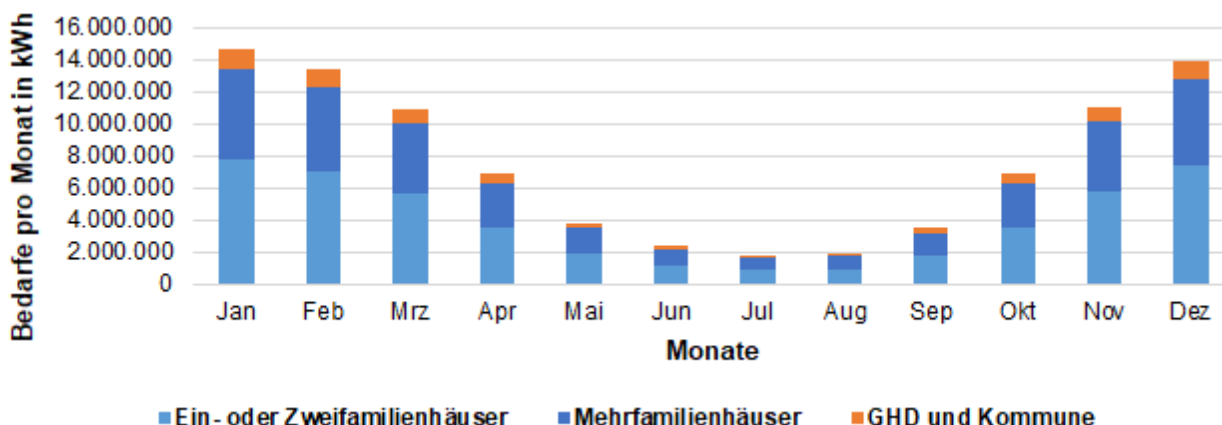


Abbildung 30: Verteilung des jährlichen Wärmebedarfs in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz

Das Übereinanderlegen der Lastgänge für Wohn- und Nichtwohngebäude zeigt, dass die Teillastgänge sehr homogen ausfallen und somit eine gemeinsame Versorgung der analysierten Gebäude im Rahmen einer gekoppelten netzgebundenen Versorgung grundsätzlich möglich ist. Zudem zeigt sich der jahreszeitliche Einfluss durch das „Tal“ in den Sommermonaten, während die höchsten Bedarfe in den Wintermonaten anfallen. In der Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz werden in den Monaten Januar und Dezember jeweils ca. 15 GWh (Jan.) bzw. 14 GWh (Dez.) Wärme nachgefragt, was im Vergleich zum Gesamtbedarf der Gemeinde (ca. 91 GWh/a, vgl. Kapitel 2.2) etwa ein Drittel des Gesamtbedarfes ausmacht. In welchem Maße Grubenwassergeothermieranlagen diese Spitzenlast im Winter decken können, werden die weiteren Analysen zeigen. Für die übrigen Monate, insbesondere die Übergangszeit und die Sommermonate, wo im Juli bspw. weniger als 2 GWh Wärmebedarf nachgefragt werden, lässt sich bei entsprechender untertägiger Verfügbarkeit (vgl. Kapitel 3) und Möglichkeiten der Energieverteilung über Tage (vgl. Kapitel 2.4) eine hohe Betriebsstundenanzahl der Anlagen sicherstellen. Da eine Vollversorgung der Gemeinde unrealistisch ist, wird für die näheren Analysen auf die in Kap. 4 und Kap. 5 identifizierten Gebiete verwiesen.

2.3.3.3 Lastprofilardarstellung für die Abnehmer in der Gemeinde Hohndorf

Der Jahreslastgang für die analysierten Gebäude in der Gemeinde Hohndorf ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die Vorgehensweise zur Erstellung der Lastprofile kann dem einleitenden Text unter Kapitel 2.3.3 bzw. den Grundlagen im Kapitel 2.3.1 entnommen werden.

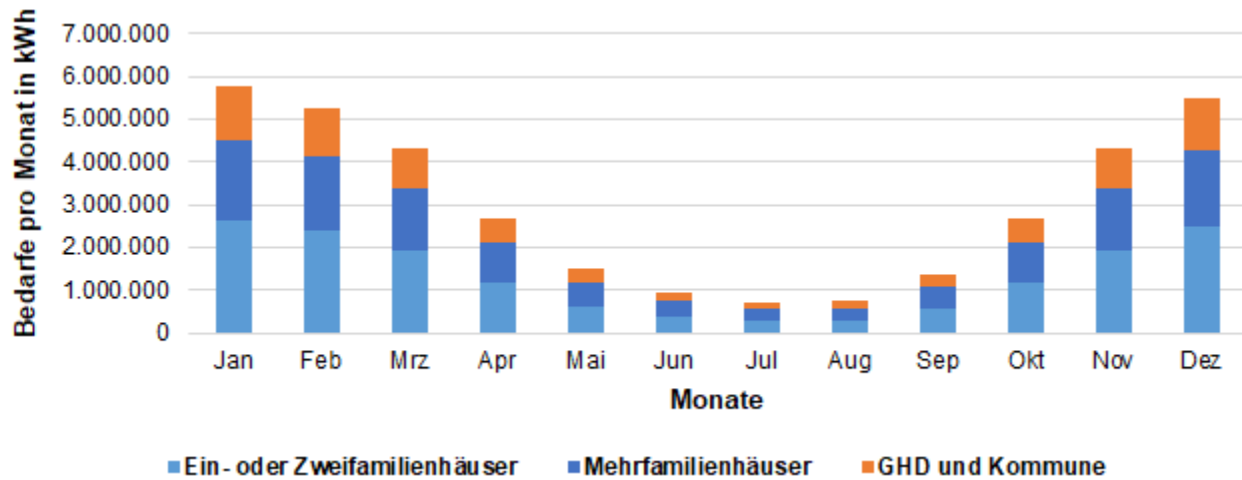


Abbildung 31: Verteilung des jährlichen Wärmebedarfes in der Gemeinde Hohndorf

Das Übereinanderlegen der Lastgänge für Wohn- und Nichtwohngebäude zeigt, dass die Teillastgänge sehr homogen ausfallen und somit eine gemeinsame Versorgung der analysierten Gebäude im Rahmen einer gekoppelten netzgebundenen Versorgung grundsätzlich möglich ist. Zudem zeigt sich der jahreszeitliche Einfluss durch das „Tal“ in den Sommermonaten, während die höchsten Bedarfe in den Wintermonaten anfallen. In Hohndorf werden in den Monaten Januar und Dezember jeweils ca. 5 GWh Wärme nachgefragt, was im Vergleich zum Gesamtbedarf der Gemeinde (ca. 30 GWh/a, vgl. Kapitel 2.2) etwa ein Drittel des Gesamtbedarfes ausmacht. In welchem Maße Grubenwassergeothermieranlagen diese Spitzenlast im Winter decken können, werden die weiteren Analysen zeigen. Für die übrigen Monate, insbesondere die Übergangszeit und die Sommermonate, wo im Juli bspw. nur 0,6 GWh Wärmebedarf nachgefragt werden, lässt sich bei entsprechender untertägiger Verfügbarkeit (vgl. Kapitel 3) und Möglichkeiten der Energieverteilung über Tage (vgl. Kapitel 2.4) eine hohe Betriebsstundenanzahl der Anlagen sicherstellen. Da eine Vollversorgung der Gemeinde unrealistisch ist, wird für die näheren Analysen auf die in Kapitel 4 und Kapitel 5 identifizierten interessanten Gebiete verwiesen.

2.3.3.4 Lastprofilardarstellung für die Abnehmer in der Gemeinde Gersdorf

Der Jahreslastgang für die analysierten Gebäude in der Gemeinde Gersdorf ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die Vorgehensweise zur Erstellung der Lastprofile kann dem einleitenden Text unter Kapitel 2.3.3 bzw. den Grundlagen im Kapitel 2.3.1 entnommen werden.

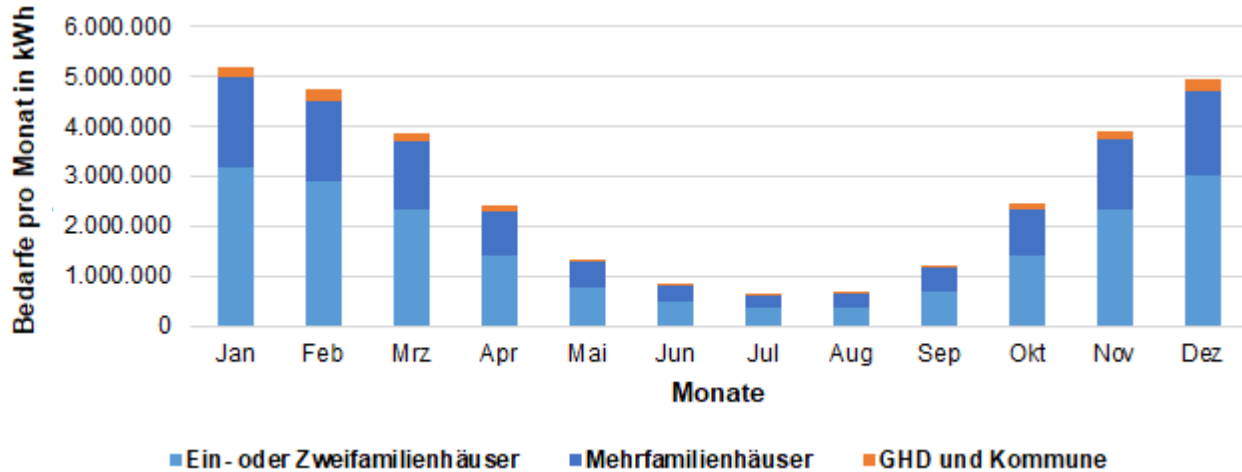


Abbildung 32: Verteilung des jährlichen Wärmebedarfes in der Gemeinde Gersdorf

Das Übereinanderlegen der Lastgänge für Wohn- und Nichtwohngebäude zeigt, dass die Teillastgänge sehr homogen ausfallen und somit eine gemeinsame Versorgung der analysierten Gebäude im Rahmen einer gekoppelten netzgebundenen Versorgung grundsätzlich möglich ist. Zudem zeigt sich der jahreszeitliche Einfluss durch das „Tal“ in den Sommermonaten, während die höchsten Bedarfe in den Wintermonaten anfallen. In Gersdorf werden in den Monaten Januar und Dezember jeweils ca. 5 GWh Wärme nachgefragt, was im Vergleich zum Gesamtbedarf der Gemeinde (ca. 32 GWh/a, vgl. Kapitel 2.2) knapp weniger als ein Drittel des Gesamtbedarfes ausmacht. In welchem Maße Grubenwassergeothermieranlagen diese Spitzenlast im Winter decken können, werden die weiteren Analysen zeigen. Für die übrigen Monate, insbesondere die Übergangszeit und die Sommermonate, wo im Juli bspw. nur 0,7 GWh Wärmebedarf nachgefragt werden, lässt sich bei entsprechender untertägiger Verfügbarkeit (vgl. Kapitel 3) und Möglichkeiten der Energieverteilung über Tage (vgl. Kapitel 2.4) eine hohe Betriebsstundenanzahl der Anlagen sicherstellen. Da eine Vollversorgung der Gemeinde unrealistisch ist, wird für die näheren Analysen auf die in Kapitel 4 und Kapitel 5 identifizierten interessanten Gebiete verwiesen.

2.4 Erstellung und Bewertung von möglichen Versorgungsnetzen

2.4.1 Grundlagen zu Wärmenetzen und kalter Nahwärmeversorgung

Die nachhaltige Energieversorgung eines ganzen Quartiers rückt weiter in den Fokus von Nutzern und Eigentümern. In einem klassischen Nahwärmenetz wird Wärme in Form von heißem Wasser oder Dampf mithilfe eines zentralen Kraftwerkes auf das benötigte Temperaturniveau gehoben und dann mittels Übergabestationen an die Abnehmer verteilt. Ein Nachteil dieser Hochtemperatur-Heizsysteme sind hohe Installationskosten und die hohen Verteilverluste infolge des hohen Temperaturniveaus [31]. Im Sommer werden zudem viele Systeme nur zur Deckung des Warmwasserbedarfs betrieben und das aufgeheizte Wasser weist eine lange Verweilzeit im Netz auf. Zu diesem Zeitpunkt können die Wärmeverluste im Netz bis zu 30 % betragen [32]. Um diese zu minimieren sind zukünftig sogenannte „kalte Nahwärmenetze“ mit geringen Temperaturen eine sinnvolle technische Option. Die Entwicklung der Wärmeversorgung im Quartier zielt darum darauf ab, die Temperatur im Netz abzusenken (Abbildung 33), um die Verluste zu minimieren.

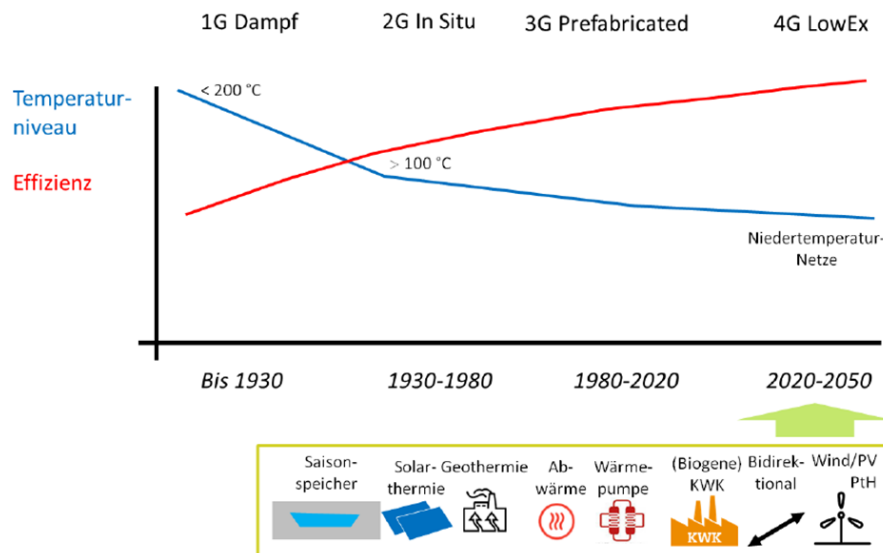


Abbildung 33: Qualitative Darstellung der Entwicklung von Effizienz und Temperaturniveau von Wärmenetzen, nach [33]

Netze der 1. Generation von Fernwärmenetzen nutzen Dampf als Wärmeträgermedium und wurden durch Netze der 2. Generation ersetzt, die unter Druck stehendes Heißwasser mit Vorlauf (VL) Temperaturen von über 100 °C als Wärmeträger verwenden. In den 1970 Jahren bis heute kommen Netze der 3. Generation zum Einsatz, die Temperaturen von 80- 100°C im VL für die Wärmeübertragung auf die Heizkörper liefern. Diese Systeme werden mit einem zentralen Wärmeerzeuger betrieben und nutzen unter Druck stehendes Wasser als Arbeitsmedium. Die Gesamtzahl dieser Fernwärmesysteme in Europa wird auf ca. 6.000 geschätzt. Ein Nachteil der zentralisierten Systeme sind die Verteilungsverluste welche in der Regel zwischen 10-30 % liegen [34].

Die Entwicklung der letzten Jahre konzentriert sich darum auf sogenannte Niedertemperaturnetze mit Systemtemperaturen von unter 90 °C. Meist werden sogar Netztemperaturen unter 70 °C anvisiert. Diese werden auch als Netze der 4. Generation bezeichnet. Infolge der niedrigeren Systemtemperaturen des Netzes können höhere Wirkungsgrade erreicht werden [31]. Überschüssige Wärme, welche nicht im Netz benötigt wird, kann in die bestehenden Fernwärmenetze eingespeist werden [35] [36].

Netze der 4. Generation können noch einmal unterteilt werden in klassische Nahwärmenetze (50-70 °C Netztemperatur) und kalte Nahwärmenetze. Klassische Nahwärmenetze können aufgrund der hohen Temperaturen in den Rohren nicht gleichzeitig verschiedene Gebäude mit Heiz- und Kühlleistungen versorgen (unidirektionale Versorgung). Diese Herausforderung adressieren sogenannte kalte Nahwärmenetze [37]. [37]

Für diese Netze existieren viele Bezeichnungen. Neben dem Begriff kalten Nahwärmenetz, der im Folgenden weiterverwendet wird, sind auch beispielsweise die Begriffe Anergie-Netze oder Wärmenetze 5.0 im Gebrauch. Das wesentliche Merkmal dieser Wärmenetze ist, dass die Netztemperatur mit Werten zwischen 5-40 °C (meist 10-25°C) für eine direkte Beheizung eines Gebäudes nicht ausreicht und dezentral Wärmepumpen (WP) im Gebäude installiert werden müssen, die die Wärme aus dem Netz auf die VL-Temperatur des Gebäudeenergiesystems anheben. Durch die Möglichkeit, den Betrieb der WP in den Wärmeübergabestationen in den Gebäuden umzukehren, kann der Wärme- und Kältebedarf der angeschlossenen Nutzer zudem über das gleiche Rohrnetz gedeckt werden (Bidirektionale Versorgung). Diese Netze sind gut für die Deckung des Kühlbedarfes nutzbar, da die Kaltwasserversorgung für Kühlzwecke (d.h. freie Kühlung) oder zur Speisung dezentraler Kältemaschinen mit sehr hohem Wirkungsgrad erfolgen kann. Zudem wird die Einbindung von erneuerbaren Energien erleichtert (vgl. Abbildung 66) [34].

2.4.2 Methodik zur Grobtrassierung möglicher Versorgungsnetze und Analyse zu potenziellen Versorgungsclustern je Gemeindegebiet

Ziel des Projektes ist es, auf Basis netzgebundener Versorgungsanalysen die Machbarkeit der Energieversorgung von Grubenwässern in den einzelnen Gemeinden zu prüfen. Hierfür ist es nötig, eine Identifikation und Modellierung von potenziell möglichen netzgebundenen Wärmeversorgungsregionen für den Gebäudesektor (Wohnen, GHD und Kommune) durchzuführen. Es muss insbesondere evaluiert werden, welche leitungsgebundenen Wärmeversorgungssysteme für einzelne Schwerpunktregionen in den betrachteten Gemeinden nach Status quo auf Basis infrastruktureller Gegebenheiten realisierbar und wirtschaftlich sind. Basis für die Analysen sind die standortgenau erfassten / durch die Partner bereitgestellten Wärmebedarfe aus AP 2. Da diese nur für wenige Einzelgebäude des gesamten Untersuchungsgebietes zur Verfügung stehen, wurde darüber hinaus auf die im Projektverlauf modellierten Werte der Einzelgebäude zurückgegriffen. Ausgehend hiervon wird in einem zweistufigen Verfahren die Methodik zur Netzsimulation entwickelt und durchgeführt. Die netzbasierten Energieverteilungsanalysen vom Bergwerk zu verschiedenen Verbrauchern werden unter Verwendung von algorithmischen und räumlichen Planungsmethoden durchgeführt, die die Gebäude auf Basis adressspezifischer Geodaten miteinander kombinieren.

Modellierungsschritt 1: Zuordnung von Abnehmern zu nahegelegener Infrastruktur

Per GIS-Analyse wird in einem ersten Schritt eine adressgenaue Beziehung zwischen den Abnehmerpunkten (Gebäuden) in den Gemeinden und dem nahegelegenen Straßennetz erstellt. Das gesamtdeutsche Straßennetz (Autobahnen und Bundesstraßen, Landes- bzw. Staatsstraßen, Gemeindestraßen, Ortsstraßen, Wirtschaftswege etc.) liegt in Form von Geodaten (Lage, Länge etc.) bei der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH in den internen Daten vor. Dieses bildet die Basis für die Analysen zur netzgebundenen Versorgung, da Energieversorgungsinfrastrukturen auf Verteilnetzebene (z.B. die hier zu modellierenden Wärmenetze, aber auch Gasverteilnetze etc.) Wärmenetze. Ergänzend zu den Straßenverläufen sind zusätzliche Kennwerte, wie bspw. der Straßenname, die Standorte von Brücken und Tunneln, Einbahnstraßen etc. erfasst. Sowohl die Art der Straße als auch Straßenabschnitte, die über Brücken und durch Tunnel führen, werden zusätzlich für die nachfolgende Netzverlaufsrechnung berücksichtigt.

In Abbildung 34 ist die schrittweise Verknüpfung der Wärmeabnehmerpunkte mit dem Straßennetz an einem Beispielgebiet (nicht im Untersuchungsgebiet des Projektes) schematisch dargestellt.

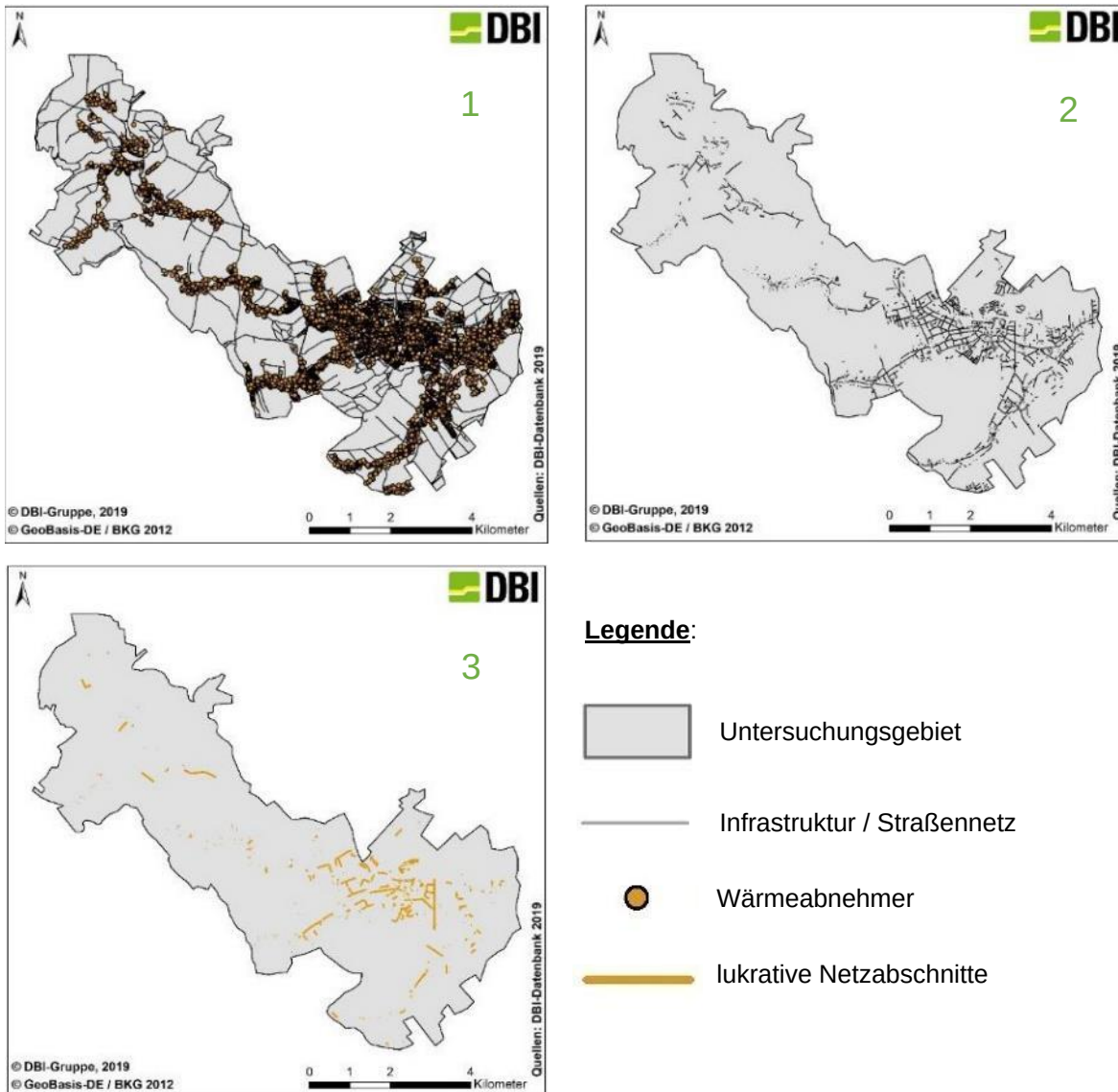


Abbildung 34: Darstellung der Wärmeabnehmer und des Straßennetzes sowie Auswahl lukrativer Netzabschnitte in einem Beispielgebiet

Der erste Schritt (Bild 1) stellt die Zuordnung aller Wärmebedarfe und weiterer relevanter Kennwerte (Anzahl der einzelnen Abnehmer, Wohngebäude/Nichtwohngebäude etc.) auf das nahegelegene Straßennetz dar. Die Wärmebedarfe basieren hierbei auf den erfassten und berechneten Bedarfen (Warmwasser, Heizwärme) aus AP 2. Dabei soll die potenzielle gemeinsame Erzeugung von Wärme und Strom, wie es bspw. in einer Brennstoffzelle möglich wäre, keine Rolle spielen.

Im zweiten Schritt (Bild 2) erfolgt die Auswahl jener Teile des Straßennetzes, die einen Wärme-Abnehmer (Gebäude) in unmittelbarer Nähe besitzen bzw. einen Wärme-Bedarf zugeordnet bekommen haben. Straßen abseits von Siedlungen und Gewerbeflächen fallen somit aus den nachfolgenden Betrachtungen heraus. Der abschließende Bearbeitungsschritt drei (Bild 3) zeigt die finale Selektion von potenziell lukrativen Netzabschnitten entsprechend einer festgelegten Wärmemenge, die pro Meter Trassenlänge abgesetzt werden kann.

Die abgesetzte Wärmemenge eines Netzabschnittes (Straßenzuges) pro Jahr und Meter Leitung wird als **Wärmebelegung** bezeichnet. Diese wird ortskonkret für jeden Straßenzug bzw. lukrativen Netzabschnitt wie folgt (vgl. Formel auf nachfolgender Seite) berechnet:

$$\text{Wärmebelegung } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{a} \cdot \text{m}} \right) = \frac{\text{absetzbare Wärmemenge des Netzabschnittes (kWh)}}{\text{Jahr (a)} \cdot \text{Länge des Straßenzuges (m)}}$$

Auf der Belegungsselektion bauen verschiedene Betrachtungsszenarien auf, die eine Bewertung nach mehreren Gesichtspunkten erlauben. Dabei können bestimmte Wärmeabsätze pro Meter als Schranken definiert werden, die nicht unterschritten werden dürfen (Mindestbelegung). Anhand der Anzahl und Dichte der lukrativen Netzabschnitte kann als weiteres Fazit dieser Teilanalyse die Darstellung von Vorzugsgebieten in den Gemeinden erfolgen, welche sich anhand der durchgeführten Bewertung von potenziellen Netzabschnitten besonders gut für eine netzgebundene Versorgung eignen. Im nächsten Schritt können auf Basis der lukrativen Netzabschnitte vollständige Netze modelliert werden.

Modellierungsschritt 2: Wärmenetzmodellierung für lukrative Netzabschnitte

Basierend auf den identifizierten lukrativen Netzabschnitten kann für die betreffenden Gebiete eine Wärmenetzmodellierung durchgeführt werden. Die Mindestwärmebelegung beschreibt das Minimum an Wärmeenergie, das im Straßenzug pro Jahr und pro Meter Leitung abgesetzt werden muss, um im entsprechenden Belegungsszenario berücksichtigt zu werden. Je größer diese ist, desto mehr Energie kann im Versorgungsnetz abgesetzt werden, was die jeweiligen Wärmenetze rentabler macht. Beispielsweise können somit folgende Wärmebelegungen betrachtet werden:

- 1 kWh/(a·m)¹²
- 1.500 kWh/(a·m)
- 2.000 kWh/(a·m)
- 2.500 kWh/(a·m)
- 3.000 kWh/(a·m)

Die Mindestwärmebelegung ist ein Maß für die potenzielle Wirtschaftlichkeit des Versorgungsnetzes [38]. Je niedriger die Wärmebelegung ausfällt, desto stärker fallen Wärmeverluste im Verhältnis zu der im Wärmenetz transportierten bzw. abgesetzten Wärmemenge ins Gewicht. Je strenger die Wärmebelegung ausgelegt wird, desto lukrativer werden die nach dieser Randbedingung ausgewählten Netzabschnitte, da die Effizienz des Wärmenetzes bei einer größeren abgesetzten Wärmemenge pro Meter Leitung steigt. Die Mindestwärmebelegung von 1.500 kWh/(a·m) ist hierbei gemäß Literaturwerten die kleinste betrachtete Belegung, welche aufgrund von anfallenden Wärmeverlusten den Grenzfall des wirtschaftlichen Betriebs eines konventionellen Wärmenetzes gewährleistet [38]. Bei einer angenommenen Wärmebelegung von 1 kWh/(a·m) kann hingegen „frei“ ein Wärmenetz modelliert werden, welches einen Vollanschluss aller möglichen Abnehmer simulieren soll. Damit kann zusätzlich das technisch größte mögliche Wärmenetz (Anschluss aller Wärmeabnehmer im Quartier) modelliert werden. Hierauf liegt in diesem Modellierungsschritt der Fokus, da eine Bewertung der entstandenen Netze im Nachgang als Abgleich mit den Untertage-Entnahmepunkten erfolgen soll.

Eine vorherige Definition von Mindestwärmebelegungen als Schranken ist demnach in erster Instanz nicht zielführend, da zuerst für das gesamte Untersuchungsgebiet eine Netzversorgung simuliert werden soll. Da die Mindestwärmebelegung einen großen Einfluss auf die Resultate hat, würde diese quartiersspezifisch für unterschiedliche Resultate sorgen. Um diesen Einfluss zu verdeutlichen, ist in Abbildung 35 auf nachfolgender Seite anhand dreier wirtschaftlich sinnvoller Mindestwärmebelegungen¹³ für konventionelle Wärmenetze die Entwicklung der lukrativen Netzabschnitte in einem Beispielquartier (nicht im Untersuchungsgebiet von MareEn) veranschaulicht. Dies dient ausschließlich zur Veranschaulichung des Einflusses einer festgelegten Mindestwärmebelegung auf die Simulation und spielt für die hier durchgeführte Modellierung keine Rolle.

¹² Das Szenario 1 kWh/(a·m) repräsentiert ein Szenario ohne vorgegebene Mindestwärmebelegung. Dieses Szenario wird als Vergleichsszenario modelliert, um das maximal mögliche Quartiersnetz – unabhängig von der Wärmebelegung – darzustellen. Damit können die einzelnen Wärmebelegungen der verschiedenen Netz-Teilabschnitte des Quartieres visualisiert werden.

¹³ z.B. 1.500 kWh/(a·m), 3.000 kWh/(a·m) und 6.000 kWh/(a·m)

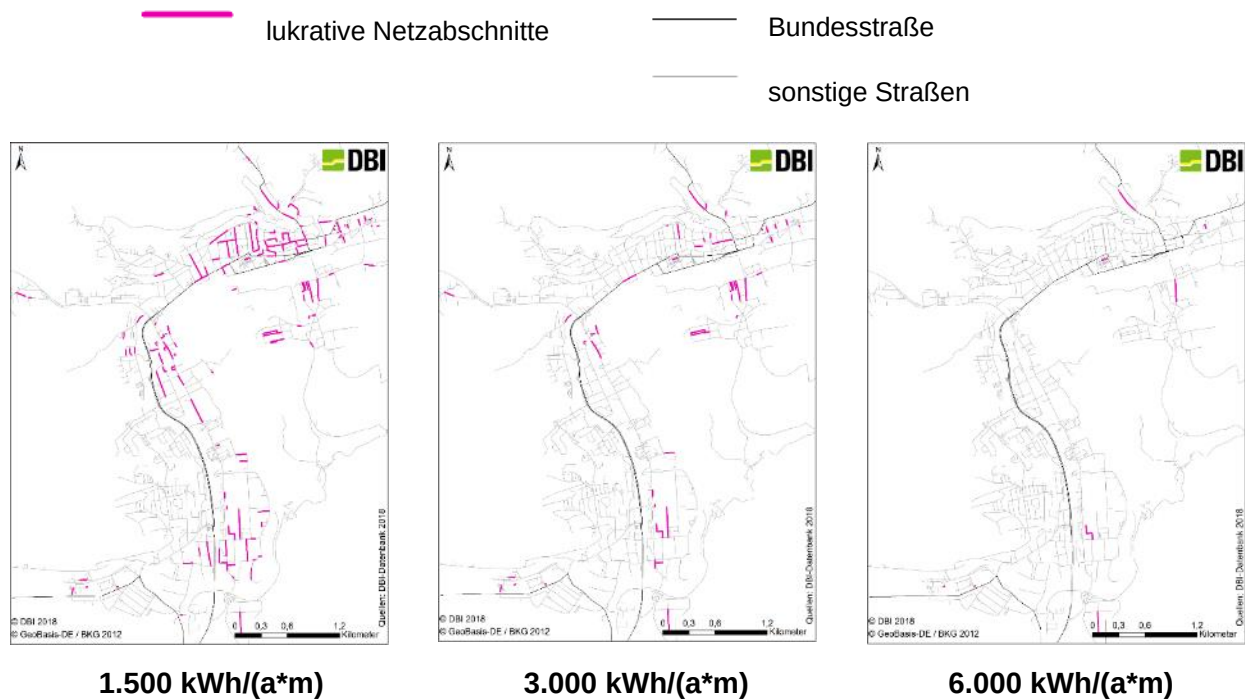


Abbildung 35: Entwicklung der lukrativen Netzabschnitte für verschiedene Wärmebelegungen in einem Beispielgebiet

Wie am Beispiel in ersichtlich ist, schränkt sich mit steigender Mindestwärmebelegung das Versorgungsgebiet immer weiter ein. Ebenso zeigt diese Betrachtung einerseits, dass sowohl die Anzahl potenzieller Standorte, als auch die abgesetzten Gesamtwärmemengen abnehmen. Andererseits wird deutlich, welche potenziellen Netzabschnitte die wirtschaftlich bedeutsamsten sind. Bei einer zukünftigen Umsetzung eines Wärmenetzprojektes sind Regionen mit einer großen Anzahl räumlich nahe beieinanderliegender Netzabschnitte mit hoher Wärmebelegung von besonderem Interesse. Dies lässt sich jedoch auch im Nachgang anhand einer Teilstückbewertung von einzelnen Teilnetzen bewerten, weshalb eine vollständige Modellierung dennoch zweckdienlich ist – die Mindestwärmebelegung wird im Kapitel 4 und Kapitel 5 eine entscheidende Rolle bei der Auswahl der geeigneten Gebiete (neben der untertägigen Betrachtung) spielen.

Um die identifizierten potenziell lukrativen Netzabschnitte möglichst genau technisch-wirtschaftlich zu bewerten, ist der Verlauf des dazugehörigen Wärmenetzes entscheidend. Um diese Aufgabe zu bewerkstelligen, hat das DBI ein eigenes GIS-Analysetool, den *DBI-GridAnalyst*, auf Pythonbasis entwickelt. Der *DBI-GridAnalyst* ist zum einen in der Lage, automatisiert eine Grobtrassierung der Wärmenetzverläufe anzustellen und daraus die wirtschaftlichen bzw. lukrativen Wärmenetze zu identifizieren. Zum anderen kann der *DBI-GridAnalyst* simultan die Platzierung von Heizzentralen mitberücksichtigen. Im Projekt MareEn wird dieses Feature des *DBI-GridAnalyst* jedoch nicht benötigt, da die potenziellen Entnahmepunkte des Grubenwassers anderweitig analysiert werden müssen und durch untertägige Messungen und Simulationen determiniert sind. Die Berechnung des groben Netzverlaufes erfolgt anhand folgender wesentlicher Rahmenbedingungen, die algorithmisch im *DBI-GridAnalyst* berücksichtigt werden:

- das Netz verläuft entlang öffentlicher Straßen
- die Netzlinie beinhaltet sowohl Vor- als auch Rücklauf
- kein Netzverlauf in Form von Schleifen / Maschen
- umgehen von kostenintensiven Abschnitten wie Autobahnen, großen Ampelkreuzungen, Brücken und Tunnel
- optimaler Verlauf hinsichtlich der Gesamtlänge unter den jeweilig vorgegebenen Mindestwärmebelegungen und zuvor ermittelten lukrativen Netzabschnitten

Zur standortgenauen Lösung dieses mathematisch-kartografischen Optimierungsproblems ist die Verwendung eines Geoinformationssystems (GIS) essenziell. Als Grundlage für die Netzverlaufsberechnung dient, wie auch schon bei der Identifikation der lukrativen Netzabschnitte, das öffentliche Straßennetz in den Quartieren. Der *DBI-GridAnalyst* ist in der Lage, automatisiert eine Grobtrassierung der Wärmenetzverläufe anzustellen und daraus die wirtschaftlichen bzw. lukrativen Wärmenetze zu identifizieren. Diese Eingrenzung der lukrativen Netzabschnitte führt zu einer Verringerung der Rechenzeit, die der *DBI-GridAnalyst* für die Wärmenetzauslegung benötigt. Dies ist aufgrund der Größe des Gebietes und der potenziellen Abnehmer (vgl. Kapitel 2.1) sehr wichtig, da die Entwicklung des Netzes einem sehr komplexen und iterativen Algorithmus folgt.

Auf Basis des ermittelten Netzverlaufes ändern sich die technisch-wirtschaftlichen Parameter des Wärmenetzes. Das heißt, dass sich mit jeder Verbindung eines lukrativen Netzabschnittes die Parameter des gesamten modellierten Wärmenetzes verändern. Dies wirkt sich sowohl auf die Netzlänge aus, die mit steigender Anzahl an angeschlossenen Netzabschnitten zunimmt. Aber auch für die Anzahl an angeschlossenen Gebäuden und damit die absetzbare Wärmemenge hat das iterative Verbinden der lukrativen Netzabschnitte zum Gesamtnetz einen Einfluss. So kann es sein, dass vormals lukrative (oder nicht lukrative Netzabschnitte) im Rahmen der Netzverlaufmodellierung an das bestehende Netz angeschlossen werden können, ohne, dass die Mindestwärmebelegung des gesamten Netzes unterschritten wird. Somit können ggf. weitere potenzielle Gebäude, welche bisher keinem als lukrativ identifiziertem Netzabschnitt zugeordnet werden konnten, ebenfalls angeschlossen werden, wenn sie sich in unmittelbarer Nähe des Gesamtnetzes befinden und die Mindestwärmebelegung des Gesamtnetzes durch den Anschluss nicht unterschritten wird. Dieses algorithmische Vorgehen hat den großen Vorteil, dass die Netzmodellierung sehr dynamisch an die Abnehmerstruktur angepasst werden kann und der *DBI-GridAnalyst* universell für das gesamte Gebiet gemeindespezifisch, aber auch gemeindeübergreifend (z.B. in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Oelsnitz) eingesetzt werden kann. Die Netzverlaufmodellierung wurde für die einzelnen Gemeinden bzw. die Verwaltungsgemeinschaft nach der vorgestellten Methodik für den Status quo (Wärmebedarf) berechnet und grobtrassiert. Die Ergebnisse können den nachfolgenden Charakterisierungen der einzelnen Gebiete entnommen werden. Sie bilden eine Basis für die Erarbeitung der Versorgungskonzepte für die einzelnen Gebiete, welche aufgrund der ober- und untertägigen Parameter in Kapitel 4 und Kapitel 5 als geeignet identifiziert werden.

Zudem wurden Cluster entsprechend der Anzahl in ihnen verorteter Energieabnehmer bzw. Gebäude gebildet (9 Klassen). Diese Cluster bilden ein Maß für mögliche Ausdehnungen der Wärmenetze, welche auf Basis der vorherrschenden Abnehmerstruktur modelliert wurden. Zudem können siedlungsstrukturelle Ausprägungen berücksichtigt werden. Das Vorhandensein von Clustern mit sehr vielen Energieabnehmern bzw. Gebäuden (große Klassen) ist ebenfalls ein Maß für eine potenzielle wirtschaftliche netzgebundene Versorgung mit Wärme. Denn auch wenn ein Großteil des Untersuchungsgebietes bspw. wirtschaftlich weniger bedeutsam für eine netzgebundene Wärme-Versorgung ist, können einzelne Versorgungsregionen bzw. -Schwerpunkte innerhalb von ganzen Gemeinden bzw. anderen Untersuchungsräumen durchaus lukrativ sein.

Hierbei ist es wichtig, dass die Cluster eine bestimmte Maximalgröße nicht überschreiten, damit die Cluster einerseits nicht zu groß werden, aber andererseits dennoch genügend Abnehmer in einem Versorgungscluster zusammengefasst werden können. Die Ergebnisse der Netzmodellierung können somit mit den Abnehmerinformationen der Clusteranalyse angereichert werden. Im Projektkonsortium wurde sich auf eine Clustergröße von maximal 100m geeinigt. Das heißt, dass zwei Abnehmerpunkte maximal 100m auseinanderliegen können, um demselben Cluster zugeordnet zu werden. Sollte sich im Umkreis von 100m kein Abnehmerpunkt mehr befinden, so ist das Cluster abgeschlossen und es wird versucht, neue Abnehmercluster mit einer netzgebundenen Versorgung zu identifizieren.

Auf der nachfolgenden Abbildung sind beide Ergebnisse (Netzsimulation und Clusteranalyse) gemeinsam für das gesamte Untersuchungsgebiet dargestellt. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der einzelnen Gemeinden kurz erläutert und zusammenfassend die Clusteranalysen tabellarisch dargestellt.

