

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Technische Universität Darmstadt



Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern

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

Bachelorthesis

von

Annika Pflum

aus Kassel (Matrikelnummer 2277682)

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

Tag der Einreichung: 25.09.2017

Darmstadt, im September 2017

Annika Pflum
annika_pflum@web.de
Matrikelnummer: 2277682
Studiengang: B. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Bachelorarbeit zum Thema:
Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern

Korrigierte Fassung vom 12.02.2018
Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

Eingereicht: 25. September 2017

Ansprechperson: Steve Borchardt, M. Sc.

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	iii
Abkürzungsverzeichnis.....	iv
1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen.....	3
2.1. Entwicklung der Wärmepumpe in der Heizungstechnik	3
2.2. Funktionsweise einer Wärmepumpe.....	5
Thermodynamische Grundlagen	5
Wärmepumpenkreislauf.....	6
Systeme zur wärmeenergetischen Nutzung von Fließgewässern.....	10
Einsatzmöglichkeiten	11
2.3. Wärmequelle Oberflächengewässer.....	13
2.4. Wärmehaushalt von Fließgewässern	15
3. Rechtliche Rahmenbedingungen.....	20
3.1. Rechtsordnung.....	20
3.2. Europa.....	21
Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).....	21
Süßwasserrichtlinie	22
3.3. Deutschland.....	24
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	24
Oberflächengewässerverordnung (OGewV).....	26
Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)	28
Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV).....	28
3.4. Bundesländer.....	29
4. Wärmeenergetisches Potential ausgewählter Fließgewässer	32
4.1. Fragestellung	32
4.2. Methodik	32
Untersuchungsgebiet	32
Datenbeschaffung und -verwendung.....	34
Wahl und Vorstellung der Referenzgewässer.....	35

4.3. Ergebnisse.....	36
Jahresganglinie auf Basis der Monatsmittel	36
Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur.....	37
Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Fließgewässers	39
Langjährige Entwicklung der Wassertemperatur.....	40
Begrenzende Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung – Winter	43
Begrenzende Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung – Sommer.....	44
5. Fazit	47
Verzeichnis der Rechtsnormen und Rechtsakte	50
Literaturverzeichnis	51
Datenquellen	53
Wassertemperaturen	53
Lufttemperaturen	55
Einteilung in Gewässertypen nach OGewV	55
Anhang.....	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung I:	Funktionsschema einer Kompressionswärmepumpe (Baumann et al. 2007, S. 12)	8
Abbildung II:	Vergleich Primärenergieverbrauch Wärmepumpe/Brennwertkessel (E.ON Energie AG 2005, S. 13)	9
Abbildung III:	Offenes System (Nova Scotia Environment 2009, S. 5)	10
Abbildung IV:	Geschlossenes System (Nova Scotia Environment 2009, S. 3)	11
Abbildung V:	Hierarchie Wasserrecht (Hähnlein et al. 2011, S. 70)	20
Abbildung VI:	Untersuchungsgebiet (verändert nach Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW))	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle I:	Wärmepumpen in Zürich während des 2. WK, verändert nach H. L. v. Cube; F. Steimle (1984): Wärmepumpen. Grundlagen und Praxis (Baumann et al. 2007, S. 8)	4
Tabelle II:	Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial (Anlage 7, 2.1.1 OGewV), Einteilung nach Fischgemeinschaften	27
Tabelle III:	Mittlere Schwankungen der Tagesmittel der Wassertemperatur	37
Tabelle IV:	Ergebnisse der Untersuchungen der langjährigen Entwicklungen der Wassertemperatur	42
Tabelle V:	Vergleich der höchsten Wassertemperaturen verschiedener Messstationen mit den Grenzwerten der OGewV	45

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
Art.	Artikel
AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (2017)
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BGBL.	Bundesgesetzblatt
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
COP	Coefficient of Performance
Cyp-R	cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
ETA	Elektrowärme im Technischen Ausbau (Zeitschrift)
EP	Gewässer des Epipotamals
ff/tempff	Gewässer sind fischfrei oder temporär fischfrei
HP	Gewässer des Hypopotamals
HT _w	höchste Wassertemperatur eines Zeitraums
LfU	Bayrisches Landesamt für Umwelt
LWaG	Landeswassergesetz
LWG	Landeswassergesetz
m ü. NN	Meter über Normalnull
MHT _w	mittlere Hoch-Wassertemperatur eines Monats, arithmetisches Mittel der Tagesmaxima eines Monats
MNT _w	mittlere Niedrig-Wassertemperatur eines Monats, arithmetisches Mittel der Tagesminima eines Monats
MP	Gewässer des Metapotamals
MT _w	Monatsmittel der Wassertemperatur, arithmetisches Mittel der Tagesmittel eines Monats
NT _w	niedrigste Wassertemperatur eines Zeitraums
OGeWV	Oberflächengewässerverordnung
S.	Satz
Sa-ER	salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals
Sa-HR	salmonidengeprägte Gewässer des Hyporhithrals
Sa-MR	salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WasgefStAnIV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (2010)
WG	Wassergesetz
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

1. Einleitung

Aufgrund der zunehmenden Verknappung fossiler Brennstoffe wird es zukünftig immer wichtiger, Energie aus regenerativen Quellen zu gewinnen. Verbindliche Ziele hierfür werden von der deutschen Bundesregierung im Erneuerbare-Energien-Gesetz festgelegt. Im Jahr 2025 sollen in Deutschland die erneuerbaren Energien 40 bis 45 % der Stromerzeugung übernehmen, im Jahr 2035 55 bis 60 % (§ 1 EEG 2014). Rund 50 % des Endenergieverbrauchs Deutschlands werden derzeit für die Wärmebereitstellung genutzt. Den Großteil des Wärmebedarfs machen dabei die Raumwärme sowie die Warmwasseraufbereitung mit mehr als 35 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus (vgl. AGEB 2015). Deshalb ist es sinnvoll, eine zukunftsfähige Lösung für die Wärmegewinnung zu entwickeln.

Eine Möglichkeit, den Einsatz fossiler Energieträger im Bereich Gebäudetechnik zu verringern, bieten Wärmepumpen und Kältemaschinen. Sie können Umgebungswärme aus vielfältigen Quellen für Heiz- und Kühlzwecke nutzbar machen. Durch einen Wärmetauscher kann der Wärmequelle thermische Energie entzogen und dem Wärmepumpenkreislauf zugeführt werden. Die Wärmepumpe erhöht anschließend die Temperatur der Wärmeenergie auf ein zur Gebäudeheizung nutzbares Niveau. Zum Kühlen von Gebäuden kann dieser Prozess umgekehrt werden.

Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Öl, Gas, Kohle, ...) werden Schadstoffe und Treibhausgase freigesetzt. Diese unterstützen den natürlichen Treibhauseffekt. Die Wärmepumpe produziert in ihrem Prozess keine Abgase, keinen Ruß und kann vielfältige Wärmequellen nutzen, wodurch diese Problem vermieden werden können (vgl. Ochsner 2009, S. 1–3). Im Gegensatz zu den knappen fossilen Ressourcen steht Energie in Form von Umgebungswärme zudem zeitlich und mengenmäßig unbegrenzt zur Verfügung. Als Wärmequellen für Wärmepumpen kann beispielsweise die Umgebungsluft, der Erdboden sowie das Grundwasser dienen. Fließgewässer stellen aufgrund ihrer hohen spezifischen Wärmekapazität eine weitere mögliche Wärmequelle dar.

In dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit sich Fließgewässer zur wärmeenergetischen Nutzung durch Wärmepumpen eignen. Im Grundlagenkapitel werden nach einer kurzen Einführung in die Geschichte der Wärmepumpen das Funktionsprinzip von Wärmepumpen sowie die beiden verschiedenen Ausführungssysteme erläutert. Auch werden hier Oberflächengewässer als Wärmequelle vorgestellt und auf deren Wärmehaushalt eingegangen.

Auf diesem Wissen aufbauend können anschließend Rechtsgrundlagen für die Anwendung dieser beiden Systeme ausgewertet werden. Relevant sind sowohl die europäische Gesetzgebung als auch die deutsche Gesetzgebung auf Bundes- sowie Landesebene. Neben allgemeinen Zielvorgaben für die Bewirtschaftung von Oberflächengewässern finden sich auch konkrete Temperaturgrenzwerte und Vorgaben für Wärmeinleitungen. Wichtig für die Planung einer Wärmepumpenanlage an einem Fließgewässer sind zudem Vorgaben zu Bewilligungs- und Genehmigungspflichten.

Einen weiteren Schwerpunkt setzt diese Arbeit auf die Untersuchung der Wassertemperaturen verschiedener deutscher Gewässer, um ihre Eignung für die wärmeenergetische Nutzung festzustellen. Hierbei werden langjährige Temperaturdaten mit statistischen Methoden ausgewertet, um Tendenzen und Abhängigkeiten verschiedener Parameter zu untersuchen. Anhand von langjährigen Tagesmitteln können typische Jahresverläufe der Temperaturen ermittelt und grafisch dargestellt werden. Die im Grundlagenkapitel vorgestellte Theorie zum Wärmehaushalt von Fließgewässern soll mit beispielhaften Untersuchungen von Referenzgewässern bestätigt werden. Unter anderem wird die Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur analysiert sowie die Veränderungen der Wassertemperaturen im Längsverlauf eines Gewässers charakterisiert. Auch wird untersucht, wie sich die Wassertemperaturen durch die Globale Erwärmung in den vergangenen Jahrzehnten verändert hat und was dies für die wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern bedeutet.

Für das Heizen und Kühlen mit Laufwasser-Wärmepumpen¹ gibt es im Hinblick auf die Wassertemperaturen einige Begrenzungen. Im Winter sollen die Wassertemperaturen möglichst hoch sein, um eine möglichst hohe Heizleistung zu erreichen und die Eisbildung am Wärmetauscher zu vermeiden. Zudem werden hier die Ergebnisse des dritten und vierten Kapitels verknüpft, indem die Grenzwerte der Oberflächengewässerverordnung mit den natürlichen Wassertemperaturen der Sommermonate gegenübergestellt werden. Daraus lassen sich Erkenntnisse über die Möglichkeiten der Wärmeinleitung in ein Gewässer zur Gebäudekühlung im Sommer ableiten.

¹ Den Begriff „Laufwasser-Wärmepumpen“ benutzte Rumpf in seinem Beitrag „Laufwasser-Wärmepumpen; Technik und Wirtschaftlichkeit“ in der Zeitschrift Elektrowärme im Technischen Ausbau (ETA) für Wärmepumpen, die mit Flusswasser als Wärmequelle betrieben werden (vgl. Rumpf 1980). Mit ebendieser Bedeutung wird der Begriff auch in dieser Arbeit verwendet.

2. Grundlagen

2.1. Entwicklung der Wärmepumpe in der Heizungstechnik

Grundlage für die Entwicklung der Wärmepumpe bildete der Entwurf des thermodynamischen Kreisprozesses von Carnot im Jahr 1824. Sein erstes Konzept einer Maschine, die durch Zustandsänderungen eines Arbeitsmittels Wärme in Arbeit umwandelt, wurde 1834 von Perkins umgekehrt und damit der Grundstein für die Kaltdampfmaschine gelegt (vgl. Baumann et al. 2007, S. 7). 1852 stellte Thomson die Grundidee einer Wärmepumpe vor, durch eine Maschine mit Kompressions- und Expansionszylinder in einem thermodynamischen Kreisprozess Wärme auf ein höheres Temperaturniveau zu pumpen und diese zum Heizen und Kühlen von Gebäuden zu nutzen. 1908 wurde die Wärmepumpe erstmals in einem Lehrbuch behandelt (vgl. Cube und Steimle 1984, S. 214).

In der Vergangenheit war die Nachfrage nach Wärmepumpen abhängig von verschiedenen Umständen. Während des 2. Weltkrieges herrschte eine Versorgungsunsicherheit bei konventionellen Energieträgern wie Öl und Kohle, was einen starken Einfluss auf die preisliche Entwicklung dieser Energieträger hatte. In der Schweiz kam es während des 2. Weltkrieges zu einer Energiekrise, was die Entwicklungen der Wärmepumpentechnik und die Verbreitung des Einsatzes von Wärmepumpen stark voranbrachte (vgl. ebd., S. 1–2). Besonders Flusswasser wurde häufig als Wärmequelle genutzt. Die folgende Abbildung zeigt einige Schweizer Einsatzorte, an denen während des Zweiten Weltkrieges Wärmepumpen errichtet wurden. Die Wärmepumpenheizung des Züricher Rathauses ist bis heute in Betrieb (vgl. Kugler 2013, S. 19).

Tabelle I: Wärmepumpen in Zürich während des 2. Weltkriegs, verändert nach H. L. v. Cube; F. Steimle (1984): Wärmepumpen. Grundlagen und Praxis (Baumann et al. 2007, S. 8) ²

Art / Jahr	Heizleistung kW	Leistungs-zahl	Vorlauf-temperatur	Wärme-quelle	Zusatz-heizung	Verwendung
Rathaus 1938	ges. 175 WP 81	2	Wasser 60°C	Fluss-wasser	Elektr. 65 kW auf Speicher	Gebäude-heizung
Kongress-haus /1939	58 Kühlen: 31	2,5	Luft 30–40°C	Luft	keine	Klimati-sierung
Hallenbad 1941	1500	3,5–8	Wasser 23 u. 45°C	Flusswasser Abwasser Trafo-Abwärme	Elektr. 2 000 kW auf Speicher	Gebäude-heizung Wasser-erwärmung
Fernheiz-werk ETH 1942	7 000	3	Wasser 70°C	Fluss-wasser	Heizwerk	Gebäude-heizung
Amtshäuser 1943	1750	4	Wasser 50°C	Fluss-wasser	vorhandene Heizanlage	Gebäude-heizung

Darüber hinaus beeinflusste die weltweite Energiekrise in den siebziger Jahren die Nachfrage nach Wärmepumpen. Auch in Deutschland wurde die Wärmepumpenheizung als eine interessante Alternative in der Heizungstechnik erkannt. Viele Studien und Schriften, die sich mit dem Einsatz von Wärmepumpen zur Gebäudeheizung beschäftigen, stammen daher aus den siebziger und achtziger Jahren. Mit den sinkenden Ölpreisen Anfang der achtziger Jahre sank allerdings auch das Interesse an Wärmepumpen (vgl. Baumann et al. 2007, S. 8–9).

In jüngerer Vergangenheit veränderte sich die Ausrichtung der Energieversorgung in Richtung regenerativer Energieformen, was eine erneute Zunahme des Interesses an Wärmepumpenheizungen zur Folge hatte. Seit der Jahrtausendwende stieg die Nachfrage nach Wärmepumpen stetig an. Mittlerweile hat sich die Wärmepumpe zu einem festen Bestandteil der deutschen Heizungsindustrie entwickelt. 2013 wurden in etwa 25 % der neuen Wohngebäude Wärmepumpen installiert (vgl. Bongs et al. 2013, S. 16).

² Die Leistungszahl ε beschreibt das Verhältnis von nutzbarer Wärmeleistung (\dot{Q}) zu aufgenommener Antriebsleistung (P) einer Wärmepumpe, $\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P}$ (siehe Abschnitt 2.2, Unterabschnitt *Thermodynamische Grundlagen*)

2.2. Funktionsweise einer Wärmepumpe

Thermodynamische Grundlagen

Die Innere Energie U eines Körpers setzt sich zusammen aus dem gesamten Energiegehalt seiner Moleküle und wird in der Einheit Joule (J) angegeben. Die thermische Energie, auch Wärmeenergie genannt, ist ein Teil der Inneren Energie eines Körpers und beschreibt dessen molekularen Bewegungszustand. Die Innere Energie steigt mit zunehmender Temperatur und wird durch Phasenänderungen zusätzlich vergrößert. Bei offenen Systemen, d.h. bei auftretenden Massenbewegungen, besitzt ein Körper zusätzlich zu seiner inneren Energie noch Druckenergie durch die Volumenänderung. Die Summe aus diesen beiden Energieformen nennt man Enthalpie H und wird ebenfalls in J angegeben.

$$H = U + p V \quad (1)$$

Dabei ist p der Druck in N/m^2 und V das Volumen der bewegten Masse in m^3 .

Innere Energie und Enthalpie sind Zustandsgrößen und beide abhängig von der Masse eines Körpers. Kommt es zu einem Energieaustausch des Systems mit der Umgebung treten zwei mögliche Prozessgrößen auf, die beiden Energieformen Arbeit W (J) und Wärme Q (J). Durch diesen Energieaustausch werden die Zustandsgrößen des Systems verändert.

Jedes System oberhalb des absoluten Nullpunktes besitzt Wärmeenergie. Kälte ist keine Energieform, sondern bedeutet, dass die Temperatur eines Systems unterhalb eines Bezugsniveaus liegt. Kältemaschinen erzeugen also keine Kälte, sondern entziehen dem zu kühlenden System Wärme bei niedrigen Temperaturen. Sowohl Wärmepumpen als auch Kältemaschinen nehmen Wärme bei einer niedrigen Temperatur auf und geben sie bei höherer Temperatur wieder ab (vgl. Cube und Steimle 1984, S. 10).

Energie kann man nach zwei Kriterien unterscheiden. Einerseits lässt sich Energie nach der Form ihres Auftretens einteilen in die speicherbaren Energien, wie innere Energie und Enthalpie, und in die systemgrenzüberschreitenden Energien, wie Arbeit und Wärme. Die zweite Einteilung erfolgt nach ihrer Wertigkeit, die sich in der Umwandelbarkeit in andere Energieformen ausdrückt. Elektrische Energie hat eine hohe Wertigkeit, da sie sich beliebig in andere Energieformen, wie mechanische oder thermische Energie umsetzen lässt. Thermische Energie hingegen kann nicht vollständig in elektrische Energie umgewandelt werden. Der Anteil der Energie, der vollständig umwandelbar ist, wird Exergie genannt, der nicht umwandelbare Anteil Anergie.

Cube formuliert den 1. Hauptsatz der Thermodynamik wie folgt: „In einem abgeschlossenen System bleibt die Summe aus Exergie und Anergie konstant.“ (Cube und Steimle 1984, S. 12) Aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik folgert er anschließend: „Bei irreversiblen Prozessen eines abgeschlossenen Systems wird Exergie in Anergie umgewandelt. Bei reversiblen Prozessen bleibt die Exergie konstant. Anergie kann nicht in Exergie umgewandelt werden.“ (ebd.)

Der Anteil von Exergie und Anergie in einem System kann sich also ändern. Dabei kann Exergie problemlos in Wärme auf dem Niveau der Umgebungstemperatur umgewandelt werden. Wärme auf dem Niveau der Umgebungstemperatur ist jedoch Anergie und kann daher keine Exergie erzeugen. Der Anteil von Exergie und Anergie wird deutlich vom Temperaturniveau des Prozesses beeinflusst. Je weiter die Temperatur eines Systems die Umgebungstemperatur überschreitet, desto größer ist der Anteil an Exergie und desto geringer ist der Anteil an Anergie der übertragenen Wärme (vgl. ebd., S. 12–13).

Um eine Wärmemenge entgegen dem natürlichen Temperaturgefälle zu transportieren, ist eine Zufuhr von höherwertiger Energie mit einem hohen Exergieanteil notwendig, wie z.B. von elektrischer oder mechanischer Energie. In einem geschlossenen System ist eine Zunahme von Exergie nicht möglich. Jedoch ist nur durch Zunahme von Exergie ein Wärmetransport entgegen dem natürlichem Gefälle möglich (vgl. ebd., S. 16).

Wärmepumpenkreislauf

Das Prinzip einer Wärmepumpe ist vergleichbar mit dem eines Kühlschranks (vgl. Baumann et al. 2007, S. 9). Ein Kühlschrank entzieht den Lebensmitteln Wärme, die er an der Rückseite des Gerätes an die Umwelt abgibt. Der Kühlschrank ist damit eine Kältemaschine. Bei der Wärmepumpe wird statt der Kälte die Wärme genutzt. Die Wärmepumpe entzieht der Umwelt Wärmeenergie, die dem Heizsystem zugeführt wird.

Der Wärmepumpenkreislauf arbeitet mithilfe von Änderungen des Aggregatzustands und der Druckverhältnisse eines im Kreislauf befindlichen Kältemittels. Dieses Kältemittel ist als Arbeitsmittel der Wärmepumpe für die Wärmeübertragung von der Wärmequelle auf den Heizkreislauf verantwortlich.

Im Wärmepumpenkreislauf (siehe Abbildung I) befindet sich ein flüssiges Kältemittel mit einem sehr geringen Siedepunkt. In der ersten Station des Kältemittelkreislaufs, dem Ver-

dampfer (2), herrscht ein geringer Druck und das Kältemittel hat eine sehr geringe Temperatur. Die Umgebungstemperatur des Verdampfers ist höher als die Siedetemperatur des Kältemittels. Dadurch verdampft das Kältemittel und entzieht der Wärmequelle die nötige Verdampfungswärme. Dieser Wärmeübergang kann direkt geschehen. Häufig wird jedoch ein Primärkreislauf vorgeschaltet, indem beispielsweise Sole zirkuliert und die Wärme von der Wärmequelle auf das Kältemittel überträgt (siehe Unterabschnitt *Systeme zur wärmeenergetischen Nutzung von Fließgewässern*).

Anschließend saugt der Kompressor (1) den Arbeitsmitteldampf an und verdichtet ihn. Durch die Verdichtung steigt der Druck des Kältemittels stark an, was eine große Temperaturerhöhung zur Folge hat. Für seine Arbeit braucht der Kompressor höherwertige Antriebsenergie mit einem hohen Exergiegehalt, die dem System von außen zugeführt wird (siehe Unterabschnitt *Thermodynamische Grundlagen*). Diese kann durch einen Elektro- oder einen Verbrennungsmotor bereitgestellt werden.

Im nachfolgenden Verflüssiger (3), auch Kondensator oder Kondensator genannt, wird der Kältemitteldampf am Sekundärkreislauf, dem Wärmeträgerkreislauf der Heizungsanlage, vorbeigeführt. Da die Temperatur des Heizwassers geringer ist als die Verflüssigungstemperatur des Kältemittels, kondensiert dieses und geht wieder in den flüssigen Zustand über. Die freiwerdende Energie wird vom Heizwasserstrom aufgenommen und steht zum Beheizen des Gebäudes zur Verfügung.

Im letzten Schritt des Wärmepumpenkreislaufs wird das Kältemittel über ein Expansionsventil (4) entspannt und wieder zum Verdampfer geführt. Die Entspannung auf einen niedrigeren Druck sorgt für eine weitere Temperaturabnahme des Kältemittels, so dass dieses im Verdampfer erneut Umgebungswärme aufnehmen kann. (vgl. Baumann et al. 2007, S. 11)

Wärmepumpen sind neben dem Heizen auch für den Einsatz zum Kühlen von Gebäuden geeignet. Hierbei dient die vorhandene Wärme im zu kühlenden Gebäude als Wärmequelle und die Umwelt als Wärmesenke. Der Verflüssiger wird damit zum Verdampfer und der Verdampfer übernimmt die Rolle des Verflüssigers.

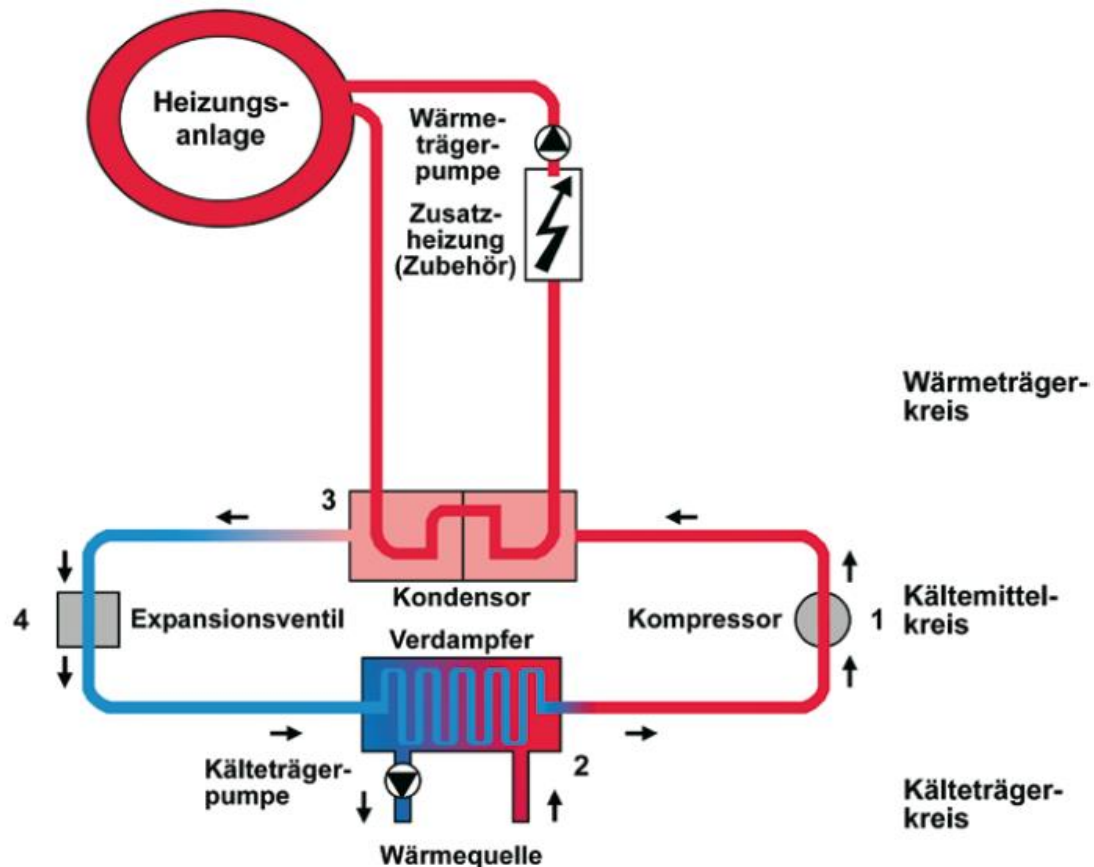


Abbildung I: Funktionsschema einer Kompressionswärmepumpe (Baumann et al. 2007, S. 12)

Um Wärme von einem Medium auf ein anderes Medium zu übertragen, werden Wärmetauscher verwendet. Die Wärmetauscher im Kältemittelkreislauf einer Wärmepumpe sind der Verdampfer und der Verflüssiger. Im Verdampfer wird Wärme von der Wärmequelle auf das Kältemittel übertragen, welches dadurch verdampft. Im Verflüssiger wird dem Kältemitteldampf Wärme entzogen und an den Heizkreislauf abgegeben. Wärmetauscher bestehen aus Materialien, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit haben und Wärme gut auf andere Materialien übertragen können. Häufig werden Metalle verwendet, die z.B. in Form von geschichteten Platten oder gewickelten Rohren ausgeführt werden.

Wie oben beschrieben muss dem System am Verdichter Energie von außen zugeführt werden. Das Verhältnis von nutzbarer Wärmeleistung (\dot{Q}) zu aufgenommener Antriebsleistung (P) wird durch die die Leistungszahl ε (Epsilon), englisch COP (Coefficient of Performance) ausgedrückt.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P} \quad (2)$$

Die Leistungszahl einer Wärmepumpe hängt primär von der Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und der Heizungsanlage ab. Je geringer dieser Temperaturunterschied ist, desto größer ist die Leistungszahl der Wärmepumpe (vgl. Baumann et al. 2007, S. 12–13). Somit ist mit geringeren Vorlauftemperaturen der Heizungsanlage ein effektiverer Betrieb der Wärmepumpe möglich. Der Anteil der Energiemenge, die Wärmepumpen in Form von Wärme aus der Umwelt entnehmen, ist je nach Wärmequelle und Heizsystem zwei- bis fünfmal so groß wie die zugeführte Antriebsleistung. Dadurch erreichen Wärmepumpen sehr hohe Leistungszahlen.

Außerdem setzen Wärmepumpen die benötigte Antriebsenergie rationeller ein als konventionelle Heizsysteme. Für je 100 % Heizwärme wird nach Untersuchungen der E.ON Energie AG vom Brennwertkessel 120 % Primärenergie gebraucht, von der Wärmepumpe nur 74 % (siehe Abbildung II) (vgl. ebd., S. 9).

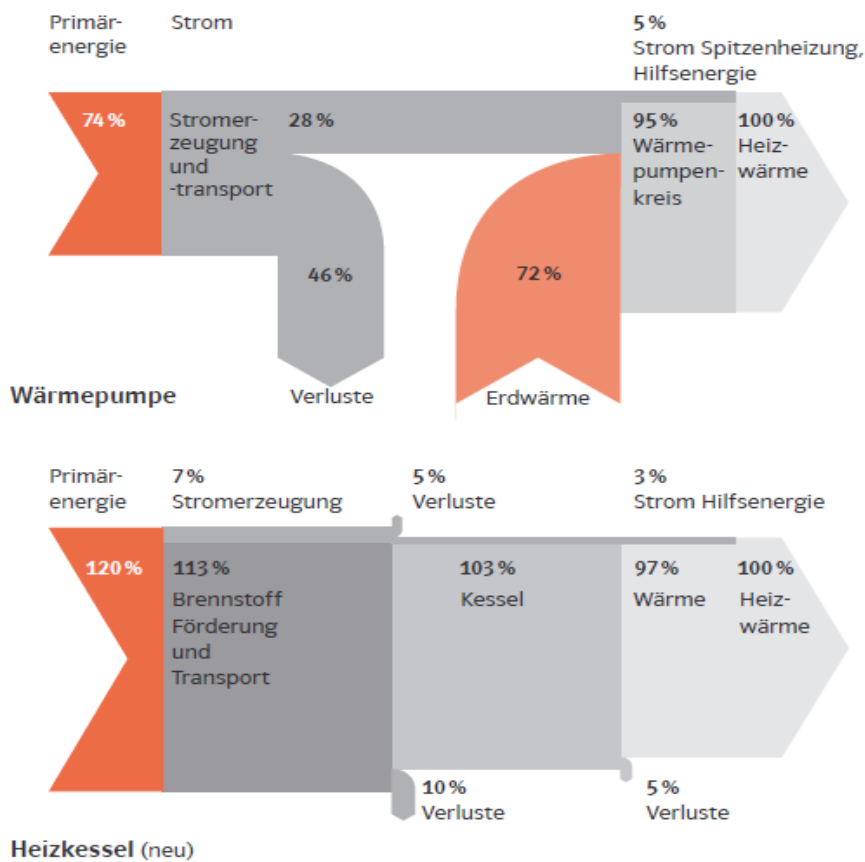


Abbildung II: Vergleich Primärenergieverbrauch Wärmepumpe/Brennwertkessel (E.ON Energie AG 2005, S. 13)

Systeme zur wärmeenergetischen Nutzung von Fließgewässern

Grundsätzlich unterscheidet man zwei verschiedene Systeme zur wärmeenergetischen Nutzung von Gewässern durch Wärmepumpenanlagen: das offene System und das geschlossene System. Diese werden im Folgenden vorgestellt und in den Untersuchungen dieser Arbeit aufgegriffen. Auf die verschiedenen existierenden Ausführungsarten der beiden Systeme wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da die inhaltlichen Schwerpunkte der Arbeit auf die Vorstellung der rechtlichen Rahmenbedingungen und die Analyse der Wassertemperaturdaten gelegt wurden.

In einem offenen System (siehe Abbildung III) wird Wasser aus dem Fließgewässer entnommen (*Screened intake*) und direkt am Verdampfer der Wärmepumpe vorbeigeleitet. Am Verdampfer wird Wärme vom Wasser auf das Kältemittel übertragen, welches dadurch verdampft. Anschließend wird das Wasser dem Gewässer wieder zugeführt (*Discharge*). Durch die Wasserentnahme handelt es sich hierbei um eine Benutzung nach § 9 des Wasserhaushaltsgesetzes, die erlaubnispflichtig ist (siehe Kapitel 3, Unterabschnitt 3.3).

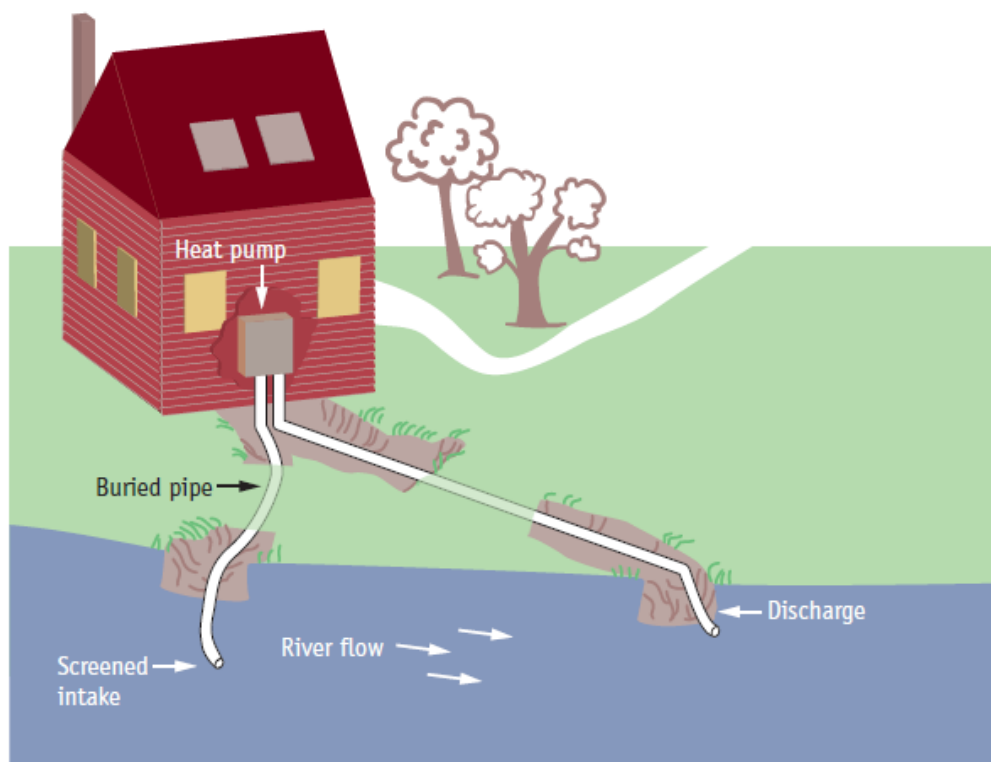


Abbildung III: Offenes System (Nova Scotia Environment 2009, S. 5)

Bei einem geschlossenen System (siehe Abbildung IV) wird zwischen der Wärmepumpe und dem Oberflächenwasser ein zusätzlicher Wärmetauscher zwischengeschaltet. Dieser Wärmetauscher ist direkt in das Oberflächengewässer eingebaut und überträgt die Wärme vom Wasser auf das in dem Zwischenkreislauf zirkulierende Wärmeträgermedium, z.B. eine Wasser-Glykol-Mischung. Dieses Medium strömt anschließend am Verdampfer der Wärmepumpe vorbei und überträgt Wärme auf das Kältemittel des Wärmepumpenkreislaufs. Es ist zu prüfen, ob der Einbau eines Wärmetauschers in ein Fließgewässer auch als Benutzungstatbestand nach § 9 des Wasserhaushaltsgesetzes angesehen wird. Hierauf wird in Abschnitt 3.3 näher eingegangen.

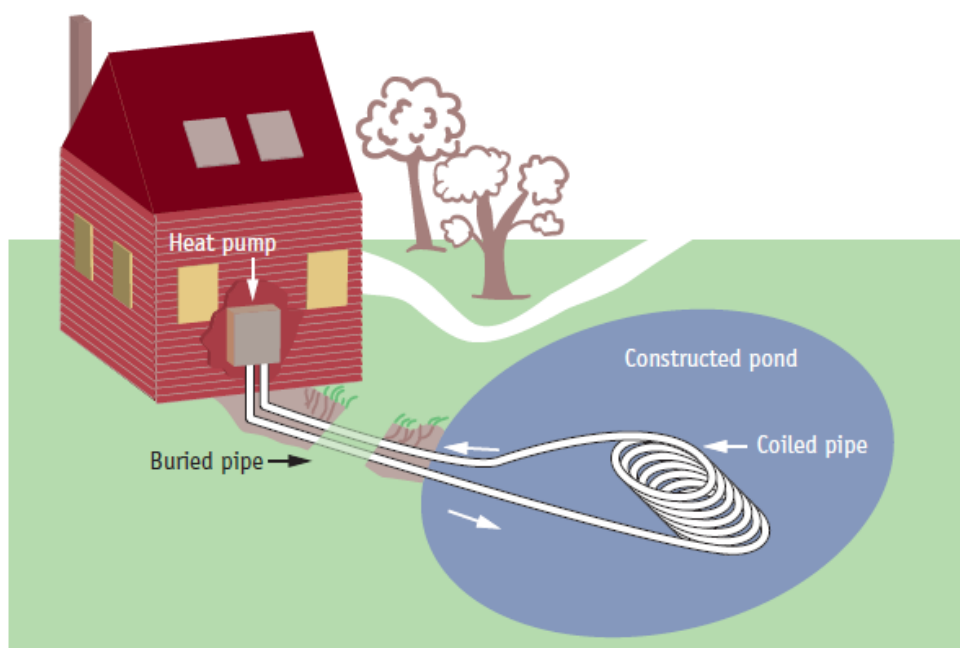


Abbildung IV: Geschlossenes System (Nova Scotia Environment 2009, S. 3)

Einsatzmöglichkeiten

Wärmepumpen sind gleichzeitig für Heizzwecke und für Kühlzwecke einsetzbar. Auch ein zeitlich versetzter Einsatz zum Heizen bzw. Kühlen ist möglich. In der Gebäudeklimatechnik bietet eine zeitliche Versetzung der Einsatzart die Möglichkeit, das Gebäude im Winter zu beheizen und im Sommer zu kühlen.

Dies ist möglich, indem der Kältemittelkreislauf so geändert wird, dass der Wärmetauscher, der im Winter als Verdampfer arbeitet und Wärme aus der Wärmequelle aufnimmt, im Sommer die Funktion des Verflüssigers übernimmt und Wärme an dieses abgibt. Auf der anderen Seite arbeitet der Wärmetauscher, der im Winter Wärme vom Kältemittel an den

Heizungskreislauf abgibt, im Sommer als Verdampfer und entzieht den zu kühlenden Räumen Wärme.

Gleichzeitige Wärme- und Kältenutzung zur selben Zeit ist z.B. bei landwirtschaftlichen Betrieben möglich, die Wärme für die Warmwasserbereitung für Waschmaschinen und Reinigung brauchen und Kälte für die Kühlung von Milch und anderen Erzeugnissen in den Lagerräumen. Auch in Kühlhäusern, die einen Wärmebedarf für die Raum- und evtl. Hallenheizung und einen Kältebedarf für die Kühlräume haben, ist eine kombinierte Nutzung denkbar (vgl. Cube und Steimle 1984, S. 4).

Mit Wärmepumpen kann auch Abwärme nutzbar gemacht werden. Beispielsweise kann in Hotels oder Krankenhäusern die Abwärme aus dem Abwasser für die Warmwasseraufbereitung oder als Waschwasser genutzt werden. In landwirtschaftlichen Betrieben ist es möglich, die Ställe oder Obstlager als Wärmequelle zu nutzen und die Wärme für die Heizung und die Warmwasseraufbereitung zu verwerten (vgl. ebd., S. 6).

In Industrie und Gewerbe oder in Großbauten, wie Bürogebäude, Hotels und Wohnsiedlungen, können Wärmepumpen mit großer Leistung eingesetzt werden. Der Einsatz von Wärmepumpen ist durch die Einsparungen von Energie- und Betriebskosten wirtschaftlich vorteilhaft. Für Großanlagen sind vielfältige Quellen geeignet, z.B. Oberflächengewässer (vgl. Ochsner 2009, S. 129–132).

Wärmepumpen können auf verschiedene Arten betrieben werden. Bei einem *monovalenten* Einsatz gibt es außer der Wärmepumpe kein anderes Heizsystem. Dies ist nur möglich, wenn die Wärmepumpe so ausgelegt ist, dass sie auch bei niedrigen Außentemperaturen den gesamten Wärmebedarf decken kann. Alternativ gibt es bei der *bivalenten* Betriebsweise, auch Hybrid-Heizung genannt, neben der Wärmepumpe ein zusätzliches zweites Heizsystem, z.B. einen Ölheizkessel. Dies ermöglicht eine energetisch günstige Auslegung der beiden Heizanlagen. Den bivalenten Betrieb untergliedert man in *bivalent-parallele* und *bivalent-alternative* Systeme. *Bivalent-parallele* werden Systeme genannt, bei denen zusätzlich zur Wärmepumpe das zweite Heizsystem eingeschaltet wird, sobald eine definierte Außentemperatur (Bivalenzpunkt) unterschritten wird. Die beiden Heizsysteme arbeiten in diesen Spitzenzeiten parallel. In einem *bivalent-alternativen* System schaltet sich die Wärmepumpenanlage aus, wenn die Außentemperatur unter die festgelegte Grenze fällt. In diesen Zeiten arbeitet dann ausschließlich das zusätzliche Heizsystem (vgl. Baumann et al. 2007, S. 57-59)

2.3. Wärmequelle Oberflächengewässer

Wärmepumpen können die in der Umwelt gespeicherte Sonnenenergie sowie die Erdwärme nutzbar machen. So kann im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen Primärenergie eingespart werden (siehe Abschnitt 2.2, Unterabschnitt *Wärmepumpenkreislauf*). Natürliche Wärmequellen sind z.B. Luft, Erdreich, Sonnen- und Globalstrahlung, Grundwasser und Oberflächenwasser. Grundwasser und Erdreich werden von der Erdwärme mit thermischer Energie versorgt. Die Temperaturen sind daher in ausreichender Tiefe über das Jahr relativ konstant. Die anderen genannten Wärmequellen stellen Wärme in Form von gespeicherter Sonnenstrahlung zur Verfügung und unterliegen alle jahreszeitlichen Schwankungen. Die mittlere Wärmequellentemperatur und somit die Wärmekapazität der Wärmequelle ist von der mittleren Jahrestemperatur abhängig (vgl. Cube und Steimle 1984, S. 57). Immer mehr nehmen auch "künstliche" Wärmequellen an Bedeutung zu, deren Energie aus Abwärme besteht und deren relativ hohe Wärmequellentemperatur für die Nutzung mittels Wärmepumpe vorteilhaft ist.

