

Masterarbeit

# Wärme aus erneuerbaren Energien

Modellierung des Potenzials verschiedener Quellen  
aus Geodaten am Beispiel von Fließgewässern

von

Sheila Tholen

Geoinformatik M.Sc.

## *Erstgutachter*

Prof. Dr. Alexander Brenning  
INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE  
Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

## *Externer Zweitgutachter*

Philip Groesdonk  
INSTITUT FÜR SOLARFORSCHUNG  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren

2. Oktober 2024

# Kurzfassung

Energiebedingte Emissionen entstehen nicht nur bei Umwandlung von Energieträgern in elektrische Energie, sondern auch bei der Umwandlung in thermische Energie. Um diese Emissionen zu reduzieren und eine klimaneutrale Versorgung zu erreichen, müssen verstärkt erneuerbare Energieträger eingesetzt werden. Hierfür gibt es vielfältige Möglichkeiten, die jedoch von den lokalen Bedingungen abhängig sind – denn Wärme lässt sich nur über begrenzte Distanzen effizient transportieren. Daher muss der Wärmebedarf lokal durch die verfügbaren Quellen gedeckt werden.

Potenzialanalysen nehmen eine Schlüsselrolle bei der Planung von klimaneutralen Wärmeversorgungssystemen ein. Sie ermöglichen die Energiemenge sowohl quantitativ als auch räumlich zu erfassen. Um den Einsatz erneuerbarer Energien effizienter zu gestalten und fossile Energieträger schneller zu verdrängen, sollte die Potenzialanalyse möglichst wenig Ressourcen, insbesondere in Form von Zeit, fordern. In der vorliegenden Masterarbeit werden zunächst bereits existierende Lösungsansätze für die verschiedenen Wärmequellen untersucht. Derzeit existieren überwiegend spezifische (auf ein Gebiet angepasste) Lösungen mit einer niedrigen zeitlichen und räumlichen Auflösung.

Kern der Arbeit ist die Entwicklung eines generischen (allgemein anwendbaren) Modells, welches das Potenzial von Fließgewässern automatisiert und unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten erfasst. Es wird untersucht welche räumlichen Daten und welche geoinformatischen Methoden eingesetzt werden können. Die Software wurde anhand von Daten aus dem Land Nordrhein-Westfalen (Deutschland) in Python entwickelt. Durch den modularen Aufbau des Modells und die Möglichkeit zur Berücksichtigung individueller Nutzereingaben ist das Modell auch auf andere Regionen anwendbar. Der implementierte Prozess segmentiert die Geometrien der Fließgewässer, um die verschiedenen Bedingungen und Grenzwerte bei der Berechnung des Potenzials abzubilden. So konnte das Potenzial mit einer räumlichen Auflösung von Fließgewässersegmenten und einer täglichen zeitlichen Auflösung berechnet werden. Durch die differenzierte Berechnung der Potenziale kann gezeigt werden, dass das theoretische Potenzial deutlich über dem technischen Potenzial liegt und daher die Definition des Potenzialbegriffs von essentieller Bedeutung ist. Weiter wird auch mithilfe einer Sensitivitätsanalyse gezeigt, dass angesichts ausreichend hoher Wassertemperaturen in Nordrhein-Westfalen der Durchfluss einen größeren Einfluss auf das Potenzial hat als die Wassertemperatur. Die Ergebnisse des Modells können bei der Wärmeplanung sowie dem lokalen Wärmenetzausbau genutzt werden. Darüber hinaus lassen sich genauere Messdaten integrieren, um präzisere Daten für die Feinplanung zu generieren.

# Abstract

Energy-related emissions arise when energy sources are transformed not only into electrical energy, but also into thermal energy. In order to reduce these emissions and achieve a climate-neutral supply, more renewable energy sources must be used. There are many ways to do this, but they depend on local conditions because heat can only be transported efficiently over limited distances. The demand for heat must therefore be covered by the locally available sources.

Analyses of potential take on a key role in the planning of climate-neutral heat supply systems. They make it possible to determine the amount of available energy both quantitatively and spatially. In order to make use of renewable energies more efficient and replace fossil fuels more quickly, these analyses should require as few resources as possible, especially in terms of time. In this master's thesis, existing solutions covering the various heat sources are first analysed. Currently, there are mainly specific solutions (customised to a specific area) with low temporal and spatial resolution.

The core of the work is the development of a generic (generally applicable) model that automatically determines the heat supply potential of rivers, taking local conditions into account. The spatial data and geoinformatic methods available for the task are analysed. The software was developed in Python using data from the state of North Rhine-Westphalia (Germany). Due to the modular structure of the model and the possibility of taking individual user input into account, the model can also be applied to other regions. The implemented workflow segments the geometries of the rivers in order to map the varying conditions and limit values when calculating the potential. As a result, the potential can be calculated with a spatial resolution of river segments and a daily temporal resolution. The differentiated calculation of the potentials shows that the theoretical potential is significantly higher than the technical potential and that the definition of the term potential is therefore of essential importance. A sensitivity analysis is also used to show that, given sufficiently high water temperatures in North Rhine-Westphalia, the flow rate has a greater influence on the potential than the water temperature. The results of the model can be used for heat planning and local heat network planning. In addition, more accurate measurement data can be integrated to generate more precise data for detailed planning.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	4
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen und Forschungsstand</b>	<b>5</b>
2.1 Wärmeversorgung . . . . .	5
2.2 Erneuerbare Wärmequellen . . . . .	8
2.2.1 Solarthermie . . . . .	10
2.2.2 Geothermie . . . . .	11
2.2.3 Umweltwärme . . . . .	14
2.2.4 Biomasse . . . . .	17
2.2.5 Abwärme . . . . .	19
2.3 Erneuerbare Wärmequellen in Deutschland . . . . .	20
2.4 Thermische Nutzung von Fließgewässern . . . . .	21
2.4.1 Technologische Anforderungen . . . . .	22
2.4.2 Physikalische Eigenschaften von Fließgewässern . . . . .	23
2.4.3 Ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung . . . . .	24
2.4.4 Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .	25
2.4.5 Das Potenzial von Fließgewässern . . . . .	29
2.5 Potenzialanalysen erneuerbarer Wärmequellen . . . . .	30
2.5.1 Definition von Potenzialen . . . . .	30
2.5.2 Räumliche Potenzialanalysen . . . . .	31
2.5.3 Automatisierte Modellierungstechniken . . . . .	39
<b>3 Methodik</b>	<b>41</b>
3.1 Konzept und Programmablauf . . . . .	41
3.2 Verwendete Daten und Datenqualität . . . . .	43
3.2.1 Die Datensätze . . . . .	45



3.2.2	Qualitätsanalyse . . . . .	47
3.3	Datenaufbereitung . . . . .	53
3.3.1	Gewässernetz . . . . .	53
3.3.2	Messdaten Temperatur . . . . .	55
3.3.3	Messdaten Durchfluss . . . . .	57
3.3.4	Daten aus weiteren Quellen . . . . .	58
3.3.5	Schutzgebiete . . . . .	59
3.4	Fließgewässersegmentierung . . . . .	59
3.5	Potenzialberechnung . . . . .	62
3.5.1	Potenzialdefinition . . . . .	63
3.5.2	Temperaturgrenzwerte . . . . .	64
3.5.3	Maximal nutzbarer Durchfluss . . . . .	65
3.5.4	Das theoretische Potenzial . . . . .	67
3.5.5	Das technische Potenzial . . . . .	68
3.6	Sensitivitätsanalyse . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>73</b>
4.1	Fließgewässersegmente . . . . .	73
4.2	Potenzial . . . . .	78
4.2.1	Theoretisches Potenzial . . . . .	80
4.2.2	Technisches Potenzial . . . . .	84
4.3	Modellsensitivität . . . . .	87
4.3.1	Konvergenz . . . . .	87
4.3.2	Sensitivität der Eingangsvariablen . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>91</b>
5.1	Modellierung des Potenzials . . . . .	91
5.2	Theoretisches und technisches Potenzial . . . . .	93
5.3	Limitationen der Methodik . . . . .	97
5.4	Vergleich mit anderen Forschungsstudien . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>103</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	103
6.2	Ausblick . . . . .	105
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>115</b>
A.1	Nutzungsbedingungen der Daten . . . . .	115
A.2	Datenqualität . . . . .	115
A.3	Übersicht Datensätze . . . . .	118
A.4	Konvergenz Sensitivitätsanalyse . . . . .	120

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Funktionsprinzip einer Kompressionswärmepumpe . . . . .	6
2.2	Erneuerbare Energiequellen und ihre möglichen Anwendungspfade . . . . .	9
2.3	Übersicht über geothermische Technologien . . . . .	12
2.4	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energien . . . . .	21
2.5	Übersicht über die Potenzialtypen. . . . .	30
3.1	Übersicht über die Methodik. . . . .	42
3.2	Übersicht über die Programmstruktur inklusive Modulen, Funktionen, Ein- und Ausgangspfaden. . . . .	44
3.3	Lage des Untersuchungsgebiets Nordrhein-Westfalen. . . . .	46
3.4	Diskontinuität in der Liniengeometrie der Fließgewässer . . . . .	55
3.5	Datenaufbereitungsschritte Temperaturdatensatz. . . . .	56
3.6	Häufigkeitsverteilung der Temperaturmesswerte aller Stationen in Nordrhein-Westfalen. . . . .	57
3.7	Datenaufbereitungsschritte Durchflussdatensatz. . . . .	58
3.8	Schematische Darstellung der Fließgewässersegmentierung. Blau: Fließgewässerlinie; farbige Linien stehen für verschiedene Fischgemeinschaften. . . . .	60
3.9	Schematische Darstellung der Durchfluss- und Temperaturwerte. . . . .	64
3.10	Bestimmung des maximalen Durchflusses (theoretisch). . . . .	67
3.11	Durchflussbegrenzung: 4000 h jährlicher Betrieb bei voller Leistung. . . . .	70
4.1	Fließgewässersegmente und Positionen der Messstationen in Nordrhein-Westfalen. . . . .	74
4.2	Boxplot der Längen der betrachteten Fließgewässersegmente. . . . .	75
4.3	Fließgewässersegmente der Werre. . . . .	76
4.4	Boxplots des jährlichen theoretischen und technischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente. . . . .	78
4.5	Boxplots des theoretischen und technischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente für die Heizperiode. . . . .	79
4.6	Fließgewässertemperatur, Durchfluss, theoretisches und technisches Potenzial im Jahresverlauf . . . . .	80
4.7	Boxplots des monatlichen theoretischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente. . . . .	81
4.8	Räumliche Verteilung des theoretischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente. . . . .	82

4.9	Tägliche Werte des theoretischen Potentials eines Erftsegments im Jahresverlauf. . . . .	83
4.10	Tägliche Werte des theoretischen Potentials eines Rheinsegments im Jahresverlauf. . . . .	83
4.11	Boxplots des monatlichen technischen Potentials der betrachteten Fließgewässersegmente. . . . .	84
4.12	Räumliche Verteilung des theoretischen Potentials der betrachteten Fließgewässersegmente. . . . .	85
4.13	Tägliche Werte des technischen Potentials eines Erftsegments im Jahresverlauf.	86
4.14	Tägliche Werte des technischen Potentials eines Rheinsegments im Jahresverlauf. . . . .	86
4.15	Konvergenz der Schätzwerte der Gesamtsensitivität für das theoretische Potenzial. . . . .	88
4.16	Konvergenz der Schätzwerte der Gesamtsensitivität für das technische Potenzial. . . . .	89
4.17	Gestapelte Balkendiagramme der endgültigen Schätzwerte der Sensitivitätsanalyse. . . . .	90
5.1	Täglicher Durchfluss an der Pegelstation Bliesheim (Stationsnummer 2743000000100) über die betrachteten Jahre. . . . .	95
A.1	Datenqualitätsbericht: Vollständigkeit der Durchflussmessreihen. . . . .	116
A.2	Datenqualitätsbericht: Vollständigkeit der Temperaturmessreihen. . . . .	117
A.3	Konvergenz der Schätzwerte der Sensitivität 1. Ordnung für das theoretische Potenzial. . . . .	121
A.4	Konvergenz der Schätzwerte der Sensitivität 1. Ordnung für das technische Potenzial. . . . .	122

# Tabellenverzeichnis

2.1	Anhaltswerte für den Gütegrad verschiedener Wärmepumpen . . . . .	8
2.2	Temperaturgrenzwerte nach der Oberflächengewässerverordnung . . . . .	27
2.3	Temperaturgrenzwerte nach der Gewässerschutzverordnung (Schweiz) . . .	28
2.4	Literaturvergleich Solarthermie. . . . .	32
2.5	Literaturvergleich Geothermie. . . . .	33
2.6	Literaturvergleich Umweltwärme – Gewässer. . . . .	34
2.7	Literaturvergleich Biomasse. . . . .	37
2.8	Literaturvergleich Abwärme. . . . .	38
3.1	Datenqualität. . . . .	52
3.2	Temperaturspreizung $\Delta T$ zwischen unbenutzten und benutzten Wasser. . .	65
3.3	Temperaturveränderung des Gesamtgewässers bei verschiedenen Tempera- turspreizungen und theoretischen Entnahmeraten . . . . .	66
3.4	Standardwerte für die Potenzialberechnung. . . . .	68
4.1	Attributauswahl der Fließgewässersegmente. . . . .	75
4.2	Attributauswahl der Fließgewässersegmente der Werre. . . . .	77
4.3	Endgültige Schätzwerte der Sensitivitätsanalyse in Bezug auf das theoreti- sche und technische Potenzial. . . . .	90
5.1	Vergleich pessimistische und optimistische Interpolation. . . . .	99
5.2	Umweltwärme (Fließgewässer). . . . .	100
A.1	Stationen. . . . .	118
A.2	Durchfluss Werte. . . . .	118
A.3	Temperatur Werte. . . . .	118
A.4	Fließgewässersegmente. . . . .	119
A.5	Werte der Fließgewässersegmente. . . . .	119
A.6	Theoretische und technische Potenziale. . . . .	119
A.7	Parameter, die während der Berechnung des theoretischen bzw. technischen Potenzials angewendet wurden. . . . .	120

# Nomenklatur

## Lateinische Buchstaben

$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$c$	Spezifische Wärmekapazität	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$C$	Wärmekapazität	$\text{J K}^{-1}$
$E_{\text{el}}$	Elektrische Energie	$\text{J}$
$E_{\text{pot}}$	Potenzial	$\text{J}$
$E_{\text{Q}}$	Exergie der Wärme	$\text{J}$
$f$	Brennstoff-Feuchte	—
$H_{\text{f}}$	Heizwert	$\text{J kg}^{-1}$
$H_{\text{s}}$	Brennwert	$\text{J kg}^{-1}$
$L$	Bohrlochtiefe	$\text{m}$
$m$	Masse	$\text{kg}$
$m_{\text{B}}$	Trockenmasse	$\text{kg}$
$m_{\text{W}}$	Wassermasse	$\text{kg}$
$P_{\text{el}}$	Leistung	$\text{W}$
$Q$	Durchfluss	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$\text{W}$
$Q_{\text{g}}$	Genutzter Durchfluss	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$Q_{\text{nutz}}$	Nutzwärme	$\text{J}$
$Q_{\text{R}}$	Durchfluss des verbliebenen Wasserpaketes	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$Q_{\text{umg}}$	Umgebungswärme	$\text{J}$
$r_{\text{b}}$	Bohrlochradius	$\text{m}$
$R_{\text{b}}$	Thermischer Widerstand	$\text{K W}^{-1}$
$s$	Spezifische Solarstrahlungsenergie	$\text{W m}^{-2}$
$S$	Sensitivität	—
$T$	Thermodynamische Temperatur	$\text{K}$
$t$	Zeit	$\text{s}$

$V$	Volumen	$\text{m}^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$w$	Wassergehalt	—

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Azimutwinkel	°
$\beta$	Neigungswinkel	°
$\eta$	Wirkungsgrad	—
$\bar{\eta}$	Nutzungsgrad	—
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\nu$	Gütegrad	—
$\phi$	Wasserentnahmerate	—
$\rho$	Dichte	$\text{kg m}^{-3}$

## Tiefgestellte Indizes

a	Jahr
A	Aperturfläche
Anl	Anlage
b	Benutztes Wasser
fluss	Fließende Oberflächengewässer
geg	Gegeben
id	Ideal
Koll	Kollektor
nutz	Nutz
see	Stehende Oberflächengewässer
tat	Tatsächlich
tec	Technisch
theo	Theoretisch
T	Total
u	Unbenutztes Wasser
umg	Umgebung

wp           Wärmepumpe

## Abkürzungen

<b>BNatSchG</b>	Bundesnaturschutzgesetz
<b>COP</b>	Leistungskoeffizient der Wärmepumpe
<b>CSV</b>	Comma-separated values
<b>EEV</b>	Endenergieverbrauch
<b>EU-28</b>	Europäische Union mit 28 Mitgliedstaaten (2013 bis 2020)
<b>FW</b>	Fernwärme
<b>GSchV</b>	Gewässerschutzverordnung
<b>GPKG</b>	GeoPackage
<b>JAZ</b>	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe
<b>KNW</b>	Kalte Nahwärme
<b>KSG</b>	Bundes-Klimaschutzgesetz
<b>LANUV</b>	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
<b>MQ</b>	Mittlerer Abfluss
<b>NRW</b>	Nordrhein-Westfalen
<b>NUTS</b>	Nomenclature of Territorial Units for Statistics
<b>OGewV</b>	Oberflächengewässerordnung
<b>OSM</b>	OpenStreetMap
<b>THG</b>	Treibhausgase
<b>WHG</b>	Wasserhaushaltsgesetz
<b>WPG</b>	Wärmeplanungsgesetz
<b>WRRL</b>	Wasserrahmenrichtlinie
<b>WFS</b>	Web Feature Service

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Fossile Energieträger sind für den Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase (THG) verantwortlich. Diese energiebedingten Emissionen bezeichnen den Ausstoß von THG und Luftschadstoffen bei der Umwandlung von Energieträgern in elektrische und/oder thermische Energie (Drosihn, 2022). 2021 machten diese 84 % der deutschen Treibhausgasemissionen aus (Umweltbundesamt, 2024a). Energiebedingte Emissionen bei der Strom- und Wärmeproduktion entstehen in Industriekraftwerken und Kraftwerken der öffentlichen Versorgung sowie in Haushalten und Gewerbe. Die Emissionen entstehen in der Industrie hauptsächlich prozessbedingt und im Sektor Haushalte und Kleinverbrauch vorrangig durch das Heizen mit fossilen Energieträgern (Drosihn, 2022). Etwa die Hälfte des nationalen Endenergieverbrauch (EEV) entfallen auf den EEV für Wärme und Kälte (Umweltbundesamt, 2024b). Die Wärmeversorgung verursacht einen Großteil des CO<sub>2</sub> Ausstoßes, da etwa 80 % der Wärmeversorgung durch fossile Brennstoffe gedeckt werden (Umweltbundesamt, 2024e). Dies soll durch die Wärmewende geändert werden. Die Wärmewende bezeichnet die Transformation des durch derzeit fossile Energieträger dominierten Wärmesektors zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung (Bdew, 2021). Ziel in Deutschland ist bis 2045 den Wärmesektor zu dekarbonisieren und die Wärmeversorgung klimaneutral zu gestalten. Der Wärmesektor stellt neben Strom und Mobilität einen der Bedarfssektoren dar. Zum einen soll der Wärmebedarf der Gebäude reduziert werden und zum anderen soll der verbleibende Wärmebedarf in Zukunft klimaneutral gedeckt werden (Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, 2023). Zu den erneuerbaren Energiequellen die für eine klimaneutrale Wärmeversorgung eingesetzt werden können zählen nach dem Wärmeplanungsgesetz (WPG) §3 Wärme aus Solarthermie, Geothermie, Umweltwärme, Biomasse, Abwärme, Abwasser, grünem Methan, Wärmepumpen und aus grünem Wasserstoff. Unvermeidbare Abwärme beschreibt Wärme, welche als nicht vermeidbares und nicht nutzbares Nebenprodukt in einer Industrieanlage, einer Stromerzeugungsanlage oder im tertiären Sektor anfällt (Bundesrepublik Deutschland, 2023a).

Durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger können fossile Energieträger verdrängt werden. 2023 konnten in Deutschland 250 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten vermieden werden. Den größten Anteil der Verdrängung mit 78 % der Gesamtmenge, macht



dabei die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen aus. Der Wärmesektor macht nur 18 % der Gesamtmenge aus. Dies zeigt, dass die Entwicklungen auf dem Weg in die Klimaneutralität sich bisher vorrangig auf den Bedarfssektor Strom beschränkten (Umweltbundesamt, 2024e). In den vergangenen 10 Jahren hat sich der Anteil der erneuerbaren Energien im Nettostromverbrauch verdoppelt und lag im Jahr 2023 bei 51,9%. Im Wärmesektor und Verkehr steigt dieser Anteil vergleichsweise langsam. Der Anteil erneuerbarer Energien liegt 2023 im Verkehr bei 7,3 % und im Wärmesektor bei nur 18,8 % (Umweltbundesamt, 2024e). Gegenüber 2022 wird nur etwa 1 % mehr Wärme aus erneuerbaren Energieträgern erzeugt. Gleichzeitig verringerte sich jedoch der Wärmebedarf, besonders in der Industrie. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am gesamten Endenergieverbrauch für Wärme stieg daher von 17,5 % auf 18,8 % (Umweltbundesamt, 2024c).

Der EUROPÄISCHE GRÜNE DEAL ist die Strategie mit der die EU-Mitgliedsstaaten bis 2050 Klimaneutralität erreichen wollen (Europäischer Rat, 2024). Es handelt sich um ein Maßnahmenpaket politischer Initiativen, um das Ziel bis 2050 ein klimaneutrales Europa zu erreichen, zu erfüllen. Das Paket FIT FÜR 55 gibt den Klimazielen der EU die rechtliche Grundlage (Europäischer Rat, 2024). Bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen ist mit der Verordnung über das Europäische Klimagesetz eine rechtliche Verpflichtung. Dazu sollen zunächst bis 2030 die Nettotreibhausgasemissionen um mindestens 55 % gegenüber 1990 gesenkt werden (Europäische Union, 2021). Ebenso regelt eine neue Richtlinie über den Einsatz erneuerbarer Energien, dass die Mitgliedsstaaten sicherstellen, dass der Anteil von Energie aus erneuerbaren Quellen am Bruttoendenergieverbrauch der Union mindestens 42,5 % im Jahr 2030 beträgt (Europäische Union, 2023). Zudem gibt es ab 2027 ein neues Emissionshandelssystem für Gebäude und den Verkehr, um auch im Verkehrs- und Gebäudesektor Treibhausgase einzusparen. Von den Einnahmen dieses Emissionshandels sollen neue Klimasozialfonds finanziert werden (Bundesregierung, 2023). Die Richtlinie (EU) 2023/2413 regelt zudem, dass jeder Mitgliedsstaat den Anteil der erneuerbaren Energien im Wärme- und Kältesektor jährlich um mindestens 0,8 %-Punkte (2021-2025) bzw. 1,1 %-Punkte (2026-2030) erhöhen gegenüber dem Anteil 2020 erhöhen muss (Europäische Union, 2023).

Die Treibhausgasemissionen sollen nach §3 des Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) bis 2030 um mindestens 65 % gegenüber 1990 reduziert werden. Bis 2040 um mindestens 88 %, bis spätestens 2045 soll Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden und nach 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erreicht werden (Bundesrepublik Deutschland, 2021). Dabei müssen alle Sektoren berücksichtigt werden und verschiedene Wissensgebiete und Institutionen zusammenarbeiten (Chang et al., 2021; Wiese, Thema & Cordroch, 2022; Gea-Bermúdez et al., 2021).

Um den Anteil erneuerbarer Energiequellen im Wärmesektor ebenfalls zu steigern und zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung bis spätestens 2045 beizutragen wurde das WPG am 20. Dezember 2023 verabschiedet und trat am 1. Januar 2024 in Kraft. Das WPG verpflichtet die Länder sicher zu stellen, dass auf ihrem Hoheitsgebiet Wärmepläne erstellt werden (Bundesrepublik Deutschland, 2023a). Dazu umfasst es Vorgaben und Arbeitsschritte für die Erstellung eines Wärmeplans, sowie zeitlich gestaffelte

Vorgaben zur Dekarbonisierung der Netze für die Wärmenetzbetreiber. Bis zu 30. Juni 2026 müssen nach §4 Gemeindegebiete mit mehr als 100.000 Einwohner\*innen einen Wärmeplan erstellt haben. Gemeindegebiete mit weniger als 100.000 Einwohner\*innen gilt dies bis zum 30. Juni 2028. Stichtag für die Einwohnerzahl ist der 1. Januar 2024 (Bundesrepublik Deutschland, 2023a). Es soll geplant werden welches Gebiet dezentral oder zentral versorgt werden soll und wie erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme genutzt werden können. Bis zum Ablauf des 31. Dezembers 2044 muss nach §31 jedes Wärmenetz vollständig mit Wärme aus erneuerbaren Energien und/oder unvermeidbarer Abwärme gespeist werden (Bundesrepublik Deutschland, 2023a). Das heißt in den kommenden Jahrzehnten wird eine kommunale Wärmeplanung in jeder Kommune in Deutschland stattfinden. Die Wärmeplanung umfasst nach §13 des WPG die Entscheidung der planungsverantwortlichen Stelle, die Eignungsprüfung, die Bestandsanalyse, die Potenzialanalyse, die Beschreibung eines Zielszenarios, die Einteilung in voraussichtliche Wärmeversorgungsgebiete und die Entwicklung einer Umsetzungsstrategie (Bundesrepublik Deutschland, 2023a). Wärme kann nicht auf beliebig langen Distanzen transportiert werden, da die Wärmeverluste zu hoch sind. Es gilt daher Lösungen zu finden die auf lokalem Maßstab funktionieren. Nach Peters, Steidle und Böhnisch (2020) umfasst die Potenzialanalyse die Erhebung der lokal verfügbaren Potenziale erneuerbarer Energien und Abwärmepotenziale, sowie die Erfassung der Potenziale zur Energieeinsparung in den Sektoren Haushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen, Industrie und öffentliche Liegenschaften für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme.

In der Gruppe GEBÄUDE UND QUARTIERE des Instituts für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde bereits ein interdisziplinärer Modellansatz entwickelt, welcher mittels Methoden der künstlichen Intelligenz das Gebäudealter ableitet und den Wärmebedarf von Gebäude ermittelt (Gorzalka, P., M. et al., 2021; Blanco, Aditya, Schiricke & Hoffschmidt, 2023).

Um die Klimaschutzziele zu erreichen und einen Wärmeplan zu erstellen nimmt die Potenzialanalyse eine wichtige Position ein. Für eine klimaneutrale Wärmeversorgung muss Wärme aus erneuerbaren Energiequellen eingesetzt werden. Bei der Potenzialanalyse sollen sämtliche Potenziale gebietsscharf nach Verfügbarkeit und Berücksichtigung des gültigen Planungs- und Genehmigungsrecht erfasst werden (Peters et al., 2020). Bei der Wärmewende ist die Zeit von großer Bedeutung. Die Berechnung der Potenziale sollte daher möglichst effizient und automatisiert erfolgen. Räumliche Daten können dabei eine Schlüsselrolle einnehmen. Wie ein Potenzial erfasst wird und welche lokalen Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen ist abhängig von der Wärmequelle. Bei der Potenzialanalyse können das theoretische, technische, wirtschaftliche und realisierbare Potenzial unterschieden werden (Manz et al., 2024; Peters et al., 2020). In dieser Arbeit wird ein allgemeiner Überblick über die verschiedenen Wärmequellen gegeben und ein Überblick geschaffen, welche Studien zur Erfassung des Potenzials bereits existieren. Die Studien konzentrieren sich überwiegend auf spezifische Fallstudien bzw. spezifische Lösungen (wie Manz et al. (2024); Pelda, Stelter und Holler (2020)). Es gibt kaum übertragbare Ansätze. Dazu zählen generische Modelle oder Softwarelösungen, wie G.POT zur Ermittlung des flachen geothermischen Potenzials von Casasso und Sethi

(2016). Insbesondere zur Erfassung der Umweltwärme findet sich weniger Literatur. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Erfassung des Potenzials von Fließgewässern für die Wärmeversorgung. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, welche Geodaten, Methoden und Werkzeuge der Geoinformatik sich eignen, um ein Modell zu entwickeln, welches das lokale theoretische und technische Potenzial von Fließgewässern berechnet. Dazu wird ein Modell, anhand von Daten des Landes [Nordrhein-Westfalen \(NRW\)](#), entwickelt. Zu den Ansprüchen gehören, dass die Berechnungsmethode effizient und verlässlich ist und die Ergebnisse eine hohe räumliche Auflösung haben. Dabei soll die ökologische Komplexität von Fließgewässern berücksichtigt werden. Während der thermischen Nutzung von Fließgewässern wird das Wasser abgekühlt (Wärmenutzung) bzw. erwärmt (Kältenutzung). Das thermisch veränderte Wasser wird in das Fließgewässer zurück geleitet aus dem es entnommen wurde (Gaudard, Schmid & Wüest, 2017). Die Wassertemperatur hat Einfluss auf die ökologischen, chemischen und physikalischen Prozesse in dem Fließgewässer. Um das Ökosystem nicht zu überlasten ist es daher wichtig die Temperaturverhältnisse nicht signifikant zu verändern (Gaudard, Wüest & Schmid, 2019).

## 1.2 Zielsetzung

Schwerpunkt der Masterarbeit sind die verschiedenen Wärmequellen. Es handelt sich bei den Wärmequellen um erneuerbare Energiequellen die für eine klimaneutrale Wärmeversorgung eingesetzt werden können. Es soll ein Modell entwickelt werden, welches das Potenzial von Fließgewässern automatisiert erfasst.

Herausforderung ist das Potenzial aus Geodaten automatisiert, effizient und zuverlässig auf lokaler Ebene abzuleiten, wobei lokale Gegebenheiten berücksichtigt werden sollen. Ziel ist herauszufinden welche geoinformationstechnologischen Methoden geeignet sind und welche (frei verfügbaren) räumlichen Daten in Deutschland zu diesem Zweck eingesetzt werden können. Aus den verwendeten Daten werden weitere Informationen für die Berechnung gewonnen.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

In [Kapitel 2](#) werden die verschiedenen erneuerbaren Energiequellen vorgestellt, die für die Wärmeversorgung eingesetzt werden können. Dabei wird zunächst auf die Grundlagen eingegangen, bevor die verschiedene Potenzialstudien verglichen werden, um den aktuellen Stand der Forschung zu erfassen. In [Kapitel 3](#) wird die entwickelte Methodik vorgestellt, um ein generisches Modell zu entwickeln, welches das Potenzial von Fließgewässern aus räumlichen Daten ableitet. Anschließend werden in [Kapitel 4](#) die Ergebnisse vorgestellt und in [Kapitel 5](#) diskutiert. Die Arbeit wird mit einem Fazit in [Kapitel 6](#) abgeschlossen.

## 2 Grundlagen und Forschungsstand

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Wärmeversorgung und die erneuerbaren Energien, die für die Wärmeversorgung eingesetzt werden können, sowie die Potenziale von Wärmequellen vorgestellt. Anschließend wird der aktuelle Forschungsstand in Bezug auf die räumlichen Analysen, deren Arbeitsweisen und Datenquellen vorgestellt. Zunächst wird dafür ein Überblick über die räumlichen Analysen für die Potenzialberechnung für die jeweiligen Wärmequellen gegeben. Anschließend werden existierende Automatisierungs- und Modellierungsansätze vorgestellt.

### 2.1 Wärmeversorgung

Bei der Wärmeversorgung wird im Wesentlichen zwischen der dezentralen Wärmeversorgung und der zentralen, also leitungsgebundenen Wärmeversorgung unterschieden. Die dezentrale Wärmeversorgung meint die gebäudeweise Wärmeversorgung, also im Gebäude selbst oder in unmittelbarer Nähe dazu (Pfnür, Winiewska, Oschatz & Mailach, o. J.). Bei der zentralen (oder leitungsgebundenen) Wärmeversorgung wird Wärmeenergie von zentralen Wärmeerzeugungsanlagen über Kalte Nahwärme (KNW) oder Fernwärme (FW) zu den Verbrauchern transportiert (Pfnür et al., o. J.). Bei den Wärmenetzen kann man fünf Generationen unterscheiden (H. Lund et al., 2014; Wirtz, 2023):

#### 1. Generation

Die 1. Generation der FW verwendet Dampf als Wärmeträger. Die Netze werden unter hohem Druck und hohen Temperaturen betrieben.

#### 2. Generation

In der 2. Generation wird heißes Wasser als Wärmeträger genutzt. Die Netze werden bei einer Vorlauftemperatur von über 100 °C betrieben.

#### 3. Generation

Seit den 1970er Jahren gibt es die Systeme der 3. Generation. Diese werden ebenfalls mit unter Druck stehendem Wasser, aber mit Temperaturen unter 100 °C betrieben.

#### 4. Generation

Moderne Wärmenetze sind von der 4. oder 5. Generation, die bei niedrigeren

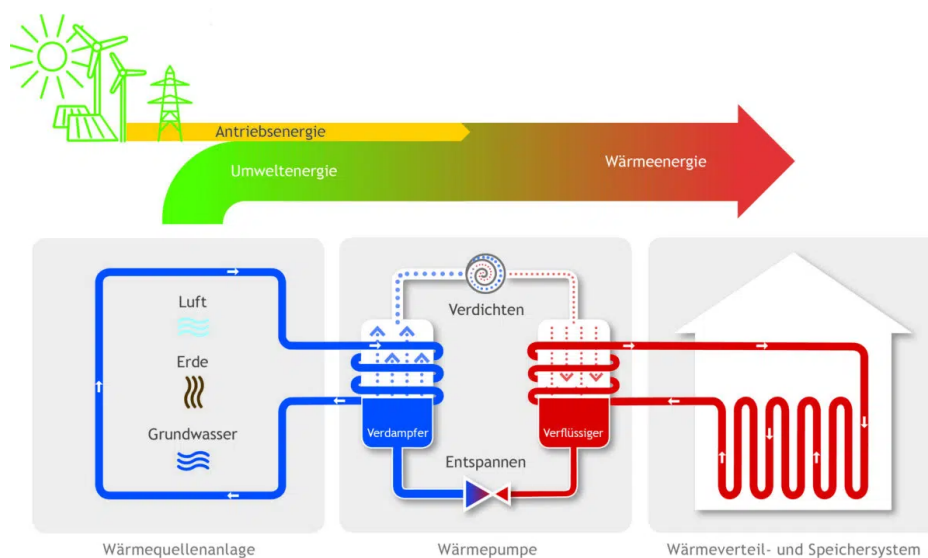
Temperaturen betrieben werden, wodurch sie geringere Wärmeverluste aufweisen. Wärmenetze der 4. Generation werden bei maximal 60 °C bis 70 °C betrieben.

### 5. Generation

Wärmenetze der 5. Generation (KNW) werden auf einem Temperaturniveau bis 35 °C betrieben.

Durch die niedrigere Vorlauftemperatur werden die Netzverluste verringert und ermöglicht, dass mehr Wärmequellen eingebunden werden können, insbesondere erneuerbare Wärmequellen (H. Lund et al., 2014).

Bei Niedertemperaturwärmequellen liegt das Temperaturniveau unter dem der Wärmeanwendung. Um diese Energie dennoch zu nutzen werden Wärmepumpen eingesetzt (Krimmling, 2009). Es gibt unterschiedliche Wärmepumpen, die nach der Betriebsart (Elektromotor, Verbrennungsmotor), Verdichtungsprinzip (Kompressionswärmepumpe, Sorptionswärmepumpe) oder der Art der Wärmequelle (Erdreich, Grundwasser, Luft) eingeteilt werden können (Krimmling, 2009). Das Funktionsprinzip einer Wärmepumpe ist in *Abbildung 2.1* dargestellt.



**Abbildung 2.1** Grundprinzip einer Kompressionswärmepumpe. Übernommen und angepasst aus BWP (2024). © Bundesverband Wärmepumpe e.V.

Die Wärmepumpe arbeitet nach einem thermischen Kreisprozess mit einem Kältemittel als Arbeitsmedium. Auf der Niederdruckseite wird durch den Wärmequellenstrom das Kältemittel verdampft. Das Kältemittel nimmt die Umweltenergie auf dem verfügbaren Temperaturniveau auf. Anschließend wird mittels eines Verdichters das Kältemittel verdichtet. Mit der Kompression geht ein Temperaturanstieg einher. Es werden Temperaturen erzielt, die über dem benötigten Niveau des Wärmenutzungsprozesses liegen. Im Kondensator beziehungsweise Verflüssiger erfolgt die Wärmeübertragung vom Kältemittel auf das Wärmeträgermedium des Nutzungsprozesses (Nutzwärmestrom).

Anschließend wird im Expansionsventil das Kältemittel wieder auf den thermodynamischen Ausgangszustand zurückgebracht (Krimmling, 2009). Wie in der Abbildung 2.1 dargestellt, wird eine Antriebsenergie benötigt, die für einen klimafreundlichen Betrieb ebenfalls aus erneuerbaren Energiequellen stammen sollte, das heißt erneuerbar erzeugte elektrische Energie.

Die Wärmepumpe benötigt demnach zur Erzeugung der Nutzwärme

$$Q_{\text{nutz}} = Q_{\text{umg}} + E_{\text{el}} \quad (2.1)$$

einen Anteil elektrischer Energie  $E_{\text{el}}$ . Der überwiegende Anteil der erzeugten Nutzwärme wird jedoch in der Regel der Umgebung  $Q_{\text{umg}}$  entzogen (Zogg, 2009).

Es lässt sich die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (JAZ)

$$\eta_{\text{JAZ}} = \frac{Q_{\text{nutz}}}{E_{\text{el}}} \quad (2.2)$$

ableiten. Sie ist das Verhältnis erzeugten Nutzwärme in einem Jahr zu der zugeführten elektrischen Energie.

Der Nutzwärmestrom

$$\dot{Q}_{\text{nutz}} = \dot{Q}_{\text{umg}} + P_{\text{el}} \quad (2.3)$$

lässt sich aus dem der Umwelt entzogenen Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{umg}}$  und der elektrischen Leistung  $P_{\text{el}}$ , die für den Betrieb der Wärmepumpe benötigt wird, berechnen (Zogg, 2009).

Der Leistungskoeffizient der Wärmepumpe (COP)

$$\eta_{\text{COP}} = \frac{\dot{Q}_{\text{nutz}}}{P_{\text{el}}} \quad (2.4)$$

beschreibt das Verhältnis von Nutzwärmestrom  $\dot{Q}_{\text{nutz}}$  zu elektrischer Leistung  $P_{\text{el}}$  (Zogg, 2009). Der COP einer idealen, verlustfreien Wärmepumpe

$$\text{COP}_{\text{id}} = \frac{T_{\text{nutz}}}{T_{\text{nutz}} - T_{\text{umg}}} \quad (2.5)$$

wird aus der Temperatur der Wärmequelle  $T_{\text{umg}}$  und der Temperatur des abgegebenen Nutzwärmestroms  $T_{\text{nutz}}$  berechnet (Zogg, 2009). Es handelt sich dabei um einen idealen Wert, der in der Praxis nicht erreicht werden kann. Es kann daher ein Gütegrad

$$\nu = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{id}}} \quad (2.6)$$



definiert werden, als Verhältnis zwischen dem realen COP und dem  $\text{COP}_{\text{id}}$  (Zogg, 2009). Der Gütegrad  $\nu$  ist von dem speziellen Anwendungsfall anhängig. Anhaltswerte können Tabelle 2.1 entnommen werden. Für den COP der Wärmepumpe

$$\text{COP} = \nu \frac{T_{\text{nutz}}}{T_{\text{nutz}} - T_{\text{umg}}} \quad (2.7)$$

wird der ideale  $\text{COP}_{\text{id}}$  (Gleichung (2.5)) mit dem Gütegrad  $\nu$  (Gleichung (2.6)) multipliziert.

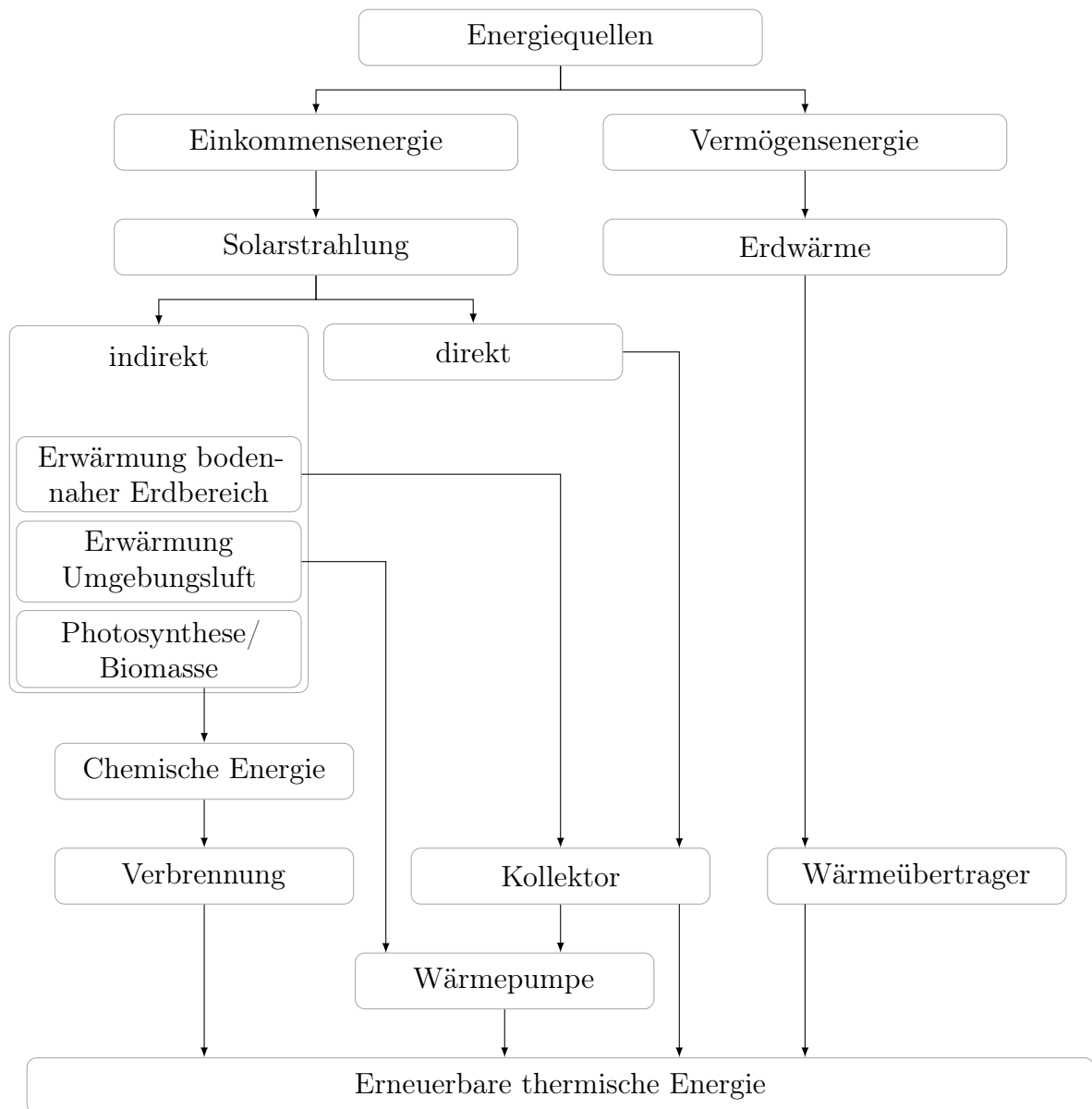
**Tabelle 2.1** Anhaltswerte für den Gütegrad verschiedener Wärmepumpen einschließlich aller Hilfsantriebe nach Zogg (2009).

Wärmequelle	Gütegrad $\nu$
Umgebungsluft	0.35
Erdwärme (Erdwärmesonden)	0.45
Wasser (Grund-, Fluss-, Seewasser)	0.50

## 2.2 Erneuerbare Wärmequellen

Wärme ist einer der vier Nutzbereiche (Nahrung, Wärme, Arbeit und Mobilität), für die der Mensch Energie verwendet (Wesselak, Schabbach, Link & Fischer, 2017). Die in den Energieträgern enthaltene Energie liegt nicht zwangsläufig in der Form vor, in welcher sie genutzt werden soll. Man unterscheidet Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie. Primärenergie ist die Energie in ihrem natürlichen Zustand, wie Kohle, Sonnenenergie oder Erdwärme. Endenergie ist die Energie, wie sie dem Verbraucher nach Aufbereitungs- und Umwandlungsprozessen zugeführt wird, wie Kraftstoffe, Heizöl oder Brennholz. Nutzenergie ist die Energienutzung durch den Verbraucher nach weiteren Umwandlungsprozessen, wie in Form von Wärme oder Kraft (Wesselak et al., 2017). Die nutzbaren Energiequellen können, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, in die Vermögensenergie, die in der Erde gespeichert ist und die Einkommensenergie, die von außen in das System eingetragen wird, unterschieden werden (Krimmling, 2009). Zu der Vermögensenergie zählen die Energie im Erdkern, sowie die fossile Energie. Zu der Einkommensenergie zählt die Solarenergie (Krimmling, 2009).

Wenn sich Primärenergieträger von selbst und innerhalb menschlicher Zeitmaßstäbe erneuern, können sie als *regenerativ* bezeichnet werden (Wesselak et al., 2017). Fossile und nukleare Energieträger haben sich über Jahrtausende gebildet, wodurch ihre Nutzung zu einer stetigen Abnahme führt (Wesselak et al., 2017). Erneuerbare Energiequellen ergeben sich aus den zugeführten Energieströmen bzw. Energiereservoirs, dazu zählt die solare Strahlungsenergie (Krimmling, 2009). Die solare Einstrahlung kann direkt oder indirekt genutzt werden (siehe Abbildung 2.2). Die indirekte Nutzung der Solarenergie beschreibt etwa die Erwärmung der Umgebungsluft, die durch eine Wärmepumpe



**Abbildung 2.2** Erneuerbare Energiequellen und ihre möglichen Anwendungspfade. Angelehnt an Krimmling (2009) und Wesselak et al. (2017). Nicht berücksichtigt sind Pfade mit Nutzung als elektrische Energie.

nutzbar gemacht werden kann. Die Erwärmung des bodennahen Erdbereichs wird als oberflächennahe Geothermie bezeichnet und kann über Sonden oder Kollektoren in Kombination mit einer Wärmepumpe genutzt werden. Zudem ist die Entstehung von Biomasse an die solare Einstrahlung gekoppelt. In der Biomasse ist die Energie in Form von chemischer Energie gespeichert und kann beispielsweise über Verbrennung als thermische Energie nutzbar gemacht werden. Radioaktive Zerfallsprozesse im Erdinneren führen zu einem Wärmestrom in Richtung der Erdoberfläche. Diese Wärme



kann in Form von Tiefengeothermie genutzt werden. Wie in *Abbildung 2.2* dargestellt, funktioniert dies über Wärmeübertrager (Krimmling, 2009).

Im Folgenden werden die verschiedenen Wärmequellen aus regenerativen Energien im Detail vorgestellt.

### 2.2.1 Solarthermie

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert und in *Abbildung 2.2* dargestellt, kann die Solarstrahlung direkt durch solarthermische Anlagen genutzt werden oder die Energie wird über Energiewandler aus einer Energieform genutzt, die unter natürlichen Umwandlungsprozessen aus der Solarstrahlung entstanden ist, wie etwa die Biomasseproduktion (Quaschnig, 2015). An dieser Stelle wird die direkte thermische Nutzung der Solarenergie betrachtet.

Bei der Nutzung im Gebäudebereich kann man zwischen der aktiven und passiven Nutzung unterscheiden (Stieglitz & Heinzl, 2012). Werden nur bauliche Mittel eingesetzt um die Solarenergie zu nutzen spricht man von einer passiven Nutzung. Aktive Systeme können in konzentrierende und nicht konzentrierende Systeme eingeteilt werden. Bei konzentrierenden Systemen wird durch Spiegel die Konzentration der eintreffenden Strahlung erhöht und damit die Einstrahlungsleistung am Absorber. Am Absorber können dadurch höhere flächenspezifische Wärmeverluste kompensiert werden, wodurch der Absorber mit höheren Temperaturen betrieben werden kann. Im Gebäudebereich kommen jedoch vor allem nicht konzentrierende Systeme zum Einsatz (Stieglitz & Heinzl, 2012). Im Rahmen dieser Arbeit sind die nicht konzentrierenden Systeme von Relevanz und werden im Folgenden näher betrachtet.

Man kann bei den Anlagen im Gebäudebereich zwischen Anlagen zur Trinkwarmwasserbereitung und Anlagen zur Heizungsunterstützung unterscheiden (Krimmling, 2009; Weyres-Borchert, Kasper & Drück, 2015). Eine Solaranlage besteht aus verschiedenen Komponenten. Die Hauptkomponenten sind der Kollektor mit dem Absorber und der Speicher. Das Grundprinzip besteht daraus, dass im Solarkreislauf das kalte Rücklaufwasser im Solarkollektor erwärmt wird (Krimmling, 2009). Die Kollektoren bestehen aus mehreren Komponenten, dem Absorber, einem Gehäuse und ggf. einer transparenten Abdeckung (Krimmling, 2009). Der Absorber absorbiert die direkte und diffuse Solarstrahlung und wandelt diese in thermische Energie um. Diese wird an einen Wärmeträger übertragen, der in speziellen, unmittelbar in den Absorber integrierten Wärmeübertragerrohren strömt (Weyres-Borchert et al., 2015; Krimmling, 2009). Es können verschiedene Kollektortypen unterschieden werden, wobei der Kollektor vorrangig von dem Nutztemperaturniveau bestimmt wird (Wesselak et al., 2017).

Thermische Solarkollektoren können auf dem Dach eines Gebäudes angebracht werden. Die Kollektoranordnung wird durch die Kollektorneigung  $\beta$ , den Winkel des Kollektors gegen die Waagerechte und den Azimutwinkel  $\alpha$ , die Abweichung der Ausrichtung von der Südrichtung, definiert. Die Kollektorneigung ist bei geneigten Dächern von diesen vorgegeben, während sie bei Flachdächern selbst gewählt werden kann mit

üblichen Werten zwischen  $\beta = 30^\circ$  bis  $60^\circ$ . Bei Flachdächern müssen die Kollektoren so angebracht werden, dass sie sich nicht gegenseitig verschatten (Krimmling, 2009). Das Optimum des Azimutwinkels liegt bei  $\alpha = 0^\circ$ , das entspricht einer Südausrichtung, und einem Neigungswinkel von  $\beta = 45^\circ$ . Bei einer Westausrichtung  $\alpha = 90^\circ$  können über 80 % des Optimums erreicht werden (Wesselak et al., 2017).