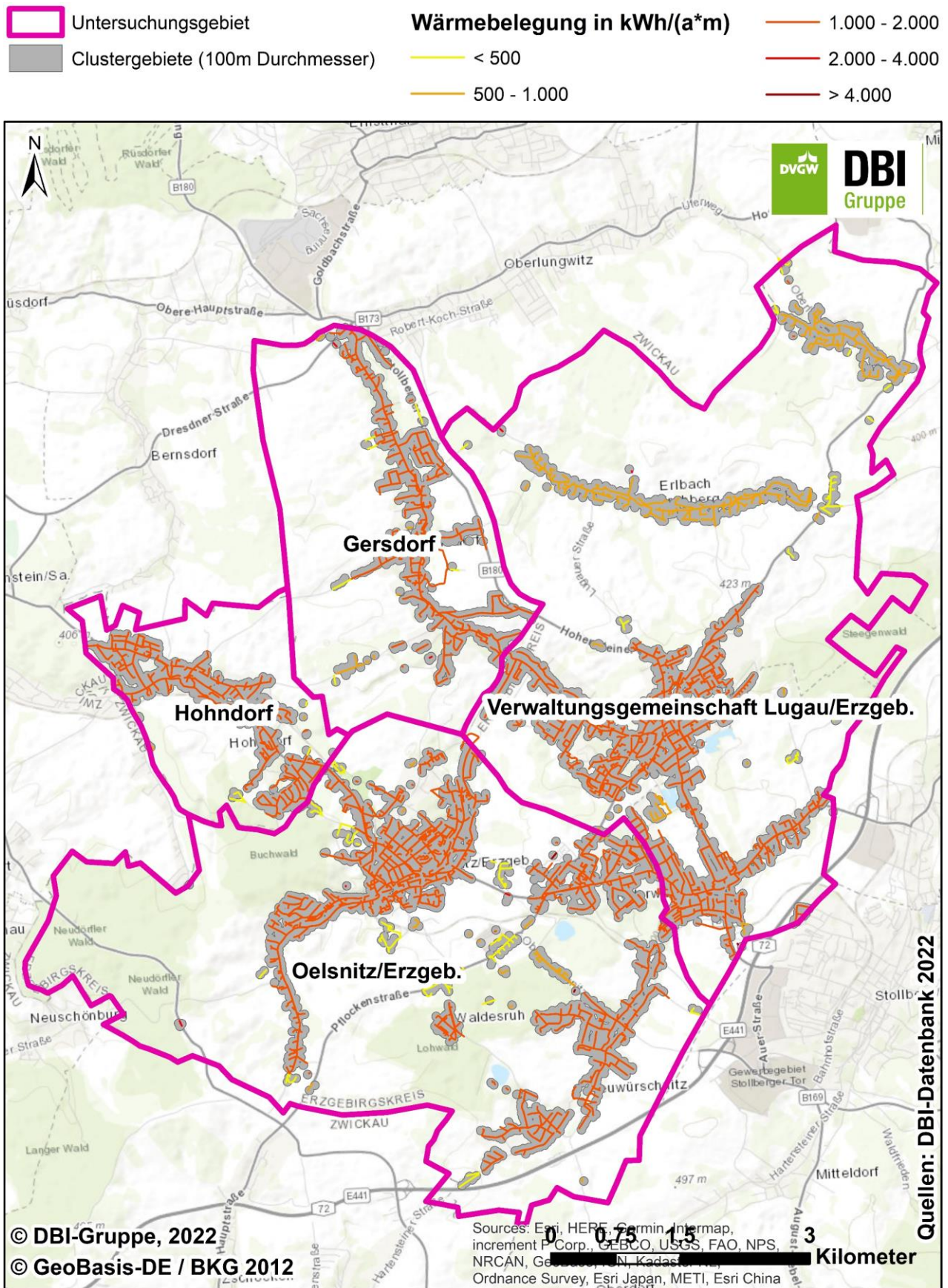
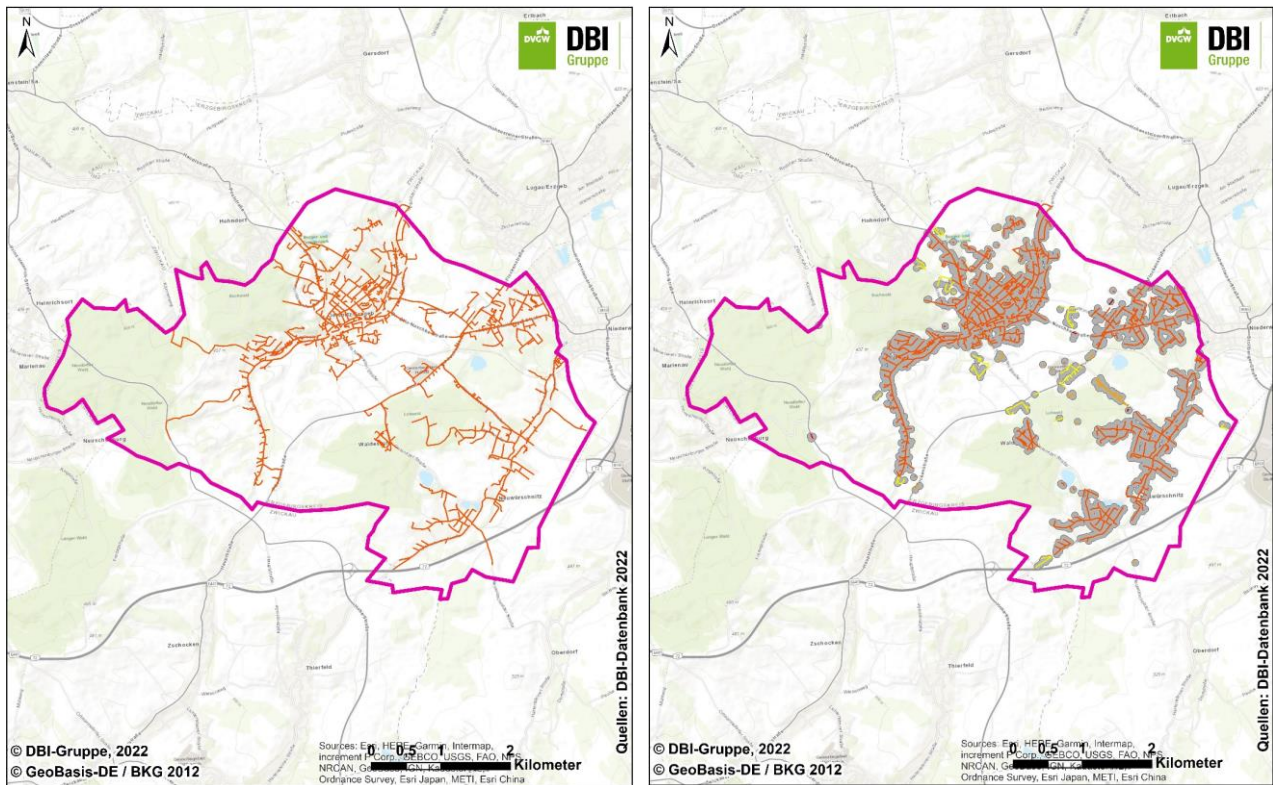
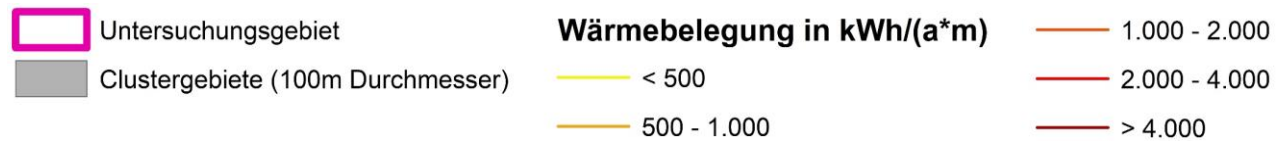


Abbildung 36: Ergebnisse der Grobtrassierungen und netzgebundenen Versorgungsanalysen für das gesamte Untersuchungsgebiet (Gemeinden im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau-Oelsnitz/Erzgeb.) des Forschungsprojektes MareEn

2.4.3 Auswertung für das Gemeindegebiet Oelsnitz/Erzgeb.

Die Ergebnisse der Netz- und Clusteranalysen für die Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb. finden sich in Abbildung 37.



Netzanalyse zur Komplettversorgung
der Gemeinde

Identifikation von Abnehmerclustern in
der Gemeinde

Abbildung 37: Kartografische Veranschaulichung der netzgebundenen Versorgungsanalyse in der Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb.

Die Grobtrassierung und Netzanalyse in Oelsnitz/Erzgeb. hat gezeigt, dass eine vollständige Netzversorgung grundsätzlich möglich ist (Abb. links). Bei dieser werden über **3.300 Adresspunkte** aus dem Wohn- und Nichtwohnbereich zu einem Gesamtnetz verbunden. Dieses hypothetische Netz würde das gesamte Gemeindegebiet versorgen, was eine **Netzlänge von 90,5 km** zur Folge hätte. Die **Wärmebelegung** im Netz, d.h. die abgesetzte Wärmemenge pro Jahr und Meter Leitung, liegt **1.114 kWh/(m*a)**. Der Kältebedarf, der zusätzlich aufgrund der angeschlossenen Abnehmer noch absetzbar wäre, liegt bei 4,3 GWh/a – dieser ist jedoch, unter den Rahmenbedingungen des Projekts MareEn, irrelevant für die Netzauslegung und Modellierung. Bei einer Detailplanung sollte dieser jedoch berücksichtigt werden. Zusätzlich konnten verschiedene Abnehmercluster (Abb. rechts) identifiziert werden. Diese wurden entsprechend der räumlichen Nähe der einzelnen Gebäude erstellt (maximaler Abstand zweier Gebäude: 100 m, um demselben Cluster zugeordnet zu werden). Innerhalb dieser Cluster wurden die modellierten Wärmenetze neu bewertet, sodass sich Gebiete mit höheren und geringeren Wärmebelegungen als Teil-Netze des Gesamtnetzes ergeben. Diese sind durch die gelbe (geringe) bzw. dunkelrote (höhere) Einfärbung der rechten Abbildung erkennbar. Ebenso wird erkennbar, welche Gebiete sich vermutlich nicht sinnvoll über ein großflächiges Wärmenetz versorgen lassen (einzelne Abnehmer, nicht verbundene Cluster) oder, wo der Fokus auf ein zwar lohnendes, aber kleines, abgetrenntes Wärmenetz gerichtet werden sollte. Eine tabellarische Auswertung kann dem Abschnitt 2.4.7 entnommen werden. Die Cluster-Analysen sowie Wärmenetztrassierungen bilden die Basis, um in Kapitel 4 besonders lukrative Standorte zu identifizieren.

2.4.4 Auswertung für die Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Erzgeb. und Niederwürschnitz

Die Ergebnisse der Netz- und Clusteranalysen für Lugau und Niederwürschnitz finden sich in Abbildung 38

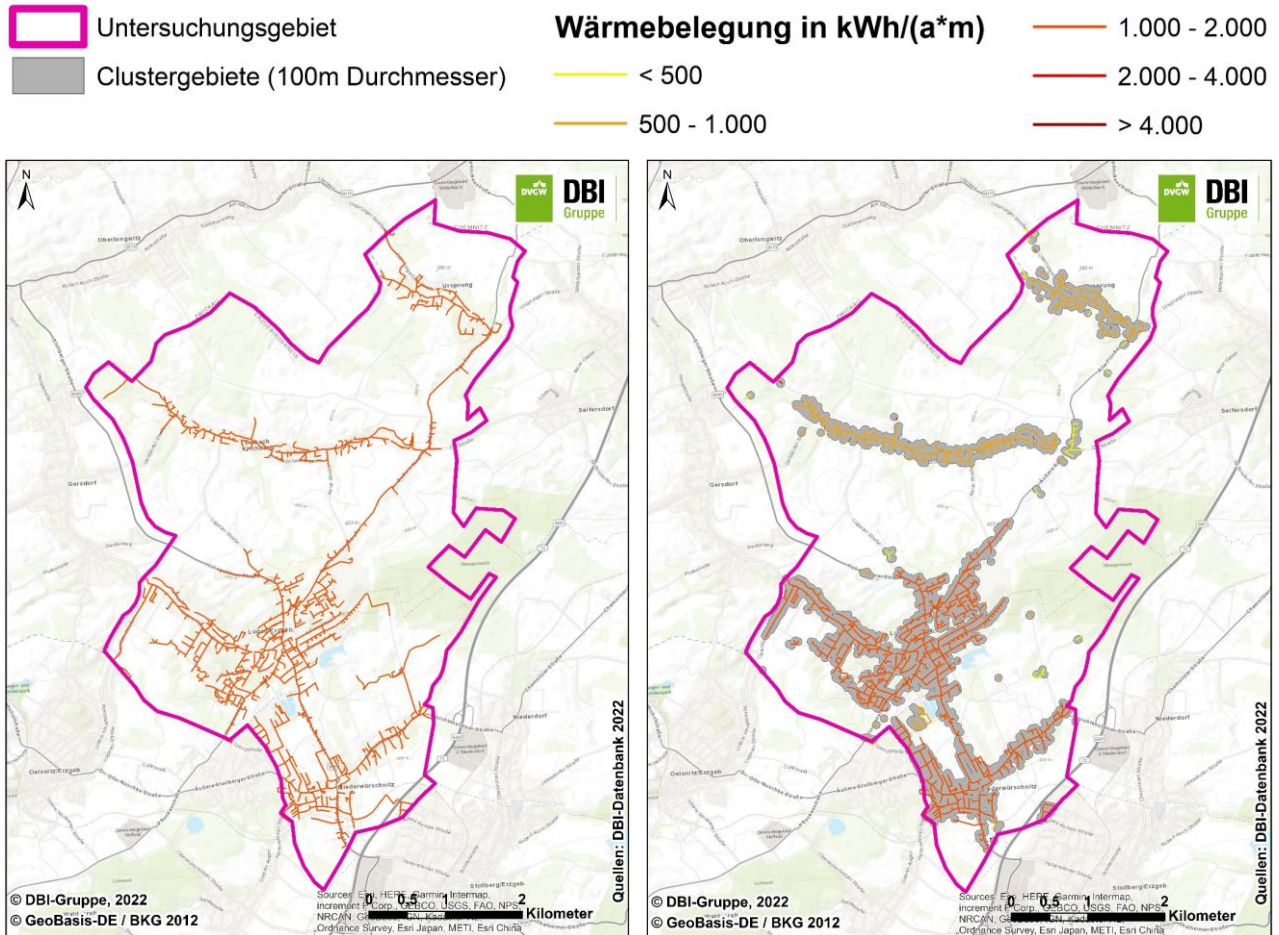
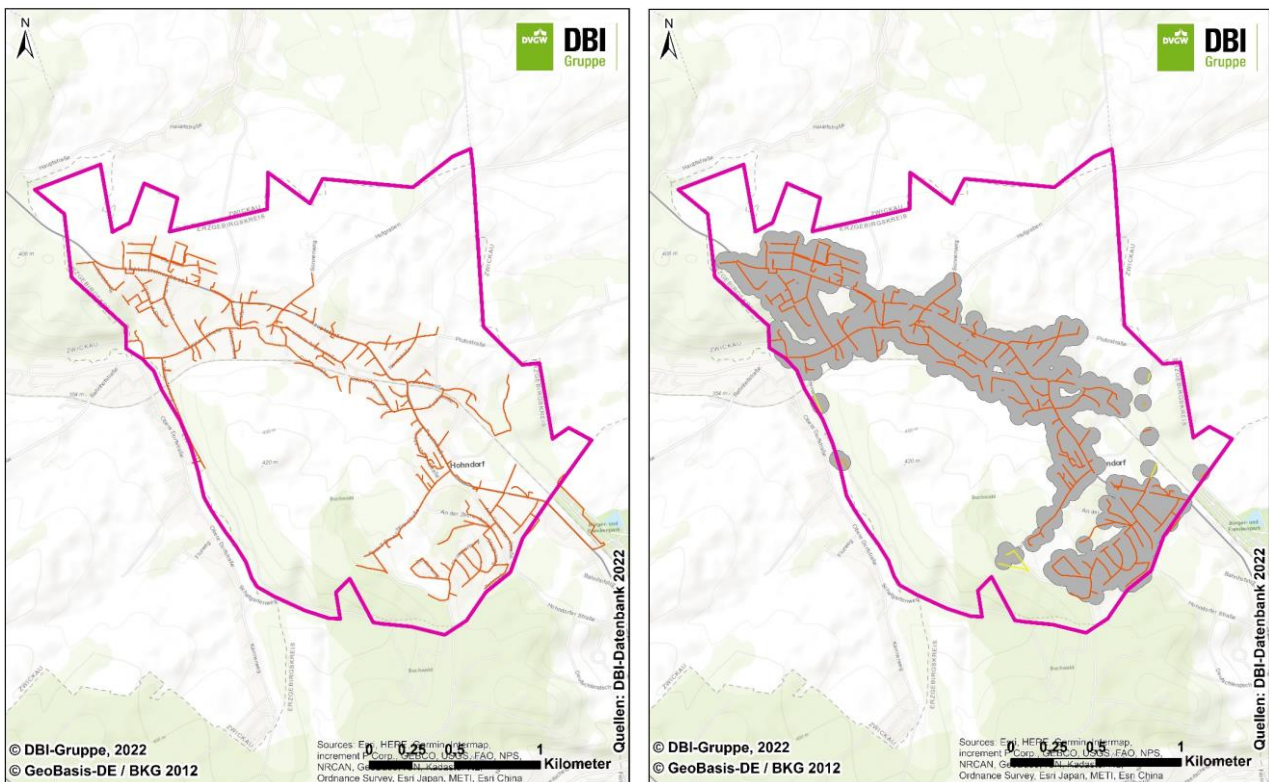
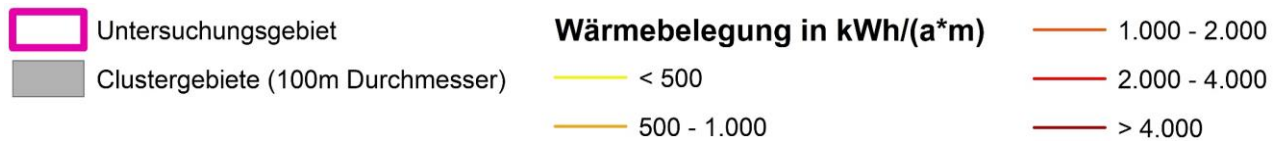


Abbildung 38: Kartografische Veranschaulichung der netzgebundenen Versorgungsanalyse in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau und Niederwürschnitz

Die Grobtrassierung und Netzanalyse in der Verwaltungsgemeinschaft Lugau-Niederwürschnitz hat gezeigt, dass eine vollständige Netzversorgung grundsätzlich möglich ist (Abb. links). Bei dieser werden über **3.000 Adresspunkte** aus dem Wohn- und Nichtwohnbereich zu einem Gesamtnetz verbunden. Dieses hypothetische Netz würde das gesamte Gebiet versorgen, was eine **Netzlänge von 87,1 km** zur Folge hätte. Die **Wärmebelegung** im Netz, d.h. die abgesetzte Wärmemenge pro Jahr und Meter Leitung, liegt **1.044 kWh/(m*a)**. Der Kältebedarf, der zusätzlich aufgrund der angeschlossenen Abnehmer noch absetzbar wäre, liegt bei 6,5 GWh/a – dieser ist jedoch irrelevant für die Netzauslegung und Modellierung. Erst bei einer Detailplanung sollte dieser berücksichtigt werden. Zusätzlich konnten verschiedene Abnehmercluster (Abb. rechts) identifiziert werden. Diese wurden entsprechend der räumlichen Nähe der einzelnen Gebäude erstellt. (maximaler Abstand zweier Gebäude: 100 m, um demselben Cluster zugeordnet zu werden). Innerhalb dieser Cluster wurden die modellierten Wärmenetze neu bewertet, sodass sich Gebiete mit höheren und geringeren Wärmebelegungen als Teil-Netze des Gesamtnetzes ergeben. Diese sind durch die gelbe (geringe) bzw. dunkelrote (höhere) Einfärbung der rechten Abbildung erkennbar. Ebenso wird erkennbar, welche Gebiete sich vermutlich nicht über ein großflächiges Wärmenetz versorgen lassen (einzelne Abnehmer, nicht verbundene Cluster) oder, wo der Fokus auf ein zwar lohnendes, aber kleines, abgetrenntes Wärmenetz gerichtet werden sollte. Eine tabellarische Auswertung kann dem Abschnitt 2.4.7 entnommen werden. Die Cluster-Analysen sowie Trassierungen bilden die Basis, um in Kap.4 lukrative Standorte zu identifizieren.

2.4.5 Auswertung für das Gemeindegebiet Hohndorf

Die Ergebnisse der Netz- und Clusteranalysen für die Gemeinde Hohndorf finden sich in Abbildung 39



Netzanalyse zur Komplettversorgung
der Gemeinde

Identifikation von Abnehmerclustern in
der Gemeinde

Abbildung 39: Kartografische Veranschaulichung der netzgebundenen Versorgungsanalyse in der Gemeinde Hohndorf

Die Grobtrassierung und Netzanalyse in Hohndorf hat gezeigt, dass eine vollständige Netzversorgung grundsätzlich möglich ist (Abb. links). Bei dieser werden über **1.000 Adresspunkte** aus dem Wohn- und Nichtwohnbereich zu einem Gesamtnetz verbunden. Dieses hypothetische Netz würde das gesamte Gemeindegebiet versorgen, was eine **Netzlänge von 24,1 km** zur Folge hätte. Die **Wärmebelegung** im Netz, d.h. die abgesetzte Wärmemenge pro Jahr und Meter Leitung, liegt bei **1.238 kWh/(m*a)**. Der Kältebedarf, der zusätzlich aufgrund der angeschlossenen Abnehmer noch absetzbar wäre, liegt bei 1,0 GWh/a – dieser ist jedoch irrelevant für die Netzauslegung und Modellierung. Bei einer Detailplanung sollte dieser jedoch berücksichtigt werden. Zusätzlich konnten verschiedene Abnehmercluster (Abb. rechts) identifiziert werden. Diese wurden entsprechend der räumlichen Nähe der einzelnen Gebäude erstellt. (maximaler Abstand zweier Gebäude: 100 m, um demselben Cluster zugeordnet zu werden). Innerhalb dieser Cluster wurden die modellierten Wärmenetze neu bewertet, sodass sich Gebiete mit höheren und geringeren Wärmebelegungen als Teil-Netze des Gesamtnetzes ergeben. Diese sind durch die gelbe (geringe) bzw. dunkelrote (höhere) Einfärbung der rechten Abbildung erkennbar. Ebenso wird erkennbar, welche Gebiete sich vermutlich nicht sinnvoll über ein großflächiges Wärmenetz versorgen lassen (einzelne Abnehmer, nicht verbundene Cluster) oder, wo der Fokus auf ein zwar lohnendes, aber kleines, abgetrenntes Wärmenetz gerichtet werden sollte. Eine tabellarische Auswertung kann dem Abschnitt 2.4.7 entnommen werden. Die Cluster-Analysen sowie Wärmenetztrassierungen bilden die Basis, um in Kapitel 4 besonders lukrative Standorte zu identifizieren.

2.4.6 Auswertung für das Gemeindegebiet Gersdorf

Die Ergebnisse der Netz- und Clusteranalysen für die Gemeinde Oelsnitz/Erzgeb. finden sich in Abbildung 40

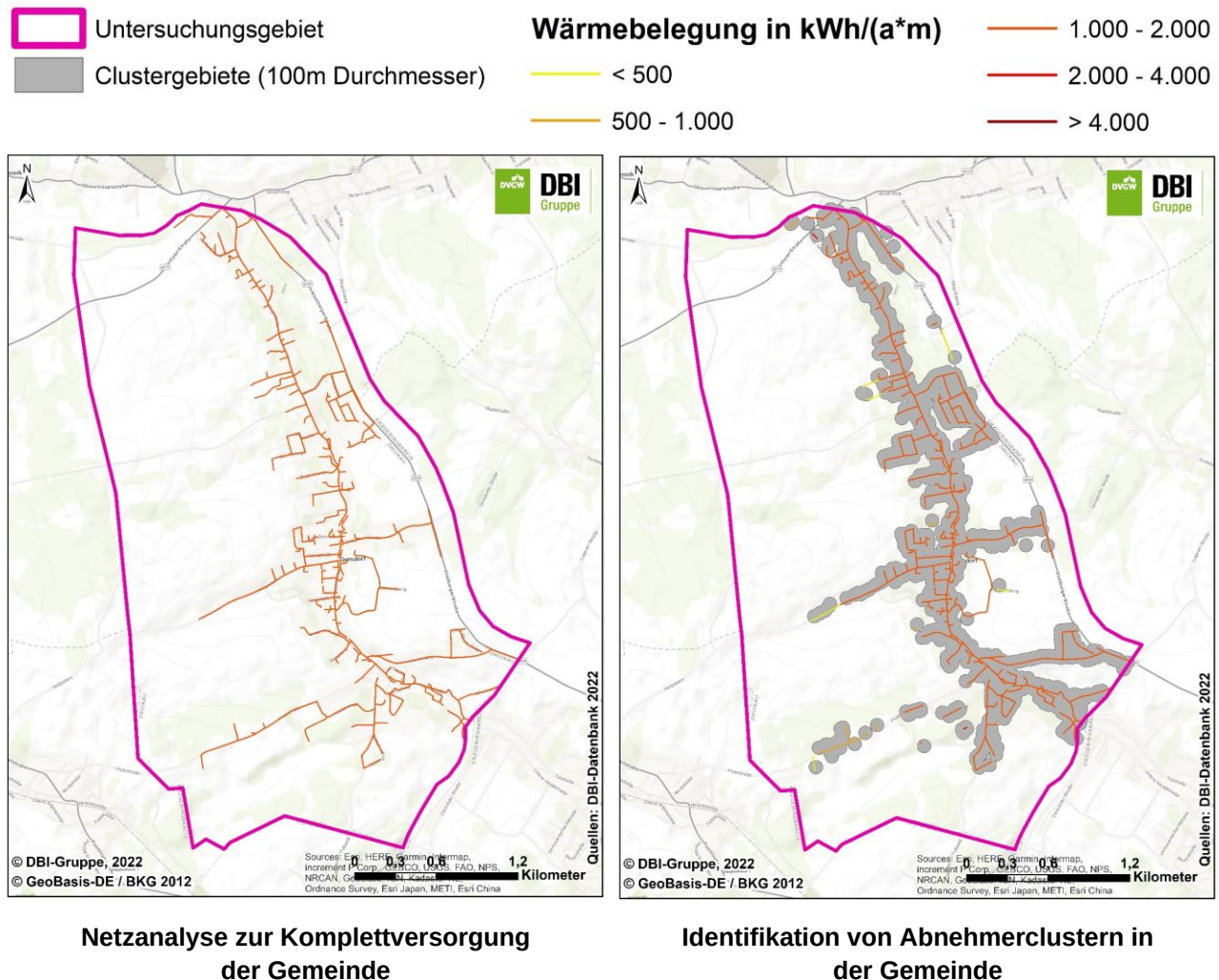


Abbildung 40: Kartografische Veranschaulichung der netzgebundenen Versorgungsanalyse in der Gemeinde Gersdorf

Die Grobtrassierung und Netzanalyse in Gersdorf hat gezeigt, dass eine vollständige Netzversorgung grundsätzlich möglich ist (Abb. links). Bei dieser werden über **1.000 Adresspunkte** aus dem Wohn- und Nichtwohnbereich zu einem Gesamtnetz verbunden. Dieses hypothetische Netz würde das gesamte Gemeindegebiet versorgen, was eine **Netzlänge von 285 km** zur Folge hätte. Die **Wärmebelegung** im Netz, d.h. die abgesetzte Wärmemenge pro Jahr und Meter Leitung, liegt bei **1.129 kWh/(m*a)**. Der Kältebedarf, der zusätzlich aufgrund der angeschlossenen Abnehmer noch absetzbar wäre, liegt bei 0,8 GWh/a – dieser ist jedoch irrelevant für die Netzauslegung und Modellierung. Bei einer Detailplanung sollte dieser jedoch berücksichtigt werden. Zusätzlich konnten verschiedene Abnehmercluster (Abb. rechts) identifiziert werden. Diese wurden entsprechend der räumlichen Nähe der einzelnen Gebäude erstellt. (maximaler Abstand zweier Gebäude: 100 m, um demselben Cluster zugeordnet zu werden). Innerhalb dieser Cluster wurden die modellierten Wärmenetze neu bewertet, sodass sich Gebiete mit höheren und geringeren Wärmebelegungen als Teil-Netze des Gesamtnetzes ergeben. Diese sind durch die gelbe (geringe) bzw. dunkelrote (höhere) Einfärbung der rechten Abbildung erkennbar. Ebenso wird erkennbar, welche Gebiete sich vermutlich nicht sinnvoll über ein großflächiges Wärmenetz versorgen lassen (einzelne Abnehmer, nicht verbundene Cluster) oder, wo der Fokus auf ein zwar lohnendes, aber kleines, abgetrenntes Wärmenetz gerichtet werden sollte. Eine tabellarische Auswertung kann dem Abschnitt 2.4.7 entnommen werden. Die Cluster-Analysen sowie Wärmenetztrassierungen bilden die Basis, um in Kapitel 4 besonders lukrative Standorte zu identifizieren.

2.4.7 Zusammenfassung und Vergleich der netzgebundenen Versorgungsmöglichkeiten

In nachfolgender Tabelle 12 werden je Untersuchungsgebiet die Analysen zu den Versorgungsclustern und den Parametern einer hypothetischen Vollversorgung zusammenfassend gegenübergestellt und ausgewertet.

Tabelle 12: Übersicht über die identifizierten Versorgungscluster und Vergleich der Parameter bei einer hypothetischen Vollversorgung der Gemeinde via Wärmenetzen

	Oelsnitz/Erzgeb	Verwaltungsgem. Lugau/Erzgeb.	Hohndorf	Gersdorf
keine Cluster (Einzelabnehmer)	18 Abnehmer	13 Abnehmer	4 Abnehmer	12 Abnehmer
Cluster 2 bis 5 Abnehmer	16 Cluster	15 Cluster	4 Cluster	6 Cluster
Cluster 6 bis 25 Abnehmer	5 Cluster	5 Cluster	keine Cluster	3 Cluster
Cluster 26 bis 100 Abnehmer	4 Cluster	1 Cluster	keine Cluster	keine Cluster
Cluster 101 bis 250 Abnehmer	2 Cluster	1 Cluster	1 Cluster	keine Cluster
Cluster 251 bis 1.000 Abnehmer	2 Cluster	2 Cluster	1 Cluster	keine Cluster
Cluster 1.001 bis 2.500 Abnehmer	1 Cluster	1 Cluster	keine Cluster	1 Cluster
Cluster > 2.500 Abnehmer	keine Cluster	keine Cluster	keine Cluster	keine Cluster
Anzahl Abnehmer bei hypothetischer Vollversorgung	3.346	3.021	1.052	1.255
Netzlänge bei hypothetischer Vollversorgung [m]	90.519	87.128	24.137	28.521
Wärmebelegung bei hypothetischer Vollversorgung [kWh/(m*a)]	1.114	1.044	1.238	1.129
zugrunde liegende modellierte Wärmemenge [kWh/a]	100.869.730	90.979.592	29.885.010	32.204.806
zusätzlich absetzbare modellierte Kältemengen [kWh/a]	4.334.985	6.571.980	1.059.465	799.180

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass es in jeder Gemeinde bzw. Verwaltungsgemeinschaft genügend Abnehmer in räumlicher Nähe gibt, die sich zu einem Versorgungscluster zuordnen und damit netzgebunden versorgen lassen. So existieren in jedem Gebiet mindestens ein Cluster, das entweder von 1.001 bis 2.500 Abnehmer beinhaltet oder von 251 bis 1.000 Abnehmer fasst. Hierbei zeigt sich, dass trotz der ländlichen Prägung des Gebietes die einzelnen Energieabnehmer und Gebäude des Wohn- und Nichtwohnsektors dennoch nah genug beieinander sind, um über gemeinsame Energieversorgungskonzepte nachzudenken. Für den ländlichen Raum lässt sich als Richtwert für eine netzgebundene Versorgung ein Abstand von 50 m pro Anschlussnehmer benennen, der bestenfalls nicht unterschritten werden sollte. Dies konnte durch die Modellierung von Versorgungsclustern, wo der maximale Abstand zweier Gebäude höchstens 100 m betragen darf, um demselben Cluster zugeordnet zu werden, bereits in erster Instanz abgebildet werden.

Eine Besonderheit der netzgebundenen Analyse zeigt sich ebenfalls in der Auswertung der Netzparameter für die hypothetisch modellierte Vollversorgung der gesamten Gebiete. Selbst bei einer vollständigen netzgebundenen Versorgung, d.h. auch der am weitesten entfernten Gebiete, sind die modellierten Wärmebelegungen stets vierstellig. In Hohndorf nähert sich der Wert sogar der für konventionelle Wärmenetze (keine kalten Nahwärmenetze, sondern Wärmenetze der dritten, ggf. vierten Generation, vgl. Kapitel 2.4.1) geeigneten Schwelle von 1.500 kWh/(m*a) an, ab der ein Betrieb von Wärmenetzen wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Bei Energienetzen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien bzw. Anergienetzen sind Wärmenetze auch bereits ab einer Belegung von 500 kWh/(m*a) bis 800 kWh/(m*a) grundsätzlich effizient und wirtschaftlich, da die Wärmeverluste weniger ins Gewicht fallen. Das bedeutet, dass das gesamte Gebiet somit grundsätzlich interessant für eine Versorgung mit kalter Nahwärme ist, sofern die erneuerbaren Energiequellen zur Verfügung stehen. Bei einer weiteren Eingrenzung der Versorgungsgebiete auf Basis der untertägigen Verfügbarkeit sowie der Clusteranalysen können für kleinere Gebiete höhere Wärmebelegungen erreicht werden, sodass die Wirtschaftlichkeit aufgrund der geringeren spezifischen Kosten pro Anschlussnehmer weiter steigt.

Bei der Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen ebenso entscheidend, ist die mittlere Leistungsdichte, das heißt das Verhältnis der Anschluss-Nennleistung zu der Anzahl der Anschlussnehmer, welche am Wärmenetz angeschlossen sind. Dies wird über die Ausnutzungsdauer bzw. Vollbetriebsstunden abgeschätzt – als Richtwert für konventionelle Fernwärme gelten hier etwa 1.800 h/a, sofern mindestens 15 kW über ein gemeinsames Versorgungsnetz bereitgestellt werden. Bei Grubenwassergeothermieranlagen werden in jedem Falle sowohl die Vollbetriebsstunden pro Jahr, als auch die Anschlussleistung über diesen Werten liegen, da die geothermische Energie des Untergrundes deutlich mehr Wärmeleistung bereithält. Insbesondere für das Revier Lugau-Oelsnitz mit Grubenwassertemperaturen von teilweise über 20 °C, können sich Anschlussleistungen im MW-Bereich ergeben, was eine Vielzahl von Abnehmern über ein Netz verbinden kann. Nähe Analysen dazu finden sich im Kapitel 3 bei der Analyse des untertägigen energetischen Potentials.

Im Anschluss an diese kann auf Basis der durchgeführten Analysen über Tage eine Gebietsidentifikation durchgeführt werden, wo ein besonderes Hauptaugenmerk bzgl. der Versorgung mit Grubenwassergeothermie gerichtet werden sollte.

3 Analyse des untertägigen energetischen Potentials

3.1 Metastudie und Datenakquise zu bestehenden Messdaten

3.1.1 Zusammenfassung bereits bestehender Studien

In Sachsen besteht aufgrund der historischen Prägung durch den Bergbau ein einzigartiger Standortvorteil, der bei der Integration von erneuerbaren Energien eine große Rolle spielen kann.

Diese Reviere wurden in den vorangegangenen Projekten GeoMAP (SAB-Antragsnummer: 100348899) und VODAMIN II (SAB-Antragsnummer: 100304269) betrachtet und das Revier Lugau/Oelsnitz wurde dabei bereits etwas näher bearbeitet. Schwerpunkte waren zum einen das Erstellen einer numerischen Hebungsprognose für das Praxisobjekt Lugau/Oelsnitz zur großräumigen Abschätzung der flutungsinduzierten Hebungen. Dabei wurde ein kontinuumsmechanischer, elastischer Berechnungsansatz entwickelt, welcher sich für Bergwerke des Altbergbaus mit begrenzter Datenlage, sowie für komplexe Bergwerksgeometrien und geologische Verhältnisse eignet. Zum anderen wurden Handlungsempfehlungen zu geotechnischen Fragestellungen von Bergbaufolgelandschaften anhand von numerischen Simulationen von Nachbergbauproblemen erstellt. Darin wurden auf Basis der durchgeführten Simulationen und weiteren Recherchen mögliche Nachbergbau-Probleme aufgezeigt. Es wurde dokumentiert, welche numerischen Methoden anwendbar sind und welche Daten benötigt werden, um mittels verschiedener Monitoringverfahren Daten für eine Kalibrierung erheben zu können. Außerdem ist in den jeweiligen Handlungsempfehlungen ersichtlich, welche Ergebnisse von numerischen Simulationen für die lokale Infrastruktur erwartet werden können. Aus diesen Vorbetrachtungen in Zusammenhang mit den örtlichen Gegebenheiten, konnte ein einzigartiger Standortvorteil erkannt werden, der bei der Integration von Erneuerbaren Energien eine große Rolle spielen kann. Zudem wurde im Rahmen des Projektes GeoMAP ein mobiler Wärmepumpenversuchsstand für den In-situ-Test von Wärmeübertrageroberflächen entwickelt, die im Projekt MareEn an einem Standort in Hohndorf eingesetzt werden soll.

Zukünftig ist es für geeignete Gemeinden in Sachsen interessant, erneuerbare Energien durch die Nutzung des geothermischen Potentials von Grubenwässern bereitzustellen. Viele dieser Wässer, müssen durch eine Wasserhaltung nach der Schließung von Bergwerken über Tage gepumpt werden oder über Entwässerungstollen abgeführt werden. Damit soll der Austritt und die Überflutung von ganzen Liegenschaften über Tage verhindert werden. Die Nachsorgemaßnahmen verursachen dabei jährlich Kosten. Außerdem können auch durch die Flutung des Altbergbaus entstandene unterirdische Reservoirs als Energiequelle dienen. Das Grubenwasser kann dabei zukünftig vermehrt als Energiequelle zur regenerativen Gebäudekonditionierung genutzt werden. Dieses stellt aufgrund der ganzjährigen und witterungsunabhängigen Verfügbarkeit bei konstanten Wassertemperaturen eine grundlastfähige Energiequelle dar. Dadurch kann aus der kostenintensiven Ewigkeitsaufgabe ein ökonomischer und ökologischer Synergieeffekt zur erneuerbaren Gebäudekonditionierung entstehen.

Eine nachhaltige Energieversorgung bedingt jedoch neben der energetischen Verfügbarkeit unter Tage auch ein entsprechendes Abnahmepotential über Tage. Im folgenden Punkt werden die untertägigen Potentiale und Möglichkeiten beschrieben. Diese sind unabhängig von den Betrachtungen des Projektpartners DBI GUT erfolgt, welche im Kapitel 2 ersichtlich sind. Analysen, die die untertägige standortgenaue Grubenwasserverfügbarkeit mit den obertägigen standortgenauen Gebäudeenergiebedarfen zusammenführen, können in diesem Bericht dem Kapitel 5.2 entnommen werden.

Die untertägigen Potentiale, die mit dem bergbaulichen Einfluss klar zusammenhängen, wurden in der Vergangenheit in ersten Studien erkannt und teilweise betrachtet. Im Folgenden wird ein Überblick über diese bestehenden Studien gegeben, die in die Bearbeitung des Projektes MareEn integriert wurden:

2006 wurde im Auftrag des LfULG eine erste Studie zur „Einschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit ausgewählter Schächte im Grubenrevier Lugau/Oelsnitz aus Sicht des Grubenwasserwiederanstieges“ durch die Deutsche Montan Technologie GmbH (DMT) durchgeführt [39].

2010 veröffentlichte das LfULG einen ersten Untersuchungsbericht zur „Geologie und Bergbaufolgen im Steinkohlerevier Lugau/ Oelsnitz“, welcher einen aktuellen Ist-Zustand des Reviers veranschaulichte [40].

2014 veröffentlichte das LfULG das Heft 15/2014 „Verbesserung der Wassergüte in Bergbaugebieten“, in dem das Revier Lugau/ Oelsnitz mit den angrenzenden Gewässern, Haldensickerwässern sowie dem Grubenwasser betrachtet wurde [41].

2015 wurde im Auftrag der Stadt Oelsnitz/Erzgebirge eine Potentialstudie zur „Entnahme von aufsteigendem Grubenwasser aus Solequellen des ehemaligen Steinkohlenreviers Lugau-Oelsnitz und Betrachtungen ökologisch nachhaltiger Verwendungsmöglichkeiten im Falle einer Förderung“ durch die Deutsche Montan Technologie GmbH (DMT) durchgeführt [42].

2019 kam es zu einer weiteren Veröffentlichung mit dem Titel „Visualisierung und Prognostizierung von Bergbaufolgen am Beispiel des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz (Sachsen)“ [43].

2020 wurden die Ergebnisse des EU-Projekts Vita-Min, mit dem Titel „Kompendium wirtschaftlicher, umweltgerechter und innovativer Lösungsansätze und Verfahren für das Bergbaufolgemanagement sowie den aktiven Bergbau in Sachsen und der Tschechischen Republik“ veröffentlicht, die u. a. den Wasserchemismus des Reviers Lugau/Oelsnitz betrachteten [44].

Neben den Veröffentlichungen befasst sich aller zwei Jahre die Bergbaukonferenz der FLOEZ (Future for Lugau-Oelsnitz-Zwickau) mit den Themen des ehemaligen Steinkohlereviers Lugau/Oelsnitz sowie dem benachbarten Revier Zwickau. In diesem werden unter anderem die Sanierungsfortschritte, präventive Maßnahmen zur Bergsicherung sowie der aktuelle Grubenwasseranstieg in Vorträgen öffentlich vorgestellt und diskutiert.

Zur Erfassung der Grundlagendaten wurde darüber hinaus verschiedene Gespräche mit Beteiligten Projektpartnern innerhalb der Gemeinden, wie Bürgermeistern sowie Amtsleitern geführt. Zudem wurden Treffen mit dem Bergbaumuseum Oelsnitz abgehalten, wobei Archivmaterial gesichtet und Informationen beschafft werden konnten.

Zusammenfassung der bestehenden Analysen

Das Holraumvolumen des ehemaligen Steinkohlereviers füllt sich nach Messungen des LfULG planmäßig mit Grubenwasser, wobei eine vollständige Flutung bis ca. 2032 abgeschlossen sein wird. Durch die Errichtung zweier Grubenwassermessstellen (GRWM) in Oelsnitz (GRWM 1) und in Gersdorf (GRWM 2) kann der Anstieg des Wassers im Grubengebäude verifiziert werden. In den Berichten wurde vermehrt von einem gleichbleibenden Anstieg, aber auf unterschiedlichem Niveau im West- und Ostfeld gesprochen. Aus aktuellen Prognosen und Gesprächen lässt sich schließen, dass das Grubengebiet hydraulisch miteinander verbunden ist und es zu einem angleichen der Pegel kommen wird (*Korrespondenz mit dem LfULG). In diesem Zusammenhang weisen die unterschiedlichen Grubenfelder eine differenzierte Salinität auf, dessen Gründe zurzeit nicht klar definiert werden können. Ebenso sind die Tiefenzuläufe nicht eindeutig, alleinig die Aussage ist bestätigt, dass das Westfeld hoch salinare und das Ostfeld gering salinare Wässer beinhaltet. Zu eindringenden Oberflächenwässern wurde in den Berichten noch keine Aussage getroffen [40].

Die getätigten Forschungen betrachteten vorwiegend die Nutzung des Grubenwassers als Solequelle für verschiedene Anwendungen. Die geothermische Nutzung des Grubenwassers ist einzig im Bericht DMT 2015, neben der Nutzung als Sole enthalten. Hierzu wurden verschiedene Varianten aufgetan, um das hoch mineralisierte Wasser zu heben und einer Aufbereitung zuzuführen. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Beispiele für Bohrungen im Zusammenhang mit der Soleförderung bzw. zusätzlich einer Regulierung des Flutungswasserspiegels auf deren Rahmenbedingungen untersucht wurden. Bohrtiefen, Grundstückseigenschaften, Kosten und verschiedene Soleleitungen wurden untersucht und in diesem Bericht genau beziffert [42].

Viele Grubenwässer müssen durch eine Wasserhaltung nach der Schließung von Bergwerken über Tage gepumpt werden oder über Entwässerungsstollen abgeführt werden. Die Nachsorgemaßnahmen verursachen dabei jährlich Kosten. Außerdem können auch durch die Flutung des Altbergbaus entstandene unterirdische Reservoirs als Energiequelle dienen. Das Grubenwasser kann zukünftig vermehrt als Energiequelle zur regenerativen Gebäudekonditionierung genutzt werden. Dieses stellt aufgrund der ganzjährigen und witterungsunabhängigen Verfügbarkeit bei konstanten Wassertemperaturen eine grundlastfähige Energiequelle dar. Dadurch kann aus der kostenintensiven Ewigkeitsaufgabe ein ökonomischer und ökologischer Synergieeffekt zur erneuerbaren Gebäudekonditionierung entstehen.

Grubenwassergeothermie zum Heizen und Kühlen findet sich in den vorliegenden Studien nicht. Allein der Bericht des LfULG's aus dem Jahr 2010 betrachtete die geothermische Nutzung des Grubenwassers zum Heizen. Hierbei wurden neun verschiedenen Versorgungsgebiete im Revier ausgemacht und betrachtet. Aus diesem Bericht wurde jedoch keine Methodik ersichtlich. Allein die Bohrtiefen und ein zum Vergleich herangezogener Fernwärmepreis von 90-110 €/MWh ist veröffentlicht [40].

Aktuelle Prognosen und Vorhersagen zeigen auf, dass sich die Wasserstände in dem westlichen und östlichen Grubenbereichen angleichen. Die in den Berichten des LfULG's benannten Grubenwasseranstiegsszenarien können für die folgende Arbeit grundlegend angewendet werden. Für diese Überwachung sind die beiden Grubenwassermessstellen in Oelsnitz und Gersdorf ausschlaggebend.