Die Anforderungen an eine Wärmequelle sind beispielsweise die ausreichende Verfügbarkeit, eine möglichst hohe Wärmespeicherfähigkeit und eine kostengünstige Erschließung. Ein möglichst hohes Temperaturniveau der Wärmequelle und damit eine möglichst geringe Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmenutzungsanlage bestimmt maßgeblich die Leistungszahl und damit auch die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpenheizungsanlage (vgl. Baumann et al. 2007, S. 32). Außerdem sollte das wärmetransportierende Medium der Wärmequelle die Wärmetauscher möglichst wenig physikalisch oder chemisch angreifen oder beeinflussen wie z.B. durch Korrosion, Verschmutzung oder Vereisung (vgl. Cube und Steimle 1984, S. 54–56).

Aufgrund seiner hohen Wärmekapazität und seiner guten Wärmeübertragungseigenschaften ist Wasser laut Cube (1984) als beste Wärmequelle für Wärmepumpen einzustufen. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Oberflächengewässern, insbesondere Flüssen, als Wärmequelle, da deren zeitliche Wasserverfügbarkeit nahezu unbegrenzt ist. Schon zwischen 1938 und 1945 wurden in der Schweiz viele Wärmepumpen mit Flusswasser als Wärmequelle betrieben (siehe Abschnitt 2.1). Das bekannteste Beispiel ist das Züricher Rathaus, das mit einer Wärmepumpenheizung beheizt wird, die als Wärmequelle das Wasser des Flusses Limnat nutzt. Im Jahr 1975 ergaben Untersuchungen des Flusses Erft auf einem 30 km langen Abschnitt des Unterlaufs, dass deren Wärmepotential ausreichen

würde, um ein angrenzendes Gebiet mit 5 km Breite mit Wärme zu versorgen (vgl. Frühling und Klein 1975).

Die Einsatzfähigkeit von Fließgewässern zur wärmeenergetischen Nutzung kann jedoch durch verschiedene Faktoren beschränkt werden. Die Wassertemperatur von Flüssen und Bächen ist von der Lufttemperatur abhängig und unterliegt somit jahreszeitlichen Schwankungen. Im Winter, wenn die Außentemperaturen sehr gering sind, bedeutet dies eine sinkende Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe. Zudem besteht die Gefahr des Einfrierens des Gewässers, was negative Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit des Wärmetauschers haben kann. Um Defizite in kalten Monaten auszugleichen, ist eine Zusatzheizung notwendig (bivalentes System, siehe Unterabschnitt *Einsatzmöglichkeiten*) (vgl. Cube und Steimle 1984, S. 54–56). Auch der Durchfluss von Fließgewässern schwankt. So ist es bei kleineren Flüssen möglich, dass sie in sehr trockenen Perioden trockenfallen und die unbegrenzte zeitliche Verfügbarkeit nicht mehr gegeben ist. Die örtliche Verfügbarkeit von Oberflächenwasser ist ebenso begrenzt. Beim Einsatz eines Wärmetauschers in Fließgewässern besteht die Gefahr der Korrosion, die durch die Materialwahl weitestgehend begrenzt werden sollte. Zudem muss beachtet werden, dass Ablagerungen und Algenbildung die Wärmeübertragung am Wärmetauscher beeinträchtigen kann und somit die Effizienz der Wärmepumpenanlage gemindert werden kann (vgl. ebd., S. 72–76).

Zu beachten ist, dass die Nutzung von Gewässern rechtlichen Bestimmungen unterliegt und für die Entnahme von Wasser sowie das Einbringen von baulichen Anlagen in Gewässer eine behördliche Genehmigung einzuholen ist. Auch müssen Vorkehrungen getroffen werden, damit bei Undichtheiten kein Kältemittel aus dem Kreislauf ins Wasser gelangt (siehe Kapitel 3, Abschnitt 3.3).

2.4. Wärmehaushalt von Fließgewässern

Fließgewässer transportieren sowohl thermische als auch mechanische Energie. Die Größe der inneren Energie eines Gewässers hängt von vielen Parametern ab. Die Wärmehaushaltsgleichung für ein Gewässer lautet wie folgt (vgl. Maniak 2010, S. 423):

$$P = \rho \cdot c \cdot Q \cdot \Delta T \quad (3)$$

ρ : Dichte des Flusswassers, $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

c : spezifische Wärmekapazität von Wasser, $c = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

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

ΔT : Temperaturänderung in K

P : Wärmebilanz in $\frac{\text{MJ}}{\text{s}} = \text{MW}$; gleicht den über die Oberfläche ausgetauschten Wärmeströmen infolge von Strahlung, Verdunstung und Konvektion

Die Menge der transportierten Wärme eines Gewässers hängt von den variablen Größen Wassertemperatur T und Durchfluss Q des Gewässers ab. Je höher die Wassertemperatur und je größer der Durchfluss ist, desto mehr thermische Energie besitzt das Fließgewässer. Diese Arbeit legt den Schwerpunkt auf die Untersuchung der Wassertemperatur und ihrer Einflussfaktoren.

Die Wassertemperatur eines Gewässers ist örtlich und zeitlich veränderlich. Eine örtliche Variabilität findet einerseits längs entlang des Gewässerlaufs statt. Nahe der Quelle ist das Wasser vergleichsweise kühl. Während seines Fließweges nimmt das Wasser zunehmend Wärme aus der Umgebung auf, sodass die Wassertemperaturen entlang des Fließweges ansteigen. Diese Aussage wird anhand verschiedener Referenzgewässer in Kapitel 4 untersucht und bestätigt. Andererseits ist die Temperatur auch innerhalb eines Gewässerquerschnitts nicht konstant. An der Oberfläche haben beispielsweise die Verdunstung und die Lufttemperatur einen Einfluss, an den Ufern und der Sohle spielt der Wärmeaustausch mit dem Erdreich eine Rolle. Zusätzlich kann ein Wärmeeintrag bzw. -entzug durch Versickerung, den Zufluss von Grundwasser oder durch Niederschläge auf das Gewässer erfolgen. Innerhalb eines Gewässers spielen biologische Abbauprozesse sowie Turbulenzen eine große Rolle und auch durch Gefrieren oder Schmelzen von Eis wird der Wärmehaushalt verändert. Dazu kommen verschiedene anthropogene Einflüsse, die den Wasserhaushalt ebenfalls beeinflussen, wie z.B. die Einleitung von Kühlwasser (vgl. ebd., S. 422-424).

Die zeitliche Variabilität der Wassertemperatur ist durch die starke Abhängigkeit von der Lufttemperatur bedingt. So unterliegt auch sie jahreszeitlichen Schwankungen, ist jedoch im Jahresmittel in der Regel höher als die Lufttemperatur. In seinem Lehrbuch *Hydrologie und Wasserwirtschaft* gibt Maniak (ebd., S. 433-434) mittlere Werte zur Beschreibung des Verlaufs und der Schwankungen der Wassertemperatur von Fließgewässern an. Maniak geht in seinen Ausführungen von einer mittleren jährlichen Wassertemperatur von 10 °C aus. Die Amplitude der Monatsmittel beträgt etwa 16 bis 20 K (Kelvin³). Dabei treten die niedrigsten Temperaturen im Januar und Februar, die höchsten Temperaturen im Juli und August auf. Auch weist die Wassertemperatur tägliche Schwankungen auf. An aufeinanderfolgenden Tagen können die Temperaturen des Flusswassers um bis zu 3 K differieren. Die angegebenen Werte von Maniak werden in Kapitel 4 mit den Ergebnissen der Untersuchungen dieser Arbeit verglichen.

Unter Einbezug aller relevanten Einflussfaktoren lässt sich eine allgemeine Wärmehaushaltsgleichung für ein Gewässer auch wie folgt formulieren. Auf die Bedeutung der einzelnen Bilanzglieder wird anschließend genauer eingegangen.

$$H_T = R_S - R_{Sr} + R_G - R_{Gr} - R_A - H_V - H_K - H_Z \quad \text{in W/m}^2 \quad (4)$$

- R_S : kurzwellige Globalstrahlung,
- R_{Sr} : reflektierte Globalstrahlung,
- R_G : einfallende langwellige Strahlung der Atmosphäre,
- R_{Gr} : reflektierte langwellige Strahlung,
- R_A : langwellige Ausstrahlung des Wasserkörpers,
- H_V : latenter Wärmestrom,
- H_K : konvektiver Wärmestrom,
- H_Z : advektiver Wärmestrom (durch ober- und unterirdische Zu- bzw. Abflüsse, z.B. Niederschläge auf das Gewässer),
- H_T : Zunahme der Wärmeenergie des Wasserkörpers.

Der Wärmeaustausch zwischen dem Flusswasser und dem Gewässerbett findet sehr langsam statt. Auch der Wärmeeintrag, der dem Gewässer durch Niederschlag zugeführt wird, ist nur sehr gering und wird daher in der Wärmebilanz nach Maniak vernachlässigt (vgl. ebd., S. 424).

³ Die übliche Einheit für die Angabe von Temperaturdifferenzen ist Kelvin. Dabei entspricht eine Temperaturdifferenz von 1 K der Temperaturdifferenz von 1 °C.

Die vereinfachte Wärmehaushaltgleichung beschreibt daher nur den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre:

$$H_T = R_{SB} - H_V - H_K \quad \text{in W/m}^2 \quad (5)$$

Mit der Strahlungsbilanz $R_{SB} = R_S - R_{Sr} + R_G - R_{Gr} - R_A$

Für alle Strahlungs-, Verdunstungs- und Konvektionsprozesse ist die Temperatur der oberflächennahen Wasserschicht von Bedeutung. Bei einem Fluss ist die Temperatur durch dessen Turbulenz relativ gut durchmischt und es ist laut Maniak (ebd., S. 427) ausreichend, mit der allgemeinen gemessenen Wassertemperatur zu rechnen. Diese wird meist an Messstationen im Uferbereich des Flusses gemessen.

Die kurzwellige Globalstrahlung R_S setzt sich zusammen aus direkter Sonnenstrahlung und diffuser Himmelsstrahlung. Die Globalstrahlung unterliegt großen täglichen sowie jahreszeitlichen Schwankungen, was den Tagesgang und den Jahresgang der Wassertemperaturen beeinflusst. So ist die Globalstrahlung im Juni acht- bis neunmal so groß wie im Dezember (Maniak 2010, S. 428). Die Gesamtglobalstrahlung wird durch Reflexion R_{Sr} noch leicht vermindert, sodass der thermisch wirksame Anteil etwa 85% beträgt (vgl. ebd.).

Die langwellige Strahlung setzt sich einerseits aus der aufwärts gerichteten Ausstrahlung der Wasseroberfläche R_A und andererseits der auf die Wasseroberfläche einwirkenden Eigenstrahlung der Atmosphäre R_G zusammen. Auch die atmosphärische Eigenstrahlung wird teilweise reflektiert (R_{Gr}). Die Bilanz dieser beiden Strahlungsterme ergibt sehr kleine Werte, da die beiden Komponenten ähnlich groß und entgegengerichtet sind (vgl. ebd., S. 428–429).

Zwei Verlustgrößen für die Wärmebilanz sind der konvektive Wärmestrom H_K und der latente Wärmestrom H_V . Der latente Wärmestrom tritt bei einer Phasenänderung des Wassers infolge von Verdunstung auf. Dabei wird dem Gewässer Verdampfungswärme entzogen und in Form von Wasserdampf in die Atmosphäre transportiert. Die Größe des latenten Wärmestroms ist von der Wassertemperatur an der Oberfläche des Gewässers abhängig. Der konvektive Wärmestrom, auch turbulenter Wärmestrom genannt, ist ein direkter Wärmeaustausch zwischen der Oberfläche des Fließgewässers und der Luft durch Konvektion. Dieser Anteil ist allerdings im Vergleich zum latenten Wärmestrom sehr klein. Insgesamt leisten die beiden oben beschriebenen Wärmeströme jedoch nur einen geringen Beitrag zu der Wärmebilanz eines Flusses (vgl. ebd., S. 430).

Fließgewässer werden häufig auch zum Einleiten von Abwärme aus Wärmekraftwerken und aus der Industrie genutzt, was einen zusätzlichen Einfluss auf die Wärmebilanz hat. Dadurch sind die Werte der Wassertemperaturen laut Maniak (ebd.) in den letzten Jahrzehnten an vielen Orten angestiegen. Um Abwärme in ein Gewässer einleiten zu können, ist ein Temperaturgefälle nötig. Die Wärme wird mittels Kühlwassers in das Fließgewässer eingeleitet, welches sich ungleichmäßig verteilt. Das wärmere Kühlwasser hat eine geringere Dichte und breitet sich somit in den oberen Schichten des Gewässers aus. Es können mehrere Kilometer lange Warmwasserfahnen entstehen, die eine Temperaturdifferenz von 1 °C zum restlichen Wasser aufweisen können. Umgekehrt können so beim Wärmeentzug aus dem Gewässer auch Kaltwasserfahnen entstehen (vgl. Kobus und Söll 1987). Die Durchmischung hängt auch vom Durchfluss des Gewässers ab. Je größer der Durchfluss ist, desto schneller verteilt sich das eingeleitete Kühlwasser (vgl. Maniak 2010, S. 435–436).

Die Gleichgewichtstemperatur T_G eines Flusses ist die Temperatur, die sich nach vollständiger Durchmischung nach einer Wärmeeinleitung einstellt, wenn keine Wärme mit der Luft ausgetauscht wird. Die Wassertemperatur eines Flusses strebt immer Richtung Gleichgewichtstemperatur. Die Gleichgewichtstemperatur ist bei konstanten meteorologischen Verhältnissen konstant.

Die folgende Gleichung beschreibt den zeitlichen Verlauf eines Abkühlvorgangs.

$$T_w = T_G + (T_0 - T_G) \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_A}\right)} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

Mit der Abkühlzeit $t_A = h \cdot \rho \cdot \frac{c}{A}$ in s

T_w : Wassertemperatur in °C

T_0 : Starttemperatur an der Einleitungsstelle in °C

T_G : Gleichgewichtstemperatur in °C

h : Wassertiefe des Fließgewässers in m

ρ : Dichte des Flusswassers, $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

c : spezifische Wärmekapazität von Wasser, $c = 4190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

A : totaler Austausch- oder Wärmeabgabekoeffizient, Wärmeaustauschrate in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$

Diese Gleichung beschreibt den Abkühlvorgang als exponentiell fallende Funktion der Temperatur. Sie wird verwendet, um den eindimensionalen Temperaturverlauf im Längsverlauf eines Gewässers unterhalb einer Wärmeeinleitungsstelle zu beschreiben. Die Temperatur nähert sich exponentiell einer neuen Gleichgewichtstemperatur an. Je größer A ist, desto schneller nähert sie sich an. Um die Gleichung anwenden zu können, müssen T_G und A bekannt sein (vgl. ebd., S. 440–444).

Da die Gleichgewichtstemperatur T_G nur als fiktiver Wert zu berechnen ist und in der Regel erheblich von der tatsächlichen Wassertemperatur abweicht, eignet es sich besser, als Bezugstemperatur T_B die Temperatur oberhalb der Wärmeeinleitungsstelle zu verwenden (vgl. ebd., S. 440–444).

Damit wird Gleichung (6) umgeformt zu:

$$T_w = T_B + (T_0 - T_B) \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_A}\right)} \quad \text{in } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

Auch der Einsatz von Wärmepumpen beeinflusst die Gewässertemperatur. Das Einleiten von Wärme im Sommer zur Gebäudekühlung ist ähnlich der Wärmeeinleitung durch Industriekühlwasser einzustufen. Der biologische Zustand und die physikalisch-chemische Beschaffenheit der Fließgewässer sind von der Wassertemperatur abhängig. Mit steigenden Temperaturen steigt die biologische Aktivität und Abbauprozesse werden beschleunigt. Dies mindert unter anderem den Sauerstoffgehalt des Wassers (Schönborn 1992, S117-120). Die verschiedenen Fisch- und Pflanzenarten haben sich an bestimmte Temperaturbereiche angepasst. Ändert sich die Wassertemperatur langfristig, kann dies zu Veränderungen des Ökosystems und seiner Tier- und Pflanzengemeinschaften führen (ebd., S. 283-284). Um die Gewässer vor nachteiligen Veränderungen durch zu starke Temperaturerhöhung zu schützen, sind behördlich vorgeschriebene Grenzwerte einzuhalten (siehe Kapitel 3 *Rechtliche Rahmenbedingungen*). Die Einhaltung der Grenzwerte muss bei der Einleitung von Wärme in ein Gewässer sichergestellt werden.

Das Wärmeaufnahmevermögen H_Q eines Gewässers kann durch die folgende Gleichung bestimmt werden.

$$H_Q = \rho \cdot c \cdot Q \cdot \Delta T_{\max} \approx 4,2 \cdot Q \cdot \Delta T_{\max} \quad (8)$$

H_Q : Wärmeaufnahmevermögen in W

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

ΔT_{\max} : maximale Aufwärmspanne in K

Das Wärmeaufnahmevermögen ist somit abhängig von dem Durchfluss Q und der maximalen Aufwärmspanne ΔT_{\max} , für die es festgelegte Grenzwerte gibt (siehe Kapitel 3) (vgl. Maniak 2010, S. 438).

3. Rechtliche Rahmenbedingungen

3.1. Rechtsordnung

Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) schafft einen gemeinsamen Ordnungsrahmen für die Wasserpolitik der europäischen Mitgliedstaaten. Die Ziele der WRRL müssen in der nationalen Gesetzgebung jedes einzelnen Staates umgesetzt werden. In Deutschland findet dies im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) statt, welches jedoch auch nur ein Rahmengesetz ist. Die praktische Umsetzung und Konkretisierung der Ziele erfolgt durch das Wassergesetz jedes Bundeslandes. Diese Hierarchie ist in der folgenden Grafik veranschaulicht.

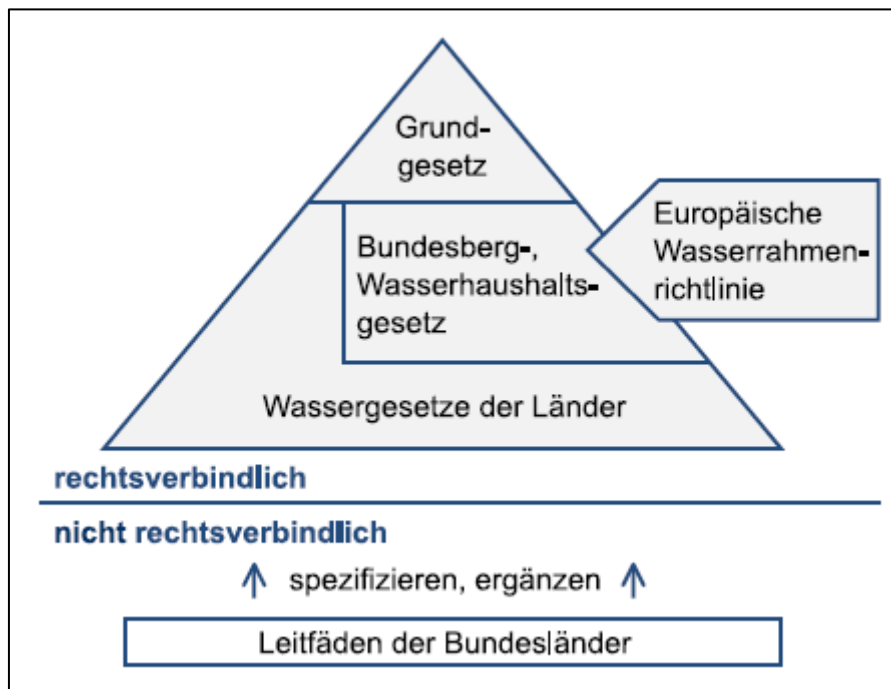


Abbildung V: Hierarchie Wasserrecht (Hähnlein et al. 2011, S. 70)

Zusätzlich zu den oben genannten gibt es noch einige andere europäische und nationale Gesetze, Verordnungen und Richtlinien, die für die Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern von Bedeutung sind und in diesem Kapitel ebenfalls untersucht werden.

Im Folgenden werden zunächst die Wasserrahmenrichtlinie als rechtliche Grundlage für die Wasserpolitik auf europäischer Ebene sowie die Süßwasserrichtlinie vorgestellt, welche erste Temperaturgrenzwerte für verschiedene Gewässertypen festlegt. Anschließend wird

die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie im Wasserhaushaltsgesetz untersucht. Besondere Bedeutung kommt der Oberflächengewässerverordnung zu, die konkrete Temperaturgrenzwerte für verschiedene Gewässertypen, eingeteilt nach heimischen Fischgemeinschaften, festlegt. Weitere für die Heizung und Kühlung mit Wärmepumpenanlagen relevante Absätze aus dem Bundesimmissionsschutzgesetz und der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen werden vorgestellt. Abschließend wird in den Wassergesetzen der Bundesländer untersucht, inwieweit die Regelungen von WRRL und WHG spezifiziert und ergänzt werden.

Der Fokus der Ausführungen wird dabei in jeder der vorgestellten Rechtsvorschriften auf Abschnitte gelegt, die einerseits für den Einsatz von Wärmetauschern in Fließgewässern im geschlossenen System, andererseits für die Wasserausleitung im offenen System sowie für die Temperaturänderung durch Wärmeeinleitung bzw. Wärmeentzug von Bedeutung sind.

3.2. Europa

Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)

Die "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", kurz Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), ist am 22.12.2000 in Kraft getreten. Sie bündelt verschiedene europäische Regelungen und schafft somit einen gemeinsamen europäischen Rahmen für den Gewässerschutz und die Gewässerbewirtschaftung. Die Bestimmungen der WRRL müssen von den EU-Mitgliedsstaaten jeweils in nationales Recht umgesetzt werden, in Deutschland geschieht dies im Rahmen des WHG (siehe Abschnitt 3.3).

Der Zweck der Richtlinie wird gleich zu Anfang formuliert. „Wasser ist keine übliche Handelsware, sondern ein ererbtes Gut, das geschützt, verteidigt und entsprechend behandelt werden muss.“. Dies soll durch die Verwirklichung verschiedener festgelegter Ziele ermöglicht werden.

Die Verschmutzung von Gewässern soll reduziert werden, indem Einleitungen, Emissionen und Verluste von potentiell schädlichen Stoffen verringert werden (Art. 1 WRRL). Als Verschmutzung wird jede Freisetzung von Stoffen oder Wärme in ein Gewässer verstanden,

welche durch menschliche Tätigkeiten verursacht wird und zu einer Minderung der Wasserqualität und Schädigung der aquatischen Ökosysteme führen kann (Art. 2 WRRL). Somit ist auch die Einleitung von Wärme bei der Gebäudekühlung mittels einer Wärmepumpe betroffen.

Ein zentrales Thema der WRRL ist der Zustand der Gewässer, welcher vor einer Verschlechterung bewahrt werden soll und wenn möglich durch Maßnahmen verbessert werden soll. Anhand verschiedener Qualitätsparameter wird der ökologische und der chemische Zustand und bei künstlichen oder erheblich veränderten Gewässern das ökologische Potential und der mengenmäßige Zustand bewertet. Ziel ist die Erreichung eines guten Gewässerzustands bzw. -potentials für jedes Einzugsgebiet (Art. 4 Abs. 1 WRRL).

Zu den Qualitätskomponenten für die Einstufung des ökologischen Zustands von Flüssen gehören unter anderem die von der wärmeenergetischen Nutzung von Gewässern beeinflussten Temperaturverhältnisse. Bei einem guten Zustand gehen „[d]ie Werte für die Temperatur, den Sauerstoffhaushalt, den pH-Wert [sic!], das Säureneutralisierungsvermögen und den Salzgehalt [...] nicht über den Bereich hinaus [sic!] innerhalb dessen die Funktionsfähigkeit des typspezifischen Ökosystems und die Einhaltung der oben beschriebenen Werte für die biologischen Qualitätskomponenten gewährleistet sind.“ (Anhang V 1.2.1 WRRL) Ein sehr guter Zustand weist bei den genannten Parametern keine Anzeichen anthropogener Störungen vor. Das Gewässer verhält sich wie bei Abwesenheit störender Einflüsse. Als mäßig ist der Zustand eines Gewässers einzustufen, wenn diese Parameter deutlichere Veränderungen aufweisen, jedoch die biologischen Qualitätskomponenten erreicht werden können.

Die Mitgliedstaaten verpflichten sich, Programme zur Überwachung des Zustands der Gewässer aufzustellen und durchzuführen. Die Überwachungsfrequenz des Wärmehaushalts von Flüssen ist im Anhang V auf 3 Monate festgelegt (Anhang V 1.3.4 WRRL). Konkrete Temperaturgrenzwerte für Gewässer sind in der WRRL jedoch nicht formuliert. Hierbei hilft eine weitere europäische Richtlinie, die Süßwasserrichtlinie, weiter.

Süßwasserrichtlinie

Die „Richtlinie 2006/44/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten“, kurz Süßwasserrichtlinie oder Fischgewässerqualitätsrichtlinie, ist 2006 in Kraft getreten und löst damit die Richtlinie 78/659/EWG aus dem Jahre

1978 ab. Die Richtlinie ist durch Gültigkeitsbeschränkungen aus der WRRL am 22.12.2013 außer Kraft getreten, enthielt jedoch konkrete Regelungen über die Temperatur von Fließgewässern. Deshalb soll sie hier dennoch kurz vorgestellt werden.

Die Süßwasserrichtlinie dient dem Schutz von fließendem oder stehendem Süßwasser, indem durch die Festlegung von Grenzwerten verschiedener Parameter die Wasserqualität verbessert werden soll und das Leben verschiedener Fischarten erhalten wird.

Einer der Qualitätsparameter ist die Wassertemperatur. "Die unterhalb einer Abwärmeeinleitungsstelle (und zwar an der Grenze der Mischungszone) gemessene Temperatur darf die Werte für die nichtbeeinträchtigte Temperatur nicht um mehr als [folgenden Wert] überschreiten." (Anhang 1, Parameter *Temperatur*, Süßwasserrichtlinie) In Salmonidengewässern⁴ beträgt die maximal zulässige Temperaturerhöhung 1,5 K, in Cyprinidengewässern⁵ 3 K. Außerdem darf die Wärmeeinleitung nicht dazu führen, dass eine Maximaltemperatur von 21,5 °C in Salmonidengewässern und 28 °C in Cyprinidengewässern überschritten wird. Jedoch können die Mitgliedstaaten unter bestimmten Bedingungen Ausnahmeregelungen für bestimmte Gebiete beschließen, sofern sich daraus „keine nachteiligen Folgen für die ausgewogene Entwicklung des Fischbestands ergeben.“ (Anhang 1, Parameter *Temperatur*, Süßwasserrichtlinie) In der Laichzeit der Salmoniden, die zur Fortpflanzung kaltes Wasser benötigen, gilt in Gewässern, die sich für diese Arten eignen, eine Temperaturobergrenze von 10 °C. Die Temperaturgrenzwerte dürfen nur in 2 % der Fälle überschritten werden. Zu Überwachung der Einhaltung der Grenzwerte müssen wöchentlich Temperaturmessungen durchgeführt werden, sowohl oberhalb als auch unterhalb der Wärmeeinleitungsstelle.

Da diese Richtlinie nicht mehr in Kraft ist, kommt der deutschen Oberflächengewässerverordnung noch mehr Bedeutung zu, die ebenfalls definierte Temperaturgrenzwerte für Oberflächengewässer nach heimischen Fischgemeinschaften festlegt. Die Ausführungen der Oberflächengewässerverordnung sind dabei zudem spezifischer (siehe Abschnitt 3.3).

⁴ Salmonidengewässer sind Gewässer, „[...] in denen das Leben von Fischen solcher Art wie Lachse (*Salmo salar*), Forellen (*Salmo trutta*), Aeschen (*Thymallus thymallus*) und Renken (*Coregonus*) erhalten wird oder erhalten werden könnte“ (Art. 1 Abs. 4 Süßwasserrichtlinie)

⁵ Cyprinidengewässer sind alle Gewässer, „[...] in denen das Leben von Fischarten wie Cypriniden (*Cyprinidae*) oder anderen Arten wie Hechten (*Esox lucius*), Barschen (*Perca fluviatilis*) und Aalen (*Anguilla anguilla*) erhalten wird oder erhalten werden könnte“ (Art. 1 Abs. 4 Süßwasserrichtlinie)

3.3. Deutschland

Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Die Vorgaben der WRRL werden im Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (kurz Wasserhaushaltsgesetz, WHG) in deutsches Recht umgesetzt. Die aktuelle Neufassung wurde am 31.07.2009 verabschiedet. Das Ziel des Wasserhaushaltsgesetzes ist es, „durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen.“ (§ 1 WHG) Natürliche oder naturnahe Gewässer sollen in diesem Zustand bleiben, nicht naturnah ausgebaute Gewässer sollen wieder in einen möglichst naturnahen Zustand gebracht werden (§ 5 Abs. 2 WHG).

Jede Benutzung eines Gewässers bedarf einer wasserrechtlichen Erlaubnis (§ 8 WHG). Als Wassernutzung werden alle Handlungen verstanden, die Auswirkungen auf den Zustand eines Gewässers haben, „die im Hinblick auf die Bewirtschaftungsziele [...] signifikant sind.“ (§ 3 WHG) Die verschiedenen Benutzungstatbestände werden in § 9 WHG aufgeführt. Bei einer Wärmepumpenanlage, die in einem offenen System betrieben wird, ist § 9 Abs. 1 S. 1 des WHG relevant, nachdem „das Entnehmen und Ableiten von Wasser aus oberirdischen Gewässern [...]“ eine Benutzung darstellt. Auch muss untersucht werden, ob in einem geschlossenen System das Einbringen eines Wärmetauschers in ein oberirdisches Gewässer als ein „[...] Einbringen und Einleiten von Stoffen in Gewässer [...]“ (§ 9 Abs. 1 S. 4 WHG) verstanden wird. Das Einleiten und das Entnehmen von Wärme könnten als Maßnahmen gelten, „[...] die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen [...]“ (§ 9 Abs. 2 WHG) und wären somit ebenfalls erlaubnispflichtig. Dabei wäre zu untersuchen, wie erheblich die Auswirkungen der Temperaturänderungen sind.

Bei jeder Benutzung muss die erforderliche Sorgfalt angewendet werden, um eine nachteilige Veränderung der Gewässereigenschaften zu vermeiden und die Leistungsfähigkeit des Wasserhaushalts zu erhalten (§ 5 WHG). Wenn durch eine Nutzung schädliche oder nicht vermeidbare bzw. nicht ausgleichbare Veränderungen am Gewässer vorgenommen werden, darf keine Erlaubnis erteilt werden (§ 8 WHG). Das Aufstauen, Entnehmen und Ableiten von Wasser ist zudem nur zulässig, wenn eine bestimmte Mindestwasserführung gewährleistet wird, um die ökologische Funktion zu erhalten (§ 33 WHG).

Die durch das WHG definierten Bewirtschaftungsziele für oberirdische Gewässer legen fest, dass diese so zu bewirtschaften sind, „dass 1. eine Verschlechterung ihres ökologischen und ihres chemischen Zustands vermieden wird und 2. ein guter ökologischer und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden.“ (§ 27 WHG) Diese Ziele sollten bis zum 22. Dezember 2015 erreicht werden. Unter bestimmten Umständen konnte die Frist verlängert werden oder für bestimmte Gewässer weniger strenge Bewirtschaftungsziele festgelegt werden (§§ 27-30 WHG). Nach Angaben des Umweltbundesamtes (2016) wurden 2015 nur etwa 7 % der deutschen Fließgewässer in einen guten oder sehr guten Zustand bzw. ökologisches Potential eingestuft. Die kommenden Bewirtschaftungszyklen müssen also genutzt werden, um eine Erreichung der Ziele weiter voran zu bringen (vgl. Umweltbundesamt 2016).

Um die Bewirtschaftungsziele zu erreichen, ist für jede Flussgebietsgemeinschaft ein Maßnahmenprogramm aufzustellen. Grundlegende Maßnahmen sind in Art. 11 Abs. 3 der WRRL formuliert (§ 82 WHG). In diesem Zuge ist auch ein Bewirtschaftungsplan für jede Flussgebietseinheit zu erstellen, aus dem z.B. der Zustand des Gewässers ersichtlich wird und die Belastungen und verschiedenen Bewirtschaftungsmaßnahmen lokalisiert werden (§ 83 WHG).

Alle baulichen Anlagen in, an, über und unter oberirdischen Gewässern wie Gebäude, Brücken und Stege sind so errichten und betreiben, dass keine schädlichen Veränderungen für das Gewässer zu erwarten sind (§ 36 WHG). Bei einer geplanten Einbringung von Wärmetauschern in oberirdische Gewässer ist zu untersuchen, ob dies als Anlage nach § 36 des WHG eingestuft wird und die Regelungen für diese zu beachten sind.

Der Abschnitt 3 des WHG beinhaltet Regelungen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Anlagen, die wassergefährdende Stoffe nutzen sind so zu betreiben, dass keine nachteiligen Veränderungen der Gewässereigenschaften entstehen (§ 62 WHG). Wer Stoffe in ein Gewässer einleitet oder dieses anderweitig nachteilig beeinflusst, muss für den entstandenen Schaden haften (§ 89 WHG). Die von Wärmepumpenanlagen verwendeten Arbeitsmittel sind in der Regel als wassergefährdende Stoffe einzustufen, für die diese Paragraphen somit Anwendung finden. Weitere Regelungen finden sich in der *Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)* (siehe gleichnamigen Unterabschnitt).

Oberflächengewässerverordnung (OGewV)

Bei allen wasserrechtlichen Zulassungsverfahren für Vorhaben, die Einflüsse auf verschiedene Qualitätskomponenten und somit auf den Zustand von Gewässern haben, ist die Oberflächengewässerverordnung zurate zu ziehen. Sie liefert Grenzwerte für die Einstufung des Zustands der Gewässer und für die Überwachung der Qualitätskomponenten.

Die aktuelle Fassung der Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (kurz Oberflächengewässerverordnung, OGewV) wurde am 20.06.2016 erlassen. Ihr Ziel ist der „Schutz der Oberflächengewässer und eine wirtschaftliche Analyse der Nutzungen ihres Wassers“ (§ 1 OGewV). Dazu ist unter anderem festgelegt, dass die zuständige Behörde eine Bestandsaufnahme der Emissionen, Einleitungen und Verluste aller prioritären Stoffe⁶ und anderer Schadstoffe erstellt.

Zentrales Thema ist auch hier die Einstufung des ökologischen und des chemischen Zustands sowie des ökologischen Potentials nach festgelegten Qualitätskomponenten. Eines der physikalisch-chemischen Qualitätskriterien ist die Wassertemperatur, welche regelmäßig überwacht werden muss. Die Ergebnisse der Überwachungen muss die zuständige Behörde in regelmäßigen Abständen dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit übermitteln (§§ 10-11 OGewV).

Ein sehr guter Zustand wird in der Oberflächengewässerverordnung wie folgt definiert: „Salzgehalt, pH-Wert, Säureneutralisierungsvermögen und Temperatur zeigen keine Anzeichen anthropogener Störungen und bleiben in dem Bereich, der normalerweise bei Vorliegen der Referenzbedingungen festzustellen ist.“ Bei einem guten Zustand werden Veränderungen geduldet, allerdings dürfen „[d]ie Werte für die Temperatur, die Sauerstoffbilanz, den pH-Wert, das Säureneutralisierungsvermögen und den Salzgehalt [...] nicht über den Bereich hinaus[gehen], innerhalb dessen die Funktionsfähigkeit des typspezifischen Ökosystems und die Einhaltung der oben beschriebenen Werte für die biologischen Qualitätskomponenten gewährleistet sind.“ (Anlage 4, Tabelle 2 OGewV)

In Anlage 7 werden Anforderungen an den jeweiligen Zustand in Form von konkreten Grenzwerten für die verschiedenen Qualitätskomponenten formuliert. Die Anforderungen an die Wassertemperatur werden an die jeweiligen Gewässertypen mit den heimischen

⁶ Prioritäre Stoffe sind Stoffe, die ein erhebliches Gefährdungspotential für die aquatische Umwelt darstellen. Eine Liste dieser Stoffe wurde von der Europäischen Kommission erstellt und zusätzlich wurden Konzentrationsgrenzwerte für Oberflächengewässer festgelegt. (Art. 16 WRRL)

Fischgemeinschaften angepasst. Die OGewV legt absolute Höchsttemperaturen für den Sommer und den Winter fest und zudem maximal zulässige Temperaturerhöhungen durch Wärmeeinleitungen.

Die Anforderungen an einen guten ökologischen Zustand und ein gutes ökologisches Potential lauten wie folgt:

Tabelle II: Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial (Anlage 7, 2.1.1 OGewV), Einteilung nach Fischgemeinschaften⁷. Die Werte für die Temperaturerhöhung bezeichnen die maximal zulässige Differenz zwischen den Temperaturen oberhalb und unterhalb der Einleitungsstelle für Abwärme.

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

Die verschiedenen Qualitätskomponenten der Gewässer müssen regelmäßig überwacht werden. Aus der Tabelle "Überwachungsfrequenzen und Überwachungsintervalle" in Anlage 10 lässt sich entnehmen, dass die Wärmebedingungen von Flüssen 4- bis 13-mal pro Jahr untersucht werden müssen. Die Zeitpunkte sind so zu wählen, dass sich jahreszeitliche Schwankungen möglichst wenig auf die Ergebnisse auswirken (Anlage 10 Abs. 4 OGewV).

⁷ ff/tempff: Gewässer sind fischfrei oder temporär fischfrei
 Sa-ER: salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals, Oberläufe kleinerer Fließgewässer; Fische: vorwiegend Bachforelle
 Sa-MR: salmonidengeprägte Gewässer des Metarhithrals, Mittellauf kleinerer Fließgewässer; Fische: Bachforelle und Mühlkoppe dominierend
 Sa-HR: salmonidengeprägte Gewässer des Hyporhithrals, Unterlauf kleinerer Fließgewässer; Fische: Äsche prägend
 Cyp-R: cyprinidengeprägte Gewässer des Rhithrals; Fische: vorwiegend Schmerle und Elritze
 EP: Gewässer des Epipotamals, Oberlauf mittlerer bis größerer Gewässer; Fische: Barbe, Nase, Döbel
 MP: Gewässer des Metapotamals, Mittellauf mittlerer bis größerer Gewässer; Fische: Aal, Barsch, Brachse
 HP: Gewässer des Hypopotamals, größere Gewässer und Ströme im Unterlauf; Fische: Aal, Barsch, Brachse, Durchzugsroute für Wanderfische wie Lachs und Meerforelle
 (LAWA-AO 2007, S. 9)

Die Temperaturgrenzwerte der OGewV sind vor allem bei der Kühlung mittels Wärmepumpen relevant. Beim Einleiten von Wärme in das Gewässer muss darauf geachtet werden, dass die Temperaturerhöhung nicht zur Überschreitung der festgelegten Temperaturobergrenzen führt.

Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)

Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen, die schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen können, sind nach BImSchG genehmigungspflichtig. Diese Anlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen vermieden oder möglichst geringgehalten werden (§§ 4-5 BImSchG).

Wärmepumpenanlagen werden im Anhang der *Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen)* nicht als genehmigungsbedürftige Anlage aufgeführt. Das Erfordernis einer wasserrechtlichen Genehmigung wird damit jedoch nicht aufgehoben.

Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)

Die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, kurz AwSV, wurde am 18.04.2017 verabschiedet und löst als Neufassung die WasgefStAnIV aus dem Jahr 2010 ab. Die AwSV „[...] dient dem Schutz der Gewässer vor nachteiligen Veränderungen ihrer Eigenschaften durch Freisetzungen von wassergefährdenden Stoffen aus Anlagen zum Umgang mit diesen Stoffen.“ (§ 1 AwSV)

Anlagen, die mit wassergefährdenden Stoffen umgehen, müssen so errichtet werden, dass keine wassergefährdenden Stoffe austreten können. "Anlagen müssen dicht, standsicher und gegenüber den zu erwartenden mechanischen, thermischen und chemischen Einflüssen hinreichend widerstandsfähig sein." (§ 17 Abs. 2 AwSV) Falls doch Stoffe austreten, muss dies schnell erkannt und zurückgehalten werden.

Betreiber von Anlagen müssen die Stoffe bzw. Gemische, die verwendet werden, in Wassergefährdungsklassen einstufen (§ 8 Abs. 3 AwSV), sofern deren Einstufung nicht schon von öffentlichen Stellen durchgeführt und veröffentlicht wurde. Die Methodik und die Maßgaben für die Einstufung sind in Anlage 1 der AwSV aufgeführt. Außerdem müssen Anlagenbetreiber die Anlage einer Gefährdungsstufe zuordnen, die von Volumen und Gefährdungsklasse des verwendeten wassergefährdenden Stoffes abhängt (§ 39 Abs. 3 AwSV).

Generell müssen alle Anlagen austretende wassergefährdende Stoffe durch Rückhalteeinrichtungen zurückhalten. Heizungs- und Kälteanlagen im Freien, die mit wassergefährdenden Stoffen umgehen, sind von der Rückhaltepflicht befreit, wenn „[...] sie durch selbsttätige Überwachungs- und Sicherheitseinrichtungen so gesichert sind, dass im Fall einer Leckage die Umwälzpumpe sofort abgeschaltet und ein Alarm ausgelöst wird [...]“ und sie als Wärmeträgermedium ausschließlich nicht wassergefährdende Stoffe oder „[...] Gemische der Wassergefährdungsklasse 1, deren Hauptbestandteile Ethylen- oder Propylenglycol sind [...]“ verwenden. Außerdem müssen die Kühlaggregate auf befestigten Flächen stehen (§ 35 Abs. 3 AwSV).

In der weiteren Zone von Schutzgebieten sowie in Überschwemmungsgebieten gelten besondere Einschränkungen und es dürfen Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen nur unter bestimmten Voraussetzungen errichtet und betrieben werden.