Um eine Solaranlage energetisch zu bewerten wird der Jahresnutzungsgrad

$$\bar{\eta}_a = \bar{\eta}_{a,\text{Koll}} \bar{\eta}_{a,\text{Anl}} \quad (2.8)$$

berechnet. Der Jahresnutzungsgrad des Gesamtsystems  $\bar{\eta}_a$  berechnet sich aus dem Produkt des Jahresnutzungsgrads des Kollektors  $\bar{\eta}_{a,\text{Koll}}$  und dem der übrigen Solaranlage

$$\bar{\eta}_{a,\text{Anl}} = 1 - \text{Verluste}$$

der sich aus den Wärmeverlusten berechnet Krimmling (2009). Die von der Solaranlage bereitgestellte Nutzwärme

$$Q_a = s_a A_A \bar{\eta}_a \quad (2.9)$$

ergibt sich aus dem Jahresnutzungsgrad  $\bar{\eta}_a$ , der jährlich auf den Kollektor eintreffenden spezifischen Solarstrahlungsenergie  $s_a$  und der Aperturfläche des Kollektors  $A_A$ .

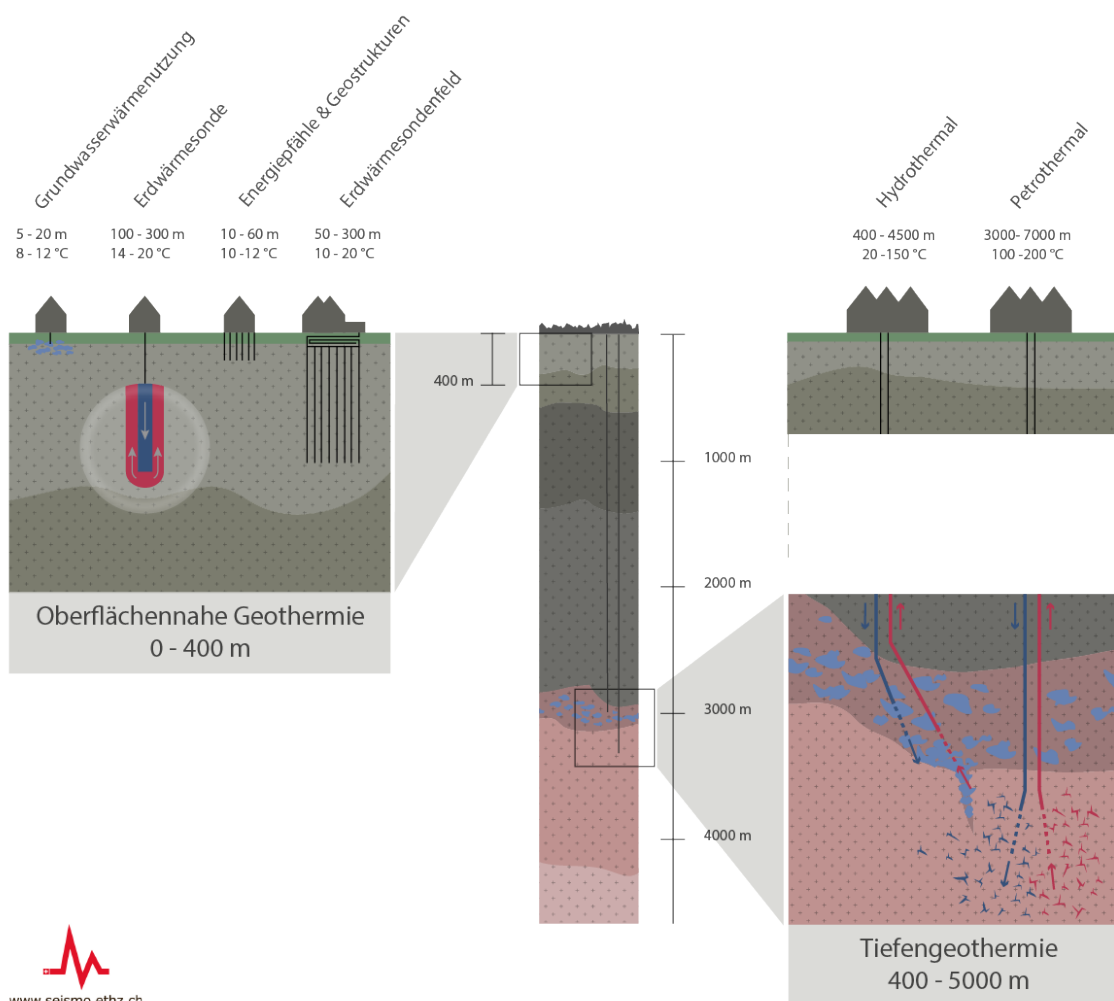
Die spezifische Solarstrahlungsenergie lässt sich aus Wetterdaten ermitteln. Liegen diese stündlich und auf Diffus- und Direktstrahlung aufgelöst vor, kann eine Verschattungsanalyse mit durchgeführt und Verschattungen entsprechend berücksichtigt werden. Für den Nutzungsgrad der Kollektoren können zudem der Azimutwinkel  $\alpha$  und der Neigungswinkel  $\beta$  einbezogen werden.

## 2.2.2 Geothermie

Bei der Geothermie wird zwischen oberflächennaher Geothermie bis zu einer Bohrtiefe von 400 m und tiefer Geothermie unterschieden, wie in [Abbildung 2.3](#) veranschaulicht. Thermodynamisch kann man die Geothermie nach direkter und indirekter Nutzung unterscheiden. Bei etwa 1000 m Bohrtiefe ist eine Temperatur von über  $50^\circ\text{C}$  zu erwarten. Dieses Temperaturniveau ist für Raumwärme ausreichend und kann über einen Wärmeübertrager direkt nutzbar gemacht werden (Wesselak et al., 2017).

### Oberflächennahe Geothermie

In den ersten 400 m der Erdoberfläche liegt das Temperaturniveau unterhalb von  $25^\circ\text{C}$  (Wesselak et al., 2017). Durch die Verwendung einer Wärmepumpe kann das Temperaturniveau abgehoben werden und die Energie somit nutzbar gemacht werden. Die Funktionsweise einer Wärmepumpe ist in [Abschnitt 2.1](#) erklärt. Die thermische



**Abbildung 2.3** Übersicht über geothermische Technologien übernommen aus ETH Zürich (2024). © Schweizerischer Erdbebendienst (SED) an der ETH Zürich.

Energie des oberflächennahen Untergrundes wird über Erdwärmesonden, Erdkollektoren oder Grundwasserbrunnen entzogen und an den Wärmepumpenkreislauf übergeben (Wesselak et al., 2017). In Deutschland ist bei einer Bohrung bis 100 m Tiefe ist eine Genehmigung nach Wasserrecht erforderlich. Dazu zählt das Wasserhaushaltsgesetz und die Gesetze und Verordnungen der jeweiligen Bundesländer (Wesselak et al., 2017).

Bei Erdwärmesonden handelt es sich um eine näherungsweise vertikale Auskühlung des Untergrundes, während bei Erdkollektoren der Untergrund horizontal erschlossen und ausgekühlt wird (Wesselak et al., 2017). Bei der Nutzung von Grundwasser ein Saug- und Schluckbrunnen mit etwa 20 m Abstand benötigt und es ist ein Pumpversuch zum Prüfen der Ergiebigkeit nötig (Krimmling, 2009). Das abgekühlte Wasser dem Grundwasser wieder zugeführt (Wesselak et al., 2017). In allen Fällen wird im Untergrund ein zeitabhängiges Temperaturfeld  $T(x, y, z, t)$  ausgebildet (Wesselak et al., 2017).

Bei der Nutzung der Erdwärme sind die thermodynamischen Eigenschaften des Untergrundes von großer Bedeutung. Die Erschließung durch Erdsonden oder Erdkollektoren ist sehr unterschiedlich und wird daher getrennt betrachtet. Eine Erdwärmesonde ist vereinfacht ein Kunststoffrohr in U-Form, welches in einem Bohrloch einzementiert wird. Darin fließt ein Wärmeträgermedium (Wesselak et al., 2017). Bei der Potenzialberechnung müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Dazu gehört nach Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019, 2021) die gegenseitige Beeinflussung der Erdwärmesonden, bei mehr als einer Sonde oder zu benachbarten Anlagen und die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes. Aus der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ergibt sich eine resultierende Entzugsleistung je Sondenmeter, wobei die Bohrtiefenbegrenzung eingehalten werden muss. Während der Heizperiode wird dem Untergrund Wärme entzogen, die hauptsächlich über die Absorption der Solarstrahlung an der Erdoberfläche im Sommer wieder zugeführt werden muss (Wesselak et al., 2017).

Erdkollektoren werden horizontal in einer Tiefe von 1,2 m bis 1,5 m ausgelegt. Die Rohre werden flächig verlegt und mit einer Soleflüssigkeit durchströmt (Wesselak et al., 2017). Durch Erdkollektoren wird fast ausschließlich die im Erdreich gespeicherte Solarenergie genutzt. Daraus ergibt sich ein starker saisonaler Temperaturverlauf  $T(z, t)$  im Untergrund. Die Amplitude nimmt mit zunehmender Tiefe  $z$  ab. Die Temperaturextreme im Jahresverlauf werden im Untergrund später erreicht als an der Erdoberfläche. Dies wird als temperaturabhängige Phasenverschiebung bezeichnet (Wesselak et al., 2017). Bei der Potenzialermittlung sind somit die Klimadaten relevant, die Bodeneigenschaften und vor allem dessen Wärmeleitfähigkeit (Wesselak et al., 2017). Die Regeneration erfolgt ausschließlich über die Absorption solarer Strahlung, die Kollektorfläche darf daher nicht überbaut oder versiegelt werden (Wesselak et al., 2017).

### Tiefe Geothermie

Die Erde ist ein terrestrischer Planet mit schalenförmigem Aufbau aus Erdkruste, Mantel, Äußerem und Innerem Kern. Im Erdinneren, bei einer Tiefe von 6370 km, befindet sich der feste Erdkern aus Eisen und Nickel bei Temperaturen von bis zu 6500 °C, die durch radioaktive Zerfallsprozesse entstehen (Quaschnig, 2015). Durch die Temperaturunterschiede zwischen Erdinnerem und der kälteren Erdkruste entsteht ein ständiger Wärmestrom (Wesselak et al., 2017). Mit Werten zwischen  $0,063 \text{ W m}^{-2}$  und  $0,42 \text{ W m}^{-2}$  ist dieser jedoch zu gering für eine technische Nutzung (Quaschnig, 2015). Der gesamte Wärmeinhalt der Erde wird auf  $1,26 \cdot 10^{31} \text{ J}$ , der der Erdkruste auf  $5,4 \cdot 10^{27} \text{ J}$  geschätzt (bezogen auf eine Referenztemperatur von 15 °C) (Quaschnig, 2015). Um Energie aus dem Erdinneren nutzen zu können werden daher Tiefenbohrungen durchgeführt. Der geothermische Gradient beträgt durchschnittlich  $1 \text{ K} / 33 \text{ m}$  (Quaschnig, 2015). Die Temperaturzunahme ist nicht gleich verteilt. Da, wo Kontinentalplatten aufeinanderstoßen, gibt es Anomalien. Gebiete mit einem hochliegenden Mantel können geothermisch genutzt werden. Andere Gebiete sind durch zu hohe Bohrkosten unwirtschaftlich. Im Bereich des Oberrheingrabens (Deutschland) weist die Kruste beispielsweise, aufgrund der aufeinanderstoßenden Kontinentalplatten und der

damit einhergehenden Oberrheingrabenbildung, geringere Dicken auf. In einer Tiefe von 3000 m herrschen Temperaturen von 150 °C oder mehr (Quaschnig, 2015).

Die geothermische Nutzung kann in die verschiedenen Ressourcen eingeteilt werden:

- Heißwasser-Aquifere (Thermalwasser) - Hydrothermale Geothermie
- Heiße trockene kristalline Gesteine (Granit, Gneis) - Petrothermale Geothermie

Heißwasser-Aquifere können aufgrund der hohen Temperaturen direkt für technische Anwendungen nutzbar gemacht werden (Quaschnig, 2015). Allerdings muss gezielt nach diesen Wasserquellen gebohrt werden, was mit hohen Investitionskosten ohne Erfolgsgarantie einhergeht. Für die Nutzung werden zwei Bohrungen benötigt. Eine Förderbohrung durch die das heiße Wasser an die Oberfläche gelangt, und eine Injektionsbohrung, durch die das ausgekühlte Wasser wieder in die Tiefe gepresst wird (Quaschnig, 2015). Die geothermale Wärmeversorgung erfolgt über Heizwerke und eine Verteilung über FW oder KNW (Quaschnig, 2015).

Bei dem Hot-Dry-Rock-Verfahren wird die Temperatur heißer Gesteine in einer Tiefe von 3000 bis 5000 m nutzbar gemacht. Dafür werden unterirdische Hohlräume geschaffen, indem kaltes Wasser in die Tiefe gepresst wird. Durch die Ausdehnung aufgrund der Temperaturerhöhung werden Hohlräume in das Gestein gesprengt. Anschließend wird in diese Hohlräume kaltes Wasser geleitet, welches sich durch das heiße umliegende Gestein erwärmt und anschließend wieder gefördert wird (Quaschnig, 2015).

Geothermische Quellen lassen sich nicht unendlich nutzen. Durch den Entzug der Wärme kühlt das umliegende Gebiet aus. Die Abstände der Tiefenbohrungen werden in der Regel so gewählt, dass die Temperaturen über etwa 30 Jahre gehalten werden können. Wenn die Temperaturen unter den Wert sinken, der technisch sinnvoll nutzbar ist können die Anlagen in einigen Kilometern Entfernung neu gebaut werden, da die Bereiche nur in unmittelbarer Nähe zur Anlage auskühlen (Quaschnig, 2015).

### 2.2.3 Umweltwärme

Jeder Zustand oberhalb des absoluten Nullpunkts bei  $0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$  enthält Energie in Form von thermischer Energie, die zur Wärmeversorgung genutzt werden kann (Krimmling, 2009). Diese Umweltwärme oder Umgebungsenergie beschreibt den Energieinhalt, der in der Umgebungsluft, den Oberflächengewässern und dem oberflächennahen Erdreich, sowie den Aquiferen vorhanden ist. Das Temperaturniveau der Umgebungswärme liegt jedoch unterhalb der nötigen Temperatur für Wärmeanwendungen (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2020). Flächenheizungen, wie Fußbodenheizungen, benötigen ein Temperaturniveau von 30 °C bis 45 °C, Heizungen mit Radiatoren oder Konvektoren 45 °C bis 70 °C beziehungsweise für die Brauchwassererwärmung sind Temperaturen von 50 °C bis 70 °C nötig (Dehli, 2020). Gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik kann Wärme nicht von selbst von einem niedrigen Temperaturniveau in ein höheres Temperaturniveau übergehen. Daher wird eine Wärmepumpe benötigt,

die die Umgebungswärme auf das nötige Temperaturniveau anhebt (Krimmling, 2009). Die Funktionsweise einer Wärmepumpe wird in [Abschnitt 2.1](#) näher erläutert.

In [Abbildung 2.2](#) wird zwischen der Vermögens- und der Einkommensenergie unterschieden. Die Energie aus der Solarstrahlung (Einkommensenergie), ist in dem bodennahen Erdbereich, dem Grundwasser, der Umgebungsluft und den Oberflächengewässern gespeichert. Wird diese genutzt, kann diese in menschlichen Maßstäben erneuert werden, es handelt sich daher um eine regenerative Energiequelle (Kaltschmitt et al., 2020).

Bei der Energie die im Erdreich gespeichert ist, wird der oberflächennahe Bereich durch die Solarstrahlung erwärmt, mit zunehmender Tiefe stammt jedoch ein ansteigender Anteil aus der Vermögensenergie, der Erdwärme (Kaltschmitt et al., 2020). Bei der Nutzung der oberflächennahen Erdwärme mittels Erdsonden oder Erdkollektoren wird das Erdreich lokal abgekühlt. Da sich eine relativ niedrige Temperatur einstellt, werden Sole-Wasser-Wärmepumpen eingesetzt (Bonin, 2023). Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie und tiefen Geothermie wird in [Unterabschnitt 2.2.2](#) erläutert.

Die Nutzung der bodennahen Luftschichten wird als aerothermische Umweltwärme bezeichnet (Umweltbundesamt, 2024d). Um Umgebungsluft als Wärmequelle zu nutzen werden Luft-Wasser-Wärmepumpen eingesetzt. Die Gefahr von Vereisungen am Verdampfer steigt mit zunehmender Luftfeuchtigkeit der Außenluft und Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt (Bonin, 2023). Luft-Luft-Wärmepumpen kommen vor allem bei Lüftungsanlagen, v. a. für Passivhäusern zum Einsatz (Bonin, 2023). Die Energieeffizienz bei der Nutzung der Umgebungsluft ist vergleichsweise niedrig, allerdings ist Umgebungsluft nahezu uneingeschränkt verfügbar und die Investitionskosten sind gering (Krimmling, 2009).

Unter der hydrothermischen Umweltwärme wird die Nutzung von Wärmeenergie verstanden, die in natürlichen Wasserressourcen wie Grundwasser, Seen, Flüssen oder Meeren gespeichert ist. (Umweltbundesamt, 2024d). Vorteil gegenüber der Umgebungsluft, mit einer stark variierenden Temperatur, stellt die konstantere Temperatur der Gewässer dar (Gaudard, Schmid & Wüest, 2018). Bei dieser Wärmequelle werden Wasser-Wasser-Wärmepumpen eingesetzt (Bonin, 2023).

Bei der Nutzung von Grundwasser wird das Wasser über einen Förderbrunnen aus dem Untergrund entnommen. Der Wärmeentzug erfolgt durch die Wärmepumpe und das abgekühlte Wasser wird anschließend über einen Schluckbrunnen wieder in das Aquifersystem zurückgeleitet (Bonin, 2023).

Bei der Nutzung von Oberflächengewässern können stehende Gewässer (Seen, Meer) und Fließgewässer (Flüsse) genutzt werden. Je nachdem, ob ein Oberflächengewässer für die Wärme- oder Kältenutzung eingesetzt wird, findet die Einleitung von abgekühlten bzw. erwärmten Wasser statt. Je nach Beschaffenheit des Gewässers eignet es sich für unterschiedliche Anwendungen. Flüsse nahe der Mündung, Gebirgsflüsse, sind durch einen geringen Durchfluss, schnell fließendes und kaltes Wasser gekennzeichnet. Diese Flüsse sind daher vor allem für eine Kältenutzung geeignet. Flachlandflüsse hingegen sind durch höhere Durchflüsse, langsames Wasser und höhere Temperaturen geprägt.



Sie eignen sich daher vor allem für die Wärmenutzung (Gaudard, Schmid, Wüest, Bryner & Penicka, 2022).

Seen sind durch ihre Schichtung geprägt. Insbesondere die oberen 15 m unterliegen Temperaturschwankungen und einer hohen biologischen Aktivität und Wasser sollten entsprechend tiefer entnommen werden. Für die Kältenutzung sollten die Entnahmen erst unter 30 m stattfinden (Gaudard et al., 2022). Die zulässige Entnahmetiefe liegt bei 0 m bis 40 m und die zulässige Rückgabtiefe bei 20 m bis 40 m (Peters et al., 2020). Durch die Einleitung von erwärmtem oder abgekühltem Wasser kann es zu Wasserverlagerungen zwischen verschiedenen Schichten kommen (Gaudard et al., 2022).

Das Potenzial von Seen

$$E_{\text{pot,see}} = cV \Delta T \quad (2.10)$$

berechnet sich aus der volumetrischen spezifischen Wärmekapazität von Wasser  $c\rho = 4,2 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ , dem Wasservolumen  $V$  in  $\text{m}^3$ , das in den See zurückgeführt wird und der Temperaturveränderung des Wasservolumens  $\Delta T$  in K berechnet werden (Gaudard et al., 2018). Das Potenzial von Fließgewässern

$$E_{\text{pot,fluss}} = cQ \Delta T t \quad (2.11)$$

berechnet sich analog aus der volumetrischen spezifischen Wärmekapazität, dem Durchfluss  $Q$  in  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ , der Temperaturveränderung  $\Delta T$  und der Betrachtungsdauer  $t$  (Gaudard et al., 2018). In beiden Fällen wird ein zusätzlicher Teil der Wärme durch die Wärmepumpe bereitgestellt (siehe Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.4).

Zu den Herausforderungen der Nutzung von hydrothermischen Wärmequellen zählen bei der Nutzung von Grundwasser:

- Zu niedrige Wasserqualität (Bonin, 2023)
- Zu hohe Eisen- und Mangengehalte des Grundwassers. Diese führen zu Ablagerungen und damit zu einem Zusetzen des Schluckbrunnens und des Verdampfers (Bonin, 2023)

und bei der Nutzung von Oberflächengewässern, wie Seen und Flüssen:

- Zu kalte Temperaturen im Winter (Gaudard et al., 2018)
- Einleitung von erwärmtem Wasser (Kältenutzung): zusätzlichen Stress für die Ökosysteme, die aufgrund des Klimawandels teilweise bereits stark belastet sind (Gaudard et al., 2022)
- Aufwuchs, wie durch Algen und Muscheln. Dies wird insbesondere durch warmes, nährstoffreiches Wasser gefördert (Gaudard et al., 2022)

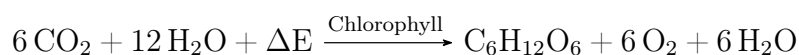
- Nutzung kleinerer Flüsse, die aufgrund der zu hohen Temperaturen im Sommer und zu niedrigen Temperaturen im Winter, oft nicht effektiv genutzt werden können (Gaudard et al., 2018)

Die Wahl der Umgebungsenergiequelle hängt daher von dem Anwendungszweck und den verfügbaren Ressourcen ab. Da in dieser Arbeit das Potenzial von Fließgewässern untersucht wird, wird in [Abschnitt 2.4](#) detailliert auf die verschiedenen Aspekte der thermischen Nutzung von Fließgewässern eingegangen.

## 2.2.4 Biomasse

Unter Biomasse fallen sämtliche Stoffe organischen Ursprungs (Wesselak et al., 2017). Wie in [Abbildung 2.2](#) zu erkennen, handelt es sich bei der Biomasse um indirekte Sonnenenergie. Diese kann in feste, flüssige und gasförmige Energieträger umgewandelt werden (Wesselak et al., 2017). Die Grenze von Biomasse zu fossilen Energieträgern liegt beim Torf, welcher nicht mehr zur Biomasse gezählt wird (Wesselak et al., 2017). Biomasse gilt als regenerative Energiequelle, wenn nur so viel Biomasse genutzt wird, wie nachwachsen kann (Quaschnig, 2015). Zu der Biomasse zählen Holz und holzartige Reststoffe aus der Forst- und Landwirtschaft, Landschaftspflege und Industrie, landwirtschaftliche Produkte (Zuckerrüben, Kartoffeln, Ölpflanzen u. a.) und Reststoffe (Stroh, Spelzen u. a.), organische Reststoffe, Altholz (Abbruchholz, Eisenbahnschwellen u. a.) und spezielle Energiepflanzen (Kurzumtriebshölzer, Miscanthus u. a.) (Wesselak et al., 2017).

Pflanzen betreiben Photosynthese, indem sie Sonnenenergie nutzen, um Kohlendioxid und Wasser gemäß der Reaktionsgleichung



in Glucose umzuwandeln, wobei Sauerstoff und Wasser als Nebenprodukte entstehen. Ein Teil des organischen Kohlenstoffs wird von der Pflanze selbst für das Wachstum verbraucht. Zudem kann nicht die gesamte eingestrahelte Sonnenenergie genutzt werden (Wesselak et al., 2017). Der Wirkungsgrad berechnet sich aus dem Heizwert der auf einer bestimmten Fläche über einen bestimmten Zeitraum hinzukommenden Biomasse dividiert durch die entsprechende Sonnenenergie, die auf dieser Fläche eintrifft (Quaschnig, 2015). Der Wirkungsgrad gibt an, welcher Teil der Sonnenenergie in Biomasse umgesetzt wird. Der durchschnittliche Wirkungsgrad der gesamten Biomasseproduktion liegt bei 0,14 % (Quaschnig, 2015).

Die Biomasserohstoffe werden durch Trocknung, Pressung, Gärung zu Alkohol, Umwandlung in Biogas oder Pelletration in feste, flüssige oder gasförmige Biomasseenergieträger aufbereitet (Quaschnig, 2015). Biomasse weist im Vergleich zu fossilen Energieträgern einen niedrigeren Energiegehalt, einen hohen Wassergehalt und eine geringe Schüttdichte auf. Daher stellen sie eine regionale Energiequelle dar, deren Transport über



lange Wege als unwirtschaftlich anzusehen ist (Wesselak et al., 2017). Biomasseverbrennungsanlagen existieren als kleine Feuerungen zur Raumheizung bis zu großen Kraftwerken (Wesselak et al., 2017). In Anlagen, die ausschließlich der Wärmebereitstellung in Gebäuden dienen, werden überwiegend Holzbrennstoffe eingesetzt (Krimmling, 2009). Energetisch sinnvoll ist es jedoch, wenn Brennstoffe in einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage eingesetzt werden (Krimmling, 2009). Bei den Gebäudeheizsystemen können die Zentralheizung und die Einzelheizung unterschieden werden. Wärmeerzeuger, die Luft erwärmen, kommen vor allem bei Einzelheizungen wie Kaminen zum Einsatz. Wärmeerzeuger bestehen aus den drei Komponenten: Brennkammer und Wärmeübertrager, Brennstoffbevorratung sowie dem Abgassystem (Krimmling, 2009). Im Gebäudebereich kommen als Zentralheizung vor allem Pumpenwarmwasserheizungen zum Einsatz. Diese werden mit Stückholz, Pellets oder Holzhackschnitzeln befeuert. Die Befuerung bei Einzelheizungen erfolgt mit Stückholz oder Pellets (Krimmling, 2009).

Um Bioenergieträger zu beurteilen müssen die physikalischen und chemischen Charakterisierungen betrachtet werden. Feuchte Biomasse

$$w = \frac{m_W}{m_W + m_B} = \frac{u}{1 + u} \quad (2.12)$$

setzt sich aus der Trockenmasse  $m_B$  und der enthaltenen Wassermasse  $m_W$  zusammen (Wesselak et al., 2017).

Die Brennstoff-Feuchte

$$f = \frac{m_W}{m_B} = \frac{w}{1 - w} \quad (2.13)$$

ist auf die Trockenmasse bezogen. Sie beschreibt die im Brennstoff gebundene Wassermasse  $m_W$  bezogen auf die trockene Biomasse  $m_B$  (Wesselak et al., 2017).

Zur Beurteilung wird der Heizwert  $H_f$  als relevante Größe herangezogen. Dieser beschreibt die Wärmemenge, die bei einer vollständigen Oxidation eines Brennstoffes ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme freigesetzt wird. Die Heizwerte werden im absolut trockenem Zustand angegeben, da der Heizwert eines biogenen Festbrennstoffs stärker vom Wassergehalt  $w$  als von der Biomassenart selbst beeinflusst wird (Wesselak et al., 2017). Der Heizwert

$$H_{f,(w)} \text{MJ kg}^{-1} = \frac{H_{f,(wf)} \text{MJ kg}^{-1} (100 - w) - 2,44 w}{100} \quad (2.14)$$

ist der Heizwert bei einem bestimmten Wassergehalt  $w$  in  $\text{MJ kg}^{-1}$ , während  $H_{f,(wf)}$  der Heizwert der Trockenmasse in trockenem Zustand ist und 2,44 die Verdampfungswärme des Wassers in  $\text{MJ kg}^{-1}$  bezogen auf  $25^\circ\text{C}$  darstellt. Bei der Verbrennung wird Wasserdampf freigesetzt, wobei der Umgebung Wärme entzogen wird. Durch diese Rauchgasabkühlung kommt es zur Kondensation und der Freisetzung latenter Wärme.

Diese kann nutzbar gemacht werden. Wird diese mit berücksichtigt, spricht man vom Brennwert  $H_s$  (Wesselak et al., 2017).

Um die Energiemenge abzuschätzen muss zunächst die verfügbare Masse  $m$  bestimmt oder geschätzt werden, was unterschiedlich komplex sein kann und von der Art des verwendeten Stoffes abhängig ist. Das thermische Potenzial

$$Q_{\text{Nutz}} = m H_{f,(w)} \quad (2.15)$$

ergibt sich aus der Multiplikation der Menge des Brennstoffs mit dem Heizwert  $H_{f,(w)}$  bei einem bestimmten Wassergehalt  $w$ . Die Masse  $m$  des jeweiligen Biomasseart muss inklusive Wasser bestimmt werden (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2014).

### 2.2.5 Abwärme

Bei industriellen Prozessen oder Prozessen im Gewerbe wird die bezogene Energie meist nicht vollständig in Nutzenergie umgewandelt. Ein Teil fällt als ungenutzte Wärme an. Diese Abwärme bezeichnet also die Wärme, die bei fast jeden thermischen oder mechanischen Prozess entsteht. Die Abwärme ist meistens an flüssige oder gasförmige Trägermedien gebunden, wie Prozessgase, Wasser sowie Luft oder sie wird über Wärmestrahlung und über Konvektionsströme an die Umgebung übertragen (Dehli, 2020). Nach dem WPG (Bundesrepublik Deutschland, 2023a) ist Abwärme dabei beschränkt auf unvermeidbare Abwärme. Also Abwärme die als unvermeidbares Nebenprodukt anfällt, nicht verringert oder im Produktionsprozess nicht anders genutzt werden kann, zum Beispiel aus wirtschaftlichen oder sicherheitstechnischen Gründen.

Abwärme kann nach Dehli (2020) nach den unterschiedlichen Temperaturniveaus unterschieden werden:

- 20 °C bis 40 °C: Raumlufttechnische Anlagen
- 40 °C bis 90 °C: Prozessanlagen, Trocknungsanlagen, Druckluftherzeugungsanlagen, Kälteanlagen, warmes Abwasser und Kühlwasser
- 100 °C bis 150 °C: Wasserdampf aus Dampferzeugungssystemen
- 100 °C bis 1000 °C: Abgase aus Verbrennungs- und Wärmeprozessen

Relevante Quellen für die Wärmeversorgung sind zum Beispiel Rechenzentren. Die Kühleinheiten von (Höchstleistungs-)Rechenzentren können Rücklauftemperaturen von bis zu 60 °C erreichen (Peters et al., 2020). Abwasser stellt ebenfalls eine Quelle dar. Im Vorlauf einer Kläranlage kann diese direkt genutzt werden für einzelne Gebäude, Quartiere oder KNW. Im Auslauf kann die Abwärme in Kombination mit einer Groß-Wärmepumpe genutzt werden. Die spezifischen Daten müssen bei dem Abwasserwirtschaftsbetrieb angefragt werden (Peters et al., 2020). Falls noch nicht

energetisch genutzt, kann auch die Abwärme in Anlagen zur thermischen Abfallverwertung genutzt werden (Peters et al., 2020). Zudem, gibt es Abwärme aus Industrie- oder Gewerbeprozessen (Miró, Brückner & Cabeza, 2015).

Die Temperatur der verfügbaren Wärme  $T$  gegenüber der Umgebungstemperatur  $T_{\text{umg}}$  beeinflusst den Anteil der Gesamtenergie der Arbeit verrichten kann. Dieser Anteil wird als Exergie

$$E_Q = Q \left( 1 - \frac{T_{\text{umg}}}{T} \right) \quad (2.16)$$

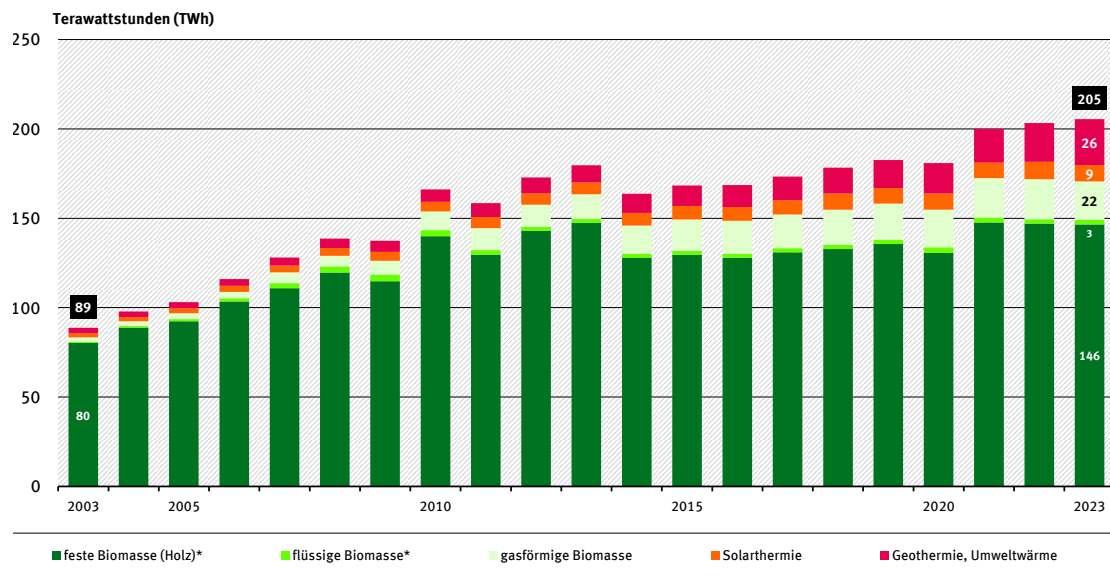
bezeichnet (Dehli, 2020). Hochtemperaturwärme kann in hochwertige mechanische Arbeit überführt werden, da sie zu einem Großteil aus Exergie besteht. Niedertemperaturwärme hingegen besteht zu einem geringeren Anteil aus Exergie und kann für die Niedertemperaturwärmeversorgung (Raumheizung und Brauchwassererwärmung) genutzt werden (Dehli, 2020). Mithilfe von Wärmeübertragern und Wärmepumpen kann diese für die Wärmeversorgung nutzbar gemacht werden. Kann die Abwärme in dem Prozess selbst nicht wieder eingespeist werden oder innerhalb des Betriebes oder nahe gelegenen Betriebes, kann sie bei einem niedrigen Temperaturniveau von 30 °C bis 75 °C für die Raumwärme- und Warmwassererzeugung in Kombination mit einer Wärmepumpe genutzt werden (siehe Abschnitt 2.1). Bei einem Temperaturniveau von 75 bis 125 °C kann sie für die Brauchwassererwärmung und Heizung genutzt werden (Dehli, 2020). Ab ausreichenden Wärmemengen und ab etwa 90 °C kann sie in ein vorhandenes Nah- oder Fernwärmenetz eingespeist werden (Dehli, 2020).

Bei der Erfassung von unvermeidbaren Abwärmequellen sind das Temperaturniveau, der Abwärmestrom, das Transportfluid (Abluft, Abwasser, Abgas, Kühlwasser), die zeitliche Verfügbarkeit und die örtliche Lage zu berücksichtigen (Dehli, 2020).

### 2.3 Erneuerbare Wärmequellen in Deutschland

Der Anteil erneuerbarer Energien am EEV für Wärme und Kälte (einschließlich Fernwärmeverbrauch) lag 2023 bei 18,8 % (Umweltbundesamt, 2024e). Im Gegensatz zum Vorjahr (2022: 17,5 %) ist der Wert leicht gestiegen. Das liegt zum einem an einem Rückgang des Prozesswärmebedarfs in der Industrie, der vorrangig mit fossilen Energieträgern gedeckt wird, und zum anderen an einem Anstieg der Nutzung von Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energieträgern in Haushalten (Umweltbundesamt, 2024c).

Den größten Anteil an den erneuerbaren Wärmequellen macht mit 83 % die Biomasse (inklusive des biogenen Anteils des Abfalls) aus. Die feste Biomasse stellt den größten Anteil an Wärme bereit (131,6 TW h). Biogas und Biomethan stellen 19,2 TW h bereit, biogener Abfall 14,9 TW h und flüssige Biomasse 2,6 TW h. Insgesamt sank die Energiebereitstellung von Biomasse und biogenem Abfall um etwa 1 % gegenüber dem Vorjahr (Umweltbundesamt, 2024c).



**Abbildung 2.4** Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energien. Übernommen aus Umweltbundesamt (2024b). Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis UBA, AGEE-Stat: “Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (Stand 02/2024). Lizenziert unter [CC BY-NC-ND 4.0 DEED](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

\* feste Biomasse inklusive des biogenen Anteils des Abfalls (in Abfallverbrennungsanlagen mit 50 Prozent angesetzt), Klärschlamm und Holzkohle; flüssige Biomasse inklusive Biodieselerverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft, Baugewerbe und Militär

Insgesamt wurden aus Geothermie und Umweltwärme (mit tiefeingeothermischen und balneologischen Anlagen) 25,7 TW h Wärme bereitgestellt, was einen Anstieg von 18 % zum Vorjahr bedeutet. Damit macht dies 12,5 % der gesamten erneuerbaren Wärme aus (Umweltbundesamt, 2024c).

Aufgrund der niedrigen Solarstrahlung 2023 sank die Wärmeerzeugung aus Solarthermie um 6 % von 9,7 TW h (2022) auf 9,1 TW h. 2023 wurde weniger neue Kollektorfläche installiert als im Jahr 2022, da es im Vorjahr aufgrund der Energiekrise eine erhöhte Nachfrage gab. Durch den zusätzlichen Rückbau von Altanlagen verändert sich die Kollektorfläche 2023 demnach gegenüber 2022 nicht nennenswert (Umweltbundesamt, 2024c).

## 2.4 Thermische Nutzung von Fließgewässern

Die in Oberflächengewässern gespeicherte Wärme zählt, wie in [Unterabschnitt 2.2.3](#) erläutert, neben der Umgebungsluft und dem oberen Erdreich zu der Wärmequelle Umweltwärme. Die thermische Energie ist in dem Flusswasser gespeichert und kann für die Wärmeversorgung genutzt werden (Krimmling, 2009). Es handelt es sich um eine Niedertemperaturwärmequelle bei der entsprechende Systeme erforderlich sind, um die

Wärme für Raumwärme oder zur Warmwasserbereitung nutzen zu können (Quaschnig, 2015).

In diesem Abschnitt werden zunächst die technologischen Anforderungen erläutert. Anschließend werden die physikalischen Eigenschaften von Gewässern und die möglichen Auswirkungen durch die thermische Nutzung thematisiert. Die Nutzung der Gewässer unterliegen verschiedenen Gesetzen, die anschließend dargestellt werden. Abschließend wird auf die Potenzialberechnung eingegangen.

### 2.4.1 Technologische Anforderungen

Das Temperaturniveau von Oberflächengewässern liegt unterhalb dem der Wärmeanwendung (Quaschnig, 2015). Durch Flusswärmepumpen kann die im Flusswasser gespeicherte Wärme nutzbar gemacht werden. Das Funktionsprinzip einer Wärmepumpe wird in Abschnitt 2.1 erklärt. Auf der Niederdruckseite wird durch die Umweltenergie bzw. durch die thermische Energie der Fließgewässer das Kältemittel verdampft und die Wärme aufgenommen (Krimmling, 2009).

Bei der thermischen Nutzung von Fließgewässern kann zwischen dem offenen und geschlossenen System unterschieden werden. Bei dem offenen System findet eine Entnahme des Flusswassers statt und die Wärmeübertragung am Verdampfer erfolgt durch das entnommene Flusswasser. Die Wärme wird auf das Kältemittel des Wärmepumpenkreislaufs übertragen. Die Temperatur des entnommenen Flusswassers wird verringert. Anschließend wird das abgekühlte Flusswasser zurück in das Gewässer geleitet. Durch den direkten Kontakt zwischen Flusswasser und Verdampfer kann es durch zu niedrige Gewässertemperaturen zu Vereisungen kommen. Die Ausgangstemperatur des Flusswassers muss daher hoch genug sein, um bei der angewendeten Temperaturspreizung nicht unterhalb eines Mindestwertes zu fallen (Huttrer, 1997). Bei einem geschlossenem System wird der Wärmeübertrager, sofern die lokale Fließgeschwindigkeit hoch genug ist, im Gewässer angebracht (Huttrer, 1997; Gaudard et al., 2022).

Zusätzlich kann zwischen einer direkten und einer indirekten Nutzung unterschieden werden. Bei der direkten Nutzung findet der Wärmeentzug des Oberflächenwassers im Verdampfer statt. Bei der indirekten Nutzung wird zwischen Wärmepumpe und Gewässer ein Wärmetauscher geschaltet. In diesem Zwischenkreislauf wird die Flusswärme auf das Wärmeträgermedium des Zwischenkreislaufs übertragen. Die Wärme wird über den Zwischenkreislauf am Verdampfer auf das Kältemittel übertragen. Die direkte Nutzung erfordert durch den direkten Kontakt strengere Temperaturgrenzen und eine höhere Wasserqualität, um den Verdampfer nicht zu beschädigen. Bei der indirekten Nutzung kann als Wärmeträgermedium des Zwischenkreislaufs ein Frostschutzmittel eingesetzt werden, wodurch die Gefahr von Vereisungen vermieden wird (GebäudeKlima Schweiz, 2014). Werden wassergefährdende Frostschutzmittel oder Wärmeträgermedien eingesetzt, müssen Schutzvorkehrungen und Sicherheitseinrichtungen vorgesehen werden und der Umgang, sowie die Prüfung unterliegt weiteren Fachstellen (Berger, 2011).

Der genutzte Durchfluss sollte nach der Normleistung oder nach der maximalen Kälteleistung gewählt werden. Der minimale und maximale Durchflussmenge ist abhängig von der eingesetzten Wärmepumpe. Durch zu geringe Durchflussmengen kommt es zu einer Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit und Wärmeübertragungsleistung im Verdampfer der Wärmepumpe und Zwischenkreislauf. Zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten führen zu mechanischer Erosion am Verdampfer (GebäudeKlima Schweiz, 2014).

Das Flusswasser kann auch zur Kühlung in der Industrie oder zur Klimatisierung eingesetzt werden. Sind die Temperaturen des entnommenen Flusswassers niedrig genug, kann es direkt eingesetzt werden (Gaudard et al., 2017). Etwa wird Flusswasser zur Kühlung in Kohle- und Kernkraftwerken eingesetzt. Nach einer Studie von Raptis, van Vliet und Pfister (2016) weist der Mississippi die höchste Anzahl an Fällen auf an denen die Erwärmung des Flusswassers durch thermische Emissionen die 3 °C Grenze erreicht oder überschreitet. Die Erwärmung des Rheins findet vor allem aufgrund der thermischen Emissionen durch die Kernkraftwerke statt. Laut dieser Studie ist der Rhein das am stärksten thermisch belastete Einzugsgebiet im Verhältnis zum Gesamtdurchfluss pro Wassereinzugsgebiet. Im Jahresdurchschnitt erfährt ein Drittel des Gesamtdurchflusses des Rheins eine Erwärmung von 5 °C (Raptis et al., 2016).

## 2.4.2 Physikalische Eigenschaften von Fließgewässern

Bei Fließgewässern handelt es sich um den Oberflächenabfluss bei welchen das Wasser dem geringsten Widerstand und dem Gefälle folgt. Der Oberlauf eines Gewässers ist durch niedrige Temperaturen und schnell fließendes Wasser geprägt. Weiter stromabwärts werden die Strömungsgeschwindigkeiten geringer und die Gewässertemperatur nimmt zu. Das Gewässerbett ist im Oberlauf schmal, grobsteiniger und das Gewässer weist abwechselnd lenitische (geringe bis keine Strömungsgeschwindigkeiten) und lotische Bereiche (starke Wasserbewegungen) auf. Stromabwärts wird der Strom breiter, während er im Mittellauf mäandriert. Im Unterlauf (Potamal) herrschen potamale Bedingungen: langsame Fließgeschwindigkeiten, breiteres Flussbett, höhere Sedimentablagerungen (Campbell, N., A. & Reece, J., B., 2009).

Flüsse und andere Gewässer ermöglichen eine effiziente thermische Nutzung aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser und der daraus resultierenden effizienten Wärmespeicherung. Im Frühling und Sommer nehmen die Oberflächengewässer Wärme durch die solare Strahlung auf, welche im Winter wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Die tägliche und jahreszeitliche Variabilität ist deutlich geringer ausgeprägt als bei der Lufttemperatur (Gaudard et al., 2017).

Die Flusstemperatur ist primär durch den Austausch mit der Atmosphäre bestimmt. Daneben spielen auch die Topographie, der Abfluss und das Flussbett eine Rolle (Caissie, 2006). Zu den atmosphärischen Bedingungen zählen die Solareinstrahlung, die Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Niederschlag sowie Phasenveränderungen, wie Schmelzen. Zu den Eigenschaften der Topographie gehören die Ausrichtung oder



die Verschattung des Geländes. Der Grundwasserzuffluss und die Wärmeleitung durch Sedimente zählen zu den Eigenschaften des Flussbettes. Der Abfluss ist charakterisiert durch die Reibung im Flussbett, die Wassermenge, die Turbulenz, die Neigung und Wasserfälle sowie durch Zuflüsse und Abzweigungen (Caissie, 2006).

### 2.4.3 Ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung

Die primäre Auswirkung der thermischen Nutzung auf das Fließgewässer ist die Veränderung der Temperatur. Wird das Flusswasser für die Wärmeversorgung genutzt, wird die Temperatur des ungenutzten Wassers erniedrigt. Bei einer Nutzung für die Kühlung wird die Temperatur erhöht (Gaudard et al., 2017). Das entnommene Wasser wird nach der thermischen Veränderung in das Gewässer, zumeist das Entnahmegewässer, zurückgeleitet. Dies wird als thermische Einleitung bzw. thermische Verschmutzung bezeichnet (Gaudard et al., 2017; Lugg & Copeland, 2014).

Die Temperatur des Wassers hat Einfluss auf verschiedene natürliche Prozesse des Gewässers und weist unterschiedliche Eigenschaften auf. Kaltes Wasser ist spezifisch schwerer und löst mehr Sauerstoff. Steigt die Temperatur, laufen auch chemische Prozesse schneller ab (Gaudard et al., 2017). Zunächst durchmischt sich das eingeleitete Wasser mit dem unbenutzten Flusswasser. Dies kann je nach Eigenschaften des Gewässers über einige Kilometer nach der Einleitungsstelle andauern (Lugg & Copeland, 2014), wobei es zu einer seitlich heterogenen Verteilung der Temperatur des Flusses kommen kann. Eine turbulente Strömung fördert eine schnellere Durchmischung (Gaudard et al., 2017). Im weiteren Flussverlauf wird der natürliche Zustand durch den Austausch mit der Atmosphäre und Zuflüsse wieder angenähert. Dennoch kann ein Teil der thermischen Verunreinigung Seen oder das Meer erreichen (Gaudard et al., 2019). Weisen die Einleitungsstelle und die Entnahmestelle eine hohe räumliche Distanz auf, kommt es zu einer Verlagerung von Nährstoffen (Gaudard et al., 2017).

Die Temperatur der Fließgewässer beeinflusst eine Vielzahl aquatischer Organismen, darunter Bakterien, Algen, Wirbeltiere, Wirbellose und Salmoniden. Die aquatischen Lebewesen haben ideale Temperaturbereiche, diese bestimmen ihre geografische Verteilung und die spezifischen Lebensräume, die sie besiedeln. Temperaturveränderungen beeinflussen das Wachstum, die Bewegungen und das Verhalten, die Fortpflanzung und die Mortalität (Caissie, 2006; Lugg & Copeland, 2014). Mikroorganismen sind meistens widerstandsfähiger als komplexe Organismen. Vor allem die Erwärmung im Sommer ist als kritisch zu betrachten, da viele Arten aufgrund des Klimawandels bereits an ihrer thermischen Obergrenze leben (Gaudard et al., 2017). Eine zu starke Abkühlung ist ebenfalls kritisch, da dadurch die Entwicklung des Fischlaichs verhindert wird (Gaudard et al., 2017).

### 2.4.4 Rechtliche Rahmenbedingungen

Um Oberflächengewässer, hier insbesondere Fließgewässer, für die Wärme- und Kälteversorgung zu nutzen muss der rechtliche Rahmen berücksichtigt werden. An oberster Stelle steht die **Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)** der Europäischen Union. Auf Bundesebene gilt das **Wasserhaushaltsgesetz (WHG)** und die **Oberflächengewässerordnung (OGewV)**. Zudem gibt es auf Bundeslandebene die Landeswassergesetze. Im Folgenden werden die Gesetze und Verordnungen vorgestellt, wobei der Fokus auf die relevanten Aspekte für die thermische Nutzung gelegt wird. Aufgrund des technischen Schwerpunkts dieser Arbeit erfolgt dies ohne Anspruch auf Vollständigkeit und rechtliche Richtigkeit. Zuletzt soll auf die gesetzlichen Regelungen der Schweiz eingegangen werden, da die schweizer **Gewässerschutzverordnung (GSchV)** zum Schutz der Gewässer konkrete Temperaturgrenzwerte enthält.

#### **Wasserrahmenrichtlinie - WRRL**

Die **WRRL (Europäische Union, 2000)** ist eine Richtlinie der Europäischen Union, die 2000 in Kraft trat. Ihr Ziel ist es, einen umfassenden Schutz für das Wasser in der EU zu gewährleisten, indem sie einen Rahmen für den Schutz und die Verbesserung der Wasserqualität in Flüssen, Seen, Küstengewässern und Grundwasser festlegt. Zu den Zielen zählen nach Artikel 1 eine weitere Verschlechterung der Gewässer zu vermeiden, den Zustand der aquatischen Ökosysteme zu verbessern, eine nachhaltige Wassernutzung zu fördern und die vorhandenen Ressourcen auf lange Sicht zu schützen und die Verschmutzung durch gefährliche Stoffe zu reduzieren.

Nach Artikel 11 gehören zu den grundlegenden Maßnahmen die jeder Mitgliedsstaat zu erfüllen hat Maßnahmen die eine effiziente und nachhaltige Wassernutzung fördern und die genannten Ziele nicht gefährden. Insbesondere müssen Schutzgebiete beachtet werden, denen über die gemeinschaftlichen Rechtsvorschriften hinaus ein besonderer Schutzbedarf besteht. Nach Artikel 6 ist jeder Mitgliedsstaat verpflichtet ein Verzeichnis oder mehrere Verzeichnisse über diese Schutzgebiete zu führen und zu pflegen. Zu den Schutzgebiete gehören nach Anhang IV Gebiete in welchen Wasser für den menschlichen Gebrauch entnommen wird, wirtschaftlich bedeutende aquatischer Arten geschützt werden müssen, Erholungs- und Badegewässer, nährstoffsensible Gebiete, sowie Gebiete, die für den Schutz von Lebensräumen oder Arten ausgewiesen wurden.

