

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität Darmstadt



Machbarkeitsstudie zur Nutzung der Werra-Wärme am Nadelwehr Hann. Münden

Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und beim Fachgebiet für
Wasserbau und Hydraulik vorgelegte

Masterthesis

von

Simon Constantin Schwarze

aus Kassel (Matrikelnummer 2905912)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann

Tag der Einreichung: 27.02.2023

Darmstadt, im Februar 2023

Machbarkeitsstudie zur Nutzung der Werra-Wärme am Nadelwehr Hann. Münden
Feasibility Study on the Use of Werra heat at the Hann. Münden weir "Nadelwehr"

Korrigierte Fassung vom 01.04.2023

Masterthesis von:

Simon Constantin Schwarze

constantin.schwarze@stud.tu-darmstadt.de

Studiengang: M. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Eingereicht: 27.02.2023

Betreuung: M.Sc. Steve Borchardt, M.Sc. Jessika Gappisch

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt, Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

Veröffentlicht unter CC-BY 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Master-Arbeit für Herrn Simon Constantin SCHWARZE (Matr.-Nr. 2905912)

Machbarkeitsstudie zur Nutzung der Werra-Wärme am Nadelwehr Hann. Münden

Feasibility Study on the Use of Werra heat at the Hann. Münden weir “Nadelwehr”

Veranlassung und Thema

Die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien soll dazu beitragen, dem Klimawandel entgegenzuwirken und durch eine dezentrale Energieernte die Abhängigkeit von anderen Ländern zu reduzieren. Fließgewässer bieten sich zur Nutzung ihrer Umweltwärme für die Raumwärmebereitstellung und Warmwasserversorgung an, da sich diese stetig thermisch regenerieren und Wasser eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt. Ob und wie ein Fließgewässer wärmeenergetisch nutzbar ist, wird von standortspezifischen Faktoren vorgegeben. Darunter fallen gewässerspezifische Faktoren wie die Wassertemperatur und der Abfluss, aber auch rechtliche und weitere Faktoren wie die Gewässernutzung oder die Nähe zu möglichen Abnehmern.

In der niedersächsischen Stadt Hann. Münden fließen die Flüsse Fulda und Werra zusammen und von dort als Weser weiter. Im Rahmen der Abschlussarbeit soll ergebnisoffen untersucht werden, inwieweit die Werra am Nadelwehr zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung konkreter umliegender Gebäude (Veranstaltungs- und Beherbergungsbetriebe) genutzt werden kann. Dafür sollen zunächst das gewässerseitige Wärmepotenzial sowie die allgemeinen Rahmenbedingungen zur Flusswärmenutzung und die standortspezifischen Anforderungen analysiert werden. In einem weiteren Schritt soll der Wärmebedarf der Gebäude ermittelt werden. Darauf aufbauend ist ein konkretes Konzept zur Gestaltung eines geeigneten Wärmeentnahme-Systems zu erarbeiten. Dabei sollen mehrere Alternativen geprüft und bewertet werden. Die Bewertung schließt eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und den hydrothermalen Deckungsanteil an der Wärmeversorgung mit ein. Außerdem soll geprüft werden, inwieweit die bestehenden Heizungsanlagen für den Einsatz von Wärmepumpen geeignet sind und wie der Betrieb und das Nutzerverhalten bei Bedarf anzupassen sind. Abschließend ist eine Empfehlung zur Machbarkeit in Bezug auf die Nutzung der Werra-Wärme am Nadelwehr Hann. Münden zu geben.

Arbeitsschritte:

- Erarbeitung der Grundlagen zur Hydrothermie und Wärmebedarfsermittlung;
- Ermittlung des gewässerseitigen Wärmepotenzials unter Berücksichtigung der hydrothermalen Rahmenbedingungen und der standortspezifischen Anforderungen;
- Ermittlung und Analyse des Wärmebedarfs konkreter Gebäude am Nadelwehr;
- Konzeptionelle Entwicklung geeigneter Wärmeentnahme-Systeme;
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Bewertung der untersuchten Wärmeentnahme-Systeme;
- Abschätzung des hydrothermalen Deckungsanteils an der Wärmeversorgung;
- Empfehlungen zum Nutzerverhalten und zum Betrieb von Heizungsanlagen in den Bestandsgebäuden, die zukünftig mit Wärmepumpen versorgt werden sollen;
- Erarbeitung von Empfehlungen zur Machbarkeit in Bezug auf die Nutzung der Werra-Wärme am Nadelwehr Hann. Münden.

Modalitäten

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen zu Abschlussarbeiten in der Allgemeinen Prüfungsordnung der TU Darmstadt und in der Studienordnung des Fachbereiches 13. Diese Bestimmungen beziehen sich u.a. auf die Aspekte

- Betreuung und Bewertung von Abschlussarbeiten und
- besondere Regelungen bei externen Arbeiten

Der Kandidat hat dafür selbstständig Sorge zu tragen, dass diese Bestimmungen eingehalten werden. Darüber hinaus gelten folgende Randbedingungen:

Referent	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik lehmann@wb.tu-darmstadt.de	Empfohlene Kenntnisse	- Hydraulik, Wasserbau - Hydrothermie - Wärmetechnik
Betreuung	Jessika Gappisch, M.Sc. FG Wasserbau und Hydraulik j.gappisch@wb.tu-darmstadt.de Steve Borchardt, M.Sc. FG Wasserbau und Hydraulik s.borchardt@wb.tu-darmstadt.de		
Bearbeitungszeitraum	Auslösung nach Vereinbarung, Leistungszeitraum 26 Wochen	Arbeitsbedingungen	- Heimarbeit - Ortsbegehung



Darmstadt, den 19. Juli 2022

Kurzfassung

Wärmepumpen haben durch die Substitution fossiler Energieträger in der Wärmebereitstellung ein erhebliches Potenzial zur Reduktion von CO₂-Emissionen. Die verstärkte Nutzung von Wärmepumpen trägt dazu bei eine dezentrale Wärmeversorgung zu fördern und die Abhängigkeit von Energieimporten aus anderen Ländern zu verringern.

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden Einsatzmöglichkeiten der thermischen Fließgewässernutzung in konkreten Gebäuden am Nadelwehr in der Altstadt Hann. Mündens untersucht. Die Analyse des Fließgewässerswärmepotenzials zeigt, dass der natürliche Wärmeinhalt der Werra ausreicht, um Raumwärme und Warmwasser bereitzustellen. Die untersuchten Gebäude am Nadelwehr haben einen spezifischen Wärmebedarf von 82 kWh/(m²·a) bis 187 kWh/(m²·a).

Um die Effizienz der Wärmepumpe zu heben, ist eine Absenkung der Vorlauftemperatur des Heizungssystems anzustreben. Für die Raumwärme kann dazu der selektive Austausch einzelner, unterdimensionierter Heizkörper ein kosteneffizienter Weg sein. Die Quellenerschließung unmittelbar am Nadelwehr ist durch weitere Gewässernutzungen begrenzt. Die Werra unterliegt anthropogener Gewässererwärmung durch die Einleitung von Salzabwässern.

Bivalente Betriebssysteme kombinieren eine Wärmepumpe mit einem bereits bestehenden fossilen Wärmeerzeuger zur Spitzenlastdeckung. Dadurch können Wärmequellenanlage und Wärmepumpe kleiner dimensioniert und Investitionskosten gesenkt werden. Bei einem Kostenverhältnis von Wärmepumpenstrom- zu Erdgaspreis kleiner 2,8 ist die Flusswärmepumpe bis zu einer Vorlauftemperatur des Heizsystems von 55 °C und einem Gütegrad η größer 0,4 aus wirtschaftlicher Sicht der bevorzugte Wärmeerzeuger. Varianten zur Wärmeentnahme wurden für die Gebäude mit unterschiedlichen energetischen Standards entwickelt und evaluiert. Als Vorzugsvariante ergibt sich ein geschlossenes System mit Edelstahl-Plattenwärmeübertrager. Der hydrothermale Deckungsanteil beträgt bei höchstem Auslegungsfaktor der Wärmepumpe maximal 83 %.

Die wirtschaftliche Analyse für die untersuchten Gebäude ergibt Amortisationszeiten der Investitionskosten zwischen 10 bis 26 Jahren. Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass die Flusswärmenutzung für den Einsatz im Gebäudebestand geeignet ist, allerdings im Einzelfall überprüft werden muss, ob dies aus technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Es gibt es einen großen Aufholbedarf an Praxiserfahrung für weitere Systemstandardisierungen.

Abstract

Heat pumps have considerable potential for reducing CO₂ emissions by substituting fossil fuels in heat supply. The increased use of heat pumps helps to promote a decentralized heat supply and to reduce the dependence on energy imports from other countries.

In the context of this master thesis, possible applications of the thermal use of flowing water in concrete buildings at the Nadelwehr in the old town of Hann. Münden are investigated. The analysis of the flowing water thermal potential shows that the natural heat content of the Werra is sufficient to provide space heating and hot water. The investigated buildings at the Nadelwehr have a specific heat demand of 82 kWh/(m²·a) to 187 kWh/(m²·a).

To raise the efficiency of the heat pump, a reduction of the flow temperature of the heating system should be aimed at. For space heating, selective replacement of individual, undersized radiators can be a cost-effective way to achieve this. Source development immediately adjacent to the Nadelwehr is limited by other water uses. The Werra River is subject to anthropogenic water heating due to the discharge of saline wastewater.

Bivalent operating systems combine a heat pump with an existing fossil fuel heat generator for peak load coverage. This allows the heat source system and heat pump to be smaller in size and reduces investment costs. With a cost ratio of heat pump electricity to natural gas price smaller than 2,8, the flow heat pump is the preferred heat generator from an economic point of view up to a supply temperature of the heating system of 55 °C and a quality factor η larger than 0,4. Variants for heat extraction were developed and evaluated for the buildings with different energy standards. The preferred variant is a closed system with stainless steel plate heat exchanger. The hydrothermal fraction of coverage is a maximum of 83 % at the highest design factor of the heat pump.

The economic analysis for the buildings investigated results in payback periods for the investment costs of between 10 and 26 years. From the results, it can be concluded that river heat utilization is suitable for use in existing buildings, but it must be checked in each individual case whether this makes sense from a technical and economic point of view. There is a great need to catch up on practical experience for further system standardization.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Symbolverzeichnis.....	VIII
1 Einführung.....	1
2 Thermische Nutzung von Fließgewässern.....	4
2.1 Wärmequelle Fließgewässer	4
2.2 Funktionsprinzip einer Wärmepumpe	8
2.3 Systeme zur Wärmeentnahme	14
3 Wärmeenergetisches Potenzial der Werra.....	20
3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes	20
3.1.1 Werra-Welle am Nadelwehr.....	23
3.1.2 Salzproblematik und thermische Einleitungen	24
3.1.3 Laufwasserkraftwerk Werrawerk	30
3.2 Ermittlung des gewässerseitigen Wärmepotenzials	30
3.2.1 Erfassung der Gewässerdaten	31
3.2.2 Auswertung des Wärmepotenzials	32
3.2.3 Ergebnisse zu Wärmepotenzial und Jahresarbeitszahlen	37
4 Wärmebedarfsermittlung konkreter Gebäude am Nadelwehr.....	42
4.1 Grundlagen der Wärmebedarfsermittlung.....	42
4.2 Wärmebedarfsanalyse.....	47
4.2.1 Erfassung der Gebäudedaten	47
4.2.2 Heizgradtage und Heizperiode.....	50
4.2.3 Auswertung des Wärmebedarfs der untersuchten Gebäude.....	52
4.3 Diskussion der Ergebnisse.....	54
5 Konzeptionierung geeigneter Wärmeentnahmesysteme	56
5.1 Standortwahl.....	56
5.2 Entwicklung der Wärmeentnahmesysteme.....	59
5.2.1 Variante A	59
5.2.2 Variante B	61
5.3 Variantenbewertung	62
6 Machbarkeit der Werra-Wärmenutzung am Nadelwehr	64
6.1 Abschätzung des hydrothermalen Deckungsanteils	64
6.2 Empfehlungen zum Betrieb und Nutzerverhalten.....	68
6.3 Empfehlungen zur Machbarkeit der Werra-Wärmenutzung am Nadelwehr	70

7	Fazit.....	75
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	75
7.2	Ausblick.....	77
	Literaturverzeichnis.....	79
	Anhang	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Strom, Wärme und Verkehr. 1	1
Abbildung 1-2: Beheizstruktur des Wohnungsbestands in Deutschland im Jahr 2021 2	2
Abbildung 2-1: Übersicht über Wärme Flüsse eines Fließgewässers (Pfeile) und möglichen Auswirkungen (eingerahmt) mit thermischer Einleitung (rote Fahne)..... 4	4
Abbildung 2-2: Einflussfaktoren auf die Wassertemperatur von Fließgewässern 5	5
Abbildung 2-3: Tageszeitliche Temperaturänderungen mit der fließenden Welle eines Fließgewässers innerhalb von vier Tagen 8	8
Abbildung 2-4: Vergleich von lokaler Verfügbarkeit und Effizienz unterschiedlicher Quellenarten..... 9	9
Abbildung 2-5: Funktionsprinzip WP 10	10
Abbildung 2-6: Darstellung der Betriebsarten für die Wärmeerzeugung..... 11	11
Abbildung 2-7: Grundprinzip der WP 12	12
Abbildung 2-8: Wärmequellenanlage im offenen System 14	14
Abbildung 2-9: Wärmequellenanlage im geschlossenen System 16	16
Abbildung 2-10: Wärmequellenanlage im gesplitteten System..... 18	18
Abbildung 3-1: Markierung des Standorts Hann. Münden im EZG Weser 20	20
Abbildung 3-2: Verlauf der Werra in Hann. Münden 21	21
Abbildung 3-3: Ansicht des Nadelwehres und der Schleuse, links im Betrieb im Jahr 2018 (Berberich, 2018) und rechts im Rahmen der Ortsbegehung im Oktober 2022 (Blickrichtung stromaufwärts) 22	22
Abbildung 3-4: Ansicht der Werrabrücke und Schleuse (Blickrichtung stromabwärts) . 22	22
Abbildung 3-5: Luftbild vom Nadelwehr und der Altstadt von Hann. Münden 23	23
Abbildung 3-6: Werra Nebenarm mit Nadelwehr am Wanfrieder Schlagd..... 24	24
Abbildung 3-7: Kaliabbau durch K+S Werke und Halden zwischen der Gemeinde Gerstungen und Philippsthal..... 25	25
Abbildung 3-8: Mittlere monatliche Gewässertemperatur der Werra an unterschiedlichen Messstellen unterhalb (Tiefenort, Vacha) und oberhalb der Salzabwassereinleitung (Gerstungen, Witzenhausen) 27	27
Abbildung 3-9: Mittlere monatliche elektrische Leitfähigkeit entlang der Werra 28	28
Abbildung 3-10: Mittlere monatliche Chloridionenkonzentration entlang der Werra ... 28	28
Abbildung 3-11: Temperaturdifferenz zwischen den mittleren monatlichen Gewässertemperaturen der Messstelle Tiefenort und der Messstelle Witzenhausen im Zeitraum zwischen 1995 und 2020 29	29
Abbildung 3-12: Temperaturdifferenz zwischen den mittleren monatlichen Gewässertemperaturen der Messstelle Tiefenort und der Messstelle Gerstungen im Zeitraum zwischen 1995 und 2020 29	29
Abbildung 3-13: Laufwasserkraftwerk Werrawerk am Pegel „Letzter Heller“ 30	30
Abbildung 3-14: Messstellen im EZG der Werra..... 31	31
Abbildung 3-15: Jahresganglinie der mittleren, minimalen und maximalen täglichen Gewässertemperaturen mit Darstellung der x_{15} - und x_{85} -Quantile im	

Zeitraum 2003 bis 2021 der Werra an der Messstelle Witzenhausen nahe Hann. Münden	33
Abbildung 3-16: Geordnete Jahresganglinie der mittleren, minimalen und maximalen täglichen Gewässertemperaturen mit Darstellung der x15- und x85- Quantile im Zeitraum 2003 bis 2021 der Werra an der Messstelle Witzenhausen nahe Hann. Münden	34
Abbildung 3-17: Anzahl Unterschreitungstage untersuchter Gewässergrenztemperaturen der Werra pro Monat	35
Abbildung 3-18: Durchschnittliche Anzahl der Unterschreitungstage der Gewässergrenztemperaturen im Jahr und daraus hervorgehende Unterschreitungstage in Prozent pro Jahr	36
Abbildung 3-19: Mittlere Gewässertemperaturen der Werra an der Messstelle Witzenhausen im Vergleich zu mittleren Lufttemperaturen in Göttingen	36
Abbildung 3-20: Abflussganglinie aus Daten zwischen 1985 bis 2021 der Werra vom Pegel „Letzter Heller“	37
Abbildung 3-21: Theoretisches Wärmepotenzial der Werra im Mittel pro Jahrestag	38
Abbildung 3-22: Leistungszahl ε in Abhängigkeit von Vorlauftemperatur und Gütegrad während eines durchschnittlichen Jahres im Betrachtungszeitraum	39
Abbildung 3-23: Häufigkeitsverteilung der Leistungszahl ε in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und dem Gütegrad während eines durchschnittlichen Jahres im Betrachtungszeitraum	40
Abbildung 3-24: JAZ pro Jahrestag während eines durchschnittlichen Jahres im Betrachtungszeitraum	41
Abbildung 4-1: Richtwerte für Heizgrenztemperaturen in Abhängigkeit des Gebäudestandards	44
Abbildung 4-2: Aufteilung der Jahresdauerlinie in Grund- und Spitzenlast	46
Abbildung 4-3: Überblick der untersuchten Gebäude	47
Abbildung 4-4: „Altes Sydekum“ an der Bremer Schlagd direkt angrenzend zum Mühlenarm der Fulda und ca. 50m entfernt vom Nadelwehr; Links: Ansicht von Mühlenarm (Fulda); Rechts: Ansicht vom Doktorwerder (Werra) auf „Altes Sydekum“ und Hotel „Im Anker“	48
Abbildung 4-5: Frontansicht Hotel „Im Anker“ während der Ortsbegehung im Oktober 2022	49
Abbildung 4-6: Aufnahme des Gebäudes in der Sydekumstr. 15; Links: Ansicht der Seite der Gebäude zum Dielengraben von Werrabrücke aus; Rechts: Gebäude von Sydekumstraße aus fotografiert	50
Abbildung 4-7: Ansicht Sydekumstr. 17 vom Dielengraben aus (gewässerseitig)	50
Abbildung 4-8: Tagesmitteltemperaturen in Hann. Münden von 1991 bis 2020 zur Bestimmung der Heizperiode bei einer Heizgrenze von 15 °C	52
Abbildung 4-9: Mittlerer monatlicher Wärmebedarf „Altes Sydekum“	53
Abbildung 4-10: Mittlerer monatlicher Wärmebedarf Hotel „Im Anker“	53
Abbildung 4-11: Mittlerer monatlicher Wärmebedarf Sydekumstr. 15	54
Abbildung 4-12: Mittlerer monatlicher Wärmebedarf Sydekumstr. 17	54

Abbildung 5-1: Potenzielle Standorte für die Entnahme der Werra-Wärme unmittelbar am Nadelwehr	57
Abbildung 5-2: Förderrate der Flusswasserentnahme für das „Alte Sydekum“ und Hotel „Im Anker“	60
Abbildung 5-3: Förderrate der Flusswasserentnahme für die Gebäude in der Sydekumstraße	60
Abbildung 5-4: Beispiel einer Entnahmestelle für das Flusswasser bei einem offenen System.....	60
Abbildung 5-5: Benötigte Wärmeübertragerfläche für das „Alte Sydekum“ und Hotel „Im Anker“	61
Abbildung 5-6: Benötigte Wärmeübertragerfläche für die Gebäude in der Sydekumstraße	61
Abbildung 5-7: Beispiel für die Montage eines Wärmeübertragers mit Verankerungsgewicht	62
Abbildung 5-8: Kosten Wärmeübertrager (geschlossenes System).....	62
Abbildung 5-9: Unterschiede der Wärmequellenanlage im offenen oder geschlossenen System.....	63
Abbildung 6-1: Bivalentes Wärmepumpensystem in schematischer Darstellung	65
Abbildung 6-2: Untersuchung des Schaltpunktes zwischen WP und Gaskessel bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Gütegraden	66
Abbildung 6-3: Prozentuale Verteilung des Wärmebedarfs der untersuchten Gebäude	67
Abbildung 6-4: Hydrothormaler Deckungsanteil in Abhängigkeit des Auslegungsfaktors der WP am Gesamtwärmebedarf.....	68
Abbildung 6-5: Berechnete mittlere Jahresarbeitszahlen nach VDI 4650-1 während der Heizperiode	71
Abbildung 6-6: Investitionskosten der Wärmepumpenanlage exkl. und inkl. Förderung nach BEG.....	73
Abbildung 6-7: Amortisationszeit der Wärmepumpenanlage exkl. und inkl. Förderung nach BEG.....	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Übersicht der verfügbaren Datensätze an den nächstgelegenen Messstationen.....	32
Tabelle 4-1: Einsatzbedingungen von Grundlast- und Spitzenlast- Wärmeerzeugern....	46
Tabelle 4-2: Gewichtete Messstationen zur Bestimmung der HGT in den Jahren 1991 bis 2012	51
Tabelle 4-3: Gewichtete Messstationen zur Bestimmung der HGT in den Jahren 2013 bis 2021	51
Tabelle 4-4: HGT Hann. Münden und Kassel im langjährigen Mittel; Links: 1991 bis 2021; Rechts: Referenzstation aus VDI 4710-2: 1976 bis 2006.....	51
Tabelle 5-1: Untersuchung der Vor- und Nachteile der potenziellen Wärmeentnahmestandorte	58
Tabelle 6-1: Berechnungstabelle der Investitionskosten und der Amortisationszeit der Wärmepumpen- und Wärmequellenanlage.....	73

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Äq.	Äquivalente
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft u. Ausfuhrkontrolle
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
COP	Coefficient of Performance
EZG	Einzugsgebiet
FBH	Fußbodenheizung
FGG Weser	Flussgebietsgemeinschaft Weser
HGT	Heizgradtage
HK	Heizkörper
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt u. Geologie
JAZ	Jahresarbeitszahl
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten u. Naturschutz
RW	Raumwärme
TLUBN	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau u. Naturschutz
WE	Wärmeerzeuger
WP	Wärmepumpe
WPA	Wärmepumpenanlage
WSA	Wasserstraßen- u. Schifffahrtsamt
WSchV	Wärmeschutzverordnung
WSV	Wasserstraßen- u. Schifffahrtsverwaltung
WW	Warmwasser
WÜ	Wärmeübertrager
ZWE	Zusätzlicher Wärmeerzeuger

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A_{W\ddot{U}}$	Wärmeübertragerfläche	m^2
B	Wärmeaustausch mit dem Boden	kW
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	Diffuse Himmelsstrahlung	kW
E	Effektive Ausstrahlung	kW
F_{ϑ}	Korrekturfaktor bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen	-
F_p	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wärmequellenpumpen	-
$F_{\Delta\vartheta}$	Korrekturfaktor für abweichende Temperaturdifferenzen bei Messung u. Betrieb am Verflüssiger der WP	-
HGT	Heizgradtage	$\text{K} \cdot \text{d}$
HGT_m	Langjähriges Mittel der Jahresheizgradtage	$\text{K} \cdot \text{d}/\text{a}$
Δh	Enthalpieänderung	kg/kJ
JAZ	Jahresarbeitszahl	-
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
L	Wärmeaustausch mit Luft	kW
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
n	Betrachteter Tag	d
p_{Gas}	Bezugskosten pro kWh Gas	$\text{€}/\text{kWh}$
p_{Strom}	Bezugskosten pro kWh Wärmepumpenstrom	$\text{€}/\text{kWh}$
$P_{\text{mtl.}}$	Monatliches Wärmepotenzial	kJ
\dot{Q}_{WP}	Heizleistung WP	kW
\dot{Q}_{th}	Wärmestrom	kW
Q	Durchfluss	m^3/s
Q_h	Jahreswärmebedarf	kWh/a
Q_{WB}	Wärmebedarf	kWh
Q_{RW}	Bereinigter Wärmebedarf für Raumwärme	kWh

Q_{VWW}	Wärmebedarf für Warmwasserbereitstellung	kWh
r_{Kosten}	Kostenverhältnis	-
S	Direkte Sonnenstrahlung	kW
T	Temperatur	°C
T_v	Reibungs- und Wärmeübertragungsverluste	°C
ΔT	Temperaturspreizung	K
ΔT_a	Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgermedium u. Flusswasser vor Wärmeentzug	K
ΔT_b	Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgermedium u. Flusswasser nach Wärmeentzug	K
ΔT_m	Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgermittel u. Gewässer	K
t_{heiz}	Heizstunden	h/a
t_{Monat}	Dauer des Monats	s
V	Verdunstungs- u. Kondensationswärme	kW
\dot{W}	Elektrische Antriebsleistung WP	kW
z	Tage des Betrachtungszeitraums	d

Griechische Buchstaben

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>	<u>Einheit</u>
ε	Leistungszahl der Wärmepumpe	-
η	Gütegrad der WP	-
$\eta_{\text{Gaskessel}}$	Wirkungsgrad des zusätzlichen Wärmeerzeugers	-
ϑ_g	Heizgrenze	°C
ϑ_m	Tagesmitteltemperatur	°C
$\vartheta_{m,n}$	Mittlere Außentemperatur des Tages n	°C
ϑ_u	Temperatur um u Uhr	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)
ρ	Dichte	kg/m ³
Φ_{HL}	Heizlast	kW

1 Einführung

Ein großer Teil der CO₂-Äq.-Emissionen entfällt in Deutschland auf die Wärmeversorgung im Gebäudesektor (BMW, 2015). Eine zukünftige klimaneutrale Wärmeversorgung ist an den Ausbau von Wärmepumpen (WP) gekoppelt (Günther et al., 2020). WP können hierbei eine CO₂-Äq.- Emissions-Reduktion von bis zu 50 % gegenüber einem Gasbrennwertgerät aufweisen (Bongs et al., 2022).

Der Endenergieverbrauch in Deutschland kann in die Bereiche Strom, Wärme und Verkehr unterschieden werden (Abbildung 1-1). So lassen sich mehr als 52 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland auf die Wärme- und Kälteversorgung zurückführen. Auf den Verkehr entfiel im Jahr 2021 rund 27 % des Endenergiebedarfs, und auf den Stromverbrauch etwa 21 %. Die gesamte Endenergiemenge setzt sich dabei aus dem Verbrauch an elektrischer Energie, thermischer Energie und Kraftstoffen zusammen. Insbesondere bei privaten Haushalten fällt der überwiegende Teil des Energiebedarfs bei der Bereitstellung von thermischer Energie in Form von RW und WW an (Loga, 2003). Die aufgewendete Energie für RW macht hierbei rund drei Viertel aus (UBA, 2022).

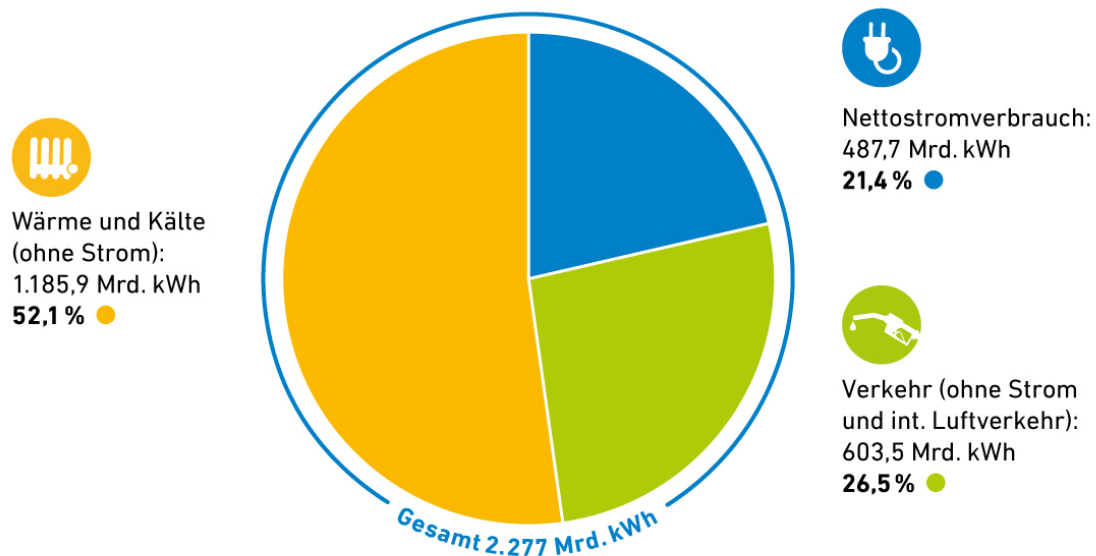


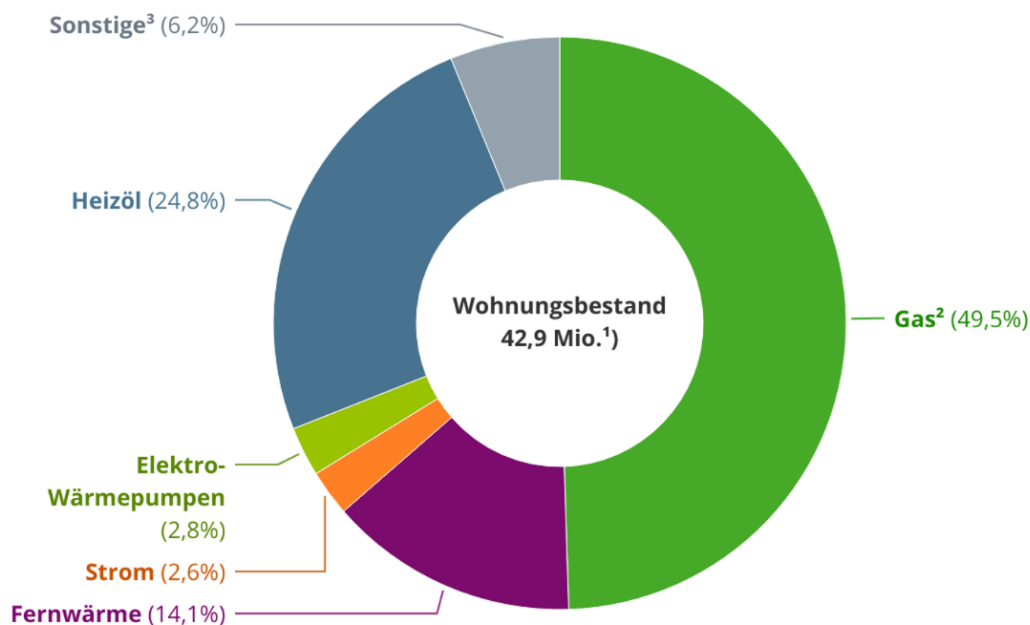
Abbildung 1-1: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Strom, Wärme und Verkehr (AEE, 2021)

Etwa 75 % der ca. 18 Mio. Wohngebäude in Deutschland wurden vor 1979 erbaut. Der Heizwärmebedarf dieser Wohngebäude liegt mit Durchschnitt bei ca. 180 kWh/(m²·a) über dem Bundesdurchschnitt von ca. 150 kWh/(m²·a) (Graichen et al., 2012). Zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele, die u.a. im Pariser Klimaabkommen und im European Green Deal formuliert sind, müssen die Treibhausgas-Emission im Gebäudesektor bis 2030 gegenüber 1990 um 68 % sinken (Günther et al., 2020). Der derzeitige Wärmepumpenbestand von rund 1 Mio. müsste in Deutschland auf zwischen 3,4 bis 8,1 Mio. im Jahr 2030 ansteigen, um eine Klimaneutralität nach Klimaschutzgesetz bis 2045 zu ermöglichen (BDEW, 2022).

Der Bundesverband Wärmepumpe geht in seinem Branchenreport aus dem Jahr 2021, selbst im optimistischen Szenario, von ca. 3 Mio. installierten WP im Jahr 2030 aus. Dies verdeutlicht die Diskrepanz zwischen dem für den Klimaschutz Notwendigen und dem unter heutigen Bedingungen Machbaren.

Die momentane Beheizstruktur des Wohnungsbestands in Deutschland mit einem Wärmepumpenanteil von ca. 3 % verdeutlicht, dass ein immenses Ausbaupotential vorliegt (Abbildung 1-2). Der Anteil von Gas an der Wärmeerzeugung in Deutschland im Jahr 2021 beträgt ca. 50 %. Damit ist Gas der am häufigsten verwendete Brennstoff für die Heizung des Wohnungsbestands in Deutschland.

Anteile der genutzten Energieträger in %



¹ Anzahl der Wohnungen in Gebäuden mit Wohnraum; Heizung vorhanden

² einschließlich Biomethan und Flüssiggas

³ Holz, Holzpellets, sonstige Biomasse, Koks/Kohle, sonstige Heizenergie

Abbildung 1-2: Beheizstruktur des Wohnungsbestands in Deutschland im Jahr 2021 (BDEW, 2022)

Der Einsatzbereich von WP, der sich im Neubau bereits etabliert hat, muss zur Erreichung der Klimaziele auch im Gebäudebestand ausgebaut werden (Graichen et al., 2012). Mit WP in Bestandsgebäuden sind verschiedene Herausforderungen verbunden. Allen voran drängt die Frage nach den realen Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizungsanlage und der damit verbundenen Effizienz der WP, aber auch die prinzipielle Einbindung der WP als lastflexibler Wärmeerzeuger (Jagnow, Wolff und Teuber, 2004). Mit dem im Februar 2022 beginnenden Angriffskriegs Russlands gegen die Ukraine beginnt eine völlig veränderte Energiebezugslage in Europa, und speziell in Deutschland. Sowohl Gas- und Heizöl-, als auch Strompreise sind seit Ende Februar 2022 stark gestiegen (Bongs et al., 2022). Diese Entwicklung verstärkt die Notwendigkeit der Transformation des Wärmesektors hin zur WP (Dötsch, Taschenberger und Schönberg, 2017)

Die Deckung des Bedarfs an RW und WW erfolgt zunehmend durch die Nutzung thermischer Energie aus regenerativen Quellen mithilfe von WP. Dabei wird die thermische Energie aus natürlichen Wärmequellen, wie bspw. der Luft, dem Erdreich oder Grundwasser entzogen und durch die WP auf das erforderliche Temperaturniveau zur Beheizung von Gebäuden angehoben. Oberflächengewässer stellen eine weitere regenerative Wärmequelle dar, welche bislang nur in geringem Maße zur Gewinnung thermischer Energie genutzt werden (Borchardt, 2018).

Fließgewässer eignen sich als Wärmequellen mit kontinuierlicher Verfügbarkeit und Regenerierbarkeit (Maniak, 2010). Die Nutzung von Fließgewässern als Wärmequelle ist jedoch abhängig von den hydrothermalen Rahmenbedingungen. Darunter fallen gewässerspezifische Parameter wie u.a. die Wassertemperatur, der Durchfluss und die Entfernung zwischen Gewässer und Nutzer (Borchardt, 2018). Außerdem muss die Nutzung des Fließgewässers rechtlichen Rahmenbedingungen erfüllen. Natürliche Fließgewässer unterliegen einem dynamischen Zustand mit zahlreichen Wechselwirkungen mit der Umwelt. Durch vielfältige Prozesse entlang des Fließweges werden dem Gewässer Feststoffe und chemische Bestandteile aus dem EZG zugeführt. Hierbei kann es zu Ablagerungen oder Verkrustungen an den Anlageteilen des Wärmeentnahmesystems kommen. Diese wirken sich auf die Flusswärmennutzung aus, da z.B. durch das sogenannte Fouling der Wärmeübertrag eingeschränkt wird (Baunach, 2020). Die Ablagerungen führen dazu, dass ein erhöhter Wärmedurchgangswiderstand der wärmeübertragenden Flächen auftritt (Schnell und Slipcević, 1990). Hieraus ergeben sich Leistungsverluste, welche aufgrund von erhöhten Reinigungs- und Wartungsarbeiten die Betriebskosten der Anlage erhöhen. Eine Bildung von Foulingschichten gilt es somit aus technischen und wirtschaftlichen zu vermeiden (Schnell und Slipcević, 1990).

Jüngste Projekte zeigen den Flusswärmepumpenausbau in Deutschland. Im Rahmen des Reallabors der Energiewende „Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) wurde in Mannheim die Installation einer von insgesamt fünf bundesweit geplanten Großwärmepumpen umgesetzt. Der Bau begann im April 2022. Diese Großwärmepumpe verfügt über eine thermische Leistung von ca. 20 MW. Sie soll thermische Energie für etwa 3.500 Haushalte liefern (MVV Energie, 2022).

Die vorliegende Masterarbeit soll als Hilfestellung für die Umsetzung der Flusswärmennutzung im Gebäudebestand dienen. Es werden verschiedene Varianten entwickelt und anschließend evaluiert, um die Machbarkeit für den Standort zu prüfen.

Zur besseren Lesbarkeit und Verständlichkeit der einzelnen Kapitel werden Redundanzen in dieser Arbeit bewusst in Kauf genommen.

2 Thermische Nutzung von Fließgewässern

Die wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern wird von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst. Der Wärmehaushalt im Gewässer spielt hinsichtlich der wärmeenergetischen Nutzung von Fließgewässern eine große Rolle (Maniak, 2010). Anhand von sogenannten Wärmeübertragern¹ (WÜ) erfolgt der Wärmeentzug aus Gewässern. Diese werden entweder direkt in das Fließgewässer eingebracht oder durch eine Flusswasserentnahme außerhalb des Gewässers betrieben (Gaudard, Schmid und Wüest, 2018). Dieses Kapitel beinhaltet Grundlagen zum Wärmehaushalt von Fließgewässern, Systemen zur Wärmeentnahme sowie Erläuterungen zum Aufbau und Funktionsprinzip von Flusswärmepumpenanlagen.

2.1 Wärmequelle Fließgewässer

Dem Wärmehaushalt von Fließgewässern kommt eine besondere Bedeutung für die Struktur und Funktion aquatischer Ökosysteme, einschließlich der Wasserqualität und den Lebensraumbedingungen der darin lebenden Organismen zu (Maniak, 2010). Die Temperaturen in Fließgewässern werden durch zahlreiche hydrometeorologische Prozesse beeinflusst (Abbildung 2-1) (Gaudard, Schmid und Wüest, 2018).

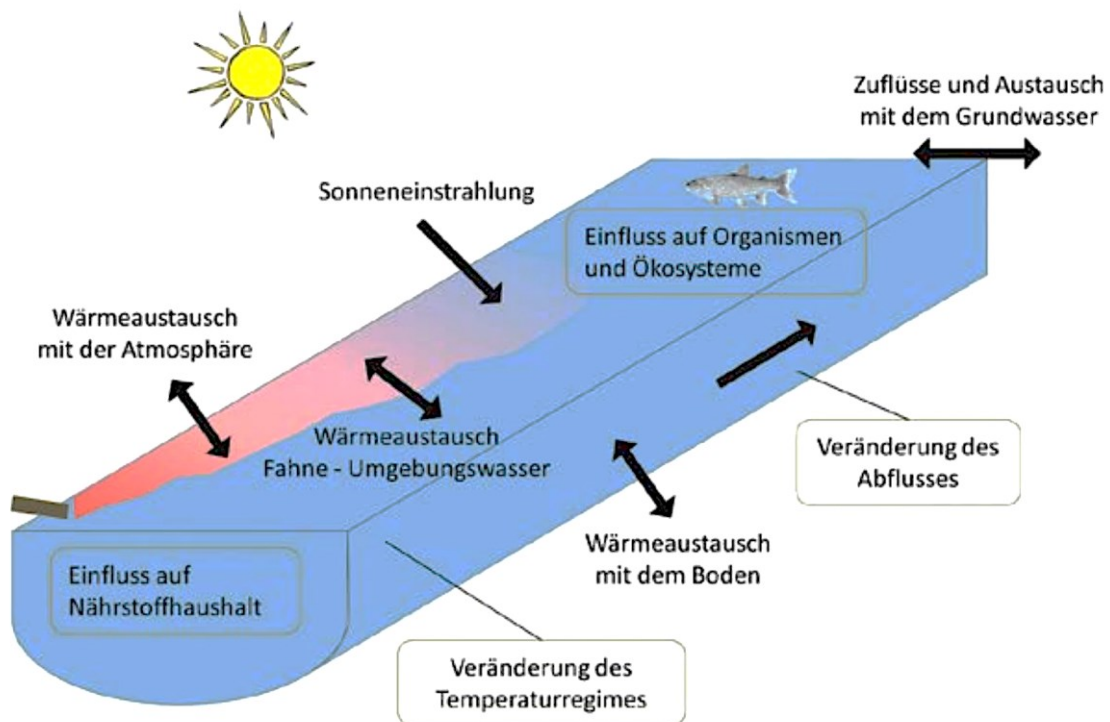


Abbildung 2-1: Übersicht über Wärmeenergieflüsse eines Fließgewässers (Pfeile) und möglichen Auswirkungen (eingehrahmt) mit thermischer Einleitung (rote Fahne) (Gaudard, Schmid und Wüest, 2018).

¹ Der Begriff „Wärmeüberträger“ wird oft als Synonym des Begriffs „Wärmetauschers“ verwendet. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik geht Wärme lediglich in eine Richtung von einem Medium höherer Temperatur auf ein Medium geringerer Temperatur über und wird nicht „getauscht“. Der Begriff „Wärmeüberträger“ ersetzt den Begriff Wärmetauscher (Gappisch (2020)).

Der Wärmehaushalt eines Fließgewässers setzt sich zusammen aus der Wärmeaufnahme, -verteilung und -abgabe (Maniak, 2010). Der Wärmeaustausch mit der Umgebung geschieht in Form von Sonneneinstrahlung mit der Atmosphäre, Grund- oder Quellwasser mit dem Boden oder durch Zu- und Abflüsse. Zwischen Wasser und Gewässerbett vollzieht sich der Austausch, verglichen zu dem von Wasser und Atmosphäre, langsamer (Schwoerbel und Brendelberger, 2022).

Die Wassertemperatur eines Gewässers ist örtlich und zeitlich dynamisch. Je länger das Fließgewässer fließt, desto mehr nimmt es an Wärme aus der Umgebung auf, sodass die Wassertemperaturen entlang des Fließweges ansteigen (Maniak, 2010). Innerhalb eines Gewässerquerschnitts ist der Temperaturverlauf nicht konstant (Maniak, 2010). An der Oberfläche haben Verdunstung und Lufttemperatur einen größeren Einfluss, an Ufern und der Sohle hingegen spielt der Wärmeaustausch mit dem Erdreich eine größere Rolle. Zusätzlich kann ein Wärmeeintrag bzw. -entzug durch Versickerung, den Zufluss von Grundwasser, Einleitungen von Abwässern oder durch Niederschläge auf das Gewässer erfolgen (Kammer, 2018). Der Wärmeeintrag durch Niederschlag und die Wärmeabgabe an das Gewässerbett sind hierbei vergleichsweise gering (Caissie, 2006). Die beschriebenen Einflussfaktoren auf die Temperaturänderungen eines Fließgewässers sind in Abbildung 2-2 zusammengefasst dargestellt:

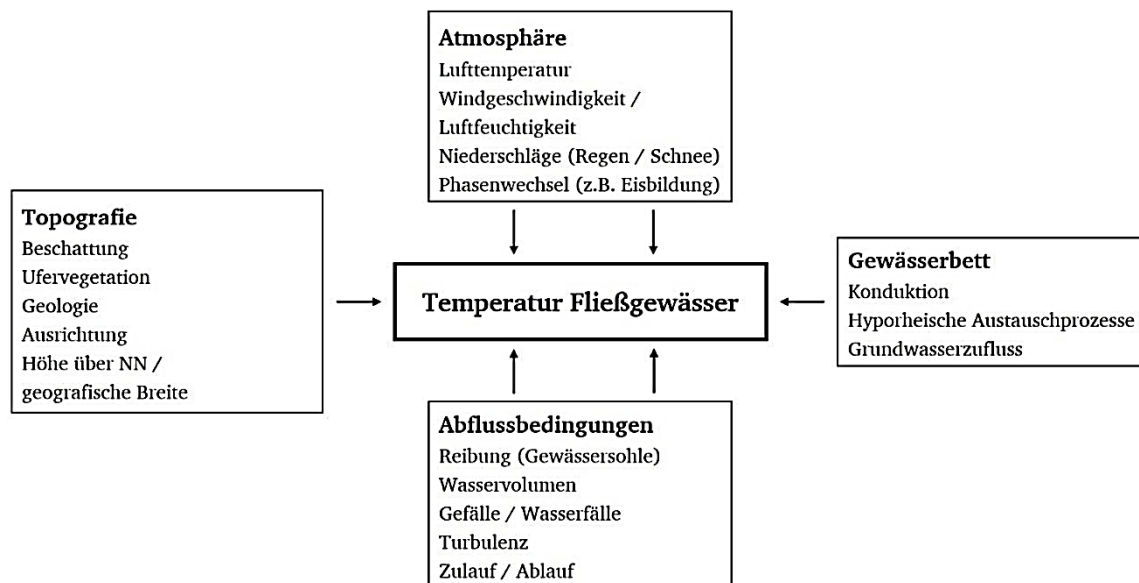


Abbildung 2-2: Einflussfaktoren auf die Wassertemperatur von Fließgewässern (Caissie, 2006).

Wasser besitzt eine hohe spezifische Wärmekapazität von $c_{p,Wasser} = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ bei 15°C und hat deswegen ein erhebliches Potenzial zur Speicherung von Wärmeenergie. Luft hat im Vergleich eine niedrigere Kapazität von $c_{p,Luft} = 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Die spezifische Wärmekapazität beschreibt die erforderliche Wärmemenge, um 1 kg des Mediums um 1°C bzw. 1K zu erwärmen (Schwoerbel und Brendelberger, 2022). Sollen 10 kg Wasser von 15°C auf 100°C erwärmt werden, so benötigt man $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 85 \cdot 10\text{kg} = 3560 \text{ kJ}$. Dies entspricht in etwa einer Kilowattstunde (kWh), da $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$ entspricht (Caissie, 2006).

Fließgewässer verfügen über ein Ausgleichsvermögen bzgl. tages- und jahreszeitlicher Temperaturschwankungen und bieten ausgewogene Lebensraumbedingungen für die darin lebenden Organismen (Caissie, 2006). Für den Wärmehaushalt von Fließgewässern ist, neben der hohen spezifischen Wärmekapazität, die geringe Wärmeleitfähigkeit von Wasser bedeutend. Sie beschreibt das Vermögen, thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser beträgt $\lambda_{\text{Wasser},25^\circ\text{C}} = 0,60 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei 20°C (Langeheinecke, 2017). Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit läuft der Wärmetransport in Wasser überwiegend konvektiv ab (Hofmann, 2017). Der Transport erfolgt somit fast ausschließlich über Wasserbewegungen und vernachlässigbar über molekularen Wärmetransport oder Wärmestrahlung über elektromagnetische Wellen. Diese Eigenschaft muss bei der Wärmeübertragung auf einen WÜ beachtet werden (Maniak, 2010).

