

Technische Universität Braunschweig
AG Reg.En

Kurztitel:

Grüne Nah- und Fernwärme aus Fließgewässern
Untersuchung für die 80 Großstädte in Deutschland

Vollständige Projektbezeichnung:

Potenzialuntersuchung der Grünen Nah- und Fernwärmegewinnung aus
Fließgewässern in Deutschland unter Berücksichtigung der Nutzungsmöglichkeiten
von Wasserkraftanlagen und Querbauwerken für die Entwicklung kombinierter
Wasser-Wärme-Kraftwerken

Abschlussbericht

von

Dipl.-Ing. Christian Seidel
Dr.-Ing. Lars Ostermann

Technische Universität Braunschweig
Institut für Statik und Dynamik
Arbeitsgruppe Regenerative Energien
Beethovenstraße 51
38106 Braunschweig

Braunschweig, November 2024

Projektförderung:
Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN)



efzn
Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen

Förderprogramm:
EFZN-Projekt-Ausschreibung vom 19. Juli 2022 - Beschleunigung der Transformation des
Energiesystems im Spannungsfeld von Energiekrise und Klimaschutz

ISBN 978-3-926031-33-4

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Roland Wüchner
© Institut für Statik und Dynamik, Technische Universität Braunschweig, 2024

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

2. Bevölkerungsverteilung und Bevölkerungsdichte in Deutschland

3. Wärmebedarf in Deutschland

3.1. Endenergiebedarf in Deutschland

3.2. Wärmebedarf in Deutschland

3.2.1. Wärmebereiche

3.2.2. Wärmebedarf nach Nutzern und Wärmebereichen

3.2.3. Verteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturbereichen und Anwendungen

3.3. Temperatureinsatzbereiche der verschiedenen Wärmequellen

3.4. Wärmeerzeugung in Deutschland

3.5. Wärmeszenarien

3.6. Erneuerbare Wärmequellen

3.6.1. Biomasse

3.6.2. Solarthermie

3.6.3. Geothermie

4. Verteilung und Charakteristik der Fließgewässer in Deutschland

4.1. Hydrologische Grundlagen

4.1.1. Niederschlagsverteilung in Deutschland

4.2. Fließgewässer in Deutschland

4.2.1. Fließgewässernetz

4.2.2. Flusseinzugsgebiete in Deutschland

4.2.3. Abfluss und Abflussvariabilität der Fließgewässer

5. Wassertemperaturen von Fließgewässern in Deutschland

5.1. Vieljähriger und saisonaler Trend der Wassertemperatur der Fließgewässer

5.1.1. Vieljähriger Trend der Wassertemperatur der Fließgewässer

5.2. Löslichkeit des Luftsauerstoffs in Abhängigkeit von der Wassertemperatur

5.3. Temperatúrauswertung von Fließgewässern in Deutschland nach Flussgebieten

5.3.1. Temperatúrauswertungen im Rheingebiet

5.3.1.1. Temperatúrauswertungen im Moselgebiet

5.3.1.2. Temperatúrauswertungen im Maingebiet

5.3.1.3. Temperatúrauswertungen im Neckargebiet

5.3.2. Temperatúrauswertungen im Donaugebiet

5.3.3. Temperatúrauswertungen im Elbe- und Odergebiet

5.3.4. Temperatúrauswertungen im Wesergebiet

5.4. Jahrgänge der Gewässertemperatur

5.5. Zusammenfassung der Untersuchungen der Wassertemperaturen

6. Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Wärmepotenzials aus Fließgewässern

6.1. Berechnung der theoretischen Wärmeleistung und des Wärmepotenzials

6.2. Rechtlich definierte Heizperiode

6.3. Mehrfachentnahmen zur Wärmegewinnung aus Fließgewässern

6.4. Einfluss der Gewässergröße auf die nutzbare Wärmeleistung

6.5. Leistungskennzahlen der Wärmepumpe

7. Gesamtwärmpotenzial aus Fließgewässern in Deutschland

7.1. Wärmepotenzial aus Fließgewässern

7.1.1. Technisches und theoretisches Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Deutschland

7.1.2. Ökologisch nutzbares Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Deutschland

7.2. Wärmepotenzial aus Abwässern

8. Untersuchung des Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Deutschland für die 80 Großstädte

9. Wärmegewinnung aus Wasserkraftanlagen in den 80 Großstädten

Literatur

1. Einleitung

Auf Grund des fortschreitenden Klimawandels, der aktuellen Energie- und Rohstoffkrise und der im Hinblick auf die geopolitischen Lage bestehenden Notwendigkeit, die Abhängigkeit von Energierohstoffexporten zu reduzieren, ist eine Beschleunigung des Ausbaus der Erneuerbaren Energien sowie eine Transformation und Dekarbonisierung unseres Energiesystems in Deutschland als zentrale Maßnahmen für den Klima- und Umweltschutz erforderlich. Die Bereitstellung von Erneuerbarer Wärme ist neben der Dekarbonisierung der Stromerzeugung und des Verkehrs eine der drei Säulen der Energiewende, wobei der Wärmewende eine besonders große Relevanz zukommt, da 56 % des Endenergiebedarfs in Deutschland alleine auf den Wärmebereich entfallen, der zu 86,8 % auf fossilen Energieträgern basiert [1].

Für die Wärmebereitstellung alleine in Siedlungsgebieten werden so z.B. neben den dominierenden fossilen Energieträgern Gas (43,5 %) und Heizöl (25,9 %) auch Fernwärme (8 %), Biomasse, Elektro-Wärmepumpen und Strom genutzt, wobei auf die Erneuerbaren Energien 13,2 % entfallen. Bei der Bereitstellung der Fernwärme wurde 2021 der Großteil der Fernwärme aus den fossilen Energieträgern Erdgas mit 46,7% sowie Steinkohle mit 13,9% und Braunkohle mit 5,9% gewonnen [2]. Nur 17,3 % der Fernwärme stammt aus Erneuerbaren Energieträgern.

Laut BMWK spielen Wärmenetze für den klimaneutralen Umbau der Wärmeversorgung eine große Rolle, da sie Umgebungswärme durch den Einsatz von Großwärmepumpen an Haushalte über Nah- und Fernwärmenetze mit verschiedenen Temperaturniveaus verteilen können [3]. Bei der Wärmewende soll in Deutschland die Wärmepumpentechnologie einen Hauptschwerpunkt bilden und nach dem BEE-Wärmeszenario 2045 [4] noch vor der Biomasse fast 40 % der Wärmeversorgung bestimmen.

Offen ist derzeit noch die Frage nach der Art der Wärmequelle für den zukünftigen Einsatz von Großwärmepumpen. Neben den Haushalten bestehen auch bei den anderen Wärmebereitstellungen für Industrie, Verkehr, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen im Bereich der Raumwärme, des Warmwassers und der Prozesswärme die Aufgabe, Erdgas; Mineralöl und Kohle zu ersetzen.

Die Suche und Erschließung neuer Wärmequellen und Wärmeträger ist daher eine der wichtigsten Kernaufgaben und zentrale Problemstellung für die erfolgreiche Umsetzung der Wärmewende in Deutschland. Für die Dekarbonisierung des Wärmebereiches ist es entscheidend, effiziente und leistungsstarke erneuerbare Umweltwärmequellen zu identifizieren, die lokal für die Wärmeversorgung kostengünstig mit einer hohen Versorgungssicherheit dauerhaft zur Verfügung stehen. Die Wärmequellen müssen dabei nicht nur identifiziert sondern ihre Potenziale untersucht, quantifiziert und ausgewiesen werden, um hier eine zügige Erschließung dieser Umweltwärmequellen zur Substitution der fossilen, CO₂ emittierenden Brennstoffe zu erreichen.

Neben der Nutzung von Biomasse und Abwärme aus industriellen Prozessen basieren die bisher diskutierten Technologien zur Erschließung von Wärmequellen primär auf der Nutzung von oberflächennaher und tiefer Geothermie, Solarthermie, Umgebungsluft sowie Grundwasser. Die Wärmegewinnung aus Fließgewässern spielt dahingegen bei der aktuellen Debatte zur Wärmewende in Deutschland keine nennenswerte Rolle, obwohl diese Umweltwärmequelle auf Grund ihrer hohen Leistungsdichte, flächendeckenden Verfügbarkeit, kostengünstigen Erschließbarkeit und ihres großen Potenzials einen entscheidenden Beitrag zur schnellen Umsetzung der Wärmewende leisten kann.

Der Einsatz von Flusswärmepumpen ist in Deutschland bisher nur in wenigen Einzelprojekten in Planung wie z.B. in Köln, Hannover, Dresden und Hamburg und wurde in Mannheim z.B. auch umgesetzt, obwohl die Technologie der Flusswärmepumpe bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt und erprobt ist. Die älteste noch in Betrieb befindliche Wärmepumpe der Welt wird so z.B. seit 1937 zur Beheizung und Kühlung des Rathauses

von Zürich in der Schweiz genutzt. Als Wärmemedium dient hierbei das Flusswasser der Limmat. 2001 erfolgte eine Erneuerung der Anlage. Trotz dieser sehr frühen und bis heute seit 87 Jahren erfolgreichen durchgängigen Nutzung der Fließgewässerwärme und –kälte, sind die vielfältigen Möglichkeiten und großen Potenziale der Aquathermie kaum erfasst.

Die Vorteile für die Nutzung der Fließgewässer für die Gewinnung grüner Nah- und Fernwärme liegen dabei auf der Hand:

1. Fließgewässer sind mit mehr als 400.000 km Fließgewässerslänge in Deutschland überall flächendeckend vorhanden, durch langjährige Messungen statistisch gut erfasst und können gut prognostiziert werden. Eine Nachverdichtung von Messstellen zur Wassertemperatur und zum Durchfluss ist ohne größeren Aufwand möglich. Fündigkeitsrisiken bestehen nicht.
2. Wasser besitzt neben Helium und Wasserstoff eine der höchsten Wärmekapazitäten und kann wesentlich mehr Wärme aufnehmen oder abgeben als andere Stoffe. Wasser ist daher ein idealer Speicher und Träger für Umweltwärme. Das gesamte Fließgewässernetz stellt einen gewaltigen Flächenwärmetauscher dar, der sowohl mit der Außenluft, dem Erdreich als auch mit der Sonneneinstrahlung in Interaktion ist.
3. Wasser besitzt eine 800-mal größere Dichte als Luft. In Kombination mit der hohen Wärmekapazität ist daher die zur Verfügung stehende Energiedichte um Größenordnungen höher. Daraus ergeben sich große lokale Entzugsleistungen, die erschlossen werden können und den Einsatz von Großwärmepumpen attraktiv macht.
4. Fließgewässer sind durch einen kontinuierlichen Volumenstrom gekennzeichnet, was infolge des stetigen Wassernachflusses zu einer permanenten Regenerierung der Wärmequelle führt. Es kommt daher zu keiner Erschöpfung der Wärmequelle.
5. Bei dem Großteil der Fließgewässer in Deutschland erfolgt der Hauptabfluss im Winterhalbjahr, so dass während der Hauptheizperiode die größten Durchflüsse und damit die höchsten Wärmeentzugsleistungen vorliegen.
6. Die Wassertemperaturen sind auf Grund der hohen Wärmespeicherfähigkeit von Wasser im Winterhalbjahr höher als die Lufttemperaturen und infolge der Trägheit des Systems wesentlich geringeren Schwankungen unterworfen.
7. Die Aquathermie ist vergleichsweise kostengünstig zu erschließen. Technisch und wirtschaftlich aufwendige Bohrungen wie bei der Geothermie sind nicht erforderlich.

In der vorliegenden Studie wird das thermisch nutzbare Wärmepotenzial aus Fließgewässern in den 80 Großstädten in Deutschland untersucht. Hierfür werden die in den jeweiligen Großstädten vorhandenen Fließgewässer aufgenommen, lokale Gewässermodelle aufgebaut und aus den Abfluss- und Temperaturdaten die möglichen thermischen Entzugsleistungen bestimmt und anschließend das Wärmepotenzial ermittelt.

Für ganz Deutschland wird über die Erfassung und Auswertung der Abflussdaten über die Gebietsgrenzen als Ausflussränder und unter Berücksichtigung der Einflussränder das zur Verfügung stehende nutzbare thermische Wärmepotenzial aus Fließgewässern berechnet. Hierfür werden verschiedene Randbedingungen betrachtet. Wie die Untersuchungen zeigen, weisen die Fließgewässer in Deutschland ein gewaltiges thermisches Potenzial auf und es können hohe thermische Entzugsleistungen gewonnen werden.

Darüber hinaus zeigen die im Rahmen der Studie ausgewerteten Langzeitmessungen der Wassertemperaturen der Fließgewässer, dass alle betrachteten Fließgewässer in Deutschland bezüglich der mittleren Wassertemperatur seit 1950 infolge des Klimawandels um 2 bis 4°C im Jahresmittel wärmer geworden sind. Dies hat Einfluss auf die Gewässerbiozönose und auf den Sauerstoffgehalt in den Fließgewässern und kann zu Veränderungen der Artenzusammensetzung führen und einen Artenrückgang bewirken. Durch die Wärmegewinnung aus Fließgewässern kann eine Gewässerabkühlung und daher eine wesentliche Verbesserung der ökologischen Gesamtsituation der Fließgewässer bewirkt werden. Dies ist auch im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie, da durch die Wärmegewinnung aus Fließgewässern der ökologische und physikalische Zustand der Gewässer wesentlich verbessert und damit das Verbesserungsgebot erfüllt wird.

Für die vollständige Nutzung des thermischen Wärmepotenzials aus Fließgewässern an einem Standort bieten sich Wasserkraftanlagen an, da Wasserkraftanlagen i.a. den vollständigen mittleren Abfluss Q_m eines Fließgewässers und darüber hinaus nutzen. Die Wasserentnahme ist bei Wasserkraftanlagen genehmigt und bei Neubauten gibt es klare Verfahrensabläufe zur Genehmigung der Anlage, so dass für die zukünftige Wärme- und Stromversorgung verhältnismäßig einfach auch ungenutzte Querbauwerke erschlossen oder außer Betrieb befindliche Altstandorte reaktiviert werden können.

Die Wasserkraftanlagen verfügen über Rechenanlagen und Fischwanderhilfen bzw. es existiert ein umfangreiches Fachwissen, um die ökologische Durchgängigkeit an einem Standort für Wasserkraftanlagen sicherzustellen. Eine zusätzliche Gewinnung der Fließgewässerwärme bietet sich neben der elektrischen Energiegewinnung bei Wasserkraftwerken daher besonders an, so dass hierfür zukünftig kombinierte Wasser-Wärme-Kraftwerke zu entwickeln sind. Die thermische Nutzung des Kraftwerksausbaudurchflusses stellt i.a. nur eine Erweiterung der Genehmigung zur Wasserkraftnutzung dar und kann bei vielen vorliegenden Genehmigungen bereits durch die erteilten Rechte abgebildet sein, was ggf. im Einzelfall zu prüfen ist. Die gewünschte Beschleunigung der Transformation des Energiesystems und der Energie- und Wärmewende ist durch die Nutzung dieser bestehenden Möglichkeiten erreichbar.

Die Wasserkraft kann damit nicht nur einen wichtigen Beitrag zur Energie- sondern auch zur Wärmewende in Deutschland leisten. Hierbei ist festzustellen, dass die Wasserkraft neben der elektrischen Leistung an einem Standort das 100-fache und mehr an Wärmeleistung aus dem Fließgewässer gewinnen kann. So kann auch eine kleine Wasserkraftanlage mit einer elektrischen Leistung von 4 bis 10 kW Wärmeleistungen von 1 MW bis 10 MW und mehr bereitstellen und damit einen erheblichen Beitrag zur lokalen Wärmeversorgung liefern. Größere Anlagen mit 50 bis 100 kW elektrische Leistung können bereits 10 bis 100 MW Wärmeleistung aus Fließgewässern gewinnen, was je nach Größe ausreichend ist für die Wärmeversorgung von Dörfern, Quartieren, Wohngebieten und Städten. Die bezüglich der Stromerzeugung häufig als kleine Wasserkraftanlagen bezeichneten Kraftwerke mit elektrischen Leistungen kleiner 1.000 kW stellen im Bereich der Wärmeerzeugung alle große Anlagen dar, mit Wärmeleistungen von weit über 1 MW bis 100 MW.

In der Studie wird daher auch untersucht, was die in den 80 Großstädten in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen für die Wärmeversorgung mit Grüner Nah- und Fernwärme leisten können. Neben dem derzeitigen Einsatz der Wasserkraft ausschließlich zur Stromerzeugung ergeben sich durch die Option, den in einem Kraftwerk verarbeiteten Durchfluss auch zur Gewinnung von grüner Nah- und Fernwärme aus Fließgewässern zu verwenden, völlig neue Möglichkeiten zur Nutzung der Wasserkraft in Deutschland. Besonders die Kombination von Stromerzeugung und Wärmeerzeugung eröffnet zukünftig ganz neue Einsatz- und Marktperspektiven. Die Wasserkraft als grundlastfähige, speicher- und regelbare erneuerbare Energiequelle kann damit bei der Strom- und Wärmeversorgung als Dualversorger und durch die Bereitstellung der notwendigen Systemdienstleistungen eine wichtige Rolle im zukünftigen Energiesystem spielen und maßgeblich zur Versorgungssicherheit und Netzstabilität beitragen.

Neben der Nutzung von Wasserkraftanlagen bieten sich auch sonstige Wasserentnahmeverrichtungen an, wie z.B. Kühlwasserentnahmen für thermische Kraftwerke. Im Gegensatz zu Wasserkraftanlagen darf hier aber i.a. nur eine wesentlich geringere Wassermenge des Fließgewässers verwendet werden, was zu kleineren Entzugsleistungen und Wärmemengen führt. Das gleiche gilt auch für Direktentnahmen aus dem Fließgewässer.

2. Bevölkerungsverteilung und Bevölkerungsdichte in Deutschland

Aktuell leben in Deutschland laut Statistischem Bundesamt 84,433 Millionen Einwohner (31.März 2023) [5]. Bei einer Landesfläche von 357.587,77 km² ergibt sich damit eine Einwohnerdichte von 236 Einwohnern pro km². Bezogen auf die Bundesländer weist Berlin die höchste Einwohnerdichte mit 4.112 Einwohnern pro km² auf. Bei den Flächenländern besitzt Nordrhein-Westphalen mit 525 Einwohnern pro km² die höchste und Mecklenburg-Vorpommern mit 69 Einwohnern pro km² die niedrigste Einwohnerdichte.

In Bild 1 ist die Anzahl der Einwohner, die Anzahl der Gemeinden sowie die Einwohnerdichte in Deutschland bezogen auf die Gemeindegrößenklassen, Stand 31.12.2021, nach Angaben des Statistischen Bundesamtes [6] dargestellt.

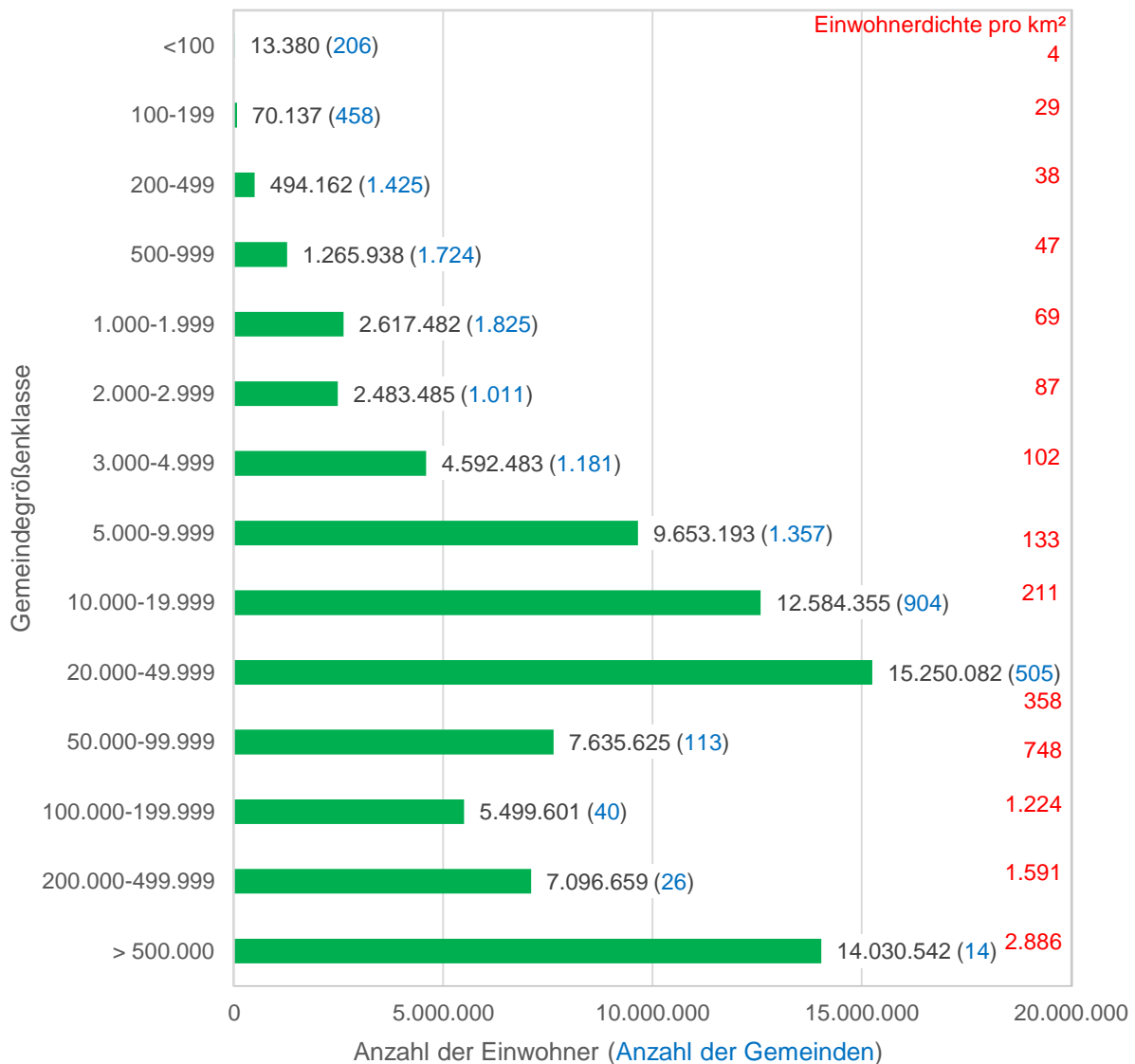


Bild 1: Anzahl der Einwohner, (Anzahl der Gemeinden) und Einwohnerdichte in Deutschland bezogen auf Gemeindegrößenklassen, Stand 31.12.2021, Statistisches Bundesamt [6]

In Deutschland lebten zum 31.12.2021 laut Statistischem Bundesamt 61.054.674 Menschen in 2.057 Städten [7]. Die Städte nehmen in Deutschland eine Gemeindefläche von 150.465,39 km² ein, was einer Einwohnerdichte von 406 Einwohnern pro km² entspricht. Neben den ca. 61 Millionen Einwohnern in städtischen Strukturen leben in Deutschland ungefähr 22 Millionen Einwohner in dörflichen Strukturen. 378 Städte haben weniger als 5.000 und 490 Städte 5.000 bis <10.000 Einwohner, was 42,2 % der Städte entspricht.

Die Unterteilung bei den Städten ergibt sich folgendermaßen:

- Landstadt < 5.000 Einwohner (378 Städte und 7.452 Dörfer)
- Kleinstadt 5.000 < 20.000 Einwohner (981 Städte und 1.280 Dörfer)
- Mittelstadt 20.000 < 100.000 Einwohner
- Großstadt > 100.000 Einwohner
- Millionenstadt ab 1.000.000 Einwohner

Die Gemeindegrößenklassen in Bild 1 sind nach dieser Unterteilung in Tabelle 1 zu vier größeren Gruppen zusammengefasst, bei der die 4 Millionenstädte in Deutschland zu den Großstädten zugeordnet werden. Insgesamt existieren in Deutschland 80 Großstädte, 618 Mittelstädte, 1.359 Klein- und Landstädte sowie 8.732 Dörfer.

Besonders hohe Einwohnerkonzentrationen ergeben sich in Deutschland wie in Bild 1 ersichtlich im Bereich der 505 Mittelstädte mit 20.000 bis <50.000 Einwohnern mit 15.250.082 Personen gefolgt von den 14 Großstädten ab 500.000 Einwohnern mit 14.030.542 Personen und bei den 904 Kleinstädten in der Gemeindeklasse 10.000 bis < 20.000 Einwohnern mit 12.584.355 Personen. Die Einwohnerdichte nimmt mit der Gemeindegrößenklasse stetig zu und ist bei den 206 Gemeinden mit weniger als 100 Einwohnern mit 4 Ew./km² am kleinsten und bei den 14 Großstädten ab 500.000 Einwohnern mit 2.886 Ew./km² am größten. Die Gemeindeklasse mit den meisten Gemeinden ist mit 1.825 Gemeinden die Klasse 1.000 bis <2.000 Einwohner.

Zusammengefasste Gemeindegrößenklassen (Stand 31.12.2021)	Siedlungsform	Anzahl der Gemeinden	Anzahl der Einwohner	Anteil Einwohner [%]	Gesamtfläche [km ²]	Gesamtanteil [%]
Gemeinden mit weniger als 5.000 Einwohnern	Dörfer, Landstädte	7.830	11.537.067	13,85	157.207	43,96
Gemeinden mit 5.000 bis 20.000 Einwohnern	Kleinstädte	2.261	22.237.548	26,70	132.222	36,98
Gemeinden mit 20.000 bis 100.000 Einwohnern	Mittelstädte	618	22.885.707	27,48	52.806	14,77
Großstädte ab 100.000 Einwohnern	Großstädte	80	26.626.802	31,97	13.815	3,86
Summe		10.789	83.287.124	100,00	356.050	99,57

Tabelle 1: Anzahl der Einwohner und Gemeinden in Deutschland bezogen auf zusammengefasste Gemeindegrößenklassen, Stand 31.12.2021, Statistisches Bundesamt [6]

Bei der Auswertung der Gemeindegrößenklassen in Tabelle 1 sind von 357.587,77 km² Gesamtfläche der Bundesrepublik 1.537 km² in [6] nicht erfasst.

Insgesamt sind in Tabelle 1 10.789 Gemeinden bei der Auswertung der Einwohner in Deutschland nach Gemeindegrößenklassen mit Stand vom 31.12.2021 vom Statistischen Bundesamt [6] erfasst. Davon liegen mit 7.830 Gemeinden die meisten Gemeinden in der Klasse der Dörfer und Landstädte mit Einwohnern kleiner 5.000 Menschen und machen hier 72,57 % aller Gemeinden in Deutschland aus. 20,96 % der Gemeinden zählen zu der Klasse der Kleinstädte mit 2.261 Gemeinden. Die Klasse der Mittelstädte umfasst 618 Gemeinden und 5,73 %. Die 80 Großstädte entsprechen 0,74 % aller Gemeinden. Wie Tabelle 1 verdeutlicht, existieren Städte über alle Gemeindegrößenklassen. Die kleinsten Städte haben dabei wie Arnis 268, Ummerstadt 452 oder Neumark 474 Einwohner.

In Bild 2 ist die Einwohnerstruktur und in Bild 3 die Flächenstruktur der Gemeinden in Deutschland nach der Einteilung der Gemeindegrößenklassen in Tabelle 1 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass 31,97 % der Einwohner in Deutschland mit Stand vom 31.12.2021 in Großstädten leben, was 26.626.802 Menschen umfasst. Im Detail setzt sich nach Bild 1 die Gruppe der 80 Großstädte aus 14 Städten mit 500.000 Einwohnern und mehr zusammen, 4 Städte davon sind Millionenstädte. 26 Großstädte liegen in der Gemeindegrößenklasse 200.000 bis <500.000 Einwohner und zählen 7.096.659 Einwohner und 40 Großstädte in der Klasse 100.000 bis <200.000 Einwohner, wo 5.499.601 Einwohner zu finden sind.

Wie Bild 1 und Tabelle 1 verdeutlichen, ist Deutschland vor allem durch Klein- und Mittelstädte geprägt. Hier leben 45.123.255 Einwohner, was 54,18 % der Bevölkerung ausmacht. Die Aufteilung erfolgt in die fast gleich großen Gruppen der Mittelstädte mit 22.885.707 Einwohnern, was 27,48 % der Bevölkerung in Deutschland umfasst und die Kleinstädte mit 22.237.548 Einwohnern, was 26,7 % entspricht. In den Gemeinden mit weniger als 5.000 Einwohnern leben 11.537.067 Menschen, was 13,85 % der Gesamtbevölkerung ausmacht.

Bei der Flächenstruktur in Bild 3 weisen die 80 Großstädte nur eine Fläche von 13.815 km² auf, was 3,86 % der Landesfläche von Deutschland entspricht, besitzen aber 31,97 % der Bevölkerung. Hier ergibt sich bezogen auf die Wärmeversorgung ein großer Wärmebedarf bei sehr geringer zur Verfügung stehender Fläche, was für die zukünftige Wärmeversorgung eine besondere Herausforderung darstellt. Auch im Bereich der Mittelstädte, wo 27,48 % der Bevölkerung leben sind mit 52.806 km² nur 14,77 % der Landesfläche vorhanden, wo sich gerade in den verdichteten Innenstadtkernen ein ähnliches Problem ergibt genauso wie bei den historisch gewachsenen Altstädten kleinerer Gemeindegrößenklassen. Im Vergleich dazu haben die Dörfer, Land- und Kleinstädte mit 43,96 % und 36,98 % der Landesfläche von Deutschland und nur 13,85 % bzw. 26,7 % der Bevölkerung eine wesentlich bessere Ausgangssituation im Bezug auf die Flächenverfügbarkeit und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten Umweltwärmequellen zu erschließen.

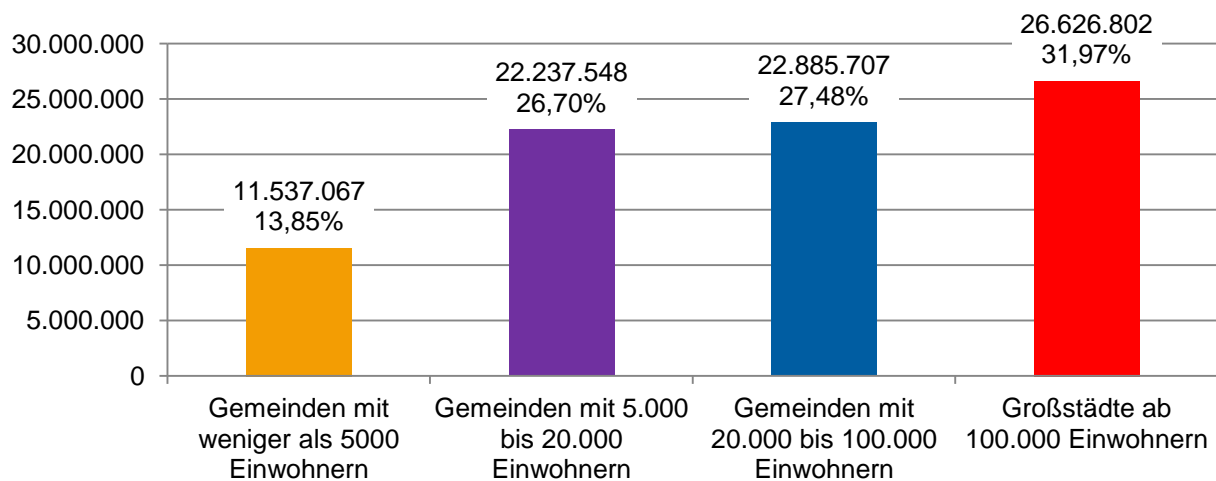


Bild 2: Einwohnerstruktur der Gemeinden in Deutschland, Daten Statistisches Bundesamt [6]

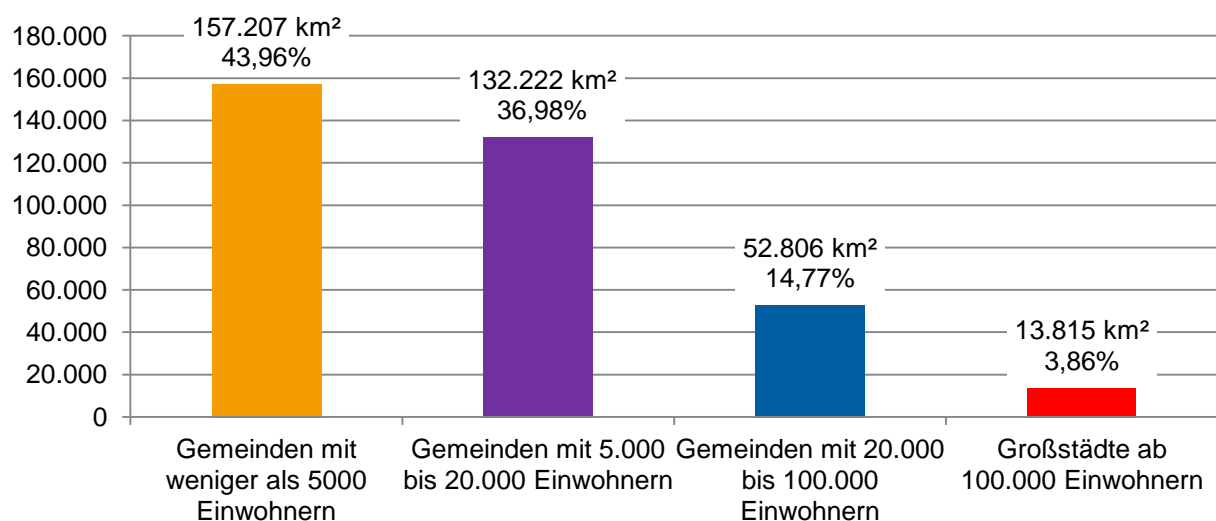


Bild 3: Flächenstruktur der Gemeinden in Deutschland, Daten Statistisches Bundesamt [6]

Im Detail betrachtet ergibt sich für die 4 Gruppen in Tabelle 1 eine Einwohnerdichte von 73,39 Ew./km² für die Gemeindegrößenklasse von weniger als 5.000 Einwohnern, 168,18 Ew./km² für die Klasse von 5.000 bis 20.000 Einwohnern, 433,39 Ew./km² für die Klasse von 20.000 bis 100.000 Einwohnern und für die Klasse ab 100.000 Einwohnern 1.927,35 Ew./km². Auch hier verdeutlicht sich die hohe Einwohnerkonzentration bei geringer zur Verfügung stehender Fläche bei der Gemeindegrößenklasse der Großstädte.

Die Bevölkerungsverteilung in Deutschland nach Groß-, Mittel- und Kleinstädten sowie Dörfern zeigt Bild 4. Ebenfalls sind in Bild 4 die Grenzen der Bundesländer dargestellt. Die höchsten Einwohnerkonzentrationen ergeben sich in Nordrhein-Westfalen. Hier liegt die größte Anzahl an Großstädten und Mittelstädten mit jeweils 30 und 178 Städten vor. Baden-Württemberg mit 9 Großstädten und 94 Mittelstädten sowie Niedersachsen mit 8 Großstädten und 82 Mittelstädten folgen anschließend vor Bayern mit 8 Großstädten und 67 Mittelstädten, wie in Bild 4 erkennbar. Darüber hinaus verdeutlicht Bild 4, dass sich eine hohe Konzentration an Groß- und Mittelstädten in der Mitte von Deutschland von West nach Ost erstreckt. Ein weiteres Band zieht sich von Südhessen, Baden-Württemberg nach Bayern. Dahingegen sind die Dörfer verhältnismäßig gleichmäßig über Deutschland verteilt.