3.4. Bundesländer

Die Wassergesetze der Bundesländer dienen dazu, die Regelungen des WHG weiter auszuführen und umzusetzen. In den Landeswassergesetzen werden unter anderem die deutschen Gewässer den Gewässerordnungen zugeordnet. Auch sind die Flussgebietsgemeinschaften und Eigentumsverhältnisse festgelegt.

In allen Landeswassergesetzen wird noch einmal betont, dass die Errichtung und der Betrieb von Anlagen in, an, über und unter oberirdischen Gewässern einer wasserrechtlichen Genehmigung bedürfen. Jegliche Benutzung eines Gewässers erfordert nach § 8 WHG eine Erlaubnis. Welche Benutzungstatbestände bei einer wärmeenergetischen Nutzung von Fließgewässern mittels Wärmepumpen vorliegen können, wurde im Abschnitt 3.3, Unterabschnitt *Wasserhaushaltsgesetz WHG* bereits vorgestellt. Liegt eine erlaubnispflichtige Nutzung vor, braucht die zugehörige Anlage jedoch keine gesonderte Genehmigung. Die Genehmigung der Anlage wird in das Erlaubnisverfahren für die Benutzung integriert.

Die zuständigen Behörden für wasserrechtliche Genehmigungen sind die Unteren Wasserbehörden der Länder, solange im Gesetz nichts anderes festgelegt wird. Die Gewässer sind nach Maßgabe der Bewirtschaftungsziele des WHG zu bewirtschaften. Dazu gehört unter anderem, dass die Benutzung der Gewässer so erfolgen soll, dass deren ökologische Funktionen erhalten bleiben und Gewässer möglichst wenig beeinträchtigt wird. Entnommenes

Wasser soll ortsnah wieder eingeleitet werden. Genehmigungen und Erlaubnisse dürfen nur erteilt werden, wenn sie sich an den Bewirtschaftungszielen ausrichten. Zudem können die Unteren Wasserbehörden die Genehmigung mit Auflagen oder Benutzungsbedingungen verknüpfen, um negative Auswirkungen auf die Gewässer zu verhindern. Die Einhaltung der Genehmigung muss regelmäßig überprüft werden.

Zu dem Qualitätsparameter Temperatur, der für einen guten Zustand der Gewässer nicht übermäßig verändert werden darf, wurden von keinem Bundesland genauere Anforderungen formuliert. Es werden keine speziellen Temperaturgrenzwerte festgelegt. Die Einleitung sowie der Entzug von Wärme werden jedoch in mehreren Landeswassergesetzen in verschiedenen Kontexten thematisiert.

Die meisten Bundesländer erheben auf die Entnahme von Wasser, wenn sie über den Gemeingebrauch hinausgeht, ein Entnahmeentgelt. Dies ist für Wärmepumpenanlagen von Bedeutung, deren Wärmetauscher in einem offenen System betrieben werden. Die Höhe des Entgelts für die Wasserentnahme zu Kühlzwecken ist in einzelnen Landeswassergesetzen mit konkreten Werten aufgeführt. Beispielsweise beträgt es in Sachsen sowie in Brandenburg 0,005 €/m³ (Anlage 5 SächsWG; § 40 BbgWG) und in Niedersachsen 0,013 €/m³ (Anlage 2 NWG). Die anderen Bundesländer geben in ihren Wassergesetzen keine Werte für die Höhe der Entgelte an oder führen die Kühlung nicht differenziert auf.

Interessant ist, dass in mehreren Bundesländern die Entnahme von Wasser zur Wärmege-
winnung als Ausnahme von der Entgeltpflicht aufgeführt wird. Im LWaG des Landes Meck-
lenburg-Vorpommern heißt es, „Ein Entgelt wird nicht erhoben für [...] das Entnehmen
und Ableiten von Wasser aus oberirdischen Gewässern, um aus ihm unmittelbar Wärme zu
gewinnen, und das anschließende Wiedereinleiten in das Gewässer [...]“ (§ 16 LWaG).
Auch die Bundesländer Brandenburg, Niedersachsen und Sachsen heben die Wasserent-
nahmeentgeltpflicht für die wärmeenergetische Nutzung auf. Baden-Württemberg bezieht
als einziges Bundesland auch die Kühlung mit Oberflächenwasser in die Ausnahme der
Entgeltpflicht mit ein. Es wird kein Entgelt erhoben für „[...] die Benutzung von Wasser
aus oberirdischen Gewässern, soweit das entnommene Wasser zur Heizung oder Kühlung
von Gebäuden verwendet und anschließend dem oberirdischen Gewässer wieder zugeführt
wird [...]“ (§ 103 WG).

Dass für die Entnahme von Wasser zu Kühlzwecken in der Regel ein Entgelt erhoben wird,
während die Wärmenutzung mehrfach davon ausgenommen wird, legt die These nahe,

dass die Wärmezufuhr einem Gewässer eher schadet als der Wärmeentzug. Auch sind in der OGewV Temperaturobergrenzen formuliert, jedoch keine Untergrenzen. Eine Erwärmung des Gewässers wirkt sich auf die Fischgemeinschaften aus, die temperaturempfindlich sind und sich einer bestimmten Lebensraumtemperatur angepasst haben. Wärmeentzug scheint für das Ökosystem nicht so schädlich zu sein. Somit ist rechtlich eine Entnahme von Wärme zur Gebäudeheizung mit einer Wärmepumpe einfacher umsetzbar als eine Kühlung im Sommer. Bei der Kühlung müssen die verschiedenen Vorgaben beachtet und die Auswirkungen des Wärmeeintrags genauer untersucht werden.

Schleswig-Holstein hat in seinem Landeswassergesetz noch eine besondere Regelung für die Wärmenutzung der Gewässer verankert. § 119 Abs 3 des LWG legt für „die Gewinnung von Wärme durch Wärmepumpen“ fest, dass eine Erlaubnis für diese Benutzung in einem vereinfachten Verfahren erteilt werden kann. Dies ermöglicht es, die Planung einer wärmeenergetischen Nutzung in kürzerer Zeit umzusetzen.

4. Wärmeenergetisches Potential ausgewählter Fließgewässer

4.1. Fragestellung

Um die wärmeenergetische Nutzung eines Fließgewässers zu planen, ist es notwendig, sich mit der Wassertemperatur des Flusses zu beschäftigen. Anhand von langjährigen Temperaturdaten werden in dieser Arbeit verschiedene Messstationen ausgewählter Gewässer untersucht. Die in Kapitel 2, Abschnitt 2.4 vorgestellten Grundlagen zum Wärmehaushalt eines Gewässers werden anhand der vorliegenden Temperaturdaten verschiedener Gewässer geprüft und bestätigt. Die Größe des vorhandenen Wärmepotentials wird anhand von Jahresverläufen gemittelter Monatswerte dargestellt. Durch Vergleich der Wassertemperaturen verschiedener Stationen sind eventuelle lokale Abhängigkeiten feststellbar, die Rückschlüsse auf eine Eignung zu wärmeenergetischer Nutzung möglich machen. Verschiedene rechtliche und technische Grenzwerte können die Nutzbarkeit des Gewässers zu Zwecken des Wärmeentzugs oder der Wärmeeinleitung begrenzen. Diese werden in den folgenden Untersuchungen mit den vorherrschenden Wassertemperaturen gegenübergestellt.

4.2. Methodik

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung VI dargestellt. Es umfasst den Süden und den Westen Deutschlands und lässt sich den folgenden Gebieten des DGJ (Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch⁸) zuordnen:

- D: Donaugebiet
- R I: Rheingebiet, Teil I, Hoch- und Oberrhein
- R II: Rheingebiet, Teil II, Main
- R III: Rheingebiet, Teil III, Mittel- und Niederrhein mit deutschem Issel- und Maasgebiet
- W/E: Weser- und Emsgebiet (Nur hessischer und thüringischer Anteil)

⁸ Das Deutsche Gewässerkundliche Jahrbuch ist eine Sammlung von offiziellen gewässerkundlichen Kenngrößen von Oberflächengewässern wie Abflussmengen, Wasserständen und Wassertemperaturen. Deutschland wird im DGJ in zehn Teilgebiete aufgeteilt. Für jedes Gebiet erscheint jährlich ein Teilband des DGJ. Neben Tageswerten enthält das DGJ auch statistische Auswertungen, z.B. Extremwerte und Dauertabellen. (Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) 2017)

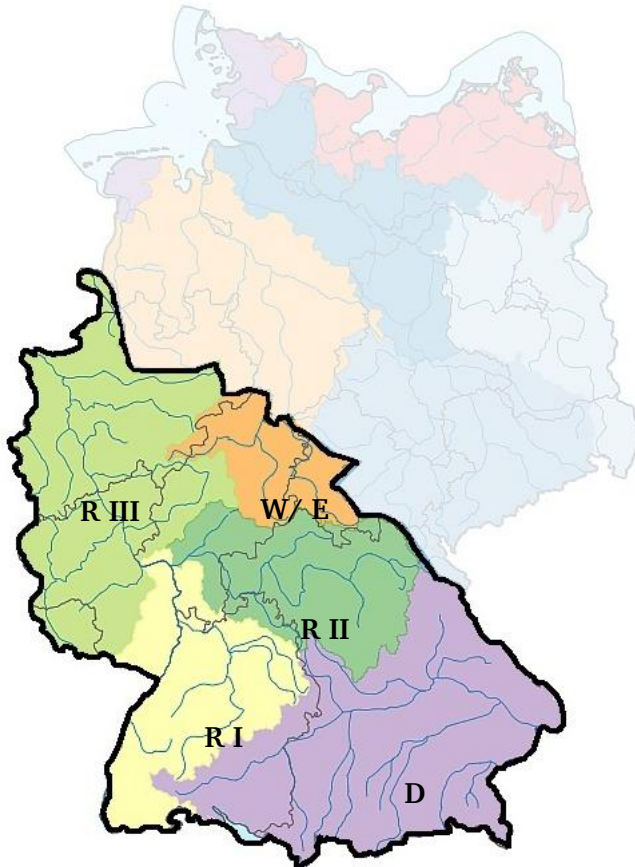


Abbildung VI: Untersuchungsgebiet (verändert nach Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW))

Die ausgewählten Teilgebiete entsprechen den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Saarland, Nordrhein-Westfalen, Hessen sowie einem Teil Thüringens.

Untersucht wurden die folgenden Fließgewässer (in alphabetischer Reihenfolge): Altmühl, Donau, Fränkische Saale, Fulda, Iller, Inn, Isar, Kinzig, Lahn, Lech, Main, Mindel, Mosel, Naab, Neckar, Nidda, Regen, Regnitz, Rhein, Ruhr, Sieg, Werra. An diesen Flüssen wurden Daten von insgesamt 48 Messstationen ausgewertet. Eine Karte aller untersuchten Messstationen befindet sich in Abbildung 1 des Anhangs.

Die Wahl der Messstationen für die Untersuchung orientierte sich an den Stationen, die in den gewässerkundlichen Jahrbüchern mit Temperaturdaten aufgeführt werden. Teilweise wurden andere naheliegende Stationen verwendet, falls für diese Stationen Daten in digitaler Form verfügbar und somit leichter nutzbar waren. Zudem wurden der Auswahl einige ergänzende Stationen hinzugefügt, um eine bessere Abdeckung des Untersuchungsgebiets zu erreichen.

Datenbeschaffung und -verwendung

Die ausgewerteten Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen. Die Temperaturwerte einiger Messstationen wurden manuell aus den gewässerkundlichen Jahrbüchern erfasst, für die meisten Gewässer standen die Daten über die Wassertemperaturen jedoch in digitaler Form zur Verfügung. Mehrere Bundesländer führen kontinuierliche Wassertemperaturmessungen durch und veröffentlichen die Ergebnisse in frei zugänglichen Online-Datenbanken, aus denen die benötigten Daten der verschiedenen Messstationen entnommen werden können. Eine Tabelle mit den Datenquellen der jeweiligen Stationen befindet sich am Schluss dieser Arbeit.

Als Vorbereitung für die Datenanalyse musste zuerst die jeweilige Datenqualität geprüft werden. Einige Datensätze waren sehr lückenhaft. Andere wiesen teilweise große Temperatursprünge zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tagesmitteln auf. Die mittleren Schwankungen der Tagesmittel der Wassertemperaturen betragen bei den untersuchten Gewässern etwa 0,3 – 0,5 K. Laut Aussage von Maniak (2010, S. 433) können die Schwankungen bis zu 3 K betragen. So ist eine tägliche Schwankung von über 5 K durch natürliche Einflussfaktoren nicht begründbar. Es ist wahrscheinlich, dass es sich um technische oder andersartige Störungen handelt. Deshalb wurden Tagesmittelwerte, die um mehr als 5 K von denen des Vortags oder Folgetags abweichen, als Ausreißer eingestuft und aus den Datentabellen gelöscht. Dadurch wurde versucht, Datenfehler zu verringern. Die Datensätze einiger Messstationen, deren Qualität als ungenügend eingestuft wurde, wurden aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Diese Stationen wurden im Anhang mit dem Zusatz „schlechte Datenqualität“ in der Abbildungsbeschriftung des jeweiligen Temperaturjahresverlaufs gekennzeichnet.

Insgesamt wurden die Temperaturdaten über einen möglichst langen Zeitraum untersucht, um kurzfristige Schwankungen auszugleichen und einen aussagekräftigen Mittelwert zu erhalten. Für die Messstation Gundelsheim am Neckar ist der Untersuchungszeitraum mit 42 Jahren (1972-2014) am längsten. Im Schnitt wurden die Daten über den Zeitraum der letzten 20 Jahre untersucht.

Die meisten Daten lagen in Form von Tagesmitteln vor. Aus diesen wurden mittlere Monatsmittel MT_w über den gesamten Untersuchungszeitraum gebildet, um einen typischen Jahresverlauf der Wassertemperaturen an den Messstationen zu ermitteln. Bei mehreren

Stationen standen zudem Daten zu Tagesminima und -maxima zur Verfügung. Diese wurden ebenfalls monatlich gemittelt zu mittleren monatlichen Hoch- und Niedrig-Wassertemperaturen (MHT_w , MNT_w). So konnte eine mittlere Schwankungsbreite dargestellt werden, welche den Bereich zeigt, in dem sich die Wassertemperatur üblicherweise bewegt und auch in Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Regel bewegen wird. Für ausgewählte Gewässer wurden zusätzlich die absoluten höchsten und niedrigsten gemessenen Wassertemperaturen (HT_w , NT_w) in dem jeweiligen Monat ermittelt. An diesen kann gezeigt werden, in welchem tatsächlichen Bereich die Temperaturen im Untersuchungszeitraum geschwankt sind und mit welchen Extremwerten in dem jeweiligen Monat zu rechnen ist.

Wahl und Vorstellung der Referenzgewässer

Für speziellere Untersuchungen nach bestimmten Fragestellungen wurden nicht die gesamten Messstationen untersucht, da dies im Umfang dieser Arbeit nicht zu leisten gewesen wäre. Es wurden je nach Fragestellung verschiedene interessante Gewässer und Stationen ausgewählt.

Für die Untersuchung der *Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur* wurden die Stationen Lenggries und München an der Isar verwendet. Die Isar entspringt in den Alpen und fließt durch das deutsche Alpenvorland, bis sie bei Deggendorf in die Donau mündet. Lenggries liegt im Oberlauf des Flusses auf einer Höhe von 679 m ü. NN, München liegt 65 km weiter stromab auf einer Höhe von ca. 500 m ü. NN (LfU). Somit sind dort sehr unterschiedliche Standortbedingungen gegeben, die Unterschiede im Zusammenhang zwischen Wasser- und Lufttemperatur vermuten lassen. Die Station Frankfurt-Main/Nied an der Nidda wird als Beispiel für sehr starke Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur dargestellt.

Aus den oben genannten Gründen wurde für die Untersuchung der *Entwicklung der Wassertemperaturen im Längsverlauf* eines Gewässers ebenfalls die Isar als ein Referenzgewässer gewählt. Auch der Neckar war unter dieser Fragestellung interessant. Dieser Arbeit lagen Wassertemperaturdaten der Station Rottweil vor, die nur wenige Kilometer stromab des Quellgebiets des Neckars liegt. Zum Vergleich wurde die Station Gundelsheim untersucht, welche im Unterlauf des Neckars liegt. Als drittes Referenzgewässer wurde auch der Main bezüglich seiner Temperaturveränderung im Längsverlauf untersucht, da für ihn Daten von sechs verschiedenen Messstationen vorlagen, die zwischen dem Oberlauf sowie der

Mündung in den Rhein verteilt liegen und so eine Untersuchung des kompletten Gewässerlaufs ermöglichen.

Stationen, für die Daten über einen sehr langen Zeitraum vorlagen, wurden auf einen *langfristigen Trend der Wassertemperaturen* untersucht. Gewählt wurden alle Stationen, für die Temperaturdaten von mindestens 20 Jahren verfügbar waren. Diese Mindestbetrachtungsdauer richtet sich nach den Empfehlungen der DWA (vgl. DVWK 1999, S. 2), welche einen Untersuchungszeitraum von über 20 Jahren als aussagekräftig einschätzt.

Bei der Untersuchung der *begrenzenden Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern* wurden die Wassertemperaturen der wärmsten Monate mit den Grenzwerten der OGewV gegenübergestellt. Dies wurde für verschiedene Stationen der Flüsse Donau, Isar, Lech, Main, Neckar, Regen und Rhein durchgeführt. Für diese Stationen konnte durch Anfrage bei den zuständigen Institutionen deren Einteilung in Fischgewässertypen nach Vorgaben der OGewV in Erfahrung gebracht werden.

4.3. Ergebnisse

Jahresganglinie auf Basis der Monatsmittel

Im Anhang ist für jede der untersuchten Messstationen der Jahresgang der Wassertemperatur dargestellt (siehe Abbildungen 2 – 49). Die erstellten Jahresganglinien der Monatsmittel zeigen in der Regel einen Verlauf ähnlich dem einer Sinuskurve. Die geringsten Monatsmittel der Wassertemperatur treten im Januar und Februar auf und die höchsten Temperaturen im Juli und August. Dabei betragen die minimalen monatlichen Wassertemperaturen im Winter in der Regel $3\text{ °C} - 5\text{ °C}$. Ausnahmen bilden einige Messstationen am Rhein, wie Worms und Mainz, an denen die minimalen Monatsmittel mit 7 °C deutlich höher liegen. Die maximalen Monatsmittel schwanken zwischen den Stationen stärker und liegen in den meisten Fällen zwischen 18 °C und 22 °C . Mit einem Maximum von ca. 13 °C ist die Wassertemperatur an den Messstationen Rosenheim (Inn) und Lenggries (Isar) am geringsten. Diese beiden Stationen liegen im Oberlauf des jeweiligen Flusses und es ist zu vermuten, dass die Wassertemperatur dort stark von der durchschnittlich kühleren Temperatur des Grundwassers beeinflusst wird (siehe Unterabschnitt *Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Fließgewässers*).

Die Amplitude der Monatsmittel variiert von Station zu Station deutlich. Bei den meisten der untersuchten Messstationen kann die Aussage von Maniak (2010, S 433), der von einer Amplitude von 14-16 K ausgeht, bestätigt werden. Die Größe der Amplitude hängt unter anderem von der Lage der Messstation im Längsverlauf des Flusses ab. In der Nähe der Quelle ist die Amplitude in der Regel kleiner (z.B. Isar bei Lenggries 8 K) und steigt im Gewässerverlauf durch eine Erhöhung des max. Monatsmittels an (z.B. Isar bei Landshut 14 K, Main bei Würzburg 19 K) (siehe Unterabschnitt *Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Fließgewässers*).

Die Schwankungen der mittleren täglichen Wassertemperatur zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tagen sind deutlich geringer. Exemplarisch wurden die mittleren Schwankungen für die drei Stationen Rheinfelden (Rhein), Würzburg (Main) und Landshut-Birket (Isar) berechnet. Diese drei Stationen liegen geografisch weit verteilt im Untersuchungsgebiet und befinden sich außerdem an unterschiedlichen Positionen im Längsverlauf des Flusses. Dadurch wird ein gemittelter Wert zwischen diesen Stationen als repräsentativ für die restlichen untersuchten Messstationen erachtet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle III dargestellt. Die Schwankungen der Tagesmittel betragen etwa 0,30 – 0,50 K.

Tabelle III: Mittlere Schwankungen der Tagesmittel der Wassertemperatur

Fluss	Station	Mittlere Schwankungen der Tagesmittel [K]
Rhein	Rheinfelden	0,32
Main	Würzburg	0,30
Isar	Landshut-Birket	0,49

Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur

Der Vergleich der Verläufe der Luft- und der Wassertemperatur an der Messstation Lenggries an der Isar zeigen einen deutlichen Zusammenhang. Da zur Lufttemperatur keine Tagesmittel direkt aus Lenggries vorlagen, wurden für den Vergleich tägliche Mittel der Lufttemperatur an der Station Holzkirchen genutzt. Diese Station liegt knapp 30 km von Lenggries entfernt und befindet sich auf einer Höhe von 685 m ü. NN, was mit der Lage

von Lenggries von ca. 679 m ü. NN gut vergleichbar ist. Alle verwendeten Daten zur Lufttemperatur stammen aus der Datenbank WESTE-XL des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Eine detaillierte Quellenangabe befindet sich am Ende dieser Arbeit.

Bei der Betrachtung der Tagesmittel (siehe Abbildung 50) ist klar erkennbar, dass die Wassertemperatur der Lufttemperatur folgt. Dabei ist jedoch die Schwankungsbreite weniger stark ausgeprägt. Von kurzfristigen täglichen Temperaturschwankungen wird die Wassertemperatur kaum beeinflusst. Da Wasser eine höhere spezifische Wärmekapazität hat als Luft, dauert es länger, bis sich Wasser erwärmt oder abkühlt. Die Wassertemperatur folgt nur längerfristigen Änderungen der Lufttemperatur. Deshalb ist die Wassertemperatur im Winter meist wärmer als die der Luft und im Sommer meist kühler. Im Jahresverlauf der Monatsmittel in Abbildung 51 ist dies erkennbar. Während die mittlere Lufttemperatur im Januar bei $-2,1\text{ °C}$ liegt, ist die Wassertemperatur mit $4,5\text{ °C}$ um $6,6\text{ K}$ wärmer. Im Juli hingegen bleibt die Wassertemperatur mit $12,7\text{ °C}$ ca. $4,4\text{ K}$ unter der Temperatur der Luft, welche im Mittel $17,3\text{ °C}$ beträgt. Während die Lufttemperatur im Jahresverlauf um $19,4\text{ K}$ schwankt, ist die Schwankungsbreite der Wassertemperatur mit $8,7\text{ K}$ deutlich geringer.

Auch zeigt die Grafik, dass das Temperaturmaximum des Flusswassers zeitlich verzögert zu dem der Luft auftritt. Die Lufttemperatur erreicht ihr Maximum im Juli, die Wassertemperatur erst im August. Dies ist ein weiteres Phänomen, welches durch die langsamere Reaktionszeit des Wassers auf Temperaturänderungen, aufgrund seiner höheren spezifischen Wärmekapazität, verursacht wird.

Eine Untersuchung der Daten der Messstation München (siehe Abbildung 52 und Abbildung 53) unterstützt die Aussage von Reinartz (2007), dass sich die Wassertemperatur im Längsverlauf des Gewässers mit größer werdendem Fließquerschnitt immer weiter an die Lufttemperatur annähert und in guter Näherung mit einem linearen Zusammenhang beschrieben werden kann. Die Temperaturdifferenzen der Monatsmittel betragen im Januar $3,5\text{ K}$ und im Juli $2,8\text{ K}$.

Ein Beispiel für eine sehr starke Beeinflussung der Wassertemperatur durch die Lufttemperatur zeigen Abbildung 54 und Abbildung 55 für die Messstation Frankfurt/Main-Nied an der Nidda. Für den Verlauf der Lufttemperatur wurden Tagesmittel der Station Frankfurt/Main-Westend verwendet. Die beiden Kurven der Monatsmittel zeigen einen annähernd gleichen Verlauf. Lediglich in den Wintermonaten Januar und Februar sind Abweichungen von ca. 2 K erkennbar.

Insgesamt ist das Jahresmittel der Wassertemperatur in der Regel größer als das der Lufttemperatur. Ausnahmen bilden Hochgebirgs- oder Gletscherflüsse, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurden (vgl. Täubert und Bassler 1974).

Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Fließgewässers

Eine Gegenüberstellung der Monatsmittel für verschiedene Pegel der Isar (Lenggries, München, Landshut-Birket) bestätigt die Annahme, dass die Wassertemperatur von Fließgewässern im Längsverlauf zunimmt (siehe Abbildung 56). In Lenggries (Flusskilometer 211) nahe der Isarquelle beträgt die mittlere Wassertemperatur im Juli nur 12,7 °C, während sie in Landshut (Flusskilometer 76) 19,5 °C erreicht. Die Temperatur steigt jedoch nicht linear zur Lauflänge des Fließgewässers. Zwischen Lenggries und München (Flusskilometer 146) nimmt die Wassertemperatur um ca. 0,06 K/km zu. Im Flussabschnitt zwischen München und Landshut steigt die Wassertemperatur um ca. 0,04 K/km. Der Temperaturanstieg ist somit im Oberlauf des Gewässers am größten und wird stromab geringer. Unter anderem liegt dies daran, dass der Gewässerquerschnitt im Längsverlauf des Flusses in der Regel zunimmt und somit der Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft steigt (vgl. Reinartz 2007).

Im Monat Januar ist keine Temperaturzunahme zu erkennen. Die Wassertemperatur sinkt stattdessen zwischen Lenggries und München leicht um -0,01 K/km, bevor sie dann bis Landshut wieder mit etwa derselben Rate ansteigt. Die Steigung der Wassertemperatur im Längsverlauf ist somit auch vom Monat und der absoluten Wassertemperatur abhängig. Mit zunehmenden monatlichen Wassertemperaturen wird auch die Temperaturzunahme im Längsverlauf des Gewässers deutlicher (siehe Abbildung 57).

Der Ort Lenggries befindet sich auf einer Höhe von 678,60 m ü. NN. In einer Tiefe von 9,54 m wurden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) Grundwassertemperaturen zwischen 7,9 °C und 10,1 °C gemessen (vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt). Die Temperatur von Grundwasser unterliegt nur geringen jahreszeitlichen Schwankungen und liegt im Bereich der mittleren jährlichen Lufttemperatur, welche in Lenggries ca. 8,6 °C beträgt. Die Temperatur von Flusswasser nahe der Quelle liegt in einem sehr ähnlichen Bereich wie die des Grundwassers (vgl. Reinartz 2007, S. 7). Die Jahreszeitlichen Schwankungen werden im Längsverlauf des Flusses stärker, was an Abbildung 57 zu erkennen ist. Die Wassertemperatur der Isar an der Messstation Lenggries schwankt durchschnittlich jährlich zwischen 4,5 °C und 13,2 °C, an der Station Landshut-Birket zwischen 4,7 °C und 19,5 °C. Im

Unterlauf des Gewässers nähert sich die Wassertemperatur immer stärker an die Lufttemperatur an (vgl. ebd., S. 7).

Auch am Beispiel des Flusses Neckar lässt sich eine steigende Temperaturtendenz im Längsverlauf des Gewässers erkennen (siehe Abbildung 58). Der Neckar entsteht durch Zusammenflüsse mehrerer kleiner Bäche südlich von Rottweil und hat bei Rottweil erst eine geringe Größe. Die mittleren monatlichen Temperaturen schwanken zwischen 3,3 °C im Januar um 15,9 °C im August. Im Unterlauf des Neckars, bei Gundelsheim, liegen die Temperaturen zwischen 6,4 °C im Januar und 21,8 °C im August und damit ganzjährig deutlich über den Wassertemperaturen an der Messstation Rottweil. Die Temperaturdifferenz ist jedoch im Sommer mit 5,9 K wesentlich stärker ausgeprägt als im Winter mit 3,1 K. Auch hier lässt sich also im Unterlauf bei größerem Fließquerschnitt ein erhöhter Wärmeaustausch zwischen Luft und Wasser vermuten.

Am Main lagen die Daten zahlreicher Stationen vor, weshalb auch hier der Temperaturverlauf in Fließrichtung des Gewässers gut untersucht werden konnte (siehe Abbildung 59). Von Kemmern bei Flusskilometer 391 bis Bischofsheim bei Flusskilometer 4 kann sowohl im Juli als auch im Januar eine steigende Tendenz der Wassertemperatur festgestellt werden. Im Juli beträgt hier die Temperaturzunahme im Mittel 0,015 K/km, im Januar 0,004 K/km. Auch hier ist also der Temperaturanstieg im Längsverlauf des Gewässers im Sommer stärker ausgeprägt als im Winter. Die Anstiegsraten sind hier jedoch insgesamt deutlich geringer als die der Isar.

Die Temperaturzunahme im Längsverlauf eines Fließgewässers kann unter anderem auch darauf zurückzuführen sein, dass mit sinkender geografischer Höhe über NN die Lufttemperatur in der Regel steigt. Eine im Mittel höhere Lufttemperatur bewirkt wiederum einen Anstieg der Wassertemperatur (vgl. Unterabschnitt *Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur*). Dies bedeutet, dass die Wassertemperaturen in Gebirgsregionen tendenziell geringer sind als die in flachen Gebieten.

Langjährige Entwicklung der Wassertemperatur

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) stellt auf seiner Homepage die Ergebnisse einer Langzeitstudie vor, die die Entwicklungen der Wassertemperaturen von Fließgewässern untersucht (vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt 2017). Demnach konnte bei etwa 75 %

der untersuchten Messstationen ein Temperaturanstieg festgestellt werden. Dieser beträgt seit 1980 im Mittel 0,5 K/Dekade.

Die dieser Arbeit vorliegenden Wassertemperaturdaten wurden ebenfalls auf langfristige Tendenzen untersucht und mit den Erkenntnissen des LfU verglichen. Um Aussagen über einen langfristigen Trend der mittleren jährlichen Wassertemperatur treffen zu können, sind Temperaturdaten aus einem möglichst langen Zeitraum notwendig. Basierend auf den Empfehlungen der DWA zur statistischen Analyse von Hochwasserwahrscheinlichkeiten (vgl. DVWK 1999, S. 2) wurde ein Untersuchungszeitraum von mindestens 20 Jahren als aussagekräftig eingeschätzt. Deshalb wurden stichprobenartig die Stationen untersucht, für die Daten aus mindestens 20 Jahren vorlagen. Die zeitliche Entwicklung der Wassertemperatur wurde durch eine lineare Regressionsgerade dargestellt (siehe Abbildungen 60 – 73). Dabei entspricht die Steigung der Geraden der Temperaturänderung in K/Jahr. Da dies sehr kleine Werte ergibt, werden in den folgenden Ausführungen die Änderungsraten in K/Dekade angegeben. Fehlten in einem Datensatz die Temperaturwerte von mehreren Monaten, wurde ein ganzes Jahr aus der Betrachtung ausgeschlossen, damit die Mittelwerte nicht insofern verfälscht wurden, dass bei fehlenden Wintermonaten die Jahresmittelwerte im Schnitt zu hoch ausfallen oder bei fehlenden Sommermonaten zu tief.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Analysen dargestellt. Bei zehn der 14 untersuchten Stationen ist ein Anstieg der Wassertemperatur festzustellen. Das entspricht einem Anteil von ca. 71 %. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit dem des LfU, das für einen Anteil von 75 % der Stationen einen Anstieg feststellte. Eine Station zeigt keine signifikante Temperaturänderung. An drei Messstationen ist sogar ein Rückgang der Wassertemperaturen zu erkennen.

Tabelle IV: Ergebnisse der Untersuchungen der langjährigen Entwicklungen der Wassertemperatur

Fluss	Station	Zeitraum	Unter- suchungs- Dauer [Jahre]	Änderung der Wassertempe- ratur [K/De- kade]
Donau	Immendingen	1988-2013	25	+0,03
Donau	Ulm-Wiblingen	1994-2014	20	+0,26
Fulda	Wahnhausen	1994-2016	22	+0,29
Kinzig	Hanau	1994-2016	22	+0,73
Lahn	Oberbiel	1995-2017	22	+0,18
Lech	Augsburg	1990-2017	27	+0,33
Main	Bischofsheim	1994-2016	22	-0,11
Neckar	Rottweil	1989-2014	25	-0,29
Neckar	Gundelsheim	1972-2014	42	-0,33
Nidda	Frankfurt/Main- Nied	1994-2016	22	+0,73
Rhein	Rheinfelden	1993-2014	21	+0,73
Rhein	Iffezheim	1992-2015	23	+0,37
Rhein	Karlsruhe	1990-2015	25	+0,37
Rhein	Worms	1987-2007	30	+0,37

Insgesamt lässt sich erkennen, dass bei dem Großteil der untersuchten Gewässer die Wassertemperaturen in den vergangenen Jahrzehnten angestiegen sind. Dabei lagen die Raten der Erwärmung des Wassers zwischen 0,18 K/Dekade bei der Lahn und 0,73 K/Dekade an Kinzig, Nidda und dem Hochrhein. Im Mittel über alle Messstationen betrug der Anstieg der Wassertemperatur 0,44 K/Dekade und liegt damit etwa in der Größenordnung des Wertes des LfU von 0,5 K/Dekade seit 1980.

Keinen signifikanten Trend zeigt die Donau bei Immendingen, deren Wassertemperatur im untersuchten Zeitraum annähernd konstant blieb. Eine Temperaturabnahme ist am Neckar sowie am Main zu verzeichnen. Um Aussagen darüber treffen zu können, warum sich diese

Gewässer entgegen dem allgemeinen Trend verhalten, wären weitergehende Untersuchungen nötig. Darauf wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Zusammenfassend lässt sich durch die Untersuchungen bestätigen, dass die Wassertemperaturen der Fließgewässer in den letzten Jahrzehnten in der Regel zugenommen haben. Trotz des kürzeren Untersuchungszeitraums wurden ähnliche Ergebnisse erzielt wie die der Langzeitstudie des LfU. Die Wassertemperaturen reagieren somit auf die nachweislichen Anstiege der Lufttemperaturen in der Vergangenheit. Dies hat verschiedene Auswirkungen auf die aquatischen Tier- und Pflanzengemeinschaften, die sich speziellen Temperaturverhältnissen angepasst haben. Abwanderungen von Fischarten und Veränderungen der bestehenden Ökosysteme können eine Folge sein (vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt 2017). Die Nutzung von Fließgewässern zur Heizung mittels Wärmepumpen würde durch den Wärmeentzug diesem Trend entgegenwirken. Sie wäre somit weniger schädlich für ein Gewässer als die Einleitung von Wärme im Sommer bei der Kühlung von Gebäuden, welche den Anstieg der Wassertemperatur noch verstärkt.

Begrenzende Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung – Winter

Von Herstellern von Wärmetauschern für Wärmepumpenanlagen wird häufig ein zulässiger Temperaturbereich festgelegt, in dem die Wärmepumpe problemlos arbeitet. Der zulässige Temperaturbereich unterscheidet sich nach Art der Wärmepumpenanlage. Bei der Planung der wärmeenergetischen Nutzung eines Fließgewässers mittels Wärmepumpenanlage sollte sich demnach mit den zu erwartenden minimalen Temperaturen in den Wintermonaten beschäftigt werden. Gerade in den Monaten Januar und Februar, in denen im Schnitt die geringsten Wassertemperaturen vorherrschen, ist eine funktionsfähige Heizungsanlage erforderlich. Es muss somit untersucht werden, inwieweit die vorgegebenen Mindesttemperaturen für die Wärmetauscher unterschritten werden und die Gebäudeheizung mittels Wärmepumpenheizung nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Für diese Phasen ist die Installation einer Zusatzheizung notwendig, welche unabhängig von Außentemperaturen funktionsfähig ist, wie z.B. eines konventionellen Heizkessels. Solch ein bivalentes Heizsystem stellt eine lückenlose Deckung des Heizbedarfs sicher.

Die minimalen Monatsmittel der untersuchten Gewässertemperaturverläufe liegen im Schnitt zwischen 3 °C und 5 °C. Da es sich um gemittelte Werte handelt, können die tatsächlichen Tagesminima an mehreren Tagen durchaus weit darunterliegen. Es lohnt sich also, die Ganglinie der Tagesminima für einige Jahre beispielhaft zu betrachten. Obwohl

das minimale Monatsmittel der Iller an der Messstation Wiblingen $3,3\text{ °C}$ beträgt, erkennt man an der Ganglinie der Tagesmittel vom 01.09.2004 bis 01.09.2006, dass dieser Wert an vielen Tagen im Januar und Februar deutlich unterschritten wird (siehe Abbildung 74). Es wurden sogar an wenigen Tagen Werte unter 0 °C gemessen.

In sehr kalten Perioden mit Lufttemperaturen unter 0 °C kann es vorkommen, dass Gewässer zufrieren. Dies kann negative Auswirkungen auf den Betrieb der Wärmepumpenanlage haben. Auch Cube (1984, S. 74) nennt die Eisbildung in seinem Lehrbuch über Wärmepumpen als einen Störfaktor auf die Funktionsfähigkeit des Wärmetauschers. Ob Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes sowie unterhalb der festgelegten Mindesttemperaturen der Wärmetauscher Beeinträchtigungen für den Betrieb der Wärmepumpenanlage bedeuten und wie ausgeprägt die Beeinträchtigungen sind, ist nicht vorherzusagen und sollte daher für den jeweiligen einzusetzenden Wärmetauscher näher untersucht werden.

Begrenzende Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung – Sommer

Im Sommer, wenn die Wärmepumpenanlage zur Gebäudekühlung verwendet werden soll, begrenzen festgelegte Temperaturmaximalwerte aus der OGeWV die Nutzung. Je nach Einteilung in Fischgewässertypen dürfen bestimmte Höchsttemperaturen nicht überschritten werden (siehe Abschnitt 3.3). Bei der Kühlung mittels Wärmepumpenanlage wird Wärme in das Gewässer eingeleitet und die Wassertemperatur lokal angehoben. Dabei muss vermieden werden, dass die Wassertemperatur über die maximal zulässige Temperatur steigt. In Tabelle V sind für verschiedene Stationen die Gewässertypen nach Fischgemeinschaften (siehe Kapitel 3, Abschnitt 3.3, *Oberflächengewässerverordnung (OGeWV)*) sowie die dort geltenden Temperaturgrenzwerte aufgeführt. Die Datenquellen dieser Einteilungen sind am Schluss dieser Arbeit aufgeführt. Zum Vergleich mit den gemessenen Wassertemperaturen wurden zusätzlich die Monatsmittel des wärmsten Monats der jeweiligen Station ($MT_{w,max}$) angegeben. Dieser Wert sagt aus, welche Temperatur das Flusswasser in der Regel in den wärmsten Sommermonaten erreicht. Da die Tagesmittel jedoch stärker schwanken, können diese durchaus an einigen Tagen wesentlich höhere Temperaturen erreichen. Daher ist außerdem die höchste gemessene Wassertemperatur an dieser Station aus dem gesamten Untersuchungszeitraum aufgelistet (HT_w). Bei Stationen, bei denen Daten über Tagesminima und -maxima bekannt waren, ist dies der höchste Wert aller Tagesmaxima. Bei den anderen Stationen wurde als Vergleichswert das höchste gemessene Tagesmittel des Zeitraums verwendet. Diese Stationen sind in der Tabelle V gekennzeichnet (*).

Tabelle V: Vergleich der höchsten Wassertemperaturen verschiedener Messstationen mit den Grenzwerten der OGewV

Fluss	Station	$MT_{W,max}$	HT_W	Fisch- gemeinschaft nach OGewV	Temperatur- grenzwert [°C]
Donau	Immendingen	18,2	25,1	Cyp-R	23
Donau	Ulm- Wiblingen	18,1	23,7*	Cyp-R	23
Donau	Ingolstadt	19,4	24,6	EP	25
Donau	Deggendorf	21,4	27,8	EP	25
Donau	Passau	21,8	28,0	EP	25
Isar	Lenggries	13,2	18,5	Sa-HR	21,5
Isar	München	16,6	21,9	Cyp-R	23
Isar	Landshut- Birket	19,5	25,4	Cyp-R	23
Lech	Augsburg	18,9	25,1	Cyp-R	23
Main	Kemmern	20,1	26,6	Cyp-R	23
Main	Trunstadt	20,7	27,6	EP	25
Main	Schweinfurt	21,5	27,7	EP	25
Main	Würzburg	21,9	28,5	EP	25
Main	Kleinheubach	22,2	27,0	EP	25
Neckar	Rottweil	15,9	21,2*	Cyp-R	23
Neckar	Gundeslheim	21,8	26,5*	EP	25
Regen	Marienthal	20,8	29,3	EP	25
Rhein	Rheinfelden	20,8	24,0*	Cyp-R	25
Rhein	Iffezheim	21,9	25,4*	EP	25
Rhein	Plitterdorf	21,5	28,7	EP	25
Rhein	Karlsruhe	21,9	24,3*	EP	25

In Tabelle V sieht man, dass MT_w bei allen untersuchten Stationen unter dem Grenzwert der OGewV liegt. Somit ist zu den meisten Zeiten im Sommer eine Wärmeeinleitung durch Wärmepumpen zur Gebäudekühlung möglich. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Wärmeeinleitung die Wassertemperatur nicht so stark erhöht, dass sie den Grenzwert überschreitet.

Die Werte von HT_w übersteigen die geltenden Temperaturgrenzwerte bei fast allen Stationen (Überschreitungen wurden in der Tabelle hervorgehoben). Das bedeutet, dass es in der Vergangenheit durchaus vorkam, dass die Wassertemperaturen schon auf natürlichem Wege die Grenzwerte überschritten haben. Dies sind Extremfälle, die nur an wenigen Tagen auftreten. Dennoch ist bei einem geplanten Einsatz von Laufwasser-Wärmepumpen zu Kühlzwecken zu beachten, dass dieser Fall auch in Zukunft an sehr heißen Tagen auftreten kann. Eine zusätzliche Wärmeeinleitung ist in diesem Fall nicht mehr zulässig.

