

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität Darmstadt



Potenzialanalyse zur Flusswärmenutzung in Hann. Münden

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

Bachelorthesis

von

Kristina Specht

aus Barnaul (Matrikelnummer 2430979)

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

Tag der Einreichung: 29.06.2022

Darmstadt, im Juni 2022

Kristina Specht
kristina.specht@gmx.de
Studiengang: B. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Bachelorarbeit zum Thema:
Potenzialanalyse zur Flusswärmenutzung in Hann. Münden
(Potential Analysis for Thermal Use of Rivers in Hann. Münden)

Eingereicht: 29. Juni 2022

Überarbeitete Fassung vom 25. September 2022, veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

Ansprechpersonen: Steve Borchardt, M.Sc. und Jessika Gappisch, M.Sc.

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann
Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Technische Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

Kurzfassung

Wärmepumpen gelten als Schlüsseltechnologie der Wärmewende. Eine Wärmepumpe ist in der Lage, thermische Energie eines Umweltmediums – sei es Erde, Wasser oder Luft – mit Hilfe zugeführter Antriebsenergie zur Warmwasser- und Wärmebereitstellung nutzbar zu machen. Oberflächengewässer werden in Deutschland bislang nur selten als Wärmequelle genutzt. Doch die außergewöhnlich hohe Wärmespeicherkapazität von Wasser sowie die stetige selbständige Regeneration eines fließgewässers sind gute Voraussetzungen für den Wärmeentzug. In Anbetracht des großen Vorkommens fließender Gewässer in der Dreiflüssestadt Hann. Münden gilt es in dieser Arbeit, das Potenzial der Flüsse Fulda, Werra und Weser für die Wärmegegewinnung abzuschätzen. Diesbezüglich wurden Temperatur- und Abflussdaten an jeweiligen fließgewässern erhoben, aufbereitet und analysiert. Im Hinblick auf die vorliegenden Temperaturdaten zeigt die Werra im Mittel das höchste Temperaturniveau. Dementsprechend fallen temperaturabhängige Wärmepumpen-Effizienzkennzahlen für diese vorteilhaft aus. Weil sich Fulda und Werra in Hann. Münden zur Weser zusammenschließen, weist letztere hingegen den quantitativ größten Abfluss auf. Infolgedessen lässt sich für die Weser auch das höchste Wärmepotenzial berechnen. Eine Unterteilung der Beobachtungsperioden zeigte eine Temperaturerhöhung der Fulda auf das Niveau der Werra für das jüngste Jahrzehnt. Da Fulda und Werra aber ihre Quellflüsse darstellen, ist auch für die Weser von einem erhöhten Temperaturniveau in jüngster Periode auszugehen. Potenzielle Standorte für die Installation eines Wärmetauschers bieten vorhandene wasserwirtschaftliche Nutzungsanlagen, welche in Hann. Münden zahlreich sowohl an der Fulda als auch an der Werra vorhanden sind.

Abstract

Heat pumps are considered a key technology for a heat transition. A heat pump is capable of harnessing the thermal energy of an environmental medium – whether it is earth, water or air – with the help of supplied electrical energy to provide hot water and heat. Surface water has rarely been used as a heat source in Germany to date. However, the extraordinarily high heat storage capacity of water as well as the constant independent regeneration of a flowing waterbody are good prerequisites for heat extraction. In view of the large occurrence of flowing waters in the three-river town of Hann. Münden, the aim of this work is to assess the potential of the rivers Fulda, Werra and Weser for heat extraction. In this respect, temperature and discharge data at the respective flowing waters were collected, processed and analyzed. Considering the available temperature data, the Werra shows the highest temperature level on average. Accordingly, temperature-dependent heat pump efficiency indicators turn out to be advantageous for it. Because the Fulda and Werra join to form the Weser in Hann. Münden, the latter, on the other hand, has the quantitatively highest discharge. Consequently, the highest heat potential can also be calculated for the Weser. A subdivision of the observation periods showed a temperature increase of the Fulda to the level of the Werra for the most recent decade. However, since the Fulda and Werra represent its source, an increased temperature level in the recent period can also be assumed for the Weser. Potential locations for the installation of a heat exchanger are offered by existing water management utilization plants, which are numerous in Hann. Münden on both Fulda and Werra.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Symbolverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Die Wärmepumpenheizungsanlage	3
2.1 Aufbau und Funktionsweise der Wärmepumpenheizungsanlage	3
2.2 Ausführung der Wärmequellenanlage	5
2.3 Betriebsweise der Wärmepumpenanlage	5
2.4 Effizienz der Wärmepumpe	6
3 Rechtlicher Rahmen	8
3.1 Europäische Wasserrahmenrichtlinie	8
3.2 Bundesweite Wassergesetzgebung	8
3.2.1 Wasserhaushaltsgesetz	8
3.2.2 Oberflächengewässerverordnung	9
3.3 Landesweite Wassergesetzgebung	10
3.3.1 Niedersächsisches Wassergesetz	10
3.3.2 Niedersächsisches Fischereigesetz	10
4 Wärmepumpen an Fließgewässern	11
4.1 Wärmequelle Oberflächengewässer	11
4.2 Rahmenbedingungen der Flusswärmenutzung	13
4.3 Auswirkungen der Wärmegewinnung im Fließgewässer	16
4.3.1 Physikalische und chemische Veränderungen	16
4.3.2 Biologische und ökologische Konsequenzen	17
5 Potenzialanalyse zur Flusswärmenutzung in Hann. Münden	20
5.1 Beschreibung des Projektgebiets	20
5.2 Analyse des gewässerseitigen Wärmepotenzials	24
5.2.1 Datenbeschaffung und -aufbereitung	24
5.2.2 Datenauswertung	29
5.2.3 Analyse des Wärmepotenzials und der Leistungskennzahlen	32
5.3 Diskussion der Ergebnisse	35
5.4 Zusammenfassung	39
6 Schlussfolgerungen für die Wärmenutzung	41
6.1 Allgemeine Empfehlungen	41
6.2 Wahl der geeigneten Wärmepumpenanlage	43

7 Fazit und Ausblick	44
8 Literaturverzeichnis	45
9 Quellenverzeichnis	50
10 Anlagenverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Systembild einer Wärmepumpenheizungsanlage	3
Abbildung 2.2:	Aufbau einer Wärmepumpenheizungsanlage	4
Abbildung 2.3:	Anteil von Wärmepumpe und Zusatzheizung an gesamt benötigter Heizleistung bei bivalent alternativer und bivalent paralleler Betriebsweise	6
Abbildung 4.1:	Austauschprozesse eines Oberflächengewässers mit der Atmosphäre	12
Abbildung 4.2:	Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten dreier Kältemittel bei steigender Fließgeschwindigkeit	16
Abbildung 5.1:	Flusseinzugsgebiet der Weser mit Darstellung der Hauptflüsse, Unterteilung in verschiedene Flussabschnitte und Markierung des Projektstandorts	20
Abbildung 5.2:	Vieljährige Mittelwerte (1991 - 2020) des Parameters Lufttemperatur für Deutschland und die Wetterstation Göttingen bzw. für Deutschland , die Wetterwarten an der Wasserkuppe und in Neuhaus	22
Abbildung 5.3:	Vieljährige Mittelwerte (1991 - 2020) des Parameters Niederschlag für Deutschland und die Wetterstation Göttingen bzw. für Deutschland , die Wetterwarte an der Wasserkuppe und in Neuhaus	23
Abbildung 5.4:	Lage der betrachteten Messstationen am Standort Hann. Münden	24
Abbildung 5.6:	Schema der erstellten Tabellen für Temperatur- und Abflussmessdaten	26
Abbildung 5.7:	Jahresganglinie von 1998 aus Rohdaten und linearen interpolierten Daten	28
Abbildung 5.8:	Verlauf der Luft- und Wassertemperatur in den Jahren 1996 und 1997	28
Abbildung 5.9:	Vergleich der Wassertemperatur-Jahresganglinien eines charakteristischen Jahres der Fulda, Werra und Weser	29
Abbildung 5.10:	Gegenüberstellung der Jahresdauerlinien eines charakteristischen Jahres von Fulda, Werra und Weser zur Betrachtung der Grenztemperatur +4° C	30
Abbildung 5.11:	Vergleich des Wärmepotenzials von Fulda, Werra und Weser im Verlauf des charakteristischen Jahres	33
Abbildung 5.12:	Häufigkeitsverteilung der Leistungszahl 35 für das Heizungssystem bezogen auf die charakteristische Heizperiode und der Leistungszahl 55 für die Warmwasserbereitstellung bezogen auf das charakteristische Jahr	35
Abbildung 5.13:	Vergleich der Wassertemperatur-Jahresganglinien der Fulda, Werra und Weser für den Zeitraum 2003 bis 2021	37
Abbildung 5.14:	Vergleich der gruppierten Jahresganglinien der Wassertemperaturen an der Werra für 2003 bis 2021 und an der Fulda für 2012 bis 2021	38
Abbildung 6.1:	Potenzielle Standorte an wasserwirtschaftlichen Nutzungsanlagen für die Installation eines Wärmeübertragers an Fulda und Werra in der Altstadt Hann. Mündens	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Von modernen Wärmepumpen erzielte Höchstwerte für den Gütegrad	7
Tabelle 4.1:	Grenzwerte und hydromechanische Anforderungen für die Nutzung von Wärmepumpenanlagen an Fließgewässern	16
Tabelle 5.1:	Übersicht der eingeholten Datensätze an betrachteten Messstationen	25
Tabelle 5.2:	Umgang mit fehlerhaften Temperaturdaten	26
Tabelle 5.3:	Gegenüberstellung der Unterschreitungshäufigkeiten aus gemittelten Jahresdauerlinien und durchschnittlicher Anzahl an Unterschreitungstagen	31

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Bedeutung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU	Europäische Union
EZG	Einzugsgebiet
FGG	Flussgebietsgemeinschaft
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GK	Güteklasse
Hann. Münden	Hannoversch Münden
HLNUG	Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
JAZ	Jahresarbeitszahl
NLWKN	Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NWG	Niedersächsisches Wassergesetz
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Gewässerquerschnitt	m^2
c_p	Wärmespeicherkapazität	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d	Jahrestag innerhalb der Datenlücke	-
d_1	Jahrestag direkt vor der Datenlücke	-
d_2	Jahrestag direkt nach der Datenlücke	-
e_{WP}	Jahresaufwandszahl	-
F_P	Korrekturfaktor für die Wärmequellenanlage	-
F_9	Korrekturfaktor für die Wasser-Wasser-Wärmepumpe	-
$F_{\Delta\theta}$	Korrekturfaktor für abweichende Temperatur am Verflüssiger	-
$t(d)$	fehlender Temperaturmesswert	$^{\circ}C$
t_1	Temperatur direkt vor der Datenlücke	$^{\circ}C$
t_2	Temperatur direkt nach der Datenlücke	$^{\circ}C$
t_W	Wassertemperatur	$^{\circ}C$
$t_{W, \text{ein}}$	Eintrittstemperatur in die Wärmepumpe	$^{\circ}C$
$t_{\text{vorl, max}}$	Maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe	$^{\circ}C$
T_N	Temperaturen von Wärmesenke	K
T_U	Temperaturen von Wärmequelle	K
T_V	Wärmeverlust	K
Q_{Gew}	Abfluss	$m^3 \cdot s^{-1}$
Q_{th}	Wärmepotenzial eines Fließgewässers	kW
v	Fließgeschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
\tilde{x}_T	Median der Wassertemperatur	$^{\circ}C$
\tilde{x}_Q	Median des Abflusses	$m^3 \cdot s^{-1}$
\bar{x}_T	Mittelwert der Wassertemperatur	$^{\circ}C$
\bar{x}_Q	Mittelwert des Abflusses	$m^3 \cdot s^{-1}$
\emptyset	Durchschnittliche Anzahl an Unterschreitungstagen	d

Griechische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
β	Jahresarbeitszahl	-
β_{35}	JAZ des Heizungssystems	-
β_{55}	JAZ für die Warmwasserbereitstellung	-
ΔT_{Gew}	Temperaturspreizung im Gewässer	K
ε_{35}	Leistungszahl des Heizungssystems	-
ε_{55}	Leistungszahl für die Warmwasserbereitstellung	-
ε_C	Leistungszahl nach Carnot	-
ε_{WP}	Leistungszahl der Wärmepumpe	-
η	Gütegrad	-
ρ	Wasserdichte	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

1 Einleitung

In Anbetracht jüngster politischer Entwicklungen in Europa wurde die Abhängigkeit Deutschlands von Energieimporten und damit von anderen Staaten deutlich aufgezeigt. Forderungen nach einem Embargo sowie Befürchtungen vor einem Lieferstopp zwingen die Politik, kurzfristig nach Alternativen zu suchen. Doch vor dem Hintergrund limitierter Primärenergierohstoffe und deren negativen Umweltwirkungen müssen fossile Rohstoffe auch langfristig ersetzt werden.

Bereits 2016 verabschiedete die Bundesregierung den Klimaschutzplan 2050, in dem Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen bis hin zur Neutralität beschlossen wurden. Zum Erreichen des Gesamtziels wird die Wirtschaft in die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft unterteilt. Während im Stromsektor im letzten Jahrzehnt mehr als eine Verdopplung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch zu verzeichnen ist, schreiten Verkehrs- und Wärmewende nur allmählich voran (UBA 2022). Der Gebäudesektor ist jedoch für knapp ein Drittel der Treibhausgasemissionen verantwortlich (BMWK 2022). Innerhalb dessen machen Wärmeanwendungen rund 90 % des Energieverbrauchs aus, die Gebäudetemperierung ist mit über 70 % besonders energieintensiv. Ein Blick auf die derzeit verwendeten Energieträger zeigt, dass über die Hälfte fossiler Herkunft ist (Destatis 2021).

Einen Grundstein für die erforderliche Wärmewende legt das Gebäudeenergiegesetz (GEG). Es vereint frühere Gesetze zur Energieeinsparung und erneuerbaren Energien im Wärmesektor und hat neben dem Schutz von Klima und der Schonung fossiler Ressourcen auch die Reduktion der Abhängigkeit von Energieimporten zum Ziel (§ 1 Nr. 2 GEG). In diesem Zusammenhang werden unterschiedliche Optionen zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfs durch regenerative Energiequellen geboten, aus denen abhängig von den vorliegenden Gegebenheiten gewählt werden kann (vgl. § 35 bis § 45 GEG). Eine Möglichkeit der Wärmebereitstellung im Bereich der Gebäudetechnik ist die Wärmepumpe. Diese ist in der Lage, thermische Energie der Umwelt für Heizzwecke und die Warmwasserbereitstellung technisch nutzbar zu machen, indem sie mithilfe externer Antriebsenergie deren Temperaturniveau anhebt. Häufig dient das Erdreich in Form von oberflächennaher oder tiefer Geothermie bereits als Wärmequelle. Weniger oft wird hydro- und aerothermische Energie genutzt. Dabei eignet sich Wasser aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften besonders gut für eine Wärmenutzung. Insbesondere Oberflächengewässer stellen eine lokale, erneuerbare und noch nicht ausgelastete Quelle dar. Ein großes Vorkommen dieser weist die Dreiflüssestadt Hann. Münden durch den Zusammenschluss der Fließgewässer Fulda und Werra zur Weser auf. Diese Gegebenheit bietet Anlass dazu, das Wärmepotenzial der Gewässer im Hinblick auf eine wärmeenergetische Nutzung abzuschätzen.

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel zwei eine Einführung in die Wärmepumpentechnologie gegeben. Diesbezüglich werden die Funktionsweise, die verschiedenen Ausführungs- und Betriebsarten sowie die Ermittlung der Effizienz der Nutzungsanlage erläutert. Im dritten Kapitel werden die rechtlichen Rahmenbedingungen für die thermische Nutzung von Oberflächengewässern auf Europa-, Bundes- und Landesebene vorgestellt. Darauf folgt in Kapitel vier die Betrachtung relevanter Merkmale des Mediums Wasser und des natürlichen Wärmehaushalts von Fließgewässern. Im Anschluss daran werden die Rahmenbedingungen der Flusswärmenutzung untersucht und ein Überblick über dessen Auswirkungen gegeben. Das

fünfte Kapitel ist dem Projektgebiet Hann. Münden und der Potenzialanalyse der Fließgewässer Fulda, Werra und Weser gewidmet. Nach einer hydrogeographischen und hydrometeorologischen Betrachtung folgt die Beschreibung der Analysemethodik. Dabei wird explizit auf die Schritte der Datenbeschaffung, -aufbereitung und -auswertung eingegangen. Die anschließende Berechnung der potenziellen thermischen Energie und einiger Leistungskennzahlen haben die Machbarkeitsanalyse einer wärmeenergetischen Nutzung der Gewässer zum Ziel. Im Fokus des sechsten Kapitels stehen schlussfolgernd Empfehlungen bezüglich der Wahl von Wärmepumpensystem und Standort. Eine zusammenfassende Abschätzung zur wärmetechnischen Nutzung der untersuchten Fließgewässer beschließt die Arbeit.

2 Die Wärmepumpenheizungsanlage

Alle Elemente, die an dem Prozess der Wärmebereitstellung aus einem Umweltmedium beteiligt sind, werden mit dem Begriff Wärmepumpenheizungsanlage zusammengefasst. Die Benennung der einzelnen Anlagenteile, auf welche sich diese Arbeit im weiteren Verlauf stützt, wird anhand von Abbildung 2.1 ersichtlich. Die Umweltmedien Luft, Wasser und auch das Erdreich können als Wärmequelle dienen. Signifikante Voraussetzung ist die eigenständige Regeneration, um dessen Auskühlung zu vermeiden (Hartmann und Schwarzbürger 2009). Vorliegende Arbeit betrachtet das Potenzial von Fließgewässern, als Wärmequelle zu dienen.

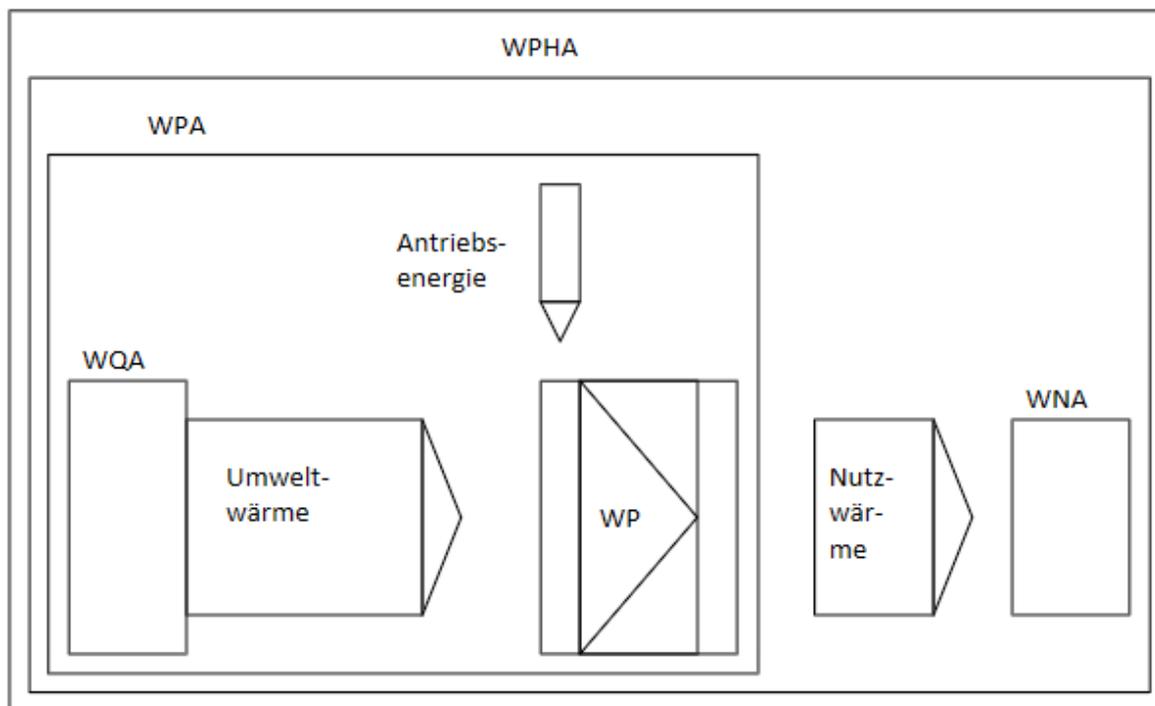


Abbildung 2.1: Systembild einer Wärmepumpenheizungsanlage: WPHA = Wärmepumpenheizungsanlage, WPA = Wärmepumpenanlage, WQA = Wärmequellenanlage, WNA = Wärmenutzungsanlage, WP = Wärmepumpe (Baumann et al. 2007)

2.1 Aufbau und Funktionsweise der Wärmepumpenheizungsanlage

Der Aufbau einer Wärmepumpenheizungsanlage kann mit Hilfe von Abbildung 2.2 erklärt werden. Die Wärmequellenanlage ① liefert in Abbildung 2.2 beispielhaft $\frac{3}{4}$ der entstehenden Heizenergie in Form von Umweltwärme. Sie besteht aus einem Wärmeübertrager, der dem Umweltmedium thermische Energie entzieht und sie zur Wärmepumpe ② - ⑤ transportiert. Die Wärmepumpe hebt durch thermodynamische Prozesse die thermische Energie der Umweltwärmequelle von einem relativ niedrigen Temperaturniveau durch einen unterstützenden Anteil elektrischer Energie, die im Beispiel $\frac{1}{4}$ der finalen Heizenergie ausmacht, auf ein höheres Niveau an. Die entstehende Heizwärme wird anschließend an die Wärmenutzungsanlage ⑥ abgegeben, welche diese wiederum zum Verbraucher transportiert.

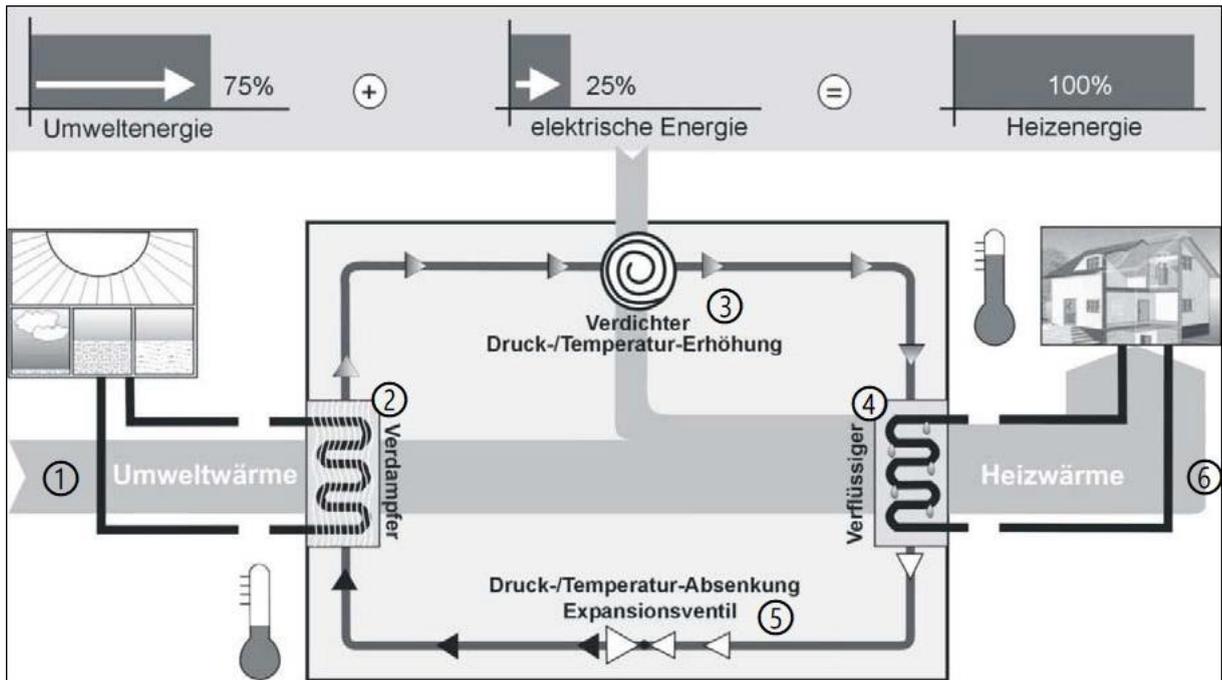


Abbildung 2.2: Aufbau einer Wärmepumpenheizungsanlage (Tholen & Walker-Hertkorn 2008)

Innerhalb der Wärmequellenanlage ① - ② findet aufgrund eines Temperaturgradienten eine konvektive Wärmeabgabe vom Umweltmedium auf einen Wärmeübertrager statt. Die essentielle Eigenschaft, dass die Quelltemperatur über der Siedetemperatur des im Verdampfer ② enthaltenen flüssigen Kältemittels liegt ($T_{\text{Wärmequelle}} > T_{\text{Kältemittel-Siedetemperatur}}$), führt zu dessen vollständiger Verdampfung. Die thermodynamisch signifikanten Prozesse ② - ⑤ finden anschließend innerhalb der Wärmepumpe statt. Der Verdichter ③ saugt den Kältemitteldampf an. Dieser sollte überhitzt sein, da das Ansaugen von Flüssigkeit oder Nassdampf mechanische Schäden im Verdichter ③ verursacht. Anschließend wird der Kältemitteldampf durch Kompression auf ein höheres Druckniveau gebracht. Gleichzeitig erhöht sich dessen Temperatur auf das vom Heizkreislauf ⑥ nutzbare Temperaturniveau (Schröder 2016). Diese Temperaturerhöhung entgegen dem natürlichen Temperaturgefälle ist durch extern zugeführte, hochwertige Antriebsenergie möglich. Im Verflüssiger ④ bewirkt das vorbeiströmende Heizwasser der Wärmesenke ⑥ die Kühlung des überhitzten Kältemitteldampfes. Der Dampf kondensiert, weil die Heizwassertemperatur unterhalb seiner Kondensationstemperatur liegt ($T_{\text{Kältemittel-Kondensationstemperatur}} > T_{\text{Wärmesenke}}$). Die durch die Zustandsänderung freigesetzte Enthalpie wird als Wärmeenergie vom Heizkreislauf ⑥ aufgenommen. Anschließend wird das wieder flüssige Kältemittel im Drosselventil ⑤ auf den Druck des Verdampfers ② entspannt und diesem zugeführt. Innerhalb der Wärmenutzungsanlage ⑥ findet die Wärmeübertragung durch freie Konvektion vom Kältemittel auf das Heizwasser im Heizkörper statt ($T_{\text{Kältemittel}} > T_{\text{Wärmesenke}}$). Die bereitgestellte Wärmeenergie wird durch die Wärmenutzungsanlage zur Gebäudebeheizung oder Warmwasserbereitstellung beim Verbraucher verwendet und zurück zum Verflüssiger ④ transportiert.

2.2 Ausführung der Wärmequellenanlage

Für den Betrieb einer Wärmequellenanlage am Gewässer kann abhängig vom Genehmigungsverfahren, Wassertemperaturen und -qualität zwischen einem offenen und einem geschlossenen Ausführungssystem gewählt werden. Bei einem offenen System wird dem Fließgewässer Rohwasser durch ein Entnahmebauwerk entnommen. Dieses wird nach Reinigung und wärmetechnischer Nutzung am Wärmeübertrager als abgekühltes Abwasser wieder in das Gewässer zurückgeleitet. Beim geschlossenen System hingegen erfolgt der Wärmeentzug mittels Wärmeübertrager, der direkt im Fließgewässer installiert ist (Borchardt 2018; Kammer 2018). Im Folgenden werden Vor- und Nachteile der Systeme erläutert, in Kapitel 6.2 erfolgt eine Beurteilung hinsichtlich ihrer Eignung an den untersuchten Fließgewässern.

Das offene System gilt grundsätzlich als effizienter, denn durch den direkten Kontakt von Rohwasser und Verdampfer der Wärmepumpe werden Energieverluste auf ein Minimum reduziert (Borchardt 2018). Wiederum besteht für den Verdampfer bei unzureichender Wasserqualität Korrosions- und Verschmutzungsgefahr. Wassertemperaturen nahe dem Gefrierpunkt können durch Eisbildung am Verdampfer ebenfalls problematisch werden (Marotz 1977). Das offene System ist demnach für Fließgewässer mit hoher Wasserqualität und -temperatur empfehlenswert.

Beim geschlossenen System entsteht mit dem im Fließgewässer installierten Wärmeübertrager ein Zwischenkreislauf. Durch diesen zwischengeschalteten Kreislauf kann eine höhere Betriebssicherheit gewährleistet werden. Grund dafür ist, dass Rohwasser und Verdampfer nicht mehr in direkten Kontakt kommen, womit dessen Schutz vor Korrosion und Verschmutzung steigt. Außerdem kann die Wärmepumpe durch das im Wärmeübertrager enthaltene Frostschutzmittel auch bei niedrigen Wassertemperaturen arbeiten. Allgemein eignet sich das geschlossene System für Fließgewässer mit geringen Wassertemperaturen besser als das offene System. Allerdings wirkt sich der Zwischenkreislauf durch Energieverluste negativ auf die Effizienz der Gesamtanlage aus (Borchardt 2018). Die Wärmeübertragung wird durch Bewuchs am wasserumströmten Wärmeübertrager zusätzlich verringert (Gaudard et al. 2018a). Dies kann die Folge einer hohen organischen Belastung des Flusswassers oder geringen Fließgeschwindigkeit v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] sein. Demzufolge ist bei der Standortwahl ein Augenmerk auch auf vorherrschende Fließgeschwindigkeiten, welche in Kapitel 5.2.2 untersucht werden, zu legen.

2.3 Betriebsweise der Wärmepumpenanlage

Abhängig von den Wassertemperaturen des Fließgewässers und der benötigten Vorlauftemperatur der Wärmenutzungsanlage wird die Betriebsart unterteilt in monovalent, monoenergetisch und bivalent. Der monovalente Betrieb zeichnet sich dadurch aus, dass die Wärmepumpe den jährlichen Wärmebedarf vollständig deckt. Bei einem monoenergetischen Betrieb wird die Wärmepumpe an sehr kalten Tagen bzw. bei sehr hohem Wärmebedarf durch eine zusätzliche Elektroheizung unterstützt. Dabei soll der unterstützende Anteil weniger als 5 % der Jahresheizwärmeversorgung betragen (Baumann et al. 2007). Die Gemeinsamkeit der beiden Betriebsweisen ist, dass lediglich elektrische Energie als Energieträger zum Einsatz kommt. Charakteristisch für die bivalenten Ausführung hingegen ist die Nutzung zwei

unterschiedlicher Energieträger. Die Wärmepumpe deckt dabei Grundlast ab und wird bei sehr großem Wärmebedarf von einem separaten Wärmeerzeuger, beispielsweise einem Öl- oder Gaskessel, unterstützt. Es können hierbei ebenfalls drei Betriebsweisen unterschieden werden: bivalent-alternativ, bivalent-parallel und bivalent-teilparallel (Baumann et al. 2007; Kammer 2018; Schröder 2016).

Beim bivalent-alternativen Betrieb wird die Wärmepumpe beim Erreichen einer bestimmten Außentemperatur, der sogenannten Einsatztemperatur oder dem Bivalenzpunkt, durch den ergänzenden Wärmeerzeuger abgelöst. Dieser übernimmt die volle Wärmeerzeugung, die Wärmepumpe hingegen schaltet ab. Ihr Anteil an der jährlichen Wärmeversorgung beträgt in etwa 60 %. Diese Betriebsweise eignet sich, wenn hohe Vorlauftemperaturen benötigt werden (Baumann et al. 2007; Schröder 2016). Bei der bivalent parallelen Wärmeerzeugung hingegen, wird beim Erreichen des Bivalenzpunkts der zweite Erzeuger zugeschaltet. Die Wärmepumpe wird von diesem unterstützt, aber bleibt weiterhin in Betrieb. Die erzielten Vorlauftemperaturen liegen unterhalb von +55 °C (Baumann et al. 2007; Schröder 2016). Abbildung 2.3 visualisiert beispielhaft den von Zusatzheizung bzw. Wärmepumpe abgedeckten Anteil an der gesamt benötigten Heizleistung. Der teilparallele Betrieb stellt eine Kombination genannter bivalenter Betriebsweisen dar. Wird die Einsatztemperatur unterschritten, arbeiten Wärmepumpe und ergänzender Wärmeerzeuger parallel. Beim Erreichen der Abschalttemperatur übernimmt der zweite Wärmeerzeuger den gesamten Heizbetrieb.