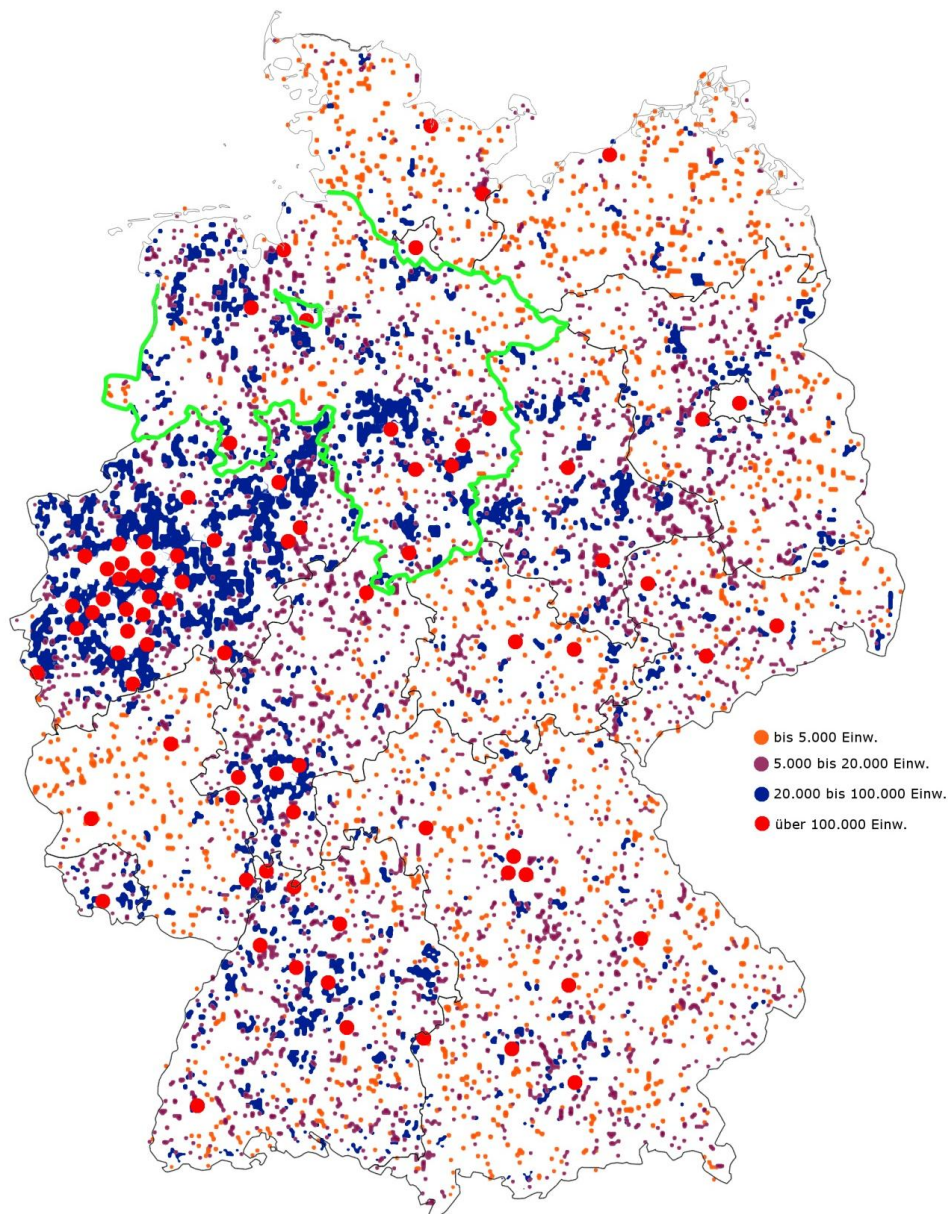


Bild 4: Bevölkerungsverteilung in Deutschland nach Groß-, Mittel- und Kleinstädten sowie Dörfern mit Grenzen der Bundesländer, Daten nach [8]

3. Wärmebedarf in Deutschland

3.1. Endenergiebedarf in Deutschland

Der Endenergiebedarf (EEV) in Deutschland für 2021 ist in Bild 5 nach [1] gezeigt und in Terawattstunden (TWh) angegeben. In Tabelle 2 ist der Endenergieverbrauch für die Jahre 2019, 2020 und 2021 zusätzlich auch in Petajoule (PJ) dargestellt.

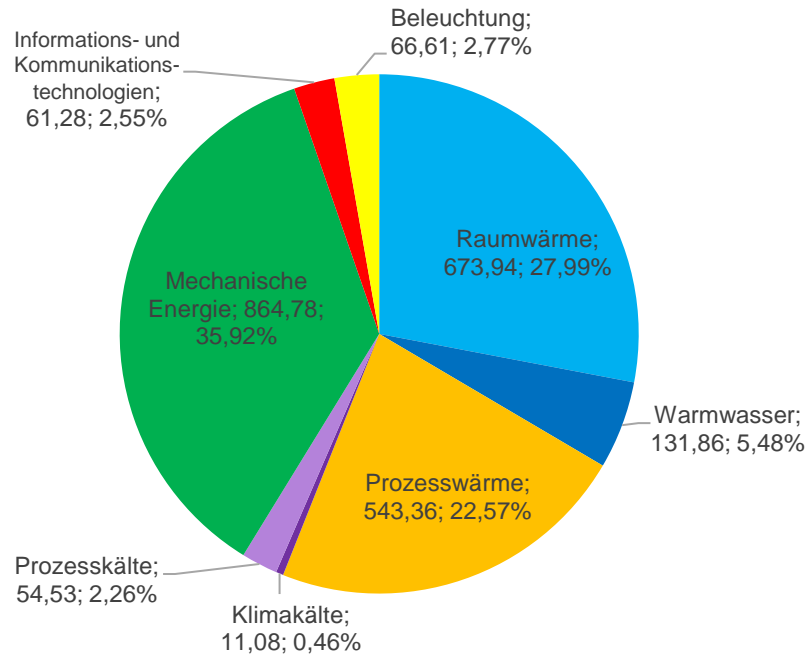


Bild 5: Endenergieverbrauch in Deutschland 2021 in [TWh] nach [1]

Der Endenergiebedarf in Deutschland lag 2021 bei 2.407,44 TWh bzw. bei 8.666,8 PJ. Der Wärmebereich macht dabei mit 56,04 % der Endenergie den größten Verbrauchssektor mit 1.349,17 TWh aus. Auf die Klimakälte entfielen 2021 65,61 TWh und 2,73 %, so dass der gesamte Wärme- und Kältebereich 58,77 % und damit fast 3/5 des Endenergiebedarfs entspricht. Mit 35,92 % und 864,78 TWh ist der Bereich der Mechanischen Energie der zweitgrößte Verbraucher, der u.a. die Antriebsmaschinen und den Verkehr umfasst. Auf die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) entfielen 2021 vom Endenergiebedarf bereits 2,55 % und damit 61,28 TWh und auf die Beleuchtung mit 66,61 TWh 2,77 %.

	2019		2020		2021	
	in PJ	in TWh	in PJ	in TWh	in PJ	in TWh
Raumwärme	2.385,7	662,69	2.373,5	659,31	2.426,2	673,94
Warmwasser	472	131,11	471,3	130,92	474,7	131,86
Prozesswärme	1.923,3	534,25	1.859,3	516,47	1.956,1	543,36
Wärme gesamt	4.781	1.328,06	4.704,1	1.306,69	4.857	1.349,17
Klimakälte	40	11,11	39,6	11,00	39,9	11,08
Prozesskälte	192,5	53,47	194,9	54,14	196,3	54,53
Kälte gesamt	232,5	64,58	234,5	65,14	236,2	65,61
Mechanische Energie	3.493,5	970,42	3.000,4	833,44	3.113,2	864,78
Informations- und Kommunikationstechnologien	215,9	59,97	217,2	60,33	220,6	61,28
Beleuchtung	250,6	69,61	243,8	67,72	239,8	66,61
EEV gesamt	8.973,5	2.492,64	8.400	2.333,33	8.666,8	2.407,44

Tabelle 2: Endenergieverbrauch (EEV) nach Anwendungszwecken in Deutschland [1]

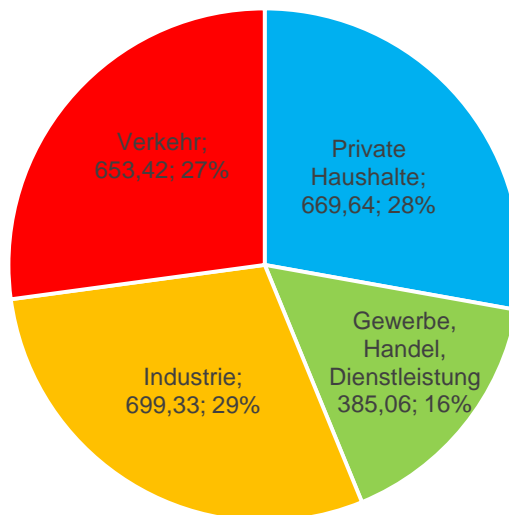


Bild 6: Endenergieverbrauch nach Sektoren 2021 in [TWh] nach [1]

Bild 6 zeigt den Endenergieverbrauch in Deutschland für die vier Sektoren Industrie, Verkehr, Private Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen für das Jahr 2021. Die Industrie benötigt mit 699,33 TWh und 29 % die meiste Endenergie gefolgt von den Privaten Haushalten mit 669,64 TWh und 28 %. An dritter Stelle liegt der Verkehr mit 27 % und einem Endenergiebedarf von 653,42 TWh. Der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) verbraucht die geringste Menge an Endenergie mit 385,06 TWh und 16 %.

3.2. Wärmebedarf in Deutschland

3.2.1. Wärmebereiche

Der Energieverbrauch für Wärmezwecke gliedert sich in Raumwärme, Prozesswärme und Warmwasser und wird in den Sektoren Haushalt, Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) benötigt. Der Kältebereich unterteilt sich in Klimakälte und Prozesskälte. Der Gesamtwärmebedarf in Deutschland lag 2021 bei 4.857,1 PJ bzw. bei 1.349,2 TWh. Davon entfielen 673,9 TWh auf die Raumwärme, 543,4 TWh auf die Prozesswärme und 131,9 TWh auf das Warmwasser, wie in Bild 7 dargestellt.

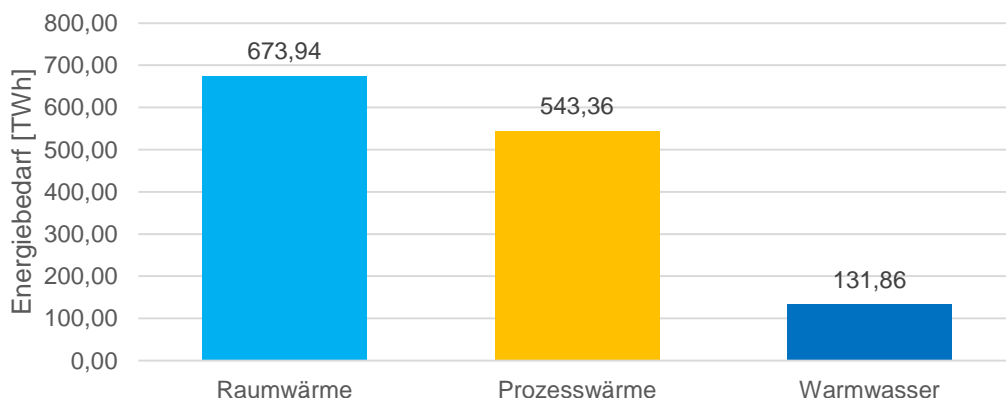


Bild 7: Energieverbrauch nach Wärmebereichen in Deutschland 2021 in [TWh]

Der Wärmebedarf gliedert sich in den Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturbereich. Bei der Prozesswärme entfallen ca. 20 % der Bedarfe in den Niedertemperaturbereich unter 100°C, wie die Auswertung der Daten aus [9] zeigt, siehe auch Bild 10. Damit lassen sich für das Jahr 2021 von den 1.956,1 PJ Wärmebedarf bei der Prozesswärme ungefähr 1.565 PJ dem

Mittel- und Hochtemperaturbereich und 391 PJ dem Niedertemperaturbereich zuordnen, siehe Bild 8 und Tabelle 3. Insgesamt entfallen 67,78 %, d.h. über zwei Drittel des Wärmebedarfes in Deutschland mit 3.292,12 PJ bzw. 914,48 TWh auf den Niedertemperaturbereich bis 100° C, siehe auch schraffierter Bereich in Bild 8. Das sind 38 % des gesamten Endenergiebedarfs in Deutschland. Im Mittel- und Hochtemperaturbereich wurden nach Abschätzung aus [9] ca. 1.564,88 PJ bzw. 434,69 TWh Wärme im Jahr 2021 benötigt.

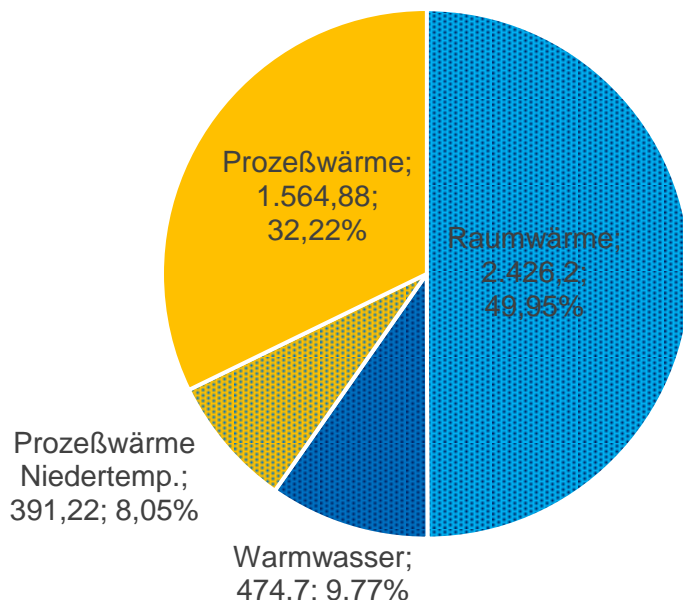


Bild 8: Energieverbrauch nach Wärmebereichen in Deutschland 2021 in [PJ]

Wärmebereich	Wärmebedarf		
	in [PJ]	in [TWh]	in [%]
Raumwärme	2.426,2	673,94	49,95
Warmwasser	474,7	131,86	9,77
Prozesswärme Niedertemperaturbereich	391,22	108,67	8,05
Teilsumme	3.292,12	914,48	67,78
Prozesswärme höhere Temperaturbereiche	1.564,88	434,69	32,22
Gesamtsumme	4.857,1	1.349,17	100,00

Tabelle 3: Wärmebedarf nach Anwendungszwecken in Deutschland [1, 9]

3.2.2. Wärmebedarf nach Nutzern und Wärmebereichen

Bild 9 und Tab. 4 zeigen die Aufgliederung der Wärme- und Kältebereiche in Deutschland für die vier Sektoren Industrie, Verkehr, Private Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen als Nutzer für das Jahr 2021. Im Bereich Raumwärme benötigen die Privaten Haushalte mit 67,75 % und 456,61 TWh den größten Anteil gefolgt von Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 25,72 % und 173,31 TWh. Auch im Bereich Warmwasser dominieren die Privaten Haushalte mit 80,25 % und 105,83 TWh den Endenergiebedarf in diesem Segment ebenfalls gefolgt von dem Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 16,26 % und 21,44 TWh. Im Bereich Prozesswärme dominiert die Industrie vollständig alle anderen Sektoren mit 86,78 % und 471,56 TWh. Die Privaten Haushalte folgen mit 7,38 % und 40,08 TWh, wo die Prozesswärme z.B. für das Kochen benötigt wird, sowie das Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 5,84 % und 31,72 TWh. Der gesamte Wärmebereich wird mit 44,66 % und 602,53 TWh von den Privaten Haushalten bestimmt gefolgt von der Industrie mit 38,32 % und 516,97 TWh und dem Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 16,79 % und 226,47 TWh. Der Verkehr ist mit 0,47 % in der Raumwärme vertreten.

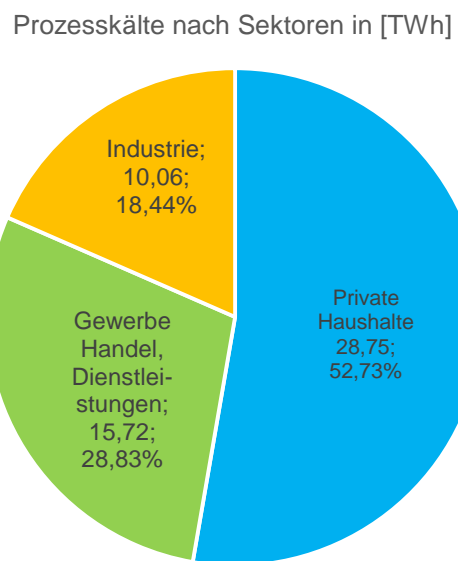
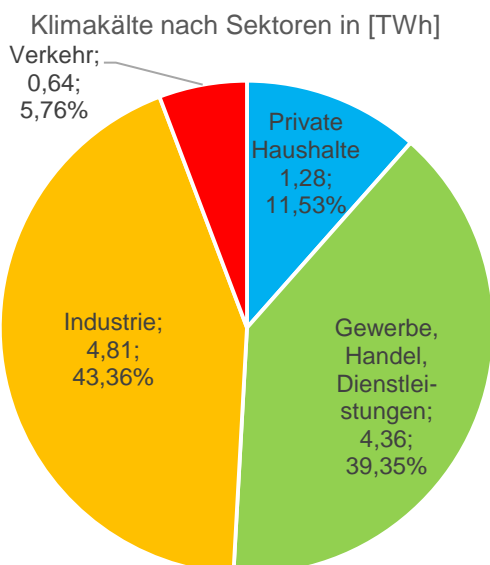
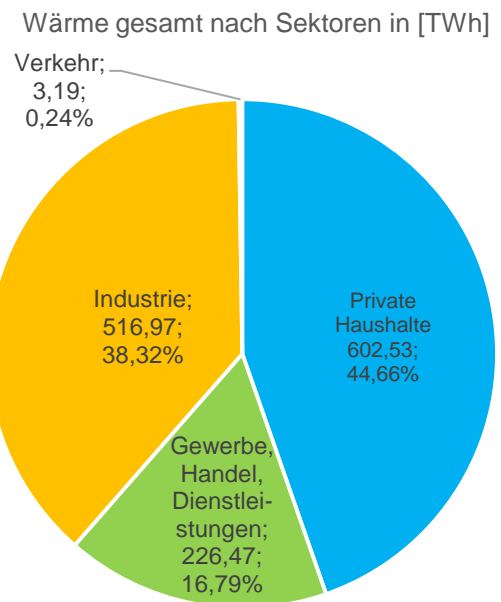
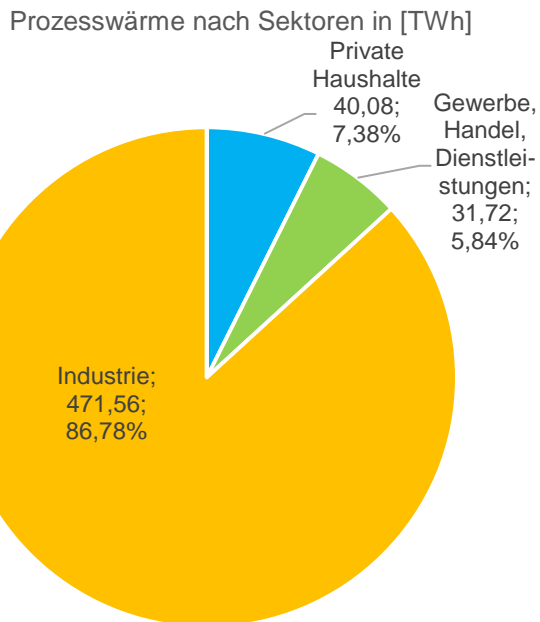
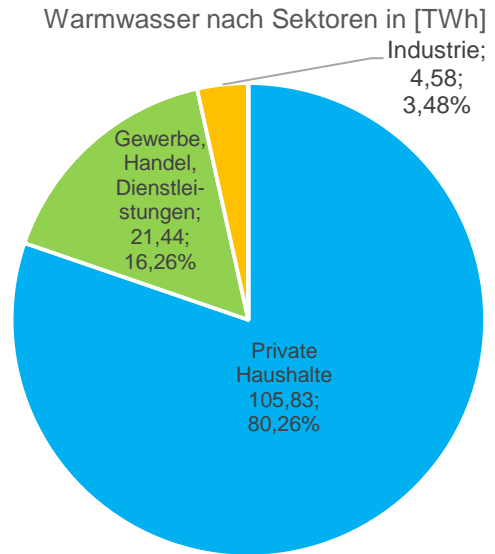
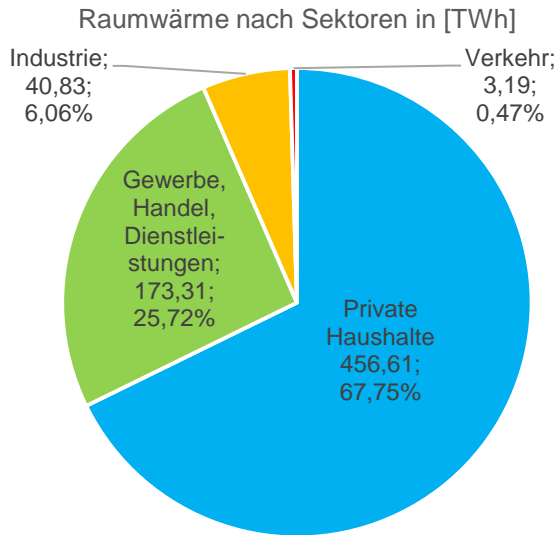


Bild 9: Wärmebedarf nach Nutzern und Wärmebereichen 2021 nach [1]

Im Bereich Klimakälte dominieren, wie in Bild 9 dargestellt, die Sektoren Industrie mit 43,36 % und 4,81 TWh und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 39,35 % und 4,36 TWh. Die Privaten Haushalte haben bei der Klimakälte einen Anteil von 11,53 % und der Verkehr von 5,76 %. Bei der Prozesskälte wird der Bereich durch die Privaten Haushalte mit 52,73 % und 28,75 TWh bestimmt, gefolgt von den Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 28,83 % und 15,72 TWh und der Industrie mit 18,44 % und 10,06 TWh. Vom gesamten Endenergiebedarf macht allerdings der Kältebereich nur 2,73 % mit 65,61 TWh und der Wärmebereich 56,04 % mit 1.349,17 TWh aus, wie auch in Abschnitt 3.1. dargestellt.

2021	Private Haushalte	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	Industrie	Verkehr	Summe
in [PJ]					
Raumwärme	1.643,8	623,9	147,0	11,5	2.426,2
Warmwasser	381,0	77,2	16,5		474,7
Prozesswärme	144,3	114,2	1.697,6		1.956,1
Wärme gesamt	2.169,1	815,3	1.861,1	11,5	4.857,0
Klimakälte	4,6	15,7	17,3	2,3	39,9
Prozesskälte	103,5	56,6	36,2		196,3
Kälte gesamt	108,1	72,3	53,5	2,3	236,2
Mechanische Energie	19,9	235,4	540,0	2.317,9	3.113,2
IKT	77,4	103,4	30,7	9,1	220,6
Beleuchtung	36,2	159,8	32,3	11,5	239,8
Endenergieverbrauch gesamt	2.410,7	1.386,2	2.517,6	2.352,3	8.666,8
in [TWh]					
Raumwärme	456,61	173,31	40,83	3,19	673,94
Warmwasser	105,83	21,44	4,58		131,86
Prozesswärme	40,08	31,72	471,56		543,36
Wärme gesamt	602,53	226,47	516,97	3,19	1.349,17
Klimakälte	1,28	4,36	4,81	0,64	11,08
Prozesskälte	28,75	15,72	10,06		54,53
Kälte gesamt	30,03	20,08	14,86	0,64	65,61
Mechanische Energie	5,53	65,39	150,00	643,86	864,78
IKT	21,50	28,72	8,53	2,53	61,28
Beleuchtung	10,06	44,39	8,97	3,19	66,61
Endenergieverbrauch gesamt	669,64	385,06	699,33	653,42	2.407,44
in [%]					
Raumwärme	67,75	25,72	6,06	0,47	100,00
Warmwasser	80,26	16,26	3,48		100,00
Prozesswärme	7,38	5,84	86,78		100,00
Wärme gesamt	44,66	16,79	38,32	0,24	100,00
Klimakälte	11,53	39,35	43,36	5,76	100,00
Prozesskälte	52,73	28,83	18,44		100,00
Kälte gesamt	45,77	30,61	22,65	0,97	100,00
Mechanische Energie	0,64	7,56	17,35	74,45	100,00
IKT	35,09	46,87	13,92	4,13	100,00
Beleuchtung	15,10	66,64	13,47	4,80	100,00
Endenergieverbrauch gesamt	27,82	15,99	29,05	27,14	100,00

Tabelle 4: Endenergieverbrauch nach Sektoren und Anwendungszwecken in Deutschland [1]

Der gesamte Wärme- und Kältebereich wird, wie die Zusammenstellung in Bild 9 verdeutlicht, maßgeblich durch die Privaten Haushalte und die Industrie bestimmt. Der Verkehr spielt im Wärmebereich eine untergeordnete Rolle. In den anderen Anwendungszwecken der Endenergie dominieren i.a. andere Sektoren, wie in der Zusammenstellung und Auswertung in Tabelle 4 ersichtlich. So wird der Bereich der Mechanischen Energie maßgeblich durch den Sektor Verkehr mit 74,45 % und 643,86 TWh bestimmt, wo 99 % als mechanische Antriebsenergie genutzt werden, gefolgt von der Industrie mit 17,35 % und 150 TWh. Im Bereich Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) dominiert der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 46,87 % und 28,72 TWh vor der Industrie mit 35,09 % und 21,5 TWh. Bei der Beleuchtung wurde die meiste Endenergie im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 66,64 % und 44,39 TWh verbraucht. Die Industrie und die Privaten Haushalte folgten mit jeweils 15,1 und 13,47 %.

3.2.3. Verteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturbereichen und Anwendungen

Bild 10 zeigt den Nutzwärmebedarf bezogen auf die verschiedenen Temperaturbereiche und die Verteilung des Wärme- und Temperaturbedarfs nach Industrie, Gewerbe und Haushalten. Besonders der Industriesektor ist im Bereich der Prozesswärme durch höhere Temperaturniveaus gekennzeichnet. Hierbei wird zwischen dem Niedertemperaturbereich bis $T < 100^{\circ}\text{C}$, dem Mitteltemperaturbereich von $T = 100$ bis 500°C , dem Hochtemperaturbereich von $T = 500$ bis 1.000°C und dem Höchsttemperaturbereich mit Temperaturen von $T > 1.000^{\circ}\text{C}$ unterschieden. Diese Unterteilung ist erforderlich, da die Erneuerbaren Energiequellen unterschiedliche Temperaturniveaus bedienen, so dass deren Einsetzbarkeit für das jeweilige Temperaturniveau zu beachten ist. Die Aufschlüsselung des Wärmebedarfs zeigt, dass der Bedarf an Nutzwärme im Niedertemperaturbereich mit 3.170,9 PJ am höchsten ist, wobei die Raumwärme mit 2.426,2 PJ den größten Anteil im Niedertemperaturbereich hat. Dies ist in der großen Zahl der privaten Haushalte in Deutschland mit ihrem Bedarf an Heizwärme und Warmwasser begründet. Daneben spielt auch der Bedarf an Raumwärme für Gebäude des öffentlichen Sektors und der Industrie eine große Rolle. Im Vergleich dazu zeigt die branchenspezifische Gliederung des Wärmebedarfs, dass für viele Industriezweige der Wärmebedarf der Prozesswärme eine Größenordnung kleiner als der Raumwärmebedarf ist. Sogar der Höchsttemperaturbereich mit Temperaturen von über 1.000°C der Industriezweige der Metallindustrie, Nichtmetallindustrie und chemischen Industrie mit einem Gesamtprozesswärmebedarf von zusammen 425 PJ ist deutlich kleiner als der Wärmebedarf des Niedertemperaturbereichs. Darüber hinaus ist der Wärmebedarf im Niedertemperaturbereich mit 3.170,9 PJ dreimal größer als die Summe des gesamten Wärmebedarfs der Bereiche höherer Temperaturen mit einer Energiemenge von 1.050 PJ.

Insgesamt liegt der Bedarf an Prozesswärme nach Bild 10 bei 1.320 PJ. Der Höchsttemperaturbereich macht hierbei mit einem Wärmebedarf von 425 PJ 32,2 % der Prozesswärme aus, gefolgt vom Mitteltemperaturbereich mit 28,48 % und 376 PJ Wärmebedarf. An dritter Stelle liegt der Wärmebedarf im Niedertemperaturbereich mit 270 PJ und 20,45 % der Prozesswärme. Der Hochtemperaturbereich liegt mit einem Wärmebedarf von 249 PJ an vierter Stelle, was 18,86 % der Prozesswärme entspricht.

Wie Bild 10 verdeutlicht, erstreckt sich der Wärmebedarf der Industrie und des Gewerbes über alle Temperaturbereiche vom Nieder-, Mittel-, Hoch- und Höchsttemperaturbereich. Der Wärmebedarf der Haushalte ist dahingegen ausschließlich im Niedertemperaturbereich angesiedelt, ebenso wie der Wärmebedarf im Verkehr, Handel sowie dem Großteil der Dienstleistungen. Im Höchsttemperaturbereich wird der Wärmebedarf durch die Metallindustrie, Nichtmetallindustrie und chemischen Industrie dominiert. Diese Industriezweige benötigen auch den Hoch- und Mitteltemperaturbereich, während im Niedertemperaturbereich nur die chemische Industrie vertreten ist. Die Papier- und Druckindustrie, die Transportindustrie sowie der Maschinen- und Metallbau besitzen Wärmebedarf sowohl im Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturbereich. Im Nieder- und Mitteltemperaturbereich haben auch noch die Industriezweige Gummi und Kunststoff, die Textilindustrie, die Nahrungs- und Genussmittelindustrie sowie die Holzindustrie Temperatur Anwendungen.

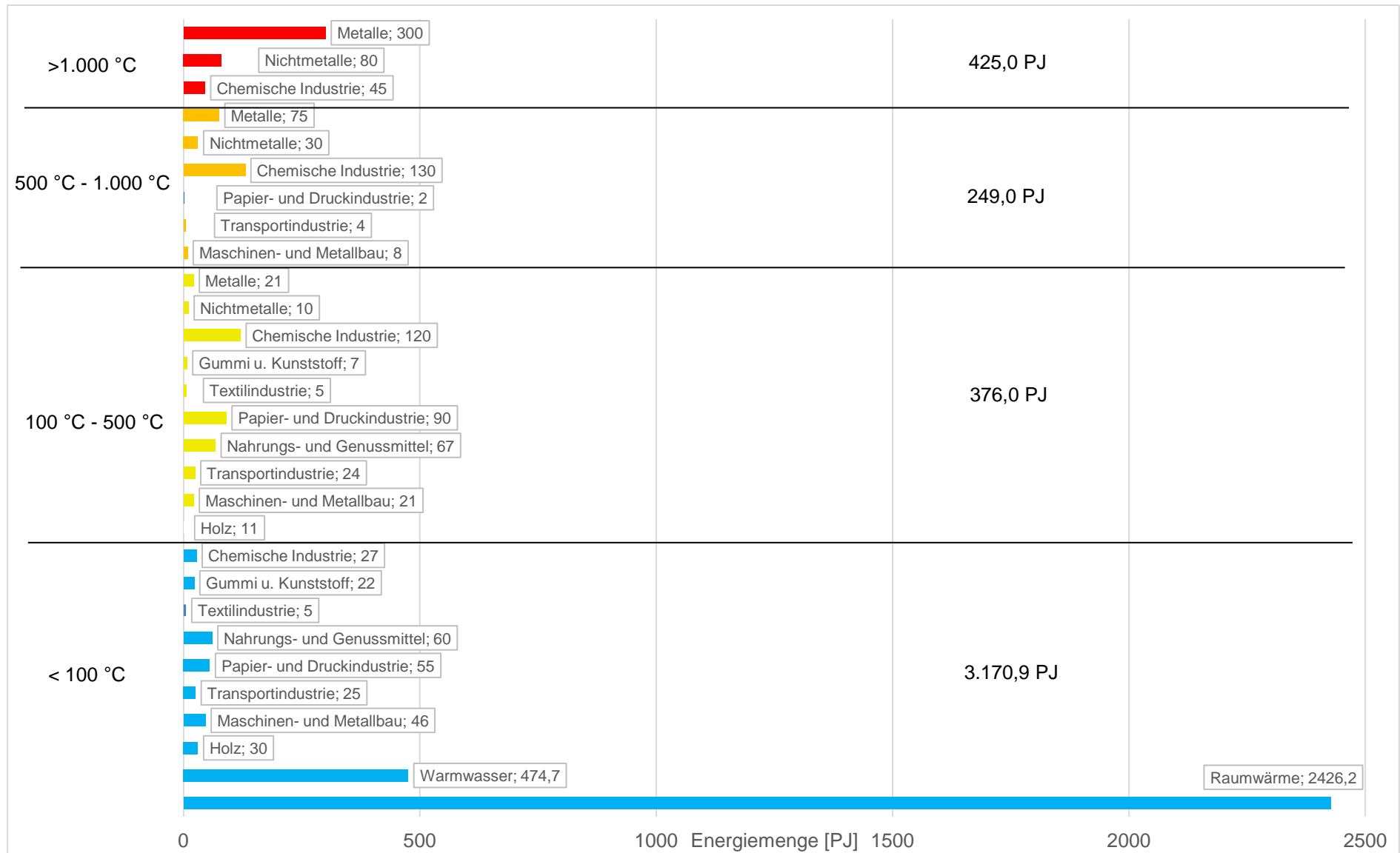


Bild 10: Verteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturbereichen und Anwendungen nach [1, 9]

3.3. Temperatureinsatzbereiche der verschiedenen Wärmequellen

In Bild 11 sind für verschiedene erneuerbare bzw. grundsätzlich nachhaltig nutzbare Wärmequellen die Temperatureinsatzbereiche aufgeführt, aus denen der Wärme- und Temperaturbedarf von Industrie, Gewerbe und Haushalten zukünftig gedeckt werden kann. Besonders bei der Prozesswärme im Industriesektor mit seinen unterschiedlichen Temperaturbereichen gibt es viele Einsatzmöglichkeiten von erneuerbaren Energiequellen, wobei deren unterschiedliche Einsatzgrenzen zu berücksichtigen sind. Eine sinnvolle Kombination der verschiedenen Quellen und Einsatzbereiche ist hier zukünftig besonders wichtig, um die zur Verfügung stehenden begrenzten Ressourcen effizient zu nutzen. Nicht dargestellt sind in Bild 11 die Temperatureinsatzbereiche der konventionellen Wärmequellen wie Erdgas, Braun- oder Steinkohle, die alle Temperaturbereiche bedienen können.

Für den Niedertemperaturbereich bis $T < 100^{\circ}\text{C}$ können Fließgewässer, die Oberflächennahe Geothermie und die Luftwärme genutzt werden. Bei allen drei Umweltwärmequellen ist der Einsatz von Wärmepumpen erforderlich. Ebenfalls in die Kategorie fällt die Nutzung der Abwasserwärme und der Grundwasserwärme. Die Hydrothermale Nutzung der Geothermie ist bis 100°C möglich ggf. in Kombination mit einer Wärmepumpe. Die direkte Nutzung der Sonneneinstrahlung im Niedertemperaturbereich ist bis 75°C mit Plattenabsorbern erreichbar, wobei diese Temperaturen ausschließlich in den Sommermonaten gewonnen werden können. Das gleiche gilt auch für Vakuumröhrenkollektoren, die bis 200°C einsetzbar sind, und für die konzentrierende Solarthermie, die z.B. mit Parabolrinnen von 50 bis 300°C im Mitteltemperaturbereich verwendbar ist, laut [4] sogar bis 430°C . Fernerhin ist für den Mitteltemperaturbereich bis 150 bzw. 200°C die tiefe Geothermie nutzbar, wie in Bild 11 ersichtlich, wobei hier erste Anwendungen in der Lebensmittel- und Papierindustrie erfolgen.

Die feste Biomasse und das Biogas sind im Nieder- und Mitteltemperaturbereich einsetzbar und können bis 600°C auch noch im unteren Hochtemperaturbereich ab 500°C verwendet werden. Gerade der Temperaturbereich über 500°C kann nur anteilig elektrifiziert werden und benötigt auch weiterhin den Einsatz von Brennstoffen, so dass Bioenergiequellen eine zentrale Rolle bei der Mittel- und Hochtemperatur-Prozesswärme spielen [4]. Im unteren Temperaturbereich bis 500°C werden primär feste Bioenergieträger und im Höchsttemperaturbereich mit $T > 1.000^{\circ}\text{C}$ Biomethan und biogen gewonnener Wasserstoff Anwendung finden. Biomethan ist wie Erdgas, Wasserstoff, Synthetisches Methan und Strom für alle Temperaturbereiche nutzbar und kann auch im Höchsttemperaturbereich ab 1.000°C Verwendung finden, wie die Darstellung in Bild 11 verdeutlicht.

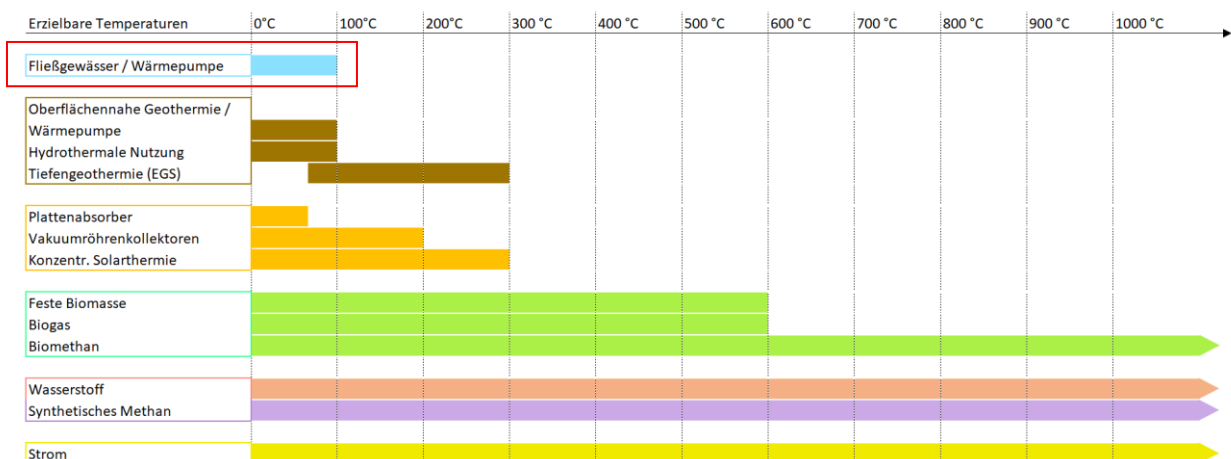


Bild 11: Temperatureinsatzbereiche der verschiedenen Wärmequellen, Datenquelle [10, 11]

Die in Bild 11 aufgeführten Wärmequellen zzgl. ihrer Temperatureinsatzbereiche zeigen, dass zukünftig für die Dekarbonisierung von Industrie, Gewerbe und Haushalt verschiedene Möglichkeiten bestehen, die bisher ausschließlich genutzten konventionellen Wärmequellen

Erdgas, Braun- und Steinkohle zu ersetzen. Hierbei wird zukünftig eine Nutzung aller unten aufgeführten Wärmequelle erforderlich sein, die teilweise vielleicht sogar kombiniert werden müssen. Eine universelle Lösung für alle Temperaturbereiche wie die konventionellen Wärmequellen es bisher waren, ist zukünftig nicht mehr möglich, die Wärmeversorgung wird diffiziler, komplexer und anspruchsvoller.