Zur Ermittlung des Wärmepotenzials eines Fließgewässers können zwei Gleichungen herangezogen werden. Der Wärmehaushalt kann als i) Energiestrom oder ii) in Form der Temperaturänderung $\Delta T/\Delta t$ beschrieben werden (Maniak, 2010).

i) Ein Fließgewässer stellt einen Energiestrom, bestehend aus mechanischer und thermischer Energie, dar. Der Wärmestrom (thermische Energie) wird in W bzw. kW ausgedrückt (Maniak, 2010). Unter der Annahme einer völligen Durchmischung, keiner von außen zugeführten Wärmeströme, eines gleichförmigen Abflusses und einer Vernachlässigung des Wärmeaustauschs mit der Gewässersohle, lässt sich der Wärmestrom für Fließgewässer mithilfe des Massenstroms $\dot{m} = \rho \cdot Q$ und der Enthalpieänderung $\Delta h = c_p \cdot \Delta T$ aus der Literatur wie folgt herleiten (Maniak, 2010):

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m} \cdot \Delta h = \rho \cdot Q \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

\dot{m} : Massenstrom $[\frac{\text{kg}}{\text{s}}]$

Δh : Enthalpieänderung $[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$

\dot{Q}_{th} : Wärmestrom Fließgewässer $[\text{kW} \text{ bzw. } \frac{\text{kJ}}{\text{s}}]$

Q : Durchfluss $[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$

ρ : Dichte Wasser $[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]$

ΔT : Temperaturspreizung $[\text{K}]$

c_p : spezifische Wärmekapazität von Wasser $[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}]$

Die Enthalpie gibt die Gesamtenergie eines physikalischen Systems unter Berücksichtigung von Druck, Volumen und Temperatur an (Maniak, 2010). Während die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p als konstant angenommen werden können, sind der Abfluss und die Temperaturspreizung² veränderlich und daher maßgebend für die thermische Leistung eines Fließgewässers. Die maximal tolerierbare Temperaturspreizung wird nach der Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV) abhängig von der Fischgemeinschaft festgelegt. Bei cyprinidengeprägten Gewässern beträgt die maximale Temperaturerhöhung $\Delta T_{max} \leq 2\text{K}$ (OGewV, 2016).

² Die Temperaturspreizung, auch als Grädigkeit bezeichnet, gibt die Temperaturdifferenz unmittelbar vor und nach dem Wärmeentzug aus dem Fließgewässer, also die Temperaturdifferenz zwischen einem wärmeabgebenden, wärmeren Medium und einem wärmeaufnehmenden, kälteren Medium an Maniak (2010).

Die Umrechnung von Leistung [kW] in das monatliche wärmeenergetische Potenzial [kJ] ergibt sich durch die Multiplikation mit der betrachteten Zeitspanne bspw. monatlich mit t_{Monat} [s] für die Dauer des betrachteten Monats. Daraus ergibt sich folgende Gleichung für das monatliche Wärmepotenzial $P_{\text{mtl.}}$ eines Fließgewässers nach (Gaudard, Schmid und Wüest, 2018) mit:

$$P_{\text{mtl.}} = \rho \cdot c \cdot Q \cdot \Delta T \cdot t_{\text{Monat}} \quad (2.2)$$

$P_{\text{mtl.}}$: Monatliches Wärmepotenzial [kJ]

t_{Monat} : Dauer des Monats [s]

ii) Wie in i) beschrieben ist der Wärmehaushalt von den Eigenschaften des Fließgewässers beeinflusst (Dichte, spezifische Wärmekapazität, Abfluss, Temperaturänderungen). Andererseits spielen die Faktoren des Wärmeaustauschs mit der Umgebung (Atmosphäre und Untergrund) eine Rolle (Schwoerbel und Brendelberger, 2022). Hierbei kann ii) aus i) hergeleitet werden:

Aus Gleichung (2.1) erhält man für einen Zeitschritt von Δt die Zunahme der Wärmeleistung im Bilanzvolumen V mit:

$$P = \rho \cdot c \cdot V \cdot \Delta T / \Delta t \quad (2.3)$$

P : Wärmeleistung in kW; gleicht dem über die Oberfläche ausgetauschten Wärmeströmen infolge Strahlung, Verdunstung, Konvektion, und Zuleitungen;

Das Bilanzvolumen V wird als Produkt von Oberfläche und Gewässertiefe bei Fließgewässern definiert.

Wird Gleichung 2.3. nach $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ umgestellt, so ergibt sich:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{\rho \cdot c \cdot V} \quad (2.4)$$

In der Wärmebilanz eines Fließgewässerabschnittes ist die aus dem Bilanzgebiet pro Zeiteinheit austretende Wärmemenge gleich der eintretenden Wärmemenge zuzüglich der Zunahme der Wärmemenge innerhalb des Bilanzvolumens während dieser Zeitspanne. Der Wärmege-
winn bzw. -verlust, der innerhalb des Bilanzgebietes durch biologische Abbauprozesse, Gefrieren oder Schmelzen von Eis oder Turbulenz auftritt, wird im Folgenden vernachlässigt (Schwoerbel und Brendelberger, 2022). Gleichung 2.5 beinhaltet die Wärmezufuhr oder -abgabe durch kurz- und langwellige Strahlung, Verdunstung, Konvektion, Wärmeübergang von oder zur Gewässersohle, Grundwasserzufluss, Versickerung, Niederschläge auf das Gewässer, z. B. als Schnee, sowie durch Wassereinleitung von bspw. Kühlwasser.

$$P = S + D - E \mp V \mp L \mp B \quad (2.5)$$

S : Direkte Sonnenstrahlung [kW]

D : Diffuse Himmelsstrahlung [kW]

E : Effektive Ausstrahlung [kW]

V : Verdunstungs- u. Kondensationswärme [kW]

L : Wärmeaustausch mit Luft [kW]

B : Wärmeaustausch mit dem Boden [kW]

Gleichung 2.5 wird in 2.4. eingesetzt und es ergibt sich:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot V} \cdot (S + D - E \mp V \mp L \mp B) \quad (2.6)$$

Die Temperaturschwankungen pro Tag sind im Fließgewässer in den Sommermonaten umso größer, je geringer die Quelltemperaturen im Vergleich zur Lufttemperatur sind und je geringer der Abfluss ist. Ein Wasserkörper, der mit geringer Temperatur an die Oberfläche tritt, wird sich bei hoher Umgebungstemperatur umso stärker erwärmen, je geringer die Wassertiefe ist. Die tagsüber aufgenommene Wärmemenge wird nachts nicht wieder in Gänze abgegeben (abhängig von der Geometrie des Wasserkörpers und seinem Volumen). Quellabwärts nimmt im Sommer das bewegte Wasser im Tagesmittel Wärme auf (Bellack et al., 2008). Mit einer Wärmezunahme gehen tagesperiodische Temperaturschwankungen einher (Abbildung 2-3).

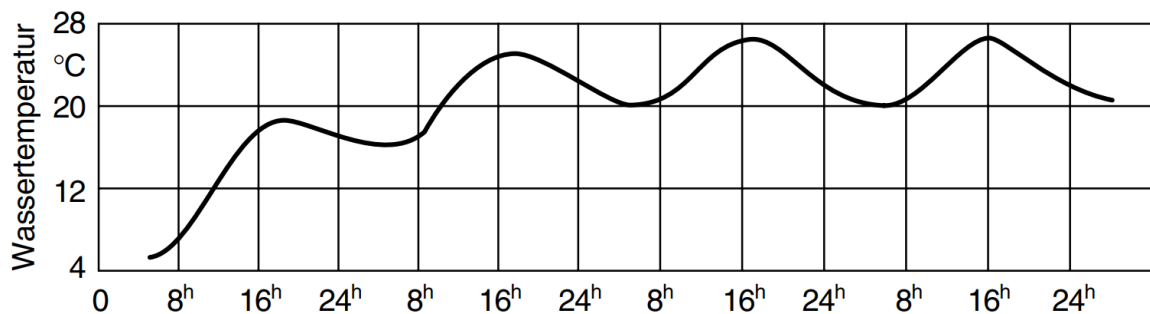


Abbildung 2-3: Tageszeitliche Temperaturänderungen mit der fließenden Welle eines Fließgewässers innerhalb von vier Tagen (Schwoerbel und Brendelberger, 2022).

Im Winter verliert der Wasserkörper Wärme an die Umgebung. Erst wenn sich die Quelltemperaturen nicht mehr auswirken, tritt eine ausgeglichene Wärmebilanz ein. Die Quelltemperaturen bzw. Grundwassertemperaturen entsprechen etwa der mittleren Lufttemperatur im Jahr. Mit zunehmender geographischer Breite und Höhe nehmen die Quelltemperaturen sowie die Jahresamplituden der Temperatur ab (Schwoerbel und Brendelberger, 2022).

2.2 Funktionsprinzip einer Wärmepumpe

Um WP zur Bereitstellung von Heizwärme und WW nutzen zu können, ist die Verfügbarkeit von Wärmequellen entscheidend. Abbildung 2-4 gibt einen Überblick über die Verfügbarkeit und Effizienz unterschiedlicher Wärmequellen (Luft, Erdwärme, Grundwasser, Oberflächengewässer, Solarthermie, Abwärme).

Es wird deutlich, dass mit zunehmender Verfügbarkeit der Wärmequelle, die Effizienz des Wärmepumpensystems abnimmt. Im Vergleich zu anderen Quellen steht Luft als Umweltwärmequelle am häufigsten zur Verfügung. Sie ist am einfachsten zu erschließen, weist aber im Jahresmittel vergleichbar niedrige Temperaturen auf. Das Medium Luft hat zudem eine niedrige Wärmespeicherkapazität (vgl. Kapitel 2.1).

Das Wärmepumpensystem leistet den höchsten Temperaturhub³ und zeigt demnach die geringste Effizienz (Bongs et al., 2022).

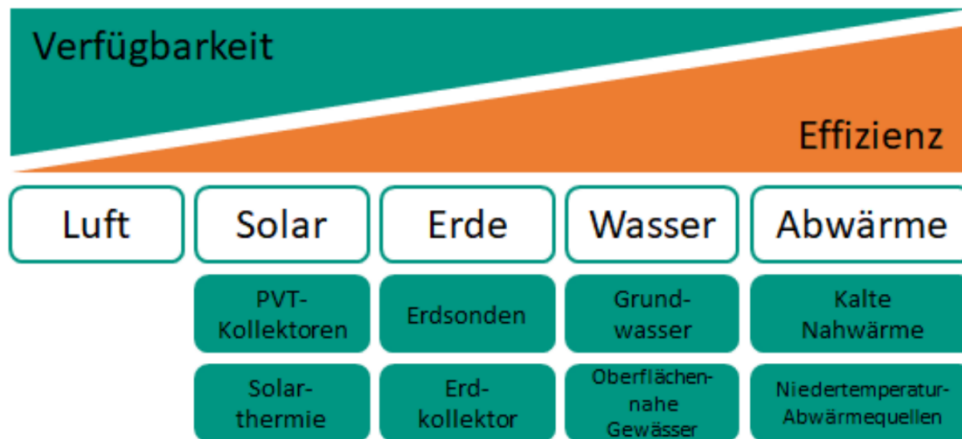


Abbildung 2-4: Vergleich von lokaler Verfügbarkeit und Effizienz unterschiedlicher Quellenarten (Bongs et al., 2022)

Die Einsatzfähigkeit von Fließgewässern zur wärmeenergetischen Nutzung ist durch verschiedene physikalische Faktoren beschränkt (vgl. Kapitel 2.1). Die Wassertemperatur ist abhängig von der Lufttemperatur und unterliegt damit jahreszeitlichen Schwankungen. Bei niedrigen Gewässertemperaturen arbeiten WP weniger effizient (Kirn, 1983). Zudem besteht im Winter die Gefahr von Vereisungen im Gewässer, was sich negativ auf die Funktionsfähigkeit des Wärmepumpensystems auswirkt (Borchardt, 2018).

Eine WPA besteht aus drei Komponenten (Abbildung 2-5); der Wärmequellenanlage, der WP, sowie dem Wärmeverteils- und Speichersystem. Im ersten Schritt gewährleistet die Wärmequellenanlage, dass die Umweltwärme (z.B. aus einem Fließgewässer) über einen WÜ oder Entnahmerohre aufgenommen und zur WP transportiert wird (Cube, 1978).

Die Wärme wird in Schritt 2 von der Wärmequellenanlage zur WP geführt und an ein sich in der WP zirkulierendes Kältemittel übertragen, welches sich im Verdampfer der WP befindet. Das Kältemittel in der WP beginnt beim Wärmeübertrag durch das Umweltmedium zu sieden. Der dabei entstehende Dampf des evaporierten Kältemittels wird zu einem Verdichter weitergeleitet. Im Verdichter findet anschließend eine Kompression statt. Hierdurch erhöht sich die Temperatur und der Druck des gasförmigen Kältemittels. Im sogenannten Verflüssiger findet die isobare Abkühlung und Kondensation statt, d.h. die entstandene Wärme wird nun kondensiert an den Heizkreislauf weitergegeben. Nachfolgend wird das nun wieder flüssige Kältemittel zu einer Drossel, dem Verflüssiger, in welchem der Druck des Kältemittels wieder verringert wird, geleitet. Das flüssige, entspannte Kältemittel wird schließlich zum Verdampfer zurückgeführt und der Kreislauf beginnt von Neuem (Cube, 1978).

³ Der Temperaturhub ist die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke. Je größer der Temperaturhub ausfällt, desto mehr Antriebsenergie benötigt die WP in Form von Strom (Schröder-Schulze et al. (1997).

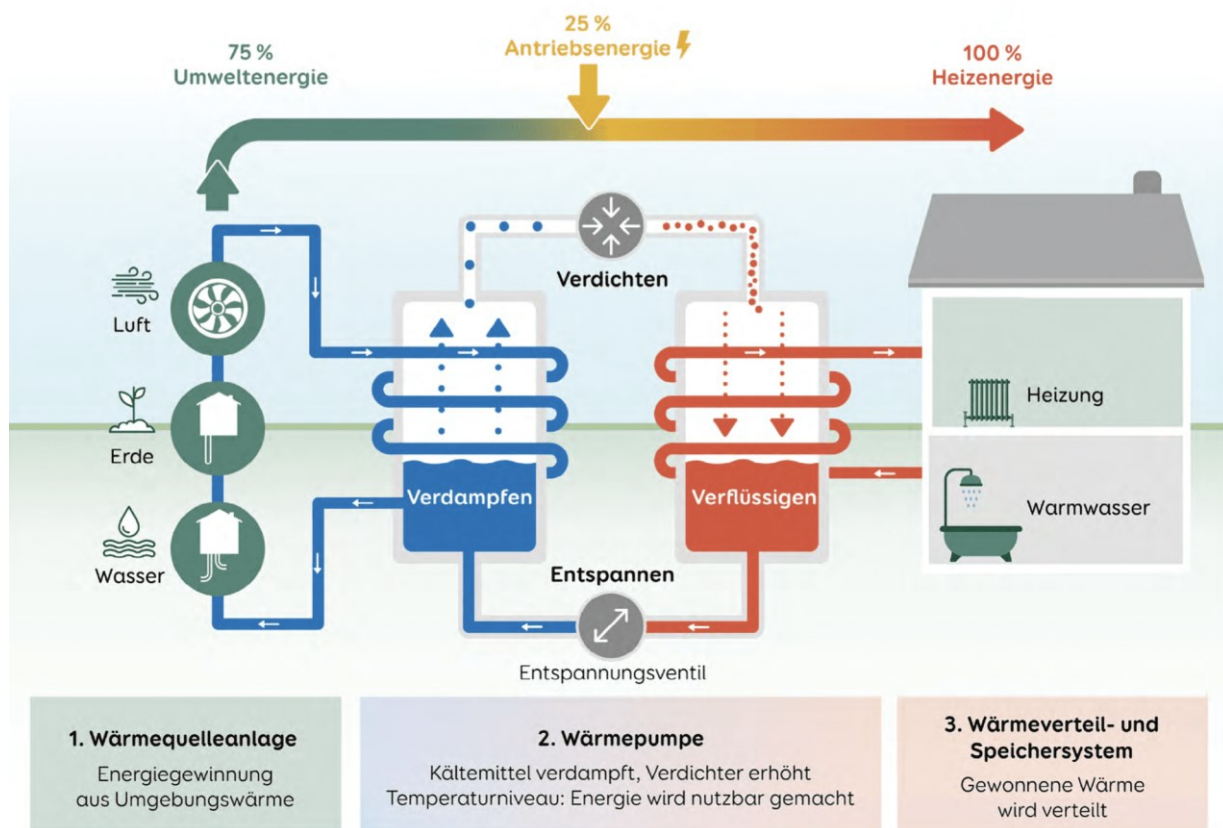


Abbildung 2-5: Funktionsprinzip WP (BDEW, 2022)

Die entstandene Wärme in der WP wird in Schritt 3 auf das Wärmeverteil- und Speichersystem, welches sich in dem zu beheizenden Gebäude befindet, übertragen. In diesem Wärmeverteilssystem zirkuliert in der Regel Wasser als Heizmedium. Es nimmt die Wärme, die das Kältemittel im Verflüssiger abgibt, auf und leitet dieses bspw. zu Flächenheizungen, HK, oder zu einem Heizungspuffer- bzw. Warmwasserspeicher (BDEW, 2022).

Bei niedriger Vor- und Rücklauftemperatur arbeitet die WP besonders energieeffizient, d.h. mit möglichst hoher JAZ. Die Vorlauftemperatur bezeichnet die Temperatur, die dem Wärmeverteilssystem von der WP zugeführt werden muss, um eine gewisse Rauminnentemperatur zu erreichen. Hierbei benötigen Flächenheizungen, im Genauen Fußboden- oder Wandheizungen, wesentlich geringere Vorlauftemperaturen als Radiatoren oder Konvektoren. Den größten Einfluss auf die benötigte Vorlauftemperatur hat die Fläche und das Alter der bestehenden Radiatoren (Miara, 2022).

Um auch in Wintermonaten eine Deckung des Wärmebedarfs von Gebäuden mit einer WP zu erreichen, ist eine ausreichend große Dimensionierung erforderlich. So kann auch während Temperaturspitzen gewährleistet werden, dass das Gebäude ausreichend beheizt wird. Dies hat unter Umständen eine Überdimensionierung der WP zur Folge, die dazu führen kann, dass die WP nicht die Effizienz erreicht, um im Kontrast zu Heizsystemen mit fossilen Brennstoffen wirtschaftlich zu sein (Günther et al., 2020). Angesichts dieser Problematik werden in der Praxis verschiedene Betriebsarten der Heizwärmeerzeugung genutzt (Abbildung 2-6). In Abbildung 2-6 werden diese Betriebsarten abgebildet.

In allen 4 Bildern der Abbildung 2-6 ist auf der Abszisse die Außentemperatur in °C und auf der Ordinate der Wärmebedarf in Prozent angegeben.

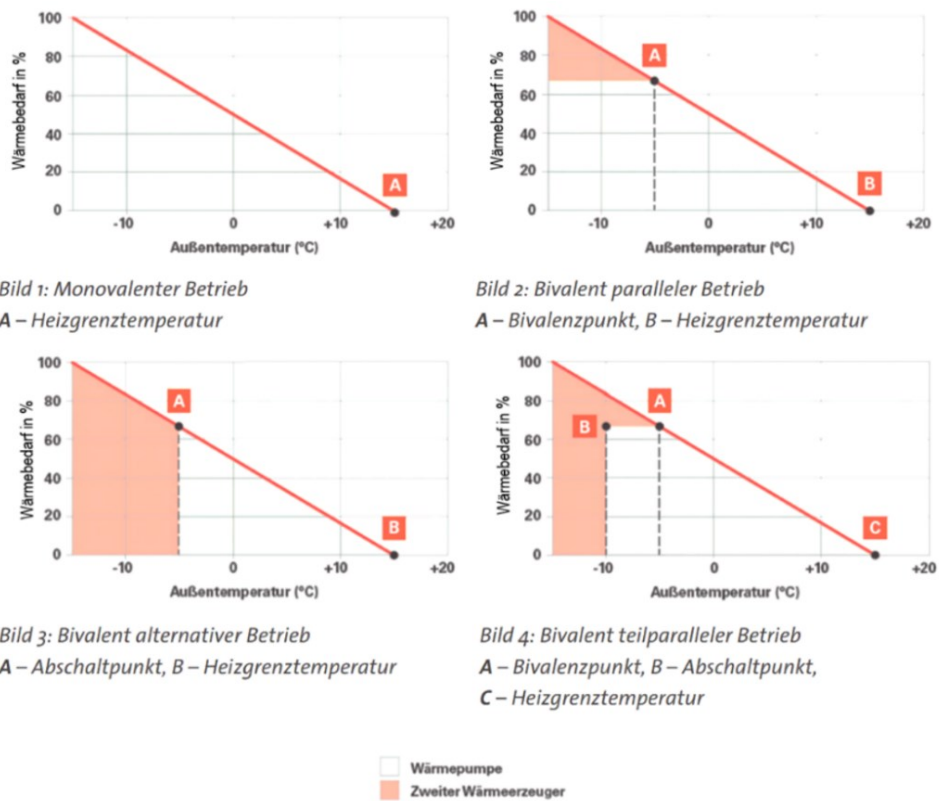


Abbildung 2-6: Darstellung der Betriebsarten für die Wärmeerzeugung (BDH, 2014)

Auf Bild 1 von Abbildung 2-6 ist der monovalente Betrieb dargestellt. Hierbei stellt die WP (weiß) ausschließlich die Wärmeerzeugung bereit. Auf Bild 2 deckt die WP im bivalenten System mit einem fossilen ZWE (Öl, Gas etc.) oder einer elektrischen Zusatzheizung (Heizstab) den Bedarf. Wenn als ZWE ein Heizstab genutzt, so wird dies als monoenergetischer Betrieb bezeichnet. Alle Betriebsweisen mit einem fossilen ZWE sind auch mit einem Heizstab möglich (BDH, 2014).

Beim bivalent parallelen Betrieb (Bild 2) erfolgt unterhalb des Bivalenzpunktes⁴ die Wärmebereitstellung ausschließlich über die WP. Oberhalb des Bivalenzpunktes wird der ZWE betrieben. Dies sind besonders die Tage im Jahr, welche besonders niedrige Außentemperaturen aufweisen (BDH, 2014).

Der bivalent alternative Betrieb (Bild 3) ist dadurch gekennzeichnet, dass unterhalb der Außentemperatur, bei der der Abschaltpunkt erreicht wird, der ZWE die Heizlast⁵ deckt. Der Abschaltpunkt beschreibt den Betriebspunkt im teilparallelen oder alternativen Betrieb, an

⁴ Der Bivalenzpunkt beschreibt den Betriebspunkt, an dem die Heizleistung der WP und der Wärmebedarf des Gebäudes übereinstimmen (VDI 4650).

⁵ Die Heizlast beschreibt die Wärme, die zur Verfügung gestellt werden muss, um ein Gebäude oder einen Raum auf eine gewünschte Rauminnentemperatur aufzuheizen. Während die Heizlast angibt wieviel Leistung vom Wärmeerzeuger benötigt wird, gibt der Wärmebedarf an, welche Energiemenge über den Zeitraum eines Tages, Monats oder Jahres bereitgestellt werden muss Miara (2022).

dem die WP abschaltet. Oberhalb dieser Außentemperatur erzeugt die WP die Wärme (BDH, 2014). Der Bivalenzpunkt unterscheidet sich zum Abschaltpunkt darin, dass es sich beim Bivalenzpunkt um den Punkt handelt, ab dem der Einsatz des ZWE benötigt wird, um die Heizlast zu decken. Der Abschaltpunkt ist dann erreicht, wenn bei Unterschreitung einer definierten Gewässertemperatur kein Wärmepumpenbetrieb mehr möglich ist (z.B. Vereisungen).

Beim bivalent-teilparallelen Betrieb (Bild 4) erfolgt unterhalb des Bivalenzpunktes die Wärmebereitstellung ausschließlich über die WP. Unterschreiten die Außentemperaturen die maximal zulässige Außentemperatur für den Betrieb, übernimmt der ZWE. Zwischen dem Bivalenzpunkt und dem Abschaltpunkt sind die WP und die ZWE gleichzeitig in Betrieb.

Generell ist nach VDI 4650-1, festzustellen, dass bei gleichen Leistungsanteilen der WP der Deckungsanteil der WP am Gesamtwärmebedarf beim bivalent parallelen Betrieb deutlich höher ist als dies beim alternativen und teilparallelen Betrieb der Fall ist. Dies liegt daran, dass die Bedarfsspitzen, die ab der Überschreitung einer gewissen prozentualen Grundlast vom ZWE gedeckt werden, zwar höhere Leistung benötigen, dies aber über wesentlich geringen Zeitraum, als die Deckung des Gesamlast bei Unterschreitung einer Gewässertemperatur. Für eine Maximierung des hydrothermalen Deckungsanteils ist also eine möglichst geringe Gewässertemperatur zu wählen, bei der ein Wärmepumpenbetrieb immer noch gewährleistet und technisch umsetzbar ist. Die bivalenten Wärmepumpensysteme weisen im Gebäudebestand durch die Nutzung eines bereits installiertem ZWE gegenüber dem monovalenten System geringere Investitionskosten auf. Außerdem ist das bivalente System flexibler einsetzbar als ein monovalentes, da bei Unterschreitung von niedrigen Gewässertemperaturen der ZWE den gesamten Bedarf decken kann. Vor allem bei älteren Gebäuden im Bestand mit hohem spezifischen Wärmebedarf kann ein bivalentes Heizsystem sinnvoll sein (Bongs et al., 2022). Für Neubauten werden in der Praxis nahezu ausschließlich monovalente Systeme genutzt, da sowohl die Grundlast als auch die Lastspitzen wesentlich geringer ausfallen.

Die Wärme, die eine Wärmepumpe nutzbar macht, bezeichnet die Summe aus Umweltwärme und Antriebswärme (Abbildung 2-7). Abbildung 2-7 zeigt vereinfacht das Grundprinzip einer WP. Die Effizienz der WPA kann quantitativ mit der Leistungszahl ε [-], engl. COP, bestimmt werden.

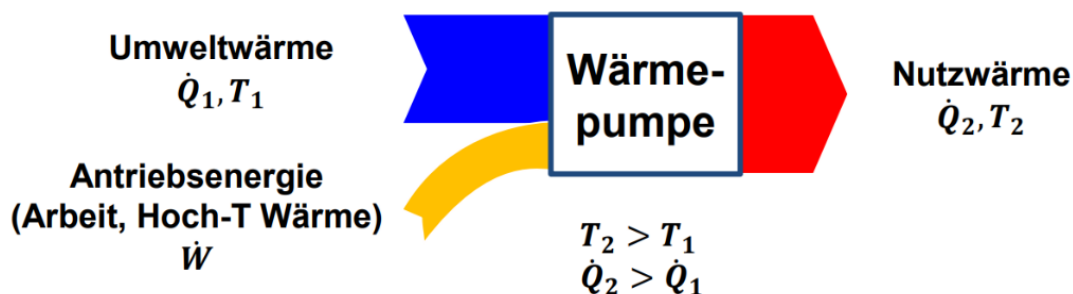


Abbildung 2-7: Grundprinzip der WP (Sass, 2016)

Der COP beschreibt das Verhältnis zwischen der thermischen Heizleistung zur benötigten elektrischen Antriebsleistung der WP (Sobotta, 2018):

$$\varepsilon = COP = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{W}} \quad (2.7)$$

\dot{Q}_2 : Thermische Heizleistung WP in kW

\dot{W} : Elektrische Antriebsleistung WP in kW

Der Wärmepumpenkreislauf kann durch einen linkslaufenden Carnot-Prozess beschrieben werden, indem Arbeit in Wärme umgewandelt wird (Sobotta, 2018).

$$\varepsilon = COP = \eta \cdot \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (2.8)$$

T_1 : Gewässertemperatur [°C]

T_2 : Vorlauftemperatur [°C]

η : Gütegrad der WP [-]

Der Gütegrad η ist abhängig vom genutzten Umweltmedium und liegt in der Praxis bei Flusswasser zwischen 40 und 50 % (Sass, 2016). Je höher T_1 und je niedriger T_2 , also je kleiner der Temperaturhub, desto größer der COP.

Die sogenannte JAZ ist das Verhältnis zwischen Nutzenergie zu Antriebsenergie und berechnet sich nach VDI 4650-1 wie folgt:

$$JAZ = \frac{Q_2}{W} = \frac{COP \cdot F_{\Delta\theta} \cdot F_{\vartheta}}{F_P} \quad (2.9)$$

$F_{\Delta\theta}$: Korrekturfaktor für abweichende Temperaturdifferenzen bei Messung und Betrieb am Verflüssiger der WP [-]

F_{ϑ} : Korrekturfaktor bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen [-]

F_P : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wärmequellenpumpen [-]

Die Korrekturfaktoren werden nach DIN 4650 tabellarisch bestimmt, abhängig von den Temperaturdifferenzen während der Prüfstandmessung und der maximalen Vorlauftemperatur der Heizung. Durch die zeitliche Variabilität des COP hat dieser eine geringere Aussagekraft für Gesamtsysteme als die JAZ. Die JAZ berücksichtigt stattdessen die Energiemengen in einem Referenzzeitraum. Die JAZ entscheidet über den primärenergetischen Nutzen einer WP (Baumann, Laue und Müller, 2010). In Abbildung 2-5 wird aus 75 % Umweltenergie und 25 % Antriebsenergie 100 % Heizenergie erzeugt. Das entspricht einer JAZ von 4. Das bedeutet, dass aus 1 kWh Strom und 3 kWh Umweltenergie 4 kWh Heizenergie entstehen. Beim Betrieb von WP gewähren Energieversorger vergünstigte WP-Stromtarife, wobei der Tarif oft verbunden mit Sperrzeiten zur Vermeidung von Lastspitzen ist (Sass, 2016). Die Sperrzeit unterbricht die Stromzufuhr zum günstigen Wärmepumpentarif maximal 3 mal 2h täglich. Im ungünstigsten Fall kann zum günstigeren Tarif also ausschließlich 18h das entsprechende Gebäude mit Wärme versorgt werden. Eine sichere Wärmebereitstellung während der Sperrzeiten wird durch Pufferspeicher gewährleistet.

2.3 Systeme zur Wärmeentnahme

Um die Wärme eines Umweltmediums an eine WP übertragen zu können, um damit ein Gebäude heizen zu können, ist eine Wärmeentnahme nötig. Die thermische Nutzung von Fließgewässern kann durch offene und geschlossene Wärmeentnahmesysteme bereitgestellt werden. Offene Systeme sind den offenen Brunnensystemen, welche in der Grundwassernutzung eingesetzt werden, ähnlich (Kammer, 2018). Das Wasser wird dem Fließgewässer durch ein Entnahmerohr entnommen und durch ein Rückgaberohr in das Gewässer zurückgegeben. Das Flusswasser kann wie in Abbildung 2-8 skizziert über das Entnahmerohr zu einem Zwischenwärmeübertrager geleitet werden. Die Wärme des Flusswassers wird auf den Kältemittelkreislauf des WÜ übertragen. Dieser Kältemittelkreislauf gibt die Wärme folgend an den Kältemittelkreislauf der WP weiter (Kammer, 2018).

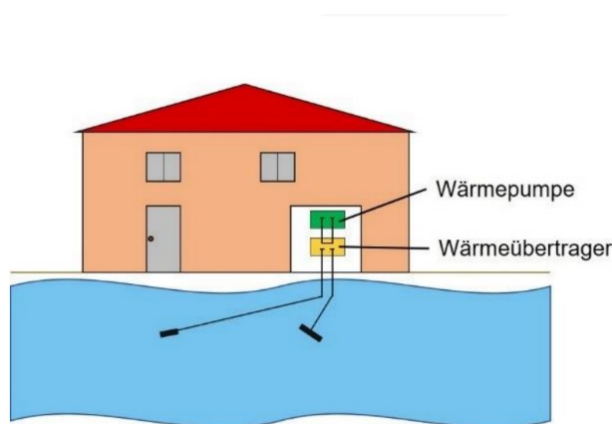


Abbildung 2-8: Wärmequellenanlage im offenen System (Baunach, 2020)

Der Zwischenwärmeübertrager verhindert, dass das Flusswasser unmittelbar zur WP gelangt und dort zu Ablagerungen bzw. technischen Problemen führt (Kammer, 2018). In der Regel ist vor dem Entnahmerohr ein Filter installiert, der grobe Schmutzpartikeln oder Sedimente zurückhält. In regelmäßigen Abständen müssen dieser Filter und die gesamte Entnahmeleitung kontrolliert und ggf. gereinigt werden, um einen Leistungsabfall der Wasserfördermenge durch Ablagerungen zu verhindern (Kammer, 2018). Für die Wasserförderung zum WÜ können Umwälzpumpen montiert werden. Hierbei sollte die Pumpe möglichst über der Gewässeroberkante installiert werden, da sich der Zugang bei Wartungsarbeiten leichter gestaltet. Für die Entnahmerohre werden Materialien, wie z.B. Stahl oder Kunststoff eingesetzt. Am häufigsten kommen Polyethylenrohre (HDPE-Rohre) zum Einsatz (Kammer, 2018). Die Vorteile von HDPE sind die chemische Neutralität, die guten Befestigungsmöglichkeiten, die Flexibilität und Stabilität. Die Schwimmfähigkeit auf dem Wasser erleichtert außerdem die Installation der Leitung. Zusätzlich verfügt das Material über einen großen Wärmeleitungs-widerstand im Vergleich zum Stahlrohr, sodass das Wasser vor Abkühlung geschützt wird, wenn geringere Außentemperaturen als Gewässertemperaturen vorliegen. Stahl hat als Material den Vorteil, dass es gegenüber Wasser eine höhere Beständigkeit als Kunststoff vorweist und nicht zersetzt werden kann. Bei der Installation des Rückgaberohrs sollte der Abstand zum Entnahmerohr groß genug sein, um hydraulische Kurzschlüsse im Wasser zu verhindern. Mit numerischen Modellen kann das hydrodynamische Verhalten des Rückgabewassers im Gewässer

simuliert werden. Ziel ist es, dass sich das Rückgabewasser schnell mit dem Umgebungswasser vermischt, um Vereisungen zu vermeiden (Kammer, 2018).

Die erforderliche Förderrate für ein offenes System kann anhand der allgemeingültigen Formel zur Ermittlung der Wärmeleistung (vgl. Kapitel 2.1) ermittelt werden:

$$\dot{Q}_{th} = \rho \cdot c \cdot Q \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

Umgestellt nach dem Durchfluss lautet die Förderrate:

$$Q = \frac{\dot{Q}_{th}}{\rho \cdot c \cdot \Delta T} \quad (2.11)$$

Q : Förderrate [$\frac{m^3}{s}$]

Q_{WB} : Wärmebedarf [kWh]

ΔT : Temperaturspreizung [K]

Je näher das entnommene Flusswasser bei offenen Systemen dem Gefrierpunkt, desto höher ist das Risiko der Vereisung nach Wärmeabgabe im Rückgaberohr (Kammer, 2018). Durch den Wärmeentzug am WÜ kühlt sich das Flusswasser ab. Vereisungen werden wahrscheinlicher, wenn sich der Rohrquerschnitt der Entnahmerohre infolge von Schmutzablagerungen verkleinert (Banks, 2010). Deswegen ist eine entsprechend hohe Wasserqualität bzw. eine regelmäßige Wartung der Wasserquellenanlage erforderlich. Offene Systeme können grundsätzlich sowohl für Wohngebäude als auch für Gebäude mit Gewerbenutzung verwendet werden. Aus wirtschaftlichen Gründen werden offene Systeme durch geringere Wärmeverluste und Investitionskosten bevorzugt im größeren Maßstab in Nah- und Fernwärmesystemen eingesetzt (Mitchell und Spitler, 2012). Fließgewässer unterliegen jahreszeitlichen Abflussschwankungen. Die durch den Klimawandel immer wahrscheinlicher werdenden Niedrigwasserphasen, in denen das Fließgewässer nicht genügend Wasser führt, besteht eine begrenzte zeitliche Verfügbarkeit und somit eine eingeschränkte thermische Nutzung (Kammer, 2018).

Bei der hydrothermischen Nutzung durch das geschlossene System wird ein WÜ im Fließgewässer eingesetzt (vgl. Abbildung 2-9). Der Wärmeübertrag der thermischen Energie findet direkt im Fließgewässer zwischen Flusswasser und Kältemittel des WÜ statt.

Der im Gewässer installierte WÜ gibt die Wärme des Flusswassers aber aufgrund von Reibungs- und Übertragungsverlusten nicht vollständig an die WP weiter, weshalb die Annahme besteht, dass ein Wärmeverlust T_v [K] von 1 K auftritt (Borchardt und Gappisch, 2022).

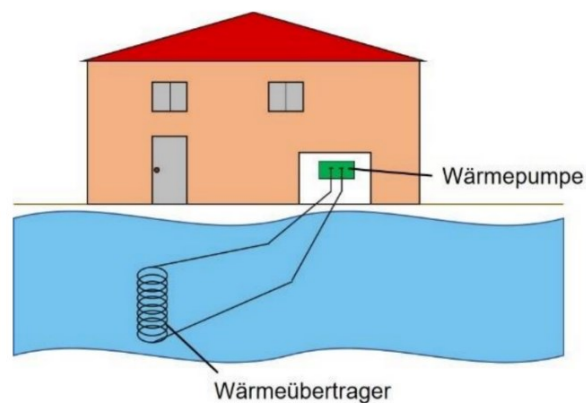


Abbildung 2-9: Wärmequellenanlage im geschlossenen System (Baunach, 2020)

Bei der Dimensionierung der WÜ ist darauf zu achten, dass die Kollektorfläche für die benötigte Wärmeleistung der Gebäude ausreichend dimensioniert ist (Banks, 2010). Die Kollektorfläche bezeichnet hierbei die Kontaktfläche, die das gewählte WÜ-System zum fließenden Wasser hat. Je nach Anwendungsbereich werden unterschiedliche technische Bauarten, wie beispielsweise Rohrbündel-, Platten-, Spiral- und Rotations-WÜ eingesetzt (Baunach, 2020). Um möglichst viel Wärme pro Flächeneinheit zu übertragen und damit einen optimalen Wirkungsgrad des WÜ zu erzielen, sind hohe Werte für die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Wärmeüberträgermedium und Flusswasser erforderlich, sowie möglichst hohe Werte für den Wärmedurchgangskoeffizient k^6 . Der Wärmedurchgangskoeffizient ist abhängig von der Geometrie des WÜ, der Strömungsgeschwindigkeit und den Stoffdaten des Fluides (Borchardt und Gappisch, 2021). Die Wärmeentzugsleistung stellt die Leistung dar, die dem Gewässer entzogen werden muss, um einen konkreten Gebäudewärmebedarf zu decken.

Die Berechnung der Wärmeentzugsleistung lautet hierbei (Böckh und Wetzels, 2018):

$$\dot{Q}_{th} = \frac{Q_{WB}}{t_{heiz}} \cdot \left(1 - \frac{1}{JAZ}\right) \quad (2.12)$$

\dot{Q}_{th} : Wärmeentzugsleistung [kW]

Q_{WB} : Wärmebedarf [kWh/a]

t_{heiz} : Heizstunden [h/a]

JAZ: Jahresarbeitszahl [-]

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ΔT_m berechnet sich wie folgt:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad (2.13)$$

ΔT_a : Temperaturdifferenz zw. Wärmeträgermedium und Flusswasser vor Wärmeentzug [K]

ΔT_b : Temperaturdifferenz zw. Wärmeträgermedium und Flusswasser nach Wärmeentzug [K]

⁶ Der Wärmedurchgangskoeffizient definiert eine bauteilabhängige Größe in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$, die Aussage über die Wärmeleitfähigkeit und Dimension des Wärmeübertragers miteinbezieht (Jagnow, Wolff und Teuber (2004).

Aus Einsetzen von Gl. 2.12 in Gl. 13 kann die nötige Wärmeübertragungsfläche bestimmt werden:

$$A_{WÜ} = \frac{\dot{Q}_{th}}{k \cdot \Delta T_m} \quad (2.14)$$

$A_{WÜ}$: Wärmeübertragungsfläche [m^2] k : Wärmedurchgangskoeffizient [$W/(m^2 \cdot K)$]

ΔT_m : mittlere logarithmische Temperaturdifferenz zw. Wärmeträgermittel und Gewässer [K]

Die mittlere Temperaturdifferenz ΔT_m ist maßgeblich von der Strömungsführung der beiden Medien (Wärmeträgermittel, Flusswasser) relativ zueinander abhängig (Böckh und Wetzell, 2018). Dabei ist nach drei Formen der Strömungsführung zu unterscheiden. Bei der Gleichstromführung treten beide Fluide an derselben Position in den WÜ ein und durchströmen den WÜ in die gleiche Richtung. In einem Gegenstromwärmeübertrager fließen die Stoffströme gegenläufig aneinander vorbei. Die dritte Form der Strömungsführung wird als Kreuzstrom bezeichnet, da die Strömung der beiden Fluide senkrecht zueinander erfolgt (Stephan et al., 2019).

Hohe Temperaturdifferenzen für einen leistungsstarken Betrieb des WÜ werden besonders bei der Gegenstromführung erreicht. Die Gleichstromführung stellt hinsichtlich der thermischen Leistung dagegen eine weniger günstige Strömungsführung dar (Stephan et al., 2019). Verglichen mit dem Gegenstrom ist dementsprechend bei gleichen Betriebsbedingungen und Wärmedurchgangskoeffizienten bei der Gleichstromführung die erforderliche Wärmeübertragungsfläche um ein Vielfaches größer. Der Wert des Wärmedurchgangskoeffizienten kann optimiert werden, indem Ablagerungen auf den wärmeübertragenden Flächen bestmöglich vermieden wird (Stephan et al., 2019). Ablagerungen an den Trennwänden können bei WÜ auftreten und verringern den Wirkungsgrad des WÜ. Dabei lagern sich Mikroorganismen auf den wärmeübertragenden Flächen an und erzeugen einen sogenannten Biofilm. Dieser Biofilm kann unter Einsatz eines Niederdruckreinigers am Wärmeübertragersystem entfernt werden (Baunach, 2020).

Der WÜ ist mit einer Wärmeträgerflüssigkeit, dem Kältemittel, gefüllt, die zusätzlich einen Frostschutz bietet. Hierbei werden zumeist Fluorkohlenwasserstoffe verwendet. Durch ein geeignetes Kältemittel in den Kollektoren kann auch bei Gewässertemperaturen nahe dem Gefrierpunkt Wärme entzogen werden (Banks, 2010). Zur Sicherheit ist beim Einsatz von wassergefährdenden Stoffen in Form von Kältemitteln auf die Verwendung einer doppelwandigen Bauweise zu achten (Kammer, 2018). Beim Einsatz eines WÜ in Fließgewässern besteht die Gefahr der Korrosion, die durch die Materialwahl begrenzt werden kann. Bei der thermischen Nutzung von salzhaltigem Wasser ist die Korrosionsgefahr besonders hoch (Kammer, 2018). Ein Beispiel für das Auftreten von Korrosion an Wärmequellenanlagen in Fließgewässern ist die WPA zur Beheizung des Mühlenviertels in Bamberg. Die Wärme wurde mithilfe von Plattenwärmeübertragern entzogen (Hamerak 1996, S. 48 f.). An den Edelstahlflächen der WÜ kam es zu Korrosionserscheinungen. Diese führten zu einer steigenden Gefahr von Undichtigkeiten an den Wärmeübertragerflächen, woraufhin die Anlage außer Betrieb genommen wurde. Da ein Ersatz der WÜ als nicht wirtschaftlich eingeschätzt wurde, erfolgte schließlich ein Rückbau der Anlage (Baunach, 2020).

Eine weitere Herausforderung für die Wärmeentnahme stellt die Kristallisation gelöster Salze an Wärmeübertragerflächen und Entnahmerohren dar. Bei einer hohen Salzkonzentration im Flusswasser kann es zur Ausfällung von Salzkristallen kommen, welche Verkrustungen bilden (Schnell und Slipcević, 1990). Sowohl bei Wärmeentnahmesystemen aus Kunststoffen und aus Metall sind in der Praxis bereits eine Vielzahl von Schadensfällen beobachtet, die als Korrosion bezeichnet werden können (Baunach, 2020). Bei Kunststoffen findet im Gegensatz zum Metall keine Zersetzung des Materials statt. Die Kunststoffkorrosion tritt durch Quellungen, Verfärbungen, Versprödung und Rissbildung in Erscheinung. Kunststoffe sind weniger korrosionsempfindlich als metallische Werkstoffe und bieten daher insbesondere im Hinblick auf den Kontakt mit natürlichen Gewässern ein geeignetes Material für Wärmequellenanlagen (Baunach, 2020).

Wegen des direkten Einbringens von Anlagenteilen in den Wasserkörper, die zudem wassergefährdende Stoffe in Form des Frostschutzmittels enthalten, ist jedoch Sorge zu tragen, dass keine negativen Beeinträchtigungen des Gewässers bspw. durch Leckagen auftreten (vgl. § 62 WHG). Bei der Ausführung eines geschlossenen Systems besteht bei geringen Gewässertemperaturen zudem die Gefahr einer Eisschichtbildung am WÜ (Baunach, 2020). Durch die Bildung einer Eisschicht an den wärmeübertragenden Oberflächen kommt es zu einer Erhöhung des thermischen Widerstandes und es treten Leistungsverluste auf (Mitchell und Spitler, 2012).

Eine weiteres Entnahmesystem zur thermischen Nutzung bietet das sogenannte gesplittete System. Der WÜ wird dabei in einem abgezwigten Gerinne eingebracht (siehe Abbildung 2-10). Gesplittete Systeme werden häufig in größeren Anlagen verwendet. Der Bau des abgezwigten Wasserkanals, in dem der WÜ eingesetzt wird, bringt hohe Investitionskosten mit sich. Zum Schutz des WÜ kann am Einlauf des Kanals eine Regulierung wechselnder Wasserstände sowie die Rückhaltung von Feststoffen vorgenommen werden.

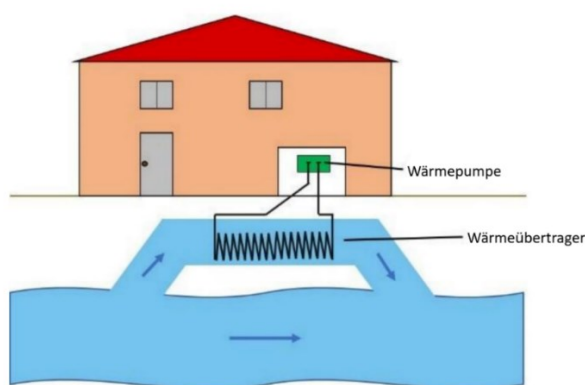


Abbildung 2-10: Wärmequellenanlage im gesplitteten System (Baunach, 2020)

Ähnlich dem offenen System erweist sich auch hier der Wärmeentzug als eher effizient, da der Verdampfer im direkten Kontakt mit dem Flusswasser steht. Es ist gleichermaßen dem geschlossenen System sicher zu stellen, dass keine wassergefährdenden Stoffe aus dem Wärmepumpenkreislauf in das Fließgewässer gelangen.