Um zu erfahren, wie regelmäßig eine Überschreitung der Temperaturgrenzwerte vorkommt, wurden beispielhaft verschiedene Gewässerabschnitte des Rheins untersucht. Der Rhein an der Messstation Rheinfelden ist beispielsweise dem Gewässertyp Cypriniden-Rithral (Cyp-R) zugeordnet, für den die OGewV einen Temperaturgrenzwert von 23 °C festlegt. Das maximale Monatsmittel von 20,8 °C liegt zwar unterhalb dieses Grenzwertes. Betrachtet man jedoch den Verlauf der Tagesmittel der Jahre 1993-2014 (siehe Abbildung 75) erkennt man, dass der Grenzwert in den Sommermonaten fast jedes Jahr für einige Tage überschritten wurde. Die untersuchten zur Verfügung stehenden Werte sind Tagesmittel, es liegt also die Vermutung nahe, dass bei einer Analyse der Tagesmaximalwerte deutlich mehr Überschreitungen des Grenzwertes von 23 °C zu beobachten wären. Daten der Tagesmaxima lagen bei der Erstellung dieser Arbeit jedoch nicht vor.

Etwa 190 km stromab des Rheins liegt eine weitere untersuchte Messstation bei Iffezheim. Hier ist der Rhein dem Gewässertyp Epipotamal (EP) zuzuordnen. Somit ist der gültige Temperaturgrenzwert mit 25 °C höher als im Hochrhein bei Rheinfelden. Da der Rhein während seine Fließwegs jedoch wärmer geworden ist, wird auch dieser Grenzwert an sehr warmen Sommertagen überschritten, wie man in Abbildung 76 erkennen kann.

Da der Rhein ein allgemein eher warmer Fluss ist, ist eine sommerliche Wärmeeinleitung durch Wärmepumpen kritisch zu betrachten. Falls solch eine Nutzung geplant werden soll, muss genauer untersucht werden, zu welchen Zeiten und in welchem Ausmaß eine Wärmeeinleitung zulässig sein kann.

5. Fazit

Die in Gewässern gespeicherte und potentiell nutzbare Wärmeenergie hängt im Wesentlichen von der Wassertemperatur und dem Durchfluss ab. Die Wassertemperatur folgt in ihrem Verlauf dem der Lufttemperatur. Aus diesem Grund unterliegt auch sie jahreszeitlichen Schwankungen. Durch die sehr große spezifische Wärmekapazität von Wasser fallen diese Temperaturschwankungen in Gewässern jedoch geringer aus als bei der Umgebungsluft. Im Winter sind die Wassertemperaturen häufig wesentlich höher als die Lufttemperaturen. Dass sie unter den Gefrierpunkt fallen, kommt sehr selten vor. Dadurch sind Oberflächengewässer gut geeignet als Wärmequelle für Wärmepumpen zur Gebäudeheizung.

Im Längsverlauf eines Gewässers nimmt die Wassertemperatur zu. Dies ist positiv für die Heizperiode, in der höhere Wassertemperaturen eine höhere Leistungszahl der Wärmepumpenheizung ermöglichen. Im Sommer kann dies allerdings für den Einsatz einer Wärmepumpe zur Gebäudeklimatisierung problematisch sein. Durch die höheren Wassertemperaturen ist eine Erreichung der Temperaturgrenzwerte der OGewV wahrscheinlicher, was die Wärmeeinleitung einschränkt. Da sich ein Gewässer im Längsverlauf in der Regel auch verändert und andere Fischgemeinschaften prägend sind, verändert sich auch der Gewässertyp nach OGewV, wodurch andere, höhere Grenzwerte gelten. Von daher lässt sich durch die durchgeführten Untersuchungen keine Aussage darüber treffen, in welchen Gewässerabschnitten eine Wärmeeinleitung zur Gebäudekühlung besser geeignet ist.

Die mittleren monatlichen Wassertemperaturen der Sommermonate liegen bei allen untersuchten Stationen, bei denen die Einteilung nach OGewV bekannt war, unter dem jeweils geltenden Temperaturgrenzwert der OGewV. Dies bedeutet, dass eine Wärmeeinleitung an jeder dieser Stationen an den meisten Tagen im Sommer möglich ist. Jedoch ist zu beachten, dass die täglichen Wassertemperaturen stärkeren Schwankungen unterliegen als die Monatsmittel. Die Untersuchungen zeigten, dass der Grenzwert bei den meisten Stationen an einigen Tagen im Sommer durchaus überschritten wurde. An diesen Tagen ist dann keine Kühlung durch die Wärmepumpe möglich.

Die Untersuchungen konnten bestätigen, dass die Wassertemperatur dem ansteigenden Trend der Lufttemperatur in den letzten Jahrzehnten gefolgt ist. Eine Erreichung der Temperaturgrenzwerte im Sommer wird somit vermutlich in Zukunft immer wahrscheinlicher,

was die Wärmeinleitung zu Kühlzwecken zusätzlich beschränkt. Hohe Wassertemperaturen im Winter haben jedoch den positiven Effekt, dass Wärmepumpen effektiver arbeiten können.

Verschiedene rechtliche Begrenzungen sorgen dafür, dass die Fließgewässer in guten Zustand erhalten bleiben und nachhaltig genutzt werden. Diese schränken die wärmeenergetische Nutzung teilweise ein. Eine Wasserentnahme bei offenen Systemen ist laut dem WHG als erlaubnispflichtige Benutzung eingestuft. Inwiefern ein Einbau eines Wärmetauschers in ein Gewässer erlaubnis- oder genehmigungspflichtig ist, konnte nach Untersuchungen der Rechtsnormen nicht eindeutig beantwortet werden und muss im Einzelfall bei der zuständigen Behörde erfragt werden.

Der Wärmeentzug ist rechtlich jedoch nicht beschränkt. Einige Bundesländer unterstützen die Nutzung von Gewässern zur Wärmegewinnung sogar durch spezielle Regelungen. Beispielsweise nehmen mehrere Bundesländer die Entnahme von Flusswasser zur Wärmegewinnung von der dort geltenden Entnahmeentgeltspflicht aus. Das Land Schleswig-Holstein räumt in seinem Landeswassergesetz zusätzlich die Möglichkeit ein, dass die Erlaubnis für die Gewinnung von Wärme durch Wärmepumpen in einem vereinfachten Verfahren erteilt werden kann. Dies vereinfacht die Umsetzung eines solchen Vorhabens.

Für die Einleitung von Wärme zu Kühlzwecken gibt es mehr Beschränkungen. Die Wassertemperatur ist einer der Qualitätsparameter zur Einstufung des chemischen Zustands eines Gewässers nach WRRL. Sie darf somit nicht so stark verändert werden, dass der Zustand des Gewässers sich verschlechtert. Dazu werden in der OGewV konkrete Temperaturgrenzwerte festgelegt, die durch eine Einleitung von Wärme nicht überschritten werden dürfen. Die Höhe der festgelegten Maximaltemperatur richtet sich nach dem Gewässertyp des jeweiligen Gewässerabschnitts, der von den heimischen Fischgemeinschaften abhängt. Besonders in sehr warmen Sommermonaten ist es möglich, dass eine Einleitung von Wärme für einige Zeit nicht möglich ist, weil sonst der Grenzwert überschritten werden würde. Auch muss für die Entnahme von Wasser zu Kühlzwecken in den meisten Bundesländern eine Gebühr gezahlt werden.

Offen bleibt die Frage, wie sich sehr niedrige Temperaturen, die unterhalb der festgelegten Minimaltemperatur des Wärmepumpenherstellers liegen, auf die Funktionsfähigkeit des Wärmetauschers auswirken. Es wird vermutet, dass sehr geringe Temperaturen und insbe-

sondere Eisbildung die Wärmeübertragung beeinträchtigen. Ob dies zutrifft und in welchem Maße die Funktion des Wärmetauschers verringert wird, muss in weiteren Untersuchungen erforscht werden.

Neben der Wassertemperatur ist der Durchfluss maßgebend für die Menge der gespeicherten Wärmeenergie eines Gewässers. Auch der Durchfluss unterliegt diversen zeitlichen und örtlichen Schwankungen, die sich auf die Eignung des Gewässers zur wärmeenergetischen Nutzung auswirken. In dieser Arbeit wurde die Größe Durchfluss jedoch nicht näher untersucht. Daher wären weitere Untersuchungen nötig, um die Variabilität des Durchflusses verschiedener Gewässer zu analysieren und durch Vergleiche zwischen Wassertemperatur und Durchfluss weitere Rückschlüsse auf die Eignung eines Gewässerabschnitts zum Einsatz eines Wärmepumpensystems ziehen zu können.

Verzeichnis der Rechtsnormen und Rechtsakte

AwSV, vom 18.04.2017: Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Fundstelle: BGBl. I S. 905.

BayWG, vom 25.02.2010: Bayerisches Wassergesetz. Fundstelle: GVBl. S. 66, BayRS 753-1-U.

BbgWG, vom 02.03.2012: Brandenburgisches Wassergesetz. Fundstelle: GVBl. I Nr. 20.

BImSchG, vom 17.05.2013: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge - Bundes-Immissionsschutzgesetz. Fundstelle: BGBl. I S. 1274.

BremWG, vom 12.04.2011: Bremisches Wassergesetz. Fundstelle: Brem.GBl. S. 262.

BWG, vom 17.06.2005: Berliner Wassergesetz. Fundstelle: GVBl. S. 357.

EEG 2014, vom 01.08.2014: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien.

HWaG, vom 29.03.2005: Hamburgisches Wassergesetz. Fundstelle: HmbGVBl. 2005, S. 97.

HWG, vom 14.12.2010: Hessisches Wassergesetz. Fundstelle: GVBl. I 2010 S. 548.

LWaG, vom 30.11.1992: Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern. Fundstelle: GVOBl. M-V S. 669; GS Meckl.-Vorp. Gl. Nr. 753-2.

LWG, vom 08.07.2016: Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen. Fundstelle: GV. NRW. S. 559.

LWG, vom 11.02.2008: Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein. Fundstelle: GVOBl. Schl.-H. S. 91.

LWG, vom 14.07.2015: Landeswassergesetz. Fundstelle: GVBl. S. 383.

NWG, vom 19.02.2010: Niedersächsisches Wassergesetz. Fundstelle: Nds. GVBl. S. 64.

OGewV, vom 20.06.2016: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer. Fundstelle: BGBl. I S. 1373.

SächsWG, vom 12.07.2013: Sächsisches Wassergesetz. Fundstelle: SächsGVBl. S. 503.

Süßwasserrichtlinie, vom 06.09.2006: RICHTLINIE 2006/44/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 6. September 2006 über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten.

SWG, vom 30.07.2004: Saarländisches Wassergesetz. Fundstelle: Amtsbl. S. 1994.

ThürWG, vom 18.08.2009: Thüringer Wassergesetz. Fundstelle: GVBl. S. 648.

Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen, vom 31.05.2017: Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - 4. BImSchV. Fundstelle: BGBl. I S. 1440

WG, vom 03.12.2013: Wassergesetz für Baden-Württemberg. Fundstelle: GBl. S. 389.

WHG, vom 31.07.2009: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Fundstelle: BGBl. I S. 626.

WRRL, vom 23.10.2000: 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 - Wasserrahmenrichtlinie. Fundstelle: Amtsblatt Nr. L 327 vom 22.12.2000 S. 0001 - 0073.

Literaturverzeichnis

AGEB (2015): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2015. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. Berlin.

Ausschuss Oberirdische Gewässer und Küstengewässer (LAWA-AO) (Hg.) (2007): Rahmenkonzeption Monitoring. Teil B - Bewertungsgrundlagen und Methodenbeschreibungen. Arbeitspapier II, Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Komponenten.

Baumann, Michael; Laue, Hans-Jürgen; Müller, Peter (2007): Wärmepumpen. Heizen mit Umweltenergie. 4., erw. u. vollst. überarb. Aufl. Berlin: Solarpraxis AG (BINE-Fachbücher).

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hg.): Landesmessnetze Grundwassertemperatur. Messdatenliste der Temperaturmessstellen. Online verfügbar unter <https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwassertemperatur/messprogramme/index.htm>.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hg.) (2017): Auswirkungen auf die Gewässertemperatur. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/auswirkungen/gewaessertemperatur/index.htm, zuletzt geprüft am 14.09.2017.

Bongs, Constanze; Günther, Danny; Helmling, Sebastian; Kramer, Thomas; Miara, Marek; Oltersdorf, Thore; Wapler, Jeannette (Hg.) (2013): Wärmepumpen. Heizen - Kühlen - Umweltenergie nutzen. FIZ Karlsruhe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. (BINE-Fachbuch).

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hg.) (2017): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch (DGJ). Online verfügbar unter http://www.bafg.de/DE/08_Ref/M1/03_Pegelwesen/DGJ/dgj_node.html, zuletzt geprüft am 31.08.2017.

Cube, Hans Ludwig von; Steimle, Fritz (1984): Wärmepumpen. Grundlagen u. Praxis. 2., neuberarb. u. erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag.

DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Merkblatt DVWK-M 251/1999.

E.ON Energie AG (Hg.) (2005): Heizen mit Umweltwärme – die Wärmepumpe im Feldtest. München.

Frühling, H.; Klein, E. (1975): Die Erft als Wärmequelle für die Raumheizung. In: *Elektrowärme im Technischen Ausbau (ETA). Edition A der Zeitschrift "elektrowärme international"* 33 (A 6), S. 267–274.

Hähnlein, Stefanie; Blum, Philipp; Bayer, Peter (2011): Oberflächennahe Geothermie - aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. In: *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 16 (2), S. 69–75. DOI: 10.1007/s00767-011-0162-0.

Kobus, Helmut; Söll, Thomas (1987): Der Wärmehaushalt des Grundwassers und seine Nutzung. In: *Wasser-Kalender* 21, S. 63–91.

Kugler, Astrid (2013): Das Zürcher Rathaus. 4. aktualisierte Auflage. Hg. v. Parlamentsdienste des Zürcher Kantonsrates. Pfister Kugler und Partner. Zürich.

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (Hg.): Gewässerkundliche Jahrbücher und Pegelraten des Bundes und der Länder. Online verfügbar unter <http://www.dgj.de/>, zuletzt geprüft am 31.08.2017.

Maniak, Ulrich (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05396-2>.

Nova Scotia Environment (2009): Surface Water Heat Pumps. The drop on water. Hg. v. Government of Nova Scotia.

Ochsner, Karl (2009): Wärmepumpen in der Heizungstechnik. Praxishandbuch für Installateure und Planer. 5., überarb. und erw. Aufl. Heidelberg: C.F. Müller.

Reinartz, Ralf (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns. Hg. v. Bayerischen Landesamtes für Umwelt.

Rumpf, Hans-Gerhard (1980): Laufwasser-Wärmepumpen; Technik und Wirtschaftlichkeit. In: *Elektrowärme im Technischen Ausbau (ETA). Edition A der Zeitschrift "elektrowärme international" 38 (A 4/5)*, S. 226–232.

Schönborn, Wilfried (1992): Fließgewässerbiologie. Jena: Gustav Fischer Verlag.

Täubert, U.; Bassler, F. (1974): Wasserbau-Mitteilungen. Wasserwirtschaftliche Systemanalyse des Wärmehaushalts von Flüssen. Hg. v. Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Umweltbundesamt (2016): Ökologischer Zustand der Fließgewässer. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/gewaesserbelastung/fliessgewaesser/oekologischer-zustand-der-fliessgewaesser#textpart-1>, zuletzt geprüft am 12.07.2017.

Datenquellen

Wassertemperaturen

DGJ: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Teilband „R I: Rheingebiet, Teil I, Hoch- und Oberrhein“.

FGG Weser: Die Flussgebietsgemeinschaft Weser, Weserdatenbank, online verfügbar unter <http://datenbank.fgg-weser.de/weserdatenbank/index.php>.

HLNUG: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Daten per E-Mail zur Verfügung gestellt von Norbert Ringel-Kaiser am 31.05.2017. Betreff: *Pflum.xls*.

LANUV, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Daten per E-Mail zur Verfügung gestellt von Sybille Jacob am 14.06.2017. Betreff: *Anfrage mehrjähriger Daten zur Wassertemperatur*.

LfU: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Gewässerkundlicher Dienst Bayern, online verfügbar unter www.gkd.bayern.de.

LUBW: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz des Landes Baden-Württemberg, Jahresdatenkatalog „Fließgewässer Baden-Württemberg“, online verfügbar unter <http://jdkfg.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/300/>.

MUEEF: Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz, Geoportal Wasser RLP, online verfügbar unter <http://www.geoportal-wasser.rlp.de/servlet/is/9220/>.

Tabelle 6: Datenquellen der untersuchten Wassertemperaturdaten

Fluss	Station	Art der Daten	Datenquelle
Altmühl	Eichstätt	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Altmühl	Beilngries o. d. Sulz	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Donau	Immendingen	14-tägig, Einzelwerte	LUBW
Donau	Ulm-Wiblingen	Tagesmittel	LUBW
Donau	Ingolstadt	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Donau	Deggendorf	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Donau	Passau	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Fränkische Saale	Bad Kissingen	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Fulda	Wahnhausen	Tagesmittel, -minima, -maxima	HLNUG

Iller	Wiblingen	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Inn	Rosenheim o. d. Mang- fallmündung	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Inn	Passau-Ingling	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Isar	Lenggries	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Isar	München	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Isar	Landshut-Birket	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Kinzig	Hanau	Tagesmittel, -minima, -maxima	HLNUG
Lahn	Oberbiel	Tagesmittel, -minima, -maxima	HLNUG
Lahn	Kalkofen	monatlich, Einzel- werte	MUEEF
Lech	Augsburg Hochablass	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Main	Kemmern	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Main	Trunstadt	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Main	Schweinfurt	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Main	Würzburg	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Main	Kleinheubach	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Main	Bischofsheim	Tagesmittel, -minima, -maxima	HLNUG
Mindel	Offingen	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Mosel	Frankel	14-tägig, Einzelwerte	MUEEF
Naab	Heitzenhofen	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Neckar	Rottweil	14-tägig, Einzelwerte	LUBW
Neckar	Gundelsheim	14-tägig, Einzelwerte	LUBW

Nidda	Frankfurt/Main-Nied	14-tägig, Einzelwerte	HLNUG
Regen	Marienthal	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Regnitz	Pettstadt	Tagesmittel, -minima, -maxima	LfU
Rhein	Rheinfelden	Tagesmittel	LUBW
Rhein	Iffezheim	Tagesmittel	LUBW
Rhein	Plittersdorf	Monatsmittel, -mi- nima, -maxima	DGJ
Rhein	Karlsruhe	Tagesmittel	LUBW
Rhein	Worms	Monatsmittel, -mi- nima, -maxima	DGJ
Rhein	Mainz	Tagesmittel	MUEEF
Rhein	Bad Honnef	Monatsmittel, -mi- nima, -maxima	LANUV
Rhein	Düsseldorf-Flehe	Monatsmittel, -mi- nima, -maxima	LANUV
Rhein	Lobith	Monatsmittel, -mi- nima, -maxima	LANUV
Ruhr	Olsberg	Monatsmittel, -mi- nima, -maxima	LANUV
Ruhr	Essen-Kupferdreh	Monatsmittel, -mi- nima, -maxima	LANUV
Sieg	Mudersbach	monatlich, Einzel- werte	MUEEF
Sieg	Hamm	monatlich, Einzel- werte	MUEEF
Werra	Gerstungen	14-tägig, Tagesmittel	FGG Weser
Werra	Witzenhausen	14-tägig, Tagesmittel	FGG Weser

Lufttemperaturen

DWD: Deutscher Wetterdienst, WESTE-XL – Wetterdaten und -statistiken express, online verfügbar unter http://www.dwd.de/DE/leistungen/weste/westexl/weste_xl.html.

Einteilung in Gewässertypen nach OGewV

LAZBW: Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg, Fischereiforschungsstelle, mündliche Mitteilung durch Herrn Dussling am 18.09.2017, vorläufige Einteilung.

LfL: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Fischerei, Daten per E-Mail zur Verfügung gestellt von Frank Bonell am 07.09.2017, Betreff: *Fischgewässertypen nach OGewV*.

Tabelle VII: Quelle der Einteilung der Gewässerabschnitte nach OGewV

Fluss	Station	Fisch- gemeinschaft nach OGewV	Temperatur- grenzwert [°C]	Quelle
Donau	Immendingen	Cyp-R	23	LAZBW
Donau	Ulm- Wiblingen	Cyp-R	23	LAZBW
Donau	Ingolstadt	EP	25	LfL
Donau	Deggendorf	EP	25	LfL
Donau	Passau	EP	25	LfL
Isar	Lenggries	Sa-HR	21,5	LfL
Isar	München	Cyp-R	23	LfL
Isar	Landshut- Birket	Cyp-R	23	LfL
Lech	Augsburg	Cyp-R	23	LfL
Main	Kemmern	Cyp-R	23	LfL
Main	Trunstadt	EP	25	LfL
Main	Schweinfurt	EP	25	LfL
Main	Würzburg	EP	25	LfL
Main	Kleinheubach	EP	25	LfL
Regen	Marienthal	EP	25	LfL
Neckar	Rottweil	Cyp-R	23	LAZBW
Neckar	Gundelsheim	EP	25	LAZBW
Rhein	Rheinfelden	Cyp-R	25	LAZBW
Rhein	Iffezheim	EP	25	LAZBW
Rhein	Plitterdorf	EP	25	LAZBW
Rhein	Karlsruhe	EP	25	LAZBW

Anhang – Inhalt

Abbildungsverzeichnis	58
Übersicht	63
Jahresverlauf der Monatsmittel.....	65
Altmühl	65
Donau.....	66
Fränkische Saale	69
Fulda	69
Iller.....	70
Inn.....	70
Isar	71
Kinzig	73
Lahn	73
Lech.....	74
Main	75
Mindel	78
Mosel.....	78
Naab.....	79
Neckar	79
Nidda.....	80
Regen	81
Regnitz	81
Rhein.....	82
Ruhr	86
Sieg	87
Werra	88
Untersuchung der Referenzgewässer	90
Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur	90
Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Fließgewässers	93
Langjährige Entwicklung der Wassertemperatur	95
Begrenzende Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung – Winter	102
Begrenzende Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung – Sommer.....	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersichtskarte aller untersuchten Messstationen (Kartengrundlage: DGJ)	64
Abbildung 2:	Wassertemperatur der Altmühl, Messstation Eichstätt, gemittelt über den Zeitraum von 2009-2017	65
Abbildung 3:	Wassertemperatur der Altmühl, Messstation Beilngries a. d. Sulz, gemittelt über den Zeitraum von 2009-2017	66
Abbildung 4:	Wassertemperatur der Donau, Messstation Immendingen, gemittelt über den Zeitraum von 1988-2013	66
Abbildung 5:	Wassertemperatur der Donau, Messstation Ulm-Wiblingen, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2015	67
Abbildung 6:	Wassertemperatur der Donau, Messstation Ingolstadt, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	67
Abbildung 7:	Wassertemperatur der Donau, Messstation Deggendorf, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	68
Abbildung 8:	Wassertemperatur der Donau, Messstation Passau, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	68
Abbildung 9:	Wassertemperatur der Fränkischen Saale, Messstation Bad Kissingen, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017.....	69
Abbildung 10:	Wassertemperatur der Fulda, Messstation Wahnhausen, gemittelt über den Zeitraum von 1996-2016	69
Abbildung 11:	Wassertemperatur der Iller, Messstation Wiblingen, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	70
Abbildung 12:	Wassertemperatur des Inns, Messstation Rosenheim o. d. Mangfallmündung, gemittelt über den Zeitraum von 2010-2017	70
Abbildung 13:	Wassertemperatur des Inns, Messstation Passau-Ingling, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	71
Abbildung 14:	Wassertemperatur der Isar, Messstation Lenggries, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	71
Abbildung 15:	Wassertemperatur der Isar, Messstation München, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	72
Abbildung 16:	Wassertemperatur der Isar, Messstation Landshut-Birket, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	72

Abbildung 17: Wassertemperatur der Kinzig, Messstation Hanau, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2016.....	73
Abbildung 18: Wassertemperatur der Lahn, Messstation Oberbiel, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2016.....	73
Abbildung 19: Wassertemperatur der Lahn, Messstation Kalkofen, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2016.....	74
Abbildung 20: Wassertemperatur des Lechs, Messstation Augsburg Hochablass, gemittelt über den Zeitraum von 1990-2017	74
Abbildung 21: Wassertemperatur des Mains, Messstation Kemmern, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2017.....	75
Abbildung 22: Wassertemperatur des Mains, Messstation Trunstadt, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017.....	75
Abbildung 23: Wassertemperatur des Mains, Messstation Schweinfurt, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017.....	76
Abbildung 24: Wassertemperatur des Mains, Messstation Würzburg, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017.....	76
Abbildung 25: Wassertemperatur des Mains, Messstation Kleinheubach, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017	77
Abbildung 26: Wassertemperatur des Mains, Messstation Bischofsheim, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2016	77
Abbildung 27: Wassertemperatur der Mindel, Messstation Offingen, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017.....	78
Abbildung 28 Wassertemperatur der Mosel, Messstation Frankel, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2016.....	78
Abbildung 29: Wassertemperatur der Naab, Messstation Heitzenhofen, gemittelt über den Zeitraum von 2006-2017.....	79
Abbildung 30: Wassertemperatur des Neckars, Messstation Rottweil, gemittelt über den Zeitraum von 1989-2013.....	79
Abbildung 31: Wassertemperatur des Neckars, Messstation Gundelsheim, gemittelt über den Zeitraum von 1972-2013	80
Abbildung 32: Wassertemperatur der Nidda, Messstation Frankfurt/Main-Nied, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2016	80
Abbildung 33: Wassertemperatur des Regens, Messstation Marienthal, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017.....	81

Abbildung 34:	Wassertemperatur der Regnitz, Messstation Pettstadt, gemittelt über den Zeitraum von 2007-2017	81
Abbildung 35:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Rheinfelden, gemittelt über den Zeitraum von 1993-2015	82
Abbildung 36:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Iffezheim, gemittelt über den Zeitraum von 1992-2015	82
Abbildung 37:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Plittersdorf, gemittelt über den Zeitraum von 1991-2007	83
Abbildung 38:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Karlsruhe, gemittelt über den Zeitraum von 1990-2015	83
Abbildung 39:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Worms, gemittelt über den Zeitraum von 1988-2007	84
Abbildung 40:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Mainz, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2016	84
Abbildung 41:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Bad Honnef, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2017 (schlechte Datenqualität)	85
Abbildung 42:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Düsseldorf-Flehe, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2017 (schlechte Datenqualität)	85
Abbildung 43:	Wassertemperatur des Rheins, Messstation Lobith, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2017 (schlechte Datenqualität)	86
Abbildung 44:	Wassertemperatur der Ruhr, Messstation Olsberg, gemittelt über den Zeitraum von 2006-2017 (schlechte Datenqualität)	86
Abbildung 45:	Wassertemperatur der Ruhr, Messstation Essen-Kupferdreh, gemittelt über den Zeitraum von 2006-2016 (schlechte Datenqualität)	87
Abbildung 46:	Wassertemperatur der Sieg, Messstation Mudersbach, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2017	87
Abbildung 47:	Wassertemperatur der Sieg, Messstation Hamm, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2017	88
Abbildung 48:	Wassertemperatur der Werra, Messstation Gerstungen, gemittelt über den Zeitraum von 1993-2004	88
Abbildung 49:	Wassertemperatur der Werra, Messstation Witzenhausen, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2015	89
Abbildung 50:	Temperaturverläufe der Tagesmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation Lenggries (Isar) vom 30.08.2010 bis 08.06.2017	90

Abbildung 51: Jahresverläufe der Monatsmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation Lenggries (Isar)	90
Abbildung 52: Temperaturverläufe der Tagesmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation München (Isar) vom 01.08.2010 bis 01.08.2016	91
Abbildung 53: Jahresverläufe der Monatsmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation München (Isar).....	91
Abbildung 54: Temperaturverläufe der Tagesmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation Frankfurt/Main-Nied (Nidda) vom 01.08.2010 bis 01.08.2016	92
Abbildung 55: Jahresverläufe der Monatsmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation Frankfurt/Main-Nied (Nidda)	92
Abbildung 56: Mittlere monatliche Wassertemperatur der Isar im Juli (oben) und im Januar (unten), Entwicklung im Längsverlauf des Gewässers	93
Abbildung 57: Jahresverlauf der Monatsmittel der Isar, Vergleich verschiedener Messstationen	93
Abbildung 58: Jahresverlauf der Monatsmittel des Neckars, Vergleich verschiedener Messstationen	94
Abbildung 59: Mittlere monatliche Wassertemperatur des Mains im Juli (oben) und im Januar (unten), Entwicklung im Längsverlauf des Gewässers	94
Abbildung 60: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Donau bei Immendingen, Trendline 1988-2013, Temperaturzunahme mit 0,03 K/Dekade.....	95
Abbildung 61: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Donau bei Ulm-Wiblingen, Trendline 1994-2014, Temperaturzunahme mit 0,26 K/Dekade	95
Abbildung 62: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Fulda bei Wahnhausen, Trendline 1994-2016, Temperaturzunahme mit 0,29 K/Dekade.....	96
Abbildung 63: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Kinzig bei Hanau, Trendlinie 1994-2016, Temperaturzunahme mit 0,73 K/Dekade	96
Abbildung 64: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Lahn bei Oberbiel, Trendline 1995-2017, Temperaturzunahme mit 0,18 K/Dekade	97
Abbildung 65: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Lech bei Augsburg, Trendline 1990-2017, Temperaturzunahme mit 0,33 K/Dekade	97

Abbildung 66: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Mains bei Bischofsheim, Trendline 1994-2016, Temperaturabnahme mit $-0,11$ K/Dekade	98
Abbildung 67: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Neckars bei Rottweil, Trendline 1989-2014, Temperaturabnahme mit $-0,29$ K/Dekade.....	98
Abbildung 68: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Neckars bei Gundelsheim, Trendline 1972-2014, Temperaturabnahme mit $-0,33$ K/Dekade	99
Abbildung 69: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Nidda bei Frankfurt/Main-Nied, Trendline 1994-2016, Temperaturzunahme mit $0,73$ K/Dekade	99
Abbildung 70: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins bei Rheinfelden, Trendlinie 1993-2014, Temperaturzunahme mit $0,73$ K/Dekade	100
Abbildung 71: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins bei Iffezheim, Trendline 1992-2015, Temperaturzunahme mit $0,37$ K/Dekade	100
Abbildung 72: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins bei Karlsruhe, Trendline 1990-2015, Temperaturzunahme mit $0,37$ K/Dekade	101
Abbildung 73: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins bei Worms, Trendlinie 1987-2007, Temperaturzunahme mit $0,37$ K/Dekade	101
Abbildung 74: Verlauf der Tagesmittel der Wassertemperatur der Iller an der Messstation Wiblingen vom 01.09.2004 bis 01.09.2006.....	102
Abbildung 75: Gegenüberstellung des Verlaufs der Tagesmittel der Wassertemperatur mit dem geltenden Temperaturgrenzwert nach OGewV (Cyp-R, 23° C), Rhein bei Rheinfelden	102
Abbildung 76: Gegenüberstellung des Verlaufs der Tagesmittel der Wassertemperatur mit dem geltenden Temperaturgrenzwert nach OGewV (EP, 25° C), Rhein bei Iffezheim	103

Übersicht

Die folgende Karte zeigt eine Übersicht über alle untersuchten Messstationen. Von diesen Stationen lagen entweder Tages- oder Monatsmittel der Wassertemperatur vor, die zu verschiedenen Fragestellungen ausgewertet wurden. Für einige Stationen waren auch Tagesminima sowie -maxima verfügbar. Die Ergebnisse der Analysen sind auf den folgenden Seiten dargestellt. Eine textliche Erläuterung dazu befindet sich im Textteil der Arbeit. Sämtliche Datenquellen der verwendeten Temperaturwerte sind im Anschluss an das Literaturverzeichnis aufgeführt.



Abbildung 1: Übersichtskarte aller untersuchten Messstationen (Kartengrundlage: DGJ)

Jahresverlauf der Monatsmittel

Nachfolgend sind die Jahresverläufe der Monatsmittel aller untersuchten Messstationen dargestellt. Die Messstationen wurden den zugehörigen Flüssen untergeordnet, welche nach alphabetischer Reihenfolge aufgeführt sind. Die zugehörigen Stationen wurden nach ihrer Position im Längsverlauf des Gewässers in Fließrichtung sortiert. Der blassblaue Bereich ist die Differenz zwischen den mittleren monatlichen Hoch- und Niedrig-Wassertemperaturen (MHT_w , MNT_w). So konnte eine mittlere Schwankungsbreite dargestellt werden, welche den Bereich zeigt, in dem sich die Wassertemperatur üblicherweise bewegt. Für einige Stationen wurden zusätzlich die absoluten höchsten und niedrigsten gemessenen Wassertemperaturen (HT_w , NT_w) in dem jeweiligen Monat ermittelt. Dies sind Extremwerte, deshalb werden sie als Punkte dargestellt. Sie zeigen, in welchem Bereich sich die Wassertemperatur im untersuchten Zeitraum tatsächlich bewegt hat, wobei die Wahrscheinlichkeit der Erreichung dieser extremalen Temperaturen vergleichsweise gering ist.

Altmühl

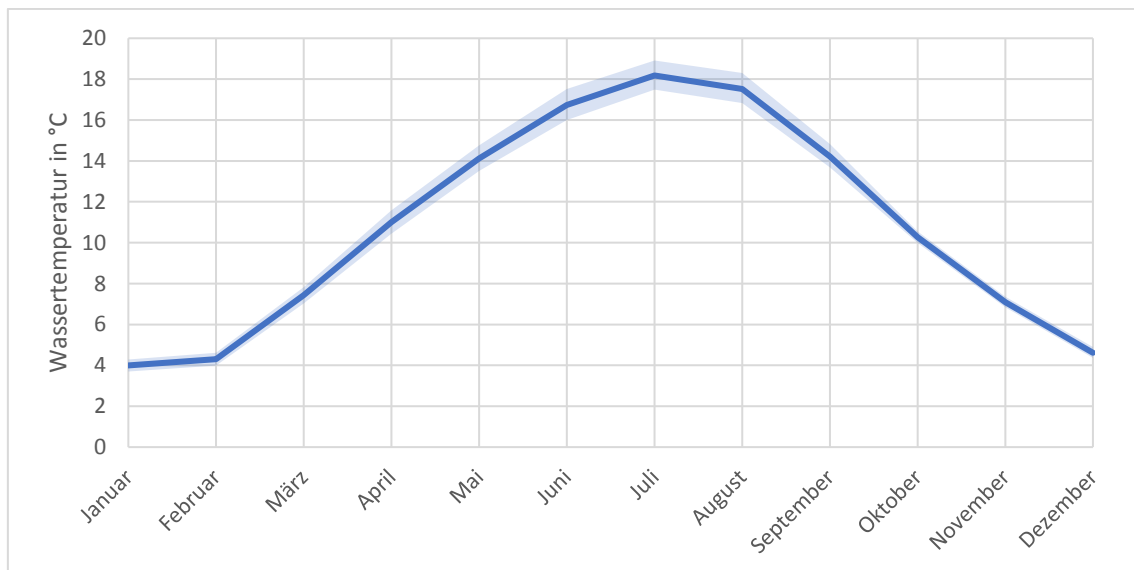


Abbildung 2: Wassertemperatur der Altmühl, Messstation Eichstätt, gemittelt über den Zeitraum von 2009-2017

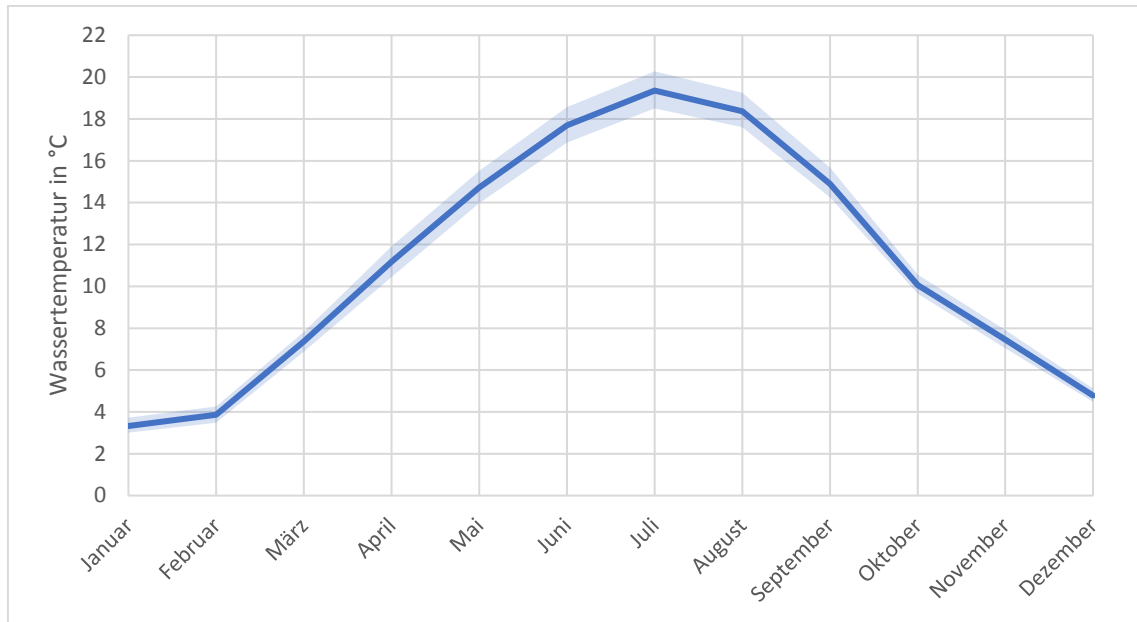


Abbildung 3: Wassertemperatur der Altmühl, Messstation Beilngries a. d. Sulz, gemittelt über den Zeitraum von 2009-2017

Donau

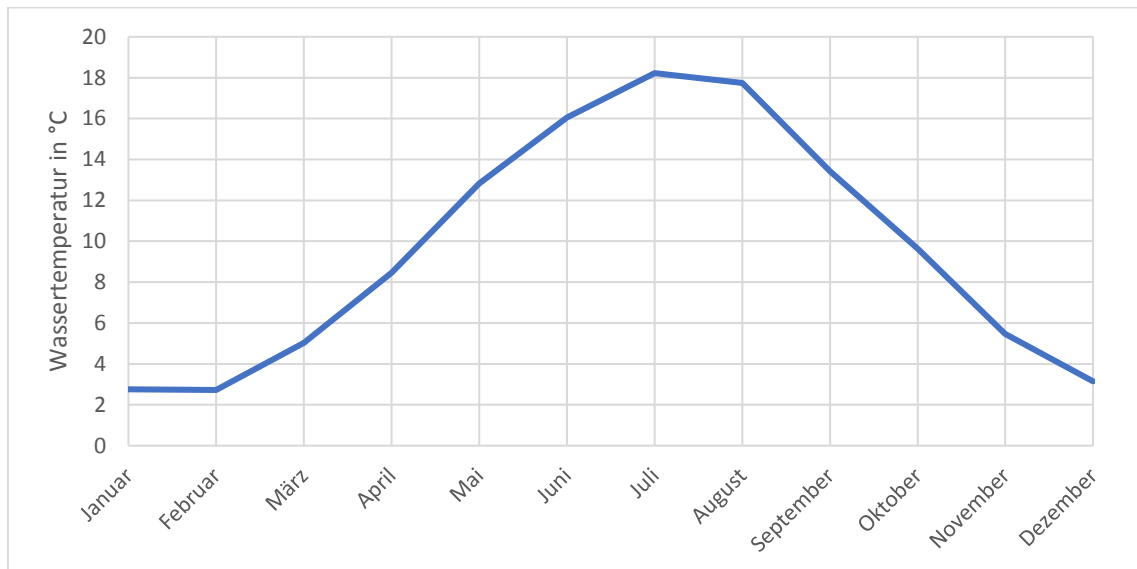


Abbildung 4: Wassertemperatur der Donau, Messstation Immendingen, gemittelt über den Zeitraum von 1988-2013

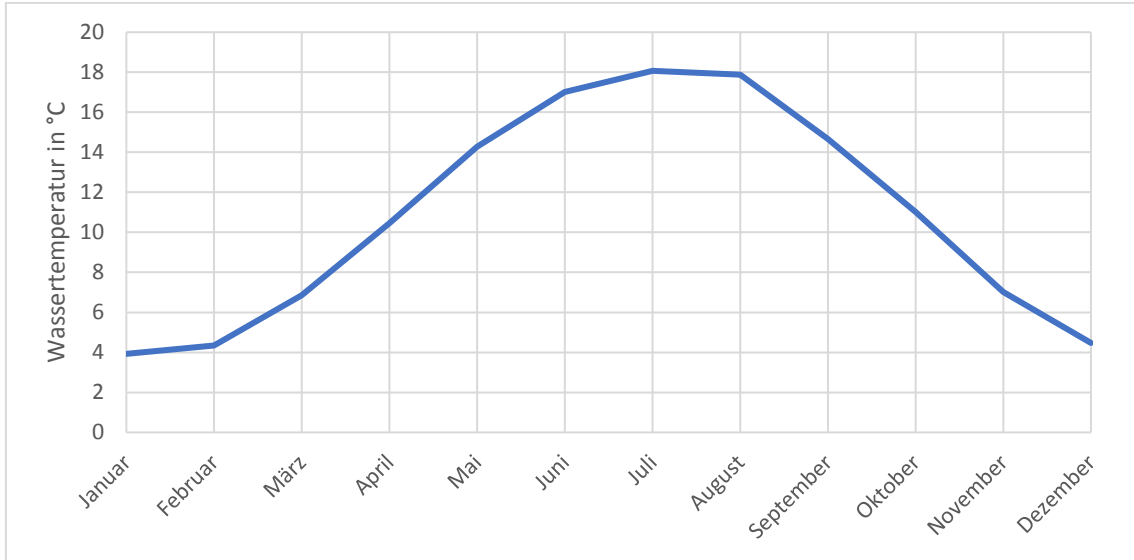


Abbildung 5: Wassertemperatur der Donau, Messstation Ulm-Wiblingen, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2015