3.4. Wärmeerzeugung in Deutschland

Bei der Wärmeerzeugung in Deutschland von 1.349,17 TWh im Jahr 2021 dominieren die fossilen Energieträger Gas mit 47,3 % und 638,44 TWh sowie Mineralöl mit 11,9 % und 160,83 TWh, wie in Bild 12 und Tabelle 5 dargestellt. Die Erneuerbaren Energien lieferten 13,2 % mit 178,08 TWh und waren damit 2021 nach den Gasen zweitgrößter Wärme-lieferant. Von nachgeordneter Bedeutung ist die Wärmeerzeugung aus Strom mit 9 %, Kohle mit 8,8 % und Fernwärme mit 8,6 %.

Innerhalb des Wärmesektors dominieren bei der Raumwärme und Warmwasser die Gase mit 50,6 % und 54,3 %, gefolgt von den Erneuerbaren mit 19 % bei der Raumwärme und vom Strom mit 17,7 % beim Warmwasser, siehe Tabelle 5. Auf Platz 3 lagen bei der Raumwärme die Mineralöle mit 17,6 % und die Erneuerbaren mit 13,67 % beim Warmwasser. Im Bereich der Prozesswärme dominieren die Gase mit 46,13 % und 229,89 TWh gefolgt von den Kohlen mit 22,53 % und 112,28 TWh. Der drittgrößte Lieferant von Prozesswärme ist dann der Strom mit 16,8 % und 83,72 TWh, während die Erneuerbaren Energien an vierter Stelle mit 6,64 % und 33,08 TWh liegen. Wie in Tabelle 5 ersichtlich, wird der Kältebereich sowohl bei der Klimakälte mit 87,72 % und 9,72 TWh als auch bei der Prozesskälte mit 99,69 % und 54,36 TWh vom Strom bestimmt.

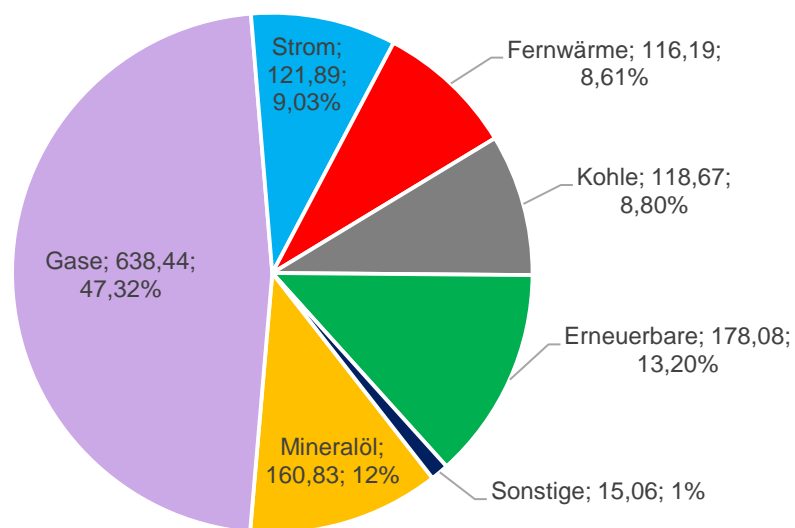


Bild 12: Wärmeerzeugung nach Energieträgern in Deutschland 2021 in [TWh] [1]

Die Zusammensetzung der erneuerbaren Energiequellen in Deutschland zur Wärmeversorgung 2021 zeigt Bild 13 nach Angaben aus [12]. Die feste Biomasse hat mit 148,7 TWh 74,65 % und die Biogase mit 19,8 TWh 9,94 % erbracht, so dass die Biomasse mit der Flüssigen Biomasse zusammen 86,04 % sowie 171,4 TWh den Großteil der Erneuerbaren Wärmeversorgung ausmacht. Aus oberflächennaher Geothermie und Umweltwärme werden 9 % sowie aus Solarthermie 4,2 % der Wärme gewonnen. Die tiefe Geothermie steuert 0,8 % zur Wärmeerzeugung bei. Insgesamt haben 2021 nach [12] die Erneuerbaren Energien im Wärmesektor 199,2 TWh bereitgestellt. Nach [1] ergibt sich für den Bereich Wärmeerzeugung aus Erneuerbaren Energien eine Gesamtsumme von 178,08 TWh, siehe Tabelle 5 und Bild 12, was zu einer Abweichung zu [12] von 21,12 TWh für 2021 führt.

Bei der Bereitstellung der Fernwärme wurde 2021 der Großteil aus den fossilen Energieträgern Erdgas mit 46,7% sowie Steinkohle mit 13,9% und Braunkohle mit 5,9% gewonnen, siehe [13]. Nur 17,3 % der Fernwärme stammt aus Erneuerbaren, wovon die Biomasse 9,2 %, der biogene Siedlungsabfall 7,3 % und die Geo- und Solarthermie 0,8 % liefern.

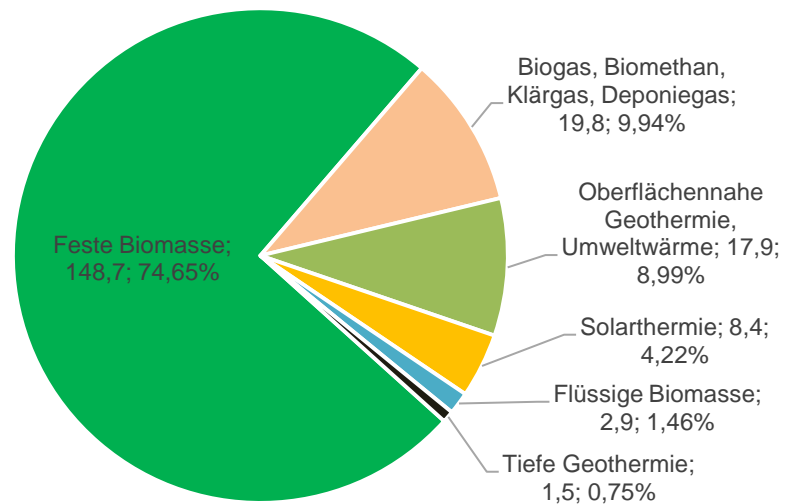


Bild 13: Endenergieverbrauch aus Erneuerbaren Energien im Wärmesektor 2021 in [TWh] [12]

In Bild 14 ist die Endenergiebereitstellung nach Energieträgern in Deutschland für das Jahr 2021 nach [1] dargestellt. Hierbei zeigt sich das von den 2.407,47 TWh Endenergiebedarf 33,27 % aus Mineralölen mit 800,86 TWh, 26,92 % aus Gasen mit 648,08 TWh und 20,61 % aus Strom mit 496,19 TWh stammen. Die Erneuerbaren Energien haben 2021 ohne ihren Anteil am Strommix 8,82 % mit 212,42 TWh zum Endenergieverbrauch beigetragen. Auf die Kohle und Fernwärme entfielen 118,7 und 116,2 TWh, was 4,93 % bzw. 4,83 % entspricht.

Bei der Bruttostromerzeugung lieferten die Erneuerbaren Energien 2021 233,933 TWh Strom [14] bei einer gesamten Bruttoerzeugung in Deutschland von 585 TWh, einem Bruttoinlandsstromverbrauch von 564,2 TWh und einem Letztverbrauch von 506,8 TWh [15]. Bezogen auf den Primärenergieverbrauch stammten von insgesamt 12.413 PJ im Jahr 2021 1.949,8 PJ bzw. 541,3 TWh aus Erneuerbaren Energien, was einem Anteil von 15,7 % entspricht. 2022 stieg dieser Anteil auf 17,2 % bei einer Primärenergiebereitstellung aus Erneuerbaren Energien von 2.034,6 PJ bzw. 565,2 TWh. Der Gesamtprimärenergieverbrauch lag 2022 in Deutschland bei 11.840,8 PJ [16].

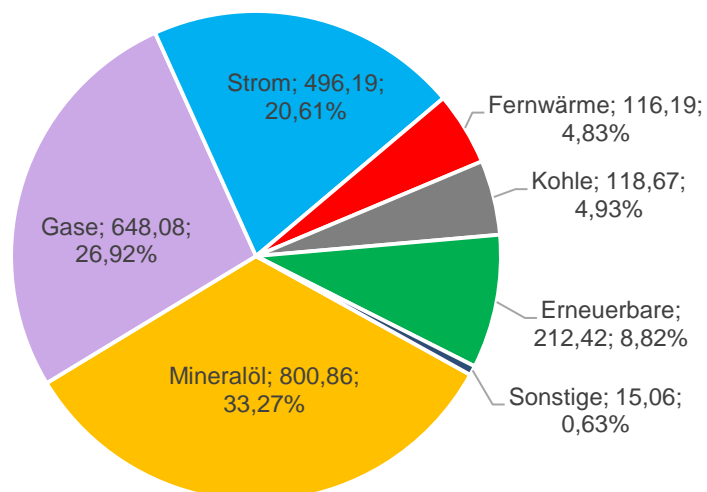


Bild 14: Endenergiebereitstellung nach Energieträgern in Deutschland 2021 in [TWh] [1]

2021	Mineralöl	Gase	Strom	Fernwärme	Kohlen	Erneuerbare	Sonstige	Summe
in [PJ]								
Raumwärme	426,4	1.226,7	57,8	231,6	22,3	460,5	1,0	2.426,3
Warmwasser	63,8	244,1	79,6	24,9	0,7	61,5	0,1	474,7
Prozeßwärme	88,8	827,6	301,4	161,8	404,2	119,1	53,1	1.956,0
Wärme gesamt	579,0	2.298,4	438,8	418,3	427,2	641,1	54,2	4.857,0
Klimakälte	2,2	2,6	35,0			0,1		39,9
Prozeßkälte		0,6	195,7					196,3
Kälte gesamt	2,2	3,2	230,7			0,1		236,2
Mechanische Energie	2.286,7	31,5	672,5			122,6		3.113,3
IKT	6,5		213,7			0,4		220,6
Beleuchtung	8,7		230,6			0,5		239,8
Endenergieverbrauch gesamt	2.883,1	2.333,1	1.786,3	418,3	427,2	764,7	54,2	8.666,9
in [TWh]								
Raumwärme	118,44	340,75	16,06	64,33	6,19	127,92	0,28	673,97
Warmwasser	17,72	67,81	22,11		0,19	17,08	0,03	124,94
Prozeßwärme	24,67	229,89	83,72		112,28	33,08	14,75	498,39
Wärme gesamt	160,83	638,44	121,89	116,19	118,67	178,08	15,06	1.349,17
Klimakälte	0,61	0,72	9,72			0,03		11,08
Prozeßkälte		0,17	54,36					54,53
Kälte gesamt	0,61	0,89	64,08			0,03		65,61
Mechanische Energie	635,19	8,75	186,81			34,06		864,81
IKT	1,81		59,36			0,11		61,28
Beleuchtung	2,42		64,06			0,14		66,61
Endenergieverbrauch gesamt	800,86	648,08	496,19	116,19	118,67	212,42	15,06	2.407,47
in [%]								
Raumwärme	17,57	50,56	2,38	9,55	0,92	18,98	0,04	100,00
Warmwasser	14,18	54,27	17,70		0,16	13,67	0,02	100,00
Prozeßwärme	4,95	46,13	16,80		22,53	6,64	2,96	100,00
Wärme gesamt	11,92	47,32	9,03	8,61	8,80	13,20	1,12	100,00
Klimakälte	5,51	6,52	87,72			0,25		100,00
Prozeßkälte		0,31	99,69					100,00
Kälte gesamt	0,93	1,35	97,67			0,04		100,00
Mechanische Energie	73,45	1,01	21,60			3,94		100,00
IKT	2,95		96,87			0,18		100,00
Beleuchtung	3,63		96,16			0,21		100,00
Endenergieverbrauch gesamt	33,27	26,92	20,61	4,83	4,93	8,82	0,63	100,00

Tabelle 5: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken in Deutschland [1]

3.5. Wärmeszenarien

Im Hinblick auf die zukünftigen Wärmeszenarien für Deutschland existieren eine Vielzahl von Studien. Das Bundesamt für Naturschutz [48] geht nach Auswertung von 7 Szenariestudien davon aus, dass sich der Endenergiebedarf für Raumwärme und Prozesswärme von 1.217,3 TWh im Jahr 2021 auf 755 TWh im Jahr 2050 durch Erhöhung der Gebäude- und Prozesseffizienz reduziert. Die so gewonnenen Endenergieeinsparungen liegen bei 38 %. Eine Betrachtung des Warmwasserbedarfs von 131,86 TWh 2021 ist in [48] nicht erfolgt. Im BEE-Wärmeszenario 2045 [4] wird für die Wärmebereitstellung in Deutschland ein Rückgang des Endenergiebedarfs von 1.200 TWh 2020 auf 900 TWh im Jahr 2045 angenommen, auf Grund von energetischen Modernisierungen, effizienterem Heizverhalt und der Reduktion von Effizienzverlusten. Die prognostizierte Einsparung liegt hier bei 25 %. Zukünftige Einsparungen im Wärmebereich von 15 bis 30 % scheinen grundsätzlich möglich zu sein.

3.6. Erneuerbare Wärmequellen

3.6.1. Biomasse

Weltweit ist die Biomasse die am meisten genutzte regenerative Energiequelle, wobei hier traditionell die Hauptnutzung im Bereich der Wärmeerzeugung liegt. Beim Primärenergieverbrauch für das Jahr 2022 stammen zur Verbrauchsdeckung so z.B. in Deutschland 17,2 % und damit 2.034,6 PJ bzw. 565,2 TWh aus Erneuerbaren Energien, bei denen die Biomasse mit über 50 % den größten Anteil ausmacht [16]. 2020 lag der Anteil der Biomasse bei den Erneuerbaren Energien mit 1.143 PJ bei 58,2 % und beim gesamten Primärenergieverbrauch bei 9,7 % [17]. Auch beim Endenergieverbrauch entfällt 2021 mit 171,4 TWh und 86,04 % der Großteil der Erneuerbaren Wärmeversorgung auf die Biomasse, wie in Abschnitt 3.4. dargestellt. Neben der Wärmeerzeugung wird die Biomasse als Energiequelle auch für die Herstellung von Kraftstoffen und für die Erzeugung von Strom eingesetzt. Die Biomasse stammt aus der Forstwirtschaft und von landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie aus biogenen Nebenprodukten, Abfällen und Reststoffen.

Das nutzbare Gesamtpotenzial der Biomasse in Deutschland wird für das Jahr 2050 bei 1.673 PJ gesehen [17], was 464,7 TWh entspricht. Das zusätzlich nutzbare Potenzial liegt damit im Vergleich zum Jahr 2020 bei 530 PJ bzw. 147,2 TWh.

Von dem nutzbaren Potenzial entfallen 458 PJ (127,2 TWh) auf Energiepflanzen wie Mais, Raps, Rüben, Getreide, Gräser oder umweltfreundliche Dauerkulturen, Wildpflanzenmischungen oder schnell wachsende Baumarten wie Papeln etc. als Agrarholz. Die Anbaufläche für Energiepflanzen wurde bei den Potenzialuntersuchungen auf 2,5 Millionen Hektar gedeckelt. Die gesamte Ackerfläche lag 2022 in Deutschland bei 11,657 Millionen Hektar, die Grünlandflächen bei 4,7334 Millionen Hektar und die Fläche für Dauerkulturen bei 0,2026 Millionen Hektar. Insgesamt ergibt sich für Deutschland 2022 eine landwirtschaftliche Nutzfläche von 16,5949 Millionen Hektar [18], so dass für Energiepflanzen 15,1 % der landwirtschaftlichen Fläche genutzt werden kann. Der Verlust an Ackerfläche liegt in Deutschland seit 2010 bei 109.100 Hektar infolge von Flächenversiegelung, Freiflächen PV etc. Im Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern wird die Anbaufläche für Energiepflanzen mit 2,7 Millionen Hektar für das Jahr 2020 [19] und damit um 8 % größer angegeben als bei [17], andere Szenarien rechnen mit 4 Millionen Hektar [19]. Dies wären 16,3 % bzw. 24,1 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Um das Potenzial der Biomasse für energetische Nutzungen zu erweitern, ist es nicht unbedingt erforderlich, mehr Anbaufläche bereitzustellen. Vielmehr kann auch der jährliche Ertrag der Biomasse durch den Energiepflanzenmix, Mehrfachbestellung mit Zwischensaat, Düngemittelsatz und Weiterem gesteigert werden.

Das technische Brennstoffpotenzial von Energiepflanzen liegt nach [19] für das Jahr 2020 bei 541,9 PJ (150,5 TWh), wobei 521,5 PJ auf Ackerfläche und 20,4 PJ auf Grünlandflächen erzeugt werden. Das Potenzial für Energiepflanzen ist damit um 23,3 TWh größer als in [17]. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Nach [17] sind desweiteren 210 PJ (58,3 TWh) aus Energieholz aus dem Wald gewinnbar, was dem energetischen Anteil des jährlichen Holzeinschlages in Deutschland nach Abzug der stofflichen Verwertung entspricht. In [19] wird das Potenzial aus forstwirtschaftlicher Biomasse noch bei 511,4 PJ (142,1 TWh) gesehen, welches sich aus energetisch genutztem Waldholz mit 245,6 PJ (68,2 TWh), Waldrestholz mit 164,7 PJ (45,8 TWh) und dem ungenutzten Holzzuwachs mit 101,1 PJ (28,1 TWh) zusammensetzt, siehe Tabelle 6. Damit ist das in [19] prognostizierte Potenzial aus forstwirtschaftlicher Biomasse um 301,4 PJ (83,7 TWh) größer als in [17] ermittelt.

Laut Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe entfallen 1.005 PJ (279,2 TWh) des Biomassepotenzials in Deutschland auf biogene Rest- und Abfallstoffe [17]. Bei den biogenen Rest- und Abfallstoffen werden aktuell bereits 524 PJ genutzt, das zusätzlich gewinnbare Potenzial liegt bei 481 PJ, was 90,7 % des aktuell noch ausbaubar gesehenen Potenzials mit 530 PJ entspricht [17]. Die Nutzung des Potenzials der biogenen Rest- und Abfallstoffe hat damit eine überproportionale Bedeutung für die zukünftige Biomassegewinnung.

In [19] ist das energetisch nutzbare Potenzial aus Rest- und Abfallstoffen mit 386,9 PJ (107,5 TWh) noch geringer angesehen worden als in [17], wie in Tabelle 6 ersichtlich. Die Differenz beträgt hier 618,1 PJ (171,7 TWh). In [19] setzt sich das Potenzial zum einen aus den Rest- und Abfallstoffen aus forstwirtschaftlicher Biomasse mit einem Potenzial beim Altholz von 116,6 PJ (32,4 TWh) und beim Industrierestholz von 57,0 PJ (15,8 TWh) zusammen. Zum anderen werden Rest- und Abfallstoffen aus der Landwirtschaft erfasst wie Stroh mit 103,1 PJ (28,6 TWh), tierische Exkremente mit 87,7 PJ (24,4 TWh) und Bio- und Grünabfälle mit 22,5 PJ (6,3 TWh), wie in Tabelle 6 zusammengestellt.

	Biomassepotenzial FNR [17]		Biomassepotenzial Agentur für EE [19]	
	[PJ]	[TWh]	[PJ]	[TWh]
Energiepflanzen				
Ackerfläche			521,5	144,9
Grünlandfläche			20,4	5,7
Zwischensumme	458	127,2	541,9	150,5
Forstwirtschaftliche Biomasse				
energetisch genutztes Waldholz			245,6	68,2
Waldrestholz			164,7	45,8
ungenutzter Holzzuwachs			101,1	28,1
Zwischensumme	210	58,3	511,4	142,1
Altholz			116,6	32,4
Industrierestholz			57,0	15,8
Reststoffe				
Stroh			103,1	28,6
Tierische Exkremente			87,7	24,4
Bio- und Grünabfälle			22,5	6,3
Zwischensumme			213,3	59,3
Zwischensumme Reststoffe gesamt	1.005	279,2	386,9	107,5
Gesamtsumme	1.673	464,7	1.440,2	400,1

Tabelle 6: nutzbares Gesamtpotenzial der Biomasse in Deutschland nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Bioenergie [17] und Agentur für Erneuerbare Energien [19]

Die Gesamtsumme des nutzbaren Potenzials der Biomasse ist mit 1.673 PJ (464,7 TWh) bei der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Bioenergie (FNR) [17] um 16 % größer als das Potenzial in der Zusammenstellung des Potenzialatlas Bioenergie der Agentur für Erneuerbare Energien [19] mit 1.440,2 PJ (400,1 TWh). Dabei wird in [19] ein wesentlich größeres Potenzial in den Rest- und Abfallstoffen ermittelt als in [17], während in [17] größere Potenziale bei den Energiepflanzen und der forstwirtschaftlichen Biomasse gesehen werden. Werden die Obergrenzen von [17] und [19] zusammengefasst, ergibt sich ein Potenzial von maximal 2.058,3 PJ (571,8 TWh).

Grundsätzlich zeigt sich, dass die zusätzlichen Ausbaupotenziale der Biomasse im Bereich der Wärmebereitstellung in Deutschland begrenzt sind. Darüber hinaus wird die Biomasse zukünftig für viele andere Prozesse in der Industrie, im Gewerbe und zur Versorgung der Bevölkerung benötigt und ein wichtiges Substitut für die derzeit vor allem auf Erdöl als Rohstoff basierende Industrie und Gewerbe sein. Ein intelligenter Einsatz der Biomasse ist daher sehr wichtig. Zukünftig soll die Biomasse vor allem für die Bereitstellung von Spitzenlast und zur Lückenschließung eingesetzt werden, um z.B. Tage mit extrem niedrigen Temperaturen abzudecken und hier die Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen zu entlasten. Eine Hybride Wärmeerzeugung, bei der die Biomasse eine Teilerzeugung sicherstellt, wird an Bedeutung gewinnen. Darüber hinaus ist bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe die Feinstaubbelastung zu beachten, wofür es grundsätzlich Lösungen gibt.

3.6.2. Solarthermie

Die Solarthermie hat beim Endenergieverbrauch im Wärmesektor in Deutschland 2021 8,4 TWh geliefert, was 0,62 % des Wärmebedarfs entspricht, wie in Abschnitt 3.4. dargestellt. 2022 ist der Beitrag der Solarthermie zur Wärmebereitstellung auf 9,733 TWh gestiegen [20], da das Jahr 2022 das strahlungsreichste Jahr seit 1983 ist [21]. 2021 waren in Deutschland 21,6 Mio. m² Kollektorfläche installiert, verteilt auf 2,5 Millionen Anlagen [22].

Die räumliche Verteilung der mittleren Jahressumme der Globalstrahlung für Deutschland zeigt Bild 15 über den vieljährigen Betrachtungszeitraum von 1991 bis 2020. Die Verteilung der Globalstrahlung ist je nach geographischer Lage in Deutschland unterschiedlich. Die größten mittleren Jahressummen der Globalstrahlung liegen in Süddeutschland vor, wohingegen Richtung Norden die Strahlungsintensität abnimmt und in Norddeutschland, im Bereich des Sauerlandes, Rothaargebirges, Harzes und Thüringer Waldes am geringsten ist.

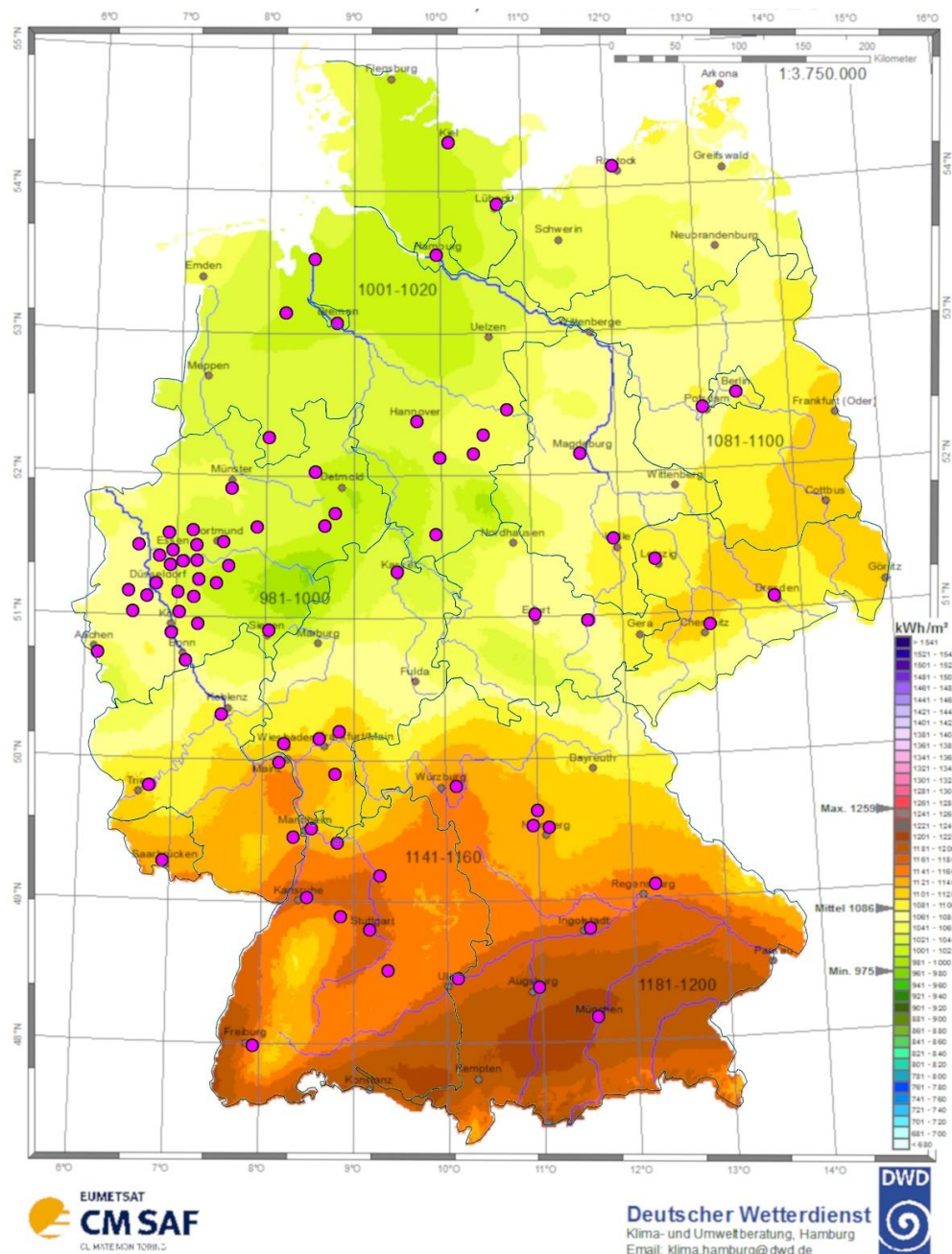


Bild 15: räumliche Verteilung der Globalstrahlung in Deutschland, mittlere Jahressumme für den Zeitraum von 1991 bis 2020, basierend auf Satellitendaten und Bodenwerte aus dem DWD-Messnetz, © Deutscher Wetterdienst [23], ergänzt

Die jährliche Globalstrahlung in Deutschland nach Bild 15 weist einen im 30-jährigen Durchschnitt von 1991 bis 2020 Wertebereich von 975 bis 1.259 kWh/m² und einen Mittelwert von 1086 kWh/m² auf. Auf der Linie des Mains verläuft ungefähr die Grenze von 1.100 kWh/m². Daneben gibt es in Ostbrandenburg und im nördlichen Sachsen ebenfalls Bereiche mit einer Globalstrahlung von über 1.100 kWh/m². Unterteilt man die in Bild 15 zusätzlich eingezeichneten 80 Großstädte in Deutschland in den Bereich über und unter 1.100 kWh/m², so liegen 24 Großstädte, was 30% der Großstädte entspricht, im südlichen Deutschland im Bereich von mindestens 1.100 kWh/m² und 56 Großstädte und damit 70% im Bereich mit einer Globalstrahlung von kleiner 1.100 kWh/m². 32 Großstädte bzw. 40 % liegen sogar in einem Bereich mit einer langjährigen mittleren Globalstrahlung von kleiner 1.040 kWh/m², wie in Bild 15 ersichtlich.

In Tabelle 7 sind die Abweichungen der mittleren Jahressummen der Globalstrahlung bezogen auf die sonnenreichsten Lagen mit 1.181 bis 1.200 kW/m² im südlichen Bayern und Baden-Württemberg dargestellt. Die geringste Globalstrahlung über den Zeitraum von 1991 bis 2020 weisen die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Nord-Hessen, Thüringen und Mecklenburg auf. In Nordrhein-Westfalen ist die Abweichung zu der sonnenreichsten Lage 16,9 % gefolgt von Niedersachsen und Schleswig-Holstein mit 15,2%. Begrenzt wird die sonnenreichste Lage am Bodensee und im Alpenvorland durch die Donau nach Norden, die offensichtlich wie eine Wetterscheide wirkt. Fernerhin zählen noch der Oberrheingraben und der Raum zwischen Karlsruhe und Stuttgart zu den sonnenreichsten Lagen. Der sich an diese Lagen anschließende Bereich der Globalstrahlung in Richtung Norden, der mit 1.141 bis 1.160 kW/m² die zweitsonnenreichste Lage in Deutschland ist, wird durch den Main und die Nahe begrenzt, siehe Bild 15.

1991 – 2020	Globale Sonnenstrahlung		Globale Sonnenstrahlung		Abweichung	
	von [kWh/m ²]	bis [kWh/m ²]	von [%]	bis [%]	von [%]	bis [%]
Nl;SH	1.001	1.020	84,8	85,0	15,2	15,0
Ostdeutschland	1.081	1.100	91,5	91,7	8,5	8,3
NRW	981	1.000	83,1	83,3	16,9	16,7
BW, BY nördlich	1.141	1.160	96,6	96,7	3,4	3,3
BY, BW südlich	1.181	1.200	100,0	100,0	0,0	0,0

Tabelle 7: Globalstrahlung in Deutschland, mittlere Jahressumme für den Zeitraum von 1991 bis 2020 nach Bild 15, prozentualer Anteil und Abweichung

Die monatliche Globalstrahlung in Deutschland auf Basis der mittleren Monatssummen für den Zeitraum 1991 – 2020 ist in Bild 16 nach [21] dargestellt. Die mittlere Jahressumme für den 30-jährigen Betrachtungszeitraum liegt bei 1.090,3 kW/m². Über das Jahr sind die größten Strahlungsgewinne in den Monaten Mai bis August zu generieren. Der Juni ist mit 165,7 kW/m² der Monat mit der größten und der Dezember ist mit 16,9 kW/m² der Monat mit der geringsten Globalstrahlung, da im Juni die längsten und im Dezember die kürzesten Tage im Jahr vorliegen. Der Dezember weist hierbei nur ein Zehntel der monatlichen Globalstrahlung des Monats Juni auf, wie die Auswertung in Tabelle 8 verdeutlicht.

Von der mittleren jährlichen Globalstrahlung von 1.090,3 kW/m² im Zeitraum von 1991–2020 entfallen 77,9 % und damit 849,2 kW/m² auf das Sommerhalbjahr von April bis September und nur 22,1 % der Globalstrahlung mit 241,1 kW/m² auf das Winterhalbjahr von Oktober bis März. Das Verhältnis zwischen Winter- und Sommerhalbjahr liegt daher bei der Globalstrahlung im langjährigen Mittel bei 1:4, d.h. vier Fünftel der globalen Solarstrahlung fallen im langjährigen Mittel in Deutschland auf das Sommerhalbjahr und nur ein Fünftel auf das Winterhalbjahr [21], da im Winterhalbjahr generell weniger Strahlung ankommt. Erfolgt eine vierteljährliche Betrachtung, so ergibt sich für die Monate Oktober bis Dezember eine Gesamtsumme für die Globalstrahlung von 98 kW/m², was 9 % der Jahresglobalstrahlung in Deutschland entspricht und für die Monate Januar bis März eine Gesamtsumme für die

Globalstrahlung von 143,1 kWh/m², was 13,1 % der Jahresglobalstrahlung darstellt. In Tabelle 8 sind die Monate farblich markiert, die eine Monatssumme der Globalstrahlung von weniger als 50 % der Globalstrahlung im Monat Juni aufweisen. Davon betroffen sind die 6 Monate des Winterhalbjahres. Das Verhältnis zum Monat Juni ist in der Spalte daneben dargestellt.

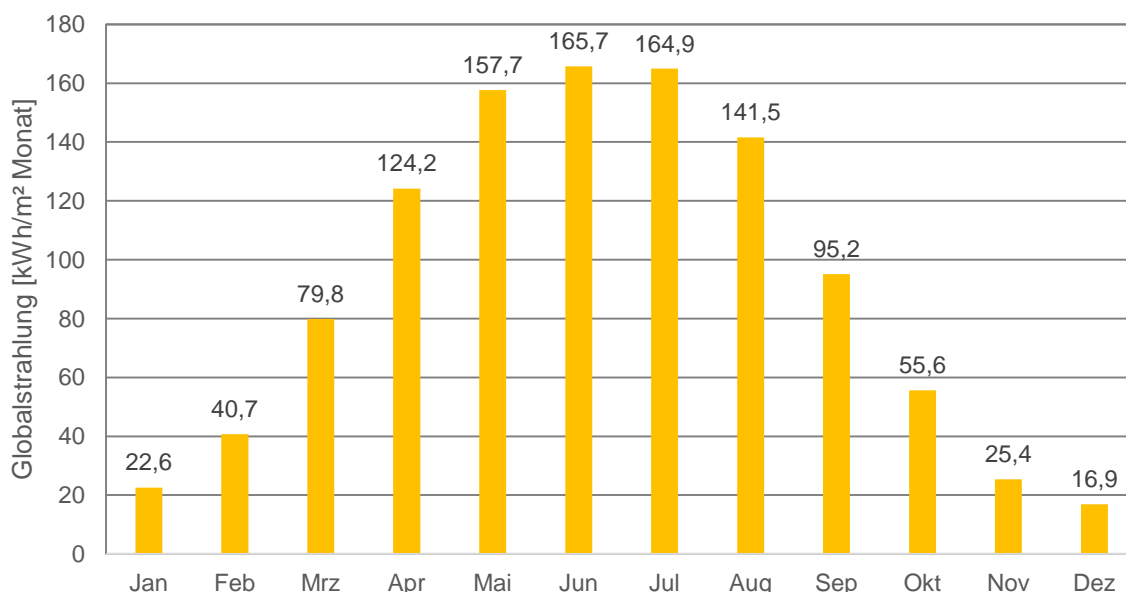


Bild 16: Monatliche Globalstrahlung in Deutschland auf Basis der mittleren Monatssummen für den Zeitraum 1991 – 2020, Datenquelle DWD [21]

Wird die langjährige mittlere monatliche Sonnenscheindauer in Deutschland für den Zeitraum von 1991–2020 betrachtet, ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der monatlichen Globalstrahlung, siehe Bild 17 und Tabelle 8. Anders als bei der monatlichen Globalstrahlung ist nicht der Juni sondern der Juli der Monat mit den meisten Sonnenstunden. Farblich markiert sind in Tabelle 8 die Monate, bei denen weniger als 50 % der Sonnenstunden im Vergleich zum Monat Juli auftreten. Hiervon betroffen sind die Monate Oktober bis Februar. Ebenfalls ist das Verhältnis zum Bezugsmonat Juli dargestellt. Im Monat Dezember sind im langjährigen Mittel weniger als ein Fünftel der Sonnenstunden vom Juli zu beobachten.

Monat	Monatssumme Globalstrahlung 1991-2020			Sonnenscheindauer 1991-2020		
	[kWh/m ²]	[%]	Verhältnis	[h]	[%]	Verhältnis
Jan	22,6	13,63	7,34	51,93	22,97	4,35
Feb	40,7	24,57	4,07	76,07	33,64	2,97
März	79,8	48,18	2,08	126,47	55,93	1,79
April	124,2	74,94	1,33	182,75	80,82	1,24
Mai	157,7	95,13	1,05	212,83	94,12	1,06
Juni	165,7	100,00	1,00	216,87	95,91	1,04
Juli	164,9	99,51	1,00	226,12	100,00	1,00
Aug	141,5	85,40	1,17	211,05	93,34	1,07
Sep	95,2	57,42	1,74	156,89	69,39	1,44
Okt	55,6	33,58	2,98	108,71	48,08	2,08
Nov	25,4	15,33	6,52	54,59	24,14	4,14
Dez	16,9	10,22	9,79	41,93	18,54	5,39
Summe	1.090,3			1.666,21		

Tabelle 8: mittlere monatliche Globalstrahlung und Sonnenscheindauer in Deutschland, mittlere Jahressumme 1991 bis 2020, prozentualer Anteil und Verhältnis [21, 24]

Nach [24] werden in Deutschland Flächendaten der Sonnenscheindauer seit 1951 erfasst. Die mittlere jährliche Sonnenscheindauer für Deutschland beträgt 1.610 Sonnenstunden für den Zeitraum von 1951-2020. Davon liegt die mittlere jährliche Sonnenscheindauer für die Klima-Standardnormalperiode von 1961-1990 bei 1.544 Sonnenstunden und für die Klima-Standardnormalperiode von 1991-2020 bei 1.665 Sonnenstunden [24]. Verursacht wird nach [24] dieser Unterschied durch die sehr trüben Jahre zwischen 1977 bis 1989, die durch eine hohe Luftverschmutzung in Deutschland gekennzeichnet sind. In diesem Zeitraum traten acht der zehn sonnenscheinärmsten Jahre seit 1951 auf. Dahingegen hat die Sonnenscheindauer im Zeitraum von 2003 bis 2020 deutlich zugenommen. 72,4 % der Sonnenstunden mit 1.207 Stunden entfallen im langjährigen Mittel auf das Sommerhalbjahr.