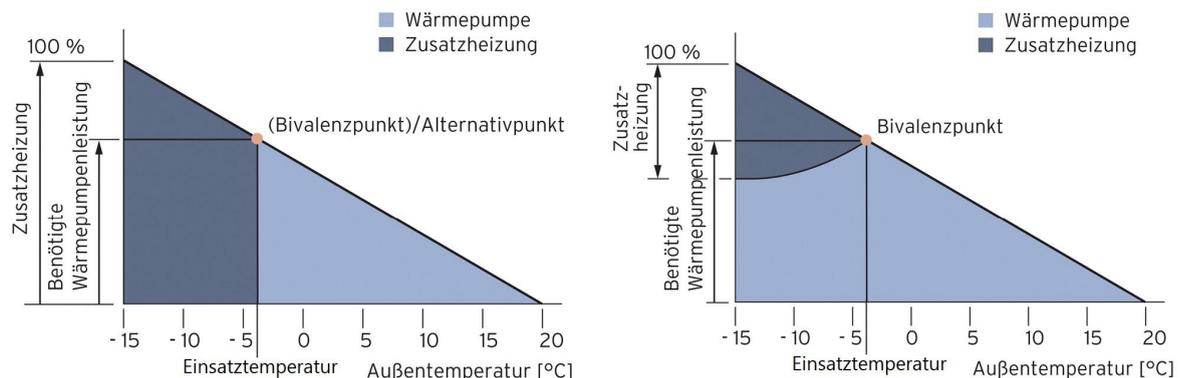


Abbildung 2.3: Anteil von Wärmepumpe und Zusatzheizung an gesamt benötigter Heizleistung bei bivalent alternativer (links) und bivalent paralleler Betriebsweise (rechts) (Held 2021)

2.4 Effizienz der Wärmepumpe

Die Leistungszahl ε_{WP} [-] einer Wärmepumpe, englisch Coefficient of Performance, beschreibt das Verhältnis von abgegebener thermischer Leistung zur aufgenommenen elektrischen Leistung. Näherungsweise kann der Wärmepumpenkreislauf durch einen linkslaufenden Carnot-Prozess beschrieben werden. Dabei kann die Leistungszahl nach Carnot ε_C [-] wie folgt anhand der beteiligten Temperaturen von Wärmesenke T_N [K] und Wärmequelle T_U [K] angegeben werden:

$$\varepsilon_C = \frac{T_N}{T_N - T_U} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Allgemein geht aus der Formel hervor, je geringer der Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und -senke, umso höher ist die Leistungszahl. Dementsprechend ist für den effizienten Wärmepumpen-Betrieb die Quelltemperatur idealerweise ganzjährig auf einem hohen Niveau, während die Nutzungsanlage mit einer niedrigen Vorlauftemperatur auskommt (Baumann et al. 2007; Kammer 2018). Weil der Carnot-Prozess einen idealen Kreisprozess darstellt, welcher wegen thermischen, mechanischen und elektrischen Energieverlusten in der Praxis nicht erreicht wird, ist die Leistungszahl nach Carnot immer größer als die real erreichbare Leistungszahl der Wärmepumpe ($\varepsilon_C > \varepsilon_{WP}$). Gleichung 2.2 setzt die beiden Werte durch den Gütegrad η [-], welcher von der genutzten Wärmequelle abhängt, in ein Verhältnis zueinander. Von modernen Wärmepumpen erzielte Höchstwerte des Gütegrads können Tabelle 1.1 entnommen werden (Borchardt 2022 [E-Mail]).

$$\varepsilon_{WP} \cong \eta \cdot \varepsilon_C \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Tabelle 1.1: Von modernen Wärmepumpen erzielte Höchstwerte für den Gütegrad (Borchardt 2022 [E-Mail])

Wärmequelle	Gütegrad η [-]
Umgebungsluft	0,4
Erdwärme (Sonden)	0,45
Wasser (Grund-, Fluss-, Seewasser)	0,5

Weil die Leistungszahl ein unter definierten Bedingungen ermittelter Momentanwert ist, gilt die Jahresarbeitszahl (JAZ) β [-] besser als Maß für die Effizienz der Wärmepumpe. Sie wird durch das Verhältnis aus abgegebener Nutzwärme zur aufgenommenen Arbeit über den Zeitraum eines Jahres beschrieben. Dabei berücksichtigt die JAZ den gesamten Energiebedarf der Wärmepumpenanlage einschließlich Hilfsanlagen und wird neben Quell- und Vorlauftemperatur auch durch die Gebäudedämmung beeinflusst. Die JAZ entspricht nach VDI 4650 Blatt 1 dem Kehrwert der Jahresaufwandszahl e_{WP} [-] (Gleichung 2.3). Diese wird wiederum durch die Leistungszahl der Wärmepumpe und den Korrekturfaktoren F_p [-] für die Wärmequellenanlage, $F_{\Delta\theta}$ [-] für eine abweichende Temperatur am Verflüssiger sowie F_{ϑ} [-] für die Wasser-Wasser-Wärmepumpe bestimmt (Hartmann & Schwarzburger 2009).

$$\beta = \frac{1}{e_{WP}} = \frac{\varepsilon_{WP} \cdot F_{\Delta\theta} \cdot F_{\vartheta}}{F_p} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Eine JAZ von beispielsweise 4,0 bedeutet, dass die von der Wärmepumpe bereitgestellte Heizwärme das Vierfache der aufgewendeten elektrischen Antriebsenergie beträgt. Der Anteil an genutzter Umweltwärme lässt sich durch die Differenz von Heiz- und Antriebsleistung ermitteln (Baumann et al. 2007; Hartmann & Schwarzburger 2009). In Kapitel 5.2.3 werden für eine wirtschaftliche Betrachtung der untersuchten Gewässer genannte Kennzahlen ermittelt und diskutiert.

3 Rechtlicher Rahmen

Im folgenden Kapitel wird auf Gesetze und Verordnungen eingegangen, die für die wärmeenergetische Nutzung oberirdischer Gewässer relevant sind. Die Nutzung von Oberflächengewässern ist dabei durch gesetzliche Bestimmungen auf Europa-, Bundes- und Landesebene geregelt. Alle aufgeführten Normen sind über Internet-Plattformen des Bundes und der Länder frei zugänglich.

3.1 Europäische Wasserrahmenrichtlinie

Nach der Gesetzgebungshierarchie steht europäisches Recht grundsätzlich über nationalem Recht und bildet somit die Grundlage der deutschen Gesetzgebung (Brede & Koppe 2019). Von der Europäischen Union (EU) erlassene Richtlinien müssen von allen Mitgliedstaaten in nationales Recht umgesetzt und ausgeführt werden.

Im Oktober 2000 vom Europäischen Parlament und dem Rat der EU implementiert, bildet die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ein grundlegendes Regelwerk für Maßnahmen im Bereich der Wasserpolitik für alle Mitgliedstaaten. Übergeordnetes Ziel ist der Schutz aller Gewässerkategorien und die Erreichung eines guten Zustands aller Gewässer. Das Qualitätsziel soll durch eine flussgebietsbezogene Bewirtschaftung innerhalb von drei Bewirtschaftungszyklen bis spätestens 2027 erreicht werden. Ausschlaggebend sind dabei Grenzen hydrologischer Einzugsgebiete (EZG) größer 10 km², nicht mehr Staats- und Ländergrenzen (UBA 2021).

3.2 Bundesweite Wassergesetzgebung

Die Umsetzung der WRRL in nationales Recht erfolgt in Deutschland durch die Einbettung in das Wasserhaushaltsgesetz (WHG), die Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV) und die Grundwasserverordnung (UBA 2021). Auf letztere wird nicht weiter eingegangen, weil Oberflächengewässer den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen.

3.2.1 Wasserhaushaltsgesetz

Mit der Novellierung des WHG im Jahre 2002 wurde die WRRL in nationales Recht integriert (BMUV 2022). Wesentlicher Grundsatz ist der Schutz aller Gewässer durch eine nachhaltige Bewirtschaftung und Anerkennung dieser „als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut“ (§ 1 WHG).

Für Deutschland ergeben sich zehn durch die WRRL festgelegte Flussgebietseinheiten, welche in § 7 Abs. 1 WHG aufgezählt und in Anlage 1 als Karte dargestellt sind. § 8 bis § 12 WHG erläutern das Genehmigungsverfahren, welches für die Nutzung thermischer Anlagen an Oberflächengewässern relevant ist. Nach § 8 WHG bedarf die Benutzung eines Gewässers einer

Erlaubnis oder einer Bewilligung seitens der zuständigen Wasserbehörde. Dabei ist die Benutzung in § 9 Abs. 1 Nrn. 1, 2 und 4 WHG definiert als

- „das Entnehmen und Ableiten von Wasser aus oberirdischen Gewässern,
- das Aufstauen und Absenken von oberirdischen Gewässern [...]
- das Einbringen und Einleiten von Stoffen in Gewässer [...]“.

Sowohl die Wasserentnahme eines offenen Systems als auch das Einbringen von Anlagenteilen in das Fließgewässer bei einem geschlossenen System können als Benutzungstatbestand im Sinne des Gesetzes ausgelegt werden und sind somit als „genehmigungspflichtig zu deklarieren“ (Brede & Koppe 2019, S. 58). Eine Erlaubnis bzw. eine Bewilligung kann wiederum verweigert werden, sollte die Sorgfaltspflicht verletzt werden, wenn „schädliche, [...] nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässerveränderungen“ (§ 12 Abs. 1 Nr. 1 WHG) Folge des Eingriffs sind.

Betreiber*innen verpflichten sich durch den Anlagenbetrieb am Gewässer zu einem Verschlechterungsverbot (vgl. § 36 WHG). Demnach darf durch die Gewässerbewirtschaftung lediglich der Erhalt oder gar eine Verbesserung des ökologischen und chemischen Zustandes erreicht werden (vgl. § 27 WHG). Bei Wasserentnahme oder -aufstau muss wegen § 33 WHG ein Mindestabfluss sowie gemäß § 34 WHG die Durchgängigkeit gewährleistet sein, um den Grundsätzen des Gesetzes nachkommen zu können. Empfehlungen diesbezüglich werden in Kapitel 6.1 betrachtet. Sobald die Nutzungsanlage wassergefährdende Stoffe verwendet, greift § 62 WHG. Frostschutzmittel, das üblicherweise im Wärmeübertrager zirkuliert, gilt nach der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen als wassergefährdend (WWA Deggendorf 2011). Dementsprechend muss die Nutzungsanlage so konstruiert und betrieben werden, dass eine potenzielle Schädigung der Wasserbeschaffenheit ausgeschlossen ist (vgl. § 62 Abs. 1 WHG). Darüber hinaus gelten in Wasserschutzgebieten spezielle Regelungen, welche der zuständigen Behörde das Recht einräumen, eine Nutzung wegen § 52 Abs. 1 Nr.1 WHG grundsätzlich zu verbieten oder einzuschränken.

3.2.2 Oberflächengewässerverordnung

Die konkrete Bewertung eines Gewässers gemäß WRRL wird in der 2011 erlassenen OGewV beschrieben. Dabei erfolgt nach § 3 Nr. 1 bis 5 OGewV eine typspezifische Einordnung jedes Gewässers. Für jeden Oberflächengewässer-Typ ist ein anthropogen unbeeinflusster Referenzzustand festgelegt. Die Größe der Abweichung von diesem Zustand ist ausschlaggebend für die Kategorisierung des Gewässers. Gemäß Anlage 3 Nr. 1 bis 3 OGewV werden bei der Bewertung biologische, hydromorphologische, chemische und physikalisch-chemische Qualitätskomponenten mit dem Referenzzustand verglichen.

Die Kategorisierung des ökologischen Zustandes bzw. des ökologischen Potenzials erfolgt nach § 5 Abs. 1 OGewV in die Klassen ‚sehr gut, gut, mäßig, unbefriedigend oder schlecht‘. Die jeweiligen Kriterien sind in Anlage 4 Tabelle 1 OGewV beschrieben und werden in den Tabellen 2 und 6 für Fließgewässer spezifiziert. Physikalisch-chemische Qualitätskomponenten werden in Anlage 7 Kap. 2 OGewV behandelt. Wie in Anlage 2 zu sehen ist, wird der ‚sehr gute bzw. gute Zustand‘ eines Fließgewässers durch Maximaltemperaturen und erlaubte Temperaturdifferenzen begrenzt. Weil in Deutschland Gewässer bislang hauptsächlich einer Kühlnutzung unterliegen,

sind die vorgeschriebenen Temperaturänderungen als maximal zulässige Temperaturerhöhung oberhalb und unterhalb der Einleitungsstelle für Abwärme zu verstehen. Gesetzliche Forderungen hinsichtlich einer Minimaltemperatur oder Temperaturabnahme durch Wärmeentzug fehlen gänzlich (vgl. Brede & Koppe 2019). Empfehlungen diesbezüglich werden in Kapitel 6.1 ausgesprochen. Der chemische Zustand wird nach § 6 OGeV in ‚gut oder schlecht‘ eingestuft. Hierbei überprüft die zuständige Behörde die in Anlage 8 OGeV aufgeführten Umweltqualitätsnormen auf vorhandene Konzentrationen im untersuchten Gewässer. Die Qualitätskomponenten werden nach § 10 Abs. 1 OGeV von der zuständigen Behörde gemäß den in Anlage 10 Nr. 4 OGeV aufgeführten Überwachungsfrequenzen regelmäßig überprüft und aktualisiert.

3.3 Landesweite Wassergesetzgebung

Auf landesweiter Ebene sind das Niedersächsische Wassergesetz (NWG) und das Niedersächsische Fischereigesetz (Nds. FischG) für den Anlagenbetrieb am Gewässer relevant.

3.3.1 Niedersächsisches Wassergesetz

Das NWG konkretisiert Forderungen aus dem WHG für das Land Niedersachsen. Das Erlaubnis- bzw. Bewilligungsverfahren wird dabei mit § 9 NWG aufgegriffen und spezifiziert. Liegt im Sinne von § 9 Abs. 1 Nrn. 1 und 5 WHG eine Wasserentnahme bei der Gewässernutzung vor, fallen nach § 21 Abs. 1 NWG Gebühren an. Die wärmeenergetische Nutzung oberirdischer Gewässer zählt dabei zu den gebührenfreien Ausnahmefällen, wenn das entnommene Wasser wieder demselben Gewässer zugeführt wird (vgl. § 21 Abs. 2 Nr. 8 NWG).

3.3.2 Niedersächsisches Fischereigesetz

Durch das Nds. FischG werden mitunter Regelungen zum Schutz der Fischbestände und der Fischerei festgelegt. Beim Errichten einer Wasserentnahmeanlage sind Unternehmer*innen dieser dazu verpflichtet, mit „geeignete[n] Vorrichtungen das Eindringen von Fischen in den Ein- und Ausfluß zu verhindern“ (§ 50 Nds. FischG). Desweiteren ermächtigt das Gesetz das zuständige Fachministerium gemäß § 53 Nds. FischG eine Fischschonzeit festzulegen, welche in Niedersachsen für Oktober bis Mitte Mai bestimmt wurde (Saschenin 2020).

4 Wärmepumpen an Fließgewässern

Durch seine physikalischen Eigenschaften und zahlreichen Anomalien beeinflusst das Medium Wasser das Leben auf der Erdoberfläche und in den Ozeanen. Insbesondere seine Dichteanomalie und die thermischen Aspekte sind sowohl für das aquatische Leben als auch die Wärmenutzung signifikant. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit den Voraussetzungen und Auswirkungen der thermischen Nutzung von Fließgewässern.

4.1 Wärmequelle Oberflächengewässer

Wassermoleküle bilden aufgrund ihrer gewinkelten Geometrie Dipole aus. Diese Konstellation führt zur elektrostatischen Anziehung und Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Molekülen, was wiederum den flüssigen Aggregatzustand von Wasser erklärt. Die Dipole bewirken, dass Wasser beim Abkühlen unter $+4\text{ °C}$ (genauer: $+3,98\text{ °C}$), entgegen dem vorherigen Verlauf der Volumenverringering, expandiert. Entsprechend hat Wasser bei etwa $+4\text{ °C}$ sein Dichtemaximum. Dieses Verhalten ist dafür verantwortlich, dass ein See von der Oberfläche ausgehend zufriert. Im Winter sinkt $+4\text{ °C}$ warmes, dichtes Wasser in die Tiefe, während Wasser an der Kontaktfläche zur Atmosphäre eine geringere Temperatur aufweist und somit leichter ist. Im Fließgewässer wird die Eisbildung durch das turbulente Fließverhalten verzögert (Schwoerbel & Brendelberger 2013).

Eine nennenswerte Eigenschaft von Wasser ist dessen außerordentlich hohe spezifische Wärmespeicherkapazität c_p [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] von etwa $4,2\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Sie beschreibt, welche Wärmemenge einem Stoff zugeführt werden muss, um dessen Temperaturänderung und damit eine Änderung der inneren Energie hervorzurufen. Schlussfolgernd ist Wasser in der Lage, hohe Wärmemengen zu speichern. Die Wärmeleitfähigkeit hingegen ist sehr gering. Bildlich erklärt, ist sie das Maß dafür, wie viel Wärme „in 1 Sekunde durch einen Würfel von 1 cm Kantenlänge von einer Endfläche zur anderen fließt, wenn zwischen beiden eine Temperaturdifferenz von 1 °C aufrechterhalten wird“ (Schwoerbel & Brendelberger 2013, S. 35). Diese Größe zeigt, dass Wärmetransport im Wasserkörper auf molekularer Ebene vernachlässigbar klein ist und ausschließlich über dessen Bewegung erfolgt (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Gaudard et al. 2017). Demzufolge ist das Fließverhalten eines Gewässers in Anbetracht des Wärmeübergangs vom Flusswasser auf das Wärmeträgermedium ein wichtiger Aspekt.

In der Hydrologie werden Fließgewässer als offene Gerinne verstanden, in denen der oberirdische und unterirdische Abfluss samt seinen Nährstoffen und Verunreinigungen aufgrund eines Gefälles transportiert wird. Der natürliche Wärmehaushalt eines Oberflächengewässers wird durch unterschiedliche Austausch- und Verteilungsprozesse bestimmt. Dabei nehmen anthropogene Einwirkungen, der atmosphärische und geothermale Antrieb, Zu- und Abflüsse sowie die Flussmorphologie Einfluss auf die Temperaturverhältnisse (Gaudard et al. 2018b). Anthropogene Einwirkungen können in direkte und indirekte Einflüsse unterteilt werden. Zum einen wird der Wasserkörper zu Kühl- vereinzelt auch Heizzwecken genutzt. Zum anderen gelangt thermisch veränderter Oberflächenabfluss aus urbanen Gebieten in den Vorfluter. In beiden Fällen spricht man von einer Temperaturverschmutzung, also die Veränderung des natürlichen Temperaturregimes durch menschliche Aktivitäten (Gaudard et al. 2018b).

Maniak (2016) und Kuhn (1972) stellen übereinstimmend fest, dass der Wärmeaustausch zwischen Wasser und Flussbett nur sehr langsam abläuft. Somit ist nur ein geringer Anteil des Wärmehaushaltes auf Interaktionen zwischen Wasser und Boden zurückzuführen und kann letztendlich vernachlässigt werden (Kuhn, 1972). Nennenswert ist aber, dass die Analyse von Wassertemperaturdaten durch Caissie (2006) ergeben hat, dass Flüsse im Sommer durch Wärmeströme vom Flussbett gekühlt werden, wohingegen im Winter Wärme von diesen freigesetzt wird.

Am stärksten wirkt sich die Interaktion zwischen Wasser und Atmosphäre auf den Wärmehaushalt aus. Dabei sind insbesondere die in Abbildung 4.1 gezeigten Faktoren, welche im Folgenden näher beleuchtet werden, für den Wärmeaustausch zu berücksichtigen.

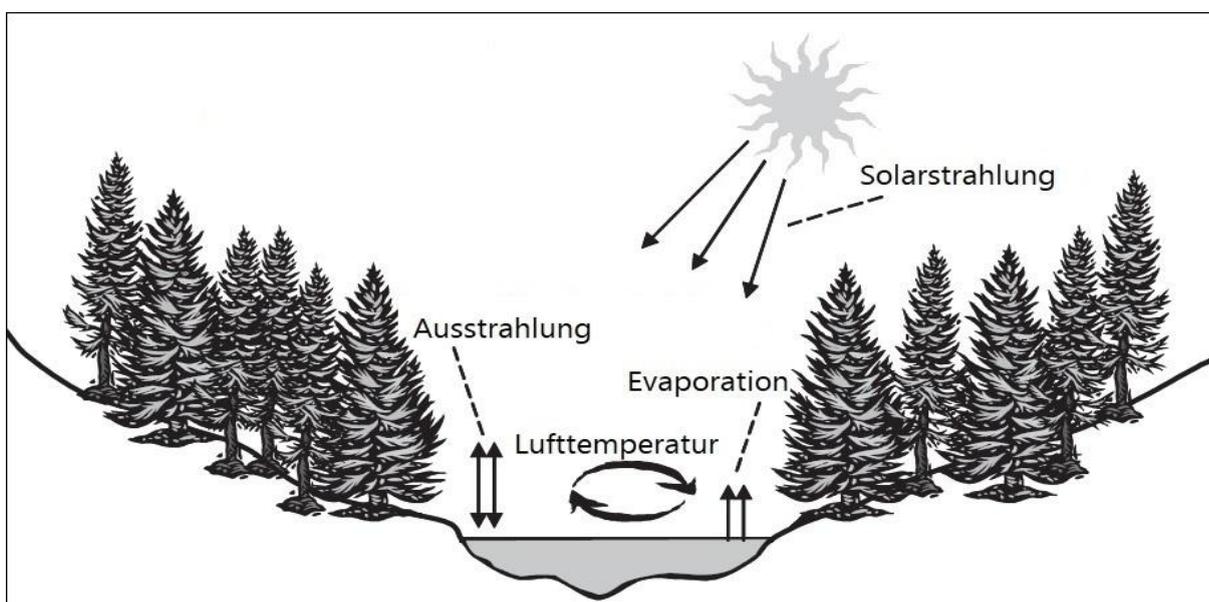


Abbildung 4.1: Austauschprozesse eines Oberflächengewässers mit der Atmosphäre (Caissie 2006)

Die Wassertemperatur passt sich zeitlich verzögert und gedämpft der Lufttemperatur an. Unabhängig von der Größe des Fließgewässers folgt der Temperaturverlauf einem Tages- und Jahresgang. Der jährliche Zyklus stellt dabei einen sinusförmigen Verlauf dar (Caissie 2006; Wilhelm 1993). Die zeitlich verschobene thermische Reaktion wird durch eine Studie von Caissie, Satish & El-Jabi aus dem Jahr 2005 ersichtlich. Die Forscher untersuchten die langzeit Jahreszyklen zweier Flüsse, die sich in unmittelbarer Nähe befinden und damit ähnlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind. Sie stellten fest, dass die Flüsse am selben Tag ihre Maximaltemperatur erreichten, wohingegen die maximale Lufttemperatur sechs Tage vorher erreicht wurde. Die Dämpfung macht sich bei Flachlandflüssen durch ein höheres Jahresmittel (LAWA 1991) und eine kleinere Temperaturamplitude im Vergleich zur Lufttemperatur bemerkbar (Kammer 2018; Wilhelm 1993). Direkte Solarstrahlung und Himmelsstrahlung wird vom Flusswasser absorbiert und hat eine Erwärmung dessen zur Folge. Ausstrahlung und Evaporation hingegen bewirken eine Wärmeabgabe. Die Geometrie des Abflussquerschnitts bestimmt dabei das Tempo der Temperaturänderung. Im breiten, flachen Gewässer ist die Kontaktfläche zur Umgebungsluft größer, weshalb Austauschprozesse rascher ablaufen als in einem schmalen, tiefen Gewässer (Caissie 2006).

Die genannten Einflussfaktoren wirken sich in erster Linie auf oberflächennahe Wasserschichten aus. Durch den stetigen Durchfluss und auftretende Turbulenz werden die verschiedenen Wasserschichten im Fließgewässer durchmischt. Infolgedessen nimmt die gesamte Wassermasse an den oberflächennahen Austauschprozessen teil, sodass im gesamten Querschnitt näherungsweise dieselbe Temperatur herrscht (Kuhn 1972; LAWA 1991). Im Vergleich zum See, wo die unterschiedlichen Temperaturen der verschiedenen Schichten durch mehrere Messungen erfasst werden, genügt diese im Fließgewässer lediglich auf einer Höhe (Maniak, 2016). Die Geometrie der Wassermasse nimmt auch hier Einfluss auf die Geschwindigkeit der Durchmischung. Somit gilt, dass schmale, kleinere Gewässer schneller völlig durchmischt werden, während dies in breiten Gewässern mehr Zeit in Anspruch nimmt. Allgemein nimmt die Wassertemperatur mit fortschreitender Entfernung von der Quelle zu, weil zunehmend atmosphärische Bedingungen auf das Wasser einwirken (LAWA 1991; Caissie 2006) – eine Ausnahme bilden hierbei die ersten Kilometer von der Quelle in den Wintermonaten (Wilhelm 1993). Gleichzeitig wird im Längsprofil „die Temperaturveränderung/km [...] flussabwärts [...] geringer und die Flussstrecken annähernd gleicher Temperatur werden länger“ (Schwoerbel & Brendelberger 2013, S.48).

Oberflächengewässer versuchen durch genannte Vorgänge der Wärmezufuhr und -abgabe ein Gleichgewicht mit ihrer Umgebung herzustellen und eine konstante Gleichgewichtstemperatur zu erreichen. „Liegt also die Wassertemperatur oberhalb der Gleichgewichtstemperatur, so wird Wärme abgegeben, liegt sie unterhalb dieser, so nimmt das Gewässer Wärme auf“ (LAWA 1991, S. 40). Doch aufgrund sich stetig wechselnder meteorologischer Gegebenheiten und stark schwankender Lufttemperaturen ist auch die Gleichgewichtstemperatur in einem kontinuierlichen Wandel. Demzufolge sind auch Gewässer Temperaturschwankungen ausgesetzt, die am Tag mehr als 3 K betragen können (Maniak 2016; LAWA 1991).

4.2 Rahmenbedingungen der Flusswärmenutzung

Gaudard et al. (2022) definiert die thermische Nutzung oberirdischer Gewässer als den „Wärmeentzug für Heizzwecke und [die] Wärmeeinleitung für Kühlnutzungen“. Doch zuvor stellt sich die Frage, unter welchen Umständen ein Gewässer als Wärmequelle dienen kann und welche Eigenschaften es dafür aufweisen muss. Baumann et al. (2007, S. 32) beantworten dies, indem sie folgenden Kriterien Relevanz zuschreiben:

- eine möglichst hohe Wärmespeicherfähigkeit und ein möglichst hohes Temperaturniveau des Umweltmediums,
- örtliche Verfügbarkeit und ausreichende Regeneration der Wärmequelle,
- eine kostengünstige Erschließung und geringer Wartungsaufwand der Nutzungsanlage.

Die Bedingung einer hohen Wärmespeicherfähigkeit ist im Fließgewässer demnach durch die außergewöhnlich hohe Wärmespeicherkapazität von Wasser sowie die Fähigkeit, Wärme durch kontinuierlich herrschende Fließbewegung zu transportieren, erfüllt (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Zudem ist ein Fließgewässer durch den stetigen Zufluss von neuem, wärmetechnisch ungenutztem Frischwasser grundsätzlich ein sich kontinuierlich selbst regenerierendes System (Marotz 1977; Borchardt 2018). Die Verfügbarkeit der Wärmequelle ist

stark von lokalen Gegebenheiten abhängig und wird in Kapitel 5.1 für das Projektgebiet betrachtet. Inwiefern die Voraussetzung eines möglichst hohen Temperaturniveaus von den untersuchten Fließgewässern erfüllt wird, wird in Kapitel 5.2 untersucht. Allgemein weisen das Erdreich und die unterirdischen Wasserkörper über das Jahr hinweg konstante Temperaturen in den Plusgraden auf. Die Umgebungsluft hingegen unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen, welche insbesondere in den Wintermonaten auch in die Minusgrade reichen. Oberirdische Gewässer sind durch die zuvor beschriebene gedämpfte Anpassung an die Lufttemperatur zwar weniger schwankungsanfällig als die Umgebungsluft, dennoch weisen sie eine größere Temperaturamplitude als Erdboden und Grundwasser auf (Gaudard et al. 2017).

Die Wirtschaftlichkeit einer Anlage wird neben den einmalig anfallenden Investitionskosten für Vorstudien und Planung auch von den laufenden Betriebskosten beeinflusst. Dabei sind nach Gaudard et al. (2018a) Betriebskosten stark variabel, denn sie hängen von den schwankenden Energiekosten, den Reinigungskosten der Anlagenteile und unter Umständen anfallenden Wassernutzungsgebühren ab. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Betriebskosten ist die Entfernung zwischen Wärmequelle und -abnehmer (Borchardt 2018; Kammer 2018). Dabei ist die Wärmeabnahme in unmittelbarer Nähe von Vorteil, um beim Transport entstehende Temperatur- und Druckverluste zu minimieren und die benötigte Antriebsenergie zu reduzieren (Borchardt 2018). Laut Kammer (2018) wird die Leistungszahl einer Wärmepumpenanlage bestimmt von der Quelltemperatur und der zugeführten Antriebsenergie. Durch eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke muss der Verdichter eine geringe Druckdifferenz aufbauen und die erforderliche Förderleistung sinkt (Schröder 2016; Borchardt, 2018). Das wirkt sich wiederum positiv auf die Leistungszahl und somit auf die Wirtschaftlichkeit aus (Baumann et al. 2007; Schröder 2016; Marotz 1977). Heizwärmebedarf und Betriebstemperaturen hängen dabei von der Gebäudenutzung und dessen Sanierungsstand ab (Kammer 2018). Mit guter Dämmung und geringer Vorlauftemperatur sinkt der Energiebedarf und erhöht die Effizienz der Anlage.

Nach Borchardt (2017) sollte der im Fließgewässer eingebaute Wärmeübertrager ein „kompaktes [und] modular aufgebautes System“ sein. Kollektoren aus UV- und lichtbeständigem Material sowie der Austausch einzelner Elemente sind vorteilhaft, um die Langlebigkeit zu gewährleisten und eine einfache Wartung zu ermöglichen. Um durch den anthropogenen Eingriff ins Fließgewässer keine negativen Konsequenzen zu verursachen, sollte der Wärmeübertrager zudem fischverträglich sein, keine Verklausung hervorrufen und keinen großen Strömungswiderstand darstellen (Borchardt 2017). Des Weiteren müssen mögliche Interessenkonflikte berücksichtigt werden. Bestehende wasserwirtschaftliche Nutzungen – beispielsweise die Schifffahrt oder Trinkwassergewinnung, Maßnahmen der Gewässerunterhaltung oder des Hochwasserschutzes – sowie bestehende Anlagen dürfen durch die wärmeenergetische Nutzung des Gewässers nicht beeinträchtigt werden (WWA Deggendorf 2011).

Wassertemperaturen eines Oberflächengewässers sind während des größten Wärmebedarfs im Winterhalbjahr am geringsten. Diese Inkohärenz zwischen Angebot und Nachfrage führt zu Einschränkungen der thermischen Nutzung. Marotz (1977) definiert diesbezüglich Temperaturgrenzwerte und hydromechanische Anforderungen, welche die Grundlage für die Potenzialabschätzung in Kapitel 5.2 bilden (siehe Tabelle 4.1).

Weil niedrige Wassertemperaturen zu zeitweiligem Abschalten der Anlage führen, ist ein geringes Temperaturniveau der Wärmequelle nicht wirtschaftlich. Darüber hinaus könnte sich durch eine entstehende Zirkulationsströmung und immer weiterer Abkühlung des ohnehin schon kalten Wassers Eis am Wärmeübertrager bilden und diesen nachhaltig schädigen. Um die Gefahr einer Vereisung zu minimieren, sollte die minimale Gewässertemperatur $+4\text{ °C}$ betragen. Diese ermöglicht der Anlage wirtschaftlich zu arbeiten und bietet Spielraum dem Flusswasser Wärme zu entziehen, ohne dessen Vereisung hervorzurufen. Ergänzend dazu muss bei einem offenen System auf ausreichend große Entfernung zwischen Wasserentnahme- und -auslaufbauwerk geachtet werden, um einen hydraulischen Kurzschluss zu verhindern (Marotz 1977). Gleichzeitig sollte eine ausreichend hohe Strömungsgeschwindigkeit und angemessen gute Wasserqualität vorherrschen, um einen ungehinderten Wärmeübergang vom Flusswasser auf den Wärmeübertrager zu ermöglichen. Eine Strömungsgeschwindigkeit größer $0,3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ verhindert dabei das Absetzen von Schwebstoffen sowie die Ansammlung organischen Materials. Gleichzeitig ist ab einer Geschwindigkeit von $0,4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ zwischen den einzelnen Verdampferplatten die optimale Wärmeübertragung erreicht (Marotz 1977). Dies wird aus dem Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten dreier Kältemittel bei steigender Fließgeschwindigkeit am Wärmeübertrager aus Abbildung 4.2 ersichtlich. Für Strömungsgeschwindigkeiten zwischen $0,1$ und $0,2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ist ein deutlicher Anstieg des Wärmeübergangskoeffizienten zu sehen, danach flachen die Verläufe ab. Ab einer Geschwindigkeiten von $0,4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ verlaufen alle dargestellten Graph parallel zur Abszisse, was durch die gestrichelte Linie verdeutlicht wird.

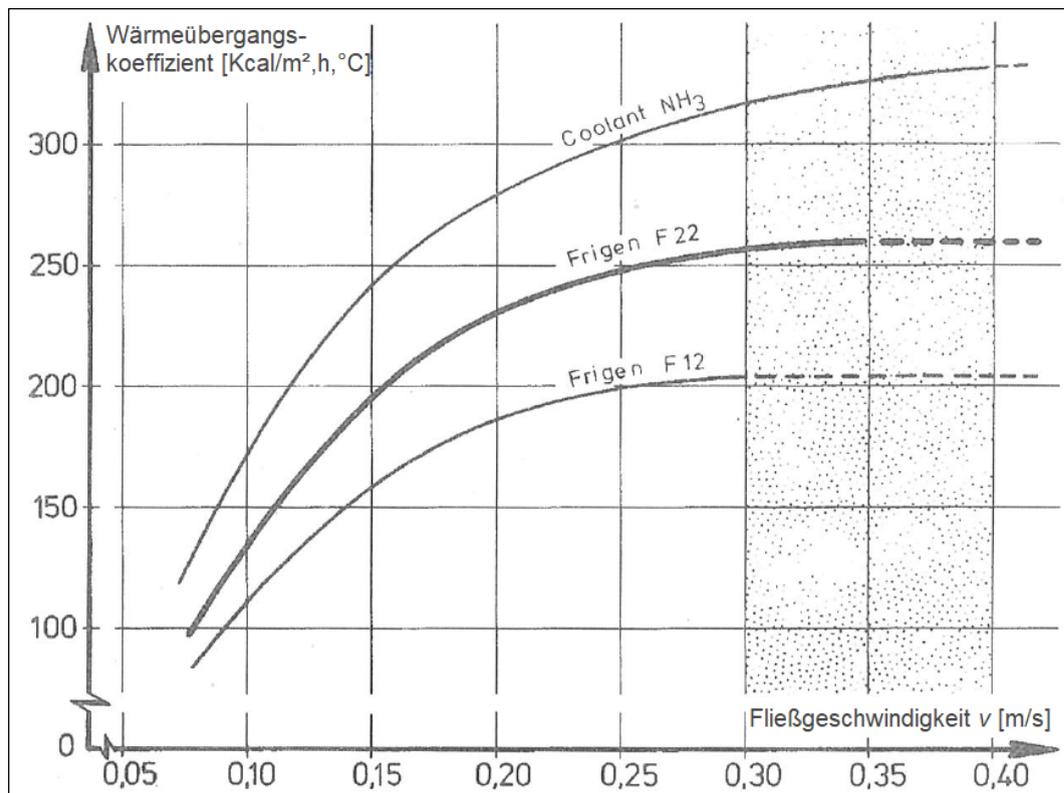


Abbildung 4.2: Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten dreier Kältemittel bei steigender Fließgeschwindigkeit (Marotz 1977)

Tabelle 4.1: Grenzwerte und hydromechanische Anforderungen für die Nutzung von Wärmepumpenanlagen an Fließgewässern (eigene Darstellung nach Marotz 1977)

Bedingung	Wert	Zweck
Temperatur der Wärmequelle	$T_U \geq 4^\circ\text{C}$	wirtschaftlicher Betrieb ohne Vereisungsgefahr
Zirkulations-/ Rückströmungen im Verdampfer	keine	Eisbildung verhindern
Entfernung Wasserentnahme- und auslaufbauwerk	groß genug	hydraulischen Kurzschluss vermeiden
Fließgeschwindigkeit - des Gewässers - zwischen einzelnen Verdampferplatten	$v \geq 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ $v \geq 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	- Absetzen von Schwebstoffen verhindern - optimaler Wärmeübergang von Flusswasser auf Wärmeübertrager

4.3 Auswirkungen der Wärmegewinnung im Fließgewässer

Wie jeder anthropogener Eingriff in die Natur birgt auch die thermische Nutzung oberirdischer Gewässer eine Veränderung vorhandener Verhältnisse und Konsequenzen für bestehende Ökosysteme. Die Temperatur als maßgebender abiotischer Faktor wirkt sich auf viele Charakteristika des Fließgewässers aus. Eine unnatürlich starke Modifikation zieht Veränderungen auf physikalischer, chemischer und biologischer Ebene mit sich. Dementsprechend müssen wasserwirtschaftliche Eingriffe in ein System, die das Temperaturregime beeinflussen, ganzheitlich betrachtet werden. Den Klimawandel verstärkende Wirkungen, mögliche Risiken für Ökosysteme wie auch direkte nachteilige Einflüsse auf das Gewässer sollten dabei im Voraus berücksichtigt und evaluiert werden.