Die Mitgliedsstaaten verpflichten sich nach Artikel 4 zu den Umweltzielen. Der Zustand der Oberflächengewässer darf nicht weiter verschlechtert werden und es muss ein guter Zustand der Oberflächengewässer erreicht werden, sowie ein gutes ökologisches Potential und ein guter chemischer Zustand. Nach Anhang V gehören die Temperaturverhältnisse zu den Qualitätskomponenten für die Einstufung des ökologischen Zustands der Oberflächengewässer. In Bezug auf physikalisch-chemische Qualitätskomponenten wird ein sehr guter Zustand dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturen keine Anzeichen anthropogener Störungen zeigen bzw. in einem Bereich liegen der „normalerweise bei Abwesenheit störender Einflüsse festzustellen ist“ (Europäische Union, 2000). Bei einem



guten Zustand liegen die Temperaturwerte innerhalb eines Bereichs der die „Funktionsfähigkeit des typspezifischen Ökosystems und die Einhaltung der oben beschriebenen Werte für die biologischen Qualitätskomponenten gewährleistet“.

### **Wasserhaushaltsgesetz - WHG**

Das WHG (Bundesrepublik Deutschland, 2023b) dient unter anderem der Umsetzung der WRRL. Es hat nach §1 den Zweck durch eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung die Gewässer zu schützen (Bundesrepublik Deutschland, 2023b). In dem Gesetz ist geregelt, dass für eine Benutzung des Gewässers einer Erlaubnis oder Bewilligung eingeholt werden muss. Zu einer Benutzung zählt nach §9 das Entnehmen und Ableiten von Wasser aus oberirdischen Gewässern, wie es bei der thermischen Nutzung der Fall ist (Unterabschnitt 2.4.1). Nach §6 müssen die Gewässer so bewirtschaftet werden, dass nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit vermieden werden. Nach §27 sind die Oberflächengewässer so bewirtschaften, dass der ökologische und chemische Zustand nicht verschlechtert wird bzw. ein guter ökologischer und chemischer Zustand erreicht wird. Nach §33 muss bei einer Entnahme und Ableitung von Wasser die Abflussmenge gleichbleiben. Die entnommene Wassermenge für die thermische Nutzung muss entsprechend der rückgeleiteten Wassermenge in das gleiche Gewässer entsprechen. In Abschnitt 3 wird der Umgang mit wassergefährdenden Stoffen geregelt (Bundesrepublik Deutschland, 2023b). In Unterabschnitt 2.4.1 wird der mögliche Einsatz von Frostschutzmitteln erläutert. Diese fallen unter wassergefährdende Stoffe. Nach §62 müssen die Anlagen zum Verwenden wassergefährdender Stoffe so beschaffen sein, dass mit keiner nachteiligen Veränderung der Eigenschaften des Gewässers zu rechnen ist.

### **Oberflächengewässerverordnung - OGewV**

Die OGewV ist eine Verordnung auf Bundesebene, die detaillierte Regelungen zur Umsetzung der WRRL der Europäischen Union in Bezug auf Oberflächengewässer festlegt. Die OGewV dient der Sicherstellung eines guten chemischen und ökologischen Zustands der Oberflächengewässer und legt spezifische Umweltziele sowie Überwachungs- und Maßnahmenprogramme fest (Bundesrepublik Deutschland, 2020). Nach §1 hat sie den Zweck die Oberflächengewässer zu schützen und dient der wirtschaftlichen Analyse der Nutzungen ihres Wassers (Bundesrepublik Deutschland, 2020). In der Verordnung sind die verschiedenen ökologischen Zustände definiert aufgeteilt nach biologischen, hydromorphologischen sowie physikalisch-chemischen und chemischen Qualitätskomponenten. Die Temperaturanforderungen für einen sehr guten und guten ökologischen Zustand entsprechen den Angaben im Absatz der WRRL. Die Verordnung enthält jedoch Bewertungsverfahren und Grenzwerte der ökologischen Qualitätsquotienten für die verschiedenen Gewässertypen.

In Anlage 7 der OGewV werden die Temperaturanforderungen an den sehr guten ökologischen Zustand und das höchste ökologische Potenzial, sowie die Temperaturanforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial dargestellt. Je nach Fischgemeinschaft und Gewässertyp müssen unterschiedliche Tem-

peraturgrenzwerte für die maximale Temperatur und die maximale Temperaturveränderung eingehalten werden. Die Werte sind in [Tabelle 2.2](#) zusammengefasst.

**Tabelle 2.2** Temperaturgrenzwerte nach der Oberflächengewässerverordnung (Bundesrepublik Deutschland, 2020).

Nicht berücksichtigt Gewässertypen. Temperaturdifferenzen beziehen sich auf ober- und unterhalb der Einleitungsstelle von Abwärme. Sommer (April bis November), Winter (Dezember bis März).

(**oben**) Anforderungen an den sehr guten ökologischen Zustand und das höchste ökologische Potenzial  
(**unten**) Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial.

**f/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 Epipotamals, **MP** Gewässer des Metapotamals, **HP** Gewässer des Hypopotamals

Fischgemeinschaft	Maximale Temperatur des Gesamtgewässers in °C		Maximale Temperaturerhöhung des Gesamtgewässers in K	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
f/tempff	< 18		0	
Sa-ER	< 18	≤ 8	0	≤ 1,0
Sa-MR	< 18	≤ 10	0	≤ 1,5
Sa-HR	< 18	≤ 10	0	≤ 1,5
Cyp-R	< 20	≤ 10	0	≤ 2,0
EP	< 20	≤ 10	0	≤ 3,0
MP	< 25	≤ 10	0	≤ 3,0
HP	< 25	≤ 10	0	≤ 3,0
f/tempff				
Sa-ER	≤ 20,0	≤ 8	≤ 1,5	≤ 1,0
Sa-MR	≤ 20,0	≤ 10	≤ 1,5	≤ 1,5
Sa-HR	≤ 21,5	≤ 10	≤ 1,5	≤ 1,5
Cyp-R	≤ 23	≤ 10	≤ 2,0	≤ 2,0
EP	≤ 25	≤ 10	≤ 3,0	≤ 3,0
MP	≤ 28	≤ 10	≤ 3,0	≤ 3,0
HP	≤ 28	≤ 10	≤ 3,0	≤ 3,0

## Rechtsgrundlagen der Bundesländer

Jedes Bundesland hat unter Einhaltung des [WHG](#) ein Landeswassergesetz welches ebendiese Vorgaben umsetzt und konkretisiert. Neben den Vorgaben die in dem vorangegangenen Absatz dargestellt sind enthalten die Landeswassergesetze die Einteilung der Oberflächengewässer. In dem Landeswassergesetz [NRW](#) werden die oberirdischen Gewässer in Gewässer 1. Ordnung und 2. Ordnung, sowie sonstige Gewässer eingeteilt ([Land Nordrhein-Westfalen, 2021](#)). Gewässer 1. Ordnung sind nach §3 im Besitz des Landes, soweit sie nicht Bundeswasserstraßen sind. Gewässer 2. Ordnung und sonstige Gewässer, sofern sie kein eigenes Grundstück bilden, sind Bestandteil der entsprechenden Ufergrundstücke und gehören deren Eigentümern ([Land Nordrhein-Westfalen, 2021](#)).

### Gewässerschutzverordnung - GSchV (Schweiz)

In der OGeWV sind Temperaturgrenzwerte für die Beurteilung des ökologischen Zustands in Abhängigkeit der Fischgemeinschaft und des Gewässertyps gegeben. Es handelt sich um die maximalen Temperaturen und die maximale Temperaturveränderung nach der Einleitung von Abwärme in Fließgewässer (Bundesrepublik Deutschland, 2020). Bei der thermischen Nutzung von Fließgewässern für die Wärmeversorgung wird dem entnommenen Wasser Wärme entzogen und es kommt zu Temperaturabsenkung (Gaudard et al., 2019). Zum einen handelt es sich bei den erläuterten Werten nicht um gesetzliche Grenzwerte, sondern Werte für die Beurteilung eines Gewässers und zum anderen sind für die minimale Temperatur und eine Temperaturabsenkung den vorgestellten deutschen Gesetzen keine konkreten Grenzwerte zu entnehmen. Daher werden an dieser Stelle die Schweizer Grenzwerte zum Schutz der Gewässer erläutert. Die GSchV hat ebenso den Zweck die ober- und unterirdischen Gewässer vor nachteiligen Einwirkungen schützen und deren nachhaltige Nutzung zu ermöglichen (Der Schweizerische Bundesrat, 1998). Die Verordnung enthält zur Erfüllung dieses Zwecks Maßnahmen und ökologische Ziele für Gewässer. In Tabelle 2.3 sind die Werte für die Temperaturveränderung der Fließgewässer dargestellt. Diese sind den zusätzlichen Anforderungen an Fließgewässer in Anhang 2 der GSchV entnommen. Sie beziehen sich auf die Temperaturveränderung eines Fließgewässers durch den Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand nach weitgehender Durchmischung (Der Schweizerische Bundesrat, 1998).

**Tabelle 2.3** Temperaturgrenzwerte nach der Gewässerschutzverordnung (Schweiz) (Der Schweizerische Bundesrat, 1998).

Maximale Temperatur des Gesamtgewässers	Maximale Temperaturveränderung des Gesamtgewässers	
	Keine Forellenregion	Forellenregion
$\leq 25\text{ °C}$	$\pm 3\text{ K}$	$\pm 1,5\text{ K}$

### Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG

Da, wie in Unterabschnitt 2.4.1 dargestellt, für die Nutzung von Flusswärme bauliche Maßnahmen nötig sind, wird an dieser Stelle auf unter Schutz gestellte Gebiete eingegangen. Diese werden auf nationaler Ebene in erster Linie durch das Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)) geregelt. Zu den unter Schutz gestellten Gebieten gehören unter anderem Naturschutzgebiete nach §23. Die Nutzung des Wassers durch Wärmepumpen ist nach §23 Absatz 3 und damit nach dem WHG §9 Absatz 2 Nummer 3 und 4 nicht explizit verboten. Dennoch kann an dieser Stelle nicht gewährleistet werden, dass durch die baulichen Einrichtungen §23 Absatz 2 nicht verletzt wird. Dieser verbietet Maßnahmen die zu einer Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung führen können, sowie Maßnahmen die zu einer nachhaltigen Störung des Naturschutzgebiets oder seiner Bestandteile führen können. Ebenso unter Schutz stehen nach §24 Nationalparke, Nationale Naturmonumente, und

nach § 25 Biosphärenreservate. In § 61 ist das Freihalten von Gewässern und Uferzonen geregelt. Nach Absatz 1 dürfen an Bundeswasserstraßen und Gewässern 1. Ordnung im Abstand von 50 m keine baulichen Anlagen errichtet werden. Nach Absatz 3 kann jedoch auf Antrag eine Ausnahme erlassen werden, wenn nach Satz 1 durch diese bauliche Anlage die Funktion des Gewässers und der Uferzone geringfügig ist oder die bauliche Anlage nach Satz 2 ein öffentliches Interesse hat.

### 2.4.5 Das Potenzial von Fließgewässern

Das thermische Potenzial von Fließgewässern

$$E_{\text{pot}} = \begin{cases} c \rho \Delta T Q_g t \frac{COP}{COP - 1} & \text{für Wärmeentzug} \\ c \rho \Delta T Q_g t & \text{für Wärmeeinleitung} \end{cases} \quad (2.17)$$

berechnet sich nach Gaudard et al. (2019) aus der spezifische Wärmekapazität von Wasser  $c = 4180 \text{ J kg K}^{-1}$ , der Dichte von Wasser  $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ , der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen dem unbenutzten Wasser (der Gewässertemperatur) und dem benutzten Wasser (der Temperatur des Wassers welches zurück in das Fließgewässer geleitet wird), dem genutzten Durchfluss  $Q_g$ , dem Betrachtungszeitraum  $t$ , sowie dem COP der Wärmepumpe. Der COP wird in Abschnitt 2.1 genauer erläutert. Unterschieden wird zwischen der Wärmenutzung, wenn ein Wärmeentzug stattfindet, und der Kältenutzung, wenn eine Wärmeeinleitung stattfindet (Gaudard et al., 2019). Es wird bei der Kältenutzung von einer direkten Kühlung ausgegangen, das Wasser wird also direkt für die Kühlung eingesetzt.

Das Potenzial für die Wärmenutzung

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{pot,theo}} + E_{\text{pot,wp}} \quad (2.18)$$

setzt sich aus dem theoretischen Potenzial Gleichung (2.19) und dem Teil der Wärme, der zusätzlich durch die elektrische Energie der Wärmepumpe Gleichung (2.20) bereitgestellt wird, zusammen (Gaudard et al., 2018).

$$E_{\text{pot,theo}} = c \rho Q_g t \Delta T \quad (2.19)$$

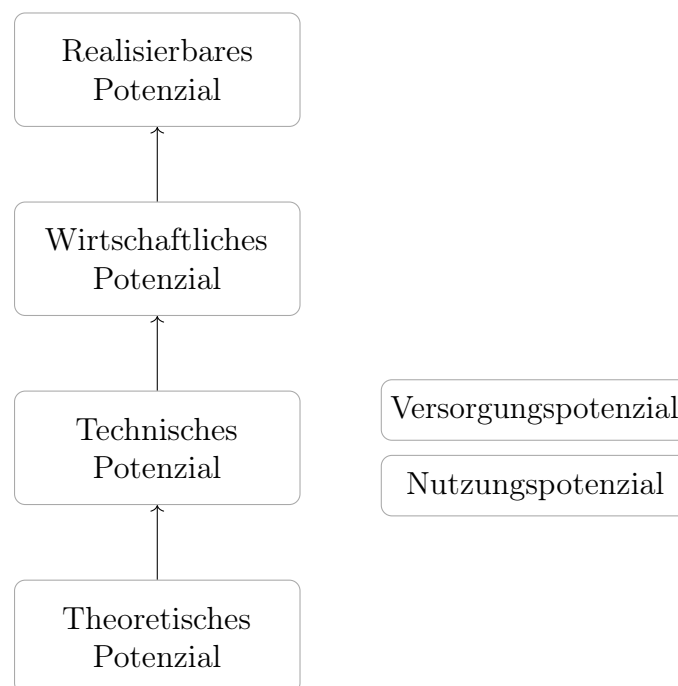
$$E_{\text{pot,wp}} = \frac{1}{COP - 1} E_{\text{pot,theo}} \quad (2.20)$$

## 2.5 Potenzialanalysen erneuerbarer Wärmequellen

Im Folgenden soll der aktuelle Forschungsstand in Bezug auf die Potenzialanalysen von erneuerbaren Energiequellen für die Wärmeversorgung vorgestellt werden. Dazu werden zunächst die unterschiedlichen Potenzialtypen definiert. In dem [Unterabschnitt 2.5.2](#) werden verschiedenen Ansätze und Studien vorgestellt die sich mit der räumlichen Potenzialanalyse der unterschiedlichen erneuerbaren Wärmequellen beschäftigen. Im [Unterabschnitt 2.5.3](#) werden Automatisierungs- und Modellierungsansätze dargestellt.

### 2.5.1 Definition von Potenzialen

Die verschiedenen Potenzialtypen können in das theoretische, technische, wirtschaftliche und realisierbare Potenzial eingeteilt werden ([Manz et al., 2024](#); [Peters et al., 2020](#)). Bei der Potenzialanalyse erneuerbarer Wärmequellen, die für die Wärmeversorgung eingesetzt werden können, können die verschiedenen Potenzialtypen betrachtet werden. Die Ebenen bilden ein Schichtenmodell welches in [Abbildung 2.5](#) veranschaulicht ist. Jedes Potenzial bildet eine Ebene, welche sich aus der vorherigen ableiten lässt. Mit jeder Ebene ergeben sich einschränkende Limitationen und Rahmenbedingungen.



**Abbildung 2.5** Übersicht über die Potenzialtypen.

Die Grundlage bildet das theoretische Potenzial. Dieses beschreibt die Gesamtwärme die eine Ressource zur Verfügung stellen könnte, es beschreibt also den maximal größten

Umfang ohne Einschränkungen (Manz et al., 2024). Die erste Unterkategorie bildet das technische Potenzial. Dieses wird durch die technischen Gegebenheiten limitiert und es werden sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen berücksichtigt (Dufter, Gruber, Guminski, von Roon & Orthofer, 2018). Nach Manz et al. (2024) kann zwischen dem Nutzungspotenzial und Versorgungspotenzial unterschieden werden. Das heißt, das Versorgungspotenzial beschreibt das Potenzial, welches technisch genutzt werden kann, während das Nutzungspotenzial das Potenzial weiter limitiert auf die Wärmemenge, welche wirklich lokal genutzt werden kann. Es wird also der lokale Bedarf berücksichtigt. In einem folgenden Schritt werden wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt, wie in Form von Wirtschaftsanalysen. Das wirtschaftliche Potenzial ist die Teilmenge des technischen Potenzials, welche wirtschaftlich genutzt werden kann (Dufter et al., 2018). Das realisierbare Potenzial ergibt sich nach Dufter et al. (2018) aus dem wirtschaftlichen und aus dem praktischen Potenzial, bei welchem auch regulatorische und administrative Hemmnisse berücksichtigt werden.

### 2.5.2 Räumliche Potenzialanalysen

Die existierenden Studien decken ein weites Feld in der Erforschung des Potenzials erneuerbarer Energien für die Wärmeversorgung ab. Im Folgenden soll einen Überblick über die bisher verwendeten Methoden und Daten geben werden die zum Einsatz kommen. Es soll ein Vergleich für je eine Wärmequelle stattfinden, um die verschiedenen Dimensionen zu vergleichen. Es wird betrachtet um welche Studie es geht und welches Ziel verfolgt wird. Der Ort bezieht sich darauf für welchen geographischen Bereich die Studie durchgeführt wurde (Europa, Deutschland o. ä.). Die räumliche Auflösung beschreibt die räumliche Auflösung der Enddaten: Entweder gibt es einen aggregierten Wert für ein bestimmtes Gebiet (wie die Länder- oder Städteebene) oder entsprechend der räumlichen Auflösung der Daten (wie die Pixelgröße bei Rasterdaten). Zudem soll die in der Studie angewandte Methodik dargestellt werden und welche Parameter berücksichtigt und berechnet werden. Wenn in der Studie für die Potenzialanalysen Daten verwendet werden, sind diese ebenfalls aufgeführt.

Allgemein können Ansätze unterschieden werden die das Ziel haben einen bestimmten Wert für ein Potenzial einer erneuerbaren Wärmequelle für ein ausgewähltes Gebiet zu ermitteln, wie etwa der Ansatz von Manz et al. (2024). Bei diesen Ansätzen wird eine spezifische Lösung erarbeitet. Dagegen stehen Ansätzen mit dem Ziel ein generischen Modells oder einer Softwarelösung zu entwickeln, wie etwa G.POT zur Ermittlung des flachen geothermischen Potenzials von Casasso und Sethi (2016). Beide Ansätze werden in Tabelle 2.5 verglichen.

Eine weitere Unterscheidung besteht darin ob eine Flächenanalyse durchgeführt wird oder das Potenzial ohne Berücksichtigung der Flächen abgeleitet wird. Der Ansatz von Pelda et al. (2020) ermittelt das Potenzial von Solarthermie für die FW anhand eines Prozentsatzes an der vorhandenen FW und daraus den benötigten Flächenbedarf (siehe Tabelle 2.4). Der Ansatz von Portmann, Galvagno-Erny, Lorenz, Schacher und Heinrich (2019) berechnet das technische Solarthermiepotenzial aus den Flächen. Es wird also

eine Flächenanalyse durchgeführt und geeignete Teildachflächen, unter Verwendung der [sonnendach.ch \(2015\)](#) Daten, ermittelt.

**Tabelle 2.4** Literaturvergleich Solarthermie.

Studie	Ziel	Ort	Räumliche Auflösung	Parameter	Methodik	Daten
Pelda et al. (2020)	Theoretisches Potenzial für die Integration in FW	Deutschland, Städte größer 100.000 Einwohner	Stadt	Wirkungsgrad Flachkollektoren: 60 % Wirkungsgrad Gesamtsystem: 50 % Durchschn. jährl. Globalstrahlung: $1054 \text{ kWh m}^{-2}$ Solaranteil: 1%/5%/15%	Berechnung des Solarertrags über Literaturwerte und dem solaren Anteil an dem vorhandenen FW. Daraus abgeleitet eine Fläche für das Gesamtsystem (Kollektoren und weitere Komponenten), um den Solaranteil am FW zu decken	FW Daten von (Peta, 2019) erweitert mit Literaturwerten
Portmann et al. (2019)	Ausgabe des Solarpotenzials einer Gemeinde. 3 Potenziale: 1. Potenzial Solarwärme, 2. Solarstrom 1 (Solarwärme und -strom), 3. Solarstrom 2 (nur Strom). 1 und 2 werden zsm. berechnet und hier betrachtet	Schweiz	Gebäude (Teildachfläche), Aggregation Gemeinde	Theoretisches Potenzial (ganze Dachfläche), Teildachflächen, Fläche Kollektoren (Reine Kollektorfläche welche benötigt wird, um den mit Kurzzeitspeicher abdeckbaren Wärmebedarf des Gebäudes zu decken), Gebäudetyp, Dachneigung, Potenzial für Solarwärme/strom (Klassen), Wärmeertrag	Dachflächen aus <a href="#">sonnendach.ch</a> : Ausschluss von Teildachflächen (kein Warmwasser oder Heizungsbedarf, Dachflächen kleiner als $10 \text{ m}^2$ , Klassifizierung jährliche Einstrahlung „gering“ oder „mittel“). Nur Teildachfläche mit größtem Solarthermieertrag wird betrachtet, alle anderen werden ausgeschlossen. Multiplikation dieser Teildachfläche mit dem Reduktionsfaktor (nach Gebäudetyp und Dachneigung). Gesamte Teildachfläche mit Solarwärme belegen, wenn das Potenzial kleiner ist als Fläche Kollektoren, sonst nur benötigten Teil belegen.	<a href="#">sonnendach.ch (2015)</a>

Bei der Ermittlung des geothermischen Potenzials kann man zwischen tiefer und oberflächennaher Geothermie unterscheiden (siehe [Unterabschnitt 2.2.2](#)). In [Tabelle 2.5](#) werden zwei Ansätze vorgestellt. Der Ansatz von [Manz et al. \(2024\)](#) ermittelt das tiefe geothermische Potenzial für Europa. Ziel der Studie ist die Ermittlung unterschiedlicher Potenziale um diese FW-Gebieten zuzuordnen. [Casasso und Sethi \(2016\)](#) hingegen stellen ein generisches Modell vor, um das flache geothermische Potenzial zu bestimmen. Es werden verschiedene physikalische Bodeneigenschaften und Parameter der Erdwärmesonden berücksichtigt. Das Modell ist entsprechend übertragbar und auf verschiedene Gebiete anwendbar. Die benötigten Parameter können aus verschiedenen Daten, wie geologischen Daten und digitalen Höhenmodellen abgeleitet werden ([Casasso & Sethi, 2016](#)).



Tabelle 2.5 Literaturvergleich Geothermie.

Studie	Ziel	Ort	Räumliche Auflösung	Parameter	Methodik	Daten
Manz et al. (2024)	Jährliches Nutzungspotenzial von petrothermaler und hydrothermaler tiefen Geothermie bestimmen um es mit anderen Potenzialen von Wärmequellen zukünftigen FW zuzuordnen	Europa	1000 m x 1000 m	Geothermischer Gradient: 30 K/1000 m, Ausbeutungstiefe 2000 bis 3000 m, $T_1$ Untergrundtemp., $T_2$ Temp. des injizierten Wasser, $\dot{V}$ Volumenstrom: 0,0194 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (petrothermal) 0,06 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (hydrothermal), $\rho$ Dichte Wasser, $c$ spez. Wärmekapazität Wasser Risikofaktor 25 % (hydrothermal), 50 % (petrothermal) benötigte Fläche 6,93 km <sup>2</sup> 3000 bis 4000 Vollaststunden pro Jahr	1. Die Temperaturwerte in 2000 m Tiefe aus Atlas of Geothermal Resources in Europe (Hurter, S. and Haenel, R., 2002) um 15 K erhöht, um Tiefe von 2000 bis 3000 m zu erhalten. 2. Mögliche hydrothermale Projekte aus dem GeoDH (2014) Datensatz identifizieren und als Vektorlayer extrahieren 3. Temperaturdaten auf Vektorlayer zuschneiden (Annahme: Hydrothermale Temp. = Gesteinstemp.) 4. Ausschluss Gewässer, Nationalparks, Gebiete über 500 m ü. NN 5. Geothermisches Potenzial mit $E_{\text{pot}} = V\rho c(T_1 - T_2)$ 6. Potenzialgebiete Diff. zw. $T_1$ und $T_2 < 15$ K, Risikofaktor und benötigte Fläche 7. Jährliches Potenzial bei Vollaststunden	Geothermal Atlas (Hurter, S. and Haenel, R., 2002), GeoDH (GeoDH, 2014)
Casasso und Sethi (2016)	Methodik G.POT, die es ermöglicht das jährliche flache Geothermie Potenzial mit Erdwärmesonden zu berechnen	Nicht ortsgebunden Bsp. für Provinz Cuneo (NW Italien)	Abhängig von den verwendeten Eingangsdaten	Tiefengemittelte Bodenwärmeleitfähigkeit $\lambda$ , Bodenwärmekapazität $\rho$ Anfängliche Bodentemperaturen $T_0$ Erdwärmesonde: Bohrlochtiefe $L$ , Bohrlochradius $r_b$ , thermischer Widerstand $R_b$ , Minimale oder maximale Trägerfluidtemperatur $T_{lim}$ Länge der Heiz- (Kühl-)Saison $t_c$ Simulationszeit $t_s$	Entwicklung einer mathematischen Berechnungsmethode um die Temp.-änderung an der Bohrlochwand zu bestimmen (Wärmeübertragungsmodell), Anpassungen und Optimierungen des Modells basierend auf Simulationen unter verschiedenen Szenarien, Berechnung des flachen geothermischen Potenzials auf Grundlage von den thermischen Eigenschaften des Bodens, der geometrischen und thermischen Eigenschaften der Erdwärmesonden, min./max. Temp des Trägerfluids, Länge der Heiz/ Kühl Saison, Simulationszeit	Daten für das Bsp. Provinz Cuneo: Geologische Karte von Piemonte (ARPA Piemont, 1976) Digitales Höhenmodell (Regione Piemonte, 2000)



Wie in [Unterabschnitt 2.2.3](#) erläutert, ist die Umweltenergie in der Umgebungsluft, Wasser oder dem Erdreich vorhanden. In [Tabelle 2.6](#) sind Ansätze dargestellt, die sich mit der in Wasser gespeicherten Umweltwärme beschäftigen. In den Ansätzen geht es um die Potenzialbestimmung. Die Temperatur der Gewässer sollte und darf, aufgrund ökologischer Auswirkungen, nicht beliebig verändert werden ([Gaudard et al., 2019](#)). Die Parameter müssen entsprechend gewählt werden, um die Temperaturgrenzen einhalten zu können ([Gaudard et al., 2019](#)). Zudem muss darauf geachtet werden, dass auch im Winter die Temperatur nicht unter  $2^{\circ}\text{C}$  sinkt und aufgrund des fehlenden Flusses in Seen die Gefahr von Vereisung auf dem Wasser besteht ([R. Lund & Persson, 2016](#)).

**Tabelle 2.6** Literaturvergleich Umweltwärme – Gewässer.

Studie	Ziel	Ort	Räumliche Auflösung	Parameter	Methodik	Daten
Ferstl, Wettberg, Hinterstocker und Möbius (2024)	Bestimmung des theoretischen Potentials als bayrischer Flüsse für die Wärmenutzung	Bayern, Deutschland	Potenzial je Fluss, Potenzialzuordnung je Gemeinde	Durchfluss $Q$ , Gesetzlicher Temperaturunterschied $\Delta T$ , $c$ spez. Wärmekapazität Wasser	Bestimmung des theoretischen Potentials durch die Multiplikation der genannten Parameter mit einer monatlichen Auflösung. Regionalisierung: Verschneidung des Gewässerachsen mit den Gemeindegrenzen. Gewichtete Verteilung des Potentials nach Flusskilometern innerhalb der Gemeinde.	Messdaten des Durchflusses, Fließgewässernetz aus dem digitalen Gewässerverzeichnis Bayern (FGN25)
Gaudard et al. (2019)	Bestimmung des Potentials der Wärmenentnahme und -abgabe der Seen, Flüsse, Seeausläufe unter Berücksichtigung der max. Temperaturänderungen in den Gewässern	Schweiz	See, Fluss(-abschnitt), Seeauslauf	Leistungskoeffizient Wärmepumpe (COP), $\rho$ Dichte Wasser, $C$ Wärmekapazität Wasser  Seen: Volumen $V_{\text{mix}}$ , in das das abgegebene Wasser erwartungsgemäß gemischt wird, zugewiesene Temperaturunterschiede für Wärmeentnahme $\Delta T_{\text{heat}}$ bzw. -abgabe $\Delta T_{\text{cool}}$ innerhalb von $V_{\text{mix}}$	Bestimmung des Bedarfs, Potentials und Nutzung eines hydrodynamischen Modells um die Auswirkungen der thermischen Nutzung der Seen abzuschätzen. Im Folgenden Potentiale.  Seen: Auswahl Seen tiefer als 30 m und einem Volumen $V > 20 \text{ Mio. m}^3$ , Ausschluss hochalpiner Reservoirs, Berechnung des jährlichen Wärmemenge die in einem See entnommen und eingeleitet werden kann unter Berücksichtigung der Parameter $\Delta T_{\text{heat}} = 0,5^{\circ}\text{C}$ , $\Delta T_{\text{cool}} = 1,0^{\circ}\text{C}$ , $V_{\text{mix}}$ abhängig von der Saison (Temperaturschichtung im Sommer).	

## 2.5 Potenzialanalysen erneuerbarer Wärmequellen

Studie	Ziel	Ort	Räumliche Auflösung	Parameter	Methodik	Daten
Zu Gaudard et al. (2019)				<p>Flüsse: zugewiesene Temperaturunterschiede für Wärmeentnahme <math>\Delta T_{\text{heat}}</math> bzw. -abgabe <math>\Delta T_{\text{cool}}</math>, Durchflussrate für die thermische Nutzung an dem Standort <math>Q_{\text{use}}</math>, Dauer einer Betriebs-saison <math>\Delta t_{\text{op}}</math></p> <p>Seeausläufe: Temperaturdifferenz zwischen einströmenden Seewasser und Auslass <math>\Delta T</math>, Durchflussrate Seeauslass <math>Q_{\text{use}}</math>, Dauer einer Betriebs-saison <math>\Delta t_{\text{op}}</math></p>	<p>Flüsse: Auswahl Standorte entlang Flüssen Abfluss <math>&gt; 1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}</math>. Berechnung der jährlichen Wärmemenge die in einem Flussabschnitt entnommen und eingeleitet werden kann unter Berücksichtigung der Parameter. Dabei max. Temperaturdifferenz zwischen ein- und ausfließendem Wasser bei der thermischen Nutzung <math>10^\circ\text{C}</math>, Durchflussrate <math>Q_{\text{use}}</math> wird so gewählt, dass die Temperaturänderung im Fluss vor und nach der thermischen Nutzung den gesetzlichen Wert von <math>1,5^\circ\text{C}</math> nicht übersteigt, Flüsse ausschließen die im Winter zu kalt sind</p> <p>Seeausläufe: v. a. Kühlung. Entnahme kaltes Wasser aus tiefen Schichten und Ableitung mit ähnlicher oder niedrigerer Temperatur in den Auslass. Berechnung der Wärmemenge die einem Auslass zugeführt werden kann anhand der Parameter. <math>Q_{\text{use}}</math> so wählen, dass das Absinken der Thermokline von Frühling bis Herbst aufgrund der thermischen Nutzung 2 m nicht überschreitet.</p>	<p>Flüsse: Daten von Abfluss- und Temperaturüberwachungsstationen</p>
R. Lund und Persson (2016)	Räumliche Analyse von acht Wärmequellen für die Nutzung in Kombination mit Wärmepumpen und unter Relation zu vorhandenen FW-Gebieten	Dänemark	Abhängig von der Wärmequelle	<p>Flüsse: Durchflussrate, maximale Abkühlung, maximaler Temperaturunterschied</p>	<p>Flüsse: Größte Flüsse (Kategorie 3) ausgewählt. Für die 10 größten Flüsse Fließgeschwindigkeit verfügbar. Für die kleineren Flüsse auf <math>5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}</math> gesetzt. Maximale Abkühlung des Wassers 2 K, Entnahme und Rückleitung maximaler Temperaturdifferenz 5 K.</p>	<p>Hintergrunddaten aus kommunalen Wasserplänen, Fließgeschwindigkeit: Ovesen et al. (2000)</p>

Studie	Ziel	Ort	Räumliche Auflösung	Parameter	Methodik	Daten
Zu R. Lund und Persson (2016)				Seen: Seevolumen, Seetiefe, maximale Abkühlung, maximaler Temperaturunterschied	Seen: Ausschluss Seen < 1 km. Annahme: gesamtes Seevolumen kann einmal pro Jahr um 2 K abgekühlt werden. Volumen des Sees ist die geographische Fläche multipliziert mit einer Tiefe von 2 m. Maximale Abkühlung des Wassers 2 K, Entnahme und Rückleitung maximaler Temperaturdifferenz 5 K.	Hintergrunddaten aus kommunalen Wasserplänen

Biomasse kann wie in [Unterabschnitt 2.2.4](#) dargestellt ebenfalls für die Wärmeversorgung eingesetzt werden. Um die vorhandene Biomasse abzuschätzen sind in [Tabelle 2.7](#) zwei Ansätze vorgestellt. [Manz et al. \(2024\)](#) konzentrieren sich darauf die Biomasse verschiedenen FW-Gebieten zuzuordnen, entnehmen dafür die geeignete Biomasse dem ENSPRESO-Datensatz und ordnen sie entsprechend räumlich zu. Die Studie von [Zyadin et al. \(2018\)](#) berechnet die vorhandene Biomasse für zwei Provinzen in Polen und stellt die Masse räumlich dar.

Tabelle 2.7 Literaturvergleich Biomasse.

Studie	Ziel	Ort	Räumliche Auflösung	Parameter	Methodik	Daten	
Manz et al. (2024)	Jährliches Nutzungspotenzial bestimmen um es mit anderen Potenzialen von Wärmequellen zukünftigen FW zuzuordnen	Europa	Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS) 2 Level	Potenzial, FW: 50 %	Anteil	Aus dem ENSPRESO Datensatz die jährlichen Werte von Rückständen aus Landwirtschaft und Forstwirtschaft sowie schnell wachsenden Energiepflanzen aus dem mittleren Szenario für das Jahr 2050 ausgewählt (sekundäre Biomasse). 50 % davon für Fernwärme. Anschließend Zuordnung zu Gebieten nach Fernwärmebedarf.	ENSPRESO (Ruiz, 2019)
Zyadin et al. (2018)	Abschätzung des wald- und landwirtschaftlichen Biomassepotenzials und Erstellung von Karten	Kujawien-Pommern und Oberschlesien, Polen	1000 m x 1000 m	Biomasse, überirdische Biomasse, Biomasseexpansionsfaktoren, Holzdichte, Landnutzungsclassen, Biomassewerte	1. Umfragen bei den Landwirten. Wald: Berechnung der oberirdischen Biomasse basierend auf den IPCC-Richtlinien und Standard-Biomasseexpansionsfaktoren sowie Holzdichtewerten für europäische Baumarten. Abzug der Stamm-Biomasse von der gesamten überirdischen Biomasse und Ausschluss von bestimmten Biomassearten, die für die Erhaltung des Bodens benötigt werden. Erstellung von Biomassekarten: Kombination Landbedeckungskarte mit dem Ergebnisgitter. Daraus resultieren Polygone mit unterschiedlichen Landnutzungsclassen. Deren Fläche wird mit dem entsprechenden Biomassewert für jeweilige landwirtschaftliche Klasse oder Waldnutzungsclassen multipliziert. Anschließend Genauigkeitsbewertung und Berechnung eines Zuverlässigkeitsniveaus für jede Klasse.	Volumen Waldbestand: Statistical Office in Katowice (2014), Statistical Office in Bydgoszcz (2014), CORINE Land Cover (CLC) 2012 (EEA, 2012)	

Das Potenzial von Abwärme ermittelten Pelda et al. (2020) für Deutschland anhand der CO<sub>2</sub> Emissionen von Industrieanlagen über stöchiometrische Berechnungen und einem Prozentsatz aus Literaturdaten.

Manz, Fleiter und Eichhammer (2023) berücksichtigen bei der Potenzialberechnung noch die Entwicklung der aktuellen Produktionsprozesse hin zu zukünftigen kohlenstoffarmen Prozessen. Zudem wird bei dem Ansatz zwischen verschiedenen Temperaturniveaus unterschieden. Die Ansätze sind in Tabelle 2.8 dargestellt.

**Tabelle 2.8** Literaturvergleich Abwärme.

Studie	Ziel	Ort	Räumliche Auflösung	Parameter	Methodik	Daten
Pelda et al. (2020)	Theoretisches Potenzial von Niedertemperaturabwärme (bis 150 °C) für die Integration in FW	Deutschland, Städte größer 100.000 Einwohner	Stadt	Emissionen, Heizwert, Thermische Energie pro Jahr $Q_a$ , Abwärmeprozent-satz	Primärenergiebedarf aus den CO <sub>2</sub> -Emissionen von Industrieanlagen über stöchiometrische Berechnungen ermitteln. Anschließend über einen Prozentsatz 10%/20%/30% die Abwärme annehmen.	Emissionen Verified Emissions Table (DEHSt)
Manz et al. (2023)	Abschätzung Abwärme von Industrien und Zuordnung zu existierenden und möglichen Fernwärmegebieten mit unterschiedlichen Temperaturniveaus 25, 55, 95 °C	Europa	Fernwärmeversorgungsgebiete 10 km Limit	Gesamte Überschusswärme pro Prozess: $E_{Ex,year}$ Jährliche Produktion pro Prozess: $m_{Product,year}$	Aktuelle und zukünftige Abwärmepotenziale unter Annahme zukünftiger kohlenstoffarmer Produktionsprozesse. Dabei zwischen Transformations- und Import-Szenario unterschieden. Die spezifischen Überschusswärmepotentiale werden pro Prozess und Temp. Niveau mit $\frac{E_{ex}}{m_{Product}}$ berechnet. Zuordnung zu Fernwärmegebieten und Bestimmung Nutzungspotenzial.	Standorte aller großen energieintensiven Industrieanlagen in der EU: Fraunhofer ISI Industrial Database frei verfügbar mit den abgeschätzten Abwärmepotenzialen unter HotMaps (2024) und Peta (2022)

### 2.5.3 Automatisierte Modellierungstechniken

In dem [Unterabschnitt 2.5.2](#) wurden unterschiedliche Studien vorgestellt, von denen die meisten das Ziel haben das Potenzial einer erneuerbaren Wärmequelle für ein bestimmtes Gebiet zu ermitteln. Es handelt sich also überwiegend um spezifische Lösungen.

Übertragbare Ansätze oder automatisierte Modellierungstechniken ermöglichen, im Gegensatz zu spezifischen Lösungen, das Potenzial einer erneuerbaren Wärmequelle für unterschiedliche Untersuchungsgebiete zu ermitteln. Im Folgenden werden zwei generische Ansätze vorgestellt.

HOTMAPS ist ein Forschungsprojekt mit dem Ziel eine Toolbox für die Wärme- und Kälteplanung zu entwickeln. Ziel des Projekts ist, dass mit dieser Toolbox Behörden, Energieagenturen und Stadtplanern bei der strategischen Wärme- und Kälteplanung unterstützt werden und dabei die EU-Politik berücksichtigt wird. Das Projekt wurde über das EU-Förderprogramm für Forschung und Innovation Horizont 2020 finanziert ([HotMaps, 2024](#)).

Die Toolbox ist Open-Source und anwendbar in allen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union mit 28 Mitgliedstaaten (2013 bis 2020) (EU-28). Zudem stehen für alle Mitgliedsstaaten der EU-28 Daten zur Verfügung ([Pezzutto et al., 2019](#)). Die Datenerhebung erfolgte auf nationaler Ebene oder falls möglich auf regionaler Ebene. Die Daten wurden für die Sektoren Wohnen, Dienstleistungen, Industrie und Verkehr erhoben ([Pezzutto et al., 2019](#)). Klimatische Variablen stehen in einer räumlichen Auflösung von 1000 m x 1000 m zur Verfügung und die Wärmedichtekarten, wie das solarthermische Potenzial, mit einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m ([Pezzutto et al., 2019](#)). Für die einzelnen erneuerbaren Wärmequellen sind Berechnungsmodule hinterlegt. Beispielsweise ist die in [Tabelle 2.5](#) dargestellt Methode G.POT ist für die Berechnung des flachen geothermischen Potenzials hinterlegt ([Casasso & Sethi, 2016](#)).

Im Auftrag von dem Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) wurde von der Genossenschaft Meteotest ein Geodatenmodell entwickelt ([Klauser, Schlegel, Hertach & Rohrbach, 2023](#)). Dieses ermöglicht unter [sonnendach.ch](#) die Eignung von Dächern und unter [sonnenfassade.ch](#) die Eignung von Fassaden für die Nutzung von Solarenergie interaktiv einzusehen. An dieser Stelle wird nur [sonnendach.ch](#) betrachtet, da die Fassade nur für die Produktion von Strom genutzt wird ([Klauser et al., 2023](#)).

[Sonnendach.ch](#) enthält für alle Dachflächen in der Schweiz Angaben zum Solarenergiepotenzial. Die Basis bilden die [swissBUILDINGS<sup>3D</sup> 2.0](#) von [swisstopo](#). Es handelt sich um einen Vektordatensatz der die Gebäude als 3D-Modelle mit Dachformen und Dachüberständen darstellt ([Bundeamt für Landestopographie swisstopo, 2024](#)). Daraus werden die Dachflächen als 2D-Polygon-Geometrien extrahiert ([Klauser et al., 2023](#)). Der Heiz- und Warmwasserbedarf der Gebäude wird auf Grundlage des eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) geschätzt. Es werden klimatologische Daten verwendet und Verschattungsanalysen durchgeführt ([Klauser et al., 2023](#)). Der in

Tabelle 2.4 vorgestellt Ansatz von Portmann et al. (2019) ermittelt auf Grundlage der sonnendach.ch Daten das Solarpotenzial einer Gemeinde.

## 3 Methodik

In diesem Kapitel wird die in dieser Arbeit eingesetzte Methodik dargestellt. Ziel ist anhand von Fließgewässerdaten eine automatisierte Methodik zur Ermittlung des thermischen Potenzials einer erneuerbaren Wärmequelle zu entwickeln. Das Potenzial wird für einzelne Fließgewässer und Fließgewässerabschnitte berechnet. Die dafür nötigen Parameter werden aus verschiedenen Daten abgeleitet. Zunächst werden das Konzept und ein Überblick über die einzelnen Arbeitsschritte dargestellt sowie eine Einführung in das Programm gegeben. Anschließend wird auf die einzelnen Schritte detailliert eingegangen. Es werden die verwendeten Daten beschrieben und ihre Qualität untersucht. Anschließend wird auf die Datenaufbereitung der Datensätze eingegangen. Die Methodik für die Einteilung der Fließgewässersegmente wird erläutert, bevor auf die Berechnung des Potenzials eingegangen wird.

### 3.1 Konzept und Programmablauf

Ziel ist die Entwicklung eines Geodatenmodells welches räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Ergebnisse liefert. Dazu wird mit einer täglichen Auflösung und Fließgewässer(-abschnitten) gerechnet. In [Unterabschnitt 2.5.1](#) werden die einzelnen Potenziale vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird das theoretische und technische Potenzial betrachtet.

In [Abbildung 3.1](#) werden die einzelnen Schritte dargestellt. Als Ausgangsdaten werden Daten über den Durchfluss und die Temperatur der Gewässer sowie die Lage der Gewässer benötigt. Diese werden diskretisiert, sodass es für jeden Tag des Jahres einen Durchfluss- und einen Temperaturwert gibt, um eine tägliche Auflösung zu erreichen. Die Fließgewässer werden in einzelne Segmente eingeteilt, um verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen und damit eine höhere räumliche Auflösung zu erreichen. Berücksichtigt werden neben der Temperatur und der Durchflüsse der Fließgewässer auch Grenzwerte, um die Ökologie der Gewässer (siehe [Unterabschnitt 2.4.3](#)) nicht negativ zu belasten. Dazu werden die Fischgemeinschaften nach der [WRRL](#) verwendet. Es werden zu diesem Zweck verschiedene Kennwerte definiert und berechnet. Daraus können Temperaturgrenzwerte und der theoretisch maximal nutzbare Durchfluss berechnet werden. Anschließend kann das Potenzial für jeden Fließgewässerabschnitt berechnet werden.



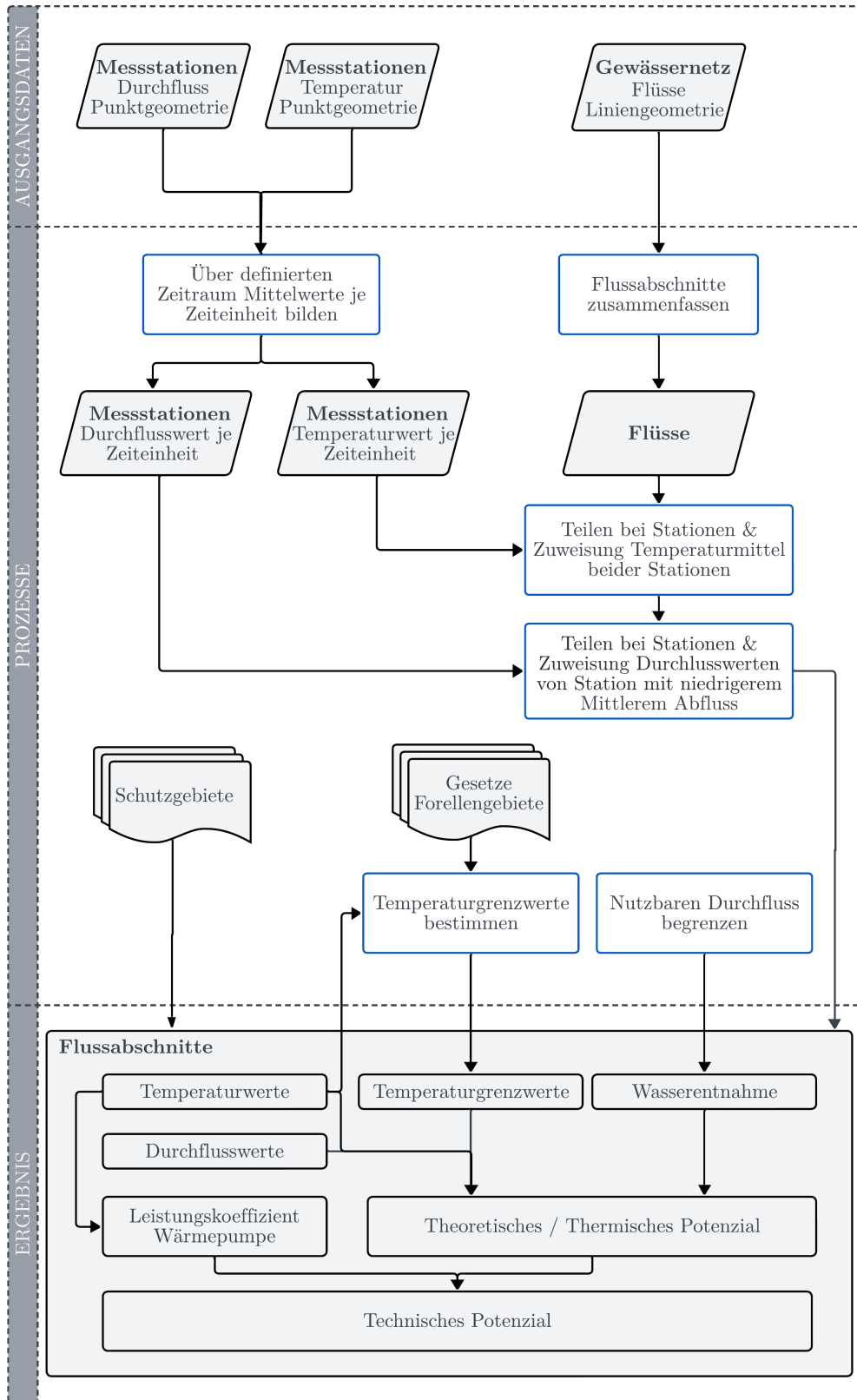


Abbildung 3.1 Übersicht über die Methodik.

Das Modell wird in der Programmiersprache Python (Python Software Foundation, 2023) programmiert. Die Struktur ist in [Abbildung 3.2](#) dargestellt.

Im Hauptmodul findet die Übergabe der Verzeichnisse, der Eingangsdaten und der nutzerspezifischen Eingaben statt sowie der Aufruf der Funktionen aus den einzelnen Modulen. Die Module sind nach den einzelnen Hauptarbeitsschritten (Datenaufbereitung - Fließgewässersegmentierung - Potenzialberechnung) organisiert. Für jeden Eingangsdatensatz (Messdaten Temperatur - Messdaten Durchfluss - Fließgewässernetz) existiert ein eigenes Modul. Zudem ist die Datenaufbereitung von den Eingangsdaten abhängig und erfordert daher Anpassungen, wenn andere Eingangsdaten verwendet werden. Neben den Modulen für jeden Hauptarbeitsschritt gibt es jeweils ein Modul mit den Funktionen die während des Hauptarbeitsschrittes benötigt werden. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten detailliert erklärt.

Für Visualisierungs- und manuelle Analyseaufgaben wird die freie Geoinformationssystemsoftware QGIS in der Version 3.34.0 (QGIS Development Team, 2023) verwendet.

## 3.2 Verwendete Daten und Datenqualität

Um das Potenzial von Fließgewässern zu ermitteln wird nach [Gleichung \(2.17\)](#) der Durchfluss und die Temperatur des Flusses benötigt. Es werden dazu Messreihen verwendet, die unter anderem von den zuständigen Ämtern der Länder bereitgestellt werden. Die Temperatur kann über Temperaturmessungen gemessen werden, während der Durchfluss in der Regel über die Wasserstand-Abfluss-Beziehung (Abflusskurve) ermittelt wird. Die Abflusskurve wird über mehrere Durchflussmessungen bei verschiedenen Wasserständen gebildet. Dies ermöglicht, dass anhand dieser Kurve der Abfluss über die Messung des Wasserstandes ermittelt und bereitgestellt werden kann. In einem regelmäßigen Turnus werden Messungen zur Kontrolle durchgeführt ([LAWA, 2018](#)).

Die Daten werden von einigen der Ämter als ungeprüfte Rohdaten und als geprüfte Messwerte zur Verfügung gestellt. Jedes System ist anders aufgebaut und der Zugang zu den Daten ist nicht in jedem Land gleich. Aufgrund der unterschiedlichen Zuständigkeit ergibt sich eine Inhomogenität im Zugang und der Datenstruktur. Zudem sind der verfügbare Zeitraum und die zeitliche Auflösung der Messreihen unterschiedlich. Nur in einigen Ländern stehen die Daten als offene Daten zur Verfügung.