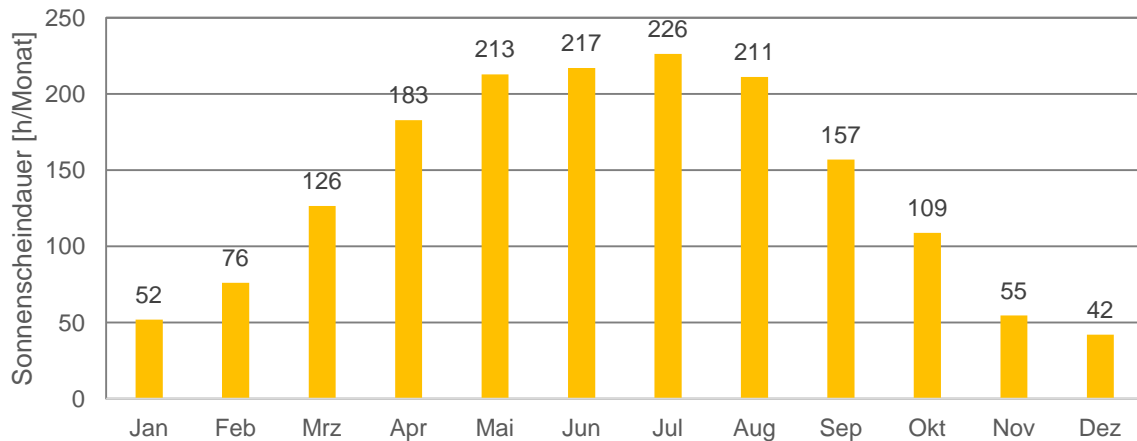


Bild 17: Mittlere monatliche Sonnenscheindauer in Deutschland für den Zeitraum 1991–2020
Datenquelle DWD [24]

Wie die jährliche Verteilung der monatlichen Globalstrahlung und Sonnenscheindauer verdeutlicht, ist das Haupteinsatzgebiet der Solarthermie in Deutschland auf das Sommerhalbjahr festgelegt. Für das Winterhalbjahr müssen andere Energiequellen genutzt werden, die Solarthermie kann hier eine Ergänzung darstellen. Auf Grund der unterschiedlichen jahreszeitlichen Verfügbarkeit der Solarthermie liegt das Haupteinsatzgebiet der Solarthermie bei der Warmwasserbereitung, da der Warmwasserbedarf eines Haushaltes relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt ist, wodurch sich eine größere Übereinstimmung zwischen der über das Jahr vorliegenden Sonneneinstrahlung und dem Energiebedarf ergibt [22]. Bild 18 zeigt den solaren Deckungsgrad für die Warmwasserbereitung in Deutschland nach [25]. Die Verteilung widerspiegelt die zuvor gezeigte Verteilung der monatlichen Globalstrahlung und der Sonnenscheindauer.

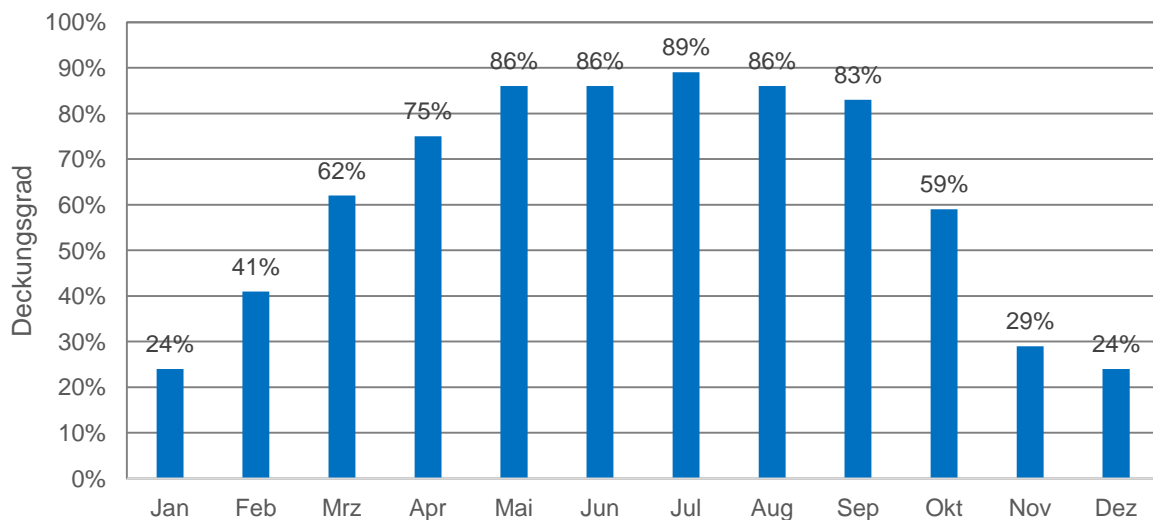


Bild 18: Solarer Deckungsgrad für die Warmwasserbereitung in Deutschland nach [25]

Bei der Warmwasseraufbereitung können über das Jahr 50 bis 65 % des erforderlichen Energiebedarfs aus Solarthermie gewonnen werden [22]. Nach [25] liegt der solare Deckungsgrad einer Solaranlage für die Warmwasseraufbereitung bei 50 bis 80 %, im Schnitt bei 60 % über das Gesamtjahr, wie in Bild 18 ersichtlich. Im Sommerhalbjahr können bis zu 89 % des Wärmebedarfs für Warmwasser aus Solarthermie gewonnen werden, der Deckungsgrad liegt bei 75 bis 89 %. Im Winterhalbjahr beträgt der solare Deckungsgrad je nach Monat 24 bis 60 %, siehe Bild 18.

Im Gegensatz zur Warmwasseraufbereitung ist der Energiebedarf für das Heizen vor allem auf das Winterhalbjahr konzentriert und fällt mit dem Zeitraum der minimalen Globalstrahlung und der minimalen Sonnenscheindauer zusammen. Der solare Deckungsgrad einer Solaranlage zur Heizungsunterstützung liegt daher bei 15 bis 40 %, im Schnitt aber nur bei 20 % [25]. Nach [22] ist bei Einfamilienhäusern bei Kombinationsanlagen mit Raumheizungsunterstützung bis zu 20 % des Gesamtwärmebedarfs gewinnbar. Für Heizungszwecke müssen besonders große Wärmespeicher bereitgestellt werden, die bei Einfamilienhäusern bei mindestens 10.000 Litern liegen müssen [25]. Für die Warmwasserbereitung genügt z.B. für einen 4-Personenhaushalt ein Speicher von 300 Litern [22]. Darüber hinaus werden für Heizungszwecke große Kollektorflächen benötigt. Alleine für Einfamilienhäuser sind nach [22] für Kombinationsanlagen Kollektorflächen von 10 bis 15 m² für Flachkollektoren und 6 bis 10 m² für Vakuumröhrenkollektoren erforderlich. Für die reine Warmwasseraufbereitung sind die notwendigen Kollektorflächen kleiner.

Das rein technische Ausbaupotenzial für die Solarthermie in Deutschland wird nach [4] durch die Branche auf 100 TWh Solarwärme geschätzt in den Einsatzgebieten der dezentralen Wärme, der Fern- und Prozesswärme. Bis 2045 könnte das genutzte Potenzial der Solarthermie von derzeit 9,733 TWh auf 60 TWh für die Wärmeversorgung in Deutschland laut [4] erhöht werden. Grundsätzlich sind hierbei aber konkurrierende Nutzungen der Flächen durch die Photovoltaik zur Stromgewinnung zu beachten, die dieses Potenzial einschränken können. Im Bereich der Prozesswärme kann zukünftig auch die konzentrierende Solarthermie an Bedeutung gewinnen [4]. In Tabelle 9 ist eine mögliche Szenarienentwicklung für die Solarthermie nach [4] bis 2045 dargestellt. Unterschieden wird in Tabelle 9 zwischen dezentraler Gebäudewärme, Industriewärme und Fernwärme. Hat die Solarthermie bisher nur bei der dezentralen Gebäudewärme eine Rolle gespielt, soll die Solarthermie laut Studie zukünftig auch bei der Industriewärme und Fernwärme an Bedeutung gewinnen. Für die in [4] skizzierten Szenarien im Jahr 2045 sollen 6,9 % der Wärmeversorgung in Deutschland bei Abnahme des Gesamtwärmebedarfs um 25 % durch Solarthermie gedeckt werden. Bei der dezentralen Gebäudewärme besteht die Möglichkeit, durch die Solarthermie im Sommerhalbjahr die gesamte Warmwasserversorgung zu übernehmen und damit andere Wärmeerzeuger wie z.B. Biomasse maßgeblich zu entlasten.

	2022 [TWh]	2030 [TWh]	2040 [TWh]	2045 [TWh]
dezentrale Gebäudewärme	9,733	20	25	25
Industriewärme		10	10	20
Fernwärme		10	15	15
Wärmeversorgung gesamt	9,733	40	50	60

Tabelle 9: Wärmeversorgungspotenzial aus Solarthermie bis 2045 nach [4]

3.6.3. Geothermie

Bei der Geothermie wird zwischen Oberflächennaher und Tiefer Geothermie unterschieden. Die Trennung zwischen den beiden Bezeichnungen erfolgt anhand der Lagerstätten Tiefe – hierbei wird die Grenze bei 400 m gesehen, d.h. Lagerstätten tiefer als 400 m zählen zur Tiefen Geothermie alles darüber zur Oberflächennahen Geothermie.

Die Geothermie hat aktuell in Deutschland mit 42 Anlagen eine Leistung von 350 MW für die Wärmeerzeugung und 47 MW für die Stromerzeugung installiert [9]. Von größerer

Bedeutung in Deutschland ist vor allem die Oberflächennahe Geothermie auf die ca. 10 TWh 2021 entfallen sind. Die Wärmeerzeugung aus Umweltwärmequellen betrug 2021 insgesamt 17,9 TWh und damit 1,33 % der Wärmeerzeugung in Deutschland. Die tiefe Geothermie steuerte dahingegen mit 1,5 TWh nur 0,11 % zur Wärmeerzeugung bei, wovon alleine 0,475 TWh auf die 178 Thermalbäder entfallen [26].

Bei der Geothermie ist vor allem die hydrothermale Geothermie von Bedeutung, da diese sich verhältnismäßig gut erschließen lässt. Das hydrothermale Potenzial in Deutschland wird auf 220 bis 430 TWh/a und im Mittel auf 300 TWh/a bei einer Leistung von 70 GW geschätzt [9]. Das hydrothermale Potenzial könnte damit bei vollständigem Ausbau 25 % des Wärmebedarfs in Deutschland decken. Die Verteilung des hydrothermalen Potenzials ist allerdings sehr ungleichmäßig in Deutschland, wie Bild 19 und 20 zeigt. Große hydrothermale Vorkommen befinden sich in Süddeutschland im Oberrheingraben, im Süddeutschen Molassebecken, im Norddeutschen Becken sowie in der Rhein-Ruhr-Region. Die Tiefen zur Erschließung dieser Potenziale in Deutschland betragen über 1.000 m bis zu 5.000 m, wo 35 bis 180°C heißes Wasser gefunden werden kann [26]. Die durchschnittliche Teufe der betriebenen Anlagen liegt bei 2.500 m. Im restlichen Deutschland sind vor allem petrothermale Vorkommen wie im Bereich der Mitteldeutschen Grundgebirge vorhanden, die wesentlich schwieriger als die hydrothermalen Vorkommen zu erschließen sind.

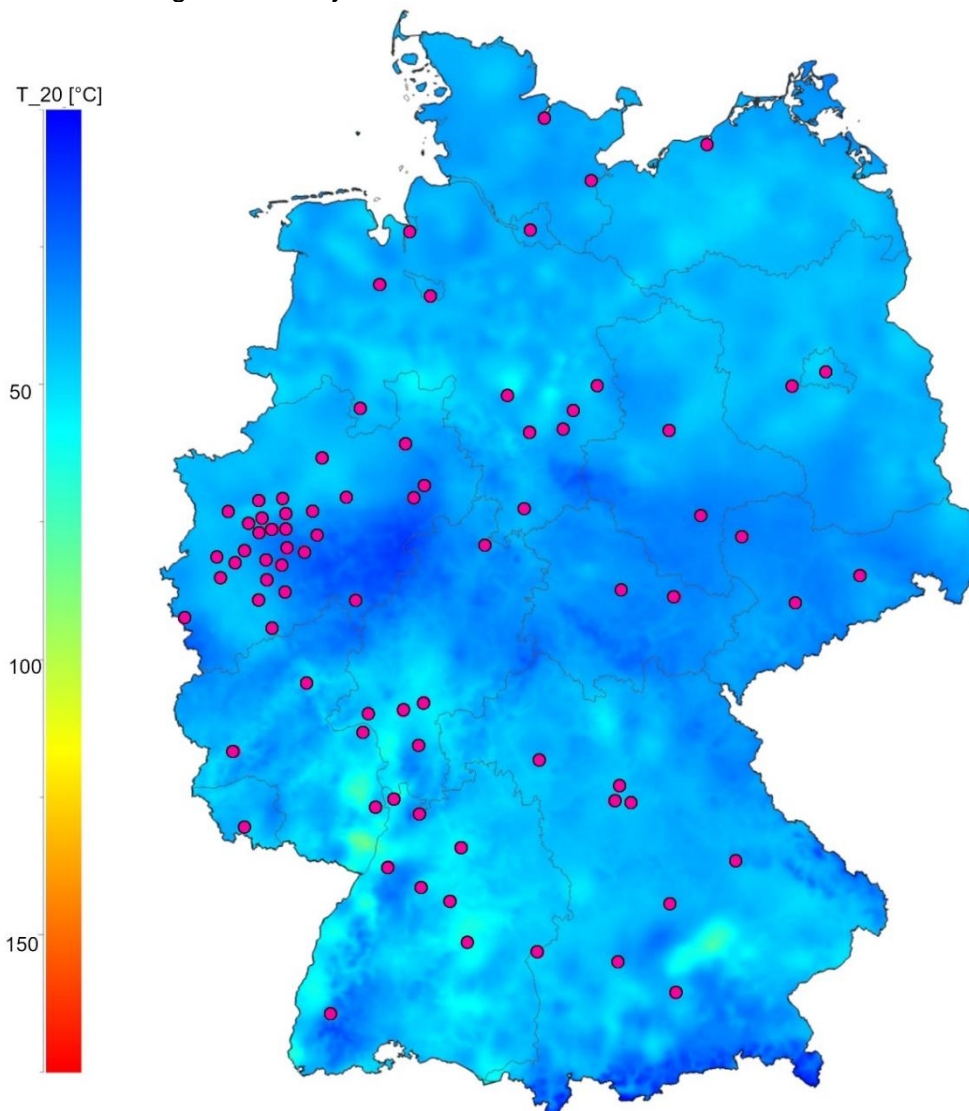


Bild 19: Temperatur in 1.000 m Tiefe (LIAG) [51] sowie die 80 Großstädte und Grenzen der Bundesländer in Deutschland, ergänzt

Infolge der Verteilung der hydrothermalen Vorkommen, sind im Hinblick auf die Bevölkerungsverteilung und die Verteilung der 80 Großstädte in Deutschland bestimmte

Gebiete bei der hydrothermalen Geothermie bevorzugt, was das nutzbare Potenzial einschränkt. Die Verteilung der Großstädte im Bezug auf die vorhandenen Temperaturen in 1.000 und 2.000 m Tiefe ist in Bild 19 und 20 ersichtlich.

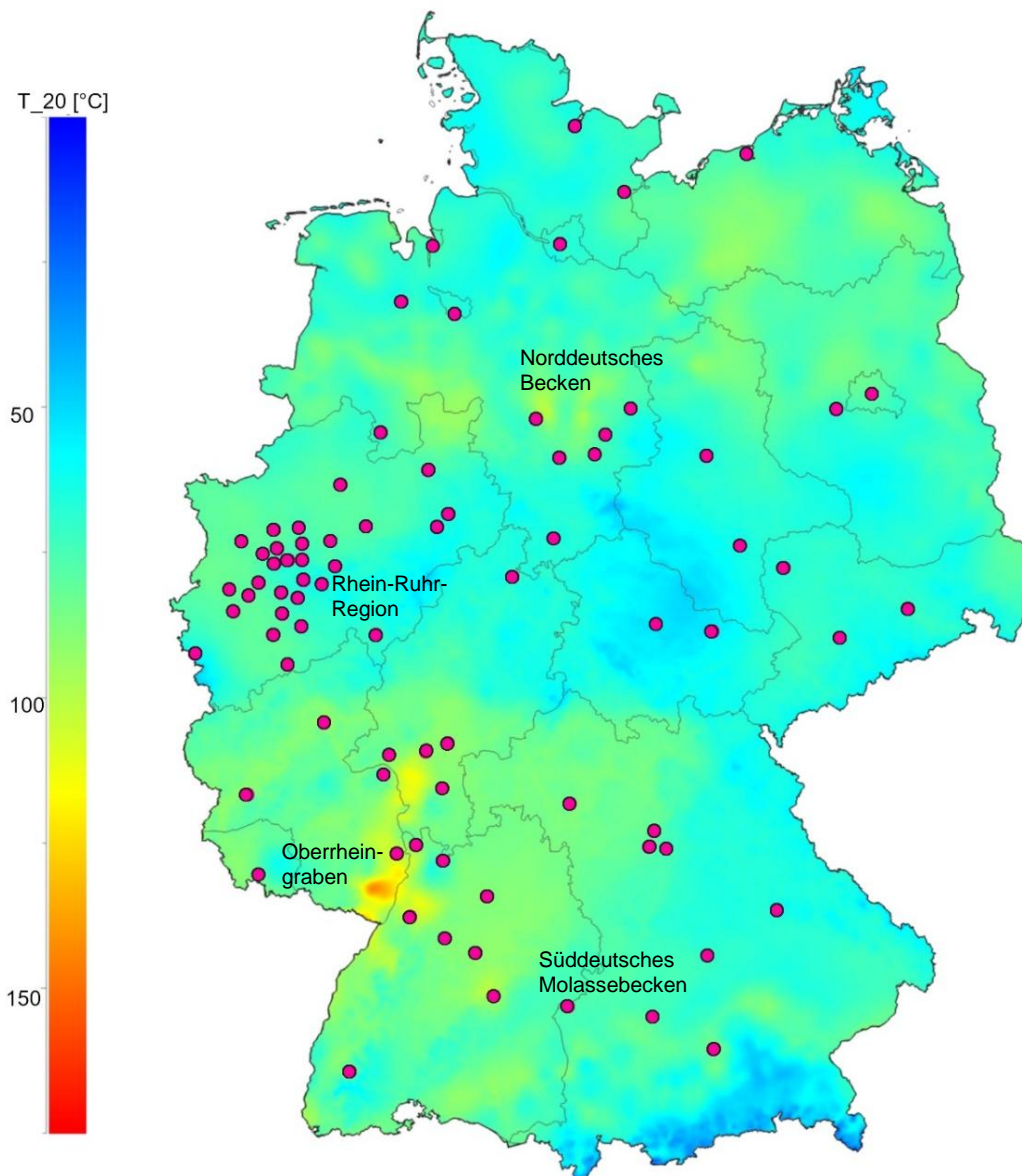


Bild 20: Temperatur in 2.000 m Tiefe (LIAG) [51] sowie die 80 Großstädte und Grenzen der Bundesländer in Deutschland, ergänzt

Ein wichtiger Aspekt bei der geothermalen Erschließung sind die Kosten. Für eine Leistung von 1 GW werden im Mittel 100 Tiefenbohrungen und 2 bis 2,5 Mrd. Euro benötigt [26]. Insgesamt wären damit bei der Erschließung von 70 GW theoretischer Wärmeleistung ein Investitionsbedarf von 140 bis 210 Mrd. Euro notwendig.

Die tiefe Geothermie bietet sich auf Grund ihrer höheren Temperaturen besonders für die Bereitstellung von Prozesswärme im mittleren Temperaturbereich an. Auch für lokale Fernwärmenetze im höheren Temperaturbereich kann nach [9] die tiefe Geothermie eine sinnvolle Ergänzung sein. Das Potenzial der tiefen Geothermie für Prozesswärme wird auf 130 TWh/a geschätzt für Temperaturen bis 150 bzw. 200°C [9].

In [4] wird das ausbaubare Potenzial der Tiefen Geothermie bis 2045 auf 80 TWh prognostiziert, wovon 50 TWh auf die Fernwärmegewinnung und 30 TWh auf die Prozesswärmegewinnung in der Industrie entfallen. Für die oberflächennahe Geothermie wird ein ausbaubares Potenzial bis 2045 von 50 TWh angenommen – 40 TWh für die dezentrale Gebäudewärme und 10 TWh für die Industriewärme.

4. Verteilung und Charakteristik der Fließgewässer in Deutschland

4.1. Hydrologische Grundlagen

4.1.1. Niederschlagsverteilung in Deutschland

Das Klima in Deutschland ist durch den Übergangsbereich des gemäßigten Seeklimas Westeuropas und des gemäßigten kontinentalen Klimas Osteuropas gekennzeichnet und zählt zur kühlgemäßigten bzw. gemäßigten humiden Klimazone. Typisch für diese Klimazone sind der häufige Wetterwechsel und die zu allen Jahreszeiten auftretenden Niederschläge. Die Abflüsse der Fließgewässer werden maßgeblich durch die Niederschläge und deren räumliche und jahreszeitliche Verteilung bestimmt. Dabei variieren in Abhängigkeit der Jahreszeiten auch die Niederschlagsmengen.

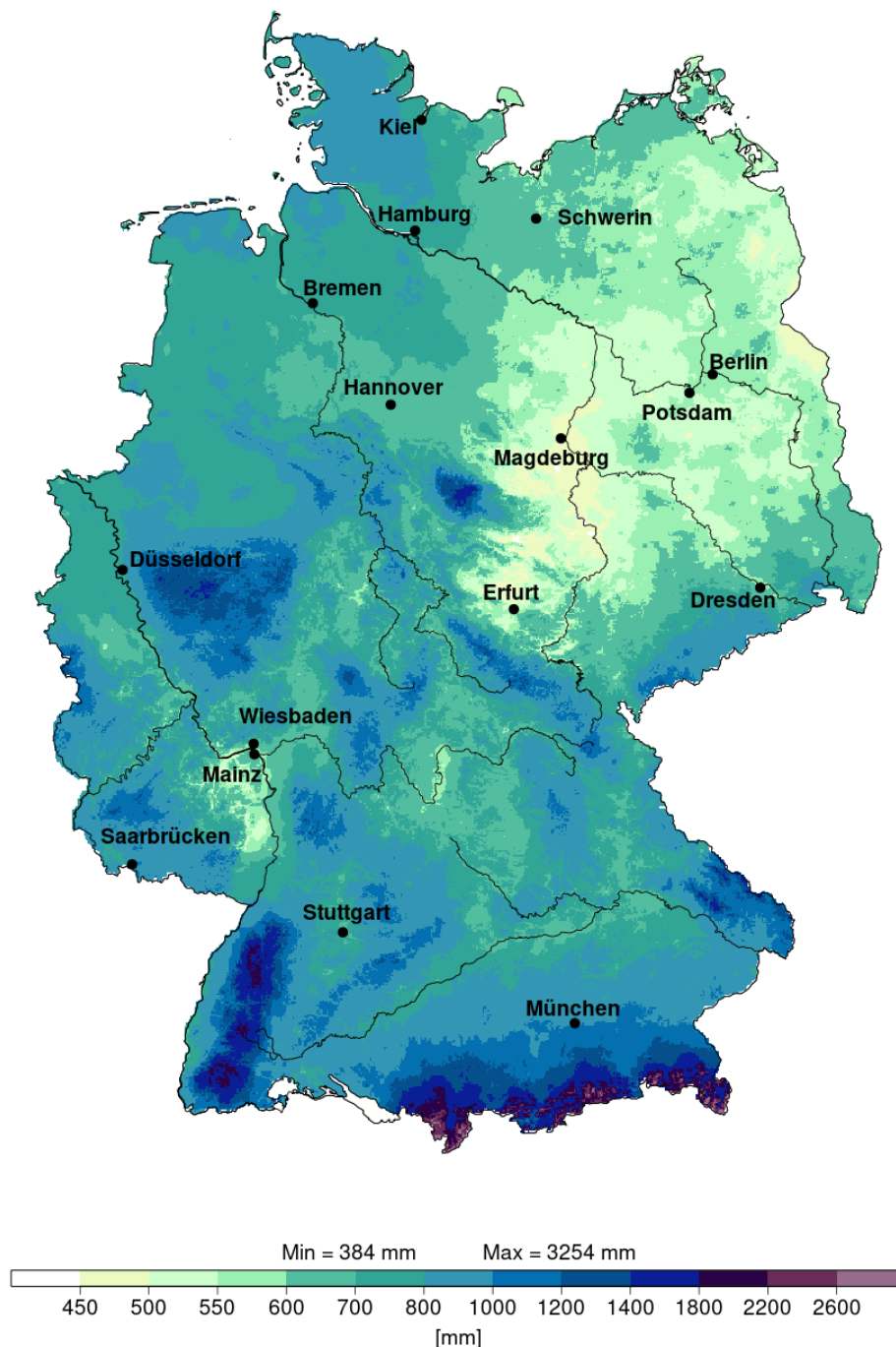


Bild 21: langjährige Niederschlagsverteilung in Deutschland (Zeitraum 1971 - 2000),
© Deutscher Wetterdienst (DWD) [52]

Bild 21 zeigt die Verteilung der Jahresniederschläge im langjährigen Mittel für Deutschland, wobei für das langjährige Mittel i.a. Messzeiträume von 30 Jahren als Bezugsperiode verwendet werden. Die Niederschlagswerte stellen dabei Flächenmittel dar. Der in Bild 21 dargestellte Zeitraum für das langjährige Mittel ist die Bezugsperiode von 1971 bis 2000.

Je nach Gebiet sind in Bild 21 unterschiedliche Niederschlagsverteilungen zu sehen, welche durch die lokal vorliegenden Geländehöhen, das Relief, die Windverhältnisse sowie durch Luv- und Lee-Effekte kleinräumig beeinflusst werden. Grundsätzlich ist in Bild 21 zu erkennen, dass mit Zunahme der Höhe ein deutlicher Anstieg der Niederschläge erfolgt, genauso wie eine Abnahme der Niederschläge von West nach Ost ersichtlich ist. Als Niederschlag wird das Auftreten von Wasser als Regen oder Nebel im flüssigen Aggregatzustand oder als Schnee oder Hagel im festen Aggregatzustand erfasst.

Die klimatischen Verhältnisse lassen sich großräumig in Deutschland in einen atlantisch-maritim geprägten Nordwesten, einen vom kontinentalen Landklima beeinflussten trocknen Osten und einen kontinental-alpin geprägten Süden einteilen.

Die höchsten Jahresniederschläge in Deutschland ergeben sich in den Alpen, im Alpenvorland, im Schwarzwald, in den Mittelgebirgen, in verschiedenen Regionen entlang der Nordseeküste und in Schleswig-Holstein. Die hohen Niederschläge in den Gebirgen werden i.a. durch Steigungsregen infolge der Höhenlagen und des Reliefs verursacht. Auf Grund höherer Windgeschwindigkeiten infolge der mit der Höhe abnehmenden Bodenreibung wird dabei in den Höhenlagen mehr Feuchtigkeit herangeführt als bei den geringeren Windgeschwindigkeiten in tieferen Lagen, was zu größeren Niederschlägen führt. Darüber hinaus machen sich zusätzlich je nach vorherrschender Windrichtung orographische Staueffekte bemerkbar, welche lokal eine weitere Verstärkung der Niederschlagsmengen bewirken - meist an den Westflanken der Gebirge.

Im Schwarzwald und in den Alpen fallen im Jahresmittel zwischen 1400 und 1800 mm Niederschlag und mehr, teilweise sogar in den Alpen über 2200 mm. Neben den Alpen und dem Schwarzwald weisen insbesondere Vogesen, Teile des Rheinischen Schiefergebirges, Harz, Thüringer, Bayrischer- und Böhmerwald sowie das Erzgebirge hohe Niederschläge auf. Im Harz ebenso wie im Rothaargebirge und Bayrischen Wald werden Niederschläge bis 1400 mm und darüber erreicht, wobei gerade im Harz Luv- und Lee-Effekte Staueffekte bewirken, aus denen erhöhte Niederschläge an den Westflanken im Bereich des Oberharzes resultieren, während der im Osten befindliche Unterharz geringere Regenfälle erhält. In den anderen Mittelgebirgen liegen Niederschläge bis zu 1200 mm teilweise auch höher vor.

Im Norden Deutschlands in Niedersachsen liegen auf Grund der geringen Geländehöhen relativ gemäßigte Niederschlagswerte von 700 bis 800 mm, die in den küstennahen Gebieten im Bereich von Ostfriesland, im Gebiet zwischen Weser- und Elbemündung sowie im Bereich der Höhenzüge höhere Jahresniederschlagswerte zwischen 800 bis 1000 mm erreichen. Ähnliche Unterschiede ergeben sich auch im Nordosten Deutschlands, wobei hier die mittleren Jahresniederschläge mit 600 bis 700 mm im Bereich der Ostseeküste geringer ausfallen als im Nordwesten Deutschlands, wie in Bild 21 ersichtlich.

Infolge des zunehmenden kontinentalen Klimaeinflusses und der von Westen nach Osten größer werdenden Entfernung vom Atlantischen Ozean und dem damit verbundenen abnehmenden Niederschlagspotenzials witterungsbestimmender Tiefdruckgebiete nimmt die Niederschlagsverteilung im Osten Deutschlands auf 450 bis 600 mm im Jahr ab, da die wetterdominierenden Tiefdruckgebiete des Atlantiks im östlichen Deutschland an Einfluss verlieren. Besonders in den tieferen Becken- und Leelagen im Osten Deutschlands treten die geringsten Niederschlagssummen von teilweise unter 500 Millimeter auf. Hier ergeben sich im Bereich der Magdeburger Börde, dem Thüringer Becken sowie der Uckermark und dem Oderbruch die trockensten Regionen Deutschlands. Dahingegen weisen die anderen Gebiete Ostdeutschlands besonders die ostdeutschen Mittelgebirge und Gebirgsvorländer sowie die Ostseeküste höhere Niederschläge auf, siehe Bild 21. Andere trockenere Gebiete sind in Deutschland entlang des Rheingrabens und im Breisgau mit 600 bis 800 mm durchschnittlichem Jahresniederschlag zu finden.

4.1.2. Mittlere Jahresniederschläge in Deutschland

Deutschland weist im Vergleich zu anderen europäischen Ländern verhältnismäßig hohe mittlere Jahresniederschläge auf. In der aktuellen Referenzperiode von 1991-2020 ist der langjährige Mittelwert des Niederschlags für den gesamten Betrachtungszeitraum von 30 Jahren bei 791,5 mm für Deutschland. Im Referenzzeitraum von 1960-1991 lag der langjährige Mittelwert des Niederschlags bei 788,9 mm. Der Mittelwert des gesamten Beobachtungszeitraums von 140 Jahre von 1881 bis 2020 liegt nach [24] für Deutschland bei 770,3 mm. In Tabelle 10 sind die Jahresmittelwerte des Niederschlags in mm für alle 12 um jeweils 10 Jahre fortgeführten 30-jährigen Bezugsperioden im Zeitraum von 1881 bis 2020 sowie der Mittelwert des 140 Jahre umfassenden Zeitraums 1881-2020 nach den Berechnungen aus [24] auf Datengrundlage des Deutschen Wetterdienstes dargestellt. Bei den Niederschlagswerten handelt es sich sowohl in Bezug auf Deutschland als auch in Bezug auf die jeweiligen Bundesländer um Flächenmittel. Neben den einzelnen Bundesländern sind in Tabelle 10 auch die Gesamtwerte für Deutschland aufgeführt.

Zeitraum	BB, BE	BW	BY	HE	MV	NI, HH, HB	NW	RP	SH	SL	SN	ST	TH	DE
1881-1910	560,9	895,1	871,7	713,3	569,7	693,8	808	737,7	713,8	820,2	736,7	561,2	691,7	740,8
1891-1920	558,8	890,4	874,2	714,9	585,3	703,4	814,7	728,7	724,5	826,9	740,4	552,5	691	743,8
1901-1930	570,5	909,9	874,9	735,1	604,2	715,2	832,1	746,7	734	868,2	750,9	554,4	686	755,3
1911-1940	573,3	945,2	903,2	743,9	610,1	717,9	826	755,2	741,7	880,4	753,8	553,3	686,7	766,6
1921-1950	571,3	937,3	904,9	750,4	615,9	721	831,1	758,4	741,3	878,1	743,5	559,2	697,8	768
1931-1960	562,1	937,8	905,7	747,7	603,6	724,9	837,9	753	746,6	879,6	725,7	559,9	698	766,5
1941-1970	564	942	912,6	773,6	609,6	741,8	869,3	771,4	767,8	913	717,3	566,3	705,5	778
1951-1980	563,4	950,2	918,7	765,9	597	734,3	856,9	771,5	767,5	911,2	713	558,6	694,2	775,3
1961-1990	557,7	979,8	940,7	793,3	594,8	745,6	875,1	807,3	788,1	944,4	699,4	547,6	700	788,9
1971-2000	553,7	976,3	945,4	776,7	593,3	744,9	872,6	803,7	784,1	935,5	704	544,8	705,2	787,7
1981-2010	576,9	1000,1	970,6	807,1	618,8	786,4	918	819,5	820,3	949,1	732,5	579,1	741,1	818,8
1991-2020	578,9	952,6	934,8	761,5	619,8	763	869,5	772,6	812,8	903,2	723,5	574,2	720,6	791,5
1881-2020	566,1	938,9	909,9	751,8	599,3	729	845	765,1	761,8	886,1	726,9	559,1	699,4	770,3

Tabelle 10: Jahresmittelwerte des Niederschlags in mm für alle 30-jährigen Bezugsperioden im Zeitraum 1881 bis 2020 nach [24]

Nach Untersuchungen in [24] betragen die maximalen Schwankungen der 30-jährigen Bezugsperioden im betrachteten Zeitraum von 1881 bis 2020 maximal $\pm 6\%$ bezogen auf den 140-jährigen Mittelwert von 770,3 mm. Die Niederschlagsverhältnisse sind damit weit weniger variabel als die ebenfalls in [24] im Zeitraum von 1881 bis 2020 untersuchten Jahresmitteltemperaturen. Die Entwicklung der Jahresmittelwerte des Niederschlags für alle 30-jährigen Bezugsperioden ist für Deutschland in Bild 22 graphisch dargestellt.

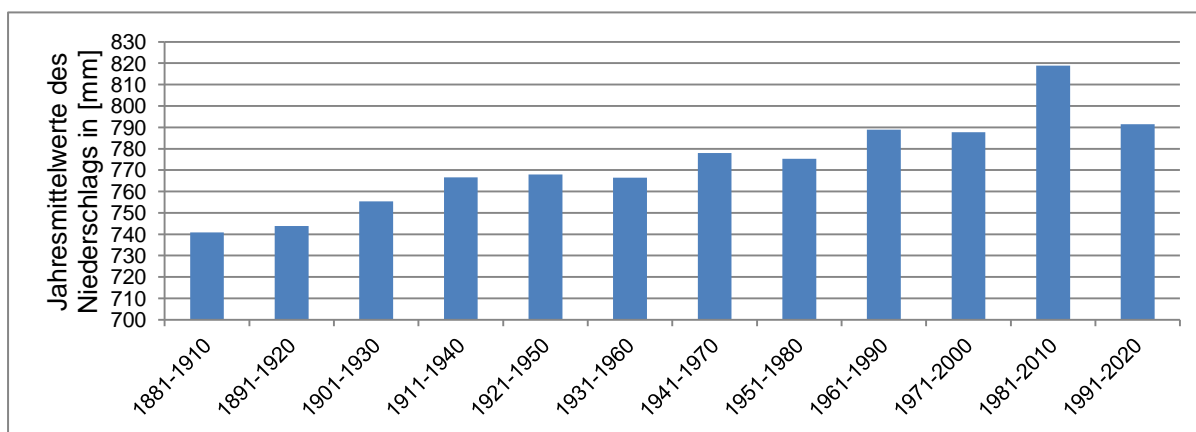


Bild 22: Jahresmittelwerte des Niederschlags in mm für alle 30-jährigen Bezugsperioden im Zeitraum 1881 bis 2020 für Deutschland auf Grundlage der Daten aus [24]

Der Zeitraum von 1881 bis 1920 war in Deutschland mit 740,8 und 743,8 mm mittleren Jahresniederschlag verhältnismäßig trocken im Vergleich zu den späteren Bezugsperioden, wie auch in Bild 22 ersichtlich. Die feuchteste 30-jährige Bezugsperiode ergibt sich für die Jahre 1981-2010 mit einem mittleren Jahresniederschlag von 818,8 mm. In dieser Bezugsperiode liegen 4 der 10 nassesten Jahre, wie in Tabelle 11 zu entnehmen. Eine Ursache für dieses Phänomen kann u.a. die höhere Luftverschmutzung bis in die 2000-er Jahre sein. So hat sich alleine seit 1995 bis heute die Luftverschmutzung mit Schadstoffen mehr als halbiert [28].