Rahmenbedingungen die für diese Betrachtung wichtig sind und aus den beschriebenen Berichten entnommen wurden, werden nachfolgend aufgelistet:

- Wasserhaltungsmenge: 27,5 bis 32,5 m³/h
- Grubenwassertemperatur in einer Tiefe von 300 NHN ist 19 °C
- Westfeld hoch mineralisiert, Ostfeld gering mineralisiert
- Standsicherheit der Strecken ist im ordovizischen Phyllitbereich gegeben, was eine gute hydraulische Kommunikation zwischen verschiedenen Revierbereichen schließen lässt.

Diese Eckpunkte und Grundlagen bestimmen die zu bearbeitende Fragestellung im Projekt, welche sich im Kern mit folgenden Sachverhalten auseinandersetzen:

- Die Entwicklung eines angepassten effizienten Wärmeübertragers, auf Basis von In-Situ-Messergebnissen → Kapitel 3.2
- Die Erfassung der aktuellen energetischen Potentiale des Steinkohlereviers Lugau/ Oelsnitz → Kapitel 3.2
- Daraus und mit den Daten des DBI GUT aus Kapitel 2.4 resultierend die Auslegung möglicher Wärme- und Kältenetze zur Gebäudeversorgung → Kapitel 5.2
- Darauf Aufbauend erfolgt eine detaillierte Betrachtung von ausgewählten Standorten → Kapitel 5.2
- Schlussendlich werden Konzepte zur saisonalen Speicherung von Energie im Grubengebäude erarbeitet → Kapitel 5.3

3.1.2 Beschreiben der Bedingungen im Revier

Das im Südwesten Sachsens gelegene Steinkohlerevier Lugau/Oelsnitz befindet sich zwischen den Städten Zwickau und Chemnitz. Auf rund 25 km² umfasst es die Städte Lugau und Oelsnitz, sowie die Gemeinden Hohndorf, Gersdorf und Niederwürschnitz. In diesem Gebiet begann 1844 die Kohleförderung. Zwischen 1859 und 1971 wurden rund 142 Mio. t verwertbare Kohle gefördert. In dieser Abbauperiode wurden mehr als 100 Tagesschächte abgeteuft, wobei der Schacht Vereinigtfeld III zwischenzeitlich den europäischen Teufenrekord mit 1.200 m innehatte. 1968 wurde auf Beschluss der DDR-Regierung die schrittweise Einstellung der Kohleförderung vollzogen. Nach Schließung des letzten Schachts 1971 wurden die Sicherungsarbeiten und Schachtverfüllungen noch bis 1975 fortgesetzt. Seit dieser Zeit kommt es zur Flutung des insgesamt 152 Mio. m³ großen Hohlraums und zu einem stetigen Anstieg des Flutungspegels unter Tage. Aufgrund fehlender Monitoring- und Eingreifmaßnahmen, wie sie heutzutage bei Grubenschließungen eingerichtet

werden, waren bis Anfang des Jahrtausends keine Daten zum aktuellen Flutungsstand vorhanden. Weiterhin bestand keine Möglichkeit, aktiv auf den Flutungsverlauf Einfluss zu nehmen [40]. Daher wurde 2002 ein vom Freistaat Sachsen und den betroffenen Kommunen erarbeiteter Maßnahmenkatalog zur Erkundung und Gefahrenabwehr der vom Steinkohlebergbau verursachten Schäden in Kraft gesetzt. Dieser beinhaltete u.a. von 2003 bis 2004 die Errichtung einer Grubenwassermessstelle (GRWM) in der Nähe des Albert-Jacob-Schachts in Oelsnitz (633 m unter GOK Endteufe) zum Monitoring des Flutungsstands und zur Überprüfung der Wasserqualität des Grubenwassers. Eine zweite GRWM wurde 2014 im Kaisergrube II Schacht in Gersdorf errichtet (674 m unter GOK Endteufe), welche sich auf die Datenerfassung des Flutungsstands konzentriert. In Anhang B.1 ist die Lage beider GRWM abgebildet [45]. Die Bohrungen beider GRWM wurden dabei nicht im offenen Streckensystem, sondern im Alten Mann (dem verbrochenen Abbaubereich des karbonischen Kohleflöz) niedergebracht [42].

Seit der Einstellung des Bergbaus 1971 kommt es zur erwähnten unkontrollierten Flutung, wobei die Flutungsmenge durch Grundwasserneubildung, im erweiterten Austrittsbereich des Karbons im Schnitt etwa 30 m³/h beträgt. Zusätzlich existiert ein Tiefenzulauf von etwa 53,6 m³/h. Dieser wird aber mit steigendem Flutungspegel abgedrosselt. Beim Erreichen des Oberflächenniveaus des Flutungspegels ist der Tiefenzulauf vollständig abgedrosselt. Der zu erwartende Austrittsvolumenstrom des Grubenwassers beläuft sich somit auf die Grundwasserneubildung von ca. 30 m³/h. Dieser Volumenstrom bezieht das Jahresmittel und ist jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Nachfolgende verdeutlicht Abbildung 41 den zeitlichen Verlauf der Flutung [42].

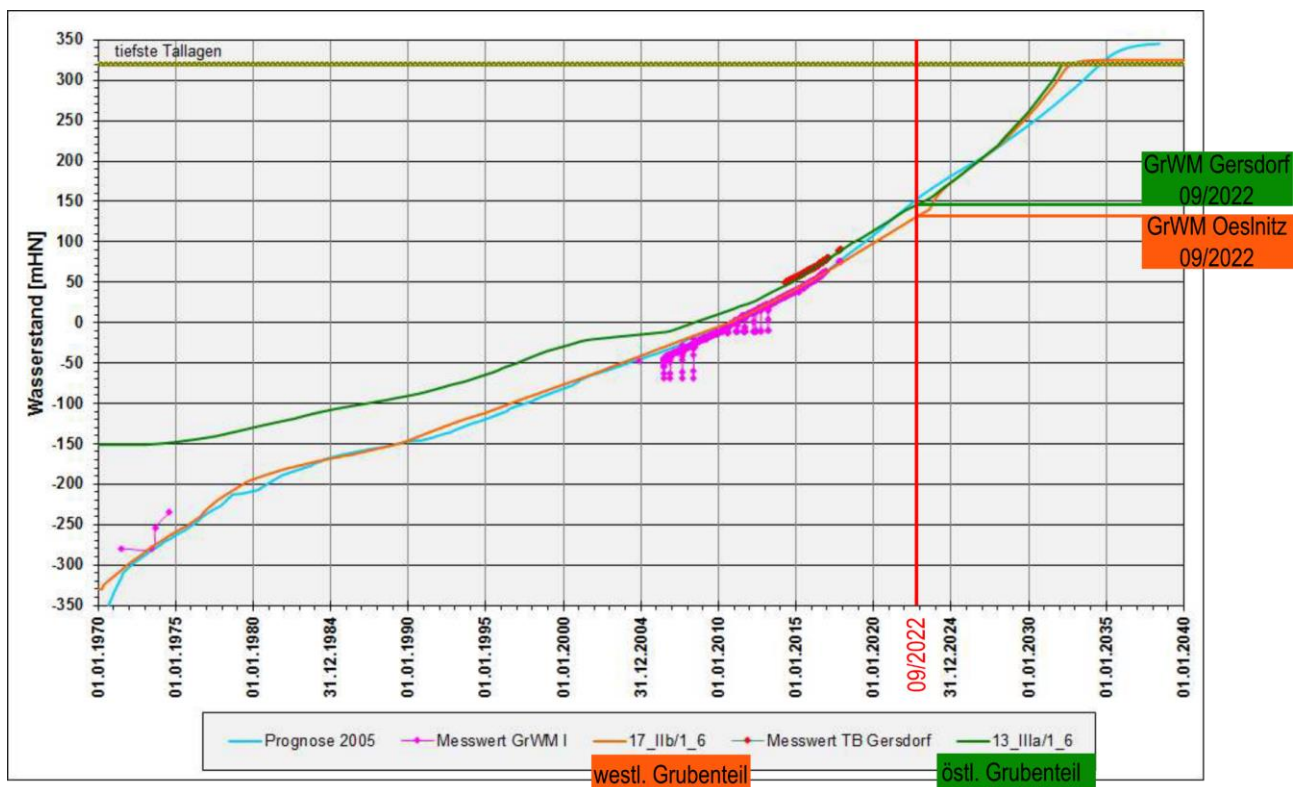


Abbildung 41: Grubenwasseranstieg seit 1970 und Vergleich mit Messdaten der Grubenwassermessstellen (GRWM) [26]

Es zeigt sich, dass der Flutungsstand ca. im Jahr 2032 das Oberflächenniveau der tiefsten Tallage (+320 m NHN) erreicht und folgend bis +350 m NHN ansteigt. Ab diesem Zeitpunkt ist mit einem unkontrollierten Austritt an der Oberfläche zu rechnen. Es besteht aber momentan keine Notwendigkeit, die Flutung des Grubengebäudes zu unterbinden. Jedoch muss bei Erreichen des Flutungspegels von +300 m NHN eine gezielte Abführung des Grubenwassers erfolgen, für welche jetzt schon Maßnahmen geplant werden sollten. Das abzuführende Wasservolumen beträgt bei diesem Flutungsniveau im Jahresdurchschnitt ca. 30 m³/h. Die Daten der GRWM I validieren den prognostizierten Flutungsverlauf, jedoch könnten aufgrund einer gestörten

hydraulischen Verbindung die Ost- und Westbereiche des Reviers unterschiedlich schnell geflutet werden. Dabei würde das Ostrevier schneller geflutet, da hier der Hauptteil der Grundwasserneubildung vorzufinden ist und außerdem weniger bergbaubedingte Hohlräume existieren.

Eine unterschiedliche Flutung beider Reviere könnte folgende Auswirkungen haben [42]:

- schnellerer Austritt des Grubenwassers, da sich die meisten tiefen Tallagen im Ostbereich befinden
- salzärmeres und kühleres Grubenwasser im Ostrevier aufgrund der höheren Grundwasserneubildung
- keine Möglichkeit der ganzheitlichen Regulierung des Flutungspegels mit nur einer Bohrung
- Abbildung 41 zeigt den zeitlichen Verlauf bei Eintritt dieses Szenarios.

Da vergangene Untersuchungen nicht von einer hydraulischen Trennung der Grubenbereiche ausgingen, wurden Messwerte welche diese Entwicklung nahelegten erst durch die Inbetriebnahme der Grubenwassermessstelle in Gersdorf festgehalten. Das Wissen um den unterschiedlichen Wasseranstieg in beiden Grubenbereichen ist essentiell, um Eindämmungsmaßnahmen rechtzeitig und ortsbezogen vornehmen zu können

Geologische Gegebenheiten des Reviers

Das zu betrachtende geologische Gebiet befindet sich in einer langlebigen tiefenbruchartigen Struktur, die sich zwischen Wildenfels im Westen und Frankenberg im Osten erstreckt. Es wird als Zentralsächsisches Lineament bezeichnet. In dieser ehemaligen tektonisch aktiven Zone kam es zu Hebungs- und Senkungserscheinungen, wobei sich im Unterkarbon Schuttsedimente und im späten Unterkarbon Rotliegende Gesteine ablagerten. Diese charakterisieren dadurch einen Teil der Vorerzgebirgssenke. Verschiedene Sand- und Tonsteine bilden mit dem ummantelnden Rotliegenden das Grundgestein des Oberkarbons. Die Kohle tritt überwiegend in karbonatischen Ablagerungen auf und wurde vor allem aus den Schichtungen des Oberkarbons abgebaut [46].

Im Revier Lugau Oelsnitz ist das Rotliegende überwiegend im Untergrund anzutreffen, welches vorwiegend aus Quarz, Glimmerschiefer, Kieselschiefer und Phyllit, sowie weiterem Knollenstein besteht. Besonders Bereiche des orthovizischen Phyllits sind für weitere Betrachtungen in den Vordergrund zu stellen. In diesem Zusammenhang ist diese Gesteinsschicht im Untergrund als besonders standfest und verbruchsicher anzusehen.

Daraus kann für das Projekt geschlussfolgert werden, dass bergmännische Tätigkeiten in diesem Bereich wie z. B. Auffahrungen von Strecken und Schächten in diesem Gebiet stabil sind. Genaue Aufzeichnungen und Beschreibungen des Phyllits bzw. des Phyllitrückens sind in Felix et al. 2010 zu finden [40].

Auffahrungen, die nicht im orthovizischen Phyllit zu finden sind, können als weniger standsicher bewertet werden. In diesen Bereichen ist besonders der jeweilige Ausbau entscheidend, wie standsicher die Grubenbaue aufgefahren worden.

Verlauf des Steinkohleabbaus im Revier

Im Steinkohlerevier sind 101 Schächte archiv- und rischkundlich bekannt [44].

Die Kohleflöze im Revier fielen von Osten nach Westen in die Tiefe ab. In diesem Zusammenhang steht ebenso der zeitliche Abbauverlauf der Flöze, welche von Osten nach Westen erschlossen wurden. Dadurch begann der Abbau der Kohle im östlichen Bereich des Reviers bereits um 1844, sehr oberflächennah. Verschiedene Gesellschaften und Unternehmungen gründeten sich und bauten in „Kleinzechen“ vergleichbar mit denen des Ruhrgebiets die ersten Steinkohlen ab. Durch die Vereinzelung, sowie den kurzfristigen Aufschluss von Bergwerken in geschlossenen Abteilungen fehlen in diesem Bereich aus den Anfängen rischkundliche Aufzeichnungen der bergmännischen Unternehmungen. Aus diesem Grund befinden sich im Osten des Abbaugebiets noch eine wesentlich größere Anzahl alter, oberflächennaher Schächte, sogenannte

Bauernschächte, welche nicht näher erfasst sind [47].

Mit dem Fortschreiten des Bergbaus und der Entwicklung der Gesellschaften wurde begonnen von Schächten, Strecken und Abbauen risskundliche Aufzeichnungen zu erstellen. Zu den Hochzeiten des Bergbaus in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts erstreckte sich der Steinkohleabbau auf einer Gesamtstreckenlänge von rund 140 km. Das Strecken- und Tagesschachtnetz ist in den Abbildungen 26 und 27 dargestellt [48].

Es zeigt sich, dass sich das Streckennetz auf 6 Sohlen in unterschiedlicher Teufe konzentriert. Diese Sohlen können als hydraulische Wegstrecken angesehen werden. Das tiefergelegene westliche Grubenfeld ist durch die Pluto-Schacht-Verwerfung vom östlichen, höhergelegenen Grubenfeld abgegrenzt. Eine Verbindung beider Grubenfelder besteht über die -146 m Sohle und die +25 m Sohle. Aufgrund des steigenden Flutungspegels sind die beiden Grubenfelder über diese Sohlen hydraulisch miteinander verbunden [48].

Definition der Abbaumethode im Revier

Der Abbau der Steinkohle erfolgte durch verschiedene Gesellschaften wobei entsprechend unterschiedliche Hauptschächte aufgefahren wurden. Darunter zählen die Deutschlandschächte, Vereinsglückschächte, Kaiserin-Augusta-Schacht, sowie die Kaisergrubenschächte. Durch die unterschiedlichen Gesellschafter/Betreiber wurden die aufgefahrenen Bereiche unterschiedlich betrieben. Von Tages-Schächten, welche zur Bewetterung und zum Einbringen von Material, Personen und Infrastruktur dienten, wie auch der Ausfuhr von Kohle und Personal wurden im Weiteren die jeweiligen Strecken in die Abbaugebiete vorangetrieben. Der eigentliche Abbau in den Kohleflözen erfolgte unter dem sogenannten Bruchbau (Streb) - Abbaufahren.

Der Vortrieb gelang über eine Streichstrecke zum abzubauenen Kohleflöz. Ab diesem Punkt wurde Abschnittsweise mit Hilfe von Aufständering (Stempel) ein bestimmtes Volumen am Abbaustoß im Vortrieb abgebaut. Beim Vorrücken des Abbaustoßes wurde die Aufständering nach vorn mitgeführt. Im hinteren Bereich wurde die Aufständering entfernt, sodass sich das Deckgebirge setzen konnte. Die Senkungsprozesse führten in Oelsnitz zu Senkungen von bis zu 17,34 m. Es wurden verschiedene Verfahren zum Stabilisieren und Wiederauffüllen der aufgefahrenen Hohlräume verwendet. Als erste Methode ist der Handversatz zu nennen, in dem händisch transportierte Bruchsteine und Materialien in die Abbaue geschichtet wurden, bevor die Stempel entfernt wurden. Durch weitere technische Entwicklungen wurde im Folgenden das Blaßversatzverfahren angewandt. Mit Hochdruck wurden dadurch feine Materialien mit Hilfe einer entwickelten Torkretmaschine in die jeweiligen Hohlräume verbracht, die mittels Leinenwänden das Abrutschen der Stoffe vermied. Zusätzlich wurde das Spühlversatzverfahren ab 1901 bis zum Ende des Bergbaus eingesetzt, das mit dem Versatzverfahren im Revier Zwickau identisch ist. Dieses basiert auf dem Einbringen von Sand, sowie kleineren Tonschiefern in Verbindung mit Wasser, welches dadurch einen betonartigen Block ergibt. Diese drei verschiedenen Techniken wurden aufgrund der Senkungsschadenereignisse an der Oberfläche, um diese zu minimieren präferiert. Der Füllwirksamkeit (gefüllter Raum zu Resthohlraum) der Versatzarten ist nachfolgend spezifiziert [49]:

- Handversatz $\approx 60\%$
- Blaßversatz $\approx 60-80\%$
- Spühlversatz $\approx 80\%$

Aufgrund dieser Abbaumethode kann für das gesamte Revier geschlussfolgert werden, dass die Bereiche der abgebauten Kohleflöze weitestgehend verschlossen sind. Aufgrund der Wirksamkeit der Verfüllverfahren, in den Abbaugebieten, ist jedoch mit einem Resthohlraumvolumen zu rechnen. Aufgrund des sich setzenden Deckgebirges im rotliegenden Gestein, kann nicht davon ausgegangen werden, dass großflächig grubenwassergefüllte Hohlräume, in den Abbaugebieten existieren. Sind Abbauorte im Phyllit zu verorten, kann davon ausgegangen werden, dass weitere Bereiche mit Wasser geflutet sind und somit eine größere Wärmeübertragende Fläche zum Grundgestein existiert [47].

Strecken

Durch die Verfüllungen stehen die jeweiligen Abbauorte im Bereich des Grubengebäudes wie beschrieben nur bedingt zur thermischen Nutzung zur Verfügung. Dementsprechend ist die Betrachtung der Strecken in diesem Verlauf ein nächster Ansatzpunkt, um Hohlräume im Untergrund zu identifizieren, welche möglicherweise

wasserführend sind. Strecken sind horizontale, bergmännisch aufgefahrene Wegsamkeiten, die von abgeteuften Schächten ausgehend verlaufen. Diese Wegsamkeiten dienen hauptsächlich dem Erreichen der Kohleflöze, sowie dem Transport von verschiedenen Betriebsmedien bzw. dem Abtransport des Abbaumaterials. Darüber hinaus dienen „Querschläge“ oder „Richtstrecken“ zum Erreichen der Lagerstätte und der jeweiligen Abbauorte. Mit Erreichen der jeweiligen Abbaugebiete beginnen, wie im oberen Teil beschrieben, die nicht stationären Bereiche. Diese werden nach Ende des Abbaus verfüllt und verbrechen teilweise [50].

Für die weitere Untersuchung der thermischen Nutzung des Grubenwassers und der Wasserwegsamkeiten im Untergrund kann der folgende Schluss gezogen werden:

Strecken die im orthovizischen Phyllit erbaut worden sind, werden nach heutigem Kenntnisstand als intakt angesehen und weisen weiterhin die jeweiligen Ausbaugeometrien auf.

Strecken, welche im Rotliegenden Gestein erbaut worden sind, können nach aktuellem Stand als nicht vollständig intakt angesehen werden. Durch die Streckenbauwerke in den jeweiligen Bereichen und in Kombination mit dem darüberliegenden Gestein kann davon ausgegangen werden, dass Wasserwegsamkeiten aber vollständig vorhanden sind. Lediglich die Maße der heutigen Strecken müssen im Vergleich zu den ursprünglichen Streckenausbauen durch die zeitliche Gesteinseinwirkung als verringert angesehen werden [47].

Schächte

Viele der in den 127 Jahren zur Kohleförderung genutzten Schächte waren nur für bestimmte Zeiträume des Abbaus in Benutzung. Ein Großteil der Schächte wurde bereits weit vor der endgültigen Beendigung des Bergbaus in der Region geschlossen. Weitere Schächte wurden offengehalten und zur Bewetterung der Grube genutzt (Frischlufzufuhr). Nach Beendigung des Bergbaus wurden sämtliche Schächte des Reviers geschlossen und mit den jeweiligen zur Verfügung stehenden Mitteln, gesichert.

In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Abraum- sowie Abbruchmaterialien in die Schächte eingebracht, um eine vorläufige Sicherung zu gewährleisten. In der überwiegenden Zahl an Schächten wurden unterschiedliche Dämme und Hilfskonstruktionen errichtet, um die Verfüllstoffe im Schacht zu fixieren. Die Wasserwegsamkeiten innerhalb der schachtangrenzenden Strecken bleiben jedoch weiterhin vorhanden, da primär nur die vertikalen Ausbaue verfüllt wurden. Durch zwangsläufig in Strecken abgleitende Verfüllstoffe sollte bei Streckenbohrungen jedoch eine Toleranzdistanz zum Schacht gewahrt werden. Durch unterschiedliche Stoffe, mit verschiedenen Eigenschaften und dem Eintrag von Wässern, war die damalige Verschüttungssicherung nicht immer erfolgreich, sodass es zu Nachrutschungen im Schachtgebäude kam [47]. Diese teilweise über 100 Jahre zurückliegenden Schachtsicherungen sind nach heutigen Standards meist nicht mehr als sicher einzustufen. Eine Nachbesserung dieser Schächte steht im Fokus verschiedenster Projekte. U.a. fördert der Freistaat Sachsen im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) derartige Projekte mit dem Vorhaben der Prävention von Risiken des Altbergbaus. Das Fördervolumen beträgt 50 Mio. €. Das Sächsische Oberbergamt tritt hierbei als Projektträger auf [51].

In diesem Zusammenhang haben die jeweils bekannten Schächte des Reviers vom OBA in der Vergangenheit sogenannte BSA-Nr. zugesprochen bekommen, die die jeweilige Standsicherheit der Schächte verdeutlichen. Diese werden in Risikoklassen eingeteilt, um den Ist-Stand der jeweiligen Schächte nach der „Bergschadenskundlichen Analyse“ zu verdeutlichen. Nach diesen Analysen ergaben sich für die EFRE Förderung verschiedenen Ansatzpunkte zur Verwahrung. Um die Schäden an der Oberfläche so gering wie möglich zu halten, sind verschiedene Konzepte auszuführen, welche sich in der DIN 21 913, Teil 6 nachlesen lassen. Daraus lassen sich Maßnahmen ableiten, die die Dauerstandsicherheit erhöhen und den Verwahrhorizont erweitern. Dazu zählen unter anderem das Einbringen von Betonplomben, Versatzkörper oder Stahlbetonplatten etc. Diese können durch technische Verfahren wie Injektionen, Pfähle oder Daueranker im Schacht angebracht werden, wobei immer auf die hydrogeologische Situation zu achten ist. Dadurch kann ein Verwahrkörper geschaffen werden, der dauerhaft den Schacht sichert [52].

In den letzten Jahren wurden ebenso im Revier Lugau/ Oelsnitz weitere Schächte dauerhaft verwahrt. Darunter zählen neben dem „Johannes-Schacht“ und „Otto-Schacht“, der „Hedwig-Schacht“. In diesem Projekt

wurde durch das OBA und dem LfULG ein konisches Widerlager auf den Schacht eingebracht, welches mit einer Betonplombe versehen wurde. Weitere Sicherungsmaßnahmen des Schachtkopfes wurden durch das Einbringen einer Zement-Suspension in den Hohlraum durchgeführt, die zur Stabilisierung beitragen [53].

Für die weiteren Untersuchungen in diesem Projekt sind die Schächte nicht für die Betrachtungen geeignet. Durch die jeweilige Verwahrung ist nicht zu identifizieren, in welcher Höhe Wassersäulen in den Schächten zugänglich sind. Darüber hinaus ergeben sich durch die unbekannten Erstsicherungsmaßnahmen Unklarheiten über den Zustand der Schächte. Durch die Errichtung von Dämmen und Schutzeinrichtungen zu den Strecken hin ist alleinig bekannt, dass dadurch die dahinterliegenden Strecken von der Schachtverfüllung weitestgehend abgeschnitten sind und das Wasser zirkulieren kann [47]. Darüber hinaus ist zu schlussfolgern, dass der Zugang in den Grubenkörper in die verwahrten Schächte nicht gegeben ist. Wie dem DMT Bericht 2015 entnehmbar, werden für den Zugang in das Grubengebäude neu abzuteufende Bohrungen benötigt, um für eine mögliche Wärmeversorgung zur Verfügung zu stehen [41].

Demzufolge sind Schächte nicht für Bohrungen geeignet. Dennoch sind die ehemaligen Schachtstandorte näher zu betrachten, da der obertägige Bereich meist freie Flächen bereitstellt, wo Wärmeübergabestationen installiert oder mögliche Netzanbindungen vorgenommen werden können. Dieser Vorzug von Freiflächen macht diese Standorte beachtenswert, um die darunterliegenden Strecken thermisch zu bewerten. Eine erste Auflistung der Standorte wird in Tabelle 13 dargestellt. Die dafür möglichen Aufschluss- sowie die Reinjektionsbohrungen sind in diesem Fall meist auf den jeweiligen Schachtstandort begrenzt, um eine kompakte Einheit zu schaffen. Während in dieser Studie zumeist unterschiedliche Strecken für die Grubenwasserextraktion und Reinjektion gewählt wurden, so könnten diese Bohrungen auch mit geringem Abstand in derselben Strecke niedergebracht werden. In dieser Konstellation ist es jedoch erforderlich, zwischen den Bohrungen einen Verschluss (z.B. durch einen Betonpacker) zu setzen um einen thermischen Kurzschluss zu vermeiden. Bei einem thermischen Kurzschluss hat das Grubenwasser nach dem Reinjezieren nicht genügend Zeit, um das ursprüngliche Temperaturlevel bis zur Saugbohrung wieder zu regenerieren. Dies wird durch eine künstliche Barriere zwischen den potenziell nahen Bohrungen vorgebeugt.

Tabelle 13: Untersuchte Strecken in der Nähe von Schachtstandorten im Revier Lugau/ Oelsnitz

BSA-NR	Standortbezeichnung der Strecken	Tiefe Strecke in N.N. [m]	historische Bezeichnung Strecke, wenn bekannt	Temperatur Strecke (berechnet) in [°C]	Länge Streckensystem in [m]	Durchmesser offen in [m] (Annahme)	Volumen in [m³]	Umliegendes Gestein	Ausbauart
9	Vereinsglückschacht II (Albert-Funk-Schacht II)	-212		25,3	813	2	10216	Phyllit	nicht bekannt
10	Vereinsglück-Schacht I (Albert-Funk-Schacht I)	-444	850-m-Sohle	32,2	6175	2	0	Rotliegendes ~90% Phyllit	nicht bekannt
15	Deutschland - Schacht II	-444	850-m-Sohle	31	2600	2	32673	Rotliegendes	Betonausbau
16	Deutschland - Schacht I	-213		27,9	745	2	9362	Rotliegendes	Betonausbau
19	Kaiserin-Augusta-Schacht	-146	-146-m-Sohle	40,8	1480	2	18598	Phyllit	Mauerung
46	Vereinigtefeld-Schacht III (Rudolf-Breitscheid-Schacht III)	-725	-725-m-Sohle	25,3	1300	2	16336	Rotliegendes ~60% Phyllit	Holzausbau
48	Hedwig-Schacht (Albert-Jacob-Schacht I)	-219		25,3	956	2	12013	Rotliegendes ~50% Phyllit	nicht bekannt
49	Friedens-Schacht (Albert-Jacob-Schacht II)	-390		30,7	1517	2	19063	Rotliegendes ~50% Phyllit	nicht bekannt
65	Vereinigtefeld-Schacht I (Rudolf-Breitscheid-Schacht I)	-725	-725-m-Sohle	40,8	1830	2	22996	Phyllit	Holz-Eisen
65	Vereinigtefeld-Schacht I (kurz) (Rudolf-Breitscheid-Schacht I)	-725	-725-m-Sohle	40,8	250	2	3142	Phyllit	Holz-Eisen
70	Concordia-Schacht I	-286		27,4	950	2	11938	Phyllit	nicht bekannt
82	Merkur-Schacht	-388		29,0	2587	2	32509	Rotliegendes	nicht bekannt
83	Kaisergrube-Schacht I	-280	621-m-Sohle	27,4	814	2	10229	Rotliegendes	nicht bekannt
85	Pluto-Schacht	-388		29,0	2587	2	32509	Rotliegendes	nicht bekannt
86	Kaisergrube-Schacht II	-312	-300-m-Querschlag	27,4	814	2	10229	Rotliegendes	nicht bekannt
88	Saxonia-Schacht	-127		23,4	745	2	9362	Rotliegendes	nicht bekannt
72	Bereich Vertrauen-Schacht	-146	-146-m-Sohle	23,4	1500	2	18850	Rotliegendes ~60% Phyllit	nicht bekannt

Für die Forschungsergebnisse ist daher das Grubenwasser in den Strecken und angrenzenden Hohlräumen, für eine mögliche zukünftige thermische Nutzung von großer Bedeutung. Dieses stellt die Wärmequelle gegenüber den obertägigen Abnehmern in der Netzstruktur (Wärmesenke) dar. Für eine mögliche zukünftige Nutzung dieses Grubenwassers sind Methodiken zur Berechnung des verfügbaren untertägigen energetischen Potentials notwendig, um für spätere Projekte Kennwerte zur Planung angeben zu können. Die entwickelte Analyse dazu ist im folgenden Kapitel näher beschrieben.

3.2 Entwicklung einer Methodik zur Berechnung des verfügbaren untertägigen energetischen Potentials

3.2.1 Grundlegende Methodikentwicklung

Die hohe Temperatur im Erdinneren führt dazu, dass sich zur kälteren Erdoberfläche hin ein Temperaturgefälle (Temperaturgradient) ausbildet. Entlang dieses Temperaturgefälles steigt Wärme kontinuierlich zur Erdoberfläche auf. Der Durchschnittswert dieses geothermischen Wärmestroms beträgt in Deutschland etwa 65 mW/m^2 . Trotz des verhältnismäßig geringen Wertes würde eine vollständige Nutzung der aufsteigenden geothermischen Energie, den Primärenergiebedarf der Menschheit um mehr als das 2,2-fache decken. Da jedoch eine vollständig flächige Nutzung dieser Energie ökonomisch und technisch nicht umsetzbar ist, liegt der Fokus darauf, besonders ergiebige Bereiche ausfindig zu machen und zu nutzen [54].

Verlassene Bergwerke können als solche Bereiche definiert werden, da das Erdreich dort von vielen Hohlräumen durchzogen ist und diese zusätzlich meist mit Grubenwasser gefüllt sind. Das Grubenwasser steht mit dem Gestein in Kontakt und weist demnach dieselbe Temperatur wie das Gestein auf. Soll nun das Grubenwasser für die Energiegewinnung genutzt werden, so können drei Szenarien unterschieden werden.

1. Grubenwassernutzung aus Entwässerungsstolln:
Grubenwasser kann für die energetische Nutzung direkt aus Entwässerungsstolln abgegriffen werden. Das Grubenwasser wird nach der Abkühlung (Heizbetrieb) oder der Erwärmung (Kühlbetrieb) wieder stromabwärts in den Entwässerungsstolln abgegeben. Da das Grubenwasser am Ende des Stollns in ein Fließgewässer eingeleitet wird, ist zu beachten, dass dessen Temperaturänderung durch die energetische Nutzung den Umweltregularien entspricht.
2. Grubenwassernutzung aus aktiver Wasserhaltung:
Grubenwasser welches für die aktive Haltung des Wasserstands kontinuierlich abgepumpt werden muss, bietet ebenfalls ein energetisches Nutzungspotential. Das abgekühlte oder im Kühlbetrieb erwärmte Grubenwasser wird nicht wieder in das Bergwerk eingeleitet, sondern direkt in ein Oberflächengewässer abgeschlagen.
3. Grubenwassernutzung und anschließende Reinjektion:
Das Grubenwasser kann ebenfalls aus Bergwerksbereichen entnommen werden, welche vollständig geflutet sind, das Grubenwasser aber nicht obertägig abgeschlagen werden kann. Nach der energetischen Nutzung wird es daher an einer anderen Stelle wieder in das Grubengebäude eingespeist. Das auf diese Weise genutzte Grubenwasser fließt nun von der Reinjektionsstelle über die Strecken und porösen Bereiche des Bergwerks zur Entnahmestelle zurück. Dabei regeneriert sich die Temperatur des Grubenwassers durch den Kontakt mit dem Gestein.

Die Energiepotentiale der Grubenwassernutzung in Entwässerungsstolln sind potentiell stärker begrenzt, da der Volumenstrom sowie die Temperatur des Wassers eine Obergrenze an Wärmepotential definiert. Die Nutzung von Grubenwasser aus einer aktiven Wasserhaltung bietet sich an, da der Wärmenutzen als ein

wirtschaftlicher Vorteil neben den Ewigkeitskosten des Pumpbetriebs angesehen werden kann. Jedoch steht diese Form der Nutzung nicht an allen Standorten zur Verfügung. Wie bei der Nutzung von Grubenwässern aus Entwässerungstollen ist auch hier das Temperaturniveau wie auch der Volumenstrom auf den jeweiligen Standort limitiert. Die energetische Grubenwassernutzung mit anschließender Reinjektion in das Bergwerk umgeht diese Limitierung, da der Volumenstrom nicht direkt begrenzt ist und keine Regularien zur Abschlagung in ein Oberflächengewässer beachtet werden müssen. Des Weiteren können durch eine größere Entnahmetiefen ebenfalls höhere Temperaturniveaus erschlossen werden. Durch die Rückführung ist ebenfalls die energetische Nutzbarmachung von stark verunreinigten Wässern möglich, ohne dass eine aufwendige Behandlung für das anschließende Abschlagen in Oberflächenwässer notwendig ist. Diese Vorteile sowie die geringere Ortsgebundenheit führen dazu, dass diese Form der Nutzung in diesem Bericht bevorzugt untersucht wird, wobei sie eigene Herausforderungen enthält, die im Zuge dessen betrachtet werden.

Neben dem Aspekt durch Grubenwassergeothermie eine umweltfreundliche Wärmebereitstellung zu ermöglichen, ist auch die Zuverlässigkeit der Wärmeversorgung von übergeordneter Wichtigkeit. Dies bedeutet, dass die Anlage die Wärmeleistung, für die sie konzipiert wurde, auch über ihre gesamte Lebensdauer erbringen kann und diese nicht mit der Betriebszeit abnimmt. Dies kann insbesondere dann eintreten, wenn dem Wasser ein zu hoher Wärmestrom entzogen wird. Wenn das zu stark abgekühlte Grubenwasser anschließend reinjiziert wird, ist es möglich, dass es seine Temperatur nicht vollständig bis zum Entnahmepunkt durch den Gesteinskontakt regenerieren kann. Die Regeneration wird im Betrieb zunehmend dadurch erschwert, dass das Gestein an der Streckenwand kontinuierlich abgekühlt wird. So ist es möglich, dass nach einem bestimmten Zeitraum eine Grubenwasseranlage mit Reinjektionsbetrieb den Gesteinsmantel um die wassergefüllte Strecke soweit abgekühlt hat, dass nicht mehr genügend Wärme vom Gestein übertragen werden kann. Die Wärmeleistung der Anlage nimmt infolgedessen ab. Um diese Möglichkeit von Beginn an zu berücksichtigen, ist die Entwicklung eines Prognoseverfahrens essentiell. Dadurch sollte die maximal mögliche Wärmeleistung für den gewählten Streckenabschnitt und die entsprechenden Randbedingungen errechnet werden können.

Solche Prognosen können grundsätzlich mit numerischen detaillierten Modellen erstellt werden, in denen die untertägige Struktur gekoppelt mit den thermofluidodynamischen Parametern zeitabhängig untersucht wird. Auch wenn diese Methode die umfangreichsten und detailliertesten Ergebnisse liefert, so ist sie für die Voruntersuchung einer großen Anzahl an Standorten ungeeignet. Der zeitliche und finanzielle Einsatz an Ressourcen ist gegenüber den daraus erhaltenen Ergebnissen praktisch unverhältnismäßig. Für Voruntersuchungen eignen sich im besonderen Maße dagegen vereinfachte analytische Modelle. Ein solches Verfahren wurde von Rodríguez und Díaz entwickelt [55]. Es bedient sich einer Kombination aus Wärmeübergangs- und Wärmetransportgleichungen, um ein analytisches Formelsystem zu entwickeln. Dieses bezieht sich auf den Fall eines Hohlzylinders, welcher in einem Gesteinskörper eingebettet liegt. Dieser wird anschließend mit Wasser definierter Temperatur durchströmt, wobei dieses dem Gestein Energie entzieht und es folglich auskühlt. Über den gewählten Betrachtungszeitraum kann so die maximal mögliche Heizleistung ermittelt werden. Gegenüber detaillierten und ressourcenintensiven numerischen Berechnungen, hat eine analytische Lösung den Vorteil, dass sie unter vereinfachten Rahmenbedingungen ebenfalls eine adäquate Genauigkeit gewährleisten kann. So kann eine größere Auswahl an Standorten berücksichtigt werden.

Die von Rodríguez und Díaz vorgestellte Methodik besitzt jedoch diverse Punkte, an denen eine Optimierung vorgenommen werden kann. Drei dieser Punkte sind:

- Konstante Rückspeisetemperatur des Grubenwassers
Das Grubenwasser wird immer mit einer konstanten Temperatur über den gesamten Betrachtungszeitraum rückgespeist. Im realen Anlagenbetrieb würde diese jedoch je nach Extraktionstemperatur und entzogener Wärmeleistung über die Zeit variieren.
- Errechnung des thermischen Widerstands im Gestein
Der mit der Zeit anwachsende thermische Widerstand im Gestein basiert teilweise auf Vereinfachungen, welche die realen physikalischen Zusammenhänge ungenügend genau widerspiegeln. Auch werden manche Annahmen nicht begründet, so dass die Verwendung der

ursprünglichen Methodik nicht zu empfehlen ist [56].

- Keine Betrachtung von zuströmenden Wässern

Zusätzliche Strömungen in den Grubenbauen haben Einfluss auf die zu erwartende Wärmeausbeute. So kann bereits ein geringer Anteil von zuströmendem Sekundärwasser das Wärmepotential signifikant erhöhen und sollte demnach in der Berechnung beachtet werden.

Um die Methodik weiterzuentwickeln wird das analytische Formelsystem in die Form eines Python-Programmcodes gebracht. So kann der iterative Berechnungsprozess mit zusätzlichen Einstellungen verfeinert werden. Die Rückspeisetemperatur wird bspw. direkt mit der Entnahmetemperatur sowie der Entnahmeleistung in Bezug gesetzt und ist dadurch ein veränderbarer Parameter. Weiterhin wurde eine Funktion implementiert, welche es erlaubt verschiedene Systemheizleistungen über den gewählten Zeitraum zu testen und die maximal mögliche Leistung anzugeben. Weiterhin wurde ein neuer Ansatz für die Berechnung des thermischen Widerstands des Gesteins integriert, welcher die Temperatureindringcharakteristik in dieses logarithmisch beschreibt [56]. Diese Methode führt so zu einer realitätsgetreueren mathematischen Abbildung. Abschließend wurde auch die Möglichkeit von zusätzlichen Strömungen in die Berechnung einbezogen. Dazu wurde ein Parameter eingeführt, welcher die Mischung von neuem Grubenwasser mit reinjizierten Grubenwasser darstellt. Mit diesem kann so festgestellt werden, wie sich das Wärmepotential bei einem zusätzlichen Zustrom verhält.

Unter Einbezug dieser Erweiterungen können nun die Berechnungen für die im Untersuchungsgebiet gewählten Streckensysteme durchgeführt werden. Dazu sind Ausgangsparameter wie Geometrie, thermophysikalische Eigenschaften des Gesteins und des Wassers sowie zusätzliche Kalkulationsparameter notwendig. Diese werden in Tabelle 14 aufgezeigt.

Tabelle 14: Für die Potentialberechnung der Strecken notwendige Ausgangsparameter

Zuordnung	Parameter
Geometrie Strecke	Länge L in m
	Durchmesser D in m
Eigenschaften Grubenwasser	Dichte ρ_{H_2O} in kg/m^3
	Spezif. Wärmekapazität c_{p,H_2O} in $J/(kg \cdot K)$
	Wärmeleitfähigkeit λ_{H_2O} in $W/(m \cdot K)$
	Temperaturniveau T_{0,H_2O} in $^{\circ}C$
Eigenschaften Gestein	Dichte ρ_{Gest} in kg/m^3
	Spezif. Wärmekapazität $c_{p,Gest}$ in $J/(kg \cdot K)$
	Wärmeleitfähigkeit λ_{Gest} in $W/(m \cdot K)$
	Temperaturniveau $T_{0,Gest}$ in $^{\circ}C$
Zus. Kalkulationsparameter	Betrachtungszeitraum t in Jahren
	Geförderter Volumenstrom $\dot{V}$ in m^3/h
	Minimale Reinjektionstemperatur in $^{\circ}C$

Sind die Werte für eine Untersuchungsstrecke bestimmt, können sie dem Berechnungscode zugeführt werden. Nachfolgend wird die Entzugsleistung errechnet, bei welcher, konstanten Betrieb vorausgesetzt, die minimale Reinjektionstemperatur am Ende des Betrachtungszeitraums erreicht wird. Die minimale Reinjektionstemperatur ist für alle durchgeführten Berechnungen auf einen Wert von $6^{\circ}C$ festgesetzt, um eine zu starke Unterkühlung zu vermeiden, welche Anlagenbetrieb langfristig gefährden könnte [57].

3.2.2 Praktische Potentialermittlung – Beispiel Kaisergrubenschacht (KGS)

Für das Streckensystem in der Nähe des Kaisergrubenschachts wird nachfolgend das Berechnungsergebnis der Entzugsleistung mit den verwendeten Randparametern dargestellt. Der gewählte Streckenverlauf ist in Abbildung 42 dargestellt. Die Randparameter und das Berechnungsergebnis für die Entzugsleistung werden in der Tabelle 15 aufgeführt.