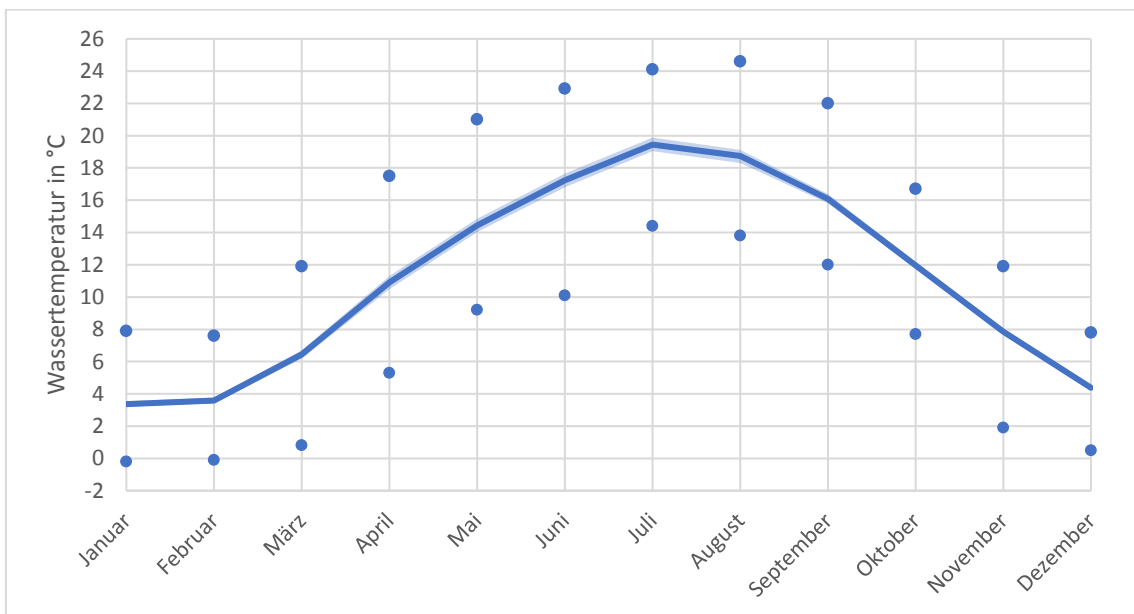


Abbildung 6: Wassertemperatur der Donau, Messstation Ingolstadt, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

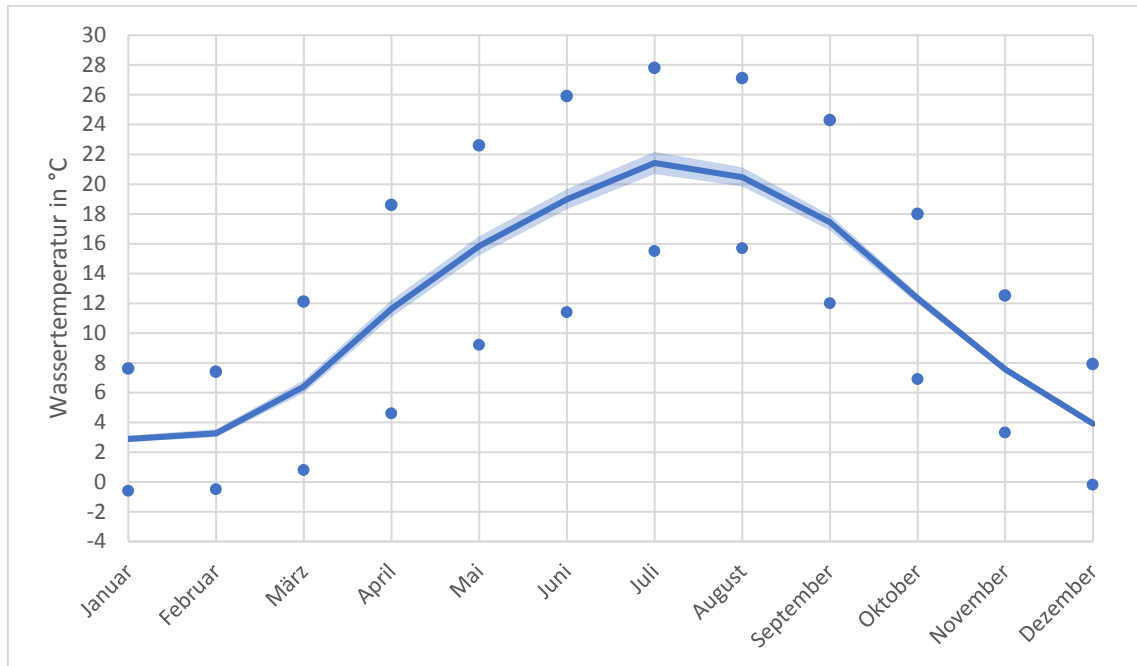


Abbildung 7: Wassertemperatur der Donau, Messstation Deggendorf, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

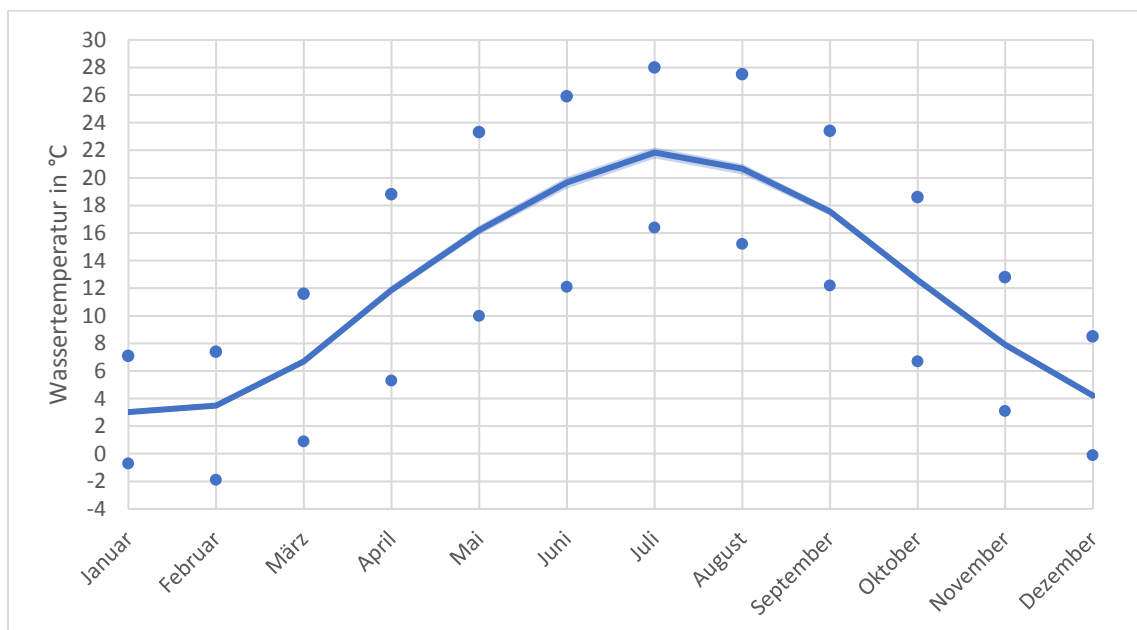


Abbildung 8: Wassertemperatur der Donau, Messstation Passau, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

Fränkische Saale

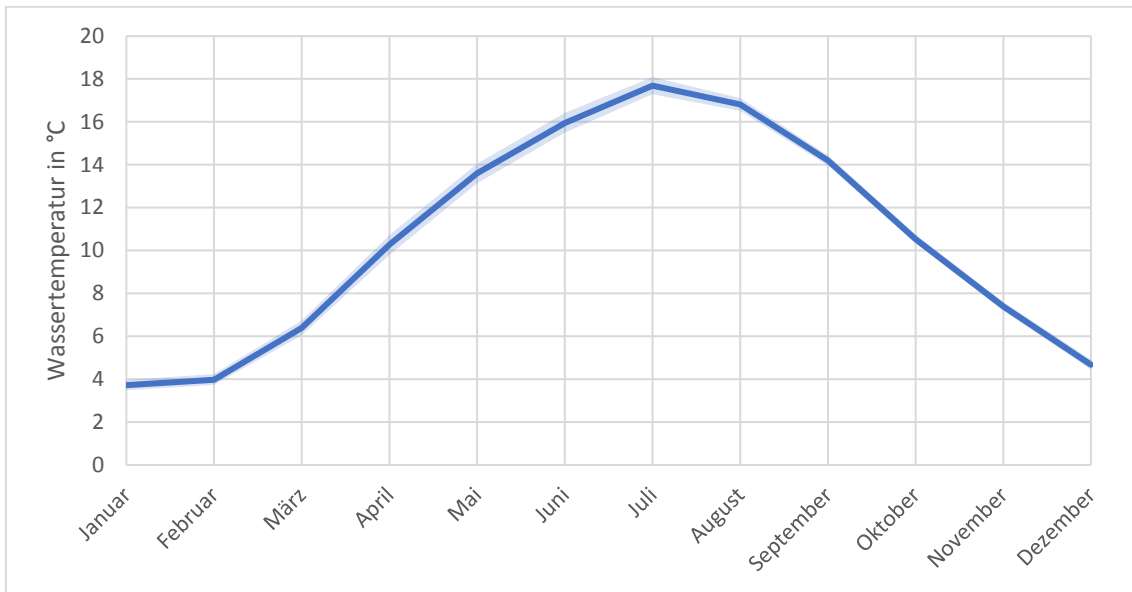


Abbildung 9: Wassertemperatur der Fränkischen Saale, Messstation Bad Kissingen, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

Fulda

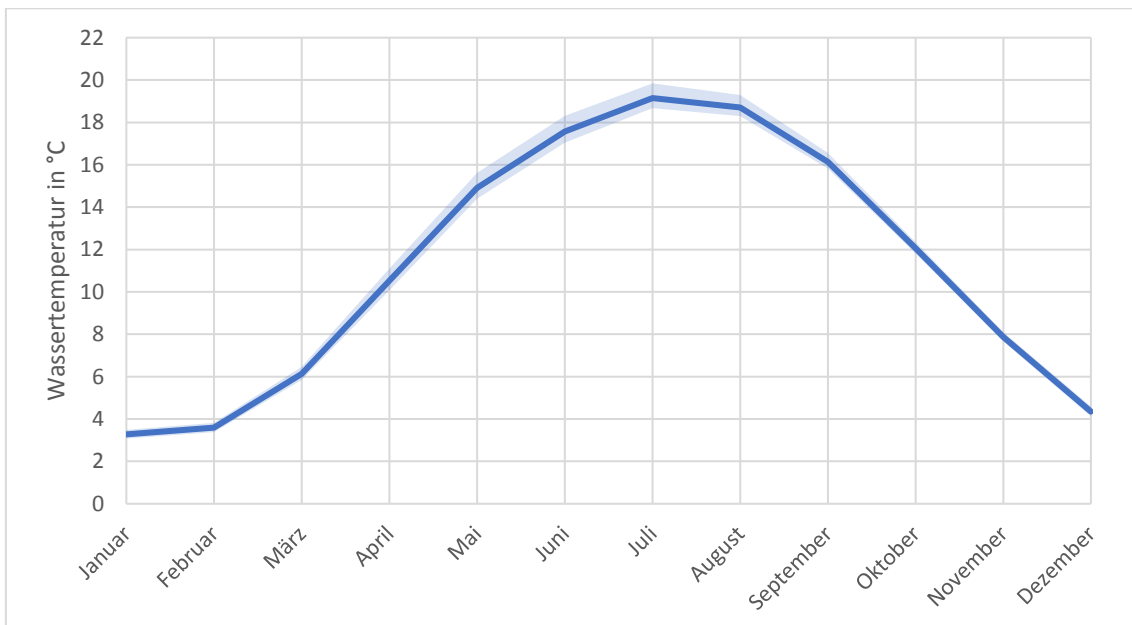


Abbildung 10: Wassertemperatur der Fulda, Messstation Wahnhausen, gemittelt über den Zeitraum von 1996-2016

Iller

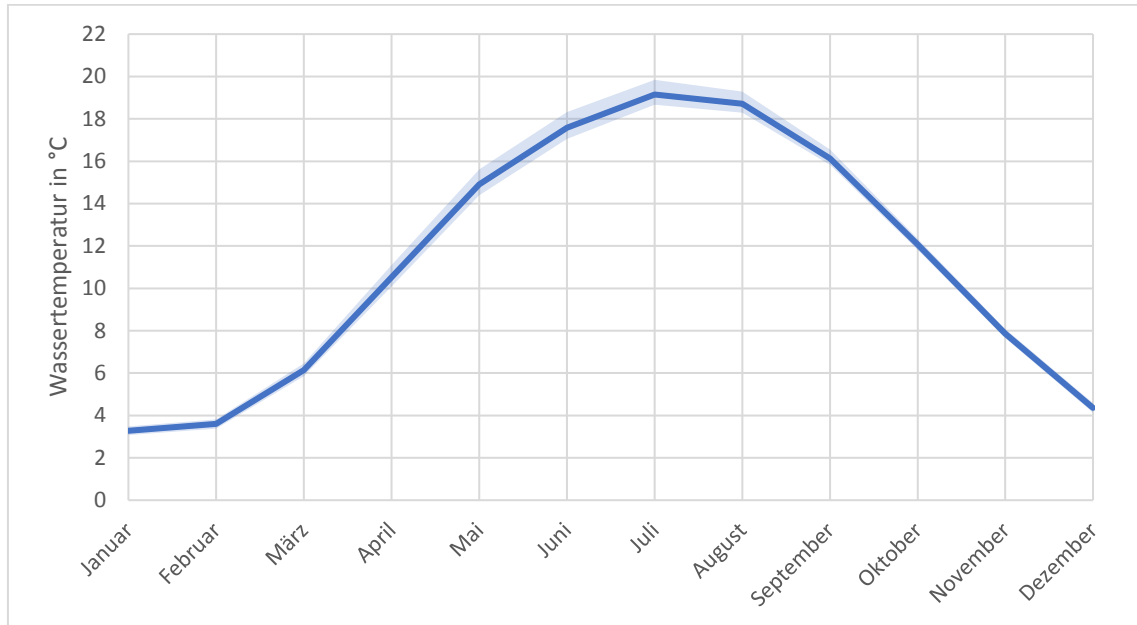


Abbildung 11: Wassertemperatur der Iller, Messstation Wiblingen, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

Inn

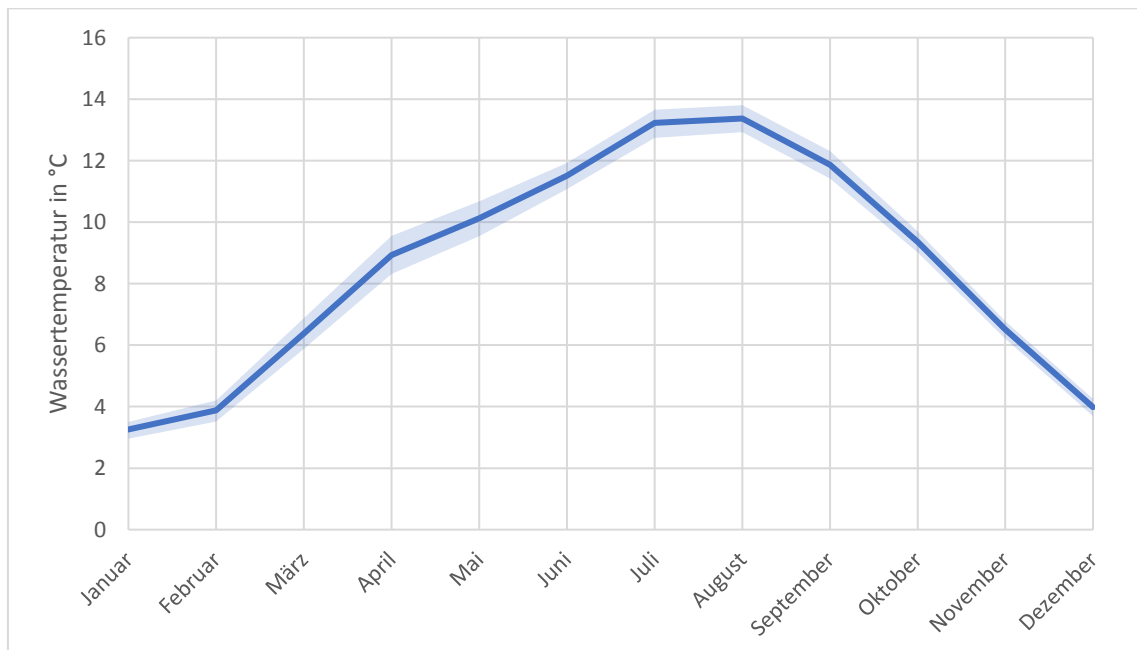


Abbildung 12: Wassertemperatur des Inns, Messstation Rosenheim o. d. Mangfallmündung, gemittelt über den Zeitraum von 2010-2017

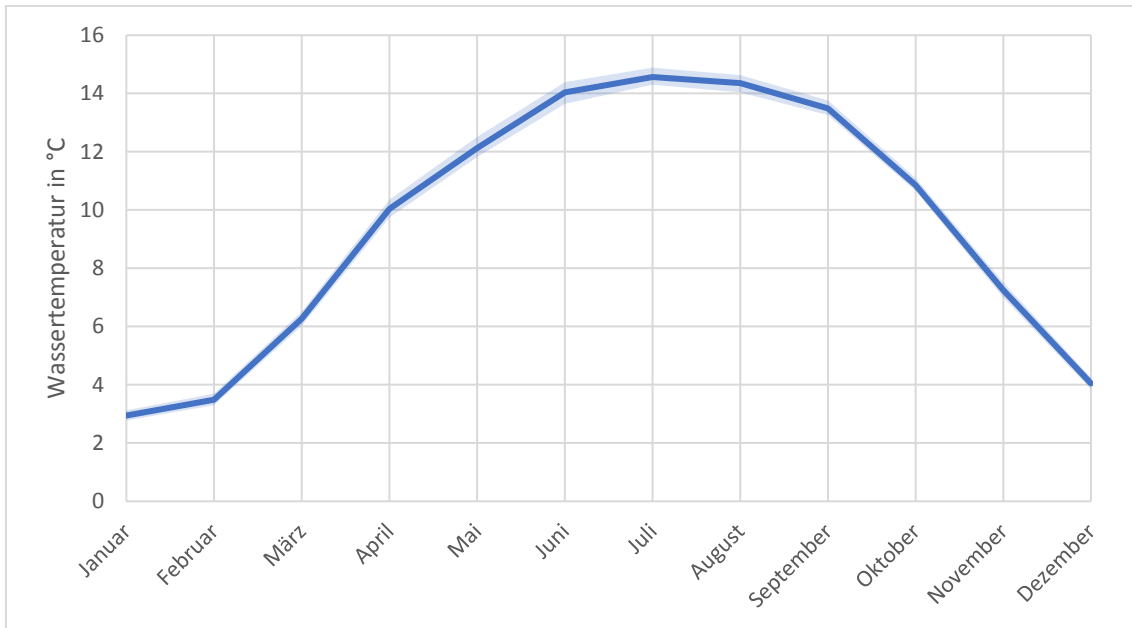


Abbildung 13: Wassertemperatur des Inns, Messstation Passau-Ingling, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

Isar

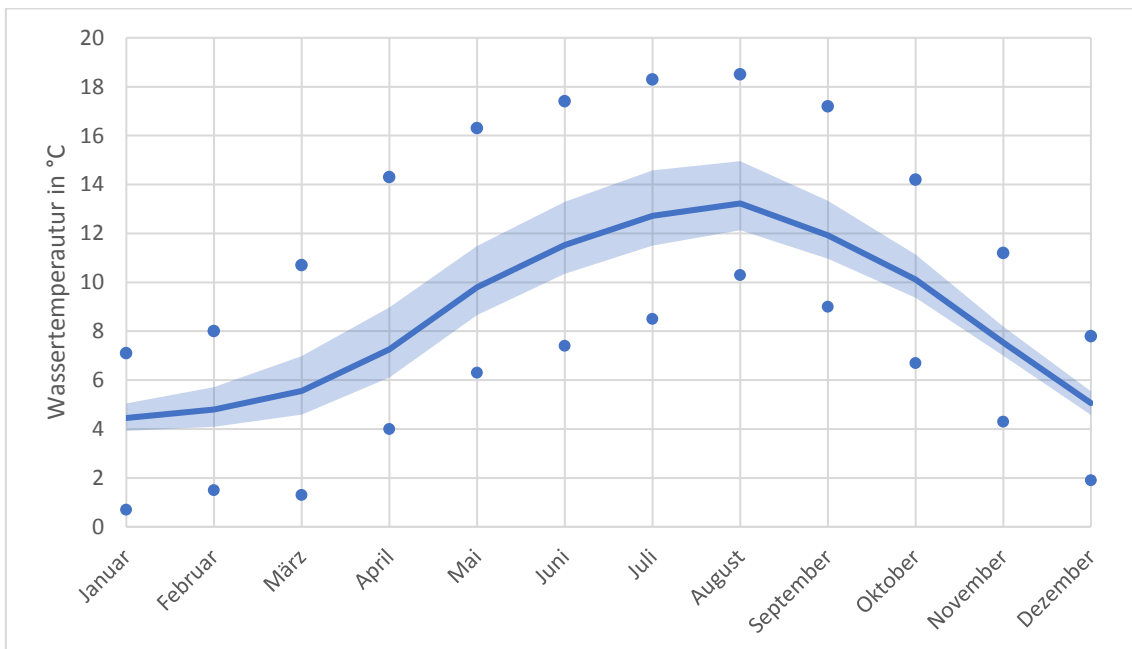


Abbildung 14: Wassertemperatur der Isar, Messstation Lenggries, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

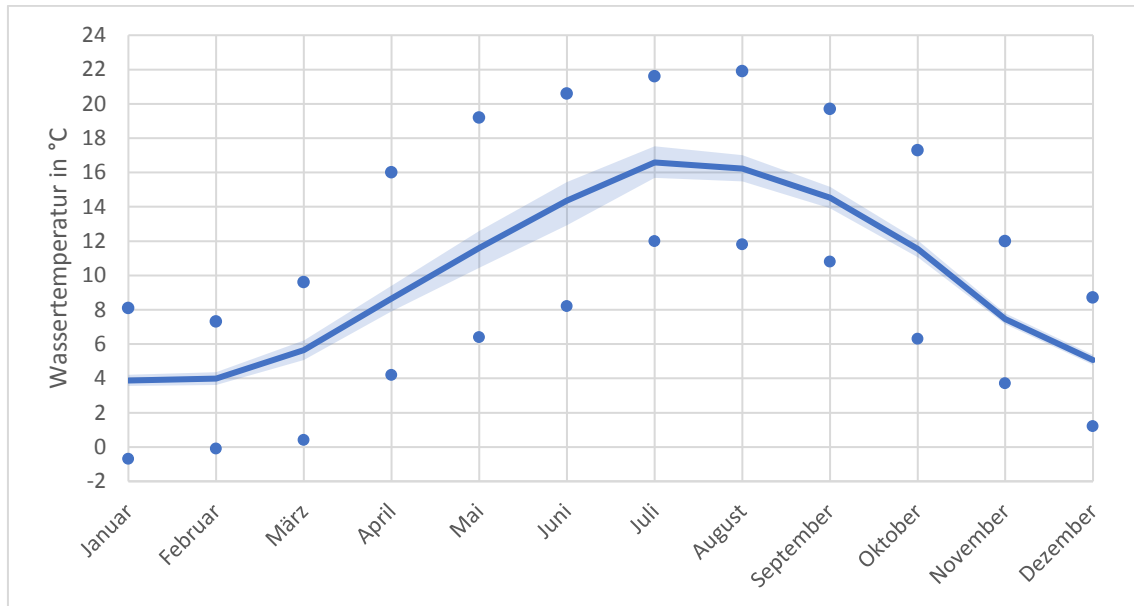


Abbildung 15: Wassertemperatur der Isar, Messstation München, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

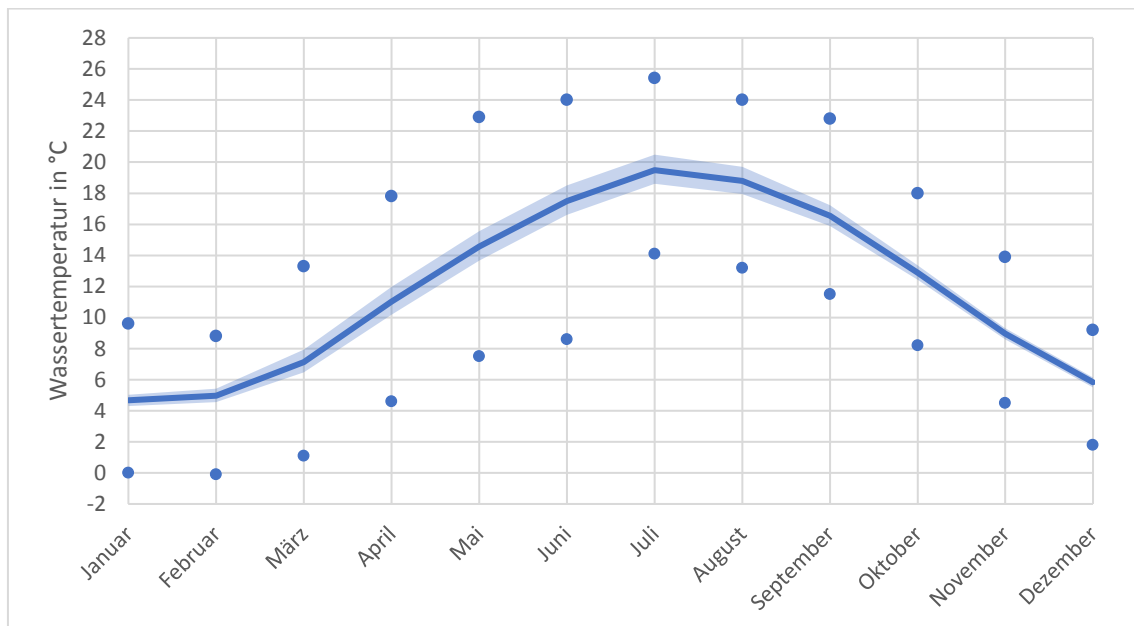


Abbildung 16: Wassertemperatur der Isar, Messstation Landshut-Birket, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

Kinzig

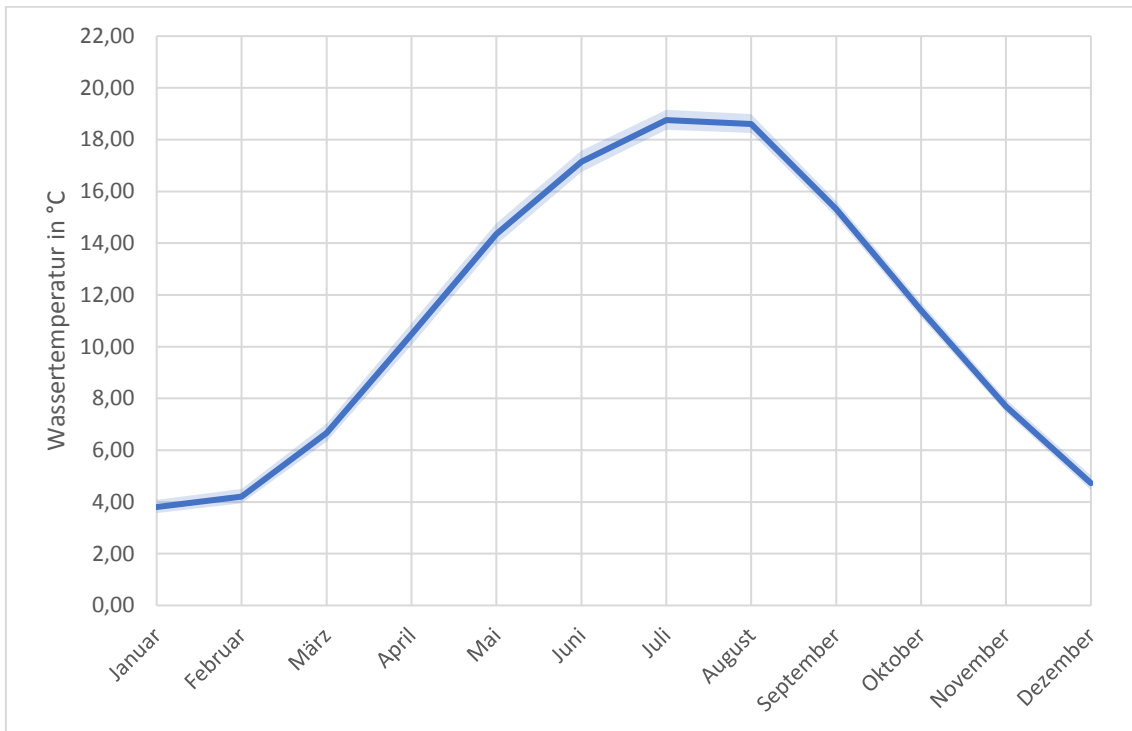


Abbildung 17: Wassertemperatur der Kinzig, Messstation Hanau, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2016

Lahn

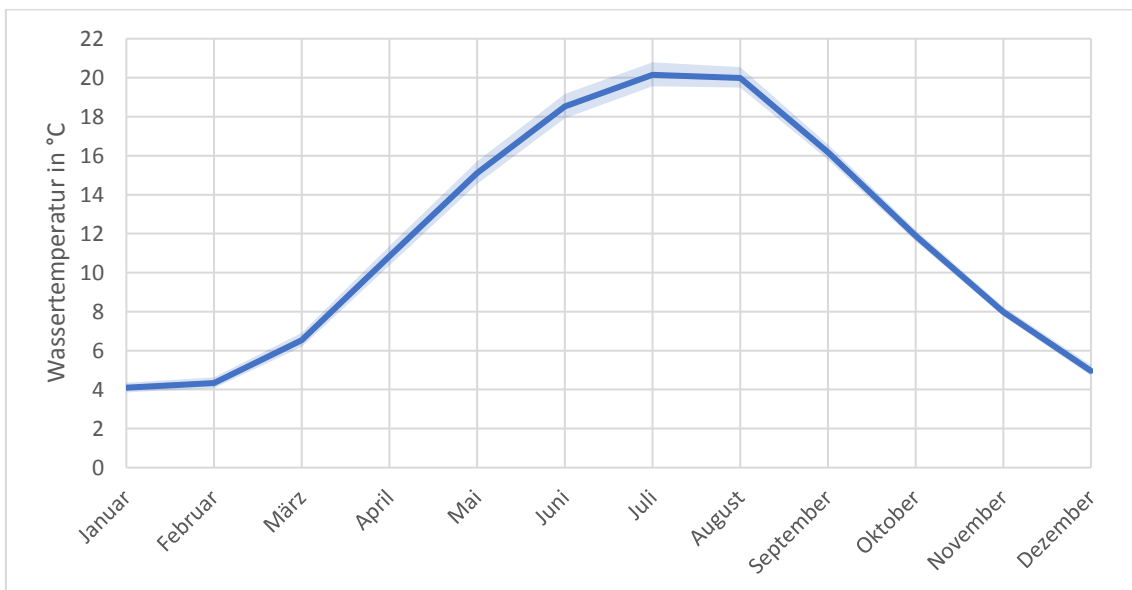


Abbildung 18: Wassertemperatur der Lahn, Messstation Oberbiel, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2016

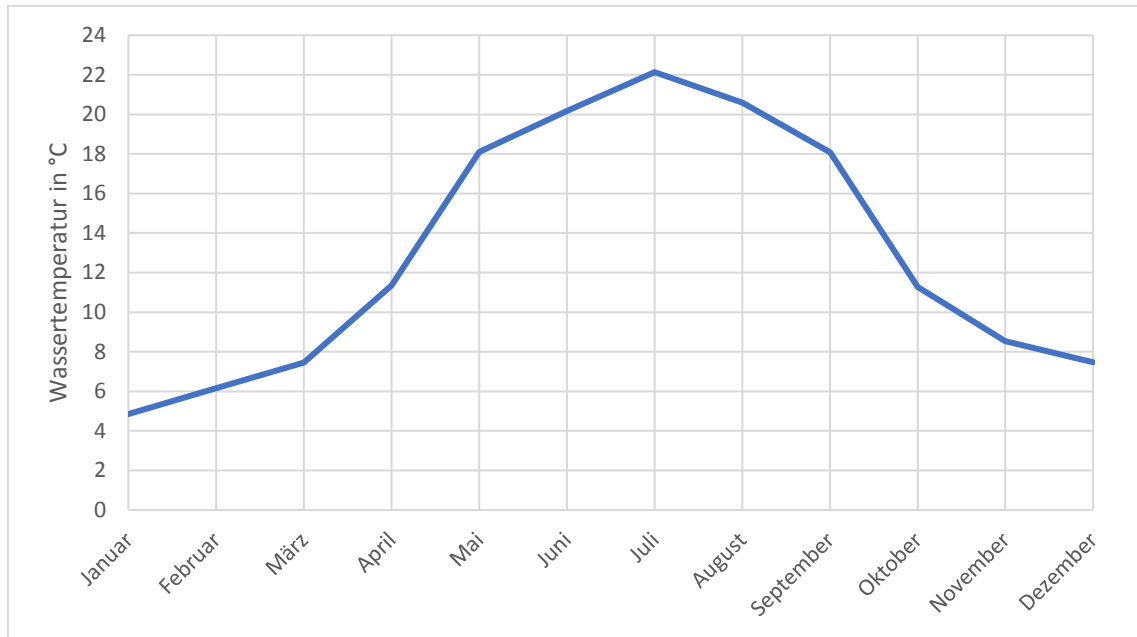


Abbildung 19: Wassertemperatur der Lahn, Messstation Kalkofen, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2016

Lech

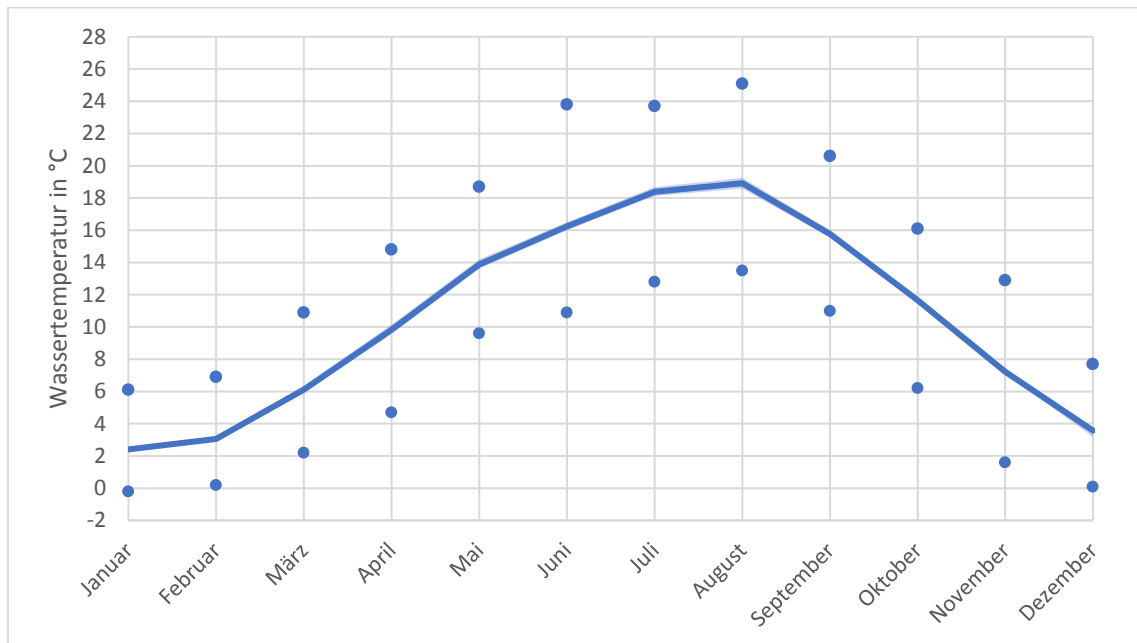


Abbildung 20: Wassertemperatur des Lechs, Messstation Augsburg Hochablass, gemittelt über den Zeitraum von 1990-2017

Main

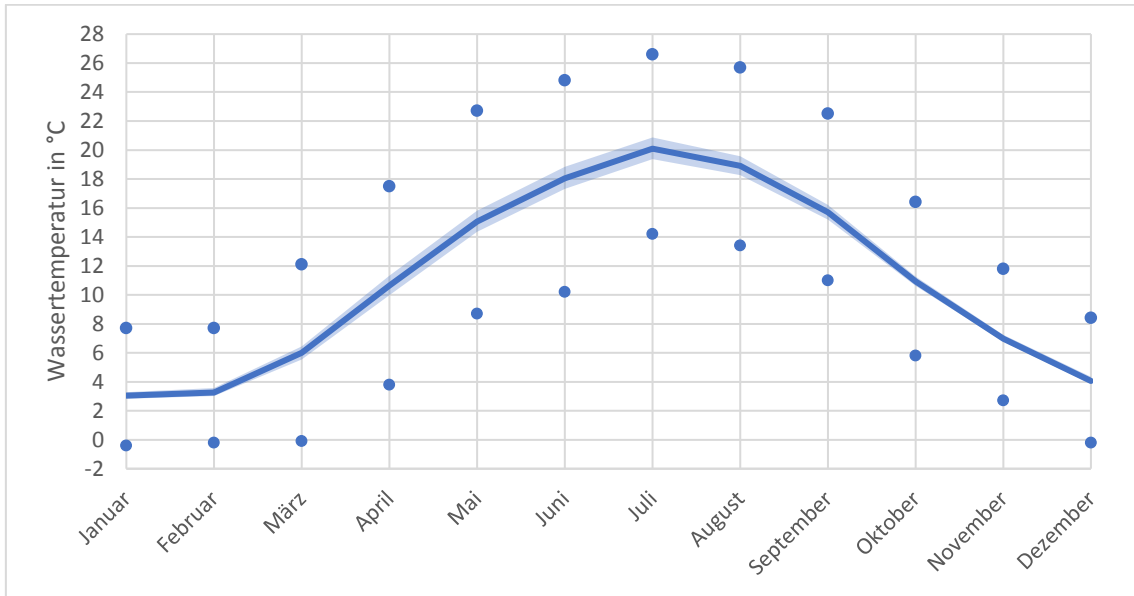


Abbildung 21: Wassertemperatur des Mains, Messstation Kemmern, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2017

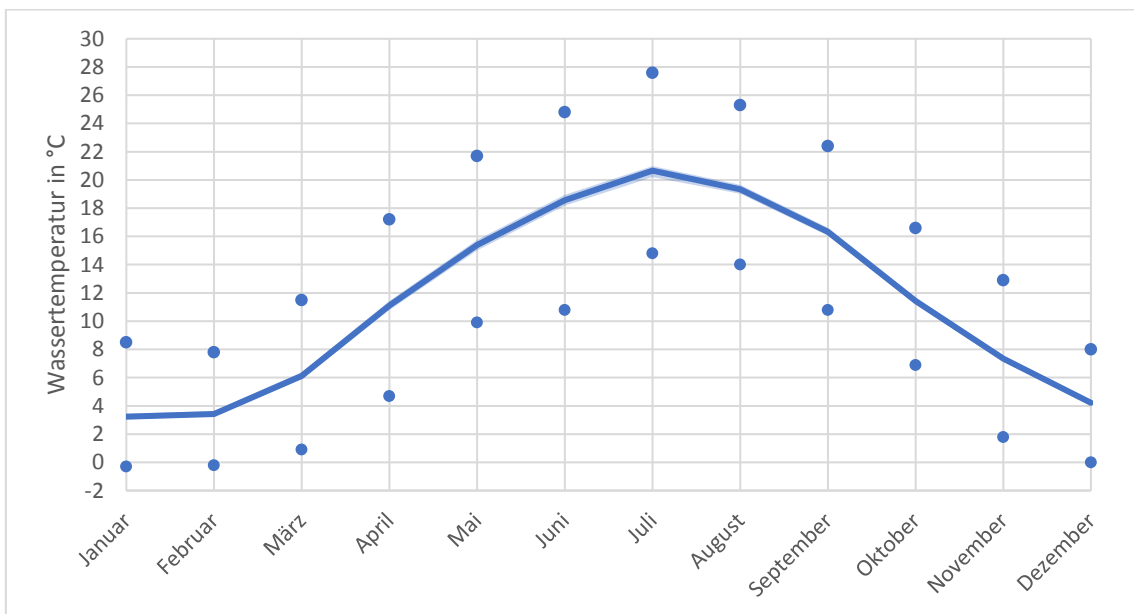


Abbildung 22: Wassertemperatur des Mains, Messstation Trunstadt, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

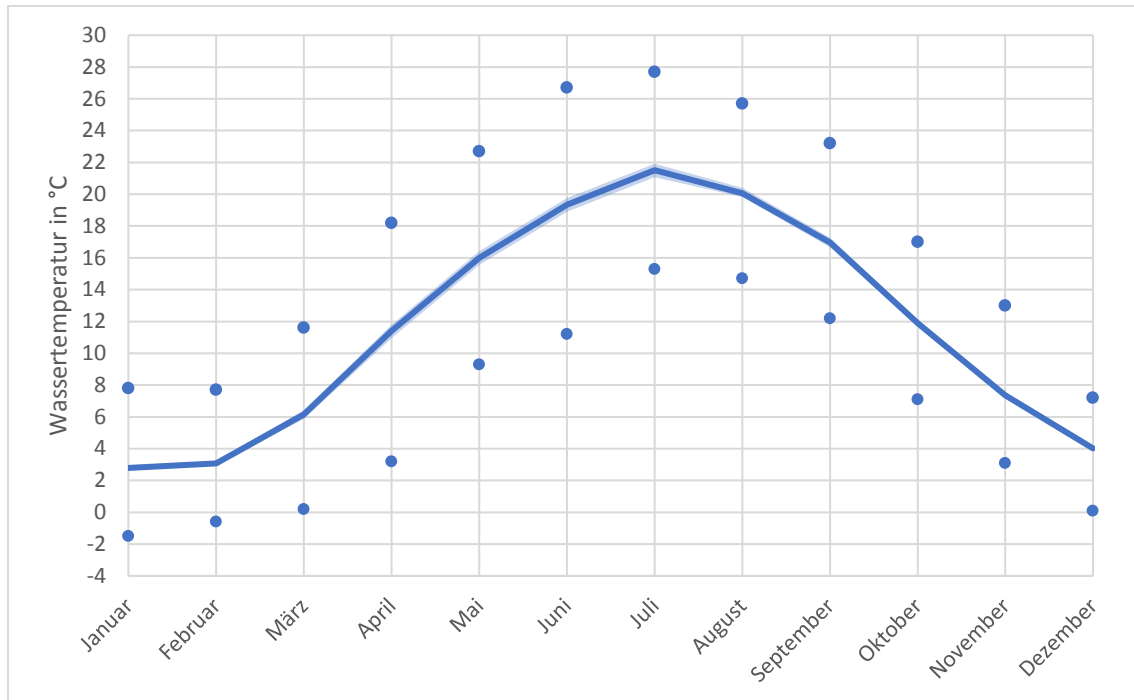


Abbildung 23: Wassertemperatur des Mains, Messstation Schweinfurt, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