Neben den Messwerten für Temperatur und Durchfluss werden auch Informationen über die Temperatur- und Pegelstationen selbst benötigt. Die Position der Stationen wird über die Angabe der Koordinaten angegeben oder die Stationen werden im Geodatenformat, wie als Shapefile, mit der entsprechenden Position zur Verfügung gestellt.

Um das Potenzial räumlich zuzuordnen wird ein Fließgewässernetz mit einer Liniengeometrie benötigt. Die Methodik ermöglicht, dass jeder Datensatz, der die Fließgewässer als Linienobjekte beinhaltet, verwendet werden kann. In dieser Arbeit werden die Gewässerkörper nach der [WRRL](#) genutzt. In [Unterabschnitt 2.4.4](#) wird die [WRRL](#)

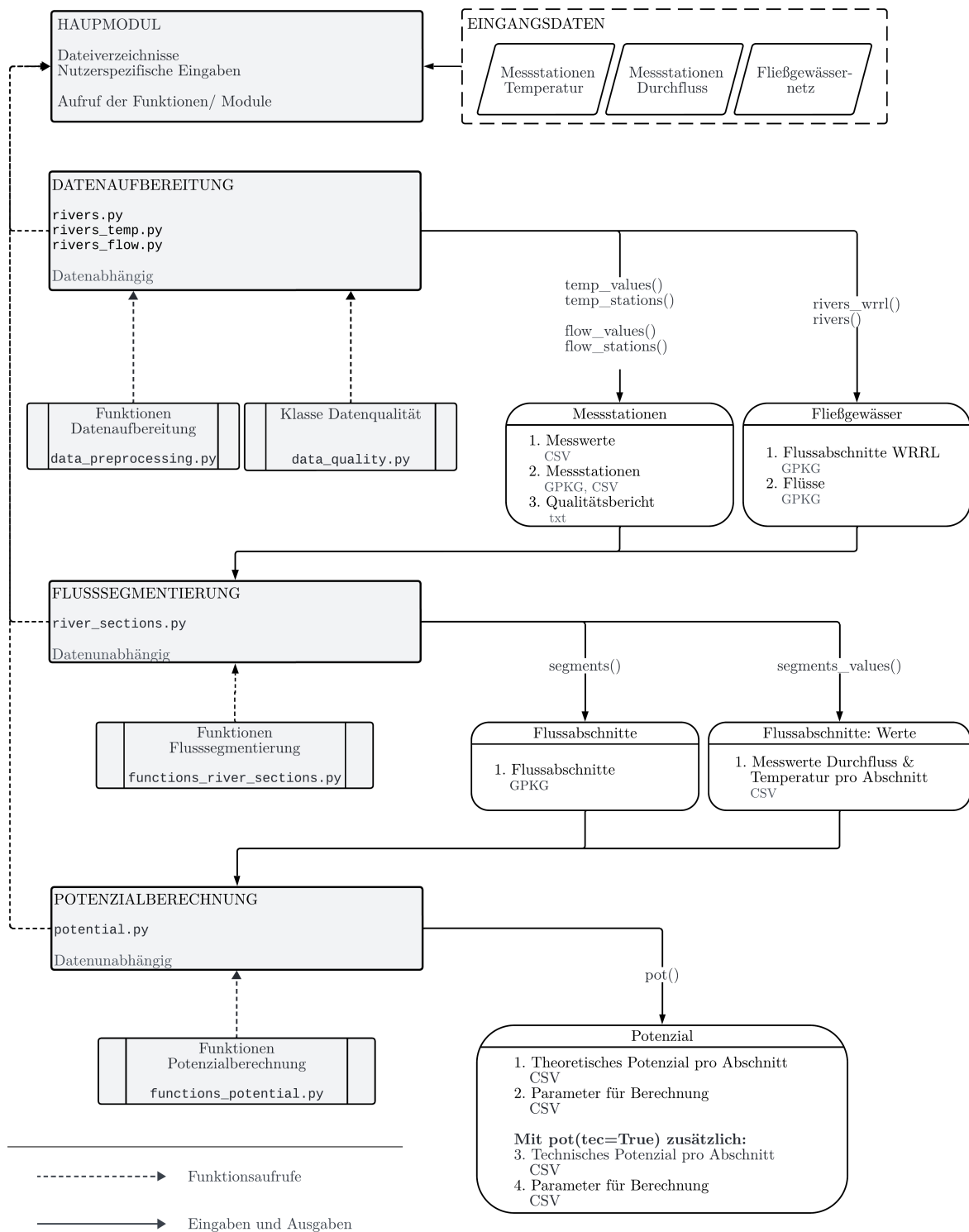


Abbildung 3.2 Übersicht über die Programmstruktur inklusive Modulen, Funktionen, Ein- und Ausgangspfaden.

vorgestellt und die *OGewV*, die zur Umsetzung der *WRRL* dient. Aufgrund der gesetzlichen Regelungen sollten die Daten über die Lage der Oberflächengewässerkörper nach der *WRRL* in jedem Bundesland zu Verfügung stehen, wodurch eine gewisse Homogenität der Daten innerhalb Deutschlands zwischen den verschiedenen Bundesländern gegeben ist.

### 3.2.1 Die Datensätze

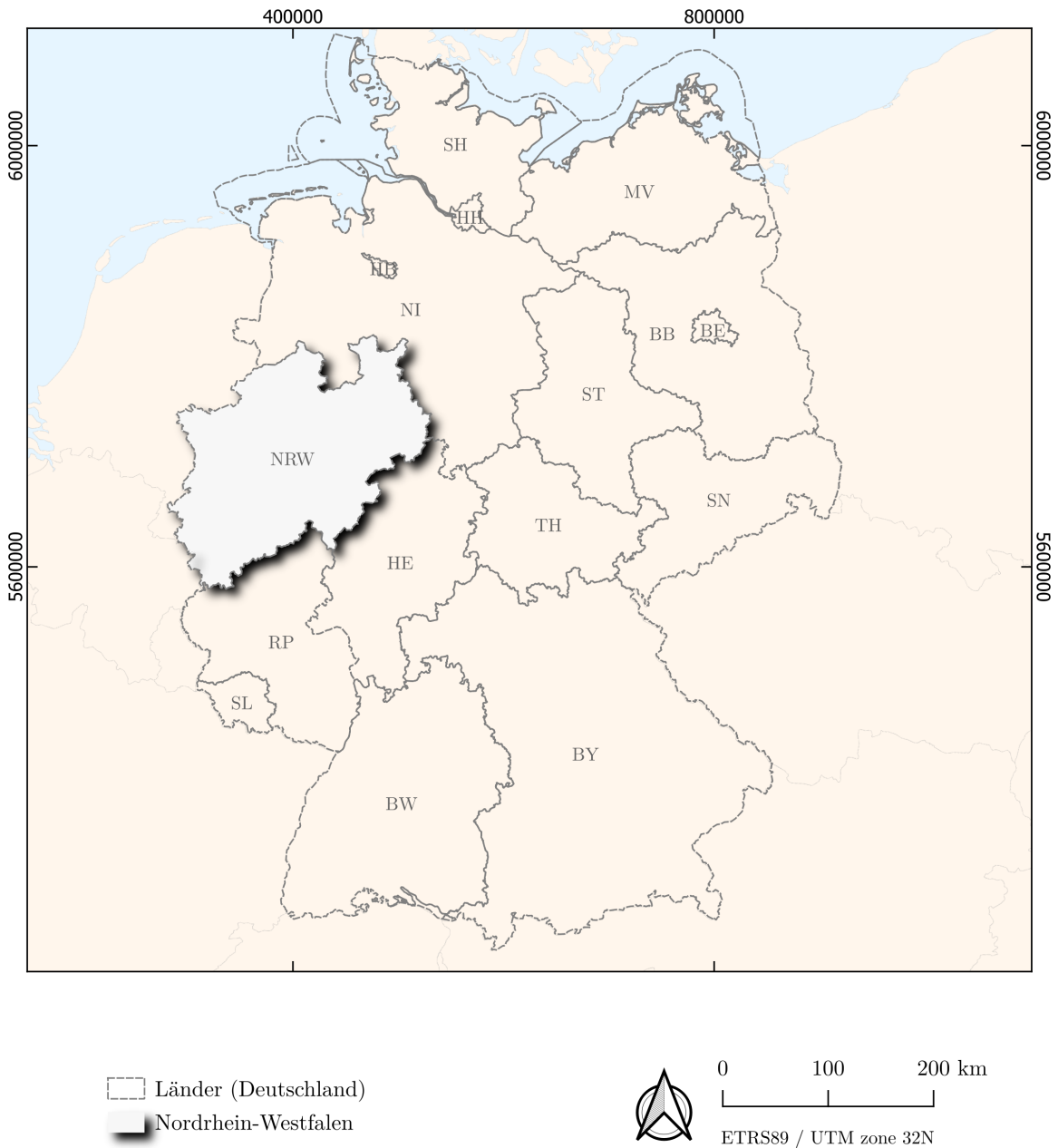
Das Modell wird anhand von Gewässerdaten des Landes *NRW* entwickelt. Das Land liegt, wie in *Abbildung 3.3* dargestellt, im Westen der Bundesrepublik Deutschland. *NRW* grenzt an die Länder Niedersachsen, Hessen und Rheinland-Pfalz sowie westlich an Belgien und die Niederlande. Die Temperaturdaten und die Daten über die Lage der Gewässer sind frei nutzbar und die Temperatur- und Durchflussmessreihen stehen in einem bearbeitbaren Format (*Comma-separated values (CSV)*, Textdatei) zur Verfügung. Der Download ist für mehrere Stationen gleichzeitig möglich. Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze beschrieben und eine Datenqualitätsanalyse nach *Veregin (1999)* durchgeführt.

#### Messdaten Temperatur

Die Gewässertemperatur zählt zu den *Allgemeinen chemischen und physikalischen Qualitätskomponenten*, die das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (*LANUV*) untersucht. Zu diesem Zweck betreibt das *LANUV* ein Temperaturmessnetz, das auf kontinuierlich messenden Gütestationen basiert. Diese Stationen sind über das ganze Land verteilt und messen die Temperatur in verschiedenen Flüssen. Zudem gibt es Kombinsonden, die neben dem Wasserstand auch die Temperatur messen (*LANUV, 2024a*). Die Messdaten stellt das *LANUV* als ungeprüfte Rohdaten zur Verfügung (*LANUV, 2024b*). Die Daten stehen unter der Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0 und können daher frei genutzt und weiterverarbeitet werden. Der Datensatz enthält vier Textdateien. Genutzt werden die Tagesmittelwerte. Die Datei enthält die Temperaturmesswerte der letzten zwei Jahre in °C für jede Station. Die Datei über die Stationen selbst enthält Informationen über die Stationen. Die Position ist in Breiten- und Längengraden (*EPSG 4326*) angegeben. Die Datei enthält weitere Informationen wie die Stationsnummern und den zugehörigen Fluss. Weiterführende Informationen und Angaben über die Qualität sind in *Unterabschnitt 3.2.2* und *Unterabschnitt 3.3.2* zu finden.

#### Messdaten Durchfluss

Das *LANUV* betreibt flächendeckend für das Land *NRW* Pegelanlagen. An diesen werden die Wasserstände und Abflüsse für etwa 160 Fließgewässer erfasst. Es handelt sich um eine kontinuierliche Messmethode. Die Ermittlung des Abflusses erfolgt über die Wasserstand-Abfluss-Kurve. Um diese zu erstellen bzw. zu aktualisieren werden jährlich



Verwaltungsgebiete © GeoBasis-DE / BKG (2024). Lizenziert unter DL-DE->BY-2.0 ([www.govdata.de/dl-de/by-2-0](http://www.govdata.de/dl-de/by-2-0)), Basiskarte © Argenmap. Lizenziert unter GNU General Public License v3.0 (<https://github.com/ign-argentina/catalogo-publicacion/blob/master/LICENSE>)

**Abbildung 3.3** Lage des Untersuchungsgebiets Nordrhein-Westfalen.

**BW** Baden-Württemberg, **BY** Bayern, **BE** Berlin, **BB** Brandenburg, **HB** Bremen, **HH** Hamburg, **HE** Hessen, **MV** Mecklenburg-Vorpommern, **NI** Niedersachsen, **NW** (hier: **NRW**) Nordrhein-Westfalen, **RP** Rheinland-Pfalz, **SL** Saarland, **SN** Sachsen, **ST** Sachsen-Anhalt, **SH** Schleswig-Holstein, **TH** Thüringen.

im Mittel 8 Abflussmessungen durchgeführt (LANUV, 2023). Die Daten stehen als geprüfte Zeitreihen zur Verfügung (LANUV, 2024c). Für die Daten muss eine Nutzungsanfrage bei dem LANUV gestellt werden. Vom LANUV Fachbereich Hydrologie wird die Nutzung der Daten im Rahmen dieser Arbeit genehmigt. Für jede Station kann eine Datei mit den Tagesmittelwerten heruntergeladen werden (Download mehrere Dateien gleichzeitig möglich). Die Dateien (CSV) enthalten in den ersten Zeilen Informationen über die Station (u. a. Name, Pegelnummer, Gewässer, Einheit) und für jeden Tag einen Wert in  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  und für wenige Stationen in  $\text{L s}^{-1}$ . Zusätzlich werden die Suchergebnisse in ELWAS-WEB exportiert (XLSX-Datei) die unter anderem die Position der Stationen in Ost- und Nordwert (EPSG 25832) enthält. Weiterführende Informationen und Angaben über die Qualität sind in Unterabschnitt 3.2.2 und Unterabschnitt 3.3.3 zu finden.

### Fließgewässerkörper

Das Potenzial soll für verschiedene Flüsse bzw. Flussabschnitte berechnet werden. Es werden die Gewässerlinien der Oberflächengewässerkörper NRW verwendet (LANUV, 2017). Es handelt sich um die Oberflächenwasserkörper NRW gemäß der WRRL basierend auf der Gewässerstationierungskarte 3C (LANUV, 2010). Die Daten stehen unter der Datenlizenz Deutschland - Zero - Version 2.0 und können daher frei genutzt und weiterverarbeitet werden. Der Datensatz enthält mehrere Shapefiles, das Einzugsgebiet, die Fließgewässerkörper und die Seewasserkörper. Genutzt wird die Datei der Fließgewässerkörper, welche als Liniengeometrie vorliegt. Der Datensatz enthält Geometrien vom Typ `MultiLineString`, die eine Sammlung von `LineString`-Objekten darstellen. Die Geometrien enthalten, neben den Positionen in der horizontalen Ebene ( $x$ - und  $y$ -Koordinaten), auch  $z$ -Koordinaten. Diese  $z$ -Koordinaten sind jedoch alle auf 0 gesetzt und tragen keine Höheninformationen.

### 3.2.2 Qualitätsanalyse

Räumliche Daten sind nicht nur durch ihre räumliche Komponente charakterisiert, sondern ebenso durch die zeitliche und thematische Komponente. Diese Dimensionen, Raum, Zeit und Thema bilden somit die Dimensionen der Datenqualität. Die betrachteten Qualitätskomponenten sind die Genauigkeit (*accuracy*), Präzision (*precision*), Konsistenz (*consistency*) und Vollständigkeit (*completeness*) (Veregin, 1999). Um die Datenqualität zu beurteilen und ob die Daten für den Anwendungszweck geeignet sind, werden die verschiedenen Dimensionen für jede der Qualitätskomponenten betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

#### Genauigkeit

Unter der Genauigkeit (*accuracy*) kann die Diskrepanz zwischen dem Wert der betrachteten Daten und dem tatsächlichen Wert verstanden werden. Dabei müssen die drei

Dimensionen Raum, Zeit und Thema berücksichtigt werden. Diese können getrennt voneinander gemessen werden, sind aber nicht zwangsläufig unabhängig voneinander. Die räumliche Genauigkeit (*spatial accuracy*) bezeichnet die Nähe zwischen der Position eines betrachteten Objekts und der tatsächlichen Position dieses Objekts (Veregin, 1999). Um die Genauigkeit der Lage der Messstationen zu beurteilen muss ein Vergleichsdatensatz festgelegt werden, der als tatsächliche Lage der Stationen definiert wird. Dies ist komplex, da die einzige Information über die Lage der Stationen von dem Datensatz selbst kommt. Einige der Pegelstationen sind in OpenStreetMap (OSM) hinterlegt, jedoch keine Temperaturmessstationen. Es kann jedoch die Lage relativ zu den Flüssen (Google Satellite und OSM) visuell analysiert werden. Die Messstationen liegen überwiegend am Rand des Fließgewässers, in einigen Fällen in dem Gewässer oder in einiger Entfernung (etwa 10 m). Die Positionen der Temperaturmessstationen werden über die Längen- und Breitengrade (EPSG 4326) angegeben. Dies lässt darauf schließen, dass die Positionen mittels eines GPS-Geräts eingemessen sind. Es gibt jedoch keine Angaben zu der Genauigkeit. Die Gewässerlinien basieren auf der Gewässerstationierungskarte 3C. Basis dieser Geometrien bilden überwiegend die Geometrien des BASIS-DLM der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 (LANUV, 2010). Diese geben eine Lagegenauigkeit von  $\pm 3$  m an (Bezirksregierung Köln, 2024). Mit einem visuellen Vergleich von Stichproben mit OSM und Google Satellite sowie Messungen in QGIS werden Abweichungen bis zu 6 m gefunden.

Die zeitliche Genauigkeit (*temporal accuracy*) beschreibt die Korrektheit des gegebenen Zeitstempels oder der zeitlichen Information der Daten (Veregin, 1999). Für die Temperaturmessstationen wird der Zeitraum der letzten zwei Jahre angegeben. Alle Stationen enthalten Messdaten für die vergangenen zwei Jahre. Für diese Arbeit wurde der Zeitraum Juni 2022 bis Juni 2024 verwendet. Für die Pegelstationen wird für 196 Messstationen von 273 Messstationen der Zeitraum von mindestens 2005 bis 2020 angegeben, davon enthalten jedoch nur 190 Stationen wirklich Messwerte von 2005 bis 2020. Der angegebene Zeitstempel ist also für sechs Stationen nicht korrekt. Der Gewässerliniendatensatz wurde 2017 erzeugt (LANUV, 2022) und basiert auf Daten aus dem Jahr 2010 (LANUV, 2010).

Die thematische Genauigkeit oder Attributgenauigkeit (*thematic accuracy*) gibt an, ob die Informationen thematisch korrekt sind, wie etwa Fehlklassifikationen bei einer Landnutzungsklassifikation (Veregin, 1999). Da es keinen Vergleichsdatensatz gibt, ist die Attributgenauigkeit nur beschränkt verifizierbar. Ein Vergleich der Datensätze und die Zuordnung der Stationen zu den Flüssen anhand der Lage lässt jedoch darauf schließen, dass die Angaben wie die eindeutige Nummer der Station und der zugehörige Gewässername in beiden Datensätzen (Temperatur und Durchfluss) korrekt sind. Die Attribute der Gewässerlinien zeigen ebenfalls keine Auffälligkeiten.

#### **Präzision**

Die Präzision oder Auflösung (*precision / resolution*) bezieht sich auf die kleinste Einheit die abgebildet wird. Daten weisen eine begrenzte Auflösung auf, da kein Abbild der Realität unendlich genau ist und da Verallgemeinerungen, wie Verringerungen der



Detailgenauigkeit, Glättungen oder Aggregationen, absichtlich angewendet werden. Ob die Präzision zu gering, ausreichend oder zu hoch ist, ist von dem jeweiligen Anwendungsfall anhängig und eine geringe Präzision ist nicht zwangsläufig negativ.

Die räumliche Auflösung *spatial resolution* beschreibt die kleinste räumliche Auflösung. Das entspricht bei Rasterdaten der Zellgröße/ Pixelgröße und bei Vektordaten dem kleinsten abgebildeten Objekt (Veregin, 1999). Für die Messdaten entspricht dies der Messstation. Da es bei der Präzision um das kleinste Objekt bzw. Ereignis geht, welches abgebildet werden kann, kann auch der Abstand zwischen den Stationen relevant sein. Da diese nicht regelmäßig verteilt sind bzw. von den Flüssen abhängen, ist die Anzahl an Stationen pro Fluss ausschlaggebend. Die Gewässerlinien sind in einzelne Flussabschnitte unterteilt die eine Länge von je etwa 600 m bis etwa 73 000 m aufweisen.

Die temporale Auflösung (*temporal resolution*) beschreibt die minimale Dauer eines erkennbaren Ereignisses. Es gibt einen Unterschied zwischen der Abtastrate und der Auflösung. Die Abtastrate beschreibt die Frequenz der Wiederholungsabdeckung, während die Auflösung das Intervall beschreibt, dass für jede Messung benötigt wird (Veregin, 1999). Die Temperaturmesswerte und die Durchflussmesswerte liegen als Tagesmittelwerte vor. Das kleinste erkennbare Ereignis entspricht daher einem Tag. Die Gewässerlinien beziehen sich auf den Bewirtschaftungsplan NRW 2022 bis 2027. Zu den Attributen die in dem Datensatz bzw. den Stammdaten enthalten sind gibt es keine Angaben, wann diese erhoben wurden. Da der Datensatz 2017 erzeugt wurde und auf Daten von 2010 basiert, kann der Zeitraum etwa auf 2010 bis 2017 festgelegt werden.

Bei der thematischen Auflösung (*thematic resolution*) muss man zwischen quantitativen und qualitativen Daten unterscheiden. Bei quantitativen Daten wird die Auflösung durch die Präzision des Messgeräts bestimmt, während bei qualitativen Daten die thematische Auflösung der Präzision der definierten Kategorien entspricht (Veregin, 1999). Über die Präzision des Temperaturmessgeräts sind keine Informationen vorhanden. Die Temperaturmesswerte haben drei bis vier signifikante Stellen. Die Werte liegen als Temperaturwerte in Celsius mit zwei Dezimalstellen vor. Die Durchflussmesswerte haben vier bis sechs signifikante Stellen bei der Angabe des Durchflusses in  $\text{m s}^{-3}$  mit drei Dezimalstellen. Die Gewässerlinien bestehen aus 1 bis 15 Abschnitten je Fluss. Für jeden Flussabschnitt gibt es mehrere Attribute in der Datei selbst und in den Stammdaten. Von Relevanz, neben der Geometrie und dem Gewässernamen sind der Fließgewässertyp (25 Typen deutschlandweit) und der Temperaturtyp (8 Kategorien).

### **Konsistenz**

Die Konsistenz (*consistency*) der Daten bezieht sich auf ihre Logik bzw. die Abwesenheit von Widersprüchen.

Bei der räumlichen Betrachtung (*spatial consistency*) bezieht sich dies vor allem auf die Topographie, wie etwa dass ein Polygon von Linien begrenzt ist (Veregin, 1999). Alle Messstationen liegen als Punkte vor, bei den Temperaturmessstationen unter der Angabe von Breiten- und Längengrad (EPSG 4326) und bei den Pegelstationen



unter der Angabe der X- und Y-Werte (EPSG 25832). Jede Station wird durch einen Punkt repräsentiert. Die Lage der Punkte relativ zu den Fließgewässerkörpern ist jedoch nicht konsistent, da die Punkte teilweise im Gewässer liegen und teilweise in unterschiedlichen Entfernungen zu den Gewässern. Ebenso ist die Lage zu den anderen Stationen (Temperaturmessstation zu Pegelstation) nicht konsistent. Stationen mit der gleichen ID liegen nicht zwangsläufig am selben Ort. Bei neun der Gewässerlinien fehlt eine Verbindung: Flüsse mit gleicher ID hängen geometrisch nicht zusammen, sondern bestehen aus zwei einzelnen geometrisch getrennten Abschnitten. Entweder weil das Gewässer teilweise außerhalb von NRW verläuft oder durch ein anderes Gewässer unterbrochen wird (siehe dazu [Unterabschnitt 3.3.1](#)).

Die zeitliche Konsistenz (*temporal consistency*) bezieht sich darauf, dass die zeitlichen Informationen über verschiedene Datensätze konsistent und logisch sind (Veregin, 1999). In den Temperatur- und Durchflussmessdatensätzen sowie den Gewässerlinien sind diese Angaben konsistent.

Die thematische Konsistenz (*thematic consistency*) umfasst zum einen Redundanzen, aber auch eine inkonsistente Attributerfassung (Veregin, 1999). Die Messwerte der Temperatur in dem Temperaturmessdatensatz werden konsistent in °C angegeben. In dem Datensatz der Durchflussmesswerte sind die Angaben des Durchflusses nicht konsistent, sondern für einige Stationen in  $\text{L s}^{-1}$  und für die übrigen Stationen in  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ . Die Angabe der übrigen Attribute des Durchflussdatensatzes, wie die Stationsnummer, der Name der Station und der zugehörige Gewässername weisen die gleiche Schreibweise auf. Die Attribute des Temperaturdatensatzes sind für die Stationsnummer und den zugehörigen Gewässernamen konsistent. Die Schreibweise des Stationsnamens ist jedoch nicht konsistent. Zwischen den beiden Datensätzen (Temperatur und Durchfluss) sind die Stationsnummer und der zugehörige Gewässername gleich geschrieben. Die Stationsnamen unterscheiden sich jedoch in einigen Fällen in ihrer Schreibweise. Beispielsweise „Schieder-Nessenberg“ vs. „Schieder-Ness.“ oder „Pannemmuehle“ vs. „Pannemmühle“. Die Angaben und die Schreibweise der Attribute ist konsistent.

#### **Vollständigkeit**

Die Vollständigkeit (*completeness*) beschreibt, ob ein Datensatz vollständig ist und alle relevanten Informationen enthält.

Um die Dimensionen der Vollständigkeit zu erfassen werden diese während der Datenaufbereitung als Instanzen der Klasse `data_quality` gesammelt und über die Funktion `report()` wird ein Report erstellt der diese zusammenfasst. Der Report für die Messreihen des Durchflusses ist in [Abbildung A.1](#) und für die Messreihen der Temperatur in [Abbildung A.2](#) dargestellt.

Hier wird die Vollständigkeit von Merkmalen oder Einheiten (*feature or entity completeness*) betrachtet. Es bezieht sich auf die Beziehung zwischen den Objekten des Datensatzes und des abstrakten Universums all dieser Objekte. Die Beschreibung des abstrakten Universums ist daher unerlässlich. Es kann zwischen der Datenvollständigkeit, dem messbaren Fehler zwischen dem Datensatz und den Spezifikationen und der

Modellvollständigkeit, der Übereinstimmung zwischen den Spezifikationen der Datenbank und dem abstrakten Universum, das für eine bestimmte Datenbankanwendung erforderlich ist, unterschieden werden (Veregin, 1999). Für die Temperaturmessreihen und die Durchflussmessreihen kann also unterschieden werden, ob die Datensätze nach der Datenvollständigkeit komplett sind oder nach der Modellvollständigkeit. Für die Aggregation des Durchflusses wird der Zeitraum von 2005 bis 2020 betrachtet. Ob die Daten für diesen Zeitraum Daten enthalten entspricht also der Modellvollständigkeit. Ein Datensatz der von 2000 bis 2010 Daten enthält und dies auch so angegeben ist, ist somit nach der Datenvollständigkeit vollständig, jedoch nach der Modellvollständigkeit nicht. Es werden nur Durchflussdatensätze betrachtet, die angeben in dem Zeitraum verfügbare Daten zu enthalten. Dies trifft auf 196 der 273 Stationen zu. Nur diese Stationen werden weiter betrachtet.

Die räumliche Vollständigkeit (*spatial completeness*) beschreibt, ob die geographische Abdeckung komplett ist und ob alle Objekte erfasst werden (Veregin, 1999). Für jede Temperatur- und Pegelstation liegt ein Punkt vor. Ob alle Stationen enthalten sind bzw. wie viele fehlen, lässt sich aufgrund fehlender Referenzangaben nicht feststellen. Für 60 Flüsse liegt mindestens eine Temperaturstation und für 170 Flüsse mindestens eine Pegelstation vor. In dem Gewässerliniendatensatz sind 1727 Flussabschnitte für 1029 Flüsse enthalten. Es sind nur Bäche und Flüsse mit einem Einzugsgebiet größer 10 km<sup>2</sup> enthalten. Dies entspricht etwa 30 % des Gesamtgewässernetzes in NRW (MULNV & LANUV, 2021). Der Datensatz enthält für den Anwendungszweck ausreichend Daten, da angenommen wird, dass kleinere Fließgewässer für die thermische Nutzung nicht geeignet sind.

Die temporale Vollständigkeit (*temporal completeness*) erfasst, ob die Daten vollständig in der Zeit sind (Veregin, 1999). Alle Temperaturmessstationen enthalten für den angegebenen Zeitraum Daten. Die Pegelstationen enthalten entgegen der Angaben nur für 190 der 196 Stationen Daten für den Zielzeitraum. Eine Station enthält keine Daten. Es werden nur die Stationen mit Daten im Zielzeitraum weiter genutzt und betrachtet.

Mit der thematischen Vollständigkeit (*thematic completeness*) wird erfasst, ob alle Attribute erfasst sind und ob die Vollständigkeit im Thema gegeben ist (Veregin, 1999). Die Werte sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Tabelle 3.1 Datenqualität.

	Messdaten Temperatur	Messdaten Durchfluss	Gewässernetz
<b>Genauigkeit</b> ( <i>accuracy</i> )			
Räumlich	Keine Angabe zur Genauigkeit. Relative Lage zu den Gewässern (Google Satellite, OSM) im Zehnermeterbereich	Keine Angabe zur Genauigkeit. Relative Lage zu den Gewässern (Google Satellite, OSM) im Zehnermeterbereich	Basierend auf BASIS-DLM mit Lagegenauigkeit $\pm 3$ m Visueller Vergleich und QGIS Messungen zw. Stichproben und OSM/ Google Satellite Abweichungen bis zu 6 m
Temporal	Zeitraum 06.2022 bis 06.2024 angegeben und für alle Stationen verfügbar	Zeitstempel für 6 Stationen von 196 Stationen nicht korrekt bei Betrachtung des Zeitraums 2005 bis 2022	Datensatz Erzeugung 2017, basierend auf Daten aus dem Jahr 2010, Übereinstimmung mit Angaben in den Attributen
Thematisch	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
<b>Präzision</b> ( <i>precision</i> )			
Räumlich	Messstation, 0-4 Stationen je Fluss	Messstation, 0-7 Stationen je Fluss	Flussabschnitte mit einer Länge von etwa 600 m bis etwa 73 000 m
Temporal	Täglich	Täglich	Bewirtschaftungsplan 2022-2027; Attribute, über einen langen Zeitraum gültig
Thematisch	Temperaturmesswerte: bei Angabe in $^{\circ}\text{C}$ 4 signifikante Stellen mit 2 Dezimalstellen	Durchflussmesswerte: bei Angabe in $\text{m s}^{-3}$ 6 signifikante Stellen mit 3 Dezimalstellen	1 bis 15 Abschnitte je Fluss; Fließgewässertyp: 25 Typen deutschlandweit; Temperaturtyp: 8 Kategorien
<b>Konsistenz</b> ( <i>consistency</i> )			
Räumlich	Jede Station ein Punkt. Konsistente Angabe der Breiten- und Längengrade (EPSG 4326), Lage relativ zu Fließgewässern und Pegelstationen nicht konsistent	Jede Station ein Punkt. Konsistente Angabe der Nord- und Ostwerte (EPSG 25832), Lage relativ zu Fließgewässern und Temperaturmessstationen nicht konsistent	9 Flüsse mit gleicher ID hängen geometrisch nicht zusammen
Temporal	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
Thematisch	Konsistente Angabe der Attribute Stationsnummer und zugehöriges Gewässer (gleiche Schreibweise), Keine konsistente Schreibweise des Stationsnamens, konsistente Angabe der Temperatur in $^{\circ}\text{C}$	Konsistente Schreibweise der Attribute, Keine konsistente Angabe des Durchflusses (Angabe in $\text{L s}^{-1}$ und $\text{m s}^{-3}$ )	Konsistente Angabe und Schreibweise der Attribute
<b>Vollständigkeit</b> ( <i>completeness</i> )			
Räumlich	Für 60 Flüsse liegt mindestens eine Station vor.	Für 170 Flüsse liegt mindestens eine Station vor.	1727 Flussabschnitte für 1029 Bäche und Flüsse mit Einzugsgebiet $> 10 \text{ km}^2$
Temporal	Alle Stationen enthalten für den angegebenen Zeitraum Daten.	6 von 196 Stationen enthalten entgegen der Angaben keine Daten für den Zielzeitraum	Keine Auffälligkeiten
Thematisch	Fehlende Messwerte nach Stationsanzahl (78 Stationen): 0 % bis 1 %: 17 1 % bis 5 %: 57 5 % bis 10 %: 2	Fehlende Messwerte nach Stationsanzahl (190 Stationen): 0 % bis 1 %: 164 1 % bis 5 %: 15 5 % bis 10 %: 4 10 % bis 20 %: 6 20 % bis 30 %: 1	Keine Auffälligkeiten

## 3.3 Datenaufbereitung

Da die Daten aus verschiedenen Quellen stammen, weisen sie, wie in [Unterabschnitt 3.2.1](#) erklärt, unterschiedliche Strukturen auf. Dies bezieht sich auf den Zeitraum, in dem eine Messreihe verfügbar ist, den Dateityp, die Dateistruktur sowie das Koordinatensystem. Ziel ist eine einheitliche Datenstruktur zu erreichen. Dies ermöglicht in den folgenden Schritten eine Datenunabhängigkeit. Die Datenaufbereitung selbst ist immer abhängig von den Ausgangsdaten. Eine vollständige Automatisierung dieses Arbeitsschrittes ist daher nicht sinnvoll und wird nicht angestrebt. Da die Ausgangsdateien jedoch ähnliche Muster aufweisen und in die gleiche Form gebracht werden sollen, werden die Funktionen in einem separaten Modul `data_preprocessing.py` definiert, um die Datenaufbereitung effizienter zu gestalten. Dazu ist das Hauptmodul nach den verschiedenen Bereichen unterteilt und die Datenaufbereitungsmodule Gewässerdaten (`rivers.py`), Temperaturdaten (`rivers_temp.py`) und Durchflussdaten (`rivers_flow.py`), werden mittels einer Funktion im Hauptmodul ausgeführt (siehe [Abbildung 3.2](#)). Alle Module, die für die Datenaufbereitung benötigt werden, sind in einem separaten Ordner `Preprocessing` des Projekts abgelegt. Diese Funktionen rufen zunächst eine Entpackungsfunktion aus dem Datenaufbreitungsmodul auf und legen die entpackten Daten ab. Anschließend erfolgt die Datenaufbereitung, die im Folgenden genauer dargestellt wird.

Die Messreihen der Gewässertemperatur und des Durchflusses werden über mehrere Jahre gemittelt, um den Einfluss von Extremwetterlagen zu minimieren und die Verhältnisse die zu erwarten sind möglichst genau abzubilden.

### 3.3.1 Gewässernetz

Die Funktion `rivers_wrrl()` aus dem Modul `rivers.py` verarbeitet zunächst die Ausgangsdaten (siehe [Abbildung 3.2](#)). Das Oberflächengewässernetz enthält die Fließgewässerlinien in einer Liniengeometrie und teilt insgesamt 1029 Flüsse in 1727 Flussabschnitte. Jeder Flussabschnitt stellt ein eigenes Objekt dar. Der Datensatz liegt bereits in EPSG 25832 vor (Zielkoordinatensystem). Die eindeutige Nummer, die Gewässerkennzahl, der Gewässername und die Geometrieinformation werden behalten und eindeutig benannt. Nach der [WRRl](#) bzw. der [OGewV](#) sind alle Flüsse und Bäche in [NRW](#) in Fließgewässertypen eingeteilt. In dieser Arbeit ist vor allem der Temperaturtyp bzw. die Fischgemeinschaft von Bedeutung, da diese als Grundlage für die Temperaturgrenzwerte verwendet wird. Nach der [OGewV](#) können die folgenden Fischgemeinschaften unterschieden werden ([Bundesrepublik Deutschland, 2020](#)):

- ff/tempff: Gewässer sind fischfrei oder temporär fischfrei
- Sa-ER: salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals
- Sa-MR: salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals

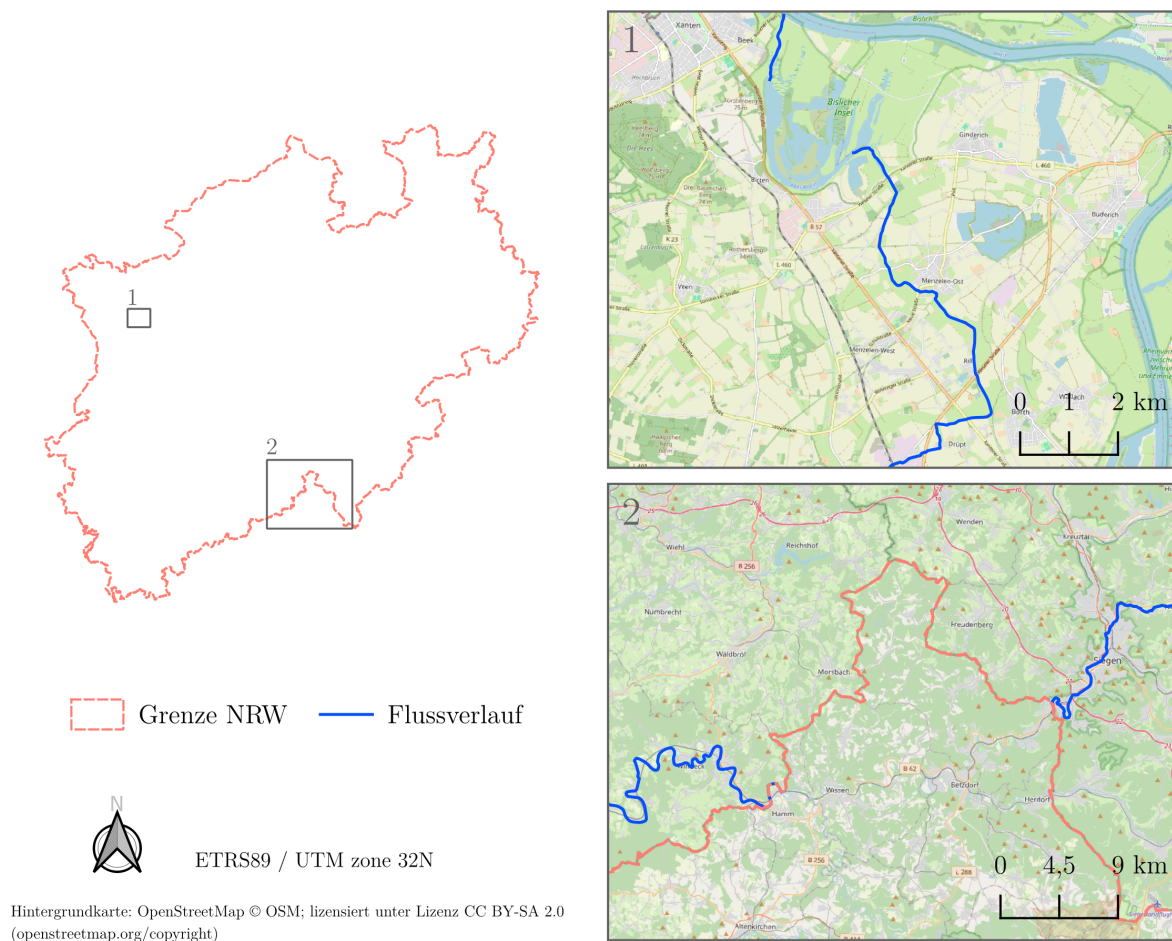
- Sa-HR: salmonidengeprägte Gewässer des Hyporhithrals
- Cyp-R: cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals
- EP: Gewässer des Epipotamals
- MP: Gewässer des Metapotamals
- HP: Gewässer des Hypopotamals

Über das Portal ELWAS-WEB werden die Suchergebnisse exportiert und die Information über den Temperaturtyp extrahiert. Der Temperaturtyp wird über die eindeutige Nummer mit den Flussabschnitten zusammengeführt. Da die einzelnen Fischgemeinschaften in weiteren Schritten verwendet werden, ist eine eindeutige Benennung erforderlich. Die Benennung erfolgt nach der Abkürzung nach der OGeWV. Die Flussabschnitte nach der WRRL werden im GeoPackage (GPKG)-Format gespeichert.

Die Fließgewässer werden als Grundlage für die Segmentierung verwendet. Der Fluss wird als ein Objekt, nicht in Abschnitte eingeteilt, benötigt. Um einen deckungsgleichen Datensatz zu erhalten (Geometrie) werden die Flussabschnitte der WRRL als Ausgangsdatsatz in der Funktion `rivers()` verwendet. Jedes deutsche Gewässer hat eine eindeutige Gewässerkennzahl. Diese wird verwendet um die Flussabschnitte zu Flüssen zu aggregieren. Es werden nur die Gewässerkennzahl, die eindeutige Abschnittsnummer und der Gewässername behalten. Die Aggregation wird zudem durchgeführt nach der Gewässerkennzahl und der Fischgemeinschaft. Für beide Datensätze werden die folgenden Schritte durchgeführt: Die Linien der Datensätze haben eine `MultiLineString`-Geometrie. Für die Segmentierung wird eine `LineString`-Geometrie benötigt. Um die Geometrie zu konvertieren werden die Datensätze zunächst von Geometriefehlern befreit, da diese sonst zu einem fehlerhaften Verhalten führen. Die `MultiLineStrings` werden zu `LineStrings` verschmolzen. Für sich berührende Linien wird eine `LineString`-Geometrie zurückgegeben und für sich nicht berührende Linie eine `MultiLineString`-Geometrie. Die Objekte werden anschließend zerlegt. Sich nicht berührende Linien werden in mehrere Objekte aufgeteilt, die eine `LineString`-Geometrie aufweisen. Es sind insgesamt 1038 Objekte und nicht 1029 Flüsse enthalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dem Datensatz neun Fließgewässer vorhanden sind, die sich geometrisch nicht berühren:

- Flussverlauf zum Teil außerhalb von NRW
- Unterbrochen von einem anderen Gewässer

Für beide Fälle ist in [Abbildung 3.4](#) ein Beispiel dargestellt. Für jedes Fließgewässer wird eine neue eindeutige Nummer erstellt. Beide Datensätze werden als GPKG-Datei gespeichert.



**Abbildung 3.4** Diskontinuität in der Liniengeometrie der Fließgewässer. (1) Unterbrechung durch ein anderes Gewässer (Xantener Altrhein / Schwarzer Graben (Gewässernummer 2792)), (2) Flussverlauf zum Teil außerhalb von NRW (Sieg (Gewässernummer 272)).

### 3.3.2 Messdaten Temperatur

Der Wassertemperaturdatensatz besteht aus vier Textdateien von denen die Informationen über die Stationen und die Tagesmittelwerte (2022-2024) genutzt werden. Die Zuordnung erfolgt über die eindeutige Nummer der Messstation. Die Datenaufbereitung erfolgt nach den Schritten wie in [Abbildung 3.5](#) dargestellt mit den Funktionen aus dem Modul `river_temp.py` (siehe [Abbildung 3.2](#)).

Die Funktion `temp_values()` bereitet zunächst die Temperaturmessdaten auf und aggregiert diese. Bei den Temperaturmesswerten handelt es sich um ungeprüfte Rohdaten. Über eine Histogrammanalyse wird der obere und untere Grenzwert des gültigen Wertebereichs ermittelt. Die Verteilung der Temperaturwerte ist in [Abbildung 3.6](#) dargestellt. Darüber wie häufig die Temperaturwerte vorkommen kann ein oberer und unterer Wert abgeleitet werden. Werte die außerhalb dieses Bereichs liegen werden blau eingefärbt. Die statistisch ermittelten Werte werden ausgegeben und müssen



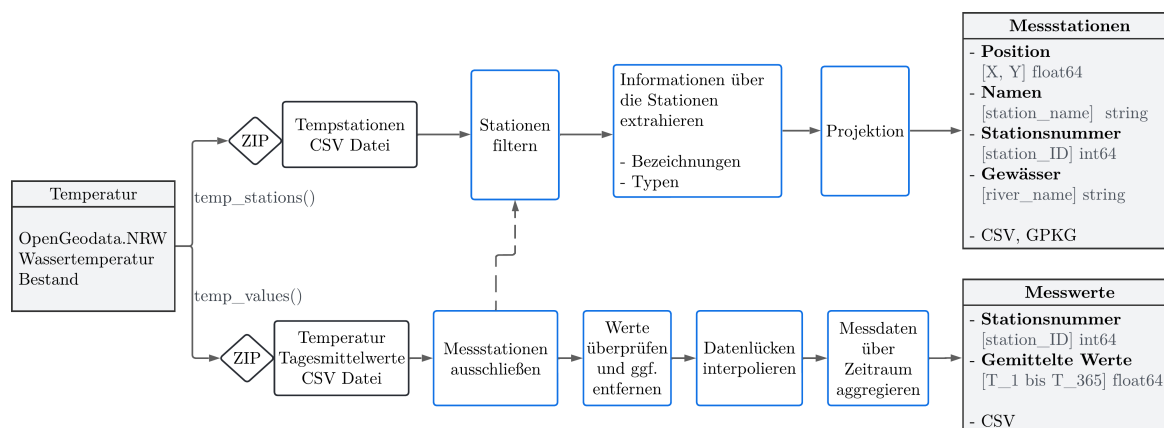
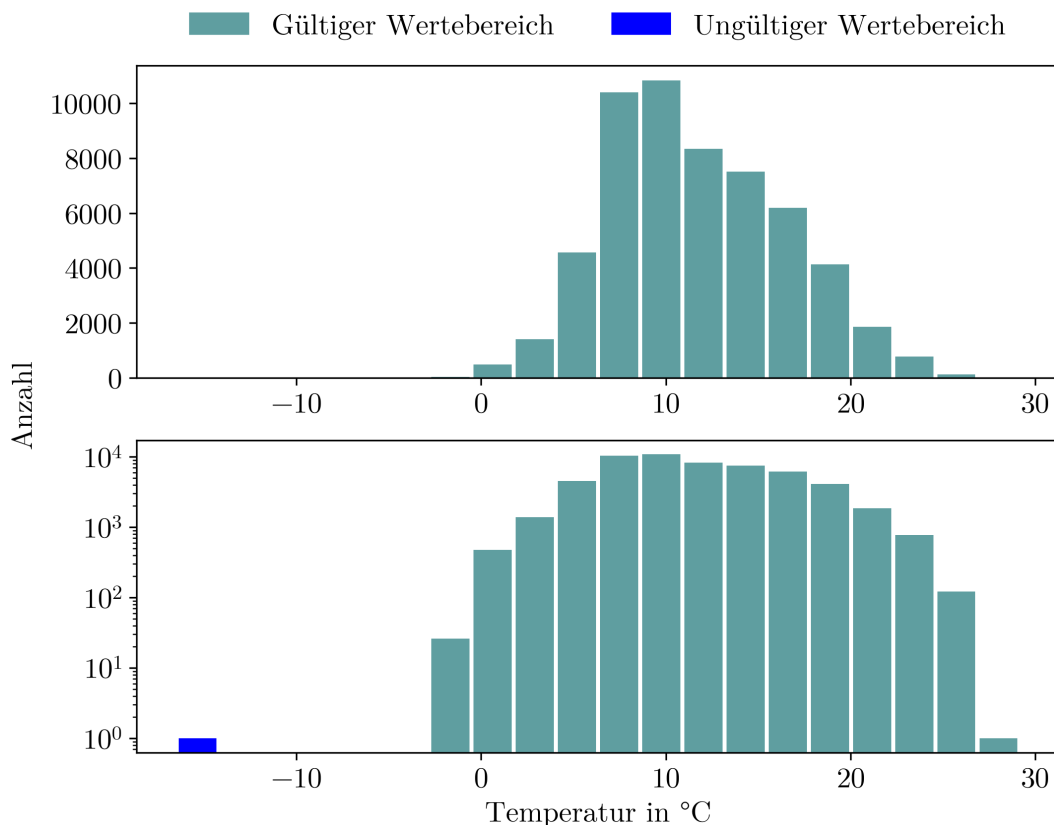


Abbildung 3.5 Datenaufbereitungsschritte Temperaturdatensatz.

überprüft und bestätigt oder über eine Eingabe angepasst werden. Der ermittelte gültige Wertebereich liegt bei  $-0,52^{\circ}\text{C}$  bis  $24,59^{\circ}\text{C}$ . Es wird angenommen, dass Fließgewässer in Deutschland höhere Wassertemperaturen erreichen können, wie sich etwa am Rhein stellenweise Temperaturen von  $28^{\circ}\text{C}$  gemessen wurden (Umweltbundesamt, 2023). Der gültige Bereich wird daher angepasst auf  $-0,52^{\circ}\text{C}$  bis  $30^{\circ}\text{C}$ . Das Ergebnis ist in [Abbildung 3.6](#) dargestellt. Messreihen in denen zu viele Messwerte (Standardwert 30 %) fehlen werden ausgeschlossen (nicht zutreffend bei den verfügbaren Zeitreihen). Auf die übrigen Messreihen wird der ermittelte Gültigkeitsbereich angewendet und zudem Ausreißer identifiziert und ausgeschlossen. Mittels einer Maskeninterpolation, maximale Anzahl fehlender Werte in Folge, werden Datenlücken interpoliert. Diese Interpolationsmethode wird angewendet, um fehlerhafte Interpolationen durch zu große Lücken zu vermeiden. Anschließend werden die Werte nach Tag und Monat über die Jahre aggregiert, sodass es für jeden Tag des Jahres einen Wert und insgesamt 365 Werte pro Station gibt. Alle Messwerte werden mit der zugehörigen eindeutigen Nummer im CSV-Format gespeichert.

In einer weiteren Funktion `temp_stations()` wird die GPKG-Datei mit den Stationsinformationen erzeugt. Zu den Messwerten soll über die eindeutige Nummer auf eine weitere Datei zugegriffen werden können, in welcher die Informationen über die Stationen abrufbar sind. Dazu wird die zweite Datei des Wassertemperaturdatensatzes verwendet. Da die Position der Stationen in einem geographischen Koordinatensystem WGS 84 (EPSG 4326) vorliegen, wird eine Projektion durchgeführt. Alle Daten sollen im gleichen Koordinatensystem (EPSG 25832) vorliegen. Die vorhandenen Attribute werden auf die Position, den Stationsnamen, die Stationsnummer (eindeutige Nummer) und das zugehörige Gewässer reduziert. Die Namen werden vereinheitlicht und die Attributtypen definiert (siehe [Abbildung 3.5](#)). Es werden in dieser Datei nur die Stationen behalten, zu denen Messreihen vorliegen und zu denen Gewässer im Gewässerdatensatz vorhanden sind. Die Messstationen werden im GPKG- und CSV-Format gespeichert.