Grundsätzlich zeigt sich aber, dass die mittleren Jahresniederschläge in Deutschland seit 1881 von Dekade zu Dekade anwachsen, wie auch in Bild 22 erkennbar. Alleine von der ersten 30-jährigen Bezugsperiode von 1881-1910 hat der mittlere Jahresniederschlag bis zur aktuellen Referenzperiode 1991-2020 um 6,8 % von 740,8 auf 791,5 mm zugenommen. Wird sich auf die feuchteste 30-jährige Bezugsperiode von 1981-2010 bezogen liegt die Zunahme sogar bei 10,5 %. Werden die vier aneinandergrenzenden 30-jährigen Bezugsperioden ausgewertet von 1901-1930 bis 1991-2020 zeigt sich die stetige Zunahme der mittleren Jahresniederschläge in Deutschland, die auch in Bild 23 dargestellt ist. Besonders stark wachsen dabei die mittleren Niederschläge in den beiden angrenzenden 30-jährigen Bezugsperioden von 1931-1960 und von 1961-1990 an. Genau dieser Zeitraum entspricht nach [29] der Zeit, wo der Klimawandel global deutlich zu beobachten ist.

Deutschland ist damit seit 1881 bis heute insgesamt feuchter und niederschlagsreicher geworden. Die ohnehin schon gute Niederschlags- und damit auch Wasserverfügbarkeit in Deutschland hat dementsprechend in den letzten 140 Jahren beständig zugenommen. Auch in [29] wird festgehalten, dass die mittleren Jahresniederschläge in Deutschland seit 1881 um 7 % gestiegen ist, der Anstieg verteilt sich aber nach [29] nicht gleichmäßig auf alle Jahreszeiten. Vielmehr sind die Winter deutlich niederschlagsreicher geworden, wohingegen im Sommer die Niederschläge geringfügig zurück gegangen sind. Seit 1881 haben bis 2022 die Niederschläge im Winter mit 47,7 mm deutlich, im Frühjahr mit 11,5 mm leicht zugenommen.

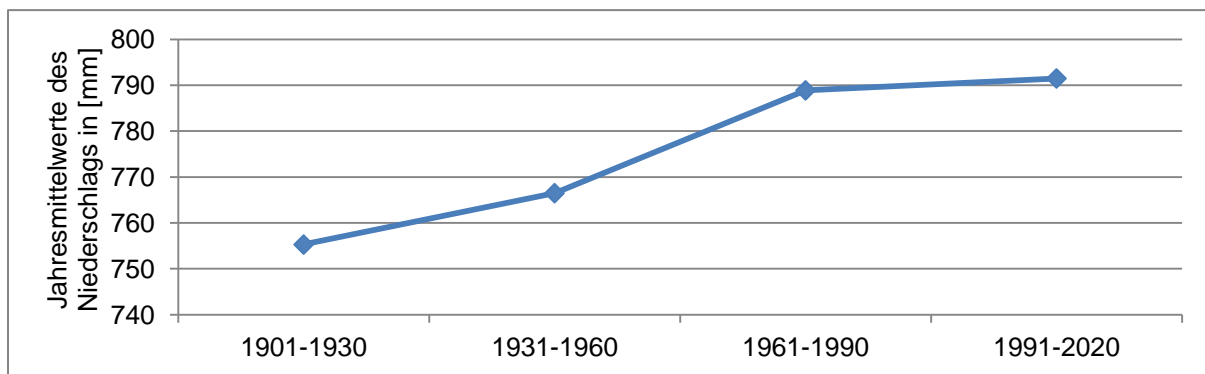


Bild 23: Jahresmittelwerte des Niederschlags in mm für die vier aneinandergrenzenden 30-jährigen Bezugsperioden für Deutschland ab 1901-1930 auf Grundlage der Daten aus [24]

Die durchschnittliche Tendenz, dass die Sommerhalbjahre in Deutschland etwas feuchter sind als die Winterhalbjahre verschiebt sich zunehmend. Erfolgten im langjährigen Mittel für den Messzeitraum von 1881 bis 2023 noch 44,7 % der Niederschläge im Winterhalbjahr und 55,3 % im Sommerhalbjahr, sind in den letzten beiden Dekaden 2001-2010 und 2011-2020 bereits 46,7 bzw. 46,6 % der Niederschläge im Winterhalbjahr und 53,3 bzw. 53,4 % im Sommerhalbjahr gefallen. Im aktuellen Zeitraum 2021-2023 liegen der Winterniederschlag bereits bei 49,5 % und der Niederschlag im Sommerhalbjahr bei 50,5 %.

In den Abfluss geht von den Niederschlägen nur ein Teil, der im Winterhalbjahr größer ist als im Sommerhalbjahr, da im Sommerhalbjahr die Verdunstung infolge der höheren Temperaturen größer ist und die Vegetation im Sommer ihre Hauptwachstumsphase hat und daher für das Wachstum entsprechend viel Wasser benötigt. Zeitlich verzögert werden auch die oberirdischen Gewässer durch die Grundwasserzuflüsse gespeist.

Werden die einzelnen Bundesländer betrachtet, so zeigen sich die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Saarland, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein als besonders niederschlagsreich. Diese Länder liegen in der aktuellen Referenzperiode von 1991-2020 mit 952,6 bis 812,8 mm über dem Deutschlandweiten Niederschlagsmittel von 791,5 mm. Die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Niedersachsen mit Bremen und Hamburg, Hessen, Sachsen und Thüringen weisen der ersten Ländergruppe nachfolgend noch hohe mittlere Niederschläge auf, die in der aktuellen Referenzperiode zwischen 772,6 mm bis 720,6 mm liegen. Als trockenere Bundesländer zeigen sich die drei ostdeutschen Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg mit Berlin und Sachsen-Anhalt mit mittleren Jahresniederschlägen in der aktuellen Referenzperiode von 619,8 bis 574,2 mm.

In Bild 24 sind die Jahresmittelwerte des Niederschlags in mm für alle 30-jährigen Bezugsperioden im Zeitraum 1881 bis 2020 für die verschiedenen Bundesländer auf Grundlage der Daten aus [24] dargestellt. Man erkennt für alle Bundesländer, dass seit 1881 der mittlere Jahresniederschlag bis heute zugenommen hat. Eine Ausnahme bildet Sachsen. Hier hat zunächst bis zur Referenzperiode von 1911-1940 der mittlere Jahresniederschlag von 736,7 mm auf 753,8 mm zugenommen und ist dann bis zur Referenzperiode 1961-1990 auf 699,4 mm gesunken. Ab dieser Bezugsperiode ist der mittlere Jahresniederschlag wieder angewachsen auf 732,5 mm in der Bezugsperiode 1981-2010 und auf 723,5 mm in der Bezugsperiode 1991-2020.

Bei den niederschlagsreicheren Bundesländern wächst der mittlere Jahresniederschlag im Vergleich zueinander relativ ähnlich an und erreicht in der Bezugsperiode 1981-2010 ein Maximum. In der aktuellen Referenzperiode von 1991-2020 ist der mittlere Jahresniederschlag in diesen Bundesländern im Vergleich zu der besonders niederschlagsreichen Bezugsperiode 1981-2010 etwas geringer. Im Bezug auf die gesamte zeitliche Entwicklung der letzten 140 Jahre ist der mittlere Jahresniederschlag aber gestiegen. Bei den niederschlagsärmeren Bundesländern Sachsen-Anhalt, Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Thüringen aber auch in Schleswig-Holstein ist dieses Phänomen der niederschlagsreicheren Bundesländern kaum ausgeprägt, sondern vielmehr eine fast durchgehend kontinuierliche Zunahme der mittleren Jahresniederschlagswerte bis in die aktuelle Referenzperiode von 1991-2020 festzustellen.

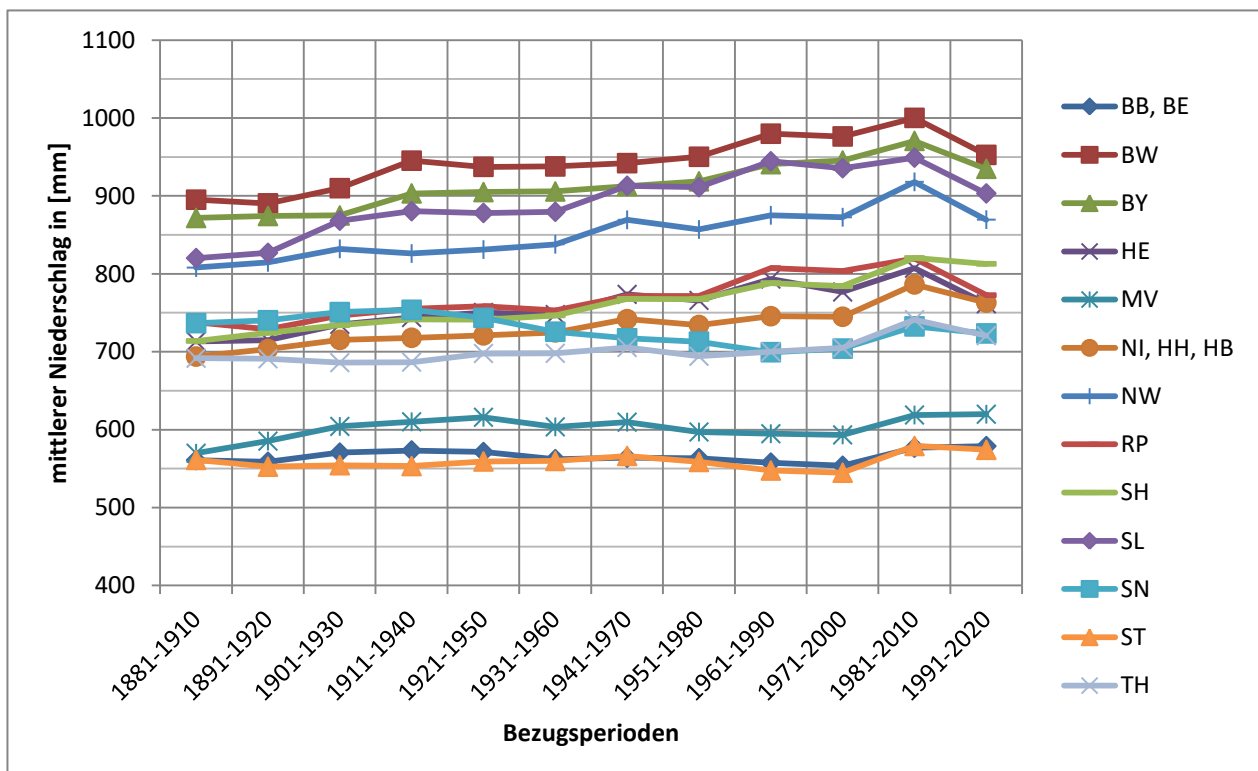


Bild 24: Jahresmittelwerte des Niederschlags in mm für alle 30-jährigen Bezugsperioden im Zeitraum 1881 bis 2020 für die Bundesländer auf Grundlage der Daten aus [24]

Wie die Untersuchungen in [24] zeigen, wechselten sich in den letzten 140 Jahren zu trockene und zu nasse Jahre beständig ab. Es gab laut [24] kaum längere Phasen die zu feucht oder zu trocken über mehrere Jahre waren – mehr als 6 Jahre bzw. 5 Jahre hintereinander folgend zu nasse Jahre konnten in den letzten 140 Jahren nicht verzeichnet werden, ansonsten lagen die aneinander hängenden Zeiträume bei meistens 2 bis 4 Jahren. Bei den zu trockenen Jahren gab es ab 1910 nur einen Zeitraum von 1918 bis 1922 wo 5 zu trockene Jahre folgten ansonsten waren i.a. höchstens 2 bis 3 aufeinanderfolgende zu trockene Jahre zu beobachten. Nur die Jahre 1883 bis 1909 waren mit Ausnahme von 4 Jahren dahingegen ungewöhnlich trocken, während ab 1910 sich die zuvor beschriebenen Phänomene manifestieren. Von 1881 bis 1909 gab es 23 trockene und 5 nasse Jahre. Ab 1910 folgten darauf 63 nasse Jahre (56,25 % ab 1910) und nur 49 trockene Jahre (43,75 % ab 1910). In Tabelle 11 sind die 10 nassesten und die 10 trockensten Jahre in Deutschland seit 1881 auf Datengrundlage des Deutscher Wetterdienstes nach [24] zusammengestellt.

mittlerer Jahresniederschlag 10 nassesten Jahre		mittlerer Jahresniederschlag 10 trockensten Jahre	
Jahr	[mm]	Jahr	[mm]
2002	1.018,1	2003	608,2
1981	995,3	1887	601,7
1965	989,4	1971	601,3
2007	969,5	1976	592,0
1966	965,1	1953	591,8
2001	928,8	1929	591,3
1882	926,7	2018	586,3
1998	919,7	1921	578,4
1939	916,3	1911	556,7
1970	913,5	1959	551,1

Tabelle 11: Die 10 nassesten und die 10 trockensten Jahre in Deutschland seit 1881, Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst nach [24]

Werden in der Tabelle 11 die ersten 100 Jahre von 1881 bis 1980 mit den 40 Jahren ab 1981 verglichen, so zeigt sich, dass in den letzten 40 Jahren seit 1981 5 Jahre zu den 10 nassesten Jahren im Gesamtzeitraum von 140 Jahren gehören, während in den 100 Jahren davor die anderen 5 nassesten Jahre zu finden sind. Bei den 10 trockensten Jahren sind in den ersten 100 Jahren seit 1881 8 der trockensten Jahre zu finden. Nur 2 der 10 trockensten Jahre treten in den letzten 40 Jahren seit 1981 auf. Die Jahre vor 1981 sind sowohl bei den nassesten als auch bei den trockensten Jahren in Tabelle 11 farblich hervorgehoben.

Die trockensten Jahre waren in den letzten 140 Jahren 1959 mit 551,1 mm, gefolgt von 1911 und 1921. 2018 war mit 586,3 mm mittleren Niederschlag erst das viert trockenste Jahr und damit 6,4 % feuchter als das Extremjahr 1959. Die fünf nachfolgenden trockensten Jahre liegen alle vor 1981 und erst das 10. trockenste Jahr ist das Jahr 2003. Bei den nassesten Jahren verhält es sich genau umgekehrt. Von den fünf nassesten Jahren sind alleine 3 Jahre nach 1980 verzeichnet. Die beiden nassesten Jahre sind 2002 mit 1018,1 mm und 1981 mit 995,3 mm. Darauf folgen dann 1965, 2007, 1966 und 2001.

Grundsätzlich lässt sich auch bei der Betrachtung der nassesten und trockensten Jahre feststellen, dass insgesamt die mittleren Jahresniederschläge in Deutschland seit 1881 zugenommen haben. Alleine 8 der nassesten Jahre sind in den letzten 70 Jahren zu verzeichnen, während nur 2 der nassesten Jahre in den ersten 70 Jahren beobachtet werden konnten, was ebenfalls eine Zunahme der mittleren Jahresniederschläge andeutet.

Neben den Niederschlagsentwicklungen von 1881 bis 2020 zeigt sich auch bei den letzten Jahren seit 2020 der beobachtete Trend der Zunahme der mittleren Jahresniederschläge.

Das Jahr 2021 wies mit 805 mm sehr ausgeglichene Niederschlagsverhältnisse auf, die mit 2 % über dem Mittelwert der Bezugsperiode von 1991-2020 von 791,5 mm liegen. Im relativ trockenen Jahr 2022 mit 670 mm mittlerem Jahresniederschlag gab es eine Abweichung von 15 % zur Bezugsperiode, die aber schon 2023 mit 958 mm mittleren Jahresniederschlag bei Weitem übertrafen wurde.

Deutschland verfügt damit über ein ausreichendes Wasserdargebot, was aber zukünftig infolge des Klimawandels wesentlich ungleichmäßiger über das Jahr verteilt sein wird, in der Grundtendenz aber weiter anwächst. Deutschland ist nach [30] ein wasserreiches Land, sowohl in Bezug auf das Oberflächen- als auch auf das Grundwasser. Durch den Klimawandel kommt es aber zu einer Umverteilung der Niederschlagsereignisse, d. h. der Winterniederschlag nimmt um etwa 20 % mit steigender Intensität zu, währenddessen die Sommerniederschläge durch Hitzeperioden um etwa 5 - 30 % abnehmen können [31]. Für das Wasserdargebot ist daher mit einer saisonalen Umverteilung zu rechnen.

Auch das Umweltbundesamt rechnet in [30] mit einer Zunahme der Niederschläge bis 2100 um 9 %. Im Winterhalbjahr nehmen die Niederschläge dabei bis zu 17 % zu, während im Sommerhalbjahr eine Abnahme von 4 bis 7 % erwartet wird. Der Weltklimarat (IPCC) erwartet nach Auswertung verschiedener Klimamodelle [32] ebenfalls bis 2100 in den mittleren Breiten eine Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr. Bei größer werdender globaler Erwärmung kann eine Zunahme der Trockenheit im Sommerhalbjahr in den mittleren Breiten erfolgen.

Die Temperaturerhöhung mit tendenziell weniger Schneefall und dem Abschmelzen der Gletscher reduziert die natürlich gespeicherten Wassermengen, die in der Vergangenheit zu einem Ausgleich zwischen Winter und Sommer geführt haben. Speicher-, Ausgleich- und Rückhalteanlagen werden in Zukunft in Deutschland wie in Süd- und Westeuropa, den USA, China, Südkorea und anderen Ländern weltweit allgemein üblich auch in Deutschland wieder mehr an Bedeutung gewinnen müssen, um zum einen einen ausreichenden Hochwasserschutz und zum anderen die gesicherte Wasserversorgung der Bevölkerung, Landwirtschaft, Industrie und der Natur in Niedrigwasserphasen zu gewährleisten.

4.2. Fließgewässer in Deutschland

4.2.1. Fließgewässernetz

Das Fließgewässernetz in Deutschland besitzt eine Länge von ungefähr 400.000 km [34, 35]. Nach Aussage in [36] soll das Fließgewässernetz in Deutschland sogar mehr als 500.000 Kilometer umfassen. Zum Fließgewässernetz gehören Ströme, Flüsse, Bäche, Gräben und Kanäle. Aufgeteilt werden kann das Fließgewässernetz in Deutschland in die sechs großen Stromsysteme Rhein, Donau, Elbe, Oder, Weser und Ems sowie in die Küstengebiete der Nord- und Ostsee. Durch verschiedene Kanäle sind die sechs Stromgebiete innerhalb von Deutschland miteinander verbunden. Bild 25 zeigt das Gewässernetz mit Flüssen, Bächen und Kanälen in Deutschland.

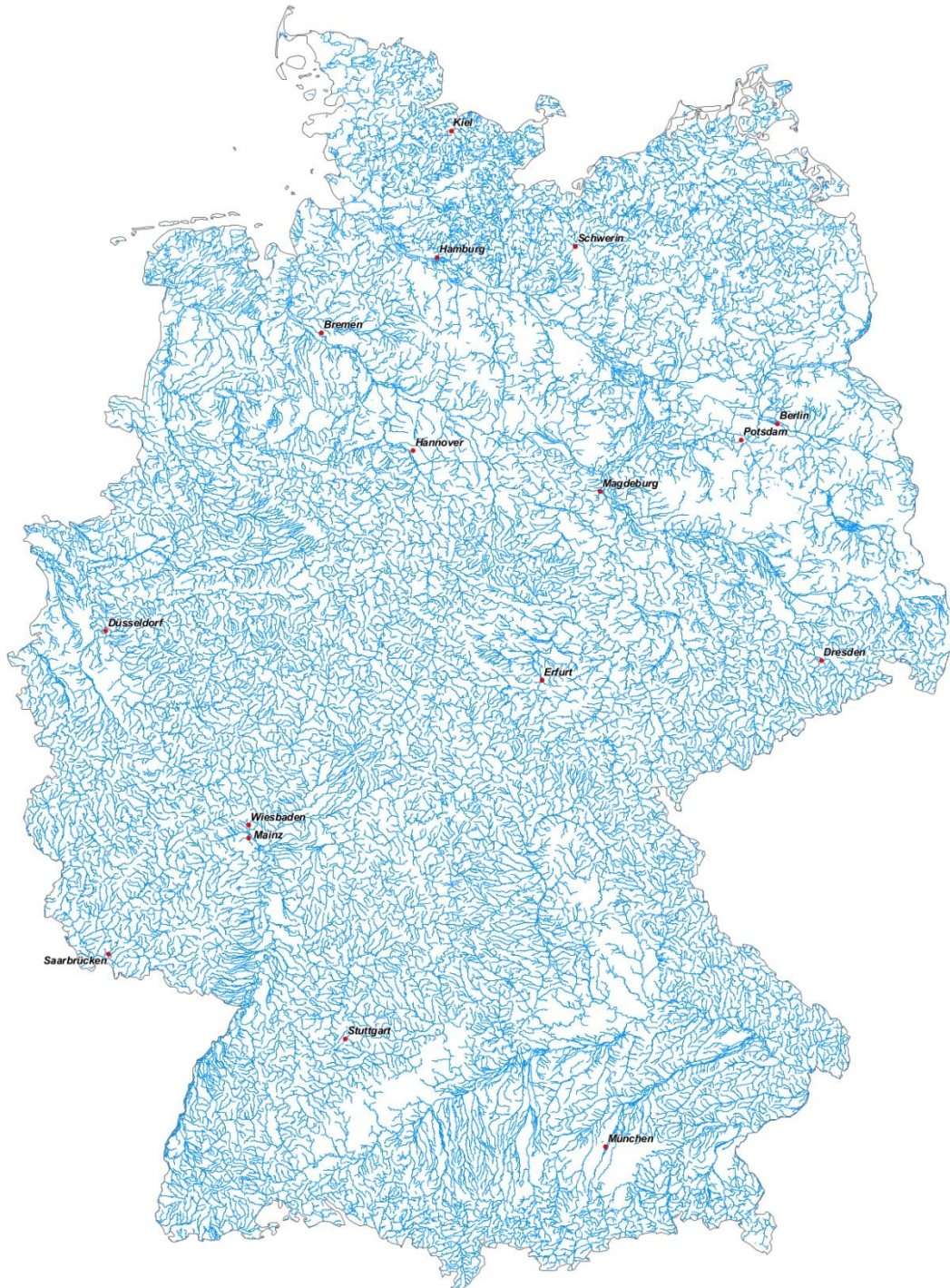


Bild 25: Darstellung des Gewässernetzes in Deutschland – Übersichtskarte Deutschland – Flüsse, Bäche und Kanäle, © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie [33]

Als Fließgewässer werden in der Hydrologie alle oberirdisch fließenden Gewässer in Form von natürlichen (Ströme, Flüsse, Bäche) oder künstlichen (Kanäle, Gräben) Wasserläufen des Binnenlandes mit ständig oder zeitweilig fließendem Wasser bezeichnet. Fließgewässer zählen wie die Stehgewässer zu den Oberflächengewässern im Gegensatz zu dem unterirdisch fließenden Grundwasser, welches nicht zu den Fließgewässern gerechnet wird. Die Abgrenzung zwischen Fließ- und Stillgewässer erfolgt über die Verweilzeit des Wassers innerhalb dessen das gesamte Wasservolumen eines zu betrachtenden Gewässerabschnittes ausgetauscht wird. Erfolgt dieses innerhalb von 3 Tagen, handelt es sich um ein Fließgewässer. Benötigt der vollständige Wasseraustausch über dreißig Tage, liegt ein Stillgewässer vor. Die Gewässerformen dazwischen stellen Übergangsbereiche dar, die sowohl Eigenschaften von Fließgewässern als auch von Stillgewässern besitzen [37].

Zu den berichtspflichtigen Fließgewässern nach europäischer Wasserrahmenrichtlinie zählen alle Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet größer 10 km².

Mit einer Gewässerlänge von 141.726 km [34] machen die Fließgewässer mit einem Gewässereinzugsgebiete von 10 km² und mehr 35,4 % der Gesamtlänge der in Deutschland existierenden 400.000 km Fließgewässer aus. Der überwiegende Teil der Fließgewässer entfällt mit 258.274 km Gewässerlänge auf die Gewässer mit einem Einzugsgebiet kleiner 10 km², was einen Anteil von 64,6 % entspricht. In [38] sind anstelle der Angaben in [34] nur 137.029 km Fließgewässer mit Gewässereinzugsgebiete von $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$ erfasst. Die Anzahl der dazu gehörigen Fließgewässerkörper liegt bei 8.925 [38]. In Tabelle 12 ist die Gesamtlänge der Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$ für die einzelnen Bundesländer in Deutschland dargestellt.

Nr.	Bundesland	Länge Fließgewässer mit $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$ [34] [km]	Fläche Bundesland [km ²]	Flächenschlüssel [km/km ²]
1	Bayern	25.510	70.550	0,3616
2	Niedersachsen	22.557	47.616	0,4737
3	Nordrhein-Westfalen	13.878	34.113	0,4068
4	Baden-Württemberg	13.176	35.751	0,3685
5	Brandenburg	11.485	29.654	0,3873
6	Hessen	8.320	21.115	0,3940
7	Sachsen-Anhalt	8.131	20.452	0,3976
8	Mecklenburg-Vorpommern	7.971	23.213	0,3434
9	Rheinland-Pfalz	7.876	19.854	0,3967
10	Schleswig-Holstein	7.486	15.802	0,4737
11	Sachsen	7.286	18.450	0,3949
12	Thüringen	6.022	16.202	0,3717
13	Saarland	911	2569	0,3546
14	Hamburg	498	755	0,6596
15	Berlin	345	892	0,3868
16	Bremen	274	419	0,6539
	Gesamtlänge	141.726	357.407	0,3965
	Gesamtlänge Gewässer	400.000		1,1192
	Gewässer $A_{E0} < 10 \text{ km}^2$	258.274		0,7226

Tabelle 12: Gesamtlänge der Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$ in den einzelnen Bundesländern in Deutschland

Anmerkung [34]: Bundesamt für Naturschutz 2004; © Geobasis-DE/BKG 2003; Stand der Daten: 12.2003; Flüsse mit Grenzverlauf in der Mitte des Flusses wurden je zur Hälfte beiden Ländern zugeordnet. Ausführliche Quelle: BfN - Bundesamt für Naturschutz (2004): Daten zur Natur 2004. Münster

In Tabelle 12 wurde neben der Aufteilung der Fließgewässerslängen auf die einzelnen Bundesländer aus [34] auch die Fläche des jeweiligen Bundeslandes erfasst und die Fließgewässerslänge auf diese bezogen und der dazugehörige Flächenschlüssel berechnet. Auch für Deutschland wurde neben dem bundeslandspezifischen Flächenschlüssel der Gesamtlächenschlüssel berechnet und in Tabelle 12 sowohl für die Hauptgewässer mit einem Einzugsgebiet von $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$ als auch für die Nebengewässer mit einem Einzugsgebiet von $A_{E0} < 10 \text{ km}^2$ angegeben.

Wie die Auswertungen in Tabelle 12 zeigen, kommen im Mittel auf einen Quadratkilometer in Deutschland, d.h. auf $1.000 \text{ m} \times 1.000 \text{ m}$ Landesfläche, 1.192 m Fließgewässerslänge bezogen auf eine Gesamtlächerslänge von 400.000 km . Hiervon zählen im Mittel in Deutschland $722,6 \text{ m}$ Gewässerslänge zu Gewässern mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} < 10 \text{ km}^2$ und $396,5 \text{ m}$ zu Gewässern mit einem Einzugsgebiet von $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$. Bezogen auf die in [36] vom Umweltbundesamt angenommenen mehr als 500.000 km Fließgewässersstrecke würden sogar 1.490 m Fließgewässerslänge im Mittel auf einen Quadratkilometer in Deutschland kommen.

Bezogen auf die einzelnen Bundesländer verdeutlicht die Untersuchung in Tabelle 12, dass die Fließgewässer mit einem Einzugsgebiet von $A_{E0} \geq 10 \text{ km}^2$ über alle Bundesländer und damit über ganz Deutschland mit $343,4 \text{ m}$ in Mecklenburg-Vorpommern bis $397,6 \text{ m}$ in Sachsen-Anhalt und in Nordrhein-Westfalen bis $406,8 \text{ m}$ verhältnismäßig gleich verteilt sind. Eine ähnliche gleichmäßige Verteilung besitzen auch die Gewässer mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} < 10 \text{ km}^2$, die aber in [34] nicht bundeslandspezifisch aufgenommen wurden. Grundsätzlich zeigt sich damit, dass die Fließgewässer in Deutschland und in den einzelnen Bundesländern überall flächendeckend gut verfügbar sind. Bezüglich einer zukünftigen nachhaltigen und erneuerbaren Wärmeversorgung ist dies eine sehr wichtige elementare Voraussetzung, um eine Wärmeversorgung aus Fließgewässern flächendeckend in Deutschland erfolgreich umzusetzen.

Etwas höhere Werte beim Flächenschlüssel bezogen auf die Gewässer mit einem Einzugsgebiet von 10 km^2 und mehr besitzen im Vergleich zu den andern Flächenländern, wie in Tabelle 12 auch farblich markiert, die beiden zur Nordsee entwässernden Bundesländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Im Vergleich zum Bundesquerschnitt mit $396,5 \text{ m}$ für die Hauptgewässer liegen hier für die in diesen beiden Bundesländern vorkommenden Gewässerslängen von $473,7 \text{ m}$ pro Quadratkilometer Landesfläche vor, was unter anderem mit den Entwässerungsstrukturen der Gewässer in Richtung Nord- und Ostsee zu tun hat, wie in Bild 25 ersichtlich. Nur die beiden Stadtstaaten Hamburg und Bremen übertreffen den Flächenschlüssel mit $659,6 \text{ m}$ und $653,9 \text{ m}$ Gewässerslänge, da Hamburg von der Elbe und Bremen von der Weser maßgeblich dominiert sind.

Gewässerslängenklasse	Anzahl der Gewässer	Anteil an Gewässersanzahl [%]	Gewässerslänge pro Klasse [km]	Anteil an Gewässerslänge [%]
über 1.000 km	3	0,28	5.184	9,73
500 bis 1.000 km	5	0,47	3.195	6,00
300 bis 500 km	7	0,65	2.492	4,68
200 bis 300 km	15	1,40	3.697	6,94
100 bis 200 km	58	5,43	7.966	14,96
50 bis 100 km	165	15,43	10.920	20,50
30 bis 50 km	250	23,39	9.458	17,76
20 bis 30 km	242	22,64	5.775	10,84
10 bis 20 km	324	30,31	4.574	8,59
Summe	1.069	100	53.261	100

Tabelle 13: Anzahl der Gewässer sortiert nach Gewässerslängenklassen für Gewässerslängen ab 10 km

In Deutschland gibt es über 1.069 Fließgewässer mit einer Gewässerlänge von 10 km und mehr. Die bei diesen Gewässern erfasste Gesamtlänge beträgt 53.261 km. In Tabelle 13 ist die Anzahl der Gewässer sortiert nach 9 Gewässerlängenklassen ausgewertet. Einige der erfassten Flüsse haben ihren Verlauf nicht nur in Deutschland sondern auch über die Landesgrenzen hinaus. So fließen z.B. von den 1.236 km des Rheins 865 km durch Deutschland, bei der Donau sind es 647 km, bei der Elbe 727 km und bei der Oder 179 km. Die Mosel mit 544 km Länge hat eine Fließgewässerstrecke in Deutschland von 242 km und der Inn von 218 km. 92 % der in Tabelle 13 betrachteten Gewässer haben Gewässerlängen unter 100 km. 58 % der Gesamtgewässerlänge in Tabelle 13 entfallen auf diese Klasse. Die Gewässer unter 10 km Länge machen über 350.000 km aus. Die 90 längsten der in Tabelle 13 untersuchten Gewässer in Deutschland sind in Tabelle 14 sortiert nach Gewässerlängenklassen aufgeführt.

Fließ- gewässer	Gewässer- länge [km]	Fließ- gewässer	Gewässer- länge [km]	Fließ- gewässer	Gewässer- länge [km]
Donau	2.857	Unstrut	192	Lesum	131
Rhein	1.236	Hunte	189	Zschopau	128
Elbe	1.091	Jagst	189	Nahe	125
Oder	866	Eider	188	Rhin	125
Weser	744	Schwarze	188	Freiberger Mulde	124
Mosel	544	Amper	185	Trave	124
Main	524	Vechte	182	Elz	121
Inn	517	Regen	177	Wümme	118
Saale	413	Eder	176	Niers	117
Spree	400	Sauer	173	Wupper	117
Ems	371	Rur	170	Berkel	114
Neckar	367	Bode	169	Loisach	114
Havel	325	Hase	169	Nied	114
Eger	316	Kocher	168	Diemel	110
Werra	300	Zwickauer Mulde	166	Vils	110
Isar	295	Naab	165	Rott	109
Mulde	290	Sieg	155	Ilmenau	107
Leine	281	Oste	153	Enz	105
Lech	264	Wertach	151	Große	105
Aller	260	Alz	150	Oker	105
Weißer Elster	257	Iller	147	Erft	103
Lausitzer Neiße	256	Warnow	143	Mies	103
Lahn	245	Fränkische Saale	142	Ohre	103
Saar	235	Kyll	142	Saalach	103
Salzach	225	Peene	142	Uecker	103
Lippe	222	Paar	134	Wied	102
Altmühl	220	Wörnitz	132	Pegnitz	101
Fulda	220	Tauber	130	Innerste	100
Ruhr	219	Ilm	129	Blies	99
Elde	208	Lenne	129	Fuhse	98

Tabelle 14: Die 90 längsten Gewässer in Deutschland sortiert nach Gewässerlängenklassen

Von den 400.000 km Fließgewässern in Deutschland werden mit Delegationsstrecken 7.289,57 km als Binnenwasserstraßen des Bundes mit Binnenschiffahrtsstraßen und Seeschiffahrtsstraßen genutzt. 2.453,54 km gehören davon zu den freien bzw. geregelten

Flussstrecken, 3.029,17 km zu den staugeregelten Flussstrecken und 1.754,39 km zu den Kanalstrecken [39].

Nach verschiedenen Quellen gibt es in Deutschland rund 15.000 Flüsse und Bäche mit einem Einzugsgebiet von mehr als zehn Quadratkilometern [40]. Insgesamt sollen ca. 200.000 Fließgewässer in Deutschland existieren.

In Bild 26 sind das Fließgewässernetz und die Bevölkerungsverteilung in Deutschland nach Groß-, Mittel- und Kleinstädten sowie Dörfern mit den Grenzen der Bundesländer eingezeichnet. Die flächendeckende gute Verfügbarkeit bezüglich der menschlichen Siedlungsstrukturen in allen Gemeindegrößenklassen ist in Bild 26 sehr gut erkennbar. Bezogen auf die 10.789 Gemeinden in Deutschland und die 200.000 Fließgewässer, was einem Verhältnis von 1:20 entspricht, lässt sich feststellen, dass de facto jede Stadt und jedes Dorf in Deutschland durch ein oder mehrere Fließgewässer durchflossen wird oder in der unmittelbaren Nähe eines oder mehrerer Fließgewässer liegt. Eine aquathermische Nutzung der Fließgewässer bietet sich daher für die kommunale Wärmeversorgung an.