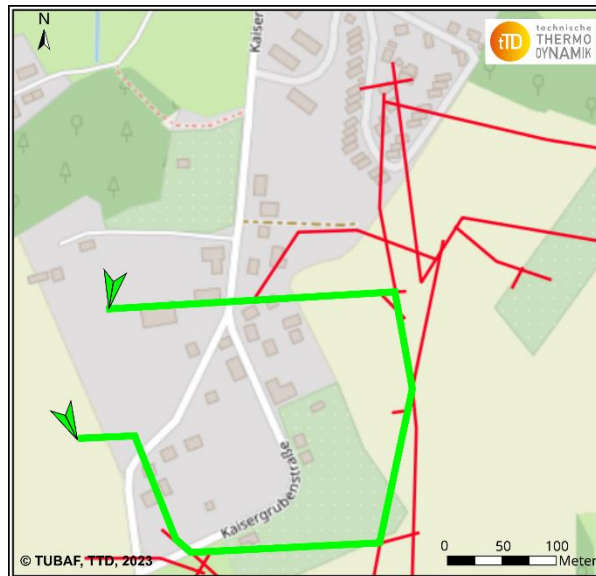


Abbildung 42: Streckenverlauf im Areal des Kaisergrubenschachtes

Tabelle 15: Rechnerische Parameter im Areal Kaisergrubenschachtes (Gesteinswerte abgeleitet nach [58], [59])

Zuordnung	Parameter	Wert
Geometrie Strecke	Länge L in m	857
	Angenommener Durchmesser D in m	2
Eigenschaften Grubenwasser	Dichte ρ_{H_2O} in kg/m ³	997
	Spezif. Wärmekapazität c_{p,H_2O} in J/(kg*K)	4.180
	Wärmeleitfähigkeit λ_{H_2O} W/(m*K)	0,78
	Temperaturniveau T_{0,H_2O} in °C	27,4
Eigenschaften Gestein	Dichte ρ_{Gest} in kg/m ³	2.700
	Spezif. Wärmekapazität $c_{p,Gest}$ in J/(kg*K)	900
	Wärmeleitfähigkeit k_{Gest} in K/m	3
	Temperaturniveau $T_{0,Gest}$ in °C	27,4
Zus. Kalkulations- parameter	Betrachtungszeitraum t in Jahren	50
	Geförderter Volumenstrom $\dot{V}$ in m ³ /h	100
	Minimale Reinjektionstemperatur in °C	6
Kalkulations- ergebnis	Konstante Entzugsleistung $Q_{max, konst, KGS}$ in kW	75,0

Da das analytische Formelsystem lediglich über die Zeit konstante Entzugsleistungen errechnen kann, wird dieses Kalkulationsergebnis daher anschließend in einen lastbezogenen Wert umgerechnet. Dies erfolgt über den Einbezug des Volllaststundenwertes. Es wird näherungsweise angenommen, dass der Wert der konstanten Entzugsleistung mit einem Faktor multipliziert werden kann, welcher sich aus dem Verhältnis von Jahresstunden zu Volllaststunden ergibt. Dies wird in Formel (7) dargestellt.

$$\dot{Q}_{\max, \text{Last}} = Q_{\max, \text{konst}} \cdot \frac{\text{Jahresstunden}}{\text{Volllaststunden}} \quad (7)$$

Es wird angenommen, dass eine Anlage mit diesem Wärmepotential über 50 Jahre betrieben wird, wobei pro Jahr eine Volllaststundenanzahl von etwa 2400 h erreicht wird. Auch wenn dies den oberen Wert für eine andere Art geothermischer Nutzung darstellt (Sondenanlagen), so er ebenfalls aus Monitoringdaten für bestehende Grubenwassergeothermieranlagen bestätigt [60] [61]. Die maximale Leistung, welche der Strecke des Kaisergrubenschachts unter Volllaststundenbeachtung entzogen werden kann, kann somit ermittelt werden. Nachfolgend ist diese Berechnung nach Formel (7) dargestellt.

$$\dot{Q}_{\max, \text{Last, KGS}} = 75,0 \text{ kW} \cdot \frac{8.760 \text{ h}}{2.400 \text{ h}} = \underline{\underline{273,8 \text{ kW}}}$$

Diese Entzugsleistung steht somit als Umweltwärme zur Verfügung und kann in einer Wärmepumpenanlage genutzt werden. Dadurch ist jedoch noch nicht die direkt nutzbare Wärmeleistung ableitbar. Diese setzt sich aus der Umweltwärmeleistung und der aufgenommenen elektrischen Leistung des Verdichters der Wärmepumpe zusammen. Die elektrische Leistung wird dort zunächst in mechanische Energie für die Kältemittelverdichtung und daraufhin in Wärmeleistung gewandelt. Nimmt man eine Arbeitszahl (Verhältnis von nutzbarer Wärmeleistung zu aufgenommener elektrischer Leistung = COP) für die Wärmepumpe an, so kann dadurch die insgesamt nutzbare Wärmeleistung errechnet werden. Für die weiteren Rechnungen wird eine Jahresarbeitszahl von 4 festgelegt, welche in Grubenwassergeothermieranlagen einen realistischen Wert

darstellt [61]. Formel (8) zeigt nachfolgend die Errechnung der maximal nutzbaren Wärmeleistung zusammen mit dem Ergebnis für das Streckensystem des Kaisergrubenschachts.

$$\dot{Q}_{\max, \text{nutz}} = \frac{\dot{Q}_{\max, \text{Last}}}{(\text{COP}-1)} + \dot{Q}_{\max, \text{Last}} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{\max, \text{nutz, KGS}} = \frac{273,8 \text{ kW}}{(4-1)} + 273,8 \text{ kW} = \underline{\underline{364,1 \text{ kW}}}$$

Eine Grubenwassergeothermieranlage, welche am Standort des Kaisergrubenschachts installiert werden würde könnte mit den genannten Randparametern somit eine Leistung von etwa 364 kW erzielen können.

Für die Strecke des Kaisergrubenschachts wird nachfolgend eine Parameterstudie durchgeführt, welche den Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die Entzugsleistung und somit auf die Wärmeleistung untersucht. Dadurch kann der Einfluss verschiedener Parameter auf die nutzbare Wärmeleistung besser abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Variation der Randbedingungen sind in Abbildung 43 dargestellt.

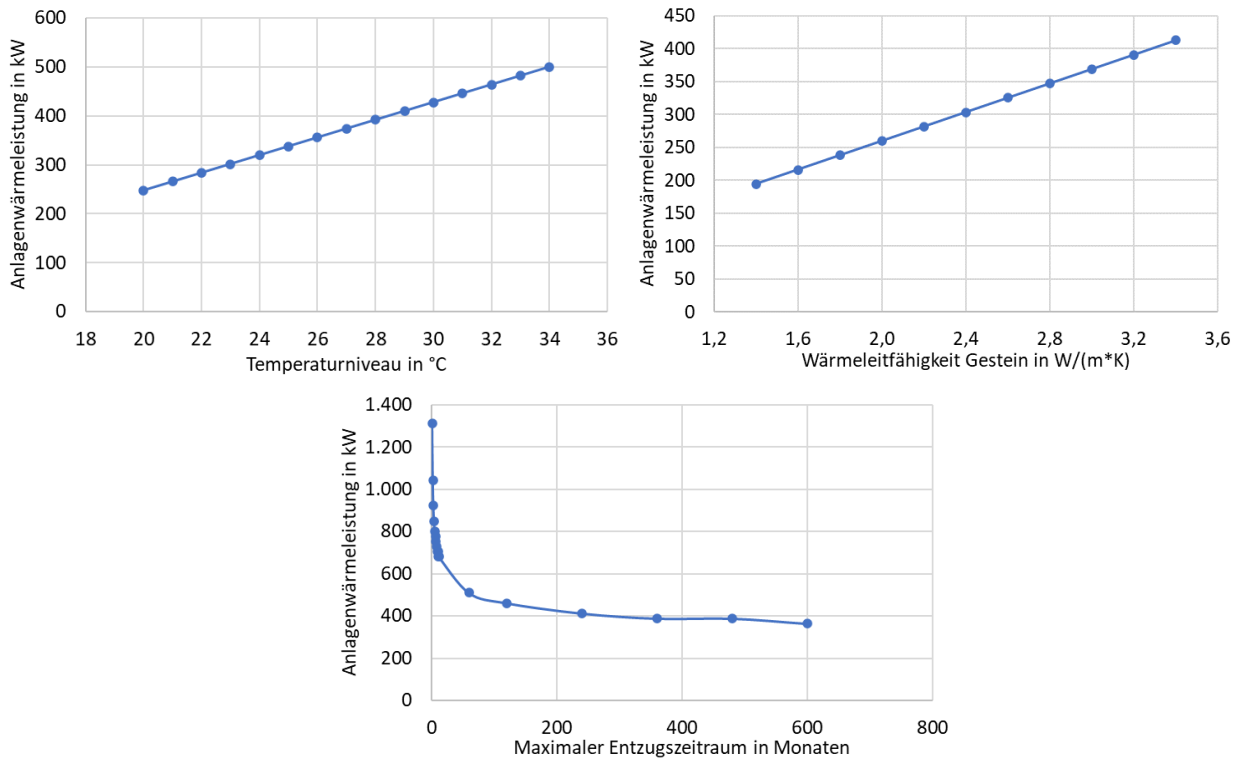


Abbildung 43: Parameterstudie (Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, maximaler Entzugszeitraum) für die Strecke des Kaisergrubenschachts

Es ist zu erkennen, dass das Wärmepotential in den Ergebnissen eine lineare Abhängigkeit zu dem Temperaturniveau und der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins besitzt. Besitzen diese Parameter höhere Werte, so erhöht sich dementsprechend die nutzbare Wärmeleistung. In der Untersuchung des maximalen Untersuchungszeitraums lässt sich erkennen, dass niedrigere Nutzungszeiträume ($\ll 100$ Monate) die maximale Leistung erhöhen. Es ist anzumerken, dass ein hoher Entzugswert über einen kurzen Entzugszeitraum zur Erschöpfung des Gesteins führt und demnach einen weiteren Wärmeentzug stark einschränkt. Die in dem Diagramm dargestellten Leistungen sind somit die Anlagenwärmeleistungen, die für diese Zeiten die Obergrenze der nutzbaren Leistung bilden. Wird eine Regeneration des Gesteins einbezogen, z.B. durch eine Kühllast im Sommer, so erhöht sich die maximale Anlagenwärmeleistung, was jedoch weitere Detailuntersuchungen benötigt.

Für weitere Details zum Standort des Kaisergrubenschachts und die anderen Standorte können die Standortsteckbriefe in Kapitel 5 eingesehen werden.

3.2.3 Zuströmendes Grubenwasser

Je nach hydrologischen und bergwerksstrukturellen Gegebenheiten ergibt sich ein Wärmezutrag nicht nur aus dem örtlich begrenzten Betrachtungsgebiet zwischen Grubenwasserreinjektion und -extraktion. In Zusammenhang mit der Art des Bergwerks und damit einhergehendem Zustand der unterirdischen Strecken können Wärmegewinne auch von außerhalb dieses Streckenbilanzgebietes verzeichnet werden. Nachfolgend werden drei mögliche Ursachen für solche Grubenwasserzuflüsse beschrieben und die Auswirkung auf das Wärmepotential für ein Beispiel untersucht.

Hydrostatische Ausgleichsbewegungen

Der Flutungsprozess in einem kürzlich stillgelegten Bergwerk zeichnet sich durch das unkontrollierte Eindringen von Oberflächen- und Grundwässern aus. Durch den unregelmäßigen Verlauf der Strecken und Schächte sowie variierende Wasserwegsamkeiten im Gestein (durch Porosität, Verwitterung, etc.) werden

bestimmte Areale des Bergwerks früher geflutet als andere. Das führt dazu, dass in den untertägigen Hohlräumen je nach betrachtetem Areal unterschiedliche Wasserspiegel zu erwarten sind. Durch den Höhenunterschied kommt es daraufhin zu einer Ausbildung eines hydrostatischen Druckgefälles, welches das Grubenwasser durch Verbindungsstellen zwischen zwei Arealen in eine Ausgleichsbewegung versetzt. Das Grubenwasser fließt dann durch natürliche Konvektion durch poröses Gestein oder durch die gefluteten Strecken zum Areal mit dem geringeren Wassersäulendruck. Des Weiteren werden Ausgleichsbewegungen ebenfalls durch vorhandene Grundwasserleiter hervorgerufen. Da untertägige Wässer über die Zeit der Höhe des Meeresspiegels entgegenstreben, gibt es zwangsläufig Grundwasserbewegungen die sich ebenfalls auf die Strömungen in Bergwerken auswirken. Für das Steinkohlerevier in Lugau-Oelsnitz kann jedoch nicht beziffert werden, inwiefern sich die Bewegung des Grundwassers auf unterschiedliche Bereiche des Bergwerks auswirkt. Der Effekt auf die nutzbaren Wärmepotentiale kann somit nur überschlägig bewertet werden. Strömungen können jedoch auch durch Dichteunterschiede innerhalb des Wasserkörpers zustande kommen, welche nachfolgend erläutert werden.

Freie Konvektion

Durch die variierenden Tiefen der unterschiedlichen Wasserkörper im Bergwerk erwärmt sich das Wasser dem geothermischen Temperaturgradienten folgend in der Tiefe stärker als auf höhergelegenen Sohlen. Insbesondere in tiefen Schächten kommt es daher oft zu einem Aufsteigen von wärmeren Wässern aus tieferen Regionen des Bergwerks, wobei an anderer Stelle im Streckensystem kältere Wässer in diese Regionen absinken und den Konvektionskreislauf dadurch schließen. Diese Konvektionswalze kann dazu führen, dass auch Wassermengen in weiter entfernten Arealen in Bewegung gesetzt werden und so ein allmählicher Wasseraustausch befördert wird.

Insbesondere die temperaturgetriebene freie Konvektion ist jedoch anfällig für Störungen der Strömung. So können bereits einzelne offene Strecken an einem tiefen Schacht dazu führen, dass der Aufstieg von warmen Tiefenwässern behindert werden kann [62]. Dementsprechend sind Strömungsstörungen ebenfalls durch Blockaden, wie z.B. bei eingebrochenen Bergwerksstrukturen in Schächten und Strecken möglich. Die vorhandenen bergbautechnischen Kenntnisse der Strecken im Revier Lugau-Oelsnitz lassen jedoch keine genaue Bewertung der untertägigen Gegebenheiten zu.

Erzwungene Konvektion

Neben natürlichen Mechanismen der Strömungsanregung kann auch die mechanische Einwirkung einer Grubenwasseranlage selbst einen das Betrachtungsgebiet übergreifenden Effekt besitzen. Zunächst gilt es zu erwähnen, dass das geförderte Grubenwasser selbst vom Reinjektions- bis zum Extraktionsort und durch die Grubenwasseranlage in einem erzwungenen Konvektionskreis geführt wird. Dieses Wasser wird jedoch gemäß der beschriebenen Methodik als Grubenwasser im Bilanzgebiet bezeichnet (Wasser im Streckenabschnitt zwischen Reinjektions- und Extraktionsbohrung). Wärmegewinne können jedoch wie bereits erwähnt durch bilanzgebietfremdes Grubenwasser verzeichnet werden. Dies geschieht ebenfalls indirekt über erzwungene Konvektion. Sobald die Pumpen der Grubenwasseranlage den Pumpprozess starten, setzt sich das Wasser um die Bohrungen der betreffenden Strecke in Bewegung. Von der Rejektionsbohrung wird es zum Extraktionsort strömen, wo durch das Abpumpen ein geringer Unterdruck erzeugt wird. Diese Strömung führt dazu, dass weiteres Grubenwasser in der Strecke durch die Reibung des strömenden Fluids mitgezogen wird. Das Grubenwasser des Bilanzgebiets wirkt somit wie ein Förderband, an welchem neues Grubenwasser von außerhalb des Streckenabschnitts nachgefördert wird. Es wird im Weiteren auch als Sekundärwasser bezeichnet.

Auswirkung auf das Wärmepotentiale

Um die Potentialentwicklung für die nutzbare Wärme bei zusätzlichen Strömungen abzuschätzen, wird vereinfachend angenommen, dass diese als unberührtes Grubenwasser mit Gesteinstemperatur angesehen werden können. Auch bei längerem Anlagenbetrieb wird angenommen, dass der Sekundärwasserzufluss ein konstantes Ausgangstemperaturniveau behält. Zwischen den Bohrungen wird durch das Aufeinandertreffen der beiden Strömungen ein Mischprozess stattfinden, welcher einen Teil der Temperatur des abgekühlten, reinjizierten Grubenwassers regeneriert. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser führt dazu, dass

schon bei geringen Anteilen einer Sekundärwasserströmung die Wärmeausbeute, im Vergleich zur Wärmeregeneration über das Gestein, signifikant ansteigt. Für die Strecke unterhalb des Kaisergrubenschachtgebiets wurde der Einfluss einer sich ausbildenden Sekundärwasserströmung zusätzlich untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 44 dargestellt.

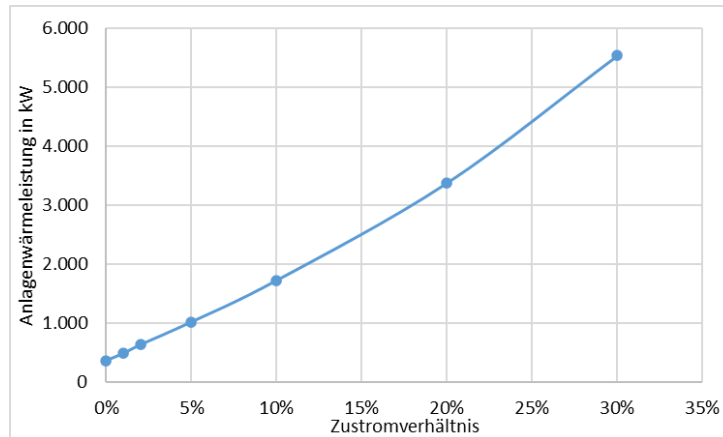


Abbildung 44: Wärmeleistung der Strecke bei variierenden Sekundärwasseranteilen für das Szenario des Standortes Kaisergrubenschacht aus Tabelle 15 ($\dot{Q}_{\max, \text{nutz}} = 364,1 \text{ kW}$ - bei 0% Zustrom)

Die Ergebnisse zeigen, dass die durch das Sekundärwasser gelieferte Wärmeleistung bereits bei einem geringen Zustromverhältnis (= Sekundärwasservolumenstrom/Gesamt volumenstrom) signifikant ansteigt. Bereits ab einem Anteil von 5 % wäre die Anlagenleistung von 1 MW erreicht, was den Bedarf der Gebäude einer potenziellen Neubausiedlung vor Ort weit übersteigen würde. Generell führt jeglicher Anstieg des Sekundärwasseranteils zu einem Anstieg der maximal nutzbaren Wärmeleistung. Zusätzliche vorhandene Zuströmungen dieser Art sind somit wichtig, um das Wärmepotential realistischer einschätzen zu können. Eine Möglichkeit um dies praktisch zu untersuchen bietet der Einsatz von Tracern, welche in das Wasser eines solchen Kreislaufs gegeben werden und bei denen über den Konzentrationsverlauf der Einfluss von Fremdwassersströmungen festgestellt werden kann.

Zusammenfassend kann herausgestellt werden, dass durch die hohe Wärmespeicherdichte von Wasser schon geringe Raten an indirekt mitgeführtem Grubenwasser unter den getroffenen Annahmen zu signifikanten Wärmegewinnen führen können. In der Praxis ist ein Wasserzustrom von den Gegebenheiten der Strecke und der umliegenden Strukturen sowie dem Pumpvolumenstrom abhängig. Auch hier kann das Konvektionsband durch eingebrochene Strecken oder Schächte gestört werden. Der durch diese Fragestellungen weiterhin bestehende Forschungsbedarf begründet infolgedessen, dass die Wärmepotentiale im Revier Lugau/Oelsnitz in einer Spanne abgegeben werden. Im unteren Leistungswert dieser Spanne gibt es keine Zuströmungen, wohingegen der obere Wert der Leistung ein Zustromverhältnis von 20 % abbildet.

3.3 Durchführung und Auswertung eines Wärmepumpenversuchs am Modellstandort Hohndorf

Wie die vorherigen Kapitel zeigen, besitzt das geflutete Bergbaurevier Lugau-Oelsnitz ein großes geothermisches Potential. Die konstante Temperaturschichtung des Grubenwassers und die sehr große wärmeübertragende Gesteinsfläche ermöglichen eine kontinuierliche energetische Nutzung (Heizen und Kühlen).

Jedoch führt Grubenwasser stets Frachten wie z.B. Salze, Bakterien oder sonstige Partikel mit, die sich abhängig vom Bergbaurevier sehr unterschiedlich zusammensetzen können. Diese können zu einer Verschmutzung der Bauteile führen, die damit in Berührung kommen. Um zu verhindern, dass die für den Betrieb notwendige Wärmepumpe verschmutzt, wird die Energie des Grubenwassers über einen Wärmeübertrager an den Heiz-, Kühlkreislauf abgegeben. Der Fokus liegt auch hier bei der Bildung von

Ablagerungen (= Fouling = Fe-, Mn-Verbindungen mit Biofilmen) auf den Wärmeübertragerplatten bei den in der Regel verwendeten Plattenwärmeübertragern (siehe Abbildung 45). Im Vergleich zu den im Wärmeübertrager verwendeten Stählen weisen diese Ablagerungen eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit auf und wirken so wie eine Dämmschicht. Dadurch kann dem Grubenwasser nicht so viel Wärme entzogen werden, wie ursprünglich berechnet und ausgelegt wurde. Daraus resultieren Effizienzverluste, weiterhin entstehen Wartungs- und Stillstandskosten.

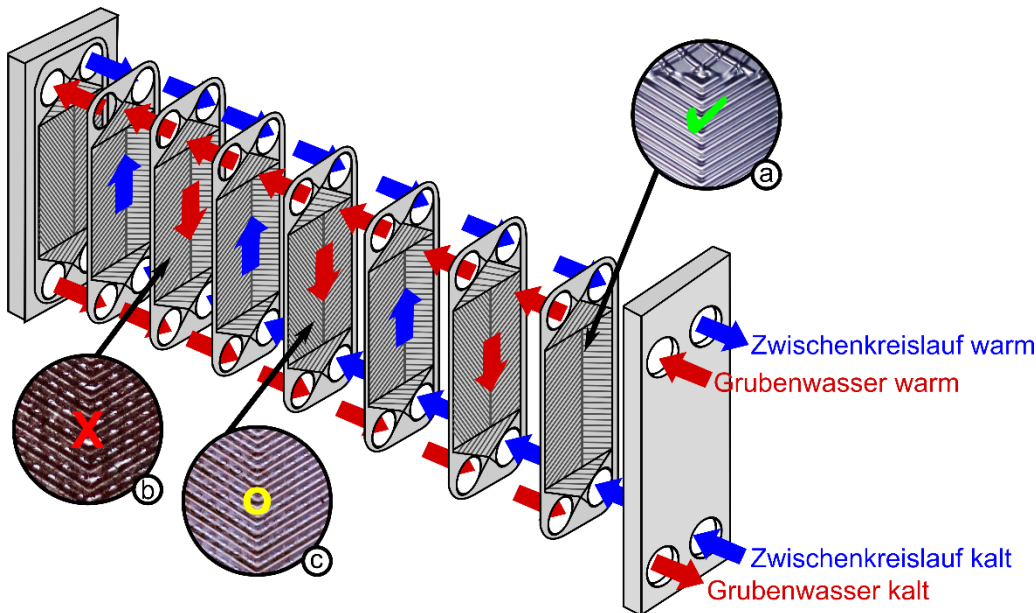


Abbildung 45: Schematischer Aufbau eines Wärmeübertragers für die energetische Nutzung von Grubenwasser (a=neue, unverschmutzte Platte, b=genutzte, verschmutzte Platte, c=genutzte, gereinigte Platte) (nach [63])

Die Dicke der entstehenden Biofilme kann dabei bis 1000 µm betragen [64]. Bereits ein Biofilm von 250 µm reduziert die übertragene Wärmemenge um ca. 50 % [65]. Bei einer einzelnen Anlage kann dies jährliche Verluste von 200.000 € bedeuten [66]. Die Ablagerungsbildung hängt dabei ortskonkret von den Wasserbeschaffenheiten, den hydraulisch und thermischen Verhältnissen an den Wärmeübertragern und ihrem konkreten Aufbau ab. Wie in Abbildung 45 ebenfalls zu erkennen, führt auch eine Reinigung der Platten nicht immer dazu, dass der Ursprungszustand wieder hergestellt wird. Das bedeutet, trotz Reinigung kann an einigen Standorten nicht mehr die geplante Wärmemenge aus dem Grubenwasser entzogen werden.

Um dem Fouling entgegenzuwirken, sollten im Projekt MareEn Versuche mit unterschiedlichen Wärmeübertragermaterialien durchgeführt werden. Dafür wurde der im Rahmen des SN-CZ-Projekt GeoMAP (SAB-Antragsnummer: 100348899) entwickelte mobile Wärmepumpenversuchsstand (Grubenwasser-Geothermieranlage im Labormaßstab) eingesetzt. Der prinzipielle Aufbau des Versuchsstandes ist in Abbildung 46 dargestellt. Der Versuchsstand verfügt, wie eine reale Grubenwassergeothermieranlage, über eine Wärmepumpe und einen Wärmeübertrager. Um gleichzeitig Ablagerungen und die entsprechend vorteilhaftesten Materialien beim Heizen (Grubenwasser wird abgekühlt) und Kühlen (Grubenwasser wird erwärmt) gleichzeitig untersuchen zu können, verfügt der Versuchsstand über zwei Wärmeübertrager. Für weitere Informationen zum Versuchsstand wird auf den Projektband des Projektes GEoMAP verwiesen [67].

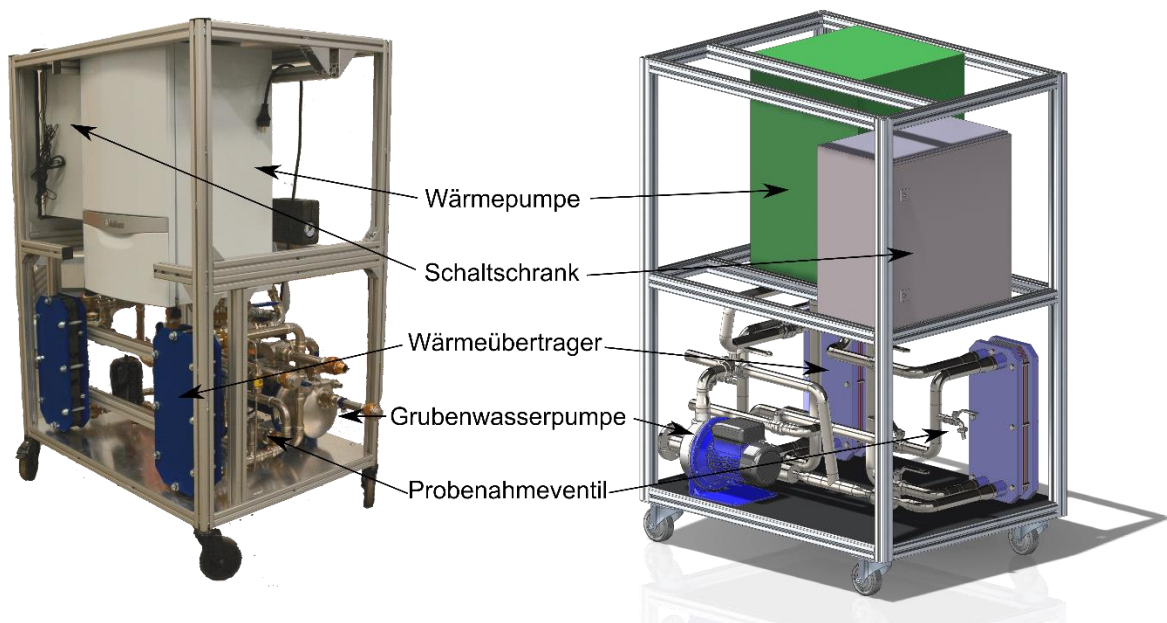


Abbildung 46: Mobiler Wärmepumpenversuchsstand für Pumpversuche im Projekt MareEn

Die Versuche im Rahmen des Projektes MareEn sollten am Tiefbrunnen in der Gemeinde Hohndorf stattfinden (siehe Abbildung 47). Dabei wird das Wasser aus dem Tiefenbrunnen zunächst in IBC-Container mit einem Gesamtvolumen von 2 m³ gepumpt und von dort in den Versuchsstand.

Bakterientests und Wasseranalysen zeigten, dass am Standort des Tiefenbrunnens kein besonders hoher Einfluss durch Mikroorganismen, und daraus resultierendes Biofouling, zu erwarten ist. Zudem wird anhand der Testergebnisse davon ausgegangen, dass am Versuchsstandort das Grubenwasser zu einem großen Anteil mit Grundwasser vermischt wird und damit im Vergleich zu anderen Punkten im Revier vergleichsweise sauber ist.

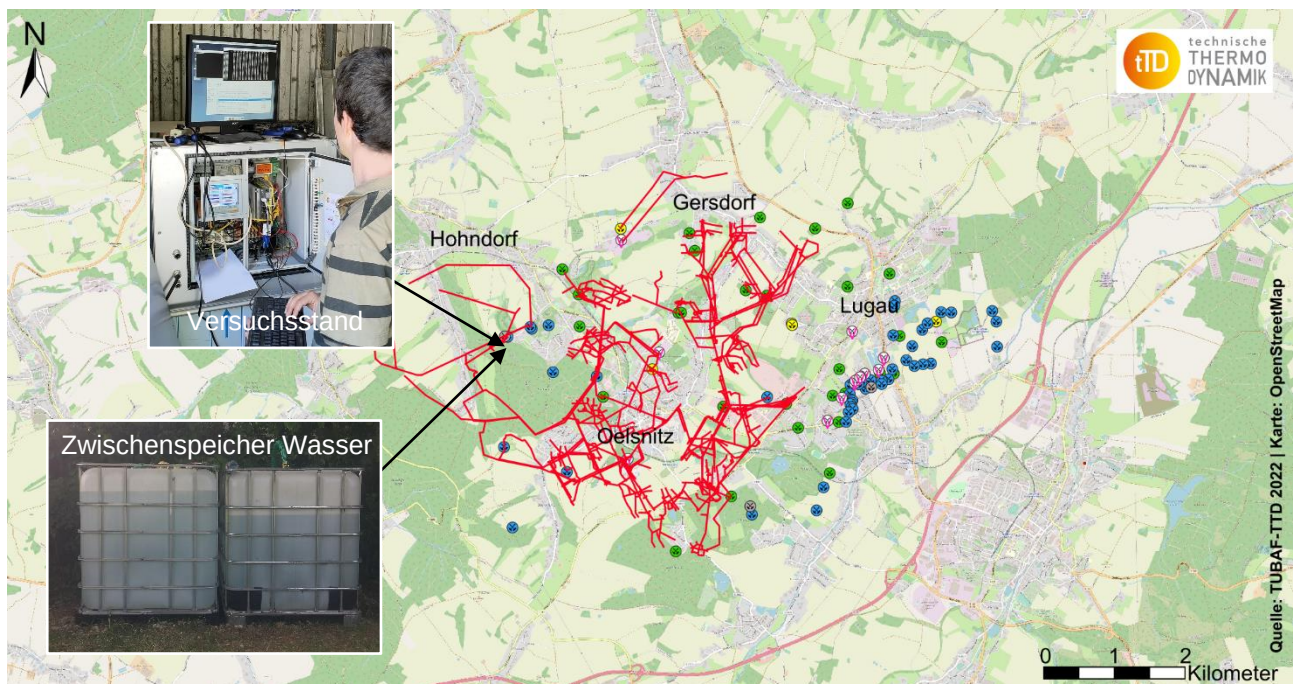


Abbildung 47: Versuchsstandort für den Wärmepumpenversuch mit dem Versuchsstand in der Gemeinde Hohndorf am Tiefbrunnen

Basierend auf den Empfehlungen aus der Literatur zu Materialien die weniger anfällig für Fouling sind und auf den bisherigen Versuchen im Projekt GeoMAP [68] wurden die folgenden Materialien und Beschichtungen für

den Pumpversuch in Hohndorf ausgewählt:

- **Heizkreislauf (Grubenwasser wird abgekühlt):**
 - Standardmäßig in Wärmeübertragern verwendeter Edelstahl: X5CrNiMo17-12-2 (Referenz)
 - SiO₂-Beschichtung
 - PTFE-Beschichtung
 - Versilberung
 - Silber-Nano-Beschichtung
 - Vernickelung
 - Antimikrobielle Beschichtung: Liquid Guard
 - Vinyl-Epoxid-Beschichtung
- **Kühlkreislauf (Grubenwasser wird erwärmt):**
 - Standardmäßig in Wärmeübertragern verwendeter Edelstahl: X5CrNiMo17-12-2 (Referenz)
 - Edelstahl: NiMo16Cr15W
 - Titan
 - PTFE-Beschichtung
 - Versilberung
 - Silber-Nano-Beschichtung
 - Vernickelung
 - Anti-Graffiti-Beschichtung

In Abbildung 48 ist der Verlauf der Wassertemperatur (im Container aus dem das Wasser in den Versuchsstand gepumpt wird) sowie der Verlauf der Volumenströme im Heiz- und Kühlkreislauf des Versuchsstandes über den gesamten Versuchszeitraum dargestellt. Beim Temperaturverlauf sind deutlich die tageszeit- und saisonbedingten Schwankungen zu erkennen. Die Temperatur im Container, aus dem es in den Versuchsstand gepumpt wird, schwankt zwischen rund 12 °C im Oktober und etwa 35 °C im Juni. Die Temperaturänderungen entstehen dabei u.a. durch die Sonnenstrahlung auf die Container und die Abwärme der Wärmepumpe. Während der Versuche wurde jedoch in festen Intervallen auch frisches Wasser aus dem Tiefenbrunnen gepumpt (alle 2 h: Austausch von 10 % des Wassers), so dass in festen Intervallen auch wieder eine Abkühlung des Wassers erfolgte. Die Volumenströme in den Wärmeübertragern der Heiz- und Kühlkreisläufe können ein Indikator für die Bildung von Fouling sein. Durch die Bildung von Fouling wird der durchströmbare Querschnitt im Wärmeübertrager reduziert, weshalb der Volumenstrom sinken kann. In Abbildung 48 ist deutlich zu erkennen, dass der Volumenstrom im Wärmeübertrager für den Heizmodus im Verlauf des Messzeitraums abfällt, wobei der der Kühlseite nahezu konstant bleibt. Insgesamt sind aber keine großen Unterschiede und Änderungen beim Volumenstrom zu beobachten.

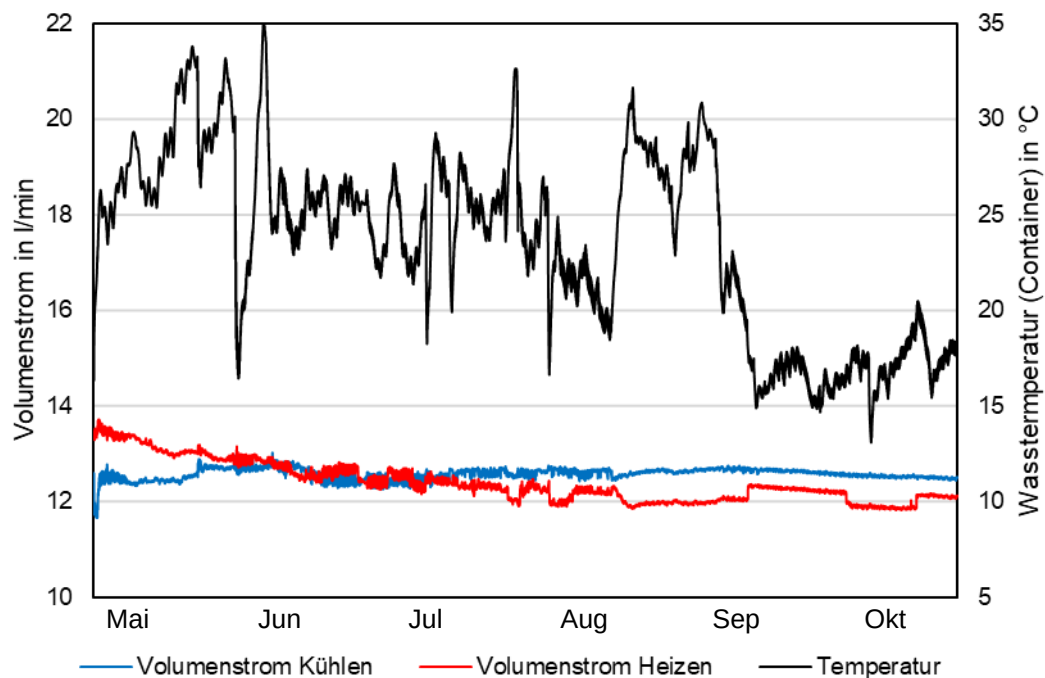


Abbildung 48: Verlauf Wassertemperatur (Container) und der Volumenströme in den Wärmeübertrager für den Heiz- und Kühlmodus über den Versuchszeitraum (05/2022-10/2022) am Standort Hohndorf

Dass es im Rahmen der Versuche eine Bildung von Fouling im Wärmeübertrager gab, lässt sich an den Diagrammen in Abbildung 49 erkennen. Links ist der Druckverlust in den beiden Wärmeübertragern über den Versuchszeitraum dargestellt. Bei beiden Wärmeübertrager steigt dieser über die Versuchszeit an. Auch hier kann die Verringerung des Strömungsquerschnitts im Wärmeübertrager durch das Fouling die Ursache sein. Die Bildung von Fouling ist auch an den rechts in Abbildung 49 dargestellten Verläufen der Heiz-, bzw. Kühlleistung zu erkennen, diese nehmen im Verlauf des Versuchs kontinuierlich ab. Daraus lässt sich schließen, dass durch Fouling nicht mehr so viel Wärme aus dem Grubenwasser entzogen werden kann, da dieses wie eine Dämmschicht wirkt.

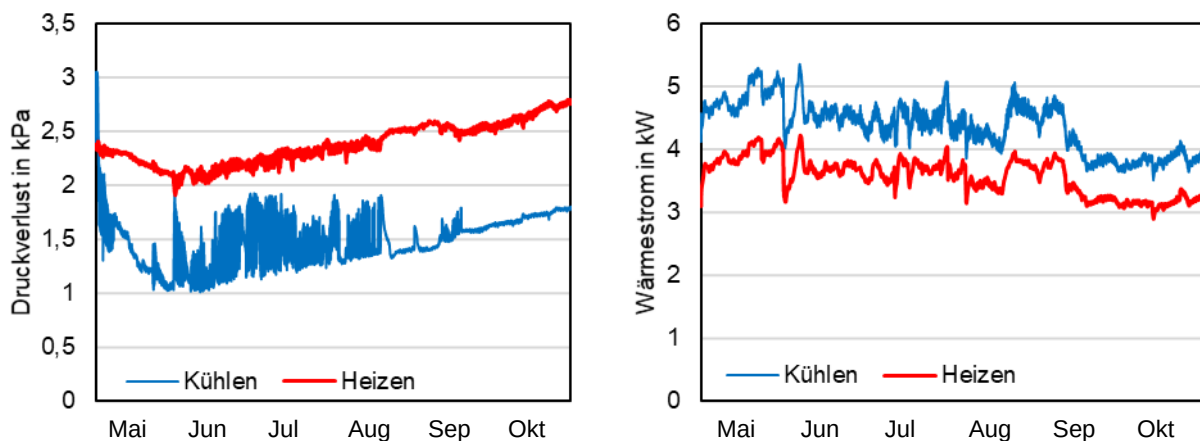


Abbildung 49: Verlauf der Druckdifferenz und der übertragenen Wärmeströme in den Wärmeübertragern für den Heiz- und Kühlmodus über den Versuchszeitraum (05/2022-10/2022) am Standort Hohndorf

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse für die Materialien im Versuchsstand dargestellt. Es sind der Verschmutzungsgrad (Verhältnis von durch Fouling belegter Oberfläche und sauberer Oberfläche) sowie die Gewichtsdiﬀerenz im Vergleich von unverschmutzten Platten zu den Ablagerungen im nassen und im getrockneten Zustand (Ablagerungen über 48 h bei 30 °C getrocknet) dargestellt.

Tabelle 16: Verschmutzungsgrad und Gewichts differenzen zwischen unverschmutzter und verschmutzter Platte für den Pumpversuch in Hohndorf (rot markierte Zahlen: schlechteste Oberfläche in dieser Kategorie, grün markierte Zahlen: beste Oberfläche in dieser Kategorie)

Material	Verschmutzungsgrad in %	Gewichtsdifferenz (nass) in g	Gewichtsdifferenz (trocken) in g
Heizkreislauf			
X5CrNiMo17-12-2	19,4	4,9	0,3
SiO ₂ -Beschichtung	18,5	6,3	0,1
PTFE-Beschichtung	32,3	7,7	0,2
Versilberung	9,0	5,0	0,2
Silber-Nano-Beschichtung	31,3	6,6	0,4
Vernickelung	38,5	7,1	0,6
Liquid Guard	29,1	7,5	0,2
Azure	18,1	5,5	0,4
Kühlkreislauf			
X5CrNiMo17-12-2	22,2	4,1	0,2
NiMo16Cr15W	24,7	5,3	0,3
Titan	26,6	5,5	0,3
PTFE-Beschichtung	18,4	4,7	0,1
Versilberung	3,6	3,9	0,1
Silber-Nano-Beschichtung	23,1	4,1	0,3
Vernickelung	47,9	7,3	0,2
Türkis	20,3	12,6	0,2

Die Ergebnisse zeigen für den Kühlkreislauf eine eindeutige Präferenz für die versilberte Platte, da diese Oberfläche in allen Kategorien die besten Messwerte aufweist. Für den Heizkreislauf ist kein Material eindeutig zu präferieren, zudem können in beiden Kreisläufen keine Materialien, bzw. Oberflächen aufgrund der in Tabelle 16 aufgeführten Messwerte ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurden zusätzlich der Wärmestrom nach dem Versuch, also mit Fouling auf den Wärmeübertragerplatten, berechnet. Als Messgrößen gehen dabei der Verschmutzungsgrad, die Gewichts differenz und die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien ein. In Abbildung 50 sind grau die übertragbaren Wärmeströme der einzelnen Oberflächen für den Ausgangszustand, also ohne Verschmutzung gezeigt. Die Unterschiede zwischen den Oberflächen resultieren aus den unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien. Positiv zu beurteilen sind möglichst hohe Heizleistungen (und simultan Kälteleistungen), bzw. eine möglichst geringe Reduktion der Heizleistung, bzw. Kälteleistung durch das Fouling. Materialbedingte geringere Wärmeleitfähigkeiten, bzw. dann Heiz- und Kühlleistungen lassen sich durch entsprechende Auslegung des Wärmeübertragers ausgleichen, so dass die Reduktion der Leistung durch Fouling als entscheidendes Kriterium betrachtet wird. Es ist zu erkennen, dass die Oberfläche „Versilbert“ die geringsten Verminderungen der Heiz- bzw. Kühlleistung während des Versuchs in Hohndorf aufweist.