**Abbildung 3.6** Häufigkeitsverteilung der Temperaturmesswerte aller Stationen in Nordrhein-Westfalen.

### 3.3.3 Messdaten Durchfluss

Die Messreihen der Durchflüsse liegen als einzelne Datei pro Station vor. Es wird ein ähnlicher Prozess durchlaufen wie bei den Temperaturdaten. Die Schritte sind in [Abbildung 3.7](#) dargestellt und erfolgen über die definierten Funktionen im Modul `river_flow.py` (siehe [Abbildung 3.2](#)). Mittels der Funktion `flow_values()` werden die Durchflussmessdaten aufbereitet und aggregiert. Da die Durchflussmesswerte für einen größeren Zeitraum vorliegen, wird die Mittelung ebenfalls über einen größeren Zeitraum durchgeführt. Dieser wird für diese Arbeit für 2005 bis 2020 festgelegt und kann als Eingangsparameter der programmierten Software angepasst werden. Es wird für alle Stationen überprüft, ob die Messreihen nach dem Startdatum des Zielzeitraums liegen oder vor dem Ende des Zeitraums enden, um diese Stationen auszuschließen. Die übrigen Stationen werden auf den Zielzeitraum zugeschnitten. Messreihen in denen zu viele Messwerte fehlen (Standardwert 30 %) werden ausgeschlossen. Die fehlenden Werte werden mit der Maskeninterpolation, maximale Anzahl fehlender Werte in Folge (Standardwert: max. 6 fehlende Werte), interpoliert. Alle Messreihen die in  $\text{L s}^{-1}$  vorliegen werden in  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  umgerechnet. Die Aggregation erfolgt kongruent zu den Temperaturdaten. Die Messwerte werden über den Zeitraum nach Tag und Monat



aggregiert, sodass es für jeden Tag des Jahres einen Wert und insgesamt 365 Werte pro Station gibt. Die aggregierten Werte werden mit der zugehörigen eindeutigen Nummer in einer CSV-Datei gespeichert. Über den betrachteten Zeitraum werden für jede Station die Durchflussmesswerte gemittelt (Mittlerer Abfluss (MQ)). Der MQ wird in einer CSV-Datei gespeichert.

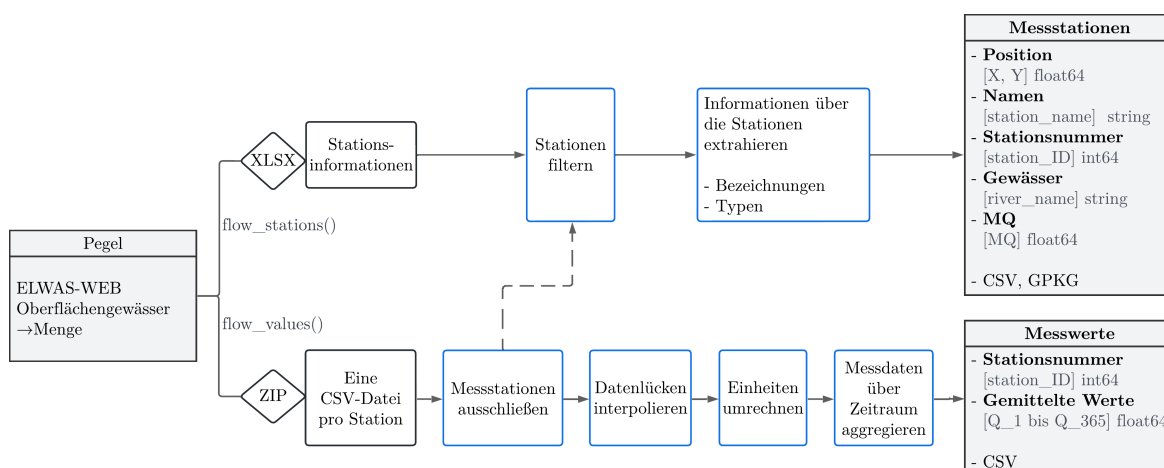


Abbildung 3.7 Datenaufbereitungsschritte Durchflussdatensatz.

Mit der Funktion `flow_stations()` wird die GPKG-Datei mit den Stationsinformationen erzeugt. Die Informationen über die Stationen werden über die Suchergebnisse über ELWAS-WEB bezogen. Die Stationen werden auf die Stationen reduziert für die Messdaten und Gewässer im Gewässerdatensatz vorliegen. Die Attribute, die Position, der Stationsname, die Stationsnummer, der zugehörige Gewässername werden eindeutig benannt und die Attributtypen definiert (siehe Abbildung 3.7). Die Informationen werden mit der Information über den MQ zusammengeführt. Die Positionen der Stationen sind bereits in EPSG 25832 gegeben. Die Messstationen werden im GPKG- und CSV-Format gespeichert.

### 3.3.4 Daten aus weiteren Quellen

Es liegen nicht für alle Fließgewässer Temperatur- und Durchflussmesswerte vor. Durch Anfragen bei dem LANUV können jedoch zu den bisher beschriebenen Datensätzen weitere Daten bezogen werden. Dabei handelt es sich um zwei Temperaturzeitreihen des Rheins. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde stellt für den Raum NRW acht Durchflusszeitreihen des Rheins zur Verfügung, die von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes betrieben werden (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2024).

Die zuvor beschriebenen Temperaturzeitreihen Unterabschnitt 3.3.2 der verschiedenen Stationen sind als Tagesmittelwerte in einer Datei zusammengefasst. Für die ergänzend zur Verfügung gestellten Daten liegt je Station eine Datei (XLSX-Datei) vor. Um die

Daten zu standardisieren und den gleichen Datenaufbereitungsschritten zu unterziehen, werden sie vor der Datenaufbereitung in das gleiche Format gebracht. Dazu wird in dem `data.py` Modul eine weitere Funktion definiert. Es werden nur die Spalten mit den Messdaten und die Zeitinformation bearbeitet. Die Temperaturdaten liegen als stündliche Daten vor und werden daher zu täglichen Werten gemittelt und in dem gleichen Format, wie die in [Unterabschnitt 3.3.2](#) beschriebenen, an die Textdatei angehängt. Da die Daten, anders als die in [Unterabschnitt 3.3.2](#) beschriebenen Daten, nicht für den Zeitraum 2022 bis 2024 vorliegen, wird er Zeitraum 2021 bis 2023 verwendet. Die Informationen über die Stationen (Name der Station, Stationsnummer, zugehöriges Gewässer, Position) werden ebenfalls in der Funktion, jedoch manuell, hinzugefügt, da die Informationen nicht in einer Datei vorliegen.

Die Durchflusszeitreihen liegen, wie in [Unterabschnitt 3.3.3](#) beschrieben, als eine Datei pro Station vor. Die zusätzlich zur Verfügung gestellten Daten liegen ebenfalls als Datei pro Station vor. Daher wird auf eine weitere Funktion verzichtet und die Einpflegung der Daten erfolgt in dem Modul `river_flow.py`. Da die Informationen über die Stationen in den ersten Zeilen der Messreihendatei gespeichert ist, werden diese bereits in der Funktion `flow_values()` gesammelt und mit dem `MQ` gespeichert und in der Funktion `flow_stations()` mit den anderen Informationen zusammengeführt.

### 3.3.5 Schutzgebiete

In [Unterabschnitt 2.4.4](#) wird auf unter Schutz gestellte Gebiete eingegangen. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass durch die Errichtung einer Anlage zur thermischen Nutzung des Fließgewässers der Schutz der Gebiete verletzt wird sollen diese berücksichtigt werden. Insbesondere werden betrachtet:

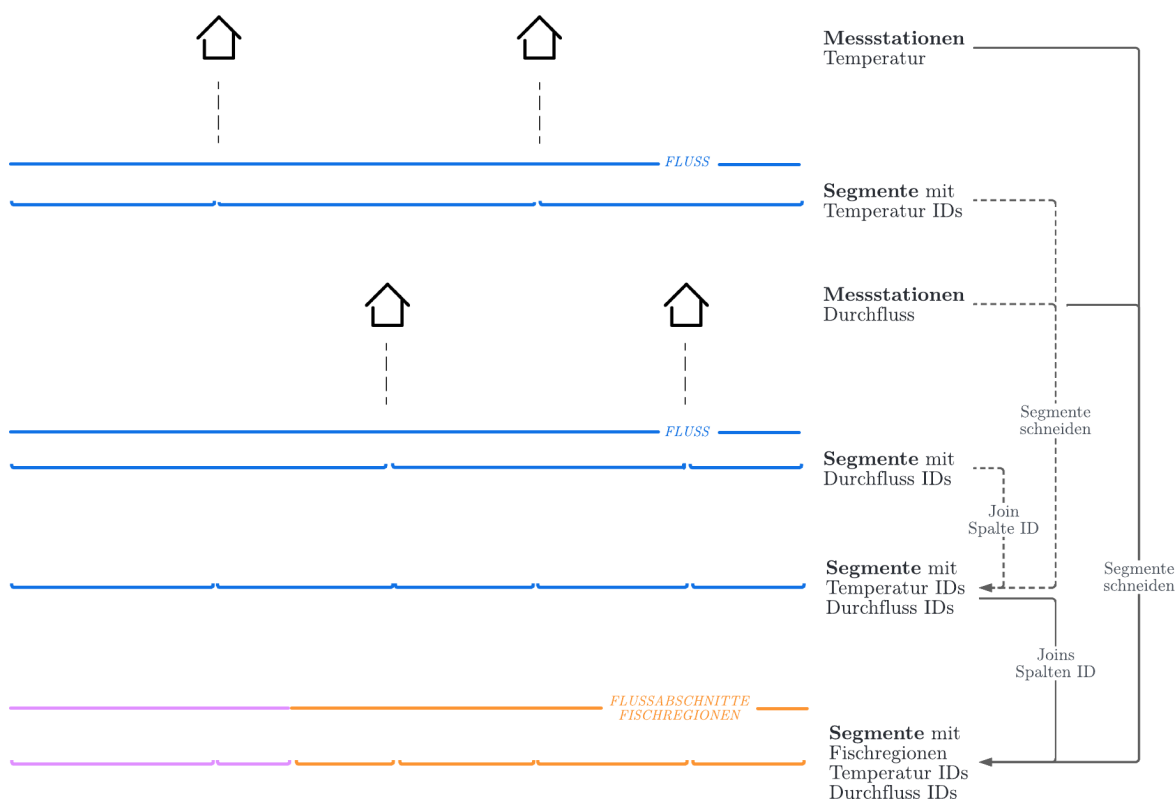
- Naturschutzgebiete
- Nationalparke
- Nationale Naturmonumente
- Biosphärenreservate

Eine Überprüfung ist insbesondere in diesen Bereichen nötig. Die Schutzgebiete werden über den `Web Feature Service (WFS)` des Bundesamtes für Naturschutz bezogen ([Bundesamt für Naturschutz, 2024](#)), auf die Fläche von `NRW` zugeschnitten und als `GPKG`-Datei gespeichert.

## 3.4 Fließgewässersegmentierung

Als Grundlage für die Potenzialberechnung werden einzelne Fließgewässerabschnitte verwendet, für die das Potenzial bestimmt wird. In diesem Abschnitt wird erläu-

tert, wie die Flussegmente entstehen. Die benötigten Funktionen sind in dem Modul `river_sections.py` definiert und die Funktionen die genutzt werden in dem Modul `functions_river_sections.py` (siehe [Abbildung 3.2](#)). Als Basis wird der Fließgewässerdatensatz mit den einzelnen Fließgewässern verwendet (siehe [Unterabschnitt 3.3.1](#)). Die Funktion `segments()` teilt die Fließgewässer in mehreren Schritten an den Temperaturmessstellen, den Pegelstationen und an den Stellen an denen sich der Temperaturtyp (die Fischgemeinschaft) ändert. Der Prozess ist in [Abbildung 3.8](#) schematisch dargestellt.



**Abbildung 3.8** Schematische Darstellung der Fließgewässersegmentierung. Blau: Fließgewässerlinie; farbige Linien stehen für verschiedene Fischgemeinschaften.

Um eine Linie an einem Punkt zu schneiden muss der Punkt exakt auf der Linie liegen. Wie in [Unterabschnitt 3.2.2](#) beschrieben, ist der Abstand der Punkte (Messstationen) zu den Linien (Fließgewässern) nicht konsistent. In dem Programm werden die Punkte auf die Linie verschoben. Durch einen Namensabgleich wird sichergestellt, dass die Stationen dem richtigen Fließgewässer zugeordnet werden. Einige Stationen mit gleicher eindeutiger Nummer, die sowohl Pegel als auch Temperatur messen, weisen nicht die gleiche räumliche Position auf. Für diese Fälle werden die Temperaturmessstationen an die Position der Pegelstationen verschoben. Da die Temperaturstationen eine größere Inkonsistenz der Lage aufweisen und projiziert wurden, wird davon ausgegangen, dass die Pegelstationen eine höhere Lagegenauigkeit aufweisen. Die verschobenen Punkte werden als `GPKG`-Dateien gespeichert.

Die Messstationen pro Fließgewässer werden gezählt. Für die Potenzialberechnung werden ein Temperaturwert und ein Durchflusswert benötigt. Fließgewässer ohne Temperaturmessstation oder ohne Pegelstation werden daher für die geometrischen Operationen nicht beachtet, wodurch der Rechenaufwand verringert wird. Um redundante Informationen zu vermeiden werden Fließgewässer mit nur einer Pegelstation und nur einer Temperaturmessstation nicht segmentiert, da den Segmenten die gleiche Station und damit die gleichen Werte zugeordnet werden würden. Diesen Fließgewässern wird direkt die eindeutige Nummer der Pegelstation und der Temperaturmessstation zugeordnet.

Die Zuordnung der Stationen erfolgt über einen räumlichen Abgleich. Den Fließgewässersegmenten wird eine Pegelstation zugeordnet und zwei Temperaturstationen, wenn zwei Stationen verfügbar sind, andernfalls nur eine Temperaturstation. Bei der Zuordnung der Pegelstation wird ein konservativ-pessimistischer Ansatz gewählt. Hierbei wird die Station mit dem niedrigeren MQ zugeordnet. Dies entspricht höchstwahrscheinlich der flussaufwärts liegenden Station, da der Durchfluss in der Regel durch Zuflüsse anderer Flüsse zunimmt. Es kann jedoch im Flussverlauf auch zu einer Durchflussabnahme kommen, etwa durch Wasserentnahmen, Bodeninfiltration oder Flussregulierungsmaßnahmen. Um das Potenzial, welches von dem Durchfluss abhängt, nicht zu überschätzen, wird daher die Station mit dem niedrigeren MQ verwendet. Dies stellt sicher, dass der beeinflussende Wert (der Durchfluss) immer den geringeren möglichen Wert annimmt. Zum Vergleich wird das Modell einmal mit der Zuordnung der Station mit dem höheren MQ durchlaufen. Um die Stationen zuzuordnen wird überprüft ob ein Fließgewässer(-abschnitt) eine oder zwei Stationen berührt und ordnet die eindeutigen Nummern nach der beschriebenen Logik zu.

Für alle Fließgewässer, für die mehr als eine Pegelstation bzw. Temperaturmessstation und mindestens eine Station des anderen Typs vorhanden ist, wird die Segmentierung durchgeführt. Zunächst werden alle Fließgewässerslinien an den Temperaturmessstationen geschnitten. Dann werden die eindeutigen Nummern der Temperaturmessstationen zugeordnet. Die eindeutigen Nummern werden in den Spalten (Temperaturmessstation ID 1 und 2) eingetragen. Es gibt so viele Objekte wie es Segmente nach der Teilung an den Temperaturstationen gibt. Da die Zuordnung der eindeutigen Nummern der Stationen segmentweise erfolgt, würden die eindeutigen Nummern der Pegelstationen teilweise verloren gehen, wenn die vorhandenen Segmente nun an den Pegelstationen geteilt werden würden. Daher wird nun der Ausgangsliniengeometrie der Fließgewässer verwendet. Dieser wird an den Pegelstationen geteilt und die ID der Pegelstation wird zugeordnet. Anschließend werden die Segmente, die durch die Teilung an den Temperaturmessstationen entstanden sind, an den Pegelstationen geteilt. Diese enthalten bereits die eindeutigen Nummern der Temperaturmessstationen. Die eindeutigen Nummern der Pegelstationen, die als Spalten in dem Durchflusssegmenten vorhanden sind, werden nun über einen räumlichen Vergleich an die Tabelle angehängt. Die Fließgewässer mit nur einer Station werden zeilenweise an die Flussegmente angehängt.

Um die Segmente weiter zu unterteilen, dort wo der Temperaturtyp (die Fischgemeinschaft) sich ändert, wird ein ähnlicher Prozess durchlaufen. Zunächst werden die

Segmente nach der Fischgemeinschaft (siehe [Unterabschnitt 3.3.1](#)) an den Temperaturmessstationen und an den Pegelstationen geteilt. Die Zuordnung der eindeutigen Nummern der Stationen erfolgt über den räumlichen Vergleich. Um redundante Informationen zu vermeiden werden zusammenhängende Segmente mit gleichen Informationen verschmolzen. Aufgrund der Teilung an verschiedenen Punkten und der unterschiedlichen Ausgangsgeometrien sind die Segmente eines Flusses nicht in der Reihenfolge des Flussverlaufs. Bevor eine eindeutige Nummer erstellt wird, werden die Segmente daher für jeden Fluss sortiert. Es wird für jedes Segment eine neue eindeutige Nummer erstellt. Da es Gebiete gibt die unter besonderen Schutz gestellt sind, wie in [Unterabschnitt 2.4.4](#) erläutert, wird überprüft, ob Segmente ganz oder teilweise in diesen Gebieten liegen. Es werden Naturschutzgebiete, Biosphaerenreservate, nationale Naturmonumente und Nationalparke überprüft. In NRW gibt es Naturschutzgebiete, Nationale Naturmonumente und Nationalparke. Für jedes Segment wird mit einer räumlichen Intersektion überprüft, ob es ganz oder teilweise in diesen Bereichen liegt. Die Information wird als Attribut (0 - Nein; 1 - Ja) hinzugefügt. Die Segmente werden als GPKG-Datei gespeichert. Dieser Datensatz enthält alle Fließgewässer. Zudem werden nur die Segmente mit mindestens einer Temperaturmessstation und mindestens einer Pegelstation als GPKG-Datei gespeichert.

In einer weiteren Funktion `segments_values()` erfolgt die Ermittlung der Messwerte. Jedes Segment enthält die eindeutige Nummer von ein bis zwei Temperaturmessstationen und einer Pegelstation. Über diese Nummer werden aus den CSV-Dateien der aggregierten Messreihen (siehe [Unterabschnitt 3.3.2](#) und [Unterabschnitt 3.3.3](#)) die Messwerte den Segmenten zugeordnet. Wenn es zwei Temperaturmessstationen für ein Segment gibt, wird der Mittelwert der Messwerte gebildet. Bei nur einer Temperaturmessstation und bei der Pegelstation wird der entsprechende Messwert zugeordnet. Jedes Segment weist damit 365 Temperaturmesswerte und 365 Durchflussmesswerte auf. Die Messwerte werden im CSV-Format gespeichert. Die Zuordnung erfolgt über die eindeutige Nummer der Segmente.

## 3.5 Potenzialberechnung

Für jeden Fließgewässer(-abschnitt) wird das Potenzial für die Wärmenutzung in einer täglichen Auflösung berechnet. Nach der Vorgehensweise in [Abschnitt 3.4](#) liegen für jeden Fließgewässer(-abschnitt) 365 Durchflussmesswerte und 365 Temperaturmesswerte vor. In [Unterabschnitt 2.5.1](#) wird eine allgemeine Definition der verschiedenen Potenzialtypen dargestellt. In dem Folgenden [Unterabschnitt](#) werden die Potenzialtypen für diese Arbeit definiert. Bei der thermischen Nutzung von Fließgewässern gibt es verschiedene Temperaturgrenzwerte, auf die anschließend eingegangen wird, bevor erläutert wird, wie der maximal nutzbare Durchfluss ermittelt wird, der theoretisch genutzt werden kann. Abschließend wird die Implementierung der Berechnung des Potenzials in Python dargestellt.

### 3.5.1 Potenzialdefinition

Nach der Darstellung in [Unterabschnitt 2.5.1](#) können das theoretische, technische, wirtschaftliche und realisierbare Potenzial unterschieden werden. Die Grenzen sind nicht trennscharf und unterscheiden sich in verschiedenen Studien. Daher soll an dieser Stelle eine für diese Arbeit gültige Definition festgelegt werden.

Die Basis bildet das theoretische Potenzial, das nach [Manz et al. \(2024\)](#) das Potenzial ohne Einschränkungen beschreibt. Bezogen auf das Potenzial von Fließgewässern entspricht dies [Gleichung \(2.19\)](#). Es müssen für eine Berechnung jedoch Annahmen, etwa über die Temperaturspreizung (siehe [Unterabschnitt 3.5.2](#)) gemacht werden. In dieser Arbeit weicht die Definition des theoretischen Potenzials – ohne Einschränkungen – daher ab. Bei dem theoretischen Potenzial werden Temperaturgrenzwerte berücksichtigt, da sie für die Berechnung notwendig sind (minimale Gewässertemperatur  $T_{\min}$  und Temperaturdifferenz  $\Delta T$ ). Diese berechnen sich auf der theoretischen Ebene aus den allgemeingültigen Begrenzungen die technischer sowie ökologischer Natur sind. Aufgrund der Temperaturdifferenzgrenzwerte kann nicht zwangsläufig der gesamte Durchfluss genutzt werden (siehe [Unterabschnitt 3.5.3](#)), der daher auf dieser Ebene rein durch die Temperaturdifferenzgrenzwerte begrenzt wird.

Bei dem technischen Potenzial werden technische Limitationen berücksichtigt. Es wird der maximal nutzbare Durchfluss begrenzt und der Anteil, der zusätzlich durch die Wärmepumpe bereitgestellt wird, wird nach [Gleichung \(2.20\)](#) berechnet. Zudem werden technisch-wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt, da der Übergang zwischen technischen und wirtschaftlichen Potenzial fließend ist bzw. voneinander abhängig ist. In dieser Arbeit werden daher technische Annahmen getroffen, die als wirtschaftlich plausibel angesehen werden. Es wird nur das Nutzungspotenzial, nicht das Versorgungspotenzial betrachtet.

Die technisch-wirtschaftlichen Faktoren beziehen sich rein auf das technische Potenzial. Unter dem wirtschaftlichen Potenzial werden in dieser Arbeit Wirtschaftsanalysen und ähnliche Methoden verstanden, die nicht Teil dieser Arbeit sind. Bei dem realisierbare Potenzial werden regulatorische und administrative Faktoren berücksichtigt ([Dufter et al., 2018](#)). In dieser Arbeit wird dies, als auf den spezifischen Anwendungsfall bezogen, verstanden. Es können unter Umständen auf dieser Ebene weitere Einschränkungen, etwa durch lokale Begrenzungen einer Gemeinde, weitere Limitationen auftreten, die im Rahmen dieser Arbeit, nicht betrachtet werden. Dennoch sollen allgemein gültige Begrenzungen, etwa Naturschutzgebiete, insofern betrachtet werden, dass deren Existenz im Datensatz aufgenommen wird. Die Berechnung des Potenzials bleibt davon unberührt. Eine Prüfung ist abhängig von dem spezifischen Projekt und damit Teil des realisierbaren Potenzials und nicht Teil dieser Arbeit.

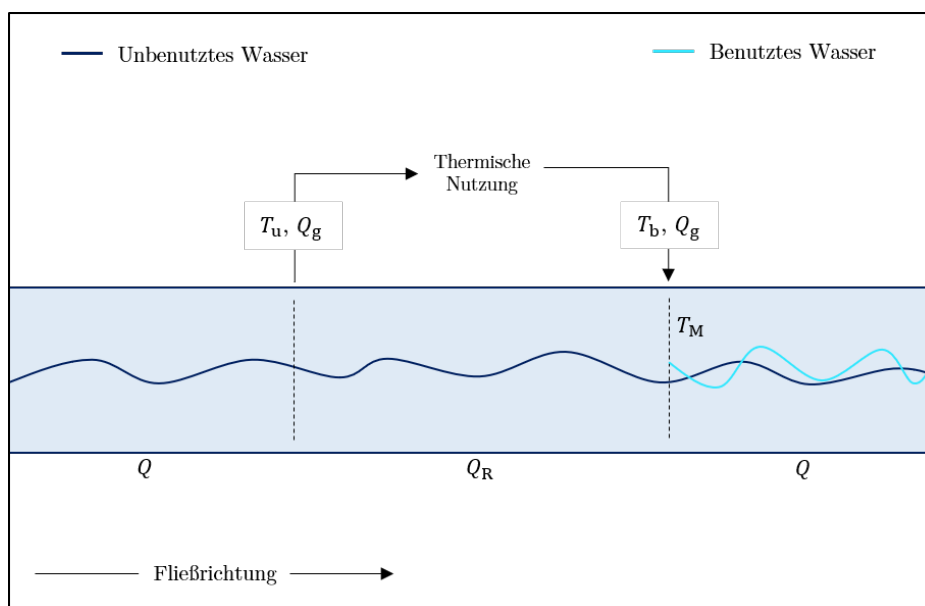


Abbildung 3.9 Schematische Darstellung der Durchfluss- und Temperaturwerte.

### 3.5.2 Temperaturgrenzwerte

Bei Flusswasser handelt es sich um eine Niedertemperaturwärmequelle, deren Temperaturniveau durch eine Wärmepumpe erhöht und damit nutzbar gemacht werden kann (Quaschnig, 2015). In der Abbildung 3.9 ist ein Fließgewässer mit einem Durchfluss  $Q$  dargestellt. Wird davon ein Teil des Durchflusses  $Q_g$  für eine Wärmeanwendung genutzt, verbleibt der Rest der Durchflusses  $Q_R = Q - Q_g$  in dem Gewässerbett. Das Wasser hat eine Temperatur vor der Nutzung  $T_u$ . Während der Nutzung wird das Wasser um einen Betrag abgekühlt. Diese Temperaturspreizung  $\Delta T$  zwischen dem unbenutzten und benutzten Wasser ist von der verwendeten Wärmepumpentechnik abhängig. Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, wird die Temperatur der Wärmequelle, das heißt des Flusswassers, auf das Kältemittel übertragen. Um einen Standardwert für die Temperaturspreizung zu ermitteln werden die Werte verschiedener Studien, wie der untersuchten Studien aus Unterabschnitt 2.5.2, betrachtet und Angaben in Betrieb befindlicher Flusswärmepumpen in Tabelle 3.2 gegenübergestellt.

Die Werte nach Tabelle 3.2 der Studien sind höher angesetzt als die Kennwerte der betriebenen Anlagen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei den Studien um die Ermittlung eines theoretischen bis technischen Potenzials handelt. Der Wert ist vorrangig jedoch auf die Technologie der Wärmepumpen zurückzuführen. Somit handelt es sich bei den umgesetzten Projekten um einen geringeren Wert, da es sich um realisierte Projekte handelt. Als Kompromiss wird ein Standardwert für die Temperaturspreizung  $\Delta T$  zwischen unbenutzten und benutzten Wasser von 0 K bis 3 K festgelegt, der als Eingangsparameter der programmierten Software angepasst werden kann.



**Tabelle 3.2** Temperaturspreizung  $\Delta T$  zwischen unbenutzten und benutzten Wasser.

Referenz	$\Delta T$	Wärmequelle	Anmerkung
Ferstl et al. (2024)	5 K bis 10 K	Flusswasser	Studie Ermittelt aus Literatur Nicht angewendet in der Studie
Gaudard et al. (2019)	Max. 10 K	Fluss- und Seewasser	Studie
Schwinghammer (2012)	Max. 5 K	Flusswasser	Studie Entnommen aus dem Genehmigungsbe- scheid Nahwärmenetz Lauterecken
MVV Energie AG (2023)	2 K bis 5 K	Flusswasser	Wärmepumpe Rhein (Mannheim, Deutschland)
Ayub (2016)	4 K bis 5 K	Fjordwasser	Wärmepumpe Drammensfjord (Dram- men, Norwegen)
Friotherm AG (2008)	2 K	Meerwasser	Wärmepumpe Värtan Ropsten (Stock- holm, Schweden)

Nach dem Wärmeentzug wird das benutzte Wasser mit der Temperatur  $T_b$  wieder in den Fluss geleitet. Es ist maximal abgekühlt um die Obergrenze der Temperaturspreizung. Zudem wird ein absoluter Minimalwert festgelegt. Aufgrund der Frostgefahr am Verdampfer (siehe Unterabschnitt 2.4.1) und der ökologischen Auswirkungen auf das Fließgewässer (siehe Unterabschnitt 2.4.3) wird der Standardwert für die minimale Temperatur des Wassers auf  $T_{\min} = 2^\circ\text{C}$  festgelegt. Dieser gilt sowohl für die Temperatur des Gesamtgewässers vor und nach der Nutzung als auch für das zurückgeleitete Wasser. Der zurückgeleitete Durchfluss entspricht dem entnommenen Durchfluss. Das verbliebene Wasserpaket mit der Temperatur  $T_u$  vermischt sich mit dem zurückgeleiteten Wasser mit der Temperatur  $T_b$ . Da die Minimaltemperatur auf  $T_{\min} = 2^\circ\text{C}$  festgelegt ist, sinkt die Temperatur des Gesamtgewässers nie unter den Minimalwert. Es ergibt sich für die absolut benötigte Temperatur vor der Nutzung die Summe aus der Temperatur des unbenutzten Wassers  $T_u$  und der Untergrenze der Temperaturspreizung.

### 3.5.3 Maximal nutzbarer Durchfluss

Um das thermische (theoretische) Potenzial zu bestimmen wird nach Gleichung (2.19) der Durchfluss  $Q_g$  benötigt, der für die Wärmeanwendung genutzt wird. Ziel ist die in Unterabschnitt 3.5.2 beschriebenen Temperaturgrenzwerte einzuhalten. In Tabelle 3.3 ist die Temperaturspreizung zwischen dem benutzten und unbenutzten Wasser gegen die Temperaturveränderung des Gesamtgewässers bei verschiedenen Entnahmeraten dargestellt. Es handelt sich bei den dargestellten Entnahmeraten um theoretische Werte, da Entnahmen über 20 % in der Praxis als unrealistisch anzusehen sind (Ferstl et al., 2024; Schwinghammer, 2012). Es handelt sich dabei jedoch um eine ökologische und technische Beschränkung, die erst bei dem technischen Potenzial (siehe Unterabschnitt 3.5.5 berücksichtigt wird. Basierend auf dem in Tabelle 3.3 dargestellten



Zusammenhang kann der maximale Durchfluss, der theoretisch genutzt werden kann, bestimmt werden.

**Tabelle 3.3** Temperaturveränderung des Gesamtgewässers bei verschiedenen Temperaturspreizungen und theoretischen Entnahmeraten, angelehnt an Ferstl et al. (2024) und Schwinghammer (2012).

Temperaturspreizung in K	Temperaturveränderung des Gesamtgewässers in K bei einer Entnahmerate von:						
	1 %	2 %	5 %	10 %	20 %	50 %	100 %
1	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	1,00
2	0,02	0,04	0,10	0,20	0,40	1,00	2,00
3	0,03	0,06	0,15	0,30	0,60	1,50	3,00
4	0,04	0,08	0,20	0,40	0,80	2,00	4,00
5	0,05	0,10	0,25	0,50	1,00	2,50	5,00
10	0,10	0,20	0,50	1,00	2,00	5,00	10,00

Der Ablauf zur Bestimmung des maximal nutzbaren Durchflusses für jedes Fließgewässersegment und jede Zeiteinheit, der theoretisch genutzt werden könnte, ist in *Abbildung 3.10* schematisch dargestellt. Liegt die Temperatur des unbenutzten Wassers  $T_u$  unterhalb der benötigten Temperatur  $T_{\min}$ , wird das Potenzial auf Null gesetzt und mit der nächsten Zeiteinheit fortgefahren. Die Temperaturgrenze ergibt sich aus der Summe der Minimaltemperatur und der Untergrenze der Temperaturspreizung  $\Delta T_{\text{geg},\min}$ . Es wird hier zwischen der gegebenen Temperaturspreizung  $\Delta T_{\text{geg}}$  und der tatsächlichen Temperaturspreizung  $\Delta T_{\text{tat}}$  unterschieden. Die tatsächliche Temperaturspreizung

$$\Delta T_{\text{tat}} = T_u - T_{\min} \quad (3.1)$$

wird aus der Differenz zwischen der Temperatur des unbenutzten Wassers  $T_u$  und der Minimaltemperatur  $T_{\min}$  bestimmt. Die tatsächliche Temperaturspreizung

$$\Delta T_{\text{tat}} = \begin{cases} \Delta T_{\text{geg},\max}, & \text{wenn } \Delta T_{\text{tat}} \geq \Delta T_{\text{geg},\max} \\ \Delta T_{\text{tat}}, & \text{wenn } \Delta T_{\text{tat}} < \Delta T_{\text{geg},\max} \end{cases}$$

kann maximal den Wert der Obergrenze der gegebenen Temperaturspreizung  $\Delta T_{\text{geg},\max}$  annehmen. Neben der tatsächlichen Temperaturspreizung  $\Delta T_{\text{tat}}$  kann auch die Temperatur des benutzten Wassers

$$T_b = T_u - \Delta T_{\text{tat}} \quad (3.2)$$

abgeleitet werden. Die maximale Temperaturveränderung des Gesamtgewässers  $\Delta T_{\max}$  lässt sich aus der Fischgemeinschaft des Fließgewässersegments ableiten. Die maximale Wasserentnahmerate

$$\phi = \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{tat}}} \quad (3.3)$$

wird aus der tatsächlichen Temperaturspreizung  $\Delta T_{\text{tat}}$  und der maximalen Temperaturveränderung des Gesamtgewässers  $\Delta T_{\max}$  bestimmt. Das Ergebnis kann Werte größer als 1 annehmen, wird jedoch auf maximal 1 begrenzt

$$\phi = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \phi \geq 1 \\ \phi, & \text{wenn } \phi < 1 \end{cases}$$

Der genutzte Durchfluss

$$Q_g = Q\phi \quad (3.4)$$

errechnet sich aus dem Gesamtdurchfluss  $Q$  multipliziert mit der Wasserentnahmerate  $\phi$ .

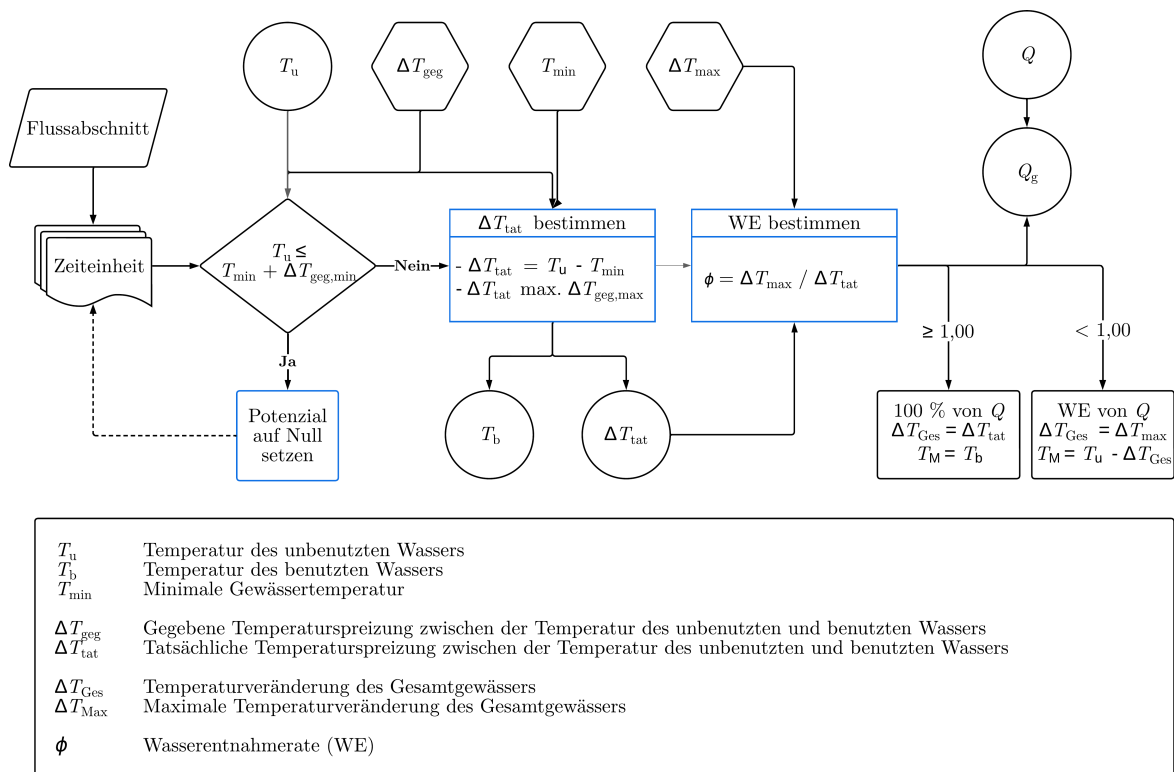


Abbildung 3.10 Bestimmung des maximalen Durchflusses (theoretisch).

### 3.5.4 Das theoretische Potenzial

Die Potenzialberechnung erfolgt in dem Modul `potential.py`. Die Funktionen, die genutzt werden sind in dem Modul `functions_potential.py` implementiert (siehe

**Tabelle 3.4** Standardwerte für die Potenzialberechnung.

Parameter	Bezeichnung	Wert
Spezifische Wärmekapazität von Wasser	c	4180 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Dichte von Wasser	rho	1000 kg m <sup>-3</sup>
$\Delta T$ zwischen unbenutzten und benutzten Wasser	lim_delta_T	0 K - 3 K
Minimale Gewässertemperatur	min_T	2 °C
Betrachtungszeitraum	t	86 400 s
<hr/>		
Gütegrad der Wärmepumpe	ny	0.5
Vorlauftemperatur	Tn	333,15 K
COP (Mindestanforderung)	cop_min	2
Maximale Entnahmerate	per	20 %
Quantil (Dimensionierung der Anlage)	quantile	54,4 %-Quantil

Abbildung 3.2). Für die Berechnung werden in dem Hauptmodul die benötigten Parameter definiert. Als Standardwerte werden die in Tabelle 3.4 dargestellten Werte initialisiert. Für das theoretische Potenzial werden nur die Werte aus dem oberen Teil der Tabelle benötigt. Die Wahl der Temperaturgrenzwerte, die Temperaturdifferenz zwischen dem unbenutzten und benutzten Wasser sowie die minimale Gewässertemperatur sind dem [Unterabschnitt 3.5.2](#) zu entnehmen. Aufgrund der täglichen Auflösung wird der Betrachtungszeitraum auf einen Tag festgelegt.

Die Funktion `pot()` berechnet das theoretische Potenzial anhand der gegebenen Werte. Dazu wird über die einzelnen Segmente iteriert. Für jedes Segment wird zunächst die maximal erlaubte Veränderung des Gesamtgewässers in Abhängigkeit der Fischgemeinschaft des Fließgewässerabschnitts ermittelt. Dazu werden die Abkürzungen der Fischgemeinschaften nach der *OGewV* verwendet. Falls eine Fischgemeinschaft unbekannt ist, wird der kleinste Wert 1,5 K verwendet und eine Warnung ausgegeben. Anschließend werden, nach der Vorgehensweise aus [Unterabschnitt 3.5.2](#) und [Unterabschnitt 3.5.3](#), die Temperaturgrenzwerte und der maximal nutzbare Durchfluss für jeden Tag des Jahres das bestimmt. Mit den Werten wird das theoretische Potenzial für jeden Tag berechnet. Die Ergebnisse werden in J und kWh je im CSV-Format gespeichert. Die gegebenen und ermittelten Werte, die für die Berechnung genutzt werden, werden in einer separaten CSV-Datei für jedes Segment gespeichert.

### 3.5.5 Das technische Potenzial

Das theoretische Potenzial kann, wie in [Abbildung 2.5](#) dargestellt, durch technische Limitationen, weiter eingeschränkt werden. Für die Berechnung des technischen Potenzials werden zusätzliche Einflussgrößen (maximale Entnahmerate, COP der Wärmepumpe,

Dimensionierung der Anlage) betrachtet. Die definierten Standardwerte sind [Tabelle 3.4](#) zu entnehmen. Die Berechnung erfolgt ebenfalls über die Funktion `pot()` mit dem Zusatz `tec=True`. Die Berechnung erfolgt analog zu dem theoretischen Potenzial mit einigen Zusätzen, die im Folgenden erläutert werden.

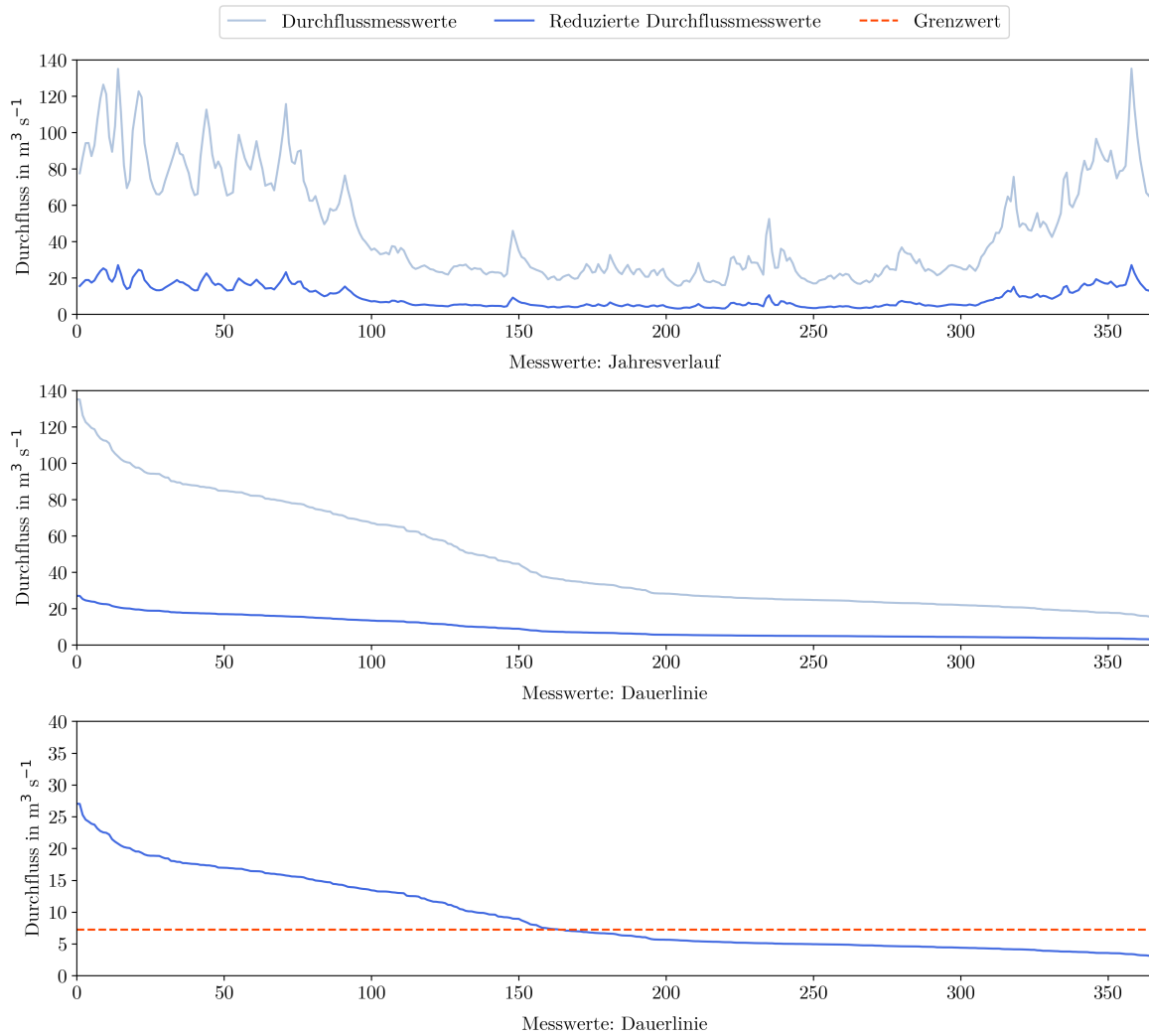
Um die Wärmepumpenanlage richtig zu dimensionieren, sollte sie eine möglichst hohe Jahreslaufzeit bei voller Leistung erreichen. Dadurch kann die Anlage effizient und wirtschaftlich betrieben werden. Je kleiner die Anlage dimensioniert ist, desto geringer sind die Investitionskosten. Ist die Anlage zu groß dimensioniert, kommt es zu häufigen Ein- und Ausschaltzyklen (Takten), was die Lebensdauer der Anlage reduziert und die Effizienz mindert. Mit der Dimensionierung der Anlage geht einher, dass der Durchfluss auf einen Bereich festgelegt wird, siehe dazu Erläuterungen in [Unterabschnitt 2.4.1](#). Dies bedeutet, ist weniger Durchfluss vorhanden, kann die Anlage nicht unter voller Leistung arbeiten. Ist ein größerer Durchfluss vorhanden, kann nur ein Teil genutzt werden. Dazu wird für jeden Fließgewässerabschnitt ein Grenzwert  $Q_{g,max}$  ermittelt. Es handelt sich um einen absoluten maximalen Durchflussmesswert. Dieser wird aus der Stundenanzahl pro Jahr abgeleitet, unter der die Anlage unter voller Leistung betrieben werden soll.

Bei der Berechnung des theoretischen Potenzials kann theoretisch der gesamte Durchfluss eines Fließgewässers genutzt werden. Aus technischen und ökologischen Gründen wird für die Entnahmerate ein Maximalwert gesetzt. Für den Standardwert wird festgelegt, dass maximal 20 % des Gesamtdurchflusses genutzt werden können (siehe [Tabelle 3.4](#)). Analog zu [Unterabschnitt 3.5.5](#) wird aus der tatsächlichen Temperaturspreizung und der maximalen Temperaturveränderung des Gesamtgewässers die maximale Wasserentnahmerate ermittelt. Liegt dieser Wert oberhalb des gegebenen Maximalwerts wird die Entnahmerate auf den Maximalwert gesetzt. Bevor der Grenzwert aus der Stundenanzahl pro Jahr abgeleitet wird, unter der die Anlage unter voller Leistung betrieben werden soll, werden die Durchflussmesswerte reduziert auf die maximale Entnahmerate. Dies ist in [Abbildung 3.11](#) (oben) am Beispiel des Abschnitts `DE_NRW_272_0_0` der Sieg dargestellt. Um die angegebenen Stunden pro Jahr zu erreichen müssen entsprechend viele Werte im Jahresverlauf über diesem Grenzwert liegen. Zur Veranschaulichung sind die Werte dazu in [Abbildung 3.11](#) (Mitte, unten) sortiert aufgetragen. Um 4000 h pro Jahr zu gewährleisten müssen 0,456 Werte oberhalb des Grenzwertes liegen, das entspricht dem 54,4 %-Quantil (gestrichelte Linie in [Abbildung 3.11](#) (unten)).

Nachdem der Wert ermittelt wurde, wird wie für das theoretische Potenzial über jeden Tag iteriert. Zunächst wird die Mindesttemperatur überprüft. Anschließend wird der nutzbare Durchflussmesswert

$$Q_g = \begin{cases} Q_{g,max}, & \text{wenn } Q_g \geq Q_{g,max} \\ Q_g, & \text{wenn } Q_g < Q_{g,max} \end{cases}$$

auf den ermittelten Grenzwert gesetzt, falls der nutzbare Durchflussmesswert größer ist.



**Abbildung 3.11** Durchflussbegrenzung: 4000 h jährlicher Betrieb bei voller Leistung am Beispiel der Sieg (Abschnitt DE\_NRW\_272\_0\_0).

Zudem wird der COP der Wärmepumpenanlage betrachtet (siehe Abschnitt 2.1). Der COP der Wärmepumpe wird mit der Gleichung (2.7) berechnet, unter Nutzung eines Standardwerts für den Gütegrad von 0,50 nach Tabelle 2.1 (Zogg, 2009). Die Temperatur des abgegebenen Nutzwärmestroms  $T_{\text{nutz}}$  wird gegeben und die Temperatur der Wärmequelle  $T_{\text{umg}}$  entspricht der Temperatur des unbenutzten Wassers. Für den COP kann zusätzlich eine Mindestanforderung angegeben werden, um zu gewährleisten, dass die Anlage wirtschaftlich ist. Liegt der COP unterhalb der Mindestanforderung, wird das Potenzial auf Null gesetzt. Für alle anderen Tage wird das technische Potenzial nach Gleichung (2.17) in J und kWh berechnet und im CSV-Format gespeichert. Die gegebenen und ermittelten Werte, die für die Berechnung genutzt werden, werden in einer separaten CSV-Datei für jedes Segment gespeichert.

## 3.6 Sensitivitätsanalyse

Um zu untersuchen, welchen Einfluss die Eingangsvariablen  $x$  des Modells auf die Ausgangsgröße  $y$  des Modells haben, wird an dieser Stelle die Implementierung einer Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Grundsätzlich können dafür drei Typen unterschieden werden (Siebertz, van Bebbber & Hochkirchen, 2017):

- Faktor-Screening: Untersuchung des qualitativen Einflusses der Eingangsvariablen auf eine Ausgangsvariable.
- Lokale Sensitivitätsanalyse: Untersuchung des Einflusses der Eingangsvariablen bei einem bestimmten Ausgangswert.
- Globale Sensitivitätsanalyse: Untersuchung des Einflusses der Eingangsvariablen auf eine Ausgangsvariable, wobei der gesamte Definitionsbereich betrachtet wird.

In dieser Arbeit wird eine globale Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Zu den für die Durchführung verfügbaren Methoden zählen grafische Verfahren, wie Scatterplots und konventionelle Verfahren, wie Analysen, die auf Monte-Carlo-Simulationen beruhen. Bei der quantitativen Varianzanalyse wird der direkte Einfluss der Parameter über den Haupteffekt, d. h. die Sensitivität erster Ordnung, beschrieben. Wechselwirkungen werden über den Totaleffekt, d. h. die Gesamtsensitivität, abgebildet (Han, 2011). Um Stichproben zu sammeln können Techniken wie die Monte-Carlo-Technik oder Verfahren auf Grundlage von Sobol-Sequenzen, verwendet werden (Burhenne, Jacob & Gregor, P., H., 2011). In dieser Arbeit wird eine varianzbasierte Sensitivitätsanalyse durchgeführt, wobei die Stichprobennahme auf Sobol-Sequenzen basiert. Es wird untersucht, welcher Anteil der Varianz im Ergebnis (dem theoretischen Potenzial  $E_{\text{pot,theo}}$  bzw. dem technischen Potenzial  $E_{\text{pot,tec}}$ ) je durch die Eingangsvariablen (Temperatur  $T$  und Durchfluss  $Q$ ) erklärt werden kann. Die Implementierung der Analyse erfolgt in Python mit der Open-Source-Bibliothek SALib (Iwanaga & Usher, W., Herman, J., 2022; Herman & Usher, 2017).