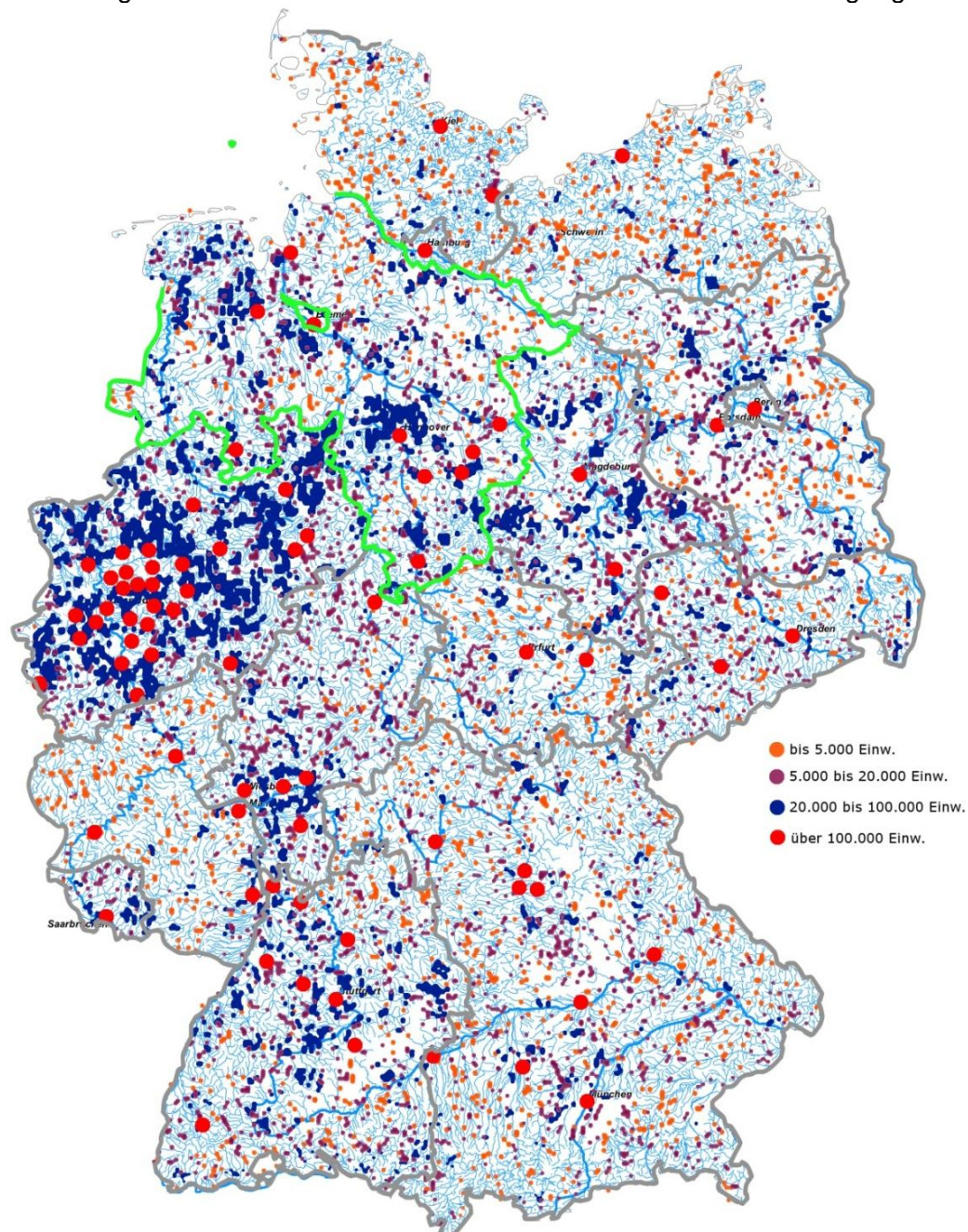


Bild 26: Fließgewässernetz © BKG [33] und Bevölkerungsverteilung in Deutschland nach Groß-, Mittel- und Kleinstädten sowie Dörfern, Daten [8], mit Grenzen der Bundesländer

4.2.2. Flusseinzugsgebiete in Deutschland

Die großen Fließgewässer und die Flusseinzugsgebiete in Deutschland sind in Bild 27 dargestellt. Sie umfassen insgesamt die 10 Flussgebiete Rhein, Donau, Elbe, Oder, Weser, Ems und Maas sowie die Küstengebiete der Nord- und Ostsee, die als Einzugsgebiet der Eider, Schlei/Trave und Warnow/Peene zusammengefasst sind. Die großen Flusseinzugsgebiete lassen sich in Teileinzugsgebiete wie z.B. Main, Neckar und Mosel beim Rhein, Havel, Saale und Mulde bei der Elbe sowie Aller, Fulda und Werra bei der Weser unterteilen.



Bild 27: Flussgebietseinheiten in der Bundesrepublik Deutschland

Bezüglich der 80 Großstädte zeigt sich, dass 46 Großstädte im Rheingebiet, 10 Großstädte im Elbe- und 10 im Wesergebiet, 5 im Donaugebiet, 4 im Emsgebiet, 2 im Maasgebiet sowie 2 im Schlei/Trave- und eine Großstadt im Warnowgebiet zu finden sind. Kiel liegt durch den Nord-Ostseekanal in dem das obere Einzugsgebiet der Eider aufgeht sowohl im Schlei/Trave- als auch im Elbegebiet. Von den Landeshauptstädten entfallen 8 Landeshauptstädte mit der Bundeshauptstadt auf das Elbegebiet, 5 auf das Rhein- und 2 auf das Wesergebiet sowie eine auf das Donaugebiet.

In Tabelle 15 sind die Einzugsgebiete des Gewässernetzes Deutschlands bezüglich ihres Gesamteinzugsgebietes und ihres Einzugsgebietes innerhalb von Deutschland dargestellt.

Nr.	Flussgebiete	Einzugsgebiet [km ²]		Einzugsgebiet Anteil Dtl.	Einzugsgebiet Gesamt [km ²]
1	Rhein	105.000	[43]	53,03%	198.000
2	Elbe	97.595	[44]	65,50%	149.000
3	Oder	5.399	[eB]	4,56%	118.400
4	Weser	46.100		100,00%	46.100
5	Donau	56.200	[45]	6,88%	817.000
6	Maas	2.455		7,39%	33.200
7	Ems	12.650	[46]	100,00%	12.650
8	Ijssel / Vechte		3.104 [eB]		8.600
9	Nordseegebiet	7.280	[eB]	100,00%	7.280
10	Ostseegebiet	24.398	[eB]	100,00%	24.398
	Summe	357.077			

Tabelle 15: Einzugsgebiete des Gewässernetzes Deutschlands, Quellen: Hydraulischer Atlas der Bundesrepublik, DFG [42], [43 bis 46], [eB] – eigene Berechnungen

Das Einzugsgebiet der Ijssel/Vechte ist beim Rheingebiet miterfasst. Die deutschen Einzugsgebiet von Oder, Ijssel/Vechte, Nord- und Ostsee wurden berechnet, so dass hieraus eine Differenz von 510,77 km² in Bezug auf die Gesamtfläche von Deutschland mit 357.588 km² resultiert, was einer Fehlerabweichung von 0,143 % entspricht.

Das größte und wasserreichste Flusseinzugsgebiet für Deutschland mit einem mittleren Jahresabfluss von 2.290 m³/s ist das Rheingebiet mit 105.000 km². 53,03 % des gesamten Einzugsgebietes des Rheins und seiner Zuflüsse mit 198.000 km² entfallen auf Deutschland und prägen hier 29,4 % der Landesfläche. An der Ausflussgrenze von Deutschland beim Übergang des Rheins in die Niederlande, ist das Rheingebiet 159.800 km² groß. Das flächenmäßig zweitgrößte Flusseinzugsgebiet ist das Elbegebiet mit 97.595 km² Flächenanteil alleine in Deutschland und 149.000 km² Gesamteinzugsgebiet, welches 27,3 % der Landesfläche beherrscht. Bezüglich des Abflusses ist aber das Donaugebiet, obwohl es nur 56.200 km² Einzugsgebiet in Deutschland hat, mit 1.430 m³/s mittlerem Jahresabflusses größer als das Elbegebiet mit 860 m³/s. Das Donaugebiet bestimmt 15,7 % der Landesfläche in Deutschland. Das viertgrößte Flusseinzugsgebiet für Deutschland mit 46.100 km² ist das Wesergebiet mit 12,9 % Landesanteil, das aber bezüglich des Abflusses mit 397 m³/s dem Odergebiet mit 540 m³/s nachgeordnet ist. Das Odergebiet macht dahingegen nur 1,5 % der Landesfläche von Deutschland aus.

Die Ems entwickelt sich von einem mittleren Abfluss von 36,8 m³/s am Pegel Rheine über 80,1 m³/s am Pegel Versen bis zu 125,6 m³/s bei der Mündung in die Nordsee und ist mit 12.650 km² das fünftgrößte Flusseinzugsgebiet in Deutschland, bestimmt damit aber nur noch 3,5 % der Landesfläche.

Die Wasserflächen in Deutschland umfassen ohne die Meeresgebiete insgesamt laut [30] 8.552 km², was 2,4 % der Landesfläche von Deutschland ausmacht. Deutschland verfügt neben den Fließgewässern alleine über 13 Seen, die eine Wasserfläche von mehr als 20 km² aufweisen und eine Gesamtfläche von 1.051 km² besitzen.

4.2.3. Abfluss und Abflussvariabilität der Fließgewässer

Der mittlere Abfluss und die Abflussvariabilität liefern wichtige Informationen über die statistisch vorhandenen Wassermengen eines Fließgewässers und ermöglichen Einblicke zur saisonalen Verfügbarkeit. Der Abfluss eines Fließgewässers ist dabei die Wassermenge, die einen definierten Querschnitt in einer bestimmten Zeit durchfließt. Die Ermittlung des Abflusses erfolgt über die Messung von Wasserständen an Messpegeln. In Deutschland existieren mehr als 4.000 Pegelmessstellen [49], so dass in Kombination mit Abflussberechnungen das Abflussverhalten für die großen, mittleren und anteilig für die kleinen Fließgewässer erfasst werden kann. Regelmäßige Wasserstandsmessungen fanden in Deutschland zunächst in Preußen - an der Elbe seit 1727 in Magdeburg und seit 1753 in Barby, seit 1766 in Düsseldorf am Rhein und seit 1771 in Stettin an der Oder statt [49]. Historisch wurden Wasserstände seit dem Mittelalter über Wassermarken festgehalten, die in Bauwerke als Zeichen eingeschlagen oder angezeichnet wurden [49], wobei neben Stauzielen, Hochwasser- und Niedrigwassermarken meist erhalten geblieben sind.

Die Abflussbildung und Abflusskonzentration eines Fließgewässers setzt sich nach [50] aus Basisabfluss und Direktabfluss, Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss zusammen und erfasst damit alle abflussrelevanten Anteile des Niederschlags, die nicht verdunstet sind. Aus diesen Komponenten wird in unterschiedlicher Intensität der Gesamtabfluss eines Fließgewässers gebildet. Der Basisabfluss beinhaltet nach [50] die grundwasserbürtigen Abflusskomponenten, aus denen die Fließgewässer aber auch die Stillgewässer in niederschlagsarmen Zeiten über Quellen oder flächenhafte Grundwasseraustritte gespeist werden. Laut [30] stellt die Speisung der Oberflächengewässer aus Grundwasserzuflüssen in Deutschland einen wichtigen Anteil dar. Deutschland ist nach [30] reich an Grundwasservorkommen, was die kontinuierliche Versorgung der Fließgewässer über die Basisabflüsse sicher stellt.

Der oberirdische Abfluss einer Landfläche kann flächenhaft als Landoberflächenabfluss oder linienhaft als Fließgewässer erfolgen. Der natürliche Abfluss der Fließgewässer in Deutschland wird maßgeblich durch die Niederschläge geprägt. Ebenfalls von Bedeutung für das Abflussgeschehen ist die Verdunstung die im Sommerhalbjahr höher ist als im Winterhalbjahr. Daher treten für viele Fließgewässer in Deutschland hohe mittlere Abflüsse im Winter und Frühjahr auf, während der Spätsommer und Herbst durch geringere mittlere Abflüsse gekennzeichnet ist. Der Großteil der Fließgewässer in Deutschland hat daher seinen Hauptabfluss im Winterhalbjahr, während der Abfluss im Sommerhalbjahr geringer ausfällt. Nur im alpinen Bereich in Süddeutschland war infolge der winterlichen Schneebedeckung und der Abschmelzung im Frühjahr in Kombination mit den Niederschlägen der Sommerabfluss im Frühjahr und im Frühsommer größer als der Winterabfluss. Infolge des Klimawandels hat sich dies aber in den letzten Jahren verschoben, so dass hier mittlerweile in den letzten Jahren auch der Winterabfluss größer als der Sommerabfluss ist.

Wie die Auswertung der untersuchten Pegel der Fließgewässer in den 80 Großstädten in Deutschland zeigt, beträgt im Gesamtmittel über alle ausgewerteten Stützstellen der mittlere Abfluss des Winterhalbjahres 192,5 % des mittleren Abflusses des Sommerhalbjahres, d.h. ca. 2/3 des mittleren Jahresabflusses erfolgen im Winter und ca. 1/3 im Sommer. Bei Flüssen wie Isar, Lech, Iller, Würm oder Hoch- und Oberrhein sind infolge der Langzeitstatistik die mittleren Abflüsse des Winterhalbjahres kleiner als die des Sommerhalbjahrs, bei Donau und Wertach ist der Winter- und Sommerabfluss gleich. Die Klimabedingte Anpassung von Winter- und Sommerabfluss ist infolge der Langzeitstatistik noch nicht signifikant erkennbar, zeigt sich aber deutlich in der Tendenz der letzten Jahre. Alle anderen ausgewerteten Gewässer weisen mit dem 1,5-, 2- und 3-fachen einen deutlich größeren mittleren Abfluss im Winterhalbjahr, in Extremfällen bis zum 4- und 7-fachen des Sommerabflusses auf.

In Bild 28 ist die Verteilung von 976 ausgewerteten Stützstellen der Gewässermodelle in den 80 Großstädten bezogen auf das Verhältnis des mittleren Abflusses des Winterhalbjahres zu dem des Sommerhalbjahres dargestellt. Bei 44,8 % der ausgewerteten Stützstellen in den 80 Großstädten ist der mittlere Abfluss des Winterhalbjahres 150 bis 200 % des mittleren Abflusses des Sommerhalbjahres. Bei 21,3 % der Stützstellen beträgt das Verhältnis 200 bis

250 % und bei 16 % der Stützstellen 100 bis 150 %. Insgesamt ist die Verteilung in Bild 28 asymmetrisch in Richtung dominanter Winterabflüsse. Größere Sommerabflüsse als Winterabflüsse lassen sich nur bei 2,8 % der untersuchten Stützstellen nachweisen, die alle samt bei den oben benannten alpinen Flüssen in Süddeutschland auftreten. Überdurchschnittlich große Winterabflüsse von mehr als 300 % lassen sich nur bei 5,4 % der untersuchten Stützstellen zeigen.

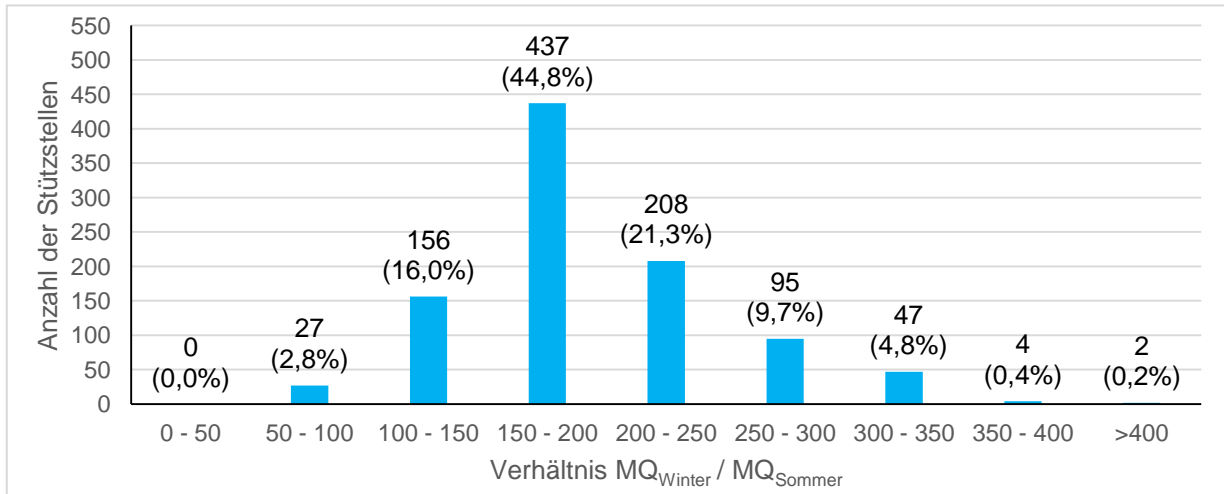


Bild 28: Verteilung der ausgewerteten Stützstellen in den 80 Großstädten bezogen auf das Verhältnis des mittleren Abflusses des Winterhalbjahres zu dem des Sommerhalbjahres

Auf Grund der verschiedenen Einflussfaktoren unterliegt der Abfluss einer großen räumlichen und zeitlichen Variabilität. In Mitteleuropa können Hochwässer zu allen Jahreszeiten auftreten [49], wobei die Alpenflüsse vor allem im Frühling und Frühsommer Hochwasser führen und die Mittelgebirgsflüsse in den Wintermonaten. Durch den Klimawandel kommt es zu einer Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Extremwetterlagen sowohl im Bezug auf Hochwässern als auch im Bezug auf Niedrigwasserphasen.

Bild 29 zeigt den mittleren Durchfluss und die Durchflussvariabilität verschiedener Fließgewässer in Deutschland. Die Bandbreite des Fließgewässers in Bild 29 entspricht dabei nach [49] der Größe des mittleren Durchflusses des jeweiligen Abschnittes des Fließgewässers. Die Farbe stellt die Durchflussvariabilität dar. Die Datenbasis sind die an den amtlichen Pegeln verfügbaren Abflusshauptzahlen. Die flächendeckende Verfügbarkeit der Fließgewässer ist in Bild 29 gut erkennbar, genauso wie die Fließgewässer mit großen Abflussmengen klar identifizierbar sind.

Die Abflussvariabilität eines Fließgewässers berechnet sich aus dem Quotienten des mittleren höchsten Abfluss MHQ und des mittleren niedrigsten Abfluss MNQ. Die Abflussvariabilität wird maßgeblich durch die Größe des Einzugsgebietes und die Lauflänge des Fließgewässers bestimmt. Weitere Einflussfaktoren sind die Abflussmengen infolge der Niederschlagshöhen, Höhen der Schneedecken, ggf. Gletscherhöhen im Einzugsgebiet und/oder die Kontinuität und Größe von Quellschüttungen ebenso wie der im Einzugsgebiet vorhandene Untergrund, Bewuchs, etc.

Grundsätzlich zeigt sich die Tendenz, dass mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes und mit zunehmender Lauflänge eines Fließgewässers die Abflussvariabilität abnimmt, da lokale Extrembedingungen ausgeglichen werden und der Gewässerabfluss über den Jahresverlauf vergleichmäßigt wird. Die großen Stromgebiete wie Rhein, Donau, Elbe, Oder und Weser weisen daher geringe Abflussvariabilitäten auf, wie in Bild 29 ersichtlich. Gewässer mit kleineren Einzugsgebieten sind dahingegen häufig durch höhere Abflussvariabilitäten gekennzeichnet. Aber auch die lokalen Gegebenheiten der einzelnen Einzugsgebiete besitzen einen großen Einfluss auf die Abflussvariabilität. So weist z.B. die Mosel trotz ihres großen Einzugsgebietes eine hohe Abflussvariabilität infolge der wenig durchlässigen Gesteinsschichten des Rheinischen Schiefergebirges auf. Ebenfalls hohe Variabilität zeigen die Quellregionen der Mittelgebirge wie Schwarzwald, Erzgebirge, etc [49].

Dementsprechend ist festzustellen, je kleiner ein Einzugsgebiet eines Fließgewässers oder je niedriger die Speicherkapazität infolge undurchlässiger Boden- und Gesteinsschichten im Einzugsgebiet ist, desto größer kann die Abflussvariabilität sein. Kleine Einzugsgebiete z.B. mit hohen kontinuierlichen Quelleistungen können aber auch sehr gleichmäßige Abflüsse aufweisen. Bei Fließgewässern zeigt laut [49] eine hohe Abflussvariabilität das mögliche Auftreten großer Hochwässer als auch das Auftreten zeitweiliger Wasserknappheiten an. Bei Gewässern mit hohen Abflussvariabilitäten ist es nach [49] daher sinnvoll, Talsperren zu errichten, um Hochwasserspitzen zurückzuhalten, Niedrigwasserabflüsse zu erhöhen und das Abflussregime auszugleichen – auch im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels.

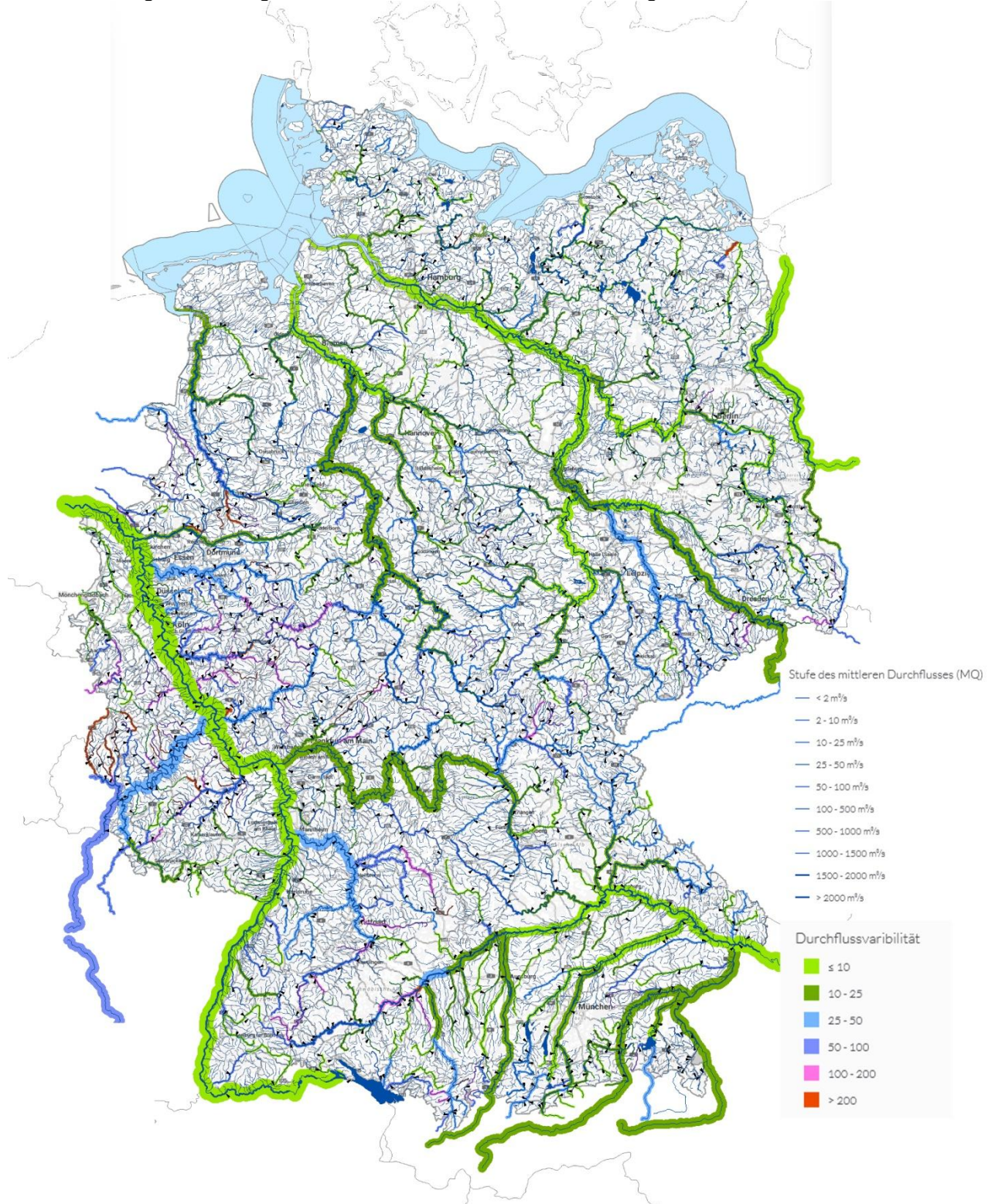


Bild 29: Mittlerer Durchfluss und Durchflussvariabilität, © BfG [47]

5. Wassertemperaturen von Fließgewässern in Deutschland

Für die Quantifizierung des Potenzials der Fließgewässer zur potenziellen Nah- und Fernwärmegewinnung wurde die Wassertemperatur von 22 Haupt- und Nebenfließgewässern an 53 Meßpegeln in Deutschland untersucht. Die Hauptgewässer Rhein, Donau, Elbe, Weser und Oder einschließlich ihrer Nebenflüsse sind dabei für die Untersuchung der Wassertemperaturen analysiert worden. Für die untersuchten Pegel liegen i.a. Messungen der Gewässertemperaturen über einen langen Zeitraum vor. Die vollständige Übersicht der untersuchten Gewässer und der betrachteten Pegel ist in Bild 30 dargestellt.



Bild 30. Darstellung der untersuchten Pegel mit Langzeit-Temperaturdaten

Bild 30 verdeutlicht, dass für die Haupt- und Nebengewässer über ganz Deutschland verteilt zahlreiche Meßpegel für die Auswertung der Wassertemperaturen in allen wesentlichen Flusseinzugsgebieten zur Verfügung stehen. Damit kann eine Einschätzung der Entwicklung der Wassertemperaturen der Fließgewässer in Deutschland erfolgen und daraus abgeleitet werden, welche Temperaturspreizungen für eine Grüne Nah- und Fernwärmeerzeugung grundsätzlich möglich sind und welche Entzugsleistungen aus den Fließgewässern gewonnen werden können. Daraus ist dann das technisch und ökologisch nutzbare Fließgewässerpotenzial ermittelbar.

Maßgebend für die Untersuchung des Fließgewässerwärmepotenzials sind der Durchfluss und die Wassertemperatur. Hierbei ist die jahreszeitliche Schwankung von Durchfluss und Wassertemperatur zu berücksichtigen, da, wie in Abschnitt 4.2.3. gezeigt, nicht nur die Wassertemperatur sondern auch der Durchfluss jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt.

Neben dem jahreszeitlichen Verlauf der Gewässertemperatur ist die Untersuchung des Langzeitverhaltens der Gewässertemperatur im Zeichen des Klimawandels von großer Bedeutung, wobei hier möglichst Pegelmessungen über viele Dekaden vorliegen sollten. Die Langzeit-Untersuchung liefert quantifizierbare Aussagen über den Einfluss des Klimawandels auf die Gewässertemperaturen der Fließgewässer in Deutschland sowohl im Jahresmittel als auch für das Sommer- und Winterhalbjahr. Ziel dieser Untersuchungen ist es dabei, quantifizierbare Größen für die Temperaturzunahmen infolge des Klimawandels zu ermitteln und für verschiedene Fließgewässer in Deutschland im Jahresmittel und im Mittel des Winter- und des Sommerhalbjahres aufzuzeigen, um auch für die beiden Jahreshälften die langjährige Gewässererwärmung bewerten zu können. Darüber hinaus kann aus den vieljährigen Temperaturdaten der Fließgewässer auch die Trendentwicklung der mittleren Wassertemperaturen für die Zukunft extrapoliert werden.

Die Untersuchung der Fließgewässertemperaturen des Winterhalbjahres ist hierbei von besonderem Interesse, da in diesem Zeitraum die Hauptheizperiode fällt, was für die Gewinnung Grüner Nah- und Fernwärme aus Fließgewässern relevant ist. Für das Winterhalbjahr werden sowohl die langzeitlichen Mitteltemperaturen als auch tagesgenaue Temperaturwerte untersucht, um hier eine Vorstellung über die Verfügbarkeit der Fließgewässerwärmenutzung und die Anzahl möglicher Ausfalltage zu gewinnen.

Für das Sommerhalbjahr können die Untersuchungen Abschätzungen möglicher Temperaturspreizungen für die Warmwassergewinnung und die Prozesswärmegewinnung im Niedertemperaturbereich ermöglichen ebenso für Kühlzwecke im Bereich der Klimakälte.

5.1. Vieljähriger und saisonaler Trend der Wassertemperatur der Fließgewässer

5.1.1. Vieljähriger Trend der Wassertemperatur der Fließgewässer

Die Langzeitentwicklung der Gewässertemperaturen zeigen die Bilder 31 und 32 für den Rhein in Koblenz, die Elbe in Hamburg und den Lech am Hochablass Augsburg für die Jahresmitteltemperatur. Die Temperaturdaten sind der FGG Rhein [53], der FGG Elbe [54] und dem GKD Bayern [55] entnommen. Bild 31 stellt die vollständigen Temperaturverläufe seit Anbeginn der Messungen und Bild 32 die Temperaturentwicklung seit 1950 dar, um eine Vergleichbarkeit der drei Pegeltemperaturmessungen zu ermöglichen.

Der Rhein bis Koblenz wird maßgeblich durch die Alpenabflüsse in der Schweiz und durch die Abflüsse aus den deutschen Mittelgebirgen charakterisiert. Die Elbe bei Hamburg wird durch die Zuströme aus den Mittelgebirgen als auch durch die Flachländer der norddeutschen Tiefebene bestimmt. Der Lech ist als Alpenabfluss stark durch die Niederschlagscharakteristik in den Alpen und durch die hier erfolgenden sommerlichen Schnee- und Gletscherschmelzen geprägt.

Für die Untersuchungen werden aus den Jahresmitteltemperaturen der drei betrachteten Fließgewässer die Langzeit-Trendlinien der Gewässertemperaturen berechnet. Die in Bildern 31 und 32 dargestellten Trendlinien mitteln die jährlichen Schwankungen der Gewässertemperaturen aus, so dass aus den Verläufen der Jahresmitteltemperatur die

langzeitliche Tendenz der Fließgewässertemperaturen abgeleitet und somit der Klimawandel bedingte Temperaturanstieg der Fließgewässer quantifiziert werden kann.

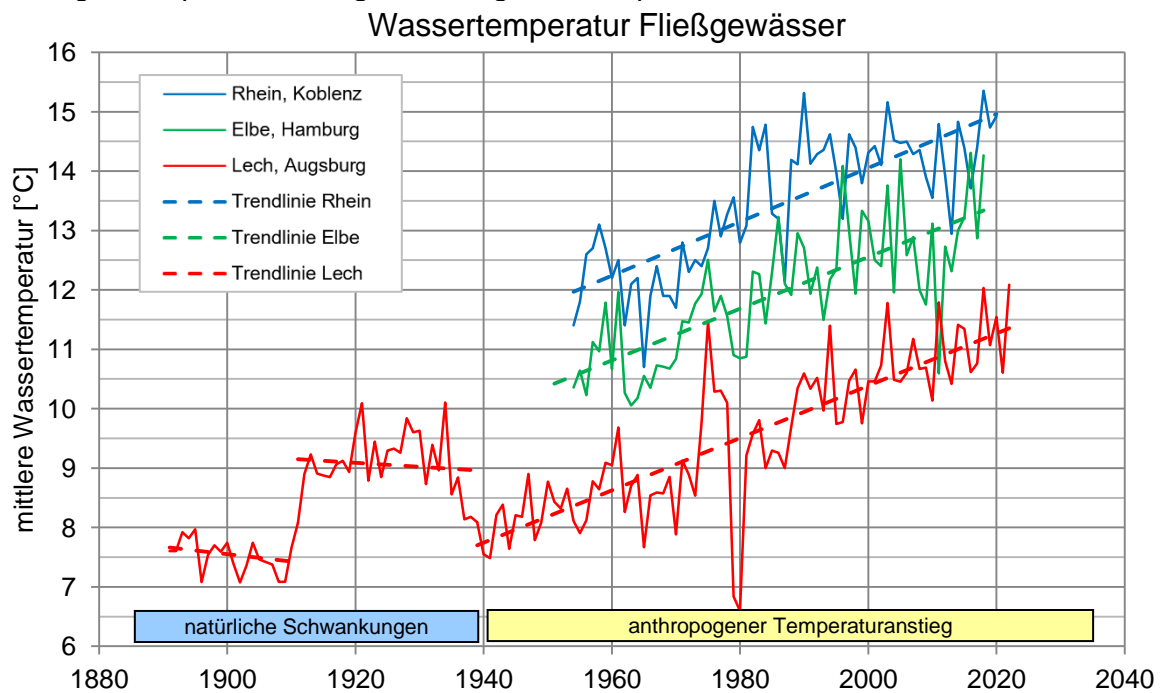


Bild 31: Vieljähriger Verlauf der Entwicklung der Wassertemperatur

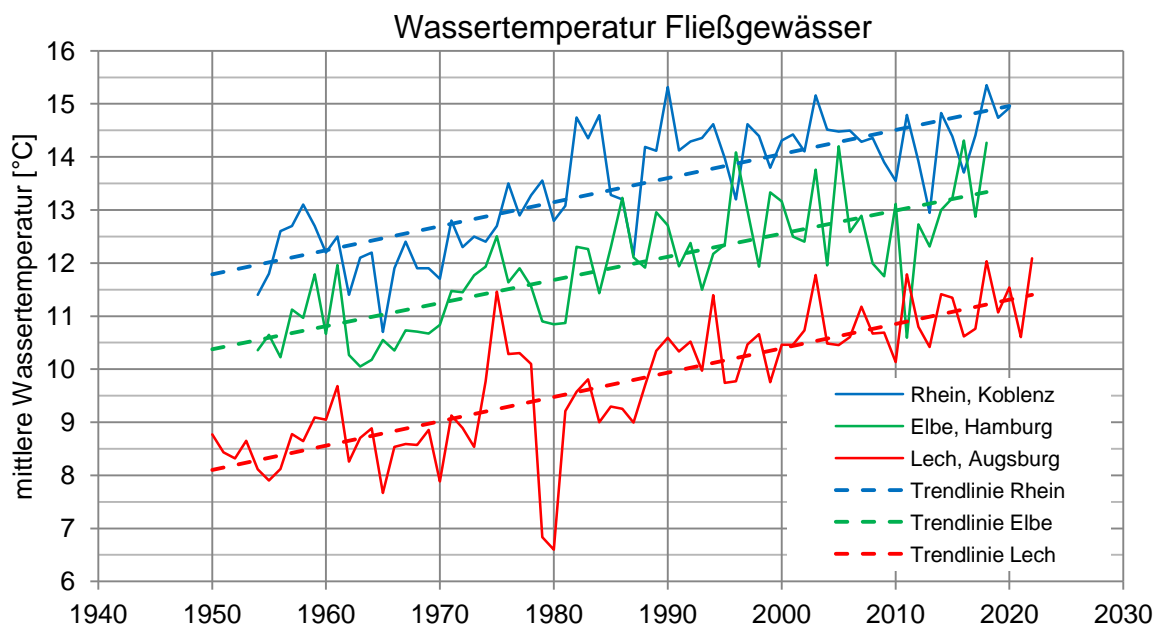


Bild 32: Vieljähriger Verlauf der Entwicklung der Wassertemperatur ab 1950

Der längste ausgewertete Meßpegel zur Wassertemperatur ist der Meßpegel am Hochablaß in Augsburg. Hier liegen frei zugängliche Meßdaten ab 1891 vor. Wie in Bild 31 ersichtlich, lassen sich für diesen langen Zeitraum unterschiedliche Tendenzen bei der Entwicklung der Wassertemperaturen des Lechs feststellen. In der letzten Dekade des 19. Jahrhunderts und in der ersten Dekade des 20. Jahrhunderts liegen die Jahresmitteltemperaturen des Lechs noch sehr niedrig zwischen 7°C bis 8°C, im Mittel bei 7,5 °C. Ab 1910 bis 1935 steigen die mittleren Wassertemperaturen um 1,5°C an und brechen anschließend wieder bis 1940 auf die mittlere Wassertemperatur der ersten beiden Dekaden der Meßreihe ein.

Ab 1950 setzt dann ein fast kontinuierlicher Anstieg der Jahresmitteltemperaturen der Fließgewässer ein. Alle in Bild 31 dargestellten Trendlinien weisen dabei einen fast identischen Anstieg der jährlich gemittelten Wassertemperatur unabhängig vom betrachteten

Flussgebiet und dem hier vorliegendem Temperaturniveau auf. Werden auch noch die Ergebnisse der Auswertungen in Abschnitt 5.3. für die 22 Fließgewässer und 51 Meßpegel mit betrachtet, so kann daraus abgeleitet werden, dass die Gewässertemperaturen im Mittel in ganz Deutschland langfristig im ähnlichem Maße angestiegen sind.

Dieser zu beobachtende Trend entspricht dem anthropogenen Temperaturanstieg, wie in Bild 31 eingezeichnet. Die Temperaturentwicklung vor 1940, die am Langzeitpegel des Lechs in Augsburg zu beobachten ist, ist dahingegen durch über mehrere Dekaden bestehende Temperaturplateaus gekennzeichnet, um die die Jahresmittelwerte schwanken, wie in Bild 31 ersichtlich. Ein ausgeprägter Anstieg der mittleren Jahrestemperatur der gemessenen Fließgewässer wie ab 1950 deutlich erkennbar, ist vor 1940 nicht feststellbar.

Neben dem langfristigen Trend lassen sich auch singuläre Ereignisse wie besonders kalte Winter, heiße Sommer oder kühlere bzw. wärmere Jahre beim Temperaturverlauf von Augsburg zeigen, die z.B. zu einem extrem niedrigen oder hohen Jahresmittelwert der Wassertemperatur geführt haben. Auch die anderen beiden Meßpegel für die Elbe in Hamburg und den Rhein in Koblenz zeigen in Bild 31 und 32 ähnliche Charakteristiken. Solche singulären Ereignisse beeinflussen den grundsätzlich bestehenden Langzeittrend der steigenden Gewässertemperaturen aufgrund des einmaligen Auftretens nur marginal.

Aus den Trendlinien in Bild 31 kann der langfristige Anstieg der Wassertemperatur zwischen den Jahren 1950 und 2020/2022 bestimmt werden, siehe Tabelle 16. Alle drei Flüsse zeigen einen ähnlich großen Anstieg der mittleren jährlichen Wassertemperatur mit 3,178 K beim Rhein, 3,164 K bei der Elbe und 3,10 K beim Lech, obwohl sich die Ausprägungen und die hier vorliegenden klimatischen Eigenschaften der Einzugsgebiete aller drei Flüsse unterscheiden. Der mittlere jährliche Temperaturanstieg ist bei allen drei betrachteten Flüssen von ähnlicher Größenordnung mit 0,0454 K/a beim Rhein, 0,0452 K/a bei der Elbe und 0,0431 K/a beim Lech. Über eine Dekade betrachtet entsprechen diese Zahlen 0,454 K beim Rhein, 0,452 K bei der Elbe und 0,431 K beim Lech und haben einen entsprechenden Impact auf die Gewässerentwicklung. Dies kann als eindeutiger Beleg für die Folgen des Klimawandels im Bereich der Fließgewässer in Deutschland gesehen werden.