4.3.1 Physikalische und chemische Veränderungen

Physikalische Effekte stehen am Anfang der Kausalkette (EAWAG 1981). Auch wenn der Eintrag von thermisch verändertem Wasser in ein Fließgewässer lokal ist, wird er mit der Strömung in unterhalb liegende Gebiete transportiert und beeinflusst den gesamten Lauf flussabwärts. Trotz der herrschenden Turbulenz eines Flusses, kann es dauern, bis sich die thermisch veränderte Wassermenge mit der thermisch unveränderten vermischt und sich eine homogene Wassertemperatur einstellt. Resultat ist eine sogenannte Kaltwasserfahne, welche sich abhängig von der Flussmorphologie über mehrere Kilometer erstrecken kann (Gaudard et al. 2018b).. Verändert sich zudem die Wasserdichte, passt sich auch die Eintauchtiefe des Flusses in den See bzw. in das Meer an. Dadurch wird nicht nur die Schichtung im See gestört, sondern auch der vom Fließgewässer abhängige Sediment- und Nährstofftransport (Gaudard et al. 2018b).

Eine Temperaturveränderung hat zwei wesentliche Einflüsse auf den Chemismus im Fließgewässer. Einerseits wird die Sauerstoffsättigung, andererseits die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen beeinflusst. Entgegengesetzt der besseren Löslichkeit von Feststoffen im wärmeren Lösungsmittel, verringert sich die Löslichkeit von Gasen mit Erwärmung des Lösungsmittels. Warmes Wasser kann dementsprechend weniger Sauerstoff lösen als kaltes

Wasser. Darüber hinaus werden die Oxidationsvorgänge von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen beschleunigt, wodurch ebenfalls der Sauerstoffverbrauch zunimmt (LAWA 1991). Nach der Van't-Hoff'schen Regel verdoppelt sich dabei die Reaktionsgeschwindigkeit pro 10 K Temperaturerhöhung (Caissie 2006). Eine Abkühlung bringt somit neben dem verbesserten Sauerstoffhaushalt auch eine verminderte Sauerstoffzehrung durch organismische Atmungs- und Abbauprozesse mit sich und wirkt sich allgemein positiv auf die Gewässerchemie aus (EAWAG 1981).

Andererseits besteht die Gefahr einer Verunreinigung durch Leckagen an der Nutzungsanlage (Wunderlich 1979). Gemäß § 62 WHG (vgl. Kapitel 3.2.1) dürfen Anlagenteile, die wassergefährdende Stoffe beinhalten und mit Oberflächenwasser in direktem Kontakt stehen, nicht für Korrosion und Alterung anfällig sein und müssen so betrieben werden, dass es zu keinem Austritt von enthaltenen Schmier- oder Kältemitteln kommt.

4.3.2 Biologische und ökologische Konsequenzen

Das Fließgewässer als Biotop hat eine auf die lokal vorherrschenden Bedingungen adaptierte Biozönose. Die Wassertemperatur spielt dabei eine entscheidende Rolle im Hinblick auf das Artenspektrum und die gesamtgesellschaftliche Gesundheit des aquatischen Ökosystems. Wird die Wassertemperatur beeinflusst, wirkt sich das automatisch auf die Wasserqualität und infolgedessen auf die Aktivität und Verteilung aquatischer Flora und Fauna aus (Caissie 2006; Gaudard et al. 2018b). Der bleibende Wechsel im Temperaturregime kann für aquatische Organismen aufgrund ihrer Thermoregulation problematisch werden. Die meisten Fische und Wirbellose gehören zu den poikilothermen Lebewesen. Im Gegensatz zum Menschen, der eine konstante Körpertemperatur von etwa +37 °C hat, passen wechselwarme Lebewesen ihre Körpertemperatur an die Umgebung an. Durch die sogenannte Nische ist die thermische Toleranz wechselwarmer Organismen jedoch in beide Richtungen begrenzt. Mit steigender Komplexität des Organismus sinkt seine thermische Toleranz, weil diese in der Regel sensibler auf veränderte Lebensumstände reagieren als einfache Organismen (Kuhn 1972; Gaudard et al. 2017). Der Fischschutz kann demzufolge als maßgebend angesehen werden und bewirkt ebenfalls den Schutz von anderen Wirbellosen und widerstandsfähigeren Bakterien.

Während sich natürliche Temperaturschwankungen im Mittel aufheben, bringt ein anthropogener Eingriff anhaltende Veränderungen mit sich. In Deutschland werden Flüsse bislang durch eine industrielle Kühlnutzung hauptsächlich erwärmt. Eine künstliche Abkühlung kann die hervorgerufenen Entwicklungen nicht schlichtweg umkehren (Friedrich 1979). Während Kühlwasser das ganze Jahr über mit annähernd konstanter Menge gebraucht wird, erfolgt die Wärmenutzung vorwiegend in den Wintermonaten (EAWAG 1981). Schließlich wirkt sich das wie folgt auf den Temperaturverlauf aus:

- „Verminderung der Minimaltemperatur
- Vergrößerung der Jahresamplitude
- Beschleunigung des Temperaturanstieges im Frühling und des Abfalles im Herbst [...]
- Absenkung des Jahresmittelwertes der Wassertemperatur“ (EAWAG 1981)

Allgemein wird durch die Wärmegewinnung die Periode niedriger Wassertemperaturen verlängert (EAWAG 1981), wodurch sich auch die Jahresamplitude ausdehnt. In kaltem Wasser ist die biologische Aktivität geringer. Einerseits findet dadurch der mikrobielle Abbau organischer Substanz langsamer statt (Caissie 2006; LAWA 1991; Kuhn 1972). Folglich ist das Selbstreinigungsvermögen des Gewässers geringer und organische Belastungen dauern länger an (Friedrich 1979; Kuhn 1972). Andererseits wird die Wachstumsperiode der aquatischen Flora und Fauna verkürzt. Die Photosyntheserate von Unterwasserpflanzen ist ebenfalls ein temperaturabhängiger Prozesse, der mit steigenden Temperaturen beschleunigt, mit sinkenden hingegen verlangsamt wird. Organismen sind zwar in der Lage Stoffwechselprozesse wie Verdauung, Wachstum oder Reproduktion den vorherrschenden Bedingungen anzupassen, nichtsdestotrotz sind negative Folgen nicht auszuschließen (EAWAG 1981).

Ob eine Verschlechterung der allgemeinen Lebensumstände durch andauernde winterliche Wassertemperaturen oder extrem kalte Temperaturen mit Eisbildung eintritt, ist bislang jedoch wenig erforscht (Gaudard et al. 2018b; Schwoerbel & Brendelberger 2013). Auswirkungen sind abhängig von der Zusammensetzung und Resilienz des jeweiligen Ökosystems und sind demnach erst nach Jahren der thermischen Nutzung deutlich erkennbar (EAWAG 1981). Treten Temperaturänderungen jedoch schlagartig ein, bedeutet dies Stress für Ökosysteme, da nicht genug Zeit zur Akklimatisierung gegeben ist (Gaudard et al. 2018b). Gerade in den Übergangszeiten ist die Rate der Temperaturveränderung vergrößert, da entweder angefangen bzw. aufgehört wird zu heizen und dem Gewässer mehr bzw. weniger Wärme entzogen wird.

Direkte Effekte der Temperaturänderung sind Verhaltensänderungen und die Migration mobiler Lebewesen. Nach Wunderlich (1979) ist es möglich, dass eine Art aufgrund ihrer größeren ökologischen Nische den Platz einer anderen einnimmt. Untersuchungen konnten zeigen, dass Fische gezielt nach einem Lebensraum mit ihren Vorzugstemperaturen suchen (Caissie 2006; Gaudard et al. 2018b; Schwoerbel & Brendelberger 2013). Je nach optimalen Temperaturbereich wirkt der thermische Eintrag entweder anziehend oder abstoßend auf die Organismen. So wurde beispielsweise im Frühjahr, Herbst und Winter eine Ansammlung von Fischen flussabwärts einer warmen Einleitstelle beobachtet, im Sommer hingegen migrierten diese flussaufwärts in kältere Bereiche (vgl. Gaudard et al. 2018b).

5 Potenzialanalyse zur Flusswärmenutzung in Hann. Münden

Auf Grundlage der bisher erarbeiteten Kenntnisse über Wärmepumpenanlagen, deren Anwendung an Oberflächengewässern und den rechtlichen Rahmenbedingungen erfolgt eine analytische Betrachtung des Projektgebiets Hann. Münden. Zu Beginn wird dieses hydrometeorologisch und hydrogeographisch betrachtet. Anschließend wird die Datengrundlage dargelegt und dessen Auswertung hinsichtlich einer potenziellen Flusswärmenutzung beschrieben. Auf die wirtschaftliche Abschätzung des gewässerseitigen Wärmepotenzials folgt eine Diskussion über die Plausibilität des Vorgehens und deren Ergebnisse.

5.1 Beschreibung des Projektgebiets

Hann. Münden liegt im Oberflächen-EZG der Weser. Die Lage des EZG innerhalb Deutschlands wird aus Anlage 1 ersichtlich. Es ist das einzige der zehn im WHG festgelegten Flussgebietseinheiten, das vollständig innerhalb der Bundesrepublik liegt. Abbildung 5.1 ermöglicht eine nähere Betrachtung inklusive Darstellung der Hauptflüsse, Unterteilung in die verschiedenen Flussabschnitte nach Busskamp (2002) und Lage des Projektstandorts Hann. Münden. Dieses befindet sich an der Vereinigung der Flüsse Fulda und Werra zur EZG namensgebenden Weser. Das Augenmerk der Potenzialanalyse liegt demzufolge auf genannten Fließgewässern.

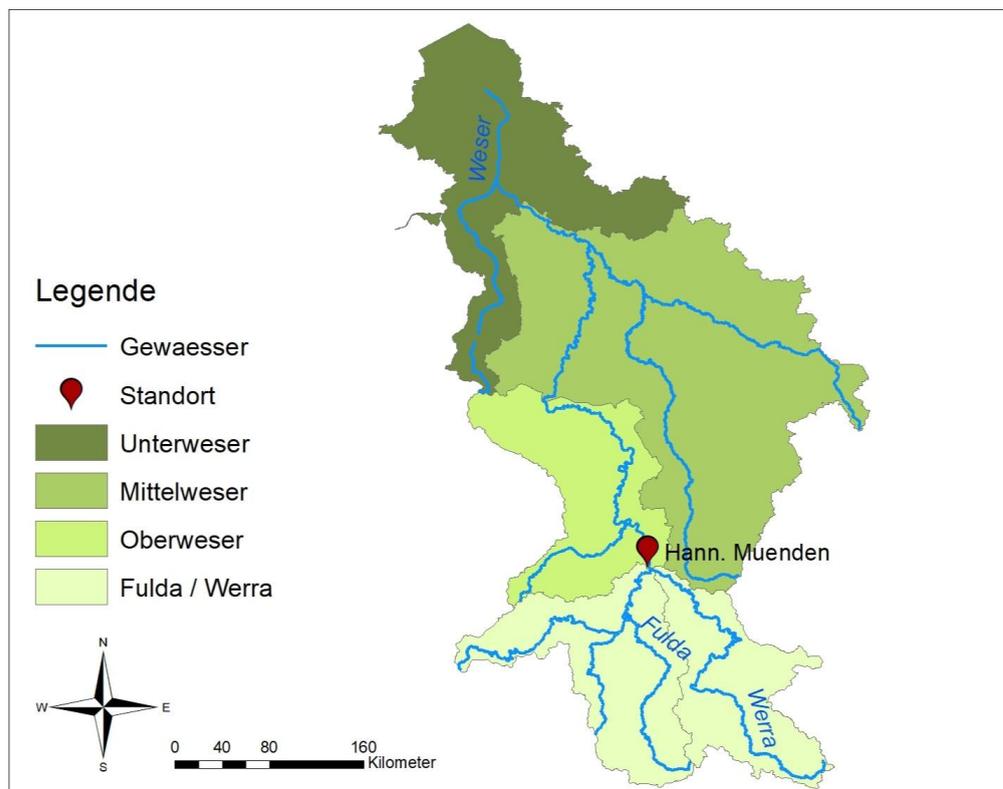


Abbildung 5.1: Flusseinzugsgebiet der Weser mit Darstellung der Hauptflüsse, Unterteilung in verschiedene Flussabschnitte nach Busskamp (2002) und Markierung des Projektstandorts Hann. Münden (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021)

Anlage 3 bis Anlage 6 dienen der allgemeinen Übersicht. Sie visualisieren die am Standort umliegenden Schutzzonen sowie die Einordnung des Gewässerzustands nach WRRL und Gewässerstrukturgüte. Die Gewässerabschnitte bei Hann. Münden werden mit GK 4 bis 6 bewertet und sind in Anlage 3 dargestellt (FGG Weser 1998). Natur- und Wasserschutzzonen erstrecken sich nicht über betrachtete Gewässerabschnitte und können demzufolge vernachlässigt werden. Im dargestellten Ausschnitt befinden sich keine Vogelschutzgebiete (vgl. Anlage 4). Die Fließgewässer sind mit einem schlechten chemischen Zustand bewertet, was in Anbetracht der fast ausschließlich schlechten chemischen Bewertung deutscher Fließgewässer nicht außergewöhnlich ist (vgl. Anlage 5). Die Kategorisierung des ökologischen Zustandes erfolgt für die Werra als natürliches Gewässer in den schlechten Zustand, für Fulda und Weser als erheblich veränderte Gewässer in ein schlechtes Potenzial (vgl. Anlage 6). Die betrachteten Gewässerabschnitte liegen in der Fischregion der Barben.

Die Weser fließt auf der 432 km langen Fließstrecke durch Niedersachsen, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Bremen. Die Bundeswasserstraße bildet abschnittsweise die Grenze zwischen den Bundesstaaten und entwässert bei Bremerhaven ein über 46.000 km² großes EZG in die Nordsee (NLWKN 2015). Da die Weser ihren Ursprung in Hann. Münden hat, bestimmen die Fließgewässer Fulda und Werra sowie dessen EZGs maßgeblich das Abflussgeschehen der Weser im Projektgebiet. Die Quellregionen der Fulda und der Werra liegen im Naturraum des deutschen Mittelgebirges und erstrecken sich vom Thüringer Wald im Osten bis zum Rothaargebirge im Westen. Die Rhön und der Vogelsberg bilden die südlichen Wasserscheiden (FGG Weser 2022).

Die Fulda entspringt der Wasserkuppe im hessischen Teil der Rhön auf 950 m ü. NN. Auf dem Weg bis nach Hann. Münden werden auf einer Lauflänge von 220 km große Teile Hessens durchquert. Nur die letzten Kilometer des Gewässers liegen in Niedersachsen, wo die Fulda mit einem knapp 6.350 km² großen EZG in die Weser mündet (NLWKN 2015). Die Verteilung der Güteklasse (GK) erweist sich entlang der Fließstrecke als wenig einheitlich. Rund 7 % der Abschnitte weisen eine GK von 3 oder besser auf. Diese liegen jedoch alle unterhalb von Kilometer 144. Die durchschnittliche GK der Fulda beträgt 4,5 (FGG Weser 1998).

Die beiden Quellflüsse der Werra entspringen dem Südwesthang des Thüringer Schiefergebirges auf 780 m ü. NN. Von dort aus fließt die Werra nordöstlich mit einer Gesamtlänge von 298 km durch Thüringen und Hessen, bis sie letztendlich in Niedersachsen in die Weser mündet. Insgesamt umfasst das Gewässer dabei ein EZG von fast 5.500 km² und ist trotz längerer Strecke weniger wasserreich als die Fulda (NLWKN 2015). Die Lauflänge könnte wiederum auf höhere Wassertemperaturen im Vergleich zur Fulda hinweisen (vgl. Kapitel 4.1). Außerdem gilt die Werra bis heute als ein stark durch Versalzung belasteter Industriefluss. Der erhöhte Salzgehalt ist der Erschließung der thüringischer Kali-Vorräte in den 1920er Jahren und der darauffolgenden Grubenentwässerung entstehender Bergwerke geschuldet (Slobodzian 2021). Die Einleitungen spiegeln sich auch in der kontinuierlichen Verschlechterung der Gewässerstrukturgüte der Werra wider. Durchschnittlich wird eine GK von 4,8 zugeordnet, was ähnlich derjenigen der Fulda ist. Die Verteilung ist jedoch breiter gefächert. Etwa ein Fünftel haben eine Bewertung mit GK 3 oder besser, über ein Drittel wiederum haben eine Bewertung von GK 6 oder 7 (FGG Weser 1998).

Großklimatisch befindet sich das Weser-EZG in der temperierten humiden Zone Mitteleuropas. Das kontinental geprägte Gebiet, in dem sich Hann. Münden befindet, weist im Vergleich zum atlantisch geprägten Nordwestdeutschland kältere Winter und geringere Niederschlagsmengen auf (FGG Weser 2022). Als Grundlage für die hydrometeorologische Beschreibung des Standortes dienen Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Dabei wird auf Daten der Klimastation Göttingen, welche durch ihre geographische Nähe als weitgehend repräsentativ für Hann. Münden gilt, der Wetterwarte an der Wasserkuppe repräsentativ für den Ursprung der Fulda und der Wetterwarte in Neuhaus wegen ihrer Nähe zu den Quellflüssen der Werra zurückgegriffen. An den Stationen werden stündlich die Lufttemperatur und täglich Niederschlagsdaten erfasst. Für einen Vergleich wurden mehrjährige Monatsmittel genannter Parameter den landesweiten Mittelwerten für die Periode von 1991 bis 2020 graphisch gegenübergestellt. An dieser Stelle wurde eine Darstellung von Monatsmittelwerten gewählt, weil der Vergleich lediglich eine Tendenz des Standortes aufzeigen soll. Tagesmittelwerte zeigen im Jahresgang starke Schwankungen und würden hier die Übersichtlichkeit stören.

Abbildung 5.2 zeigt den sinusförmigen Verlauf der gemittelten Lufttemperatur über die Periode eines Jahres. Das linke Diagramm stellt den deutschen Durchschnitt der Referenzstation Göttingen, das rechte hingegen den Stationen an der Wasserkuppe und in Neuhaus gegenüber. Die Graphen haben eine Ruhelage bei 10 °C, eine Amplitude¹ von etwa 10 °C und weisen in den Sommermonaten Juli und August ihr Maximum auf. Die Temperaturmessungen der Referenzstation Göttingen sind dem landesweiten Mittelwert ähnlich, wodurch sich die Graphen des Öfteren überschneiden. Auffällig ist, dass in den Wintermonaten in Göttingen überdurchschnittlich warme Lufttemperaturen gemessen werden. Weil sich die Wassertemperatur atmosphärischen Gegebenheiten anpasst (vgl. Kapitel 4.1), könnte dieser Aspekt vorteilhaft für die Wärmenutzung der Gewässer sein. Die Graphen für die Wetterwarten an der Wasserkuppe und in Neuhaus sind in ihrem gesamten Verlauf um etwa 3 °C nach unten verschoben. Grund dafür ist die Höhenlage der Wetterstationen.

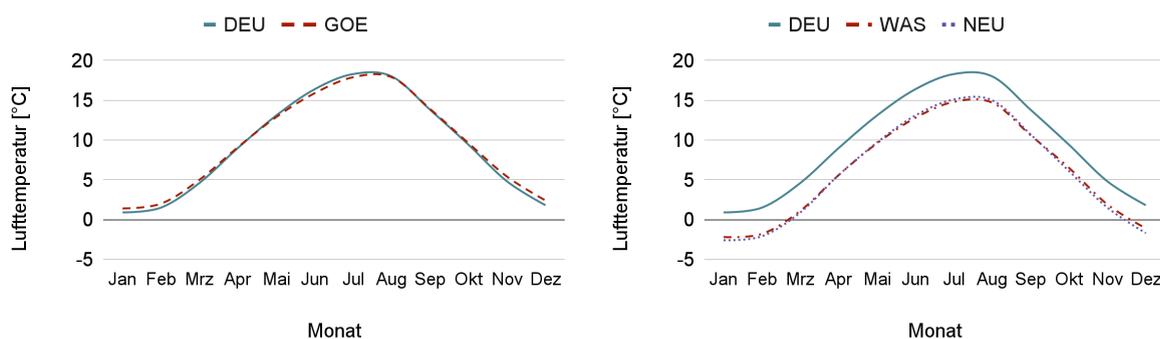


Abbildung 5.2: Vieljährige Mittelwerte (1991 - 2020) des Parameters Lufttemperatur für Deutschland (DEU) und die Wetterstation Göttingen (GOE) (links) bzw. für Deutschland (DEU), die Wetterwarten an der Wasserkuppe (WAS) und in Neuhaus (NEU) (rechts) (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des DWD 2022)

¹ In dieser Arbeit wird die Amplitude als die maximale Auslenkung um die Ruhelage verstanden.

In Abbildung 5.3 ist die gemittelte Niederschlagshöhe über die Periode eines Jahres dargestellt. Die Graphen können mit einer wellenartigen Form beschrieben werden, welche sich zwischen 25 und 125 mm Niederschlag bewegt. Das Mittel der jährlichen Gebietsniederschlagshöhe Göttingens liegt mit 624 mm etwa 11 % unter dem landesweiten von 791,4 mm. Der Verlauf der Referenzstation nähert sich im Frühjahr zwar dem deutschen Niederschlagsmittelwert an, verläuft das ganze Jahr über 5 bis 15 mm unterhalb dessen. Die Verläufe an der Wasserkuppe und in Neuhaus weisen stärker ausgeprägte Wellen als der deutsche Mittelwert und die Station in Göttingen auf (vgl. Abbildung 5.3 rechts). Die Graphen zeigen eine Verschiebung nach oben und liegen mit 1106 mm bzw. 1153,7 mm Jahresniederschlag knapp 40% bzw. 46 % über dem deutschen Durchschnitt. Schlussfolgernd befinden sich die Wasserkuppe und Neuhaus in einer überdurchschnittlich niederschlagsreichen Region, Hann. Münden hingegen liegt in einem unterdurchschnittlichen Niederschlagsgebiet.

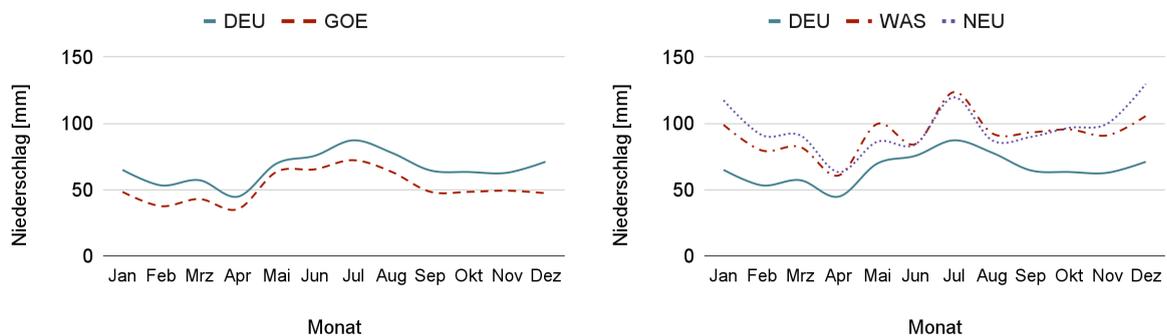


Abbildung 5.3: Vieljährige Mittelwerte (1991 - 2020) des Parameters Niederschlag für Deutschland (DEU) und die Wetterstation Göttingen (GOE) (links) bzw. für Deutschland (DEU), die Wetterstation an der Wasserkuppe (WAS) und in Neuhaus (NEU) (rechts) (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des DWD 2022)

Doch nicht nur atmosphärische Bedingungen üben Einfluss auf oberirdische Gewässer aus, auch das unterirdisch fließende Wasser interagiert mit diesen. Weil das Fließgewässer den topographisch gesehen tiefsten Punkt des EZGs darstellt, fließt diesem sowohl ober- als auch unterirdisch Wasser zu. Dabei werden in Deutschland Flüsse zu etwa $\frac{3}{4}$ durch das Grundwasser gespeist (Nützmann & Moser 2016). Grundwasser-Fließsysteme sind sowohl von der Lage in der Landschaft als auch den hydrogeologischen Eigenschaften des Bodens abhängig. Im Untergrund weisen die EZGs überwiegend fein- und mittelkörnige Buntsandgesteine auf, welche den Festgesteinen zugeordnet werden. Diese Gebiete sind von Poren- und Kluftgrundwasserleitern geprägt. Vereinzelt treten entlang der Fulda und der Werra auch ergiebige Porengrundwasserleiter auf, welche durch Schichten von Lockergesteinen gebildet werden. An diesen Stellen wird Grundwasser für die öffentliche Wasserversorgung gewonnen. Entlang der Fließstrecke der Werra kommen zudem nicht zusammenhängende chemische und klastisch-chemische Sedimente vor, welche Karstgrundwasserleiter ausbilden (Wittmann 2002; BGR o. J.). Nach Kuhn (1972) ist der Einfluss des Untergrundes auf den Wärmehaushalt im Fließgewässer jedoch vernachlässigbar gering (vgl. Kapitel 4.1).

5.2 Analyse des gewässerseitigen Wärmepotenzials

Ausschlaggebend für das Wärmepotenzial der untersuchten Fließgewässer ist deren innere Energie. Diese wird durch den Abfluss als numerischer Wert und die Temperatur als qualitativer Parameter beschrieben (Maniak 2016; Wilhelm 1993). Im Folgenden wird die Beschaffung relevanter Daten und das Vorgehen bei deren Aufbereitung erläutert. Anschließend werden die Messdaten mithilfe von graphischen Darstellungen ausgewertet und die potenzielle Wärmeübertragungsleistung der Gewässer sowie näherungsweise die Leistungszahl der Wärmepumpe bestimmt. Diese dienen der wirtschaftlichen Bewertung betrachteter Fließgewässer.

5.2.1 Datenbeschaffung und -aufbereitung

Insgesamt wurde jeweils ein Pegel und eine Gütemessstellen an der Fulda, Werra und Weser betrachtet, welche sich innerhalb bzw. in unmittelbarer Nähe zu Hann. Münden befinden. Weil mit zunehmender Fließstrecke die Temperaturveränderung pro Kilometer abnimmt, können die Messstationen durch ihre geographische Nähe zum Projektgebiet als repräsentativ für die Verhältnisse innerhalb Hann. Müdens angesehen werden (vgl. Kapitel 4.1). Die Lage der Messstationen wird in Abbildung 5.4 in einer Karte, welche die Stadtgrenze und die betrachteten Fließgewässer abbildet, dargestellt.

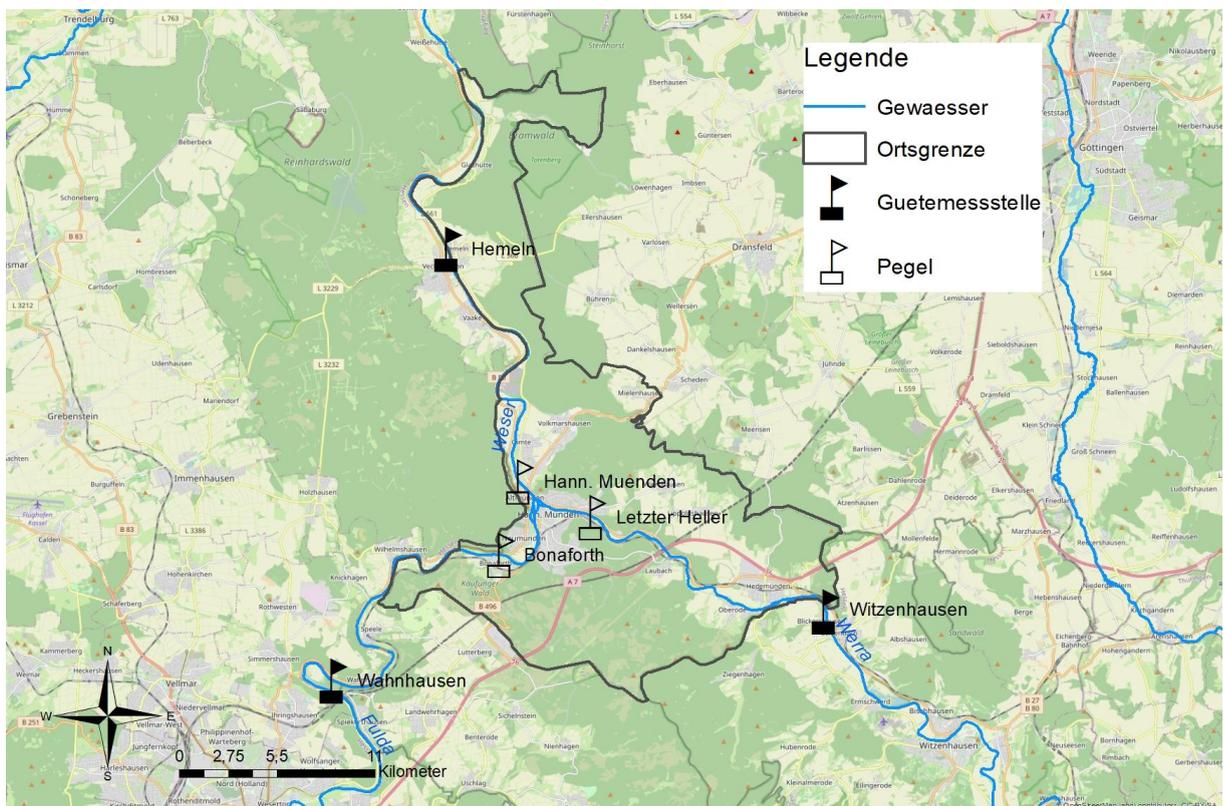


Abbildung 5.4: Lage der betrachteten Messstationen am Standort Hann. Münden (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021 und BKG 2021)

Die Gütemessstellen Wahnhausen und Witzenhausen werden vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) betrieben, während die Station Hemeln vom niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) bewirtschaftet wird. Stammdaten sowie messtechnische Daten des zurückliegenden Jahres können über das Internetangebot der HLNUG bzw. der NLWKN aufgerufen werden. Des Weiteren werden länderübergreifende Datenbestände von der Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Weser gesammelt und sind für die Öffentlichkeit durch die sogenannte Weserdatenbank frei zugänglich. Um langjährige hydrologische Daten zu erhalten, wurde jeweils eine Anfrage nach Tagesmittelwerten der Wassertemperatur und des Abflusses per E-Mail an Ansprechpersonen der HLNUG, NLWKN und FGG Weser verschickt. Des Weiteren wurden beim Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Weser Maße der Gewässerquerprofile an den Pegelmessstellen angefragt. Die zur Verfügung gestellten Datensätze sind in Tabelle 5.1 übersichtlich aufgelistet.

Tabelle 5.1: Übersicht der eingeholten Datensätze an betrachteten Messstationen (eigene Darstellung)

Parameter	Fluss	Messstation	Zeitreihe	Quelle
Temperatur	Fulda	Wahnhausen	1994 - 2018	FGG Weser 2022
			1994 - 2021	Semsei (HLNUG) 2022 [E-Mail]
	Werra	Witzenhausen	2003 - 2018	FGG Weser 2022
			2003 - 2021	Semsei (HLNUG) 2022 [E-Mail]
	Weser	Hemeln	1982 - 2015	FGG Weser 2022
			1985 - 2015	Heinz (NLWKN) 2022 [E-Mail]
Abfluss	Fulda	Bonaforth	1999 - 2021	Krippenstapel (NLWKN) 2022 [E-Mail]
			1985 - 2015	Stange (HLNUG) 2022 [E-Mail]
	Werra	Letzter Heller	1999 - 2021	Krippenstapel (NLWKN) 2022 [E-Mail]
			1985 - 2015	Stange (HLNUG) 2022 [E-Mail]
	Weser	Hann. Münden	1999 - 2021	Krippenstapel (NLWKN) 2022 [E-Mail]
	Querprofil	Fulda	Bonaforth	
Werra		Letzter Heller		

Sich überschneidende Datensätze wurden durch einen Datenabgleich auf Übereinstimmung geprüft. Hierbei konnten keine gravierenden Abweichungen festgestellt werden. Sich nicht deckende Messreihen wurden zusammengeführt, um die längstmögliche Beobachtungsreihe zu erhalten. Insgesamt ist dadurch eine Zeitspanne von:

- 28 Jahren für die Messstation Wahnhausen,
- 19 Jahren für die Messstation Witzenhausen,
- 29 Jahren, davon 17 Jahre in Folge, für die Messstation Hemeln,
- 37 Jahren für die Pegel Bonaforth und Letzter Heller und
- 23 Jahren für den Pegel Hann. Münden entstanden.

Unter Verwendung von Google Tabellen wurden die Messdaten einheitlich zusammengetragen, wodurch umfangreiche Tabellen nach dem in Abbildung 5.6 gezeigten Schema entstanden. Die zweite Zeile zeigt den Namen der betrachteten Messstation bzw. des Pegels und das Fließgewässer. In der ersten Spalte (Spalte B) sind die Jahrestage 1 bis 356 bzw. 366 und in der dritten Zeile das betrachtete Jahr aufgelistet. Unterhalb eines jeden Jahres wurden Tagesmittelwerte der Wassertemperatur t_w [°C] bzw. des Abflusses eingetragen. Temperaturdaten niedriger Werte wurden zur besseren Übersicht wie folgt eingefärbt:

- $t_w < 1$ °C → intensives Rot
- $t_w < 2$ °C → helles Rot
- $t_w < 4$ °C → transparentes Rot
- $t_w = \text{k. A.}$ → Grau

	B	C	D	E	F	G	H	I	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA
1		Tagesmittelwert Wassertemperatur [°C]													
2	Station	Wahnhausen, Fulda							Witzenhausen, Werra						
3	Jahrestag\Jahr	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
4	1	3,9	3,9	2,0	0,3	4,7	3,0	4,1		2,8	4,6	3,8	5,5	4,7	0,7
5	2	3,8	3,5	2,0	0,3	5,3	3,2	4,2		2,4	4,9	3,6	5,2	4,4	0,9
6	3	3,9	3,2	2,0	0,3	5,4	3,6	4,3		1,9	4,9	3,3	5,3	3,9	0,7

Abbildung 5.6: Schema der erstellten Tabellen für Temperatur- und Abflussmessdaten unter Verwendung von Google Tabellen (eigene Darstellung)

Weil die vorliegenden Abflussdaten keine Lücken aufweisen, wurde auf weitere Aufbereitungsschritte verzichtet. Das im Folgenden beschriebene Vorgehen bezieht sich somit ausschließlich auf Temperaturdaten. Für die Jahre 1994 bis 2021 wurde jeweils eine Ganglinie erstellt. Durch die Visualisierung der Messdaten konnten Abweichungen von einem erklärbaren Verlauf besser identifiziert werden. Daraufhin wurden insgesamt vier mögliche Fehlerarten formuliert:

- fehlende Messdaten,
- außergewöhnlich starker Sprung der Wassertemperatur an einer Messstation,
- konstante Wassertemperatur und
- einzelne Ausreißer.