Die Wahl zwischen einem offenen und einem geschlossenen System hängt somit zum einen von der Wasserqualität und dem Jahrestemperaturverlauf des Fließgewässers ab. Die Betriebsweise der Anlage, also ob die Wärmepumpe gänzlich den Wärmebedarf deckt oder durch einen elektrischen oder fossilen Wärmeträger unterstützt wird, ist bei der Ausführung zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist ein Betrieb zu bevorzugen, bei dem die WP 100 % der Deckung übernimmt, jedoch besteht oftmals bei zu geringen Flusstemperaturen keine Möglichkeit die Spitzen im Wärmebedarf in den Wintermonaten zu decken, da bspw. wegen der Gefahr von Vereisung kein Betrieb sinnvoll wäre. Außerdem müsste die WP so dimensioniert werden, dass sie selbst am durchschnittlich kältesten Tag im Jahr die gewünschte Ruminnentemperatur bereitstellt. Dies kann zu einer Überdimensionierung und zu hohen Investitionskosten führen. Darüber hinaus sind die räumlichen Gegebenheiten sowie genehmigungsrechtliche Voraussetzungen bei der Entscheidung einzubeziehen (Günther et al., 2020). Herausforderungen, die bei dem Betrieb einer WPA auftreten können, sind breit gefächert. Durch den Wärmeentzug aus dem Fließgewässer ist bei den meisten Anlagen ein Betrieb bei sehr niedrigen Flusswassertemperaturen nicht möglich, weshalb häufig bivalente oder monoenergetische Systeme genutzt werden. Diese Systeme bedeuten Mehrkosten beim Betrieb, außerdem muss die Regelung des unterstützenden Systems auf die WP angepasst sein. Besonders bei offenen Systemen kommt es bei der Wasserentnahme durch Pumpen, aufgrund von Schwebstoffen, Laub oder Treibgut häufig zu einer erheblichen Leistungsminderung der Anlage. WÜ im geschlossenen System müssen durch Metallkonstruktionen (z.B. Leitrechen) vor Treibgut und anderen externen Einflüssen geschützt werden, damit gewährleistet ist, dass kein Kältemittel austritt (Kammer, 2018).

Je nach Abfluss des Fließgewässers kann der Einsatz von Wärmepumpensystemen Einfluss auf die Gewässerdynamik haben. Dabei ist darauf zu achten, dass bei dem Einsatz einer solchen Anlage die Strömung des Gewässers nicht wesentlich verändert wird, um den Abfluss, sowie die Böschungs- und Sohlstabilität nicht zu gefährden. Falls es sich bei der Wärmequelle, um ein großes Fließgewässer handelt, das mit Schiffen befahren wird, muss darauf geachtet werden, dass die Schifffahrt durch den Betrieb der Anlage nicht gestört wird. Da aufgrund der Gewässerdynamik eine ausreichende Restwassermenge gegeben sein muss, darf dem Gewässer nicht zu viel Wasser entnommen werden (Kammer, 2018). Nach der WRRL darf sich der Zustand der Fließgewässer nicht verschlechtern. Dementsprechend sind in der OGewV Grenzwerte für Temperaturänderungen festgelegt (OGewV, 2016). In Einzelfällen werden von den zuständigen Wasserbehörden Vorgaben zur Einhaltung einer maximal zulässigen Temperaturdifferenz gestellt. Jede Anlage ist exklusiv auf die vorliegenden Umweltparameter einzustellen. Sinkt die durchschnittliche Flusswassertemperatur langfristig, ist es möglich, dass die Anlage nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben ist (Wunderlich, 1979).

3 Wärmeenergetisches Potenzial der Werra

Aufbauend auf den Grundlagen der Hydrothermie und der erarbeiteten Kenntnisse über WPA in Kapitel 2 wird im Folgenden das wärmeenergetische Potenzial der Werra in Hann. Münden bestimmt. Im Rahmen einer Ortsbegehung wurde der Standort mit Fokus auf seinen standort-spezifischen Anforderungen untersucht, um Hindernisse und Möglichkeiten der Machbarkeit einer Flusswärmennutzung am Nadelwehr evaluieren zu können. Unter Berücksichtigung der hydrothermalen Rahmenbedingungen und den standortspezifischen Anforderungen wird das gewässerseitige Wärmepotenzial der Werra ermittelt, um die Leistungsfähigkeit einer WPA, die mit dem Umweltmedium Flusswasser betrieben wird, abschätzen zu können.

3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

In Hannoversch Münden, kurz Hann. Münden, mündet die aus dem Thüringer Wald heran-fließende Werra und die aus der Rhön kommende Fulda in die Weser (Abbildung 3-1).

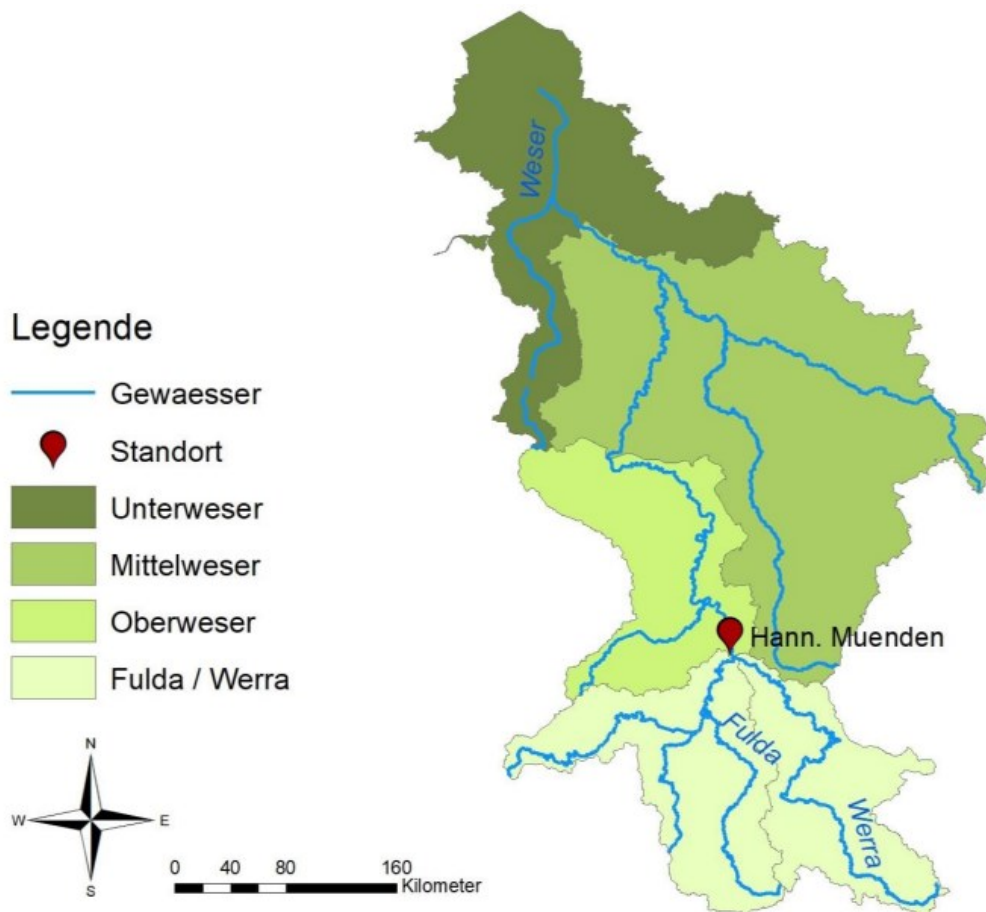


Abbildung 3-1: Markierung des Standorts Hann. Münden im EZG Weser (Specht, 2022)

Die Quelle der Werra befindet sich im Thüringer Schiefergebirge auf 780 Metern ü. NN. Das EZG der Werra ist mit ca. 5500 km² ein Teilgebiet des EZG der Weser (FGG Weser, 2022). Die Werra hat eine Fließlänge von ca. 300 km und durchfließt dabei die Bundesländer Thüringen, Hessen und Niedersachsen. Verglichen zur Fulda, hat die Werra einen längeren Fließweg,

führt aber im Durchschnitt weniger Wasser. Das EZG der Werra befindet sich in der temperierten humiden Klimazone Mitteleuropas. Hann. Münden weist im Vergleich zum atlantisch geprägten Nordwestdeutschland kältere Winter und geringere Niederschlagsmengen auf (FGG Weser, 2022). Dabei werden Daten der Klimastation in Göttingen genutzt, da die Klimastation ca. 20 km von Hann. Münden entfernt befindet.

Die Werra teilt sich kurz vor Hann. Münden durch den Blümer Werder in den Stadtarm und den Nebenarm der Werra. Der Nebenarm der Werra unterfließt die alte Werrabrücke und in das Wasserkraftwerk „Blumer Wehr“ (Abbildung 3-2). Dieser Nebenarm mündet in den darauffolgend in die Weser. Der Stadtarm der Werra fließt teilweise über ein Streichwehr unmittelbar vor Erreichen der Werrabrücke. Der andere Teil des Stadtarms fließt durch die Werrabrücke Richtung Nadelwehr (roter Pfeil), welches parallel zu einer Schifffahrtsschleuse liegt. Nach Durchfließen des Nadelwehrs trifft das Wasser auf einen Seitenarm der Fulda. Danach vereinigen sich die Seitenarme der Werra und werden zusammen mit der Fulda zur Weser.

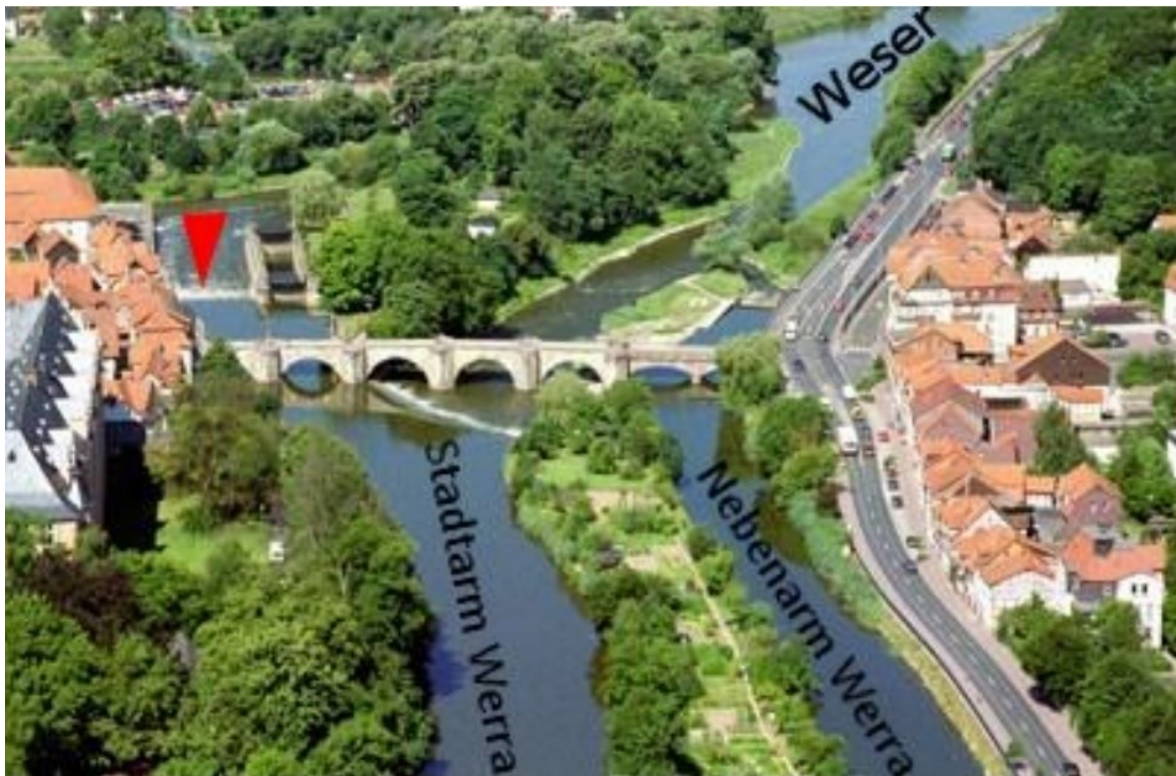


Abbildung 3-2: Verlauf der Werra in Hann. Münden (Meier-Staude und Hochhäusler, 2022)

Abbildung 3-3 zeigt das Nadelwehr im Jahr 2018 und im Jahr 2022. Zum Stand der Ortsbegehung im Oktober 2022 befanden sich am Platz des Nadelwehrs Spundwände, da das Nadelwehr zu dem Zeitpunkt saniert wurde.



Abbildung 3-3: Ansicht des Nadelwehrs und der Schleuse, links im Betrieb im Jahr 2018 (Berberich, 2018) und rechts im Rahmen der Ortsbegehung im Oktober 2022 (Blickrichtung stromaufwärts)

Die Schifffahrtsstraße ist zwischen Schleuse und Werrabrücke durch an der Oberfläche sichtbare Leitwerke (Abbildung 3-4) in Form von (Stand 2023) schwimmenden Rohren erkennbar. Diese zeigen den Verlauf der Schifffahrtsstraße und geben den Schiffen Führung und leiten sie trichterförmig in die Schleuse. Außerdem halten diese Treibgüter auf.



Abbildung 3-4: Ansicht der Werrabrücke und Schleuse (Blickrichtung stromabwärts)

Abbildung 3-5 zeigt auf dem Luftbild, aufgenommen mit einer Drohne, das überströmte Nadelwehr und die Schleuse im März 2021. Das Nadelwehr ist in einer technischen Zeichnung in Anhang 1 zu sehen. Außerdem zeigt sich die historische Altstadt Hann. Mündens mit seinen teilweise denkmalgeschützten Fachwerkhäusern. Zur Seite der Schleuse befindet sich die Flusinsel „Doktorwerder“, worauf sich keine Gebäude befinden.

Auf der Seite des Nadelwehrs befindet sich der Wanfrieder Schlagd, eine historische Uferbefestigung, die bis ins 20. Jahrhundert als Warenumschlagsfläche in der Schifffahrt genutzt wurde. Heute stellt die Wanfrieder Schlagd als Übergang zwischen der Altstadt und der Werra aus denkmalpflegerischer Sicht ein Dokument des Handels und der Schifffahrt dar (Stadt Hann. Münden, 2022).



Abbildung 3-5: Luftbild vom Nadelwehr und der Altstadt von Hann. Münden (Niki Lettieri, 2021)

Das historische Nadelwehr dient dazu, die Werra zu stauen, um eine bestimmte Wassertiefe für die Schifffahrt oberhalb der Wehranlage zu erzeugen. Es wurde 1877 erbaut und hat eine Breite von 16,30 m (WSA Weser, 2022). Die Stauhöhe ist mit 118,53 m. ü. NN so festgelegt, dass eine Wassertiefe oberhalb des Nadelwehres von 1,75 m über das gesamte Jahr gewährleistet ist (WSV, 2022). Schwankungen der Stauhöhe werden im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt, weil dazu keine verlässlichen Daten vorhanden sind.

Im Rahmen der Ortsbegehung und durch Gespräche mit Stadtplaner Siegfried Pflum wurde deutlich, dass die Schifffahrt heutzutage touristischen Zwecken dient und nur wenige Schiffe pro Jahr die Schifffahrtsstraße nutzen.

3.1.1 Werra-Welle am Nadelwehr

Im August 2021 bewilligte die Europäische Union im Rahmen des Maßnahmenprogramms LEADER eine „Machbarkeitsstudie für die Entwicklung einer Surfwele in der Werra“ zur Stärkung und Weiterentwicklung der ländlichen Räume. Hierfür wurde eine Wellenkonstruktion in einem physikalischen Modell im Maßstab 1:14 von Robert Meier-Staude und Dominik Hochhäusler im Wasserbaulabor der Hochschule München modelliert und im Versuchskanal getestet (Anhang 4) (Werra-Welle, 2022). Mittlerweile ist die Machbarkeitsstudie abgeschlossen und wurde bei der zuständigen Behörde, dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) eingereicht (HNA, 2022). Der gewählte Standort für die Surfwele ist unmittelbar unterhalb des Nadelwehrs (Abbildung 3-6).

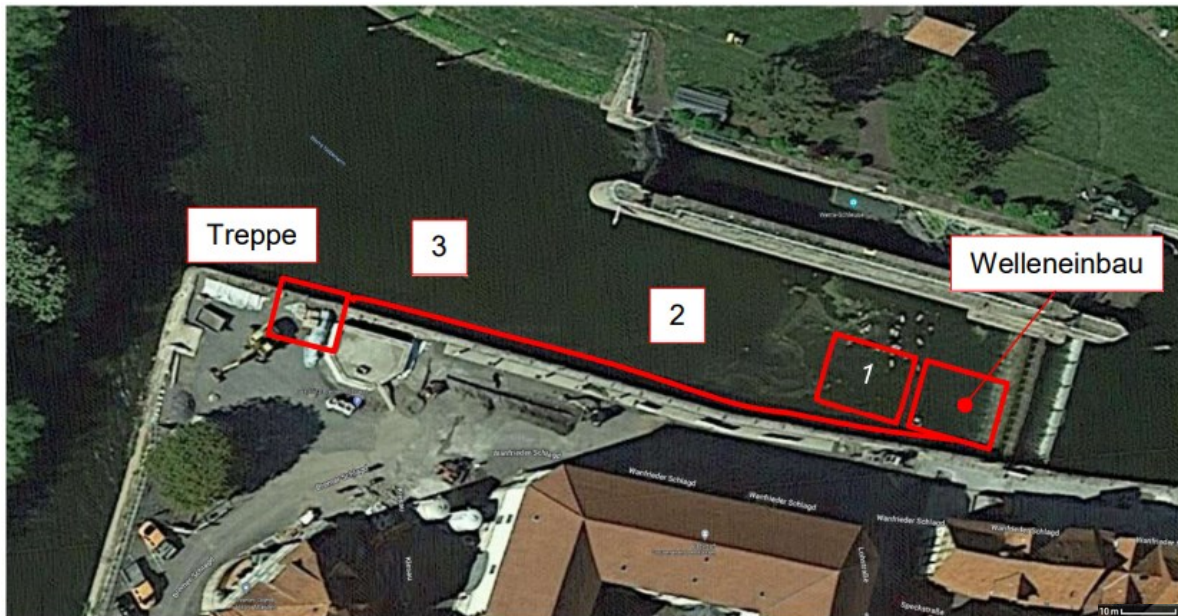


Abbildung 3-6: Werra Nebenarm mit Nadelwehr am Wanfrieder Schlagd (Meier-Staude und Hochhäusler, 2022)

Der geplante Welleneinbau und die Treppe sind mit roten Rechtecken ohne Ziffern gekennzeichnet. Die rote Linie kennzeichnet den geplanten Zugang bzw. den Rettungssteg mit einer Länge von ca. 75 m. Entlang dieser Linie ist ein einfacher Ausstieg für die Surfer möglich. Ziffer 1 zeigt die primäre Ausstiegszone und Ziffer 2 den Bereich, in dem das Wasser meist Stehtiefe hat (Hochhäusler, 2022). In Zone 3 beginnt der Bereich mit stark beruhigter Strömung. Der Entwurf der Welle ist in

Anhang 2 dargestellt. Im Entwurf ist als Einstieg ein Steg an der Schlagdmauer erkennbar. Der Steg hat auch die Funktion eines Rettungssteges. Der Zugang zur Welle erfolgt über Leiter und Steg. Der Ausstieg ist über die Leiter oder die Steintreppe weiter stromabwärts nahe der Schlagdspitze möglich (Abbildung 3-6). Zur Wellenerzeugung wird das „Floater“ Prinzip verwendet. Hierbei sind die unteren drei Elemente beweglich gelagert (Anhang 3). An der unteren Kante des letzten Elements sind zwei Bolzen angebracht, welche in zwei Schienen laufen können. Die Schienen sind mit der Seitenplatte und dem Kragarm verschraubt. Unter den beiden Elementen wurden mittig Luftkissen platziert, welche sich händisch aufpumpen lassen. Auf diese Weise kann der Floater bis auf eine Höhe von 17,9 cm von der Gewässersohle angehoben werden, das sind umgerechnet 116,95 m. ü. NN. Die Planung der Werra-Welle hat einen Einfluss auf die Konzeptionierung der Wärmeentnahme, da der Standort unmittelbar unterhalb des Nadelwehrs, der für die Welle eingeplant ist nicht für das Wärmeentnahmesystem verfügbar ist. Die Konzeptionierung des Wärmeentnahmesystem wird in Kapitel 5 ausgeführt.

3.1.2 Salzproblematik und thermische Einleitungen

Am Oberlauf der Werra in Thüringen und Hessen wurden seit Anfang des 20. Jahrhunderts im Zuge des Kalisalzabbaus Abwässer in die Werra eingeleitet (Abbildung 3-7). Wenige Kilometer stromaufwärts der Gemeinde Gerstungen befinden sich zwei Kaliwerke und zwei Kalihalden. Nach mehr als 100 Jahren Kalibergbau gehören Weser und Werra zu den am stärksten

mit Salz belasteten Flüssen Europas (FGG Weser, 2022).

Die Grenzwerte für Chlorid-, Kalium- und Magnesiumionen übersteigen am Pegel Gerstungen, ca. 100 km stromaufwärts von Hann. Münden, die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (BUND, 2022). Die mittlere tägliche Chloridionenkonzentration von 2.500 mg/l übersteigt bei Gerstungen den Grenzwert von 250 mg/l um das 10-fache (FGG Weser, 2022). In den 1970er und 1980er Jahren des letzten Jahrhunderts war der Salzgehalt in der Werra mit 35 g/l so hoch wie in der Nordsee (FGG Weser, 2022). Neben hohen Korrosionsschäden an Laufrädern von Turbinen, Bauwerken und Wehren entstanden durch den hohen Salzgehalt irreversible Schäden am Ökosystem (BUND, 2022). Fische reagieren auf hohe Salzkonzentrationen vermehrt mit Krankheiten, etliche Arten seien ausgestorben (Irob et al., 2019). Die Wirbellosenfauna der Werra ging stark zurück und wird heute teilweise von salztoleranten Arten dominiert (NDR, 2022).



Abbildung 3-7: Kaliabbau durch K+S Werke und Halden zwischen der Gemeinde Gerstungen und Phillipsthal (BUND, 2022)

Dies bestätigten auch Studien aus dem Jahr 2019 und 2021, die aufzeigten, dass der erhöhte Salzgehalt der Werra durch die die Kalisalzabwässer des Unternehmens K+S Auswirkungen auf die Fischpopulation der Werra hat. Bei Untersuchungen mit einem Zebraabärbling hat sich gezeigt, dass sowohl die Befruchtung als auch Entwicklung der Fische durch die hohen Salzkonzentrationen negativ beeinflusst wird. Bis zu 60 Prozent der getesteten Fische haben deformierte Wirbelsäulen, teilweise keine Augen ausgebildet oder aufgeblähte Körper (Irob et al., 2019).

Zudem ist eine erhöhte Spermienmortalität des Flussbarsches, sowie Einschränkungen in der frühen Entwicklung des Rotauges nachgewiesen (Baberschke et al., 2021). Es ist anzumerken, dass die Studienergebnisse von Irob et al. 2019 und Baberschke et al. 2021 unter Laborbedingungen entstanden sind, mit maximalen Salzkonzentrationen, die in der Werra gemessen wurden. Es ist möglich, dass in der Natur etwa in Seitenarmen die schädlichen Salzbelastungen niedriger sind und somit die Schäden geringer ausfallen.

Das Regierungspräsidium Kassel hat im Jahr 2021 eine Fortsetzung der Salzeinleitung des Düngemittelherstellers K+S von 2022 bis 2027 genehmigt. Bis Ende 2027 muss die Werra nach EU-Recht allerdings in einem guten ökologischen Zustand sein. Ein guter ökologischer Zustand ist mit den beschriebenen hohen Chloridkonzentrationen allerdings aktuell nicht gewährleistet. Nach Oberflächengewässerverordnung (OGewV), Anlage 7.2, ist für den guten ökologischen Zustand ein Grenzwert von 200 mg/l Chloridionen nicht zu überschreiten (OGewV, 2016).

Die Auswirkungen auf das Ökosystem seien laut NABU, BUND und Deutscher Umwelthilfe im Unterlauf der Werra, auch untere Werra genannt, ab Höhe der industriellen Salzeinleitungen gravierend (BUND, 2022). Die Gewässerstrukturgüte der Werra ist nach Daten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Hann. Münden und am Nadelwehr mit vollständig verändert (7) klassifiziert (Anhang 5). Durchschnittlich besitzt die Werra entlang ihrer Fließlänge eine Gewässerstrukturgüte von 5. Etwa 20 % der Werra hat eine Bewertung mit Gewässerstrukturgüte 3 oder besser und über ein 30 % hat eine Bewertung von Gewässerstrukturgüte 6 oder schlechter (FGG Weser, 1998).

Neben den ökologischen Folgen auf die Fauna hat die Einleitung der Salzabwässer weitere ökologische Folgen. Umweltverbände befürchten irreversible Schäden in Grund- und Trinkwasservorkommen. Die beim Kalibergbau des Unternehmens K+S entstehende Lauge wird in tiefliegende unterirdische Gesteinsschichten gepresst und gespeichert. Kritiker bezweifeln, dass die Speicher, in denen das Salz gelagert wird, undurchlässig sind und gehen davon aus, dass Trinkwasser und Grundwasser gefährdet sind. Das Land Thüringen hat die Salzspeicherung in tiefen Gesteinsschichten nicht mehr genehmigt (MDR, 2022).

Im Zuge der Salzabwassereinleitung wird auch Wärme in die Werra eingeleitet (Matthes und Werner, 2012). Aus einem Bericht zu Leitfähigkeitsmessungen der Werra unmittelbar vor und nach der Einleitung zwischen den Ortschaften Heringen und Widdershausen, welche sich wenige Kilometer stromabwärts von Gerstungen befinden, wurde Folgendes festgestellt: „Die Kaliabwässer gelangen über einen etwa 4m breiten und 1m tiefen Zuleitungsgraben mit einer geschätzten Strömungsgeschwindigkeit von 0,4 m/sec in die Werra. Die Wassertemperatur im Zuleitungsgraben zeigte mit Werten von 31,1 bis 31,3 °C kaum Abweichungen zwischen Grundmessung, Mittelwasser- und Oberflächenmessung. In der Werra ca. 1,2 km nach Einleitung zeigten bis auf die Messung in Bodennähe (19,1 °C) alle Messwerte von Sohle bis zur Oberfläche gegenüber den Messwerten oberhalb der Einleitung unterschiedliche Erhöhungen an, die im Mittelwasser (2 bis 3 m) mit rund 24 °C am höchsten ausfielen ($\Delta T > 3$ °C). An der Oberfläche und in 1 m Wassertiefe zeigte die Wassertemperatur von 21,4 bzw. 21,7 °C eine moderatere Temperaturerhöhung an ($\Delta T < 1$ °C)“ (Matthes und Werner, 2012).

Zur Abschätzung des Einflusses der thermischen Einleitungen auf den Wärmehaushalt der

Werra wurden vom TLUBN Gewässertemperaturdaten der Messstellen Tiefenort, Vacha und Gerstungen zur Verfügung gestellt (vgl. Tabelle 3-1). Da es sich bei den Daten um vor-Ort-Messwerte handelt und keine durchgehenden kontinuierlichen Messreihen zur Verfügung stehen, wurden Monatsmittelwerte gebildet (vgl. Abbildung 3-8). Die Messstellen in Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 sind von Quelle nach Mündung geordnet. Tiefenort ist somit am nächsten zur Quelle der Werra und Witzenhausen am nächsten zur Mündung. Parallel zur Wassertemperatur wurde die elektrische Leitfähigkeit und die Chloridionenkonzentration ausgewertet (Abbildung 3-9 u. Abbildung 3-10), um Zusammenhänge zu den Salzeinleitungen feststellen zu können. Eine Erhöhung der Salzkonzentration führt zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Gewässers, da sich die Anzahl der freien Ladungsträger erhöht (Pupisky und Shainberg, 1979). Die größte Salzabwassereinleitung erfolgt demnach nach Vacha und vor Gerstungen, da dort der größte Anstieg der elektrischen Leistungsfähigkeit nachzuweisen ist (vgl. Abbildung 3-9). Die Mündung der Nesse und der Wehre in die Werra zwischen Gerstungen und Witzenhausen und die damit einhergehende Erhöhung des Abflusses der Werra trägt dazu bei, dass die Chloridionenkonzentration bei Witzenhausen wieder erheblich sinkt. Die Leitfähigkeit steht in Abhängigkeit zu den eingetragenen Salzionen. Die Chloridionenkonzentration und weitere relevante Salzionen in Form von Kalium und Magnesium durch die Einleitungen sind nachgewiesen (vgl. Anhang 9 bis Anhang 12).

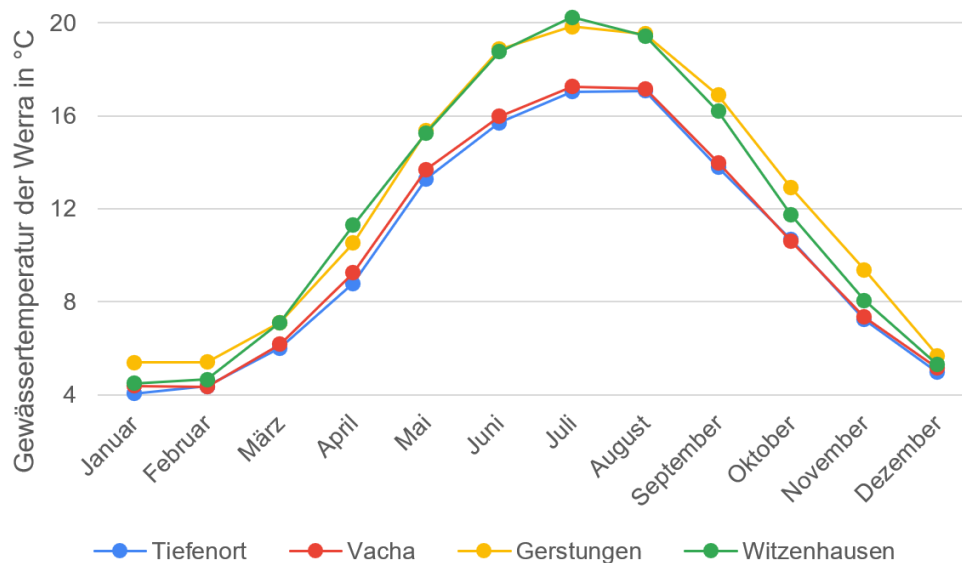


Abbildung 3-8: Mittlere monatliche Gewässertemperatur der Werra an unterschiedlichen Messstellen unterhalb (Tiefenort, Vacha) und oberhalb der Salzabwassereinleitung (Gerstungen, Witzenhausen) (eigene Darstellung auf Grundlage von TLUBN, 2023)

Bei genauer Betrachtung der mittleren monatlichen Temperaturverläufe von Abbildung 3-8 wird deutlich, dass ein starker Gewässertemperaturanstieg zwischen Vacha und Gerstungen stattfindet. Genau zwischen diesen beiden Messstellen bei Heringen befindet sich die Einleitung. Der Temperaturanstieg fällt in den Wintermonaten (Oktober bis März) schwächer ($\Delta T_{Okt. bis März.} \leq +1,1 \text{ °C}$) als in den Sommermonaten aus ($+1,1 < \Delta T_{Apr. bis Sep.} \leq +3,2 \text{ °C}$). Abbildung 3-11 zeigt diese Temperaturerhöhungen entlang der Fließstrecke pro Monat im Zeitraum zwischen 1995 und 2020 auf Grundlage zur Verfügung gestellten

Gewässertemperaturdaten (TLUBN, 2023). Für die Bearbeitung dieser Machbarkeitsstudie ist die Feststellung dieser Temperaturerhöhung für das weitere Vorgehen relevant, um abschätzen zu können, ob eine Nutzung auch bei einem Verbot der Einleitung in Zukunft immer noch wirtschaftlich wäre.

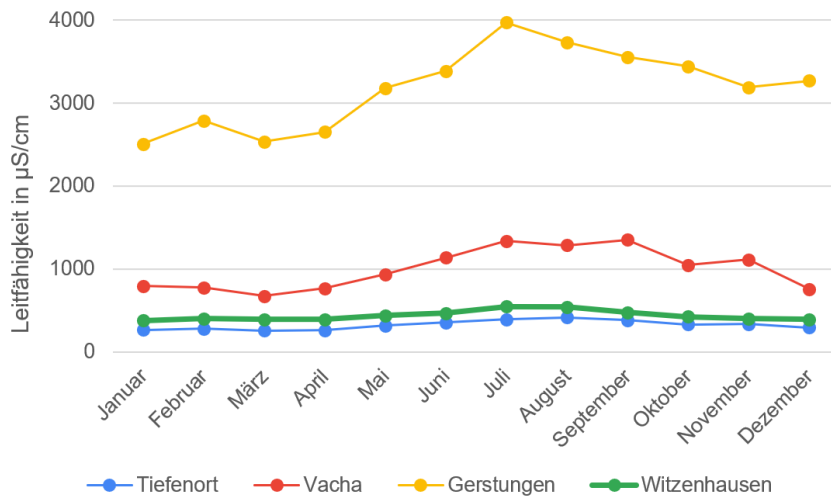


Abbildung 3-9: Mittlere monatliche elektrische Leitfähigkeit entlang der Werra (eigene Darstellung auf Grundlage von TLUBN, 2023)

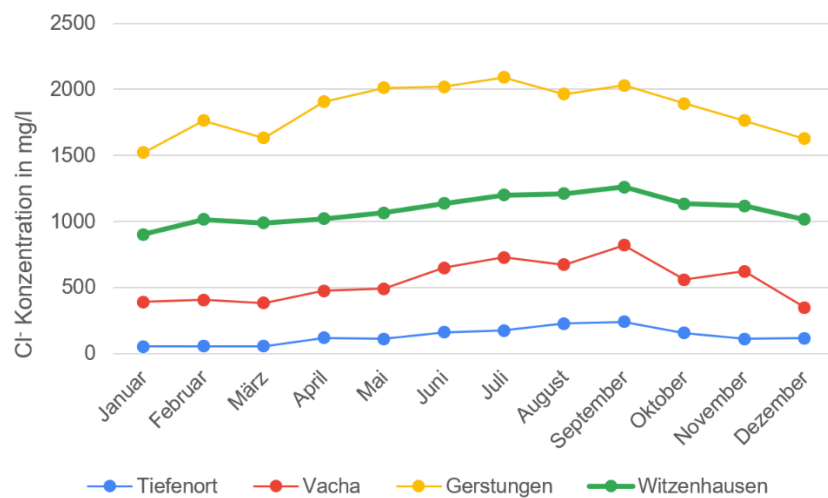


Abbildung 3-10: Mittlere monatliche Chloridionenkonzentration entlang der Werra (eigene Darstellung auf Grundlage von TLUBN, 2023)

Zu beachten ist im weiteren Vorgehen, dass neben den Zuflüssen des Unternehmens K+S, auch Querbauwerke einen Einfluss auf die Gewässertemperatur entlang der Fließweges eines Gewässers haben. Hierbei ist nicht genau zu sagen, welcher Anteil des Temperaturanstiegs der Messstelle Tiefenort im Vergleich zur Messstelle Witzenhausen auf die Salzeinleitungen zurückgehen.

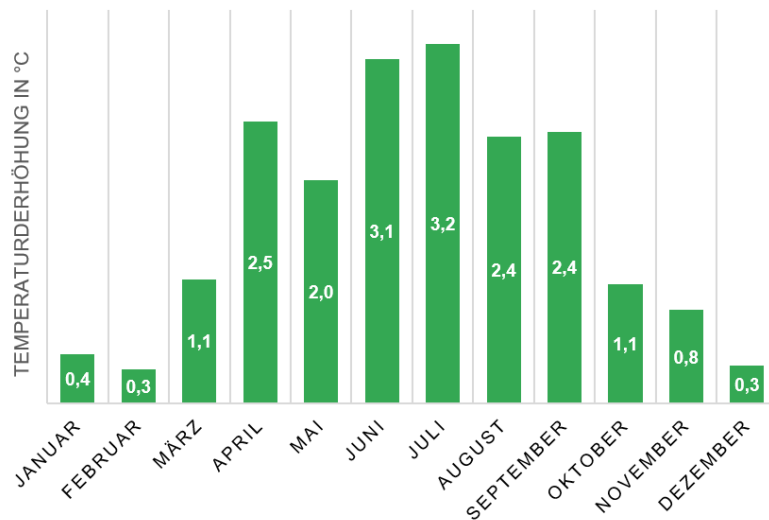


Abbildung 3-11: Temperaturdifferenz zwischen den mittleren monatlichen Gewässertemperaturen der Messstelle Tiefenort und der Messstelle Witzenhausen im Zeitraum zwischen 1995 und 2020 (eigene Darstellung auf Grundlage von (TLUBN, 2023)).

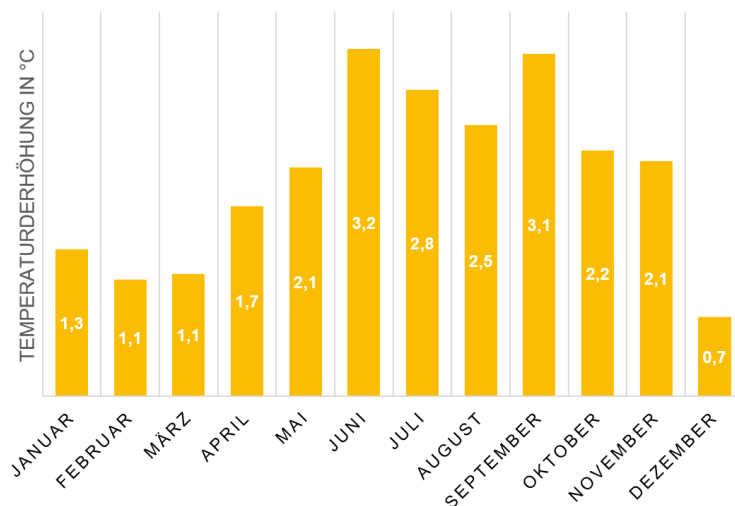


Abbildung 3-12: Temperaturdifferenz zwischen den mittleren monatlichen Gewässertemperaturen der Messstelle Tiefenort und der Messstelle Gerstungen im Zeitraum zwischen 1995 und 2020 (eigene Darstellung auf Grundlage von (TLUBN, 2023)).

Im Vergleich der Temperaturerhöhung aus Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 durch die Salzeinleitungen lässt sich feststellen, dass die Messstellen, die unmittelbar vor (Tiefenort) und nach (Gerstungen) der Einleitung verglichen werden wesentlich höhere Gewässertemperaturerhöhungen vorweisen als die Messstellen, die zwar unmittelbar vor (Tiefenort) aber auch wesentlich weiter flussabwärts (Witzenhausen) liegen. Diese abnehmende Auswirkung der Wärmeinleitung auf die Werra, je weiter die Einleitung von der Messstelle entfernt ist, lässt sich durch die Wärmeaustauschprozesse mit Boden und Luft aus Kapitel 2.1 erklären, da das Gewässer, je länger es fließt auch mehr Wärme, die durch die Wärmeinleitungen aufgenommen wurde, wieder abgeben kann.

3.1.3 Laufwasserkraftwerk Werrawerk

Die Werra passiert entlang ihres Fließweges von der Quelle bis zum Erreichen Hann. Mündens einige Querbauwerke (Anhang 6). Das Laufwasserkraftwerk „Werrawerk“ bei Hann. Münden, früher „Letzter Heller“ genannt, wurde zwischen 1921 und 1924 von der damaligen „PreussenElektra“, später „EON-Energie“, zur Stromerzeugung gebaut. Anfang 2009 hat der norwegische Energiekonzern „Statkraft“ den Betrieb des Kraftwerks übernommen. Die Nennleistung des Laufwasserkraftwerks beträgt 2,6 MW mit einer Fallhöhe von 3,8 m. Es werden insgesamt drei Kaplansturbinen betrieben. Das Laufwasserkraftwerk ist in Abbildung 3-13 in einem Luftbild dargestellt. Zum Zeitpunkt der Aufnahme des Luftbildes wurden Sanierungsarbeiten durchgeführt. Aufgrund des hohen Salzgehaltes der Werra sind über die Jahre hohe Korrosionsschäden an Laufrädern entstanden. Um diesen Schäden entgegenzuwirken, wurde eine elektrische Korrosionsschutzanlage installiert.



Abbildung 3-13: Laufwasserkraftwerk Werrawerk am Pegel „Letzter Heller“ (Statkraft, 2022)

Der Pegel „Letzter Heller“ befindet sich ca. 2,3 km stromaufwärts vom Nadelwehr und ca. 2,5 km stromabwärts vom Laufwasserkraftwerk Werrawerk. Das Laufwasserkraftwerk liegt somit ca. 4,8 km oberhalb des Nadelwehrs in Hann. Münden.

3.2 Ermittlung des gewässerseitigen Wärmepotenzials

Ausschlaggebend für das Wärmepotenzial der Werra ist der Abfluss und die Temperaturänderung (vgl. Kapitel 2.1). Im Folgenden wird die Beschaffung relevanter Daten zur Ermittlung des Wärmepotenzials erläutert. Anschließend werden die Messdaten ausgewertet und die JAZ für einen potenziellen Wärmepumpenbetrieb bestimmt. Diese dienen im weiteren Verlauf der Machbarkeitsstudie als Grundlage für die Einschätzung, ob eine Flusswärmenutzung am Nadelwehr wirtschaftlich ist.

3.2.1 Erfassung der Gewässerdaten

Für die Ermittlung des gewässerseitigen Wärmepotenzials der Werra wurden die Messstellen „Letzter Heller“ (Nr. 802) und „Witzenhausen“ (Nr. 091) verwendet (Abbildung 3-14).

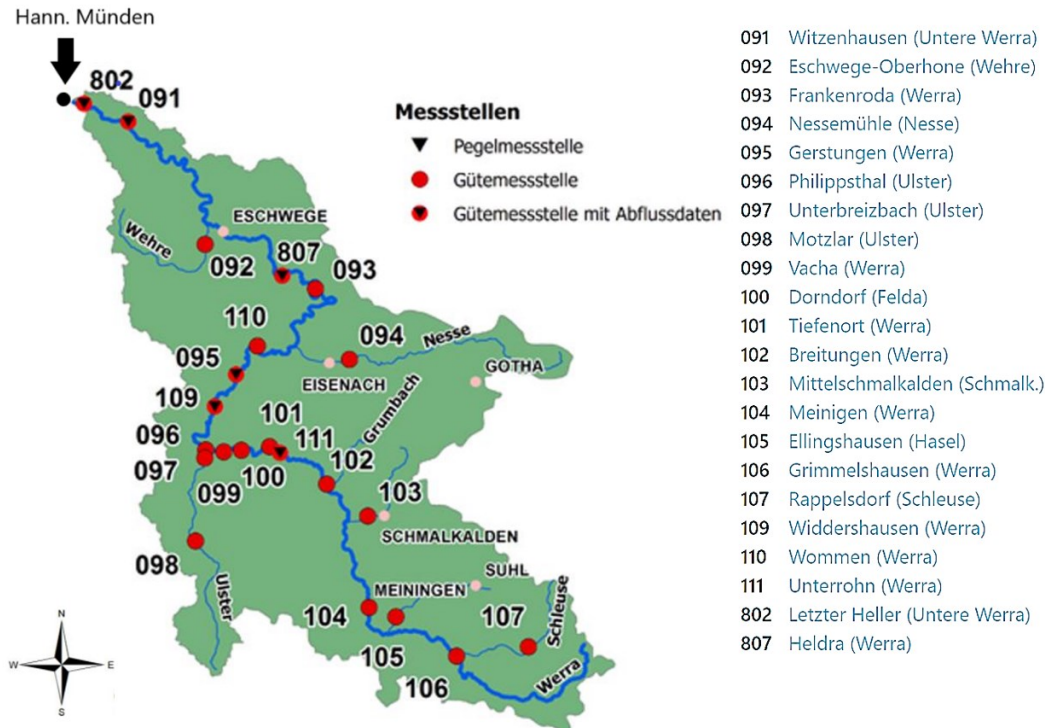


Abbildung 3-14: Messstellen im EZG der Werra (FGG Weser, 2022)

Die in Abbildung 3-14 dargestellten Gütemessstellen (rot) messen mit Ausnahme der Messstelle Witzenhausen keine Gewässertemperaturen, allerdings alle die Chloridionenkonzentration.

Stammdaten sowie messtechnische Daten der zurückliegenden Jahre konnten über das Internetangebot der HLNUG für Hessen bzw. der NLWKN für Niedersachsen aufgerufen werden. Für Thüringen wurden per Mail seitens des TLUBN Daten zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wurden länderübergreifende Datenbestände von der Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Weser gesammelt. Diese Daten sind in der Weserdatenbank frei zugänglich verfügbar (FGG Weser, 2022). Die zur Verfügung stehenden Daten der Weserdatenbank wurden mit den Daten, die durch die Ansprechpersonen der HLNUG, NLWKN und FGG Weser im Rahmen einer Bachelorarbeit aus dem Jahr 2022 von B.Sc. Kristina Specht mit dem Titel „Potenzialanalyse zur Flusswärmennutzung in Hann. Münden“ bereitgestellt worden sind, durch einen Datenabgleich auf Übereinstimmung geprüft (Tabelle 3-1). Zudem hat das TLUBN per Mail Daten der Gewässertemperatur der Messstellen Tiefenort, Vacha und Gerstungen bereitgestellt. Dies ermöglichte die Abschätzung des Wärmeeinflusses der Kalisalzeinleitungen des Unternehmens K+S auf die Werra (vgl. Kapitel 3.1.2). Diese sind keine durchgehenden kontinuierlichen Messreihen, sondern vor-Ort-Messwert in 14-Tagen Abständen. Die Ausrüstung der Pegel-Messstellen mit kontinuierlicher Messung der Wassertemperaturen befindet sich in Thüringen im Ausbau.