Gewässer	Messpegel	Beginn	Ende	Temp.diff. [K]	Anstieg [K/a]	Dekade [K/10a]
Rhein	Koblenz	1950	2020	3,178	0,0454	0,454
Elbe	Hamburg	1950	2020	3,164	0,0452	0,452
Lech	Augsburg	1950	2022	3,10	0,0431	0,431

Tabelle 16: Anstieg der Jahresmittel-Wassertemperatur zwischen den Jahren 1950 und 2020/2022

Auch die langjährige Entwicklung der in Abschnitt 5.1. und 5.3. untersuchten Gewässertemperaturen der anderen Fließgewässer zeigt, dass diese ebenfalls als Folge des Klimawandels ganzjährig immer wärmer werden. Eine Temperaturzunahme von 3 bis 4 K ist hier insgesamt seit 1950 zu verzeichnen. Besonders in den Sommermonaten kann aufgrund des Temperaturanstiegs die Gewässertemperatur bedenklich hohe Werte annehmen, bei denen Teile des Öko-Systems des Fließgewässers gefährdet sind. Die ebenfalls zu beobachtende zunehmende Erwärmung der Gewässer im Winterhalbjahr infolge des Klimawandels lässt auch Auswirkungen auf die Aquafauna und Aquaflore erwarten. Bei Barschen führen z.B. laut IGB [56] die höheren Winterwassertemperaturen zu Problemen mit der Eireifung und daraus resultierend zu einer verringerten Fortpflanzung im Frühjahr.

5.1.2. Vieljähriger saisonaler Trend Winter- und Sommerhalbjahr der Gewässertemperaturen

Die langzeitlichen Auswertungen der Temperaturen zeigen nicht nur den Anstieg der Jahresmitteltemperatur der Fließgewässer, sondern auch einen Anstieg bei den saisonal gemittelten Gewässertemperaturen. Hierfür wird das Jahr in eine Wintersaison vom 1.10. bis 31.3. und in eine Sommersaison vom 1.4. bis 30.9. unterteilt. Für die Untersuchung werden die Standorte Hamburg (Elbe), Havelberg (Havel), Würzburg (Main), Ingolstadt (Donau) und Augsburg (Lech) ausgewählt, da für diese Standorte langzeitliche Tagesmittelwerte vorliegen und die Standorte Nord-, Ost- und Süddeutschland repräsentieren.

Zeitraum	Augsburg			Hamburg		
	Temp.1939 [°C]	Temp.2022 [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.1950 [°C]	Temp.2020 [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	7,77	11,34	3,57	10,24	13,40	3,16
Sommer	11,50	16,51	5,01	16,03	18,28	2,25
Winter	4,01	6,03	2,02	4,62	8,26	3,64

Tabelle 17: Anstieg der saisonalen Wassertemperatur bis 2020/2022

Tabelle 17 fasst quantitativ die Ergebnisse der Trendlinien für das Jahresmittel der Sommerhalbjahre und die Winterhalbjahre der Wassertemperatur des Lechs in Augsburg und der Elbe in Hamburg zusammen. Dabei zeigt sich, dass für den betrachteten Zeitraum von 1939 bis 2022 die Temperaturdifferenz in Augsburg für das Jahresmittel 3,57 K, für die Sommerhalbjahre 5,01 K und für die Winterhalbjahre 2,02 K beträgt. Für die Elbe lässt sich in Hamburg ein Temperaturanstieg zwischen 1950 und 2020 im Jahresmittel von 3,16 K, für die Sommerhalbjahre von 2,25 K und die Winterhalbjahre von 3,64 K belegen.

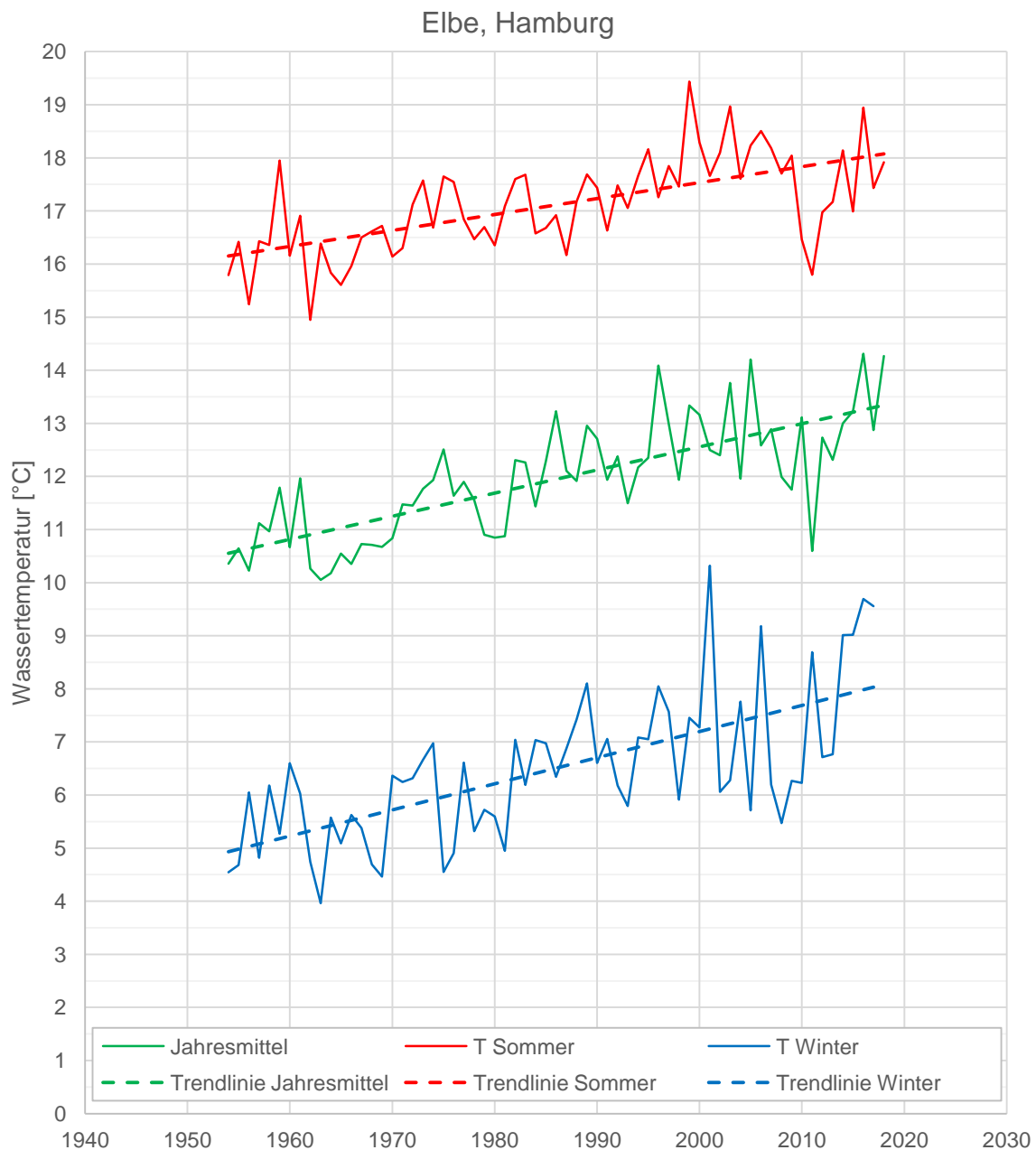


Bild 33: Vieljähriger Verlauf der Entwicklung der saisonalen Wassertemperatur ab 1950 der Elbe in Hamburg

Am Lech in Augsburg liegt ein geringerer Anstieg der Gewässertemperatur in den Wintermonaten mit 2,02 K als an der Elbe in Hamburg mit 3,64 K vor, siehe Tabelle 17. Als eine Ursache hierfür kann der höhere Schneefall im Flussgebiet des Lechs gesehen werden. Die infolge des Klimawandels auftretenden höheren Temperaturen im Winter werden durch die kühlende Schmelzwärme der winterlichen Schneemengen der voralpinen und alpinen Regionen im Flussgebiet des Lechs teilweise ausgeglichen und dämpfen daher den Temperaturanstieg des Lechs im Winter. Im Sommer hingegen liegt in Süddeutschland eine höhere saisonale Sonnenscheindauer im Vergleich zu Norddeutschland und Hamburg vor, so dass der Klimawandel während der Sommermonate im Lech einen größeren Temperaturanstieg von 5,01 K im Vergleich zur Elbe in Hamburg mit 2,25 K bewirkt. In Bild 33 sind die Trendlinien der saisonalen Temperaturentwicklung für die Elbe in Hamburg und in Bild 34 für den Lech in Augsburg dargestellt.

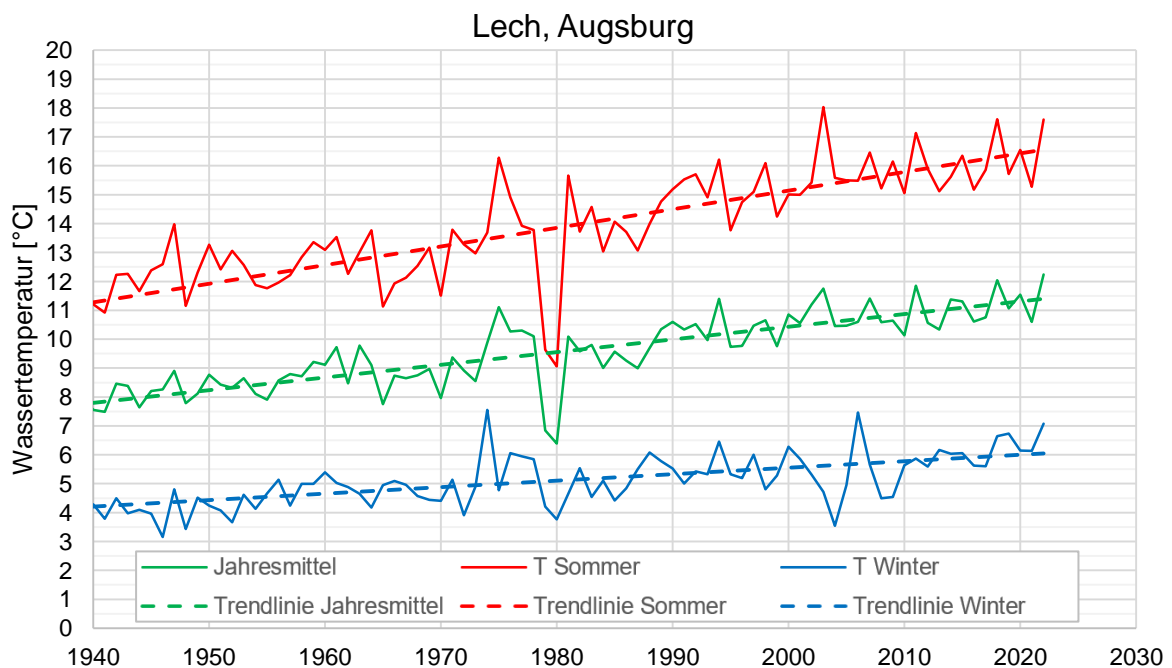


Bild 34: Vieljähriger Verlauf der Entwicklung der saisonalen Wassertemperatur Lech ab 1940

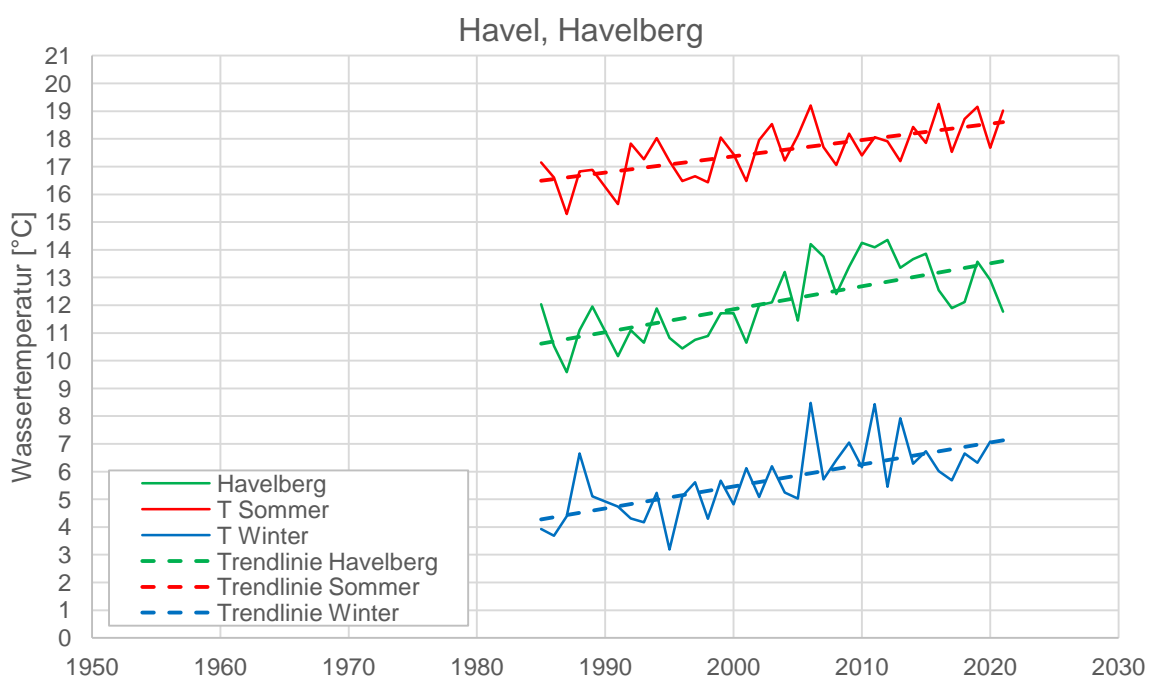


Bild 35: Vieljähriger Verlauf der Entwicklung d. saisonalen Wassertemperatur Havel ab 1985

In Bild 35 bis 37 sind zum Vergleich die langjährigen Temperaturverläufe für das Jahresmittel, das Sommer- und das Winterhalbjahr auch für weitere Flussgebiete wie die Havel in Havelberg in Bild 35, für den Main in Würzburg in Bild 36 und die Donau in Ingolstadt in Bild 37 ausgewertet. Auch diese Verläufe der Wassertemperaturen weisen sowohl für das Jahresmittel als auch die gemittelten Werte über das Sommer- und Winterhalbjahr vieljährig betrachtet eine signifikant steigende Tendenz auf. Dieser Anstieg der Gewässertemperatur geht wie an den anderen Pegeln einher mit dem klimawandelbedingten Anstieg der Lufttemperaturen und zeigt auch für die Zukunft eine steigende Tendenz auf.

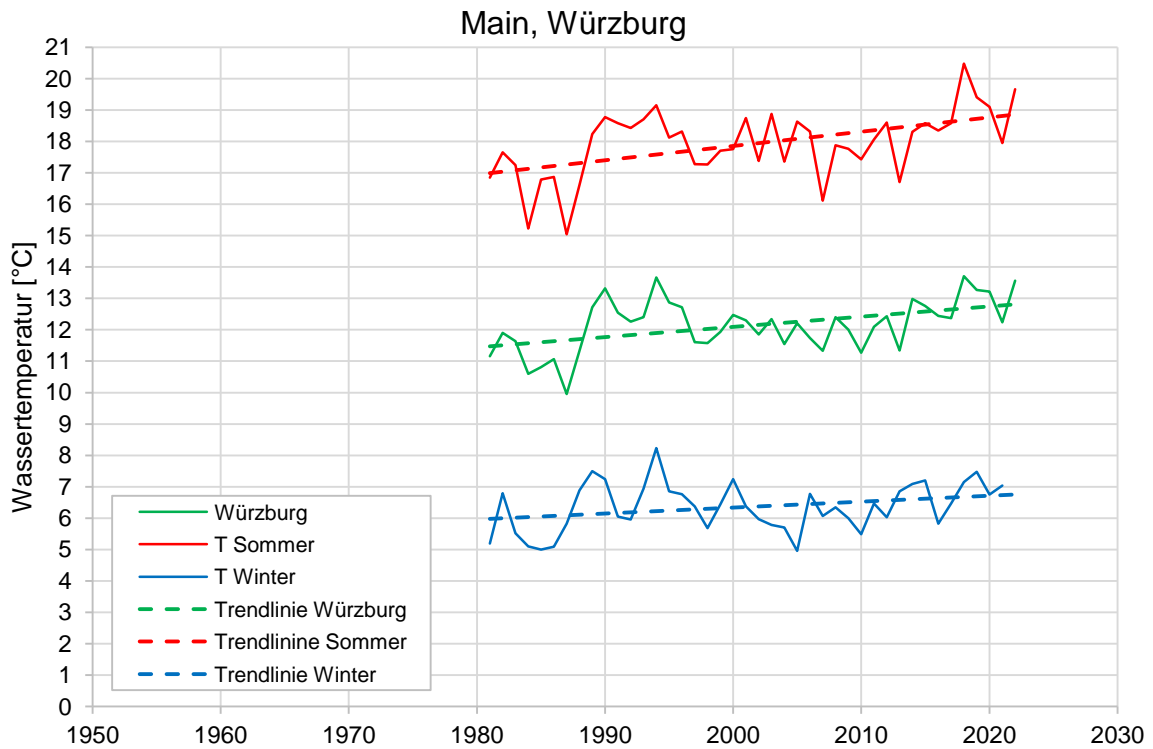


Bild 36: Vieljähriger Verlauf der Entwicklung der saisonalen Wassertemperatur Main ab 1981

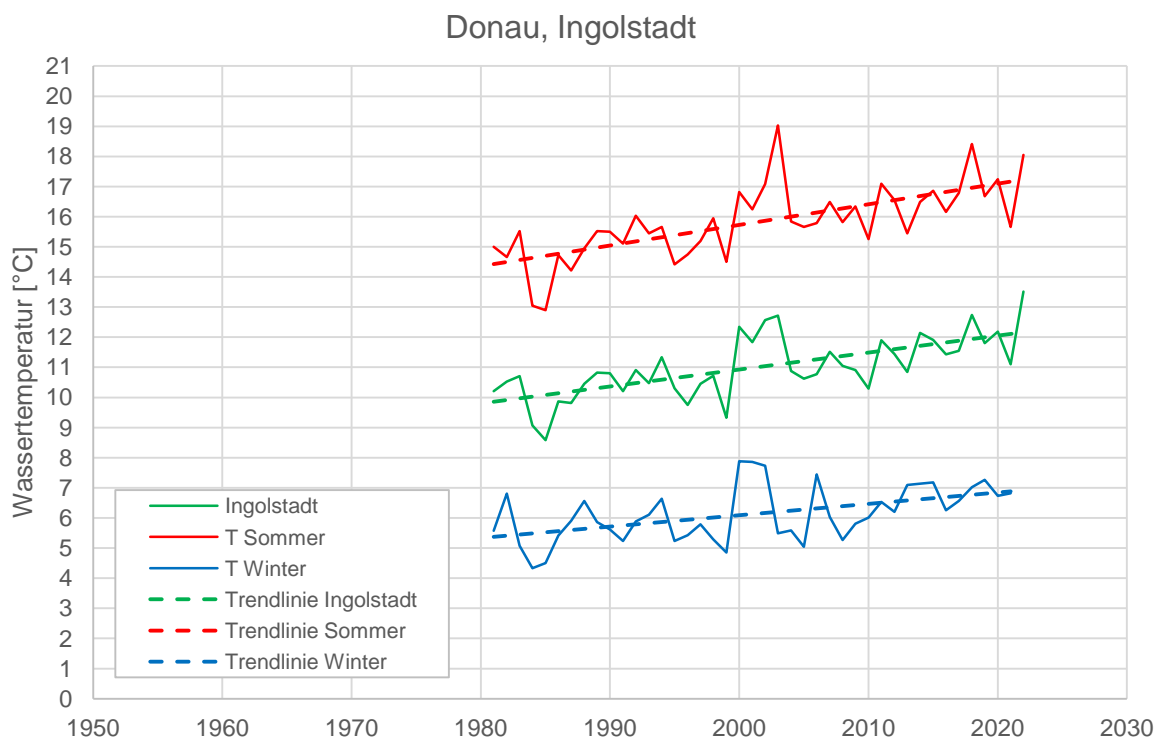


Bild 37: Vieljähriger Verlauf der Entwicklung d. saisonalen Wassertemperatur Donau ab 1981

Die Ergebnisse der vieljährigen Temperaturverläufe für die großen Fließgewässer in Deutschland sind in Tabelle 18 für 18 ausgewählte Messpegel dargestellt. Aus der Trendlinie ergeben sich die Gewässertemperaturen zu Beginn und zum Ende des Messzeitraumes für das Jahresmittel und die saisonalen Mittelwerte des Sommer- und des Winterhalbjahres. Für eine Vergleichbarkeit der Temperaturentwicklung an den Messpegeln werden die Temperaturen entlang der Trendlinien auf den Zeitraum von 1950 bis 2022 für den Jahresmittelwert sowie für das Sommer- und Winterhalbjahr projiziert. Ebenfalls wird der Temperaturanstieg innerhalb einer Dekade für die untersuchten Meßpegel ausgewiesen.

Elbe – Hamburg							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (66 Jahre)	T(1954) [°C]	T (2020) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	10,42	13,40	2,98	0,450	10,24	13,49	3,25
Sommer	16,16	18,28	2,12	0,321	16,03	18,35	2,32
Winter	4,83	8,26	3,43	0,519	4,62	8,36	3,74
Elbe – Cumlosen							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (24 Jahre)	T(1997) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	10,69	12,12	1,43	0,594	7,90	12,18	4,28
Sommer	17,14	18,54	1,40	0,585	14,39	18,60	4,21
Winter	5,06	6,77	1,72	0,716	1,69	6,85	5,16
Elbe – Magdeburg							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (35 Jahre)	T(1985) [°C]	T (2020) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	11,17	13,16	1,99	0,568	9,18	13,27	4,09
Sommer	16,75	17,94	1,19	0,341	15,55	18,01	2,46
Winter	5,50	6,69	1,19	0,340	4,31	6,76	2,45
Elbe – Schmilka							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (25 Jahre)	T(1996) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	11,39	12,83	1,44	0,575	8,75	12,89	4,14
Sommer	16,88	18,46	1,58	0,631	13,98	18,52	4,54
Winter	5,86	7,09	1,23	0,493	3,59	7,14	3,55
Havel – Havelberg							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (35 Jahre)	T(1985) [°C]	T (2020) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	10,69	13,59	2,91	0,830	7,78	13,76	5,98
Sommer	16,43	18,48	2,05	0,585	14,39	18,60	4,21
Winter	4,24	7,02	2,78	0,793	1,47	7,17	5,71
Main – Würzburg							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (40 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	11,50	12,81	1,31	0,327	10,49	12,84	2,35
Sommer	16,98	18,81	1,82	0,456	15,57	18,85	3,28
Winter	6,03	6,79	0,76	0,189	5,45	6,81	1,36

Main – Schweinfurt							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (40 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	10,79	12,24	1,45	0,362	9,67	12,28	2,61
Sommer	16,08	18,20	2,12	0,530	14,44	18,26	3,82
Winter	5,63	6,39	0,76	0,191	5,03	6,41	1,38
Neckar – Wendlingen							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (34 Jahre)	T(1987) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	11,04	12,08	1,04	0,306	9,91	12,11	2,20
Sommer	15,29	16,64	1,35	0,397	13,83	16,68	2,86
Winter	6,67	7,27	0,60	0,175	6,03	7,29	1,26
Donau – Passau							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (40 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	10,98	12,59	1,62	0,404	9,73	12,63	2,91
Sommer	16,29	18,41	2,12	0,531	14,64	18,46	3,82
Winter	5,12	7,09	1,97	0,493	3,59	7,14	3,55
Donau – Vilshofen							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (41 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	10,91	12,77	1,86	0,454	9,50	12,77	3,27
Sommer	15,96	18,55	2,59	0,631	14,01	18,55	4,54
Winter	5,76	6,78	1,03	0,250	4,98	6,78	1,80
Donau – Straubing							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (40 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	10,12	12,75	2,62	0,656	8,09	12,81	4,72
Sommer	15,08	18,68	3,59	0,898	12,30	18,77	6,47
Winter	5,04	6,57	1,53	0,382	3,86	6,61	2,75
Donau – Regensburg							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (27 Jahre)	T(1994) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	10,60	12,12	1,51	0,560	8,14	12,17	4,03
Sommer	16,07	18,18	2,11	0,782	12,63	18,26	5,63
Winter	4,92	6,12	1,20	0,445	2,96	6,17	3,20
Donau – Ingolstadt							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (40 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	9,85	12,10	2,25	0,562	8,11	12,16	4,05
Sommer	14,45	17,19	2,74	0,684	12,33	17,25	4,92
Winter	5,28	6,79	1,51	0,377	4,11	6,82	2,71

Donau – Neu-Ulm							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (27 Jahre)	T(1994) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	9,24	11,04	1,80	0,667	6,30	11,11	4,80
Sommer	12,83	15,29	2,46	0,911	8,83	15,38	6,56
Winter	5,36	6,58	1,22	0,452	3,37	6,63	3,25
Isar – München							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (40 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	9,28	10,32	1,04	0,259	8,48	10,34	1,86
Sommer	12,56	14,24	1,68	0,419	11,26	14,28	3,02
Winter	6,11	6,59	0,49	0,122	5,73	6,61	0,88
Inn – Passau							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (40 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2021) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	8,47	9,82	1,35	0,338	7,42	9,85	2,43
Sommer	11,96	13,91	1,95	0,488	10,45	13,96	3,51
Winter	5,02	5,80	0,78	0,195	4,42	5,82	1,40
Inn – Rosenheim							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (41 Jahre)	T(1981) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	7,31	8,70	1,39	0,339	6,26	8,70	2,44
Sommer	10,38	11,80	1,42	0,347	9,30	11,80	2,50
Winter	4,41	5,88	1,47	0,359	3,29	5,88	2,58
Lech – Augsburg							
	Messreihe				Projektion		
Zeitraum (83 Jahre)	T(1939) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]	Temp.diff. 10 Jahre [K]	T (1950) [°C]	T (2022) [°C]	Temp.diff. [K]
Jahresmittel	7,77	11,34	3,57	0,430	8,24	11,34	3,10
Sommer	11,50	16,51	5,01	0,604	12,16	16,51	4,35
Winter	4,01	6,03	2,02	0,243	4,28	6,03	1,75

Tabelle 18: Anstieg der saisonalen Wassertemperatur zwischen den Jahren 1950 und 2022

Für die Elbe erfolgt in Tabelle 18 die quantitative Betrachtung an den Messpegeln Hamburg, Cumlosen bei Wittenberge, Magdeburg und Schmilka bei Dresden. Die Elbe ist durch die Zuflüsse aus den deutschen Mittelgebirgen und der norddeutschen Tiefebene sowie dem ebenfalls durch Mittelgebirge bestimmten Einzugsgebiet in Tschechien geprägt. Der projizierte Anstieg der Jahresmitteltemperatur in der Elbe liegt für den betrachteten Zeitraum von 1950 bis 2022 zwischen 4,14 K in Schmilka, 4,09 K in Magdeburg, 4,28 K in Cumlosen und 3,25 K in Hamburg. Die gleiche Tendenz zeigt sich bei der Projektion der Temperatur für das Winterhalbjahr von 2,45 K in Magdeburg und bis zu 5,16 K in Cumlosen, so dass eine mit einer Temperaturabsenkung um 2 K verbundene Wärmeentnahme aus der Elbe für die Grüne Nah- und Fernwärme im gesamten Flussabschnitt der Elbe die klimabedingte Erhöhung der Gewässertemperatur anteilig reversieren würde. Für die Havel als Nebengewässer der Elbe lässt sich in der Projektion ein noch viel höherer Temperaturanstieg am Messpegel Havelberg von 5,98 K im Jahresmittel und 5,71 K für das

Winterhalbjahr feststellen, so dass die Havel ebenfalls für die Nutzung der Aquathermie prädestiniert ist und sich hier sogar Mehrfachentnahmen anbieten.

Für das Rheingebiet werden die langzeitlichen Temperaturentwicklungen für den Main und den Neckar untersucht und sind in Tabelle 18 angegeben. Hierbei zeigt sich, dass der Anstieg der Fließgewässertemperatur geringer ausfällt als im Elbegebiet, da an diesen Flüssen zahlreiche Großkraftwerke betrieben wurden, welche während ihrer Betriebsphase durch die Nutzung des Fließgewässers als Kühlwasser-Ressource zu einem höheren Temperaturniveau im Fließgewässer geführt haben, so dass der klimabedingte Temperaturanstieg nicht im gleichen Maße wie bei Gewässern ohne Großkraftwerke mit Kühlwassernutzung ausgeprägt ist, da die betroffenen Gewässer ohnehin schon viel wärmer sind. Daher liegt bei Projektion der Temperaturentwicklung auf den Zeitraum von 1950 bis 2022 ein geringerer Temperaturanstieg des Jahresmittelwertes von 2,35 K in Würzburg am Main und 2,61 K in Schweinfurt am Main sowie von 2,20 K in Wendlingen am Neckar vor. Ohne die Wärmeeinleitungen der Großkraftwerke und anderen großen Wärmeeinleitern würde auch am Main und Neckar der klimabedingte Temperaturanstieg in der gleichen Größenordnung wie in den anderen Flussgebieten liegen.

Für das Winterhalbjahr ist der projizierte Temperaturanstieg an Main und Neckar durch die bestehenden Wärmeeinleitungen ebenfalls niedriger ausgeprägt als beispielsweise an der Elbe mit 1,36 K in Würzburg, 1,38 K in Schweinfurt und 1,26 K in Wendlingen. Dies zeigt, dass der Temperaturanstieg an Gewässern mit in Betrieb befindlichen oder außer Betrieb gesetzten Großkraftwerken gesondert untersucht werden muss. Allein im bayerischen Fließgewässerabschnitt des Mains liegen sechs große Wärmeeinleiter mit einem Wärmeeintrag von jeweils mindestens 10 MJ/s in den Main vor [57]. Am Neckar sind es sogar 9 Großkraftwerke, wie in Abschnitt 5.3. ausführlich beschrieben, die für eine Aufwärmung des Neckars über die Kühlwassereinleitung sorgen oder in der Vergangenheit gesorgt haben, was sich in der ausgewerteten Langzeitstatistik widerspiegelt.

Die Donau wird durch die Mittelgebirgszuflüsse sowie durch alpine Abflüsse über die Nebenflüsse Iller, Lech, Isar, Inn und Wertach geprägt. Die alpinen Abflüsse besitzen auf Grund der sommerlichen Schneeschmelze vielfach im Sommerhalbjahr einen höheren Abfluss als im Winterhalbjahr im Gegensatz zu den deutschen Mittelgebirgsabflüssen. Im deutschen Flussabschnitt weist die Donau in der Projektion der Temperaturentwicklung für den Zeitraum von 1950 bis 2022 fast durchgehend größere Zunahmen der Gewässertemperatur auf, siehe Tabelle 18. Dies zeigt sich sowohl in Passau mit 2,91 K, in Vilshofen mit 3,27 K, in Straubing mit 4,72 K, in Regensburg mit 4,03 K, in Ingolstadt mit 4,05 K und in Neu-Ulm mit 4,80 K. Ebenfalls ist die Gewässertemperatur im Winterhalbjahr mit 3,55 K in Passau, 1,80 K in Vilshofen, 2,75 K in Straubing, 3,20 K in Regensburg, 2,71 K in Ingolstadt und 3,25 K in Neu-Ulm angestiegen.

Die Ergebnisse der untersuchten, alpinen Nebenflüsse der Donau, Lech, Isar und Inn zeigen ebenfalls für die auf den Zeitraum von 1950 bis 2022 projizierten Temperaturen einen Anstieg für das Jahresmittel als auch für das Winter- und Sommerhalbjahr. Die Gewässertemperatur der Isar in München hat im Jahresmittel einen geringeren Anstieg von 1,86 K und für das Winterhalbjahr von 0,88 K. Eine Ursache ist die Nutzung der Isar als Kühlwasserressource für das thermische Kraftwerk München-Süd mit einer thermischen Leistung von 927 MW und München-Nord mit 900 MW Fernwärmeleistung. Der Wärmeeintrag aus dem Kraftwerksbetrieb kann dabei den Anstieg der Gewässertemperatur infolge des Klimawandels überlagern, so dass der zu beobachtende Temperaturanstieg geringer ausfällt, da das Gewässer stärker aufgewärmt ist. Insgesamt gibt es nach [57] sieben große Wärmeeinleiter an der Isar mit Wärmeeinleitungen größer 10 MJ/s, von den alleine drei im unmittelbaren Raum von München angesiedelt sind. Daher ist eine genauere Analyse der langzeitlichen Temperaturentwicklung der Isar in München unter Berücksichtigung der Wärmekraftwerke sinnvoll, wenn der Klimawandel bedingte Temperaturanstieg genauer identifiziert werden soll.

Für den Inn liegen die projizierten Temperaturanstiege im Jahresmittel bei 2,44 K in Rosenheim und 2,43 K in Passau. Im Winterhalbjahr beträgt der Temperaturanstieg 2,58 K

in Rosenheim und 1,40 K in Passau. Auch hier widerspiegeln sich anteilig die Wärmeeinleitung mit mehr als 10 MJ/s in Rosenheim und durch sechs Wärmeeinleiter an der Alz [57], die den Inn in Passau entsprechend aufwärmen und damit den Temperaturanstieg des vieljährigen Trends infolge des höheren Wärmeniveau des Gewässers abschwächen.

Für den Lech in Augsburg steigen die projizierten Gewässertemperaturen im Jahresmittel um 3,10 K und im Winterhalbjahr um 1,75 K. Der klimabedingte Temperaturanstieg des Lechs wird durch 4 Wärmeeinleitungen größer 10 MJ/s [57] überlagert und fällt infolge des dadurch bedingten höheren Temperaturniveaus des Lechs etwas geringer aus. Unterhalb von Augsburg kommen noch einmal zwei weitere Wärmeeinleitungen größer 10 MJ/s hinzu [57].

Die durchschnittliche Zunahme der Gewässertemperatur aller in Tabelle 18 betrachteten Fließgewässer beträgt für den projizierten Zeitraum von 1950 bis 2022 für das Jahresmittel 3 bis 4 K, für das Sommerhalbjahr 2 bis 6 K und für das Winterhalbjahr 2 bis 3 K, teilweise auch bis zu 5 K. Die Gewässer, die bei der Auswertung im Winterhalbjahr kleinere Temperaturzunahmen als 2 K aufweisen, sind allesamt Gewässer die hohe Wärmeeinleitungen durch Großkraftwerke und andere große Wärmeeinleiter aufweisen. Diese Wärmeeinleitungen für Kühlzwecke führen zu einer höheren Grundtemperatur des betrachteten Fließgewässers, so dass die Klimawandel bedingte Temperaturzunahme geringer ausfällt. Da diese Gewässer neben der Erwärmung durch den Klimawandel noch zusätzlich aufgewärmt werden, ergeben sich entsprechend große nutzbare Temperaturspreizungen für die Fließgewässerwärmegegewinnung.

Abgeleitet aus der Langzeittrendentwicklung der untersuchten Fließgewässer in Tabelle 18 und in Abschnitt 5.3. ist von einer weiteren Erwärmung der Fließgewässer in Deutschland auszugehen, die je nach Gewässer im Jahr 2050 bis zu 1 K betragen kann.

Dies verdeutlicht, dass mit Blick auf die weiter zu erwartende Temperaturzunahme im Winter- und Sommerhalbjahr eine Wärmeentnahme aus den Fließgewässern mit einer damit verbundenen Temperaturabsenkung von 2 bis 3 K grundsätzlich möglich ist. Tendenziell ist sogar eine Temperaturspreizung von $\Delta T = 3$ bis 4 K denkbar, wenn angestrebt wird, den Temperaturzustand der Gewässer von vor 1950 wieder zu erreichen.

5.2. Löslichkeit des Luftsauerstoffs in Abhängigkeit von der Wassertemperatur

Die Sauerstoffsättigung in Fließgewässern hängt hauptsächlich von der Temperatur ab. Je geringer die Wassertemperatur ist, desto mehr Sauerstoff kann das Fließgewässer lösen. Bei 10 °C Wassertemperatur und einem atmosphärischen Druck von 1013,25 hPa entsprechen 11,3 mg/l Sauerstoff einer Sättigung von 100 % [58]. Eine ausreichende Sauerstoffsättigung ist wichtig für das Überleben von aquatischen Organismen und beeinflusst die Wasserqualität in Flüssen und Bächen. Eine zu geringe Sauerstoffsättigung kann zu Problemen wie Fischsterben und schlechter Wasserqualität führen.

Es gibt zahlreiche Gründe, weshalb die Sauerstoffsättigung entscheidend für das Überleben von Wasserlebewesen ist und maßgeblich die Wasserqualität beeinflusst. Fische, Insektenlarven und andere Wasserlebewesen benötigen für ihre Atmung den Sauerstoff, da dieser überhaupt erst die Stoffwechselprozesse der Wasserlebewesen ermöglicht. Im Wasser werden organische Stoffe meist durch Bakterien abgebaut. Dieser Prozess verbraucht den im Fließgewässer gelösten Sauerstoff. Wenn die Sauerstoffsättigung nicht ausreichend hoch ist, kann dies zu einem Sauerstoffmangel führen, der sich negativ auf die Wasserqualität auswirkt. Im Extremfall führt die niedrige Sauerstoffkonzentration zum Erstickten der Fisch und anderen Wasserlebewesen und kann sogar zu einem Massensterben führen und die Ökosysteme in Fließgewässern nachhaltig schädigen.