Die Zielfunktion ist die Potenzialberechnung. Für die Potenzialberechnung werden verschiedene Parameter benötigt, von denen der Durchfluss und die Temperatur der Gewässerabschnitte aus Messwerten stammen und mit Unsicherheiten behaftet sind. Mittels der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss der Unsicherheit der Eingangsdaten für Temperatur und Durchfluss auf die Unsicherheit im Ergebnis, dem Potenzial, untersucht. Dabei sind insbesondere die Monate von Bedeutung, die innerhalb der Heizperiode liegen. Die Heizperiode ist von der Heizgrenztemperatur abhängig, einem Kennwert, der bei Neubauten aufgrund der energetischen Standards niedriger ist als bei Bestandsgebäuden. Die Dauer der Heizperiode ergibt sich daraus, wann die Heizgrenztemperatur unterschritten wird. Es ist demnach das regionale Klima zu betrachten (Schild & Willems, 2022). Da an dieser Stelle ein allgemeiner Zeitraum für ganz Deutschland benötigt wird, wird auf eine detaillierte Betrachtung verzichtet. Die

Heizperiode ist rechtlich nicht festgelegt, kann jedoch auf Oktober bis einschließlich April festgelegt werden, wobei Abweichungen aufgrund der Witterungsverhältnisse möglich sind (Viessmann, 2024). Die Sensitivitätsanalyse wird nur für diesen Zeitraum durchgeführt, da in diesen Monaten ein erhöhter Bedarf an Raumheizwärme besteht. Für jeden Monat der Heizperiode und jeden Fließgewässerabschnitt wird die Varianz der Temperatur und des Durchflusses bestimmt. Aus der Varianz wird die Größe des Parameterraums bestimmt. Es werden  $N$  Stichproben aus dem 2-dimensionalen Parameterraum (Temperatur und Durchfluss,  $k = 2$ ) gezogen. Die Anzahl der Stichproben muss hoch genug sein, sodass die berechneten Sensitivitätsindizes konvergieren. Die Grenzen werden je auf  $x_T = [-1, 1]$  und  $x_Q = [-1, 1]$  festgelegt. Insgesamt entspricht das  $N(k + 2)$  Durchläufen bzw. Bewertungen der Zielfunktion. Für jeden Durchlauf bzw. jede Bewertung werden die täglich aufgelösten Ausgangswerte der Eingangsparameter mit der Multiplikation der jeweiligen monatlichen Varianz mit der Stichprobe summiert. Das Ergebnis der Zielfunktion  $y$ , das Potenzial, wird je Durchlauf summiert. Anschließend findet die Analyse statt, die den Haupteffekt (Sensitivität erster Ordnung) und den Totaleffekt (Gesamtsensitivität) zurückgibt.

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die resultierenden Ergebnisse dieser Masterarbeit vorgestellt. Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist der Einsatz von geoinformationstechnologischen Methoden, um das Potenzial von Fließgewässern aus räumlichen Daten abzuleiten.

### 4.1 Fließgewässersegmente

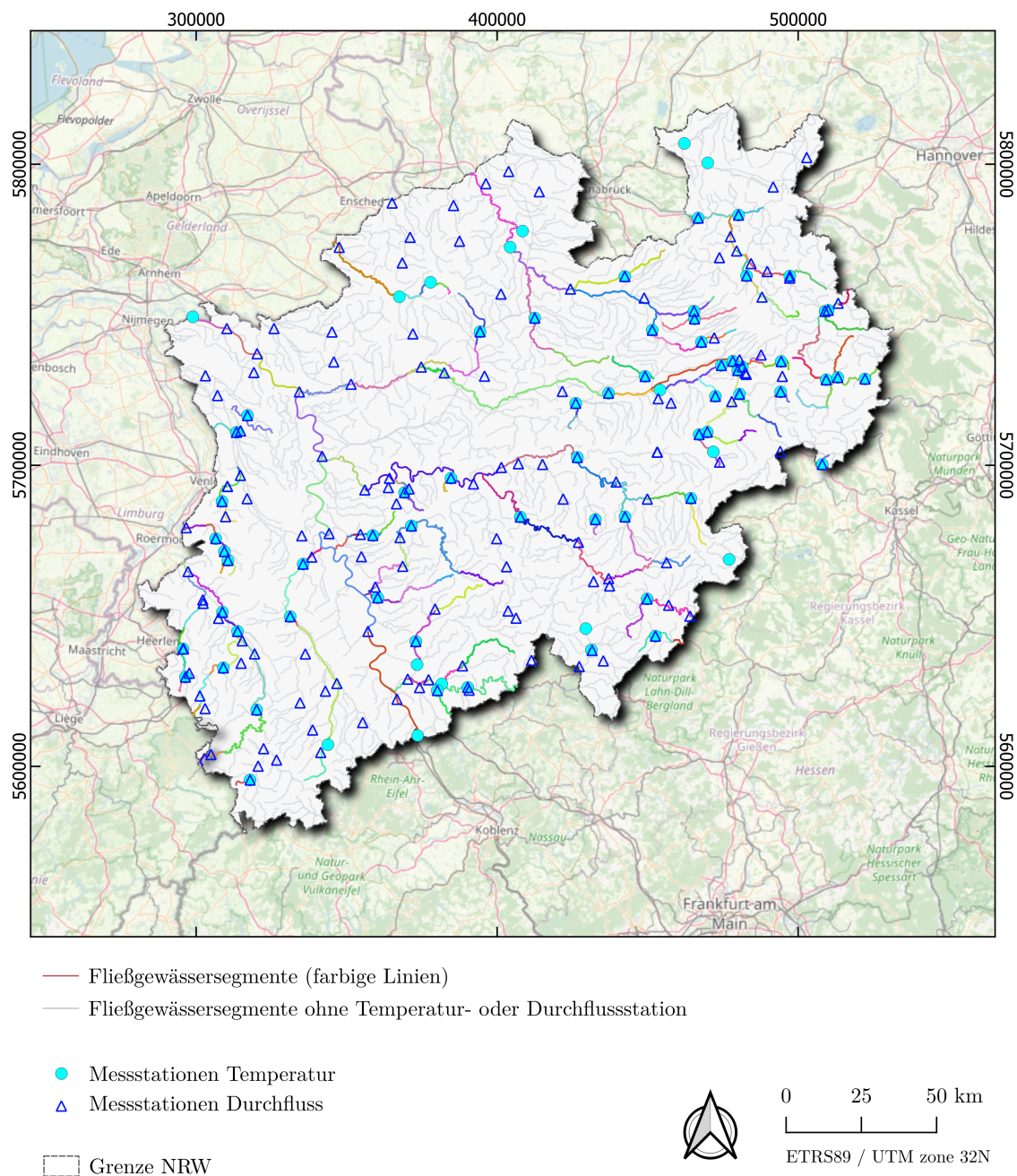
Zunächst wurden das Fließgewässernetz sowie die Temperatur- und Durchflussdaten aufbereitet. Dieser Schritt ist abhängig von den Ausgangsdaten. Anschließend wurden die Fließgewässerlinien geteilt. Ergebnis der Fließgewässersegmentierung sind die folgenden Datensätze:

1. Fließgewässersegmente, nur Fließgewässer mit mindestens einer Temperatur- und Pegelstation (Vektordaten im GPKG-Format mit LineString Geometrie)
2. Fließgewässersegmente, inklusive Fließgewässern ohne Temperatur- und Pegelstation (Vektordaten im GPKG-Format mit LineString Geometrie)
3. Zugehörige Temperatur- und Durchflussmesswerte zu den Fließgewässersegmenten (CSV-Format)

Der erste Datensatz enthält die Fließgewässersegmente, für die sowohl ein Durchflussmesswert, als auch ein Temperaturmesswert vorliegt. Zur Vollständigkeit enthält der zweite Datensatz ebenfalls die Fließgewässer, für die keine Daten vorliegen. Dieser Datensatz wird in diesem Kapitel nicht weiter thematisiert. In *Abbildung 4.1* sind die Fließgewässersegmente dargestellt. Der dritte Datensatz enthält die ermittelten Temperatur- und Durchflussmesswerte für jedes Fließgewässer(-segment) des ersten Datensatzes. Der erste und dritte Datensatz bilden die Grundlage der Potenzialberechnung.

Die Segmentgrenzen der Fließgewässer befinden sich an den Positionen, an welchen sich der Temperaturtyp (die Fischgemeinschaft) ändert oder eine Temperaturmessstation bzw. eine Pegelstation liegt. In *Abbildung 4.3* sind die Fließgewässersegmente und in *Tabelle 4.2* die zugehörigen Attribute am Beispiel der Werre dargestellt. Die Werre

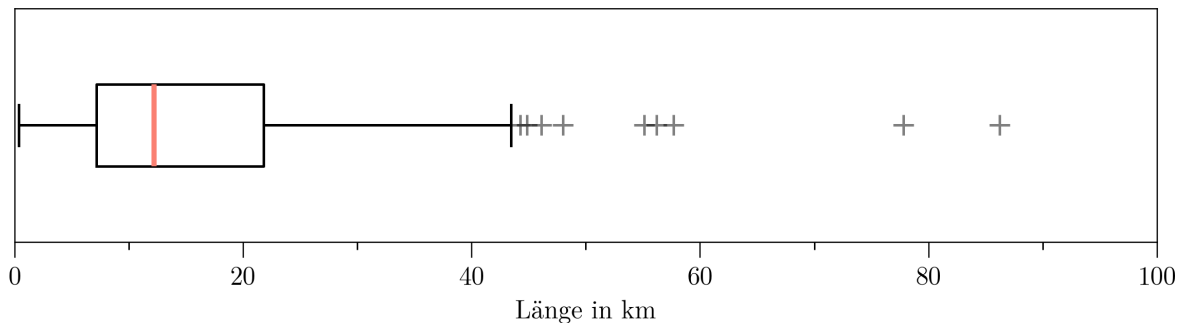




Abflussmessdaten © Land NRW. Abflussmessdaten des Rheins: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BIG). (Daten verändert), Basiskarten und -daten von OpenStreetMap und der OpenStreetMap-Foundation (CC-BY-SA). © <https://www.openstreetmap.org> und Beitragende.

**Abbildung 4.1** Fließgewässersegmente und Positionen der Messstationen in Nordrhein-Westfalen.

besteht aus acht Segmenten mit unterschiedlichen Fischgemeinschaften. Es gibt fünf Pegelstationen und zwei Temperaturmessstationen. Die Fließgewässer(-segmente) bestehen nur dann aus mehreren Segmenten, wenn die resultierenden Segmente keine redundanten Informationen enthalten. Beispielsweise besteht, wenn für ein Fließgewässer nur eine Temperatur- und eine Pegelstation vorliegt, das resultierende Ergebnis weiterhin nur aus einem Abschnitt ohne Teilung. Im weiteren Vorlauf wird von Fließgewässersegmenten gesprochen, wobei ein Segment auch einem gesamten Fließgewässer entsprechen kann. Insgesamt beinhaltet der Datensatz 165 Fließgewässersegmente. Die Länge der Fließgewässersegmente differiert zwischen 0,4 km und 86 km. Im Mittel sind die Segmente 16,5 km bzw. im Median 12,2 km lang. Eine Übersicht über die Länge der Segmente ist in [Abbildung 4.2](#) dargestellt.

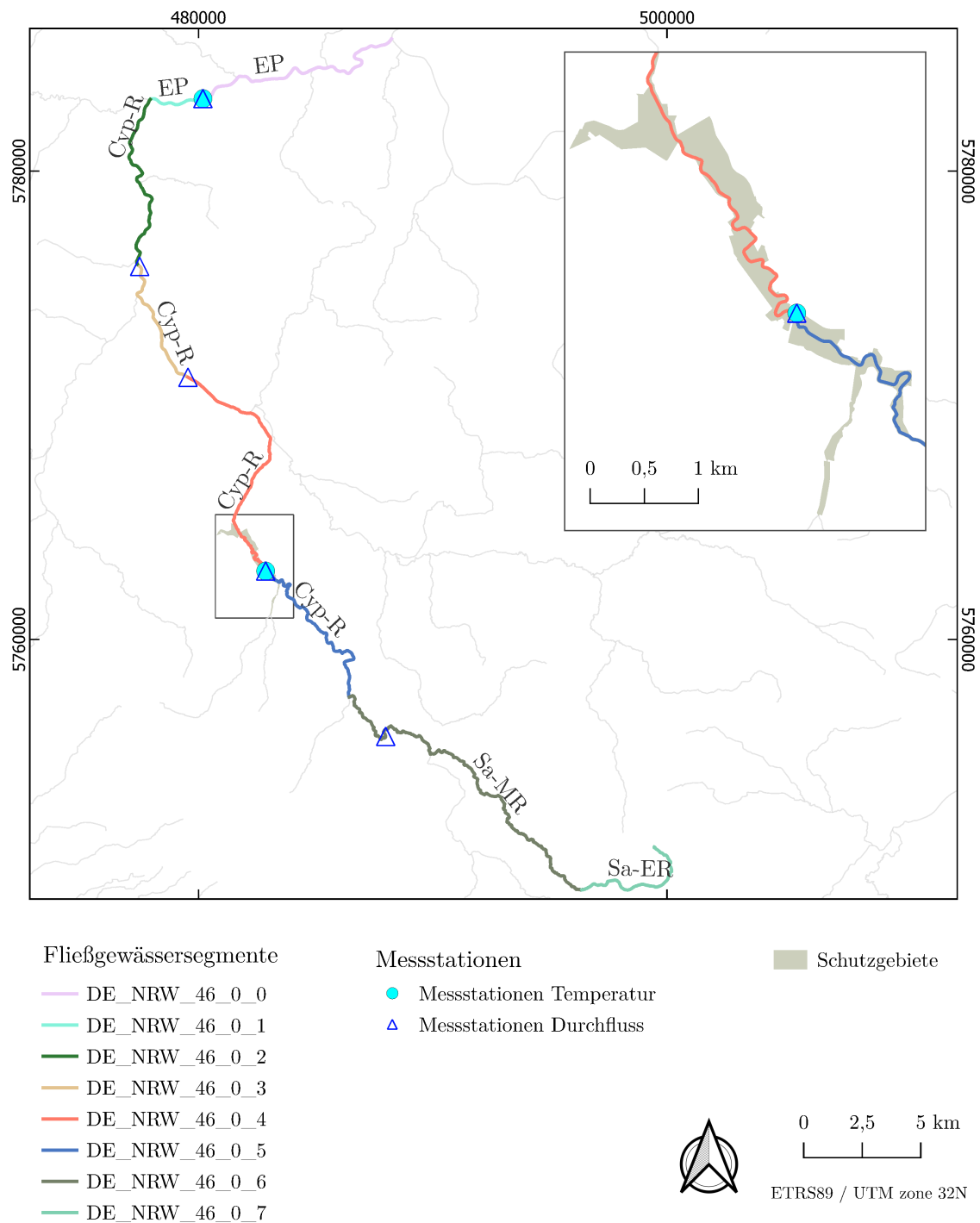


**Abbildung 4.2** Boxplot der Längen der betrachteten Fließgewässersegmente.

Für jedes Fließgewässersegment liegen die in [Tabelle 4.1](#) aufgeführten Attribute vor. Ein vollständige Übersicht der Attribute ist [Tabelle A.4](#) zu entnehmen. Die Segment-ID ist ein Identifikator, der aus dem Land, dem Bundesland, der Gewässerkennzahl und dem Abschnitt (falls ein Fluss mit der gleichen Gewässerkennzahl räumlich getrennt ist, siehe dazu [Unterabschnitt 3.3.1](#)) und einer fortlaufenden Nummer, nach Anzahl der Segmente, besteht. Der Temperaturtyp ist gleichbedeutend mit der Fischgemeinschaft. Es können mehrere Typen nach der [WRRL](#) unterschieden werden. In [Abbildung 4.3](#)

**Tabelle 4.1** Attributauswahl der Fließgewässersegmente.

Attribut	Beschreibung
segment_ID	Identifikator des Segments
temp_typ	Temperaturtyp, gleichbedeutend mit der Fischgemeinschaft
temp_station_ID_1	Identifikator der ersten Temperaturmessstation
temp_station_ID_2	Identifikator der zweiten Temperaturmessstation, falls vorhanden
discharge_station_ID	Identifikator der Pegelstation
protection_area	Boolescher Ausdruck, Lage im Schutzgebiet



Abflussmessdaten © Land NRW (Daten verändert), Schutzgebiete: Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2024).

**Abbildung 4.3** Fließgewässersegmente der Werre.

Aus Übersichtsgründen sind nur die Schutzgebiete dargestellt, die ein oder mehrere Fließgewässersegmente schneiden. **Sa-ER** salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals, **Sa-MR** salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals, **Cyp-R** cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals, **EP** Gewässer des Epipotamals.

sind die Fischgemeinschaften als Beschriftung an den Segmenten dargestellt. Die ID der ersten Temperaturmessstation ist der Identifikator der Temperaturmessstation, die dem Gewässersegment zugeordnet werden konnte. Ist dem Segment noch eine weitere Temperaturmessstation zugeordnet, ist der Identifikator ebenfalls gespeichert. Für die Pegelstation ist nur ein Attribut vorhanden, da nur die Station mit dem niedrigeren MQ zugeordnet wurde. Bei dem Schutzgebiet-Attribut handelt es sich um einen booleschen Ausdruck, der Auskunft darüber gibt, ob ein Segment ganz oder teilweise in einem Schutzgebiet (Naturschutzgebiete, Biosphärenreservate, Nationale Naturmonumente und Nationalparks) liegt. In [Abbildung 4.3](#) ist die Lage von zwei Segmenten in der Vergrößerung oben rechts dargestellt.

**Tabelle 4.2** Attributauswahl der Fließgewässersegmente der Werre.

**Sa-ER** salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals, **Sa-MR** salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals, **Cyp-R** cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals, **EP** Gewässer des Epipotamals.

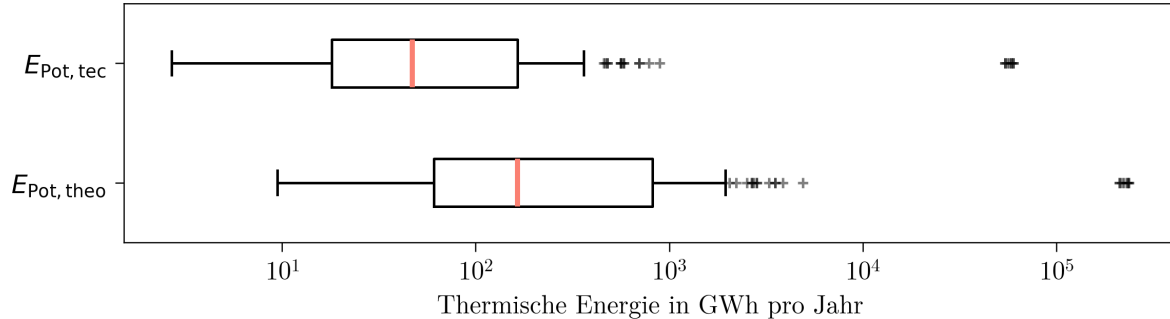
Segment	Fischgemeinschaft	$T$ Messstation	$T$ Messstation	$Q$ Messstation	Schutzgebiet
0	EP	4670000000100		4670000000100	Nein
1	EP	4670000000100	4619100000100	4651000000100	Nein
2	Cyp-R	4670000000100	4619100000100	4651000000100	Nein
3	Cyp-R	4670000000100	4619100000100	4639000000100	Nein
4	Cyp-R	4670000000100	4619100000100	4619100000100	Ja
5	Cyp-R	4619100000100		4613900000100	Ja
6	Sa-MR	4619100000100		4613900000100	Nein
7	Sa-ER	4619100000100		4613900000100	Nein

Für jede Temperatur- und Pegelstation liegen 365 Temperatur- und 365 Durchflussmesswerte vor. Bei den Temperaturwerten handelt es sich um die aggregierten Tagesmittelwerte der Gewässertemperatur über den Zeitraum von 2022 bis 2024 (Ausnahme Rhein: 2021 bis 2023). Bei den Durchflussmesswerten handelt es sich um die aggregierten Tagesmittelwerte über den Zeitraum von 2005 bis 2020. Die Werte sind in je einer CSV-Datei gespeichert. Über die Identifikatoren der Stationen kann auf diese Werte zugegriffen werden. Die dritte Datei (zugehörige Temperatur- und Durchflussmesswerte zu den Fließgewässersegmenten) enthält die ermittelten Werte für die Segmente. Bei den Temperaturwerten ( $T_1, T_2, \dots, T_{365}$ ) wurde eine lineare Interpolation angewendet, es handelt es sich um die Mittelwerte der Messwerte, sofern das Segment zwischen zwei Stationen liegt, sonst um den Wert der einen Station. Die Durchflussmesswerte ( $Q_1, Q_2, \dots, Q_{365}$ ) der zugeordneten Station wurden als Attribute für das Segment gespeichert. Die CSV-Datei enthält nur die Segment-ID sowie die Temperatur- und Durchflussmesswerte.

## 4.2 Potenzial

Für jedes der zuvor beschriebenen Fließgewässersegmente wurde nach der in [Abschnitt 3.5](#) beschriebenen Methodik das theoretische und technische Potenzial bestimmt. Ziel war das Potenzial auf lokaler Ebene zu bestimmen. Die räumliche Auflösung sind Fließgewässer und, sofern die Datengrundlage dies zulässt, Fließgewässersegmente. Die Länge der Segmente beträgt zwischen etwa 0,4 km und 86 km. Das Potenzial wurde mit einer täglichen Auflösung berechnet. Alle gegebenen und berechneten Parameter, die während der Potenzialkalkulation benötigt wurden, sind in einer separaten CSV-Datei gespeichert. Entsprechend des Aufbaus aller Dateien entspricht jeder Fließgewässerabschnitt einer Zeile. Die Potenziale sind in einer weiteren CSV-Datei gespeichert. Die Potenziale liegen in J vor. Zudem wurde eine separate Datei erzeugt in der die Potenziale in kW h gespeichert sind.

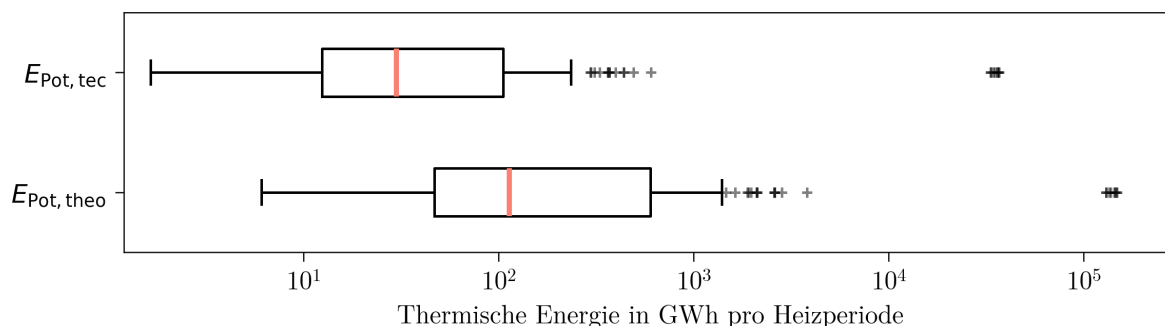
In [Abbildung 4.4](#) ist das theoretische und technische jährliche Potenzial dargestellt. Der Boxplot zeigt, dass der Median des jährlichen theoretischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente in NRW, bei 164 GW h und der des technischen Potenzials bei 47 GW h liegt. Die Boxen zeigen zudem das erste und dritte Quartil, sowie den Interquartilsabstand. Zwischen den Ausreißern nach oben ist ein Abstand zu erkennen. Die deutlich höheren Werte sind die Potenzialwerte der Rheinsegmente.



**Abbildung 4.4** Boxplots des jährlichen theoretischen und technischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente.

Die Wärmenachfrage unterliegt saisonalen Schwankungen im Jahresverlauf. Sie steigt im Winter und sinkt im Sommer ([Ferstl et al., 2024](#)). Dabei kann die Heizperiode als zu betrachtende Größe herangezogen werden. Diese wird in [Abschnitt 3.6](#) auf Oktober bis einschließlich April festgelegt. In diesem Zeitraum ist die Wärmenachfrage in der Regel höher als im restlichen Jahresverlauf. Entsprechend ist das Potenzial insbesondere in diesen Monaten von Bedeutung. Daher werden in [Abbildung 4.5](#) weitere Boxplots dargestellt. Die Boxplots stellen das Potenzial der Fließgewässer für die Heizperiode dar. Im Median liegt das Gesamtpotenzial für die Heizperiode, eines Fließgewässers in NRW (der betrachteten Fließgewässer), bei 113 GW h (theoretisch) und 30 GW h (technisch). Die Boxen zeigen zudem das erste und dritte Quartil, sowie den Interquartilsabstand.

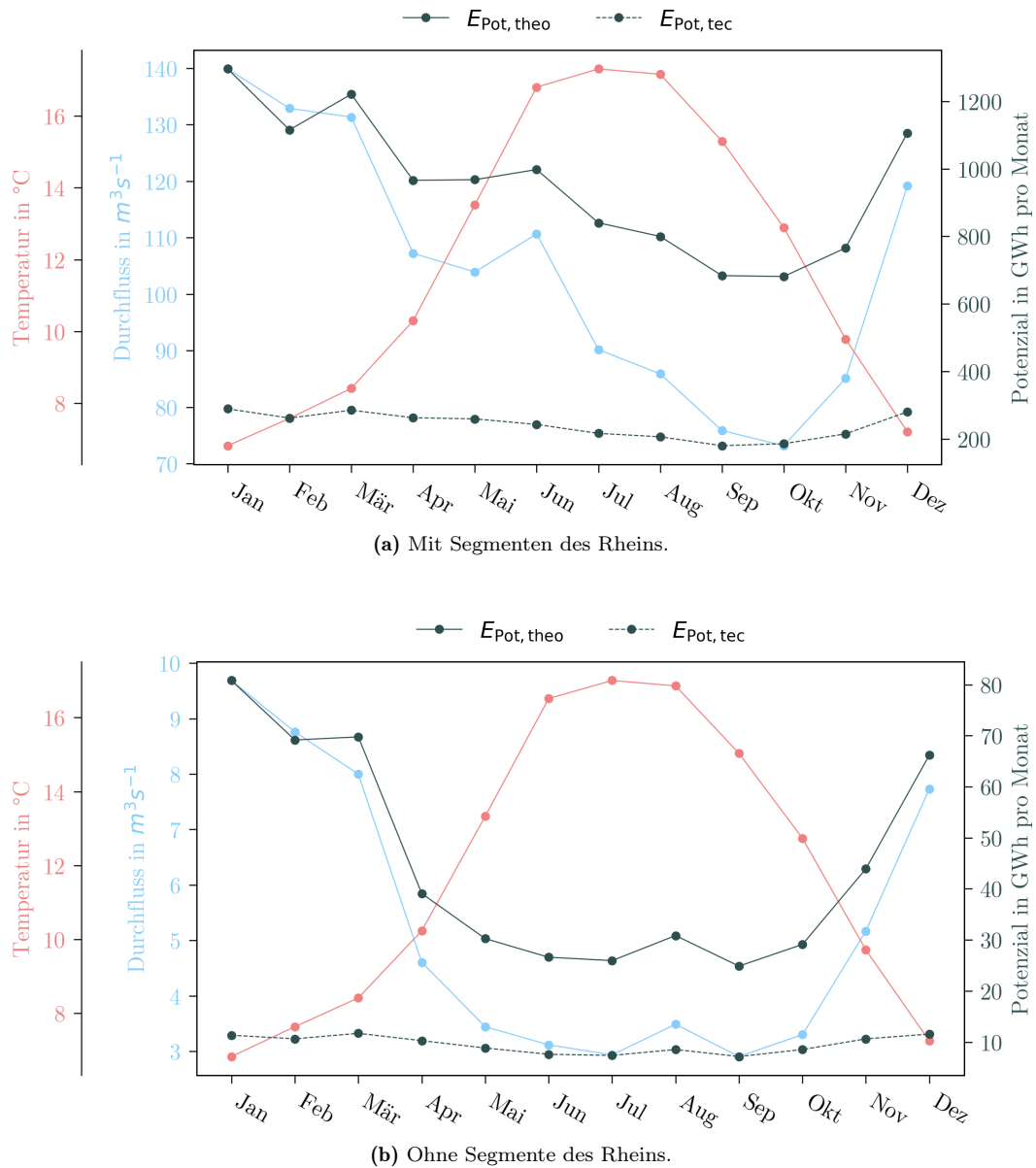
Die höheren Ausreißer, mit Abstand zu den anderen Ausreißern, sind die Potenzialwerte der Rheinsegmente.



**Abbildung 4.5** Boxplots des theoretischen und technischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente für die Heizperiode (Oktober bis April).

Die Parameter, die für die Potenzialberechnung benötigt werden und aus Messdaten stammen, sind der Durchfluss und die Temperatur der Fließgewässer. Diese unterliegen saisonalen Schwankungen im Jahresverlauf. In [Abbildung 4.6](#) ist der Verlauf der Fließgewässertemperatur und des Durchflusses für jeden Monat gemittelt und über alle Segmente gemittelt dargestellt. Aufgrund des hohen Einflusses der Rheinsegmente werden in [Abbildung 4.6](#) (unten) die Werte ohne die Rheinsegmente dargestellt. Das Potenzial wurde mit einer täglichen Auflösung berechnet. Es soll auf eine Gesamtpotenzialbetrachtung bzw. -darstellung verzichtet werden, da in dieser Arbeit lokale Potenziale bestimmt wurden. Nicht für alle Fließgewässer liegen Daten vor und da jedes Fließgewässer in unterschiedlich viele Segmente eingeteilt ist, würde eine Summierung ein fehlerhaftes Ergebnis liefern. Daher werden die monatlichen Potenzialwerte (tägliche Werte je Monat summiert) der Fließgewässer in [Abbildung 4.6](#) über die Fließgewässersegmente im Mittel dargestellt. Temperatur und Durchfluss laufen gegensätzlich zueinander. Die Fließgewässertemperatur steigt im Sommer und ist in den Wintermonaten am niedrigsten. Der Fließgewässerdurchfluss ist hingegen in den Sommermonaten am niedrigsten und steigt im Herbst an bis er ab Januar wieder abnimmt. Sowohl das theoretische, als das technische Potenzial folgen dem Verlauf des Durchflusses. Das theoretische Potenzial ist im Mittel im Januar mit 1296 GW h pro Monat am höchsten und im Oktober mit 681 GW h pro Monat am niedrigsten. Das technische Potenzial ist geringer als das theoretische Potenzial. Das technische Potenzial ist im September mit im Mittel 180 GW h pro Monat am niedrigsten. Am höchsten ist es, im Mittel mit 289 GW h pro Monat, im Januar.





**Abbildung 4.6** Fließgewässertemperatur, Durchfluss, theoretisches und technisches Potenzial im Jahresverlauf pro Monat im Mittel für jedes Fließgewässersegment.

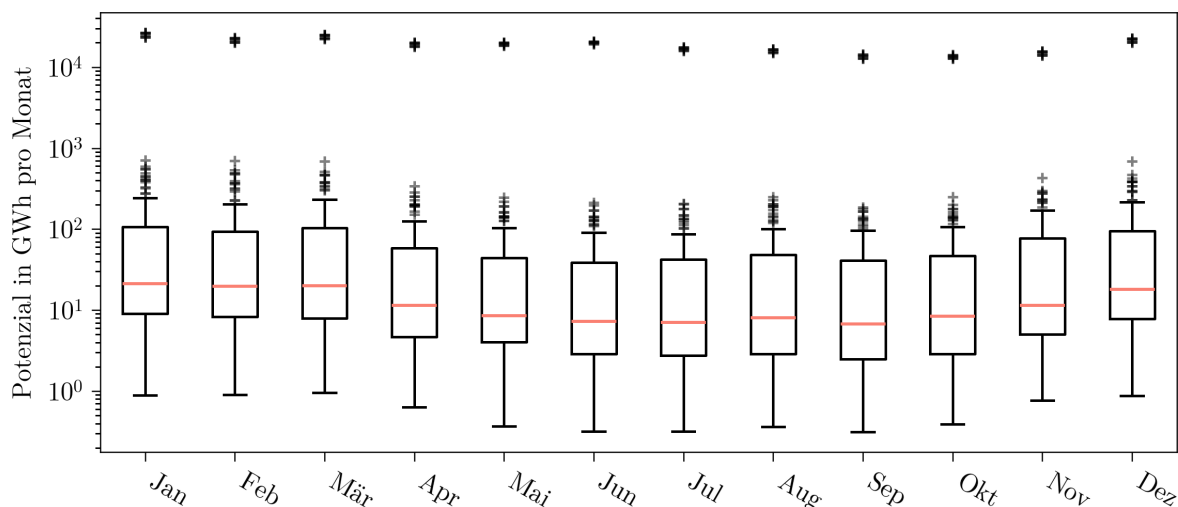
**Temperatur** Monatliche mittlere Fließgewässertemperatur gemittelt über die betrachteten Fließgewässersegmente.

**Durchfluss** Monatliche mittlere Durchflussmesswerte gemittelt über die betrachteten Fließgewässersegmente.

**Potenzial** Monatliches theoretisches und technisches Potenzial gemittelt über die betrachteten Fließgewässersegmente.

## 4.2.1 Theoretisches Potenzial

Bei der Berechnung des theoretischen Potenzials wurde angenommen, dass eine Wassernutzung von bis zu 100 % des Fließgewässerdurchflusses möglich ist. Diese Zahl wurde nur durch die Einhaltung der Temperaturgrenzwerte reduziert. Die Ermittlung

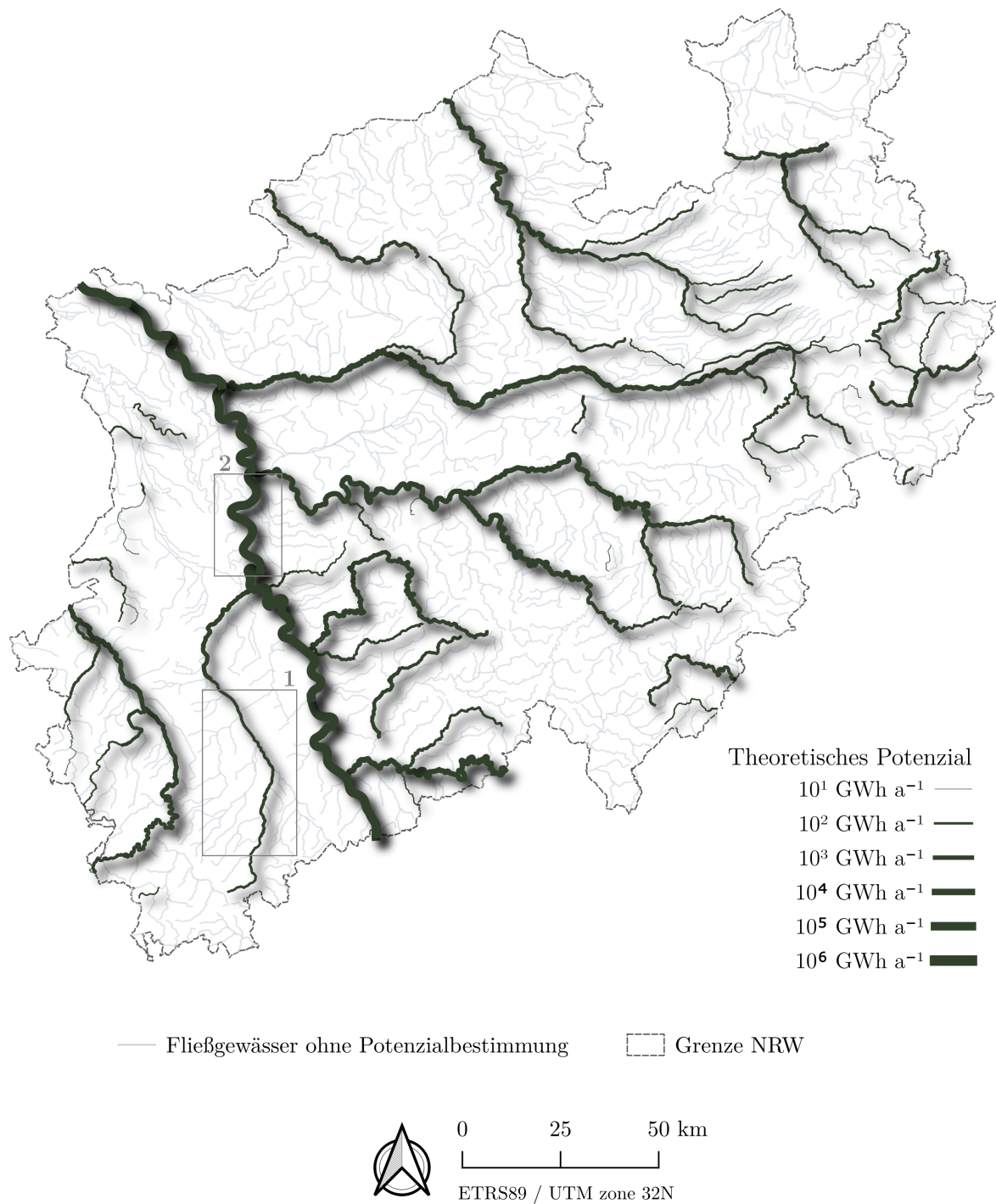


**Abbildung 4.7** Boxplots des monatlichen theoretischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente.

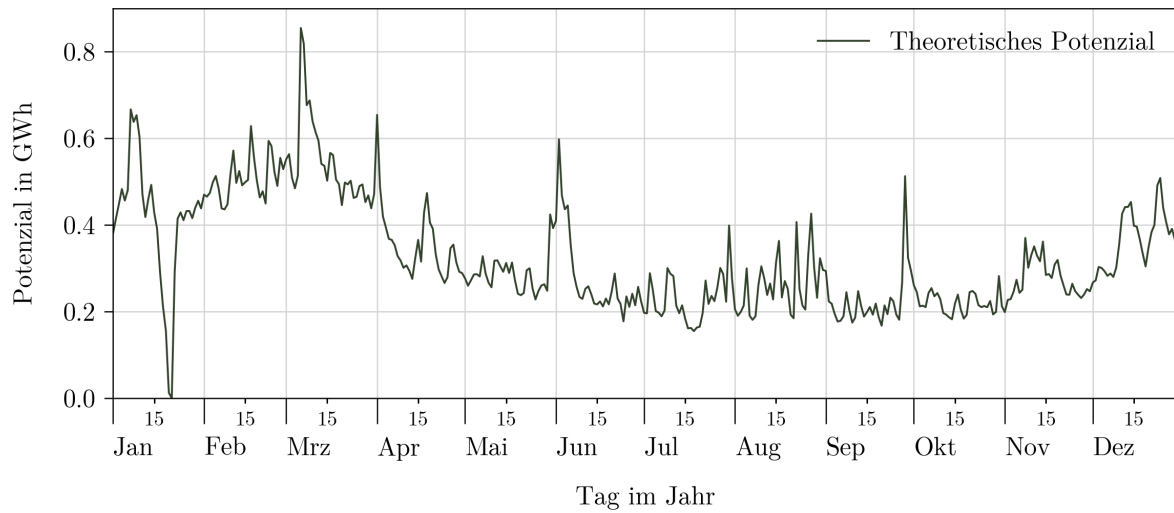
des theoretischen Potenzials erfolgte nach der in [Unterabschnitt 3.5.4](#) beschriebenen Methodik. In [Abbildung 4.7](#) sind die Boxplots der ermittelten Werte des theoretischen Potenzials pro Monat für die Fließgewässersegmente dargestellt. Der Median schwankt zwischen 6,7 GWh im September und 21,3 GWh im Januar. Die Boxen zeigen zudem das erste und dritte Quartil, sowie den Interquartilsabstand. Die Ausreißer, die sich nach oben von den anderen Ausreißern abgrenzen, sind die Segmente des Rheins.

In [Abbildung 4.8](#) ist die räumliche Verteilung der ermittelten theoretischen Potenziale der betrachteten Fließgewässer in NRW dargestellt. Für die Darstellung wird das Potenzial pro Fließgewässerabschnitt innerhalb der Heizperiode summiert und eine logarithmische Skala gewählt. Für jeden Fließgewässerabschnitt liegen die Potenziale in täglicher Auflösung vor. In [Abbildung 4.9](#) ist der Verlauf des theoretischen Potenzials für das sechsten Segment der Erft DE\_NRW\_274\_0\_5 dargestellt. In der Karte ([Abbildung 4.8](#)) ist dieses Segment in dem Kasten 1 verordnet. Zudem sind die jährlichen Werte des vierten Segments des Rheins DE\_NRW\_2\_0\_3 in [Abbildung 4.10](#) dargestellt. Das Segment ist mit Kasten 2 in der [Abbildung 4.8](#) markiert. In [Abbildung 4.9](#) (Erft) liegen die Werte, wie auch in [Abbildung 4.8](#) zu erkennen, deutlich unter den Werten des Rheinsegments ([Abbildung 4.10](#)). In der zweiten Januarhälfte (21.01.) in [Abbildung 4.9](#) ist das Potenzial gleich Null. Der Datei `river_segments_values.csv` ist zu entnehmen, dass dies auf die zu geringe Gewässertemperatur (1,78 °C) zurückzuführen ist. Entsprechend gibt es keine tatsächliche Temperaturspreizung (Temperaturspreizung zwischen unbenutzten und benutzten Wasser) und keinen nutzbaren Durchfluss. Diese Informationen sind in der Datei `theoretical_potential_values.csv` gespeichert.





**Abbildung 4.8** Räumliche Verteilung des theoretischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente. Potenzial je Fließgewässersegment entspricht den aufsummierten Tageswerten in der Heizperiode (Oktober bis April). **Kasten 1:** Segment Erft (DE\_NRW\_274\_0\_5) **Kasten 2:** Segment Rhein (DE\_NRW\_2\_0\_3).



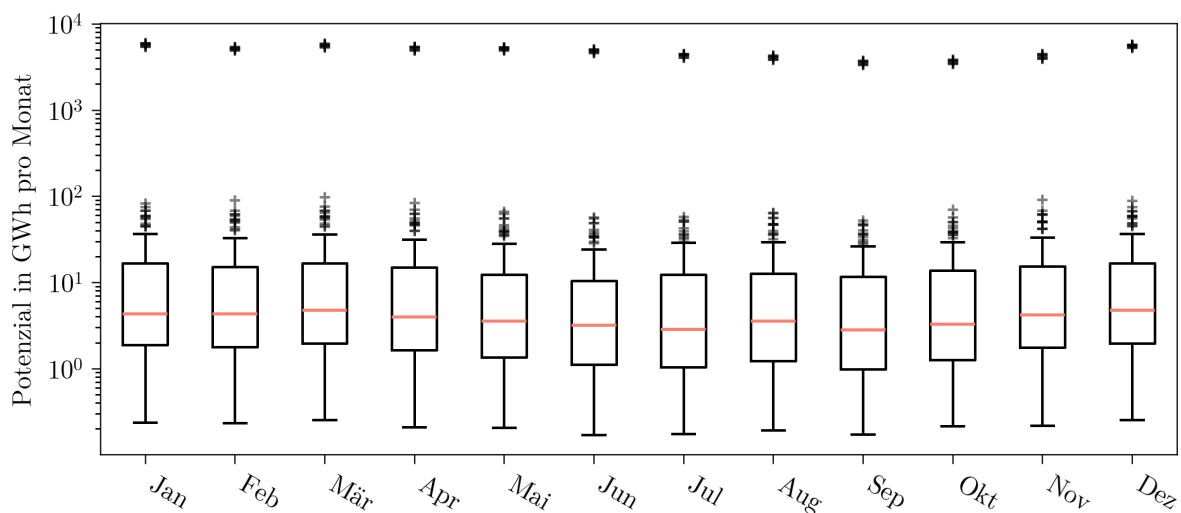
**Abbildung 4.9** Tägliche Werte des theoretischen Potenzials eines Erftsegments (DE\_NRW\_274\_0\_5) im Jahresverlauf.



**Abbildung 4.10** Tägliche Werte des theoretischen Potenzials eines Rheinsegments (DE\_NRW\_2\_0\_3) im Jahresverlauf.

## 4.2.2 Technisches Potenzial

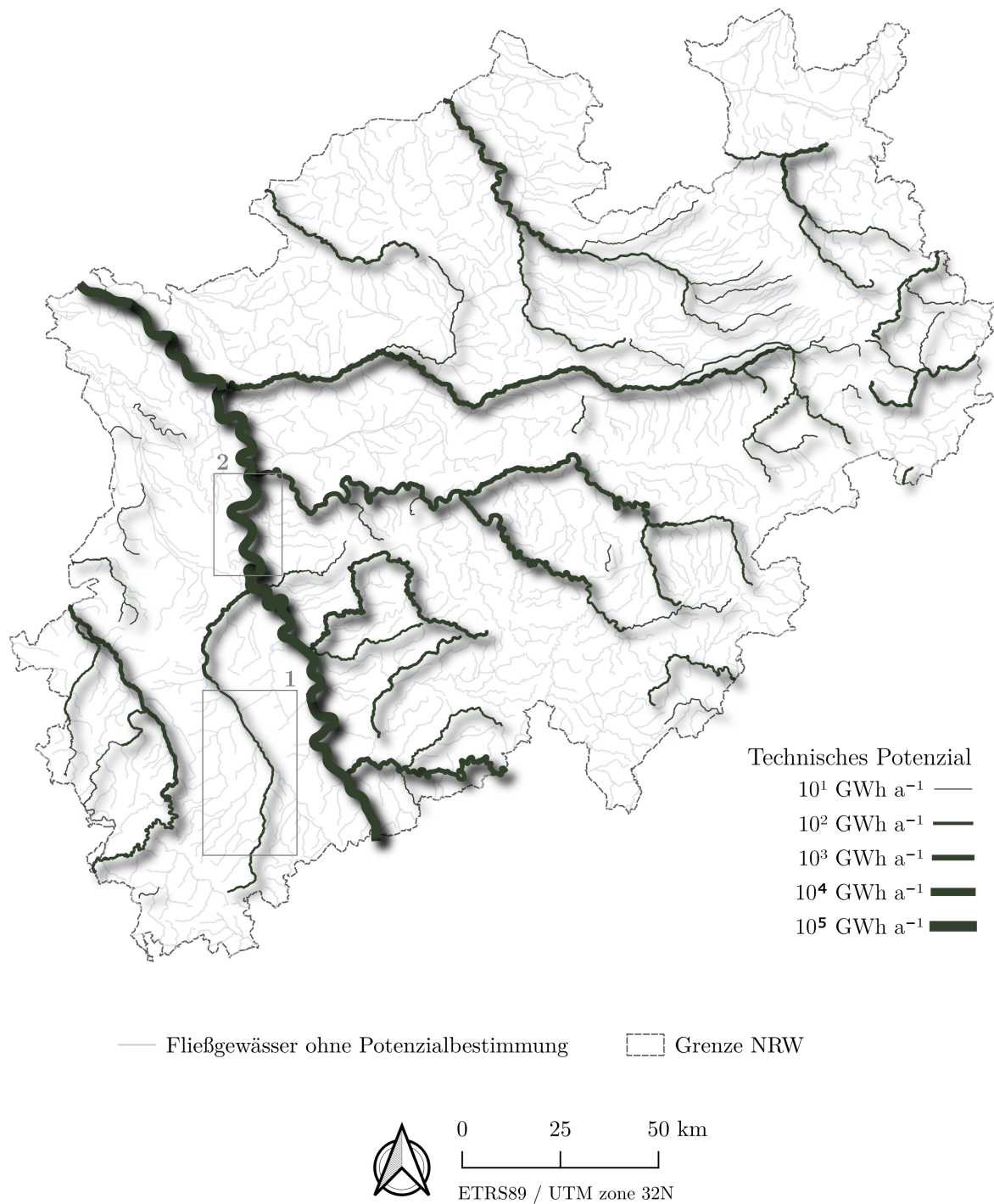
Bei der Kalkulation des technischen Potenzials wurde der nutzbare Durchfluss auf maximal 20% des Fließgewässerdurchflusses festgelegt. Diese Zahl wurde ggf. weiter reduziert, um die Anlage richtig zu dimensionieren: aus der Anzahl an Stunden, unter der die Anlage pro Jahr unter voller Last laufen soll, kann das nötige Quantil abgeleitet werden. Das Quantil wird durch eine nutzerspezifische Eingabe übergeben und die Grenzwerte für jedes Segment ermittelt. Dieser Grenzwert beschreibt den maximal nutzbaren Durchfluss. Zudem wurde der COP der Wärmepumpe berechnet. Die Ermittlung des technischen Potenzials erfolgte nach der in [Unterabschnitt 3.5.5](#) beschriebenen Methodik. In [Abbildung 4.11](#) sind die Boxplots der ermittelten Werte des technischen Potenzials pro Monat für die Fließgewässersegmente dargestellt. Der Median schwankt zwischen 2,8 GW h im September und 4,7 GW h im März. Die Boxen zeigen zudem das erste und dritte Quartil, sowie den Interquartilsabstand. Die Ausreißer, die sich nach oben von den anderen Ausreißern abgrenzen, sind die Segmente des Rheins.



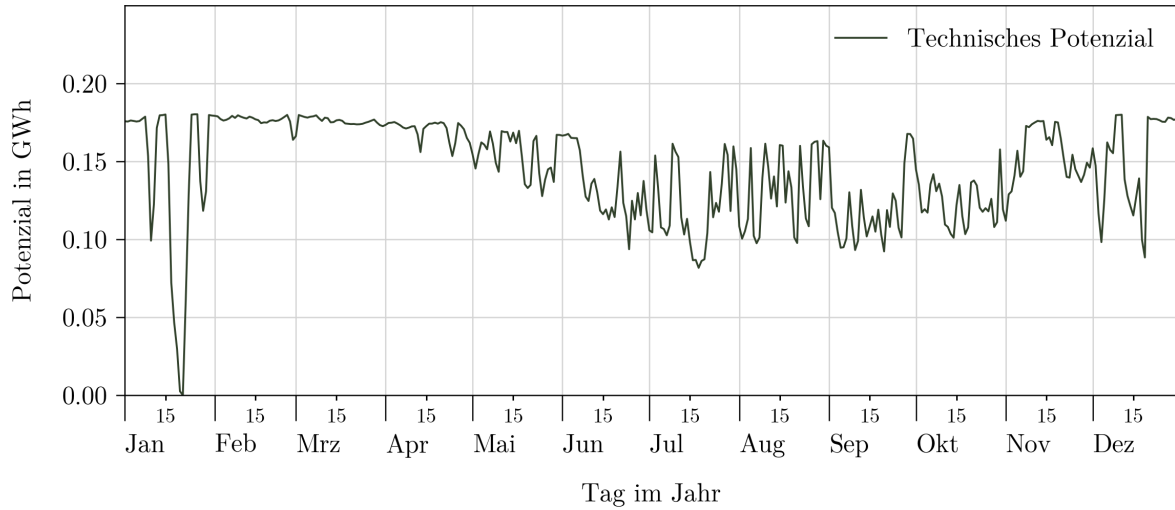
**Abbildung 4.11** Boxplots des monatlichen technischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente.