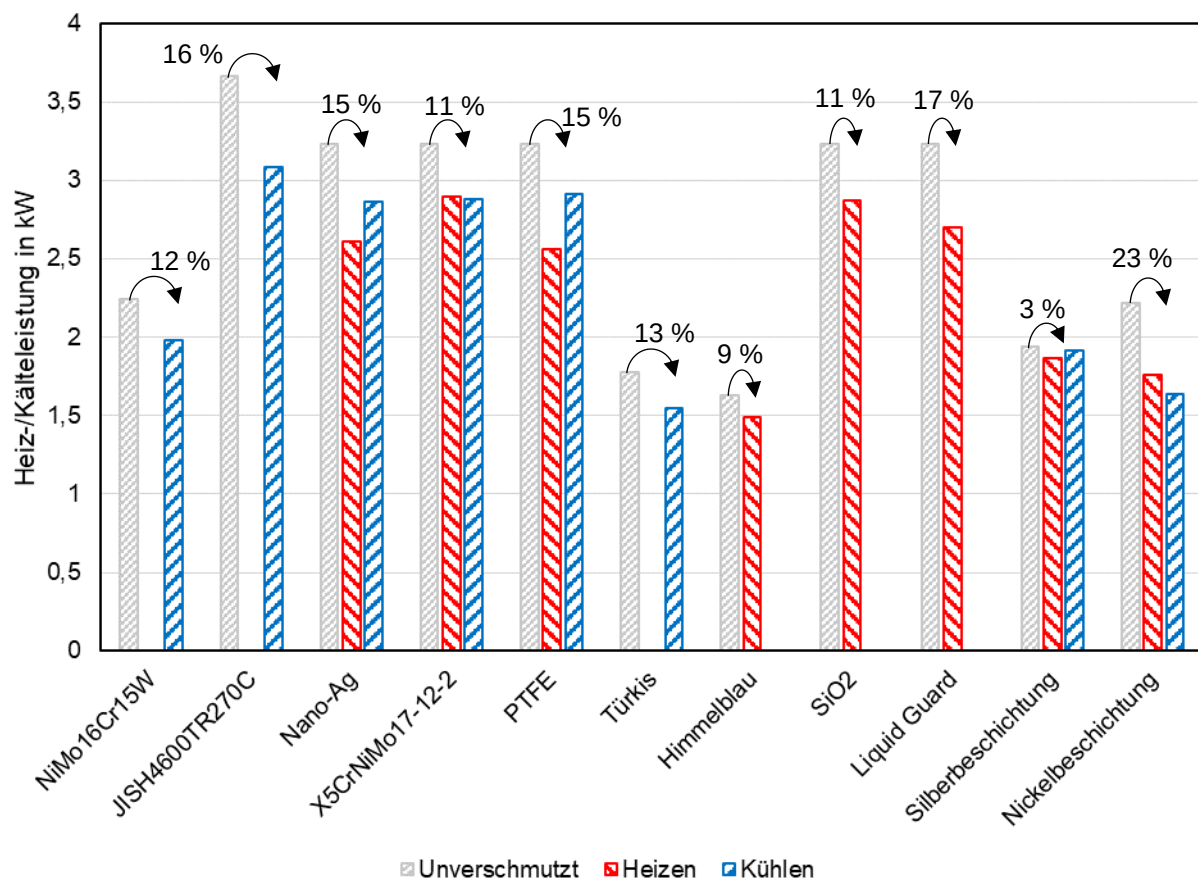


Abbildung 50: Gegenüberstellung der Heiz- und Kälteleistung in den Wärmeübertragern für den Heiz- und Kühlmodus mit dem unverschmutzten Zustand über den Versuchszeitraum (05/2022-10/2022) am Standort Hohndorf, basierend auf den Messwerten der nassen Gewichtsdiffenz und dem Verschmutzungsgrad

Um eine Empfehlung für die zu verwendende Oberfläche am Standort Hohndorf treffen zu können, werden die verwendeten Oberflächen und Materialien jeweils für den Heiz- und Kühlkreislauf separat von 1 bis 8 in den Kriterien:

- Verschmutzungsgrad,
- Gewichtsdiffenz nass,
- Gewichtsdiffenz trocken und
- Reduzierung Heiz- Kälteleistung durch Fouling

bewertet. Aus der Summe der Rankingergebnisse ergibt sich die Empfehlung für den Standort, wobei eine geringe Gesamtsumme am besten zu bewerten ist. Die Ergebnisse in Tabelle 17 zeigen, sowohl für die Heiz- als auch die Kühlwendung die beste Bewertung für die versilberten Platten. Zusätzlich ist auch das Referenzmaterial X5CrNiMo17-12-2 zu empfehlen. Parallel dazu kann für den Standort Hohndorf noch die SiO₂-Beschichtung im Heizkreislauf und die PTFE-Beschichtung im Kühlkreislauf empfohlen werden.

Tabelle 17: Gesamtbewertung der eingesetzten Materialien und Oberflächen am Versuchsstandort Hohndorf

Material	Rang Verschmutzu- ngsgrad	Rang Gewichts- differenz (nass)	Rang Gewichts- differenz (trocken)	Rang Heiz- /Kälteleistung	Summe Ränge	Gesamtrang Material
Heizkreislauf						
X5CrNiMo17-12-2	4	1	5	3	13	3
SiO ₂ - Beschichtung	3	4	1	4	12	2
PTFE- Beschichtung	7	8	2	7	24	7
Versilberung	1	2	2	1	6	1
Silber-Nano- Beschichtung	6	5	6	6	23	6
Vernickelung	8	6	8	7	29	8
Liquid Guard	5	7	2	5	19	5
Azure	2	3	7	2	14	4
Kühlkreislauf						
X5CrNiMo17-12-2	4	2	3	2	11	2
NiMo16Cr15W	6	5	6	5	22	6
Titan	7	6	6	7	26	7
PTFE- Beschichtung	2	4	1	4	11	2
Versilberung	1	1	1	1	4	1
Silber-Nano- Beschichtung	5	2	6	2	15	4
Vernickelung	8	7	3	8	26	7
Türkis	3	8	3	6	20	5

Zu beachten ist bei diesen Schlussfolgerungen, dass sie allein für den Standort Hohndorf anwendbar sind. Untersuchungen des Wassers zeigten, dass am genutzten Tiefenbrunnen ein großer Anteil Grundwasser mit dem Grubenwasser vermischt wird. Deshalb entstehen im Vergleich zu anderen Standorten auch deutlich geringe Foulingmengen (siehe [69], [70]). Das verwendete Wasser und damit auch die Ergebnisse des Versuchs sind nicht oder nur bedingt auf andere Standorte im Revier übertragbar. Aus diesem Grund sind weitere Versuche z.B. an den Grubenwassermessstellen zu empfehlen. Dennoch ist als Projektergebnis festzuhalten, dass für eine mögliche Grubenwassergeothermieanlage am Standort Hohndorf aus technischer Sicht die Verwendung von versilberten Platten im Wärmeübertrager zu empfehlen ist.

3.4 Potentialbestimmung der Standorte

Methodisches Vorgehen

Für eine konsistente Entwicklung des ehemaligen Steinkohlereviers in Bezug auf die thermische Nutzung des Grubenwassers müssen verschiedene Konzepte berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die Potentialanalyse unter Tage, die Netzanalyse über Tage und die derzeitigen und zukünftigen Potentiale innerhalb der Gemeinde ausschlaggebend.

Mit diesen gleichgewichteten und gleichgestellten Voraussetzungen sind sowohl die wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und gemeindebezogenen Anschauungen abgedeckt. Durch die jeweilige Verknüpfung der betrachteten Strecken lassen sich dadurch Potentiale bestimmen, die nach einer von den Projektpartnern getroffenen Kriterienauswahl erfolgsversprechend sind. Dazu werden verschiedene Methoden zur Anwendung gebracht, welche in Kapitel 3.1.2, 3.2.1 sowie 2.2.2 veranschaulicht sind. Die Auswahl der Standorte innerhalb des Reviers für die das energetische Potential berechnet wurde, erfolgte anhand der folgenden drei Wege:

Fall 1: Ausgehend von den Schächten:

Zunächst wurden im Umfeld der Schächte im Bergbaurevier die energetischen Potentiale bestimmt. Die Schächte selber bilden dabei aber nur den Ausgangspunkt der Analyse und sind nicht Bestandteil der nutzbaren Hohlräume, was in Kapitel 3.1.2 näher erläutert wurde. Die betrachteten Strecken nahe der Schächte sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Fall 2: Ausgehend von durch die Gemeinden definierte potentielle Abnehmergebiete:

In Zusammenarbeit mit den Gemeinden des Bergbaureviers wurden mögliche Abnahmegebiete definiert, da dort z.B. kommunale Gebäude versorgt werden können, neue Wohngebiete geplant sind oder auch generell große Wärmebedarfe anliegen. Anschließend wurde in der Nähe der definierten Abnahmegebiete nach nutzbaren Strecken gesucht und für diese das Potential bestimmt.

Fall 3: Ausgehend von der vom DBI GUT durchgeführten Clusterbildung:

Dadurch konnten Gebiete ausgewiesen werden, die auf kleinem Raum große Wärmebedarfe aufweisen und somit potentiell sehr gut für eine mit netzgebundene Wärmeversorgung mit Grubenwasser geeignet sind. Auch hier wurden in der Nähe der Cluster nutzbare Strecken identifiziert und für diese das energetische Potential bestimmt. Für Cluster > 15.000.000 kWh/a ergaben sich drei Standorte in den Gemeinden Oelsnitz, Lugau sowie Gersdorf. Mit der Hinzunahme des Clusters 5.000.000 kWh/a - 15.000.000 kWh/a, wurden weitere Gebiete in Hohndorf sowie in den bereits erwähnten Gemeinden aufgezeigt und hinzugefügt.

Die Untersuchung der Gebiete erfolgte, wie beschrieben, unter drei voneinander unabhängigen Ausgangspunkten. Die Potentiale ergeben sich unter der Annahme, dass jeweils eine Förderbohrung, die zur Entnahme des Grubenwassers vorgesehen ist und eine Reinjektionsbohrung, in der das Grubenwasser wieder in die Strecke eingebracht wird, abgeteuft werden muss. Für die Potentiale ist es von hohem Interesse, dass das Wasser die längste mögliche Strecke zwischen den Bohrungen zurücklegen muss, um möglichst viel Wärme aus dem umliegenden Gestein aufzunehmen. Ist der Weg zwischen Förder- und Reinjektionsbohrung zu gering, kann weniger thermische Energie aus dem Gestein aufgenommen und damit genutzt werden. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass bei Strecken, wo Förder- und Reinjektionsbohrung unmittelbar nebeneinander aufgezeichnet wurden, ein untertägiges Bauwerk errichtet werden muss (z. B. verpressen von Beton o. ä.), um dem Wasser einen längeren Weg aufzuzwingen.

Durch eine spätere Verschneidung der Daten von unter- und über Tage können dadurch standortspezifisch die besten Platzierungen für Förder- sowie Reinjektionsbohrung abgeleitet werden. Anschließend können die jeweiligen Potentiale in verschiedenen Abbildungen für jede Gemeinde spezifisch nachgeschlagen werden. Es wurden die Zeiträume 25 und 50 für die Betrachtung und die Darstellung gewählt. Entsprechend des Potentials sind in den folgenden Karten die Potentiale für die unterschiedlichen Streckenabschnitte veranschaulicht. Je größer der jeweilige Kreis auf dem Punkt der möglichen Förder- und Reinjektionsbohrung,

desto höher ist sein Potential. Mit der Farbe des Kreises wird darüber hinaus verdeutlicht, welche Temperaturen an diesem Aufschlusspunkt durch den geothermischen Temperaturanstieg erwartbar sind (vgl. Tabelle 13).

Ergebnisse

Ausgehend von der oben beschriebenen Methodik wurde mit den Ergebnissen für die betrachteten Gemeinden für jeden der drei Wege jeweils eine Potentialkarte erstellt. Dabei wurden die Potentiale sowohl für einen Nutzungszeitraum von 25, als auch von 50 Jahren berechnet und dargestellt. Die Potentialkarten sind nachfolgend aufgeführt. Dabei bedeutet ein größerer Kreis ein größeres Wärmepotential, je dunkler der Farbton ist, desto höher ist die nutzbare Temperatur.

Große Potentiale konnten u.a. in den nachfolgenden Bereichen identifiziert werden. Die Gebiete sind dabei anhand der nächstliegenden Schächte, Straßen oder sonstigen markanten Einrichtungen benannt:

- Freibad Gersdorf
- Kaisergrubenstraße Gersdorf
- Merkur – Schacht Gersdorf
- Pluto – Schacht Gersdorf
- Stadion Gersdorf
- Fleischerberg Hohndorf
- Vereinigt - Feld Schacht II Hohndorf
- Heinrich-Heine-Straße Lugau
- Saxoniaschacht Lugau
- Berufsschulzentrum Oelsnitz
- Deutschland-Schacht II Oelsnitz
- Vereinsglück-Schacht Oelsnitz

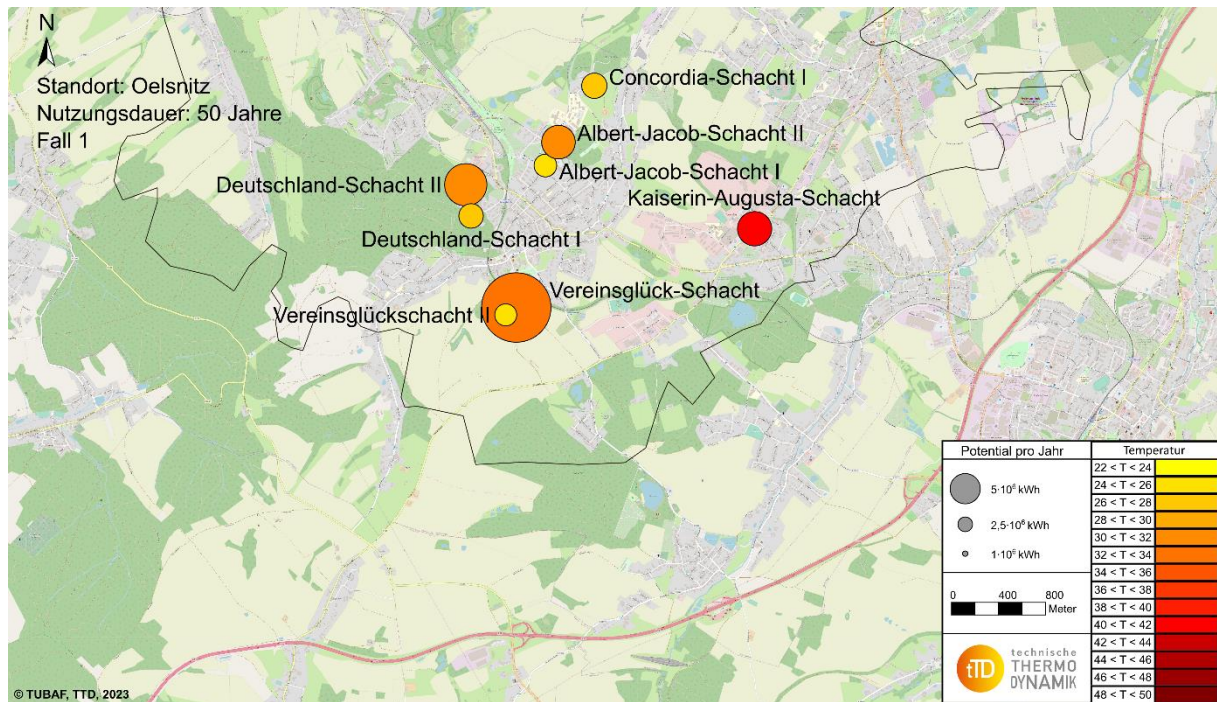


Abbildung 51: Fall1 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Oelsnitz ausgehend von den Schächten

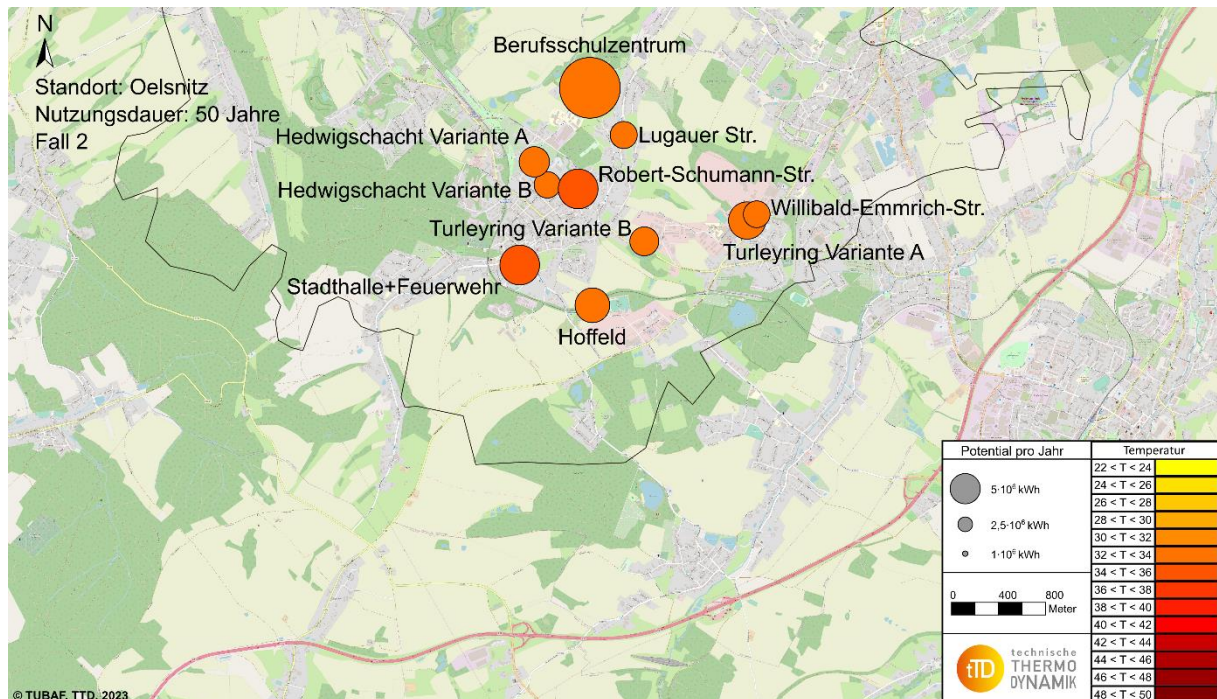


Abbildung 52: Fall 2 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Oelsnitz ausgehend von durch Gemeinden definierten potentiellen Abnehmergebieten

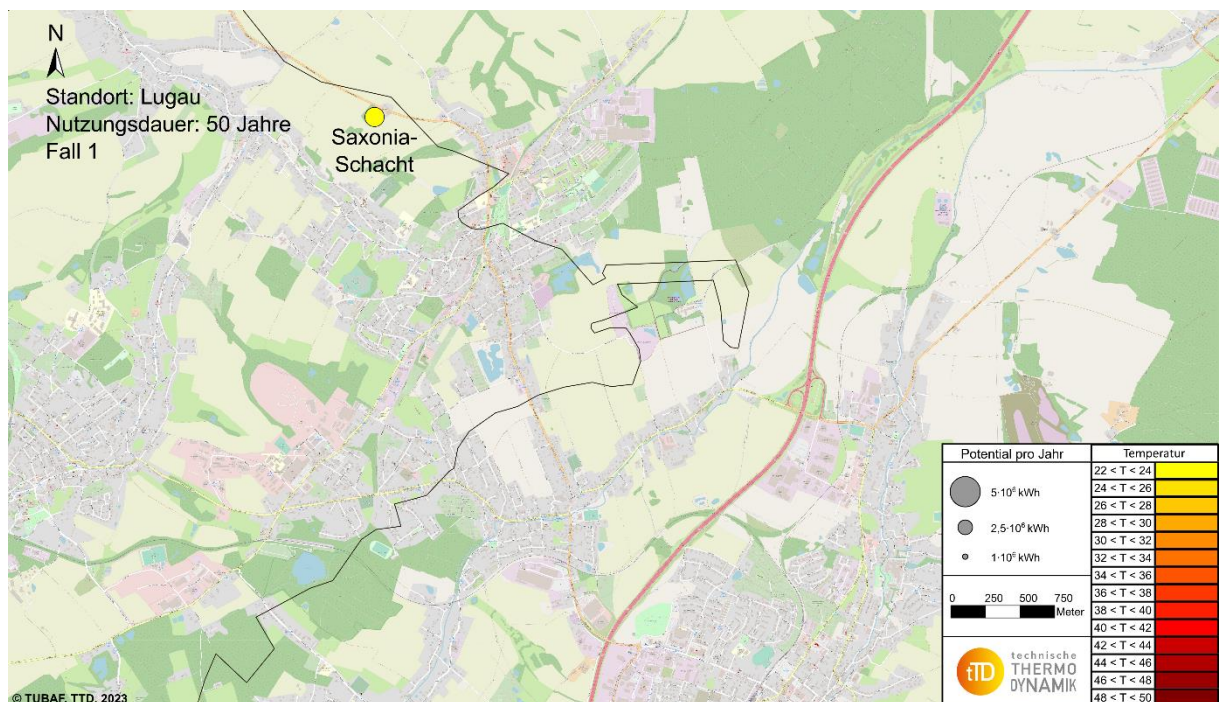


Abbildung 53: Fall 1 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Lugau/ Niederwürschnitz ausgehend von den Schächten

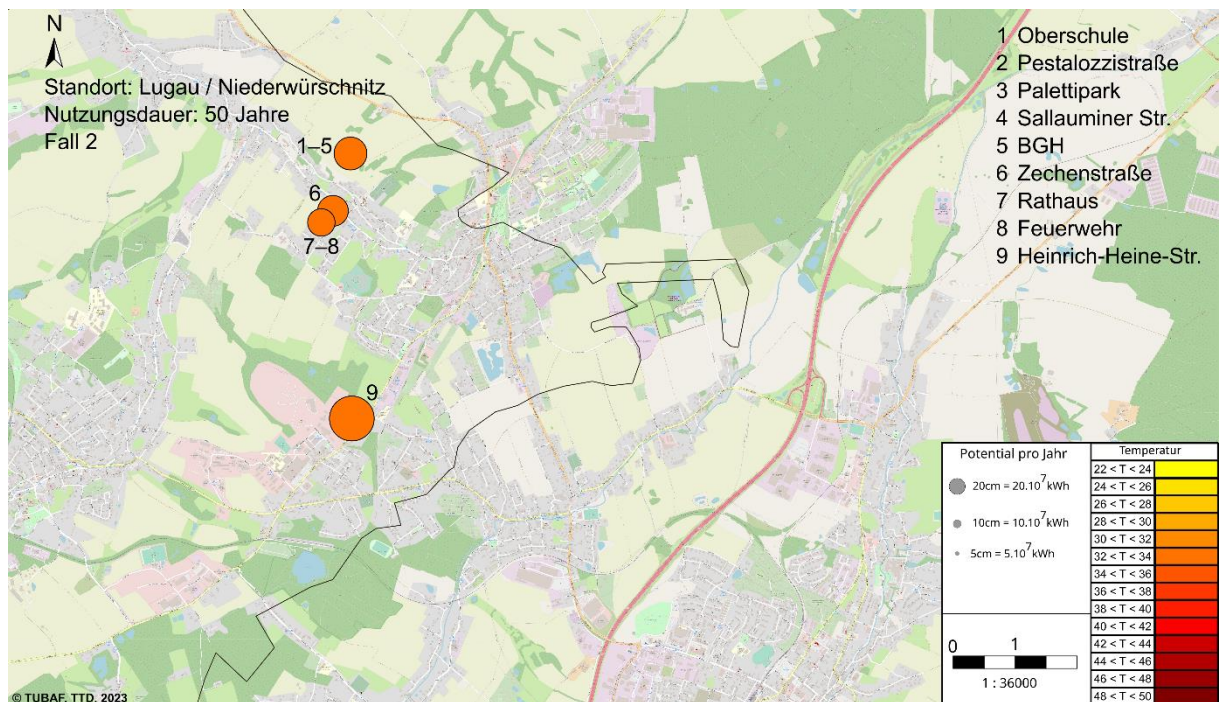


Abbildung 54: Fall 2 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Lugau/ Niederwürschnitz ausgehend von durch Gemeinden definierten potentiellen Abnehmergebieten

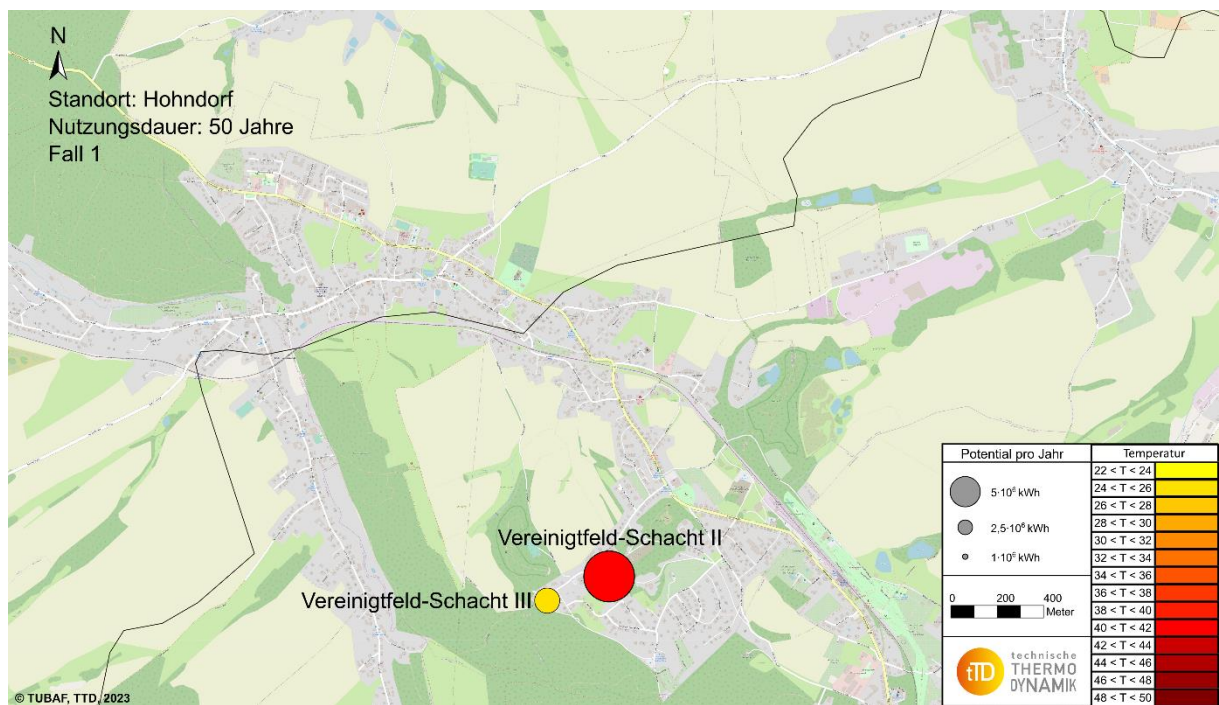


Abbildung 55: Fall 1 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Hohndorf ausgehend von den Schächten

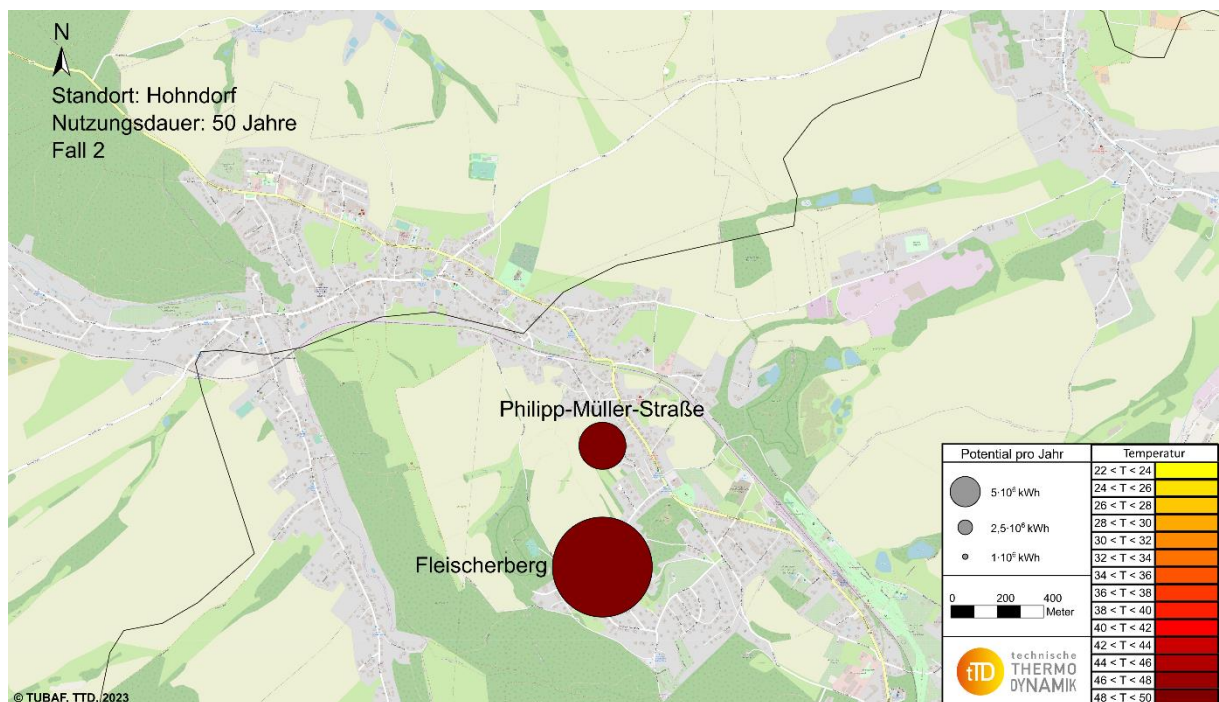


Abbildung 56: Fall 2 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Hohndorf ausgehend von durch Gemeinden definierten potentiellen Abnehmergebieten

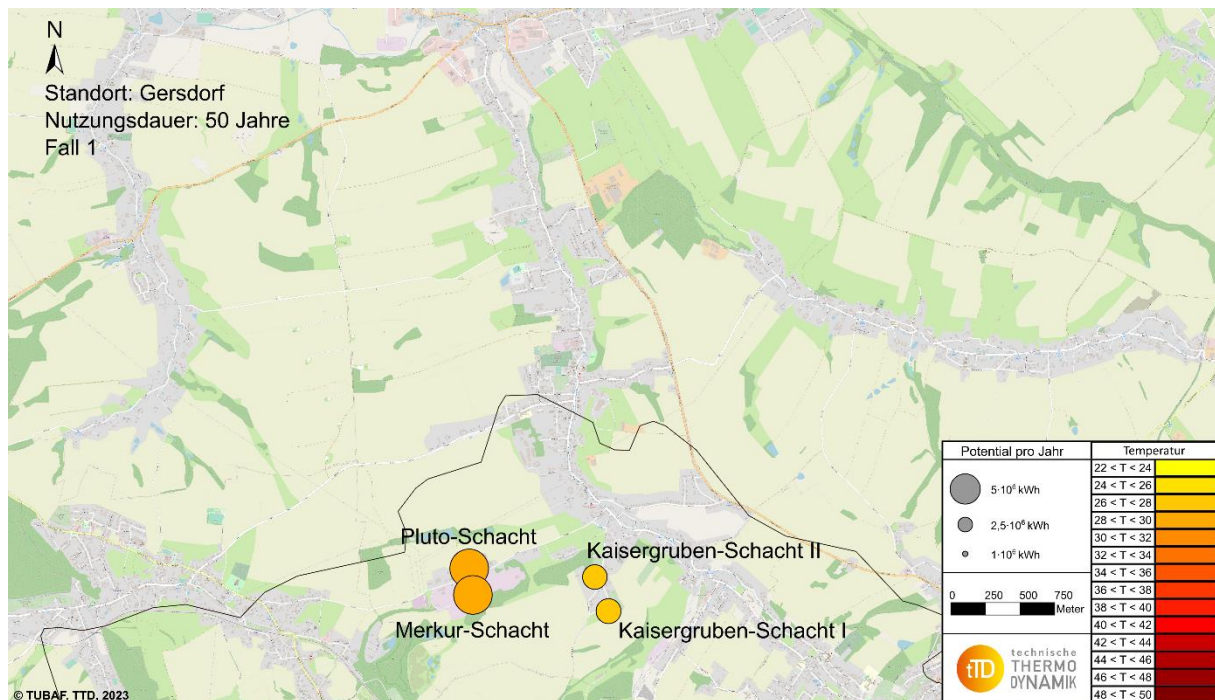


Abbildung 57: Fall 1 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Gersdorf ausgehend von den Schächten

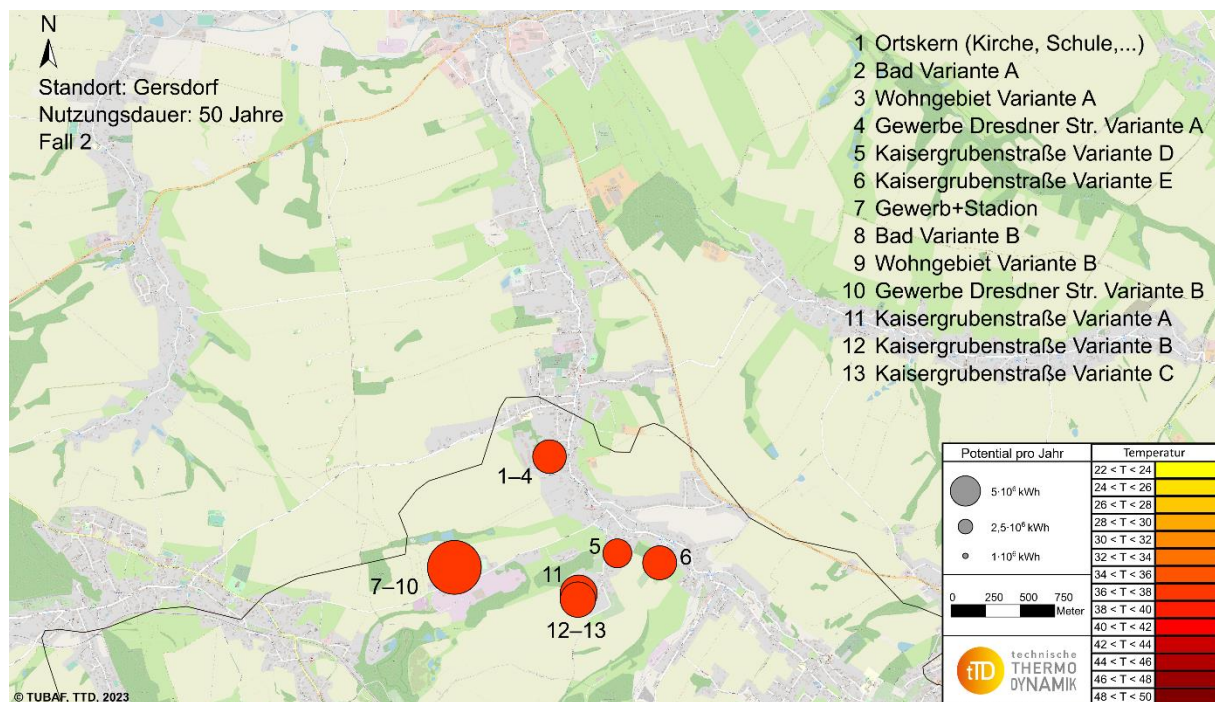


Abbildung 58: Fall 2 Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre in Gersdorf ausgehend von durch Gemeinden definierten potentiellen Abnehmergebieten

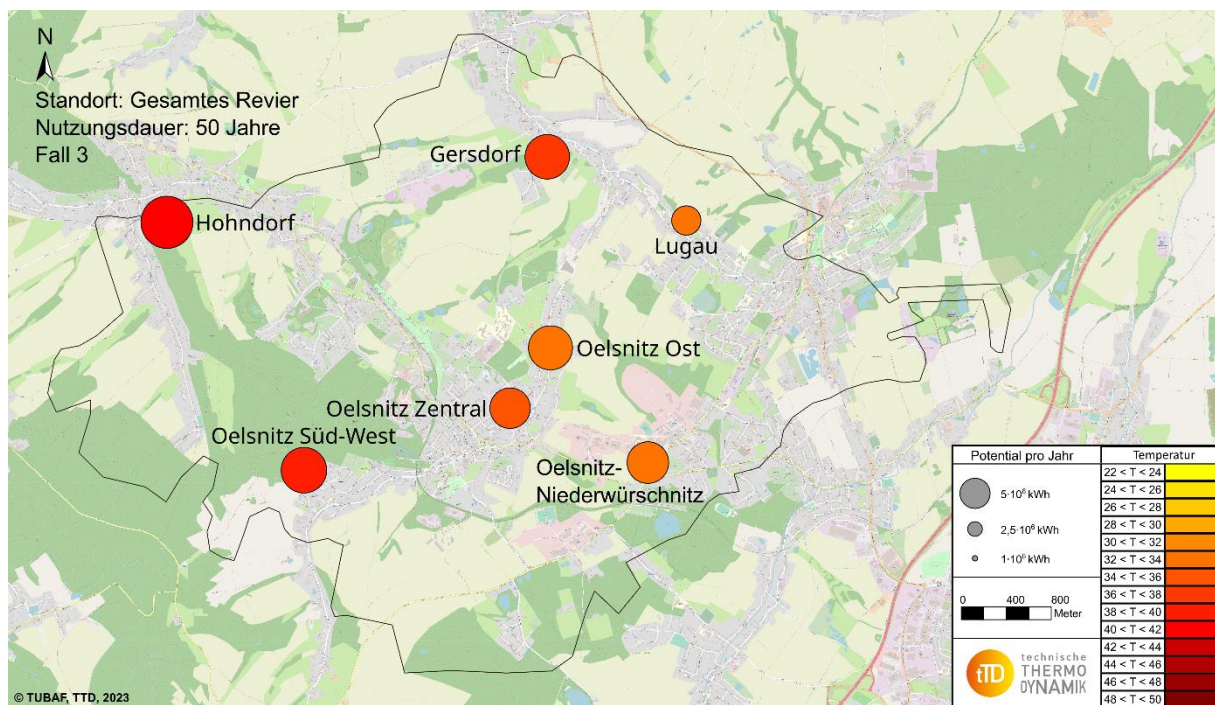


Abbildung 59: Fall 3 - Potentialbetrachtung (jährlich entziehbare Energiemenge) für 50 Jahre im gesamten Revier ausgehend von der vom DBI GUT durchgeführten Clusterbildung

4 Abgleich der untertägigen Potentiale mit obertägigen Wärmesenken

4.1 Gegenüberstellung des untertägigen und obertägigen Potentials

Das Hauptanliegen im Projekt ist neben der Potentialermittlung im Untertage- und Obertagebereich interessante Ortsteile oder Quartiere zu identifizieren, die für eine Konzeptanalyse näher betrachtet werden sollen. Die Analysen sollen hierbei in einem höheren Detaillierungsgrad als bei den beiden separat durchgeführten Potentialanalysen vorgenommen werden. Im ersten Schritt wird eine konkrete Gegenüberstellung der potenziellen Grubenwasser-Entnahmepunkte (siehe Kapitel 3) mit den Wärmeabnahmepotentialen durchgeführt (siehe Kapitel 2). Nachfolgend ist das Ergebnis der Analyse in Abbildung 60 dargestellt.

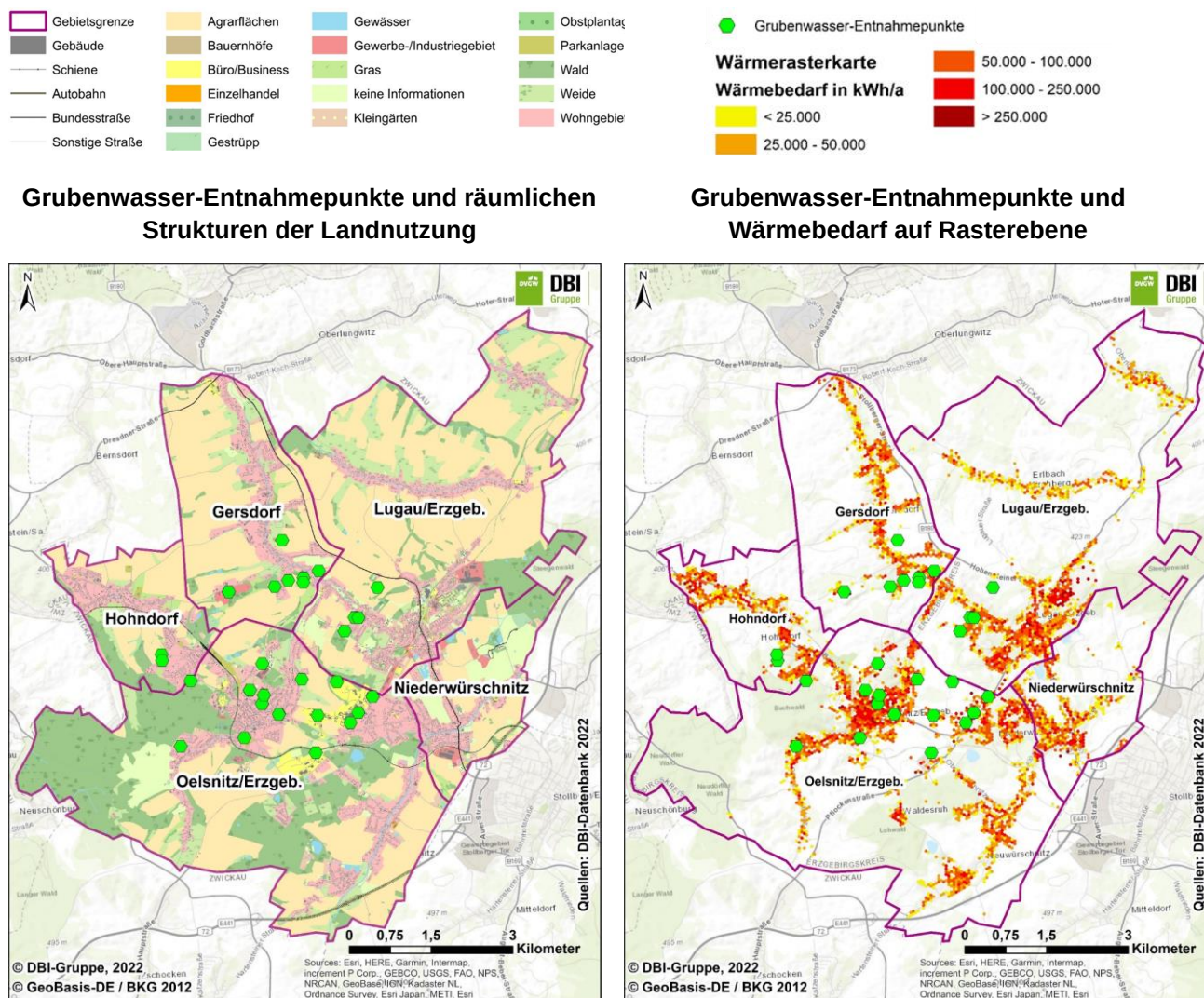


Abbildung 60: Gegenüberstellung potenzieller Grubenwasser-Entnahmepunkte mit räumlichen Strukturen der Landnutzung und Wärmebedarfen auf Rasterebene in den betrachteten Gemeinden

Bei der räumlichen Analyse konnte festgestellt werden, dass fast alle potenziellen Grubenwasser-Entnahmepunkte in relevanten Gebieten verortet sind. Bis auf einen Entnahmepunkt (nördlichster Punkt in Lugau) liegen alle Standorte in unmittelbarer Nähe zu Wohn-, GHD- oder Industriell genutzten Gebieten (siehe

linke Seite Abbildung 60). Dies bedeutet, dass in den meisten Fällen für das untertägige energetische Potential auch Abnehmer für die Wärmeenergie vorhanden sind. Die Höhe des lokalen Wärmebedarfs sowie die Anzahl an Wärmeabnehmern schwanken jedoch zwischen einzelnen Grubenwasser-Entnahmepunkten stark (siehe rechte Seite Abbildung 60). Um die wirtschaftlich geeignetsten Standorte (Ortsteile oder Quartiere) zu identifizieren, müssen mögliche Netzversorgungsstrukturen mit betrachtet werden. Weiter sind in der Abbildung auch jene Regionen klar zu erkennen, in der ein Wärmebedarf existiert jedoch keine Grubenwasser-entnahmepunkte vorhanden sind. Dies betrifft den Südosten von Oelsnitz, den Nordwesten von Hohndorf, den Norden von Gersdorf, den Nordosten von Lugau und das komplette Gebiet von Niederwürschnitz.

4.2 Identifizierung von geeigneten Standorten im Untersuchungsgebiet

Im Rahmen des Projektes werden zehn Standorte in Form von Quartieren oder Ortsteilen ausgewählt, um diese näher in einer ökonomischen Betrachtung zu bewerten. Ziel ist es, ein möglichst breites Spektrum an unterschiedlichen Standorten in die Analyse einzubeziehen. Zum einen sollen fünf Standorte mit den höchsten wirtschaftlichen Wärmeabnahmepotentialen näher bewertet werden. Ergänzt werde diese zum anderen von fünf weiteren Standorten, welche aufgrund von bautechnischen Merkmalen oder anderen konkreten Ortsfaktoren (bspw. das Interesse von Gemeinden oder Stadtverwaltungen etc.) im Fokus stehen.