Der Umgang mit den Fehlerarten samt Ergebnis der Fehlerbehebung ist in Tabelle 5.2 stichpunktartig beschrieben. Anschließend folgt eine detaillierte Begründung des Vorgehens.

Tabelle 5.2: Umgang mit fehlerhaften Temperaturdaten: WA = Wahnhausen; WI = Witzenhausen; HE = Hemeln

Fehlerart	Vorgehen	Station	Jahr	Jahrestag	Ergebnis der Fehlerbehebung
fehlende Messdaten	lineare Interpolation für Fehlwerte < 14 Tagen [d] (bei Fehlwerten ≥ 14 d wird auf eine Interpolation verzichtet, da natürliche Schwankungen verfälscht bzw. nicht dargestellt werden können)	WA	1994 - 2021*		*1996; 2012: Fehlwerte ≥ 14 d
		WI	2003 - 2021*		*2003; 2009: Fehlwerte ≥ 14 d
		HE	1982 - 2015*		*1984; 1987; 1988; 1991/92; 1994/95; 1995/96; 1997; 2003; 2004; 2008; 2009/10; 2010/11; 2013: Fehlwerte ≥ 14 d *1999; 2005; 2006; 2007; 2012: fehlen

außergewöhnlich starker Sprung der Wassertemperatur an einer Messstation	Abgleich mit Lufttemperatur, ob a. der gleiche Sprung auftritt oder b. Wassertemperaturen diesen entsprechen	WI	2012	30 - 55	Lufttemperatur zeigt denselben Temperaturabfall → Messdaten plausibel
		WA	1996	65 - 148	Wassertemperatur liegt weit über Lufttemperatur und andere betrachtete Messstationen zeigen nicht denselben Temperatursprung → Messdaten nicht plausibel → Daten werden gelöscht, um den Mittelwert nicht zu verfälschen
		HE	2008	124 - 139	
			2009	41 - 55 65 - 90	
			2009 / 2010	290 (2009) - 60 (2010)	
			2010 / 2011	339 (2010) - 60 (2011)	
2013	187 - 219				
konstante Wassertemperatur	1. Prüfung vorhandener Schwankungen minimaler und maximaler Wassertemperaturen 2. Abgleich mit Lufttemperatur, ob a. der gleiche Verlauf auftritt oder b. Wassertemperaturen diesen entsprechen	WA	1996 / 1997	358 (1996) - 29 (1997)	1. geringe Schwankungen vorhanden 2. Lufttemperaturen liegen unter dem Gefrierpunkt, wodurch Eisbildung im Fließgewässer wahrscheinlich ist → Messdaten plausibel
			2009	1 - 27	
einzelne Ausreißer	lineare Interpolation	WA	1998	118	→ Messdaten werden mit Werten direkt vor und direkt nach der Datenlücke interpoliert
		HE	1994	1	→ Interpolation nicht möglich, weil Messdaten nach der Datenlücke fehlen → Daten werden gelöscht

Laut dem DWA-Merkblatt 541 (2020) ist eine Interpolation dem Belassen von Lücken in der Beobachtungsperiode vorzuziehen und sollte insbesondere bei kurzen Sequenzen von Fehlwerten unternommen werden. Somit wurde, wenn möglich, eine lineare Interpolation nach Gleichung 5.1 für fehlende Temperaturmesswerte $t(d)$ [°C] durchgeführt. Dabei erhält die Temperatur t [°C] bzw. der Jahrestag d [-] direkt vor der Datenlücke einen Index von 1 und direkt nach der Datenlücke einen Index von 2.

$$t(d) = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \cdot (d - d_1) \tag{Gl. 5.1}$$

Abbildung 5.7 dient diesbezüglich der Veranschaulichung. Links ist die Ganglinie aus Rohdaten, rechts die aus interpolierten Daten der Fulda und der Weser für das Jahr 1998 zu sehen. Die Abszisse zeigt die Jahrestage, die Ordinate die Wassertemperatur. Ein einzelner Ausreißer vom Jahrestag 118 an der Fulda konnte mithilfe der linearen Interpolation behoben werden. An den Jahrestagen 182 bis 195 (14 Tage) der Weser wird wiederum durch den linearen Abfall deutlich, dass natürliche Schwankungen, wie sie an der Fulda zeitgleich aufgetreten sind, bei einer derart großen Datenlücke nicht wiedergegeben werden können. In diesem Fall wurde die Datenlücke belassen, um den Mittelwert nicht zu verfälschen. Infolgedessen wurden Fehlwerte von maximal 13 Tagen als Grenzwert für die Interpolation festgelegt.

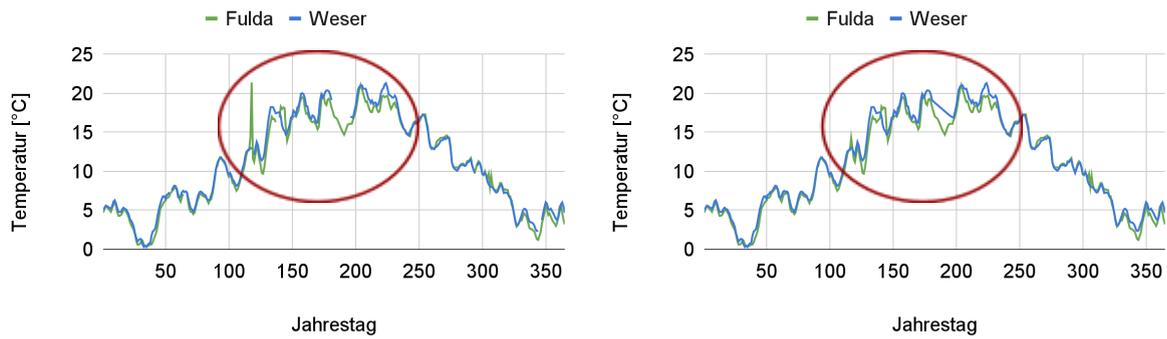


Abbildung 5.7: Jahresganglinie von 1998 aus Rohdaten (links) und linearen interpolierten Daten (rechts) (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

Für die Behebung der übrigen Fehlerarten wurden ergänzend zu den vorliegenden Wassertemperaturen Daten der Lufttemperatur der Klimastation Göttingen herangezogen. Diese wurden für die relevanten Jahre aus Tabelle 5.2 ebenfalls graphisch dargestellt. Ein Abgleich mit auffällig konstanten Wassertemperaturen ergab, dass es sich um mehrtägig strengen Frost mit Lufttemperaturen bis zu -10 °C handelte. Abbildung 5.8 zeigt beispielhaft die Temperaturverläufe von Fulda, Weser und der Luft für den Winter 1996 und 1996/1997. Für eine bessere Darstellung wurde das Jahr 1997 an dieser Stelle mit fortlaufender Jahreszahl gezählt. Zu Beginn der betrachteten Periode (vor Quasijahrestag 50) sowie zum Jahreswechsel (Quasijahrestag 350 bis 400) sinkt die Lufttemperatur langanhaltend in die Minusgrade. Die anhaltende Kälteperiode könnte durchaus Eisbildung im Fließgewässer verursacht haben (vgl. Wilhelm 1993), weshalb die Wassertemperaturen relativ konstant entlang der Null-Grad-Marke verlaufen. Außerdem wird in der Graphik die in Kapitel 4.1 angesprochene zeitlich verzögerte Reaktion der Wassertemperatur auf die Lufttemperatur an mehreren Stellen deutlich. Beispielhaft sind hier die Perioden um den Jahrestag 125 oder 250 zu nennen.

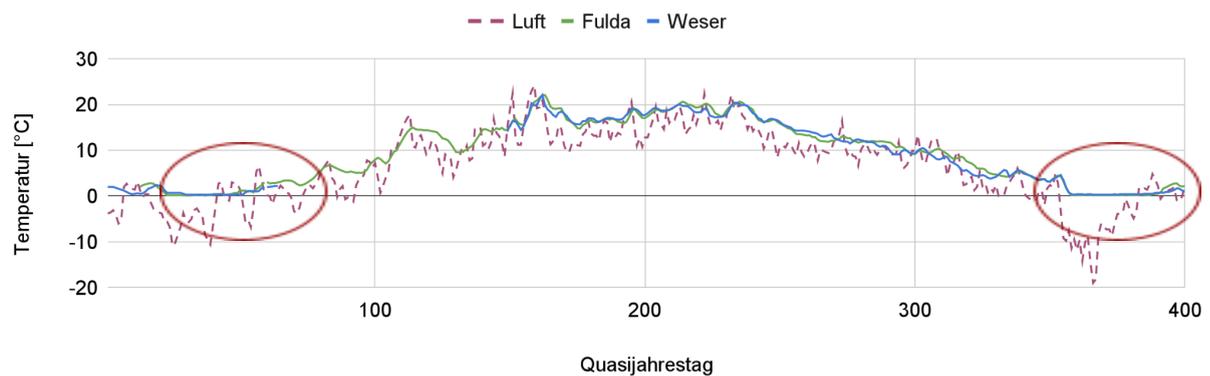


Abbildung 5.8: Verlauf der Luft- und Wassertemperatur in den Jahren 1996 und 1997 (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

Starke Sprünge im Temperaturverlauf konnten mit einer Ausnahme an der Messstation Witzenhausen durch den Verlauf der Lufttemperatur nicht bestätigt werden. Die Fehlerart wurde vor allem an der Messstation Hemeln nach 2008 identifiziert. Wegen der lückenhaften und teilweise fehlenden Messdaten ab 2004 kann allgemein von Problemen bei der Datenerhebung ausgegangen werden. Die Messdaten wurden gelöscht, um keine Verfälschungen hervorzurufen.

5.2.2 Datenauswertung

Im nächsten Schritt wurde mithilfe der bereinigten Temperaturdaten für den jeweiligen Jahrestag der Messstation Mittelwert \bar{x}_T [°C], Median \tilde{x}_T [°C] sowie 0,15- und 0,85-Quantil bestimmt. Mit den berechneten Werten kann für jedes Fließgewässer eine charakteristische Jahresganglinie der Wassertemperatur erstellt werden (siehe Anlage 7 bis Anlage 9). Diese zeigt den sinusförmigen Verlauf zum Jahresbeginn auf dem niedrigsten Niveau. Mit voranschreitenden Monaten steigen die Graphen bis sie um den Jahrestag 200 das Maximum erreichen. Anschließend kommt es wieder zu einem Temperaturabfall. Wegen der Darstellung von Tagesmittelwerten zeigen die Graphen im gesamten Verlauf stärkere Schwankungen. Die Darstellung von Mittelwert und Median ermöglicht die Prüfung der Messdaten. Eine Übereinstimmung der Verläufe deutet auf schlüssige Messdaten hin. Des Weiteren wurden Quantile abgebildet, um zu veranschaulichen, in welchem Bereich sich die Wassertemperaturen um den Mittelwert bzw. den Median bewegen. Dabei ist zu erkennen, dass die Quantile in den Winter- und Sommermonaten stärkeren Schwankungen unterliegen als im Frühling und im Herbst.

Anschließend wurden die ermittelten Ganglinien für einen direkten Vergleich in Abbildung 5.9 zusammengeführt. Durch diese Darstellungsweise kommt zum Ausdruck, dass die mittlere Temperatur und das 0,15-Quantil von Werra gegenüber Fulda und Weser in den Wintermonaten höhere Werte aufweisen. Zur Unterscheidung der Fließgewässer in graphischen Darstellungen wurde Fulda die Farbe Grün, Werra Orange und Weser Blau zugeordnet. Der Übersichtlichkeit halber wurde auf die Darstellung des Medians in untenstehender Graphik verzichtet.

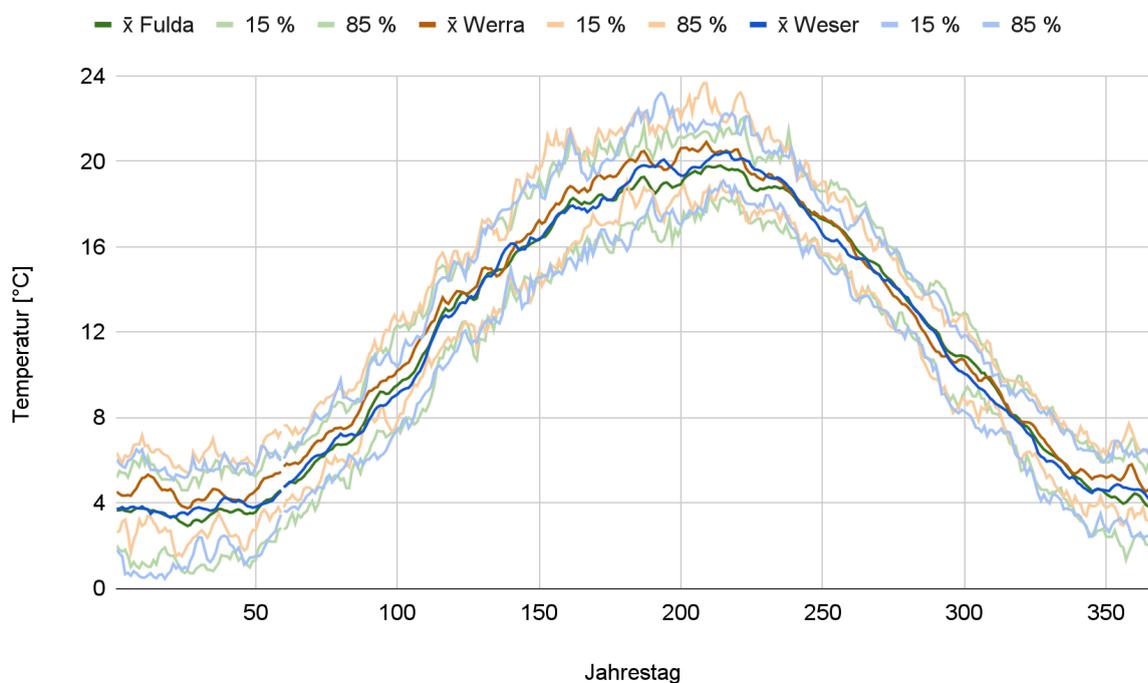


Abbildung 5.9: Vergleich der Wassertemperatur-Jahresganglinien eines charakteristischen Jahres der Fulda, Werra und Weser (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

Daran anknüpfend wurden Mittelwert, Median und Quantile der Größe nach sortiert, um für jedes Gewässer eine Dauerlinie abzubilden. An dieser Stelle ist die Darstellung einer abszissengemittelten Unterschreitungsdauerlinie vorteilhaft, um die Anzahl der Tage betrachten zu können, welche die für die thermische Nutzung relevante Minimaltemperatur von +4 °C unterschreiten (Maniak 2016). Anlage 10 bis Anlage 12 bilden die Jahresdauerlinien in ihrer Gesamtheit als aufsteigende Graphen mit angedeuteter S-Kurve ab. Zur näheren Betrachtung der Grenztemperatur ist in Abbildung 5.10 ein Ausschnitt der Dauerlinien gezeigt. Die Achsenbeschriftung ist im betrachteten Ausschnitt nicht mehr erkennbar. Die zuvor gewonnene Erkenntnis wird durch die Gegenüberstellung bekräftigt. Es ist deutlich zu sehen, dass die zwischen den Quantilen eingeschlossene Fläche unterhalb von +4 °C in der Dauerlinie der Werra kleiner ist als die von Fulda und Weser. Im charakteristischen Jahr wird die Grenztemperatur im Mittel an der Werra an 5 Tagen unterschritten, an der Fulda und Weser hingegen an 55 bzw. 45 Tagen. Der Median liegt für die Werra und Fulda ähnlich bei 7 bzw. 47 Tagen. Eine stärkere Abweichung zum Mittelwert ist bei der Weser mit 29 Tagen zu erkennen. Das 0,15-Quantil liegt an der Werra mit 84 Tagen ebenfalls unter dem von Fulda und Weser mit 100 und 98 Tagen.

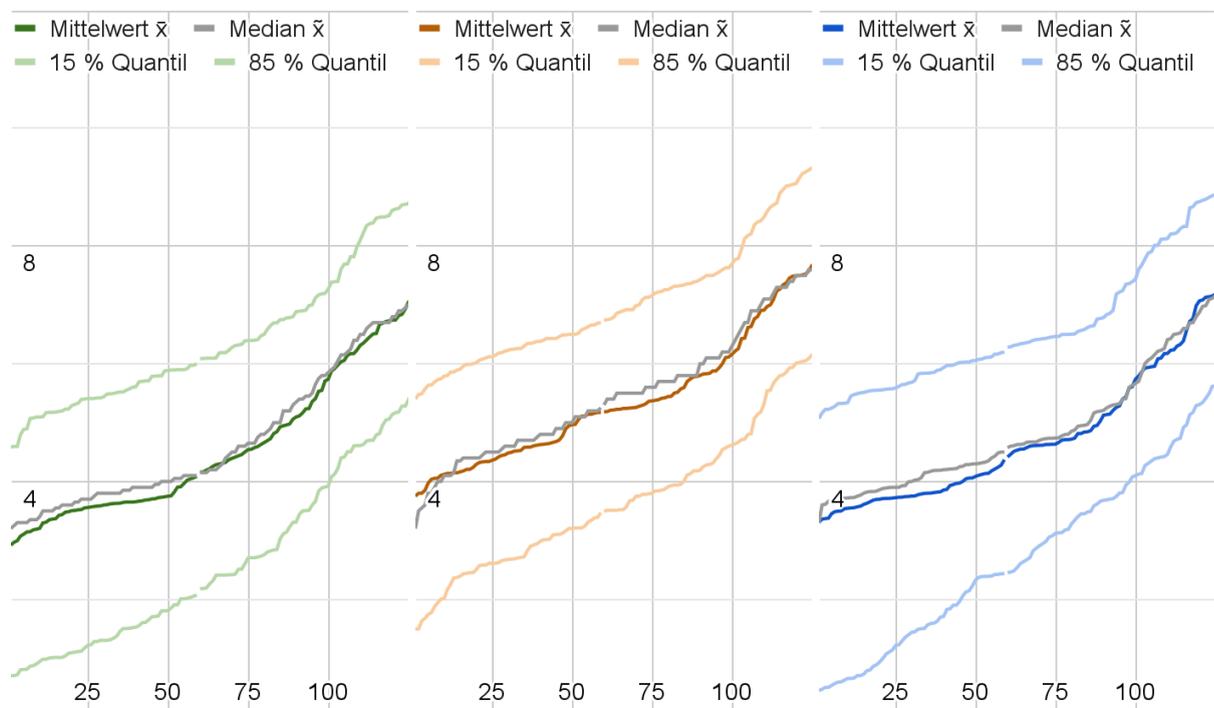


Abbildung 5.10: Gegenüberstellung der Jahresdauerlinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres von Fulda (links), Werra (mitte) und Weser (rechts) zur Betrachtung der Grenztemperatur von +4 °C (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

Schlussendlich ist die Häufigkeit und Dauer geringer Wassertemperaturen ausschlaggebend für die Planung von Wärmenutzungsanlagen am Gewässer. Aus diesem Grund wurde eine Tabelle erarbeitet, welche die jährlichen Unterschreitungshäufigkeiten jeder Messstelle für Wassertemperaturen zwischen +1 und +5 °C aufzeigt (siehe Anlage 13). Die Anzahl der Tage, welche den betrachteten Schwellenwert unterschreiten, wurde für jedes Messjahr aufsummiert und in der jeweiligen Zeile angegeben. Anschließend wurden die Unterschreitungstage spaltenweise gemittelt. Zur besseren Übersicht wurde das betrachtete Jahr an jeweiliger Messstation nach folgenden Kriterien farblich markiert:

- Jahr mit Messung von $t_w < 1\text{ °C}$ an mindestens sieben Tagen →  Dunkelbraun
- Jahr mit Messung von $t_w < 2\text{ °C}$ an mindestens sieben Tagen →  Hellbraun
- Jahr mit Messung von $t_w < 3\text{ °C}$ an mindestens sieben Tagen →  Gelb
- Jahr mit Messung von $t_w < 4\text{ °C}$ an mindestens sieben Tagen →  helles Gelb

Aus der Tabelle in Anlage 13 geht durch die überwiegend gelbe Färbung der Werra hervor, dass diese im Vergleich die höchsten Temperaturen aufweist. Dennoch kommt es in regelmäßigen Abständen – alle vier bis sechs Jahre – für den Zeitraum von mindestens einer Woche zu extrem kalten Wassertemperaturen kleiner 1 °C . Die Jahre der Fulda und Weser sind überwiegend bräunlich markiert. Im jüngsten Jahrzehnt hingegen sind weniger oft extrem kalte Wassertemperaturen aufgetreten. Jedes Gewässer unterschreitet für mehrere Wochen eine Wassertemperatur von $+5\text{ °C}$, weshalb dieser den letzten betrachteten Wert darstellt.

Mithilfe der Tabelle konnte zudem die jährlich durchschnittliche Anzahl \emptyset an Unterschreitungstagen bestimmt werden. Diese sind in Anlage 13 in der letzten Zeile aufgeführt und werden in Tabelle 5.3 mit den Unterschreitungshäufigkeiten, die sich aus der jeweiligen Jahresdauerlinie ergeben, verglichen. Dabei wird eine Diskrepanz deutlich: An der Werra wird mit durchschnittlich 34 Tagen die Spanne eines Monats jährlich erreicht, an dem das Gewässer die Grenztemperatur von $+4\text{ °C}$ unterschreitet. Für Fulda und Weser fällt der Wert mit 48 bzw. 38 Tagen sogar etwas geringer aus. Die Jahresdauerlinien zeigen zudem keine Unterschreitung der Temperaturen $+1$ bis $+2\text{ °C}$, diese werden dennoch an jedem Gewässer für den Zeitraum von mindestens einer Woche erfasst. Die tatsächliche Anzahl an Tagen, die die Grenztemperatur unterschreiten, liegt demnach deutlich höher als aus den Jahresdauerlinien hervorgeht. Diese Diskrepanz wird in Kapitel 5.3 näher betrachtet.

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Unterschreitungshäufigkeiten aus gemittelten Jahresdauerlinien (\bar{x}_T) und durchschnittlicher Anzahl an Unterschreitungstagen (\emptyset) (eigene Darstellung)

	Unterschreitungshäufigkeiten [d]														
	Wahnhausen, Fulda					Witzenhausen, Werra					Hemeln, Weser				
	T<1°C	T<2°C	T<3°C	T<4°C	T<5°C	T<1°C	T<2°C	T<3°C	T<4°C	T<5°C	T<1°C	T<2°C	T<3°C	T<4°C	T<5°C
\bar{x}_T	0	0	3	55	89	0	0	0	5	51	0	0	0	45	89
\emptyset	8	17	29	48	70	3	7	14	34	50	8	14	24	38	60

Aus den vorliegenden Abflussdaten wurden analog zu den Temperaturdaten für jeden Jahrestag Mittelwert \bar{x}_Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], Median \tilde{x}_Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] und Quantile bestimmt. Die Verläufe der charakteristischen Abflussjahre sind in Anlage 14 bis Anlage 16 gezeigt. Dabei ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinate zu beachten. Im Vergleich zum hydrologischen Winterhalbjahr², in dem der Abfluss der Fließgewässer größeren Schwankungen unterliegt, ist im hydrologischen Sommerhalbjahr im Mittel eine quantitativ geringere jedoch nahezu konstante Abflussmenge zu verzeichnen. Die Weser hat durch den Zusammenfluss von Fulda und Werra die größte Wasserführung vorzuweisen. Der mengenmäßig geringste Abfluss ist an der Werra zu verzeichnen, was auf die Größe ihres EZGs zurückzuführen ist.

² Das hydrologische Jahr wird in ein hydrologisches Winter- (November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) unterteilt.

Anforderungen an die Fließgeschwindigkeit aus Kapitel 4.2 werden beispielhaft an der Werra geprüft, weil diese in Anbetracht der Temperaturdaten die besten Voraussetzungen für eine thermische Nutzung bietet. Mit dem Abfluss Q_{Gew} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] und dem Gewässerquerschnitt A_{Gew} [m^2] kann nach der Kontinuitätsgleichung 5.2 die Fließgeschwindigkeit berechnet werden.

$$v = \frac{Q_{\text{Gew}}}{A_{\text{Gew}}} \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Um den Gewässerquerschnitt zu erhalten, wurden die von der WSA Weser bereitgestellten Punktdaten in Google Tabellen übertragen und als Liniendiagramm ausgegeben. Weil der Pegel an der Werra an einem ungeraden Flusskilometer liegt und lediglich Querschnitte für gerade Flusskilometer vorliegen, wurden sowohl das in Fließrichtung davor liegende Querprofil (Anlage 18) als auch das dahinter liegende Querprofil (Anlage 19) betrachtet. Des Weiteren wurden durch die WSA Weser Informationen bereitgestellt, die der Abschätzung des Wasserstandes bei bestimmten Abflüssen dienen. Diese wurden als Tabelle zusammengeführt und sind in Anlage 17 sichtbar. Mithilfe der Angaben konnten die Gewässerquerschnitte und die zugehörigen Fließgeschwindigkeiten bestimmt werden. Für den mittleren Abfluss MQ ergab sich bei einem Querschnitt von etwa 85 m^2 eine Strömungsgeschwindigkeit von $0,61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Hierbei wird die Bedingung für einen idealen Wärmeübergang erfüllt und das Absetzen von Schwebstoffen verhindert. Für den mittleren Niedrigwasserabfluss NQ ist bei einem Querschnitt von knapp 49 m^2 von einer Fließgeschwindigkeit von $0,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ an der Pegelmessstelle auszugehen. Diese würde das Absetzen von Schwebstoffen verhindern, aber nicht das Optimum der Wärmeübertragung erreichen. Im Hinblick darauf, dass das charakteristische Abflussjahr insbesondere in den Wintermonaten den mittleren Abfluss MQ von $51,62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ aus Anlage 17 übertrifft, ist an der Werra von ausreichender Strömungsgeschwindigkeit auszugehen.

5.2.3 Analyse des Wärmepotenzials und der Leistungskennzahlen

Im Folgenden soll das Wärmepotenzial von Fulda, Werra und Weser sowie die Wirtschaftlichkeit der Wärmenutzung abgeschätzt werden. Das Wärmepotenzial eines Fließgewässers Q_{th} [kW] kann nach Maniak (2016) mithilfe der Wärmehaushaltsgleichung 5.3 berechnet werden.

$$Q_{\text{th}} = \rho \cdot Q_{\text{Gew}} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{Gew}} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Zur Vereinfachung werden die Wärmespeicherkapazität von Wasser mit $4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ und die Wasserdichte ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] mit $1.000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ als konstant angenommen (vgl. Kapitel 4.1). Laut Gaudard et al. (2018a) entspricht der Abfluss für die Berechnung dem mittleren Abfluss am betrachteten Gewässer. Generell gilt der Mittelwert für Zeitreihen über 20 Jahre als aussagekräftiger. Für den Pegel Hann. Münden an der Werra liegt eine Beobachtungsreihe von 23 Jahren vor, für die Pegel Bonaforth an der Fulda und Letzter Heller an der Werra sogar 37 Jahre. Demzufolge wird an dieser Stelle der gemittelte Abfluss des jeweiligen Jahrestags für die Berechnungen herangezogen, um einen Verlauf des Wärmepotenzials über das charakteristische Jahr darzustellen.

In Deutschland fehlen gesetzliche Vorgaben bezüglich einer zulässigen Temperatursenkung (vgl. Kapitel 3.2.2). Zur Bestimmung der Temperaturspreizung ΔT_{Gew} [K] im Gewässer können zwei

Ansätze verfolgt werden. Einerseits können die Grenzwerte der OGewV aus Anlage 2 sowohl für den Wärmeeintrag als auch für den -entzug angenommen werden. Die betrachteten Gewässerabschnitte liegen in der Barbenregion, welche den Cyprinidengewässern zugeordnet wird. Nach OGewV wäre im Winter eine Temperaturänderung von 2 K erlaubt. Andererseits könnte die natürliche Variation der Monatsmittelwerte für die Änderung der Wassertemperatur in Betracht gezogen werden (Eawag 1981). Um diese zu ermitteln, wurden für jedes betrachtete Jahr Monatsmittelwerte sowie das 15 % und 85 % Quantil dessen gebildet. Somit konnte festgestellt werden, dass zwischen den wärmsten und den kältesten Temperaturmessungen innerhalb genannter Quantile eine Temperaturdifferenz von 2 bis 3 K liegt. Weil eine Temperaturspreizung von 2 K die Schnittstelle beider Herangehensweisen bildet und eine natürlich auftretende Temperaturänderung darstellt, wird diese für die Berechnung des Wärmepotenzials angesetzt.

Abbildung 5.11 zeigt das gewässerseitige Wärmepotenzial von Fulda, Werra und Weser im Verlauf eines Jahres. Auf den ersten Blick ähnelt der Verlauf den Abflussganglinien aus Anlage 14 bis Anlage 16: Alle Gewässer zeigen im hydrologischen Winterhalbjahr ausgeprägte Schwankungen und einen vergleichsweise hohen Wärmeinhalt zum hydrologischen Sommerhalbjahr, in dem weniger Schwankungen und ein niedrigerer Wärmeinhalt zu verzeichnen sind. Dabei liegt das Niveau der Weser – wie auch der Abfluss – über dem von Fulda und Werra. Die Werra weist in der Darstellung insgesamt das geringste Potenzial auf. Der Verlauf ist durch die unterschiedliche Wasserführung der Gewässer zu erklären. Der Abfluss stellt in der Berechnung des Wärmepotenzials die einzig variable Größe dar und ist letztendlich ausschlaggebend für das Ergebnis.

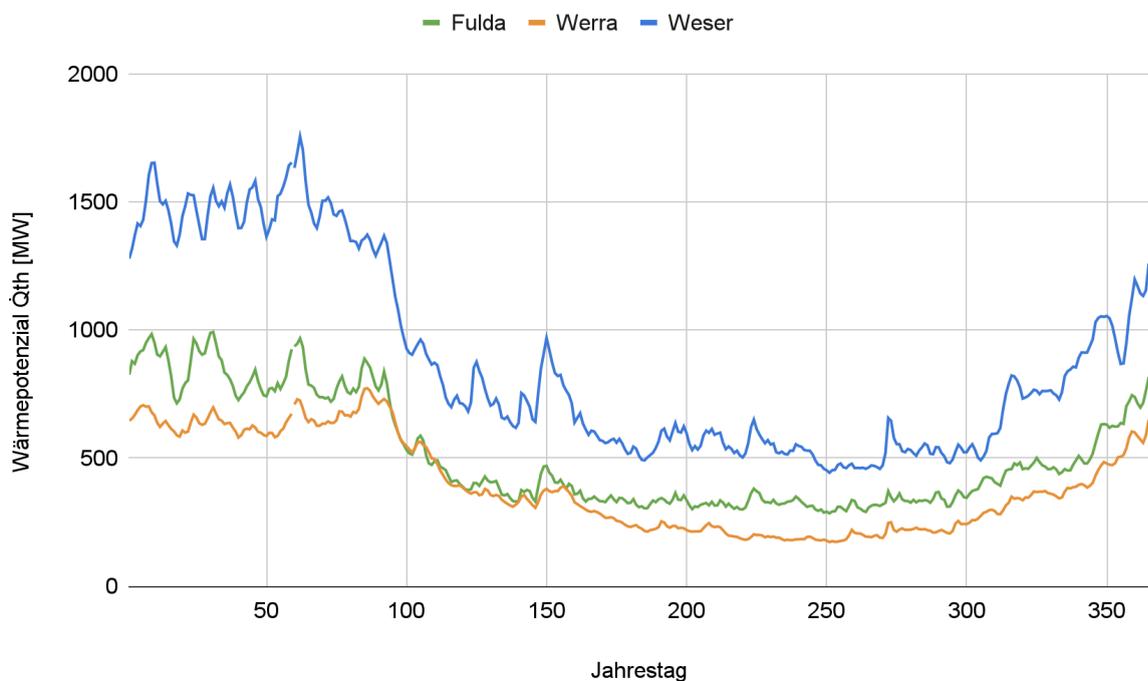


Abbildung 5.11: Vergleich des Wärmepotenzials von Fulda, Werra und Weser im Verlauf des charakteristischen Jahres (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

Für eine wirtschaftliche Betrachtung der untersuchten Gewässer werden im Weiteren Kennwerte zur Bestimmung der Effizienz für jeden Jahrestag des charakteristischen Jahres bestimmt. In Kapitel 2.4 wurde bereits Gleichung 2.2 vorgestellt, mit der näherungsweise die Leistungszahl bestimmt werden kann. Wegen den niedrigen Wassertemperaturen ist ein geschlossenes System der Wärmepumpenanlage vorteilhaft (vgl. Kapitel 2.2). Der im Gewässer installierte Wärmeübertrager gibt die Wärme des Flusswassers aber aufgrund von Reibungs- und Übertragungsverlusten nicht vollständig an die Wärmepumpe weiter, weshalb die Annahme besteht, dass hier ein Wärmeverlust T_V [K] von 1 K auftritt (Borchardt 2022 [E-Mail]). Hartmann & Schwarzbürger (2009, S. 70) grenzen die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe auf +35 °C für das Heizungssystem und auf +55 °C für die Warmwasserbereitstellung ein. Diese werden jeweils als Nutzttemperatur für die Berechnungen angenommen. Während die Trinkwassererwärmung das ganze Jahr über erfolgt, wird die Bereitstellung von Raumwärme überwiegend in der Heizperiode³ benötigt. Die Nutzttemperaturen werden entsprechend getrennt voneinander betrachtet und tageweise die Leistungszahl ε_{35} bzw. ε_{55} mit an den Wärmeverlust angepasster Gleichung 5.4 bestimmt. Der Gütegrad η wird nach Tabelle 1.1 mit 0,5 für Flusswasser als Wärmequelle angenommen.

$$\varepsilon_{WP} = \eta \cdot \frac{T_N}{T_N - (T_U - T_V)} \quad (\text{Gl. 5.4})$$

Der jährliche Verlauf der ermittelten Leistungszahlen ist Anlage 20 und Anlage 21 zu entnehmen. Die Ganglinien scheinen für die betrachteten Gewässer zu korrelieren. Es ist ein näherungsweise konstanter Verlauf auf niedrigem Niveau über die Wintermonate mit Anstieg im Frühjahr zu sehen. In den Sommermonaten zeigen die Graphen vergleichsweise stärkere Schwankungen um das Maximum auf und fallen im Herbst wieder auf ein niedriges Niveau. Allgemein weist die Leistungszahl ε_{35} eine geringe Amplitude auf. Der Verlauf zwischen Jahrestag 121 und 273 kann für die Leistungszahl ε_{35} vernachlässigt werden, da er außerhalb der Heizperiode liegt. Für eine bessere Unterscheidung wurde das Vorkommen einzelner Werte mit einer Häufigkeitstabelle kategorisiert (Anlage 22 und Anlage 23). Wegen der separaten Betrachtung der Leistungszahl für Raumwärme- bzw. Warmwasserbereitstellung wurden absolute Häufigkeit (H_{absolut}) und relative Häufigkeit (H_{relativ}) jeweils auf die charakteristische Heizperiode (213 Tage) bzw. das gesamte charakteristische Jahr (366 Tage) bezogen. Die Klassengrenzen wurden so gewählt, dass das Resultat einer Rundung einer natürlichen Zahl entspricht und in einem Diagramm der entsprechenden Leistungszahl zugeordnet werden kann. Nachstehende Abbildungen dienen der Visualisierung der Ergebnisse. Die jeweilige Leistungszahl ist hierbei auf die Abszisse aufgetragen, wobei die Ordinate die absolute Häufigkeit in Tagen aufzeigt.