Analog zu dem theoretischen Potenzial ist in [Abbildung 4.12](#) die räumliche Verteilung der ermittelten technischen Potenziale der betrachteten Fließgewässer in NRW dargestellt. Die Potenzialwerte entsprechen den auf die Heizperiode aufsummierten Werten für jedes Fließgewässersegment. Die Werte liegen in täglicher Auflösung vor. In [Abbildung 4.13](#) ist der jährlicher Verlauf des technischen Potenzials für das sechste Segment der Erft DE\_NRW\_274\_0\_5 veranschaulicht. Dieses Segment ist im Kasten 1 in der Karte ([Abbildung 4.12](#)) verordnet. Die täglichen Werte des technischen Potenzials des vierten Segments des Rheins DE\_NRW\_2\_0\_3 sind in [Abbildung 4.14](#) dargestellt. Dieses Segment ist mit dem Kasten 2 in [Abbildung 4.12](#) hervorgehoben.

Wie bei dem theoretischen Potenzial ist auch das technische Potenzial in der zweiten Januarhälfte (21.01.) in [Abbildung 4.13](#) gleich Null, aufgrund der zu geringen



**Abbildung 4.12** Räumliche Verteilung des theoretischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente. Potenzial je Fließgewässersegment entspricht den aufsummierten Tageswerten in der Heizperiode (Oktober bis April). **Kasten 1:** Segment Erft (DE\_NRW\_274\_0\_5) **Kasten 2:** Segment Rhein (DE\_NRW\_2\_0\_3).



**Abbildung 4.13** Tägliche Werte des technischen Potenzials eines Erftsegments (DE\_NRW\_274\_0\_5) im Jahresverlauf.



**Abbildung 4.14** Tägliche Werte des technischen Potenzials eines Rheinsegments (DE\_NRW\_2\_0\_3) im Jahresverlauf.

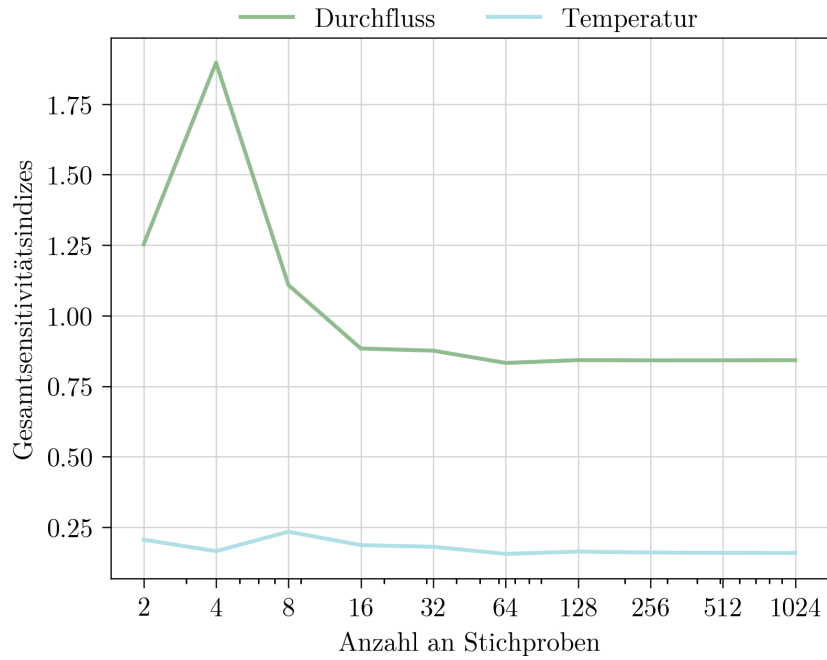
Gewässertemperatur ( $1,78^{\circ}\text{C}$ ). Entsprechend gibt es keine tatsächliche Temperaturspreizung (Temperaturspreizung zwischen unbenutzten und benutzten Wasser) und keinen nutzbaren Durchfluss. In der Datei `technical_potential_values.csv` sind diese Informationen gespeichert. Die Verläufe der beiden Segmentbeispiele sind etwas anders als bei dem theoretischen Potenzial. Zum einem sind die Werte durch die weiteren Einschränkungen deutlich niedriger. Zum anderen sind insbesondere die Schwankungen nach oben weniger stark ausgeprägt (Vergleich [Abbildung 4.9](#) und [Abbildung 4.13](#) und [Abbildung 4.10](#) und [Abbildung 4.14](#)), da der Durchfluss begrenzt wird. Besonders bei dem Jahresverlauf des Rheins ist der jahreszeitliche Verlauf sowohl bei dem theoretischen, wie auch dem technischen Potenzial zu erkennen. Die zu erkennenden Schwankungen sowohl bei dem theoretischen Potenzial in [Abbildung 4.9](#) als auch dem technischen Potenzial [Abbildung 4.13](#) des Erftsegments sind ebenfalls in den aggregierten Durchflussdaten vorhanden.

## 4.3 Modellsensitivität

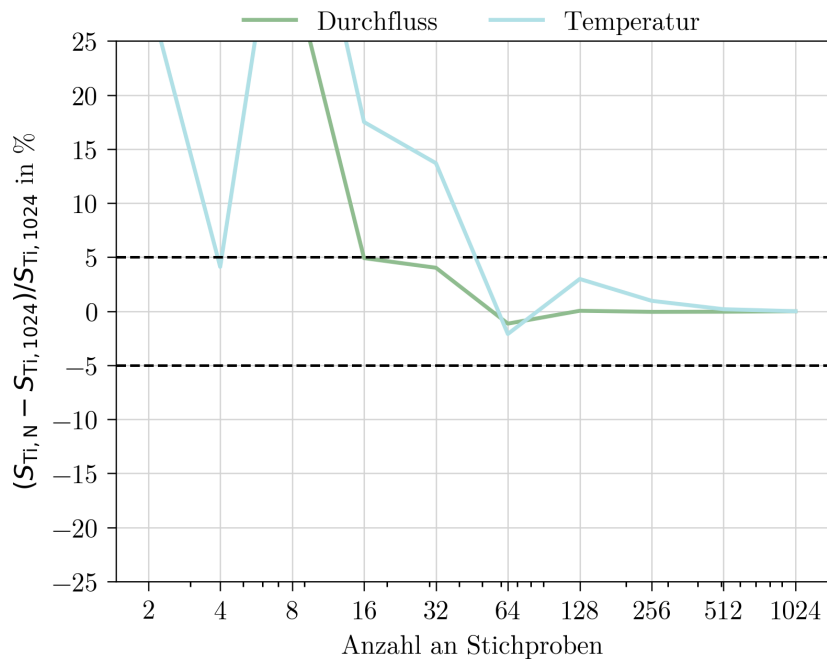
In [Abschnitt 3.6](#) wird die Sensitivitätsanalyse beschrieben. Es wurden zwei separate Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss der Eingangsvariablen (Temperatur und Durchfluss) auf das theoretische Potenzial sowie das technische Potenzial zu untersuchen. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

### 4.3.1 Konvergenz

Wie in [Abschnitt 3.6](#) beschrieben, muss eine ausreichend hohe Anzahl an Stichproben gezogen werden, bis eine Konvergenz erreicht wird. In [Abbildung 4.15](#) sind die Gesamtsensitivität sowie die Abweichung zum Referenzwert gegen die Anzahl an Stichproben  $N = 2$  bis  $N = 1024$  in Bezug auf das theoretische Potenzial und in [Abbildung 4.16](#) in Bezug auf das technische Potenzial dargestellt. In [Anhang A.4](#) sind die analogen Grafiken für die Sensitivität erster Ordnung in Bezug auf das theoretische und technische Potenzial dargestellt. Als Referenzwert wird der letzte Wert bei  $N = 1024$  festgelegt. Nach [Burhenne \(2013\)](#) wird Konvergenz erreicht, wenn sich der Schätzwert – d. h. die geschätzte Sensitivität bei definierter Stichprobengröße – in den Bereich des Referenzergebnisses  $\pm 5\%$  fällt. Weiter ist als praktikable Abschlussregel definiert, dass Konvergenz als erreicht gelten kann, wenn sich die letzten drei Stichprobengrößen innerhalb dieses Bereichs befinden, wobei der größte Stichprobenwert als Referenzwert gilt. Aus den Abbildungen ist abzuleiten, dass diese Bedingung erfüllt ist.

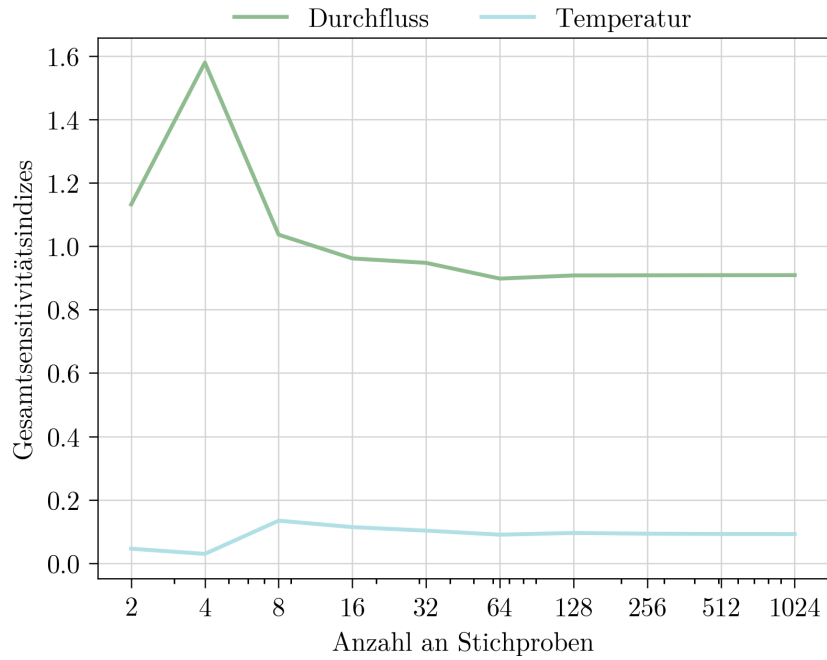


(a) Schätzwerte der Gesamtsensitivität bei verschiedenen Stichprobengrößen.

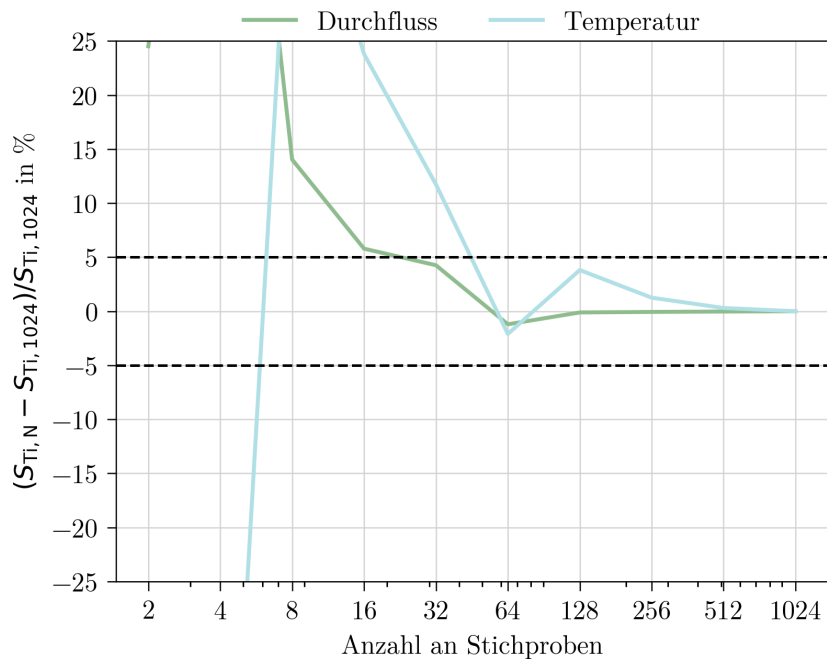


(b) Abweichung der Schätzwerte der Gesamtsensitivität vom Referenzergebnis.

**Abbildung 4.15** Konvergenz der Schätzwerte der Gesamtsensitivität für das theoretische Potenzial.



(a) Schätzwerte der Gesamtsensitivität bei verschiedenen Stichprobengrößen.



(b) Abweichung der Schätzwerte der Gesamtsensitivität vom Referenzergebnis.

**Abbildung 4.16** Konvergenz der Schätzwerte der Gesamtsensitivität für das technische Potenzial.



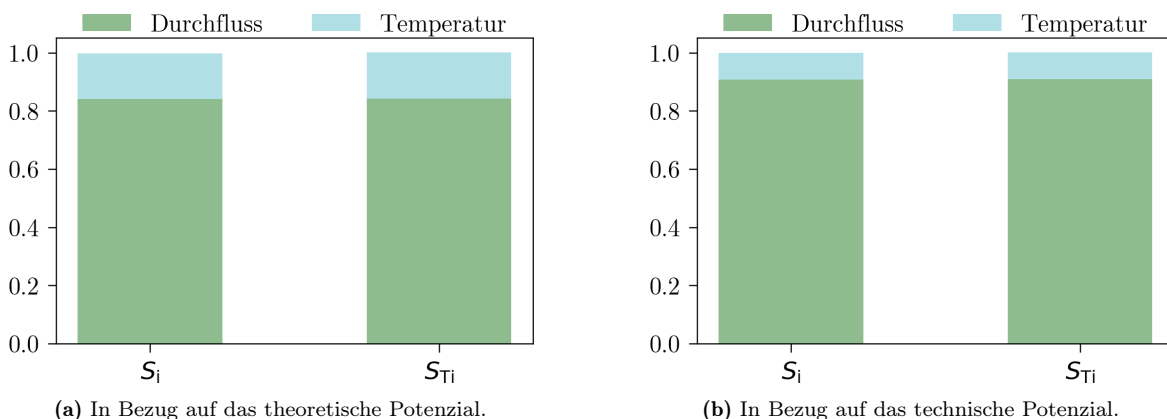
### 4.3.2 Sensitivität der Eingangsvariablen

Bei der implementierten Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss der Temperatur  $T$  und des Durchflusses  $Q$  auf das theoretische Potenzial  $E_{\text{pot,theo}}$  und technische Potenzial  $E_{\text{pot,tec}}$  untersucht. In Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse der Analyse für das theoretische und technische Potenzial dargestellt.

**Tabelle 4.3** Endgültige Schätzwerte der Sensitivitätsanalyse in Bezug auf das theoretische und technische Potenzial.

Parameter	Theoretisches Potenzial		Technisches Potenzial	
	$S_{Ti}$	$S_i$	$S_{Ti}$	$S_i$
Durchfluss $Q$	0,842	0,841	0,909	0,908
Temperatur $T$	0,159	0,157	0,092	0,091

Aus Tabelle 4.3 und Abbildung 4.17 wird geschlossen, dass der Sensitivitätsindex erster Ordnung, sowie der Gesamtsensitivitätsindex für den Durchfluss größer ist als für die Temperatur. Sowohl in Bezug auf das theoretische, als auch auf das technische Potenzial. Der Sensitivitätsindex erster Ordnung zeigt den direkten Einfluss von Temperatur und Durchfluss auf das Gesamtergebnis. Die Veränderung der Durchflusswerte erklären 84,1 % der Varianz des theoretischen Potentials, die Temperaturwerte 15,7%. Bei dem Gesamtsensitivitätsindex werden auch die Interaktionen zwischen den Eingangsvariablen berücksichtigt. Der Einfluss des Durchflusses ändert sich auf 84,2 %, die Temperaturvarianz erklären 15,9 %. In Bezug auf das theoretische Potenzial ist der Einfluss des Durchflusses ausgeprägter. Über 90 % der Varianz des technischen Potentials werden durch die Varianz in den Durchflusswerten erklärt (sowohl Gesamtsensitivität sowie Sensitivität erster Ordnung).



**Abbildung 4.17** Gestapelte Balkendiagramme der endgültigen Schätzwerte der Sensitivitätsanalyse.

## 5 Diskussion

In dieser Arbeit wurde das Potenzial von erneuerbaren Energiequellen, die für die Wärmeversorgung eingesetzt werden können, untersucht. Das entwickelte Modell ermöglicht anhand von räumlichen Eingangsdaten (Position von Temperatur- und Pegelstationen, Lage von Fließgewässern und Lage von Schutzgebieten), sowie von Messdaten (Temperatur- und Durchflusszeitreihen der Fließgewässer) die Energiemenge der Fließgewässersegmenten quantitativ zu bestimmen. Für NRW wurde der Prozess im Rahmen dieser Arbeit automatisiert, für andere Bundesländer muss die Datenaufbereitung ggf. angepasst werden. Für NRW liegen aufbereitete Daten vor. Es wurden alle Fließgewässer identifiziert, für die ausreichend Daten vorliegen (Untersuchungszeitraum, mindestens eine Temperatur- und Pegelstation). Die Fließgewässer wurden anhand der Fischgemeinschaften und der Lage der Temperatur- und Pegelstationen in Fließgewässersegmente eingeteilt. Für 165 Fließgewässersegmente wurden theoretische und technische Potenzialwerte in J und kWh mit einer täglichen Auflösung berechnet. In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass das theoretische Potenzial deutlich höher ist als das technische Potenzial. Der Median des jährlichen Potenzials über alle Segmente liegt bei 164 GW h, der des technischen Potenzials bei 47 GW h. Der Rhein weist aufgrund der hohen Durchflusswerte deutliche höhere Potenzialwerte auf, als die restlichen Fließgewässersegmente.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert. Im ersten Teil wird auf die Ergebnisse im Allgemeinen eingegangen und diskutiert, ob das Ziel der Arbeit erreicht wurde. Anschließend wird auf die Limitationen der Methodik eingegangen, bevor die Ergebnisse und die entwickelte Methodik mit anderen Forschungsergebnissen verglichen wird.

### 5.1 Modellierung des Potenzials

Forschungsgegenstand dieser Arbeit ist herauszufinden, welche geoinformatischen Methoden sich dazu eignen, das Potenzial von Wärmequellen automatisiert aus Geodaten abzuleiten und welche (frei verfügbaren) räumlichen Daten innerhalb Deutschlands für diesen Zweck verfügbar sind. In Abschnitt 2.5 werden verschiedenen Studien verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass für jede Wärmequelle eine andere Methodik und andere Daten benötigt werden. Für die Potenzialberechnung jeder Quelle wurden in den unter-

suchten Studien räumliche Daten verwendet. In neun von elf Studien wurden räumliche Analysen eingesetzt. Nur in einer der betrachteten Studien wurde ein generisches Modell entwickelt. In der vorliegenden Masterarbeit wurden räumliche Daten verwendet, eine räumliche Analyse durchgeführt und ein generisches Modell entwickelt, um das Potenzial von Fließgewässern zu ermitteln. Dabei muss zwischen der Datenaufbereitung und dem restlichen Modell unterschieden werden. Die Datenaufbereitung ist datenabhängig und in dieser Arbeit beschränkt sich dieser Teil daher auf die verwendeten Daten innerhalb des Landes NRW und ist nicht notwendigerweise übertragbar auf andere Bundesländer. Das restliche Modell, die Fließgewässersegmentierung und die Potenzialberechnung, ist nach der Datenaufbereitung datenunabhängig und anwendbar in ganz Deutschland.

In der Untersuchung hat sich gezeigt, dass die Datenverfügbarkeit und das Datenformat innerhalb Deutschlands stark variiert. Die Temperatur- und Pegelstationen werden vorrangig durch die Länder betrieben und weisen daher Unterschiede bzgl. der Einsehbarkeit, den Downloadmöglichkeiten, den Nutzungsrechten, der zeitlichen Auflösung, des Dateiformats und des Aufbaus der Dateien selbst auf. Es wurden daher nur Daten aus dem Raum NRW verwendet. Die Daten der Temperaturmessstationen sind frei verfügbar. Für die Durchflussdaten der Pegelstationen musste eine Anfrage gestellt werden. Die Datensätze bestehen aus mehreren Dateien, die die Messwerte sowie weitere Informationen, wie die Lage, über die Stationen enthalten. Die Daten wurden aufbereitet, sodass je eine Datei mit den über mehrere Jahre aggregierten Temperatur- bzw. Durchflusswerten (365 Werte) entstand, sowie eine räumliche Datei mit den Informationen über die Stationen. Zudem wurden die Daten um den Rhein erweitert. Diese Daten mussten gesondert angefragt werden. Die Lage des Fließgewässernetzes, welches auf der WRRL beruht, ist frei verfügbar. Dieser Datensatz ist vorteilhaft, da er, aufgrund der Gesetzeslage, auch in den anderen Ländern in gleicher oder ähnlicher Form vorliegen sollte. Zudem ist in diesem Datensatz die Information über die Fischgemeinschaft enthalten. Die Daten wurden so aufbereitet, dass es eine räumliche Datei gibt, welche die Flüsse als je ein Objekt enthält. Zudem wurde eine räumliche Datei erzeugt, bei welcher ein Objekt einem Flussabschnitt mit eindeutiger Fischgemeinschaft repräsentiert wird. Die Lage der Schutzgebiete ist für ganz Deutschland frei über einen WFS verfügbar. Für diese Arbeit wurde er auf die Fläche von NRW zugeschnitten. Daraus kann geschlossen werden, dass es Daten für die Ermittlung des Potenzials von Fließgewässern gibt, diese jedoch länderabhängig aufbereitet werden müssen und nicht zwangsläufig frei nutzbar sind.

In dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, das Potenzial von Fließgewässern lokal abzuschätzen. Dabei war nicht das Ziel ein Gesamtpotenzial für ein Gebiet zu erhalten, sondern ein Werkzeug für die lokale Planung von Energieversorgungssystemen zu entwickeln. In weiteren Schritten, die nicht Teil dieser Arbeit sind, kann dort, wo Bedarf besteht, überprüft werden, ob und wie viel von dem Bedarf möglicherweise durch Umweltwärme aus einem Fließgewässer gedeckt werden kann.

Da bei der Wärmenutzung dem Wasser der Fließgewässers Wärme entzogen wird, wird abgekühltes Wasser zurückgeleitet. Dies wird, sowie die Einleitung von wärmeren Wasser, als thermische Verschmutzung oder Emission bezeichnet und kann bis zu

mehreren Kilometern nach der Einleitung andauern (Lugg & Copeland, 2014). Durch den Austausch mit der Atmosphäre wird das abgekühlte Wasser wieder erwärmt. Diese Annahme, dass das Potenzial erneuert wird, führt dazu, dass ein Fließgewässer theoretisch nicht nur einmal, sondern an mehreren Stellen für die Wärmeversorgung eingesetzt werden kann. Dies ist etablierte Praxis. Etwa wird der Rhein an mehreren Stellen zur Kühlung von Kraftwerken eingesetzt (Raptis et al., 2016). Daher wurde in dieser Arbeit für die kleinste mögliche und die kleinste nötige Einheit das Potenzial bestimmt. Um keine Informationen zu verlieren, wurde das Potenzial für einzelne Segmente bestimmt, nicht nur ein Potenzial pro Fließgewässer. Jedoch wurden die Segmente nur dort geteilt, wo sich eine Information ändert, nicht in regelmäßigem Abstand. Dadurch können redundante Informationen vermieden werden. Dies führt dazu, dass die Segmente eine unterschiedliche Länge aufweisen (0,4 km bis 86 km). Die relevanten Informationen, an denen die Fließgewässer geteilt wurden, sind die Temperatur- und Pegelstationen, sowie die Fischgemeinschaften. Die Länge der Fließgewässersegmente ist damit von den Datengrundlage abhängig. Dadurch wird vermieden, dass von einer höheren räumlichen Auflösung ausgegangen wird als tatsächlich möglich ist. Eine alternative Lösung bzw. mögliche Weiterentwicklung besteht darin die Daten (Temperatur und Durchfluss) zwischen den Messstationen durch geeignete Modelle zu simulieren. Dafür sind ggf. weitere Daten, wie Höhenmodelle, notwendig, sowie eine Prüfung, ob für derartige Modelle eine ausreichende Datengrundlage vorhanden ist.

In *Abbildung 4.6* ist der Verlauf des technischen und theoretischen Potenzials pro Monat im Mittel über alle Fließgewässer dargestellt. Der Jahresverlauf des Potenzials folgt dem Verlauf des Durchflusses. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Durchfluss in der Berechnung direkt eingeht. Die Fließgewässertemperatur wird hingegen nur benötigt, um das Potenzial an Tagen, an denen die Temperatur zu gering ist, auf null zu setzen. Die tatsächliche Temperaturspreizung berechnet sich ebenfalls unter Abhängigkeit der Gewässertemperatur. Die gegebene Temperaturspreizung wird jedoch nur dann reduziert, wenn sich die Gewässertemperatur nahe den Minimaltemperatur des Gewässers befindet. Für alle übrigen Tage hat die Gewässertemperatur keinen Einfluss auf das theoretische Potenzial. Bei dem technischen Potenzial wird zusätzlich der COP der Wärmepumpe berechnet. In diese Formel geht die Gewässertemperatur mit ein. Bei der Potenzialberechnung handelt es sich dabei nur um den Anteil der zusätzlich durch die Wärmepumpe bereitgestellt wird. Der Durchfluss ist weiterhin, im Vergleich zu der Gewässertemperatur, die dominierende Größe.

## 5.2 Theoretisches und technisches Potenzial

Das theoretische Potenzial wurde nach *Gleichung (2.19)* berechnet. Dabei wird angenommen, dass der Durchfluss eines Fließgewässers theoretisch komplett genutzt werden kann. Das ist eine rein theoretische Annahme und in der Praxis aus ökologischen und technischen Gründen nicht umsetzbar. Allerdings werden, wie in *Unterabschnitt 3.5.2* beschrieben, die Temperaturgrenzwerte eingehalten. Als nutzerspezifische Eingaben in

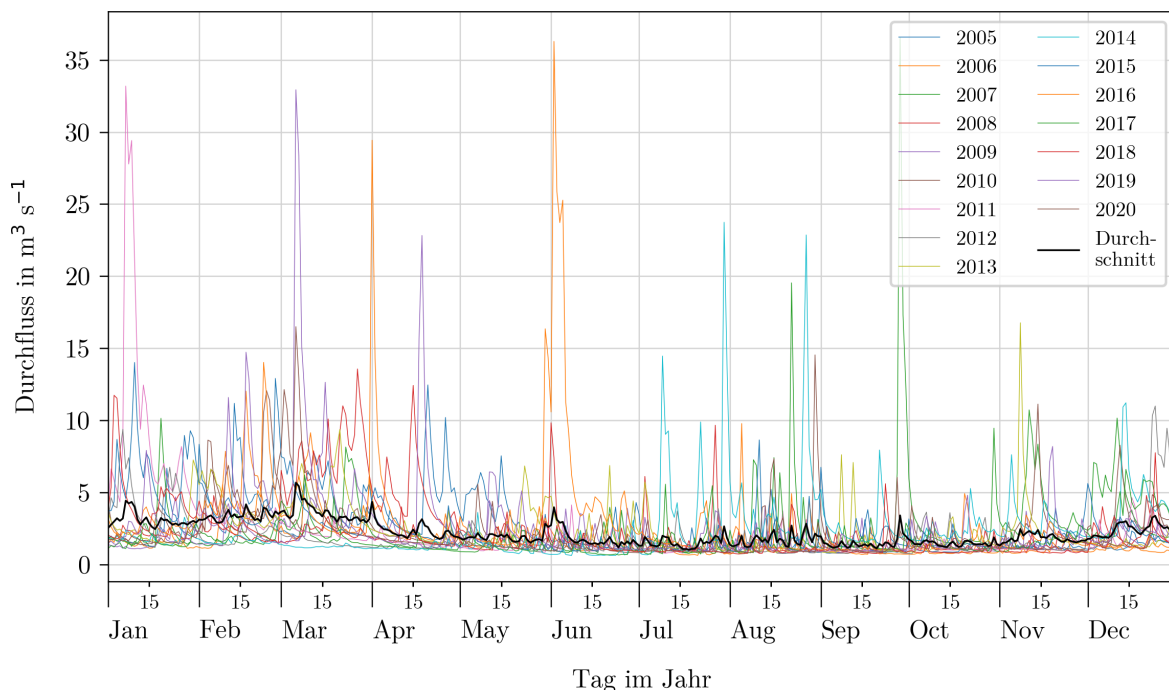
die Software wurden die minimale Temperatur und die Temperaturspreizung zwischen benutztem und unbenutztem Wasser festgelegt. Dadurch wurde der Durchfluss bei der Berechnung des Potenzials begrenzt, wie in [Unterabschnitt 3.5.3](#) erklärt. Als Grundlage für die Temperaturbegrenzung gelten technische Limitationen und ökologische Gründe. Da es in Deutschland bisher keine gesetzlichen Begrenzungen für die Einleitung von abgekühlten Wasser gibt, wurden die Werte der [GSchV](#) (Schweiz) berücksichtigt. Um Forellenregionen mit geringerer erlaubter Temperaturdifferenz zu identifizieren wurden die Fischgemeinschaften auf Basis der [WRRL](#) verwendet. Dies könnte, falls sich die Gesetzeslage in Deutschland ändert, ermöglichen den Code an dieser Stelle mit den entsprechenden Werten zu ergänzen. Zudem könnten durch weitere Studien die ökologischen Auswirkungen auf die Fließgewässer untersucht werden und die Werte dementsprechend angepasst werden. Durch den Klimawandel leben jedoch viele Organismen bereits an ihrer thermischen Obergrenze ([Gaudard et al., 2017](#)) – die Einleitung von kühlerem Wasser ist daher als weniger kritisch zu betrachten als die Wärmeeinleitung.

In [Abbildung 4.4](#) sind die Boxplots des jährlichen theoretischen und technischen Potenzials der betrachteten Fließgewässersegmente dargestellt. Der Median des theoretischen Potenzials liegt bei 164 GW h und der des technischen Potenzials bei 47 GW h. Diese große Differenz ist darauf zurückzuführen, dass Ersteres ein rein theoretischer Wert ist, der technisch nach aktuellen Standards und ökologischen Gründen nicht genutzt werden kann. Diese Differenz zeigt, dass die Unterscheidung zwischen den Potenzialen von ausschlaggebender Bedeutung ist und bei der Interpretation der Werte (auch anderer Studien) die berücksichtigten Faktoren beachtet werden müssen. Mit dem theoretischen Potenzial können die Tage, an denen das Wasser der Fließgewässer für die Nutzung zu kalt ist, identifiziert werden. Durch das technische Potenzial wird dieser Wert nicht weiter reduziert. Zu kalt für eine Nutzung (unter 2 °C sind nur das in [Abbildung 4.9](#) dargestellte Segment der Erft mit 1,78 °C am 21.01. und ebenfalls am 21.01. die Niese mit 1,32 °C. Dies ist jedoch von den verwendeten Daten abhängig, die sich bei dieser Analyse nur auf die vergangenen zwei Jahre beziehen und damit keine Prognose in die Zukunft darstellen. Um die Tage zu identifizieren, an welchen die Temperaturen zu gering sind und ggf. weitere Wärmequellen genutzt werden müssen, sollte in Rahmen von spezifischen Analysen untersucht werden.

Das technische Potenzial wurde nach [Gleichung \(2.17\)](#) berechnet. Dabei wurden die gleichen Grenzwerte eingehalten wie für das theoretische Potenzial und die Temperaturgrenzwerte und der maximal nutzbare Durchfluss bestimmt. Allerdings wurden dabei weitere Faktoren berücksichtigt. Für die Nutzung der im Fließgewässer gespeicherten Wärme wird eine Wärmepumpenanlage benötigt (siehe [Unterabschnitt 2.4.1](#)). Neben der Berechnung des Anteils, der zusätzlich durch die Wärmepumpe bereitgestellt wird ([Gleichung \(2.20\)](#)), wurde der maximal nutzbare Durchfluss auf maximal 20% festgelegt. Dieser Wert wurde ggf. weiter begrenzt. Um das technische Potenzial jedoch möglichst realistisch abzuschätzen wurden Annahmen über die Anlage gemacht (siehe dazu [Unterabschnitt 3.5.5](#)). Dadurch kann verhindert werden, dass die Anlage zu groß dimensioniert wird, womit ein häufiges Takten einhergeht und somit ein zu hohes technisches Potenzial angenommen wird. Über diesen Wert wird der maximal nutzbare

Durchfluss bestimmt. Dies erklärt, warum in [Abbildung 4.13](#) und [Abbildung 4.14](#) die Schwankungen nach oben im Verlauf deutlich schwächer ausgeprägt sind.

Die Schwankungen im Jahresverlauf des theoretischen Potenzials ([Abbildung 4.9](#)) und technischen Potenzials ([Abbildung 4.13](#)) des dargestellten Erfsegmentes sind auf die Schwankungen im Durchfluss zurückzuführen. Dieser hat, wie die Sensitivitätsanalyse gezeigt hat, den dominierenden Einfluss auf das Potenzial. Dem betrachteten Segment wurden die, über den Zeitraum von 2005 bis 2015, gemittelten Durchflusswerte der Pegelstation Bliesheim (Stationsnummer 274300000100) der Erfzt zugeordnet. In [Abbildung 5.1](#) sind die zugrundeliegenden Jahresverläufe des Durchflusses an der Pegelstation Bliesheim und der gemittelte Verlauf über die betrachteten Jahre dargestellt.



**Abbildung 5.1** Täglicher Durchfluss an der Pegelstation Bliesheim (Stationsnummer 274300000100) über die betrachteten Jahre.

Der MQ über den betrachteten Zeitraum liegt für die Station bei  $2,22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Wie in [Abbildung 5.1](#) zu erkennen, weichen einige Ereignisse stark von diesem Wert ab. Aufgrund der Umbaumaßnahmen sind extreme Abflusssituationen charakteristisch für die Erfzt. Insbesondere lokale Starkregenniederschläge im Sommerhalbjahr im Erfzteinzugsgebiet sind für extreme Hochwasser verantwortlich (Bezirksregierung Köln, 2015). Am Pegel Bliesheim gelten die folgenden Werte (Erfztverband, 2024):

- 1-jährliches Hochwasser:  $23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- 2-jährliches Hochwasser:  $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- 10-jährliches Hochwasser:  $45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



- 100-jährliches Hochwasser:  $71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- Extremhochwasser:  $103 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Es ist vor allem das Hochwasserereignis vom 28. September 2007 hervorzuheben mit dem höchsten Wert im betrachteten Zeitraum von  $36,565 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Gefolgt von den Ereignissen Anfang März 2009 mit  $32,935 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , Anfang Juli 2011  $33,189 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  und Anfang Juni 2016 mit  $36,289 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Die Frequenz die sich in den Daten erkennen lässt stimmt mit den in der Liste aufgeführten Werten, die an der Pegelstation Bliesheim gelten, überein. Die Ereignisse sind auch in den gemittelten Werten, wenn auch deutlich weniger ausgeprägt, zu erkennen (schwarze Linie in [Abbildung 5.1](#)) und entsprechend auch in den Potenzialwerten. Bei der Ermittlung des lokalen Potenzials müssen solche Schwankungen berücksichtigt werden. Durch die gewählte Mittelwertbildung kann es demnach zu Verzerrungen des Potenzials kommen. Die Hochwasserereignisse werden durch die Mittelwertbildung, aufgrund des geringen Durchflusses (nahe null  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) nur bedingt ausgeglichen. Für eine sichere Auslegung des Energiesystems sollte bei Fließgewässern mit geringen Durchfluss eventuell eine andere Mittelwertbildung in Betracht gezogen werden.

Die ermittelten Potenzialwerte beziehen sich auf die Fließgewässer in NRW. Der Bedarf an Warmwasser und Raumwärme in NRW lag 2022 bei 189 TW h für das gesamte Land. Der Wärmebedarf wird jedoch in den nächsten Jahren voraussichtlich sinken. 2045 wird der Bedarf bei voraussichtlich 148 TW h (moderates Einsparzenario) bzw. 123 TW h (hohes Einsparzenario) liegen ([Neubaur, 2024](#)). Das ermittelte Potenzial der Fließgewässer lässt sich nur bedingt mit dem Wärmebedarf in NRW vergleichen, da die ermittelten Potenziale für einzelne Fließgewässersegmente gelten und kein Wert für das gesamte Land ermittelt wurde. Es ist jedoch das Ziel, den Wärmebedarf mit verschiedenen Wärmequellen zu decken.

Aufgrund der hohen Besiedlungsdichte bzw. vielen Regionen mit hohem lokalem Wärmedichten in NRW stellt die leitungsgebundene Wärmeversorgung (siehe [Abschnitt 2.1](#)) eine wichtige Versorgungsstrategie dar. Sie bietet unter anderem den Vorteil, dass viele verschiedene erneuerbare Wärmequellen und unvermeidbare Abwärme eingebunden werden können ([Neubaur, 2024](#)). Die hier entwickelte Methodik ermöglicht das Potenzial der Fließgewässer räumlich zu lokalisieren. Dies ermöglicht Fließgewässer, als Wärmequelle bei der Planung neuer Wärmeversorgungssysteme, zu berücksichtigen und einzubinden. Ebenso ermöglichen die räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Potenzialwerte Netzbetreibern die Bestandsnetze mit den Potenzialkarten zu vergleichen und ggf. fossile Energieträger durch Flusswärme zu ersetzen. Ziel ist, dass ähnliche Modelle, wie das hier entwickelte Modell, für alle erneuerbaren Wärmequellen vorliegen und so eine effiziente Wärmeplanung stattfinden kann.

Die berechneten Potenzialwerte wurden anhand von Messdaten entwickelt, die in der Vergangenheit liegen. Inwiefern die Potenzialwerte auch für die Zukunft gültig sind, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Beispielsweise sind die Abflussverhältnisse und damit das Potenzial der Erft, durch die Sumpfungsmaßnahmen stark verändert ([Engelhardt, 2016](#)). Im Zuge des Kohleausstiegs wird die Erft renaturiert, da der Abfluss,

durch die zurückgehenden Sumpfungswassereinleitungen, deutlich zurückgehen wird (Heinrich Schäfer, 2023). Dieses Beispiel zeigt, dass es sich bei den berechneten Werten um Potenziale handelt und für eine Umsetzung weitere Analysen und Planungen im Einzelfall nötig sind. Neben individuellen Bedingungen verändern sich die Fließgewässer jedoch auch durch den Klimawandel. Etwa werden die Wassertemperaturen weiter ansteigen und die Abflüsse stärker schwanken (van Vliet et al., 2012). Durch die Sensitivitätsanalyse kann gezeigt werden, dass die Temperatur einen untergeordneten Einfluss auf das Potenzial hat. Da die berücksichtigten Grenzwerte sich insbesondere auf zu niedrige Wassertemperaturen beziehen sollten sich die Potenzialwerte durch die höheren Wassertemperaturen nicht verringern. Obwohl eine Wärmepumpe effizienter arbeitet, umso geringer die Temperaturspreizung zwischen der Temperatur der Wärmequelle und des abgegebenen Nutzwärmestroms ist (siehe Abschnitt 2.1), ist auch nicht mit einer Zunahme des technischen Potenzials zu rechnen. Dies zeigt die Sensitivitätsanalyse, die auch hier den deutlich höheren Einfluss des Durchflusses zeigt, wie aus Tabelle 4.3 deutlich wird. Wichtiger als die Gewässertemperatur ist bei der Kalkulation des Potenzials der Durchfluss des Fließgewässers. Der Klimawandel führt nach einer Studie von Gudmundsson et al. (2021) global nicht gleichmäßig zu einer Abnahme der geführten Wassermenge. In manchen Regionen kommt es zu einer Abnahme und in anderen Regionen zu einer Zunahme. Diese Veränderungen sind in dem Modell nicht abgebildet und müssen ggf. durch weitere Analysen untersucht werden. Zudem kommt es zu einer Zunahme hydrologischer Extremereignisse, wie Niederschlags- bzw. Starkregenereignisse, wobei ein Einfluss auf den Abfluss insbesondere in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten vorhanden ist (Simon & Mudersbach, 2021). Wärmepumpen sind auf bestimmte Durchflussmengen angepasst (GebäudeKlima Schweiz, 2014) (Unterabschnitt 3.5.5 sind dazu weitere Erläuterungen zu entnehmen), eine starke Variabilität des Durchflusses wirkt sich daher negativ auf die Nutzungseffizienz aus. Energiebedingte Emissionen machen 84 % (2021) der deutschen Treibhausgasemissionen aus – durch den Einsatz von erneuerbaren Wärmequellen, wie Fließgewässern, kann eine klimaneutrale Wärmeversorgung erreicht werden. Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell bietet die Möglichkeit das Potenzial von Fließgewässern räumlich zu quantifizieren und damit eine Grundlage für eine effiziente Planung von klimaneutralen Wärmeversorgungssystemen zu schaffen.

### 5.3 Limitationen der Methodik

Die Methodik wurde entwickelt, um automatisiert das Wärmepotenzial von Fließgewässern auf lokalem Maßstab mit einer täglichen Auflösung zu berechnen. Eine Abschätzung des Potenzials für ein ganzes Gebiet ist aufgrund der Einteilung der Fließgewässer nicht möglich. Dies würde, da einige Fließgewässer in mehrere und andere in nur ein Segment eingeteilt sind, zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Eine Möglichkeit wäre das Potenzial auf die Länge zu beziehen. Eine Weiterentwicklungsmöglichkeit würde darin bestehen, zu untersuchen wann das Potenzial erneuert wurde und welche Einflüsse dies



beeinflussen. Daher könnte dies auch für den konkreten Anwendungsfall betrachtet werden, wenn zwei Wärmepumpenanlagen an einem Fließgewässer geplant sind. Da unterschiedlich viele Stationen pro Fließgewässer vorliegen und die Fischgemeinschaften sich unregelmäßig ändern, sind die Segmente unterschiedlich lang. Für einige Fließgewässer liegen gar keine Stationen vor. Um regelmäßige Segmente einzuteilen und auch Fließgewässer ohne Stationen zu untersuchen könnten durch hydrologische Modelle die Temperatur- und Durchflusswerte simuliert werden. Da es sich jedoch um eine Potenzialberechnung handelt, mit der eine Abschätzung vorgenommen wird, ist fraglich, ob eine höhere Auflösung (mehr Segmente) nötig ist.

Die Wahl der Interpolation in dieser Arbeit ist ein konservativ-pessimistischer Ansatz. Ein Problem besteht dabei in den Randsegmenten der Fließgewässer. Es wurde der Mittelwert der Temperaturen gebildet, sofern ein Segment durch zwei Stationen begrenzt wird. Sonst wurden nur die Werte der einen Station zugeordnet. Die Wassertemperatur von Fließgewässern ändert sich nicht extrem über die hier betrachteten Distanzen, siehe dazu Erläuterungen in [Unterabschnitt 2.4.2](#). Um dies zu überprüfen wurden für jeden Fluss die täglichen Temperaturwerte zwischen den Stationen pro Tag verglichen. Es wurde die Differenz zwischen dem geringsten Temperaturwert und höchsten Temperaturwert pro Tag und pro Fließgewässer ermittelt. Von diesen 365 Differenzwerten wurde der Mittelwert gebildet. Es kann gezeigt werden, dass der maximale und minimale gemessene Wert innerhalb eines Fließgewässers im Mittel nur um  $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  voneinander abweicht. Dass die Endstücke von Fließgewässern, die nur den Wert einer Station zugewiesen bekommen, statt den Mittelwert zwischen zwei Stationen, kann daher als vernachlässigbar angesehen werden. Hingegen liegt die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Wert der Durchflusses innerhalb eines Fließgewässers im Mittel bei  $14,2\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ . Der Durchfluss kann sich auch auf kurzen Strecken, beispielsweise durch Zuflüsse, stark verändern. Daher wurde kein Mittelwert zwischen zwei Stationen gebildet, sondern nur der Wert der Station zugeordnet, der den geringeren MQ aufweist. Dieser wurde über den betrachteten Zeitraum (2005 bis 2020) für jede Station ermittelt. Durch diesen konservativ-pessimistischen Ansatz wird das Potenzial für die Segmente eher unterschätzt als überschätzt. Dies gilt nicht für die Fließgewässer, für die nur eine Station vorliegt und für die Segmente, die nur an eine Station grenzen (Randstücke). Bei diesen besteht die Möglichkeit, dass der tatsächliche Durchfluss niedriger ist und damit das Potenzial überschätzt wurde. Um den Einfluss zu untersuchen wurde das Modell einmal unter Verwendung einer konservativ-optimistische Interpolation durchlaufen, d. h. es wurde immer die Station mit dem höheren MQ zugeordnet. Die Werte sind [Tabelle 5.1](#) zu entnehmen. Verglichen wird in der Tabelle der Median der ermittelten auf ein Jahr bzw. die Heizperiode summierten Potenzialwerte der betrachteten Flüsse. Bei dem konservativ-optimistischen Ansatz sind die Potenzialwerte, wie zu erwarten, höher als bei der konservativ-pessimistischen Interpolation. Da die Heizperiode (Oktober bis einschließlich April) besonders relevant ist, wird auch diese betrachtet. Die prozentuale Differenz schwankt je nach betrachteter Größe zwischen 8,5 % und 25,7 %. Die Wahl der Interpolationsmethode ist daher relevant. Das Potenzial wird in den Randsegmenten flussaufwärts höchstwahrscheinlich überschätzt. Dies beruht auf der Annahme, dass der Durchfluss im Flussverlauf zunimmt. Durch die Zuordnung der Durchflusswerte

der Station mit dem niedrigeren **MQ** ist der tatsächliche Durchfluss in dem letzten Segment flussaufwärts der Station höchstwahrscheinlich geringer.

**Tabelle 5.1** Vergleich pessimistische und optimistische Interpolation.

Median der Potenziale je Fließgewässersegment. Heizperiode Oktober bis einschließlich April.

Potenzial	Konservativ-pessimistisch	Konservativ-optimistisch	Prozentuale Differenz
	Median	Median	
Theoretisch, Jahr	164 GW h	178 GW h	8,5 %
Theoretisch, Heizperiode	113 GW h	142 GW h	25,7 %
Technisch, Jahr	47 GW h	53 GW h	12,8 %
Technisch, Heizperiode	30 GW h	36 GW h	20 %

Die Datengrundlage in Deutschland ist abhängig von den Ländern. Um die Daten für die Potenzialberechnung zu standardisieren waren aufwändige Datenaufbereitungsschritte nötig. Soll das Modell auf andere Länder angewandt werden, müssen zunächst die entsprechenden Daten beschafft und aufbereitet werden. In dieser Arbeit wurde beispielhaft eine Implementierung für die Datenlage in **NRW** durchgeführt, die prinzipiell auf andere Länder übertragbar ist. Die Funktionen, die während der Datenaufbereitung benötigt werden, sind in einem separaten Skript `data_preprocessing.py` definiert. Sie können bei der Datenaufbereitung eines anderen Landes verwendet werden. Für die Potenzialberechnung wurden die Temperatur- und Durchflusswerte über mehrere Jahre gemittelt, um einen Wert pro Tag (365 Tage) zu erhalten. Dadurch kann der Einfluss von Extremereignissen limitiert werden. Problematisch ist, dass der Zeitraum für die Aggregation nicht identisch ist. Für die Durchflusswerte wurde ein Aggregationszeitraum von 2005 bis 2020 gewählt. In diesem Zeitraum lagen jedoch keine Temperaturdaten in **NRW** vor. Diese konnten nur für die letzten zwei Jahre (2022 bis 2024) bezogen werden. Die gesondert angefragten Temperaturdaten des Rheins liegen ein Jahr zurück (2021 bis 2023). Da keine anderen Daten vorlagen, wurden die gegebenen Zeiträume verwendet. Mit der Sensitivitätsanalyse konnte allerdings gezeigt werden, dass der Einfluss der Temperatur von untergeordneter Relevanz ist. Der kleinere Zeitraum kann daher als vernachlässigbar betrachtet werden. Die Aggregation der Zeitreihen der Wassertemperaturen über einen größeren Zeitraum würde zu einer Reduktion des Einflusses von Extremereignissen (und damit weniger Tagen mit einer zu geringen Wassertemperatur) führen. Die Berechnung des Potenzials und die Berechnung der Tage an denen die Temperaturen zu niedrig für eine Nutzung sind, sollten bei einer spezifischen Planung daher gesondert betrachtet werden.

**Tabelle 5.2** Umweltwärme (Fließgewässer).

Studie	Ziel	Ort	Räumliche Auflösung	Parameter	Methodik	Daten
Diese Arbeit	Modell um das tägliche Fließgewässerpotenzial zu bestimmen	Nicht ortsgebunden. Bsp. für NRW, Deutschland	Fließgewässer(-segmente)	spezifische Wärmekapazität von Wasser $c$ , Dichte von Wasser $\rho$ , genutzter Durchfluss $Q_g$ , Temperatur des unbenutzten Wassers $T_u$ , minimale Gewässertemperatur $T_{\min}$ , gegebene Temperaturspreizung $\Delta T_{\text{geg}}$ , tatsächliche Temperaturspreizung $\Delta T_{\text{tat}}$ , maximale Veränderung der Gewässertemperatur (Fischgemeinschaft), COP der Wärmepumpe, Betrachtungszeitraum $t$ , maximale Entnahmerate, Quantil (Dimensionierung der Anlage)	Aggregation der Durchfluss- und Temperaturwerte über mehrere Jahre. Einteilung von Fließgewässersegmenten mit Fischgemeinschaft, Bestimmung des maximal nutzbaren Durchflusses unter Einhaltung der Temperaturgrenzwerte und bei dem technischen Potenzial zusätzlich Parameter zur Dimensionierung der Anlage. Bestimmung des täglichen theoretischen und technischen Potenzials für alle Segmente.	Fließgewässernetz (LANUV, 2017), Gewässertemperaturdaten (LANUV, 2024b), Gewässerdurchflussdaten (LANUV, 2024c), Schutzgebiete (Bundesamt für Naturschutz, 2024)

## 5.4 Vergleich mit anderen Forschungsstudien

In Unterabschnitt 2.5.2 werden verschiedene Studien vorgestellt, die sich mit der Erfassung des Potenzials erneuerbarer Energiequellen beschäftigen, die für die Wärmeversorgung eingesetzt werden können. Dabei wurde die Unterscheidung zwischen spezifischen Lösungen und generischen Modellen herausgearbeitet. In dieser Arbeit wurde ein generisches Modell entwickelt. Das Modell ist in anderen Regionen innerhalb Deutschlands anwendbar. Dabei müssen die zu verwendenden Daten aufbereitet werden. Dies ist am Beispiel von Daten innerhalb des Landes NRW durchgeführt worden. Entsprechend liegen ortsspezifische Ergebnisse vor.

In Unterabschnitt 2.5.2 wurde das Ziel, der Ort (geographischer Bereich), die räumliche Auflösung und welche Methodik und Parameter verwendet wurden verglichen. In Tabelle 5.2 ist ein solcher Tabelleneintrag für diese Arbeit dargestellt.