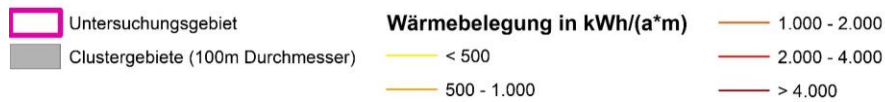
Identifikation der fünf wirtschaftlichsten Standorte

Um die potenziell wirtschaftlichsten Standorte zu identifizieren, werden Wärmenetzmodellierungen für mehrere Szenarien in Abhängigkeit der Grubenwasserentnahmestellen durchgeführt. Hierbei wurden für die Modellierung in den betrachteten Gemeinden Oelsnitz, Hohndorf und Gersdorf, sowie der Verwaltungsgemeinschaft Lugau/Niederwürschnitz vier verschiedene Wärmebelegungen genutzt. Die Wärmebelegung eines Netzes ist definiert durch die abgesetzte Wärmemenge pro Jahr und Meter Leitung (siehe Kapitel 2) und ist ein Maß für die potenzielle Wirtschaftlichkeit des Versorgungsnetzes [38]. Für jedes der vier Szenarien mussten die einzelnen Wärmenetzabschnitte ein bestimmtes Minimum an Wärmeenergie pro Jahr und pro Meter Leitung absetzen. Netzabschnitte, die die jeweiligen Grenzen (Mindestwärmebelegung) nicht erreichten, wurden in den entsprechenden Belegungsszenarien nicht mehr berücksichtigt. Ziel ist es, Netzabschnitte auf Basis der in Kapitel 2 durchgeführten vollständigen Bewertung zu identifizieren, an denen sich der Bau einer Grubenwasseranlage am ehesten lohnen kann. Daher werden die für das gesamte Untersuchungsgebiet durchgeführten Analysen in diesem Schritt mit den Daten der untertägigen Analyse angereichert und das Gebiet näher eingegrenzt. Um diese Gebiete zu identifizieren, ist eine Vorselektion auf Basis der Mindestwärmebelegungen und Eingrenzung der im Abschnitt 2 identifizierten Versorgungscluster nötig.

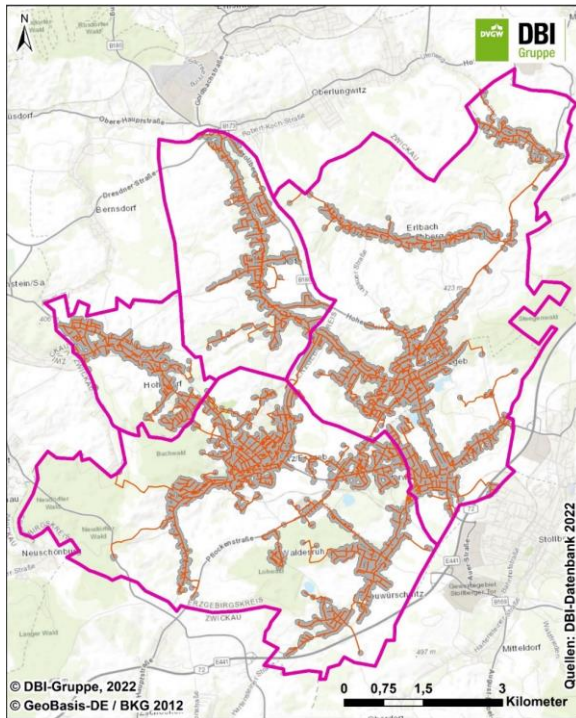
Je größer die Mindestwärmebelegung gewählt wird, desto mehr Energie kann im Versorgungsnetz abgesetzt werden, was die jeweiligen Wärmenetze rentabler macht. In der Analyse werden folgende vier Belegungsszenarien mit nachfolgenden Mindestwärmebelegungen betrachtet:

- 1.500 kWh/(a·m)
- 2.000 kWh/(a·m)
- 2.500 kWh/(a·m)
- 3.000 kWh/(a·m)

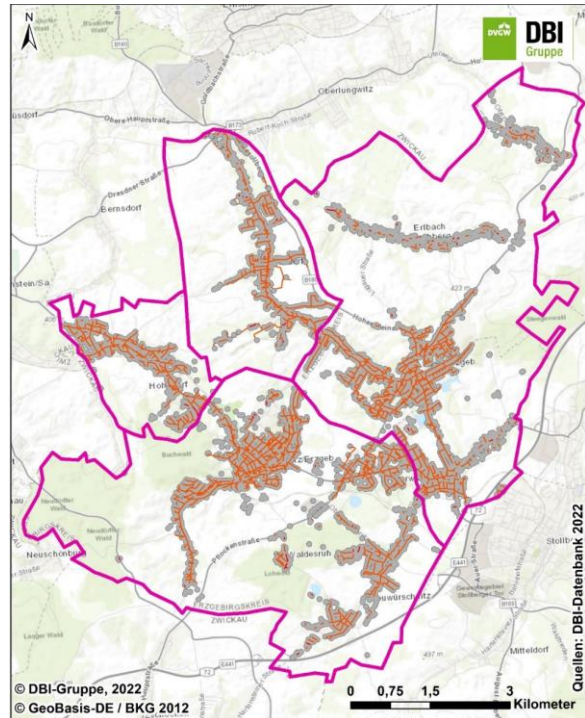
Wie bereits eingangs im Kapitel 2 erwähnt wurde, ist die Mindestwärmebelegung ein Maß für die potenzielle Wirtschaftlichkeit des Versorgungsnetzes [38]. Denn je strenger die Wärmebelegung ausgelegt wird, desto lukrativer werden die nach dieser Randbedingung ausgewählten Netzabschnitte, da die Kosteneffizienz des Wärmenetzes bei einer größeren abgesetzten Wärmemenge pro Meter Leitung steigt. Die Ergebnisse der Analyse sind in der nachfolgenden Abbildung entsprechend der vier Szenarien dargestellt.



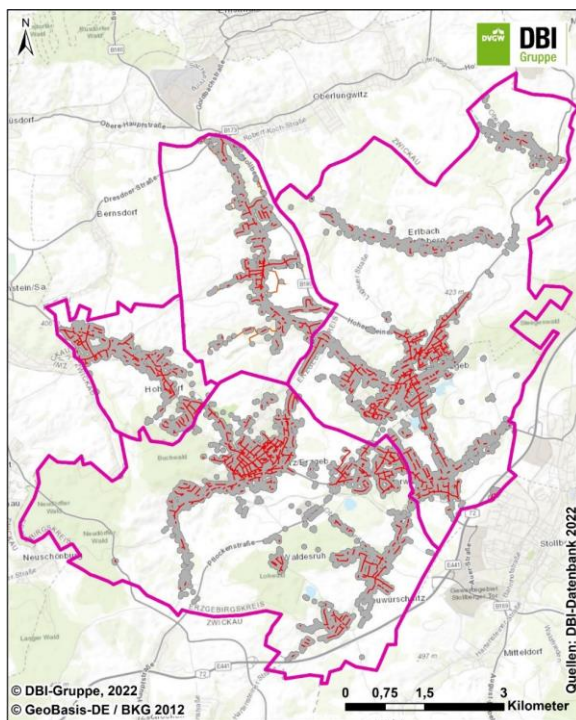
Wärmenetzversorgungsstrukturen bei einer Mindestwärmebelegung von 1.000 kWh/(a*m)



Wärmenetzversorgungsstrukturen bei einer Mindestwärmebelegung von 1.500 kWh/(a*m)



Wärmenetzversorgungsstrukturen bei einer Mindestwärmebelegung von 2.000 kWh/(a*m)



Wärmenetzversorgungsstrukturen bei einer Mindestwärmebelegung von 2.500 kWh/(a*m)

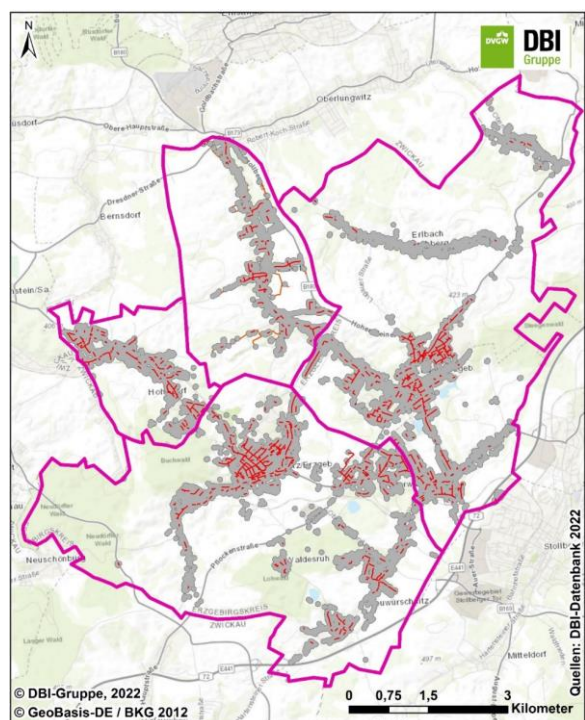
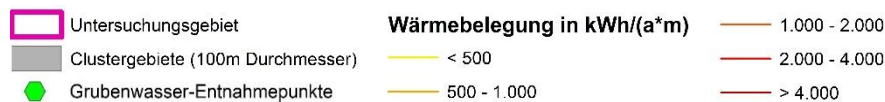


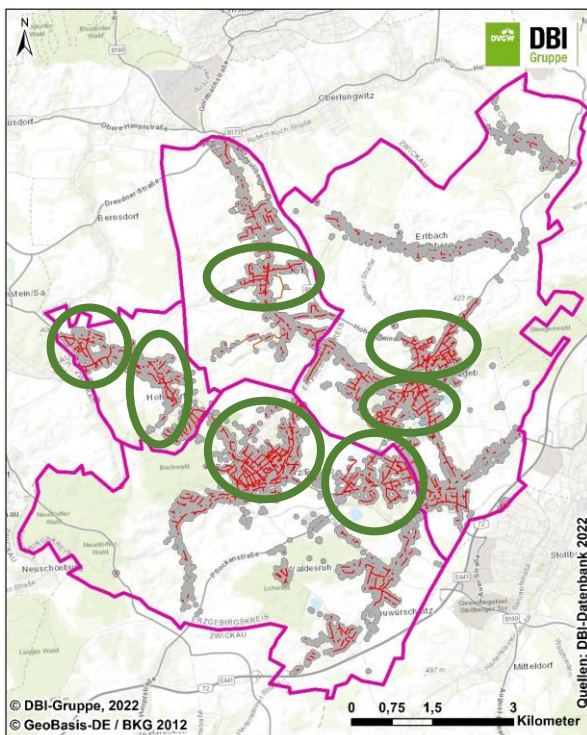
Abbildung 61: Analyse zur Netzmodellierung für verschiedenen Belegungsszenarien (Mindestwärmebelegung von 1.000, 1.500, 2.000 und 2.500 kWh/(a*m))

Wie in Abbildung 61 ersichtlich ist, schränkt sich mit steigender Mindestwärmebelegung das Versorgungsgebiet immer weiter ein. Ebenso zeigt diese Betrachtung einerseits, dass sowohl die Anzahl potenzieller Standorte als auch die abgesetzten Gesamtwärmemengen abnehmen. Andererseits wird deutlich, welche potenziellen Netzabschnitte, die wirtschaftlichsten sind. So ist bspw. zu erkennen, dass bei einer Mindestwärmebelegung von 1.000 kWh/(a·m) in jeder der drei Gemeinden und der Verwaltungsgemeinschaft eine vollständige netzgebundene Versorgung möglich ist. Ab einer Belegung von 1.500 kWh/(a·m) zerfallen die vier Netze in kleine Netzteile, deren Anzahl sich mit steigender Mindestwärmebelegung immer weiter reduziert.

Im iterativen Wechselspiel zwischen den einzelnen Belegungsszenarien lassen sich die Ortsteile und Quartiere, die bei einer netzgebundenen Energieversorgung die höchsten Wärmeabnahmedichte aufweisen, identifizieren, siehe Abbildung 62. In Summe konnten sieben Ortsteile bzw. Quartiere identifiziert werden, die bei einer netzgebundenen Versorgung die höchste wirtschaftliche Relevanz aufweisen (siehe Abbildung 62 links). Da in den wirtschaftlich relevanten Gebieten nicht immer eine räumliche Nähe zu Grubenwasser-Entnahmepunkten gewährleistet ist, wurden nur die besten fünf für eine detaillierte ökonomische Betrachtung ausgewählt (siehe Abbildung 62 rechts).



Ortsteile und Quartiere mit der höchsten wirtschaftlichen Relevanz



Ausgewählte Ortsteile und Quartiere mit potenziellen Grubenwasser-Entnahmepunkten

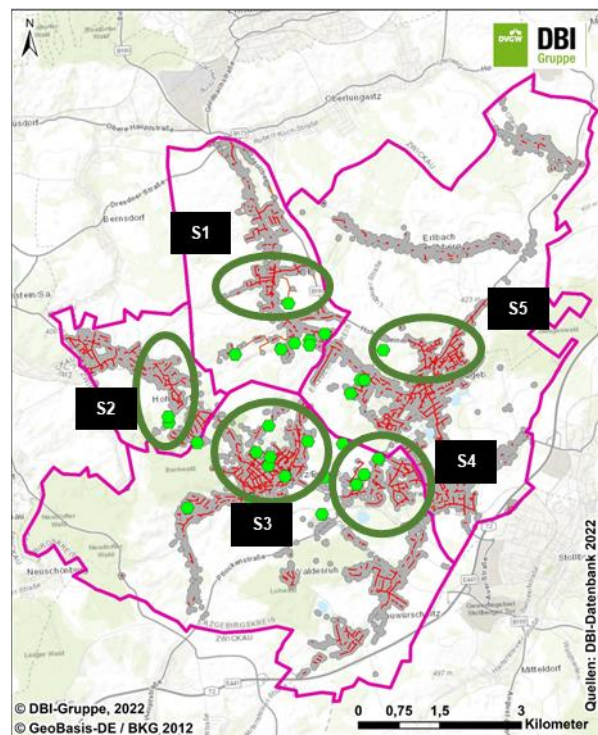


Abbildung 62: Identifizierte und ausgewählte Ortsteile und Quartieren mit der höchsten wirtschaftlichen Relevanz und Zugang zu Grubenwasser-Entnahmepunkten.

Nachfolgend findet sich eine namentliche Auflistung der fünf wirtschaftlich relevantesten Standorte:

- S1: Gersdorf
- S2: Hohndorf
- S3: Oelsnitz (Zentrum)
- S4: Oelsnitz (Neu-Oelsnitz)
- S5: Lugau / Niederwürschnitz

Identifikation weiterer relevanter Quartiere

Neben den wirtschaftlich relevantesten Standorten erfolgte zusätzlich die Auswahl von fünf weiteren Quartieren. Grundlage für diese zweite Auswahl waren interessante bautechnische Merkmale oder andere konkrete Ortsfaktoren. Die Lage, sowie die räumliche Ausdehnung der 5 Quartiere ist in Abbildung 63 dargestellt. Nachfolgend findet sich eine Auflistung der fünf Quartiere sowie des zugehörigen Standortfaktors, welcher Maßgebend für die Auswahl war:

- S6: Kaisergrubenschacht → Neubaugebiet bzw. Gebiete und bestehende Siedlungen
- S7: Oelsnitz Wohnungsgenossenschaft (Hedwigschacht) → Mehrfamilienhäuser im Bestand
- S8: Hohndorf Fleischberg → Neubausiedlung mit Eigenheimen
- S9: Lugau Sallauminer Straße → Plattenbausiedlung mit schon bestehendem Netz
- S10: Gersdorf Merkur Schacht → wenig Bebauung jedoch mögliche gewerbliche Nutzungszwecke

Auswahl Quartiere mit relevanten Standortfaktoren

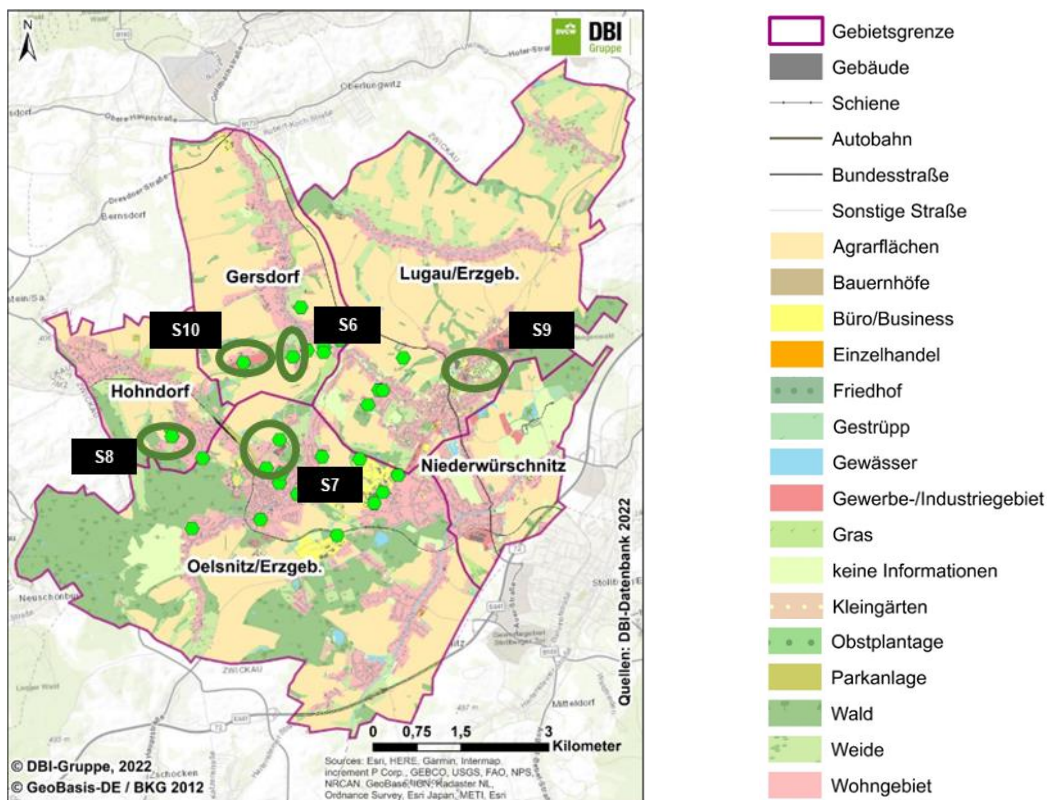


Abbildung 63: Identifizierung von fünf zusätzlichen Quartieren mit relevanten Standortfaktoren

Grobtrassierung und Kennwertauswertung

Mit Hilfe des *DBI-GridAnalyst* werden für die fünf ausgewählten Ortsteile bzw. Quartiere auf Grundlage der identifizierten potenziell lukrativen Netzabschnitte automatisiert Grobtrassierungen für Wärmenetzverläufe erstellt. Zusätzlich erfolgt eine detaillierte Auswertung der angeschlossenen Abnehmer hinsichtlich der einzelnen Wärmebedarfe, sowie der einzelnen Netzkennwerte (Wärme-Belegung, abgesetzte Wärme-Menge, Netzlänge und Anzahl angeschlossene Gebäude). Diese Kennwerte bilden wiederum die Basis für stündliche Modellierung der benötigten Wärmeleistung des Netzes. Das daraus entstehende wärmenetzspezifische Lastprofil bildet die Grundlage für die detailliertere ökonomischen Betrachtung der 10 ausgewählten Ortsteile und Quartiere, sowie der zugehörigen modellierten Wärmenetz-Grobtrassierungen. Die beispielhafte Darstellung der Ergebnisse können der Abbildung 64 entnommen werden.

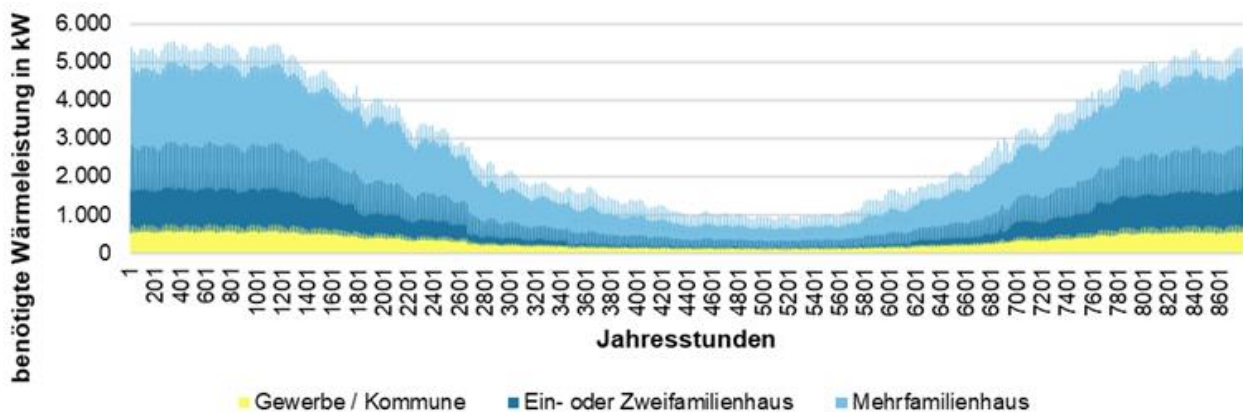
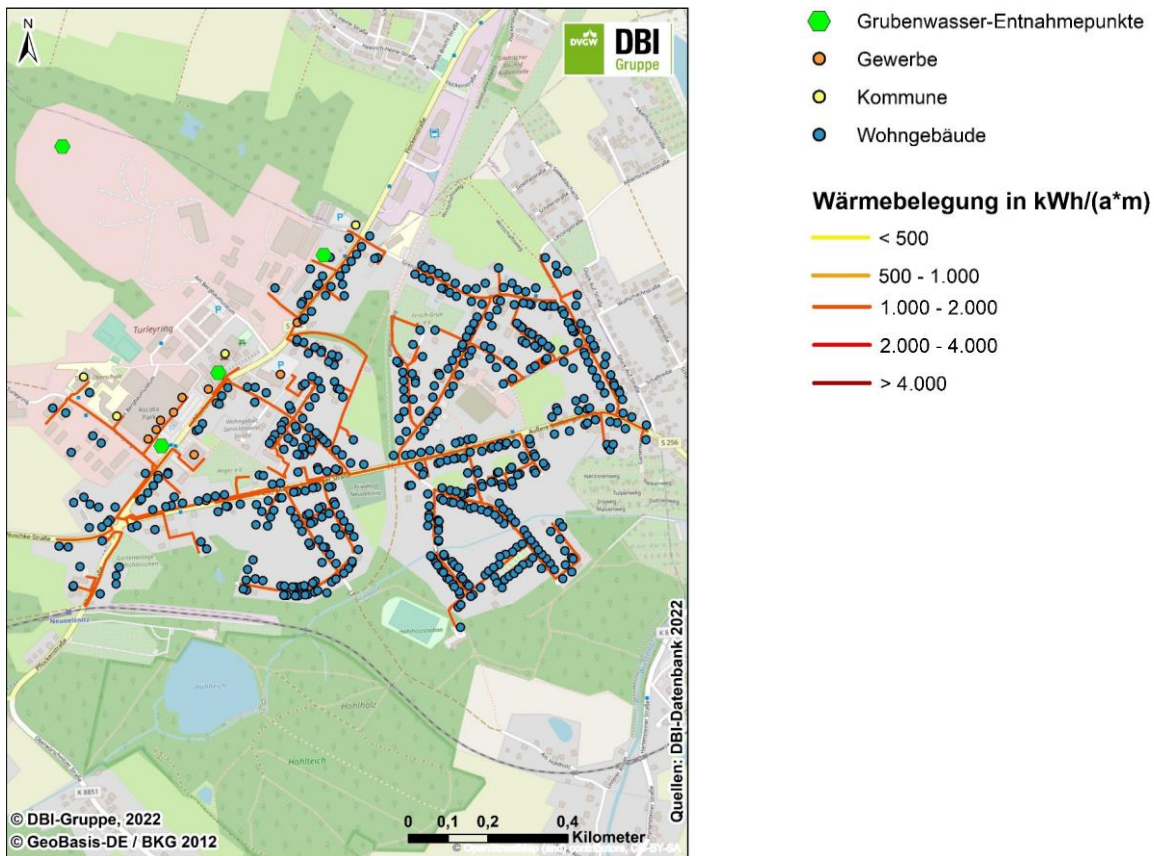


Abbildung 64: Grobtrassierung, Kennwertauswertung und Lastprofil für das Beispiel S4: Oelsnitz (Neu-Oelsnitz)

Die hier ermittelten Ergebnisse bilden im Kapitel 5 die Basis, um die Energieversorgungskonzepte hinsichtlich Ökonomie, Ökologie und abgesetzten Energiemengen zu bewerten. Dazu werden zu allen zehn identifizierten Standorten Steckbriefe erstellt, die die Standorte bzgl. der Energieversorgung unter Tage und über Tage näher charakterisieren.

5 Evaluierung von energetischen Versorgungskonzepten für geeignete Standorte

5.1 Bewertungsaspekte der ermittelten Versorgungsnetze

Energetische Betrachtung

Um die Standorte bezüglich der Wärmeleistungspotenziale zu evaluieren, ist es essenziell die Rahmenbedingungen zu definieren, innerhalb derer die Berechnungen durchgeführt werden. Für jeden Standort sind dafür verschiedene Parameter notwendig. Die Berechnungsparameter sind in Tabelle 14 im Kapitel 3.2 zusammengefasst. Analog zur im Kapitel 3.2.2 vorgestellten Berechnung zum Standort Kaisergrubenschacht können so die Wärmepotenziale in den weiteren ausgewählten Standorten quantifiziert werden. Insbesondere die Streckenlänge sowie die Streckentemperatur haben dabei eine hohe Auswirkung auf die mögliche Wärmeleistung. Während die Streckentemperatur weitestgehend durch die Tiefe der Strecke abstrahiert wurde, so wurden die Streckenverläufe durch die Punkte der Bohrungen so gewählt, dass ein möglichst langer Fließweg gewährleistet ist. Auch wenn kein genaues Wissen über den Zustand dieses Streckenverlaufs existiert, so können doch vollständige hydraulische Blockaden weitestgehend ausgeschlossen werden (*persönliche Kommunikation LfULG).

Ein zusätzlicher Aspekt, welcher in Kapitel 3.2.3 erläutert wurde, ist der Einfluss von zusätzlichen Grubenwasserströmungen. In untertägigen Strukturen ist das Wasser stetig in Bewegung, was direkten Einfluss auf die mögliche Wärmeleistung einer Anlage besitzt. Eine Betrachtung des Einflusses dieser Sekundärströmungen ist daher essenziell, um die Auswirkung auf das praktische System zu quantifizieren. Da die genaue Strömungscharakteristik des Grubenwassers in verwahrten Strecken jedoch nicht mit Sicherheit beurteilt werden kann, werden die Berechnungen der ausgewählten Standorte für 0 % bis 20 % Grubenwasserzufluss vorgenommen. Es ergibt sich daraufhin ein Band an möglicher Wärmeleistung. Der untere Bereich stellt die konservative Annahme dar, dass keine Strömung vorliegt und die Strecke ein geschlossenes System darstellt. Der obere Leistungsbereich ist unter Einfluss von 20 % Zufluss berechnet, was bei den angenommenen Fördervolumenströmen von 100 m³/h einem Anteil von 20 m³/h substituierten Grubenwassers entspricht. Den Steckbriefen zu den Standorten kann so entnommen werden, dass dieser Einfluss sich wesentlich auf die Wärmepotenziale auswirkt.

Ökonomische Betrachtung

Ziel der ökonomischen Betrachtung ist es, eine erste wirtschaftliche Analyse der untersuchten Standorte in Bezug auf eine mögliche Grubenwassergeothermieanlage, mit anschließendem Verteilnetz durchzuführen. Dafür werden die Rahmenbedingungen für die jeweiligen Anlagen ermittelt und die Investitionsübersicht aufgestellt. Aus den 58 untersuchten Standorten wurden für eine konkrete Betrachtung 10 Standorte ausgewählt (siehe Kapitel 4), die im Folgenden näher beschrieben sind. Dazu wurden verschiedene Ausgangswerte in die Betrachtung einbezogen und miteinander unter den jeweiligen Bedingungen verrechnet.

Dazu zählen unter anderem für das Wärmenetz:

- Spezifischen Netzparameter wie die Wärmebelegung im Jahr
- Anzahl der Abnehmer/ Verbraucher
- Voraussichtliche Netzlänge
- Resultierende Kosten

Für die Grubenwasseranlage wurden folgende Parameter betrachtet:

- Bergmännische Arbeiten, wie z. B. abzuteufenden Förder- und Reinjektionsbohrung
- Elektroinstallation und Gebäudeautomation in Bezug auf die zu erreichenden Teufen in Kombination mit der zu installierenden Leistung

- Einzubringende Rohleitungstechnik für Förder- und Reinjektionsbohrungen
- Kosten für mögliche Wärmepumpen, Wärmeübertrager, Pumpentechnik und weiteres Zubehör

So konnten skalierbare Kosten aufgestellt werden, die für jeden Standort individuell errechnet wurden [71].

Für die jeweiligen Standorte sind die Ergebnisse in den Standortsteckbriefen in Abschnitt 5.2 zu finden. Dort sind ebenso Fördermöglichkeiten in verschiedenen Szenarien dargestellt, um abschätzen zu können in welchem Bereich die Amortisation der Systeme an den jeweiligen Standorten ungefähr liegen. Dazu wurden in Bezug auf die Investitionssummen folgende Szenarien aufgeführt:

- 25 % oder 50% Förderung auf die Investitionen des Wärmenetzes
- 25 % oder 50% Förderung auf die Investitionen der Grubenwasseranlage
- 25 % oder 50% Förderung auf die Investitionen des Gesamtsystems
- Keine Förderung

Exemplarisch ist in der folgenden Tabelle 18 die ökonomische Betrachtung für ein mögliches Ortsnetz der Gemeinde Lugau dargestellt.

Tabelle 18: Ökonomische Betrachtung des Standortes Cluster Lugau mit 0 % Sekundärwasser (nach [71])

Wärmenetz	Förderung	0%	25%	50%	0%	0%	25%	50%
	Verbl. Summe	4,60 Mio. €	3,45 Mio. €	2,30 Mio. €	4,60 Mio. €	4,60 Mio. €	3,45 Mio. €	2,30 Mio. €
GW-Anlage	Förderung	0%	0%	0%	25%	50%	25%	50%
	Verbl. Summe	1,70 Mio. €	1,70 Mio. €	1,70 Mio. €	1,28 Mio. €	0,85 Mio. €	1,28 Mio. €	0,85 Mio. €
Gesamt	Summe	6,30 Mio. €	5,15 Mio. €	4,00 Mio. €	5,88 Mio. €	5,45 Mio. €	4,73 Mio. €	3,15 Mio. €

In der Praxis ist es wichtig für den betreffenden Standort die Amortisationszeit zu kennen. Erst nach diesem Zeitpunkt werden im Vergleich zur Referenzanlage (Gasbrennwerttherme) Gewinne durch die Anlage erwirtschaftet. Bei den fündigsten Standorten können vergleichsweise konkurrenzfähige Amortisationszeiten erreicht werden, wenn man eine weiter gefasste Energiepreisanalyse einbezieht. Um dies zu betrachten, wurden drei unterschiedlichen Szenarien definiert. Die drei Szenarien beinhalten jeweils einen niedrigen, durchschnittlichen und hohen Strompreis sowie einen niedrigen, durchschnittlichen und hohen Gaspreis:

- **Szenario 1:** Durchschnittliches Preisniveau Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh
- **Szenario 2:** Niedriges Preisniveau Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh
- **Szenario 3:** Hohes Preisniveau Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

Ökologische Betrachtung

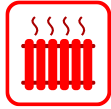
Im Rahmen dieses Projekts wurde ebenso die CO₂-Einsparung der Grubenwassernutzung im Vergleich zu Gasbrennwertthermen untersucht. Die CO₂-Emissionsfaktoren des Gas- und Strombezuges wurden aus dem Informationsblatt CO₂-Faktoren des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle sowie dem Umweltbundesamt entnommen. Damit kann das Global Warming Potential (GWP) bewertet werden. Elektrische Energie hat in diesem Vergleich aufgrund des aktuellen Strommixes einen Emissionsfaktor von $0,428 \left[\frac{t_{CO_2}}{MWh} \right]$ während Gas einen Emissionsfaktor von $0,201 \left[\frac{t_{CO_2}}{MWh} \right]$ besitzt [72] [73].

Im aktiven Betrieb können die Anlagen, wenn die berechneten Wärmemengen durch Grubenwassergeothermie substituiert werden, in den jährlich Szenarien CO₂-Mengen von 100 t_{CO2}/a bis knapp 1.700 t_{CO2}/a einsparen. Die jeweiligen Werte können ebenso in den Steckbriefen der betrachteten Standorte nachvollzogen werden. Durch die lokale regenerative Bereitstellung des notwendigen Stroms für die Anlagen, z.B. durch Photovoltaikanlagen könnten die CO₂-Einsparungen noch deutlich reduziert werden.

5.2 Energetische Versorgungskonzepte

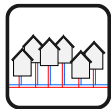
Standort: Cluster Oelsnitz

Grubenwassergeothermie

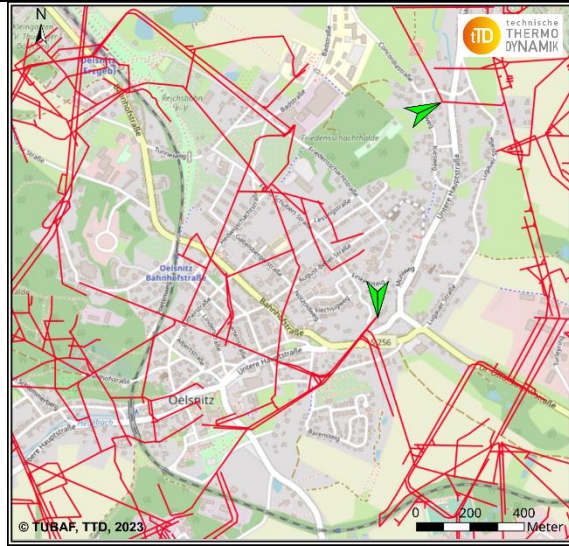


Bohrmeter	2 x 446 m
Streckenlänge	2.234 m
Th. Heizleistung	1.400 – 5.100 kW
Th. Wärmemenge	3,3 – 12,2 GWh/a
Pot. Einsparung	310 –
CO ₂ -Emissionen	1.100 t/a

Nahwärmenetz



Anzahl Abnehmer	821
Netzlänge	16.391 m
Wärmebedarf	30,9 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser (< 100 % = weitere Wärmequelle notwendig)	11 % – 40 %

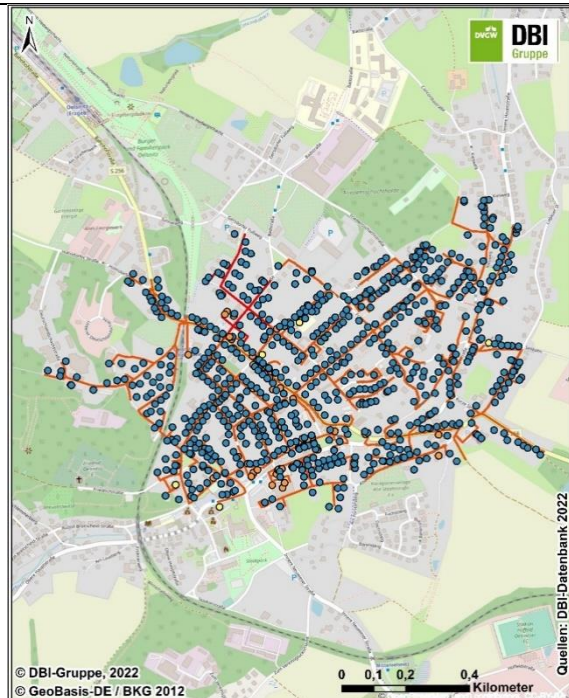


Versorgungsgebiet Cluster Oelsnitz, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie



Investition Grubenwasseranlage	2.200.000 €
Investition Wärmenetz	9.700.000 €
Gesamtinvestition	11.900.000 €
Amortisation ohne Förderung	6,6 – 24,1 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,6 – 5,2 a
inkl. Netz Szenario 1	8,6 – 24,1 a
inkl. Netz Szenario 2	16,6 – 42,4 a
inkl. Netz Szenario 3	6,6 – 18,8 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	4,5 – 13,3 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	6,6 – 18,9 a



Mögliches Wärmenetz am Standort Oelsnitz; blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe; gelb: Kommune

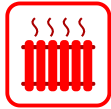
Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh

Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh

Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

Standort: Cluster Oelsnitz Bergbaumuseum

Grubenwassergeothermie



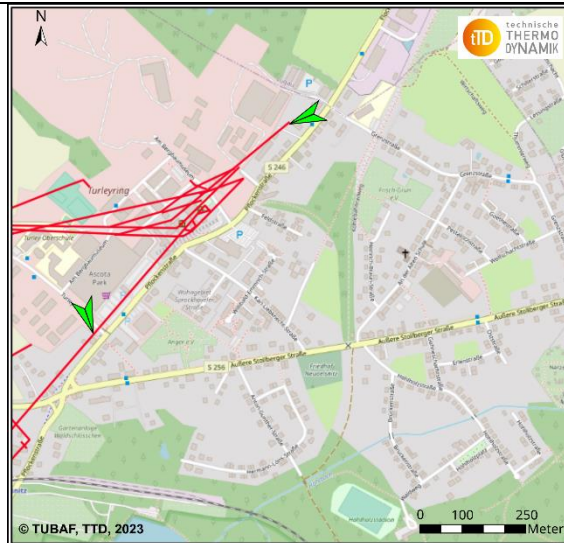
Bohrmeter	2 x 446 m
Streckenlänge	2.234 m
Th. Heizleistung	970 – 4.000 kW
Th. Wärmemenge	2,3 – 9,5 GWh/a
Pot. Einsparung	210 –
CO ₂ -Emissionen	890 t/a

Nahwärmenetz



Anzahl Abnehmer	582
Netzlänge	12.609 m
Wärmebedarf	19,6 GWh/a

Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser (< 100 % = weitere Wärmequelle notwendig)	11 % – 49 %
---	-------------

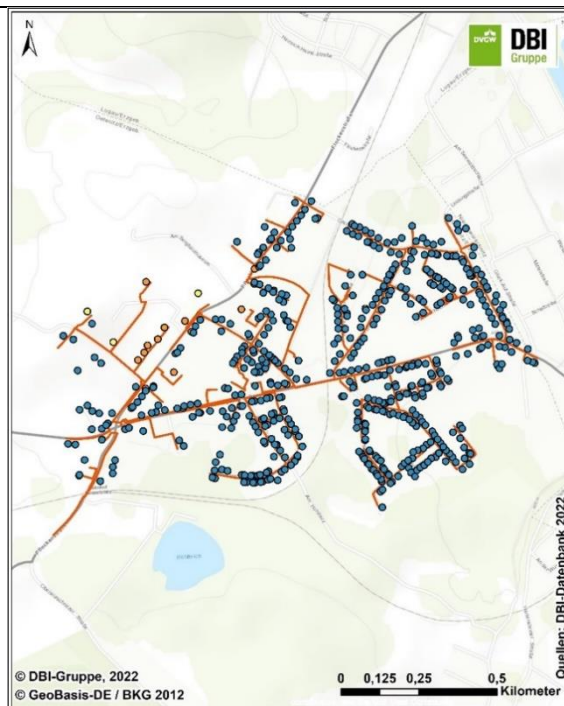


Versorgungsgebiet Cluster Neu-Oelsnitz, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie



Investition Grubenwasseranlage	2.000.000 €
Investition Wärmenetz	4.600.000 €
Gesamtinvestition	6.600.000 €
Amortisation ohne Förderung	8,2 – 31,1 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	4,9 – 11,1 a
inkl. Netz Szenario 1	10,8 – 31,1 a
inkl. Netz Szenario 2	20,8 – 54,2 a
inkl. Netz Szenario 3	8,2 – 24,4 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	5,7 – 17,6 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	8,3 – 24,7 a



Mögliches Wärmenetz am Standort Neu-Oelsnitz; blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe; gelb: Kommune

Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh
 Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh
 Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

Standort: Cluster Lugau

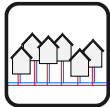
Grubenwassergeothermie

Bohrmeter	2 x 445 m
Streckenlänge	918 m
Th. Heizleistung	510 – 4.100 kW
Th. Wärmemenge	1,2 – 10,1 GWh/a
Pot. Einsparung	110 –
CO ₂ -Emissionen	950 t/a

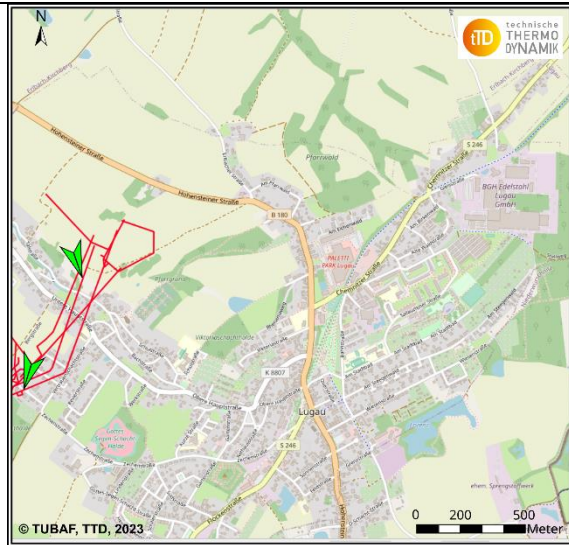


Nahwärmenetz

Anzahl Abnehmer	377
Netzlänge	8.733 m
Wärmebedarf	17,8 GWh/a



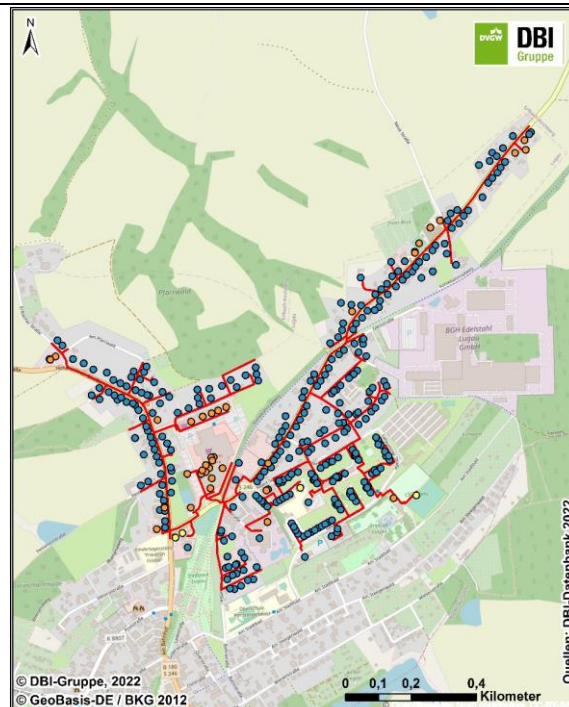
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser (< 100 % = weitere Wärmequelle notwendig)	7 % – 57 %
---	------------



Versorgungsgebiet Cluster Lugau, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie

Investition Grubenwasseranlage	1.700.000 €
Investition Wärmenetz	4.600.000 €
Gesamtinvestition	6.300.000 €
Amortisation ohne Förderung	4,9 – 33,2 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,9 – 8,4 a
inkl. Netz Szenario 1	6,5 – 33,2 a
inkl. Netz Szenario 2	12,6 – 56,5 a
inkl. Netz Szenario 3	4,9 – 26,1 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	3,3 – 18,9 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	4,9 – 26,4 a

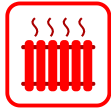


Mögliches Wärmenetz am Standort Lugau
blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe;
gelb: Kommune

Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh
Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh
Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