Aus dem linken Graphen in Abbildung 5.12 geht hervor, dass sich die Leistungszahl ε_{35} für alle drei Gewässer überwiegend um den Wert 5 bewegt. Während sich für Fulda und Weser eine sehr ähnliche Häufigkeitsverteilung mit einem ausgeprägten Maximum bei einer Leistungszahl von 5 ergibt, weicht die Verteilung für die Werra geringfügig ab. Hierbei wird das Maximum ebenfalls bei einer Leistungszahl von 5 erreicht, das Niveau liegt jedoch unterhalb dem von Fulda und Weser. Grund dafür ist, dass an der Werra die Wertigkeit von 6 häufiger erreicht wird, sodass das Niveau hier über dem von Fulda und Weser liegt. Für die Trinkwassererwärmung erreicht die

³ Die Heizperiode wird in dieser Arbeit als Zeitraum zwischen dem 1. Oktober und dem 30. April definiert.

Wärmepumpe, wie in Abbildung 5.12 im rechten Graphen sichtbar wird, Leistungszahlen zwischen 3 und 5 mit einem Maximum bei einem Wert von 4. Auch hier weist die Werra öfter eine hohe Leistungszahl auf als Fulda und Weser, was sich durch ein höheres Niveau bei einer Leistungszahl von 5 äußert. In beiden Fällen ist dieses Verhalten auf die höheren Wassertemperaturen der Werra zurückzuführen. Grund für die allgemein geringere Wertigkeit letzterer Leistungszahl ist die höhere benötigte Vorlauftemperatur der Warmwasserbereitstellung.

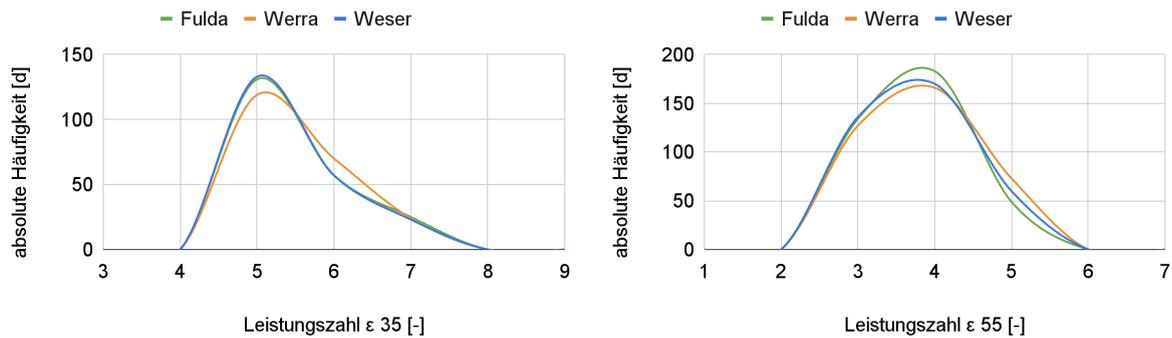


Abbildung 5.12: Häufigkeitsverteilung der Leistungszahl ϵ_{35} für das Heizungssystem (links) bezogen auf die charakteristische Heizperiode und der Leistungszahl ϵ_{55} für die Warmwasserbereitstellung (rechts) bezogen auf das charakteristische Jahr (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

Die Ermittlung der JAZ ist nach VDI 4650 Blatt 1 möglich. Sie wird überschlägig für Monatsmittel mit Gleichung 2.4 aus Kapitel 2.4 berechnet. Zuvor wurden folgende Annahmen getroffen:

- Korrekturfaktor F_p entspricht dem Literaturwert für Grundwasserförderpumpen; Annahme: $F_p = 1,14 [-]$
- Korrekturfaktor $F_{\Delta\theta}$ für abweichende Temperatur am Verflüssiger bewegt sich abhängig von Temperaturdifferenzen bei der Prüfstandsmessung und dem Betrieb der Heizungsanlage um einen Wert von $1,000 \pm 0,1$; Annahme: $F_{\Delta\theta} = 1 [-]$
- Korrekturfaktor F_{θ} wird für Eintrittstemperaturen $t_{W, \text{ein}}$ kleiner $+8 \text{ °C}$ linear interpoliert und in Anlage 24 entsprechend gekennzeichnet; für Wassertemperaturen größer $+12 \text{ °C}$ wird entsprechender Korrekturfaktor angenommen (Hartmann und Schwarzburger 2009, S. 75)

Die Verläufe der gemittelten JAZ β_{35} für das Heizungssystem und der gemittelten JAZ β_{55} für die Warmwasserbereitstellung werden in Anlage 25 und Anlage 26 gezeigt. In Anbetracht der JAZ β_{35} ist das abgebildete Maximum zu vernachlässigen, da sich dieses außerhalb der Heizperiode von Oktober bis April befindet. Die JAZ verläuft für alle Fließgewässer nahezu konstant bei einem Wert von 4 und steigt zu Beginn und zum Ende der Heizperiode auf einen Wert von 6 (vgl. Anlage 25). Die JAZ β_{55} weist eine geringere Amplitude auf und liegt für alle Fließgewässer zwischen einem Wert von 2 bis 3,7 mit Maximum in den Sommermonaten (vgl. Anlage 26).

5.3 Diskussion der Ergebnisse

Streng genommen wird durch eine Punktmessung, wie es die Erfassungen der Temperatur und des Durchflusses sind, nur der Zustand an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt erfasst. Je nach gewählter Auflösung stellt die Messreihe somit nur stichprobenartig vorhandene Schwankungen einer sich stetig veränderlichen Größe dar (Maniak 2016). In Anbetracht dessen wurde die Betrachtung von Tagesmittelwerten als hinreichend genau gewertet. Diese ermöglicht neben einer Darstellung von grundlegenden Wetterumschwüngen auch die Abschätzung von Unterschreitungshäufigkeiten der Grenztemperatur.

Durch die stufenweise Färbung der Temperaturdaten (vgl. Abbildung 5.6) ist besonders auffällig geworden, dass die betrachteten Fließgewässer in den Wintermonaten zu sehr tiefen Wassertemperaturen neigen. Des Öfteren liegen diese sogar nahe dem Gefrierpunkt und deuten auf eine Eisbildung im Fließgewässer hin. Ab dem Jahr 1994, das Jahr 1999 ausgenommen, liegen Temperaturdaten von mindestens zwei Messstationen vor, welche in ihren Verläufen gut übereinstimmen und auf die Schlüssigkeit der Messdaten deuten. Nichtsdestotrotz wurde die Ansprechperson der HLNUG gebeten, die Plausibilität der Messdaten einzuschätzen. Hierauf wurde erwidert, dass „die Messstationen [...] in Nordhessen [liegen], wo es im Winter zu sehr niedrigen Lufttemperaturen bis weit unter die Nullgrad-Marke kommt. Da sich die Wassertemperatur der Lufttemperatur anpasst und die Gewässer zum Teil staugeregelt sind mit geringen Abflüssen, kann es durchaus zur Eisbildung kommen“ (Semsei 2022 [E-Mail]). Diese Aussage konnte auch mit der Gewässerbeschreibung in einem Forum untermauert werden. Dort wird berichtet, dass Ober- und Mittelweser zu Beginn des 20. Jahrhunderts regelmäßig zufroren, wodurch der Fluss sogar mit dem Wagen überquert werden konnte (Slobodzian 2021).

Nach DVWK-Merkblatt 251 gilt die Datenreihe des Pegels Hann. Münden mit 23 Messjahren als bedingt geeignet. Die Pegel Bonaforth und Letzter Heller können hingegen mit über 30 Beobachtungsjahren als geeignet eingestuft werden. Das Merkblatt bezieht sich auf Hochwasserabflüsse, kann an dieser Stelle aber analog für Temperaturbetrachtungen angewendet werden. Die Messstation Witzenhausen ist demnach für hydrologische Betrachtungen mit weniger als 20 Messjahren lediglich abschätzend, während die Datenreihen von Wahnhausen und Hemeln mit 28 Jahren bedingt geeignet sind. Schlussfolgernd sind insbesondere die Beobachtungsreihen der Gütemesstellen aufgrund ihrer geringen Zeitspanne unter Vorbehalt zu betrachten.

Wie Tabelle 5.3 gezeigt hat, entsteht bei der unterschiedlichen Herangehensweise zur Betrachtung der Unterschreitungshäufigkeiten eine starke Abweichung der Unterschreitungstage. Diese Diskrepanz lässt sich dadurch erklären, dass in den Dauerlinien eine gemittelte Temperatur dargestellt wird, welche sich aus den Messdaten des jeweiligen Jahrestages zusammensetzt. Die Messung einer Temperatur kleiner $+1\text{ °C}$ wird demnach durch eine Messung von $+6\text{ °C}$ am selben Jahrestag eines prinzipiell wärmeren Jahres ausgeglichen. In Anlage 13 hingegen wurden die einzelnen Messjahre separat voneinander betrachtet, um die Unterschreitungshäufigkeiten zu ermitteln. Letzteres Vorgehen kann als aussagekräftiger gewertet werden, weil es die tatsächliche Anzahl der Unterschreitungstage berücksichtigt, unabhängig davon, an welchem Jahrestag der betrachtete Schwellenwert erreicht wurde.

Gleichzeitig muss wegen den unterschiedlichen erfassten Zeiträumen die Vergleichbarkeit der Daten hinterfragt werden. Die Messstationen Wahnhausen und Witzenhausen bieten mit Messdaten von 1994 bzw. 2003 bis 2021 aktuelle und bis auf vereinzelte Fehlwerte vollständige Aufzeichnungen. Die Datensätze der Messstation Hemeln hingegen weisen teilweise große Lücken auf. Zudem liegt ein Großteil der Zeitreihe mit den Jahren 1982 bis 2003 am weitesten in der Vergangenheit. Wie mit Anlage 13 durch die bräunliche Färbung deutlich wird, wurde insbesondere das letzte Jahrhundert von kalten Wassertemperaturen geprägt. Diese Jahre sind in die Berechnung der mittleren Temperatur der Fulda und Weser eingeflossen, konnten aber aufgrund fehlender Aufzeichnungen von Witzenhausen für die Werra nicht berücksichtigt werden. Inwiefern dadurch die mittlere Temperatur von Fulda und Weser gesenkt wurde, konnte durch eine graphische Betrachtung der Zeitspanne 2003 bis 2021 in Abbildung 5.13 überprüft werden. Für die Station Hemeln (Weser) liegen im betrachteten Zeitraum nur sechs Messjahre vor. Wegen der geringen Aussagekraft für hydrologische Betrachtungen, wurden diese nicht weiter berücksichtigt. Mittelwert und Quantile der Jahresganglinien von Fulda und Werra wurden für den genannten Zeitraum erneut in einem Diagramm zusammengeführt. Um die Veränderung besser erkennen zu können, ist der Verlauf des zuvor betrachteten Zeitraums von 1994 bis 2021 an der Fulda in Grau dargestellt. Abbildung 5.13 ist zu entnehmen, dass das Temperaturniveau der Fulda sich im Vergleich zur zuvor betrachteten Zeitspanne zum Jahresbeginn und -ende geringfügig erhöht hat, aber immer noch unterhalb des Niveaus der Werra liegt. Grund dafür kann einerseits die größere Lauflänge der Werra sein (vgl. Kapitel 4.1), andererseits der anthropogene Einfluss durch die Grubenentwässerung des Kali-Bergbau (vgl. Kapitel 5.1).

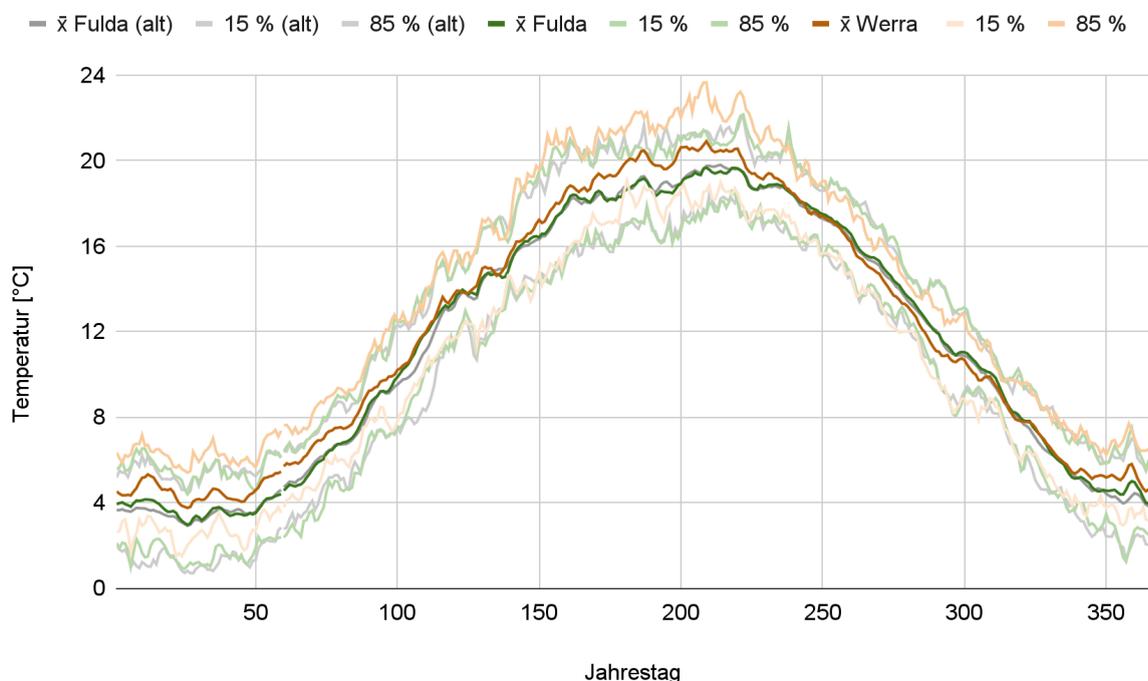


Abbildung 5.13: Vergleich der Wassertemperatur-Jahresganglinien der Fulda, Werra und Weser für den Zeitraum 2003 bis 2021 (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

Mithilfe von Anlage 13 konnte ebenfalls festgestellt werden, dass im letzten Jahrzehnt weniger häufig extrem kalte Wassertemperaturen aufgetreten sind. Um diese Beobachtung im Hinblick auf mögliche klimatische Veränderungen weiter auszuführen und einen möglichen Trend der Temperaturerhöhung zu erkennen, wurde eine Gruppierung des Temperaturmittelwertes für jeweils ein Jahrzehnt vorgenommen. Während an der Werra (siehe Anlage 28) und an der Weser (siehe Anlage 29) keine offensichtliche Erhöhung des Temperaturniveaus der daraus entstehenden Zeitreihen zu erkennen ist, sieht man an der Fulda (siehe Anlage 27) diese deutlich in den Wintermonaten für das Jahrzehnt von 2012 bis 2021. Für einen besseren Vergleich wurde diese Zeitreihe mit dem gruppierten Temperaturverlauf der Werra in Abbildung 5.14 zusammengeführt. Das Ergebnis sind sich nahezu überschneidende Ganglinien von Fulda und Werra. Somit hatte die Fulda in der jüngsten betrachteten Zeitspanne dasselbe Temperaturniveau der Werra, welche zu Beginn der Analyse in Anbetracht ihrer hohen winterlichen Wassertemperaturen als favorisiertes Gewässer für eine wärmeenergetische Nutzung galt. Da sich Fulda und Werra zur Weser vereinigen, ist davon auszugehen, dass die Weser in Hann. Münden im jüngsten Jahrzehnt ebenfalls das in Abbildung 5.14 sichtbare Temperaturniveau aufweist.

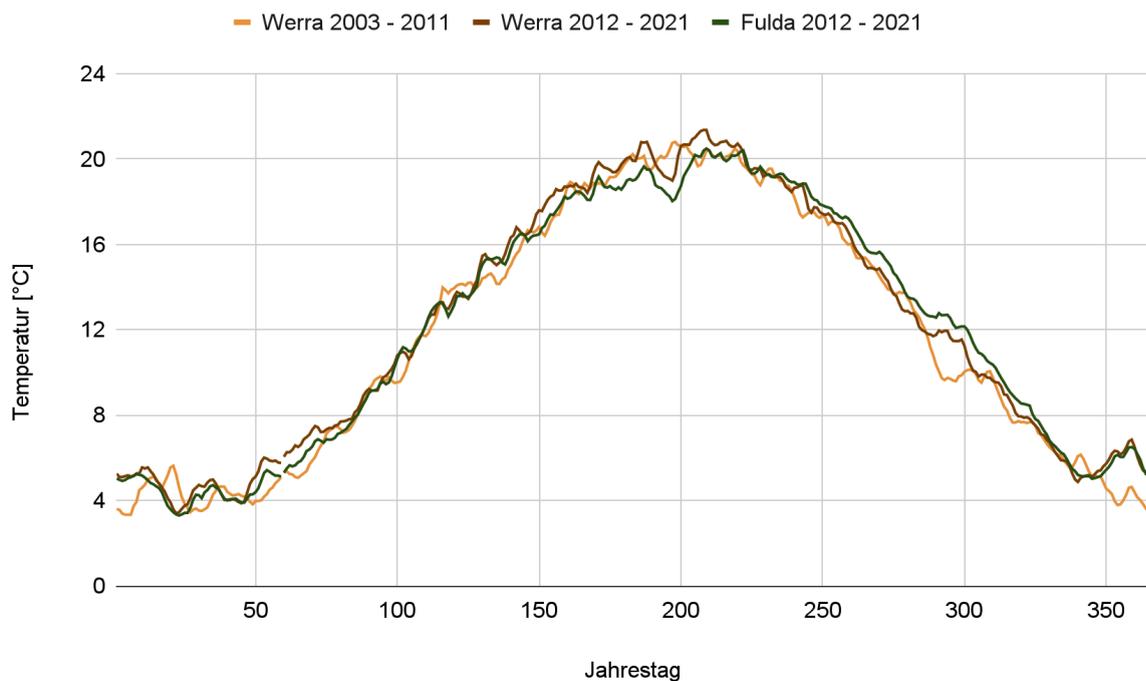


Abbildung 5.14: Vergleich der gruppierten Jahresganglinien der Wassertemperaturen an der Werra für 2003 bis 2021 und an der Fulda für 2012 bis 2021 (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

Es ist anzumerken, dass es sich bei dem berechneten Wärmepotenzial um die von der gesamten Abflussmenge pro Zeiteinheit transportierte thermische Energie handelt, nicht um die tatsächlich nutzbare Wärmeleistung. Nach einem Merkblatt der WWA Deggendorf (2011) ist der Durchfluss im Wärmeübertrager sehr gering. Beispielhaft werden PE-Rohre genannt, die bei optimalem Betrieb einen Volumenstrom von 0,21 l/s im Wärmetauscher ermöglichen. Dieser Volumenstrom bestimmt letztendlich die Entzugsleistung des Wärmeübertragers und ist im

Vergleich zum Gewässerabfluss, welcher für die Bestimmung des Wärmepotenzials herangezogen wurde, verhältnismäßig sehr klein. Des Weiteren kann das Wärmepotenzial wegen geringen Wassertemperaturen und einhergehenden technischen Schäden in den Wintermonaten nicht immer ausgeschöpft werden.

Für die Berechnungen des Wärmepotenzials wurde eine Temperaturspreizung von 2 K im Gewässer angesetzt. Diese Annahme geht von einer vollständigen Durchmischung im gesamten Querschnitt nach dem Wärmeentzug aus. Wie in Kapitel 4.1 geschildert, hängt die Geschwindigkeit der Durchmischung aber von zahlreichen Faktoren ab und würde aufgrund der Größe betrachteter Fließgewässer Zeit in Anspruch nehmen. Zudem waren Vorgaben der OGewV, welche sich auf Temperaturerhöhungen beziehen, Anhaltspunkt für diese Annahme. Nach Gaudard et al. (2018a) und Wunderlich (1979) ist die Abkühlung eines Gewässers weniger kritisch zu beurteilen als dessen Erwärmung. Aus diesem Grund sollten Wärmeeintrag und -entzug im Hinblick auf festgelegte Temperaturgrenzwerte differenziert betrachtet werden. Die Herangehensweise, in der die natürliche Variation der Monatsmittelwerte in Betracht gezogen wird, erscheint demzufolge sinnvoller.

Die Wirtschaftlichkeit der in dieser Arbeit berechneten Leistungszahlen kann im Hinblick auf die Erfüllung bestimmter Mindestanforderungen abgeschätzt werden. Für eine Förderung durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle ist bei einem geschlossenen System die Leistungszahl einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit 4,3 im Betriebspunkt und bei einem offenen System die der Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit 5,1 im Betriebspunkt relevant (Doelling 2011). An dieser Stelle ist anzumerken, dass eine deutschlandweite Feldanalyse von Russ et al. (2010) ergeben hat, dass der Gütegrade im Wärmepumpenbetrieb von Literaturangaben abweicht. Dabei konnte im Mittel eine Differenz von 0,1 im Heizbetrieb und eine Differenz von 0,08 im Warmwasserbetrieb für Luft/Wasser-Wärmepumpen zu den in dieser Arbeit in Tabelle 1.1 aufgeführten Werten festgestellt werden. Die Abweichungen für Sole/Wasser-Wärmepumpen betragen im Mittel im Heizbetrieb 0,08 und im Warmwasserbetrieb sogar 0,12 zu dem angenommenen Wert von 0,5 (vgl. Kapitel 5.2.3). Es ist folglich naheliegend, dass die von der Wärmepumpe erreichte Leistungszahl in Realität geringer ausfällt als berechnet.

Erb et al. (2004) konnten durch eine Feldanalyse in der Schweiz die JAZ betriebener Kleinwärmepumpen bis 20 kW berechnen und eine statistische Verteilung der Effizienz definieren. Hierfür wurden 236 Anlagen untersucht, die sich sowohl in Neubauten als auch in sanierten Bestandsgebäuden befinden. Dabei war die benötigte Vorlauftemperatur im Sanierungsobjekt im Mittel 5 K höher und die JAZ entsprechend 9 % niedriger als im Neubau. Angesichts ihres Marktanteils wurden überwiegend Luft/Wasser-Wärmepumpen und Sole/Wasser-Wärmepumpen in die Studie einbezogen, für die sich eine mittlere JAZ von 3,5 bzw. 2,7 ergab. Ähnliche Werte haben auch die Untersuchungen von Russ et al. (2010) ergeben. In dieser Arbeit hingegen ergab die Berechnung der JAZ β_{35} Werte zwischen 4 und 6 (vgl. Anlage 25) und liegt somit deutlich über dem Mittelwert real betriebener Anlagen. Die berechnete JAZ β_{55} mit Werten zwischen 2 und 3,7 (vgl. Anlage 26) weist hingegen näherungsweise das Potenzial real betriebener Anlagen auf. Der Vergleich zu bestehenden Heizsystemen bekräftigt, dass die ermittelten Verläufe der JAZ lediglich als Abschätzung verstanden werden können. Grund dafür ist, dass einerseits mehrere Annahmen für die Berechnung getroffen werden mussten und andererseits zahlreiche Faktoren in der Rechnung nicht berücksichtigt werden, die entscheidend

für die letztendlich aufgenommene Jahresarbeit der Wärmepumpe sind. Darunter fallen neben der Bauweise und der Dämmung des Gebäudes auch das Nutzungsverhalten der Besitzer. Die exakte Bestimmung der JAZ ist somit erst nach einem Betriebsjahr möglich.

5.4 Zusammenfassung

In Anbetracht der vorliegenden Temperaturdaten wurde die Werra wegen dem vergleichsweise hohen Niveau der charakteristischen Temperaturganglinie zu Beginn der Analyse für die Flusswärmenutzung favorisiert. Die Analyse der berechneten Wärmepumpen-Leistungszahl, welche von der Quelltemperatur abhängt, zeigt ebenfalls die größte Wirtschaftlichkeit der Werra auf. Allerdings wurde der angenommene große Unterschied zu den anderen untersuchten Fließgewässern durch die Ermittlung der jährlichen Unterschreitungshäufigkeiten widerlegt. Die Werra weist die geringste Anzahl an Tagen mit extrem kalten Wassertemperaturen auf, dennoch wird im Durchschnitt jährlich die Spanne eines Monats mit Wassertemperaturen unter $+4\text{ °C}$ erreicht. Die Berechnung des Wärmepotenzials hingegen zeigte, dass die Weser das numerisch größte Potenzial aufweist. Ausschlaggebende Größe ist hierbei der Abfluss, welcher sich für die Weser aus Summe der Abflüsse von Fulda und Werra ergibt.

Die Vergleichbarkeit der vorliegenden Temperaturdaten wurde hinsichtlich ihrer erfassten Zeiträume hinterfragt. Während für die Zeitspanne 2003 bis 2021 das Temperaturniveau der Fulda weiterhin unterhalb dem der Werra liegt, hat die Fulda in der jüngsten Periode von 2012 bis 2021 das Niveau der Werra erreicht. Für die Weser liegt mit lediglich vier erfassten Jahren nur ein Bruchteil der Daten in letzterem Zeitabschnitt vor. Weil Fulda und Werra aber die Quellflüsse der Weser verkörpern, kann davon ausgegangen werden, dass letztere selbiges Temperaturniveau erreicht hat.

Eine Studie konnte Abweichungen beim Gütegrad realer Wärmepumpen zu Literaturangaben feststellen (Russ et al. 2010). Demzufolge werden die in dieser Arbeit berechneten Leistungszahlen als zu hoch eingeschätzt. Der Vergleich von in einer Feldanalyse erfassten JAZs mit berechneten Werten bekräftigt die Annahme: die berechneten Werte übertreffen die realen Kennzahlen. Ursache liegt darin, dass für die Berechnung der JAZ zahlreiche Annahmen getroffen wurden, der Gebäudezustand sowie Nutzerverhalten vernachlässigt wurden und die zuvor ermittelte Leistungszahl zu groß ausfällt.

6 Schlussfolgerungen für die Wärmenutzung

Im Folgenden wird das erarbeitete Hintergrundwissen hinsichtlich der unterschiedlichen Betriebsarten und wasserrechtlichen Rahmenbedingungen sowie die durch die Analyse gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um Empfehlungen für die Flusswärmenutzung im betrachteten Projektgebiet zu formulieren.

6.1 Allgemeine Empfehlungen

Weder die mengenmäßige Wasserentnahme noch die quantitative Temperatursenkung sind in Deutschland gesetzlich konkretisiert (vgl. Kapitel 3.2.2). In der Schweiz wird der Kennwert Q_{347} herangezogen, welcher als gesetzlich festgelegte Größe für die Mindestwasserführung unterhalb von Stauhaltungen und Wasserentnahmestellen in Fließgewässern dient. Er entspricht derjenigen Abflussmenge, welche an 347 Tagen im Jahr, also 95 %, erreicht oder überschritten wird (DWA-M 541 2020). Schaffner & Niederberger (2017) raten, dass dieser Trockenwetterabfluss über 500 l/s liegt und die maximale Entnahmemenge 20 % dessen nicht überschreitet. In der Schweiz gelten sowohl für Wärmeeintrag als auch -entzug dieselben Grenzwerte (Gaudard & Schmid 2019). Diese liegen im Fließgewässer allgemein bei höchstens 3 K, in Gewässerabschnitten der Forellenregion bei höchstens 1,5 K und erinnern an Anforderungen der deutschen OGewV bezüglich der erlaubten Temperaturerhöhungen (vgl. Anlage 2). Während die künstliche Temperatursenkung weniger kritisch zu beurteilen ist, sollte sie dennoch begrenzt werden und die natürlichen Schwankungen verschiedener Jahre nicht übertreffen. Friedrich (1979) grenzt die Abkühlspanne folglich auf 3 bis 5 K ein. Gleichzeitig ist ein kontinuierlicher Wärmeentzug zur Vermeidung sprunghafter Temperaturschwankungen und die Rückgabe ins gleiche Gewässer empfehlenswert. Dadurch wird einerseits die Abflussmenge beibehalten, andererseits werden mögliche Krankheiten nicht in unbetroffene Gewässer verschleppt (Friedrich 1979; Schaffner & Niederberger 2017; Gaudard et al. 2022). Außerdem würden in Niedersachsen Gebühren der Gewässernutzung wegfallen (vgl. Kapitel 3.3.1).

Allgemein sollte die Anzahl von Bauwerken und Eingriffen ins Gewässer gering gehalten werden. Gleichzeitig ist eine rasche Durchmischung der thermisch veränderten und unveränderten Wassermengen erstrebenswert, damit Zeitspanne und Fließweg der Kältefahne minimiert werden. Entsprechend könnte ein Wärmeübertrager dort installiert werden, wo ohnehin schon eine anthropogene Bewirtschaftung durch wasserbauliche Nutzungssysteme erfolgt. Diese bereits vorhandenen Infrastrukturen können beispielsweise Wasserkraftwerke, Schleusen oder Sohlenbauwerke sein. Bei einem offenen System ist auf die vorteilhafte Gestaltung des Einleitungsbauwerkes zu achten, um den Prozess der Durchmischung zu fördern. Weil höhere Turbulenz allgemein die Durchmischung fördern (vgl. Kapitel 4.1), sollte der Standort eine angemessen hohe Fließgeschwindigkeit vorweisen (vgl. Kapitel 4.2). Diese ist auch gegen die Bildung eines Biofilms am Wärmeübertrager wirksam und vergrößert das Reinigungsintervall dessen (Schaffner & Niederberger 2017; Gaudard et al. 2022; LAWA 1991).

Beispielsweise eignet sich der Auslauf eines Wasserkraftwerks oder einer Stauanlage gut für die Installation eines Wärmeübertragers. Abbildung 6.1 zeigt hierzu die Lage und den Typ existierender Bauwerke an der Fulda und der Werra rund um die Altstadt Hann. Mündens. Anlage 30 zeigt diese nochmals übersichtlich in einer Tabelle. In Anlage 31 und Anlage 32 werden weitere Nutzungsanlagen flussaufwärts gezeigt, die in Betracht gezogen werden können. Bei der Auswahl gezeigter Standorte wurde auf die Nähe umliegender Siedlungen geachtet. Die Gebäude weisen optimalerweise einen energieeffizienten Bestand mit Flächenheizsystemen auf, um den Wärmeverlust der Gebäudehülle zu minimieren und gleichzeitig die Effizienz der Wärmepumpe durch niedrige Vorlauftemperaturen zu erhöhen. In einer Studie von Erb et al. (2004) konnten zudem Vorteile der Warmwasserbereitstellung durch die Wärmepumpenanlage gegenüber einem separaten Elektroboiler festgestellt werden. Des Weiteren wird hier ein Wärmepumpenregler empfohlen, welcher durch Ausgleich der Raumtemperatur und einhergehender Energieeinsparung eine höhere JAZ der untersuchten Anlagen zeigte.

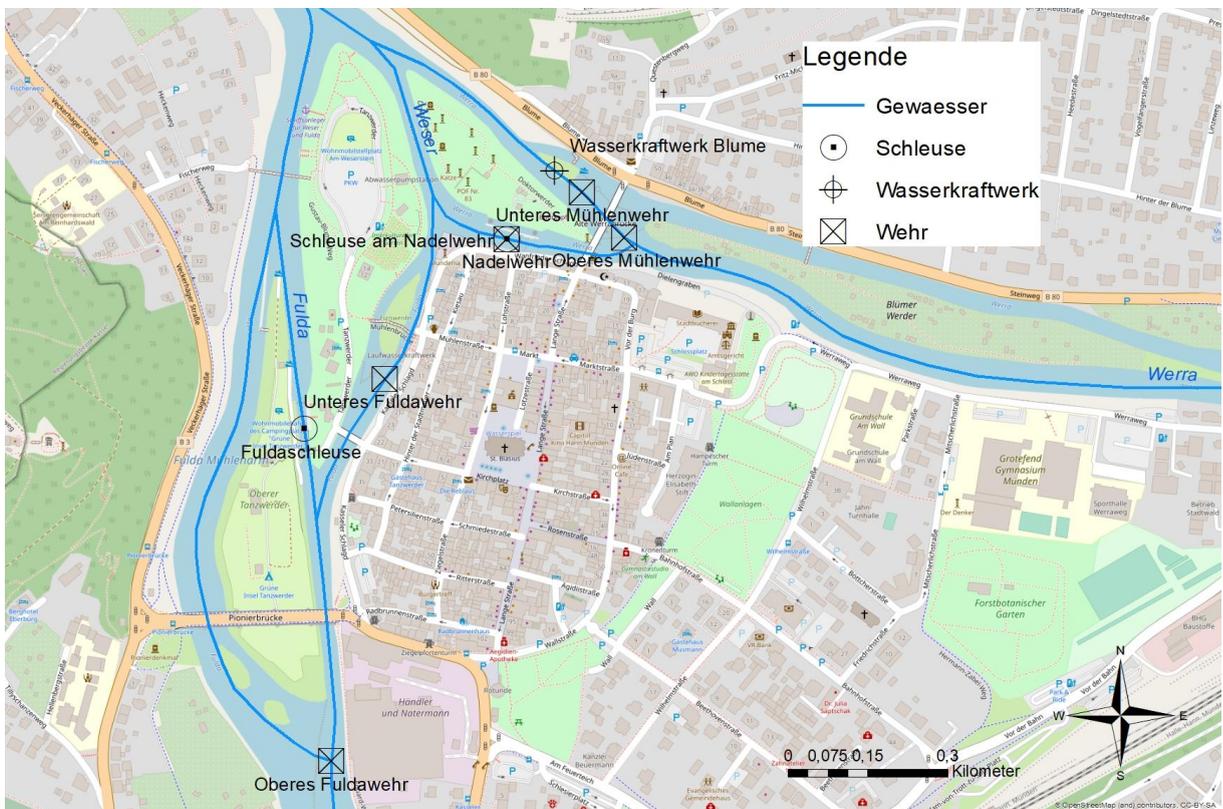


Abbildung 6.1: Potenzielle Standorte an wasserwirtschaftlichen Nutzungsanlagen für die Installation eines Wärmeübertragers an Fulda und Werra in der Altstadt Hann. Mündens (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021, BKG 2021 und WSA Weser o.J.)