Weitere Informationen zu den verwendeten Datensätze sind in Tabelle 3-1 aufgelistet:

Tabelle 3-1: Übersicht der verfügbaren Datensätze an den nächstgelegenen Messstationen

Parameter	Messstation	Zeitreihe	Quelle
Gewässertemperatur [°C]	Witzenhausen-Blickershausen	Bli- 2003 bis 2018	FGG Weser 2022
		2003 bis 2021	Semsei (HLNUG) 2022
	Tiefenort	1995 bis 2020	Wyrwa (TLUBN) 2023
	Vacha	1995 bis 2022	Wyrwa (TLUBN) 2023
Abfluss [m ³ /s]	Letzter Heller	Gerstungen 1995 bis 2022	Wyrwa (TLUBN) 2023
		2000 bis 2021	FGG Weser 2022
		1985 bis 2015	Stange (HLNUG) 2022
Chloridionenkonzentration [mg/l]	Witzenhausen-Blickershausen	2002 bis 2018	FGG Weser 2022
		Tiefenort 2000 bis 2013	FGG Weser 2022
	Vacha	2000 bis 2014	FGG Weser 2022
	Gerstungen	2000 bis 2015	FGG Weser 2022

Die Messreihen wurden zusammengeführt, um die längst mögliche Beobachtungsreihe zu erhalten. Insgesamt hat sich eine Zeitspanne von Messdaten von 19 Jahren für die Messstation Witzenhausen und 37 Jahren für den Pegel „Letzter Heller“ ergeben. Die Datensätze der Chloridionenkonzentration liegen mit 14-Tages-Mittelwerte vor. Sich nicht deckende Messreihen wurden ergänzt, um die längste mögliche Beobachtungsreihe zu erhalten. Dabei wurden keine Abweichungen festgestellt. Hierbei wurden sich überdeckende Datenreihen auf Konsistenz geprüft

3.2.2 Auswertung des Wärmepotenzials

Mithilfe den aufbereiteten Gewässertemperaturdaten für den jeweiligen Jahrestag der Messstation Witzenhausen wurde der langjährige Mittelwert, sowie der Median, und Quantile bestimmt (Abbildung 3-15). Die x_{15} - und x_{85} -Quantile veranschaulichen, in welchem Bereich sich die Wassertemperaturen um den Mittelwert bzw. den Median bewegen. Das x_{15} -Quantil sagt aus, dass genau 15 % der Werte unter und 85 % über dem Quantil liegen. Die Quantile geben einen genaueren Eindruck über die Volatilität der Gewässertemperaturen im Jahresverlauf. Ein Quantil definiert somit einen bestimmten Teil einer Datenmenge und ermöglicht konkrete Aussagen zur Verteilung der Daten zu tätigen (Matthäus, 2007). Zum Jahresbeginn und Jahresende ist die Gewässertemperatur auf dem niedrigsten Temperaturniveau mit einem

minimalen täglichen Mittelwert (schwarze Linie) über die Jahre 2003 bis 2021 über die betrachteten Jahre von 3,8 °C. Der Mittelwert wird hierbei aus der mittleren täglichen Wassertemperatur eines Jahrestages während des Betrachtungszeitraums gebildet. Mit voranschreitenden Monaten steigen die Graphen bis sie in den Sommermonaten um den Jahrestag 200 (Mitte Juli) das Maximum erreichen. Anschließend kommt es wieder zu einem Temperaturabfall. Die Darstellung von Mittelwert, Median und Quantilen ermöglicht die Einordnung der Messdaten (Matthäus, 2007).

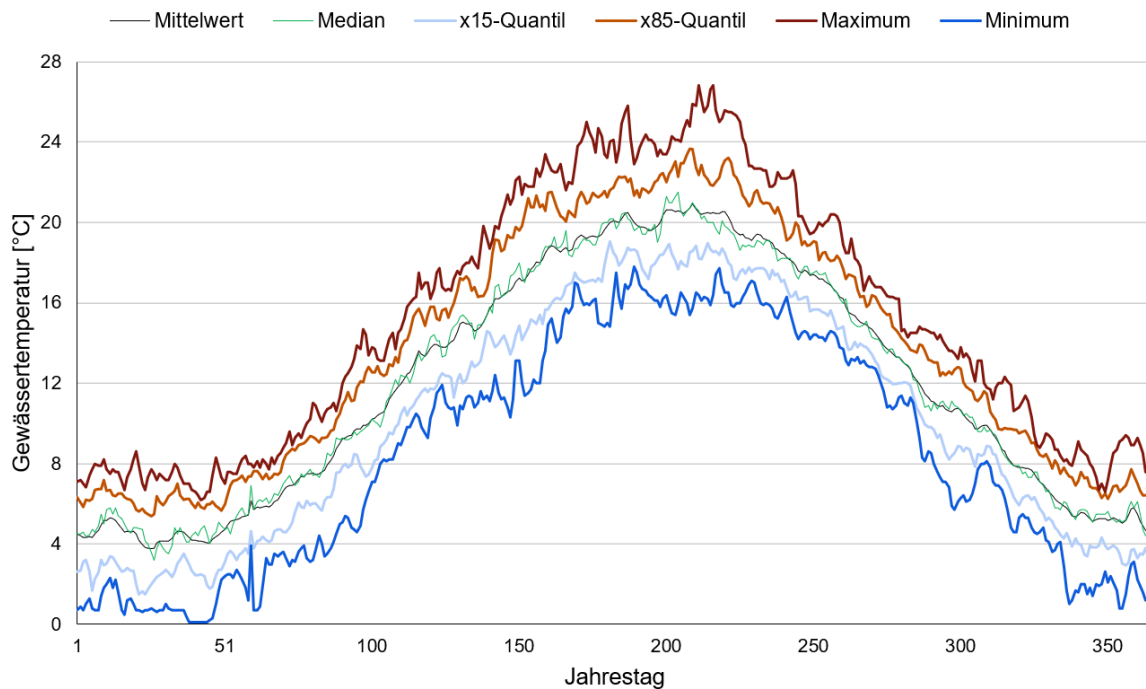


Abbildung 3-15: Jahresganglinie der mittleren, minimalen und maximalen täglichen Gewässertemperaturen mit Darstellung der x_{15} - und x_{85} -Quantile im Zeitraum 2003 bis 2021 der Werra an der Messstelle Witzenhausen nahe Hann. Münden

Die Daten wurden der Größe nach sortiert, um für die Werra eine geordnete Jahresganglinie abzubilden. Aus der geordneten Jahresganglinie geht die Anzahl der Tage hervor, welche für die thermische Nutzung relevante Minimaltemperaturen unterschreiten (Maniak, 2010). Zur näheren Betrachtung der Grenztemperatur ist in Abbildung 3-16 die geordnete Jahresganglinie dargestellt. Das 15 %-Quantil unterschreitet an 89 Tagen die +4 °C Grenztemperatur. Der Mittelwert unterschreitet die Grenztemperatur von +4 °C in der Werra an 5 Tagen, der Median an 7 Tagen.

Die Häufigkeit und Dauer geringer Wassertemperaturen sind ausschlaggebend für die Planung von hydrothermischen Anlagen (Caissie, 2006). Anhang 8 zeigt tabellarisch die jährlichen Unterschreitungshäufigkeiten der Messstelle Witzenhausen für Wassertemperaturen zwischen +1 und +5 °C jahresweise.

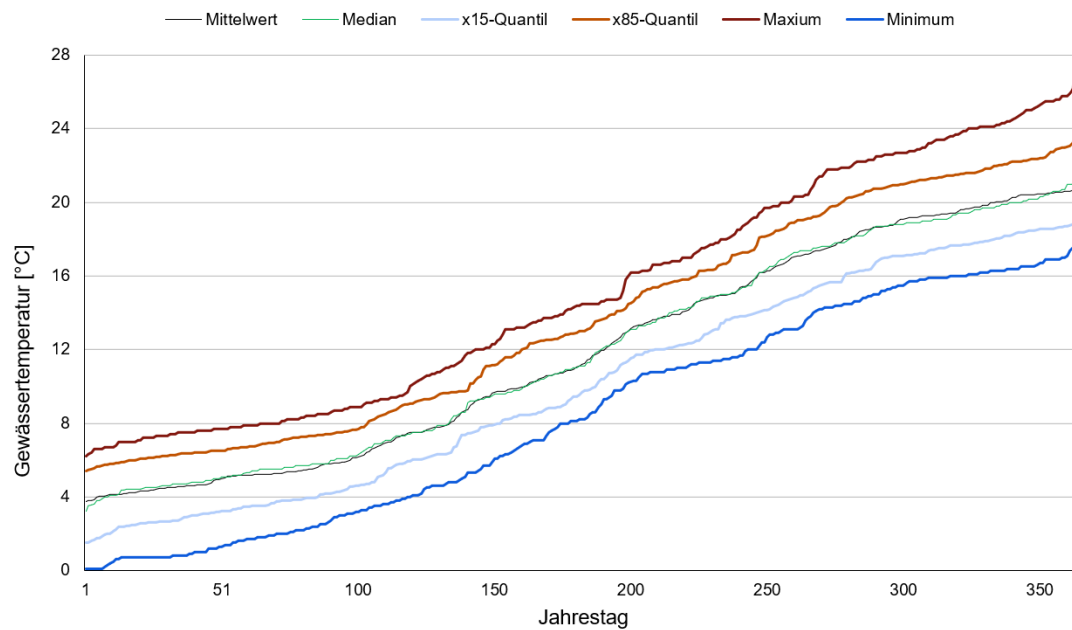


Abbildung 3-16: Geordnete Jahresganglinie der mittleren, minimalen und maximalen täglichen Gewässertemperaturen mit Darstellung der x15- und x85-Quantile im Zeitraum 2003 bis 2021 der Werra an der Messstelle Witzenhäuser Mündung

Die Anzahl der Tage, welche den betrachteten Schwellenwert unterschreiten, wurde für jedes Jahr aufsummiert und in der jeweiligen Zeile angegeben. Die jährlich durchschnittliche Anzahl an Unterschreitungstagen (\emptyset) wurde als Mittelwert mithilfe der zu Verfügung stehenden Jahre in Anhang 8 bestimmt. Diese werden mit den Unterschreitungshäufigkeiten, die sich aus der jeweiligen geordneten Jahresganglinie ergeben, verglichen. Dabei wird Folgendes deutlich: Die Werra unterschreitet im Schnitt 30 Tage im Jahr die Wassertemperatur von $+4\text{ °C}$ und für 7 Tage im Jahr die Wassertemperatur $+2\text{ °C}$.

Die Nutzung der WP ist bei Unterschreitung von $+4\text{ °C}$ Gewässertemperatur für einen Betrieb nicht zu empfehlen (Kammer, 2018). Bei der Untersuchung der Unterschreitungshäufigkeiten ist eine starke Abweichung zu den Unterschreitungstagen der geordneten Jahresganglinie festzustellen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in der geordneten Jahresganglinie eine gemittelte Temperatur über alle Betrachtungsjahre dargestellt. Bei der Ermittlung der Unterschreitungshäufigkeiten wurden die Daten pro Jahr ausgewertet, also nicht gemittelt, um zu erkennen, an wie vielen Tagen die untersuchten Gewässergrenztemperaturen unterschritten werden. Daraus lässt sich schließen, dass eine Betrachtung der Gewässertemperaturen der Jahrestage also nur begrenzt Sinn ergibt. Im Zuge des Klimawandels werden Wetterextreme immer wahrscheinlicher und somit steigt auch die Schwankung der Gewässertemperaturen. Um diese Schwankungen in Zukunft besser miteinbeziehen zu können, ist die Betrachtung von Extremwerten umso wichtiger, um eine bessere Aussagekraft über Unterschreitungshäufigkeiten zu erhalten.

Die Ermittlung der Wassertemperaturen ist relevant, da diese bei Unterschreitung von Grenztemperaturen zu Gefahren wie bspw. Vereisung (vgl. Kapitel 2.3) führen können. Um Anzahl der Tage zu ermitteln, an denen gewisse Grenztemperaturen in der Werra unterschritten werden, wurde monatsweise die durchschnittliche Anzahl der Unterschreitungstage in Abbildung

3-17 dargestellt. Hieraus geht hervor, dass der Januar, gemittelt über den Zeitraum, in dem verfügbare Daten vorliegen, der Monat mit den geringsten Gewässertemperaturen ist. Im Januar wird im Mittel an 11 Tagen die Gewässertemperatur von $+4\text{ °C}$ unterschritten und an 3 Tagen die Gewässertemperatur von $+2\text{ °C}$.

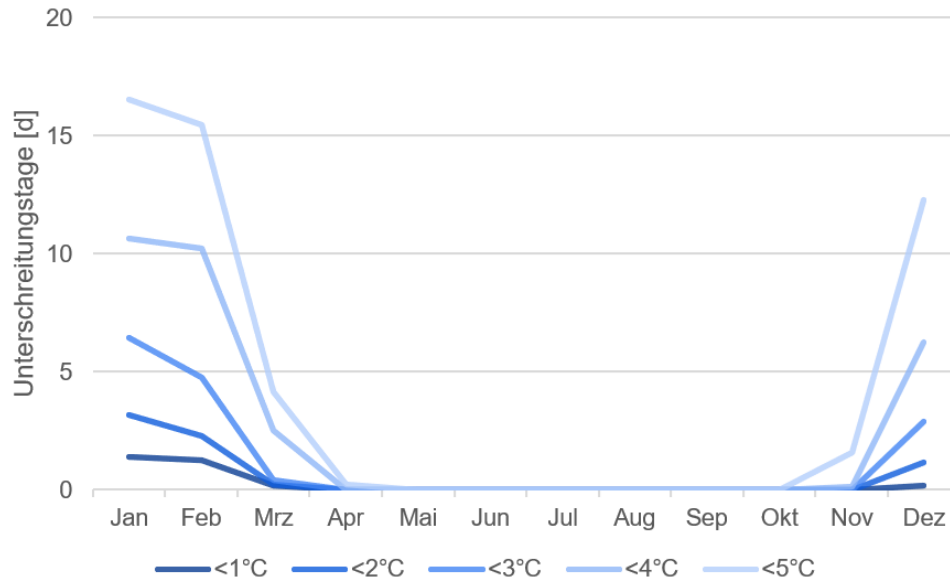


Abbildung 3-17: Anzahl Unterschreitungstage untersuchter Gewässergrenztemperaturen der Werra pro Monat

Die Anzahl der Unterschreitungstage der Grenztemperaturen pro Jahr werden in Abbildung 3-18 dargestellt. Es wird deutlich, dass an durchschnittlich 50 Tagen im Jahr die Grenztemperatur von $+5\text{ °C}$, an 30 Tage pro Jahr $+4\text{ °C}$, an 14 Tage $+3\text{ °C}$, an 7 Tage $+2\text{ °C}$ und an 3 Tagen die Gewässertemperatur von $+1\text{ °C}$ unterschritten wird. Diese Anzahl pro Jahr wurde in Abbildung 3-17 neben absoluten Zahlen auch prozentual dargestellt. Diese Unterschreitungstage in Prozent sagen aus, an wieviel Prozent der Tage im Jahr die Grenztemperaturen im Mittel unterschritten werden. Wird die minimale Gewässertemperatur für einen Anlagenbetrieb mit $+5\text{ °C}$ festgelegt, so kann die Anlage an 14 % der Tage im Jahr nicht betrieben werden. Bei $+4\text{ °C}$ wäre an 8 % im Jahr und bei $+2\text{ °C}$ an 2 % der Tage im Jahr kein Betrieb möglich. Diese Sperr – bzw. Ausfallzeiten der Anlage haben direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Je mehr Tage im Jahr die WPA ohne technische Gefahren betrieben werden kann, desto höher ist der hydrothermale Deckungsanteil der WP am Gebäudewärmebedarf.

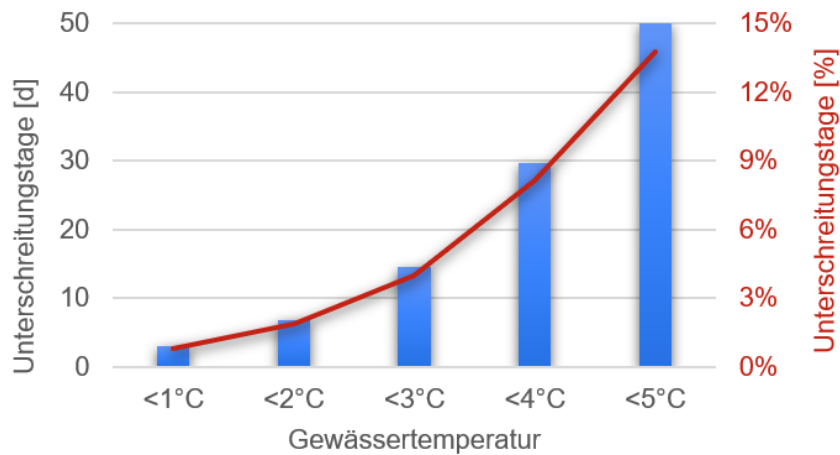


Abbildung 3-18: Durchschnittliche Anzahl der Unterschreitungstage der Gewässergrenztemperaturen im Jahr und daraus hervorgehende Unterschreitungstage in Prozent pro Jahr

Ein Vergleich der mittleren täglichen Wassertemperaturen der Werra mit den Lufttemperaturen am Projektstandort in Hann. Münden nach Abbildung 3-19 macht deutlich, dass die Wassertemperaturen im Mittel die Lufttemperaturen durchschnittlich um ca. +2 °C in Sommermonaten und um +3 °C in Wintermonaten überschreiten. Dies lässt sich einerseits aufgrund der Staustufen der Werra unmittelbar vor Erreichen Hann. Mündens erklären (vgl. Kapitel 3.1.3), da durch die Querbauwerke die Fließgeschwindigkeit verringert wird und somit die Faktoren Lichteinstrahlung, Wärmeabstrahlung, Wärmeaustausch mit der Luft etc. (vgl. Kapitel 2.1) das Gewässer stärker aufwärmen. Die Luftaußentemperaturen des Standortes wurden vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt (DWD, 2022).

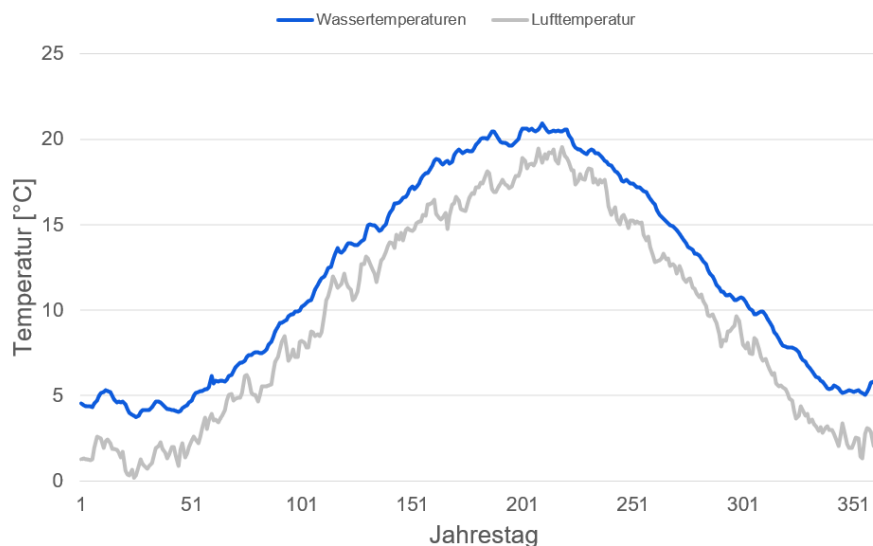


Abbildung 3-19: Mittlere Gewässertemperaturen der Werra an der Messstelle Witzenhausen im Vergleich zu mittleren Lufttemperaturen in Göttingen

Die Abflussdaten des Pegels „Letzter Heller“ wurden analog zu den Temperaturdaten ausgewertet. Die Abflussganglinie der Werra am Pegel „Letzter Heller“ ist in Abbildung 3-20 dargestellt. Die dazugehörigen hydrologischen Daten sind in Anhang 7 gegeben.

Am Pegel „Letzter Heller“ führt die Werra $14 \text{ m}^3/\text{s}$ im MNQ, $49 \text{ m}^3/\text{s}$ im MQ und $260 \text{ m}^3/\text{s}$ im MHQ. Aus der Abflussganglinie geht hervor, dass der Mittelwasserabfluss (Mittelwert, schwarze Linie) reguliert ist. Diese Regulierung bzw. Glättung des Mittelwasserabflusses ist auf das in Kapitel 3.1.3 beschriebene Laufwasserkraftwerk Werrawerk zurückzuführen. Die Stauhaltung mit Wasserkraftanlage dient Stromerzeugung und Abflussregulierung zur Gewährleistung des Hochwasserschutzes. Außerdem ist zu erkennen, dass die mittleren Abflüsse in den Wintermonaten ungefähr doppelt so hoch sind wie in den Sommermonaten. Diese Feststellung begründet sich damit, dass das natürliche Abflussgeschehen der Werra überwiegend von Regenfällen bestimmt ist, welche im Winter häufiger auftreten als im Sommer. Wegen der erhöhten Verdunstung im Sommer und dem erhöhten Niederschlag im Winter treten hohe Mittelwasserabflüsse im Winter und im Frühjahr auf, und niedrige Abflüsse im Spätsommer und Herbst (FGG Weser, 2022).

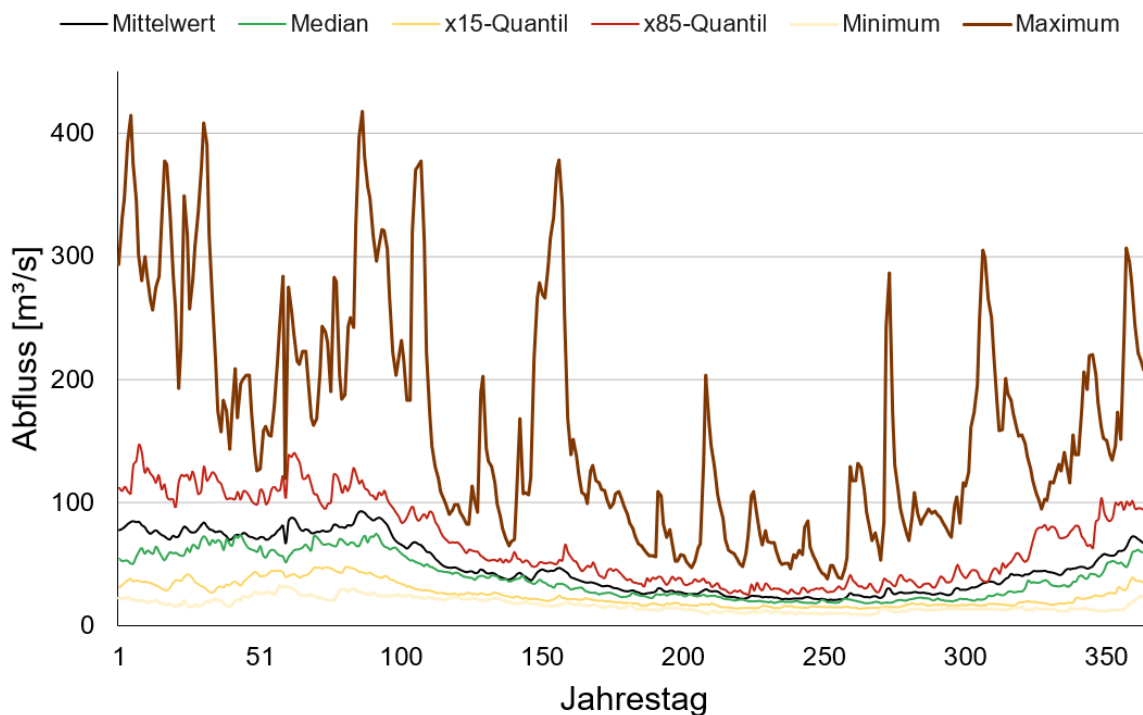


Abbildung 3-20: Abflussganglinie aus Daten zwischen 1985 bis 2021 der Werra vom Pegel „Letzter Heller“

3.2.3 Ergebnisse zu Wärmepotenzial und Jahresarbeitszahlen

Im Folgenden soll das Wärmepotenzial der Werra mithilfe der Wärmehaushaltsgleichung für Fließgewässer ermittelt werden (Kapitel 2.1, Gleichung 2.1). Dieses Wärmepotenzial stellt nicht das später nutzbare Wärmepotenzial dar, sondern den potenziellen natürlichen Wärmehalt, über den die Werra verfügt. Die benötigte nutzbare Wärmemenge wird in Kapitel 5 berechnet. Außerdem soll die Wirtschaftlichkeit einer potenziellen WPA anhand der Leistungskennzahlen und JAZ abgeschätzt werden.

Die Wärmespeicherkapazität wird mit $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ und die Dichte ρ des Flusswassers mit $1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$ als konstant angenommen. Für die Abflussdaten des Pegels „Letzter Heller“ an der Werra liegt eine Beobachtungsreihe von 37 Jahren vor. Es wird der gemittelte Abfluss des

jeweiligen Jahrestags für die Berechnungen herangezogen, um einen Verlauf des Wärmepotenzials darzustellen.

Das theoretische Potenzial der Werra, welches nach Gleichung 2.1 berechnet wurde und in Abbildung 3-21 dargestellt ist, zeigt, dass die Werra einen hohen Wärmeinhalt aufweist. Hierbei ist aber festzustellen, dass der Durchfluss für die Bestimmung des Wärmepotenzials der maßgebliche Faktor ist. Das lässt sich dadurch erklären, dass der mittlere Abfluss der Abflussganglinie sehr ähnlich zum Graph des Wärmepotenzials verläuft. Das Wärmepotenzial gibt keine genaue Aussage darüber, ob eine WP effizient betrieben werden kann, sondern ausschließlich, dass die Werra als Umweltmedium viel Umweltwärme bereitstellen kann. Wie genau dieses Potenzial allerdings genutzt werden kann, wird technisch in Kapitel 5 konkret am Projektstandort dargelegt.

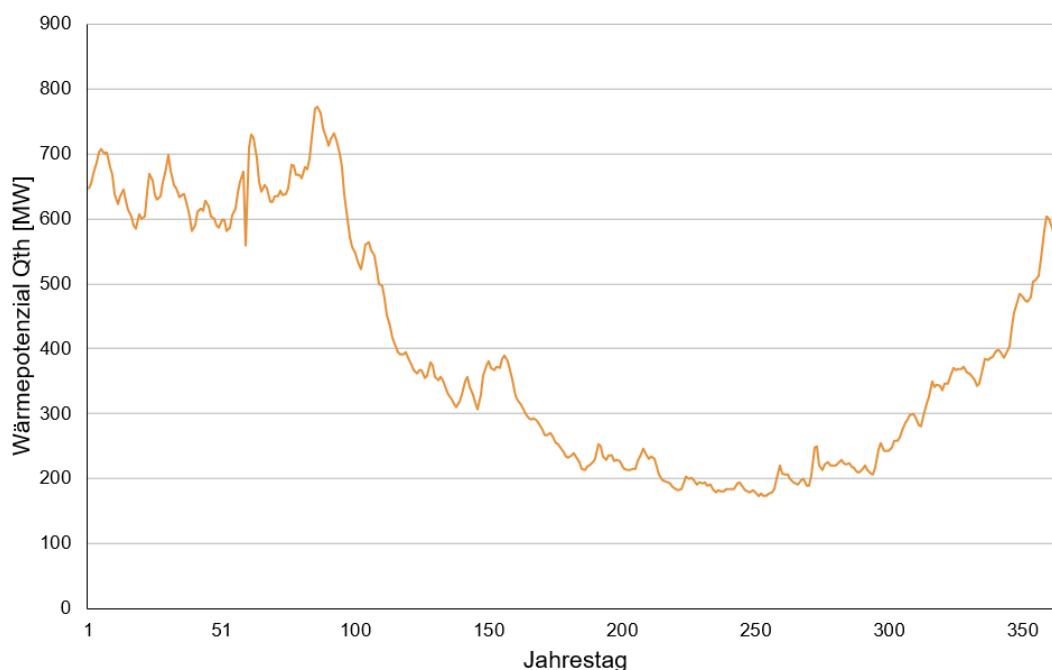


Abbildung 3-21: Theoretisches Wärmepotenzial der Werra im Mittel pro Jahrestag

Die Berechnung der JAZ dienen zur Bestimmung der Effizienz einer WPA für jeden Jahrestag. In Kapitel 2.2 werden die Gleichungen 2.8 und 2.9 vorgestellt, mit der die Leistungszahlen und daraus die JAZ bestimmt werden können. Da beim Wärmeübertrag von Flusswasser auf WÜ-Wärmeübertragungsverluste auftreten und die Wärme nicht vollständig an die WP weitergegeben werden kann, wird der Wert T_v eingeführt. Auf Grundlage von bisherigen Studien wurde die Annahme getroffen, dass ganzjährig 1 K Wärmeverlust auftritt (Gaudard, Schmid und Wüest, 2018). Da die Wärmepumpenleistung in Datenblättern von Wärmepumpenherstellern wie Bosch, Buderus, Vaillant, Viessmann etc. üblicherweise für großflächige Heizsysteme (z.B. FBH) mit der Vorlauftemperatur von mind. +35 °C und für kleinflächige Heizsysteme (Radiatoren) mit +55 °C angegeben werden, werden zwecks Standardisierung und unter Zuhilfenahme der Herstellerangaben die gleiche Spanne (35 °C bis 55 °C) für Vorlauftemperaturen angenommen (Vaillant, 2019).

Es ist davon auszugehen, dass HK wie sie in älteren Bestandsgebäuden in der Regel überdimensioniert sind (Günther et al., 2020). Das bedeutet, dass diese HK auch mit niedrigeren Vorlauftemperaturen (45 bis 55 °C) eine verlässliche RW bereitstellen können (Bongs et al., 2022). Der Warmwasserverbrauch ist nicht von der Außentemperatur abhängig und über das Jahr nahezu konstant (Bongs et al., 2022). Die Dimensionierung des Warmwasserspeichers sowie des Pufferspeichers kann wie die Berechnung der JAZ ebenfalls auf Basis der VDI 4645-1 vorgenommen werden (VDI 4645-1, 2018). Das Volumen des Warmwasserspeichers wird auf der Grundlage des höchsten Tages-Warmwasserbedarfs berechnet, während das Volumen des Pufferspeichers auf der Grundlage der Nennleistung der WP berechnet wird (Faktor: 20 l/kW_{WP}) (Bongs et al., 2022).

Die Dauer der Heizperiode wird in Kapitel 4.1. bestimmt. Die Leistungszahlen werden unter der Annahme, dass es sich bei den zu untersuchenden Gebäuden in Hann. Münden um Gebäude handelt, die hohe Vorlauftemperaturen benötigen, berechnet. Dies ist allerdings in Kapitel 4 bei genauerer Betrachtung der Gebäude zu überprüfen. Darauf folgt die Berechnung der Leistungszahl mit:

$$\varepsilon = \eta \cdot \frac{T_2}{T_2 - (T_1 - T_v)} \quad (3.1)$$

T_v : Reibungs – und Wärmeübertragungsverluste [K]

Die Berechnung der Leistungskennzahlen folgt nach Gleichung 3.1. Die ermittelten Leistungskennzahlen wurden in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und des Gütegrads η auf ihre Sensitivität untersucht (Abbildung 3-22). Je niedriger die benötigte Vorlauftemperatur für das Heizsystem und je höher der Gütegrad η , desto höher ist die Leistungszahl ε . Eine Verringerung der Vorlauftemperatur um 10 °C erhöht im Jahresmittel die Leistungszahl ε um ca. 1. Eine Erhöhung des Gütegrads η um 0,1 erhöht auch im Jahresmittel die Leistungszahl ε um ca. 1. Diese Korrelation zeigt, dass beide Parameter einen erheblichen Einfluss auf die Leistungszahl haben. Außerdem geht aus der Gleichung 3.1 bereits hervor, dass kein Eingangsparmeter potenziert eingeht, somit war diese Sensitivität bereits abzuschätzen. Außerdem ist die Amplitude des Verlaufs der Leistungszahlen umso höher, je niedriger die Vorlauftemperatur ist.

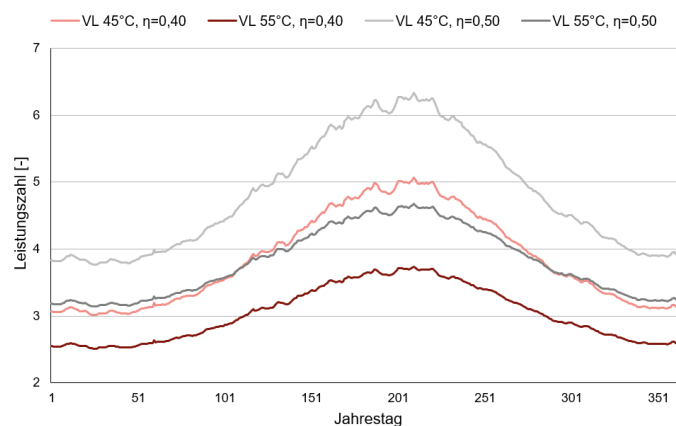


Abbildung 3-22: Leistungszahl ε in Abhängigkeit von Vorlauftemperatur und Gütegrad während eines durchschnittlichen Jahres im Betrachtungszeitraum

In Abbildung 3-23 die Häufigkeitsverteilung der Leistungszahlen in Abhängigkeit von Vorlauf-temperatur und Gütegrad dargestellt. Hieraus geht hervor, dass höhere Leistungszahlen nicht nur bei niedrigeren Vorlauftemperaturen erreicht werden, sondern diese auch häufiger im Jahresverlauf auftreten.

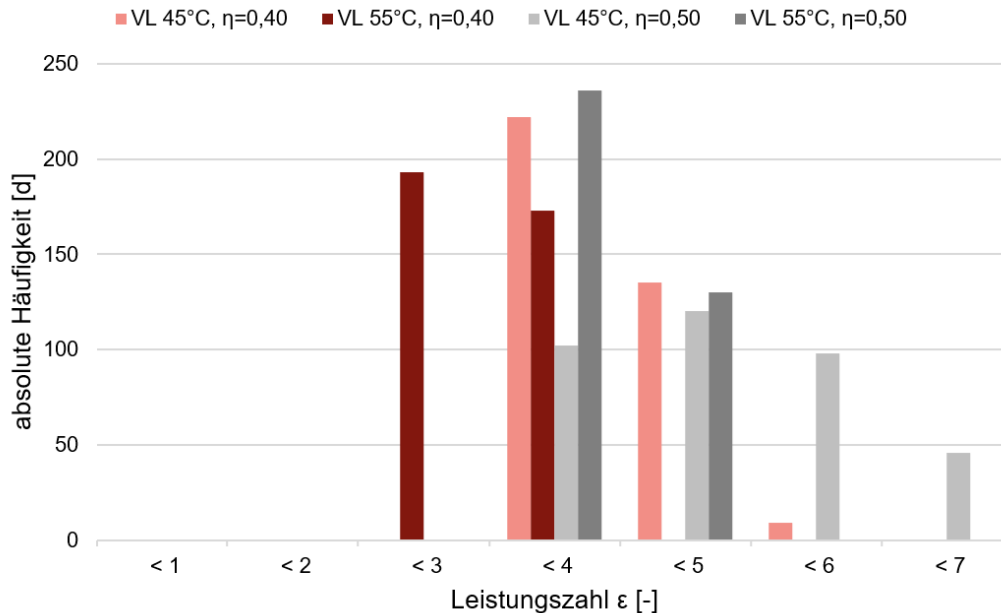


Abbildung 3-23: Häufigkeitsverteilung der Leistungszahl ϵ in Abhängigkeit der Vorlauf-temperatur und dem Gütegrad während eines durchschnittlichen Jahres im Betrachtungszeitraum

Die Ermittlung der JAZ erfolgt nach VDI 4650-1. Sie wird im Monatsmittel mit Gleichung 2.9 aus Kapitel 2.2 berechnet. Zuvor wurden folgende Annahmen getroffen:

Der Korrekturfaktor F_P entspricht dem Wert zur Berücksichtigung der Wärmequellenpumpe in der Vorplanung für WP bis 20 kW Leistung ohne Zwischenwärmeübertrager; $F_P = 1,14$ [-] (Anhang 13).

Korrekturfaktor $F_{\Delta\theta}$ wird für abweichende Temperaturen am Verflüssiger, auch als Kondensator bezeichnet, und bewegt sich abhängig von Temperaturdifferenzen bei der Prüfstandsmessung und dem Betrieb der Heizungsanlage um einen Wert von $1,000 \pm 0,1m$; Annahme: $F_{\Delta\theta} = 1$ [-] (Anhang 14).

Korrekturfaktor F_θ wird abhängig von den minimalen Eintrittstemperaturen von Gewässer- bzw. Soletemperaturen und Vorlauf-temperaturen bestimmt (Anhang 15).

Die ermittelten JAZ für die Vorlauf-temperaturen von 45 bis 55 °C sind in Abbildung 3-24 dargestellt. Die Werte der JAZ außerhalb der Heizperiode, welche in Kapitel 4 bestimmt wird, sind zu vernachlässigen, da die WP in diesem ausschließlich für die Warmwasserbereitstellung benötigt wird und nicht für die Raumheizung. Abbildung 3-24 macht deutlich, dass die JAZ eindeutig vom Gütegrad und der Vorlauf-temperatur abhängt. Weitere Parameter wie die Gewässertemperatur, der Wärmeverlust oder die Korrekturfaktoren nach VDI 4650-1 sind nicht veränderlich und wurden somit bei der Sensitivitätsanalyse nicht beachtet. Die JAZ steigen wesentlich bei der Herabsetzung der Vorlauf-temperatur. Wird angenommen, dass die

Vorlauftemperaturen bis auf 45 °C gesenkt werden und der Gütegrad einen Wert von 0,5 hat, ist ganzjährig eine JAZ von über 3 erreichbar (Abbildung 3-24).

Bei bisherigen Studien zum Wärmepumpenbetrieb im Gebäudebestand wurde dieser Zusammenhang auch festgestellt. Die prognostizierte JAZ von Sole-WP für die Raumwärmebereitstellung stieg um 40 % nach Bongs et. al., 2022 bei der Herabsetzung der Vorlauftemperatur von 75 °C auf 55 °C durch den Austausch von 7 % der HK eines Bestandsgebäudes. Wenn die Vorlauftemperaturen in der vorliegenden Arbeit von 55 °C auf 45 °C bei einem Gütegrad von 0,5 gesenkt werden, steigt die JAZ im Schnitt 26 %. Wird die Vorlauftemperatur von 75 °C auf 55 °C bei gleichem Gütegrad gesenkt, so steigt die JAZ um ca. 38 %. Die JAZ steigt im Schnitt pro Grad Celsius geringerer Vorlauftemperatur um ca. 2 %. Dieser Zusammenhang verdeutlicht die Relevanz der Absenkung der Vorlauftemperaturen für einen effizienteren und wirtschaftlicheren Betrieb der WP.

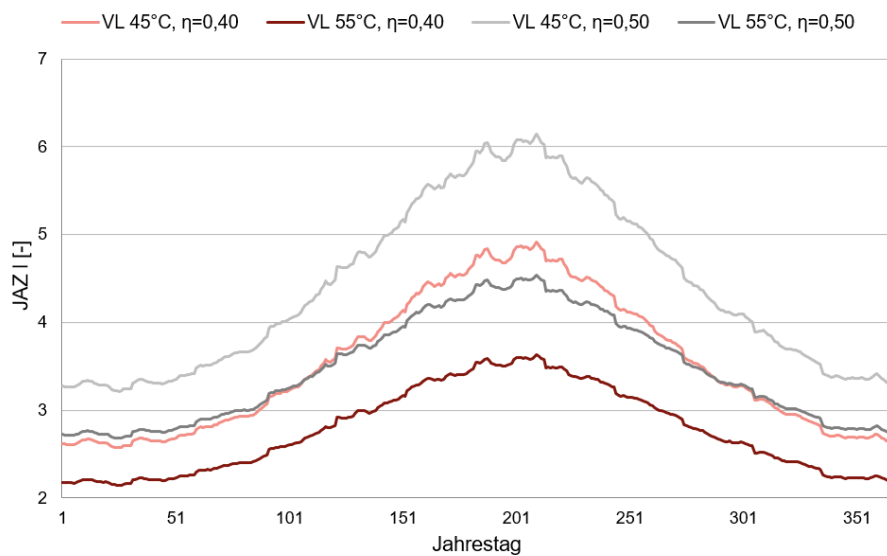


Abbildung 3-24: JAZ pro Jahrestag während eines durchschnittlichen Jahres im Betrachtungszeitraum

4 Wärmebedarfsermittlung konkreter Gebäude am Nadelwehr

Um festzustellen, inwieweit die Werra am Nadelwehr zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung umliegender Gebäude genutzt werden kann, werden Daten zum Wärmebedarf benötigt. Der Wärmebedarf stellt dar, wieviel Wärme ein Gebäude benötigt, um gewünschte oder geforderte Rauminnentemperaturen zu erreichen. Die Ermittlung des Wärmebedarfes für konkrete Gebäude, unmittelbar am Nadelwehr, wird anhand von Verbrauchsdaten, welche im Rahmen dieser Arbeit erhoben wurden, durchgeführt.

4.1 Grundlagen der Wärmebedarfsermittlung

Nach § 3 Absatz 1 Satz 31 a) des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) bezeichnet der Wärmebedarf „die Summe der zur Deckung der Heizung und Warmwasserbereitung jährlich benötigten Wärmemenge, einschließlich des thermischen Aufwands für Übergabe, Verteilung und Speicherung [...]“ (Gebäudeenergiegesetz, 2020). Unter dem Wärmebedarf (WB) wird also der Bedarf an Wärmeenergie zur Beheizung eines Gebäudes verstanden, welcher vom Heizungssystem bereitgestellt werden muss, um die Innentemperatur auf einem angenehmen Niveau zu halten. Diese Wärmemenge entspricht, unter Vernachlässigung der Wärmeverteilverluste innerhalb des Gebäudes, der Differenz aus Wärmeverlusten und -gewinnen des Gebäudes während einer Heizperiode. Falls Gebäude untersucht werden sollen, bei denen keine Verbrauchswerte vorliegen, so erfolgt die Berechnung des Wärmebedarfs nach DIN V 4108-6 (Tiator, 2013).

Mit dem Jahreswärmebedarf Q_h [kWh/a] lassen sich Aussagen zum energetischen Standard des Gebäudes und der wärmetechnischen Anlagen treffen. Für die Auslegung der Anlagenbestandteile wie WE, Heizflächen und Rohrleitungen, ist die Heizlast Φ_{HL} [kW] nötig (Tiator, 2013). Die Heizlast wird nach DIN EN 12831 berechnet. Ist der Wärmeverbrauch eines Gebäudes über einen längeren Zeitraum bekannt, lässt sich die Heizlast alternativ anhand der Heizstunden t_{heiz} , und des Wärmebedarfs ermitteln (Gleichung 4.1) (Loga et al., 2015).

$$\Phi_{HL} = \frac{Q_h}{t_{heiz}} \quad (4.1)$$

Φ_{HL} : Heizlast [kW]

Q_h : Wärmebedarf [kWh/a]

t_{heiz} : Heizstunden [h/a]

Im Durchschnitt sind wärmetechnische Anlagen ca. 1,8mal größer dimensioniert als notwendig (Jagnow, Wolff und Teuber, 2004). Dies hat erhöhte Investitionskosten zur Folge.

Während die Warmwassererwärmung das ganze Jahr über erfolgt, wird die Bereitstellung von RW überwiegend während der Heizperiode benötigt. Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) nimmt im Bericht „Deutsche Wohngebäudetypologie“ einen Energiebedarf für WW von 10 kWh/(m²·a) für EFH und 15 kWh/(m²·a) für MFH an. In einer Feldstudie des Fraunhofer-Instituts ISE aus dem Jahr 2020 zur Implementierung von insgesamt 56 WP mit der Wärmequelle Außenluft in Bestandsgebäuden wird im Mittel 85 % des thermischen Bedarfs zur

Raumheizung und 15 % zur Warmwasserbereitstellung genutzt (wobei mehr als die Hälfte der Gebäude vor 1979 errichtet wurde). Dieser Wert kann durch die DIN V 4701-10 (Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen) gestützt werden. Da den Nutzern der untersuchten Gebäude in Hann. Münden keine Daten zum Trinkwasserwärmeverbrauch vorliegen, sondern nur zum Gesamtwärmeverbrauch, wird im weiteren Verlauf der Arbeit die in der Literatur gegebene Verteilung zwischen Raumwärme- (85 %) und Warmwasserbedarf (15 %) angenommen (Günther et al., 2020).

Um die Wärmebedarfe ausgewählter Gebäude am Nadelwehr in Hann. Münden zu ermitteln, werden in dieser Arbeit Wärmeverbrauchsdaten verwendet. Die Daten wurden von den Betreibern bzw. den Eigentümern im Rahmen einer Umfrage (Anhang 16) erhoben.

Im Folgenden werden, basierend auf der VDI 4710-2 und 3807-1, grundlegende Definitionen und Berechnungen aufgezeigt, die für eine Ermittlung des Wärmebedarfes aus Verbrauchsdaten relevant sind (VDI 4710-2, 2007, VDI 3807-1, 2013) .

Heiztage

Heiztage sind Tage, an denen die über den Tag gemittelte Außenlufttemperatur unter der Heizgrenztemperatur liegt.

Heizgrenztemperatur

Die Heizgrenztemperatur ϑ_g ist der Wert der Tagesmitteltemperatur, unterhalb welchem Heizen erforderlich ist, um eine geforderte Norminnentemperatur zu erreichen. Die Summe der Tage, an denen die Tagesmitteltemperatur unter der Heizgrenztemperatur liegt, bildet die Heizperiode.

Tagesmitteltemperatur

Die Tagesmitteltemperatur ϑ_m ist das arithmetische Mittel von 24 Stundenmesswerten der Außenlufttemperatur (24-Stunden-Methode) an einem festgelegten Ort. Annäherungsweise kann die Tagesmitteltemperatur aus den drei Messwerten um 7:30 Uhr, 14:30 Uhr und 21:30 Uhr gebildet werden (VDI 4710-2, 2007). Dabei ist ϑ_u Temperatur in °C um u Uhr.

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_7 + \vartheta_{14} + 2\vartheta_{21}}{4} \quad (4.2)$$

ϑ_m : Tagesmitteltemperatur [°C]

ϑ_u : Temperatur um u Uhr [°C]

Gradtage

Gradtage [K·d] geben die Häufigkeit an, in der die Luftaußentemperatur unter der Rauminnentemperatur liegt (IWU, 2022). Zur Ermittlung der Gradtage eines Monats werden die Tage mit auftretenden Differenzen zwischen der Raumtemperatur und dem Tagesmittel der Außenlufttemperatur erfasst und aufsummiert. Die Gradtagszahl ist die Eingangsgröße für eine Energiebilanzrechnung, bei der innerhalb der Heizperiode solare und interne Gewinne mitberücksichtigt werden.

Heizgradtage

HGT [K·d] geben die Häufigkeit an, in der die Luftaußentemperatur unter der Heizgrenztemperatur liegt (IWU, 2022). Zur Ermittlung der HGT eines Monats werden die an Heiztagen auftretenden Differenzen zwischen der Heizgrenztemperatur und dem Tagesmittel der Außenlufttemperatur erfasst und aufsummiert. HGT sind Vergleichswerte, mithilfe derer für gemessene Heizwärmeverbräuche eine Klimabereinigung vorgenommen wird. Diese Klima- bzw. Außentemperaturbereinigung dient dazu, Jahre mit unterschiedlichen Jahrestemperaturverläufen zu vergleichen. Durch den Vergleich dieser Werte lässt sich für mehrere Heizperioden feststellen, ob sich ein Verbrauchswert klimabereinigt vermindert oder erhöht hat. Für einen Betrachtungszeitraum mit z Heiztagen werden die HGT aufsummiert.