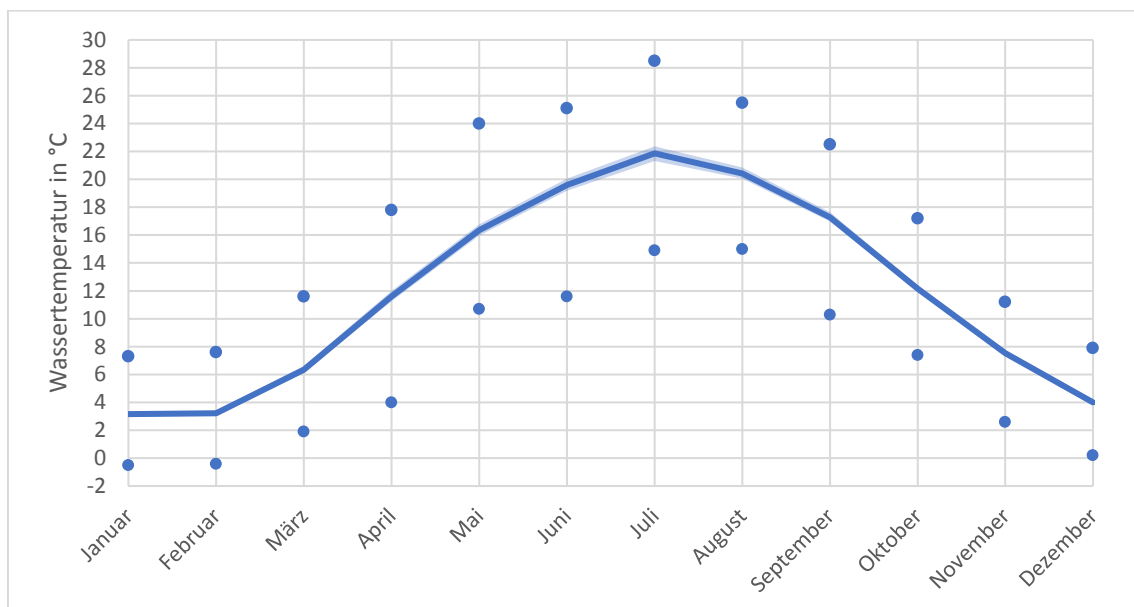


Abbildung 24: Wassertemperatur des Mains, Messstation Würzburg, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

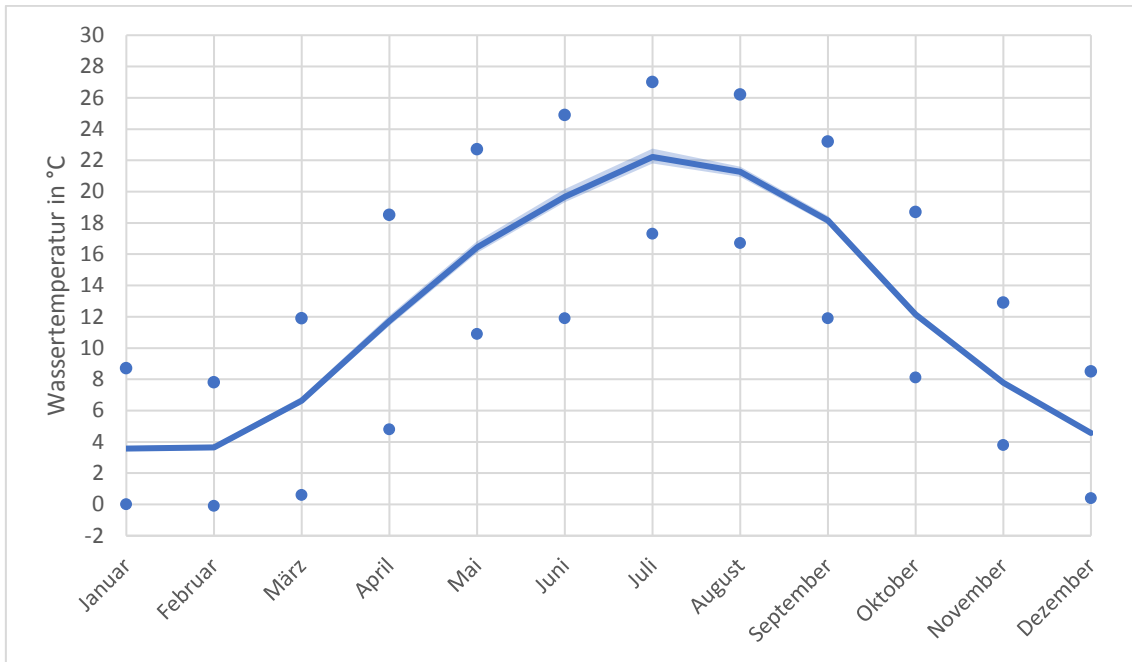


Abbildung 25: Wassertemperatur des Mains, Messstation Kleinheubach, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

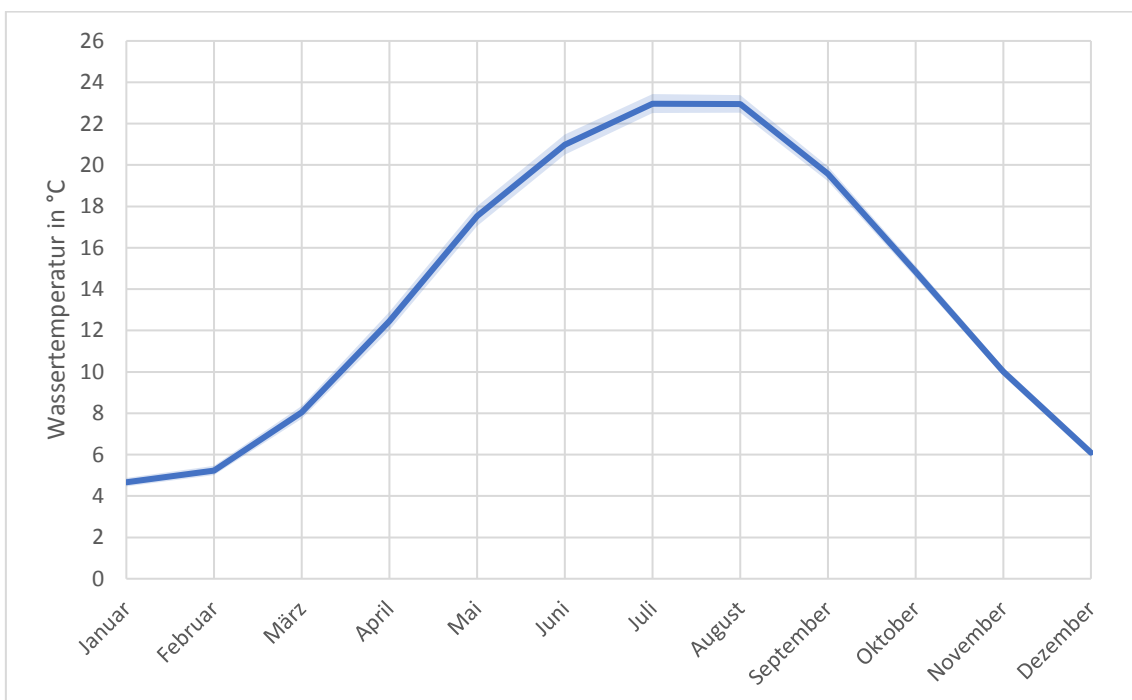


Abbildung 26: Wassertemperatur des Mains, Messstation Bischofsheim, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2016

Mindel

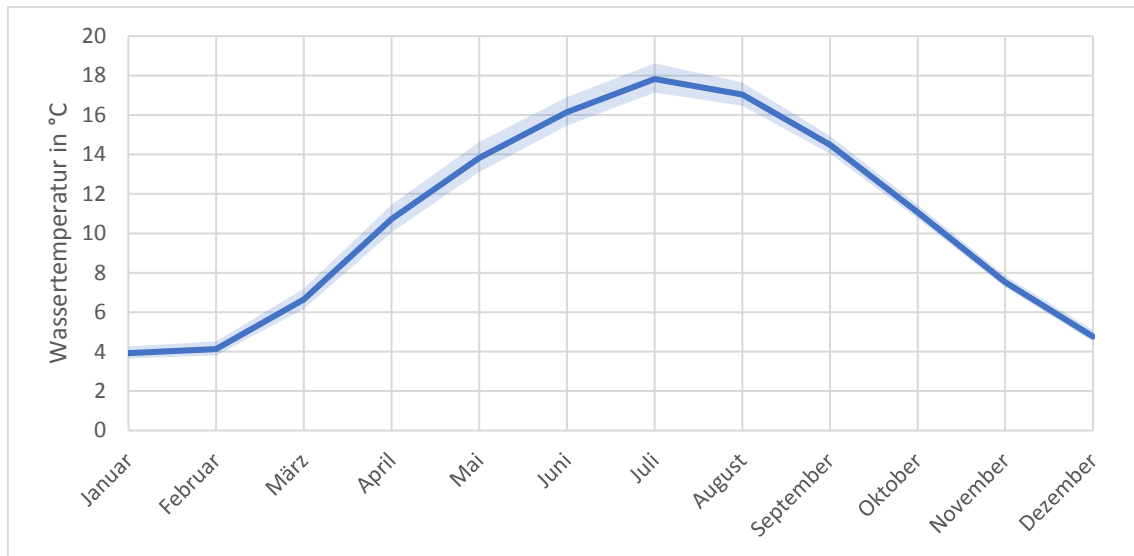


Abbildung 27: Wassertemperatur der Mindel, Messstation Offingen, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

Mosel

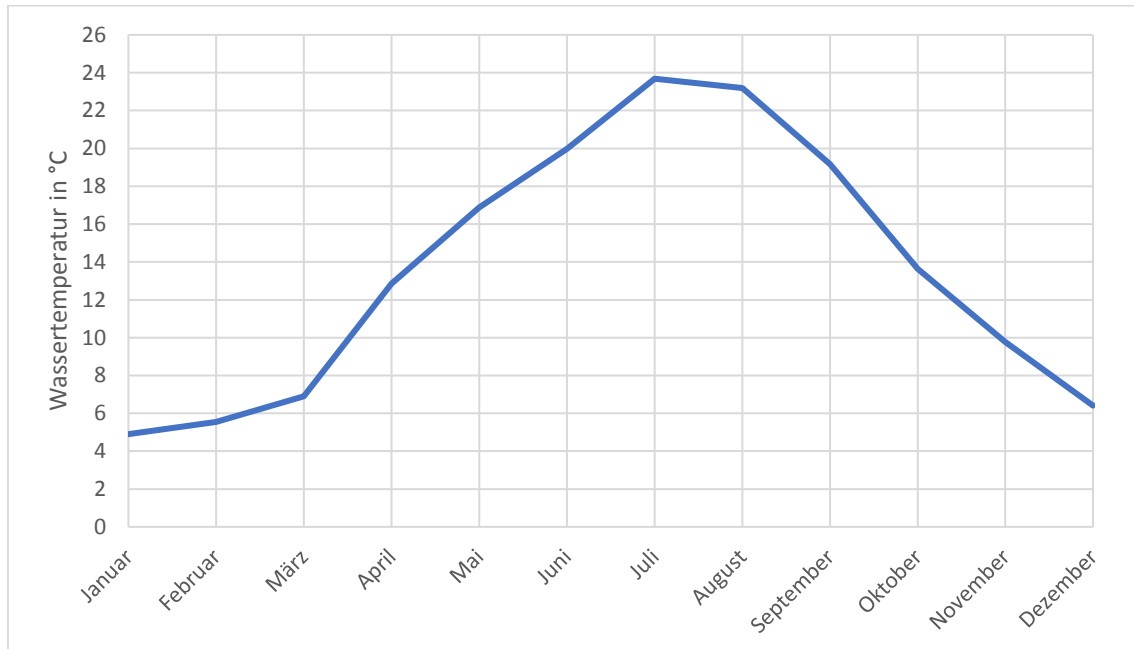


Abbildung 28 Wassertemperatur der Mosel, Messstation Frankel, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2016

Naab

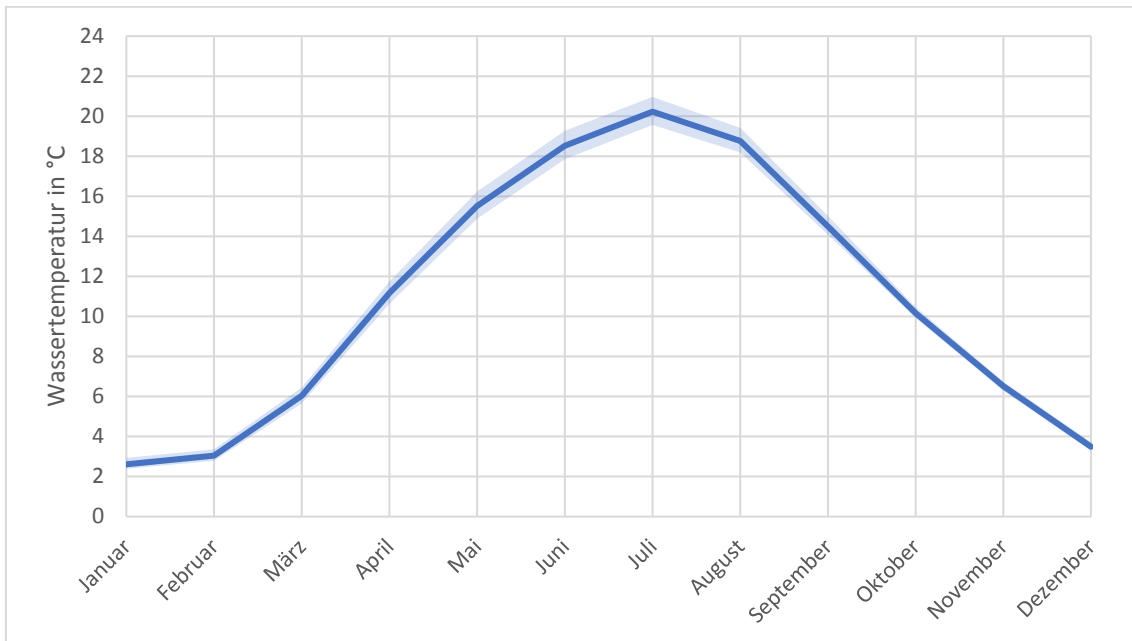


Abbildung 29: Wassertemperatur der Naab, Messstation Heitzenhofen, gemittelt über den Zeitraum von 2006-2017

Neckar

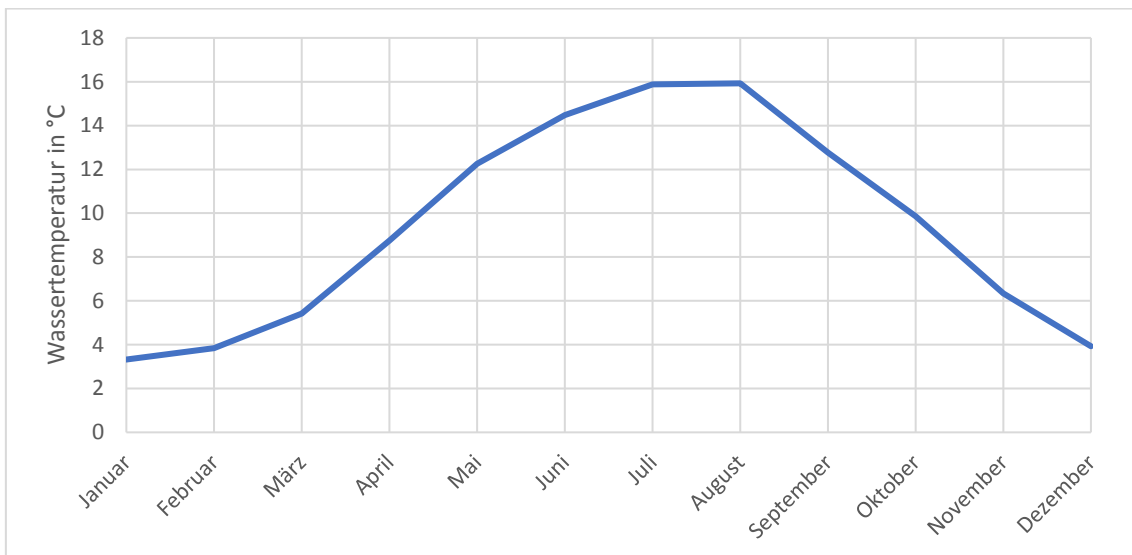


Abbildung 30: Wassertemperatur des Neckars, Messstation Rottweil, gemittelt über den Zeitraum von 1989-2013

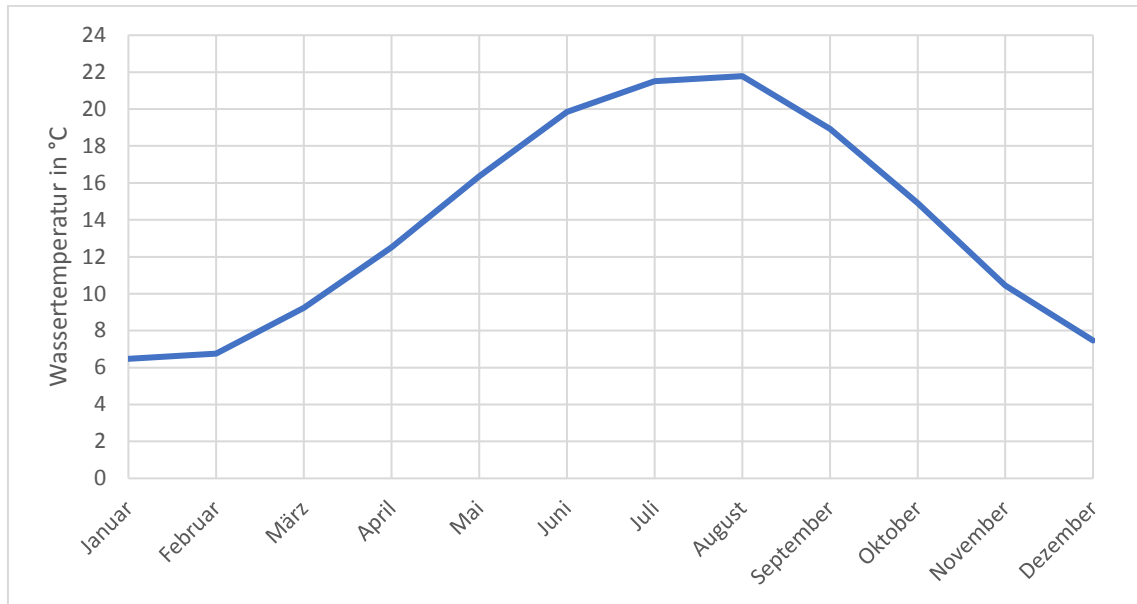


Abbildung 31: Wassertemperatur des Neckars, Messstation Gundelsheim, gemittelt über den Zeitraum von 1972-2013

Nidda

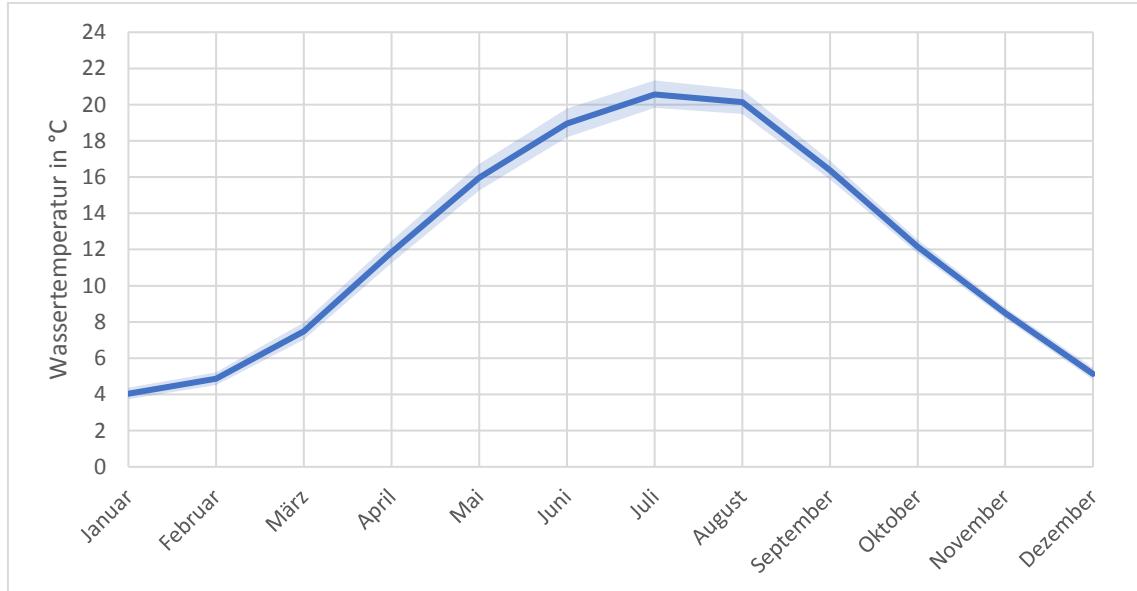


Abbildung 32: Wassertemperatur der Nidda, Messstation Frankfurt/Main-Nied, gemittelt über den Zeitraum von 1994-2016

Regen

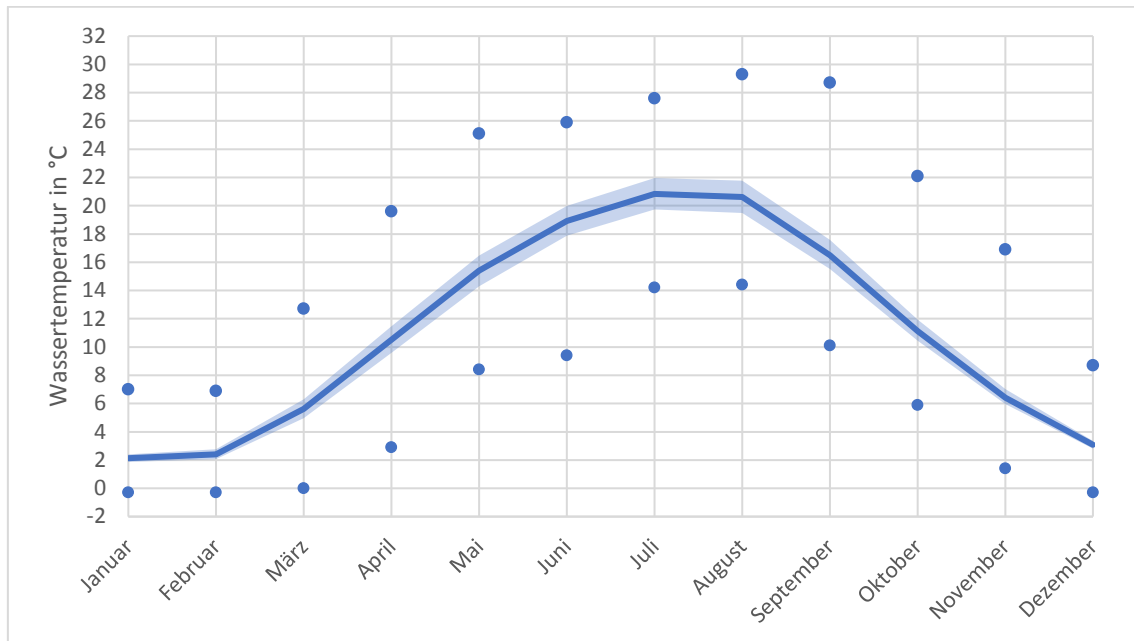


Abbildung 33: Wassertemperatur des Regens, Messstation Marienthal, gemittelt über den Zeitraum von 2004-2017

Regnitz

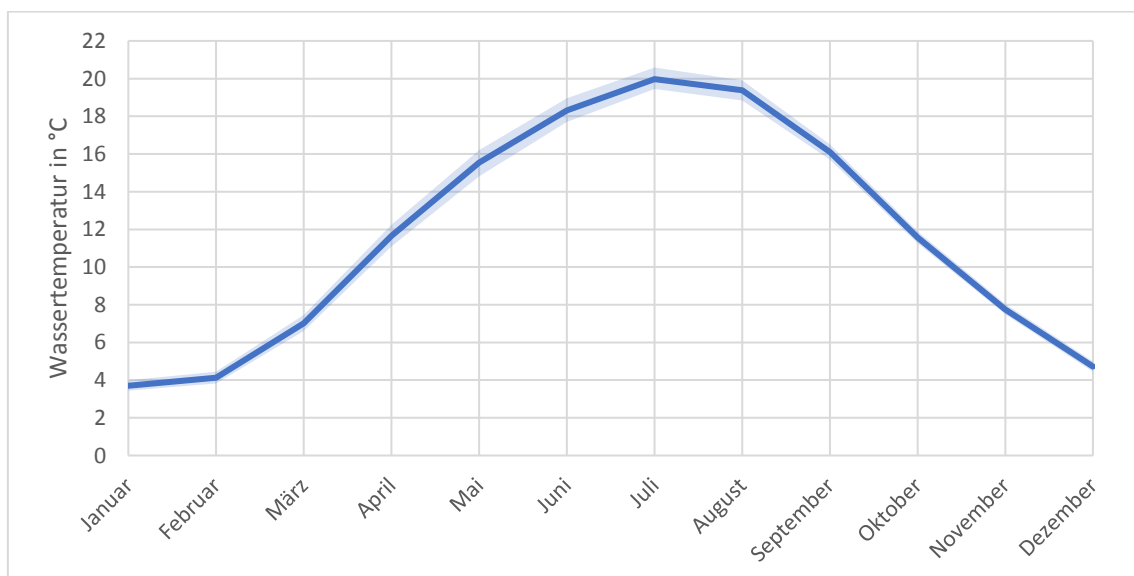


Abbildung 34: Wassertemperatur der Regnitz, Messstation Pettstadt, gemittelt über den Zeitraum von 2007-2017

Rhein

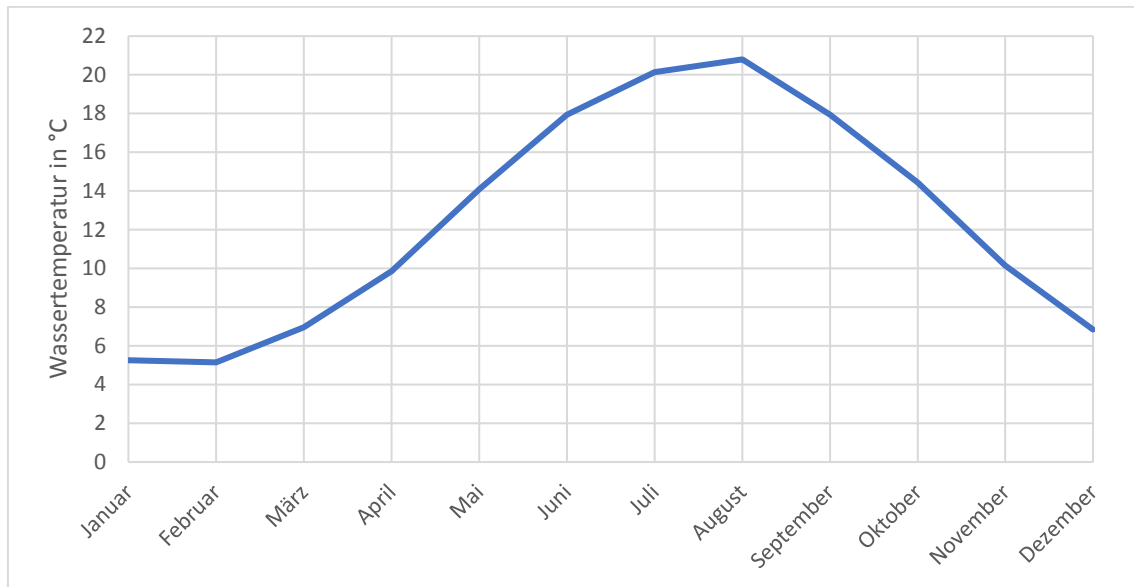


Abbildung 35: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Rheinfelden, gemittelt über den Zeitraum von 1993-2015

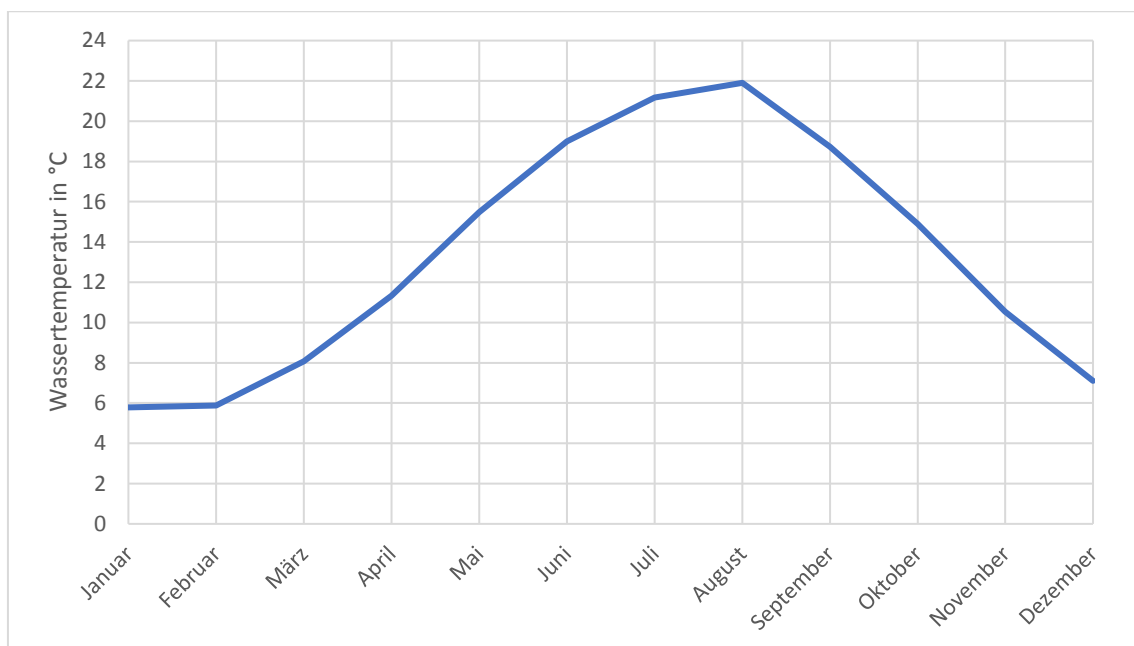


Abbildung 36: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Iffezheim, gemittelt über den Zeitraum von 1992-2015

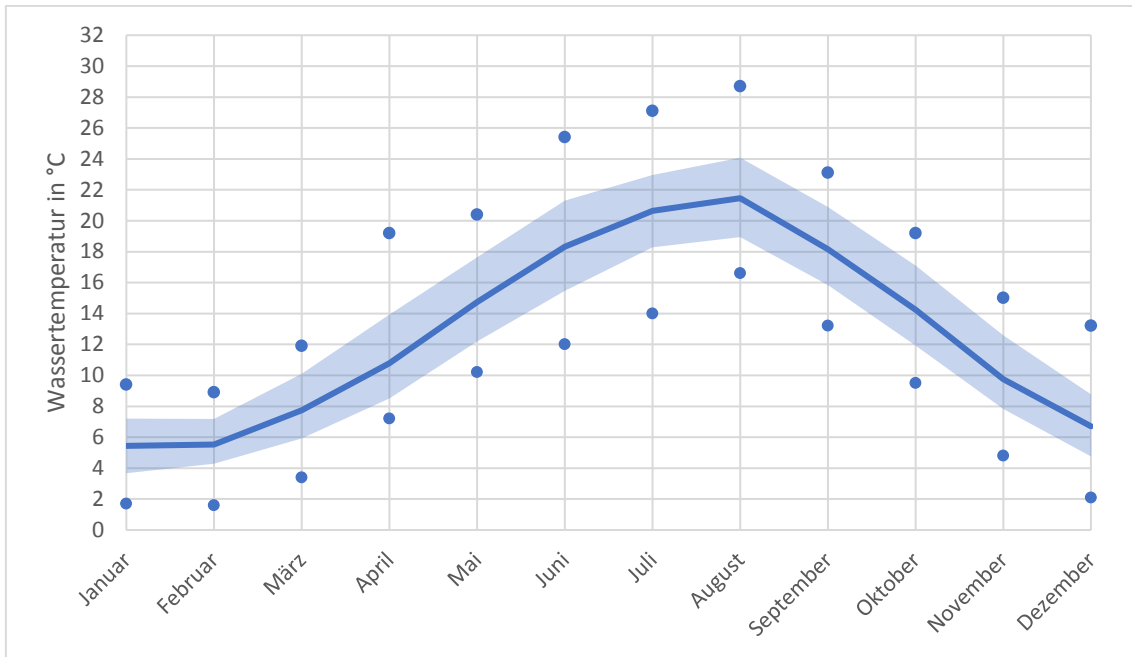


Abbildung 37: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Plittersdorf, gemittelt über den Zeitraum von 1991-2007

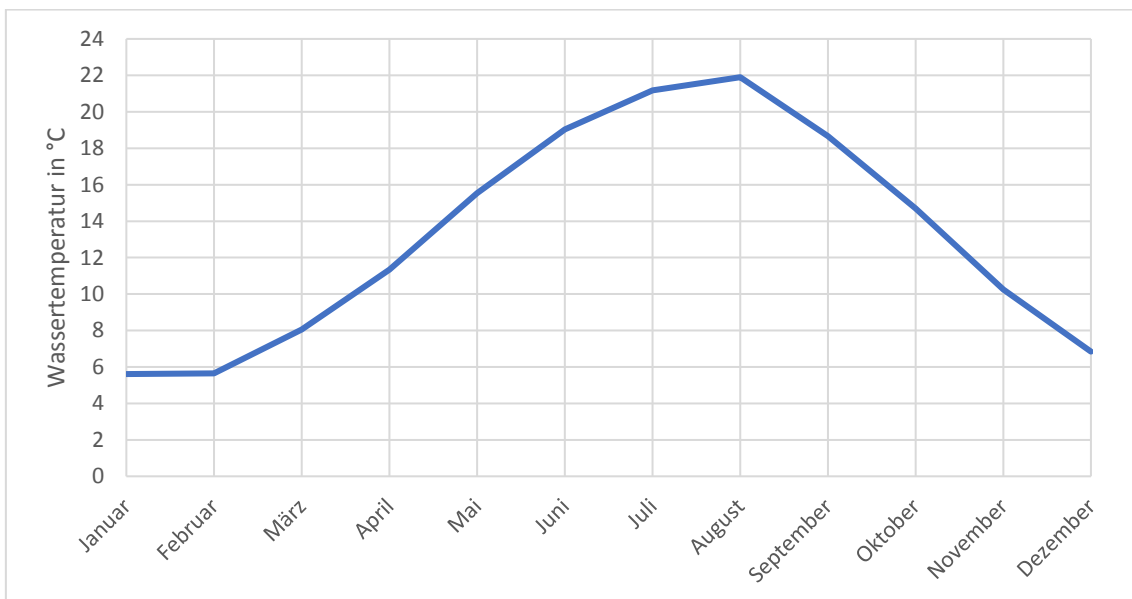


Abbildung 38: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Karlsruhe, gemittelt über den Zeitraum von 1990-2015

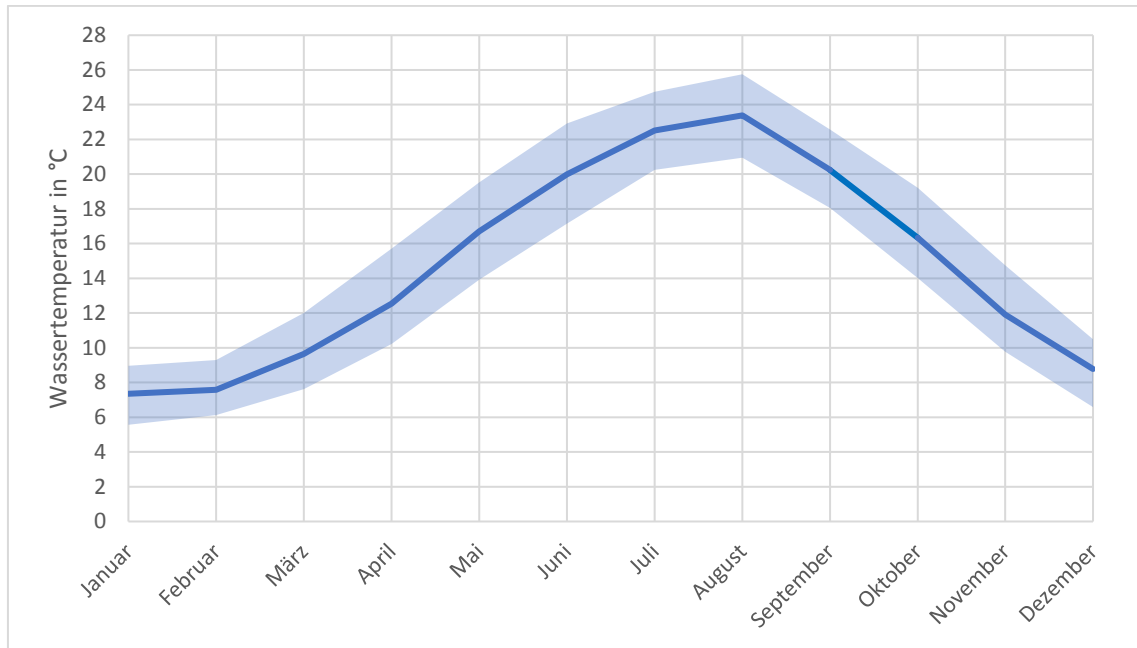


Abbildung 39: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Worms, gemittelt über den Zeitraum von 1988-2007

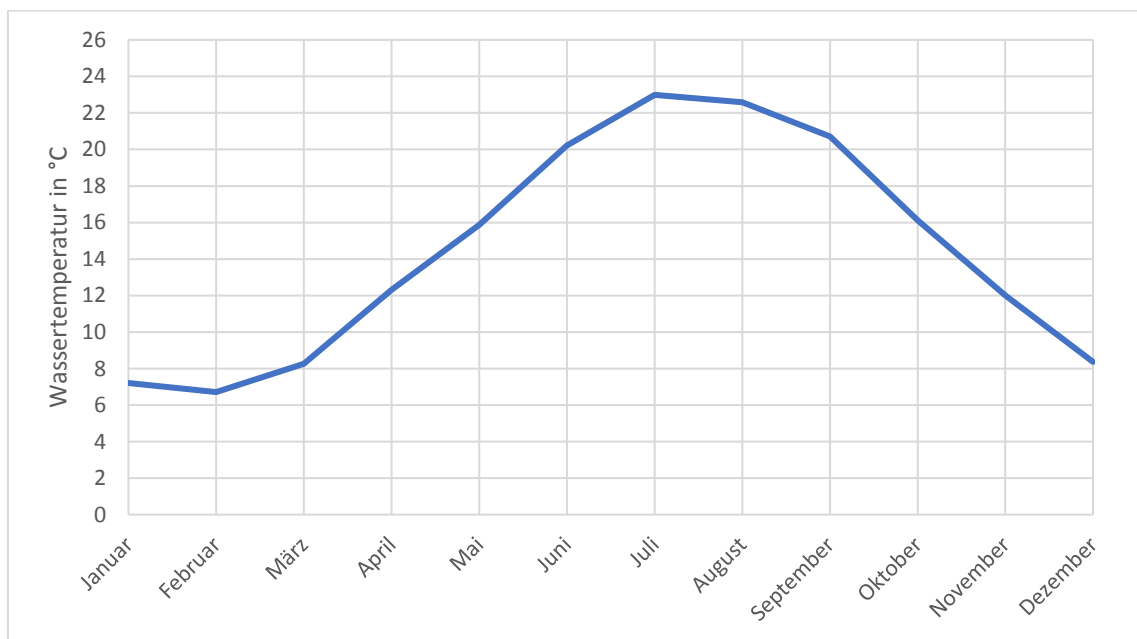


Abbildung 40: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Mainz, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2016