6.2 Wahl der geeigneten Wärmepumpenanlage

Werden genannte Bedingungen erfüllt, stellt sich die Frage nach der geeigneten Ausführung der Wärmequellenanlage und der realisierbaren Betriebsweise der Wärmepumpenanlage. Wie in Kapitel 2 beschrieben, kann zwischen unterschiedlichen Ausführungs- und Betriebsarten gewählt werden. Diese werden im Folgenden aufgegriffen und hinsichtlich ihrer Anwendung im Projektgebiet beurteilt.

Die Wasserentnahme und -einleitung eines offenen Systems stellt faktisch eine Benutzung im Sinne von § 9 WHG dar. Dabei muss gemäß § 33 WHG eine ausreichende Restwassermenge gewährleistet sein, um die Funktionen des Gewässers nicht zu beeinträchtigen. Empfehlungen aus Kapitel 6.1 sollten diesbezüglich in Erwägung gezogen werden. Der Erhalt einer wasserrechtlichen Genehmigung für den Betrieb eines geschlossenen Systems scheint jedoch unproblematischer zu verlaufen, als der für ein offenes System. Eine bundesweite Befragung zuständiger Wasserbehörden von Brede & Koppe (2019, S. 58) diesbezüglich zeigte, dass niedersächsische Behörden „weiterhin in Frage [stellen], ob die Installation eines Wärmeübertragers im Gerinne überhaupt [dem] Tatbestand des Einbringens fester Stoffe entspricht, da mit der Begriffsbeschreibung i. d. R. Stoffe gemeint seien, welche sich im Wasser auflösen, vom Wasser fortgeschwemmt werden oder sich auf der Gewässersohle ablegen“.

Ausschlaggebender Faktor für die Wahl zwischen den Systemen ist letztendlich die Wassertemperatur. Grund dafür ist, dass die Wärmepumpe effizient betrieben werden kann, wenn die Wärmequelle ein hohes Temperaturniveau aufweist, während die Wärmesenke eine geringe Vorlauftemperatur benötigt. Niedertemperatur-Heizsysteme wie es beispielsweise die Fußbodenheizung ist, arbeiten mit niedrigen Vorlauftemperaturen und sollten seitens des Wärmeabnehmers in Betracht gezogen werden (Baumann et al. 2007; Schröder 2016). Wie die Analyse in Kapitel 5.2.2 ergeben hat, liegt das Temperaturniveau der untersuchten Gewässer in den Wintermonaten oftmals nahe der Null-Grad-Marke. Aus Gründen der größeren Betriebssicherheit und verringerten Vereisungsgefahr ist folglich ein geschlossenes System mit installiertem Wärmeübertrager im Fließgewässer zu empfehlen. Dabei sollte wegen der starken Versalzung von Werra und Weser und der geringen Gewässergüte, bei der Wahl des Wärmeübertragers auf dessen Korrosionsbeständigkeit geachtet werden. Edelstahl kann beispielsweise auch in Meerwasser genutzt werden, Kunststoff erweist sich als noch unempfindlicher.

Wegen der durchschnittlich hohen Anzahl von Unterschreitungstagen genannter Schwellenwerte an den untersuchten Gewässern (vgl. Anlage 13), ist neben der Flusswärmenutzung eine alternative Wärmebereitstellung wichtig. Von einem monovalenten Betrieb der Heizungsanlage wird abgeraten. Der monoenergetische oder bivalente Betrieb eignet sich in diesem Fall besser (vgl. Kapitel 2.3). Letzteres kann abhängig von benötigter Vorlauftemperatur und gewünschtem Deckungsgrad der Wärmepumpe an der jährlichen Wärmeversorgung als Bivalentanlage mit Öl- oder Gaskessel realisiert werden.

7 Fazit und Ausblick

Allgemein kann gesagt werden, dass die anthropogen und klimatisch bedingte Gewässererwärmung auch in Zukunft überwiegen wird und kritischer zu beäugen ist als eine künstliche Abkühlung. Unter Berücksichtigung einiger Rahmenbedingungen und Empfehlungen kann der Wärmeentzug negativen Effekten des Klimawandels entgegenwirken bzw. diese abschwächen. Einerseits ist hier die kühlende Wirkung zu nennen, die den Ökosystemen mehr Zeit zur Anpassung verschafft. Andererseits werden fossile Brennstoffe durch erneuerbare Wärmequellen substituiert, was einen weiteren Schritt auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität darstellt.

Mithilfe der vorliegenden Datensätze konnten die untersuchten Fließgewässer hinsichtlich ihres Wärmepotenzials analysiert werden. Dabei wurden von den hessischen und niedersächsischen Ämtern bereitgestellte Temperatur- und Abflussdaten für graphische Darstellungen aufbereitet und in Anbetracht der Rahmenbedingungen einer wärmeenergetischen Nutzung interpretiert. Während die Werra zu Beginn wegen dem vergleichsweise hohen Temperaturniveau der charakteristischen Temperaturganglinie favorisiert wurde, weist die Weser durch den Zusammenfluss von Fulda und Werra und damit einhergehend mengenmäßig größten Abfluss das größte thermische Potenzial auf. Daraufhin wurde die Vergleichbarkeit des Beobachtungszeitraums in Frage gestellt, welcher sich an der Weser stark von denen der Fulda und Werra unterscheidet. Eine darauf folgende Gruppierung in Zeitabschnitte von, wenn möglich, zehn Jahren ergab, dass das Temperaturniveau der Fulda für die jüngste Periode von 2012 bis 2021 dem der Werra entspricht. Schlussfolgernd ist davon auszugehen, dass auch die Weser in genanntem Zeitraum selbiges Niveau erreicht hat. Die ermittelten Effizienzkennzahlen übersteigen in Feldanalysen erfasste Werte und sollten demzufolge nur als Abschätzung verstanden werden.

Die Wärmepumpe stellt nach Thomas, et. al. (2022) die Schlüsseltechnologie der Wärmewende dar. Ihre Anwendung an Oberflächengewässern ist in Deutschland bislang selten. Dabei stellt ein Fließgewässer eine lokale, sich selbst regenerierende Wärmequelle dar. Im Hinblick darauf, wurde in dieser Arbeit das vorhandene Wärmepotenzial der Fließgewässer Fulda, Werra und Weser abgeschätzt. Eine Diskussion der Ergebnisse hat wiederum ergeben, dass nur ein Bruchteil dessen letzten Endes der wärmeenergetischen Nutzung zur Verfügung steht. Nach einem Merkblatt der WWA Deggendorf (2011) ist im Betrieb einer Wärmepumpe am Gewässer eine Temperaturdifferenz von etwa 3 bis 4 K zwischen Ein- und Auslauftemperatur zu erreichen, durch welche die betrachteten Gewässer keine Temperaturänderung von 2 K erreichen würden. Als nächster Schritt wäre somit die Ermittlung der potenziellen Entzugsleistung möglich. An dieser Stelle sollte beachtet werden, dass der Wärmeentzug technisch nur bis zu einer Wassertemperatur von +2 °C uneingeschränkt möglich ist, weil sonst Vereisungsgefahr am Wärmeübertrager besteht, welche zur nachhaltigen Schädigung dessen führen kann (Borchardt 2018). Eine weitere Frage wirft der mögliche Standort für die Wärmenutzungsanlage auf. Erste Empfehlungen diesbezüglich wurden in dieser Arbeit angesprochen, wonach bestehende wasserwirtschaftliche Nutzungsanlagen innerhalb Hann. Mündens in Betracht gezogen werden können. Die Nähe potenzieller Wärmeabnehmer sowie die Energieeffizienz der Gebäude sind hierbei eine gute Voraussetzung, um die gewonnene Wärmeenergie möglichst verlustfrei zu nutzen.

8 Literaturverzeichnis

- Baumann, M.; Laue, H. J.; Müller, P. (2007): Wärmepumpen. Heizen mit Umweltenergie. 4., erw. u. vollst. überarb. Aufl. Berlin: Solarpraxis (BINE-Informationspaket).
- Borchardt, S. (2017): Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern. In: J. Jensen (Hg.): 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute, Bd. 10, S. 29–32.
- Borchardt, S. (2018): Wärmetechnische Nutzung von Fließgewässern. Gastbeitrag der Technischen Universität Darmstadt. In: Regierungspräsidium Darmstadt (Hg.): Journal für Arbeitsschutz und Umwelt. Darmstadt (10), S. 21–24.
- Borchardt, S. (2022): Bachelorarbeit Hann.Münden - hier: Leistungszahl, 10.06.2022. E-Mail an Kristina Specht.
- Brede, H.; Koppe, B. (2019): Genehmigungsfähigkeit der thermischen Nutzung von Oberflächengewässern. In: Wasserwirtschaft (109), S. 56–61.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hg.) (o. J.): Art der Grundwasserleiter und der Wasserversorgung von Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/abb_gw-leiter+ww.html;jsessionid=E348237E31CF134AB6471D94ECB6E370.1_cid284?nn=1542268, zuletzt geprüft am 27.06.2022.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2022): Das Wasserhaushaltsgesetz. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/binnengewasser/gewaesserschutzrecht/deutschland/das-wasserhaushaltsgesetz>, zuletzt geprüft am 11.04.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022): Der Klimaschutzplan 2050, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- Caissie, D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. In: Freshwater Biology (51), S. 1389–1406.
- Caissie, D.; Satish, M. G.; El-Jabi, N. (2005): Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). In: Hydrological Processes (19), S. 2137–2159.
- Doelling, R. J. (2011): Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen: Kennzahlen & Berechnung. Richtwerte von Jahresarbeitszahlen nach Wärmepumpenarten. Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/leistung/jahresarbeitszahl>, zuletzt geprüft am 25.06.2022.
- DVWK-M 251 (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Bonn.
- DWA-M 541 (2020): Statistische Analyse von Niedrigwasserkenngrößen. Hennef.
- Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) (1981): Wärmepumpen an Oberflächengewässern. Oekologische Probleme und

Einsatzmöglichkeiten in der Schweiz. Bern/Hannover (Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Studie Nr. 19).

Erb, M.; Hubacher, P.; Ehrbar, M. (2005): Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003. Auszug aus dem Schlussbericht, 2005.

Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Weser (1998): Gewässerstrukturgütekarte Weser, Werra, Fulda (11).

Freter, M.: Brut- und Setzzeit beachten. Rücksicht nehmen bei Ausflügen in die Natur. Hg. v. NABU (Naturschutzbund Deutschland) Landesverband Niedersachsen e. V. Online verfügbar unter <https://niedersachsen.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/oekologisch-leben/naturschutz/29724.html>.

Friedrich, G. (1979): Ökologische Anforderungen an Wärmepumpen an Fließgewässern. In: W. D. Glatzel und K.-D. Heise (Hg.): Wärmepumpen und Gewässerschutz. Ökologische Auswirkungen von Wärmepumpen mit Wärmeentzug aus Wasser. Berlin: Erich Schmidt Verlag, S. 195–196.

Gaudard, A. (2016): Wärme- und Kältenutzung aus Sempacher- und Baldeggersee. Abschätzung des Potenzials. Bericht im Auftrag des Amtes für Wasser und Energie des Kantons St. Gallen, Eawag, Kastanienbaum.

Gaudard, A.; Schmid, M.; Wüest, A. (2022): Wärmenutzung aus Seen und Fließgewässern.

Gaudard, A.; Weber, C.; Alexander, T. J.; Hunziker, S.; Schmid, M. (2018b): Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat. In: WIREs Water (5).

Gaudard, A., Schmid, M., & Wüest, A. (2018a): Thermische Nutzung von Seen und Flüssen. Potenzial der Schweizer Oberflächengewässer. In: Aqua & Gas (2), S. 26–33.

Gaudard, A., Schmid, M., & Wüest, A. (2017): Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. Mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung. In: Aqua & Gas (5), S. 40–45.

Gaudard, A.; Schmid, M. (2019): Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung. Bericht im Auftrag des Amtes für Wasser und Energie des Kantons St. Gallen, Eawag, Kastanienbaum.

Glatzel, W. D.; Heise, K.-D. (Hg.) (1979): Wärmepumpen und Gewässerschutz. Ökologische Auswirkungen von Wärmepumpen mit Wärmeentzug aus Wasser. Berichtsband zum Statusseminar am 19. und 20. November im Reichstagsgebäude in Berlin. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

GEG – Gebäudeenergiegesetz: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden vom 8. August 2020

Hartmann, F.; Schwarzburger, H. (2009): Systemtechnik für Wärmepumpen. Solar- und Umweltwärme für Wohngebäude. 1. Aufl. Heidelberg, Neckar: Hüthig und Pflaum (De-Fachwissen).

- Held, E. (2021): Wie entsteht ein Bivalenzpunkt? In: SBZ Monteur (1).
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) (2003): EU-WRRRL Europäische Wasserrahmenrichtlinie. Organisation der Umsetzung, zuletzt geprüft am 19.04.2022.
- Jensen, J. (Hg.) (2017): 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute.
- Kammer, H. (2018): Thermische Seewassernutzung in Deutschland. Bestandsanalyse, Potential und Hemmnisse seewasserbetriebener Wärmepumpen. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kuhn, W. (1972): Physikalisch-meteorologische Überlegungen zur Nutzung von Gewässern für Kühlzwecke. In: Arch. Met. Geoph. Biokl. A. (21), S. 95–122.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Arbeitsgruppe Wärmebelastung der Gewässer (LAWA) (1991): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. 3., verb. Aufl. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Maniak, U. (2016): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Marotz, G. (1977): Der Einsatz von Wärmepumpen in fließenden Gewässern - wasserwirtschaftliche und betriebliche Aspekte. In: Wasserwirtschaft (12), S. 376–381.
- Nds. FischG: Niedersächsisches Fischereigesetz vom 1. Februar 1978, zuletzt geändert am 20. Mai 2019
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (2015): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Weser- und Emsgebiet.
- Nützmann, G.; Moser, H. (2016): Elemente einer analytischen Hydrologie. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- NWG: Niedersächsisches Wassergesetz vom 19. Februar 2010, zuletzt geändert am 16. Dezember 2021
- OGewV – Oberflächengewässerverordnung: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer vom 20. Juni 2016, zuletzt geändert am 9. Dezember 2020
- Regierungspräsidium Darmstadt (Hg.) (2018): Journal für Arbeitsschutz und Umwelt. Darmstadt (10).
- Russ, C.; Miara, M.; Platt, M.; Günther, D.; Kramer, T.; Dittmer, H. et al. (2010): Feldmessung Wärmepumpen im Gebäudebestand. Kurzfassung zum Abschlussbericht. Freiburg.
- Saschenin, S. (2020): Niedersachsen – Schonzeiten und Mindestmaße für Fische 2021. Online verfügbar unter <https://www.angelpedia.de/niedersachsen-schonzeiten-und-mindestmasse-fuer-fische/>, zuletzt geprüft am 16.04.2022.

- Schaffner, B.; Niederberger, K. (2017): Programm «Thermische Netze». Nutzung von Oberflächengewässer für thermische Netze.
- Schröder, T. (2016): Wärmequellen für Wärmepumpen. 2. Aufl. Dortmund: Verlag Dortmunder Buch.
- Schwoerbel, J.; Brendelberger, H. (2013): Einführung in die Limnologie. 10. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Slobodzian, G. (2021): Weser, Gewässerbeschreibung. Online verfügbar unter https://faltboot.org/wiki/index.php/Weser,_Gew%C3%A4sserbeschreibung#Gliederung_der_Weser, zuletzt geprüft am 11.06.2022.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021): Energieverbrauch privater Haushalte für Wohnen 2019 weiter gestiegen. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/08/PD21_383_85.htm, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- Tholen, M.; Walker-Hertkorn, S. (2008): Arbeitshilfen Geothermie. Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen. Bonn: Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser.
- Thomas, S.; Schüwer, D.; Vondung, F.; Wagner, O. (2022): Heizen ohne Öl und Gas bis 2035. Ein Sofortprogramm für erneuerbare Wärme und effiziente Gebäude.
- Umweltbundesamt (UBA) (2021): Wasserrahmenrichtlinie. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/wasserrahmenrichtlinie>, zuletzt geprüft am 11.04.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022): Erneuerbare Energien in Zahlen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick>, zuletzt geprüft am 31.05.2022.
- Wasserwirtschaftsamt (WWA) Deggendorf (2011): Wärmetauscher in oberirdischen Gewässern. Wasserwirtschaftliche Betrachtung. Deggendorf. Online verfügbar unter https://www.wwa-deg.bayern.de/service/veroeffentlichungen/doc/w_tauscher_gew.pdf.
- WHG – Wasserhaushaltsgesetz: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts vom 31. Juli 2009, zuletzt geändert am 18. August 2021
- Wilhelm, F. (1993): Hydrogeographie. Grundlagen der allgemeinen Hydrogeographie. 2. verb. Aufl. Braunschweig: Westermann (Das geographische Seminar).
- Wittmann, S. (2002): Tritiumgestützte Wasserbilanzierung im Einzugsgebiet von Fulda und Werra. Diplomarbeit. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau. Institut für Hydrologie. Online verfügbar unter <http://www.hydro.uni-freiburg.de/publ/diplommasterarbeiten/diplmcalpha/#W>.

WRRL – Wasserrahmenrichtlinie: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

Wunderlich, M. (1979): Auswirkungen des Wärmeentzugs auf die Güte von Oberflächengewässern. In: W. D. Glatzel und K.-D. Heise (Hg.): Wärmepumpen und Gewässerschutz. Ökologische Auswirkungen von Wärmepumpen mit Wärmeentzug aus Wasser. Berlin: Erich Schmidt Verlag, S. 183–194.

9 Quellenverzeichnis

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2021): Verwaltungszuordnungen 1:250 000. Online verfügbar unter

https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/verwaltungszuordnungen-1-250-000-stand-01-01-vz250-01-01.html?__SID=U, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (2021): Das Open Data Angebot der BfG. Online verfügbar unter <https://geoportal.bafg.de/CSWView/od.xhtml>, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

Busskamp, R.; Krahe, P. (2002): Die Hauptflüsse und ihre Einzugsgebiete. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Koblenz. Online verfügbar unter

http://archiv.nationalatlas.de/wp-content/art_pdf/Band2_124-125_archiv.pdf, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2022): Vieljährige Mittelwerte. Online verfügbar unter

https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/vielj_mittelwerte.html?nn=480164&lsbId=343278, zuletzt geprüft am 21.06.2022.

Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Weser (Hg.) (2022): Die Flussgebietsgemeinschaft Weser (FGG Weser). Online verfügbar unter <https://www.fgg-weser.de/>.

Heinz, E. (NLWKN) (2022): Datenanfrage NLWKN, 11.05.2022. E-Mail an Kristina Specht.

Krippenstapel, I. (NLWKN) (2022): Abflussdaten, 29.03.2022. E-Mail an Kristina Specht.

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (2017): Umweltkarten Niedersachsen. Online verfügbar unter

https://www.umweltkarten-niedersachsen.de/Umweltkarten/?lang=de&topic=Natur&bgLayer=TopographieGrau&E=493000.00&N=5825000.00&zoom=3&layers_visibility=false&catalogNode=s=, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

Semsei, J. A. (HLNUG) (2022): WG: Mail vom Kontaktformular: Pegeldata, 28.03.2022. E-Mail an Kristina Specht.

Stange, B. (HLNUG) (2022): Ihre Abschlussarbeit an der TU Darmstadt, 28.03.2022. E-Mail an Kristina Specht.

Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Weser (WSA) (Hg.) (o. J.): Wasserstraßen. Bauwerke und Anlagen des WSA Weser. Online verfügbar unter

<https://www.wsa-weser.wsv.de/webcode/2606734>, zuletzt geprüft am 10.05.2022.

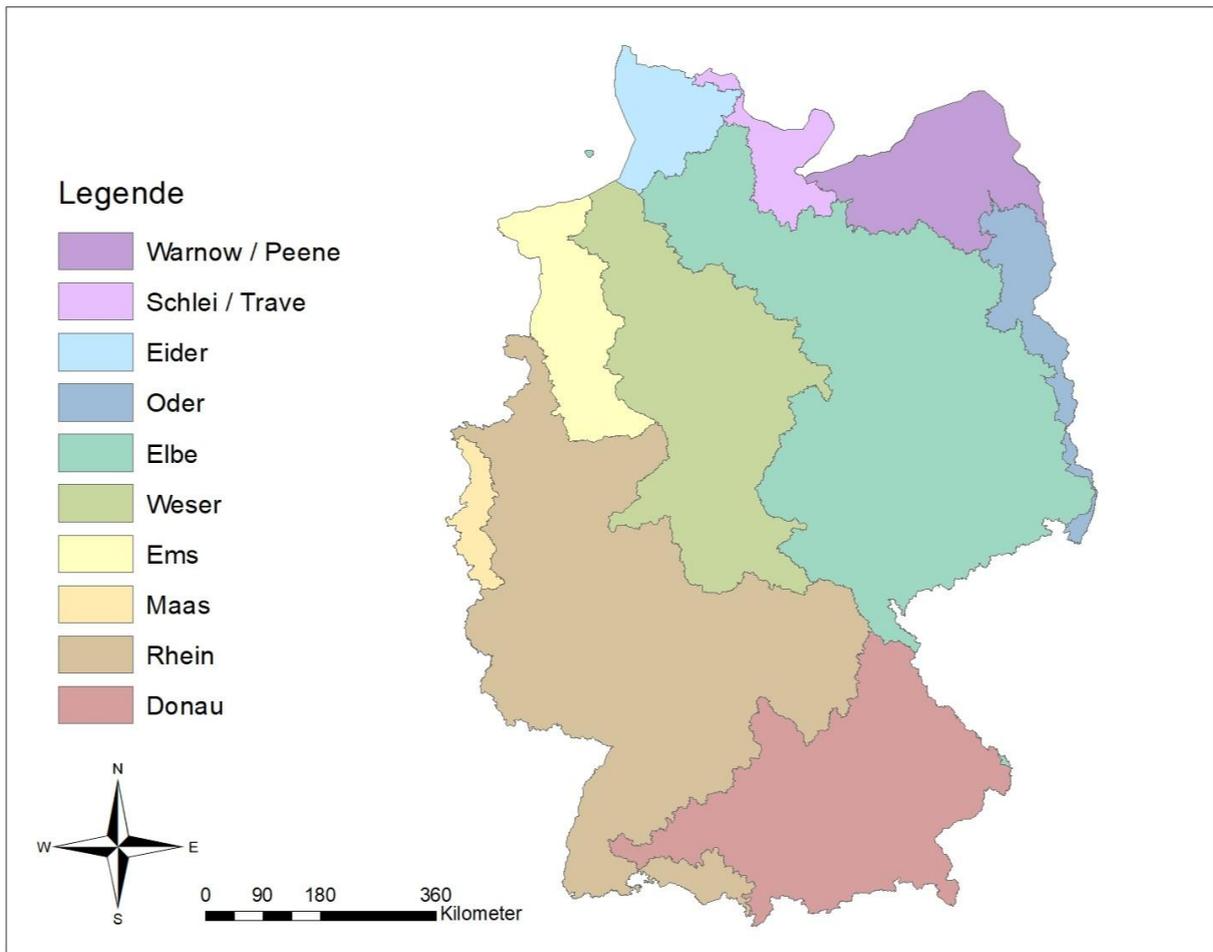
Willmann, S. (WSA Weser) (2022): AW: Anfrage für Bachelor Thesis: Flussquerschnitt und Wassertiefe üNN an, 06.04.2022. E-Mail an Kristina Specht.

10 Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Flussgebietseinheiten in Deutschland nach § 7 Abs. 1 WHG	48
Anlage 2:	Anforderungen an den sehr guten bzw. guten ökologischen Zustand und das höchste ökologische Potenzial für Fließgewässer	49
Anlage 3:	Gewässerstrukturgüte am Standort Hann. Münden	50
Anlage 4:	Schutzgebiete am Standort Hann. Münden	50
Anlage 5:	Chemischer Zustand der Gewässer nach WRRL am Standort Hann. Münden	51
Anlage 6:	Ökologischer Zustand der Gewässer nach WRRL am Standort Hann. Münden	51
Anlage 7:	Jahresganglinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (1994 bis 2021) der Fulda	52
Anlage 8:	Jahresganglinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (2003 bis 2021) der Werra	52
Anlage 9:	Jahresganglinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (1982 bis 2015) der Weser	53
Anlage 10:	Jahresdauerlinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (1994 bis 2021) der Fulda	53
Anlage 11:	Jahresdauerlinie der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (2003 bis 2021) der Werra	54
Anlage 12:	Jahresdauerlinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (1982 bis 2015) der Weser	54
Anlage 13:	Jährlich aufsummierte Unterschreitungstage für Temperaturen kleiner +1 bis +5 °C	55
Anlage 14:	Abflussganglinie eines charakteristischen Jahres (1985 bis 2021) der Fulda	56
Anlage 15:	Abflussganglinie eines charakteristischen Jahres (1985 bis 2021) der Werra	56
Anlage 16:	Abflussganglinie eines charakteristischen Jahres (1999 bis 2021) der Weser	57
Anlage 17:	Angaben der WSA Weser zu Wasserständen bei bestimmten Abflüssen: MNQ = mittlerer Niedrigwasserabfluss; MQ = mittlerer Abfluss; MHQ = mittlerer Hochwasserabfluss	57
Anlage 18:	Querprofil der Werra (in Fließrichtung) vor Pegelmessstelle	58
Anlage 19:	Querprofil der Werra (in Fließrichtung) nach Pegelmessstelle	58
Anlage 20:	Leistungszahl ϵ_{35} für das Heizungssystem im Verlauf eines charakteristischen Jahres	59
Anlage 21:	Leistungszahl ϵ_{55} für die Warmwasserbereitstellung im Verlauf eines charakteristischen Jahres	59

Anlage 22:	Häufigkeitstabelle für das Vorkommen der Leistungszahl ϵ_{35} während einer charakteristischen Heizperiode	60
Anlage 23:	Häufigkeitstabelle für das Vorkommen der Leistungszahl ϵ_{55} während einer charakteristischen Heizperiode	60
Anlage 24:	Korrekturfaktor F_9 für Wasser-Wasser-Wärmepumpen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen nach VDI 4650	61
Anlage 25:	Gemittelte JAZ β_{35} für das Heizungssystem im Verlauf der charakteristischen Monatsmittel	62
Anlage 26:	Gemittelte JAZ β_{55} für die Warmwasserbereitstellung im Verlauf der charakteristischen Monatsmittel	62
Anlage 27:	Gruppierung der Jahresganglinie der Wassertemperaturen an der Fulda	63
Anlage 28:	Gruppierung der Jahresganglinie der Wassertemperaturen an der Werra	63
Anlage 29:	Gruppierung der Jahresganglinie der Wassertemperaturen an der Weser	64
Anlage 30:	Liste wasserwirtschaftlicher Nutzungsanlagen in Hann. Münden	64
Anlage 31:	Potenzieller Standort an wasserwirtschaftlichen Nutzungsanlagen an der Fulda	65
Anlage 32:	Potenzieller Standort an wasserwirtschaftlichen Nutzungsanlagen an der Werra	65

Anlage 1: Flussgebietseinheiten in Deutschland nach § 7 Abs. 1 WHG (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) 2021)



Anlage 2: Anforderungen an den sehr guten bzw. guten ökologischen Zustand und das höchste ökologische Potenzial für Fließgewässer (Anlage 7 Nr. 1 und 2 OGewV)

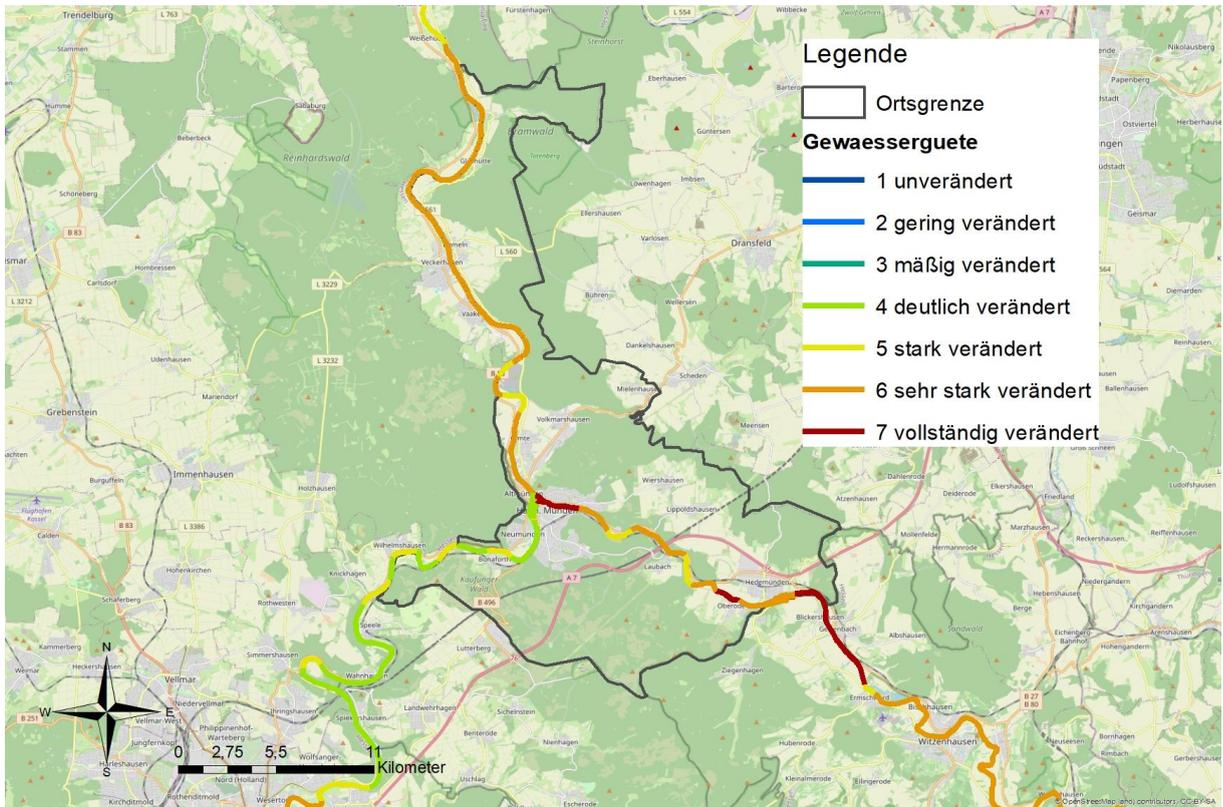
Anforderungen	Fischgemeinschaft							
	ff/tempff	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	Cyp-R	EP	MP	HP
T_{max} [°C] Sommer (April bis November)	< 18	≤ 18 bzw. ≤ 20	≤ 18 bzw. ≤ 20	≤ 18 bzw. ≤ 21,5	≤ 20 bzw. ≤ 23	≤ 20 bzw. ≤ 25	≤ 25 bzw. ≤ 28	≤ 25 bzw. ≤ 28
Temperaturerhöhung Sommer [ΔT in K]	0	0 bzw. ≤ 1,5	0 bzw. ≤ 1,5	0 bzw. ≤ 1,5	0 bzw. ≤ 2	0 bzw. ≤ 3	0 bzw. ≤ 3	0 bzw. ≤ 3
T_{max} [°C] Winter (Dezember bis März)		≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Temperaturerhöhung Winter [ΔT in K]		≤ 1	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3

Die Werte für Temperaturerhöhung bezeichnen die maximal zulässige Differenz zwischen den Temperaturen oberhalb und unterhalb einer Einleitungsstelle für Abwärme.