HGT können nach VDI 4710-2 wie folgt berechnet werden:

$$HG = \sum_{n=1}^z (\vartheta_g - \vartheta_{m,n}) \cdot 1d \tag{4.3}$$

HGT: Heizgradtage [K · d]

ϑ_g: Heizgrenze [°C]

ϑ_{m,n}: mittlere Außentemperatur des Tages [°C]

z: Tage des Betrachtungszeitraums [d]

n: betrachteter Tag [d]

Zur vereinfachten Berechnung der HGT liegt die Heizgrenze für Altbauten bei 15 °C fest (Schild und Willems, 2022). In Abbildung 4-1 sind Gebäudetypen verschiedener energetischer Gebäudestandards dargestellt.

temperatur- und nutzflächen-spezifischer Wärmeverlust* [W/(m²K)]	spezifische Heizlast** [W/m²]	Raumtemperatur	19 °C		21 °C	
		innere Wärmequelle	5 W/(m²K)		2,5 W/(m²K)	
		energetischer Gebäudestandard	entspr. Randbedingungen nach DIN V 4106-6		entspr. Randbedingungen nach „Leifaden Energiebewußte Gebäudeplanung“	
Solarapertur*** Standard	Solarapertur*** hoch		Solarapertur*** Standard	Solarapertur*** hoch		
Heizgrenztemperaturen						
5,0	150	Altbau, schlechter Wärmeschutz	15°C	15°C	Jahr	Jahr
4,0	120	Altbau, Standard	15°C	15°C	Jahr	15°C
3,0	90	Altbau, teilweise verbessert	15°C	15°C	Jahr	15°C
2,5	75	Altbau, teilweise verbessert	15°C	12°C	15°C	15°C
2,0	60	Neubau 80er/90er Jahre	15°C	12°C	15°C	15°C
1,5	45	Neubau EnEV	12°C	10°C	15°C	12°C
1,0	30	Niedrigenergiehaus	10°C	10°C	12°C	10°C
0,7	21	„3-Liter-Haus“	10°C	10°C	12°C	10°C
0,5	15	Passivhaus	10°C	10°C	10°C	10°C

Zwischenwerte können linear interpoliert werden. Bei Änderung der Raumtemperatur ändert sich die Heizgrenztemperatur im gleichen Umfang.
 *) Wärmeverluste (Transmission und Lüftung) pro K Temperaturdifferenz und m² Energiebezugsfläche
 **) Heizlast bei 30 K Temperaturdifferenz pro m² Energiebezugsfläche, ohne Wärmegewinne
 ***) Solarapertur = effektive Fensterfläche für solare Gewinne (Fenstergröße, Verschattung, g-Wert, Rahmen/siehe Beispieltabelle)

Abbildung 4-1: Richtwerte für Heizgrenztemperaturen in Abhängigkeit des Gebäudestandards (Loga, 2003)

Die Gebäude, die im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie untersucht werden, sind unter anderem denkmalgeschützte Fachwerkhäuser (Altbauten) aus dem 18. und 19. Jahrhundert, die teilweise verbesserten und teilweise schlechten Wärmeschutz vorweisen. Abbildung 4-1 gibt Richtwerte zu Heizgrenztemperaturen in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard, der Raumtemperatur und der Solarapertur an. Es wird somit eine Heizgrenztemperatur von 15 °C angenommen.

Außentemperaturbereinigung

Um den Einfluss der jährlich schwankenden Außentemperaturen auf den Heizwärmeverbrauch zu berücksichtigen, wird eine Außentemperaturbereinigung durchgeführt, sodass eine Vergleichbarkeit der Heizwärmeverbräuche aus unterschiedlichen Jahren hergestellt werden kann (VDI 3807-1, 2013). Diese Außentemperaturbereinigung bezieht sich allerdings ausschließlich auf den Raumwärme- und nicht auf den Warmwasserverbrauch, da der Warmwasserbedarf nicht von den Außentemperaturen abhängt (Günther et al., 2020).

$$Q_{RW} = (Q_h - Q_{WW}) \cdot \frac{HG_m}{HG} \quad (4.4)$$

Q_{RW} : Bereinigter Raumwärmbedarf [kWh/a]

Q_{VWW} : Wärmebedarf für Warmwasserbereitstellung [kWh/a]

Q_h : Jahreswärmebedarf [kWh/a]

HGT_m : Langjähriges Mittel der Jahresheizgradtage [K·d/a]

HGT : Heizgradtage [K·d]

Jahresdauerlinie

Jahresdauerlinien geben Aufschluss über die erforderliche Leistung der Heizungsanlage und liefern somit die Rahmendaten für die Auslegung von Wärmerversorgungssystemen (Dötsch, Taschenberger und Schönberg, 2017). Die benötigte Wärmeleistung wird dabei auf der Ordinate, die Heizstunden oder Jahresstunden auf der Abszisse aufgetragen. Die Verbrauchswerte werden nach ihrer Größe in absteigender Reihenfolge dargestellt. Zur Ermittlung von Jahresdauerlinien werden standardisierte Verfahren (Typtagverfahren nach VDI 2067) oder Verfahren auf der Basis vom Monats-, Jahres- oder bestimmten Tagesverbrauchswerten angewendet. Die Fläche unter der Jahresdauerlinie stellt die Heizlast [kW] dar, die während eines Jahres von den WE aufgewendet werden muss. Die Heizlast wird in Grund- und Spitzenlast aufgeteilt (Abbildung 4-2). Die Grundlast ist durch eine annähernd konstante Leistung mit hoher Betriebsstundenzahl charakterisiert. Diese konstante Leistung wird bspw. für die Warmwasserbereitstellung benötigt. Die darüber hinausgehende Spitzenlast zeichnet sich durch eine hohe Leistungsspitze bei wenigen Jahresstunden aus (Dötsch, Taschenberger und Schönberg, 2017). Die Grundlast stellt in Abbildung 4-2 20 % der maximalen Spitzenlast. Im Hinblick auf den gesamten Wärmebedarf eines Jahres entspricht die Grundlast wesentlich mehr 20 %. Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine möglichst hohe Wärmeversorgung durch die WP mit möglichst hohen JAZ anzustreben. Die Investitionskosten für den Grundlastwärmeerzeuger (WP) sind im Vergleich zu denen eines Spitzenlastkessels wesentlich höher. Die Rentabilität bivalenter Anlagen ergibt sich aus den bis zu 50 % geringeren Wärmeerzeugungskosten der WP gegenüber einer konventionellen, fossilen Heizung. Ziel der Dimensionierung bivalenter Anlagen sollte es sein, mittels eines möglichst kleinen Grundlastwärmeerzeugers einen möglichst großen Teil der Heizarbeit zu leisten. Dabei sind die unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Grundlastwärmeerzeugung zu berücksichtigen (z.B. zu niedrige Gewässertemperaturen).

Bei bivalenten Systemen bewegt sich der Anteil für die Spitzenlast an der gesamten Heizlast zwischen 10 und 40 Prozent (Dötsch, Taschenberger und Schönberg, 2017).

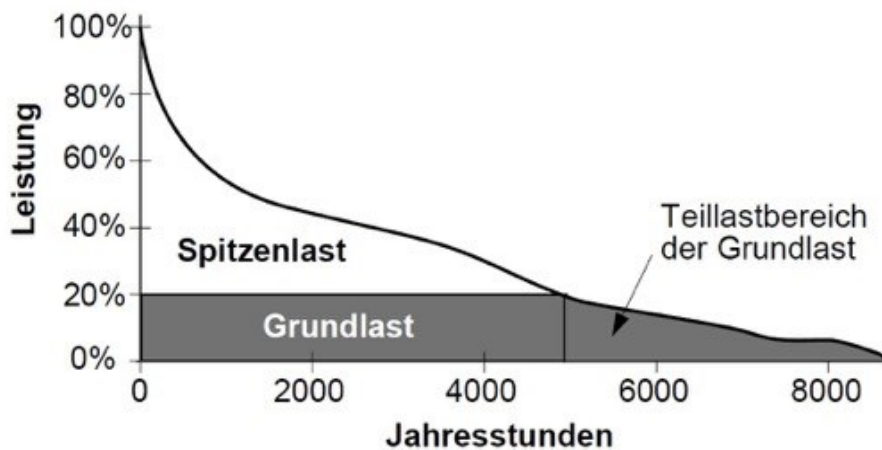


Abbildung 4-2: Aufteilung der Jahresdauerlinie in Grund- und Spitzenlast (Dötsch, Taschenberger und Schönberg, 2017)

Folgende Einsatzbedingungen⁷ sind bei der Auswahl von WE für die Grund- und Spitzenlast zu beachten (Tabelle 4-1):

Tabelle 4-1: Einsatzbedingungen von Grundlast- und Spitzenlast- Wärmerezeugern (Dötsch, Taschenberger und Schönberg, 2017)

Grundlast-Wärmerezeuger	Spitzenlast-Wärmerezeuger
<ul style="list-style-type: none"> • Ganzjähriger Betrieb • Hohe Betriebsstundenzahl • Konstante Wärmebereitstellung • Seltene Lastwechsel 	<ul style="list-style-type: none"> • Betrieb bei Spitzenlasten • Geringe Betriebsstundenanzahl • Häufige Lastwechsel • Sehr hohe Verfügbarkeit

Der Grundlast-WE stellt WW und RW bereit bis der Bivalenzpunkt erreicht wird (vgl. Kapitel 2.2). Bei Überschreitung des Bivalenzpunktes wird die Gebäudebeheizung durch den Spitzenlast-WE betrieben. Weiterhin kommt die WP für eine hohe Betriebsstundenzahl und konstante Wärmeversorgung ohne Heizlastwechsel zum Einsatz. Im Gegensatz dazu stellt der Spitzenlast-WE die RW zu Spitzenlastzeiten an nur wenigen Heiztagen im Jahr bereit. Je weniger der ZWE betrieben wird und je mehr die WP mit hohen JAZ betrieben werden kann, desto geringer sind die laufenden Kosten. Der Spitzenlast-WE muss eine variable Wärmebereitstellung mit häufigen Heizlastwechseln und hoher zeitlicher Verfügbarkeit gewährleisten. Das beinhaltet auch, dass der ZWE bei den geringsten Außenlufttemperaturen im Jahr Wärme effizient bereitstellen (Tiator, 2013).

⁷ Neben den technischen Anforderungen sind gesetzliche Restriktionen zu beachten, wie bspw. die Bundesimmissionschutzverordnung (BImSchV)

4.2 Wärmebedarfsanalyse

Zur Erfassung der Heizwärmebedarfe von Gebäuden werden in der Literatur zwei Ansätze verwendet:

1. Die Berechnung des Wärmebedarfs über ermittelte Transmissionswärmeverluste, Lüftungswärmeverluste, Warmwasserbedarf, solare und interne Gewinne (DIN 4108-6).
2. Die Berechnung über den tatsächlich gemessenen Verbrauch, der im Gegensatz zur Berechnung nach DIN 4108-6 auch, je nach Datendichte der Verbrauchswerte das Nutzerverhalten abbildet.

Bei alten, unsanierten Gebäuden tritt häufig eine Differenz zwischen dem berechneten Bedarf nach DIN und dem gemessenen Verbrauch auf (Heße, 2020). In dieser Arbeit werden jährliche Wärmeverbräuche außentemperaturbereinigt und tägliche Wärmebedarfswerte mithilfe der HGT berechnet (vgl. Kapitel 4.1), um darauf aufbauend in Abhängigkeit der Auslegung der WP den hydrothermalen Deckungsanteil zu bestimmen.

4.2.1 Erfassung der Gebäudedaten

Die Wärmeverbrauchsdaten, die als Grundlage für die Dimensionierung der WP dienen, wurden im Rahmen einer Umfrage ermittelt (Anhang 16). Hierbei wurde den Betreibern bzw. Eigentümern der Gebäude das Anliegen der Arbeit persönlich und schriftlich mitgeteilt und eine Checkliste zugesendet. Diese Checkliste beinhaltet die Abfrage zum Energieverbrauch der letzten Abrechnungsjahre für RW und Warmwasserbereitstellung, sowie Angaben zum Baujahr, der Wohn- bzw. Nutzfläche, den Sanierungsmaßnahmen in den letzten Jahren, sowie den eingesetzten Energieträgern und der Anlagentechnik. In der Altstadt Hann. Mündens wurden insgesamt vier Gebäude hinsichtlich ihrer Energieverbräuche untersucht (Abbildung 4-3).

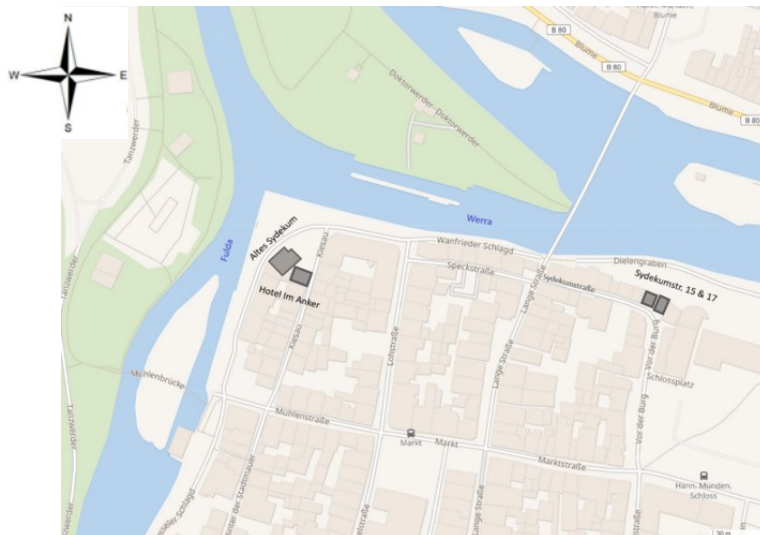


Abbildung 4-3: Überblick der untersuchten Gebäude (eigene Darstellung auf Grundlage von OpenStreetMap)

Bei den vier Gebäuden handelt es sich um das Veranstaltungsgebäude „Loge Pythagoras“ (Altes Sydekum), das Hotel „Im Anker“, ein Gebäude mit Wohn- und Gewerbenutzung

(Sydekumstr. 15) und ein Bürogebäude (Sydekumstr. 17) (Abbildung 4-3). Die Gebäude der Sydekumstr. 15 und 17 sind Eigentum von Herrn Fehrensens. Herr Fehrensens ist Initiator der Planung der „WerraWelle“ am Nadelwehr und hat Verbrauchsdaten zur Verfügung gestellt. Ein weiteres Gebäude, das Hotel „Alter Packhof“, sollte auch untersucht werden. Im Folgenden werden die untersuchten Gebäude einzeln beschrieben und die Verbräuche dargelegt.

Altes Sydekum

Beim „Alten Sydekum“ (Abbildung 4-4) handelt es sich um ein denkmalgeschütztes Gebäude. Es befindet sich am nordwestlichsten Punkt der Altstadt Hann. Mündens an der Schlagdspitze, die von der Bremer und der Wanfrieder Schlagd gebildet wird (Abbildung 4-3). Der mehrgeschossige, quadratische Hausaufbau wurde 1729 auf die untere, rund gemauerte, ehemalige Burganlage errichtet. Seit 1872, mit Unterbrechung in Zeiten des Nationalsozialismus, befindet es sich im Eigentum der Freimaurerloge „Pythagoras zu den drei Strömen“. 1994 fand eine Sanierung der Gebäudehülle statt (Pezold, 2001). Dabei wurden u.a. die Fenster saniert (Stenzel, 2022). Das Logenhaus wird für den Veranstaltungsbetrieb genutzt (Pflum, 2022). Es befindet sich außerdem eine Wohnung im Gebäude. Für diese Wohnung wurden allerdings keine Wärmeverbrauchsdaten zur Verfügung gestellt. Die Nutzfläche beträgt 224 m². Der Kontakt zum Schatzmeister Hr. Stenzel der Loge wurde durch Herrn Pflum (Leitung Fachdienst Stadtplanung Hann. Münden) hergestellt.

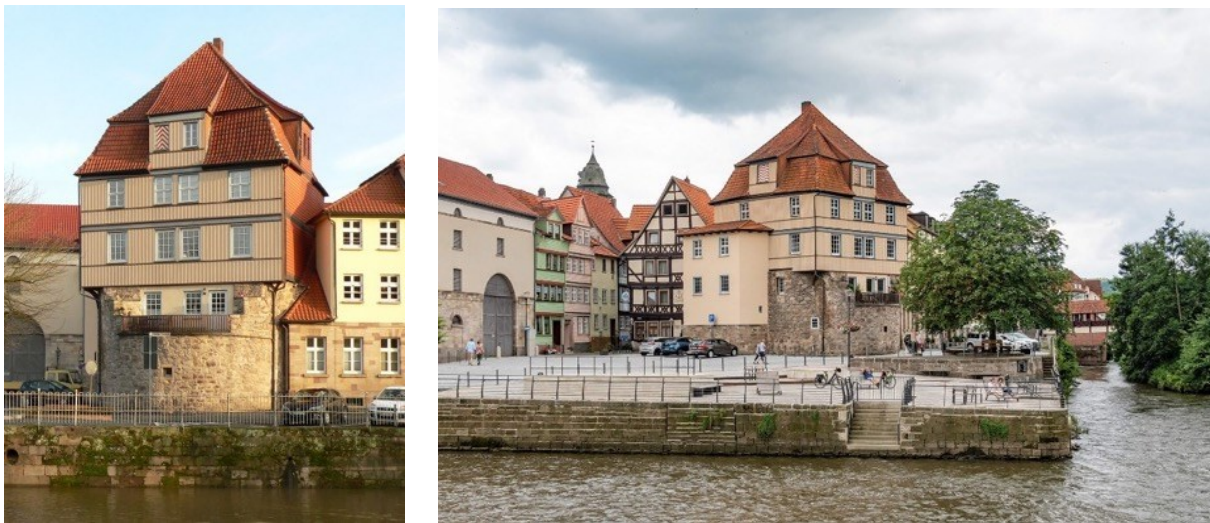


Abbildung 4-4: „Altes Sydekum“ an der Bremer Schlagd direkt angrenzend zum Mühlenarm der Fulda und ca. 50m entfernt vom Nadelwehr; Links: Ansicht von Mühlenarm (Fulda); Rechts: Ansicht vom Doktorwerder (Werra) auf „Altes Sydekum“ und Hotel „Im Anker“ (Hindemith, 2016).

Die Verbrauchsdaten für RW und Warmwasserbereitstellung (2012 bis 2021) wurden erhoben (Anhang 17). Eine Aufteilung von Raumwärme- und Warmwasserverbrauch ist nicht gegeben. Die Loge wird mit Gas und Holz (Kamin) beheizt (Stenzel, 2022).

Hotel „Im Anker“

Das Hotel „Im Anker“ befindet sich südöstlich angrenzend an das zuvor beschriebene alte Sydekum (Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4). Es liegt sich unmittelbar an der Schlagdspitze und ist ca. 50m von der Werra (unterhalb des Nadelwehrs) und ca. 50m vom Mühlenarm der Fulda entfernt. Das Baujahr des Gebäudes ist nicht bekannt.

Der Geschäftsführer des Hotels konnte Abrechnungsdaten der zuständigen Versorgerbetriebe aus den Jahren 2020 und 2021 zur Verfügung stellen (Anhang 17).

Das Hotel „Im Anker“ wird mit einer Gasheizung betrieben. Ein Gespräch mit einem Mitarbeiter des zuständigen Schornsteinfegerbetriebs während der Ortsbegehung ergab, dass Ende 2019 sowohl im „Alten Sydekum“ als auch im Hotel „Im Anker“ eine neue Gasheizung eingebaut wurde. Rückfragen nach genaueren Daten der Heizleistung des Gaskessels und weiteren gebäudespezifischen Daten wurden aufgrund des Datenschutzes nicht beantwortet.



Abbildung 4-5: Frontansicht Hotel „Im Anker“ während der Ortsbegehung im Oktober 2022

Da ausschließlich Verbrauchsdaten aus den Jahren 2020 und 2021 vorliegen ist davon auszugehen, dass die Verbräuche im Vergleich zu den Vorjahren bedeutend geringer sind. Eine Minderung des Verbrauchs ist auf die Corona Pandemie zurückzuführen, da davon auszugehen ist, dass während 2020 und 2021 weniger Gäste bewirtet werden konnten.

Sydekumstraße 15 und 17

Die Gebäude sind sowohl gewässerseitig vom Dielengraben als auch altstadtseitig von der Sydekumstraße aus zugänglich (Abbildung 4-6 u. Abbildung 4-7). Bei den Gebäuden handelt es sich um Fachwerkhäuser, die im 18. Jahrhundert errichtet wurden. Beide Gebäude werden mit Gas und Holz (Kamin) beheizt. Beide Gebäude werden sowohl gewerblich (Büro) als auch zu Wohnzwecken genutzt. Die Wohn- bzw. Nutzflächen, sowie der Wärmeverbrauch sind in Anhang 18 einsehbar.



Abbildung 4-6: Aufnahme des Gebäudes in der Sydekumstr. 15; Links: Ansicht der Seite der Gebäude zum Dielengraben von Werrabrücke aus; Rechts: Gebäude von Sydekumstraße aus fotografiert (Kubrak, 2016).



Abbildung 4-7: Ansicht Sydekumstr. 17 vom Dielengraben aus (gewässerseitig) (Fehrensens, 2022)

4.2.2 Heizgradtage und Heizperiode

Für eine Vergleichbarkeit der Wärmeverbräuche wurden Außentemperaturbereinigungen vorgenommen. Dafür sind mittlere Außentemperaturen im Untersuchungsgebiet notwendig. Diese Tagesmitteltemperaturen konnten vom DWD (Deutscher Wetterdienst) zur Verfügung gestellt werden. Wetterdaten wurden für das langjährige Mittel der HGT von 1991 bis 2021 (30-jähriger Zeitraum) zur Verfügung gestellt. Von 1991 bis 2012 wurden die drei Wettermessstationen Kassel, Göttingen und Wesertal-Lippoldsberg verwendet (siehe Tabelle 4-2) und in den Jahren 2013 bis 2021 die Stationen Göttingen, Wesertal-Lippoldsberg und Eschwege (siehe Tabelle 4-3). Diese Messstationen wurden jeweils nach der Entfernung zu Hann. Münden gewichtet, um möglichst genaue Außentemperaturdaten und HGT in Hann. Münden zu erhalten. Die Berechnung der Grad- oder HGT kann mit dem IWU-Tool „Gradtagzahlen Deutschland“ erfolgen (IWU, 2023).

Tabelle 4-2: Gewichtete Messstationen zur Bestimmung der HGT in den Jahren 1991 bis 2012

Gewichtung	ID	Wetterstation	Bundesland	Breitengrad	Längengrad	Höhe über NN
35%	2532	Kassel	Hessen	51,2963	9,4424	231 m
34%	1691	Göttingen	Niedersachsen	51,5002	9,9507	167 m
30%	5279	Wesertal-Lippoldsberg	Hessen	51,6194	9,5749	176 m

Tabelle 4-3: Gewichtete Messstationen zur Bestimmung der HGT in den Jahren 2013 bis 2021

Gewichtung	ID	Wetterstation	Bundesland	Breitengrad	Längengrad	Höhe über NN
39%	1691	Göttingen	Niedersachsen	51,5002	9,9507	167 m
35%	5279	Wesertal-Lippoldsberg	Hessen	51,6194	9,5749	176 m
26%	1297	Eschwege	Hessen	51,2041	10,0138	156 m

Die berechneten HGT für Hann. Münden können anhand verfügbarer Referenzwerte für verschiedene Referenzstationen aus VDI 4710-2 überprüft werden. Es wurden die berechneten HGT von Hann. Münden mit denen aus Kassel verglichen. Die HGT von Kassel aus der VDI 4710-2 sind im Schnitt ca. 10 % höher als die berechneten für Hann. Münden. Dies liegt u.a. daran, dass ein anderer Betrachtungszeitraum zu Grunde liegt (1976 bis 2006). Die höheren HGT deuten auf niedrigere Temperaturen zwischen 1976 bis 2006 im Vergleich zu 1991 bis 2021 hin. Dies erscheint aufgrund der steigenden Lufttemperaturen durch den Klimawandel schlüssig.

Tabelle 4-4: HGT Hann. Münden und Kassel im langjährigen Mittel; Links: 1991 bis 2021; Rechts: Referenzstation aus VDI 4710-2: 1976 bis 2006

Hann. Münden	Heizgradtage [K·d]	Kassel														
		Heizgrenze in °C / Heating temperature limit, in °C	6	8	10	12	14	15	16	18	19,4	20	22	24	26	28
Jan	421	Jan	179	241	303	365	427	458	489	551	594	613	675	737	799	861
Feb	368	Feb	135	191	247	303	359	387	415	471	510	527	583	639	695	751
Mrz	310	Mrz / Mrch	53	112	174	236	298	329	360	422	466	484	546	608	670	732
Apr	173	Apr	0	13	52	112	172	202	232	292	334	352	412	472	532	592
Mai	83	Mai / May	0	0	0	5	35	65	96	158	201	220	282	344	406	468
Jun	18	Jun	0	0	0	0	0	0	9	59	101	119	179	239	299	359
Jul	5	Jul	0	0	0	0	0	0	0	16	58	76	138	200	262	324
Aug	6	Aug	0	0	0	0	0	0	1	28	68	87	149	211	273	335
Sep	52	Sep	0	0	0	0	14	35	63	123	165	183	243	303	363	423
Okt	166	Okt / Oct	0	4	30	75	137	168	199	261	304	323	385	447	509	571
Nov	275	Nov	48	106	166	226	286	316	346	406	448	466	526	586	646	706
Dez	380	Dez / Dec	142	204	266	328	390	421	452	514	557	576	638	700	762	824
		Jahr gesamt / Yearly total	556	869	1238	1649	2117	2380	2660	3300	3806	4025	4755	5485	6215	6945

Die Heizperiode bezeichnet die Summe an Tagen, an welchen die mittlere Luftaußentemperatur unter der Heizgrenze liegt (Abbildung 4-8). Die Heizperiode beginnt in Hann. Münden bei einer Heizgrenze von 15 °C im Durchschnitt am 15.09. und geht bis zum 31.05. des folgenden Jahres. Aus Abbildung 4-8 geht zudem hervor, dass auch außerhalb der Heizperiode die Heizgrenztemperatur von 15 °C zweimal um 0,5 °C unterschritten wurde. Diese minimale Unterschreitung wird im weiteren Vorgehen vernachlässigt, da diese nur an zwei Tagen im Jahr aufgetreten ist.

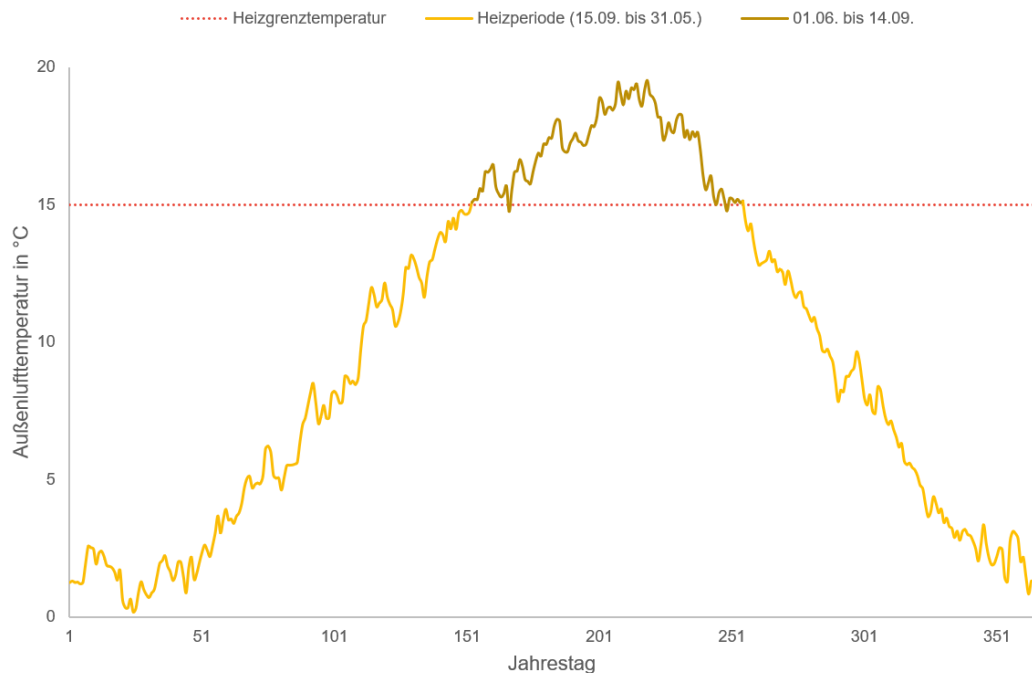


Abbildung 4-8: Tagesmitteltemperaturen in Hann. Münden von 1991 bis 2020 zur Bestimmung der Heizperiode bei einer Heizgrenze von 15 °C

Die Heizperiode zeichnet sich auch anhand der berechneten HGT für das Untersuchungsgebiet ab, da diese zwischen Juni bis August nahe null sind. Da die HGT angeben, welche Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Heizgrenze besteht, zeigt der Wert in $K \cdot d$ an, wieviel pro Monat geheizt werden muss. In Monaten mit einem höheren HGT-Wert muss also mehr geheizt werden als mit niedrigerem Wert. Aus Tabelle 4-4 geht hervor, dass mehr HGT im Mai vorliegen als im September. Mit einem HGT-Wert von jeweils mindestens 275 $K \cdot d$ weisen die Monate November bis März die größten Heizbedarfe auf. Während dieser Periode fallen 78 % der jährlichen HGT an.

4.2.3 Auswertung des Wärmebedarfs der untersuchten Gebäude

Zur Bestimmung des täglichen und monatlichen Wärmebedarfs der untersuchten Gebäude werden im ersten Schritt die erhobenen Verbrauchsdaten außentemperaturbereinigt. Hierbei wird allerdings nur der Raumwärmebedarf und nicht der Warmwasserbedarf bereinigt (Kapitel 4.1). Da keine konkreten Daten für den Warmwasserverbrauch erhoben werden konnten, wird die Annahme aus Kapitel 4.1. verwendet, dass 85 % des Wärmebedarfs der Gebäude auf den Raumwärmebedarf und 15 % auf den Warmwasserbedarf zurückgehen. Darauffolgend wird der Raumwärmebedarf mithilfe der täglichen HGT aus den erhobenen jährlichen Verbrauchsdaten bestimmt. Hierbei werden die bestimmten HGT pro Jahrestag durch die Gesamtzahl der HGT des Jahres im langjährigen Mittel geteilt, um den täglichen Wärmebedarf zu erhalten (Anhang 23 bis Anhang 26). Die täglich berechneten Wärmebedarfswerte werden im Folgenden monatsweise aufsummiert, um die ermittelten Wärmebedarfswerte anschaulicher darzulegen.

Altes Sydekum

Für das Gebäude „Altes Sydekum“ ist der mittlere Wärmebedarf pro Jahr und Monat. in Anhang 19 abgebildet. Das Gebäude hat einen spezifischen Wärmebedarf von $82 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Die HGT in den Monaten Juni bis August sind als so gering einzustufen, dass sie für die Berechnung des Raumwärmebedarfs nicht berücksichtigt werden. Die Heizperiode ist vom 15.09. bis 31.05. eines Jahres definiert (vgl. Kapitel 4.2.2). Der mittlere monatliche Wärmebedarf wird in Abbildung 4-9 monatsweise gezeigt. Der jährliche Gesamtwärmebedarf des Veranstaltungsgebäudes „Loge Pythagoras“ liegt bei ca. 18.000 kWh/a .

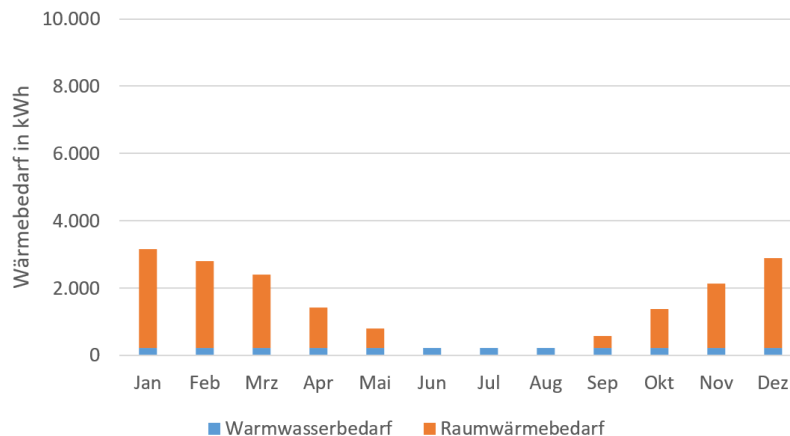


Abbildung 4-9: Mittlerer monatlicher Wärmebedarf „Altes Sydekum“

Hotel „Im Anker“

Vom Betreiber des Hotels „Im Anker“ wurde keine Nutzfläche angegeben. Die Gebäudegrundfläche konnte im Rahmen der Ortsbegehung mit 120 m^2 abgeschätzt werden. Im Hotel werden vier Geschosse beheizt, womit sich eine Nutzfläche von 480 m^2 berechnen lässt. Die Berechnung des Wärmebedarfs des Hotels ist in Anhang 20 aufgeführt. Das Hotel hat einen spezifischen Wärmebedarf von $130 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ und einen mittleren jährlichen Wärmebedarf von 62.000 kWh/a .

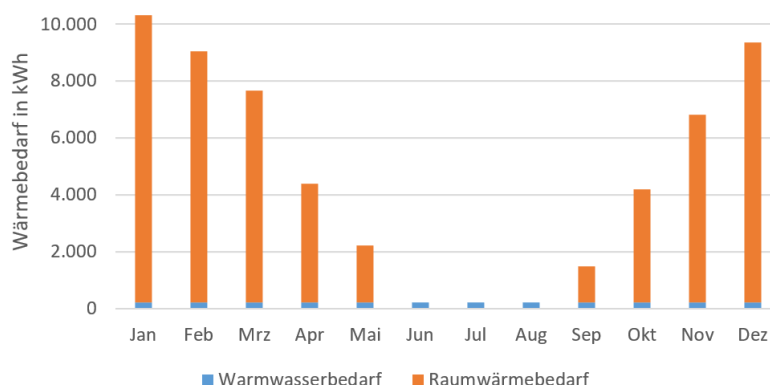


Abbildung 4-10: Mittlerer monatlicher Wärmebedarf Hotel „Im Anker“

Sydekumstraße 15 und 17

Anhang 21 bzw. Anhang 22 zeigen die Wärmebedarfe für die Gebäude in der Sydekumstr. 15 bzw. 17 tabellarisch. Der spezifische Wärmebedarf für das Gebäude der Sydekumstr. 15 beträgt $187 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Der mittlere jährliche Wärmebedarf beläuft sich auf $41.000 \text{ kWh}/\text{a}$.

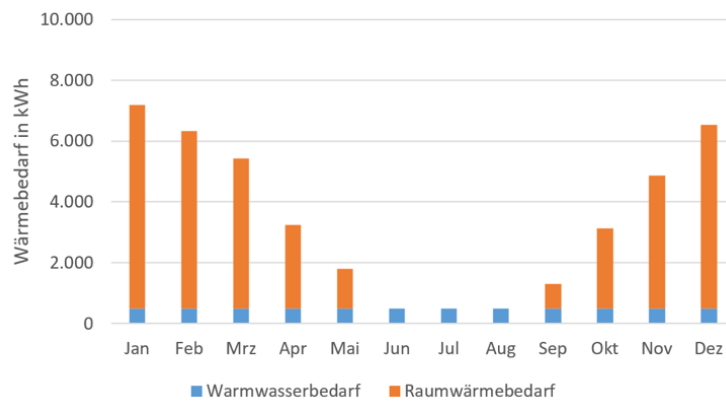


Abbildung 4-11: Mittlerer monatlicher Wärmebedarf Sydekumstr. 15

Mit Blick auf die absoluten mittleren jährlichen Zahlen ähnelt der Gesamtwärmebedarf des Gebäudes in der Sydekumstraße 17 dem des „Alten Sydekums“ mit ca. $18.000 \text{ kWh}/\text{a}$. Der spezifische Wärmebedarf für das Gebäude der Sydekumstr. 17 beträgt $82 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

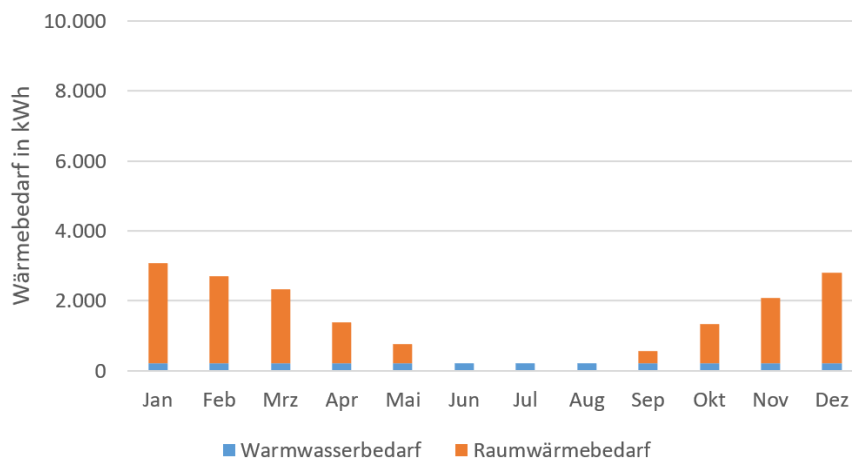


Abbildung 4-12: Mittlerer monatlicher Wärmebedarf Sydekumstr. 17

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die dargestellten Ergebnisse der Wärmebedarfsanalyse der vier untersuchten Gebäude in Hann. Münden in Kapitel 4.2. sowie den Anhang 17 bis 22 zeigen, dass einige Unterschiede bei den Wärmebedarfswerten existieren. Die Spanne der spezifischen Wärmebedarfswerte reicht von $82 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bis $187 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Die großen Unterschiede im Wärmebedarf können auf das Nutzerverhalten, die Gebäudehülle oder die Bauform des Gebäudes zurückzuführen sein. Außerdem wird in zwei von vier Gebäuden zusätzlich mit Holz geheizt. Die Kaminheizung wurde in Kapitel 4.2. nicht berücksichtigt, da hierzu keine Verbrauchswerte

vorliegen. Der mittlere spezifische Wärmebedarf in Deutschland bei ca. $150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Graichen et al., 2012, BMWi, 2015). Drei der untersuchten Gebäude liegen unter diesem Vergleichswert, eines genau bei 130 und das andere überschreitet diesen. Entgegen den Erwartungen haben die untersuchten Gebäude trotz ihres Alters, verglichen zum Bundesdurchschnitt, einen relativ niedrigen Wärmebedarf. Dies liegt einerseits an den im Jahr 2019 durchgeführten Sanierungsmaßnahmen der Heizungsanlagen bei zwei der Gebäude. Andererseits wird ein Gebäude (Altes Sydekum) ausschließlich bei Veranstaltungen genutzt, also nur wenige Wochen im Jahr, weswegen sich ein geringerer Wärmebedarf ergibt. Beim Hotel „Im Anker“ wurden ausschließlich Verbrauchsdaten während der Corona Pandemie verwendet. Es ist davon auszugehen, dass die erhobenen Wärmeverbrauchsdaten nur einen Bruchteil der tatsächlich im Vollbetrieb des Hotels benötigten Wärme abbilden. Das Gebäude in der Sydekumstr. 15 wird teilweise zu Gewerbezwecken verwendet. In der Regel sind die Wärmeverbrauche in Bürogebäuden geringer als in Wohngebäuden, da die Anforderungen an die Innentemperatur und die Luftqualität in Büros oft niedriger sind als in Wohngebäuden (Miara, 2022).

Weiterhin ist es durch eine Abschätzung der Grundfläche des Hotels „Im Anker“ wahrscheinlich, dass eine Abweichung zwischen dem Berechnetem und dem tatsächlichen spezifischen Wärmebedarfswert vorliegt. Dies mindert die Aussagekraft des spezifischen Wärmebedarfs des Hotels.

Die Aussagekraft der berechneten Wärmebedarfswerte ist teilweise als gering einzustufen, da die Betrachtungszeiträume und somit die Datendichte sich auf wenige Jahre begrenzen. Im Schnitt wurden zur Bestimmung des Wärmebedarfs in allen Gebäuden 6,5 Jahre betrachtet. Weiterhin wurde im Rahmen der Umfrage versucht, an monatliche Verbrauchswerte zu gelangen, um die Berechnung anhand der HGT zu überprüfen. Dies war nicht möglich, da die Ansprechpartner der Gebäude ausschließlich jährliche Abrechnungen von den Versorgungsbetrieben erhielten.

5 Konzeptionierung geeigneter Wärmeentnahmesysteme

Aufbauend auf den in Kapitel 4.2 ermittelten Wärmebedarfen der untersuchten Gebäude in Hann. Münden wird in diesem Kapitel ein konkretes Konzept zur Gestaltung eines geeigneten Wärmeentnahme-Systems erarbeitet. Dies schließt die Wahl geeigneter Standorte für die Wärmeentnahme mit ein. Es werden zwei Varianten zur Wärmeentnahme entwickelt, anschließend geprüft und bewertet.

5.1 Standortwahl

Anknüpfend an die in Kapitel 3 vorgestellten hydrothermalen Rahmenbedingungen und standortspezifischen Anforderungen werden im Folgenden denkbare Standorte für eine wärmeenergetische Nutzung der Werra erarbeitet.

Damit ein Fließgewässer thermisch genutzt werden kann, müssen gewässerseitig bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein (Baumann, Laue und Müller, 2010). Zusammenfassend gehen für die Erschließung folgende Bewertungskriterien hervor:

- Ausreichende zeitliche und örtliche Verfügbarkeit der Wärmequelle
- Regeneration der Wärmequelle
- Möglichst hohe Gewässertemperatur
- Wenige Unterschreitungstage von Temperaturgrenzen (Tage $\leq 4\text{ °C}$)
- Möglichst hohe Entzugsleistung des Wärmeentnahmesystems
- Kostengünstige Erschließung
- Geringe Entfernung zu Abnehmern
- Geringer Wartungsaufwand der Nutzungsanlage
- Kompatibilität mit bestehenden Heizungsanlagen
- Beachtung der Gewässernutzung (Schifffahrt, Hochwasserschutz)
- Gewässerschutz und Einhaltung der Richtlinien

Abbildung 5-1 zeigt die potenziellen Standorte für die Entnahme der Werra-Wärme am Nadelwehr. Im Rahmen der Ortsbegehung wurde auf die örtlichen Gegebenheiten geachtet, um eine Eignung der Standorte bestimmen zu können. Insgesamt ergeben sich vier Standorte, die anhand der zuvor beschriebenen Kriterien auf ihre Vor- und Nachteile untersucht und miteinander verglichen wurden (Tabelle 5-1).

Die gestrichelte orangene Linie in Abbildung 5-1 stellt die Eingrenzung des Bereiches dar, der laut WSA Weser für die Schifffahrt vorgesehen ist. Die durchgezogene Linie stellt die Leitwerke dar, die die Schifffahrtsrinne unmittelbar am Nadelwehr kennzeichnen (Abbildung 3-4). Diese sind bereits vorhanden und können verhindern, dass Treibgut die Standorte 1 bis 3 erreicht. Bei Standort 4 ist ein solcher Schutz nicht vorhanden.



Abbildung 5-1: Potenzielle Standorte für die Entnahme der Werra-Wärme unmittelbar am Nadelwehr (eigene Darstellung auf Grundlage eines Luftbilds vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG))

Die Standorte unterscheiden sich wesentlich in der Distanz zu den untersuchten Gebäuden. Standort 1 befindet sich am nächsten zu den Gebäuden „Altes Sydekum“ und dem Hotel „Im Anker“, Standort 4 zu den Gebäuden in der Sydekumstr. 15 und 17. Die Nähe zu den Abnehmern gibt den beiden Standorten erhebliche Vorteile, da mit zunehmender Entfernung zu den Gebäuden erhöhte Wärmeverluste und Investitionskosten einhergehen. Standort 3 hat einen erheblichen Nachteil, denn er ließe sich durch eine Verwirklichung der Werra-Welle nur schwer erschließen. Grund dafür ist, dass kein direkter Zugang zur Schlagd- bzw. Kaimauer besteht. Standort 1, 2 und 4 bergen den Vorteil, dass WÜ (bei einem geschlossenen System) direkt an der Schlag- bzw. Kaimauer befestigt werden könnten, um so möglichst nah an potenziellen Gebäuden der Altstadt Hann. Mündens installiert zu werden.

Es befinden sich zwei Standorte unmittelbar ober- und zwei unmittelbar unterhalb des Nadelwehrs. Das Nadelwehr staut den Abfluss der Werra für die Schifffahrt auf. So liegt die Wassertiefe in S3 und S4 an den meisten Tagen im Jahr bei mind. 1,75 m. Die Fließgeschwindigkeit und der Abfluss am Nadelwehr können im Rahmen dieser Arbeit nur qualitativ abgeschätzt werden. Der Abfluss, der zum Nadelwehr fließt, ist der Abfluss des Pegels „Letzter Heller“ abzüglich des Teiles des Abflusses, der über das Streichwehr und dem Teil, der zum Wasserkraftwerk „Blumer Wehr“ fließt. Ein Austausch mit Herrn Hochhäusler (einem der planenden Ingenieure der Werra-Welle) ergab folgende Angaben, welche ursprünglich von der WSA Weser stammen: Bei Erreichung von 118,53 m. ü. NN (1,75 m Wassertiefe) am Nadelwehr fließen normalerweise 7 m³/s über den Mühlenarm zum „Blumer Wehr“ und ca. 11,5 m³/s über das Streichwehr und der Rest zum Nadelwehr. Bereits eine geringe Veränderung der Überfallhöhe am Nadelwehr bedeutet einen großen Einfluss auf den Abfluss (Hochhäusler, 2022). Weiterhin wurden Informationen seitens der Bundesanstalt für

Gewässerkunde (BfG) und der WSV bereitgestellt, in denen Folgendes beschrieben wird: „Wenn der Pegel auf 118,53 m. ü. NN am Nadelwehr gehalten wird, ist ein Abfluss von bis zu 7 m³/s in den Kraftwerkskanal „Blumer Wehr“ und mind. 11,5 m³/s am Streichwehr zu erwarten. Der Abfluss „Letzter Heller“ abzüglich der 18,5 m³/s, welcher über den Kraftwerkskanal und das Streichwehr fließt (was also am Nadelwehr ankommt), beträgt mind. 10 m³/s an 43 % der Tage im Jahr 1998-2021 (WSV, 2020). Ein Durchfluss von 5 m³/s wurde an 32 % der Tage der letzten 24 Jahren unterschritten. Selten geht der Abfluss über 50 m³/s“ (BfG, 2020).