Im Vergleich zu den in Tabelle 2.6 verglichenen Studien werden, wie in der Studie von Ferstl et al. (2024), nur Fließgewässer betrachtet und keine weiteren Gewässer, wie Seen oder Seeausläufe. In der Studie von Gaudard et al. (2019) werden neben dem Potenzial von Flüssen, auch das Potenzial von Seen und Seeausläufen bestimmt. Bei der Studie von R. Lund und Persson (2016) werden zusätzlich auch Seen betrachtet. In den verglichenen Studien sind spezifische Lösungen dargestellt, in dieser Arbeit wurde ein generisches Modell entwickelt, es ist also übertragbar. Ein generisches Modell bzw. eine Softwarelösung haben auch Casasso und Sethi (2016) entwickelt, um das flache

geothermische Potenzial zu ermitteln. Vorteil ist, dass diese Ansätze ermöglichen das Modell auch in anderen Regionen anzuwenden und durch nutzerspezifische Eingaben ermöglichen, das Ergebnis anzupassen. Dabei ist, anders als bei einer spezifischen Lösung, nicht das Ziel einen Potenzialwert für eine ganze Region zu erhalten, um etwa auf größerem Maßstab verschiedene Potenziale abschätzen zu können.

Für eine Anwendung außerhalb Deutschlands müssen gesetzlich festgelegte Randbedingungen, insbesondere Temperaturgrenzwerte, möglicherweise angepasst werden. Die räumliche Auflösung sind, wie in der Studie von Gaudard et al. (2019), Fließgewässer(-segmente), in den Studien von (Ferstl et al., 2024) und R. Lund und Persson (2016) wird das Potenzial pro Fluss bestimmt.

In den Studien werden verschiedene Parameter berücksichtigt. Der Durchfluss und die Temperatur sind die Parameter, die aus den Daten für die Potenzialberechnung abgeleitet werden. In den Studien von Ferstl et al. (2024) und R. Lund und Persson (2016) wird nur der Durchfluss berücksichtigt und Temperaturdifferenzen angenommen. In der Studie von Gaudard et al. (2019) und in dieser Arbeit wird die Gewässertemperatur als Parameter berücksichtigt. So können Gewässer ausgeschlossen werden, die im Winter zu kalt sind (wie bei Gaudard et al. (2019)), bzw. das Potentials an Tagen, an welchen die Gewässertemperatur zu gering ist, auf null gesetzt werden (diese Arbeit). Zudem kann über die Gewässertemperatur die tatsächliche Temperaturspreizung zwischen unbenutzten und benutzten Wasser berechnet werden und der Durchfluss ermittelt werden, der in diesem Segment an diesem Tag genutzt werden kann.

Bei der Bestimmung des technischen Potenzials wird in dieser Arbeit die Gewässertemperatur auch verwendet, um den COP zu berechnen und den Anteil zu bestimmen, der zusätzlich durch die Wärmepumpe bereitgestellt wird. Der COP wird auch in der Studie von Gaudard et al. (2019) berechnet. Zusätzlich wird in dieser Arbeit der Durchfluss nicht nur durch die Temperaturgrenzwerte begrenzt, sondern auch durch die Dimensionierung der Anlage. Dazu wird berücksichtigt, wie viele Stunden pro Jahr die Anlage unter voller Last arbeitet soll.

In dem Ansatz von Ferstl et al. (2024) und R. Lund und Persson (2016) wird das theoretische Potenzial bestimmt, in dem Ansatz von Gaudard et al. (2019) das technische Potenzial. In dieser Arbeit wird sowohl das theoretische, als auch das technische Potenzial berechnet. Dadurch kann der Unterschied zwischen den Potenzialen untersucht werden. Durch den generischen Ansatz können die festgelegten Standardwerte durch nutzerspezifische Softwareeingaben angepasst werden. In allen betrachteten Studien werden Grenzwerte beachtet. Dies erfolgt auch in dieser Arbeit. Grundlage dafür bilden hier die Fischgemeinschaften. Je nach Fischgemeinschaft werden für jedes Segment spezifische Grenzwerte beachtet.

Durch die tägliche Auflösung können die Modellergebnisse mit Bedarfsdaten abgeglichen werden und ermöglichen eine detaillierte Planung. Gleichzeitig ermöglicht eine hohe räumliche Auflösung (Fließgewässersegmente) die Beachtung der lokalen Gegebenheiten aus Durchfluss, Temperatur und Fischgemeinschaft. Die nutzerspezifischen Eingaben ermöglichen die individuellen Bedingungen, während der Berechnung des Potenzials, zu

berücksichtigen. Da sowohl das theoretische, als auch das technische Potenzial berechnet wird, ist das Modellergebnis für verschiedene Weiterverarbeitungen geeignet.

# 6 Fazit

Der Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der räumlichen Erfassung und Modellierung des Potenzials für erneuerbare Wärme. Es wurde ein Modell präsentiert, welches das Potenzial von Fließgewässern bestimmt. [Abschnitt 6.1](#) fasst zunächst die Arbeit zusammen, bevor [Abschnitt 6.2](#) ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschung gibt.

## 6.1 Zusammenfassung

Durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger können fossile Energieträger verdrängt und damit energiebedingte Emissionen verringert werden. Dies gilt auch für die Wärmeversorgung mit einem bisher sehr geringen erneuerbaren Anteil. Die Transformation hin zu erneuerbaren Quellen ist in Deutschland unter anderem mit dem [WPG](#) gesetzlich geregelt. Da Wärme nicht über beliebig lange Distanzen transportiert werden kann, müssen die Wärmequellen lokal bestimmt werden, zum Beispiel in der kommunalen Wärmeplanung oder für konkrete Wärmenetzplanungen.

In dieser Arbeit wurden verschiedene erneuerbare Energieträger betrachtet, die für die Wärmeversorgung eingesetzt werden können. Durch den Vergleich verschiedener Studien zur Potenzialermittlung konnte festgestellt werden, dass insbesondere in der Erfassung der Umweltwärme, spezifische Lösungen existieren. Generische (allgemein anwendbare) Modelle existieren derzeit kaum.

Ein solcher übertragbarer Ansatz wurde in dieser Arbeit für die Erfassung des Potenzials von Fließgewässern ermittelt. Flusswärme ist eine der genannten erneuerbaren Wärmequellen und eignet sich sowohl für die dezentrale, aber vor allem für die leistungsgebundene Wärmeversorgung. Im Rahmen der Arbeit wurde sich mit der Frage beschäftigt, welche (frei verfügbaren) räumlichen Daten in Deutschland und welche geoinformatischen Methoden für die Potenzialanalyse von Fließgewässern eingesetzt werden können. Das Modell wurde anhand von Daten aus dem Land [NRW](#) entwickelt. Die Daten waren überwiegend online einsehbar und frei nutzbar, teilweise musste eine Nutzeranfrage gestellt werden. Zudem kann geschlossen werden, dass die Geodateninfrastruktur in Deutschland überwiegend von den Ländern abhängig ist und sich die Zugänglichkeit, der Download und die Nutzungsrechte je nach Land unterscheiden. Es

konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von geoinformationstechnologischen Methodiken sowie den Einsatz von Python-Bibliotheken zur Verarbeitung von Geometrien eine effiziente Methodik entwickelt werden konnte. Der implementierte Prozess selektiert die Fließgewässer, für die ausreichend Daten vorliegen, ordnet die Stationen und weitere Informationen räumlich zu und segmentiert die Geometrien der Fließgewässer um die verschiedenen Bedingungen und Grenzwerte bei der Berechnung des theoretischen und technischen Potenzials zu berücksichtigen. Als Berechnungsgrundlage wurden täglich aufgelöste (über mehrere Jahre aggregierte) Temperatur- und Durchflussdaten der Fließgewässer verwendet. Für jedes Segment wurden individuelle Temperaturgrenzwerte beachtet und der maximal nutzbare Durchfluss bestimmt. Bei der Berechnung des technischen Potenzials wurden zusätzlich Parameter möglicher Anlagen berücksichtigt. Für 165 Fließgewässersegmente in NRW wurde das theoretische und technische Potenzial mit einer täglichen Auflösung berechnet. Die Fließgewässersegmente enthalten zudem eine Information darüber, ob sie ganz oder teilweise innerhalb eines (Natur-)Schutzgebietes liegen.

Es konnte gezeigt werden, dass das theoretische Potenzial deutlich über dem technischen Potenzial liegt. Der Median des jährlichen theoretischen Potenzials, der betrachteten Fließgewässersegmente in NRW, liegt bei 164 GW h und der des technischen Potenzials bei 47 GW h. Wird nur die Heizperiode (Oktober bis April) betrachtet, liegt der Median bei 113 GW h (theoretisch) und 30 GW h (technisch). Der Rhein weist deutlich höhere Potenzialwerte als alle anderen betrachteten Fließgewässer auf, was hier auf die deutlich höheren Durchflusswerte zurückzuführen ist.

Bei einem visuellen Vergleich wurde festgestellt, dass das Potenzial der Fließgewässer im Jahresverlauf dem Verlauf des Durchflusses folgt. Dies wurde auch durch die Sensitivitätsanalyse bestätigt. Aus dieser geht hervor, dass der überwiegende Teil der Varianz im Ergebnis (theoretisches Potenzial) durch die Varianz in den Durchflusswerten und der deutlich geringere Anteil durch die Varianz in den Temperaturwerten erklärt wird. Bei dem technischen Potenzial ist dies noch ausgeprägter. Die Betrachtung der Durchflusswerte ist daher bedeutender, als die Betrachtung der Temperaturdaten. Die Temperaturwerte der Fließgewässer sind insbesondere dann relevant, wenn sie sich der definierten minimalen Temperaturgrenze nähern, wodurch die tatsächliche Temperaturspreizung verringert wird bzw. eine Nutzung nicht mehr möglich ist. In NRW waren nur zwei der betrachteten Fließgewässer an je einem Tag im Jahr zu kalt für eine Nutzung.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell ermöglicht effizient das theoretische und technische Potenzial von Fließgewässern zu berechnen. Durch den modularen Aufbau des Modells und die Berücksichtigung individueller Nutzereingaben ist das Modell auch auf andere Regionen anwendbar.



## 6.2 Ausblick

Es wurde in dieser Arbeit beispielhaft für das Land NRW das Potenzial ermittelt. An diese Arbeit anschließend könnte die Datengrundlage weiter ausgebaut werden und auch die anderen Bundesländer Deutschlands hinzugefügt werden. Durch die Berücksichtigung weiterer Gesetze, die in anderen Staaten gelten, kann das Modell auch über Deutschland hinaus angewendet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde für alle Fließgewässer, für welche Daten vorliegen, unabhängig von der Durchflussmenge das Potenzial ermittelt. Inwiefern kleinere Fließgewässer sich jedoch für die Wärmeversorgung eignen, muss in weiteren Studien und insbesondere im Abgleich mit der lokalen Nachfragesituation untersucht werden. Im praktischen Einsatz lässt sich die entwickelte Software etwa in am DLR vorhandene Optimierungsmethoden für Energiesysteme einbetten und kann dort die Randbedingungen des technischen Potenzials für Flusswärmenutzung liefern. Auf diese Weise würde auch ein Abgleich mit Bedarfsdaten und eine überschlägige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen.

Durch den Einsatz einer konservativ-pessimistischen Interpolationsmethode des Durchflusses kann es in den Randsegmenten zu einer Überschätzung des Potenzials gekommen sein. Eine Möglichkeit verlässlichere Daten zu generieren könnte daher eine Weiterentwicklung an dieser Stelle des Modells sein. Statt eines konservativen Ansatzes könnte überprüft werden, ob eine andere Inter- und Extrapolationsmethode geeigneter wäre. Bevor jedoch ein hydrologisches Modell verwendet wird, um die Durchflussdaten zu interpolieren, sollte überprüft werden, ob dafür die Datengrundlage genügt und ob verlässliche Ergebnisse generiert werden können.

Um die Wärmeversorgung klimaneutral zu decken werden verschiedene Wärmequellen benötigt. Durch weitere Studien könnten analoge Modelle für weitere erneuerbare Energieträger entwickelt werden – einige existieren auch bereits. Dies würde eine effiziente Planung von klimaneutralen Wärmeversorgungssystemen ermöglichen, auch da manche Wärmequellen synergetisch zueinander eingesetzt werden können. In der Praxis können die Modellergebnisse mit Bedarfsdaten oder Bestandsnetzen verglichen werden und so geeignete Wärmequellen identifiziert werden. Daran anschließend können weitere Messungen und detaillierte Planungen stattfinden.

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die automatisierte Ermittlung des Potenzials für Umweltwärme aus Fließgewässern auf lokaler Ebene möglich ist. Durch die hohe zeitliche Auflösung (täglich) und hohe räumliche Auflösung (Fließgewässersegmente) eignen sich die Ergebnisse für die Potenzialanalyse während der Planung klimaneutraler dezentraler und zentraler Wärmeversorgungssysteme. Die Daten eignen sich sowohl für den lokalen Netzausbau als auch als klimaneutrale Alternative zur Einspeisung in Bestandsnetze. Werden weitere Daten bereitgestellt, können diese eingepflegt und das Potenzial neu berechnet werden. Auf diese Weise kann der entwickelte Softwarecode nicht nur für eine Abschätzung (wie hier aus großflächig verfügbaren Daten erfolgt),



sondern auch für genauere Betrachtungen der lokalen Eignung der Fließgewässer genutzt werden.

# Literaturverzeichnis

- ARPA Piemont. (1976). *Carta della litologia - scala 1:100000*.
- Ayub, Z. (2016). World's Largest Ammonia Heat Pump (14 MWh) for District Heating in Norway—A Case Study. *Heat Transfer Engineering*, 37 (3-4), 382–386. doi: 10.1080/01457632.2015.1052716
- Bdew. (2021). *Wärmewende*. Zugriff am 04.04.2024 auf <https://www.bdew.de/presse/pressemappen/waermewende/>
- Berger, H. (2011). *Wärmetauscher in oberirdischen Gewässern: Wasserwirtschaftliche Betrachtung*. Deggendorf: Wasserwirtschaftsamt Deggendorf.
- Bezirksregierung Köln. (2015). *Beitrag zum Hochwasserrisikomanagementplan Rhein (NRW) für das Teileinzugsgebiet Erft*. Köln: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Bezirksregierung Köln. (2024). *Digitales Basis-Landschaftsmodell*. Zugriff am 20.06.2024 auf <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/landschaftsmodelle/aktuelle-landschaftsmodelle/digitales-basis>
- Blanco, L., Aditya, M., Schiricke, B. & Hoffschmidt, B. (2023). Classification of building properties from the German census data for energy analyses purposes. In IBPSA (Hrsg.), *Proceedings of Building Simulation 2023: 18th Conference of IBPSA* (S. 817–824). IBPSA. doi: 10.26868/25222708.2023.1266
- Bonin, J. (2023). *Handbuch Wärmepumpen: Planung und Projektierung* (4. Aufl.). Berlin: Wien.
- Bundeamt für Landestopographie swisstopo. (2024). *swissBUILDINGS3D 2.0*. Zugriff am 02.05.2024 auf <https://www.swisstopo.admin.ch/de/landschaftsmodell-swissbuildings3d-2-0>
- Bundesamt für Naturschutz. (2024). *Schutzgebiete (WFS)*. Zugriff am 01.07.2024 auf <https://gdk.gdi-de.org/geonetwork/srv/api/records/bec888f9-ba0c-42dc-846e-177b8265dafa>
- Bundesregierung. (2023). *EU-Klimaschutzpaket Fit For 55*. Zugriff am 05.04.2024 auf <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/europa/fit-for-55-eu-1942402>
- Bundesrepublik Deutschland. (2020). *Oberflächengewässerverordnung (OGewV) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist*.
- Bundesrepublik Deutschland. (2021). *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12.*

- Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.
- Bundesrepublik Deutschland. (2023a). *Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz -WPG)*. Bundesgesetzblatt, 2023 I Nr. 394.
- Bundesrepublik Deutschland. (2023b). *Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585)*, das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 22. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 409) geändert worden ist.
- Burhenne, S. (2013). *Monte Carlo Based Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Performance Simulation* (Dissertation). Fakultät für Architektur des Karlsruher Instituts für Technologie, Karlsruhe.
- Burhenne, S., Jacob, D. & Gregor, P., H. (2011). Sampling Based on Sobol' Sequences for Monte Carlo Techniques Applied to Building Simulations. In IBPSA (Hrsg.), *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of IBPSA* (S. 1816–1823). IBPSA.
- BWP. (2024). *Funktion & Wärmequellen | Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.* Zugriff am 16.04.2024 auf <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion-waermequellen/>
- Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51 (8), 1389–1406. doi: 10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x
- Campbell, N., A. & Reece, J., B. (Hrsg.). (2009). *Biologie* (8. Aufl.). München: Pearson Studium.
- Casasso, A. & Sethi, R. (2016). G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy*, 106, 765–773. doi: 10.1016/j.energy.2016.03.091
- Chang, M., Zink Thellufsen, J., Zakeri, B., Pickering, B., Pfenninger, S., Lund, H. & Østergaard, P. A. (2021). Trends in tools and approaches for modelling the energy transition. *Applied Energy*, 290, 116731. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116731
- Dehli, M. (2020). *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe: Energietechnische Optimierungskonzepte für Unternehmen*. Wiesbaden and Heidelberg: Springer Vieweg.
- Der Schweizerische Bundesrat. (1998). *Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. Februar 2023)*.
- Drosihn, D. (2022). *Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990 - 2020: unter Verwendung von Berechnungsergebnissen der Nationalen Koordinierungsstelle Emissionsberichterstattung*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Dufter, C., Gruber, A., Guminski, A., von Roon, S. & Orthofer, C. (2018). Methodisches Vorgehen und voruntersuchungen zu Flexibilitätpotenzialen. In F. Ausfelder, A. Seitz & S. von Roon (Hrsg.), *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie* (S. 2–23). Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- EEA. (2012). *CORINE Land Cover 2012 [Dataset]*. European Environment Agency. doi: 10.2909/a84ae124-c5c5-4577-8e10-511bfe55cc0d

- Engelhardt, N. (2016). *Jahresbericht Erftverband 2016: Wasserwirtschaft für unsere Region*. Bergheim: Erftverband.
- Erftverband. (2024). *Wasserstand und Abfluss an Erft und Nebenläufen*. Zugriff am 22.09.2024 auf [https://www.erftverband.de/mapserver/arcshp/flussgebiet/klima\\_abfluss/howis/html/ev\\_w\\_tab\\_aktwerte.html](https://www.erftverband.de/mapserver/arcshp/flussgebiet/klima_abfluss/howis/html/ev_w_tab_aktwerte.html)
- ETH Zürich. (2024). *Geothermie in Kürze*. Zugriff am 17.04.2024 auf <http://www.seismo.ethz.ch/de/knowledge/things-to-know/geothermal-energy-earthquakes/geothermal-energy-in-a-nutshell/>
- Europäische Union. (2000). *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*.
- Europäische Union. (2021). *Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“)*.
- Europäische Union. (2023). *Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates*.
- Europäischer Rat. (2024). *Ein europäischer Grüner Deal*. Zugriff am 05.04.2024 auf <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014). *Leitfaden feste Biobrennstoffe: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich* (4. Aufl.). Gülzow-Prüzen: FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Ferstl, J., Wettberg, N., Hinterstocker, M. & Möbius, A. (2024). *Wärmepumpen an Fließgewässern: Analyse des theoretischen Potenzials in Bayern*. München: FfE.
- Friotherm AG. (2008). *Värtan Ropsten – Weltgrößte Anlage mit Meerwasser-Wärmepumpen: 6 Unitop<sup>®</sup> 50FY, Gesamtkapazität 180 MW*. Winterthur.
- Gaudard, A., Schmid, M. & Wüest, A. (2017). Thermische Nutzung von Oberflächengewässern: Mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung. *Aqua & Gas* (5), 40–45.
- Gaudard, A., Schmid, M. & Wüest, A. (2018). Thermische Nutzung von Seen und Flüssen: Potenzial der Schweizer Oberflächengewässer. *Aqua & Gas* (2), 26–33.
- Gaudard, A., Schmid, M., Wüest, A., Bryner, A. & Penicka, P. (2022). *fact sheet Wärmenutzung aus Seen und Fliessgewässern*. Dübendorf: Eawag.
- Gaudard, A., Wüest, A. & Schmid, M. (2019). Using lakes and rivers for extraction and disposal of heat: Estimate of regional potentials. *Renewable Energy*, 134, 330–342. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.095
- Gea-Bermúdez, J., Jensen, I. G., Münster, M., Koivisto, M., Kirkerud, J. G., Chen, Y. & Ravn, H. (2021). The role of sector coupling in the green transition: A least-cost energy system development in Northern-central Europe towards 2050. *Applied Energy*, 289, 116685. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116685

- GebäudeKlima Schweiz. (2014). *Wärmequellennutzung Oberflächenwasser: Unterlagen für Planer*. Olten: Schweizerischer Verband für Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik.
- GeoDH. (2014). *European Geothermal Energy Council, GeoDH Geographical Information System (Map)*. European Union. Zugriff am 30.04.2024 auf <http://geodh.eu/database/>
- Gorzalka, P., M., Garbasevski, O., Estevam Schmiedt, J., Droin, A., Linkiewicz, M., Wurm, M. & Hoffschmidt, B. (2021). Collecting data for urban building energy modelling by remote sensing and machine learning. In IBPSA (Hrsg.), *Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA* (S. 1139–1146). KU Leuven. doi: 10.26868/25222708.2021.30184
- Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., ... Zhao, F. (2021). Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science (New York, N.Y.)*, 371 (6534), 1159–1162. doi: 10.1126/science.aba3996
- Han, S. (2011). *Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse als Beitrag zur Bewertung der Zuverlässigkeit adaptronischer Struktursysteme* (Dissertation). Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Heinrich Schäfer. (2023). *Jahresbericht Erftverband 2023: Wasserwirtschaft für unsere Region*. Bergheim: Erftverband.
- Herman, J. & Usher, W. (2017). SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis. *The Journal of Open Source Software*, 2 (9), 97. doi: 10.21105/joss.00097
- HotMaps. (2024). *Hotmaps Project - The open source mapping and planning tool for heating and cooling*. Zugriff am 30.04.2024 auf <https://www.hotmaps-project.eu/>
- Hurter, S. and Haenel, R. (2002). *Atlas of geothermal resources in Europe*. Europäische Kommission Generaldirektion Forschung und Innovation, Publications Office.
- Huttrer, G. W. (1997). Geothermal heat pumps: An increasingly successful technology. *Renewable Energy*, 10 (2-3), 481–488. doi: 10.1016/0960-1481(96)00107-3
- Iwanaga, T. & Usher, W., Herman, J. (2022). Toward SALib 2.0: Advancing the accessibility and interpretability of global sensitivity analyses. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 4, 18155. doi: 10.18174/sesmo.18155
- Kaltschmitt, M., Streicher, W. & Wiese, A. (2020). *Erneuerbare Energien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-61190-6
- Klauser, D., Schlegel, T., Hertach, M. & Rohrbach, N. (2023). *Dokumentation Geodatenmodell: Solarenergie: Eignung Dächer (Sonnendach.ch), Solarenergie: Eignung Fassaden (Sonnenfassade.ch)*. Bern: Genossenschaft Meteotest im Auftrag von Bundesamt für Energie BFE.
- Krimmling, J. (2009). *Erneuerbare Energien: Einsatzmöglichkeiten - Technologien - Wirtschaftlichkeit ; mit 56 Tabellen*. Köln: Müller.
- Land Nordrhein-Westfalen. (2021). *Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen Landeswassergesetz (LWG). In der Fassung des Artikels 1 des Gesetzes zur Änderung wasser- und wasserverbandsrechtlicher Vorschriften vom 8. Juli 2016*

- (GV. NRW. S. 559). Zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 17. Dezember 2021 (GV. NRW. S. 1470).
- LANUV. (2010). *Digitale Gewässerstationierungskarte des Landes Nordrhein-Westfalen (GSK) Auflage 30.11.2010 (GSK3C): LANUV NRW FB 51*. Zugriff am 20.06.2024 auf <https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/pdf/Allgemeine%20Hinweise%20zur%20GSK3C.pdf>
- LANUV. (2017). *Oberflächenwasserkörper NRW (Auflage 3D): OW-Wasserkoerper-NRW\_EPSG25832\_Shape*. Zugriff am 05.06.2024 auf <https://open.nrw/dataset/a71583b3-ea2e-4a41-980d-143d0c18b8b9>
- LANUV. (2022). *Metadaten zu Oberflächenwasserkörper NRW (Auflage 3D)*. Zugriff am 13.08.2024 auf <https://www.geoportal.nrw/?activetab=map#/datasets/iso/d0c28148-3c2d-4ea1-aae0-34821f3eba45>
- LANUV. (2023). *Mess- und Monitoring-Programme: Pegel (Wasserstand und Abfluss)*. Zugriff am 20.06.2024 auf <https://www-lanuv-fis.nrw.de/mess-und-monitoringprogramme?>
- LANUV. (2024a). *Gewässertemperatur*. Zugriff am 19.06.2024 auf <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/gewaesserueberwachung/gewaessertemperatur>
- LANUV. (2024b). *Hydrologische Rohdaten (HYGON): OpenHygon-Wassertemperatur-Bestand\_CSV.zip*. Zugriff am 03.06.2024 auf [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/oberflaechengewaesser/hygon/](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/oberflaechengewaesser/hygon/)
- LANUV. (2024c). *Pegeldaten ELWAS*. Zugriff am 22.05.2024 auf <https://www.elwasweb.nrw.de>
- LAWA. (2018). *Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch* (5. Aufl.). Stuttgart: Kulturbuch-Verlag GmbH.
- Lugg, A. & Copeland, C. (2014). Review of cold water pollution in the Murray–Darling Basin and the impacts on fish communities. *Ecological Management & Restoration*, 15 (1), 71–79. doi: 10.1111/emr.12074
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F. & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy*, 68, 1–11. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089
- Lund, R. & Persson, U. (2016). Mapping of potential heat sources for heat pumps for district heating in Denmark. *Energy*, 110, 129–138. doi: 10.1016/j.energy.2015.12.127
- Manz, P., Billerbeck, A., Kök, A., Fallahnejad, M., Fleiter, T., Kranzl, L., ... Eichhammer, W. (2024). Spatial analysis of renewable and excess heat potentials for climate-neutral district heating in Europe. *Renewable Energy*, 224, 120111. doi: 10.1016/j.renene.2024.120111
- Manz, P., Fleiter, T. & Eichhammer, W. (2023). The effect of low-carbon processes on industrial excess heat potentials for district heating in the EU: A GIS-based analysis. *Smart Energy*, 10, 100103. doi: 10.1016/j.segy.2023.100103
- Miró, L., Brückner, S. & Cabeza, L. S. (2015). Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries. *Renewable Energy*, 51, 847–855. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.035
- MULNV & LANUV. (2021). *Bewirtschaftungsplan NRW 2022-2027*. Zugriff



- am 20.06.2024 auf [https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/bewirtschaftungsplan\\_nrw\\_2022-2027.pdf](https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/bewirtschaftungsplan_nrw_2022-2027.pdf)
- MVV Energie AG. (2023). *MVV nimmt erste Flusswärmepumpe in Mannheim in Betrieb*. Zugriff am 16.07.2024 auf <https://www.mvv.de/ueber-uns/unternehmensgruppe/mvv-umwelt/aktuelle-projekte/mvv-flusswaermepumpe>
- Neubaur, M. (2024). *Energie- & Wärmestrategie Nordrhein-Westfalen*. Düsseldorf: Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Ovesen, N. B., Iversen, H. L., Larsen, S. E., Müller-Wohlfeil, D. I., Svendsen, L. M., Blicher, A. S. & Jensen, P. M. (2000). *Afstrømningsforhold i danske vandløb*.
- Pelda, J., Stelter, F. & Holler, S. (2020). Potential of integrating industrial waste heat and solar thermal energy into district heating networks in Germany. *Energy*, 203, 117812. doi: 10.1016/j.energy.2020.117812
- Peta. (2019). *Pan-European Thermal Atlas version 4.3*. Zugriff am 29.04.2024 auf <https://heatroadmap.eu/peta4/>
- Peta. (2022). *Pan-European Thermal Atlas version 5.2*. Zugriff am 29.04.2024 auf <https://www.seenergies.eu/peta5/>
- Peters, M., Steidle, T. & Böhmisch, H. (2020). *Leitfaden Kommunale Wärmeplanung: Handlungsleitfaden*. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Pezzutto, P., Zambotti, S., Croce, S., Zambelli, P., Garegnani, G., Scaramuzzino, C., ... Popovski, E. (2019). *HOTMAPS - D2.3 WP2 Report – Open Data Set for the EU28*. Wien: HotMaps Project.
- Pfnür, A., Winiewska, B., Oschatz, B. & Mailach, B. (o. J.). *Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt: Vergleichende Studie aus energetischer und ökonomischer Sicht*. Darmstadt, Dresden: ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden und Technischen Universität Darmstadt.
- Portmann, M., Galvagno-Erny, D., Lorenz, P., Schacher, D. & Heinrich, R. (2019). *Sonnendach.ch und Sonnenfassade.ch: Berechnung von Potenzialen in Gemeinden*. Bern: e4plus AG im Auftrag von Bundesamt für Energie BFE.
- Python Software Foundation. (2023). *Python (Version 8.9.18)*. Software. Zugriff auf <https://www.python.org/>
- QGIS Development Team. (2023). *QGIS Geographic Information System (Version 3.34.0)*. Software. QGIS Association. Zugriff auf <https://www.qgis.org>
- Quaschnig, V. (2015). *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation; 119 Tab* (9. Aufl.). München: Hanser. doi: 10.3139/9783446443334
- Raptis, C. E., van Vliet, M. T. H. & Pfister, S. (2016). Global thermal pollution of rivers from thermoelectric power plants. *Environmental Research Letters*, 11 (10), 104011. doi: 10.1088/1748-9326/11/10/104011
- Regione Piemonte. (2000). *Modelli digitali del terreno da CTRN 1:10000 (passo 10mt): Modello altezze filtrato*. Torino: Regione Piemonte.
- Ruiz, P. (2019). *ENSPRESO - BIOMASS. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset]*. Zugriff am 07.05.2024 auf <https://data.jrc.ec.europa>



- .eu/dataset/74ed5a04-7d74-4807-9eab-b94774309d9f
- Schild, K. & Willems, W. M. (2022). Vereinfachte Berechnung des Heizenergiebedarfs. In K. Schild & W. M. Willems (Hrsg.), *Wärmeschutz* (S. 257–263). Wiesbaden and Heidelberg: Springer Vieweg. doi: 10.1007/978-3-658-38274-2\_6
- Schwinghammer, F. (2012). *Thermische Nutzung von Oberflächengewässern* (Masterarbeit). Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Freiburg i. Br.
- Siebertz, K., van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017). Sensitivitätsanalyse. In K. Siebertz, D. van Bebber & T. Hochkirchen (Hrsg.), *Statistische Versuchsplanung* (S. 415–430). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-55743-3\_13
- Simon, F. & Mudersbach, C. (2021). Statistische Analyse kombinierter Extremereignisse am Beispiel der Ereigniskombination Starkregen und Flusshochwasser. In Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg.), *Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel* (Bd. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 65, S. 327–336).
- sonnendach.ch. (2015). *opendata.swiss [Dataset]*. Zugriff am 29.04.2024 auf <https://opendata.swiss/de/showcase/sonnendach-ch>
- Statistical Office in Bydgoszcz. (2014). *Statistical Yearbook Kujawsko-Pomorskie*. Bydgoszcz, Poland: Autor.
- Statistical Office in Katowice. (2014). *Statistical Yearbook Śląskie Voivodship*. Katowice, Poland: Autor.
- Stieglitz, R. & Heinzl, V. (2012). *Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Berlin and Heidelberg: Springer Vieweg.
- Umweltbundesamt. (2023). *WW-I-10: Wassertemperatur von Fließgewässern*. Zugriff am 04.09.2024 auf <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/monitoring-zur-das/das-handlungsfelder-indikatoren/wasserhaushalt-wasserwirtschaft-kuesten/ww-i-10-wassertemperatur-von-fliessgewaessern>
- Umweltbundesamt. (2024a). *Energiebedingte Emissionen von Klimagasen und Luftschadstoffen*. Zugriff am 26.03.2024 auf <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#quotenergiebedingte-emissionenquot>
- Umweltbundesamt. (2024b). *Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme*. Zugriff am 04.04.2024 auf <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme>
- Umweltbundesamt. (2024c). *Erneuerbare Energien in Deutschland: Daten zur Entwicklung im Jahr 2023*. Dessau-Roßlau: Autor.
- Umweltbundesamt. (2024d). *Umgebungswärme und Wärmepumpen*. Zugriff am 12.04.2024 auf <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen#umgebungsw%C3%A4rme>
- Umweltbundesamt. (2024e). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien*

- in Deutschland: unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)*. Dessau-Roßlau: Autor.
- van Vliet, M. T., Franssen, W. H., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P. & Kabat, P. (2012). Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change*, 23 (2), 450–464. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002
- Veregin, H. (1999). Data quality parameters. In Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D., J. and Rhind, D. W. (Hrsg.), *Geographical Information Systems Vol. 1* (S. 177–189). Toronto: John Wiley & Sons, Inc.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019). *VDI 4640 Blatt 2: 2019-06-00 Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2021). *VDI 4640 Blatt 1 Entwurf: 2021-12-00 Thermische Nutzung des Untergrunds Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Viessmann. (2024). *Heizperiode: Ab wann muss geheizt werden?* Zugriff am 19.08.2024 auf <https://www.viessmann.de/de/wissen/anleitungen-und-tipps/heizperiode.html>
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. (2024). *Abflussdaten von Pegeln am Rhein*. Anfrage gestellt am 27.08.2024. Daten bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T. & Fischer, J. (2017). *Handbuch Regenerative Energietechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-53073-3
- Weyres-Borchert, B., Kasper, B.-R. & Drück, H. (2015). *Solare Wärme: Technik - Planung - Hausanlage*. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag.
- Wiese, F., Thema, J. & Cordroch, L. (2022). Strategies for climate neutrality. Lessons from a meta-analysis of German energy scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 2, 100015. doi: 10.1016/j.rset.2021.100015
- Wirtz, M. (2023). *Kalte Nahwärme in Deutschland*. Zugriff am 15.04.2024 auf [https://xn--blemliquartier-winti-qec.ch/dl/2023\\_whitepaper-kalte-nahwaerme-in-deutschland.pdf](https://xn--blemliquartier-winti-qec.ch/dl/2023_whitepaper-kalte-nahwaerme-in-deutschland.pdf)
- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages. (2023). *Die Wärmewende in Deutschland. Bedeutung, Ziele und Umsetzbarkeit: Sachstand WD 5 - 3000 - 010/23*. Zugriff auf <https://www.bundestag.de/resource/blob/940166/b842d5428e65f5924a17f2d5d66a8a54/WD-5-010-23-pdf-data.pdf>
- Zogg, M. (2009). *Wärmepumpen: Zertifikatslehrgang ETH in angewandten Erdwissenschaften*. Oberburg: ETHZ Verfahrenstechnik Energietechnik.
- Zyadin, A., Natarajan, K., Latva-Käyrä, P., Igliński, B., Iglińska, A., Trishkin, M., ... Pappinen, A. (2018). Estimation of surplus biomass potential in southern and central Poland using GIS applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 204–215. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.022

# A Anhang

## A.1 Nutzungsbedingungen der Daten

Die verwendeten Zeitreihen des Durchflusses (LANUV, 2024c) wurden über ELWAS-WEB bezogen. Jedweder Verweis (© Land NRW) bezieht sich auf diesen Sachverhalt. Für die Verwendung der Daten innerhalb dieser Arbeit wurde eine Nutzungsanfrage bei dem LANUV gestellt. Bei Weiternutzung der Daten muss Kontakt mit der ELWAS-Geschäftsstelle im LANUV aufgenommen werden.

Die Durchflussmessdaten des Rheins wurden gesondert angefragt und stammen aus der Pegeldatenbank der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Die Daten wurden durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bereitgestellt. Die Temperaturdaten des Rheins wurden gesondert beim LANUV angefragt und sind urheberrechtlich geschützt. Jede vom Urheberrechtsgesetz nicht zugelassene Verwertung bedarf der vorherigen Zustimmung des Herausgebers.

## A.2 Datenqualität

Im Folgenden sind die Qualitätsberichte zu den beschriebenen Ausgangsdaten in Unterabschnitt 3.2.2 dargestellt.

## A Anhang

---

-----  
DATA QUALITY REPORT

Checked stations: \data\archiv\flow\unzipped  
Stations total: 203

-----  
Considered time range: 2005 - 2020  
Measurement series that start after 2005 or end before 2020: 5  
Stations: [2782510000100, 4761500000100, 2764890000100, 2764590000100,  
2789760000100]

Stations will be skipped.

-----  
Data gaps (none values) in considered time range  
Measurement series with at least 30.0 % missing values: 1  
Stations: [2721421000100]

Stations will be skipped.

Category: Missed values (none values) divided into percent  
classes  
Stations before: Number of stations before interpolation and before  
exclusion  
Stations after: Number of stations after interpolation and after  
exclusion

-----  
Category            Stations before            Stations after  
-----  
[0.0, 0.01)            171                        172  
[0.01, 0.05)            15                          14  
[0.05, 0.1)             4                            4  
[0.1, 0.2)              6                            6  
[0.2, 0.3)              1                            1  
[0.3, inf)               1                            0  
-----

-----  
Number of stations considered for aggregation: 197  
Number of missing values in the aggregated data set: 0  
-----

### Abbildung A.1 Datenqualitätsbericht: Vollständigkeit der Durchflussmessreihen.

Betrachtete Daten inklusive Messreihen des Rheins.

-----  
 DATA QUALITY REPORT

Checked stations:  
 \data\archiv\temperature\unzipped\temp\_tagesmittelwerte.txt  
 Stations total: 80

-----  
 Considered time range: 2021 - 2024  
 Measurement series that start after 2021 or end before 2024: 0  
 Stations: []

Stations will be skipped.

-----  
 Data gaps (none values) in considered time range  
 Measurement series with at least 30.0 % missing values: 2  
 Stations: [2766645000100, 2782190000100]

Stations will be skipped.

Category: Missed values (none values) divided into percent  
 classes  
 Stations before: Number of stations before interpolation and before  
 exclusion  
 Stations after: Number of stations after interpolation and after  
 exclusion

Category	Stations before	Stations after
[0.0, 0.01)	14	53
[0.01, 0.05)	61	23
[0.05, 0.1)	2	1
[0.1, 0.2)	0	0
[0.2, 0.3)	1	1
[0.3, inf)	2	0

-----  
 Number of stations considered for aggregation: 78  
 Number of missing values in the aggregated data set: 0  
 -----

**Abbildung A.2** Datenqualitätsbericht: Vollständigkeit der Temperaturmessreihen.

Fehlende Werte vor der Interpolation beziehen sich bereits auf die bereinigten Daten (Ausreißer und Werte außerhalb des Gültigkeitsbereichs zählen zu fehlenden Werten). Betrachtete Daten inklusive Messreihen des Rheins.

## A.3 Übersicht Datensätze

In diesem Abschnitt werden die erzeugten Datensätze beschrieben.

**Tabelle A.1** Stationen (station\_info.csv, discharge\_monitoring\_stations.gpkg, discharge\_monitoring\_stations\_moved.gpkg, temperature\_monitoring\_stations.gpkg und temperature\_monitoring\_stations\_moved.gpkg).

Attribut	Beschreibung
station_ID	Identifikator (ID) der Station
station_name	Name der Station
river_name	Name des Fließgewässers
Y	Nordwert EPSG 25832 ETRS89 / UTM zone 32N
X	Ostwert EPSG 25832 ETRS89 / UTM zone 32N
MQ	Nur bei Pegelstationen Mittlerer Abfluss in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ über den betrachteten Zeitraum

**Tabelle A.2** Durchfluss Werte (flowrates.csv).

Attribut	Beschreibung
station_ID	Identifikator (ID) der Station
Q_1 bis Q_365	Durchfluss $Q$ in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ; Tagesmittelwert

**Tabelle A.3** Temperatur Werte (tempvalues.csv).

Attribut	Beschreibung
station_ID	Identifikator (ID) der Station
T_1 bis T_365	Wassertemperatur $T$ in $^{\circ}\text{C}$ ; Tagesmittelwert

**Tabelle A.4** Fließgewässersegmente (river\_segments.gpkg und river\_segments\_all.gpkg).

Attribut	Beschreibung
segment_ID	Identifikator des Segments (Segment ID)
temp_typ	Temperaturtyp, gleichbedeutend mit der Fischregion
temp_station_ID_1	Identifikator (ID) der ersten Temperaturmessstation
temp_station_ID_2	Identifikator (ID) der zweiten Temperaturmessstation, falls vorhanden
discharge_station_ID	Identifikator (ID) der Durchflussmessstation
protection_area	Boolescher Ausdruck, Lage im Schutzgebiet
river_number	Gewässerkennzahl: Identifikator des Fließgewässers (Deutschland)
river_name	Name des Fließgewässers
river_number_id	Identifikator (ID) Fließgewässer mit Zusatz, falls räumlich getrennt

**Tabelle A.5** Werte der Fließgewässersegmente. (river\_segments\_values.csv).

Attribut	Beschreibung
segment_ID	Identifikator des Segments (Segment ID)
Q_1 bis Q_365	Durchflusstageswerte $Q$ in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ für das Segment (Werte der Station mit dem niedrigeren MQ)
T_1 bis T_365	Temperaturtageswerte $T$ in $^{\circ}\text{C}$ für das Segment (Mittelwerte, wenn zwei Stationen, sonst Wert der verfügbaren Station)

**Tabelle A.6** Theoretische und technische Potenziale. (theoretical\_potential\_J.csv, theoretical\_potential\_kWh.csv, technical\_potential\_J.csv und technical\_potential\_kWh.csv).

Attribut	Beschreibung
segment_ID	Identifikator des Segments (Segment ID)
pot_1_J bis pot_365_J bzw. pot_1_kWh bis pot_365_kWh	Berechnete theoretische bzw. technische Potenziale $E_{\text{pot}}$ für das Segment. J und kWh stehen dabei für die Einheit.

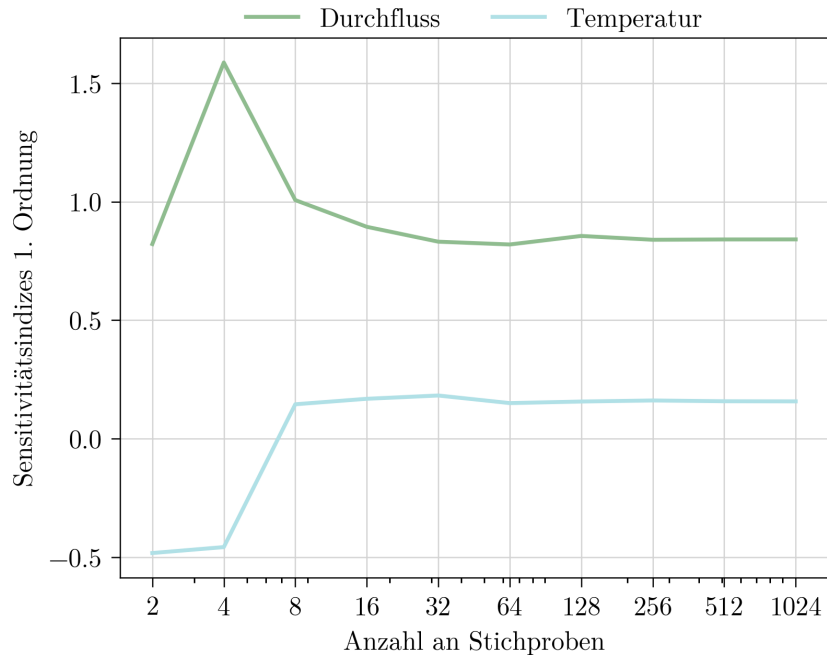


**Tabelle A.7** Parameter, die während der Berechnung des theoretischen bzw. technischen Potenzials angewendet wurden. (theoretical\_potential\_values.csv und technical\_potential\_values.csv).

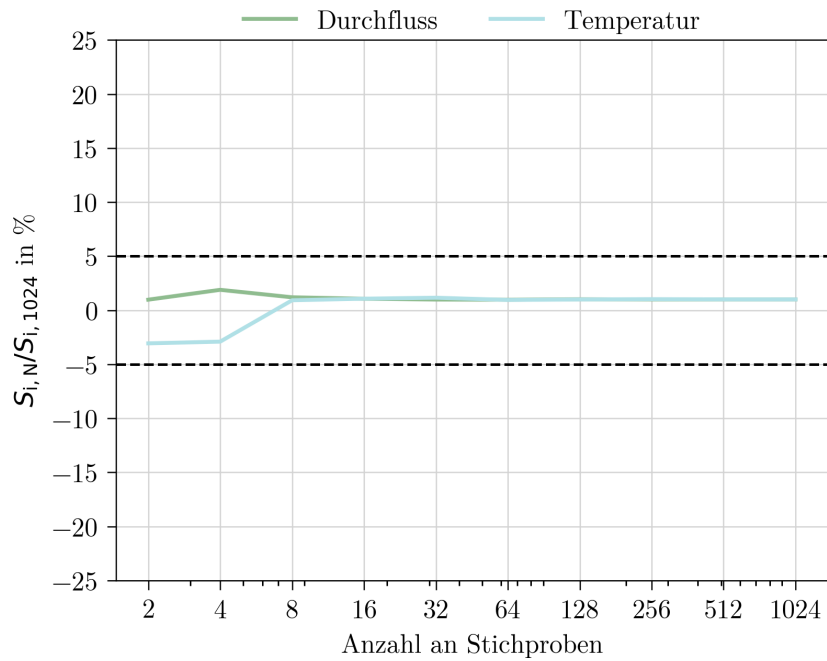
Attribut	Beschreibung
segment_ID	Identifikator des Segments (Segment ID)
c	Spezifische Wärmekapazität $c$ von Wasser in $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
rho	Dichte $\rho$ von Wasser in $\text{kg m}^{-3}$
min_T	Minimale Gewässertemperatur $T$ in $^{\circ}\text{C}$
t	Betrachtungszeitraum $t$ in s
delta_T_1 bis delta_T_365	Tatsächlichen Temperaturspreizung $\Delta T_{\text{tat}}$ in K für jeden Tag des Jahres
used_Q_1 bis used_Q_365	Genutzter Durchfluss $Q_g$ in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ für jeden Tag des Jahres

## A.4 Konvergenz Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden sind die Konvergenzplots der Sensitivitätsanalyse in Bezug auf die Sensitivität 1. Ordnung dargestellt. Dies bezieht sich auf [Unterabschnitt 4.3.1](#).

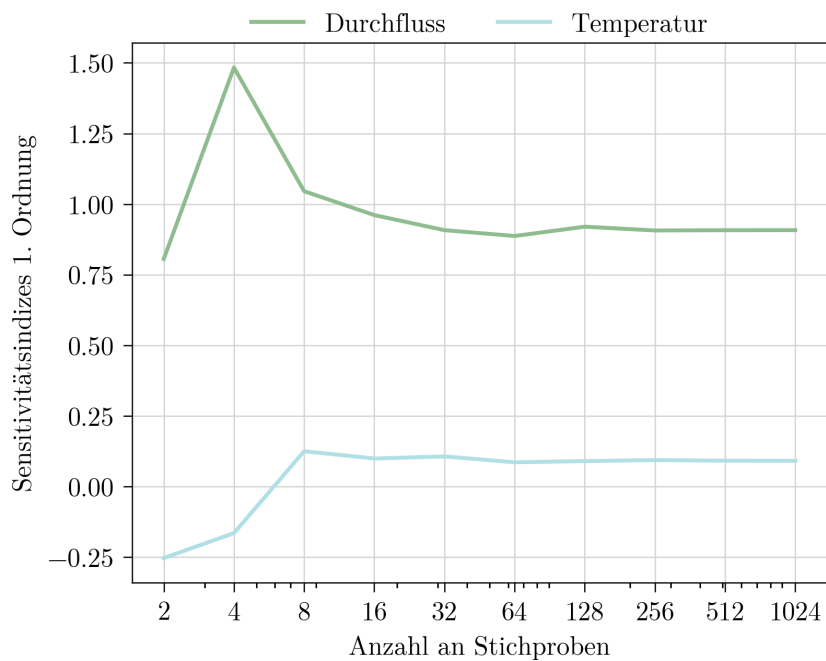


(a) Schätzwerte der Sensitivität 1. Ordnung bei verschiedenen Stichprobengrößen.

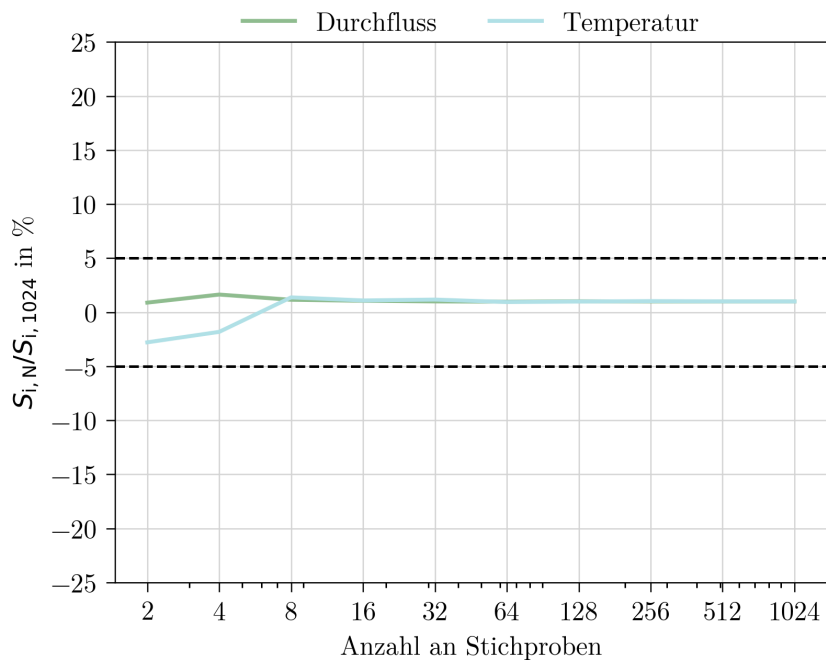


(b) Abweichung der Schätzwerte der Sensitivität 1. Ordnung vom Referenzergebnis.

**Abbildung A.3** Konvergenz der Schätzwerte der Sensitivität 1. Ordnung für das theoretische Potenzial.



(a) Schätzwerte der Sensitivität 1. Ordnung bei verschiedenen Stichprobengrößen.



(b) Abweichung der Schätzwerte der Sensitivität 1. Ordnung vom Referenzergebnis.

**Abbildung A.4** Konvergenz der Schätzwerte der Sensitivität 1. Ordnung für das technische Potenzial.