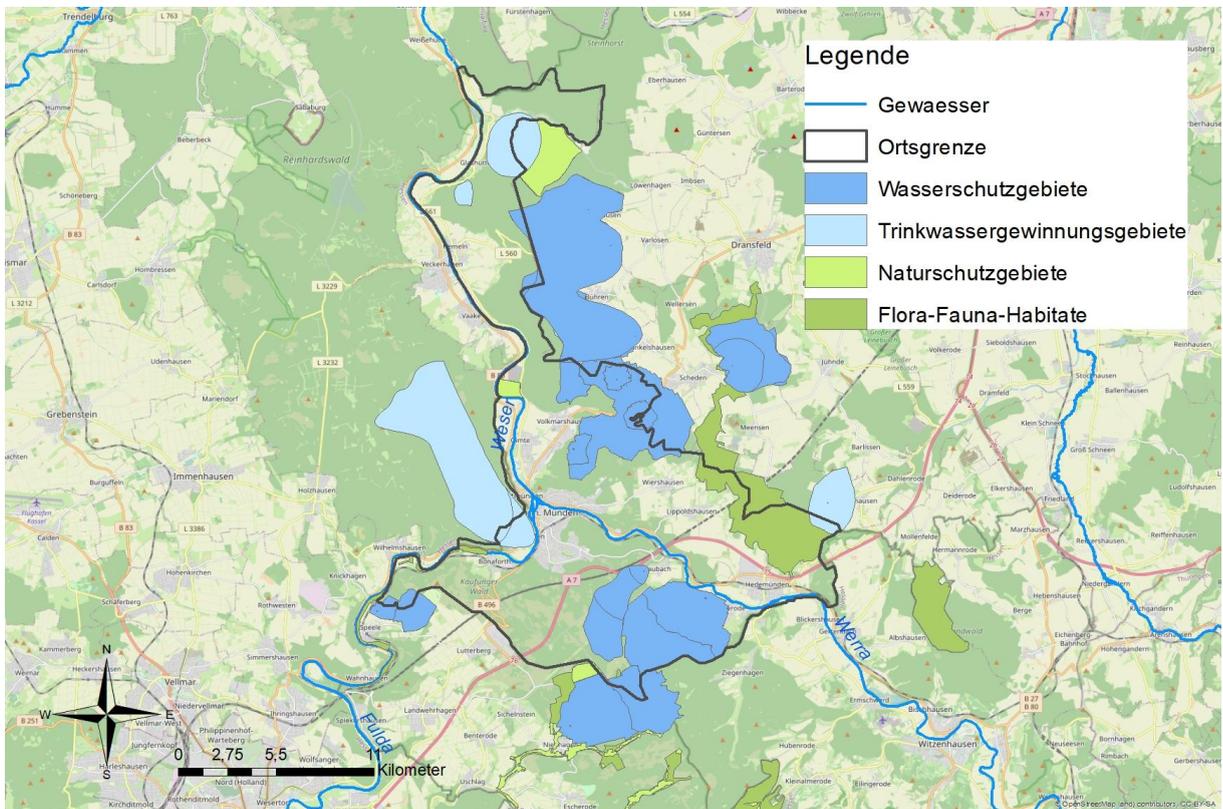
Legende:

- ff/tempff: Gewässer sind fischfrei oder temporär fischfrei
- Sa-ER: salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals
- Sa-MR: salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals
- Sa-HR: salmonidengeprägte Gewässer des Hyporhithrals
- Cyp-R: cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals
- EP: Gewässer des Epirhithrals
- MP: Gewässer des Epirhithrals
- HP: Gewässer des Epirhithrals

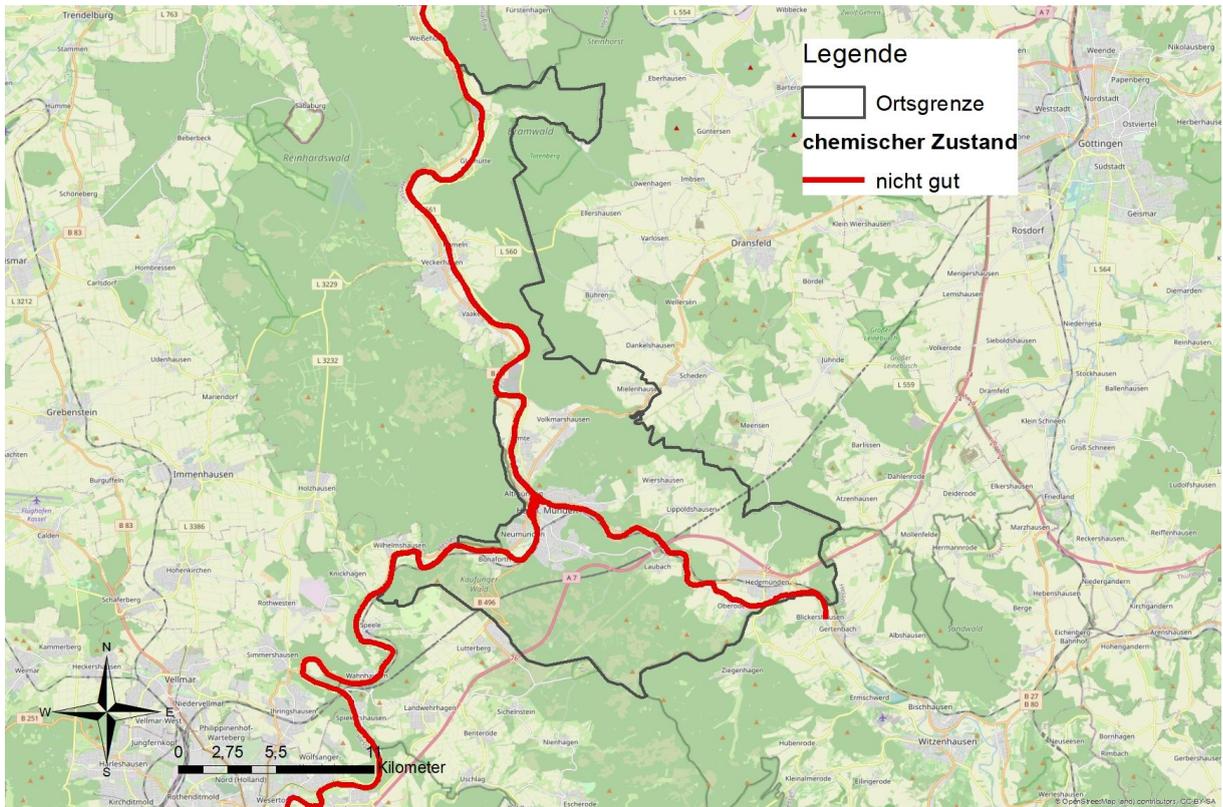
Anlage 3: Gewässerstrukturgüte am Standort Hann. Münden (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) 2021 und FGG Weser 1998)



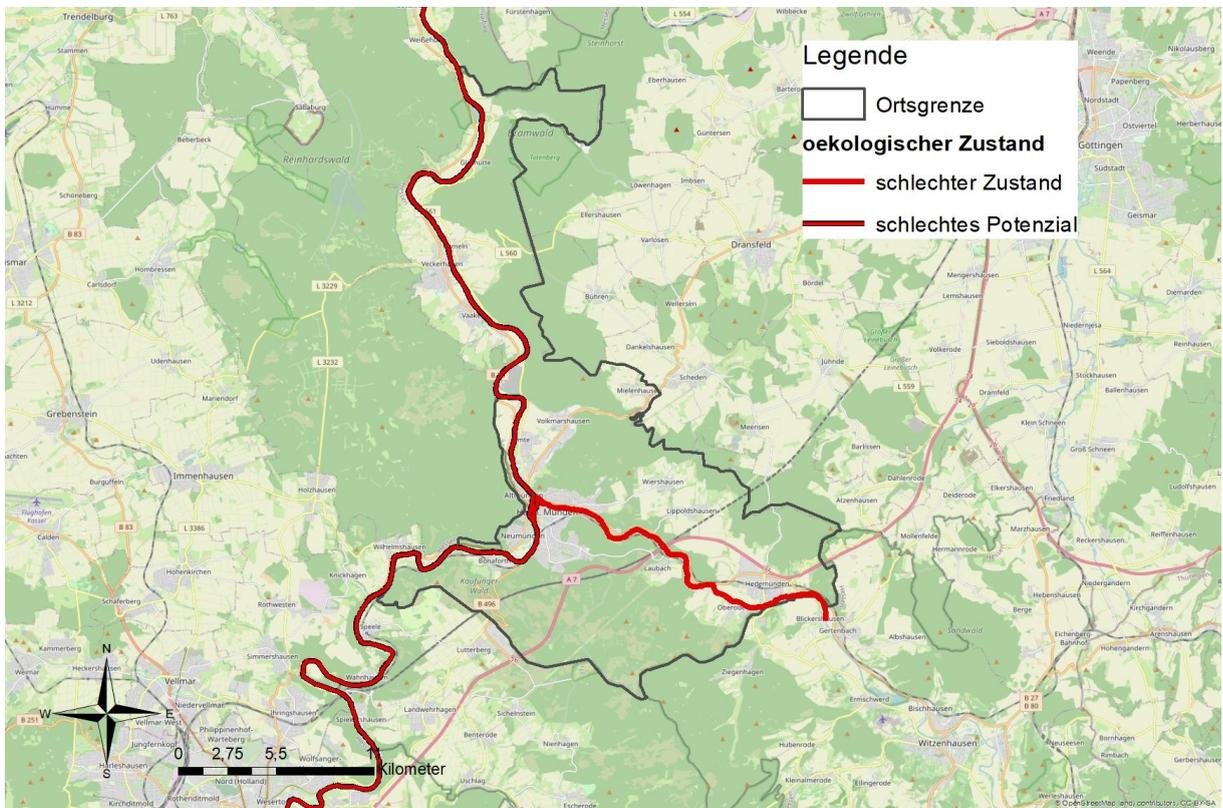
Anlage 4: Schutzgebiete am Standort Hann. Münden (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021, BKG 2021 und NLWKN 2017)



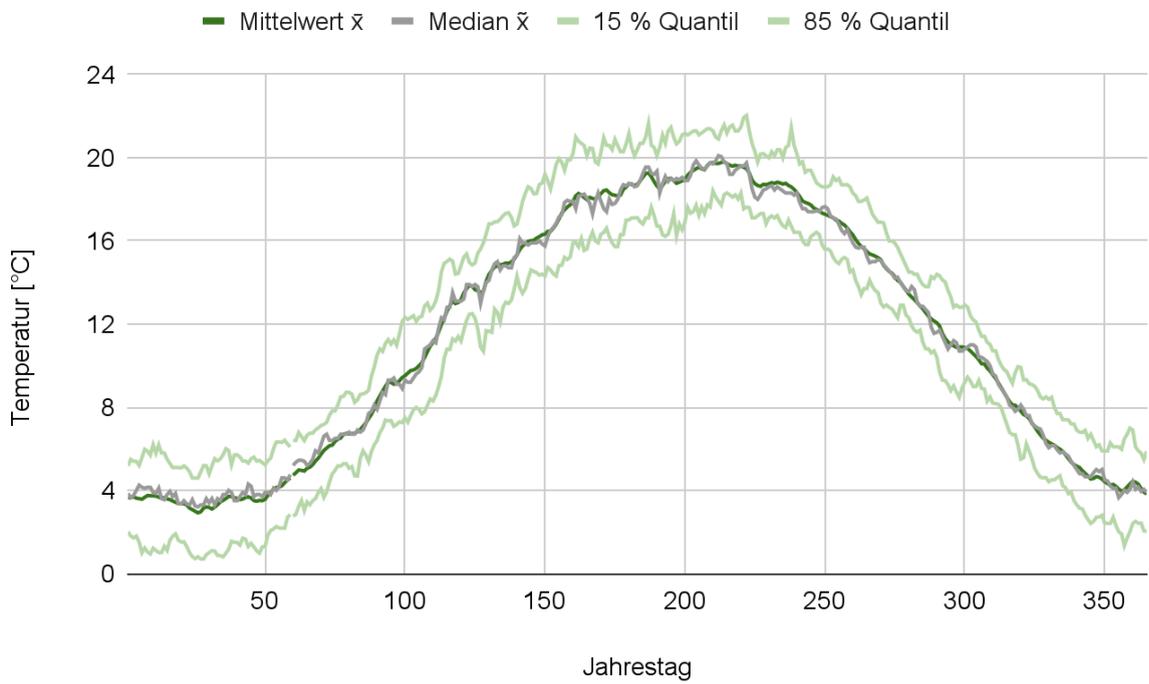
Anlage 5: Chemischer Zustand der Gewässer nach WRRL am Standort Hann. Münden (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021 und BKG 2021)



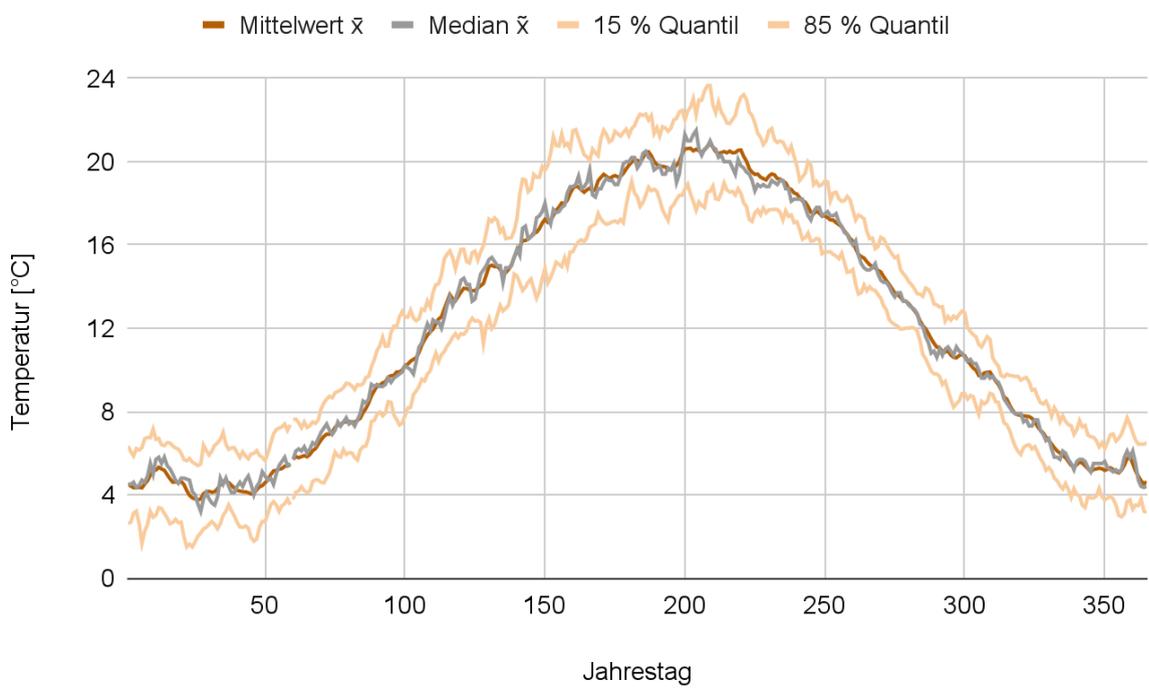
Anlage 6: Ökologischer Zustand der Gewässer nach WRRL am Standort Hann. Münden (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021 und BKG 2021)



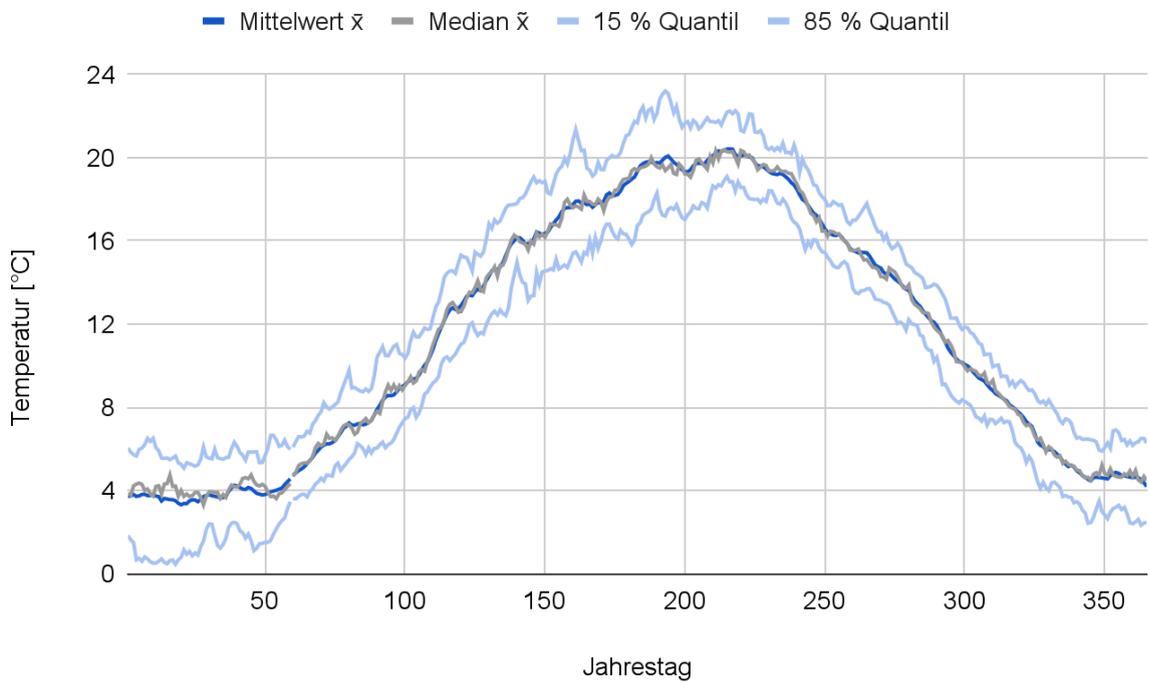
Anlage 7: Jahresganglinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (1994 bis 2021) der Fulda (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



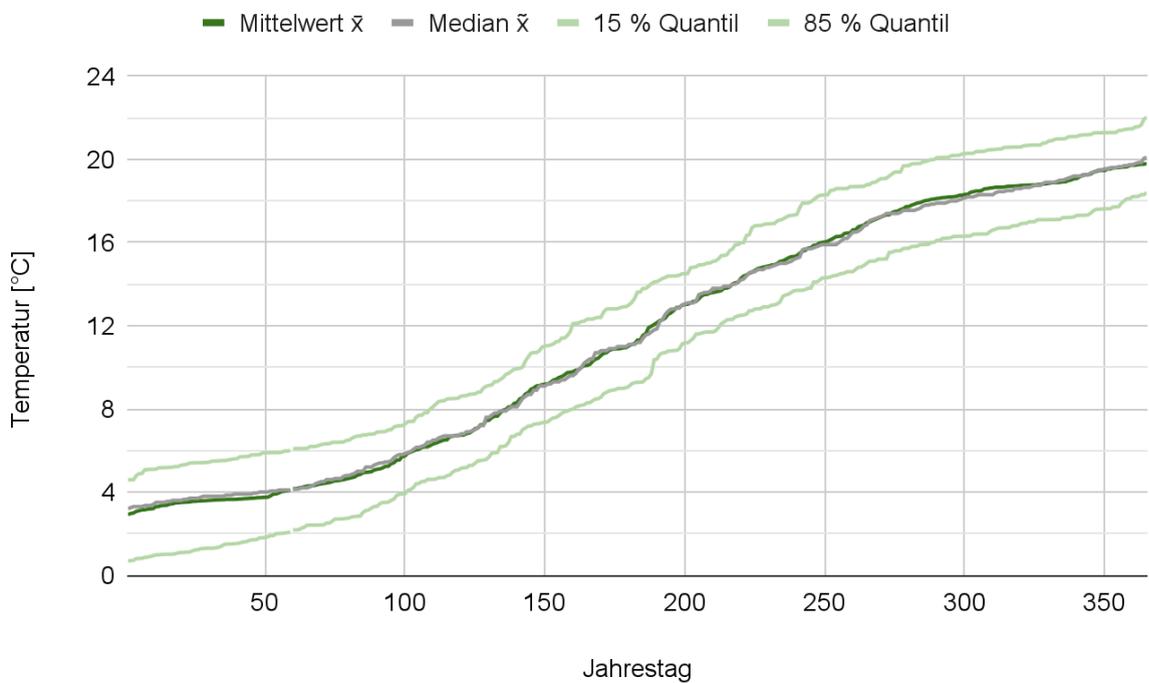
Anlage 8: Jahresganglinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (2003 bis 2021) der Werra (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



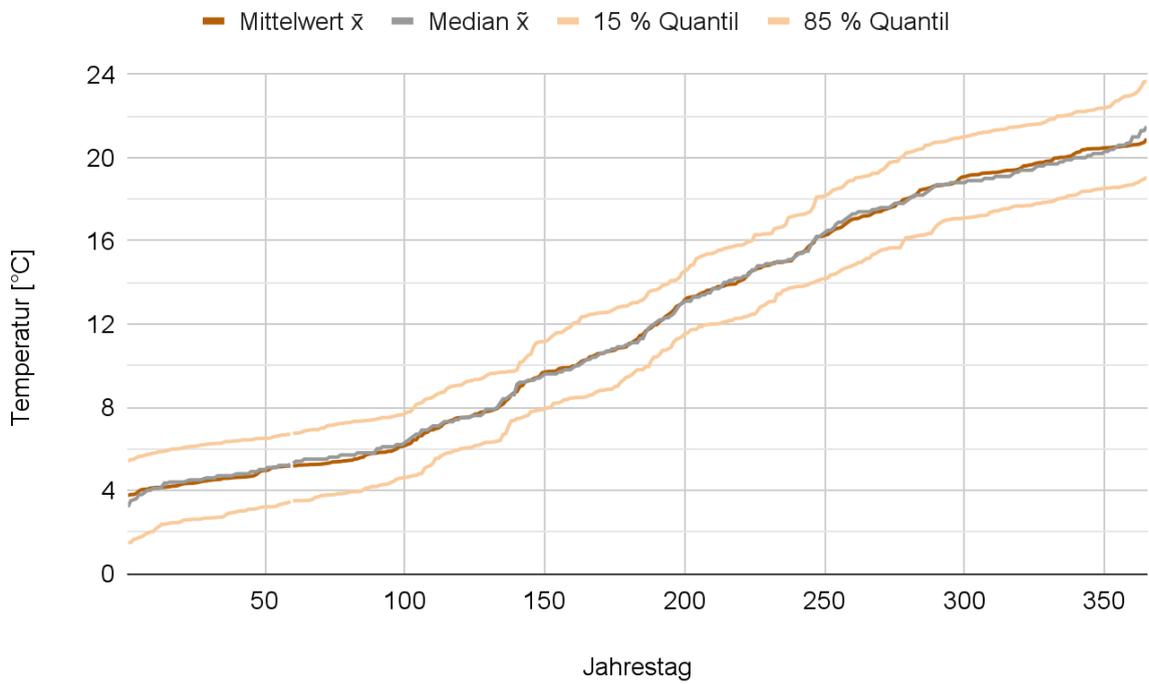
Anlage 9: Jahresganglinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (1982 bis 2015) der Weser (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



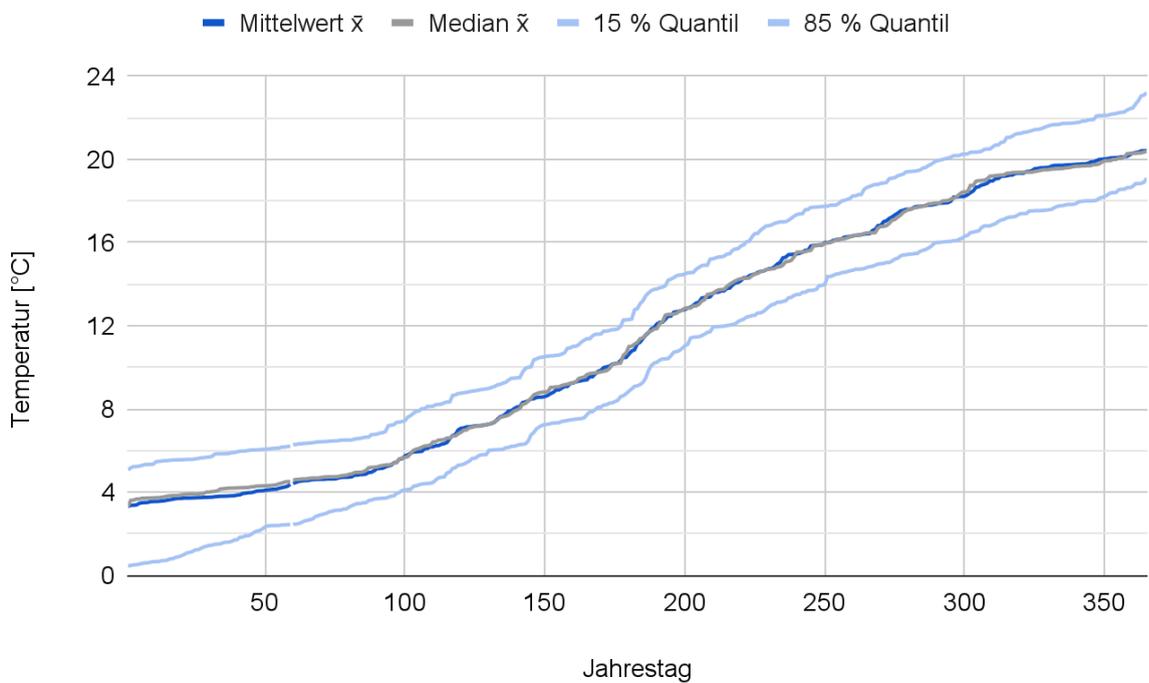
Anlage 10: Jahresdauerlinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (1994 bis 2021) der Fulda (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



Anlage 11: Jahresdauerlinie der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (2003 bis 2021) der Werra (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



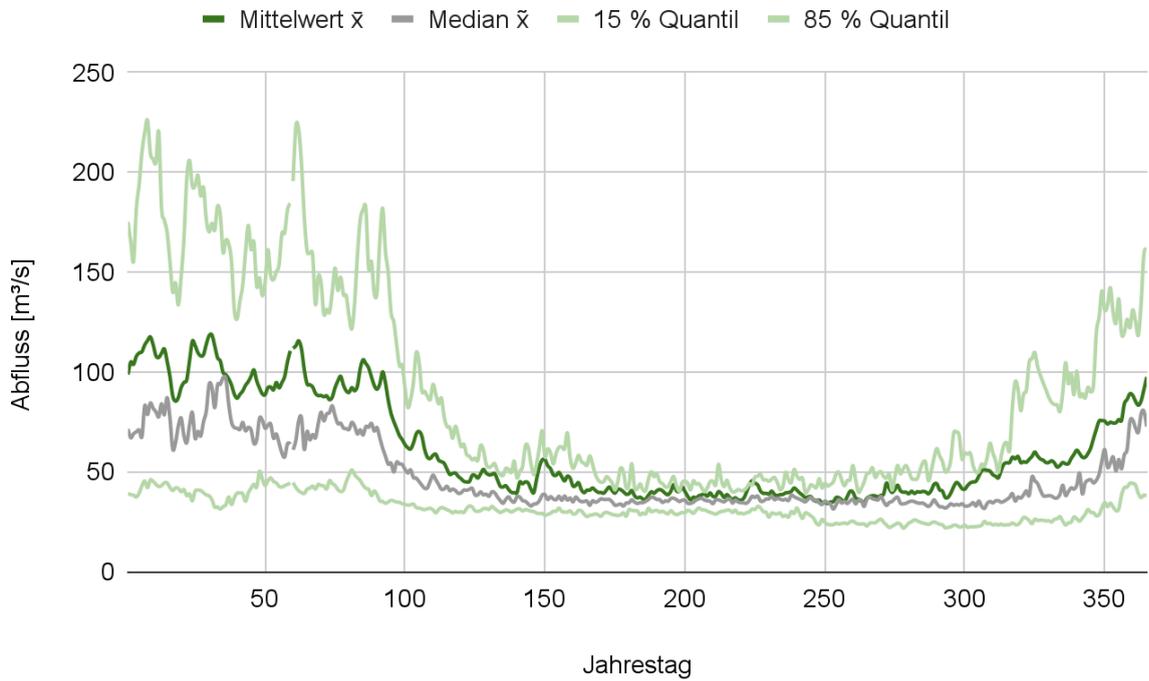
Anlage 12: Jahresdauerlinien der Wassertemperatur eines charakteristischen Jahres (1982 bis 2015) der Weser (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



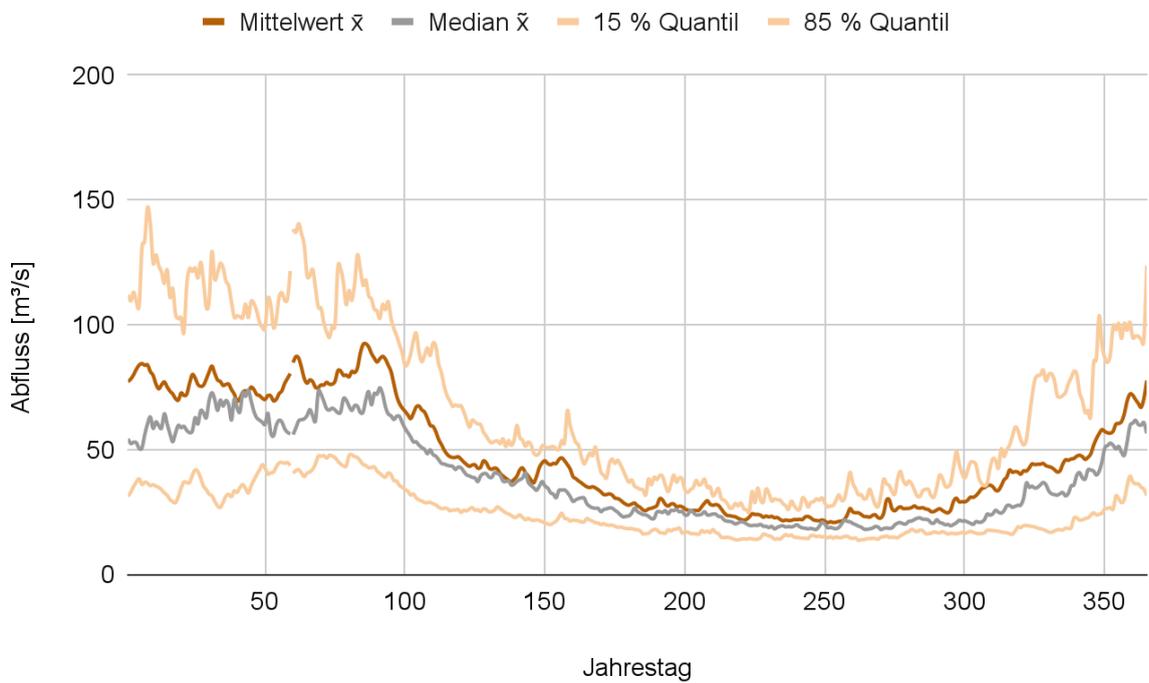
Anlage 13: Jährlich aufsummierte Unterschreitungstage für Temperaturen kleiner +1 bis +5 °C (Legende auf S.30) (eigene Darstellung)

Jahr	Unterschreitungshäufigkeiten [d]														
	Wahnhausen, Fulda					Witzenhausen, Werra					Hemeln, Weser				
	t<1°C	t<2°C	t<3°C	t<4°C	t<5°C	t<1°C	t<2°C	t<3°C	t<4°C	t<5°C	t<1°C	t<2°C	t<3°C	t<4°C	t<5°C
1982											9	12	21	31	72
1983											2	9	26	42	69
1984											0	2	14	38	70
1985											24	34	56	68	83
1986											16	27	47	66	81
1987											15	25	49	79	96
1988											0	0	0	3	44
1989											0	4	7	27	44
1990											0	0	4	26	46
1991											14	26	40	54	73
1992											4	9	17	25	39
1993											13	27	39	57	95
1994	9	11	13	30	67						2	9	11	16	28
1995	0	9	46	60	81						0	3	6	8	17
1996	46	61	75	85	103						39	48	65	85	102
1997	29	42	48	62	79						26	31	44	52	66
1998	11	21	31	48	75						7	13	22	40	59
1999	0	5	17	55	83										
2000	3	5	7	25	63						0	10	17	26	58
2001	0	3	23	52	69						4	10	29	54	71
2002	14	26	31	39	52						11	23	28	37	46
2003	1	14	34	60	80	0	4	16	38	54	0	8	21	44	58
2004	2	18	41	71	99	0	5	15	42	72					
2005	3	21	42	79	107	0	0	12	41	79					
2006	24	48	74	84	92	12	17	33	71	83					
2007	0	3	12	24	40	0	0	2	14	23					
2008	2	3	16	59	90	1	2	3	11	38					
2009	36	58	68	76	100	8	12	22	41	55	23	30	38	40	43
2010	36	65	84	104	110	0	24	54	79	102	0	1	4	12	16
2011	5	17	24	61	105	0	0	6	18	31	0	1	4	7	51
2012	0	1	10	23	38	14	20	28	34	52					
2013	1	10	23	50	86	0	3	11	30	56	6	10	27	51	96
2014	0	0	0	8	19	0	0	0	80	22	0	0	5	14	36
2015	0	0	1	9	43	0	0	0	3	26	0	0	3	21	49
2016	0	0	8	16	38	0	4	10	15	35					
2017	0	20	37	49	52	10	17	32	43	48					
2018	1	9	15	39	49	3	6	8	18	51					
2019	3	5	9	21	41	1	6	6	17	33					
2020	0	0	1	10	31	0	0	1	7	31					
2021	8	10	17	39	64	7	9	16	35	63					
Ø	8	17	29	48	70	3	7	14	34	50	8	14	24	38	60

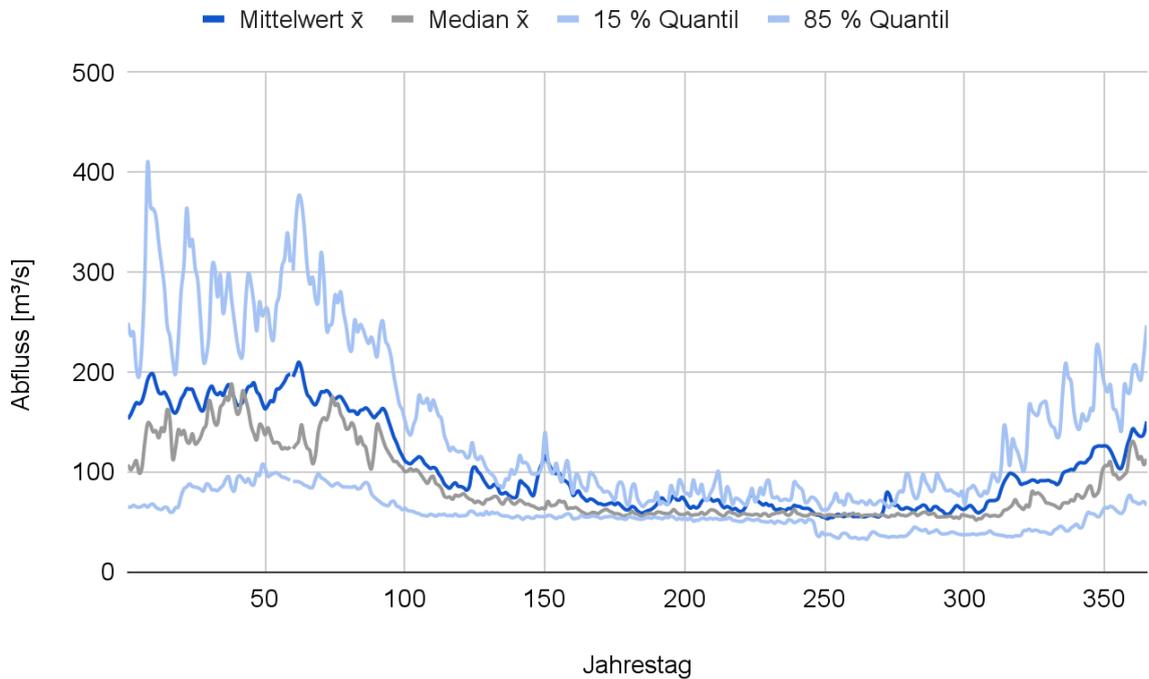
Anlage 14: Abflussganglinie eines charakteristischen Jahres (1985 bis 2021) der Fulda (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



Anlage 15: Abflussganglinie eines charakteristischen Jahres (1985 bis 2021) der Werra (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