Tabelle 5-1: Untersuchung der Vor- und Nachteile der potenziellen Wärmeentnahmestandorte

Kriterien/Standort	S1	S2	S3	S4
Nähe zu untersuchten Gebäuden	++	-	--	++
Fließgeschwindigkeit	+	+	-	-
Direkter Zugang über Kai- bzw. Schlagdamm	+	-	+	+
Wassertiefe	--	-	+	+
Leitwerk zum Abfangen von Treibgut vorhanden	+	+	+	-
Beeinträchtigung durch andere Gewässernutzungen	-	-	+	+
Gesamtergebnis (Differenz aus + und -)	2	-2	1	3

Aus dem Vergleich der Standorte geht hervor, dass für die untersuchten Gebäude „Altes Sydekum“ und Hotel „Im Anker“ Standort 1 am ehesten geeignet ist. Es ist zu prüfen, ob ein gefahrloser Betriebsablauf in Kombination mit der Werra-Welle gewährleistet werden kann. Ist dies nicht der Fall, könnte der Mühlenarm der Fulda als Wärmequelle genauer untersucht werden. Für die Gebäude in der Sydekumstraße ist Standort 4 derjenige mit den meisten Vor- und wenigsten Nachteilen. Besonders die Nähe zu den Gebäuden spielt hierbei eine wichtige Rolle. Ob die hiesige Wasserbehörde die vorgestellten Standorte zur Wärmeentnahme genehmigt, bleibt zu klären. Die Wärmeentnahme an den Standorten bedarf nach § 8 WHG einer Bewilligung seitens der zuständigen Wasserbehörde (Brede und Koppe, 2019). Die Genehmigung für den Betrieb eines geschlossenen Systems ist im Vergleich zu einem Offenen als weniger problematisch einzustufen. Dies liegt u.a. daran, dass bei einem offenen System nach § 33 WHG eine ausreichende Restwassermenge nach Wasserentnahme gewährleistet sein muss. Eine Befragung zuständiger Wasserbehörden von Brede und Koppe (2019) zeigte, dass hinterfragt werden könnte, ob die Installation eines WÜ im Gewässer nach § 26 WHG einem Einbringen fester Stoffe entspricht.

5.2 Entwicklung der Wärmeentnahmesysteme

Die Entwicklung geeigneter Wärmeentnahmesysteme an den in Kapitel 5.1 vorgestellten konkreten Standorten in Hann. Münden umfasst u.a. deren Dimensionierung. Im Rahmen dieser wird die Förderrate für offene Systeme und Wärmeübertragerfläche für geschlossene Systeme bestimmt.

5.2.1 Variante A

Die erste Variante stellt ein offenes System dar. Für die Bereitstellung von Wärme aus einem Fließgewässer mittels WP ergibt sich die stündliche Förderrate an Flusswasserbedarf anhand der in Kapitel 2.3 aufgeführten Formel.

Die Förderrate wird anhand von Gleichung 2.11 berechnet. Sie ist abhängig vom Wärmebedarf des Gebäudes, der Temperaturspreizung zwischen Vorlauftemperatur im Entnahmerohr und Rücklauftemperatur im Rückgaberohr sowie der spezifischen Wärmekapazität und Dichte von Wasser (volumenbezogene Wärmekapazität). Der Wärmebedarf ist dabei vom untersuchten Gebäude anhängig. Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur wird aufgrund von Vereisungsgefahr auf maximal 4 K und minimal 2 K begrenzt. Die volumenbezogene Wärmekapazität des Flusswassers wird als konstant angenommen (siehe Kapitel 2). Die Wärmebedarfswerte der Gebäude wurden durch Datenbalken dargestellt, sodass ein direkter Vergleich der Gebäude sichtbar ist (Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-3). Die Abbildung der Dimensionierung der Förderrate ist differenziert in gebäudeseitige und gewässerseitige Daten. Die mittlere monatliche Gewässertemperatur und die Temperaturspreizung sind für die Berechnung der Gebäude gleich. Die Temperaturspreizung gibt die Abkühlung des Flusswassers am WÜ an und wird mit minimal 2 bis maximal 4 K angenommen. Sie wurde anhand der mittleren monatlichen Gewässertemperaturen der Werra bestimmt. Das Gebäude in der Sydekumstr. 15 benötigt die niedrigste Förderrate mit 0,4 l/s (Abbildung 5-3) und das Hotel „Im Anker“ mit 1,4 l/s (Abbildung 5-2). Zur Deckung des Wärmebedarfs benötigt das „Alte Sydekum“ eine Flusswasserentnahme von 0,4 l/s und die Sydekumstraße 17 von 0,9 l/s. Die nötigen Förderraten sind hierbei proportional zum Wärmebedarf, d.h. je höher der Wärmebedarf pro Monat, desto höher die benötigte Förderrate. Obwohl die Gebäude jeweils unterschiedlich weit von den potenziellen Entnahmestandorten (S1 ca. 50 m vom „Alten Sydekum“ und Hotel; S4 ca. 30 m von Sydekumstr. 15 und 17) entfernt sind, wird vereinfacht angenommen, dass entlang der Entnahmeleitung keine Wärmeverluste auftreten. Würden Wärmeverluste auftreten, müsste die Förderrate demnach erhöht werden. Die Entnahmestelle des offenen Systems würde in der Praxis unmittelbar an der Kaimauer installiert werden, ähnlich wie es beispielhaft in Abbildung 5-4 dargestellt ist. Abbildung 5-4 zeigt die Entnahmestelle inklusive einer Tauchpumpe, wie sie auch in Hann. Münden umgesetzt werden könnte. Um das entnommene Wasser zur WP in den Gebäuden zu fördern, werden Rohrleitungen benötigt. Der benötigte Durchmesser der Rohrleitungen kann anhand der Kontinuitätsgleichung berechnet werden. Er wird anhand der Parameter Fließgeschwindigkeit im Rohr und dem Durchfluss berechnet.

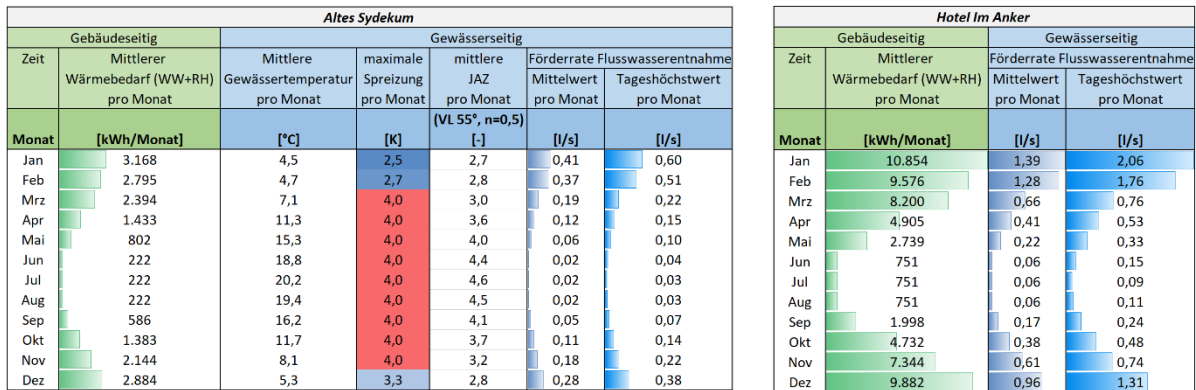


Abbildung 5-2: Förderrate der Flusswasserentnahme für das „Alte Sydekum“ und Hotel „Im Anker“

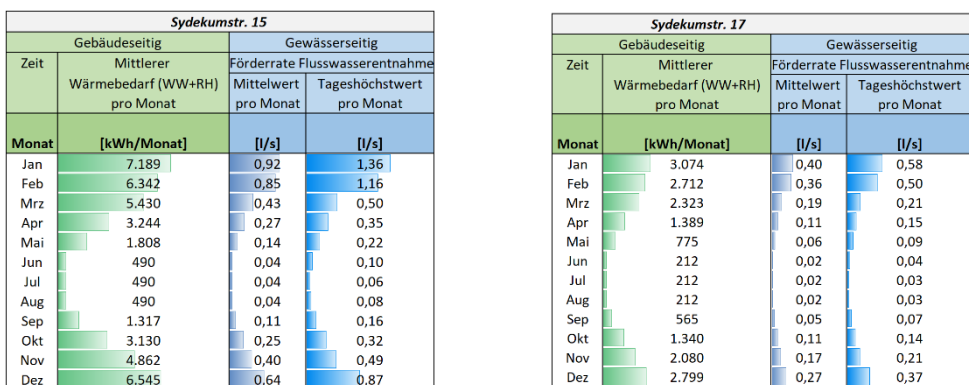


Abbildung 5-3: Förderrate der Flusswasserentnahme für die Gebäude in der Sydekumstraße

Die Förderrate wird neben den mittleren monatlichen Werten des Wärmebedarfs, der Gewässertemperatur und der JAZ anhand der maximalen Temperaturspreizung berechnet. Bei der Dimensionierung sollte darauf geachtet werden, dass möglichst mit täglichen Mittelwerten von Wärmebedarf und Wassertemperatur gearbeitet wird, um genauere Ergebnisse zu erhalten. Beim Hotel „Im Anker“ wird nach Berechnung des monatlichen Mittelwertes im Januar maximal 1,4 l/s benötigt. Bei der Berechnung pro Tag bedarf es allerdings am 26. Januar eines durchschnittlichen Jahres einer maximalen Förderrate von 2,1 l/s (Abbildung 5-2). Eine Abweichung von 60 % zwischen den täglichen und den mittleren monatlichen Förderraten ist ebenso bei den anderen Gebäuden zu beobachten (Anhang 27 bis Anhang 30). Aus diesem Grund wurden in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 jeweils die Tageshöchstwerte pro Monat angegeben.



Abbildung 5-4: Beispiel einer Entnahmestelle für das Flusswasser bei einem offenen System (Dahlmans, 2022)

5.2.2 Variante B

Variante B beschreibt die Wärmeentnahme anhand eines geschlossenen Systems (vgl. Kapitel 2.3). Die benötigte Wärmeübertragerfläche wird mit Gleichung 2.14 bestimmt. Hierzu müssen die Betriebsstunden der Wärmepumpe ermittelt werden. Es wird angenommen, dass die WP außerhalb der Heizperiode (107 Tage) an 2 h/d zur Bereitstellung von WW betrieben wird. Während der Heizperiode (258 Tage) wird angenommen, dass die WP an 6 h/d betrieben wird. Dies resultiert in einer Betriebsstundenzahl von ca. 2300 h/a. Der bivalente Betrieb von WP zur Grundlastherzeugung ergibt in der Mehrheit der Tage während der Heizperiode sogar Betriebsstunden von mehr als 8 h/d (Anhang 31) (Neubert et al., 2022, Magiera und Pater, 2012). Des Weiteren wird Variante B mit einem Edelstahl-Plattenwärmeübertrager konzipiert, da dieser in Anbetracht der starken Versalzung der Werra und der geringen Gewässergüte gegenüber einem Kunststoff-WÜ als korrosionsbeständiger eingestuft wird (vgl. Kapitel 2.3). Der mittlere, prognostizierte Wärmedurchgangskoeffizient eines WÜ mit dem Werkstoff Edelstahl 1.4301 beträgt 0,35 kW/(m²K) (Gappisch, 2022). Die Temperaturspreizung wird analog zur Variante A ermittelt.

Altes Sydekum							Hotel Im Anker			
Gebäudeseitig		Gewässerseitig			Gewässerseitig		Gebäudeseitig		Gewässerseitig	
Zeit	Mittlerer Wärmebedarf (WW+RH) pro Monat	Mittlere Gewässertemperatur pro Monat	maximale Spreizung pro Monat	mittlere JAZ pro Monat (VL 55°, n=0,5)	Mittelwert pro Monat	Tageshöchstwert pro Monat	Zeit	Mittlerer Wärmebedarf (WW+RH) pro Monat	Mittelwert pro Monat	Tageshöchstwert pro Monat
Monat	[kWh/Monat]	[°C]	[K]	[-]	[m²]	[m²]	Monat	[kWh/Monat]	[m²]	[m²]
Jan	3.168	4,5	2,5	2,7	9,26	14,89	Jan	10.854	31,72	50,97
Feb	2.795	4,7	2,7	2,8	8,61	12,69	Feb	9.576	29,51	43,44
Mrz	2.394	7,1	4,0	3,0	4,62	5,46	Mrz	8.200	15,84	18,69
Apr	1.433	11,3	4,0	3,6	3,07	3,81	Apr	4.905	10,52	13,04
Mai	802	15,3	4,0	4,0	1,73	2,38	Mai	2.739	5,92	8,13
Jun	222	18,8	4,0	4,4	0,51	1,08	Jun	751	1,73	3,70
Jul	222	20,2	4,0	4,6	0,50	0,65	Jul	751	1,69	2,24
Aug	222	19,4	4,0	4,5	0,50	0,82	Aug	751	1,68	2,82
Sep	586	16,2	4,0	4,1	1,32	1,72	Sep	1.998	4,50	5,89
Okt	1.383	11,7	4,0	3,7	2,90	3,46	Okt	4.732	9,92	11,84
Nov	2.144	8,1	4,0	3,2	4,36	5,31	Nov	7.344	14,94	18,18
Dez	2.884	5,3	3,3	2,8	6,51	9,44	Dez	9.882	22,32	32,31

Abbildung 5-5: Benötigte Wärmeübertragerfläche für das „Alte Sydekum“ und Hotel „Im Anker“

Sydekumstr. 15				Sydekumstr. 17			
Gebäudeseitig		Gewässerseitig		Gebäudeseitig		Gewässerseitig	
Zeit	Mittlerer Wärmebedarf (WW+RH) pro Monat	Mittelwert pro Monat	Tageshöchstwert pro Monat	Zeit	Mittlerer Wärmebedarf (WW+RH) pro Monat	Mittelwert pro Monat	Tageshöchstwert pro Monat
Monat	[kWh/Monat]	[m²]	[m²]	Monat	[kWh/Monat]	[m²]	[m²]
Jan	7.189	21,01	33,72	Jan	3.074	8,98	14,43
Feb	6.342	19,54	28,74	Feb	2.712	8,36	12,30
Mrz	5.430	10,49	12,36	Mrz	2.323	4,49	5,29
Apr	3.244	6,96	8,63	Apr	1.389	2,98	3,69
Mai	1.808	3,91	5,38	Mai	775	1,68	2,30
Jun	490	1,13	2,45	Jun	212	0,49	1,05
Jul	490	1,10	1,48	Jul	212	0,48	0,63
Aug	490	1,10	1,87	Aug	212	0,47	0,80
Sep	1.317	2,96	3,90	Sep	565	1,27	1,67
Okt	3.130	6,56	7,84	Okt	1.340	2,81	3,35
Nov	4.862	9,89	12,03	Nov	2.080	4,23	5,15
Dez	6.545	14,78	21,38	Dez	2.799	6,32	9,15

Abbildung 5-6: Benötigte Wärmeübertragerfläche für die Gebäude in der Sydekumstraße

Die WÜ können an der Kai- bzw. Schlagdmauer oder mit Verankerungsgewichten auf dem Gewässergrund befestigt werden (Abbildung 5-7). Je nach Bauhöhe und Installationsstandort des WÜ muss darauf geachtet werden, dass Mindestwassertiefen für den Betrieb des WÜ während der Heizperiode erreicht werden (vgl. Kapitel 5.1). Der Durchfluss und Querschnitt für

die Vor- und Rückgabelleitung zwischen WÜ und WP ist abhängig vom Wärmeübertragermodell und der Dimensionierung.



Abbildung 5-7: Beispiel für die Montage eines Wärmeübertragers mit Verankerungsgewicht (Frank GmbH, 2022)

5.3 Variantenbewertung

In der folgenden Bewertung werden die konzipierten Varianten A und B hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit miteinander verglichen. Hierfür werden spezifische Investitions- und Betriebskosten abgeschätzt. Die Wirtschaftlichkeit des Wärmeentnahmesystems ist von den Investitionskosten, laufenden Betriebskosten und vom Wärmebedarf des jeweiligen Gebäudes abhängig (Kammer, 2018). Die Investitionskosten für ein offenes System sind maßgeblich von den Kosten, die durch die Erschließung der Entnahme- und Rückgabelleitung verursacht werden, dominiert (Neubert et al., 2022). Je weiter die Gebäude von der Wärmequelle entfernt sind, desto länger sind die Rohre und desto höher entsprechend sind die Kosten. Ein weiterer Kostenpunkt ist abhängig davon, ob das Wärmeentnahmesystem mit oder ohne Zwischenwärmeübertrager geplant wird (Abbildung 5-9). Beim geschlossenen System werden die leistungsspezifischen Kosten für die WÜ anhand der Entzugsleistung ermittelt. Die Kosten pro kW Entzugsleistung betragen beim Plattenwärmeübertrager 480€. Das Hotel „Im Anker“ hätte bei einer berechneten Entzugsleistung von ca. 32 kW demnach Investitionskosten des WÜ in Höhe von ca. 15.000€ (Abbildung 5-8).

	Tageshöchstwert Entzugsleistung	Kosten
Gebäude	[kW]	[€]
Altes Sydekum	9,2	4.430
Hotel im Anker	31,6	15.164
Sydekumstr. 15	20,9	10.032
Sydekumstr. 17	8,9	4.294

Abbildung 5-8: Kosten Wärmeübertrager (geschlossenes System)

Beim Gebäude in der Sydekumstr. 15 liegt die Entzugsleistung bei ca. 21kW und die Kosten bei ca. 10.000€. Das „Alte Sydekum“ und das Gebäude der Sydekumstr. 17 haben eine Entzugsleistung von ca. 9 kW, womit die Kosten bei ca. 4400€ liegen.

Zusätzlich verursacht das Genehmigungsverfahren der Wärmequellenanlage Erstellungs- und Bearbeitungsgebühren, die ebenfalls zu den Investitionskosten zählen. Weitere Investitionskosten betreffen die Pufferspeicher. Es wird angenommen, dass sowohl die Auslegung der

Pufferspeicher als auch WP nicht vom jeweiligen Entnahmesystem abhängig sind. Es werden nur die Kosten der Anlagenteile der Wärmeentnahmesysteme verglichen, die jeweils beim anderen nicht auftreten (Abbildung 5-9). Beide Varianten werden ohne einen Zwischenwärmeübertrager verglichen.

Die laufenden Betriebskosten sind zum einen ebenfalls abhängig von den Auflagen der Wasserbehörde, zum anderen aber auch von dem Strombedarf, der beim Betrieb der WP benötigt wird. Je höher der Wärmebedarf, der hydrothermale Deckungsanteil und die Effizienz der WP, desto schneller amortisieren sich die Investitionskosten der WPA gegenüber dem Betrieb mit einem fossilen WE (vgl. Kapitel 6.1).

Zudem erhöht eine niedrige Wasserqualität die Betriebskosten, da der Zeitraum zwischen Wartung und Reinigung der Filter bzw. WÜ enger getaktet sein muss. Da die Werra aufgrund des hohen Salzgehaltes eine niedrige Wasserqualität vorweist, wird der Wartungsaufwand als hoch eingeschätzt. Es wird angenommen, dass das geschlossene System im Vergleich zum Offenen einen niedrigeren Wartungsaufwand hat. Eine weitere Möglichkeit zur Senkung der Betriebskosten ist die Verwendung der WP zur Kühlung der Gebäude im Sommer.

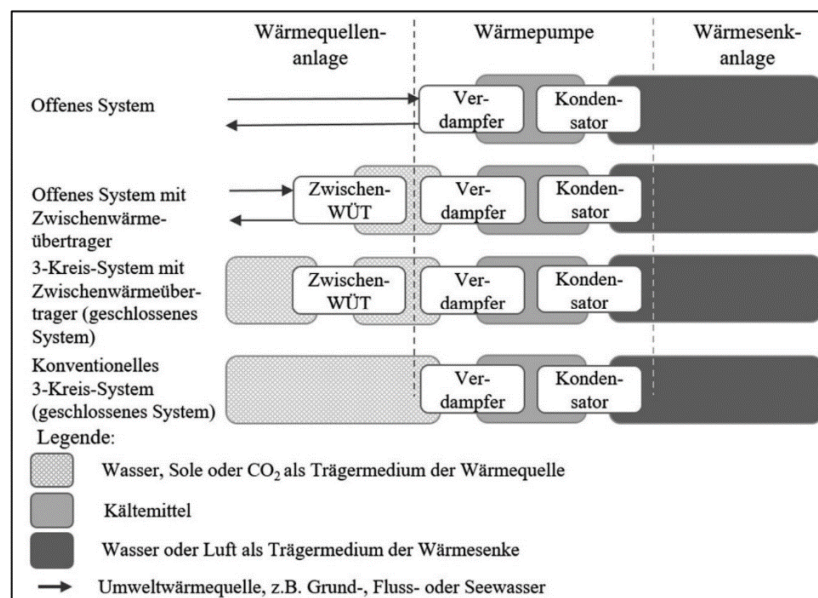


Abbildung 5-9: Unterschiede der Wärmequellenanlage im offenen oder geschlossenen System (Kammer, 2018)

Aufgrund des hohen Salzgehaltes stellt das geschlossene System die sicherste Variante dar. Sie bildet somit die Vorzugsvariante. Die Ausfälle des Betriebes durch Verschmutzungen, sowie Verkrustungen durch Ausfällung von Salzkristallen im Entnahme- und Rückgaberohr im offenen System sind als hoch einzuschätzen (Schnell und Slipcević, 1990). Allerdings ist bei der konkreten Materialwahl des WÜ unbedingt darauf zu achten, dass das Material langfristige Korrosionsbeständigkeit aufweist (vgl. Kapitel 2.3).

Im weiteren Vorgehen der Arbeit wird die Amortisationszeit der Vorzugsvariante berechnet, um eine konkrete Aussage darüber zu treffen, ob und wann sich der Bau einer Flusswärmepumpenanlage aus wirtschaftlicher Sicht für die Gebäude in der Altstadt Hann. Mündens amortisiert.

6 Machbarkeit der Werra-Wärmenutzung am Nadelwehr

Die Machbarkeit der Werra-Wärmenutzung ist von den unterschiedlichen, zuvor untersuchten Faktoren abhängig. Die in Kapitel 3 ermittelten JAZ geben an, wie viel Strom die WP benötigt. In Kapitel 4 wurden vier Gebäude auf ihren Wärmebedarf untersucht, um nachfolgend das bevorzugte Wärmeentnahmesystem zu dimensionieren. Der hydrothermale Deckungsanteil am Gesamtwärmebedarf wird prozentual anhand des Auslegungsfaktors der WP ermittelt. Zwei geeignete Standorte wurden für die Wärmeentnahme evaluiert. In allen Gebäuden werden die bestehenden Heizungsanlagen mit Gas betrieben und können in einem bivalent-teilparallelen Betrieb in Kombination mit der WP zur Bereitstellung für RW und WW verwendet werden.

Ein weiterer, bisher nicht berücksichtigter Faktor, ist das Nutzerverhalten der Wärmeabnehmer. Es hat einen Einfluss auf die Vorlauftemperaturen und die Lastspitzen (Günther et al., 2020). Wenn bspw. Fenster über einen längeren Zeitraum geöffnet sind und viel Wärme entweicht, kann dies dazu führen, dass die Nutzer versuchen, die verlorene Wärme durch eine Erhöhung der Thermostatregelung auszugleichen. In der Folge führt dies zu erhöhten Vorlauftemperaturen und einer Senkung der Wärmepumpeneffizienz. So kann eine bewusste und sparsame Nutzung der Heizungsanlage zur Senkung der Vorlauftemperaturen beitragen und den Wärmebedarf reduzieren (Neubert et al., 2022).

6.1 Abschätzung des hydrothermalen Deckungsanteils

Da die Werra im Durchschnitt an 30 Tage im Jahr eine Gewässertemperatur von $+4\text{ °C}$ unterschreitet (vgl. Kapitel 3.2), deckt der ZWE in diesen Tagen den Wärmebedarf vollständig. Diese Betriebsweise wird als bivalent-alternativ bezeichnet, da die WP nur bis zu einer bestimmten Temperatur, dem sogenannten Abschaltpunkt, arbeitet. Prozentual machen die 30 Unterschreitungstage während der kältesten Tage im Jahr, an denen die Gewässertemperatur $+4\text{ °C}$ unterschreitet, ca. 8 % des Gesamtjahres aus. Der bivalente Betrieb ist in Abbildung 6-1 schematisch dargestellt. Hierbei wird gezeigt, wie der ZWE (in diesem Fall ein Gaskessel) nach der WP geschaltet ist. Die erzeugte Wärme kann in sogenannten Pufferspeichern zwischengespeichert werden, bevor sie für die Radiatoren (Rad) oder die Bereitstellung von WW verwendet wird. Diese Speicher sind notwendig, da der durch die Versorgungsbetriebe bereitgestellte Wärmepumpenstrom Sperrzeiten unterliegt (ca. 6 Stunden pro Tag). In diesen Sperrzeiten werden RW und WW durch die in den Puffern gespeicherte Wärme bereitgestellt. Diese ermöglichen so einen lastflexiblen Einsatz der WE. Bei einem monoenergetischen System würde ein Heizstab (anstelle eines Gaskessels) als ZWE dienen (Anhang 32).

An durchschnittlich 8 % der kältesten Tage im Jahr wird in den untersuchten Gebäuden ca. 17 % des Gesamtwärmebedarfs benötigt. Dieser Anteil wird vom ZWE gedeckt. Hinzu kommt der Deckungsanteil, der aus wirtschaftlicher Sicht mit einem Gaskessel günstiger als mit einer WP erzeugt wird. Um diesen zusätzlichen Deckungsanteil zu erhalten, werden die Energiebezugskosten der beiden WE verglichen (Bongs et al., 2022).

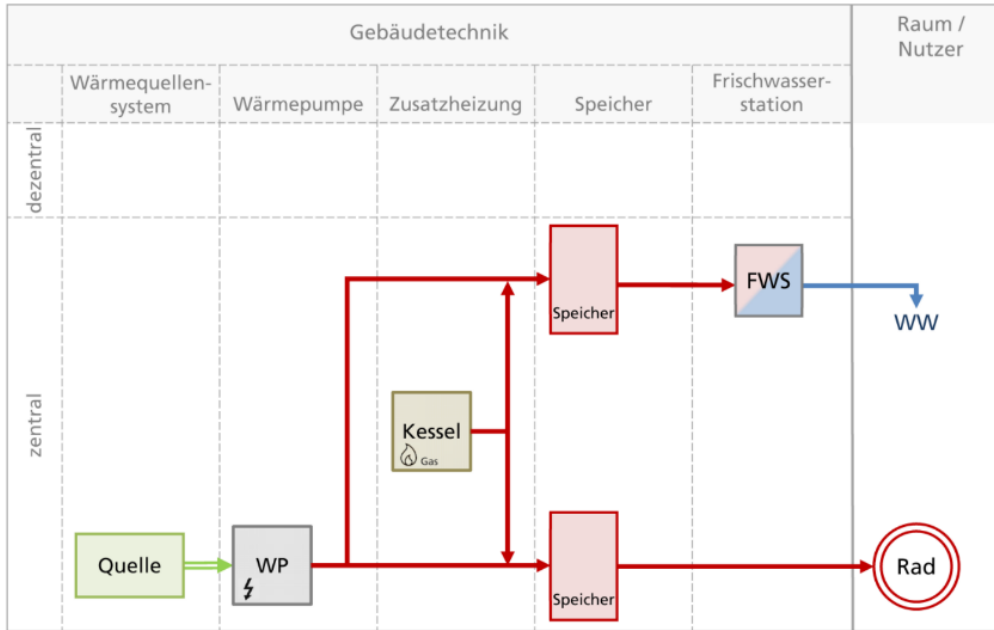


Abbildung 6-1: Bivalentes Wärmepumpensystem in schematischer Darstellung (Bongs et al., 2022)

Im bivalenten Betrieb können zwei Optimierungsmöglichkeiten umgesetzt werden, indem entweder die CO₂-Emissionen oder die Energiebezugskosten minimiert werden. Es werden ausschließlich die Energiebezugskosten beleuchtet, da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt. Der Optimierungsprozess wird durch die Effizienz der WE und durch das Verhältnis der Energiebezugskosten der Endenergieträger Strom und Gas bestimmt. Das Kostenverhältnis r_{Kosten} ist wie folgt definiert (Bongs et al., 2022):

$$r_{Kosten} = \frac{p_{Strom}}{p_{Gas}} \tag{5.1}$$

r_{Kosten} : Kostenverhältnis [-]

p_{Strom} : Bezugskosten pro kWh Wärmepumpenstrom [$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$]

p_{Gas} : Bezugskosten pro kWh Gas (Bezug auf Brennwert) [$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$]

Um zu entscheiden, wann die Umschaltung zwischen WP und Gasbrennwertgerät geschieht, wird ein Schaltkriterium f_{opt} definiert. Das Schaltkriterium f_{opt} ist das Produkt des Kostenverhältnisses r_{Kosten} und des Verhältnisses der Effizienzen der WE. Das Schaltkriterium wird pro Jahrestag ausgewertet.

$$f_{opt} = r_{fuel, cost} \frac{\eta_{Gaskessel}}{COP} \tag{5.2}$$

f_{opt} : Schaltkriterium (Wärmepumpenvorrang, wenn $f_{opt} \leq 1$)

$\eta_{Gaskessel}$: Wirkungsgrad des zweiten Wärmeerzeugers (bezogen auf den Brennwert)

COP bzw. ϵ : Leistungszahl der Wärmepumpe

Wenn das Schaltkriterium $f_{opt} \leq 1$ beträgt, wird die WP mit einem geringeren Kostenaufwand betrieben als der Gaskessel.

Die Bezugskosten für Wärmepumpenstrom und Gas wurden bei den ortsansässigen Versorgerbetrieben Hann. Münden recherchiert. Der Strompreis für die Versorgung von WP („MÜN-DENwärmestrom“) für das Jahr 2023 beträgt im Schnitt ca. $0,24 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ und der Gaspreis ca. $0,14 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$. Dies ergibt ein Kostenverhältnis r_{Kosten} von 1,8. Zur Berechnung des Schaltkriteriums wird für die bestehenden Gasheizungen der untersuchten Gebäude ein brennwert-bezogener Wirkungsgrad von 0,9 angenommen (Wolff et al., 2004). Die Leistungszahl wurde in Kapitel 3.2 in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur des Heizkreislaufes, der Gewässertemperatur und des Gütegrades von Flusswasser bestimmt. Es wird konservativ angenommen, dass die Vorlauftemperatur sowohl für die Raumwärme- als auch Warmwasserbereitstellung 55 °C betragen muss.

Das Schaltkriterium f_{opt} ist genau dann größer 1, wenn die Leistungszahl der WP kleiner 1,6 ist. Eine Unterschreitung dieser Leistungszahl ist bei keiner der untersuchten Vorlauftemperaturen und Gütegraden der Fall, da die kleinste tägliche Leistungszahl bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C und einem Gütegrad η von 0,4 bei 2,55 vorliegt (Abbildung 3-22). Liegt das Kostenverhältnis zwischen den Energiebezugskosten für Wärmepumpenstrom und Gas über 2,8, so ist der Gaskessel der bevorzugte WE, da dieser Wärme kostengünstiger erzeugt als die WP. Die WP ist für die untersuchten Werte der Vorlauftemperaturen und des Gütegrades der bevorzugte WE (Abbildung 6-2).

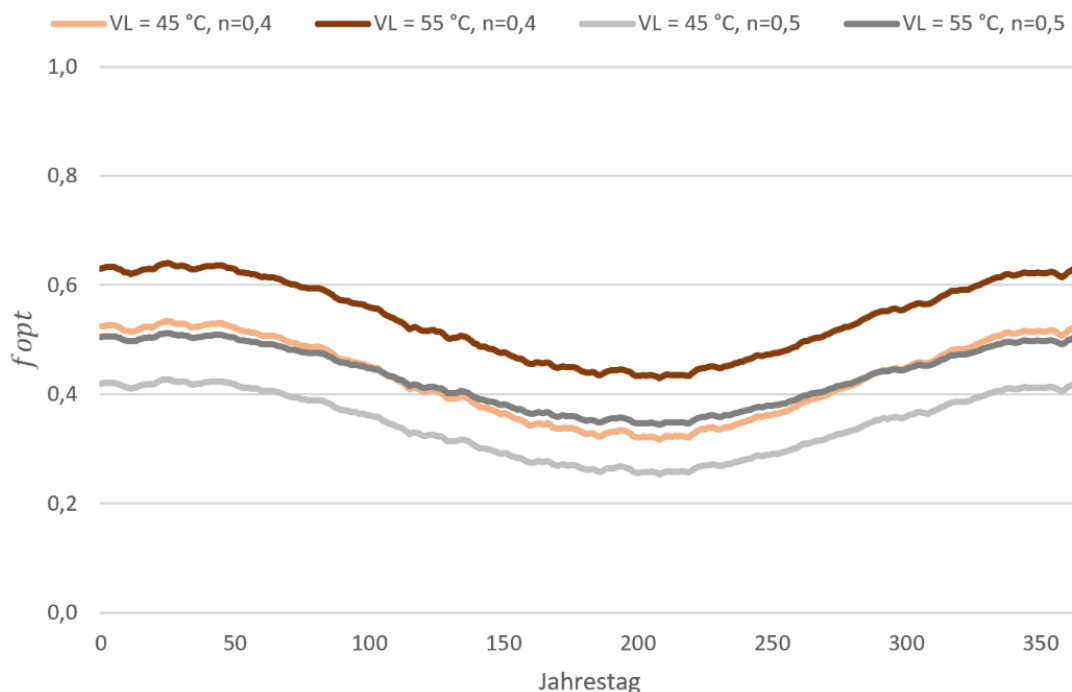


Abbildung 6-2: Untersuchung des Schaltpunktes zwischen WP und Gaskessel bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen und Gütegraden

Ein weiterer limitierender Faktor des hydrothermalen Deckungsanteils ist die Auslegung bzw. Dimensionierung der WP. Je nachdem wie groß die WP ausgelegt wird, ist eine bestimmte Deckung des Wärmebedarfs möglich. Um zu prüfen, welche Auslegung für die untersuchten Gebäude am wirtschaftlichsten ist, wird der Wärmebedarf pro Gebäude prozentual dargestellt.

Abbildung 6-3 zeigt den prozentualen Bedarf an RW und WW pro Jahrestag. Diese prozentuale Verteilung ergibt sich jahresweise, unberücksichtigt des jeweiligen Nutzerverhaltens, da sie anhand des jährlichen Wärmebedarfs und der HGT berechnet wurde. Die prozentuale Verteilung ermöglicht die Beurteilung des Wärmebedarfs über ein Jahr für alle Gebäude mit gleicher Heizgrenztemperatur in einer Region mit gleichen HGT. Diese Herangehensweise schafft die Berechnungsgrundlage des hydrothermalen Deckungsanteils in Abhängigkeit des Auslegungsfaktors.

Ein Vorteil des bivalenten Systems ist, dass die WP auch kleiner dimensioniert werden kann, da bereits ein ZWE in die Bedarfsdeckung eingeplant ist. Eine kleinere Auslegung hat geringere Investitionskosten zur Folge, da WP mit höherer Heizleistung kostenintensiver sind (Miara, 2022). Im Folgenden wird der Einfluss einer kleineren Dimensionierung der WP auf den hydrothermalen Deckungsgrad für Raumheizung und Trinkwarmwasser durch die WP untersucht. Dazu wird die WP in 20 %-Schritten kleiner dimensioniert.

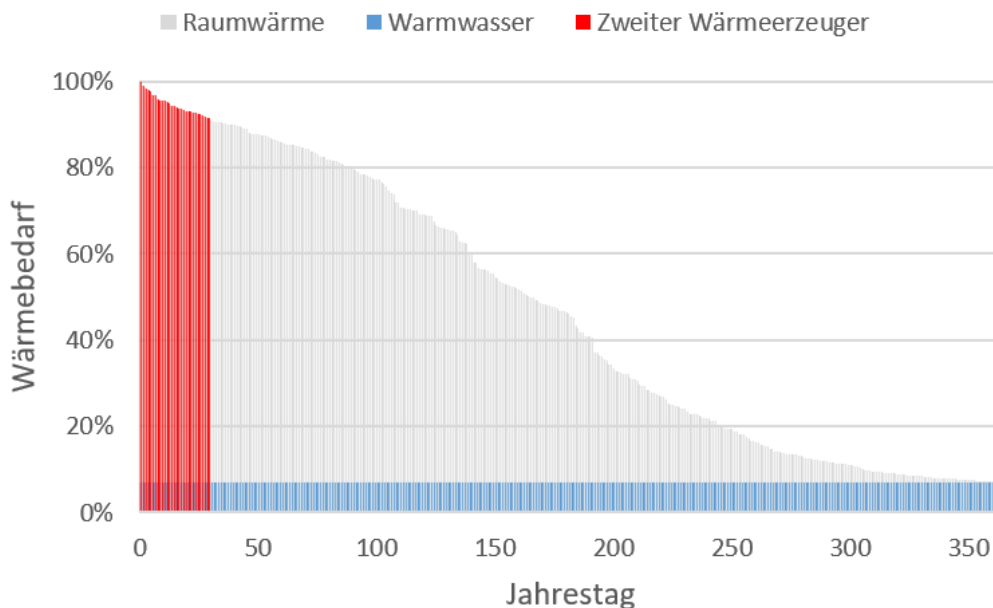


Abbildung 6-3: Prozentuale Verteilung des Wärmebedarfs der untersuchten Gebäude

Abbildung 6-4 zeigt den hydrothermalen Deckungsgrad der WP in der Bereitstellung von RW und WW. Die durch die Gewässertemperatur vorgegebene Limitierung stellt sich heraus, da 100 % der Auslegung nur 83 % der Deckung entsprechen. Der Deckungsgrad nimmt mit einer Verringerung des Auslegungsfaktors deutlich ab, da der prozentuale Anteil des Wärmebedarfs in den Lastspitzen kleiner als in der Grundlast ist (Abbildung 6-3).

Der Deckungsgrad der WP sinkt bei einem Auslegungsfaktor von 80 % zunächst nur gering und dann stärker, je kleiner die WP ausgelegt ist (Abbildung 5-11). Eine Auslegung der WP auf 60 % deckt einen Bedarf von 71 %. Hingegen deckt eine Auslegung der WP auf 40 % einen Bedarf von 55 % und eine Auslegung von 20 % erreicht lediglich einen Deckungsgrad von 33 % (Abbildung 6-4). Jede Erhöhung des Auslegungsfaktors um 20 % hat eine geringere Erhöhung des Deckungsbedarfs zur Folge (22 %, 16 %, 10 %, 2 %). Dieser Zusammenhang verdeutlicht, dass eine Erhöhung des Auslegungsfaktors keine proportionale Erhöhung des Deckungsanteils zur Folge hat. Der Abschaltzeitpunkt der WP erfolgt bei 4 °C Gewässertemperatur, was im Mittel einer Luftaußentemperatur von ca. 0,7 °C entspricht. Aufgrund des Abschaltzeitpunktes lässt sich der Deckungsgrad mit einer größer dimensionierten WP nicht weiter als um 83 % erhöhen. Eine Auslegung von ca. 80 % ist zu empfehlen, um einen möglichst hohen Deckungsgrad bei gleichzeitig möglichst geringer Auslegung zu erreichen. Werden weniger als 83 % des Wärmebedarfes gedeckt, ändert sich der Betrieb von einem alternativen zu einem bivalent-teilparallelen Betrieb (BDH, 2014).

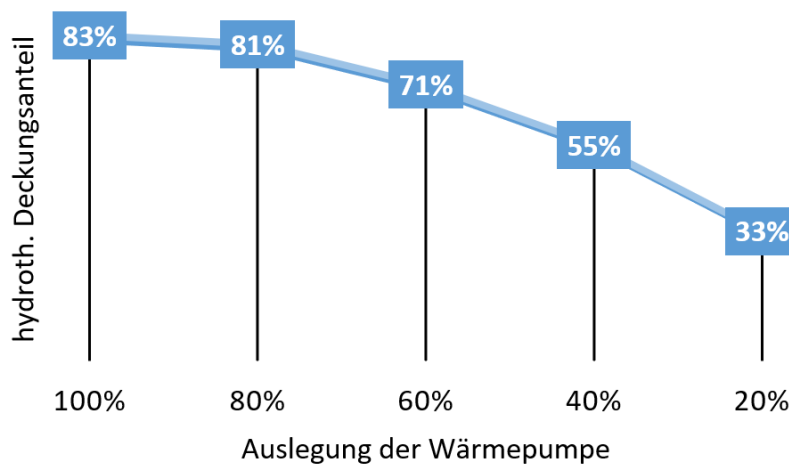


Abbildung 6-4: Hydrothermaler Deckungsanteil in Abhängigkeit des Auslegungsfaktors der WP am Gesamtwärmebedarf

6.2 Empfehlungen zum Betrieb und Nutzerverhalten

Zusätzlich zu den bestehenden Gaskesseln kommen bei zwei der vier Gebäuden Kaminöfen zum Einsatz, die zur Teildeckung der RW genutzt werden. Das Nutzerverhalten hat einen Einfluss darauf, wie hoch der Deckungsanteil der Kaminöfen ist. Je höher der Anteil, desto weniger Wärme müssen die beiden anderen WE bereitstellen (Günther et al., 2020). Eine Zunahme der Deckungsbeiträge der Kaminöfen trägt dann zu einer Effizienzsteigerung der WP bei, wenn die Kaminöfen in Tagen betrieben werden, in denen die JAZ unter der Gesamtjahresarbeitszahl⁸ liegt. Es wird empfohlen, die Kaminöfen in den Monaten mit den kältesten Gewässer- bzw. Luftaußentemperaturen zu nutzen (Dezember bis Februar).

⁸ Die Gesamtjahresarbeitszahl ist ein Maß für die Effizienz der WP und gibt das Verhältnis zwischen erzeugter Wärme und dafür benötigter Antriebsenergie während eines durchschnittlichen Jahres an (VDI 4650-1).

Der tatsächliche Deckungsanteil der Kaminöfen kann nicht quantifiziert werden, da keine messtechnische Untersuchung stattgefunden hat.

Im bisherigen Vorgehen wurde angenommen, dass die Nutzer bei Unterschreitung der Heizgrenztemperatur anfangen zu heizen. Allerdings wurden neben Wohn- auch Nichtwohngebäude betrachtet und in der Berechnung des Wärmebedarfs gleichbehandelt. Diese Vereinfachung ermöglicht es, die prozentuale Verteilung des Wärmebedarfs pro Jahrestag über die HGT zu berechnen und für alle Gebäude Aussagen zum hydrothermalen Deckungsanteil zu treffen. Dies spiegelt jedoch nicht das tatsächliche Nutzerverhalten wider. Durch eine Erfassung von Monats- oder, im Idealfall Tagesverbräuchen kann das Nutzerverhalten besser analysiert und zugleich eine Überdimensionierung der WP vermieden werden. Weiterhin ist zu empfehlen, raumweise Innentemperaturen zu bestimmen, welche von den Nutzern zum Wohnkomfort benötigt werden, um genauere Wärmebedarfswerte ermitteln zu können.

Beim „Alten Sydekum“ handelt es sich um ein Veranstaltungsgebäude, welches nicht ganzjährig beheizt wird. Da an weniger Tagen als angenommen Wärmebedarf besteht, sind die Lastspitzen um ein wesentliches höher als berechnet, da der Wärmebedarf sich auf alle Tage im Jahr verteilt. Beim Betrieb der WPA wird empfohlen, Lastspitzen so weit wie möglich zu vermeiden, da der hydrothermale Deckungsanteil sinkt, je höher und öfter Lastspitzen auftreten. Wird ein kleiner Anteil des Wärmebedarfs für die tägliche Grundlast und ein großer Anteil für Lastspitzen benötigt, so sinkt der hydrothermale Deckungsanteil bei gleichem Auslegungsfaktor der WP. Es dauert länger, bis sich die Investition der WPA amortisieren, da der zweite und teurere WE einen größeren Anteil deckt.

Das Gebäude in der Sydekumstraße 15 wird zum Teil gewerblich und zum Teil zu Wohnzwecken genutzt. Diese Nutzung wurde in der Berechnung des täglichen Wärmebedarfs nicht berücksichtigt, spielt aber eine wichtige Rolle. Für weitere Untersuchungen wird empfohlen, in diesem Gebäude raumweise Rauminnentemperaturen festzulegen, um anhand dieser, genauere Aussagen zum Wärmebedarf zu tätigen.

Im Folgenden sind einige Empfehlungen zum Betrieb und Nutzerverhalten zusammengefasst aufgelistet und erläutert. Diese werden in Empfehlungen mit und ohne Kostenaufwand unterteilt.

Empfehlungen mit zusätzlichem Kostenaufwand:

1. Vorlauftemperaturen senken: Durch den selektiven Austausch von HK, welche besonders hohe Vorlauftemperaturen benötigen, kann die benötigte Vorlauftemperatur gesenkt und die Effizienz der WP gesteigert werden (Bongs et al., 2022).
2. Verwendung von erneuerbaren Energien: Eine WP kann am kostengünstigsten und umweltfreundlichsten betrieben werden, wenn sie mit erneuerbaren Energien, wie bspw. Solarenergie betrieben wird. Wenn die Möglichkeit besteht, erneuerbare Energien zu nutzen, sollten diese in Betracht gezogen werden (Günther et al., 2020).
3. Regelmäßige Wartung: Es ist wichtig, dass die WPA regelmäßig gewartet wird, um sicherzustellen, dass sie effizient und zuverlässig funktioniert. Eine jährliche Wartung durch einen Fachmann ist empfehlenswert (Mattinen et al., 2015).
4. Nutzung von Zeitschaltuhren oder modernen Heizkörperthermostaten: Mithilfe von Zeitschaltuhren oder modernen Heizkörperthermostaten kann die Heizung

automatisiert gesteuert werden. Indem die Heizung während der Nachtstunden oder bei Abwesenheit ausgeschaltet wird, kann vermieden werden, dass Räume unnötig beheizt werden (Eguiarte et al., 2020).

5. Dämmung und Isolierung verbessern: Eine gute Dämmung und Isolierung sind besonders wichtig für Altbauten, um Wärmeverluste zu reduzieren. Es sollte daher überprüft werden, ob eine zusätzliche Dämmung und Isolierung umsetzbar ist, um den Energieverbrauch zu senken (Gerbitz et al., 2018).
6. Austausch von Fenstern: Ein Austausch von Fenstern kann einen erheblichen Einfluss auf den Wärmebedarf haben. Neue Fenster sind oft besser isoliert und haben daher einen geringeren Wärmeverlust. Wenn alte Fenster luftdurchlässig sind, kann kalte Luft von außen eindringen, was zu einem höheren Wärmebedarf führt, da die WP mehr arbeiten muss, um die erwünschte Innentemperatur zu halten (Günther et al., 2020).