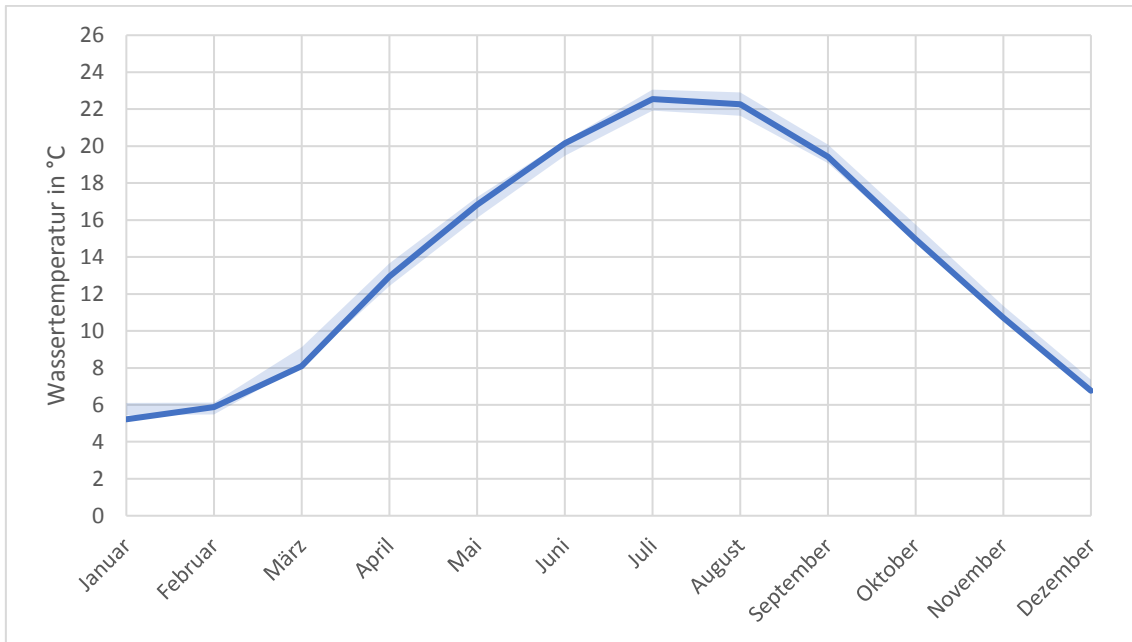


Abbildung 41: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Bad Honnef, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2017 (schlechte Datenqualität)

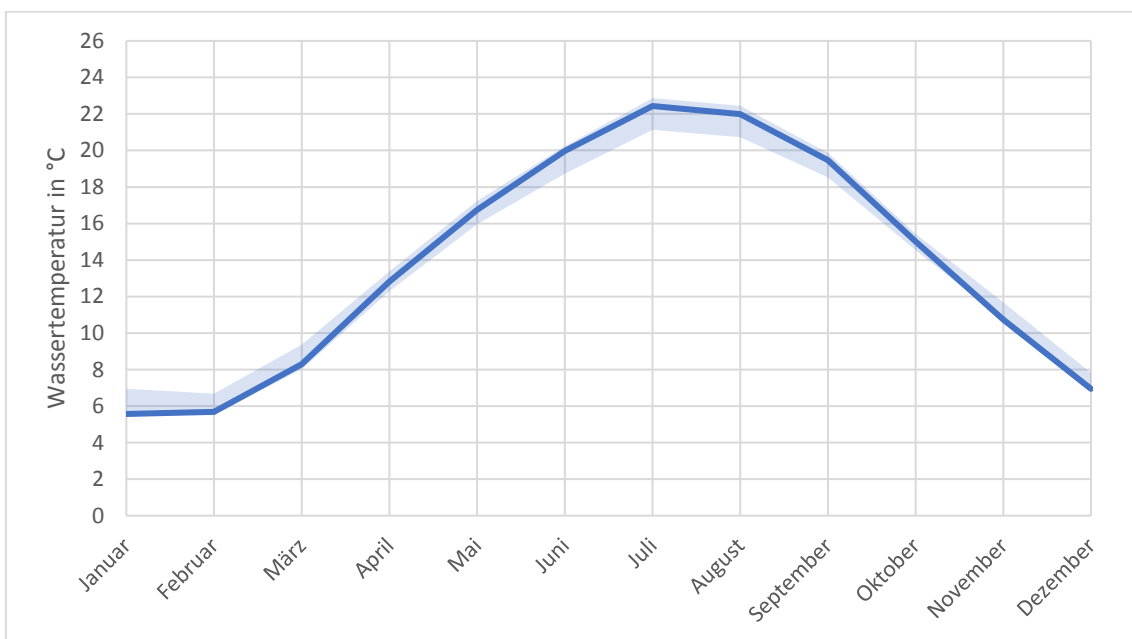


Abbildung 42: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Düsseldorf-Flehe, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2017 (schlechte Datenqualität)

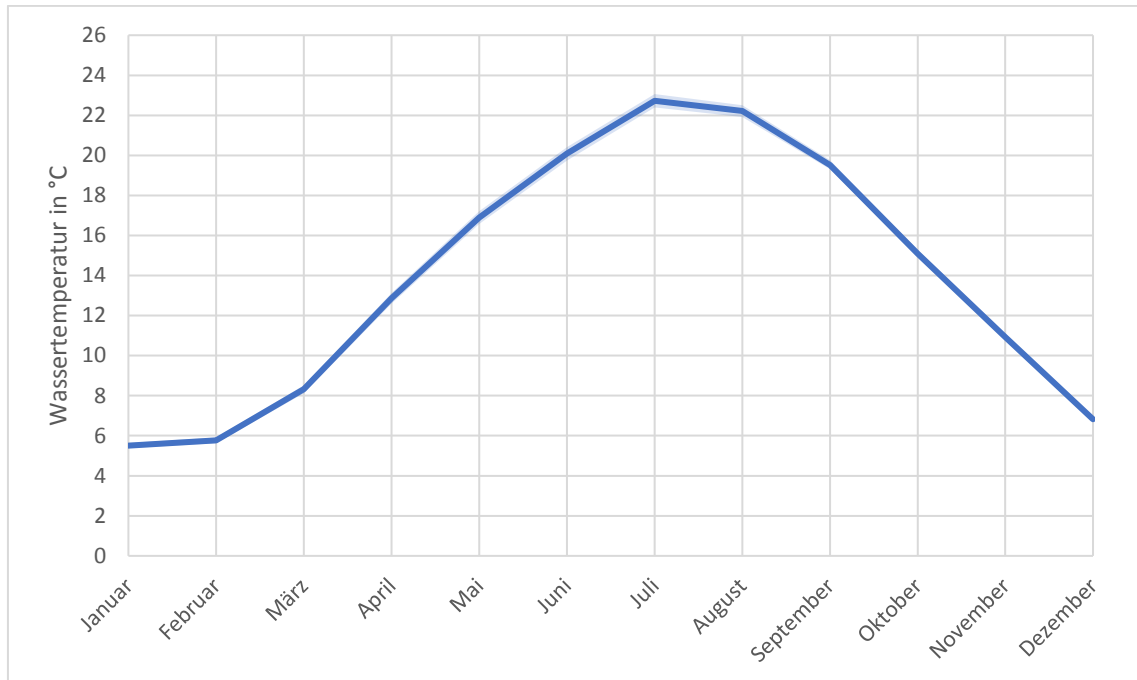


Abbildung 43: Wassertemperatur des Rheins, Messstation Lobith, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2017 (schlechte Datenqualität)

Ruhr

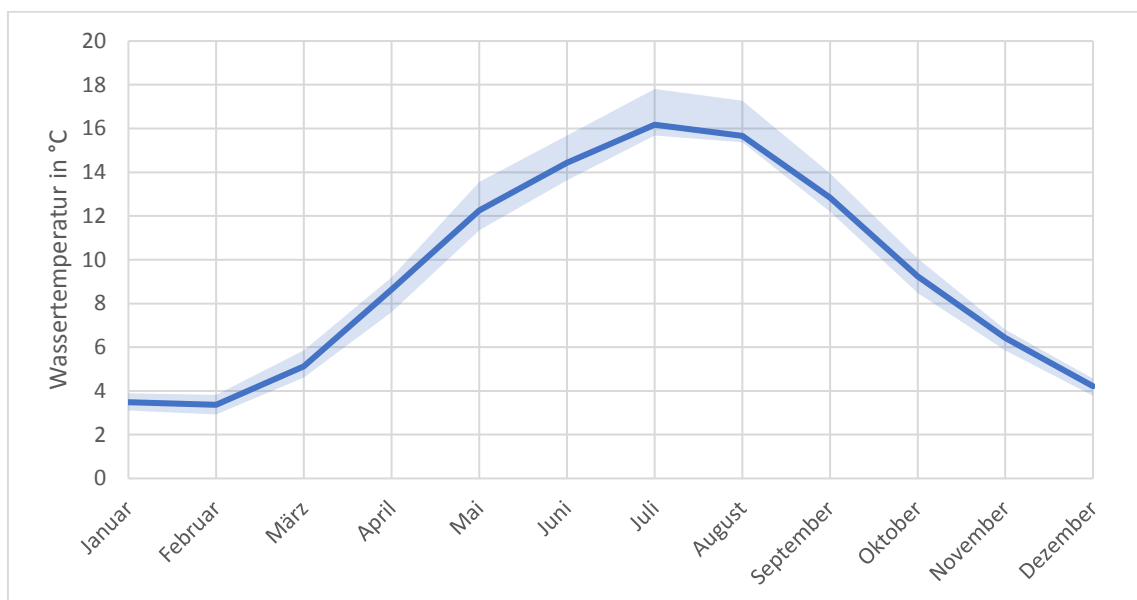


Abbildung 44: Wassertemperatur der Ruhr, Messstation Olsberg, gemittelt über den Zeitraum von 2006-2017 (schlechte Datenqualität)

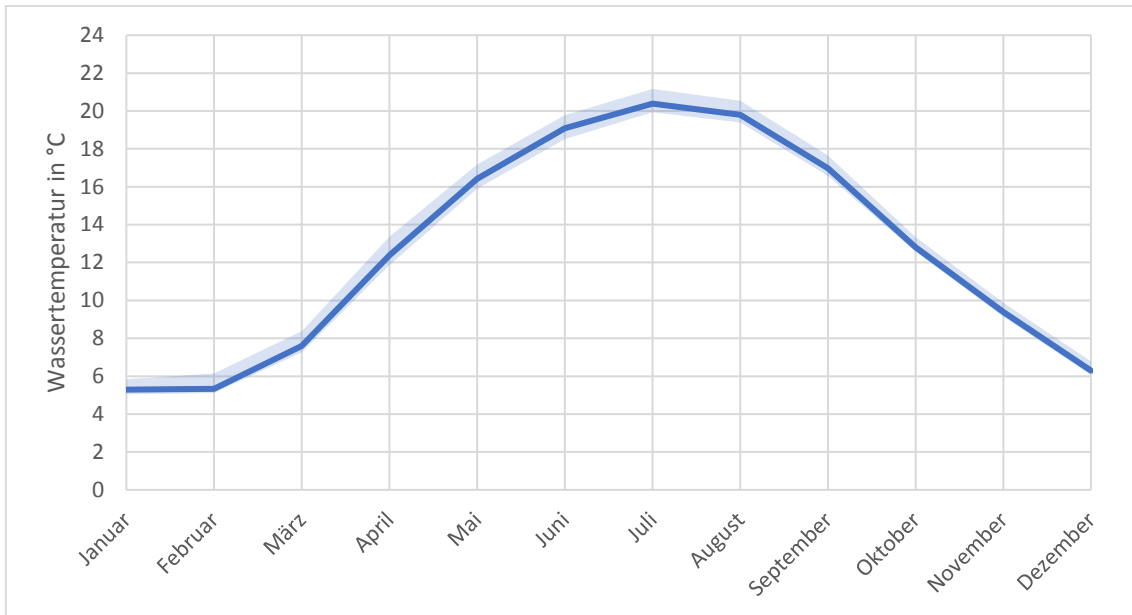


Abbildung 45: Wassertemperatur der Ruhr, Messstation Essen-Kupferdreh, gemittelt über den Zeitraum von 2006-2016 (schlechte Datenqualität)

Sieg

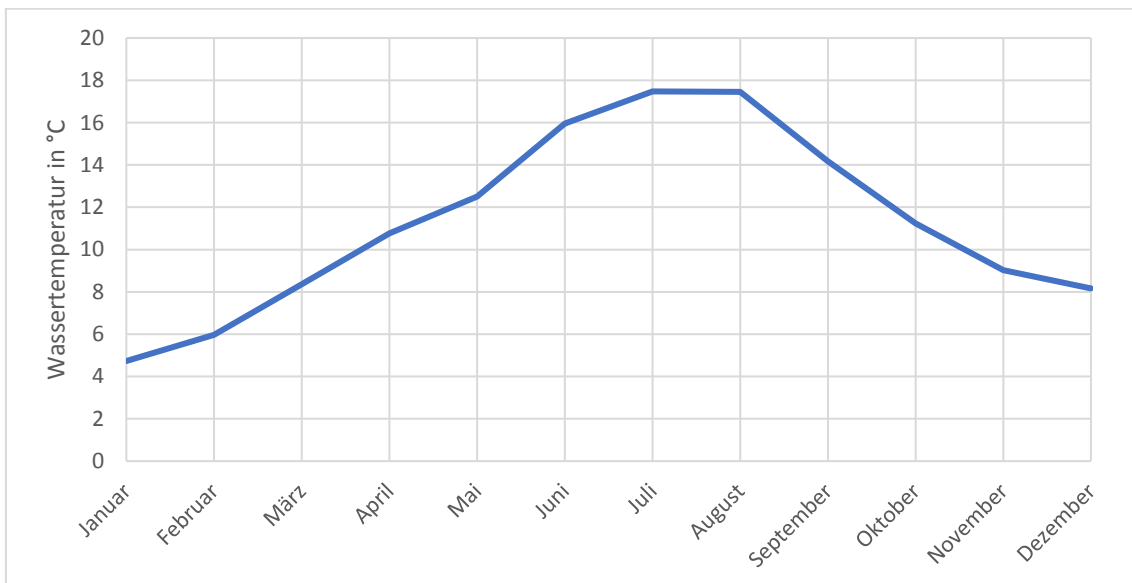


Abbildung 46: Wassertemperatur der Sieg, Messstation Mudersbach, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2017

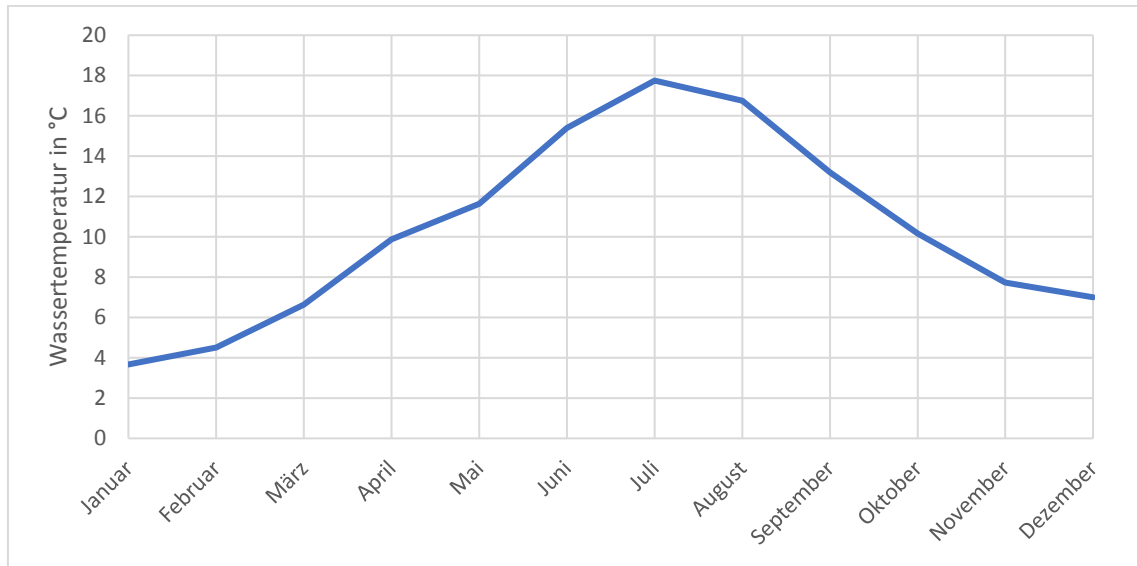


Abbildung 47: Wassertemperatur der Sieg, Messstation Hamm, gemittelt über den Zeitraum von 2014-2017

Werra

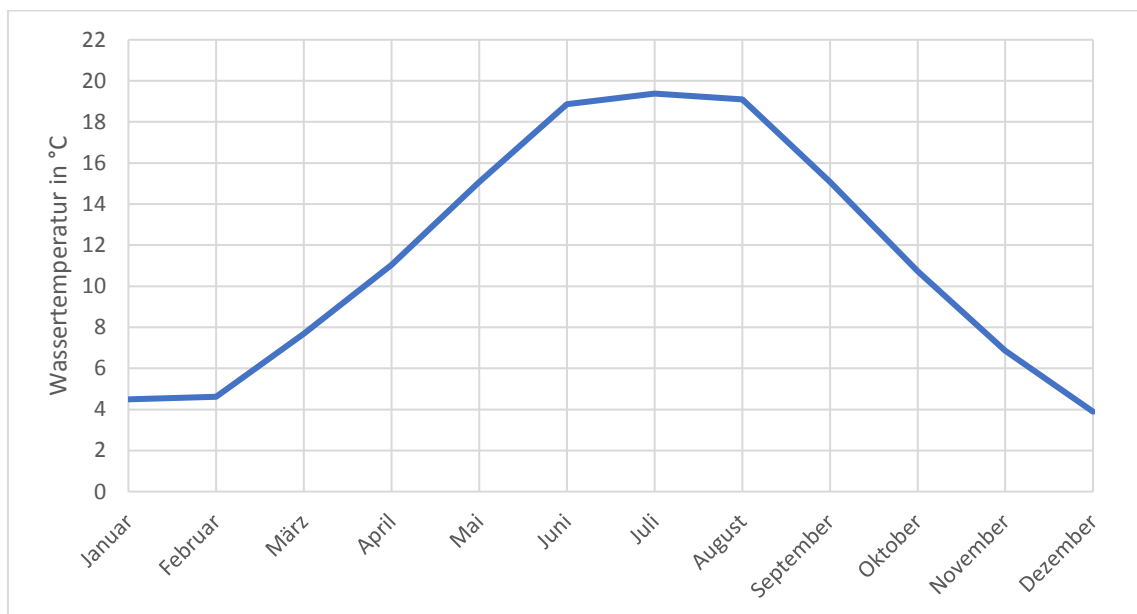


Abbildung 48: Wassertemperatur der Werra, Messstation Gerstungen, gemittelt über den Zeitraum von 1993-2004

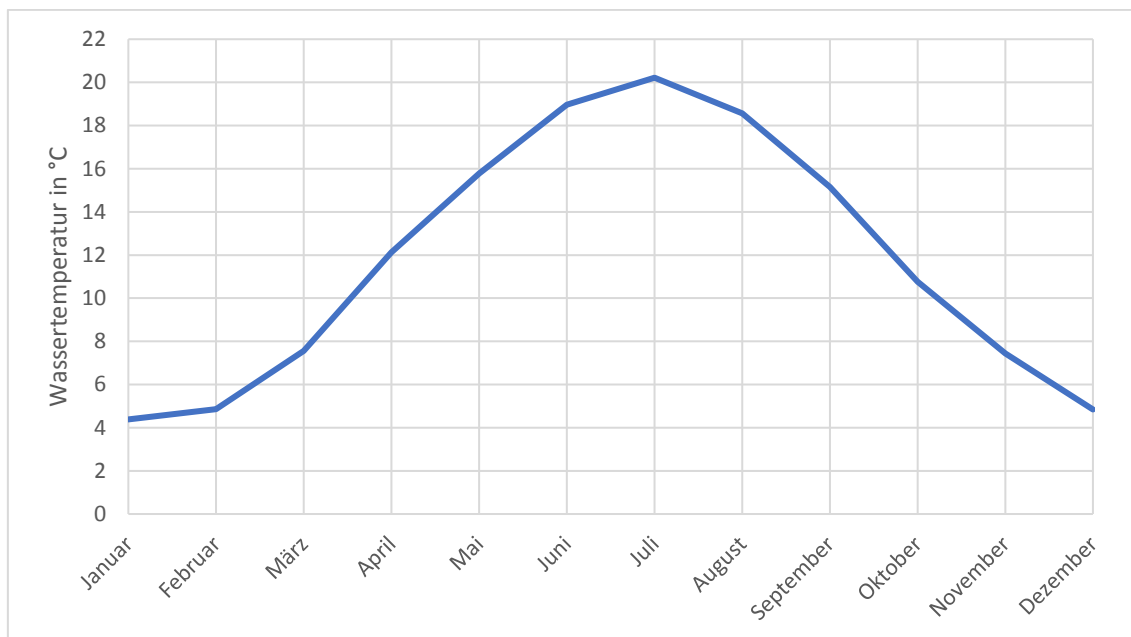


Abbildung 49: Wassertemperatur der Werra, Messtation Witzenhausen, gemittelt über den Zeitraum von 2003-2015

Untersuchung der Referenzgewässer

Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur

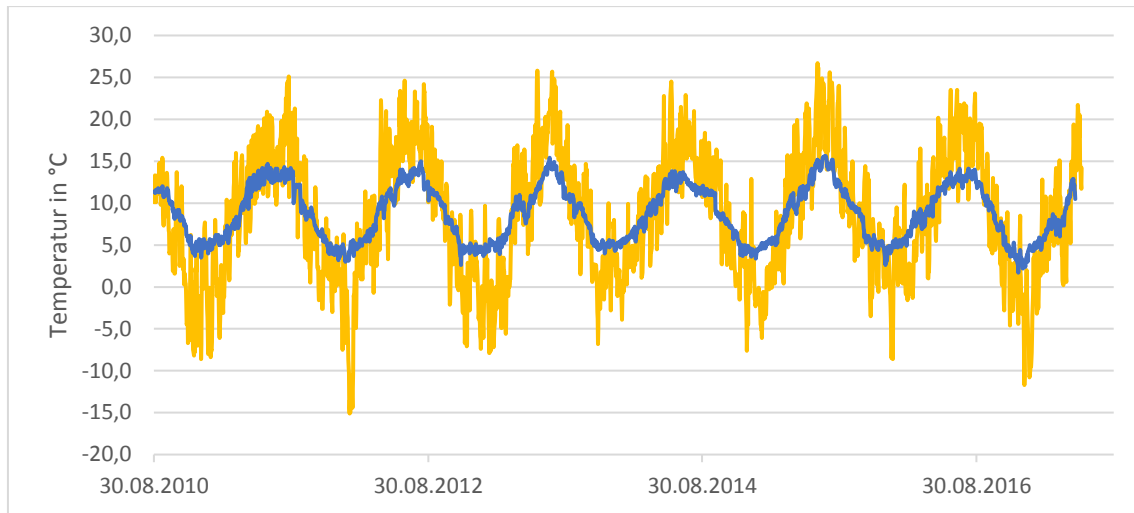


Abbildung 50: Temperaturverläufe der Tagesmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation Lenggries (Isar) vom 30.08.2010 bis 08.06.2017, Lufttemperaturwerte der Station Holzkirchen

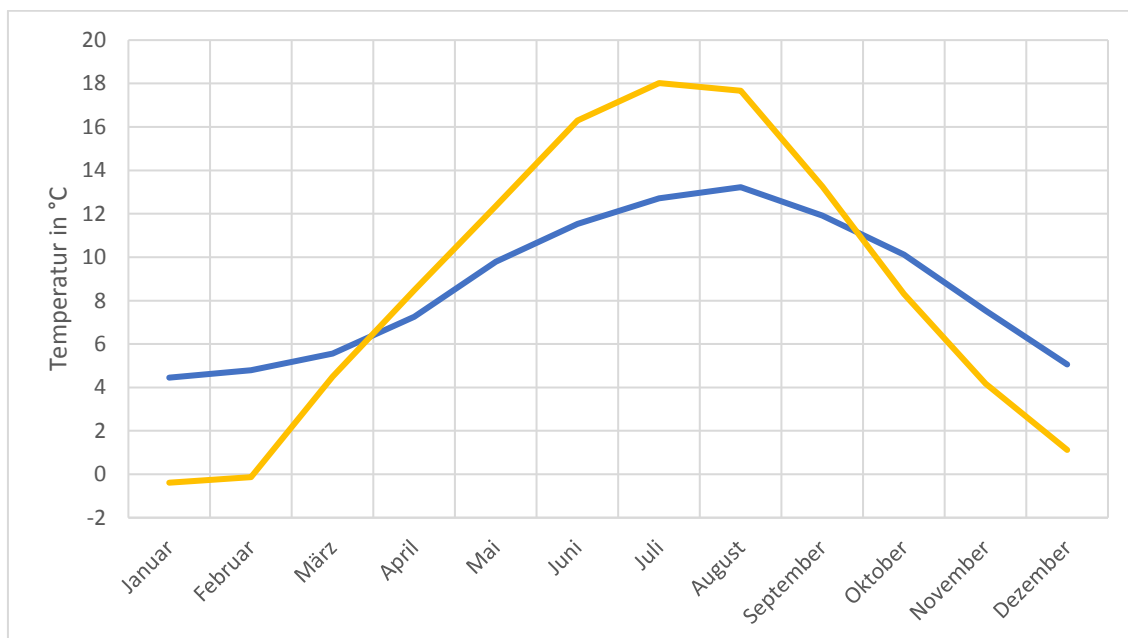


Abbildung 51: Jahresverläufe der Monatsmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation Lenggries (Isar), Lufttemperaturwerte der Station Holzkirchen

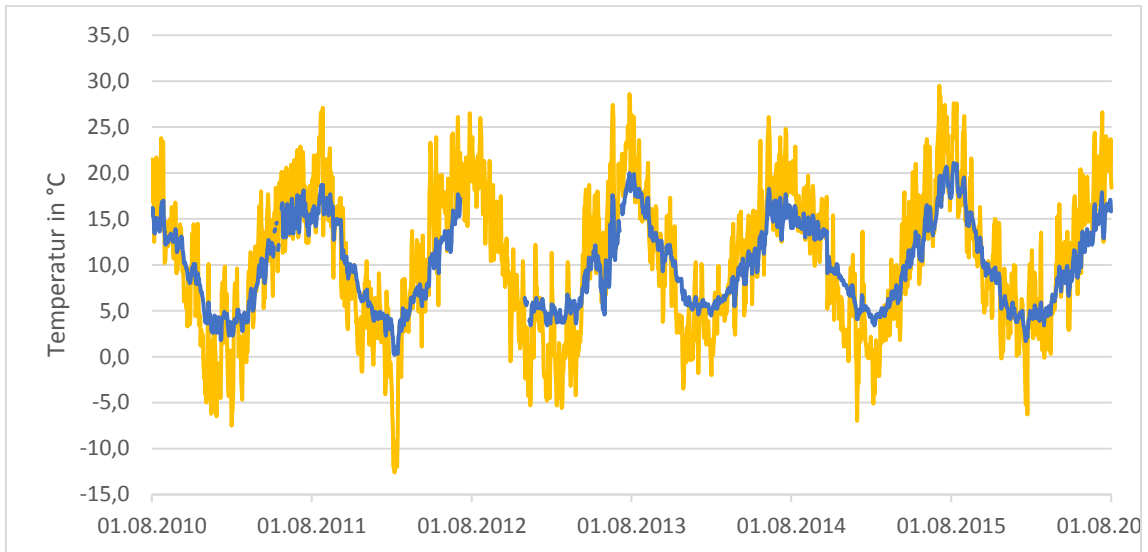


Abbildung 52: Temperaturverläufe der Tagesmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation München (Isar) vom 01.08.2010 bis 01.08.2016, Wassertemperaturdaten von 06.07.2012 bis 30.11.2012 nicht verfügbar

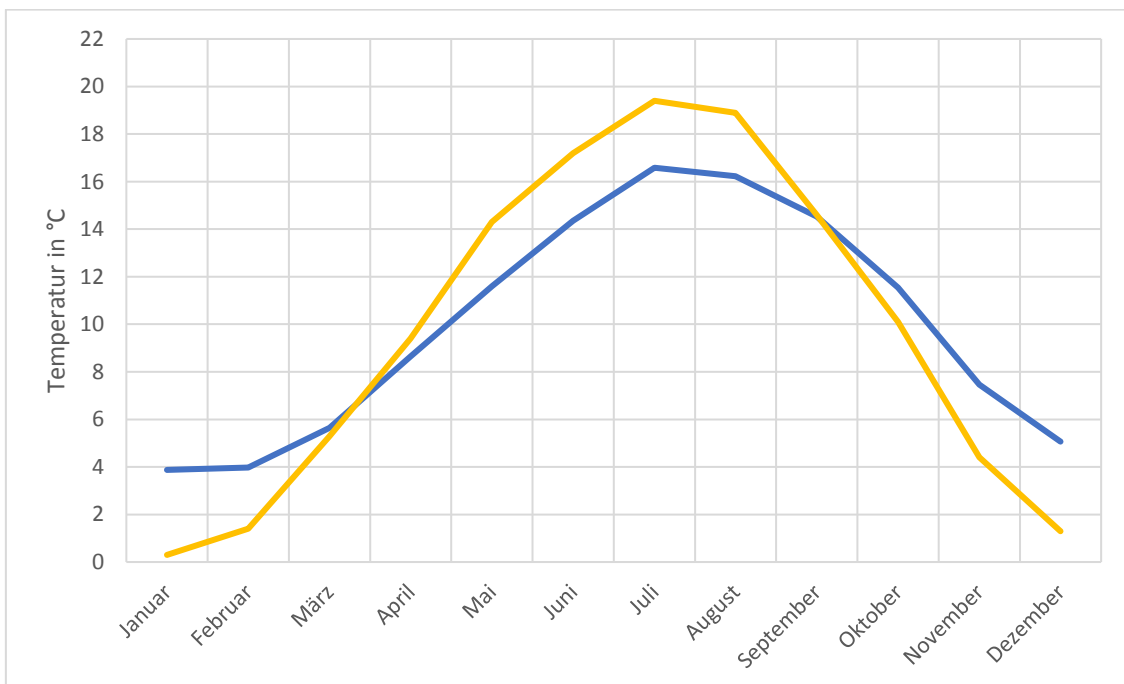


Abbildung 53: Jahresverläufe der Monatsmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation München (Isar)

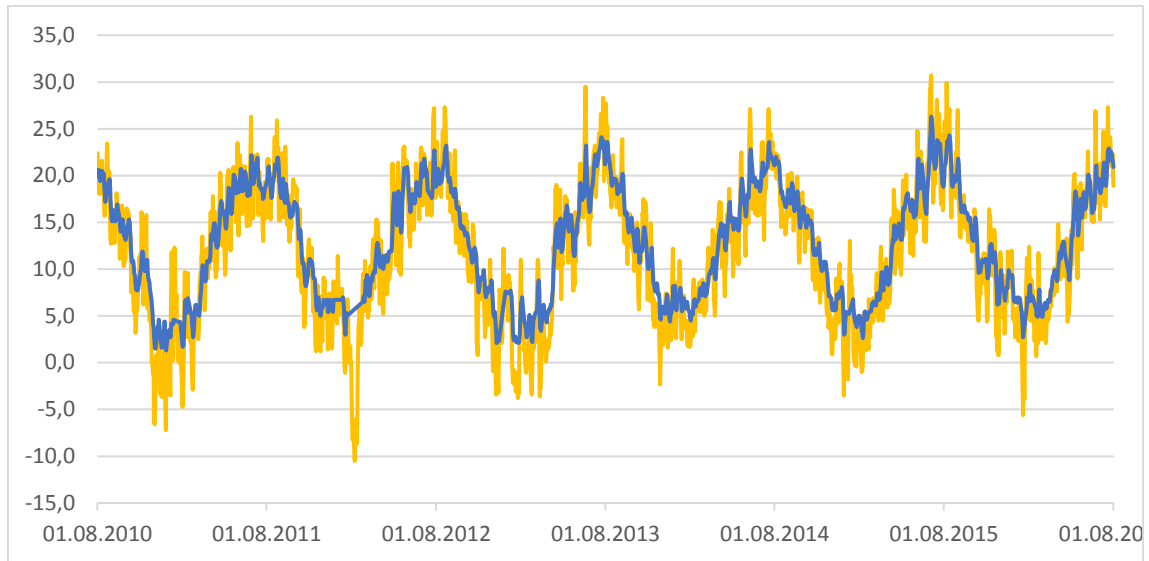


Abbildung 54: Temperaturverläufe der Tagesmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation Frankfurt/Main-Nied (Nidda) vom 01.08.2010 bis 01.08.2016, Lufttemperaturen der Station Frankfurt/Main-Westend

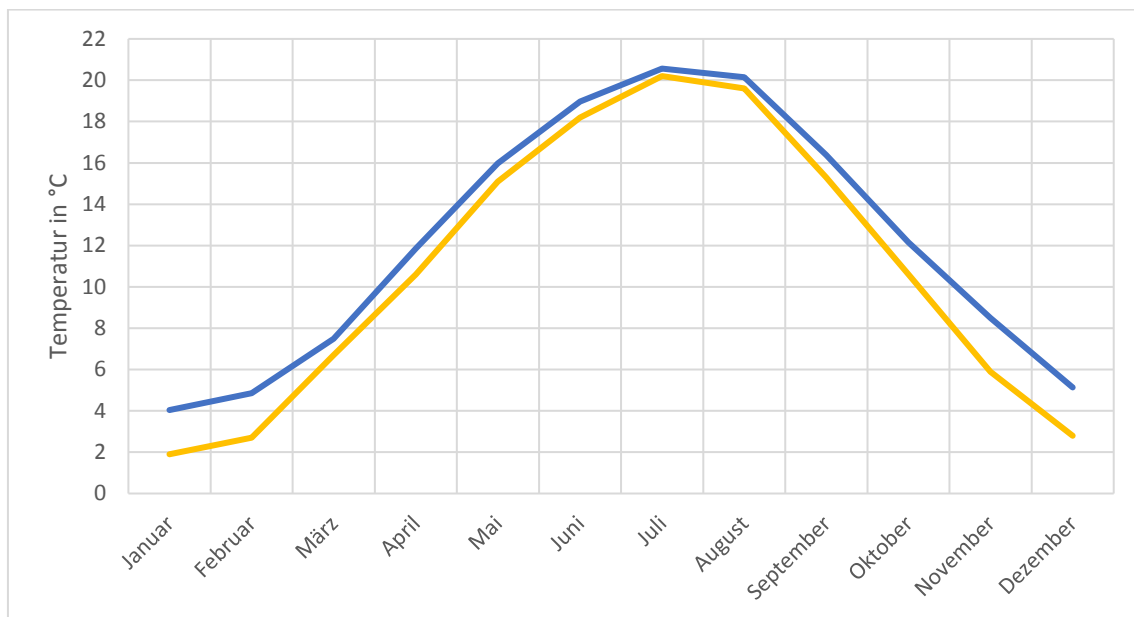


Abbildung 55: Jahresverläufe der Monatsmittel der Wassertemperatur (blau) und der Lufttemperatur (gelb) an der Messstation Frankfurt/Main-Nied (Nidda), Lufttemperaturen der Station Frankfurt/Main-Westend

Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Fließgewässers

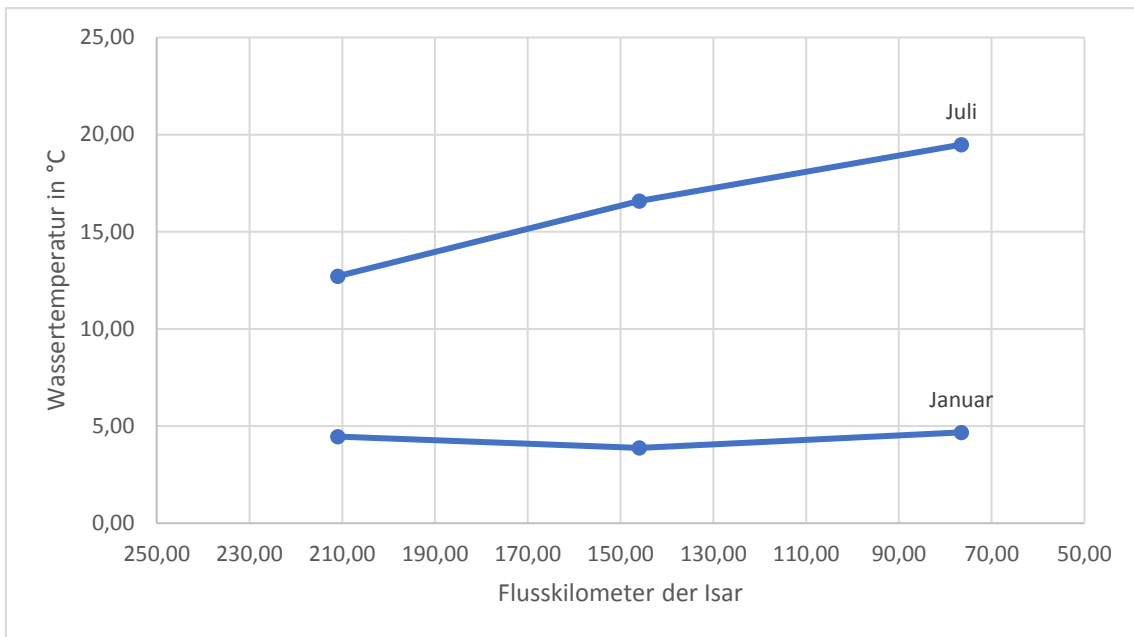


Abbildung 56: Mittlere monatliche Wassertemperatur der Isar im Juli (oben) und im Januar (unten), Entwicklung im Längsverlauf des Gewässers anhand der Stationen Lenggries (km 211), München (km 146), Landshut (km 76)⁹

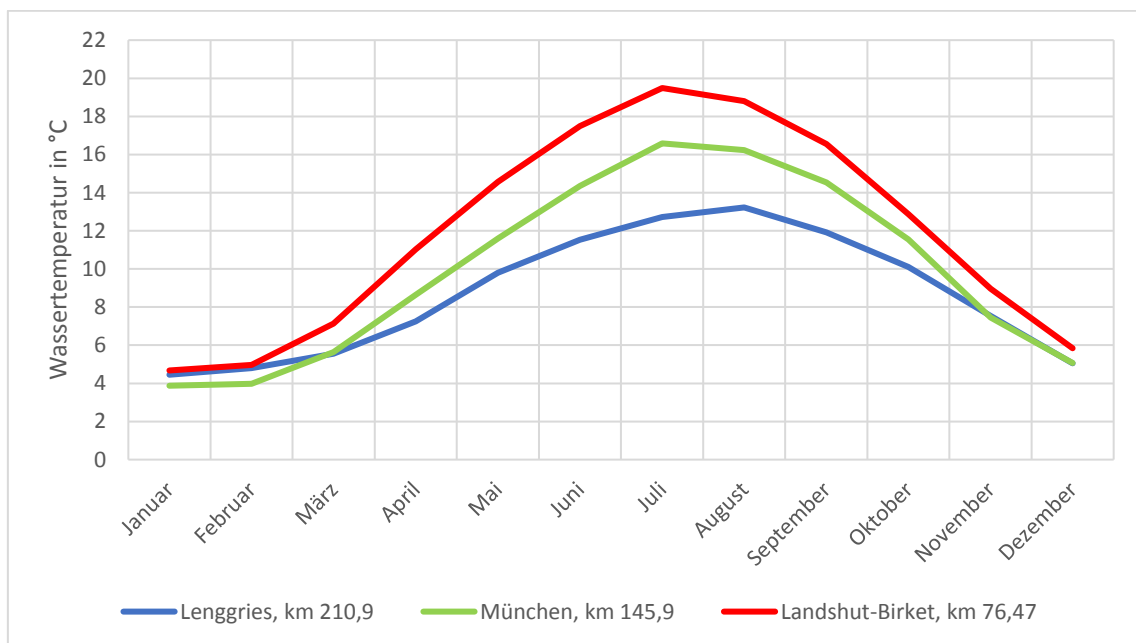


Abbildung 57: Jahresverlauf der Monatsmittel der Isar, Vergleich verschiedener Messstationen

⁹ Die Kilometrierung der Isar beginnt an deren Mündung in die Donau.

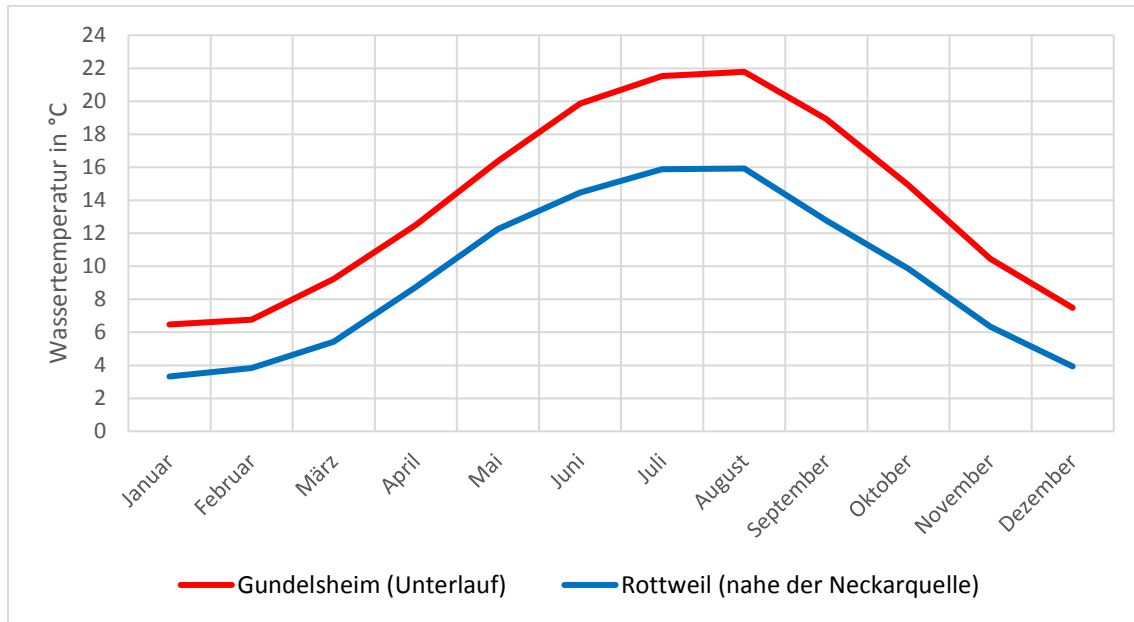


Abbildung 58: Jahresverlauf der Monatsmittel des Neckars, Vergleich verschiedener Messstationen

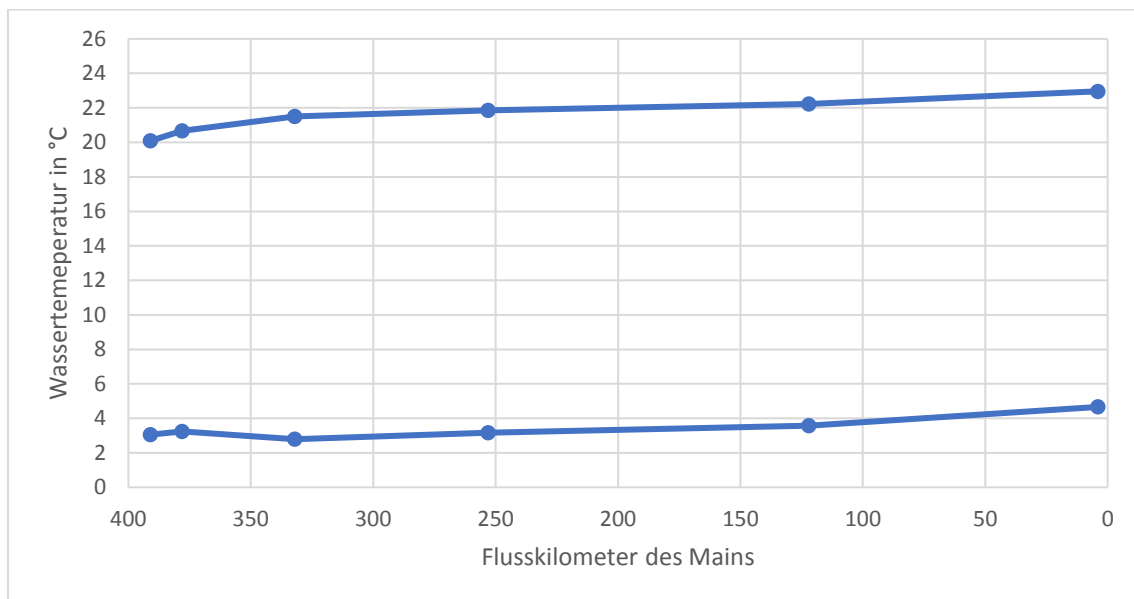


Abbildung 59: Mittlere monatliche Wassertemperatur des Mains im Juli (oben) und im Januar (unten), Entwicklung im Längsverlauf des Gewässers anhand der Stationen Kemmern (km 391), Trunstadt (km 378), Schweinfurt (km 332), Würzburg (km 253), Kleinheubach (km 122) und Bischofsheim (km 4)¹⁰

¹⁰ Die Kilometrierung des Mains beginnt an dessen Mündung in den Rhein.