Standort: Cluster Hohndorf

Grubenwassergeothermie

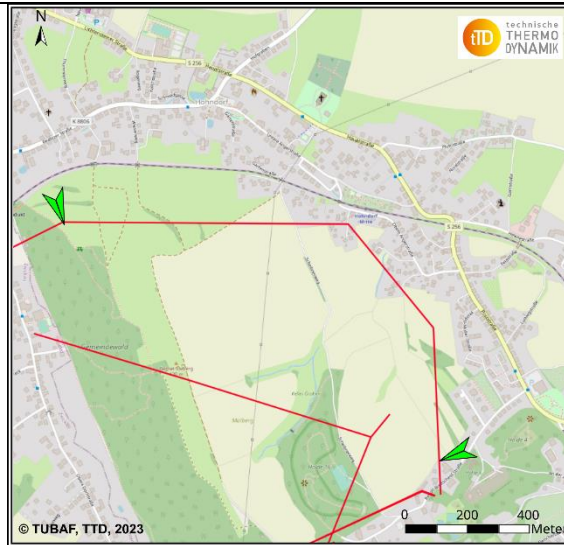


Bohrmeter	2 x 744 m
Streckenlänge	1.861 m
Th. Heizleistung	1.700 – 7.700 kW
Th. Wärmemenge	4,0 – 18,5 GWh/a
Pot. Einsparung	380 –
CO ₂ -Emissionen	1.700 t/a

Nahwärmenetz



Anzahl Abnehmer	287
Netzlänge	5.907 m
Wärmebedarf	8,6 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser	47 % – 215 %
(>100, keine weitere Wärmequelle notwendig)	

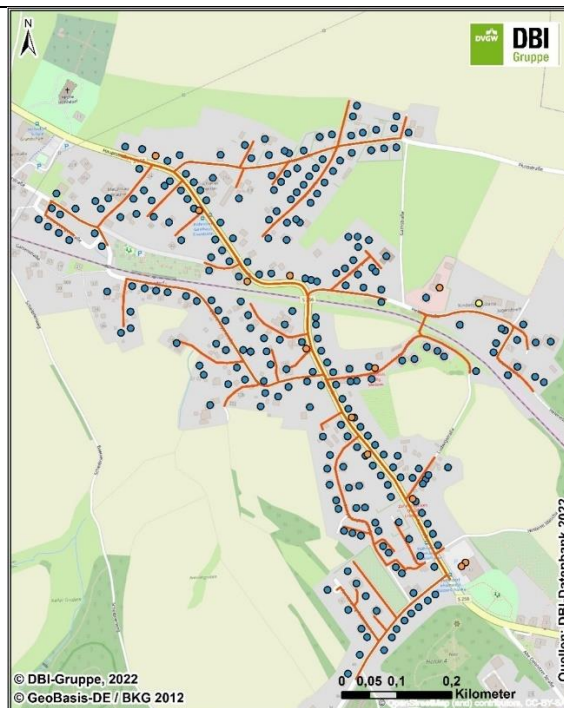


Versorgungsgebiet Cluster Hohndorf, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie



Investition Grubenwasseranlage	3.200.000 €
Investition Wärmenetz	2.700.000 €
Gesamtinvestition	5.900.000 €
Amortisation ohne Förderung	2,9 – 11,1 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,7 – 6,3 a
inkl. Netz Szenario 1	3,9 – 11,1 a
inkl. Netz Szenario 2	7,7 – 21,2 a
inkl. Netz Szenario 3	2,9 – 8,5 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	2,0 – 5,8 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	2,9 – 8,5 a



Mögliches Wärmenetz am Standort Hohndorf
blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe;
gelb: Kommune

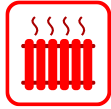
Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh

Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh

Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

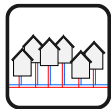
Standort: Cluster Gersdorf

Grubenwassergeothermie

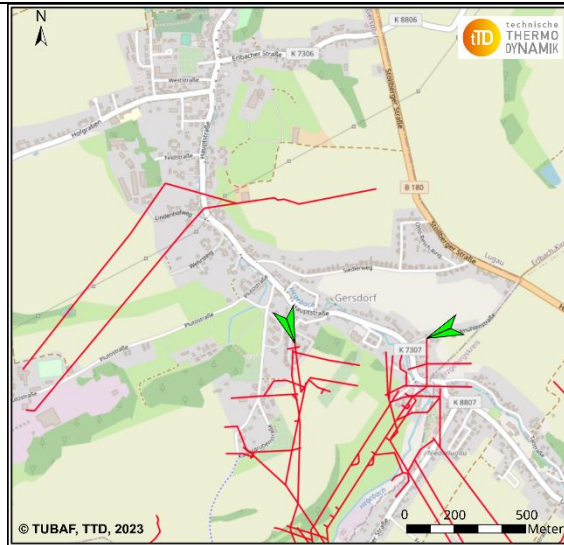


Bohrmeter	2 x 580 m
Streckenlänge	1.790 m
Th. Heizleistung	1.100 – 5.400 kW
Th. Wärmemenge	2,7 – 13,0 GWh/a
Pot. Einsparung	250 –
CO ₂ -Emissionen	1.200 t/a

Nahwärmenetz



Anzahl Abnehmer	294
Netzlänge	5.891 m
Wärmebedarf	9,9 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser (>100, keine weitere Wärmequelle notwendig)	27 % – 130 %

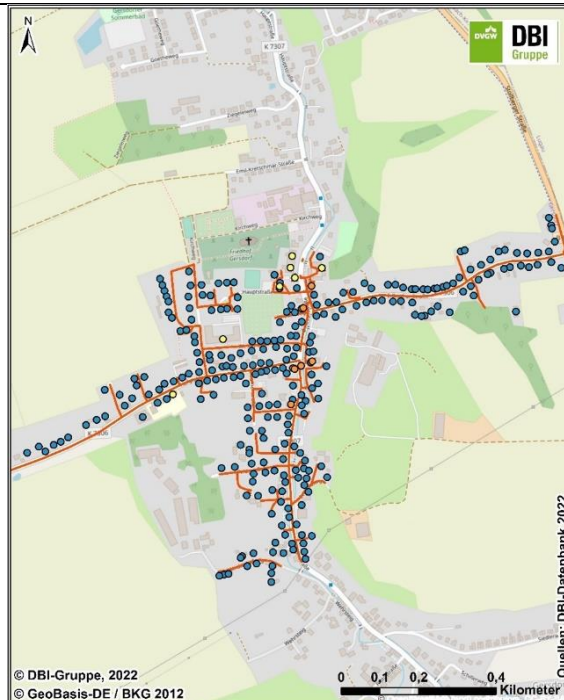


Versorgungsgebiet Cluster Gersdorf, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie



Investition Grubenwasseranlage	2.400.000 €
Investition Wärmenetz	3.100.000 €
Gesamtinvestition	5.500.000 €
Amortisation ohne Förderung	3,5 – 15,5 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,8 – 7,3 a
inkl. Netz Szenario 1	4,7 – 15,5 a
inkl. Netz Szenario 2	9,3 – 28,8 a
inkl. Netz Szenario 3	3,5 – 11,9 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	2,4 – 8,3 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	3,6 – 12,0 a

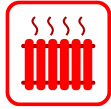


Mögliches Wärmenetz am Standort Gersdorf
blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe;
gelb: Kommune

Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh
Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh
Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

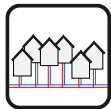
Standort: Hedwigschacht Oelsnitz

Grubenwassergeothermie

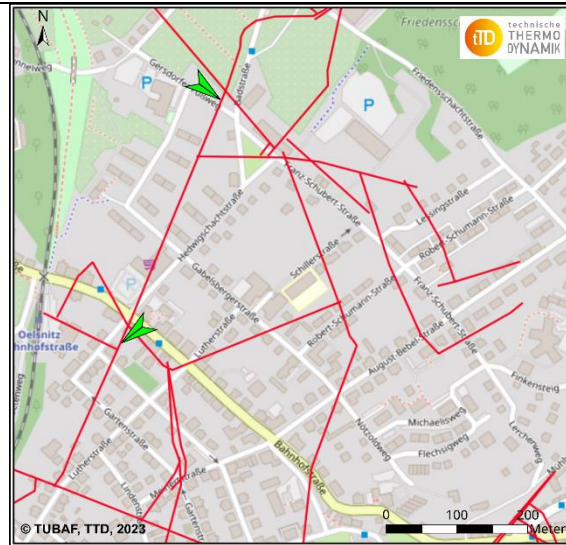


Bohrmeter	2 x 446 m
Streckenlänge	825 m
Th. Heizleistung	490 – 4.500 kW
Th. Wärmemenge	1,2 – 10,8 GWh/a
Pot. Einsparung	110 –
CO ₂ -Emissionen	1.000 t/a

Nahwärmenetz



Anzahl Abnehmer	42
Netzlänge	825 m
Wärmebedarf	2,1 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser	57 % – 510 %
(>100, keine weitere Wärmequelle notwendig)	

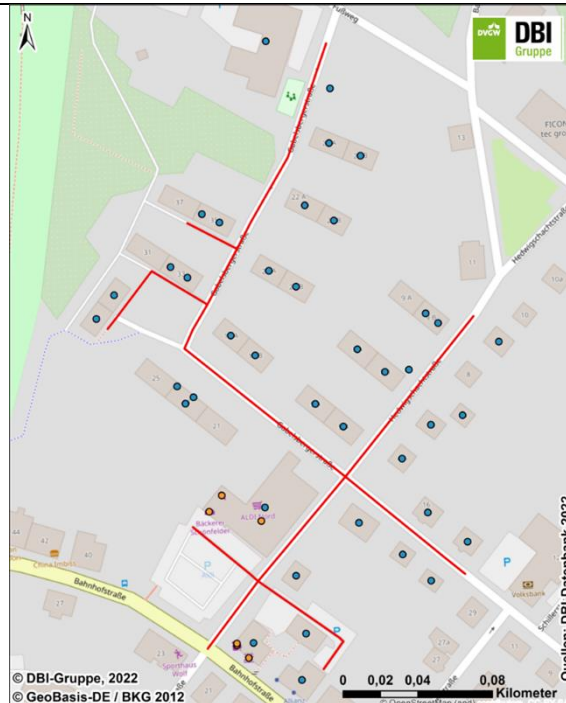


Versorgungsgebiet Hedwigschacht Oelsnitz, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie



Investition Grubenwasseranlage	1.800.000 €
Investition Wärmenetz	300.000 €
Gesamtinvestition	2.100.000 €
Amortisation ohne Förderung	2,2 – 13,1 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,8 – 11,5 a
inkl. Netz Szenario 1	3,0 – 13,1 a
inkl. Netz Szenario 2	6,0 – 25,1 a
inkl. Netz Szenario 3	2,2 – 9,9 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	1,5 – 6,9 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	2,2 – 10,1 a



Mögliches Wärmenetz am Standort Hedwigschacht Oelsnitz; blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe; gelb: Kommune

Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh

Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh

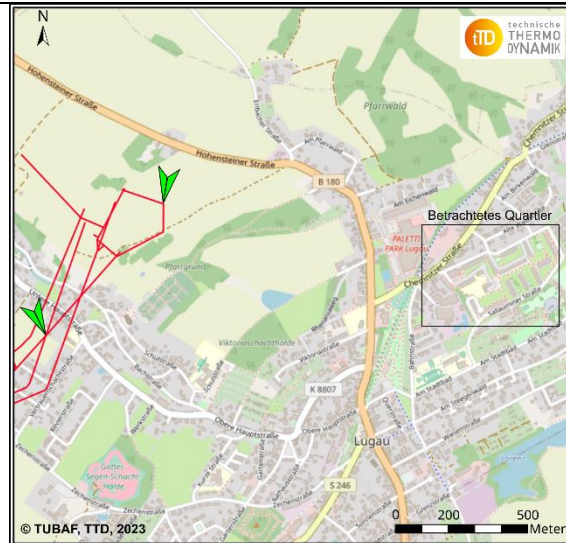
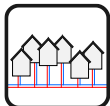
Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

Standort: Sallauminer Straße Lugau**Grubenwassergeothermie**

Bohrmeter	2 x 445 m
Streckenlänge	918 m
Th. Heizleistung	510 – 4.200 kW
Th. Wärmemenge	1,2 – 10,1 GWh/a
Pot. Einsparung	110 –
CO ₂ -Emissionen	950 t/a

**Nahwärmenetz**

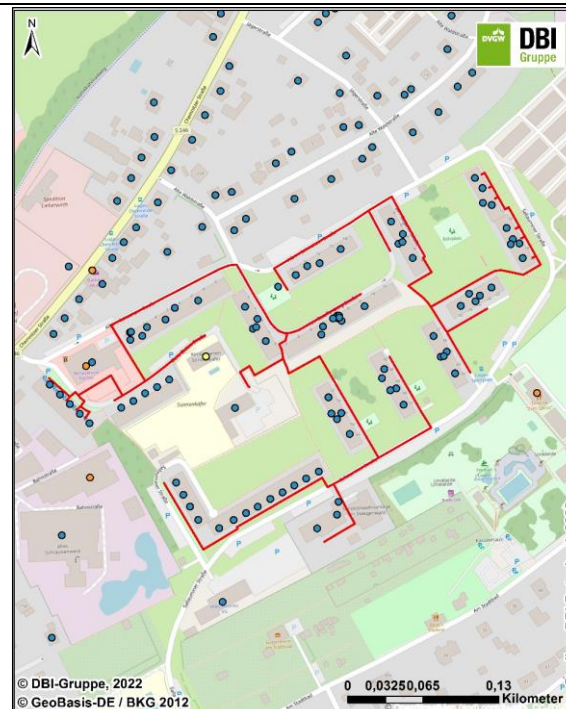
Anzahl Abnehmer	93
Netzlänge	1.852 m
Wärmebedarf	7,0 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser (>100, keine weitere Wärmequelle notwendig)	17 % – 140 %



Versorgungsgebiet Sallauminer Straße Lugau, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie

Investition Grubenwasseranlage	1.700.000 €
Investition Wärmenetz	800.000 €
Gesamtinvestition	2.500.000 €
Amortisation ohne Förderung	2,6 – 15,3 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,8 – 11,1 a
inkl. Netz Szenario 1	3,4 – 15,3 a
inkl. Netz Szenario 2	6,9 – 28,9 a
inkl. Netz Szenario 3	2,6 – 11,7 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	1,7 – 8,2 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	2,6 – 11,9 a



Mögliches Wärmenetz am Standort Sallauminer Straße Lugau blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe; gelb: Kommune

Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh
 Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh
 Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

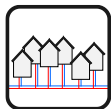
Standort: Fleischerberg Hohndorf

Grubenwassergeothermie

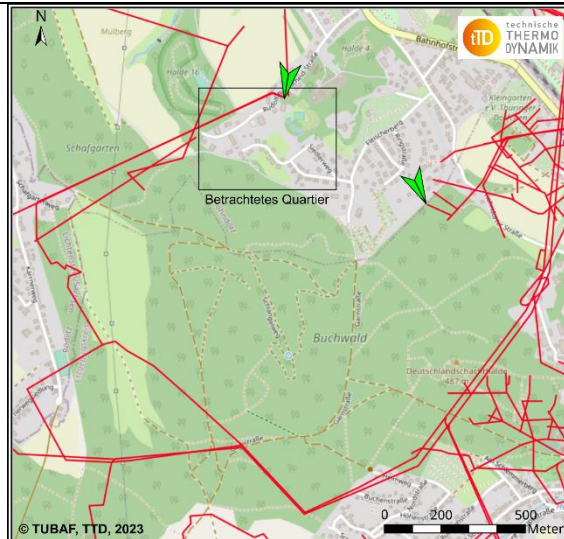


Bohrmeter	2 x 1.025 m
Streckenlänge	4.696 m
Th. Heizleistung	3.900 – 10.000 kW
Th. Wärmemenge	9,5 – 24,0 GWh/a
Pot. Einsparung	900 –
CO ₂ -Emissionen	2.300 t/a

Nahwärmenetz



Anzahl Abnehmer	16
Netzlänge	775 m
Wärmebedarf	0,6 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser (>100, keine weitere Wärmequelle notwendig)	1.500 % – 40.000 %



Versorgungsgebiet Fleischerberg Hohndorf, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie



Investition Grubenwasseranlage	5.100.000 €
Investition Wärmenetz	200.000 €
Gesamtinvestition	5.300.000 €
Amortisation ohne Förderung	2,1 – 3,4 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,7 – 4,4 a
inkl. Netz Szenario 1	2,8 – 4,6 a
inkl. Netz Szenario 2	5,7 – 9,1 a
inkl. Netz Szenario 3	2,1 – 3,4 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	1,4 – 2,3 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	2,1 – 4,5 a



Mögliches Wärmenetz am Standort Fleischerberg Hohndorf blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe; gelb: Kommune

Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh

Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh

Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

Standort: Kaisergrubenschacht Gersdorf

Grubenwassergeothermie



Bohrmeter	2 x 580 m
Streckenlänge	857 m
Th. Heizleistung	360 – 3.400 kW
Th. Wärmemenge	0,9 – 8,1 GWh/a
Pot. Einsparung	100 –
CO ₂ -Emissionen	800 t/a

Nahwärmenetz



Anzahl Abnehmer	71
Netzlänge	1.572 m
Wärmebedarf	1,6 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser (>100, keine weitere Wärmequelle notwendig)	56 % – 506 %

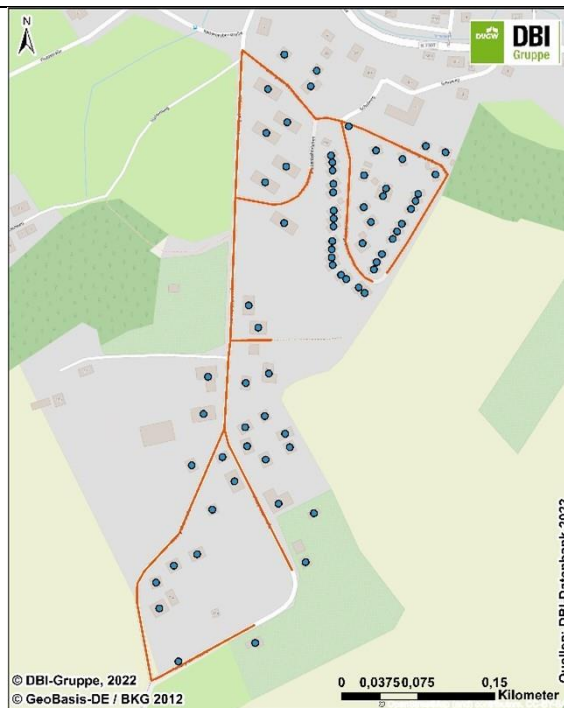


Versorgungsgebiet Kaisergrubenschacht Gersdorf, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie



Investition Grubenwasseranlage	2.100.000 €
Investition Wärmenetz	300.000 €
Gesamtinvestition	2.400.000 €
Amortisation ohne Förderung	2,1 – 19,9 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,7 – 17,9 a
inkl. Netz Szenario 1	2,8 – 19,9 a
inkl. Netz Szenario 2	5,7 – 36,9 a
inkl. Netz Szenario 3	2,1 – 15,2 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	1,4 – 10,8 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	2,1 – 15,5 a



Mögliches Wärmenetz am Standort Kaisergrubenschacht Gersdorf blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe; gelb: Kommune

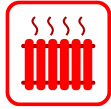
Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh

Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh

Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

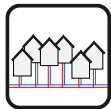
Standort: Merkurschacht Gersdorf

Grubenwassergeothermie

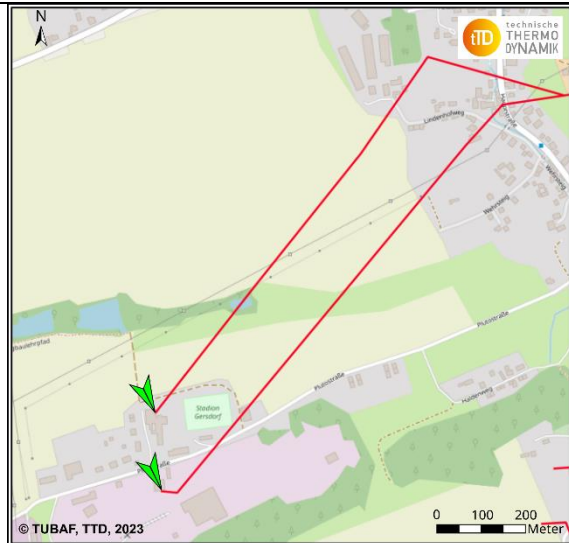


Bohrmeter	2 x 632 m
Streckenlänge	2.587 m
Th. Heizleistung	1.100 – 4.300 kW
Th. Wärmemenge	2,7 – 10,2 GWh/a
Pot. Einsparung	300 –
CO ₂ -Emissionen	1.100 t/a

Nahwärmenetz



Anzahl Abnehmer	17
Netzlänge	783 m
Wärmebedarf	0,4 GWh/a
Th. Deckungsgrad durch Grubenwasser	675 % – 2.550 %
(> 100 %, keine weitere Wärmequelle notwendig)	

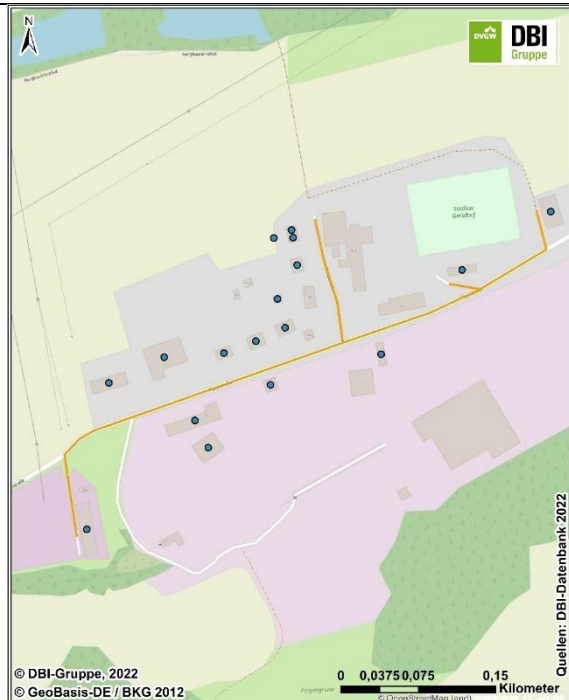


Versorgungsgebiet Merkurschacht Gersdorf, inkl. Ein- und Ausspeisepunkt (grüne Pfeile)

Ökonomie



Investition Grubenwasseranlage	1.700.000 €
Investition Wärmenetz	200.000 €
Gesamtinvestition	1.900.000 €
Amortisation ohne Förderung	2,0 – 5,8 a
Amortisationen Szenarien	
exkl. Netz Szenario 1	2,6 – 5,2 a
inkl. Netz Szenario 1	2,7 – 5,8 a
inkl. Netz Szenario 2	5,5 – 11,4 a
inkl. Netz Szenario 3	2,0 – 4,3 a
Amortisation, 50 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	1,4 – 3,0 a
Amortisation, 25 %-Förderung	
inkl. Netz Szenario 1	2,0 – 4,4 a



Mögliches Wärmenetz am Standort Merkurschacht Gersdorf blau: Wohngebäude; orange: Gewerbe; gelb: Kommune

Szenario 1: Durchschnittliches Preisniveau; Gas 0,15 €/kWh, Strom 30 €/kWh
 Szenario 2: Niedriges Preisniveau; Gas 0,10 €/kWh, Strom 25 €/kWh
 Szenario 3: Hohes Preisniveau; Gas 0,20 €/kWh, Strom 40 €/kWh

5.3 Simulation beispielhaften Modellquartiers in Gersdorf

Als angelagerter Teil des Projektes, wurde ein Standort in Gersdorf betrachtet, an dem Grubenwasser potenziell zur aktiven Wasserhaltung abgepumpt werden könnte. In Zusammenhang damit könnte ein naheliegendes Quartier versorgt werden. Nach einer kurzen Standortsbeschreibung erfolgt die Erläuterung der Methodik, mit derer das Quartier energetisch analysiert wurde und welche in dieser Form für weitere Standorte verwendet werden könnte.

Im Südwesten der Gemeinde Gersdorf befinden sich die ehemaligen Kaisergrubenschächte sowie deren Abraumhalde des Steinkohlereviers Lugau/Oelsnitz. Nach der Stilllegung in 1930/31 befanden sich weiterhin verschiedene Einrichtungen und Gebäude auf diesem Areal, welche zur damaligen Förderung der Kohle notwendig waren. Die beiden Schächte wurden mit Aschen sowie Halden- und Waschbergen verfüllt.

Wie oben beschrieben, ist Gersdorf die Gemeinde, mit der tiefsten Tallage (+320 m NHN) in diesem Verbund und somit die erste Gemeinde, in der das Grubenwasser voraussichtlich 2032 ohne Gegenmaßnahmen zu Tage treten würde. Im Zuge dessen wurde 2002 vom Freistaat Sachsen und den betroffenen Kommunen der Maßnahmenkatalog zur Erkundung und Gefahrenabwehr der vom Steinkohlebergbau verursachten Schäden in Kraft gesetzt. Nach Eröffnung der ersten Grubenwassermessstelle (GRWM) in Oelsnitz (2008) erfolgte dann 2014 die Eröffnung der GRWM II (655 m unter GOK Endteufe) am ehemaligen Kaisergruben- Schacht II in Gersdorf mit dem Ziel, den Flutungsverlauf im Ostrevier aufzuzeichnen und eventuelle Unterschiede hinsichtlich der Flutungsgeschwindigkeit zwischen dem durch die Pluto-Schacht-Verwerfung getrennten tiefergelegenen westlichen und höhergelegenen östlichen Grubenfeld zu ermitteln.

Um Flutungsschäden durch unkontrolliert austretendes Grubenwasser zu verhindern, müssen Maßnahmen zur Flutungskontrolle ergriffen werden. Diese beinhalten das Abpumpen des zulaufenden Grubenwassers mittels einer Bohrung. Da für die Errichtung der GRWM die verfüllten Schächte bereits wieder geöffnet und entsprechende Bohrungen niedergebracht wurden, können diese für das Abführen des Grubenwassers genutzt werden. Aufgrund der hohen Kosten von Bohrungen in derartige Teufen kann so gegebenenfalls eine Kosteneinsparung erzielt und das abgepumpte Grubenwasser für die Wärmeversorgung umliegender Infrastruktur energetisch genutzt werden. Aus diesem Grund wurde ein mögliches Neubauquartier an diesem Standort beispielhaft in Matlab-Simulink simuliert.

Das betrachtete Quartier liegt an der Kaisergrubenstraße in Gersdorf, auf der jetzigen Sperrfläche der des ehemaligen Betriebsgeländes des Kaisergrubenschachts II. Das Gebiet um die GRW-Messstelle Kaisergruben-Schacht II befindet sich im Besitz der Stadt und umfasst die Flurstücke 535/3, 535/b und 560/27, die Gesamtfläche beträgt rund 9.000 m². Das geplante Quartier soll 11 Haushalte und die Grubenwasseranlage umfassen, daher wurde eine Einteilung in 12 Grundstücke vorgenommen. Die Grubenwassermessstelle befindet sich zentral gelegen auf dem Gelände und kann für die Versorgung der Wohneinheiten genutzt werden.

Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt der Bebauungsplan nicht feststeht, können über die genaue Grundstückseinteilung, sowie die Wohnungszusammensetzung keine konkreten Aussagen getroffen werden. Es wurden im Rahmen des Projektes daher 3 Einfamilienhaustypen und 2 unterschiedliche Dachformen ausgewählt, welche die mögliche Zusammensetzung des Quartiers abbilden, weiterhin wurde für einige Wohneinheiten eine Unterkellerung vorgesehen. Im Rahmen der Simulation wurden verschiedene Gebäude abgebildet um Empfehlungen zur optimalen Bebauung treffen zu können. In Abbildung 3 ist die resultierende Gebäudeplatzierung dargestellt, zweigeschossige Wohneinheiten werden im nördlichen Teil des Areals errichtet, die eingeschossigen Bungalows befinden sich im südlichen Teil. Da in dieser Aufteilung nicht alle Gebäude an das bereits existierende Straßennetz angeschlossen werden können, soll ein zusätzlicher Weg errichtet werden, welcher im Besitz der Gemeinde verbleibt und öffentlich zugänglich ist. Dieser Weg dient gleichzeitig auch als Zugangspunkt zur Grubenwasseranlage und kann vom Energieversorgungsunternehmen oder Wartungstechnikern genutzt werden, ohne dass ein Überqueren von Privatgelände notwendig ist.

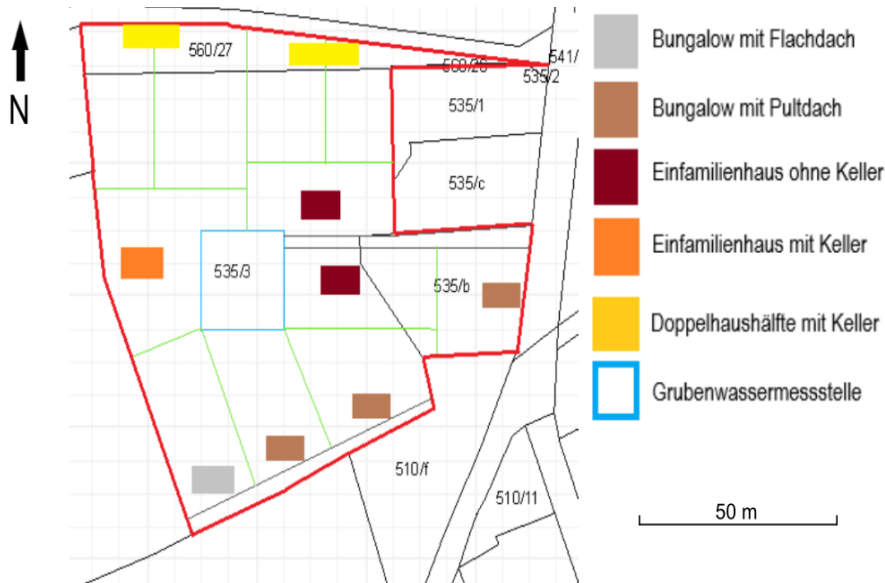


Abbildung 65: Im Rahmen der Simulation definierte Gebäudeverteilung auf dem Gelände

Als Wärme- bzw. Kältequelle für das Quartier wird das Grubenwasser aus den Strecken um den ehemaligen Kaisergruben-Schachts II verwendet, das im Rahmen dieser Quartierskonzeptionierung über die GRWM II gefördert werden soll. Aufgrund der ganzjährig zur Verfügung stehenden hohen Temperaturen der Quelle von rund 25 °C können bei Einsatz von Wärmepumpen hohe Jahresarbeitszahlen erreicht werden. Mittels eines Wärmeübertragers findet eine Energieübertragung zwischen dem Quartiersnetz und dem Grubenwasser statt, das Wärmetransportmedium des Netzes wird je nach Temperaturniveau erwärmt oder gekühlt.

Simulationsergebnisse Neubauquartier Gersdorf

Die Simulationen der Gebäude des Quartiers wurden wie benannt mittels des Programms Simulink, das als Zusatzprodukt zur Matlab Software erwerbbar ist, realisiert.

Weiterhin erfolgte die Nutzung der CARNOT Toolbox, welche eine von der FH Aachen entwickelte frei verfügbare Zusatzanwendung für Simulink ist [74]. In der Toolbox finden sich vorgefertigte Blöcke zur technischen Auslegung von thermodynamischen, hydraulischen, elektrischen und chemischen Systemen, welche durch Anpassung an die jeweiligen Parameter editiert werden können. Mithilfe der CARNOT- Blöcke wurden festgelegte Rahmenparameter eingebunden und in eine Abhängigkeit zueinander gebracht. Die so entstandenen Modelle simulieren die thermodynamischen und hydraulischen Vorgänge der Gebäude [55].

Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine konkreten Bauvorhaben geplant sind und demzufolge Annahmen getroffen werden mussten, wurde ein modularer Aufbau der Modelle vollzogen. Die Parameter des Modells können leicht angepasst und die Struktur der einzelnen Beziehungen der Blöcke zueinander verändert werden. Somit können die Modelle durch geringen Aufwand an die tatsächlichen getroffenen Vorgaben der Bauplanung in den folgenden Jahren angepasst werden.

Für das Modell wurden darüber hinaus mehrere Inputfaktoren bzw. Rahmenbedingungen mit einbezogen, um ein authentisches und möglichst reales Bild des Quartiers zu erhalten. Die in den Simulationen verwendeten Wetterdaten basieren auf dem Datensatz des DWD für den Standort Gersdorf. Neben Temperatur- und Strahlungswerten sind ebenfalls Windrichtung und Geschwindigkeit, relative Feuchte, Bewölkung und barometrische Angaben enthalten.

Das Gebäudemodell setzt sich in der Simulation aus den einzelnen Räumen zusammen, die über den Luftaustausch und die Wandflächen thermodynamisch in Verbindung mit dem Rest des Gebäudes, sowie der Außenumgebung stehen. Dadurch sind Wärmetransporte innerhalb des Gebäudes sowie von außen mitberücksichtigt. Darüber hinaus wurden die unterschiedlichen Dachtypen, sowie die Verknüpfung zwischen Keller-Erdgeschoss und Erdboden berücksichtigt und simulativ eingebunden. Als ein weiterer wichtiger Bestandteil bei der Simulation des Energiebedarfs, ist die Verwendung von individuellen Lastprofilen. Diese stellen die internen Lasten des Hauses dar. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen dieser Arbeit der

von N. PFLUGRADT entwickelte "LoadprofileGenerator" [75] verwendet, welcher die Zusammenstellung eines individuellen Lastprofils, für unterschiedliche Verbraucher ermöglicht. Dies ermöglicht äußerst genaue Simulationen der Gebäudebestandteile bis hin zu elektrischen Kleingeräten.

Dieser exakte Simulationsbedarf, vor allem bei Gebäuden mit niedrigem Energiebedarf (z.B. Passivhausstandard), ist essentiell, da die internen Lasten aufgrund der hohen und guten Dämmung des Gebäudes einen wichtigen Beitrag zum Wärmehaushalt des Gebäudes beitragen. Entsprechend kann dadurch auch abgeleitet werden inwiefern eine Kühlung der Gebäude notwendig ist.

Mit Hilfe der durchgeführten Simulationen konnten die einzelnen Wärme- und Stromverbräuche der Gebäude ermittelt werden. Insgesamt wurden 16 Simulationen durchgeführt, welche jeweils um einen der Parameter Gebäudetyp, Haushaltslastprofil, sowie Kollektorflächengröße (für Photovoltaik und/oder Solarthermie) variiert wurden. Aus den gewonnenen Ergebnissen erfolgte die Ermittlung des Einflusses der einzelnen Parameter auf die Energiebilanz der Gebäudemodelle. Durch Summation der Wärme- und Stromverbräuche ergibt sich ein Gesamtenergiebedarf, welcher anteilig vom Wärme- bzw. Stromnetz gedeckt werden muss. Anhand dieser Daten konnte eine ökonomische und ökologische Vorbetrachtung erfolgen, welche im konkreten Auslegungsfall an die realen Bedingungen angepasst werden kann und im Folgenden kurz betrachtet wird.

Anhand des errechneten Energiebedarfs für die zentrale und dezentrale Versorgung kann der Primärenergiefaktor (PEF) der Gebäude und Anlagen ermittelt werden. Für die Großwärmepumpen ist ein PEF von 1,2 für den Strom anzusetzen. Für Geothermie, Solarthermie und PV entspricht der PEF nach Gebäudeenergiegesetz § 22 Absatz 4 null. Demzufolge kann der Primärenergiebedarf des Quartiers über den Stromverbrauch der Großwärmepumpen und im dezentralen Versorgungsfall über den Netzbezug ermittelt werden. Für netzbezogenen Strom wird ein PEF von 1,8 angewendet.

Der Netzbezug der beispielhaften Quartierszusammensetzung beträgt 24.000 kWh, demzufolge ergibt sich ein Gesamtprimärenergiebedarf von 43.500 kWh/a. Unter Betrachtung der Gesamt-EBF des Quartiers von 1.500 m² entspricht dies einem durchschnittlichen Primärenergiebedarf von $28,7 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$. Für die zentrale Versorgungsvariante ergibt sich bei einem Stromverbrauch von 19.700 kWh ein Primärenergiebedarf von 23.600 kWh/a.

Für eine geschätzte Trassenlänge zur Versorgung des Neubauquartiers von 250 m Ringleitung, sowie 110 m Zuleitungen entstehen demnach Verlegekosten in Höhe von 99.500 € für das dezentrale Nahwärmenetz sowie 196.300 € für das zentrale Nahwärmenetz.

Da im Rahmen des Quartierskonzepts von einer Nutzung des zur Flutungskontrolle abgepumpten Grubenwassers ausgegangen wird, werden die Anlagen- und Betriebskosten der Förderpumpen nicht mit in die Berechnung einbezogen. Die Anlagenkosten entfallen demnach nur auf die obertägigen Systeme des Wärmenetzes, zu diesen gehören die Hausanschlussstation, die Wärmepumpe inkl. der Kreislauflüssigkeiten, sowie die für den Betrieb des Nahwärmenetzes erforderlichen Netzpumpen. Für das dezentrale Wärmenetz entfallen die Kosten für die Wärmepumpe, eine Betrachtung der individuellen Kosten für die einzelnen Haushalte ist nicht erfolgt.

Unter Berücksichtigung von verschiedenen spezifischen Wirkungsgraden ergeben sich die Anlagenkosten des zentralen Nahwärmenetzes mit zwei Wärmepumpen von ca. 108.000 €. Im Falle eines dezentralen Wärmenetzes entfallen die Kosten für die Wärmepumpen und den Zwischenkreislauf, die Kosten belaufen sich dann auf 18.700 €, jedoch müssen die erforderlichen Anlagensysteme bei den Verbrauchern eingerichtet werden.

Zusammenfassend zeigt die Simulation, dass 11 Wohneinheiten im Bereich der Grubenwassermessstelle problemlos mit Wärme und Kälte aus Grubenwassergeothermie versorgt werden könnten. Der Gesamtwärmebedarf des Quartiers wurde mit rund 37.100 kWh für Wärme (Heizen und Warmwasser) und ca. 30.100 kWh für Kälte berechnet. Allein das zukünftig im Bereich Gersdorf zwangsweise abzuführende Grubenwasser hat ein jährliches energetisches Potential von ca. 820.000 kWh und könnte den Bedarf des Neubauquartiers damit mehr als zwanzigmal decken. Eine Nutzung des Grubenwassers für die Wärme- und Kälteversorgung des Quartiers ist damit zu empfehlen.

5.4 Sektorenkopplungspotential innerhalb des Netzes

Im Jahr 2020 betrug der deutsche Energiebedarf für die Versorgung mit Wärme und Kälte 1.348 Mrd. kWh [76]. Eine Energieversorgung aus regenerativen Energiequellen bildet die Grundlage für eine umweltfreundliche Versorgung. Vor allem im Wärmesektor war die Zunahme des Anteils erneuerbarer Energie (EE) in den letzten Jahren jedoch gering. Erdgas ist der dominierende Energieträger in der Wärmeversorgung mit einem Anteil von fast 43 %. (vgl. Abbildung 66). Im Jahr 2020 lag der Anteil EE am deutschen Wärmemix bei 13,4 % (181,7 Mrd. kWh). 86 % hiervon wird über Energie aus Biomasse gedeckt. Solarthermie und Geothermie stellen 4,4 % bzw. 9,7 % der regenerativen Energie für Wärme zur Verfügung [76] [77].

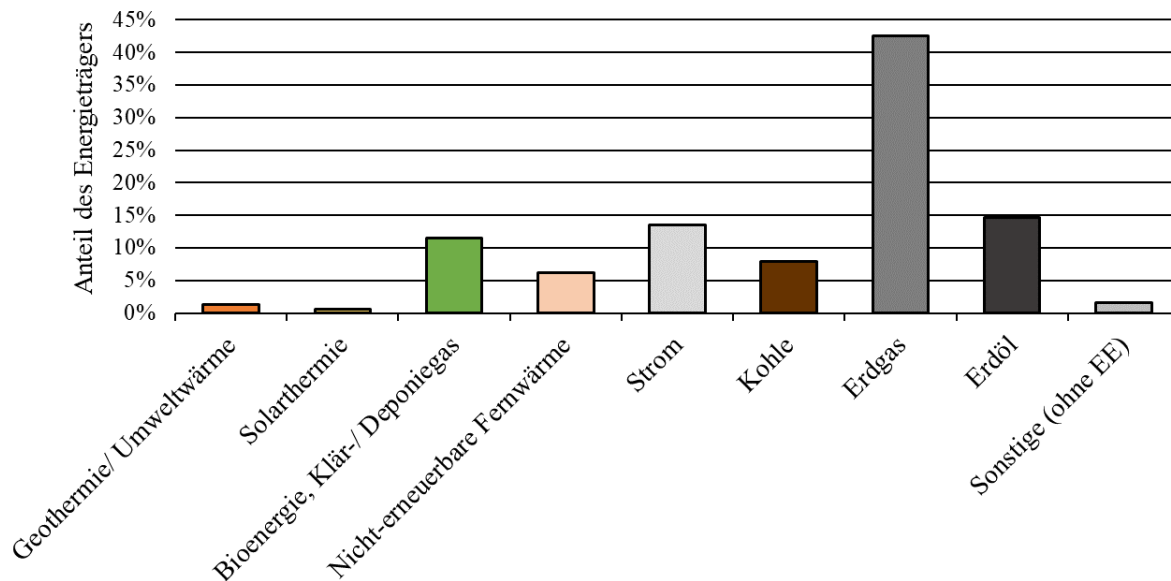


Abbildung 66: Anteil verschiedener Energieträger am deutschen Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte im Jahr 2020, nach [76]

Die energetische Nutzung von Grubenwasser lässt sich gut bedarfsbezogen mit anderen regenerativen Energiequellen kombinieren, da das thermische Potential ganzjährig konstant zur Verfügung steht.

Innerhalb der verschiedenen regenerativen Energiequellen existieren jedoch große Unterschiede hinsichtlich der nutzbaren Temperaturbereiche zur Wärme bzw. Kältebereitstellung (vgl. Abbildung 67).

Im Rahmen des Projektes MareEn lag der Fokus auf der energetischen Nutzung von Grubenwassergeothermie. Aufgrund des eingeschränkten Temperaturbereiches ist eine Kopplung nicht mit allen Energieträgern wirtschaftlich. Das Wärme- und Kältepotential von Oberflächenwässern liegt im Temperaturbereich von 0°C bis zu 25 °C. Bei Abwassernutzung können die Temperaturen geringfügig höher liegen. Erdwärmesonden und -kollektoren können je nach lokalen Gegebenheiten Temperaturen von bis zu 15 °C bereitstellen. Diese Quellen sind gut in kalten Nahwärmenetzen mit Grubenwassernutzung integrierbar.

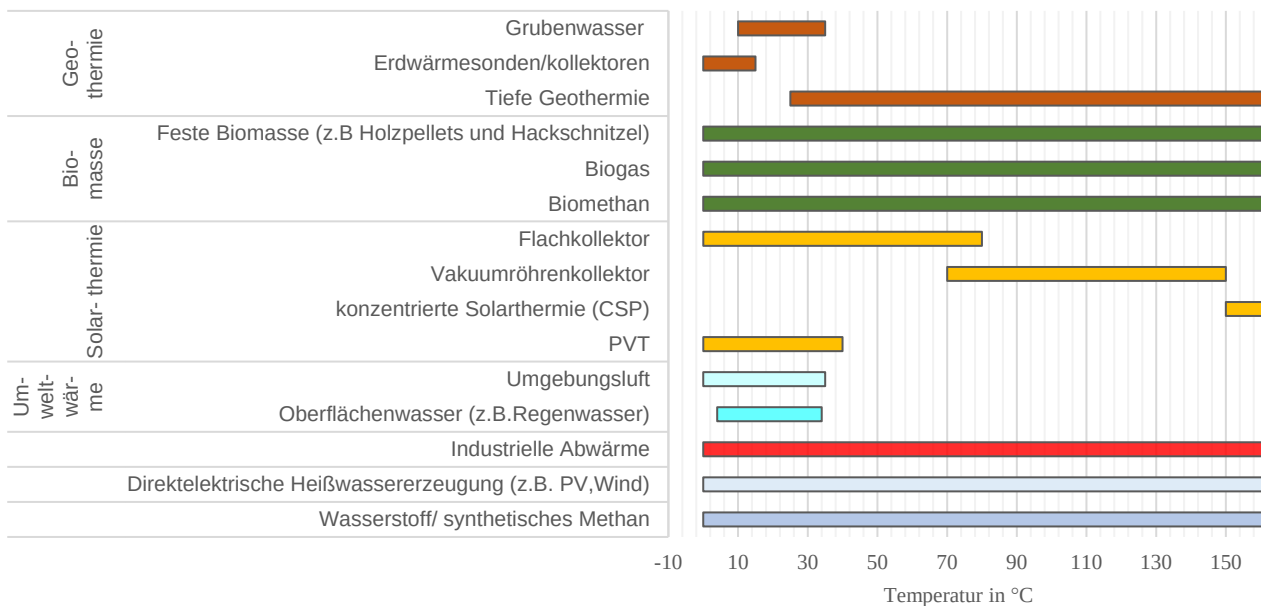


Abbildung 67: Bereitgestellte Temperaturniveaus verschiedener regenerativer Energieträger, nach [33], [78] und [79]

Biomasse

Unter dem Begriff der Biomasse werden sämtliche Stoffe organischer Herkunft verstanden. Für die energetische Verwertung werden neben Material aus der Land- und Forstwirtschaft auch Reststoffe und Abfälle biogenen Ursprungs genutzt. Biomasse kann als Energieträger

- gasförmig als Biogas (meist Biomethan),
- flüssig als Biotreibstoff auf Pflanzenölbasis (z.B. Biodiesel)
- oder fest z.B. über Pellets oder Holzhackschnitzel (z.B. direkte thermisch/elektrische Verwertung in Blockheizkraftwerken (BHKW))

genutzt werden.