Empfehlungen ohne zusätzlichen Kostenaufwand:

1. Senkung der Rauminnentemperatur bei Abwesenheit: Die Rauminnentemperatur sollte bei Abwesenheit gesenkt werden, um Energie zu sparen. Es muss allerdings beachtet werden, dass es bei WP generell länger als bei Gaskesseln dauert, bis das Haus wieder aufgeheizt ist (Miara, 2022).
2. Keine plötzlichen Änderungen in der Heizungsregelung: WP arbeiten am effizientesten, wenn sie über einen längeren Zeitraum mit einer konstanten, niedrigen Belastung betrieben werden (Neubert et al., 2022). Wenn die Regler der HK schnell erhöht werden, erhöht sich die Vorlauftemperatur und die WP arbeitet ineffizienter, um die zusätzliche Wärme bereitzustellen. Es wird empfohlen, die Heizkörperregelung graduell zu erhöhen (BDH, 2014).
3. Rauminnentemperatur nicht zu hoch einstellen: Bei geringeren Rauminnentemperaturen sinken der Wärmebedarf und die Kosten für die Wärmebereitstellung (Baumann, Laue und Müller, 2010).
4. Adäquates Lüften: Innenräume sollten regelmäßig gelüftet werden, um die Luftfeuchtigkeit zu reduzieren. Allerdings sollte vermieden werden, Fenster dauerhaft zu öffnen oder zu kippen. Stoßlüften ist die effektivste Methode, um die Luft im Raum auszutauschen, ohne dass zu viel Wärme verloren geht (Bongs et al., 2022).
5. Adäquates Heizen von Räumen: Wenn nur bestimmte Räume im Haus geheizt werden sollen, ist es effizienter, die Türen zu diesen Räumen zu schließen, um den Wärmeverlust in den ungenutzten Räumen zu minimieren (BAFA, 2019).

Die aufgelisteten Empfehlungen sind teilweise mit hohen Kosten (z.B. Senkung der Vorlauftemperaturen, Dämmung, Wartung etc.) und teilweise mit niedrigen Kosten (z.B. Lüftungsverhalten, Thermostatregelung etc.) verbunden. Welche der genannten Maßnahmen technisch und wirtschaftlich sinnvoll sind, muss im Einzelfall betrachtet werden.

6.3 Empfehlungen zur Machbarkeit der Werra-Wärmenutzung am Nadelwehr

Um eine quantitative Empfehlung für die Machbarkeit der Werra-Wärmenutzung am Nadelwehr zu tätigen, wird im Folgenden eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, um

sicherzustellen, dass die Flusswärmenutzung tatsächlich wirtschaftlich rentabel ist. Hierfür wird eine sogenannte Amortisationszeit bestimmt, d.h. die Zeit, nach der sich die Kosten der Installation der Anlage mit den Ersparnissen durch den Betrieb der WP decken.

Es ist wichtig zu beachten, dass eine WP nicht ausschließlich zur Amortisation der Investitionskosten, sondern auch zu einer Senkung des CO₂-Ausstoßes beiträgt. Diese Senkung wird in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung jedoch nicht eingepreist, obwohl die WP gegenüber einem Gaskessel mehr als 50% der CO₂ Äq.- Emissionen einspart (Bongs et al., 2022).

Eine WP ist in Abhängigkeit der nach VDI 4650-1 berechneten JAZ förderfähig (BAFA, 2019). WPA werden nach der reformierten BEG gefördert. Die Förderung besteht aus einem prozentualen Zuschuss der Investitionskosten und umfasst nicht nur die WPA selbst, sondern auch die Wärmequellenanlage (BAFA, 2023). Für Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-WP kann die Förderung grundsätzlich ab einer JAZ von 2,7 in 2023 und ab 2024 ab einer JAZ von 3,0 genehmigt werden (BAFA, 2023). In Deutschland beträgt die Förderung im Jahr 2023 von bivalenten WP mit einer JAZ von mindestens 2,7 30 % der förderfähigen Kosten, maximal jedoch 6.000 € pro Wohneinheit (BAFA, 2023). Für bivalente WP mit einer JAZ von über 4,0 beläuft sich die Förderung im Jahr 2023 auf 35 % der förderfähigen Kosten, maximal jedoch auf 7.500 € pro Wohneinheit (BAFA, 2023).

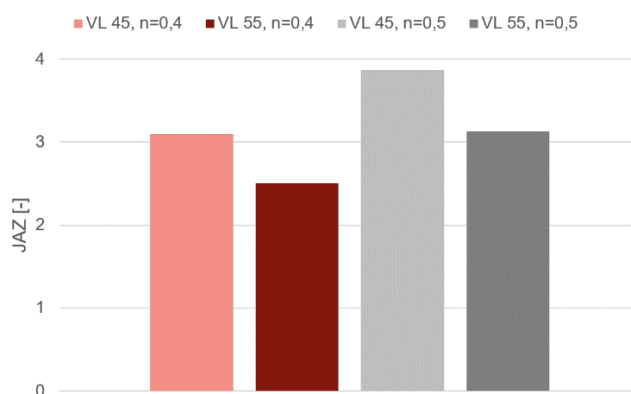


Abbildung 6-5: Berechnete mittlere Jahresarbeitszahlen nach VDI 4650-1 während der Heizperiode

Es wurden die mittleren JAZ während der Heizperiode, für die in Kapitel 3 vorgestellten Vorlauftemperaturen und Gütegrade ermittelt (Abbildung 6-5). Die WPA mit einer Vorlauftemperatur von 55 °C und einem Gütegrad von 0,4 ist aufgrund einer mittleren JAZ von 2,5 nicht förderfähig. Alle anderen angenommenen Vorlauftemperaturen und Gütegrade weisen eine $JAZ \geq 3,1$ auf. Allerdings erreicht ausschließlich der Fall mit der Vorlauftemperatur von 45 °C und einem Gütegrad von 0,5 die mittlere JAZ von 3,9. Für die Berechnung der Amortisationszeit wird angenommen, dass eine Förderung von 30 % für die WPA inkl. Wärmequellenanlage erreicht wird, da dies in drei der vier Systemkonfigurationen von Vorlauftemperatur und Gütegrad zutrifft. Ab 2024 ist bei der Auslegung darauf zu achten, dass eine JAZ von mind. 3,0 erreicht wird, um eine Mindestförderung zu erhalten.

Für die Berechnung der Amortisationszeit werden zunächst die Investitionskosten abgeschätzt. Es werden verschiedene Wärmepumpenhersteller und deren Angaben zu den Investitionskosten verglichen. Die Investitionskosten umfassen die Kosten für die WP, Pufferspeicher,

die zugehörigen Installationskosten, die Erschließung der Wärmequelle, den Genehmigungsantrag sowie die Wartung und die Reinigung der Anlage. Zudem werden die Kosten für die WÜ addiert, die in Kapitel 5.4 berechnet wurden. Die nachfolgenden Investitionskosten wurden anhand von Angaben vier unterschiedlicher Wärmepumpenhersteller (Bosch, Buderus, Vaillant, Viessmann) abgeschätzt:

Die Investitionskosten für die WP betragen je nach Hersteller und Heizleistung zwischen ca. 10.000 und 15.000 €. Die Installationskosten betragen für Wasser-Wasser und Sole-Wasser-WP im Durchschnitt ca. 4.000 € und die Erschließung der Wärmequelle ca. 7000 €. Die Kosten für die WÜ betragen ca. 4.300 bis 15.200 €. Die Kosten für die Antragstellung und die Genehmigung werden mit 3.000 € abgeschätzt. Die beiden Pufferspeicher für die lastflexible Bereitstellung von WW und RW belaufen sich jeweils auf ca. 2.000 €. Der letzte Kostenpunkt betrifft die Wartung der Anlage inklusive Reinigung der WÜ und wird mit ca. 200 €/a abgeschätzt. Diese groben Abschätzungen sollen es den zukünftigen potenziellen Nutzern der WPA ermöglichen, einen Eindruck vom Investitionsumfang zu erhalten (Bosch, 2022, Buderus, 2022, Viessmann, 2011, Vaillant, 2019).

Dementgegen stehen die Ersparnisse, die pro Jahr durch den Betrieb der WP erwirtschaftet werden. Wie viel Strom hierbei pro kWh Wärme benötigt wird, ist abhängig von der JAZ (vgl. Kapitel 3.2). Für die JAZ wird der niedrigste Wert (3,0), der für eine Förderung ab 2024 nötig ist, verwendet. Dieser wird von den untersuchten Systemkonfigurationen ausschließlich bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C und einem Gütegrad von 0,4 unterschritten. Für alle anderen Systemkonfigurationen wird er allerdings erreicht, womit dieser als machbar eingestuft werden kann. Die Ersparnisse durch den Betrieb der WP werden anhand der Energiebezugskosten für Wärmepumpenstrom und Gas berechnet (Kapitel 6.1). Mit den Energiebezugskosten der Versorgerbetriebe Hann. Münden ergibt sich im Februar 2023 bei einem Wärmepumpenstrompreis von 0,240 €/kWh_{Strom} und einer JAZ von 3,0 ein Preis von 0,080 €/kWh_{Wärme}. Mit einem Gaspreis von 0,140 €/kWh_{Gas} fällt mit der angenommenen Effizienz des Gaskessels von 0,9 ein Preis von 0,154 kWh_{Wärme} für die Bereitstellung von RW und WW an. Dies entspricht einer Einsparung von 0,074 €/kWh_{Wärme}. Die jährliche Einsparung ist abhängig vom jährlichen Wärmebedarf des Gebäudes. Die Einsparung sind umso höher, je mehr Wärmebedarf durch die WP gedeckt wird. Es wird angenommen, dass die WP auf 80 % ausgelegt wird und somit einen hydrothermalen Deckungsanteil von 81 % erreicht (Kapitel 6.1). Wie oben erwähnt, beträgt die Förderung ab 2024 30 % für eine JAZ von 3,0 (BAFA, 2023). Für die Anlagenplanung ab 2024 ist zu beachten, dass die Vorlauftemperatur ausreichend gesenkt wird ($JAZ \geq 3,0$), um die Mindestförderung zu erhalten. Außerdem ist zu empfehlen, die JAZ mit einem Gütegrad zu berechnen, der realistisch ist.

Tabelle 6-1 zeigt die Berechnung der Gesamtinvestitionen und der Amortisationszeit pro Gebäude. Die höchsten Investitionskosten treten beim Hotel „Im Anker“ und die Niedrigsten beim „Alten Sydekum“ und im Gebäude der Sydekumstr. 17 auf (Tabelle 6-1; Abbildung 6-6).

Tabelle 6-1: Berechnungstabelle der Investitionskosten und der Amortisationszeit der Wärmepumpen- und Wärmequellenanlage

			Altes Sydekum	Hotel Im Anker	Sydekumstr. 15	Sydekumstr. 17
			Wärmebedarf [kWh/a]			
			18.256	62.485	41.337	17.693
Auslegung [-]	hydroth. Deckungsanteil [-]	Ersparnis [€/kWh]	Ersparnis pro Jahr durch Wärmepumpenbetrieb [€/a]			
20%	33%	0,074	450	1.540	1.019	436
40%	55%	0,074	747	2.558	1.692	724
60%	71%	0,074	956	3.271	2.164	926
80%	81%	0,074	1.096	3.752	2.482	1.062
100%	83%	0,074	1.125	3.850	2.547	1.090
Anlagenteile			Investitionskosten [€]			
Wärmepumpe			10.000	15.000	12.500	10.000
Wärmeübertrager			4.430	15.164	10.032	4.294
Erschließung			7.000			
Installation			4.000			
Genehmigung			3.000			
Pufferspeicher			4.000			
Wartung & Reinigung im Amortisationszeitraum			4.740	1.860	2.420	4.900
Gesamtinvestitionskosten ohne Förderung			37.170	50.024	42.952	37.194
Förderung nach BEG '23			9.729	14.449	12.159	9.688
Gesamtinvestitionskosten inkl. Förderung			27.441	35.575	30.792	27.506
			Amortisationszeit in Jahren			
Amortisationszeit exkl. Förderung			33,9	13,3	17,3	35,0
Amortisationszeit inkl. Förderung			25,0	9,5	12,4	25,9

Abbildung 6-6 zeigt die Investitionskosten inklusive und exklusive Förderung nach BEG mit ca. 27.000 bis 36.000 €.

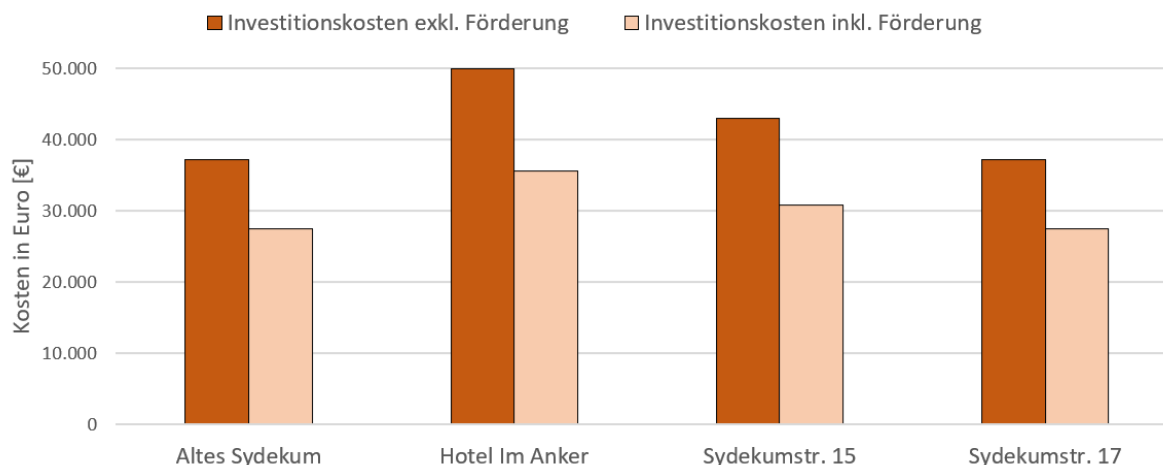


Abbildung 6-6: Investitionskosten der Wärmepumpenanlage exkl. und inkl. Förderung nach BEG

Die Amortisationszeit für das Hotel „Im Anker“ inkl. Förderung beträgt ca. 10 und für das Gebäude in der Sydekumstr. 15 ca. 12 Jahre (Abbildung 6-7). Beim „Alten Sydekum“ als auch beim Gebäude in der Sydekumstr. 17 beträgt der Zeitraum ca. 25 und 26 Jahre (Abbildung 6-7; Tabelle 6-1).

Laut einer Studie des Bundesverbandes Wärmepumpe (BWP) liegt die durchschnittliche Amortisationszeit für eine Luft-Wasser-WP in Deutschland zwischen 8 und 12 Jahren. Für Erdwärmepumpen liegt die durchschnittliche Amortisationszeit bei 10 bis 15 Jahren (BWP, 2016). Es wird geschlussfolgert, dass eine wirtschaftliche Machbarkeit für das Hotel „Im Anker“ und in der Sydekumstr. 17 aufgrund der vergleichsweise niedrigen Amortisationszeiten gegeben ist. Für die Gebäude des „Alten Sydekums“ und der Sydekumstr. 17 ist eine Umsetzung der Flusswärmenutzung als Einzelmaßnahme aufgrund der hohen Amortisationszeiten nicht zu empfehlen.

Die JAZ hat einen erheblichen Einfluss auf die Zeit, mit der sich die Investitionskosten amortisieren. Wird anstelle einer JAZ von 3, eine von 4 erreicht, sinkt die Amortisationszeit um durchschnittlich ca. 21 %. Die Erhöhung der JAZ durch Senkung der Vorlauftemperatur und einen möglichst hohen Gütegrad ist eine Möglichkeit, um die Amortisationszeit zu verkürzen. Weitere Möglichkeiten stellen eine Senkung der Investitionskosten, eine Erhöhung des hydrothermalen Deckungsanteils und eine Anpassung des Nutzerverhaltens dar.

Die Berechnung in dieser Arbeit dient ausschließlich einer Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der Anlage und sollte bei konkreter Umsetzung z.B. durch Experteninterviews genauer untersucht werden.

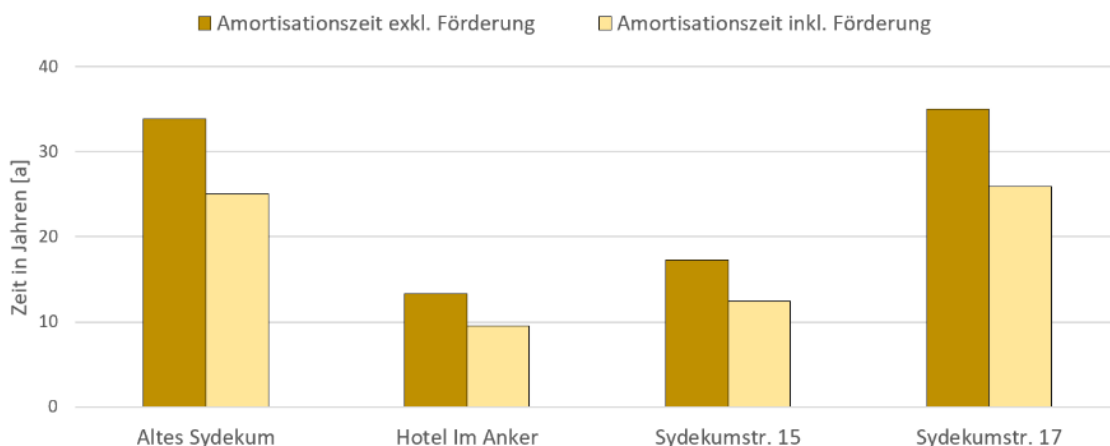


Abbildung 6-7: Amortisationszeit der Wärmepumpenanlage exkl. und inkl. Förderung nach BEG

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Flusswärmenutzung ist eine technische Methode zur Gewinnung von Wärmeenergie aus Fließgewässern. Diese kann mithilfe von WP genutzt werden, um den Einsatz fossiler Brennstoffe zur Wärmebereitstellung in Gebäuden zu reduzieren, sowie Kosten und CO₂-Äq.-Emissionen einzusparen. Die Umstellung von fossilen Energieträgern auf strombetriebene WP, möglichst einhergehend mit Effizienzmaßnahmen an Gebäuden und angepasstem Nutzerverhalten, ist aufgrund von drohendem Gasmangel und steigenden Energiebezugskosten aktueller denn je. Vor diesem Hintergrund gibt diese Machbarkeitsstudie eine Hilfestellung für die thermische Nutzung von Fließgewässern im Gebäudebestand.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Machbarkeit einer Werra-Wärmenutzung in der Dreiflüssestadt Hann. Münden untersucht. Diese setzt eine Prüfung von unterschiedlichen Parametern voraus. Die gewässerseitige Analyse der Werra zeigt, dass die mittlere Gewässertemperatur im Betrachtungszeitraum während der Heizperiode ca. 9,0 °C beträgt. Im Durchschnitt unterschreitet die Werra an 7 Tagen pro Jahr eine Gewässertemperatur von +2 °C und an 30 Tagen eine von +4 °C. Aufgrund von Einleitungen von Salzabwässern kommt es zu einer anthropogenen Gewässererwärmung der Werra. Neben dieser ist die prognostizierte klimatische Gewässererwärmung in zukünftigen Projektvorhaben ebenso zu beachten.

Die Effizienz einer WP wird durch die JAZ ausgedrückt und in Abhängigkeit des Gütegrades für Wasser, der Gewässer- und Vorlauftemperatur, sowie der sogenannten Korrekturfaktoren berechnet. Aus einer Sensitivitätsanalyse der unterschiedlichen Systemkonfigurationen wurde abgeleitet, dass die JAZ für RW mit jedem Grad Temperaturabsenkung der Vorlauftemperatur um ca. 2 % steigt. Es wurde bei der Untersuchung deutlich, dass die JAZ größer ist, je niedriger die benötigte Vorlauftemperatur und je höher der Gütegrad ist. Die JAZ betragen im Durchschnitt während einer Heizperiode zwischen 2,5 und 3,9. Eine Erhöhung der Effizienz der WP ist durch eine Absenkung der Vorlauftemperaturen zu erreichen.

Im Rahmen einer Ortsbegehung und nachfolgendem Informationsaustausch mit den Eigentümern der untersuchten Gebäude wurden jährliche Wärmeverbrauchsdaten erhoben. Es handelt sich um historische Gebäude, die bereits vor mehreren Jahrhunderten erbaut und teilweise saniert wurden. Als vorherrschende Heizungstechnik erzeugt die zentrale Wärmeerzeugung kombiniert RW und Trinkwarmwasser. Die Wärmeübergabe erfolgt in allen Gebäuden über HK (sogenannte Radiatoren). Pro Gebäude wurden während der Heizperiode tägliche, witterungsbereinigte Wärmebedarfswerte für RW und WW ermittelt. Der spezifische Wärmebedarf beträgt zwischen 82 kWh/(m²·a) und 187 kWh/(m²·a), der Absolute zwischen ca. 18.000 kWh/a und 62.000 kWh/a.

Eine technische Herausforderung liegt in der Nutzbarmachung der Werra-Wärme anhand von Wärmeentnahmesystemen. Für die Deckung des Wärmebedarfs ist eine Förderrate bzw. Wärmeübertragerfläche notwendig, die für zwei Wärmeentnahmesysteme berechnet wurden. Angesichts der standortspezifischen Eignung wurde eine Vorzugsvariante mit Edelstahl-Plattenwärmeübertrager evaluiert. Die notwendige Wärmeübertragerfläche beträgt, abhängig vom

jeweiligen Gebäude, zwischen 12,8 und 45,2 m². Bei der Wärmeentnahme wurden ökologische Anforderungen der Werra beachtet, um negative Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaft im Fließgewässer zu vermeiden. Für das konkrete Planungsvorhaben sind die gesetzlichen Rahmenbedingungen zu prüfen und einzuhalten.

Um eine Wärmeversorgung, auch bei besonders niedrigen Gewässertemperaturen sicherzustellen, erfolgt der Einsatz eines bivalenten Heizungsbetriebes, da ein ZWE die Lastspitzen deckt. Die WP wird im bivalenten Betrieb mit den bestehenden Gasheizungen eingesetzt. Es wird empfohlen, Puffer zur Speicherung von RW und WW zu installieren, um lastflexibel heizen zu können. Der hydrothermale Deckungsanteil wurde anhand des Auslegungsfaktors der WP bestimmt. Er beträgt bei maximaler Auslegung der WP und einem Betrieb der Anlage ab +4 °C Gewässertemperatur 83 %. Eine Auslegung der WP auf mind. 80% des Gesamtwärmebedarfes wird empfohlen, um 81% des Wärmebedarfes durch die Flusswärmenutzung zu decken. Da die Energiebezugskosten für Strom pro kWh Wärme kostengünstiger sind als die für Gas, amortisieren sich die Investitionskosten der WPA und Wärmequellenanlage schneller, je höher der hydrothermale Deckungsanteil ist. Die Rentabilität ist ein wichtiger Faktor für die Machbarkeit der Flusswärmenutzung: Investitions- und Betriebskosten sowie Einsparungen infolge der Wärmebereitstellung durch die WP wurden berechnet, um abzuschätzen, nach wie vielen Jahren sich die Werra-Wärmenutzung amortisiert. Es werden Amortisationszeiten zwischen 10 und 26 Jahren für die untersuchten Gebäude erreicht.

Es sind hauptsächlich drei Akteure dafür verantwortlich, ob die WPA effizient arbeitet und zur Klimaentlastung beiträgt; die Wärmepumpenhersteller, die planenden Ingenieure und Installateure sowie die Nutzer. Die Nutzer können mit ihrem Verhalten die Effizienz der WP beeinflussen. Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung, dass die Bewohner eine entsprechende Einführung und Unterstützung zum besseren Verständnis der Arbeitsweise von WP bekommen. Konkrete Empfehlungen zum Betrieb sowie Nutzerverhalten wurden formuliert und nach Kostenaufwand geordnet. Insbesondere Maßnahmen zur Senkung der Vorlauftemperaturen können ein wichtiges Instrument zu einer höheren Effizienz der Anlage darstellen. Im Bereich der RW kann dazu der selektive Austausch einzelner HK ein kosteneffizienter Weg sein. Um eine Bereitstellung von WW mit der WP sicherzustellen, ist darauf zu achten, dass die WP die benötigten Vorlauftemperaturen für die Warmwasserbereitstellung erreichen kann und trotzdem eine JAZ erreicht, die möglichst hoch ist. Für eine hohe Nutzerakzeptanz bezüglich einer wärmeenergetischen Nutzung der Werra ist eine gute und frühzeitige Kommunikation wichtig.

Unabhängig davon, wie ökologisch sinnvoll eine Technologie ist, wird sie sich nur durchsetzen, wenn sie auch ökonomische Vorteile für ihre Nutzer hat. Die Technik muss sich für den Verbraucher bzw. die Person, die die Anlage errichtet, rechnen. Eine umfassende wirtschaftliche Bewertung von WP ist komplex und hängt von sehr vielen Faktoren ab. Derzeit wird ein Teil der Investitionskosten der WPA durch staatliche Förderungen aufgefangen (BAFA, 2023).

Aus einem Vergleich der aktuellen Energiebezugskosten der Versorgerbetriebe in Hann. Münden ist die WP aus Kostensicht, verglichen mit einem Gaskessel, der bevorzugte WE für die untersuchten Systemkonfigurationen. Die Umsetzung der Werra-Wärmenutzung am Nadelwehr in Hann. Münden ist unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit

Vorbehalt machbar. Für das Hotel „Im Anker“ und die Gebäude in der Sydekumstr. 15 ist die Umsetzung aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten vertretbar. Für die Gebäude „Altes Sydekum“ der Sydekumstr. 17 kann aufgrund der hohen Amortisationszeiten keine Empfehlung ausgesprochen werden. Die Ergebnisse sind durch weiterführende Untersuchungen zu prüfen, da im Rahmen dieser Arbeit bewusst Annahmen und Vereinfachungen getroffen wurden.

7.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit ergeben sich Anknüpfungspunkte für weitere Untersuchungen. So werden im Folgenden Aspekte zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Standorte, sowie mögliche Fortsetzungen in Hann. Münden vorgestellt. Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Standorte sind gewässer- und gebäudeseitige Parameter zu prüfen.

Anhand numerischer Modelle sind genauere Untersuchungen der hydraulischen Auswirkungen eines Einbringens von WÜ am Nadelwehr in Hann. Münden denkbar. Auswirkungen auf das Fließverhalten und den Aufstau der Werra durch den Einsatz von WÜ sind zu prognostizieren. Diese sind u.a. für weitere Gewässernutzungen relevant. Dazu sollten systemrelevante Abschnitte vermessen und ein hydraulisches Abfluss-Wasserstands-Modell erstellt werden. Weitere Erkenntnisse zur Biofilmbildung an den wärmeübertragenden Flächen und der damit verbundenen Beeinträchtigung der Wärmeentzugsleistung können durch ergänzende Arbeiten erworben werden. Außerdem könnte die Korrosionsbeständigkeit von geeigneten WÜ in Modellversuchen hinsichtlich der vorliegenden Gewässerbeschaffenheit der Werra erforscht werden.

Um zu einer nachhaltigen und innovativen Wärmeversorgung zur klimaresilienten Stadtentwicklung Hann. Mündens beizutragen, kann weiterhin untersucht werden, ob die Entwicklung eines wärmeenergetischen Quartierskonzeptes eine Möglichkeit zur Wärmeversorgung darstellt. Ein zentraler Baustein ist eine detaillierte Analyse des Wärmebedarfes auf Quartiersebene. Auf dieser Basis sind mögliche Einsparpotenziale im Bestand und Ausbaupotenziale abzuleiten. Ziel ist die Senkung von Kosten zur Wärmeversorgung, sowie die Einsparung von CO₂-Äq.-Emissionen. Zudem bildet eine breiter angelegte Bestandsanalyse eine Grundlage für weitere konkrete Maßnahmen zur nachhaltigen Wärmeversorgung. Anschließend an diese Arbeit kann untersucht werden, ob die Flusswärmenutzung zur Wärmeversorgung im Verbund zweier angrenzender Gebäude (Hotel „Im Anker“, „Altes Sydekum“ und Gebäude in der Sydekumstr. 15 und 17) sinnvoll ist.

Im Rahmen einer Feldstudie kann geprüft werden, welche Vorlauftemperaturen in bestimmten Gebäuden benötigt werden, um genauere Aussagen zur Effizienz der WP zu ermöglichen. Außerdem könnte untersucht werden, welche und wie viele HK ausgetauscht werden müssen, um die Vorlauftemperaturen zu senken. Eine solche Effizienzmaßnahme ist für jedes Gebäude individuell zu evaluieren.

Die Wirksamkeit der Maßnahme hängt dabei insbesondere von dem Sanierungsstand des Gebäudes und der ursprünglichen Dimensionierung der HK ab. Eine raumweise Berechnung des Wärmebedarfes kann eine genauere Dimensionierung der WP ermöglichen. Dazu werden Daten zu den Wärmeverlusten der Gebäudehülle und genaue Grundrisse der Gebäude benötigt. Es sind, wenn möglich, tägliche Wärmeverbrauchsdaten zu erheben, um das Nutzerverhalten

möglichst genau abzubilden und die WP passend zu dimensionieren. Dies minimiert das Risiko einer Unter- bzw. Überdimensionierung. Um den Aufwand einer Datenerhebung zu reduzieren, sollten diese Daten gesammelt zur Verfügung stehen.

Weiterhin kann eine Kombination einer WP mit erneuerbaren Energien wie z.B. PV-Modulen erwägt werden, um die Energiebezugskosten zu senken und möglichst klimaneutral Wärme zu erzeugen.

Der Einsatz von bivalenten Systemen ist bei weiteren Projektstandorten mit begrenzter Flächenverfügbarkeit und bei schrittweiser Verbesserung des energetischen Gebäudestandards möglich. Je nach Flächenverfügbarkeit kann der Auslegungsfaktor der WP und der hydrothermale Deckungsanteil reduziert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass möglichst kurze Amortisationszeiten erreicht werden. Die WP kann außerdem vor geplanter Sanierung installiert werden und gemeinsam mit einem konventionellen WE betrieben werden. Nach der Gebäudesanierung sinkt in der Regel der Wärmebedarf, wodurch die WP die Wärmeerzeugung möglichst vollständig decken kann.

Bei der Auswahl weiterer Projektstandorte sollten Gebäude bevorzugt werden, die sich in geringer Entfernung zur Wärmeentnahme befinden, um Wärmeverluste zu minimieren. Es könnte auch sinnvoll sein, das Potenzial der Wärmepumpe für die Kühlung der Gebäude zu untersuchen, da dies die Wirtschaftlichkeit der Anlage verbessern könnte.

Literaturverzeichnis

- AEE, 2021. *Kommunale Wärmewende*. Agentur für Erneuerbare Energien.
- BABERSCHKE, N., F. SCHAEFER, T. MEINELT und W. KLOAS, 2021. Ion-rich potash mining effluents affect sperm motility parameters of European perch, *Perca fluviatilis*, and impair early development of the common roach, *Rutilus rutilus*.
- BAFA, 2019. *Wärmepumpe - Grundwissen zum Marktanzreizprogramm*.
- BAFA, 2023. *Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärme-markt*.
- BANKS, D., 2010. *An introduction to thermogeology. Ground source heating and cooling*.
- BAUMANN, M., H.J. LAUE und P. MÜLLER, 2010. *Wärmepumpen. Heizen mit Umweltenergie; Informationspaket*. Berlin: Solarpraxis AG.
- BAUNACH, F., 2020. *Auswirkungen von Wasserqualität und Feststoffen auf Wärmequellenanlagen in Fließgewässern und Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen für konstruktive Schutzmaßnahmen. Masterarbeit*. TU Darmstadt.
- BDEW, 2022. *Beheizstruktur des Wohnungsbestands in Deutschland*. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft.
- BDH, 2014. *Bivalente Wärmepumpen-Systeme*.
- BELLACK, HEER, HERRMANN, HOFFMANN und HORNEMANN, 2008. *Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer*. 3., verbesserte Auflage. Berlin: Erich Schmidt.
- BMWI, 2015. *Energieeffizienzstrategie Gebäude*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.
- BÖCKH, P. und T. WETZEL, 2018. *Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis*. 7. Aufl. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- BONGS, C., J. WAPLER, A. DINKEL, M. MIARA und S. AUERSWALD, 2022. *LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden*. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE.
- BORCHARDT, S. und J. GAPPISCH, 2021. *Technische Hydromechanik und Hydraulik 2*. Vorlesungsunterlagen. TU Darmstadt.
- BORCHARDT, S. und J. GAPPISCH, 2022. Meilensteingespräche während Bearbeitung der Master-Thesis. TU Darmstadt.
- BORCHARDT, S., 2018. *Wärmetechnische Nutzung von Fließgewässern*. *Journal für Arbeitsschutz und Umwelt*. Gastbeitrag der Technischen Universität Darmstadt.
- BOSCH, 2022. *Wärmepumpe: Kosten und Preise im Überblick* [online]. Verfügbar unter: <https://www.bosch-thermotechnology.com/>

- BREDE, H. und B. KOPPE, 2019. *Genehmigungsfähigkeit der thermischen Nutzung von Oberflächengewässern*.
- BUDERUS, 2022. *Überblick Kosten Wärmepumpe* [online]. Verfügbar unter: <https://www.buderus.de/de/waermepumpe/kosten>
- BUND, 2022. *Werraversalzung* [online]. Verfügbar unter: <https://www.bund-hessen.de/wasser-und-gewaesser/werraversalzung/>
- BWP, 2016. *Leitfaden Erdwärme*. Bundesverband Wärmepumpe.
- CAISSIE, 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*.
- CUBE, H.L., 1978. *Wärmepumpen. Grundlagen und Praxis*. Düsseldorf.
- DÖTSCH, C., J. TASCHENBERGER und I. SCHÖNBERG, 2017. *Leitfaden Nahwärme*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. UMSICHT-Schriftenreihe. 6.
- DWD, 2022. *Wetter und Klima* [online]. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/>
- EGUIARTE, O., A. GARRIDO-MARIJUÁN, P. de AGUSTÍN-CAMACHO, L. DEL PORTILLO und A. ROMERO-AMORRORTU, 2020. Energy, Environmental and Economic Analysis of Air-to-Air Heat Pumps as an Alternative to Heating Electrification in Europe. *Energies*. Energies.
- FGG WESER, 2022. *Weserdatenbank* [online]. Verfügbar unter: <https://datenbank.fgg-weser.de/weserdatenbank/>
- FRANK GMBH, 2022. *Wasserwärmetauscher* [online]. Verfügbar unter: <https://www.frank-gmbh.de/>
- GAPPISCH, J., 2020. *Thermofluidynamische Grenzschichtprozesse bei hydrothormaler Nutzung von Fließgewässern*. Masterarbeit TU Darmstadt.
- GAUDARD, A., M. SCHMID und A. WÜEST, 2018. Thermische Nutzung von See und Flüssen. Potenzial der schweizer Oberflächengewässer.
- GEBÄUDEENERGIEGESETZ, 2020. *Gebäudeenergiegesetz. Textausgabe mit Gesetzesbegründung*. Dresden.
- GERBITZ, J., K. HABERMANN, NORRMANN JAN, L. ROSENAU, SIEVERS, HERMANN, P. SPIES, T. TIMM und A. STEEGE, 2018. *Energetisches Quartierskonzept Hann. Münden, Neumünden/Fuldablick*.
- GRAICHEN, V., V. BÜRGER, S. GORES, G. PENNINGER und W. ZIMMER, 2012. *Energieeffizienzdaten für den Klimaschutz* [online]. *Umweltbundesamt*.
- GÜNTHER, D., J. WAPLER, R. LANGNER, S. HELMLING und M. MIARA, 2020. *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden*. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE.
- HEßE, W., 2020. *Energieeffiziente Wärmeversorgung von Gebäuden. Tatsächliche Versorgungsverhältnisse und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- HNA, 2022. *Surferwelle an der Werra in Hann. Münden rückt näher* [online]. Verfügbar unter: <https://www.hna.de/lokales/hann-muenden/>

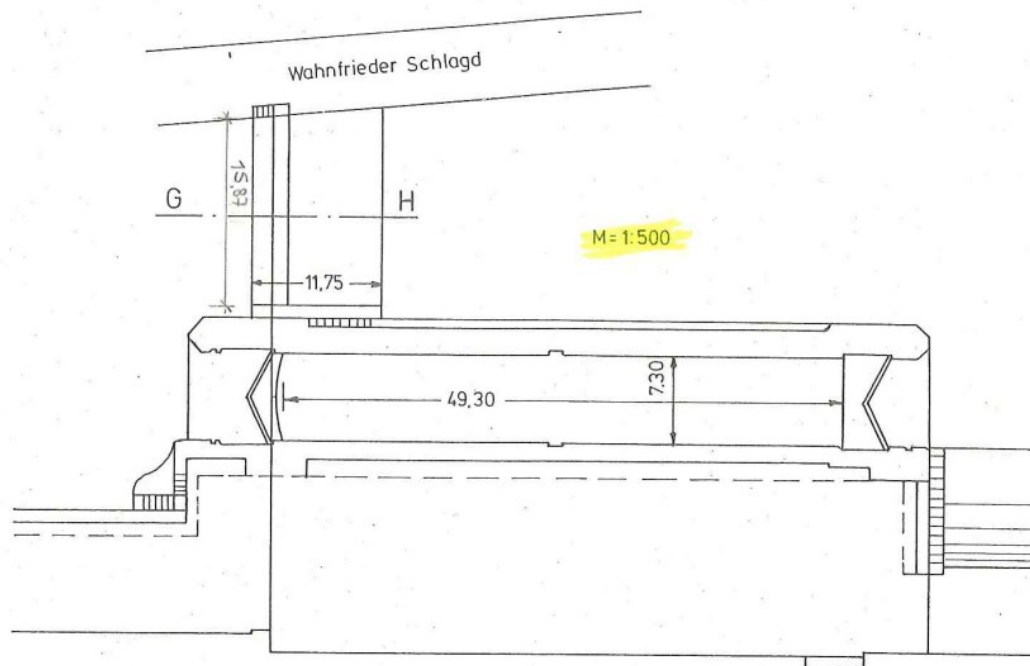
- HOCHHÄUSLER, D., 2022. Werra Welle Nadelwehr. Austausch per Email.
- HOFMANN, G., 2017. *Wärmehaushalt der Gewässer im Zeichen des Klimawandels*.
- IROB, K., M. WAGLER, N. BABERSCHKE, T. MEINELT und W. KLOAS, 2019. Potash mining effluents induce moderate effects on histopathological and physiological endpoints of adult zebrafish (*Danio rerio*). *The Science of the total environment*.
- IWU, 2022. *Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Tools* [online]. Verfügbar unter: <https://www.iwu.de/publikationen/tools/>
- IWU, 2023. *Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Tools* [online]. 15. Februar 2023 [Zugriff am: 15. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.iwu.de/publikationen/tools/>
- JAGNOW, K., D. WOLFF und P. TEUBER, 2004. *Efficiency of heat generators. Proposals to implement the EU regulation: Total energy efficiency of buildings;*
- KAMMER, H., 2018. *Thermische Seewassernutzung in Deutschland. Bestandsanalyse, Potential und Hemmnisse seewasserbetriebener Wärmepumpen*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- KIRN, H., 1983. *Wärmequellen und Wärmespeicher*. Karlsruhe: Müller. Kälte, Wärme, Klima aktuell. 55. ISBN 378807194X.
- LANGHEINECKE, K., 2017. *Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium*. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- LOGA, T., 2003. Heizgrenztemperaturen für Gebäude unterschiedlicher energetischer Standards. Abschätzung der Heizgrenztemperaturen und Bilanzzeiten für das Heizperiodenbilanzverfahren nach DIN V 4108-6. *Bauphysik*, 25(1).
- LOGA, T., B. STEIN, N. DIEFENBACH und R. BORN, 2015. *Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.
- MAGIERA, J. und S. PATER, 2012. Bivalent heating installation with a heat pump and solar collectors for a residential building. *Environment Protection Engineering*, 38(2).
- MANIAK, U., 2010. *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure*. 6. Auflage. Berlin: Springer.
- MATTHÄUS, W.G., 2007. *Statistische Tests mit Excel leicht erklärt. Normalverteilung, Glockenkurve, Quantile*. Wiesbaden: Teubner.
- MATTHES, U. und R. WERNER, 2012. *Leitfähigkeitsmessungen der Werra zwischen Heringen und Widdershausen zur Erstellung von Vertikal- und Längsprofilen*.
- MATTINEN, M.K., A. NISSINEN, S. HYYSALO und J.K. JUNTUNEN, 2015. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Air-Source Heat Pump and Innovative Ground-Source Air Heat Pump in a Cold Climate. *Journal of Industrial Ecology*. ISSN 1530-9290.
- MDR, 2022. Gefahren für Fische durch Salzbelastung der Werra befürchtet [online]. Verfügbar unter: <https://www.mdr.de/>

- MEIER-STAUDE, R. und D. HOCHHÄUSLER, 2022. Machbarkeitsstudie für die Entwicklung einer Surfwehle in der Werra.
- MIARA, M., 2022. *Wärmepumpen: Ökonomische Betrachtung der Betriebskosten, neue Sichtweise*.
- MITCHELL, M.S. und J.D. SPITLER, 2012. *Open-loop direct surface water cooling and surface water heat pump systems—A review*.
- MVV ENERGIE, 2022. *MVV Flusswärmepumpe Mannheim* [online]. Verfügbar unter: <https://www.mvv.de>
- NDR, 2022. Verbände klagen gegen Salzeinleitung in die Werra durch K+S [online]. *NDR*. Verfügbar unter: <https://www.ndr.de/>
- NEUBERT, D., C. GLÜCK, J. SCHNITZIUS, A. MARKO, J. WAPLER, C. BONGS und C. FELS-MANN, 2022. Analysis of the Operation Characteristics of a Hybrid Heat Pump in an Existing Multifamily House Based on Field Test Data and Simulation.
- NIKI LETTIERI, 2021. *Drohnenaufnahme Nadelwehr Hann. Münden* [online]. Verfügbar unter: <https://www.google.com/maps/>
- OGEWV, 2016. *Oberflächengewässerverordnung*.
- PEZOLD, J.D., 2001. Das alte Sydekum.
- PFLUM, S., 2022. Ortsbegehung Hann. Münden am 05.10.2022.
- PUPISKY, H. und I. SHAINBERG, 1979. Salt Effects on the Hydraulic Conductivity of a Sandy Soil. *Soil Science Society of America Journal*.
- SASS, I., 2016. *Vorlesungsskript Geothermie 1*. TU Darmstadt.
- SCHILD, K. und W.M. WILLEMS, 2022. *Wärmeschutz. Grundlagen, Berechnung, Bewertung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg.
- SCHNELL, H. und B. SLIPCEVIĆ, 1990. *Wärmeaustauscher. Rohrbündel-Wärmeaustauscher ; Grundlagen, Aufbau, Anwendung*.
- SCHRÖDER-SCHULZE, M., M. FLAMENSBECK, F. SUMMERER und F. ZIEGLER, 1997. *DKV-Tagungsbericht 1997. Hamburg, 19. - 21. November 1997*.
- SCHWOERBEL, J. und H. BRENDELBERGER, 2022. *Einführung in die Limnologie. Stoffhaushalt - Lebensgemeinschaften - Technologie*. 11. Aufl. 2022: Springer Heidelberg.
- SOBOTTA, S., 2018. *Praxis Wärmepumpe. Technik, Planung, Installation*. 3. Auflage. Berlin: Beuth Verlag.
- STADT HANN. MÜNDEEN, 2022. *Fachdienst Denkmalschutz und Stadtbildpflege* [online]. Verfügbar unter: <https://www.hann.muenden.de>
- STATKRAFT, 2022. Laufwasserkraftwerk Werrawerk [online]. Verfügbar unter: <https://www.statkraft.de/>

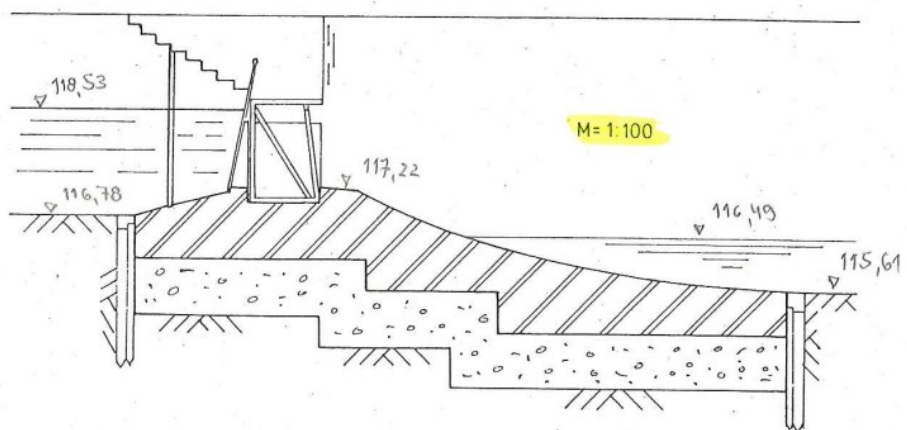
- STEPHAN, P., S. KABELAC, M. KIND, D. MEWES, K. SCHABER und T. WETZEL, 2019. *VDI-Wärmeatlas. Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*. 12. Auflage: Springer Heidelberg.
- TIATOR, I., 2013. *Wärmepumpen und Wärmepumpenanlagen*. 2. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag.
- TLUBN, 2023. Gewässertemperatur der Messstellen Tiefenort, Vacha und Gerstungen in Thüringen. Mail.
- UBA, 2022. *Energieverbrauch privater Haushalte* [online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de>
- VAILLANT, 2019. *Planungsinformationen Wärmepumpe*.
- VDI 3807-1, 2013. *Verbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen*.
- VDI 4645-1, 2018. *Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern*: Beuth Verlag.
- VDI 4650-1, 2019. *Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen. Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung*: Beuth Verlag.
- VDI 4710-2, 2007. *Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung - Gradtage*.
- VIESSMANN, 2011. *Planungshandbuch Wärmepumpen*.
- WERRA-WELLE, 2022. *Surfwelle am Nadelwehr in Hann. Münden* [online]. Verfügbar unter: <https://werrawelle.de/>
- WOLFF, D., P. TEUBER, J. BUDDE und K. JAGNOW, 2004. *Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln*.
- WSA WESER, 2022. *Nadelwehr Hann. Münden* [online]. Verfügbar unter: <https://www.wsa-weser.wsv.de/>
- WSV, 2022. Außenbezirk Hann. Münden. Verfügbar unter: <https://www.wsa-weser.wsv.de/>
- WUNDERLICH, M., 1979. *Auswirkungen des Wärmeentzugs auf die Güte von Oberflächengewässern. Wärmepumpen und Gewässerschutz. Ökologische Auswirkungen von Wärmepumpen mit Wärmeentzug aus Wasser*.