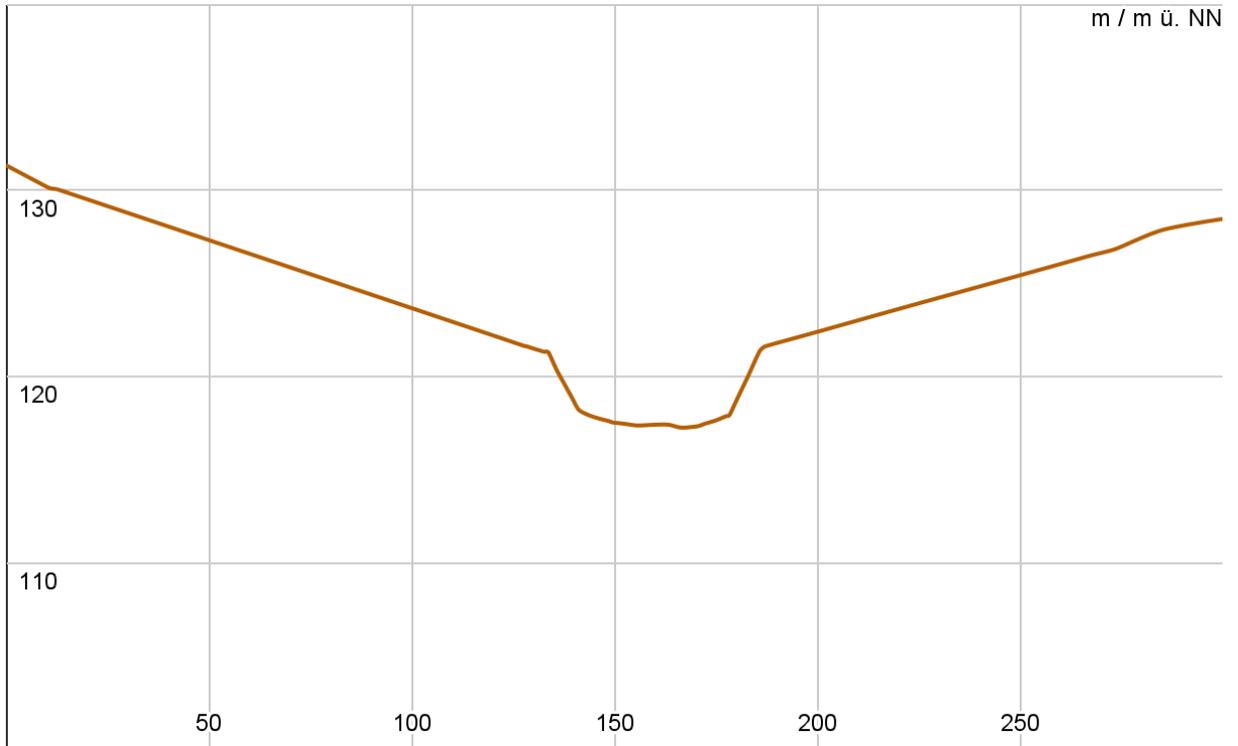
Anlage 16: Abflussganglinie eines charakteristischen Jahres (1999 bis 2021) der Weser (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



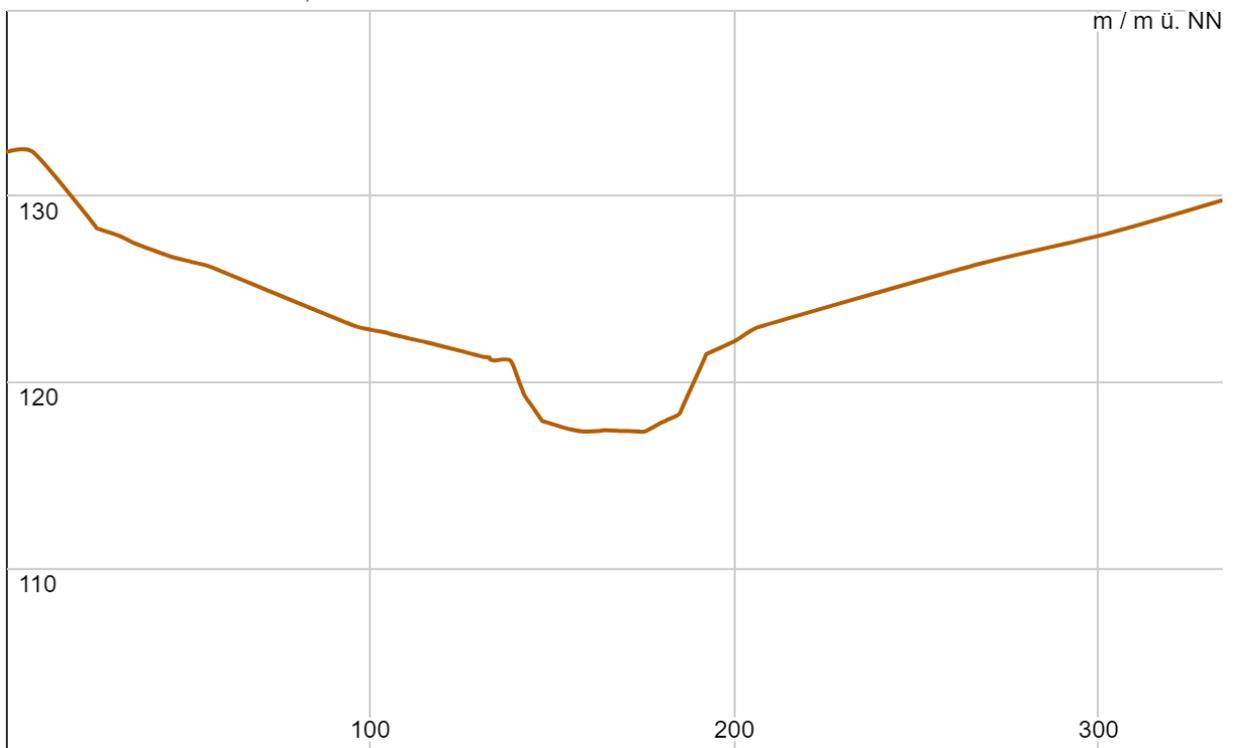
Anlage 17: Angaben der WSA Weser zu Wasserständen bei bestimmten Abflüssen: MNQ = mittlerer Niedrigwasserabfluss; MQ = mittlerer Abfluss; MHQ = mittlerer Hochwasserabfluss (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der WSA Weser 2022)

Pegel und Fließgewässer		MNQ	MQ	MHQ
Bonaforth Fulda	Abfluss [m ³ /s]	18,70	66,82	379,09
	Wasserstand [m ü. NN]	119,82	120,41	122,80
Letzter Heller Werra	Abfluss [m ³ /s]	15,80	51,62	264,05
	Wasserstand [m ü. NN]	118,82	119,64	121,62
Hann. Münden Weser	Abfluss [m ³ /s]	40,00	112,00	552,00
	Wasserstand [m ü. NN]	115,92	116,87	119,84

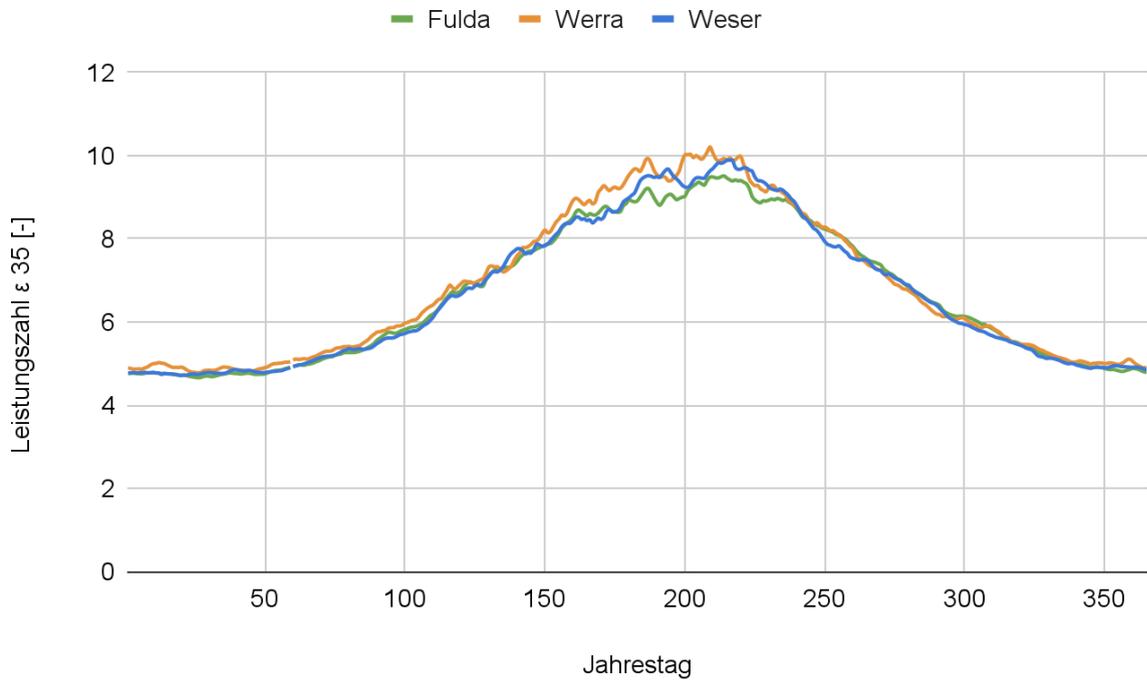
Anlage 18: Querprofil der Werra (in Fließrichtung) vor Pegelmesssstelle (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der WSA Weser 2022)



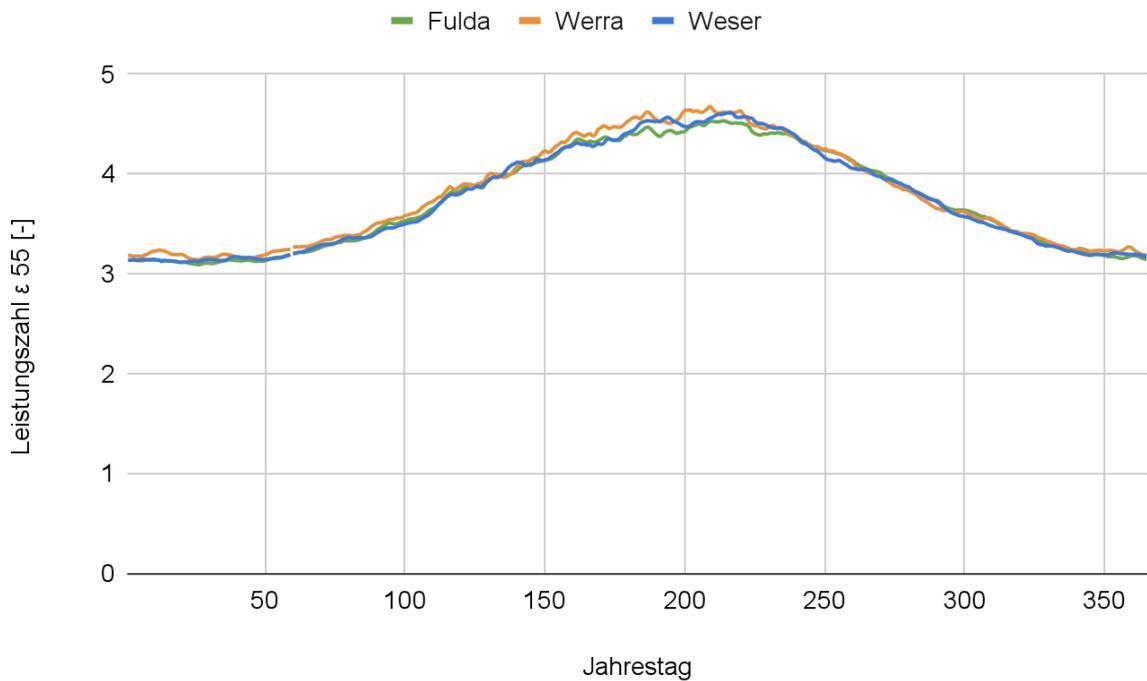
Anlage 19: Querprofil der Werra (in Fließrichtung) nach Pegelmesssstelle (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der WSA Weser 2022)



Anlage 20: Leistungszahl ϵ_{35} für das Heizungssystem im Verlauf eines charakteristischen Jahres (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



Anlage 21: Leistungszahl ϵ_{55} für die Warmwasserbereitstellung im Verlauf eines charakteristischen Jahres (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



Anlage 22: Häufigkeitstabelle für das Vorkommen der Leistungszahl ϵ_{35} während einer charakteristischen Heizperiode (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

		Vorkommen während der charakteristischen Heizperiode					
		Fulda		Werra		Weser	
ϵ_{35} [-]	Klassenbreite	H _{absolut} [-]	H _{relativ} [%]	H _{absolut} [-]	H _{relativ} [%]	H _{absolut} [-]	H _{relativ} [%]
3	2,5 bis 3,4	0	0	0	0	0	0
4	3,5 bis 4,4	0	0	0	0	0	0
5	4,5 bis 5,4	131	62	119	56	133	62
6	5,5 bis 6,4	57	27	70	33	57	27
7	6,5 bis 7,4	25	12	24	11	23	11
8	7,5 bis 8,4	0	0	0	0	0	0
9	8,5 bis 9,4	0	0	0	0	0	0

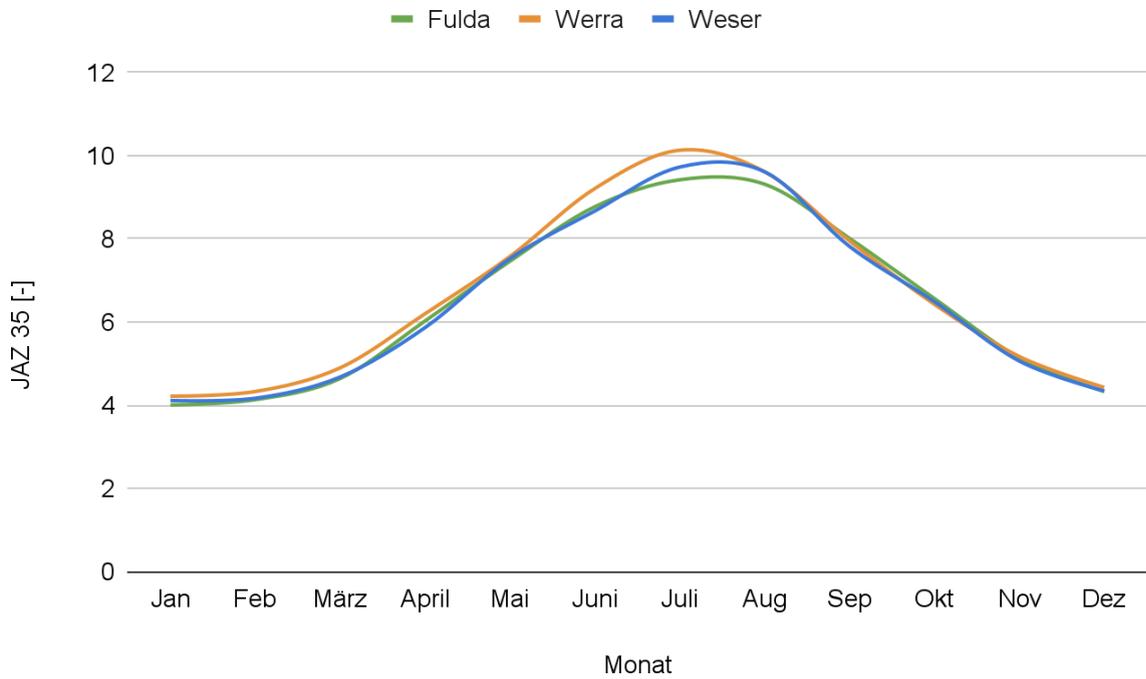
Anlage 23: Häufigkeitstabelle für das Vorkommen der Leistungszahl ϵ_{55} während einer charakteristischen Heizperiode (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der HLNUG 2022 und NLWKN 2022)

		Vorkommen im charakteristischen Jahr					
		Fulda		Werra		Weser	
ϵ_{55} [-]	Klassenbreite	H _{absolut} [-]	H _{relativ} [%]	H _{absolut} [-]	H _{relativ} [%]	H _{absolut} [-]	H _{relativ} [%]
1	0,5 bis 1,4	0	0	0	0	0	0
2	1,5 bis 2,4	0	0	0	0	0	0
3	2,5 bis 3,4	134	37	127	35	136	37
4	3,5 bis 4,4	183	50	166	45	170	46
5	4,5 bis 5,4	49	13	73	20	60	16
6	5,5 bis 6,4	0	0	0	0	0	0
7	6,5 bis 7,4	0	0	0	0	0	0

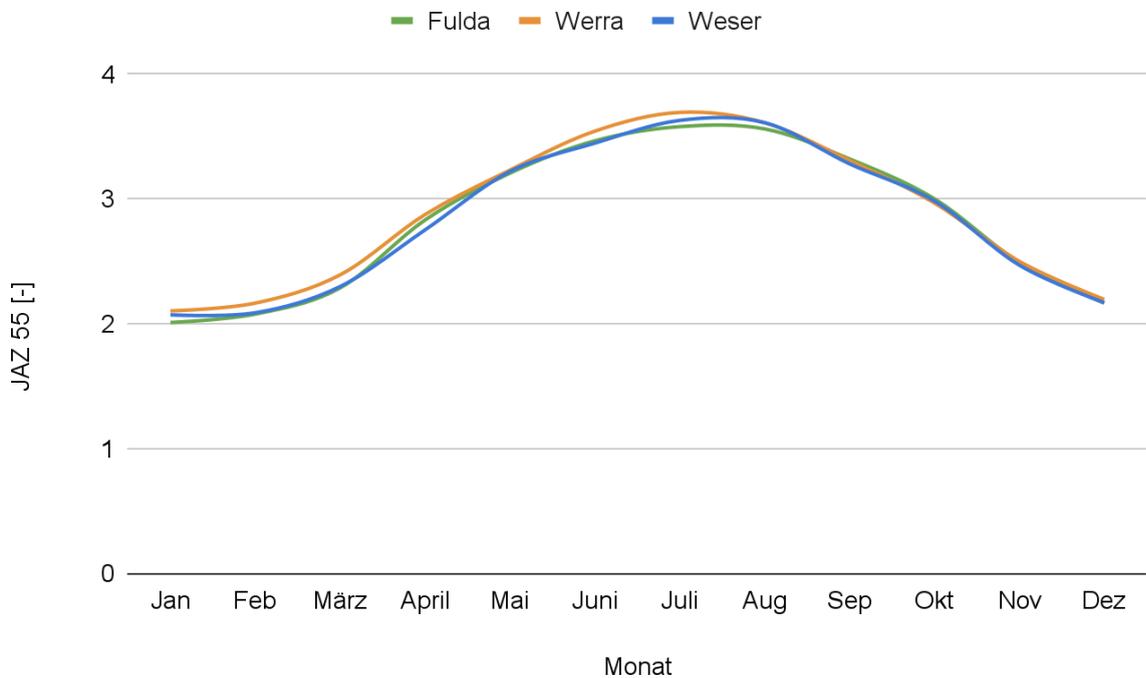
Anlage 24: Korrekturfaktor F_9 für Wasser-Wasser-Wärmepumpen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen nach VDI 4650 (interpolierte Werte mit (*) markiert) (Hartmann und Schwarzburger 2009, S. 75)

$t_{W, \text{ein}} [^{\circ}\text{C}]$	Maximale Vorlauftemperatur $t_{\text{Vorl, max}} [^{\circ}\text{C}]$					
	30	35	40	45	50	55
12	1,158	1,106	1,054	1,000	0,947	0,892
11	1,139	1,087	1,035	0,981	0,927	0,873
10	1,120	1,068	1,016	0,962	0,908	0,853
9	1,101	1,049	0,997	0,943	0,889	0,834
8	1,082	1,030	0,978	0,924	0,870	0,815
7		1,011*				0,796*
6		0,992*				0,777*
5		0,973*				0,758*
4		0,954*				0,739*
3		0,935*				0,720*

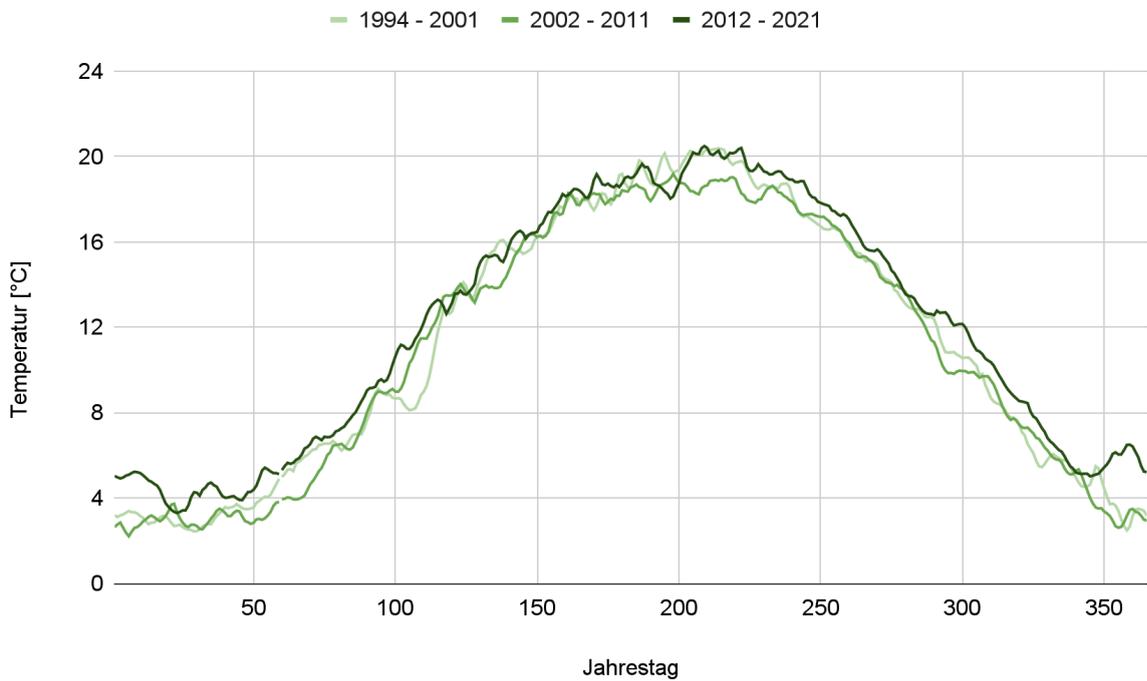
Anlage 25: Gemittelte JAZ β_{35} für das Heizungssystem im Verlauf der charakteristischen Monatsmittel (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



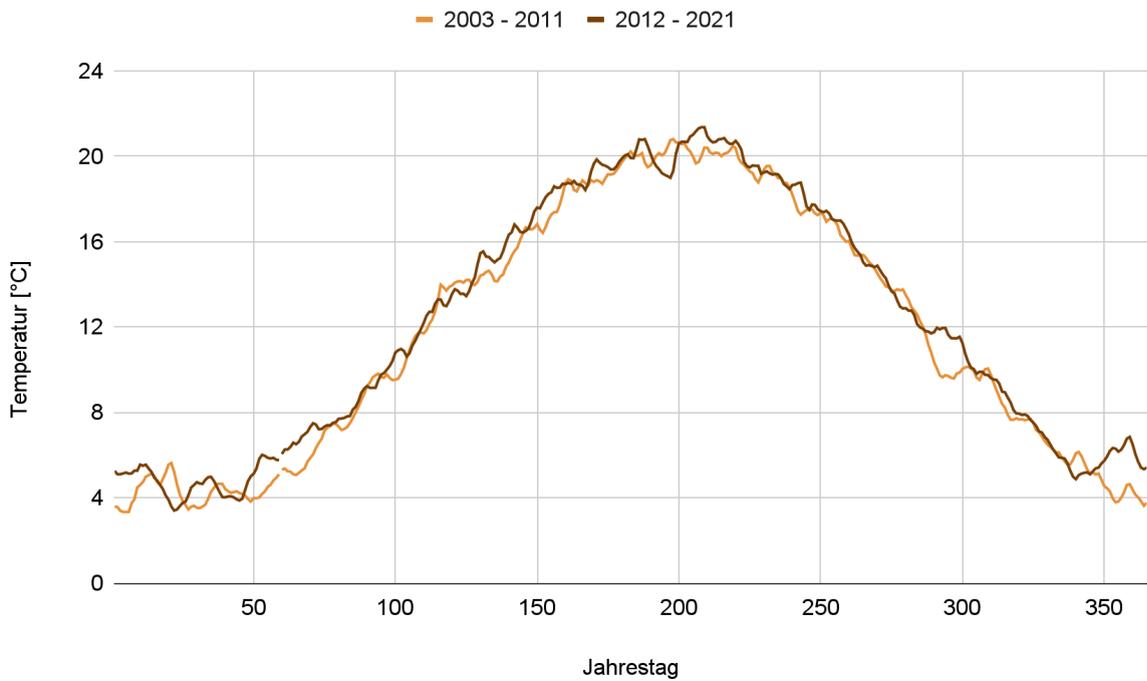
Anlage 26: Gemittelte JAZ β_{55} für die Warmwasserbereitstellung im Verlauf der charakteristischen Monatsmittel (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



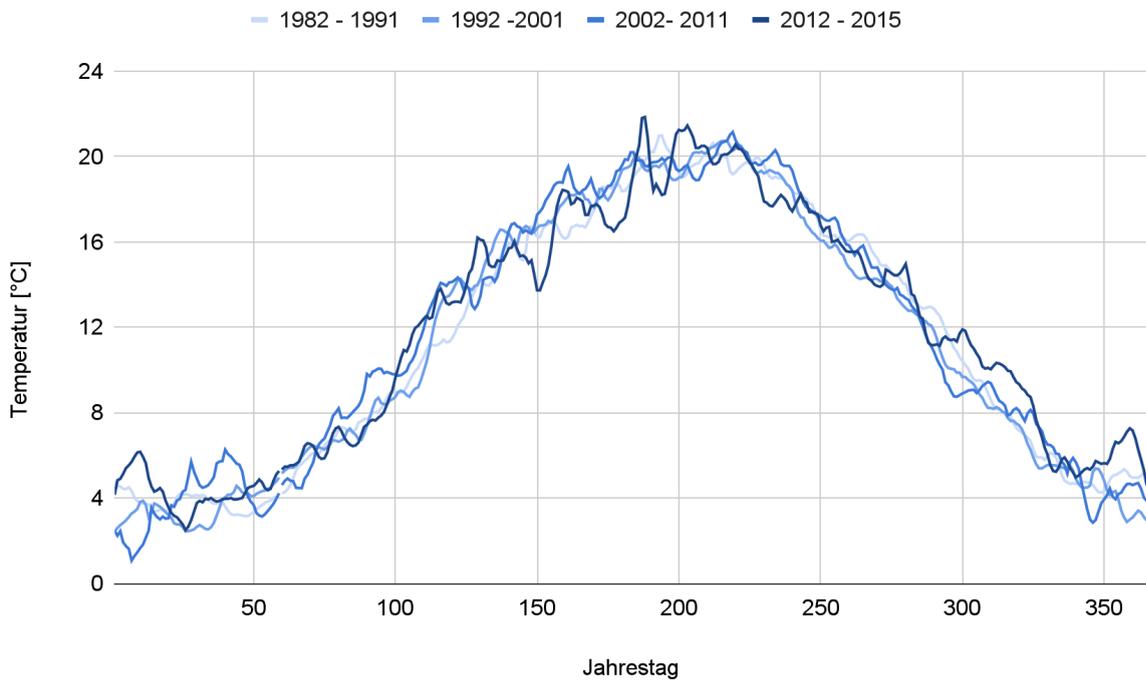
Anlage 27: Gruppierung der Jahresganglinie der Wassertemperaturen an der Fulda (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



Anlage 28: Gruppierung der Jahresganglinie der Wassertemperaturen an der Werra (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



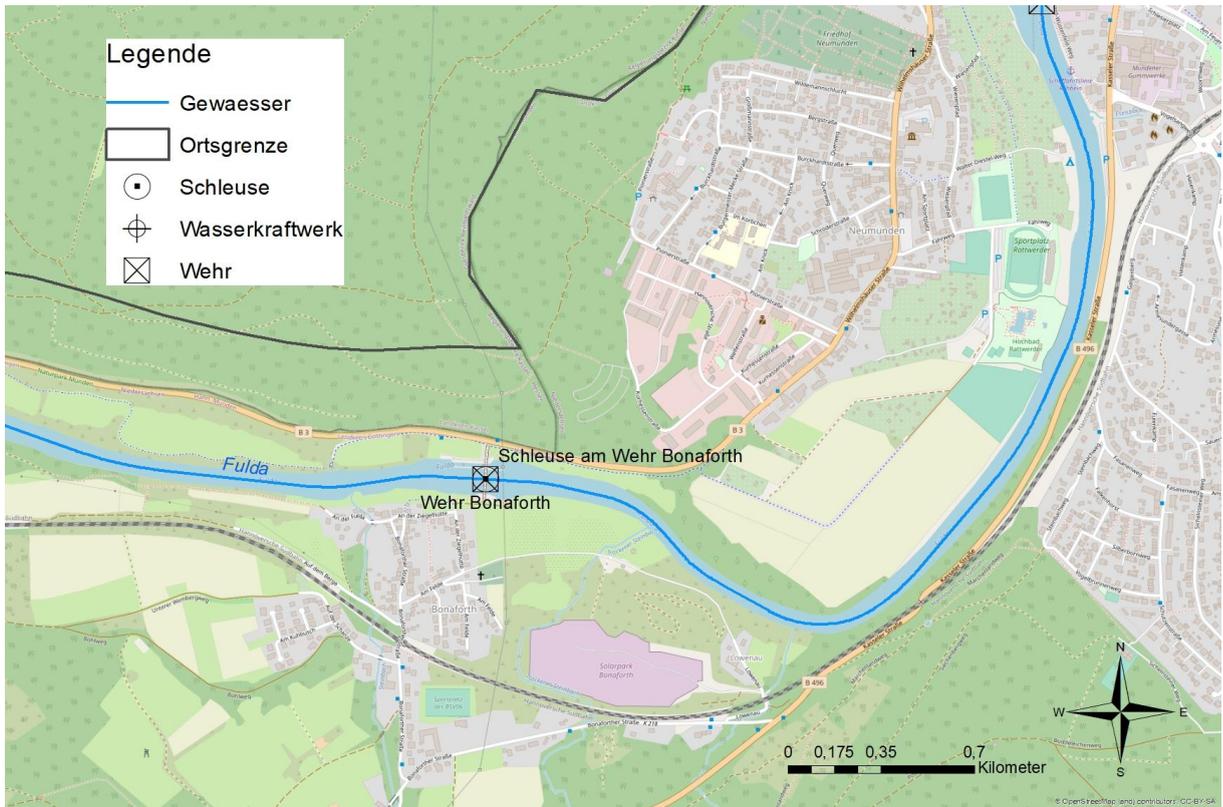
Anlage 29: Gruppierung der Jahresganglinie der Wassertemperaturen an der Weser (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der FGG Weser 2022, HLNUG 2022 und NLWKN 2022)



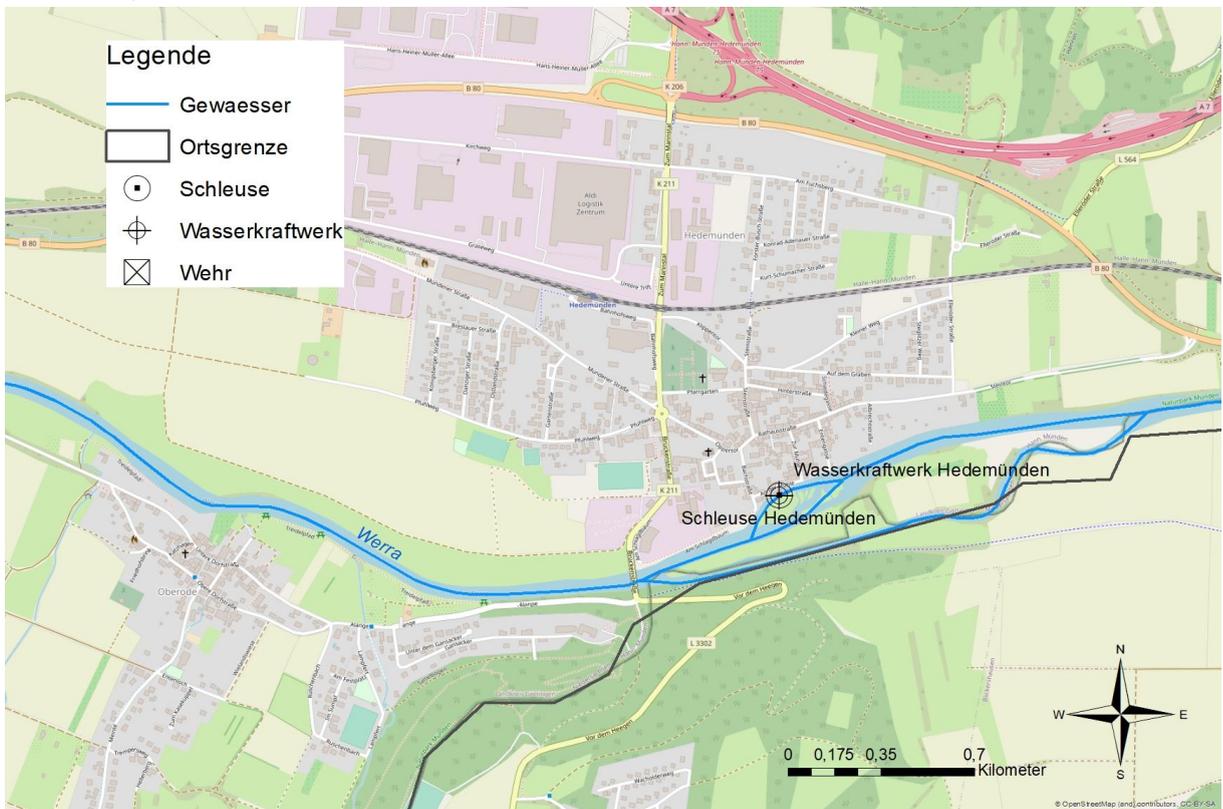
Anlage 30: Liste wasserwirtschaftlicher Nutzungsanlagen in Hann. Münden (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der WSA Weser o.J.)

Sichtbar in	Objektname	Gewässer	Bauwerkstyp
Abbildung 6.1	Fuldaschleuse	Fulda	Schleuse
	Oberes Fuldawehr		Wehr
	Unteres Fuldawehr		Wehr
	Schleuse am Nadelwehr	Werra	Schleuse
	Nadelwehr		Wehr
	Oberes Mühlenwehr		Wehr
	Unteres Mühlenwehr		Wehr
	Wasserkraftwerk Blume		Wasserkraftwerk
Anlage 31	Schleuse am Wehr Bonaforth	Fulda	Schleuse
	Wehr Bonaforth		Wehr
Anlage 32	Schleuse Hedemünden	Werra	Schleuse
	Wasserkraftwerk Hedemünden		Wasserkraftwerk

Anlage 31: Potenzieller Standort an wasserwirtschaftlichen Nutzungsanlagen an der Fulda (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021, BKG 2021 und WSA Weser o.J.)



Anlage 32: Potenzieller Standort an wasserwirtschaftlichen Nutzungsanlagen an der Werra (eigene Darstellung auf Grundlage von Daten der BfG 2021, BKG 2021 und WSA Weser o.J.)



Abschlussarbeit von

Frau Specht

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

Hiermit versichere ich, Kristina Specht, die vorliegende Abschlussarbeit 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.

Frankfurt, den 29.06.2022

Unterschrift