Vor allem in landwirtschaftlich geprägten Gebieten können Nahwärmenetze auf Basis von Biobrennstoffen versorgt werden (z. B. Bioenergiedörfer). Wird feste Biomasse direkt vor Ort verwertet (z.B. in Kraft-Wärme-Kopplungen (KWK)-Anlagen), sollte eine entsprechend große Abnehmerstruktur vorhanden sein. Durch eine entsprechende Aufbereitung und Reinigung (Abtrennung von CO₂ und Schwefelwasserstoff) kann aus Biogas Biomethan erzeugt werden. Dieses kann direkt in das Erdgasnetz eingespeist werden. Biomethan bzw. -gas kann in Gas-WP, Brennstoffzellen, und BHKW genutzt werden. Die Nutzung von Biomasse kann, soweit ein entsprechendes geothermisches Potential vor Ort vorhanden ist, auch mit oberflächennaher Geothermie und saisonalen Speichern kombiniert werden. Im Gegensatz zur Temperaturbegrenzung anderer regenerativer Energieträger wie z.B. Solarthermie sind durch die direkte thermische Verwertung von fester Biomasse und Biogas Temperaturen bis 500°C realisierbar [78].

Solarenergie

Die Kombination von Solarthermie mit Geothermiesystemen (z.B. Erdsondenfelder und WP) bzw. mit saisonalen Speichern ermöglicht ganzjährig hohe Deckungsanteile an der Wärme-bzw. Kälteversorgung. Ein zentrales Problem der Solarthermie ist die Nutzungskonkurrenz mit PV-Anlagen, welche infolge geringerer Kosten und einer größeren finanziellen Sicherheit auf Dachflächen meist bevorzugt werden. Die Rentabilität von Solarthermie ist stark von der Entwicklung der Strom- und Gaspreise sowie von den Finanzierungsmöglichkeiten für die hohen Investitionskosten abhängig. Einen Kompromiss können hier Photovoltaisch-thermische Kollektoren (PVT) darstellen. Dort wird Photovoltaik (PV) mit der thermischen Nutzung der Sonnenenergie in einer Anlage kombiniert. Dieser Hybridkollektor wird als PVT-System bezeichnet. Da PV-Zellen (im Speziellen aus kristallinem Silizium) sinkende Wirkungsgrade mit steigendem

Temperaturniveau des Fluides aufweisen, sind PVT-Anlagen besonders für Niedertemperatursysteme geeignet. Ein Betrieb ist nur bis zu einer Fluidtemperatur von max. 30-40 °C sinnvoll. An Tagen mit starker Sonneneinstrahlung und hohen Umgebungstemperaturen können sich die Module auf 60 °C und mehr erwärmen. [80].

Abwärme

Die Nutzung überschüssiger Wärme aus Industrieprozessen stellt ein großes Wärmepotential dar, das sonst ungenutzt in die Umwelt abgegeben werden würde. Abschätzungen des Bundesinstitutes für Energie- und Umweltforschung (ifeu) aus dem Jahr 2017 ergeben hierbei ein Potential von rund 140 Petajoule für luftgetragene Abwärme über 95 °C und 15 Petajoule im Temperaturbereich zwischen 50-95 °C (Energienmengen bezogen auf 35 °C Referenztemperatur) [81].

Temperaturen bis 300 °C sind auch für solarthermische Kraftwerke, Tiefengeothermie und industrielle Abwärme aus Hochtemperaturanwendungen erreichbar. Infolge des hohen bereitgestellten Temperaturniveaus sind diese in Fern- und Nahwärmenetze integrierbar. Die Einbindung dieser Anwendungen sind jedoch eher für Wärmenetze mit hohen Temperaturniveaus bzw. den Prozesswärmebedarf der Industrie sinnvoll. Eine Kombination mit Grubenwassergeothermie ist nicht sinnvoll. Überschusswärme kann jedoch bei fluktuierender Nachfrage in Mittel bis Hochtemperaturspeichern zwischengespeichert werden. Alternativ kann eine Verstromung der Überschusswärme angestrebt werden [79] [81] [31].

Wasserstoff

Wasserstoff (H₂) hat einen hohen massebezogenen Energiegehalt von $33 \frac{kWh}{kg}$. Bei den Herstellungsverfahren von H₂ wird zwischen Elektrolyse, Dampfreformierung und Methanpyrolyse unterschieden. Der überwiegende Teil des in Deutschland genutzten Wasserstoffs wird über Dampfreformierung und als Nebenprodukt der chemischen Industrie hergestellt. Überschüssiger Strom aus EE kann über Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt und gespeichert werden (grüner Wasserstoff). Dies wird als Power-to-Gas bezeichnet. Durch Zugabe von CO₂ kann dieser in Methan umgewandelt und in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden. Im Quartier kann diese Technik zukünftig dazu beitragen, den Anteil von EE zu erhöhen und zum Beispiel Stromüberschüsse von Dach-PV Anlagen zwischen zu speichern. Als Schlüsseltechnologie für eine verbesserte Sektorenkopplung ist Wasserstoff vielfältig integrierbar, aktuell besteht hier aber noch Forschungsbedarf für Umsetzungen z.B. im Quartier [82] [83].

Für ein weiteres Potential kann die mögliche Nutzung eines Überangebots an Wärme aus dem Grubenwasser angesehen werden. In Bereichen, wo ein Überangebot an Wärme besteht, könnte z.B. nachts, die verfügbare Wärme für die Herstellung von Wasserstoff genutzt werden. In diesem Zusammenhang bedarf es einer Analyse der jeweiligen standortspezifischen Rahmenbedingungen (Temperatur des Grubenwassers, Wasserzulauf sowie Netzknoten für elektrische Energie). Je nach Elektrolyseverfahren, müssen dennoch Temperaturen von ca. 80 °C – 100 °C erreicht werden (z.B. Proton Exchange Membrane-Verfahren). In diesem Zusammenhang muss durch den Einsatz von Wärmepumpen das Wasser entsprechend erhitzt werden, um es dem Prozess zur Verfügung zu stellen. Entsprechend sind Temperaturhübe von mindestens 40 bis 80 Kelvin zu verzeichnen. Wärmepumpen in dieser Bauart sind verfügbar oder es können Kaskadenschaltungen installiert werden. Insgesamt ist diese Anwendung aber sehr kostenintensiv. Entsprechend ist eine Nutzung von Überangeboten der Wärme aus Grubenwasser zur Wasserstoffherzeugung nicht zu favorisieren.

Strom aus Windkraft und Photovoltaik

Zur Erreichung einer möglichst klimaneutralen Wärme-bzw. Kälteversorgung im Quartier, ist es essenziell, parallel auch andere Sektoren wie die Stromversorgung und Mobilität zu fokussieren. Die Nutzung von Windkraft- und PV-Anlagen stellt eine weitere nachhaltige Option der Stromerzeugung dar. Die elektrische Leistung der Windkraftanlagen beträgt etwa 5 MW an Land bzw. bis zu 15 MW Off-Shore [84].

Netzgekoppelte PV-Anlagen können als kleinere Einheit auf Gebäudeflächen oder als großflächige Freiflächenanlagen betrieben werden. Konzentrierende PV (Concentrator Photovoltaic-CPV) Systeme nutzen optische Komponenten, um die Intensität des Sonnenlichtes bis um das 1000-fache zu erhöhen [85].

Eine Option, ist die Nutzung des produzierten Stromes zur Wärmegewinnung bzw. zum Betrieb eines Heizsystems (Power-to-heat). Das benötigte Temperaturniveau kann so individuell nach Bedarf eingestellt werden. In Folge des fluktuierenden Angebotes der elektrischen Erzeugung durch die EE steigen die Anforderungen an die Gestaltung elektrischer Netze und führen zu erhöhtem Netzplanungsaufwand [86] [84].

Überschussstrom aus erneuerbaren Energien der nicht direkt benötigt wird, kann z.B.

- über direktelektrische Heißwassererzeugung (z.B. Elektro- oder Strahlungsheizung) oder dem Betrieb von elektrischen WP der Wärmebereitstellung dienen
- in Batterien gespeichert werden oder in das Stromnetz eingespeist werden
- zur Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse genutzt werden.

In Gebieten ohne bzw. geringer Anbindung an die Fernwärmeversorgung werden dezentrale WP als Alternative zur Fernwärme zunehmend rentabel und attraktiv. In Zukunft wird so die verbrennungsunabhängige Wärmeerzeugung weiter an Bedeutung gewinnen. Durch die Absenkung der Netztemperatur können neue Potentiale (z.B. die fast ganzjährige Nutzung niedertemperierter Solarthermie und die direkte Einbindung von Grubenwassergeothermie) erschlossen werden. Durch die Kombination mit einem Wärmespeicher, kann die WP elektrische Energie verbrauchen, wenn die Energie zu niedrigeren Kosten erzeugt wird, oder wenn Erzeugungsspitzen aus EE vorherrschen. Zusätzlich kann sie Wärme oder Kälte erzeugen, die gespeichert und später von den Nutzern im Netz verbraucht werden kann (Kältering). Der Aufbau und die Steuerung von „intelligenten“ Wärmenetzen (Smart Grids) sind von grundlegender Bedeutung, um das fluktuierende Angebot von EE in das Energiesystem zu integrieren. Der Strom zum Betrieb einer Grubenwassergeothermieanlage kann in Abhängigkeit der lokalen Rahmenbedingungen mit allen genannten regenerativen Energieträgern wirtschaftlich zur Verfügung gestellt werden. Für die Bereitstellung von Strom für den Einsatz dezentraler WP in Wohnungen bieten sich im Speziellen PV-Dachanlagen an [33] [87] [88] [89].

6 Öffentlichkeitsarbeit und Bürgerbeteiligungen

Ein zentraler Punkt im Rahmen des Projektes MareEn war die Integration der Ideen und Wünsche seitens der beteiligten Gemeinden und Institutionen im Projekt, z.B. zu möglichen Vorzugsgebieten für die energetische Nutzung von Grubenwasser. Zusätzlich wurden im Rahmen von Treffen die aktuelle Energieversorgungslage sowie zukünftige Pläne zur Entwicklung der Energieversorgung in den Gemeinden diskutiert. Im Projektverlauf fanden die folgenden gemeinsamen Veranstaltungen statt:

- Kickoff-Meeting im Januar 2022
- Treffen mit Vertretern der Gemeinden Hohndorf und Gersdorf im Februar 2022
- Treffen mit Vertretern der Gemeinden Oelsnitz und Lugau im April 2022
- Treffen mit Vertretern Wohnungsbaugenossenschaft Oelsnitz im Juni 2022
- Treffen mit Vertretern des Bergbaumuseums im Oktober 2022
- Abschlussveranstaltung im Dezember 2022

Zudem wurde am 14.06.2022 ein Workshop für Kommunen, Bergwerksbesitzer, Entscheidungsträger und weitere Stakeholder veranstaltet. Über 80 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Sachsen und weiteren Bundesländern kamen zusammen, um sich über die Energiewende, bestehende Projekte und konkrete Umsetzungsmöglichkeiten zu informieren und darüber zu diskutieren. Nach den Vorträgen z.B. zu Großwärmepumpen, den politischen Rahmenbedingungen für Geothermie und aktuellen Projekten zu Nahwärmenetzen wurde den Beteiligten im Rahmen einer Exkursion zum Kältenetz der TU Bergakademie Freiberg auch ein realisiertes Kältenetz gezeigt. Im Folgenden sind einige Impressionen der Veranstaltung gezeigt:



Einlass und Ausgabe der Tagungsunterlagen



Dipl. Ing. (FH) S. Kersten, Referent des Bundesverbands Wärmepumpe e.V., erklärt den Teilnehmenden die Grundlagen zur Wärmepumpe



Das Auditorium während des Vortrags von F. Stanko (Bundesverband Geothermie) über die politischen Rahmenbedingungen zur Wärmepumpentechnik



Das Auditorium im Schlossplatzquartier der TU Bergakademie Freiberg, während des Vortrags zu Großwärmepumpen von SmartHeat



Das Auditorium während des Vortrags von M. Sc. D. Nefodov (TU Chemnitz) über die Forschung an Quartierskonzepten mittels Großwärmepumpen und Speichersystemen



Exkursion zum Kältenetz Kältenetz "Campus Kälte" der TU Bergakademie Freiberg

Zusätzlich wurde das Projekt im Rahmen von Vorträgen und Posterpräsentationen auf verschiedenen Veranstaltungen vorgestellt:

- T. Wenzel: Netzgebundene Wärmeversorgung von Gebäuden mit Grubenwasser-geothermie – Möglichkeiten einer GIS-gestützten Modellierung, Workshop: Lösungen für die Wärmewende – Energiespeicherung in Grubenwasser, Zentrum für Wasserforschung Freiberg (ZeWaF), 23.11.2022, Freiberg
- T. Wenzel, P. Heinrich, L. Oppelt, T. Wunderlich: Energieversorgung von Gebäuden mit Grubenwassergeothermie: Chancen für eine CO₂-neutrale Wärmeversorgung, European Geothermal Congress 2022 DACH Event, 17-21.10.2022, Berlin
- L. Oppelt, T. Wunderlich, T. Grab, S. Pose, T. Fieback: Effektive energetische Nutzung von Grubenwasser durch optimiertes Wärmeübertragerdesign, kassel22, 06-08.09.2022, Kassel
- T. Wunderlich, L. Oppelt, T. Grab, T. Fieback: Quartierslösungen mittels Wärme aus Grubenwasser, kassel22, 06-08.09.2022, Kassel
- L. Oppelt, T. Grab, T. Wunderlich, T. Fieback: Grubenwasser als regenerative Energiequelle – Effizienzsteigerung durch optimiertes Wärmeübertragerdesign. ZeWaF-Lunchbagseminar, 17.06.2022, Freiberg
- Wunderlich, Timm; Oppelt, Lukas; Grab, Thomas; Fieback, Tobias. (2022, June 10). Quarter solutions for energy transition using heat from mine water. 73. BHT: 9. PhD-Conference, Freiberg, Germany.
- L. Oppelt, T. Grab, T. Wunderlich, T. Storch, T. Fieback: Mine Water Geothermal Energy - Abandoned Mines As A Green Energy Source, CLIMA 2022, Rotterdam, 22.05. - 25.05.2022
- L. Oppelt, T. Grab, T. Wunderlich, T. Fieback: Energetische Nutzung von Grubenwasser, Workshopreihe "Niedertemperaturwärmequellen - Potentiale und effiziente Nutzung", 03.05.2022, Online
- L. Oppelt; T. Grab; S. Pose; T. Grab: Reduktion von Fouling im Wärmeübertrager bei Grubenwassergeothermie durch innovatives Wärmeübertragerdesign, Geothermiekongress 2021, 30.11.-02.12.2021, Essen/Online
- Nacht der Wissenschaft und Wirtschaft 2022, 18.06.2022 Freiberg
- Solar Butterfly on tour, 02.09.2022 Freiberg

Zusätzlich wurde bei Hitradio RTL Sachsen am 15.06.2022 über das Projekt MareEn berichtet.

Des Weiteren wurden zum Projekt die folgenden Veröffentlichungen erstellt:

- L. Oppelt, T. Grab, T. Wunderlich, T. Storch, T. Fieback: Mine Water Geothermal Energy - Abandoned Mines As A Green Energy Source, CLIMA 2022-Proceedings, Rotterdam, 2022, DOI: 10.34641/clima.2022.55
- T. Wunderlich; L. Oppelt; T. Grab; T. Wenzel; P. Heinrich; R. Manig; T. Fieback: Energieversorgung von Gebäuden mit Grubenwasser: Chancen zur CO₂-neutralen Wärmeversorgung, Geothermische Energie, Nr. 102, Jg. 31, S. 26-29, 2022

Zudem wurden Projektwebseiten erstellt, auf der das Projekt vorgestellt wird und Interessierte durch regelmäßige Updates über den aktuellen Bearbeitungsstand informiert wurden (geothermie.iwtt.tu-freiberg.de).

7 Handlungsempfehlungen und Roadmap

Realisierung der Konzepte an den ausgewählten Standorten

Im Rahmen des Projektes MareEn wurden für zehn Standorte im Revier Lugau-Oelsnitz konkrete Umsetzungskonzepte zur Versorgung der Gemeinden mit Wärme aus Grubenwässern erarbeitet. Hier ist eine technische Umsetzung in den nächsten Jahren zu forcieren, insbesondere an Standorten, an denen eine niedrige Amortisationszeit und damit eine attraktive Wirtschaftlichkeit zu erwarten ist, z.B. im Bereich des Kaisergrubenschachts Gersdorf, im Bereich Hedwigschacht Oelsnitz, im Bereich Fleischerberg Hohndorf und Bereich Sallauner Straße Lugau.

Abteufen weiterer Grubenwassermessstellen

Das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) sowie das Oberbergamt (OBM) haben ein Rahmenkonzept für die Grubenwasserproblematik im Revier entwickelt, welches zur 12. Bergbaukonferenz in Zwickau vorgestellt wurde. In diesem ist zu erkennen, dass eine Verifizierung der Flutungsprognosen in den kommenden Jahren notwendig sein wird. In diesem Zusammenhang ist das Abteufen weiterer Bohrungen zur Einrichtung von Grubenwassermessstellen zu empfehlen. Diese Bohrungen sollten durch die jeweiligen betreffenden Stellen in Absprache mit den Gemeinden so gewählt sein, dass die Bohrstandorte für mögliche weitere Anwendungszwecke (Validierung Potentialberechnungen, Untersuchungen zum Wärmeübertragerdesign, Nutzung zur zukünftigen Wärmeversorgung von Quartieren) verwertbar sein können.

Empfehlungen zum Wärmeübertragerdesign

Durch den Versuch am Tiefbrunnen in Hohndorf sind erste Ergebnisse für eine Auslegung des Wärmeübertragers verfügbar, die innerhalb des Reviers aber nicht übertragbar sind, da das Grubenwasser am Versuchsstandort zu einem großen Anteil mit Grundwasser vermischt war. Dennoch ließ sich als Empfehlung die Verwendung von versilberten Platten konkret für den Standort in Hohndorf ableiten. Aufgrund der unterschiedlichen Salinitäten sind zusätzliche Versuche für eine technische Realisierung an weiteren Standorten im Revier zu empfehlen.

Untersuchungen zu Strecken bzw. Schächten im Raum Lugau

Aufgrund der geringen Datenlage konnten im Rahmen des Projektes die Potentiale im Raum Lugau nicht vollständig erfasst werden (hauptsächlich „Bauernschächte“). Wenn z. B. abgeschlossene Kleinzechen in diesem Raum mit freien Streckenabschnitten bestehen, könnten diese für weitere Forschungen im Bereich Wärme- und Kältenutzung oder Wärmespeicherung zukünftig genutzt werden. Hier sind weitere Messkampagnen zu empfehlen.

Kommunikation der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts MareEn sollten an interessierte Parteien (Stadtrat, Gemeindevertreter, Bürger, Unternehmer, etc.) kommuniziert werden. Durch diese Ergebnisverwertung kann es zum Wissensaufbau kommen, welcher zu weiterer Akzeptanz mit der Thematik der möglichen Grubenwassernutzung im Revier führt. Dadurch können Chancen und Risiken klar herausgestellt und Vorbehalte in der Bevölkerung abgebaut werden. Ziel muss es sein, die Bürger sowie mögliche Investoren, Netzbetreiber und Politiker für anstehenden Projekte bzw. die Umsetzung zu gewinnen.

Grubenwassergeothermie bei Infrastrukturprojekten berücksichtigen

Für eine mögliche zukünftige Inbetriebnahme von kalten Nahwärmenetzen, können bereits heute ohne genaue Angaben von Netzauslegung und -anbindung Maßnahmen getroffen werden, um Kosten in der Zukunft zu reduzieren. Sollten in den jeweils priorisierten Standorten Baumaßnahmen an der bestehenden Infrastruktur wie Straßen oder Gehwegen vollzogen werden, können bereits Leerrohre verlegt werden. Diese können als „Platzhalter“ für später vorgesehene Rohre eines kalten Nahwärmenetzes dienen. Dadurch kann zukünftiger Bauaufwand verringert und somit das Verlegen der Infrastruktur beschleunigt werden.

Tracertests zur realen Quantifizierung der Energiepotentiale

Die in der vorliegenden Machbarkeitsstudie erstellten energetischen Versorgungskonzepte sind grundlegend auf der Annahme basierend, dass das Grubenwasser im Wasserkreislauf zwischen abgeteuften Bohrungen den kürzesten Fließweg wählt. Die so errechnete Wärmebereitstellung wird von dieser Seite grundsätzlich limitiert. Real sind allerdings natürliche Strömungen im Bergwerk zu erwarten, welche zu Zuströmungen an warmem Grubenwasser an den Bohrungen führen. Um dieses zusätzliche Energiepotential zu charakterisieren, werden wissenschaftlich begleitete Tracertests („Verdünnungsmethode“) vorgeschlagen. Dadurch wird die Verweilzeit des im untertägigen Kreislauf geführten Grubenwassers bewertet. Dies lässt so Schlussfolgerungen auf den realen Fließweg und damit die Energiepotentiale am untersuchten Standort zu.

Kamerabefahrung der gefluteten Bereiche

Für die weitere Untersuchung des Reviers unter Tage sind vor allem die Streckenbereiche entscheiden. Um die Aussagen zu Potentialen aus dem Projekt genauer zu verifizieren und in ihrer Dimension den realen Werten besser anpassen zu können, wären Kamerabefahrungen der Schächte und der Strecken von großem Vorteil. Anhand dieser Bilder kann kontrolliert werden, wie der Zustand des Bergwerks punktuell zu bewerten ist. Dadurch lassen sich Streckenquerschnitte, Temperaturen sowie Wasserwegsamkeiten überprüfen, die bis zu diesem Teil anhand von Messungen errechnet bzw. angenommen werden mussten.

Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt, "Alle politisch selbständigen Gemeinden mit ausgewählten Merkmalen am 30.09.2022 (3. Quartal 2022)," 31 August 2022. [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GVAuszugQ/AuszugGV3QAktuell.html;jsessionid=10BE870F6FE1C0C7131C5F9DFC914858.live732>. [Accessed 13 September 2022].
- [2] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, "Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR)," Dezember 2021. [Online]. Available: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/regionalstatistische-raumtypologie.html>. [Accessed 13 September 2022].
- [3] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, *DBI GIS-Datenbank*, Freiberg, 2021.
- [4] openstreetmap.org, "OpenStreetMap - Deutschland," 13 September 2022. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.de/>. [Accessed 13 September 2022].
- [5] Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen [GeoSN], "Höhen- und 3D-Stadtmodelle," 13 September 2022. [Online]. Available: <https://www.geodaten.sachsen.de/digitale-hoehenmodelle-3994.html>. [Accessed 13 September 2022].
- [6] PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft, "Energiewende Outlook: Kurzstudie Wärme," 2015.
- [7] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), "Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland," [Online]. Available: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/09/awt_2021_d.pdf. [Accessed 16 01 2022].
- [8] C. H. Jungbluth, "Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen in Wohngebäuden im zukünftigen Energiesystem," Darmstadt, 2006.
- [9] "DIN V 4108-6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und das Jahresheizenergiebedarfs," Beuth, 2004.
- [10] "DIN/TS 18599-12:2021-04: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 12: Tabellenverfahren für Wohngebäude," Beuth, 2021.
- [11] W. M. Willems, *Lehrbuch der Bauphysik: Wärme - Feuchte - Klima - Schall - Licht - Brand*, Dortmund: Springer Vieweg, 2022.
- [12] ÖKO-TEST Verlag GmbH & Co. KG, "1 Grad weniger heizen: So viel können Sie sparen," [Online]. Available: https://www.oekotest.de/freizeit-technik/1-Grad-weniger-heizen-So-viel-koennen-Sie-sparen_13132_1.html. [Accessed 18 11 2022].
- [13] Institut Wohnen und Umwelt, "Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden - zweite erweiterte Auflage," Darmstadt, 2015.
- [14] Institut Wohnen und Umwelt, "Gradtagszahlen Deutschland," 2020. [Online]. Available: https://www.iwu.de/nachricht/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=292&cHash=a295d1987306c0dbadecc7d829e3ba48. [Accessed 14 03 2022].

- [15] Deutscher Wetterdienst, "CDC (Climate Data Center)," [Online]. Available: https://www.dwd.de/EN/climate_environment/cdc/cdc_node_en.html. [Accessed 14 03 2022].
- [16] Institut für Wärme und Öltechnik (IWO), "Energietische Gebäudesanierung in Deutschland," 2013.
- [17] D. Bohne, Technischer Ausbau von Gebäuden und nachhaltige Gebäudetechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [18] Verein Deutscher Ingenieure e.V., "VDI 2078: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)," 2015.
- [19] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., "Kühlen und Klimatisieren mit Erdgas," Berlin, 2018.
- [20] T. Putz, "Räume richtig kühlen: So können Sie im Sommer die Raumtemperatur senken," 27 06 2019. [Online]. Available: <https://www.raumtemperatur.info/raeume-kuehlen/>. [Accessed 16 12 2022].
- [21] S. P. Hausl, "Auswirkungen des Klimawandels auf regionale Energiesysteme - Modellierung und Optimierung regionaler Energiesysteme unter Berücksichtigung klimatischer und räumlicher Aspekte," München, 2018.
- [22] Umweltbundesamt, "Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel," Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2015.
- [23] Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW), "Praxisinformation P 2007/13 Gastransport/Betriebswirtschaft: Abwicklung von Standardlastprofilen," 2007. [Online]. Available: https://www.eichsfeldwerke.de/fileadmin/user_upload/Praxisinformation_P2007_13.pdf. [Accessed 21 09 2022].
- [24] M. Hellwig, "Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile. Dissertation. Technische Universität München," München, 2003.
- [25] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU); GEODE - Groupement Européen des entreprises et Organismes de Distribution d'Energie, EWIV, "BDEW/VKU/GEODE-Leitfaden: Abwicklung von Standardlastprofilen Gas," 30 06 2016. [Online]. Available: https://www.bdew.de/media/documents/Leitfaden_20160630_Abwicklung-Standardlastprofile-Gas.pdf. [Accessed 21 09 2022].
- [26] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, "Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende: Die Energie der Zukunft," 06 2018. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=26. [Accessed 21 09 2022].
- [27] B. M., S. Kempe, M. Ohl, U. Fahl, A. König, T. Jenssen and L. Eltrop, "Wärmeatlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen. Endbericht," Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2009.
- [28] "DIN EN 15232-1: Energieeffizienz von Gebäuden - Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement," Beuth, 2017.
- [29] "DIN/TS 18599-10:2021-04: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzrandbedingungen, Klimadaten," Beuth, 2021.
- [30] L. Oppelt, T. Storch, A. Gäbler and T. Fieback, "Monitoring results of the energy consumption

behaviour of two highly solar-powered apartment buildings; EuroSun2022," in *EuroSun2022*, Kassel, 2022.

- [31] D. Banks, "An Introduction to Thermogeology – Ground source heating and cooling," John Wiley and Sons Ltd, Chicester, 2012.
- [32] S. Buffa, M. Cozzini and M. e. a. D'Antoni, "5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe," EURAC Research, Institute for Renewable Energy, April 2019.
- [33] M. Pehnt, "Wärmenetzsysteme 4.0-Endbericht – Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme – Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen," ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln, 2017.
- [34] M. Pellegrini and A. Bianchini, "The Innovative Concept of Cold District Heating Networks: A Literature Review," *Energies* 11, p. 236, 2018.
- [35] H. Lund, S. Werner and R. e. a. Wiltshire, "4th Generation District Heating (4GDH)," *Energy* 68, pp. 1-11, 2014.
- [36] A. Prasanna, V. Dorer and N. Vetterli, "Optimisation of a district energy system with a low temperature network," *Energy* 137, pp. 632-648, 2017.
- [37] H. Lund, P. Østergaard and T. e. a. Nielsen, "Perspectives on fourth and fifth generation district heating," *Energy*, no. 227, p. 120520, 2021.
- [38] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, "Wärmenetzsysteme 4.0: Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme "Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen"," Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln, 2017.
- [39] J. Kowarik and J. Schubert, "Einschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit ausgewählter Schächte im Grubenrevier Lugau/Oelsnitz aus Sicht des Grubenwasserwiederanstieges," DMT-Leipzig, Oktober 2006.
- [40] M. Felix and H.-J. Berger, "Steinkohlebergbau und Bergbaufolgen im Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz – Geoprofil 14," Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 2010.
- [41] "Verbesserung der Wassergüte in Bergbaugebieten – Zusammenfassung der Untersuchungen des Ziel 3-Projektes VODAMIN zur Verbesserung der Wassergüte in Bergbaugebieten," LfULG, 2014.
- [42] M. Eckart, J. Kowarik and P. e. a. Rüterkamp, "Potenzialstudie – Entnahme von aufsteigendem Grubenwasser aus Solequellen des ehemaligen Steinkohlenreviers Lugau-Oelsnitz und Betrachtungen ökologisch nachhaltiger Verwendungsmöglichkeiten im Falle einer Förderung," DMT-Leipzig, Leipzig, Oktober 2014.
- [43] S. Hädecke, M. Ussath and C. e. a. Jahns, "Visualisierung und Prognostizierung von Bergbaufolgen am Beispiel des Grubenwasseranstiegs im ehemaligen Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz (Sachsen)," Landesamt für Umwelt, Geologie und Landwirtschaft Freiberg (LfULG), Bochum, 2019.
- [44] K. Lünich, L. Kieschnik and C. Zönnchen, "Wassermanagement im Bergbau, Ergebnisse des EU-Projektes Vita-Min – Kompendium wirtschaftlicher, umweltgerechter und innovativer Lösungsansätze und Verfahren für das Bergbaufolgemanagement sowie den aktiven Bergbau," Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Dresden, Januar 2021.
- [45] M. Hübschmann and C. Jahns, "Aktuelle Aktivitäten des geologischen Diensts in der Steinkohleregion Zwickau-Oelsnitz. FLOEZ - Future for Lugau-Oelsnitz-Zwickau,"

Oelsnitz/Erzgebirge, 2018.

- [46] D. Henningsen and G. Katzung, "Einführung in die Geologie Deutschlands," Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1992.
- [47] H. Neuber, "Zustand des unter Tage Bauwerke im Revier Lugau/ Oelsnitz," 2022.
- [48] M. Felix, S. Görne and H.-J. e. a. Berger, "Zur geothermischen Nutzbarkeit des Grubenwassers im Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz," 2007.
- [49] G. Williger, "Scheibenförmiger Abbau mächtiger Flöze unter Anwendung von Versatz mittels Wasserspülung auf dem Steinkohlenwerke Myslowitz," *Essener »Glück auf«*, p. 6, 1902.
- [50] H. Arlt, "Bergbau – Der Werdegang der Entdeckungen und Erfindungen," De Gruyter Oldenbourg, Oldenbourg, 1927.
- [51] K. Dammer, "Übersicht der EFRE-Sanierungsvorhaben in den Bergbaurevieren Zwickau und Lugau/Oelsnitz. FLOEZ - Future for Lugau-Oelsnitz-Zwickau," Oelsnitz/Erzgebirge, 2018.
- [52] M. D.-I. h. Günter, "Bergschadenkundliche Analyse – Grundlagen - Stand - Inhalt - Risikobewertung," TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2015.
- [53] "Prävention von Risiken des Altbergbaus," Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, Dresden, September 2022.
- [54] R. Koenigsdorff, "Oberflächennahe Geothermie für Gebäude – Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung," Fraunhofer IRB, 2021.
- [55] R. Rodríguez and M. Diaz, "Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method," *Renewable Energy*, no. 34, pp. 1716-1725, 2009.
- [56] C. B. D. a. R. N. Loredó, *Evaluation of analytical models for heat transfer in mine tunnels*, Elsevier, 2017.
- [57] LANUV, "Potenzialstudie Warmes Grubenwasser, Fachbericht 90," Recklinghausen, 2018.
- [58] I. Stober and K. Bucher, Geothermie, Springer Spektrum, 3. Auflage, ISBN 978-3-662-60939-2 ISBN 978-3-662-60940-8, Springer, 2020.
- [59] J. Schön, Physical Properties of Rocks, Fundamentals and Principles of Petrophysics, Elsevier, 2015.
- [60] "VDI 4640 Blatt 2, Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen," VDI, Energie und Umwelt , 2019.
- [61] "Monitoringdaten sächsische Grubenwassergeothermieranlagen," TU Bergakademie Freiberg, Institut für technische Thermodynamik, Freiberg, 2023.
- [62] V. Hamm and B. B. Sabet, "Modelling of fluid flow and heat transfer to assess the geothermal potential of a flooded coal mine in Lorraine, France," *Geothermics (Geothermics)*, pp. 177-186, 2010.
- [63] R. Wunderlich, "O1 Konstruktive Hinweise für den Bau von Wärmeübertragern," in *VDI-Wärmeatlas*, Heidelberg, Springer Reference Technik, 2019, pp. 2011-2039.
- [64] K. Nandakumar, "Biofouling and Its Prevention: A Comprehensive Overview," *Biocontrol Science*, vol. 8, no. 4, p. 133–144, 2003.

- [65] P. D. Goodman, "Effect of chlorination on material for seawater cooling system: a review of chemical reactions," *Bra. Corr. J.* 22, pp. 56-62, 1987.
- [66] T. G. S. P. T. S. T. F. L. Oppelt, "Mine water geothermal energy as a regenerative energy source - status quo and results from five years of monitoring," *Oil Gas EUROPEAN MAGAZINE*, no. 47, pp. 15-19, 2021.
- [67] L. Oppelt, S. Pose, T. Grab and T. Fieback, "Stillgelegte Bergwerke als regenerative Energiequelle - Vyřazené doly jako regenerativní zdroj energie," in *GeoMAP - Geologische, hydrogeologische und geomechanische Modellierungs-, Visualisierungs- und Prognosewerkzeuge zur Darstellung von Bergbaufolgen und Nachnutzungspotenzialen*, Dresden, 2021, pp. 112-135.
- [68] T. G. S. P. T. S. T. F. L. Oppelt, "Innovative heat exchanger design to avoid fouling," European Geothermal Congress 2022-Proceedings, Berlin, 2022.
- [69] T. G. S. P. T. S. T. F. L. Oppelt, "Innovative heat exchanger design to avoid fouling," European Geothermal Congress 2022-Proceedings, Berlin, 2022 .
- [70] T. G. T. W. T. E. T. F. L. Oppelt, "Lösung für die Energiewende? – Grubenwasser zum Heizen, Kühlen, Speichern, Lösungen für die Wärmewende – Energiespeicherung in Grubenwasser," *ZeWaF*, Freiberg, 23.11.2022.
- [71] J. Balski, "Ökologische und ökonomische Bilanzierung einer Grubenwassergeothermianlage," TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2021.
- [72] B. f. W.-. u. Ausfuhrkontrolle, "Informationsblatt CO2-Faktoren," Eschborn, 2021.
- [73] Umweltbundesamt, "Entwicklung der spezifischen Emissionen des deutschen Strommix 1190-2020 und erste Schätzungen 2021 im Vergleich zu Emissionen der Stromerzeugung," 2022.
- [74] Solar-Institut Jülich, "CARNOT Toolbox Ver. 6.3, 10/2018 für Matlab/Simulink," Aachen, 2016.
- [75] N. Pflugradt, "LoadProfileGenerator," 2016. [Online]. Available: <https://www.loadprofilegenerator.de>. [Accessed 22 12 2022].
- [76] "Grafik-Dossier: Der Wärmemix in Deutschland 2020, 2018 & 2016," Agentur für Erneuerbare Energien, 2022. [Online]. Available: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/der-waermemix-in-deutschland-2016-2018>.
- [77] "Erneuerbare Energien in Zahlen," Umweltbundesamt, 2022. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>.
- [78] "Erneuerbare Energie für die Industrie. Prozesswärme aus Bioenergie sorgt für Unabhängigkeit und Klimaschutz," Agentur für Erneuerbare Energien e.V, Berlin, Juni 2017.
- [79] K. Johansen and S. Werner, "Something is sustainable in the state of Denmark: A review of the Danish district heating sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 158, p. 112117, 2022.
- [80] A. (. Dahiya, "Bioenergy – Biomass to biofuels and waste to energy," Academic Press an imprint of Elsevier, London, 2020.
- [81] G. Warnke, "PVT - eine wenig beachtete Flächensynergie," 2021. [Online]. Available: <https://www.dgs.de/news/en-detail/090721-pvt-eine-wenig-beachtete-flaechensynergie/> [Zugriff am: 04.11.2022].

- [82] M. Roeb, S. Brendelberger and et al., "Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende," Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) - Institut für Solarforschung, Köln, 2020.
- [83] "Herstellung von Wasserstoff nach Produktionsprozess in Deutschland im Jahr 2020," Statista, 2022. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1194793/umfrage/produktion-von-wasserstoff-nach-prozess/>.
- [84] S. Blömer, C. Götz and M. e. a. Pehnt, "EnEff:Wärme - netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme (NENIA) – Schlussbericht," Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 2019. [Online]. Available: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Schlussbericht_EnEffW%C3%A4rme-NENIA.pdf [Zugriff am: 04.11.2022].
- [85] T. Werth, "Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen," Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [86] T. Schabbach and P. Leibbrandt, "Solarthermie," Springer Berlin Heidelberg, Heidelberg, 2021.
- [87] M. Wietschel, S. Ullrich and P. e. a. Markewitz, "Energietechnologien der Zukunft," Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015.
- [88] T. Bullmann, "Wasserstoff-DIHK Faktenpapier," Deutsche Industrie- und Handelskammer (DIHK), Berlin, Juni 2020.
- [89] U. Hoffstede, M. Beil and W. e. a. Beyrich, "Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz – Teilvorhaben II a: Biomasse Endbericht," Fraunhofer IEE, Kassel, Mai 2019.
- [90] A. Förster and H.-J. Förster, "Crustal composition and mantle heat flow: Implications from surface heat flow and radiogenic heat production in the Variscan Erzgebirge (Germany)," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105, vol. 12, no. 105, pp. 27917-27938, 2000.
- [91] V. Wesselak, T. Schabbach and T. e. a. Link, "Handbuch Regenerative Energietechnik," Springer Berlin Heidelberg, Heidelberg, 2017.
- [92] N. Strodel, "Wahrscheinlichkeitsbasierte Energiesystem- und Wirtschaftlichkeitsanalyse eines Energieverbundsystems unter Einbindung eines Aquiferwärmespeichers," Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg, 2018.
- [93] "Weatherspark: Klima und durchschnittliches Wetter das ganze Jahr über in Lugau – Deutschland," Weatherspark, 2022. [Online]. Available: <https://de.weatherspark.com/y/73545/Durchschnittswetter-in-Lugau-Deutschland-das-ganze-Jahr-%C3%BCber>.
- [94] F. Hahn, G. Bussmann and F. e. a. Jagert, "Reutilization of mine water as a heat storage medium in abandoned mines," IMWA, September 2018.
- [95] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, "1,5 °C Globale Erwärmung: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger," CD Werbeagentur GmbH, 2018.
- [96] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), "Wie heizt Deutschland," Berlin, 2019.
- [97] J. Adolf, K. Arnold, C. H. Balzer and J. Louis, "Wasserstoff - Energie der Zukunft?," *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, no. 67, pp. 74-77, 2017.
- [98] S.-. u. R. (. Bundesinstitut für Bau-, "Laufende Raumbbeobachtung - Raumabgrenzungen. Siedlungsstrukturelle Kreistypen," 31 Dezember 2018. [Online]. Available: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschlan>

d/kreise/siedlungsstrukturelle-kreistypen/kreistypen.html. [Accessed 28 Mai 2021].

- [99] Statistisches Bundesamt (Destatis), "Entwicklung der Privathaushalte bis 2040: Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung 2020," 2 März 2020. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Publikationen/Downloads-Haushalte/entwicklung-privathaushalte-5124001209004.pdf?__blob=publicationFile. [Accessed 25 Juni 2021].
- [100] Deutscher Wetterdienst (DWD), "Klimaszenarien (Zukunft)," [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien_homenode.html. [Accessed 25 06 2021].
- [101] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, "Raumordnungsprognose 2040," Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, 2021.
- [102] Statistisches Bundesamt (Destatis), "14. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung für Deutschland," [Online]. Available: <https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/index.html>. [Accessed 25 Juni 2021].
- [103] Deutsche Energie-Agentur (dena), "dena-Gebäudereport," 12 November 2019. [Online]. Available: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2019/dena-gebaudereport-waermewende-kommt-seit-2010-nicht-voran/>. [Accessed 25 Juni 2021].
- [104] "Energiewende-Outlook: Kurzstudie Wärme – Eine Untersuchung verschiedener Strategien zur Sicherstellung einer erfolgreichen Energiewende im Wärmebereich," AG PricewaterhouseCoopers, Januar 2015.
- [105] "Homepage der BGH Edelstahl Lugau GmbH," BGH Edelstahl Lugau GmbH, 2022. [Online]. Available: <https://www.bgh.de/de/standort-lugau>.
- [106] T. Grab, "Informationen zum Unternehmen BGH Freital bzw. Lugau," 2022.
- [107] "Erneuerbare Energien: Leitfaden-Argumente für die kommunale Wärmewende – Warum sich die Umstellung der kommunalen Wärmeversorgung auf Bioenergie und andere regenerative Quellen lohnt," *Agentur für Erneuerbare Energien*, no. 07, 2016.
- [108] "Lugauer Geschichte," Stadt Lugau, 2022. [Online]. Available: <https://www.stadt-lugau.de/webs/index.php?id=141>.
- [109] K. Hoyer, "Bergbaufolgen," Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 2010.
- [110] L. Oppelt, S. Pose and T. e. a. Grab, "Vergleich von Grubenwassergeothermie zu fossilen Energieträgern mittels ökonomischer, ökologischer und technologischer Kriterien," *Geothermiekongress 2021*, 2021.
- [111] Bundesverband Wärmepumpe e.V., "(bwp)-Energiepreise," Berlin.
- [112] C. Kost, S. Shammugam and V. e. a. Fluri, "Stromgestehungskosten erneuerbare Energien," Fraunhofer ISE, Freiburg, Juni 2021.
- [113] "CO2-Online-Strompreisentwicklung – Das kostet 1 kWh Strom 2022," co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH, 2022. [Online]. Available: <https://www.co2online.de/energiesparen/strom-sparen/strom-sparen-stromspartipps/strompreis/#c122841>. [Accessed 19 12 2022].
- [114] W. T., "Grubenwasser zum Kühlen - Evaluierung anhand ökologischer, ökonomischer und technischer Kriterien und Entwicklung von Kühlverbrauchsprofilen," TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2021.