Anhang

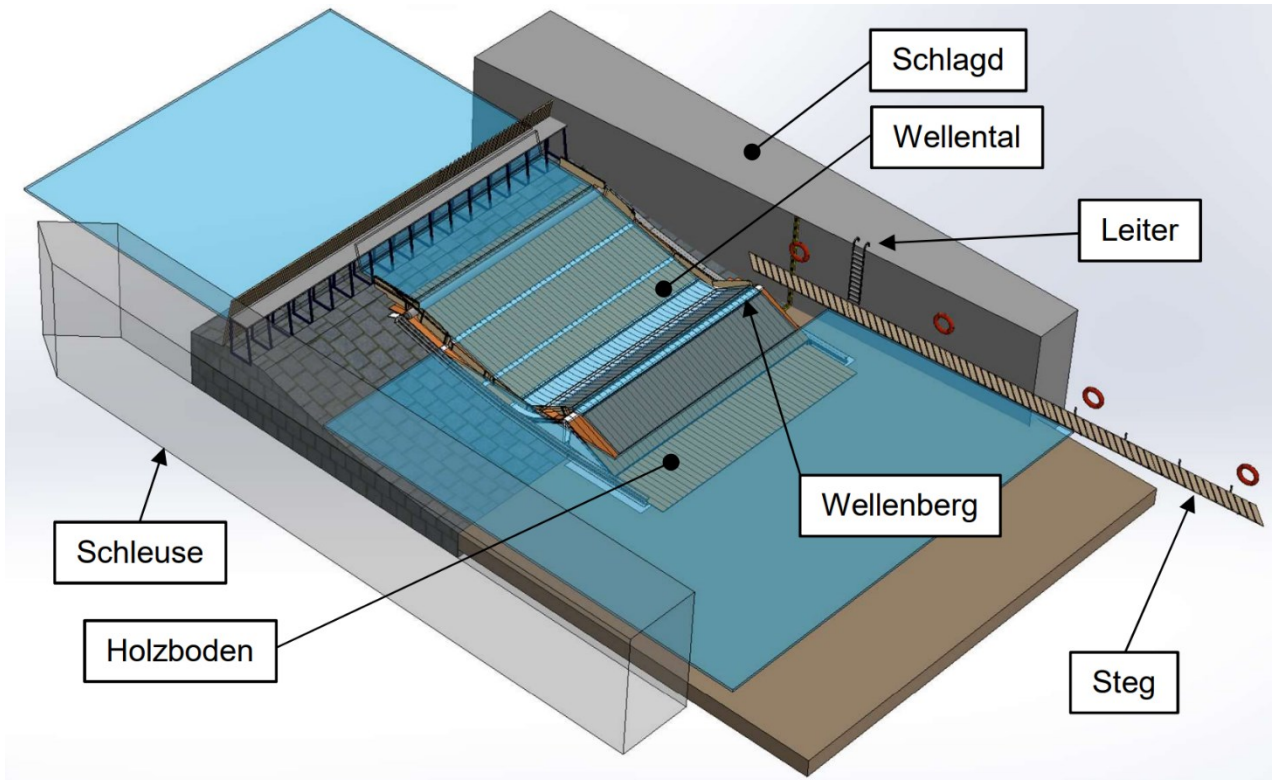
Anhang 1: Schnitt und Draufsicht des historischen Nadelwehrs (bereitgestellt durch Herrn Rempe/WSA).



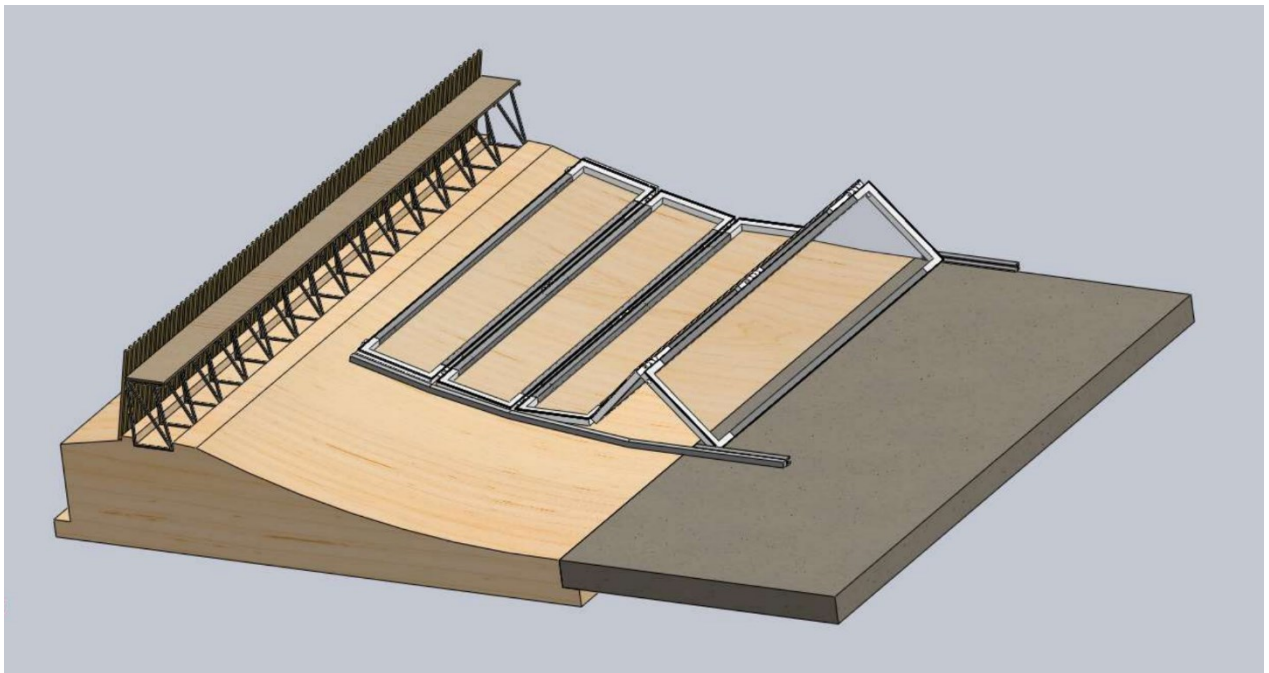
Schnitt G-H



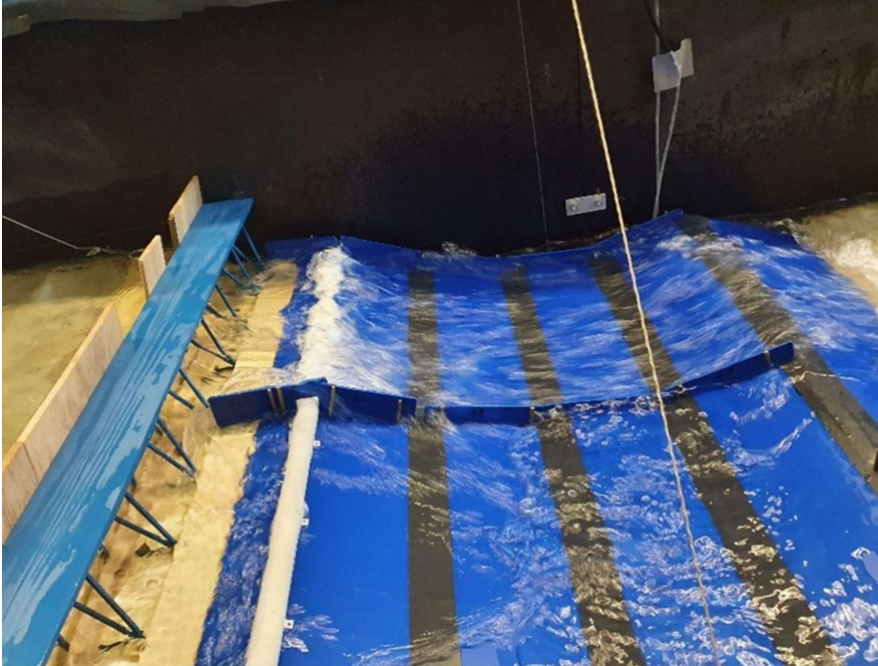
Anhang 2: Modellentwurf des Welleneinbaus unterhalb des Nadelwehres in Hann. Münden (Meier-Staude und Hochhäusler, 2022)



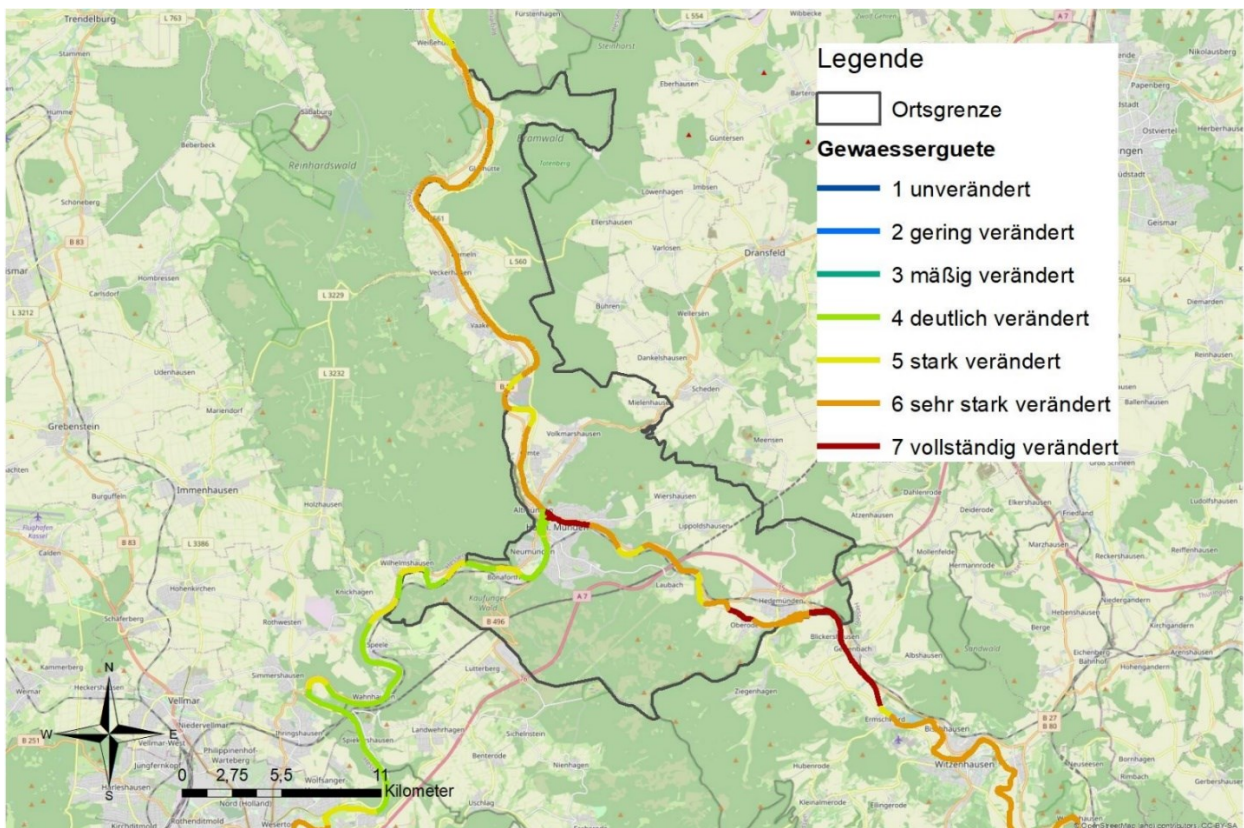
Anhang 3: Modellentwurf des Konstruktionsprinzips „Floater“ (Nicht dargestellt: Platten auf den Elementen, Führungswände, Luftkissen) (Meier-Staude und Hochhäusler, 2022)



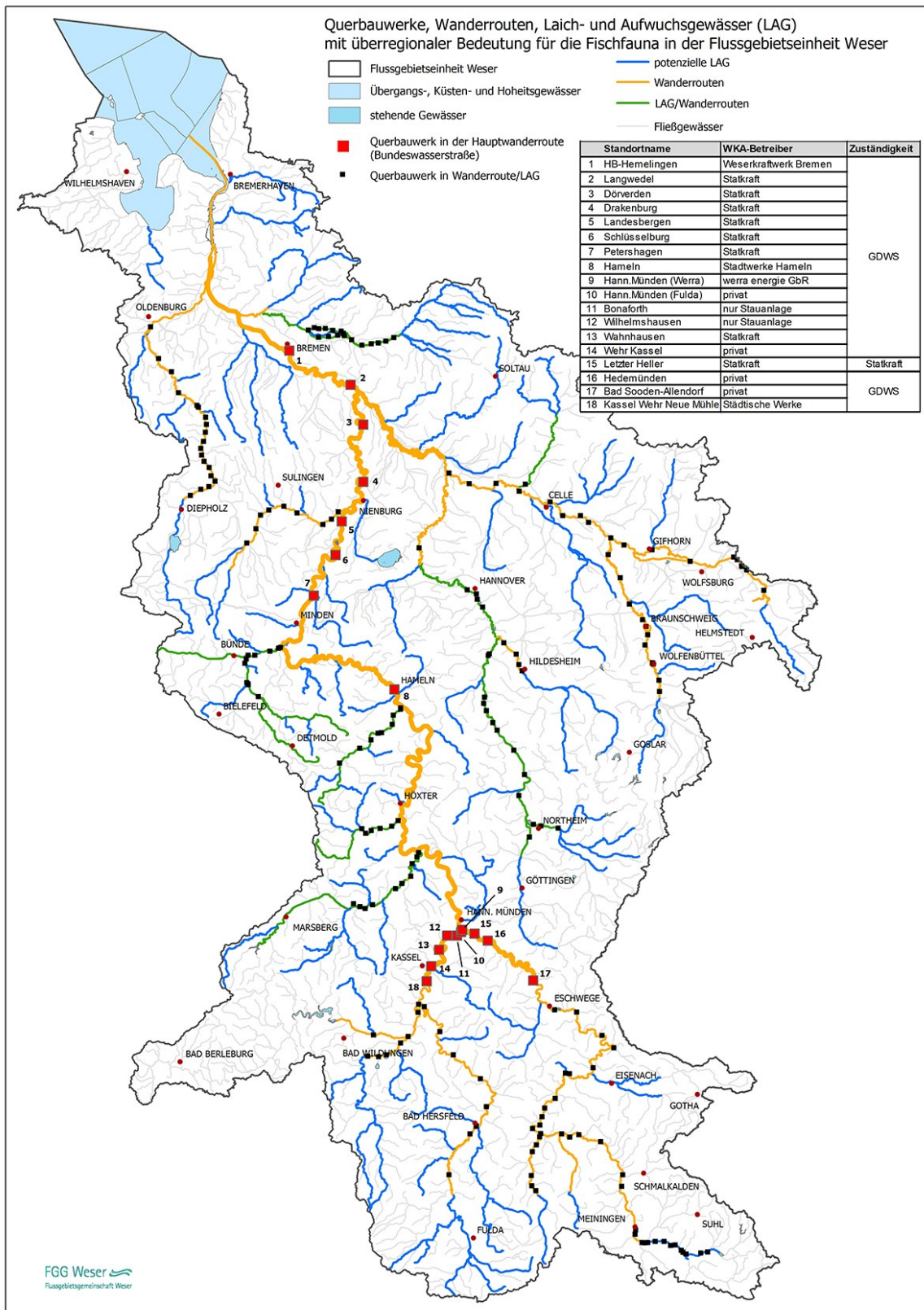
Anhang 4: Welle mit der Breite $B = 5$ m im Maßstab 1:14 im Wasserbaulabor der Hochschule München (Meier-Staude und Hochhäusler, 2022)



Anhang 5: Gewässerstrukturgüte am Standort Hann. Münden auf Grundlage von Daten der BfG 2021, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) 2021 und FGG Weser 1998 (Specht, 2022)



Anhang 6: Querbauwerke in den überregionalen Hauptwanderrouten des EZG Weser (FGG Weser, 2022)



Anhang 7: Hydrologische Daten Werra am Pegel „Letzter Heller“ (FGG Weser, 2022)

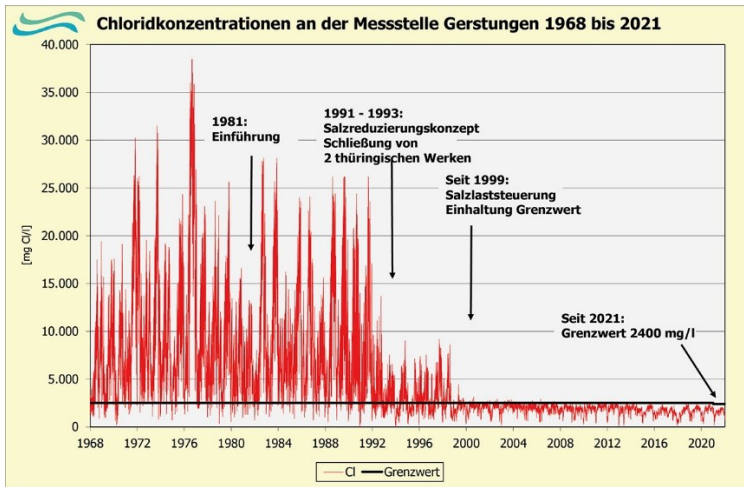
Gewässer	Werra
Pegel	Letzter Heller
Einzugsgebiet [km ²]	5.487
NNQ [m ³ /s]	5,1
MNQ [m ³ /s]	14,4
MQ [m ³ /s]	49
MHQ [m ³ /s]	260
HHQ [m ³ /s]	605
Zeitraum der Hauptwerte	1941-2021

NNQ=Niedrigster Abfluss
MNQ=Mittlerer Niedrigwasserabfluss
MQ=Mittlerer Abfluss
MHQ=Mittlerer Hochwasserabfluss
HHQ=Höchster Abfluss

Anhang 8: Jährlich aufsummierte Unterschreitungstage für Wassertemperaturen der Werra kleiner 0 °C bis +5 °C, sowie die durchschnittliche Anzahl an Unterschreitungstagen pro Grenztemperatur (Ø)

Unterschreitungshäufigkeiten [d] Werra					
Jahr	<1°C	<2°C	<3°C	<4°C	<5°C
2003	0	4	16	38	54
2004	0	5	15	42	72
2005	0	0	12	41	79
2006	12	17	33	71	83
2007	0	0	2	14	23
2008	1	2	3	11	38
2009	8	12	22	41	55
2010	0	24	54	79	102
2011	0	0	6	18	31
2012	14	20	28	34	52
2013	0	3	11	30	56
2014	0	0	0	8	22
2015	0	0	0	3	26
2016	0	4	10	15	35
2017	10	17	32	43	48
2018	3	6	8	18	51
2019	1	6	6	17	33
2020	0	0	1	7	31
2021	7	9	16	35	63
Ø	3	7	14	30	50

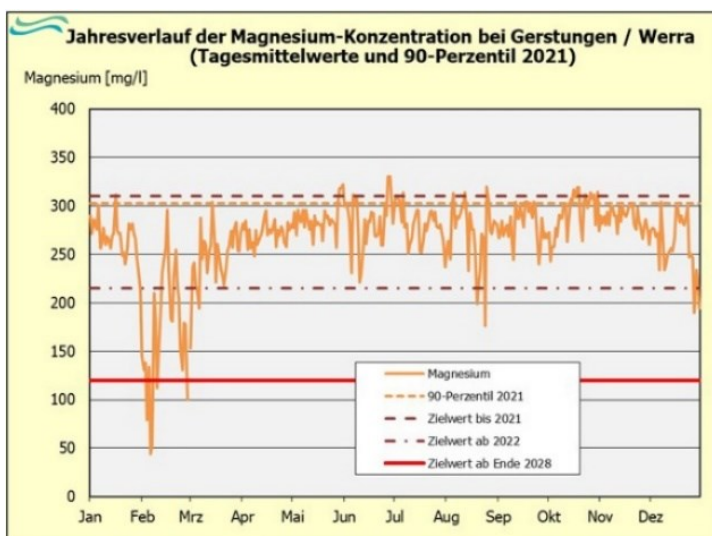
Anhang 9: Verlauf der Chloridkonzentration von 1968 bis 2021 in Gerstungen/Werra (FGG Weser, 2021)



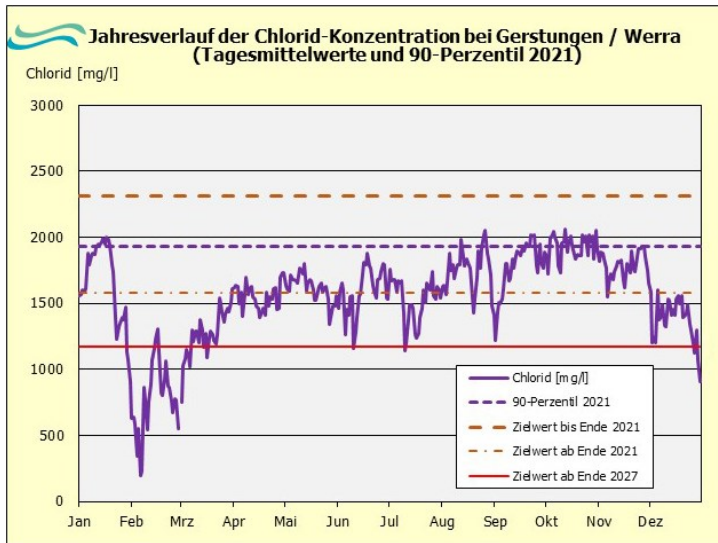
Anhang 10: Kalium-Konzentration bei Gerstungen 2021 (FGG Weser)



Anhang 11: Magnesium-Konzentration bei Gerstungen 2021 (FGG Weser)



Anhang 12: Chlorid-Konzentration bei Gerstungen 2021 (FGG Weser)



Anhang 13: Korrekturfaktor F_p zur Berücksichtigung der Wärmequellenpumpe in der Vorplanung (VDI 4650-1, 2019)

Leistung / Power in kW	Anlagen ohne ZWÜ ^{a)} / Systems without ZWÜ ^{a)}	Anlagen mit ZWÜ ^{a)} / Systems with ZWÜ ^{a)}
> 20 kW	1,14	1,175
(10...20) kW	1,20	1,235
< 10 kW	1,25	1,285

^{a)} Zwischenkreis-Wärmeübertrager / intermediate circuit heat exchange

Anhang 14: Korrekturfaktor $F_{\Delta\theta}$ für abweichende Temperaturdifferenzen am Verflüssiger (VDI 4650-1, 2019)

$\Delta\vartheta_B$ ^{a)} in K	Temperaturdifferenz bei der Prüfstandsmessung $\Delta\vartheta_M$ in K / Temperature difference during laboratory measurement $\Delta\vartheta_M$, in K							
	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1,000	0,990	0,980	0,969	0,959	0,949	0,939	0,928
4	1,010	1,000	0,990	0,980	0,969	0,959	0,949	0,939
5	1,020	1,010	1,000	0,990	0,980	0,969	0,959	0,949
6	1,031	1,020	1,010	1,000	0,990	0,980	0,969	0,959
7	1,041	1,031	1,020	1,010	1,000	0,990	0,980	0,969
8	1,051	1,041	1,031	1,020	1,010	1,000	0,990	0,980
9	1,061	1,051	1,041	1,031	1,020	1,010	1,000	0,990
10	1,072	1,061	1,051	1,041	1,031	1,020	1,010	1,000

^{a)} $\Delta\vartheta_B$ – Temperaturdifferenz beim Betrieb im Auslegungspunkt der Heizungsanlage / $\Delta\vartheta_B$ – temperature difference during operation at the design point of the heating system

Anhang 15: Korrekturfaktor F_{θ} für Sole-Wasser-WP bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen (VDI 4650-1, 2019)

Sole-Wasser-Wärmepumpe / Brine-water heat pump $\vartheta_{B, \min}^{\text{a)}}$ in °C	Maximale Vorlauftemperatur / Maximum supply temperature $\vartheta_{\text{vorl, max}}$ in °C					
	30	35	40	45	50	55
5	1,337	1,273	1,209	1,144	1,079	1,012
4	1,317	1,253	1,189	1,124	1,059	0,992
3	1,298	1,234	1,169	1,104	1,039	0,972
2	1,278	1,214	1,150	1,085	1,019	0,952
1	1,259	1,195	1,131	1,066	1,000	0,933
0	1,241	1,177	1,112	1,047	0,981	0,914
-1	1,223	1,159	1,094	1,029	0,963	0,895
-2	1,206	1,142	1,077	1,011	0,945	0,878
-3	1,190	1,126	1,061	0,995	0,928	0,861

a) $\vartheta_{B, \min}$ – minimale Soleeintrittstemperatur in die Wärmepumpe / minimum temperature of brine at heat pump inlet

Anhang 16: Checkliste Wärmebedarfsanalyse Hann. Münden

Ansprechpartner

Herr/Frau Mustermann

Musterstraße

34346 Hann. Münden

Mittwoch, 22. September 2022

Checkliste Wärmebedarfsanalyse**Gebäudedaten****Notwendige Informationen:**

1. Baujahr des Gebäudes
2. Wohn- bzw. Nutzfläche m²
davon beheizte Fläche m²
3. Anzahl Vollgeschosse
4. Wärmeverbrauch der letzten zehn Abrechnungsjahre in **kWh für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung** (s. Heizkostenabrechnung)

Jahr	Raumwärme:	Warmwasser:
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh
20____	..... kWh	..... kWh

5. **Monatlicher** Wärmeverbrauch für **Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung** der letzten fünf Jahre in **kWh** (falls vorhanden in Heizkostenabrechnung)

Jahr	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov	Dez.
20__												
20__												
20__												
20__												
20__												

6. Art des Heizkörpers

- Radiatorheizung Flächenheizung Lüftung
 Ofen oder Kamin Widerstandsheizung Fußbodenheizung

Anmerkungen:

.....

7. Heizungsart

- Öl Gas Pellet
 Strom Nahwärme Fernwärme

Sonstiges:

Baujahr der Heizung Leistung kW

Optionale Informationen:

8. Gebäudehülle

Fläche

Außenwände (Fassade) m²

Fenster m²

OG-Decke m²

Kellerdecke m²

9. Keller

- beheizt unbeheizt

10. Dachgeschoss

beheizt unbeheizt

11. Sanierungsmaßnahmen nachträglich

Jahr:

Fenster
.....

Dach
.....

Fassade
.....

Anmerkungen:

.....
.....
.....

12. Sonstige Anmerkungen:

.....
.....
.....
.....
.....

Anhang 17: Verbrauchsdaten „Altes Sydekum“ (links) und Verbrauchsdaten Hotel „Im Anker“ (rechts)

Altes Sydekum		Hotel Im Anker	
Fläche [qm]	224	Fläche [qm]	n.a.
Jahr	Verbrauch [kWh]	Jahr	Verbrauch [kWh]
2012	19.049	2020	59.222
2013	23.622	2021	60.981
2014	14.514		
2015	16.035		
2016	16.676		
2017	16.325		
2018	19.108		
2019	17.949		
2020	16.898		
2021	17.629		

Anhang 18: Verbrauchsdaten Sydekumstr. 15 & 17

Sydekumstr. 15 & 17				
Gebäude Sydekumstr. 15 & 17	Syd. 17 Wohnen	Syd. 15 Gewerbe	Syd. 15 1.OG kleine Wohnung	Syd. 15 2.OG große Wohnung
Fläche [qm]	216	89	47	85
Jahr	Verbrauch [kWh]			
2013	22.424	13.399	16.314	0
2014	14.505	6.335	11.260	0
2015	16.818	10.448	13.938	0
2016	15.891	10.729	11.643	14.449
2017	18.154	10.948	16.314	16.787
2018	18.420	6.223	12.950	15.433
2019	12.696	11.579	13.609	15.101
2020	16.725	15.460	12.154	12.640
2021	0	16.837	13.820	14.610

Anhang 19: Wärmebedarf „Altes Sydekum“ in den Jahren 2012 bis 2021. Links; Außentemperaturbereinigter Wärmebedarf für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung. Rechts; Mittlerer Raumwärmebedarf pro Monat

Altes Sydekum		Wärmebedarf [kWh]	
Fläche [qm]	224		
Jahr	Raumwärme	Warmwasser	
2012	15.447	2.857	
2013	18.090	3.543	
2014	14.796	2.177	
2015	14.601	2.405	
2016	13.975	2.501	
2017	14.367	2.449	
2018	17.274	2.866	
2019	16.636	2.692	
2020	16.384	2.535	
2021	14.315	2.644	
Mittelwert [kWh/a]	15.588	2.667	
spez. Wärmebedarf [kWh/(m²-a)]	70	12	

Mittl. Raumwärmebedarf; Altes Sydekum (2012 bis 2021)		
Monat	Heizgradtage [K-d]	Raumwärmebedarf [kWh]
Jan	421	2.945
Feb	368	2.573
Mrz	310	2.172
Apr	173	1.211
Mai	83	579
Jun	0	0
Jul	0	0
Aug	0	0
Sep	52	364
Okt	166	1.161
Nov	275	1.922
Dez	380	2.662
Gesamt	2.227	15.588

Anhang 20: Wärmebedarf Hotel „Im Anker“ in den Jahren 2020 bis 2021. Links; Außentemperaturbereinigter Wärmebedarf für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung. Rechts; Mittlerer Raumwärmebedarf pro Monat

Hotel Im Anker	Wärmebedarf [kWh]	
Fläche [qm]	480	
Jahr	Raumwärme	Warmwasser
2020	57.422	8.883
2021	49.517	9.147
Mittelwert [kWh/a]	53.470	9.015
spez. Wärmebedarf [kWh/(m ² ·a)]	111	19

Mittl. Raumwärmebedarf; Hotel im Anker (2020 bis 2021)		
Monat	Heizgradtage [K·d]	Raumwärmebedarf [kWh]
Jan	421	10.102
Feb	368	8.825
Mrz	310	7.449
Apr	173	4.154
Mai	83	1.988
Jun	0	0
Jul	0	0
Aug	0	0
Sep	52	1.247
Okt	166	3.981
Nov	275	6.593
Dez	380	9.131
Gesamt	2.227	53.470

Anhang 21: Wärmebedarf Sydekumstr. 15 in den Jahren 2016 bis 2021. Links; Außentemperaturbereinigter Wärmebedarf für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung. Rechts; Mittlerer Raumwärmebedarf pro Monat

Sydekumstr. 15	Wärmebedarf [kWh]	
Fläche [qm]	221	
Jahr	Raumwärme	Warmwasser
2016	30.857	5.523
2017	38.765	6.607
2018	31.285	5.191
2019	37.343	6.043
2020	39.030	6.038
2021	36.757	6.790
Mittelwert [kWh/a]	35.456	5.881
spez. Wärmebedarf [kWh/(m ² ·a)]	160	27

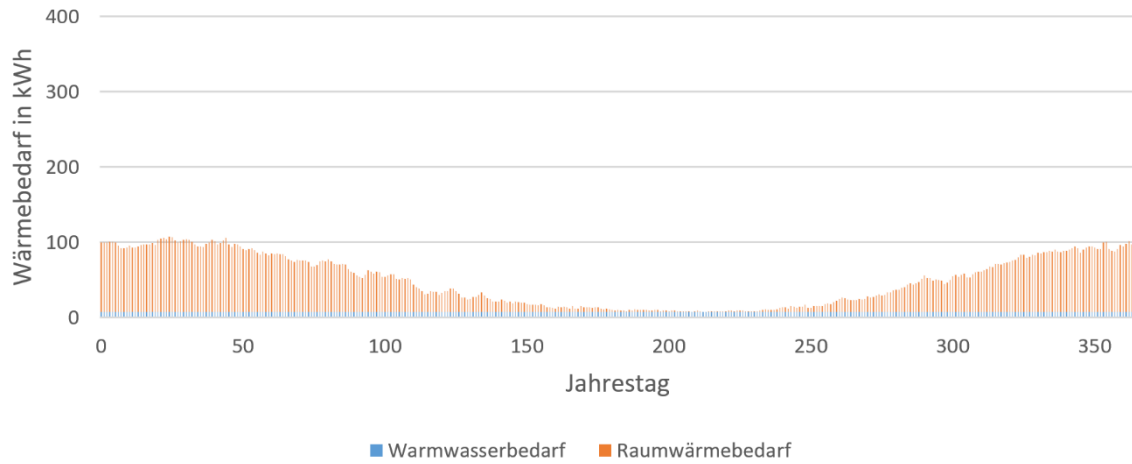
Mittl. Raumwärmebedarf; Sydekumstr. 15 (2016 bis 2021)		
Monat	Heizgradtage [K·d]	Raumwärmebedarf [kWh]
Jan	421	6.699
Feb	368	5.852
Mrz	310	4.940
Apr	173	2.754
Mai	83	1.318
Jun	0	0
Jul	0	0
Aug	0	0
Sep	52	827
Okt	166	2.640
Nov	275	4.372
Dez	380	6.055
Gesamt	2.227	35.456

Anhang 22: Wärmebedarf Sydekumstr. 17 in den Jahren 2013 bis 2020. Links; Außentemperaturbereinigter Wärmebedarf für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung. Rechts; Mittlerer Raumwärmebedarf pro Monat

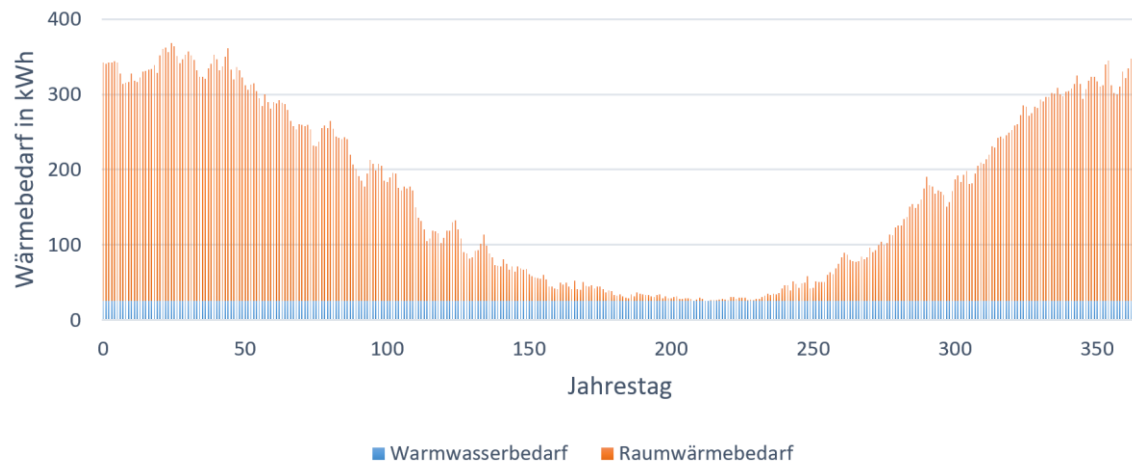
Sydekumstr. 17	Wärmebedarf [kWh]	
Fläche [qm]	216	
Jahr	Raumwärme	Warmwasser
2013	17.172	3.364
2014	14.787	2.176
2015	15.314	2.523
2016	13.317	2.384
2017	15.976	2.723
2018	16.652	2.763
2019	11.768	1.904
2020	16.217	2.509
Mittelwert [kWh/a]	15.150	2.543
spez. Wärmebedarf [kWh/(m ² ·a)]	70	12

Mittl. Raumwärmebedarf; Sydekumstr. 17 (2013 bis 2020)		
Monat	Heizgradtage [K·d]	Raumwärmebedarf [kWh]
Jan	421	2.862
Feb	368	2.500
Mrz	310	2.111
Apr	173	1.177
Mai	83	563
Jun	0	0
Jul	0	0
Aug	0	0
Sep	52	353
Okt	166	1.128
Nov	275	1.868
Dez	380	2.587
Gesamt	2.227	15.150

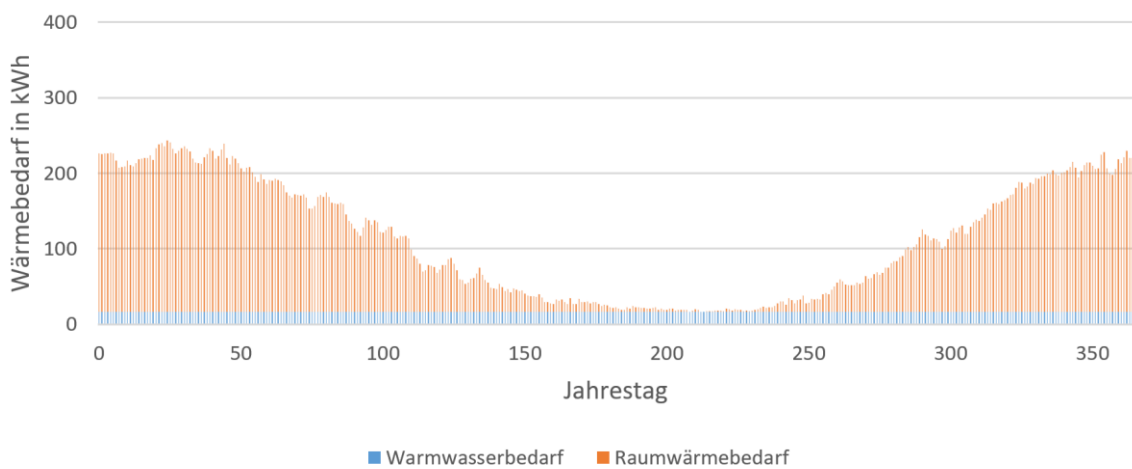
Anhang 23: Täglicher Wärmebedarf „Altes Sydekum“



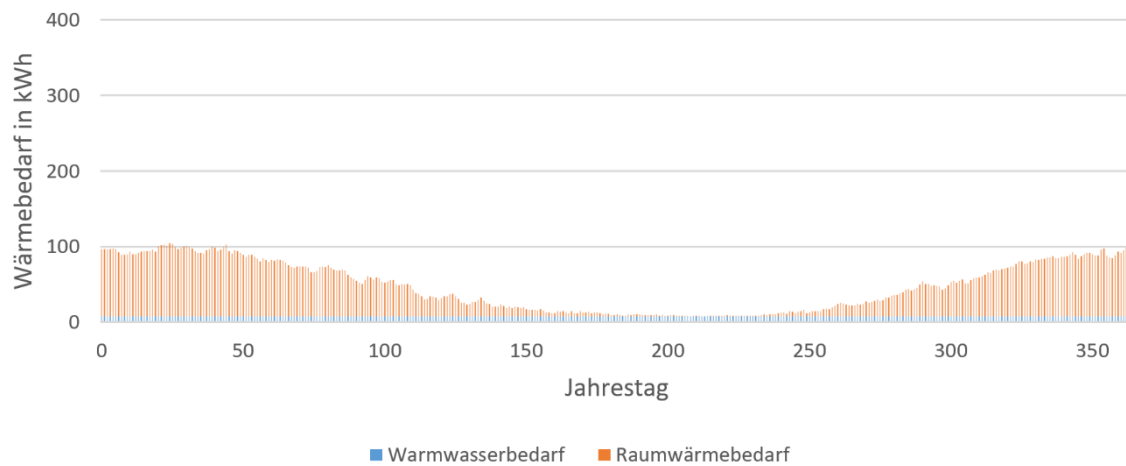
Anhang 24: Täglicher Wärmebedarf Hotel „Im Anker“



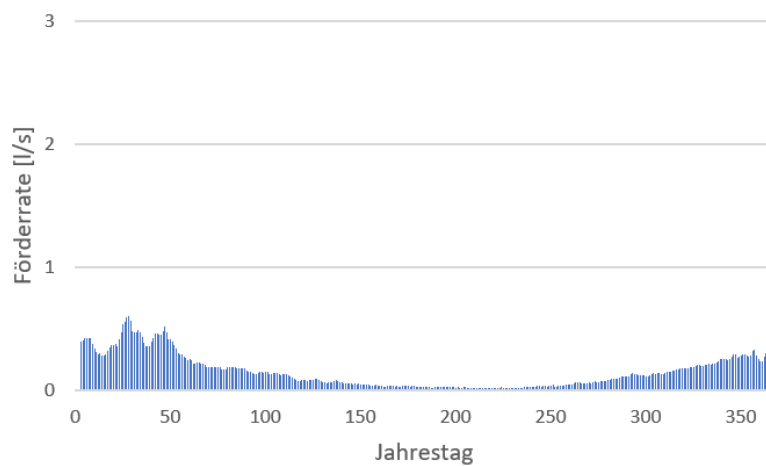
Anhang 25: Täglicher Wärmebedarf Sydekumstr. 15



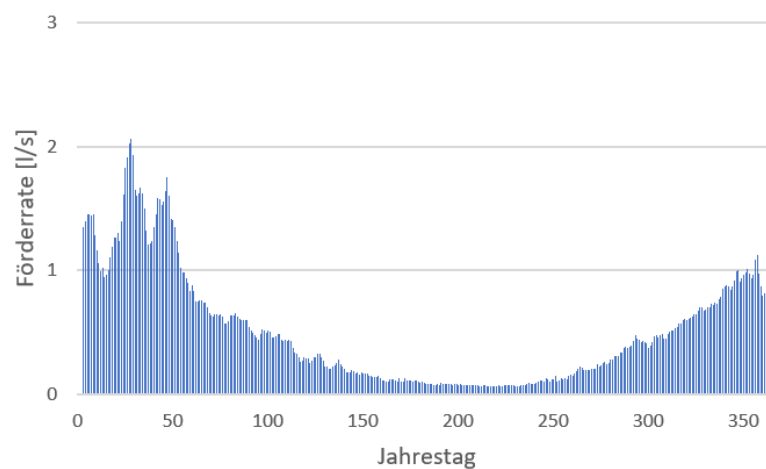
Anhang 26: Täglicher Wärmebedarf Sydekumstr. 17



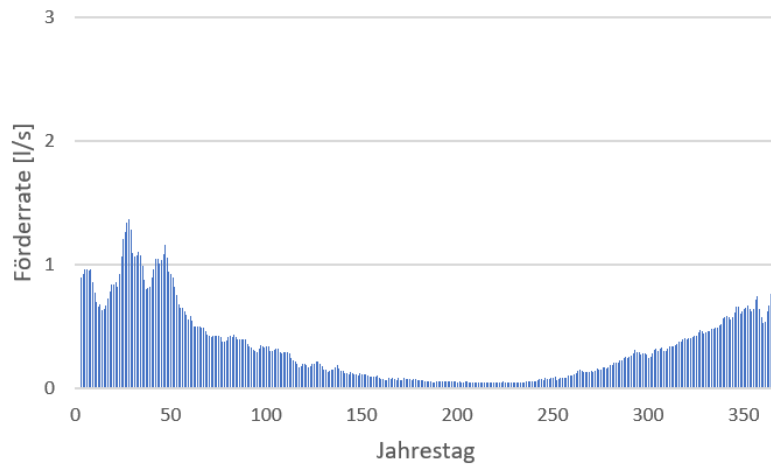
Anhang 27: Benötigte tägliche Förderrate offenes System „Altes Sydekum“



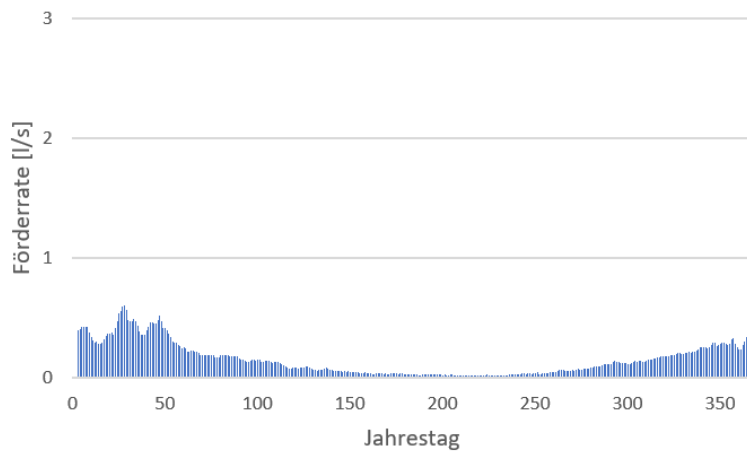
Anhang 28: Benötigte tägliche Förderrate offenes System Hotel Anker



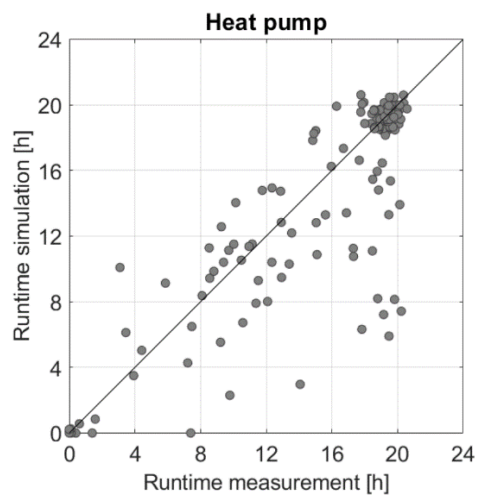
Anhang 29: Benötigte tägliche Förderrate offenes System Sydekumstr. 15



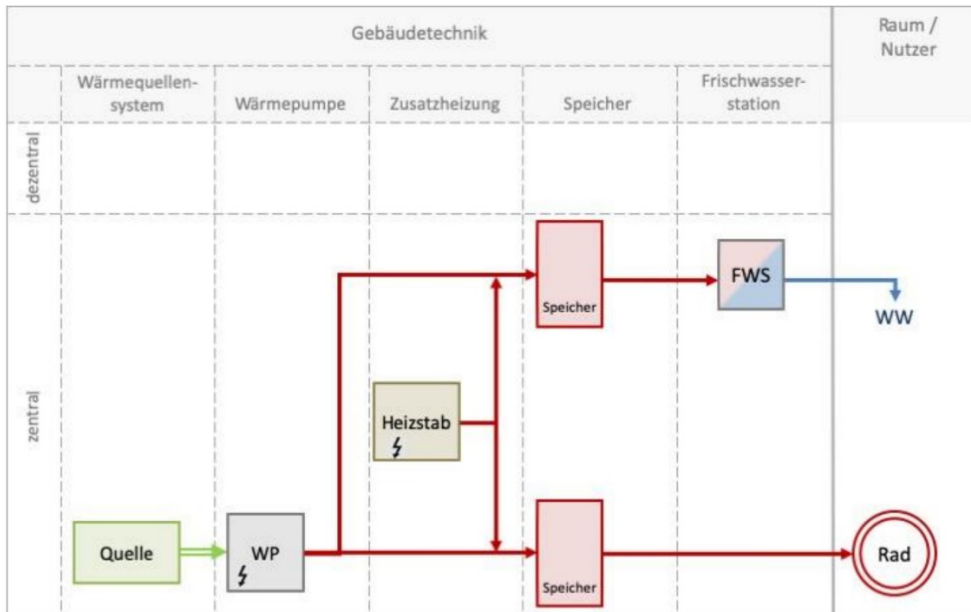
Anhang 30: Benötigte tägliche Förderrate offenes System Sydekumstr. 17



Anhang 31: Tägliche Laufzeit der WP für ein Mehrfamilienhaus im Bestand



Anhang 32: Monoenergetisches Wärmepumpensystem in schematischer Darstellung (Bongs et al., 2022)



Eidesstattliche Erklärung

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Simon Constantin Schwarze, die vorliegende Master-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

English translation for information purposes only:

Thesis Statement pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt

I herewith formally declare that I, Simon Constantin Schwarze, have written the submitted thesis independently pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt. I did not use any outside support except for the quoted literature and other sources mentioned in the paper. I clearly marked and separately listed all of the literature and all of the other sources which I employed when producing this academic work, either literally or in content. This thesis has not been handed in or published before in the same or similar form.

I am aware, that in case of an attempt at deception based on plagiarism (§38 Abs. 2 APB), the thesis would be graded with 5,0 and counted as one failed examination attempt. The thesis may only be repeated once.

Datum / Date:

27.02.2023

Unterschrift/Signature:

C. Schwarze