Langjährige Entwicklung der Wassertemperatur

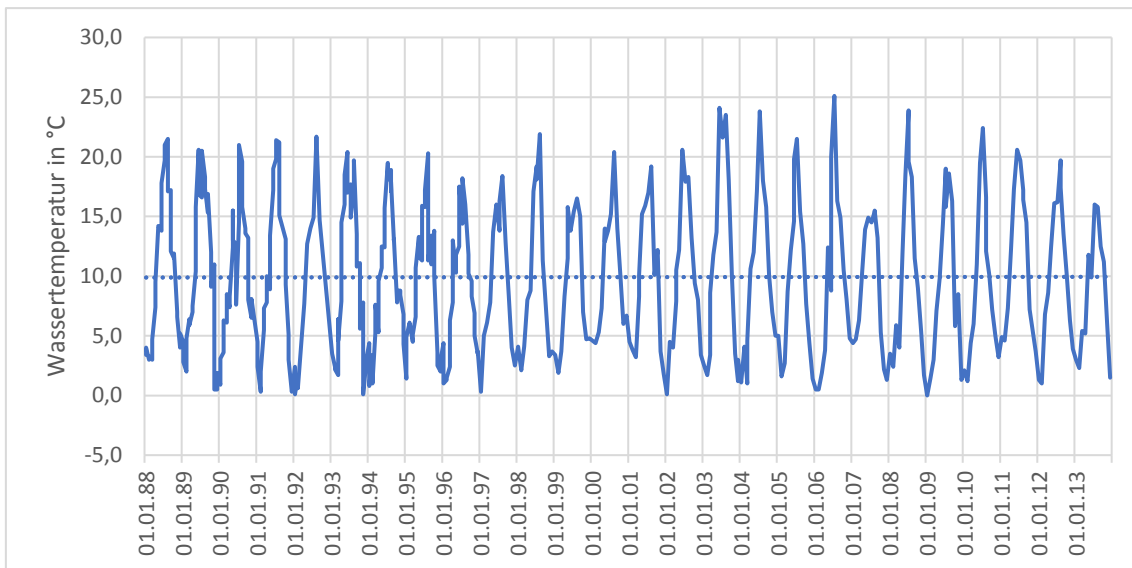


Abbildung 60: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Donau bei Immendingen, Trendline 1988-2013, Temperaturzunahme mit 0,03 K/Dekade

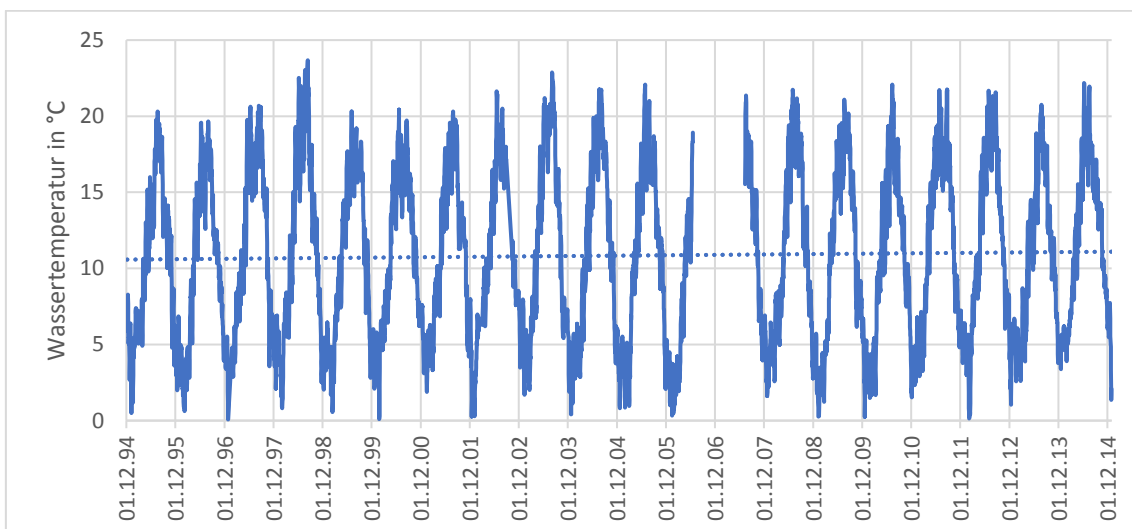


Abbildung 61: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Donau bei Ulm-Wiblingen, Trendline 1994-2014, Temperaturzunahme mit 0,26 K/Dekade, Daten 21.06.06 – 13.07.07 fehlend

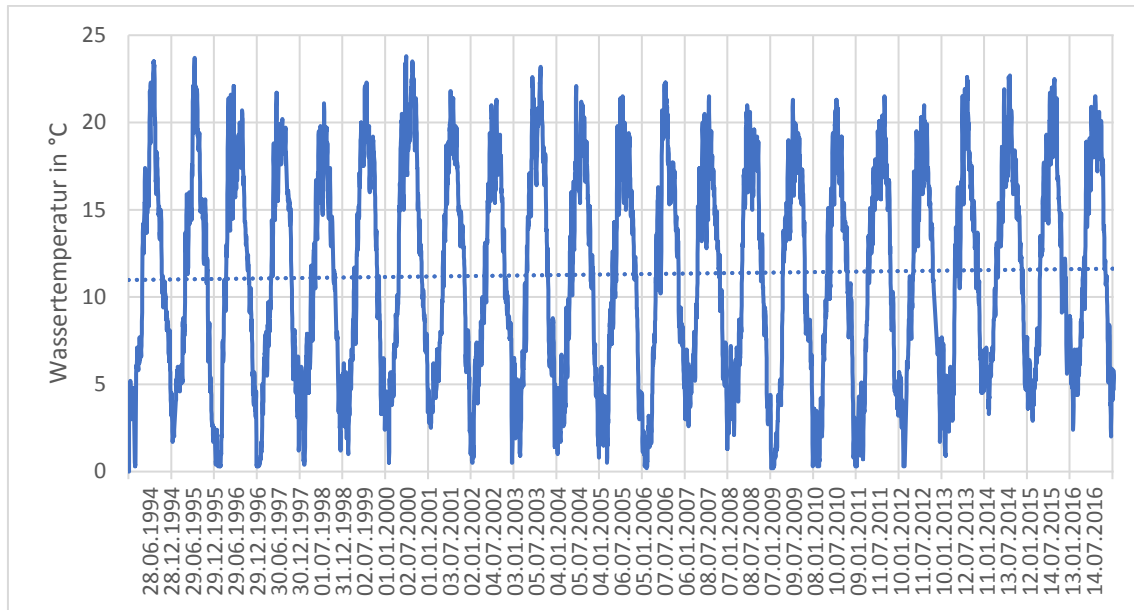


Abbildung 62: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Fulda bei Wahnhausen, Trendline 1994-2016, Temperaturzunahme mit 0,29 K/Dekade

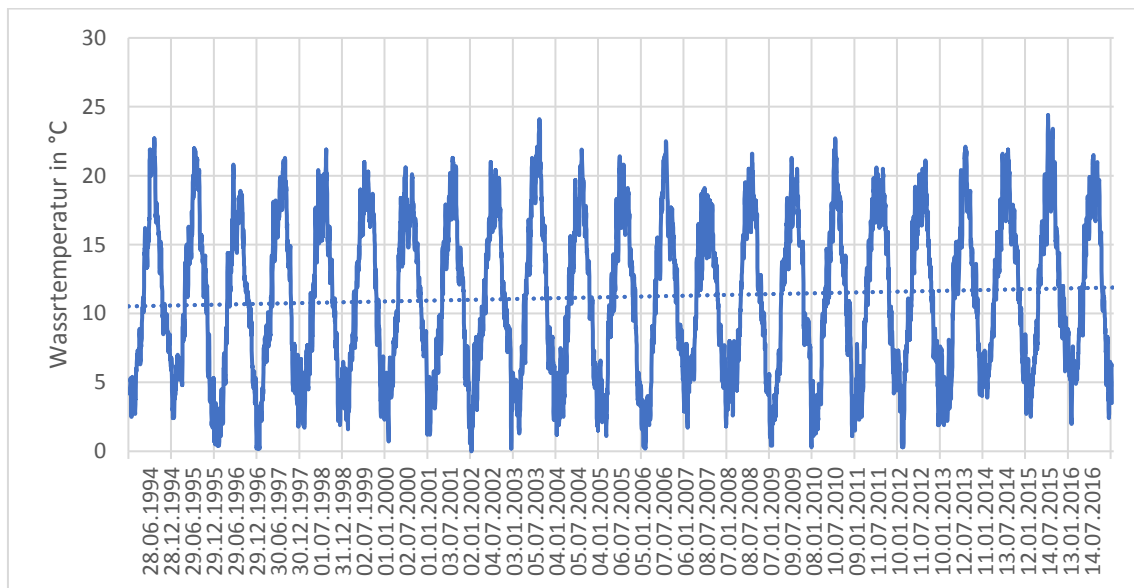


Abbildung 63: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Kinzig bei Hanau, Trendlinie 1994-2016, Temperaturzunahme mit 0,73 K/Dekade

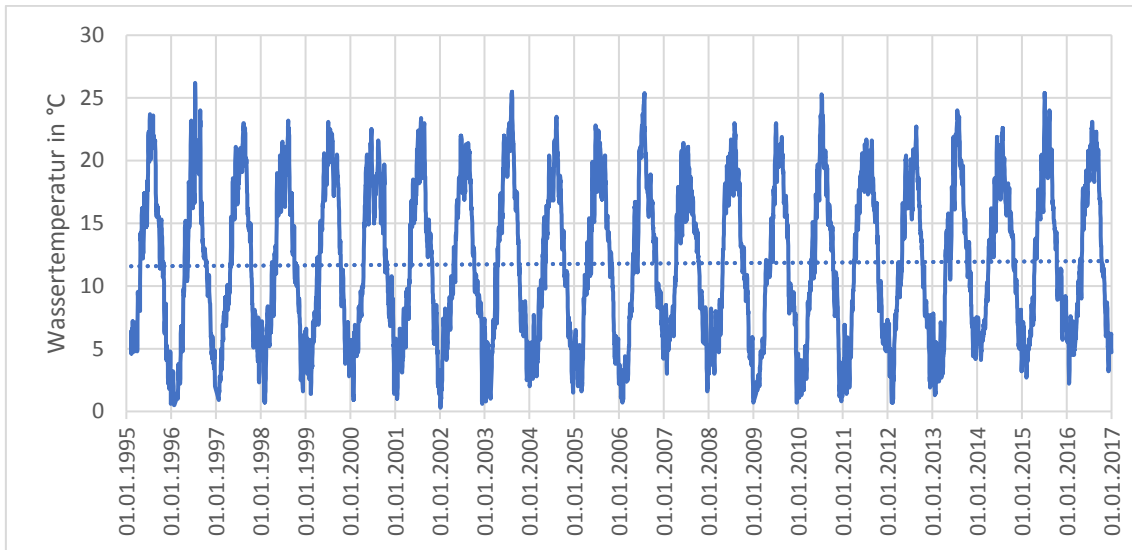


Abbildung 64: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Lahn bei Oberbiel, Trendline 1995-2017, Temperaturzunahme mit 0,18 K/Dekade

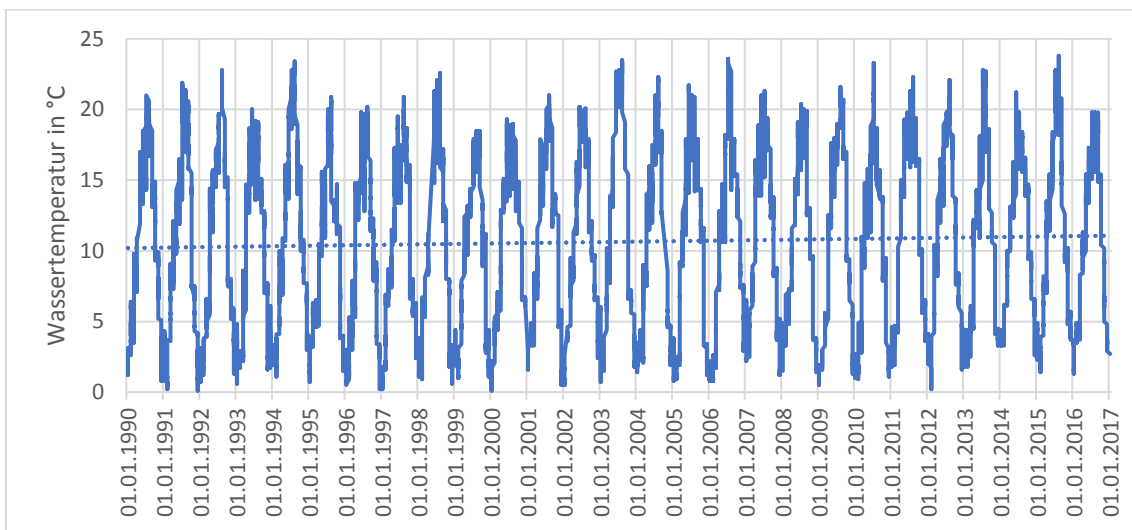


Abbildung 65: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Lech bei Augsburg, Trendline 1990-2017, Temperaturzunahme mit 0,33 K/Dekade

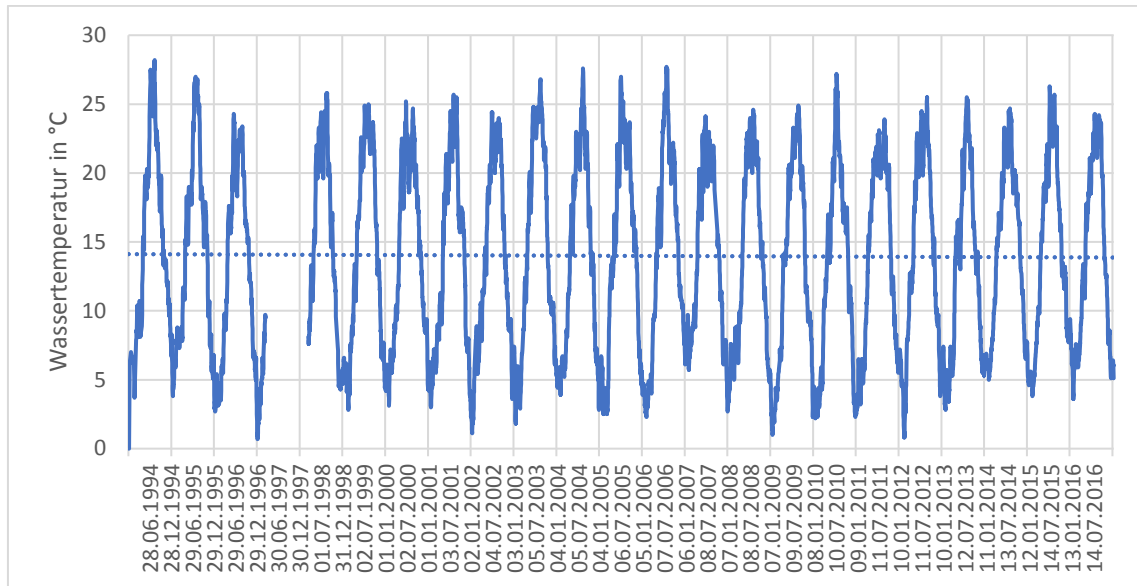


Abbildung 66: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Mains bei Bischofsheim, Trendline 1994-2016, Temperaturabnahme mit $-0,11$ K/Dekade, Daten 10.03.97 – 10.03.98 fehlend

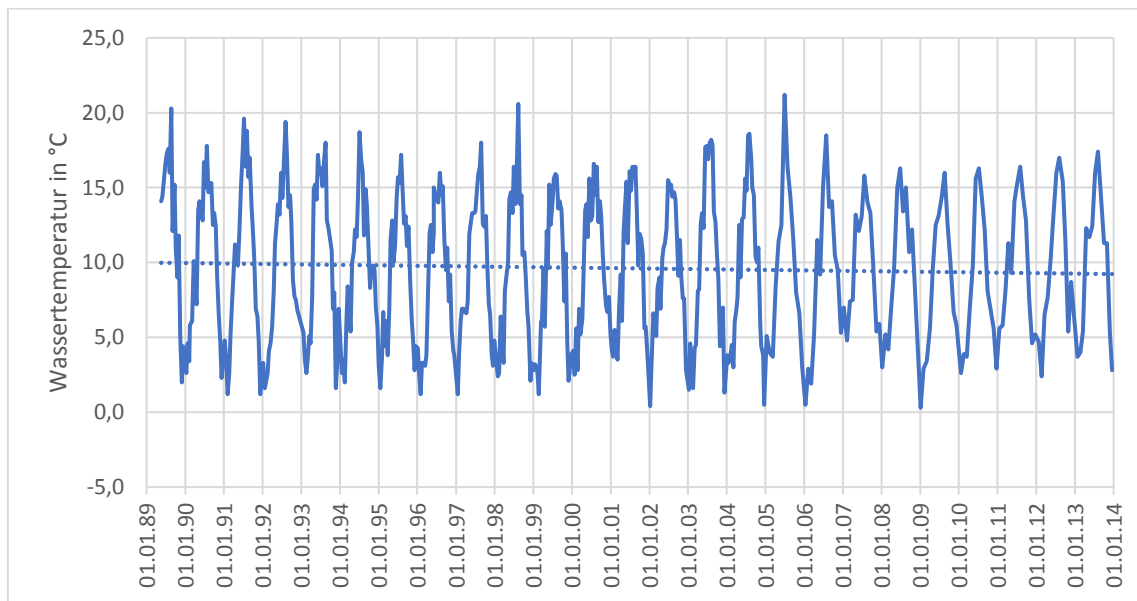


Abbildung 67: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Neckars bei Rottweil, Trendline 1989-2014, Temperaturabnahme mit $-0,29$ K/Dekade

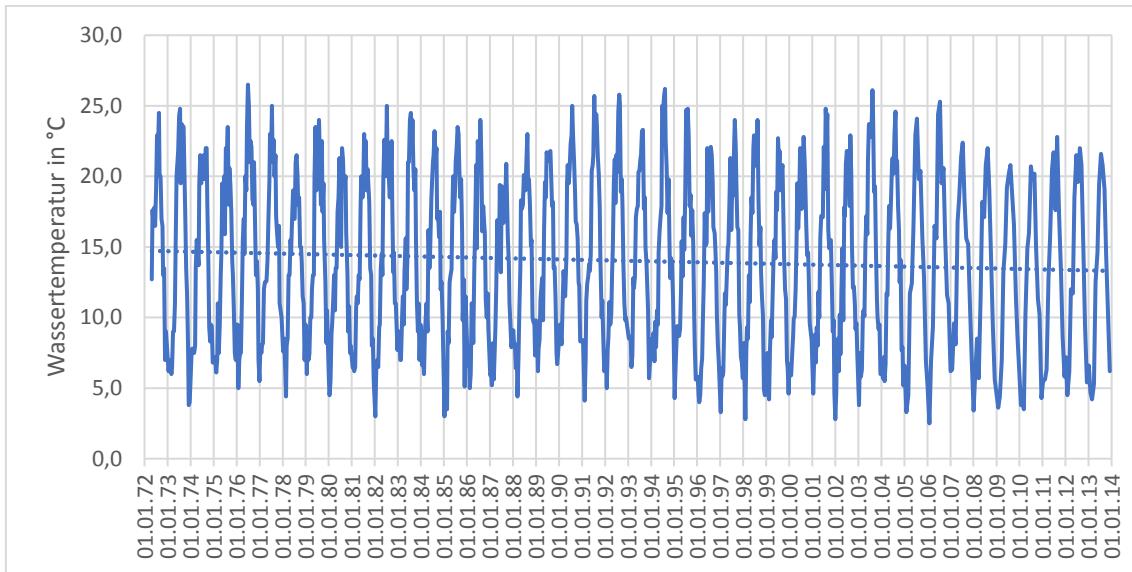


Abbildung 68: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Neckars bei Gundelsheim, Trendline 1972-2014, Temperaturabnahme mit $-0,33$ K/Dekade

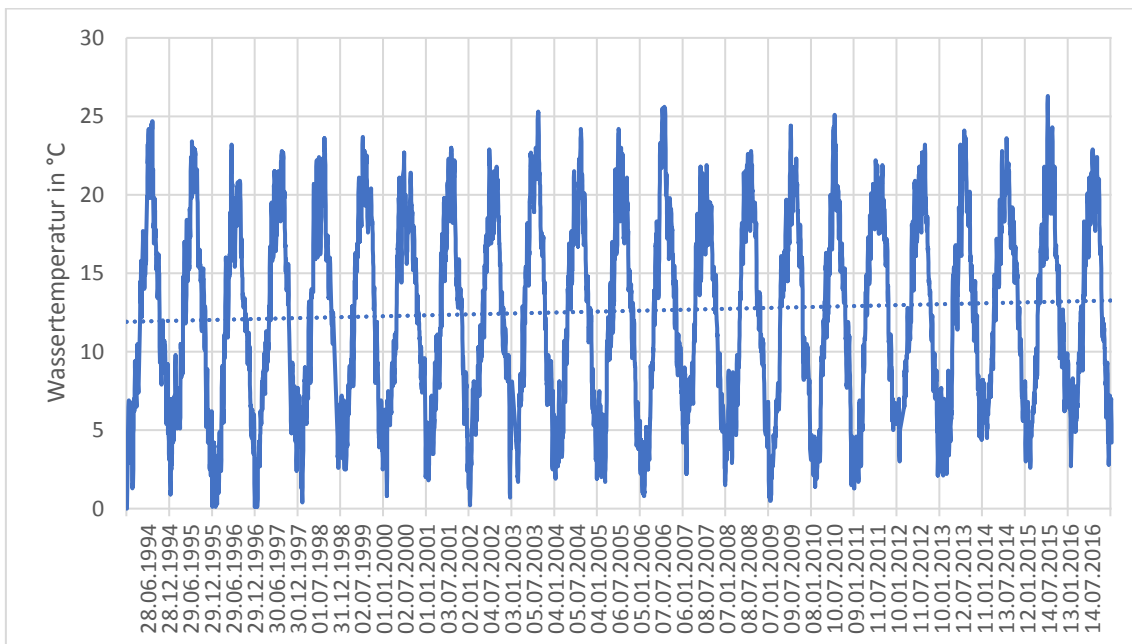


Abbildung 69: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur der Nidda bei Frankfurt/Main-Nied, Trendline 1994-2016, Temperaturzunahme mit $0,73$ K/Dekade

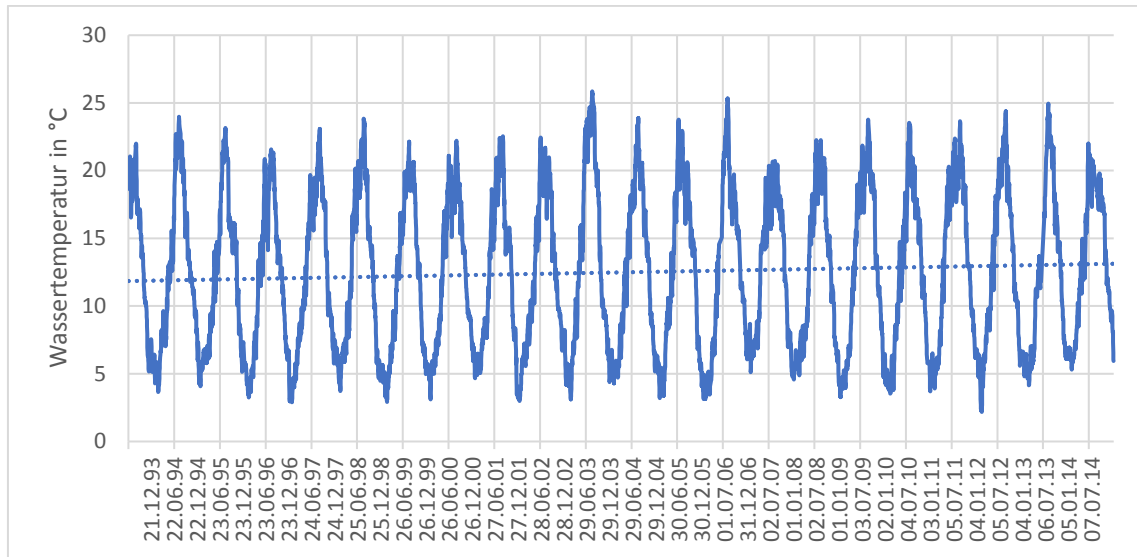


Abbildung 70: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins bei Rheinfelden, Trendlinie 1993-2014, Temperaturzunahme mit 0,73 K/Dekade

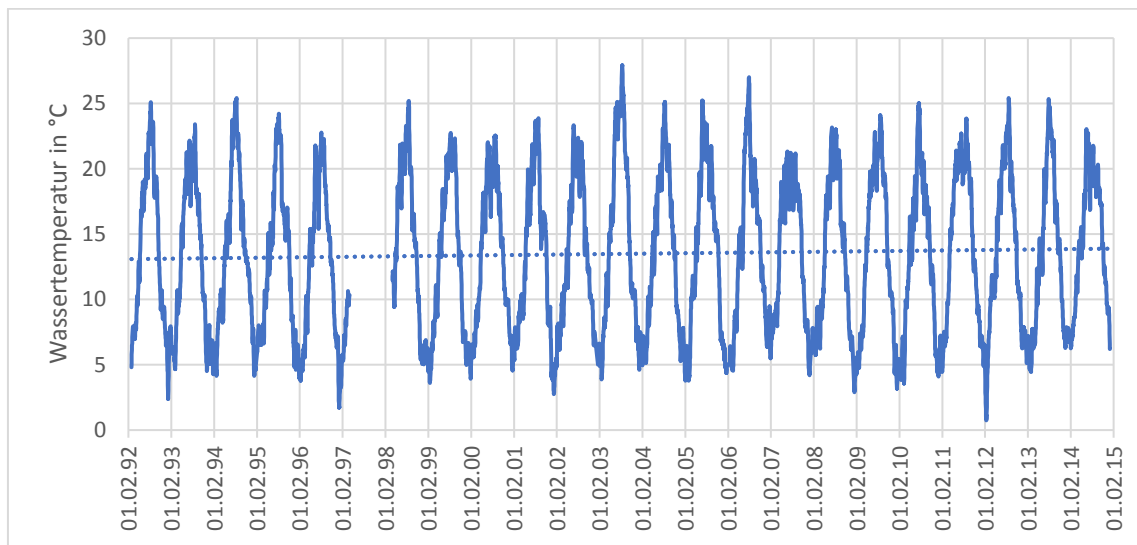


Abbildung 71: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins bei Iffezheim, Trendline 1992-2015, Temperaturzunahme mit 0,37 K/Dekade

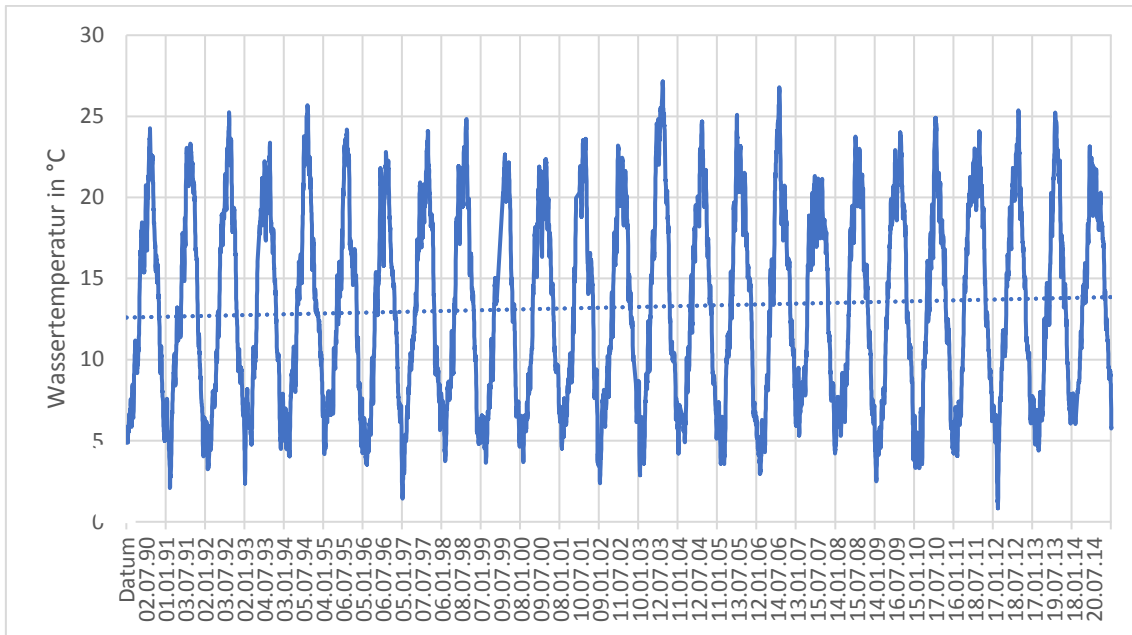


Abbildung 72: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins bei Karlsruhe, Trendlinie 1990-2015, Temperaturzunahme mit 0,37 K/Dekade

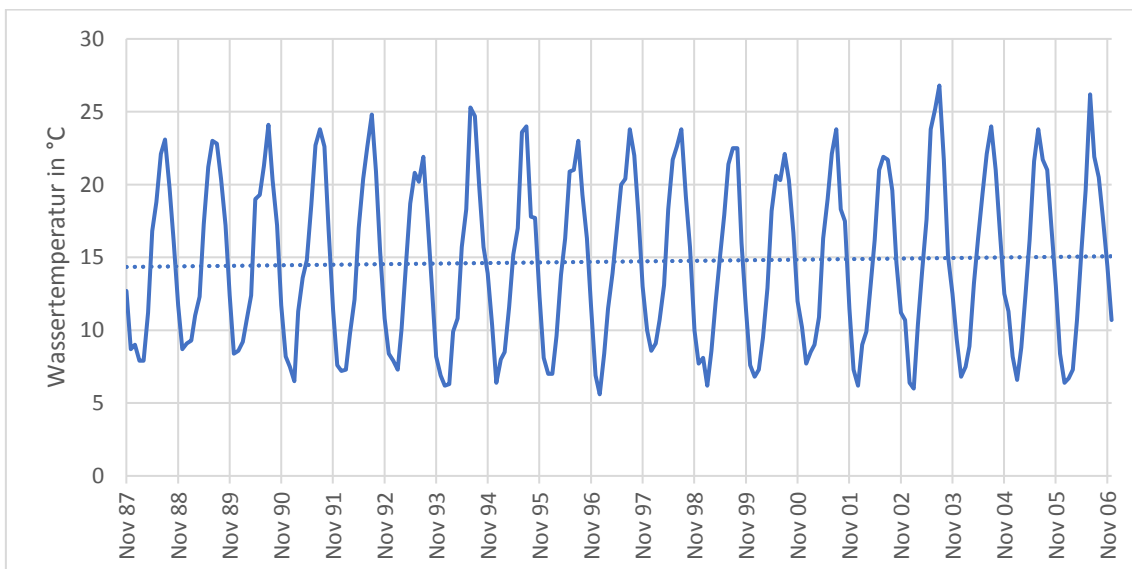


Abbildung 73: langjährige Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins bei Worms, Trendlinie 1987-2007, Temperaturzunahme mit 0,37 K/Dekade

Begrenzende Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung – Winter

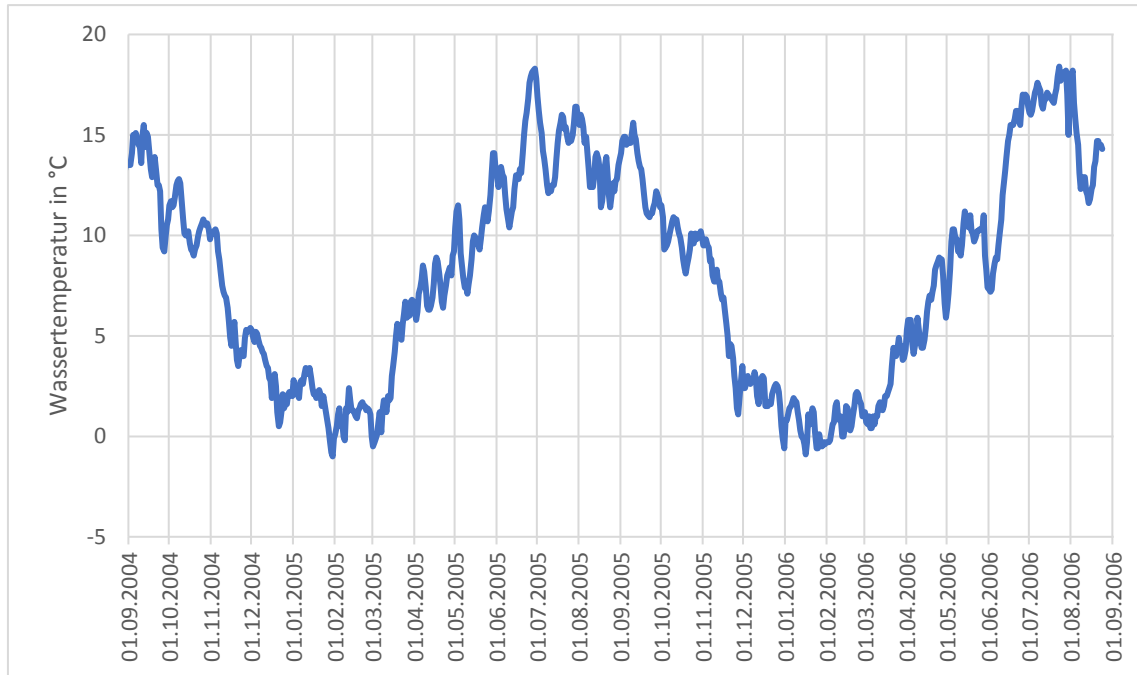


Abbildung 74: Verlauf der Tagesmittel der Wassertemperatur der Iller an der Messstation Wiblingen vom 01.09.2004 bis 01.09.2006

Begrenzende Faktoren für die wärmeenergetische Nutzung – Sommer

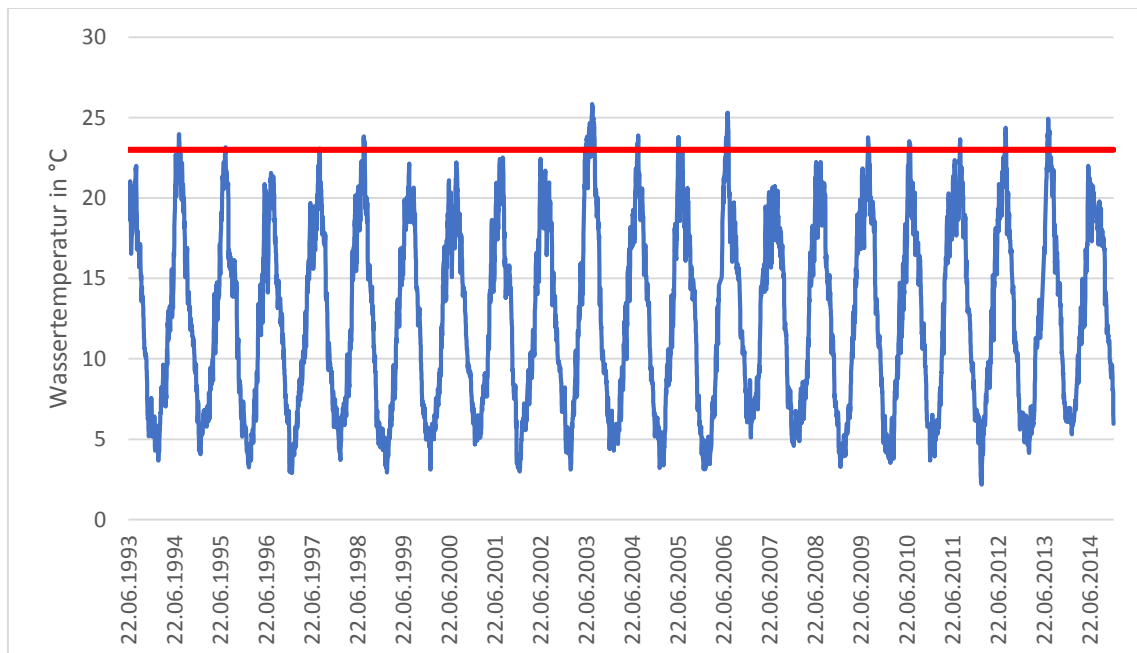


Abbildung 75: Gegenüberstellung des Verlaufs der Tagesmittel der Wassertemperatur mit dem geltenden Temperaturgrenzwert nach OGewV (Cyp-R, 23° C), Rhein bei Rheinfelden

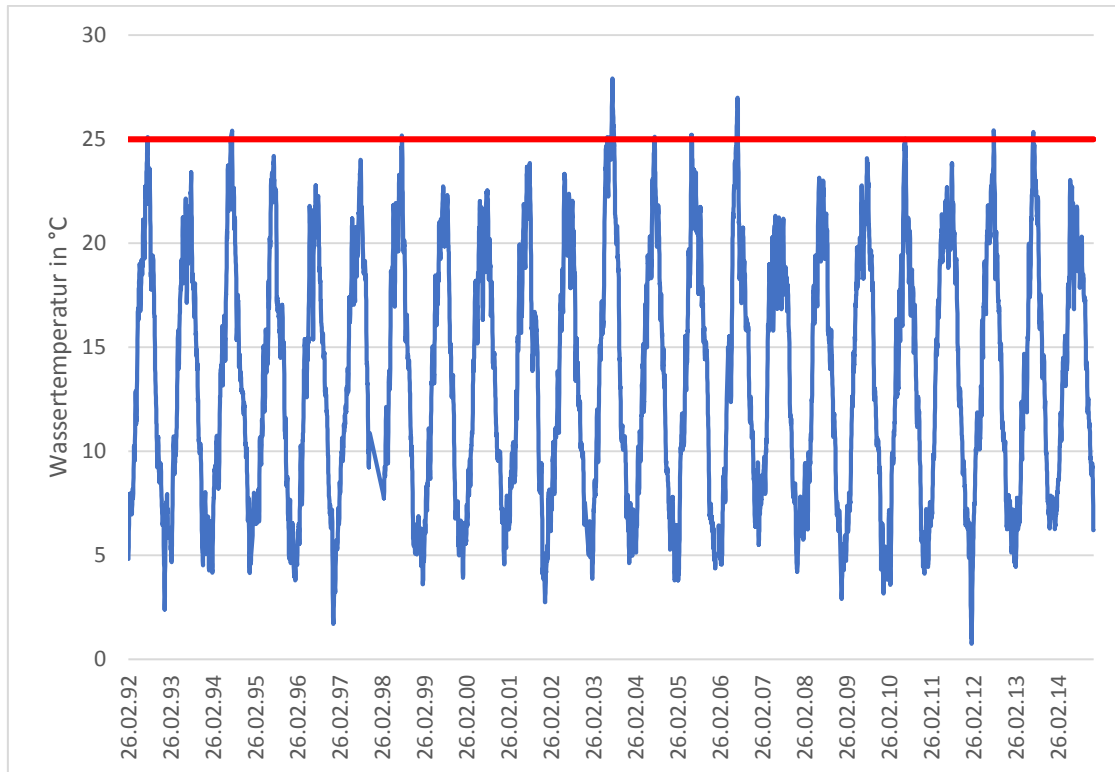


Abbildung 76: Gegenüberstellung des Verlaufs der Tagesmittel der Wassertemperatur mit dem geltenden Temperaturgrenzwert nach OGewV (EP, 25 °C), Rhein bei Iffezheim

Abschlussarbeit von

Frau Annika Pflum

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden.

Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 25.09.2017

Unterschrift