Die Sauerstoffkonzentration wird maßgeblich durch den atmosphärischen Druck und die Wassertemperatur beeinflusst. So kann kühleres Wasser mehr Sauerstoff aufnehmen als wärmeres Wasser. Die Konzentration von Sauerstoff C_{O_2} und Stickstoff C_{N_2} wird näherungsweise nach der Gleichung von Weiss (1970) bestimmt:

$$\ln C_{O_2} = A_1 + A_2 \cdot \frac{100}{T} + A_3 \ln \frac{T}{100} + A_4 \frac{T}{100}$$

$$\ln C_{N_2} = B_1 + B_2 \cdot \frac{100}{T} + B_3 \ln \frac{T}{100} + B_4 \frac{T}{100}$$

mit den Parametern für Sauerstoff $A_1=-173,4292$, $A_2=249,6339$, $A_3=143,3483$, $A_4=-21,8492$ und für Stickstoff $B_1=-172,4965$, $B_2=248,4262$, $B_3=143,0738$, $B_4=-21,712$, siehe [59].

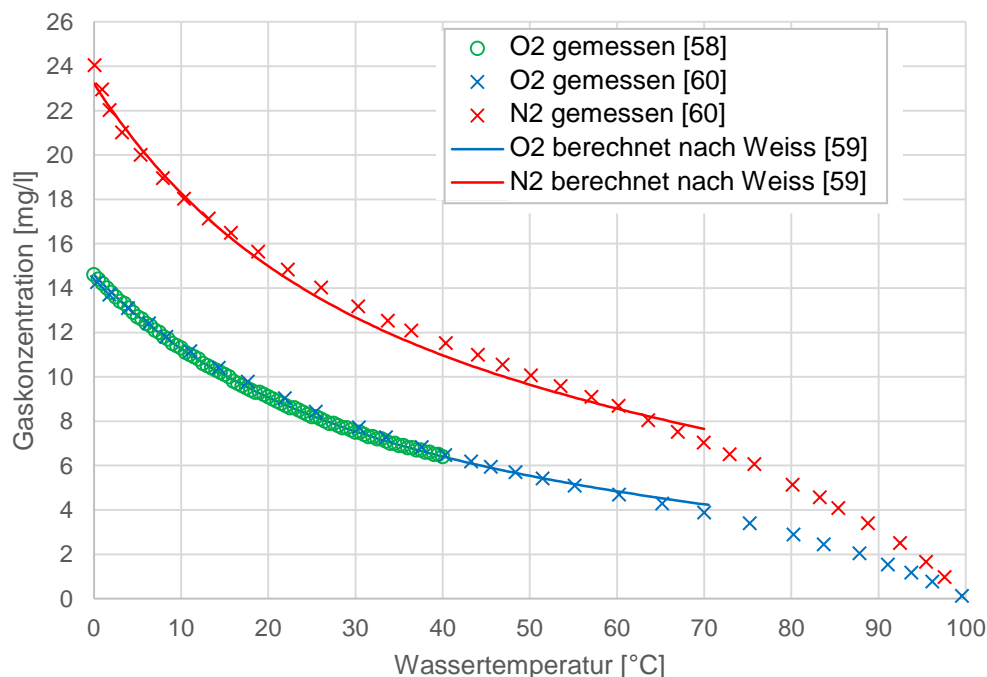


Bild 38: Löslichkeit von Luftsauerstoff und Luftstickstoff in Wasser

Die von Weiss zusätzlich angegebenen Terme zur Beschreibung des Einflusses der Salinität werden in der Bestimmungsgleichung vernachlässigt, da für die Fließgewässer außerhalb des Tide- und Brackwasserbereiches nur die Löslichkeit des Luftsauerstoffs im Süßwasser

zu betrachten ist. Für die Untersuchung im Übergangsbereich von Süß- und Salzwasser im Bereich der Meereintrittsstellen von Fließgewässern sind zusätzlich auch die Terme für die Salinität in [59] für Berechnung der Sauerstoffkonzentration mit zu berücksichtigen.

Der temperaturabhängige Verlauf der Sauerstoff- und Stickstoffkonzentration nach der Berechnung von Weiss ist in Bild 38 unter Berücksichtigung der atmosphärischen Partialdrücke der beiden Gase angegeben. Dabei zeigen die Verläufe von Sauerstoff und Stickstoff eine sehr starke Abnahme ihrer Löslichkeit in Wasser bei Zunahme der Wassertemperatur. Alleine beim Sauerstoff nimmt die Löslichkeit von 14,6 mg/l bei 0°C auf 9,1 mg/l bei 20°C ab, was prozentual einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Gewässer von 38 % entspricht. Bei Wassertemperaturen von 28°C liegt die Sauerstoffkonzentration nur noch bei 7,8 mg/l, was eine Abnahme bezogen auf 0°C von 47 % darstellt und einer Halbierung des im Wasser gelösten Sauerstoffs entspricht. In Anbetracht der Größe der Konzentrationsabnahme bei einer Temperaturzunahme wird deutlich, dass dies eine maßgebliche Ursache des sommerlichen Sauerstoffmangels in Fließgewässern ist.

Die Sättigungskonzentration des Stickstoffs sinkt mit gleicher Tendenz von 23,2 mg/l bei 0°C auf 15,0 mg/l bei 20°C, was eine Abnahme der Stickstoffkonzentration von 35 % darstellt. Die in Bild 38 gemessenen Sättigungsverläufe für Sauerstoff und Stickstoff aus [58, 60] zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Näherungsgleichung nach Weiss [59] im Bereich von 0°C bis 60°C. In Anbetracht dieses Temperaturbereiches kann auf Basis dieser Gleichungen für Fließgewässer sehr gut die Wassertemperatur abhängige Sauerstoff- und Stickstoffkonzentration bestimmt werden, da Fließgewässer in der gemäßigten Klimazone i.a. Wassertemperaturen zwischen minimal 0°C und maximal 30°C aufweisen. Auch für höhere Aufheizungen von Fließgewässern, für Wärmeeinleitungen oder Thermalwassereinspeisungen ist grundsätzlich mit den gegebenen Gleichungen die Sauerstoff- und Stickstoffkonzentration berechenbar.

Bild 39 zeigt den Verlauf der gemessenen Sauerstoffkonzentration und der berechneten Sauerstoffsättigung für die Elbe am Pegel Blankenese für das Jahr 2022. Wie Bild 39 verdeutlicht, ist in den Sommermonaten eine starke Abnahme der Sauerstoffkonzentration zu erkennen. Verursacht wird dieses Phänomen auf Grund der Tatsache, dass in den Sommermonaten infolge der erhöhten Gewässertemperatur die Sättigungskonzentration des Sauerstoffs im Vergleich zu den anderen Jahreszeiten deutlich geringer ist. Darüber hinaus bewirken die hohen Temperaturen im Sommer ein erhöhtes Biomassewachstum, welches durch die anthropogene Eutrophierung verstärkt wird und anschließend höhere Aktivitäten der sauerstoffzehrenden Organismen im Fließgewässer beim Abbau dieser Biomasse verursacht, was wiederum eine zusätzliche Sauerstoffzehrung bedingt.

Die Eutrophierung stellt dabei einen Prozess dar, bei welchem zum einen Pflanzennährstoffe meist in Form von Stickstoff- und Phosphorverbindungen in das Gewässer gelangen und sich dort akkumulieren können. Zum anderen spielt das Phytoplankton bei der Eutrophierung eine große Rolle, da es auf Grund der guten Nähstoffbedingungen stark zunimmt, sich dann aber nach dem Absterben meist nicht vollständig zersetzt und anschließend als Biomasse am Gewässerboden anreichern kann, die wiederum unter Sauerstoffzehrung abgebaut wird. Diesen Prozess beschleunigt die erhöhte Gewässertemperatur in den Sommermonaten maßgeblich, weshalb in den Sommermonaten die Zehrung des gelösten Sauerstoffs aufgrund der Abbauprozesse der Biomasse in den Fließgewässern am größten ist.

Bezüglich der Sauerstoffkonzentration finden daher zwei maßgebliche Prozesse in den Gewässern statt, die bei Temperaturerhöhung zur Absenkung der Sauerstoffkonzentration im Fließgewässer führen, - der physikalische wassertemperaturabhängige Prozess der Löslichkeit des Luftauerstoffs und der biologische sauerstoffzehrende Biomasseabbauprozess. Zusammen können diese Prozesse in den Sommermonaten bei hohen Wassertemperaturen und starker Eutrophierung Sauerstoffkonzentrationen bewirken, die für Wasserlebewesen lebensbedrohlich geringe Werte annehmen können. Beide Prozesse finden sowohl in freifließenden als auch in staugeregelten Gewässern statt, da sie im Wesentlichen durch die Wassertemperatur und den Grad der Eutrophierung beeinflusst werden.

Mit Blick auf die langfristig klimabedingt steigenden Gewässertemperaturen erhöht sich die Gefahr, dass zukünftig durch die Klimaerwärmung sowohl eine geringere Sauerstoffsättigung als auch eine stärkere Sauerstoffzehrung infolge biologischer Abbauprozesse zu erwarten ist, die zu weiter sinkendem Sauerstoffgehalt in den Gewässern im Sommer führt.

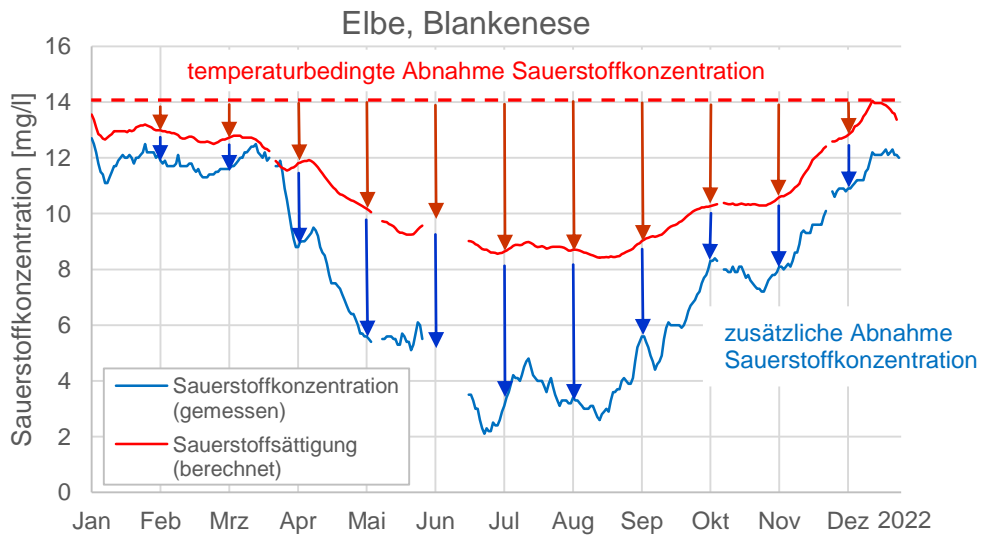


Bild 39: Jahresverlauf der Sauerstoffkonzentration 2022 am Pegel Blankenese

Die zwei Prozesse, die im Sommerhalbjahr zu verringerter Sauerstoffkonzentration beitragen, sind in Bild 39 für den Elbe-Messpegel Blankenese für das Jahr 2022 dargestellt und setzen sich aus der temperaturbedingten Abnahme der Sauerstoffkonzentration und der zusätzlichen Sauerstoffzehrung infolge biologischer Abbauprozesse zusammen. Die Konzentration der Sauerstoffsättigung über das Kalenderjahr 2022 folgt aus der Modellgleichung von Weiss [59] und wird für die tagesgenauen Gewässertemperaturen berechnet. Bild 39 zeigt die starke jahreszeitliche Schwankung der gemessenen Sauerstoffkonzentration am Pegel Blankenese [60] ebenso Bild 40 für die Jahre 2019-23.

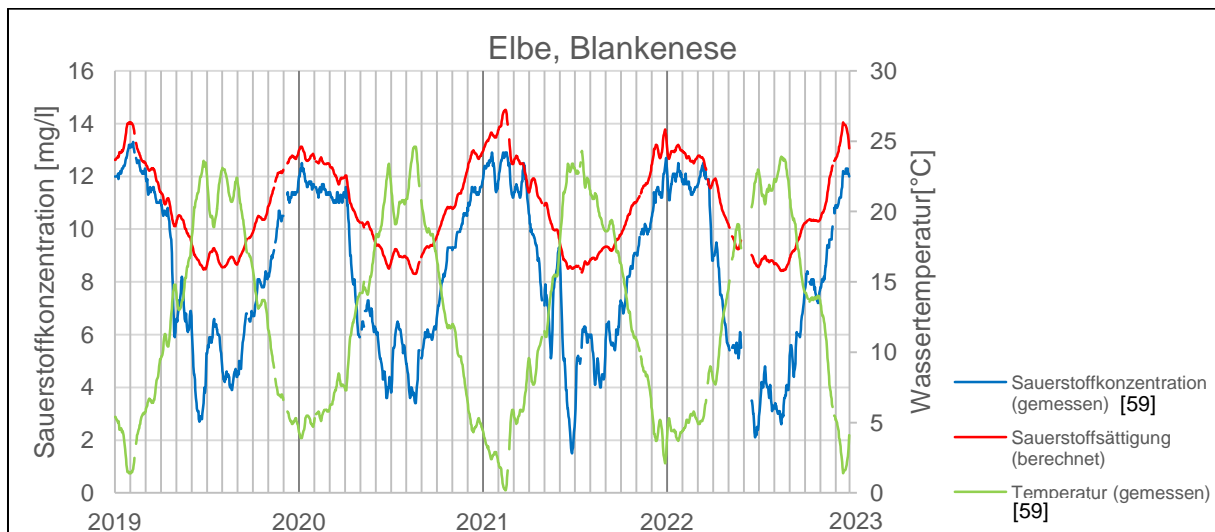


Bild 40: Verlauf der Sauerstoffkonzentration von 2019 bis 2022 am Pegel Blankenese

Für die Sommermonate 2022 liegt in Bild 39 die minimale gemessene Sauerstoffkonzentration von 2,1 mg/l bei einer Wassertemperatur von 22,1 °C vor. Bei dieser Wassertemperatur beträgt die Sauerstoffsättigungskonzentration in der Elbe 8,5 mg/l. Die tatsächlich gemessene Sauerstoffkonzentration weist dahingegen nur 25 % der Sättigung auf, was als kritisch zu bewerten ist. Das Absinken der Sauerstoffkonzentration um 6,4 mg/l ist dabei maßgeblich auf die Sauerstoffzehrung infolge biologischer Abbauprozesse zurückzuführen. In den Wintermonaten wurde 2022 eine maximale Sauerstoffkonzentration von 12,7 mg/l bei Wassertemperaturen von 2,7°C gemessen, siehe Bild 39, wofür sich eine berechnete

Sauerstoffsättigung von 13,5 mg/l ergibt. Die gemessene Sauerstoffkonzentration entspricht dabei 94% der Sauerstoffsättigung in der Elbe. Die zusätzliche Sauerstoffzehrung geht auch hier auf biologische Abbauprozesse zurück.

Wird der Verlauf der gemessenen Sauerstoffkonzentration am Pegel Blankenese über mehrere Jahre für den Zeitraum von 2019 bis 2022 verfolgt, zeigt sich in Bild 40 die in Bild 39 beschriebene Tendenz auch für die anderen Jahre. Desweiteren ist in Bild 40 der zeitliche Verlauf der Gewässertemperatur dargestellt, mit der sich die ebenfalls aufgeführte temperaturabhängige Sauerstoffsättigung nach Weiss berechnet.

Besonders in den Sommermonaten kommt es wie im Jahr 2022 auch in den anderen Jahren von 2019 bis 2023 zu einer starken Abnahme der gemessenen Sauerstoffkonzentration, die weit unterhalb der berechneten Sauerstoffsättigung liegt, wie in Bild 40 ersichtlich. Im Winterhalbjahr nähert sich dahingegen die gemessene Sauerstoffkonzentration dem Funktionsverlauf der berechneten Sauerstoffsättigung weitest gehend an, da infolge der geringen Wassertemperaturen die biologischen Abbauprozesse stark reduziert sind.

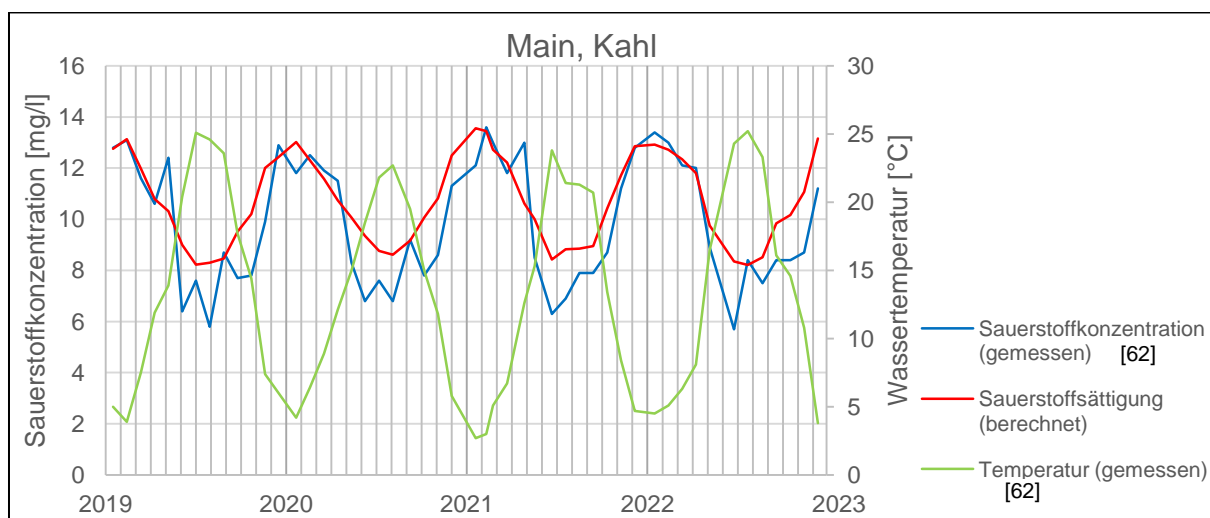


Bild 41: Verlauf der Sauerstoffkonzentration am Messpegel Kahl am Main von 2019-2023

In Bild 41 ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration und der gemessenen Lufttemperaturen am Messpegel Kahl am Main für den Zeitraum von 2019-2023 dargestellt. Auf Basis der gemessenen Lufttemperaturen wurde in Bild 41 analog zu Bild 40 auch die temperaturabhängige Sauerstoffsättigung berechnet. Anders als am Messpegel Blankenese, wo tagesgenaue Messwerte zur Verfügung stehen, liegen am Messpegel in Kahl nur monatliche Messwerte vom GKD Bayern vor, was die unschärfere Auflösung der Messwerte in Bild 41 im Vergleich zu Bild 40 erklärt. Werden die beiden Pegel miteinander weiter verglichen, zeichnet sich von der Charakteristik her für die Sauerstoffkonzentration und die Gewässertemperatur ein ähnlicher Verlauf ab.

Im Winterhalbjahr nähert sich die gemessene Sauerstoffkonzentration im Main der berechneten Sauerstoffsättigung an oder ist sogar identisch mit dieser. Dies gilt besonders für die Monate Januar bis März, während in den Monaten Oktober bis Dezember noch eine zusätzliche Sauerstoffzehrung infolge biologischer Abbauprozesse erfolgt. Im Sommerhalbjahr sinkt die gemessene Sauerstoffkonzentration deutlich unter die temperaturabhängige berechnete Sauerstoffsättigung ab. Auch hier wird dieses Phänomen durch die Sauerstoffzehrung infolge der Abbauprozesse von Biomasse verursacht. Die gemessene minimale Sauerstoffkonzentration ist im Sommerhalbjahr am Main mit 5,7 bis 6,8 mg/l mit dem mehr als 2 bis 3-fachen Wert am Pegel Kahl deutlich höher als an der Elbe mit 1,8 bis 3,5 mg/l, wie in Bild 40 und 41 ersichtlich.

In Bild 42-b sind die über die Jahre 1981 bis 2020 gemessenen Werte der Sauerstoffkonzentration im Main am Messpegel Kahl über die jeweils in [62] gemessene Gewässertemperatur sowie die berechnete Sättigungskurve von im Wasser gelösten

Sauerstoff als Funktion der Wassertemperatur dargestellt. Es zeigt sich, dass die gemessenen Werte der Sauerstoffkonzentration entlang dem berechneten Funktionsverlauf der Sättigungskurve von der Charakteristik her folgen. Ein Teil der gemessenen Werte der Sauerstoffkonzentration ist dabei kleiner, was auf die zusätzliche Sauerstoffzehrung infolge Biomasseabbaus während der Sommermonate zurückzuführen ist. Wie in Bild 42-b ersichtlich, nimmt die Sauerstoffzehrung infolge Abbaus der Biomasse mit der Wassertemperatur zu. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass auch noch bei sehr niedrigen Wassertemperaturen eine zusätzliche Sauerstoffzehrung infolge Biomasseabbaus erfolgt, was, wie in Bild 41 erkennbar, vor allem in der ersten Hälfte des Winterhalbjahres bis Ende Dezember geschieht, während in der zweiten Hälfte des Winterhalbjahres dieser Prozess fast vollständig abklingt. Desweiteren zeigen die Messungen für den Main, dass die maximalen Wassertemperaturen im betrachteten Messzeitraum unter 27°C lagen. Die vereinzelt Werte oberhalb der Sättigungskurve können auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sein.

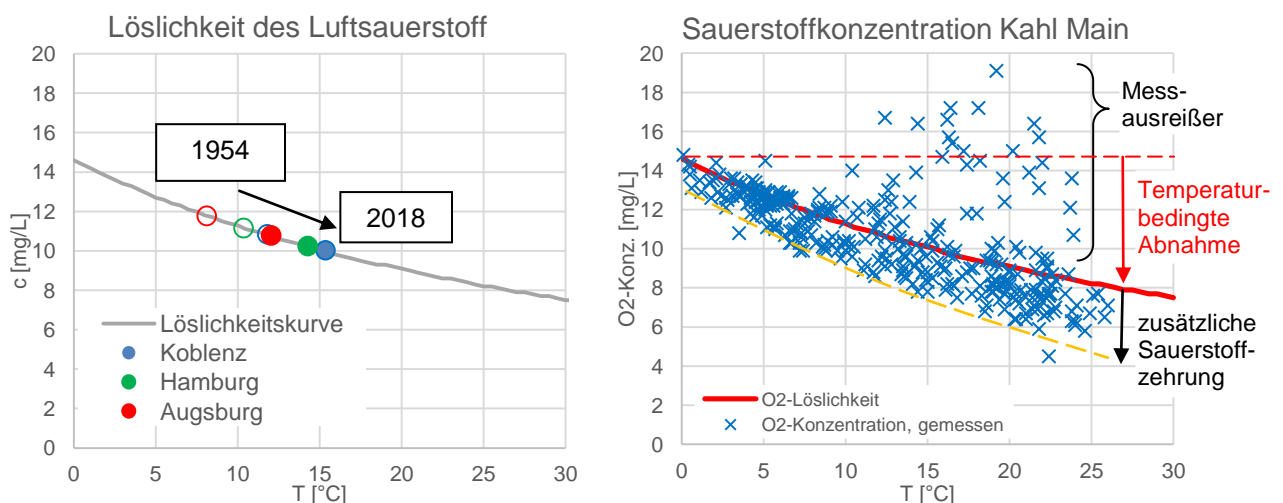


Bild 42: a) Entwicklung der Sauerstoffsättigung von 1954 bis 2018 infolge Anstieg der Wassertemperaturen für verschiedene Meßpegel b) Sauerstoffsättigung und gemessene Sauerstoffkonzentration als Funktion der Wassertemperatur am Pegel Kahl am Main

Das linke Diagramm (Bild 42-a) zeigt die Entwicklung der Löslichkeit des Sauerstoffs als Funktion von der Gewässertemperatur. Im Diagramm eingezeichnet, ist für die Meßpegel Koblenz, Hamburg und Augsburg für die Fließgewässer Rhein, Elbe und Lech der an den Meßpegeln im Jahr 1954 und im Jahr 2018 vorliegende im Wasser gelöste Sauerstoff für die gemessenen mittleren Jahreswerte der Wassertemperatur dargestellt. Wie Bild 42-a verdeutlicht, ist bei allen drei Gewässern auf Grund der gestiegenen Jahresmitteltemperaturen der Fließgewässer infolge der Klimaerwärmung die mittlere Löslichkeit des Sauerstoffs und damit der im Gewässer physikalisch-chemisch einbindbare Sauerstoffgehalt für den betrachteten Zeitraum von 1954 bis 2018 signifikant gesunken.

Standort	Jahr	Projizierte Jahresmitteltemperatur [°C]	Temperaturdifferenz [K]	Berechnete Sauerstoffsättigung [mg/L]	Abnahme Sauerstoffsättigung
Rhein, Koblenz	1950	11,8	-3,55	10,840	-7,5 %
	2022	15,4		10,029	
Elbe, Hamburg	1950	10,4	-3,91	11,158	-8,2 %
	2022	14,3		10,247	
Lech, Augsburg	1950	8,1	-3,92	11,778	-8,4 %
	2022	12,0		10,786	

Tabelle 19: Berechnete Sauerstoffsättigung abhängig von der Jahresmitteltemperatur

Die genaue Berechnung der Entwicklung der Sauerstoffsättigung für die an den drei Messpegeln beobachtete Wassertemperaturzunahme ist in Tabelle 19 durchgeführt. Dabei sind die Werte für die Sättigung der Sauerstoffkonzentration in den Fließgewässern Rhein, Elbe und Lech in Abhängigkeit von der auf den Zeitraum von 1950 bis 2022 projizierten Jahresmitteltemperatur der Gewässer dargestellt. Die Projektion der Jahrestemperatur auf eine lineare Trendlinie gleicht jährliche Schwankungen aus und zeigt die Tendenz der beobachteten Wassertemperaturentwicklung an den untersuchten Messpegeln. Aus der Entwicklung der Wassertemperaturen kann dann anschließend die Tendenz der Sauerstoffsättigung berechnet werden.

Hierbei veranschaulichen die Werte in Tabelle 19, dass die Löslichkeit des Sauerstoffs aufgrund der gestiegenen mittleren Jahreswerte der Gewässertemperaturen deutlich abnimmt. Alleine im Auswertzeitraum von 1950 bis 2022 hat der im Fließgewässer einbindbare Luftsauerstoff an den untersuchten drei Messpegeln um 7,5 bis 8,4 % abgenommen – und das nur für die mittleren Jahreswerte der Wassertemperaturen. Im Sommerhalbjahr kann die Abnahme der Sauerstoffkonzentration infolge höherer Temperaturanstiege noch größer ausfallen.

Dies zeigt, dass der klimabedingte Temperaturanstieg einen Einfluss auf die langzeitliche Entwicklung der Sauerstoffkonzentration in fast allen Fließgewässern in Deutschland hat. Die über den vieljährigen Trend nachweisbare Zunahme der Gewässertemperatur verstärkt zukünftig die sommerliche Sauerstoffabnahme im Fließgewässer, da zum einen die Sauerstofflöslichkeit abnimmt und andererseits höhere Temperaturen auch eine größere biologische Aktivität mit einem stärkeren Sauerstoffverbrauch bedeuten können.

Eine Reduktion der mittleren Wassertemperaturen in den Fließgewässern kann diesen aus der vieljährigen Entwicklung ersichtlichen Prozess aufhalten oder sogar revidieren.

5.3. Temperatúrauswertung von Fließgewässern in Deutschland nach Flussgebieten

In Abschnitt 5.1. wurden die Temperaturentwicklungen der Fließgewässer in Deutschland anhand ausgewählter Beispiele demonstriert. Für die Ermittlung des Potenzials der Grünen Nah- und Fernwärme aus Fließgewässern ist auch die Untersuchung der Wassertemperaturentwicklung für die verschiedenen Flusseinzugsgebiete in Deutschland von Bedeutung. Für die Temperatúrauswertungen der Fließgewässer werden daher die Einzugsgebiete von Rhein, Elbe, Weser, Donau und Oder untersucht. Als Datengrundlage dienen die Messungen der Gewässertemperatur der Flussgebietsgemeinschaften Elbe, Weser und Rhein, die Daten des GKD Bayern sowie die Messungen des NLWKN. Die Auswertung der vieljährigen Gewässertemperaturen kann je nach zur Verfügung stehenden Daten an den verschiedenen Meßpegeln unterschiedlich weit zurückverfolgt werden. Gesamt betrachtet kann hieraus für Deutschland ein relativ ähnliches Bild bezüglich der Entwicklung der Wassertemperaturen der Fließgewässer in den letzten Jahrzehnten gezeichnet werden.

5.3.1. Temperatúrauswertungen im Rheingebiet

Im Einzugsgebiet des Rheins mit 185.000 km² leben ca. 60 Mio. Menschen. Im deutschen Rheinabschnitt mit einem Einzugsgebiet von ca. 105.000 km² sind 37 Mio. Einwohner zu verzeichnen [63]. Daher spielen der Rhein und sein gesamtes Gewässersystem für die Gewinnung der grünen Nah- und Fernwärme aus Fließgewässern eine entscheidende Rolle, da alleine 43,5 % der Bevölkerung von Deutschland hier leben und 46 von 80 Großstädten in Deutschland im Rheineinzugsgebiet zu finden sind. Zahlreiche Großstädte liegen zudem direkt am Rhein, wie Duisburg, Düsseldorf, Neuss, Leverkusen, Krefeld, Köln, Bonn, Koblenz, Mainz, Wiesbaden, Mannheim, Ludwigshafen, und Karlsruhe, so dass sich eine Fließgewässerwärmenutzung direkt aus dem Rhein anbietet. Der Rhein zeigt auf Grund seines großen Durchflusses und seiner hohen mittleren Wassertemperaturen das höchste Potenzial für die Grüne Nah- und Fernwärme aus Fließgewässern in Deutschland.

Für das Rheingebiet werden neben dem Rhein auch die großen Nebengewässer Mosel, Main und Neckar untersucht, sowie die Saar und die Emscher, siehe Bild 43.

In Deutschland ist der Rhein im Gebiet des Hochrheins und des deutsch-französischen Oberrheins von staugeregelten Flussabschnitten geprägt, während unterhalb im Bereich des unteren Oberrheins, des Mittel- und Niederrheins unregelmäßiges Abflussverhalten vorliegt. Im niederländischen Deltarhein gibt es hingegen wieder vier Stauhaltungen, die die Wasserstände regeln. Nachfolgende Tabelle 20 zeigt die Länge der einzelnen Deutschland betreffenden Rheinabschnitte. Der Alpenrhein und der Hochrhein sind hier nicht erfasst.

Rheinabschnitt	Beginn des Abschnitts	Ende des Abschnitts	Fließlänge des Abschnitts
Hochrhein	Konstanz	Basel	ca. 170 km
Oberrhein	Basel	Bingen	ca. 360 km
Mittlerhein	Bingen	Bonn	ca. 115 km
Niederrhein	Bonn	Lobith	ca. 215 km

Tabelle 20: Fließabschnitte des Rheins nach [44]

In Bild 43 ist die räumliche Verteilung der Messstellen der FGG Rhein im Einzugsgebiet des Rheins dargestellt, deren vieljährige Daten von der FGG öffentlich zugänglich sind und in die Auswertung für die Wassertemperatur der Fließgewässer mit einfließen. Die Karte zeigt, dass von der FGG Rhein nicht nur am Rhein selbst, sondern auch an den wichtigen Zuflüssen die Wassertemperatur an ausgewählten Messstellen veröffentlicht wird. Die langjährigen Temperaturdaten der FGG liegen als Jahresmittelwerte vor, so dass für die Bestimmung der Mittelwerte für das Winter- und das Sommerhalbjahr weitergehende Datenanfragen erforderlich sind, was in weiterführenden Arbeiten vorgesehen ist.

Neben den Daten der FGG Rhein werden die langjährigen Temperaturmessungen weiterer Fließgewässer des Rheingebietes herangezogen, wobei die langjährigen, bei den jeweiligen Flussgebietsgemeinschaften hinterlegten Temperaturdaten in einigen Fällen nicht vollständig

sind. Dies erklärt in den nachfolgenden Diagrammen die lückenhaften Verläufe der vieljährigen Gewässertemperaturen.

Die Wassertemperaturen des Rheineinzugsgebietes liegen i.a. zwischen 3 bis 5° und 25°C, was charakteristisch für Gewässer in der gemäßigten Klimazone ist. Erst durch die in den letzten Jahrzehnten erfolgte Klimaerwärmung und die Wärmeeinleitungen durch thermische Kraftwerke, Industrie und Gewerbe, Abwasserwirtschaft etc. kommt es am Rhein nach [64] zu Wassertemperaturen von 28°C und mehr.

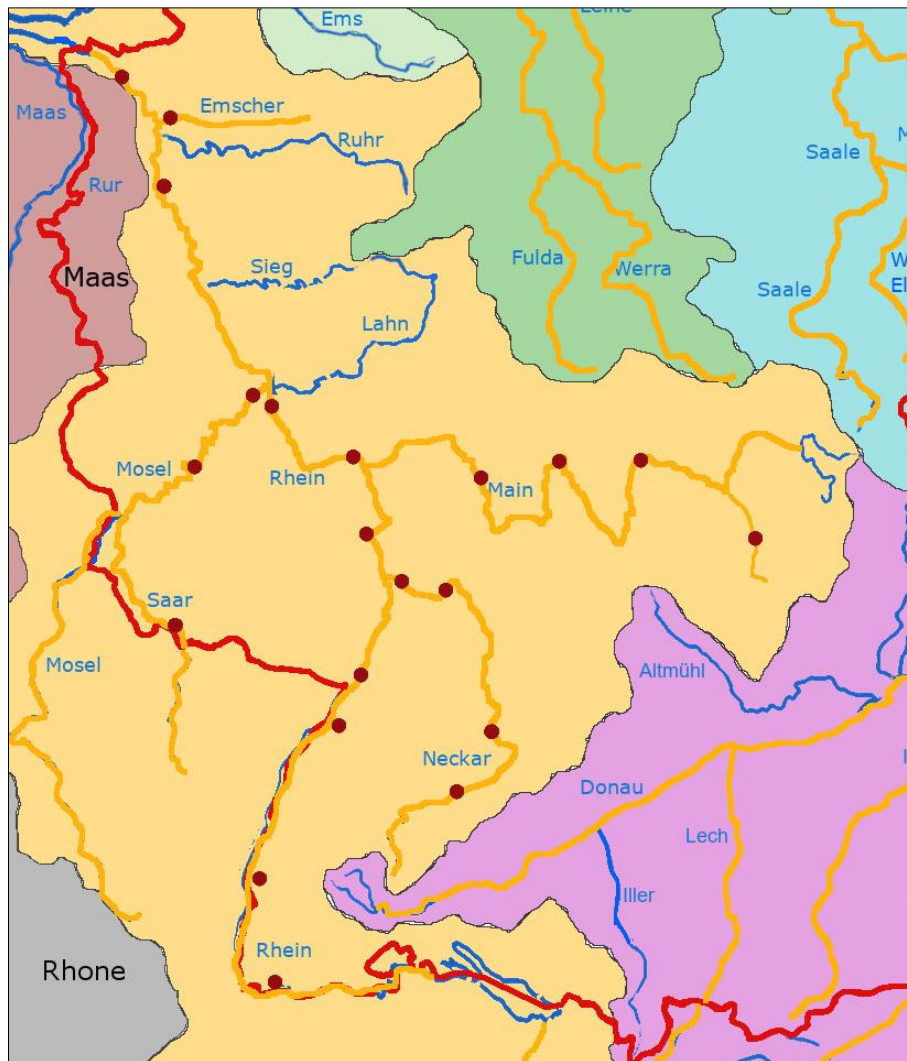


Bild 43: Karte der untersuchten Messstellen der FGG Rhein

Bild 44 zeigt die vieljährigen mittleren Jahresverläufe der Wassertemperaturen an den Rheinpegeln Rheinfelden, Vogelgruen, Iffezheim und Karlsruhe an Hand von der FGG zur Verfügung gestellten Daten [51] dargestellt. Neben den Jahresmittelwerten ist in den Diagrammen des weiteren die lineare Trendlinie dargestellt, die den langfristigen Anstieg der mittleren Gewässertemperatur des Rheins verdeutlicht. Dieser langjährige Anstieg der Gewässertemperatur ist für die 4 Meßpegel in Bild 44 eindeutig erkennbar. Der Verlauf am Pegel Vogelgrün setzt sich aus 2 Temperaturverläufen zusammen, da die Temperaturmessungen an 2 unterschiedlichen Meßpegeln durchgeführt wurden. Der Verlauf der Temperaturverlauf am Pegel Karlsruhe weist für das Jahr 1981, wie in Bild 44 gezeigt, einen außergewöhnlichen hohen mittleren Jahreswert der Wassertemperaturen auf, so dass dieser als Ausreißer gewertet und bei der Bestimmung der Trendlinie nicht berücksichtigt wird. Auch bei lückenhaften Daten wie beim Pegel Iffezheim kann der langjährige Anstieg der Gewässertemperatur eindeutig belegt werden. Durch den fortschreitenden Klimawandel und der damit verbundenen Temperaturerhöhung wird sich dieser Trend der Gewässertemperaturen langfristig weiter fortsetzen.

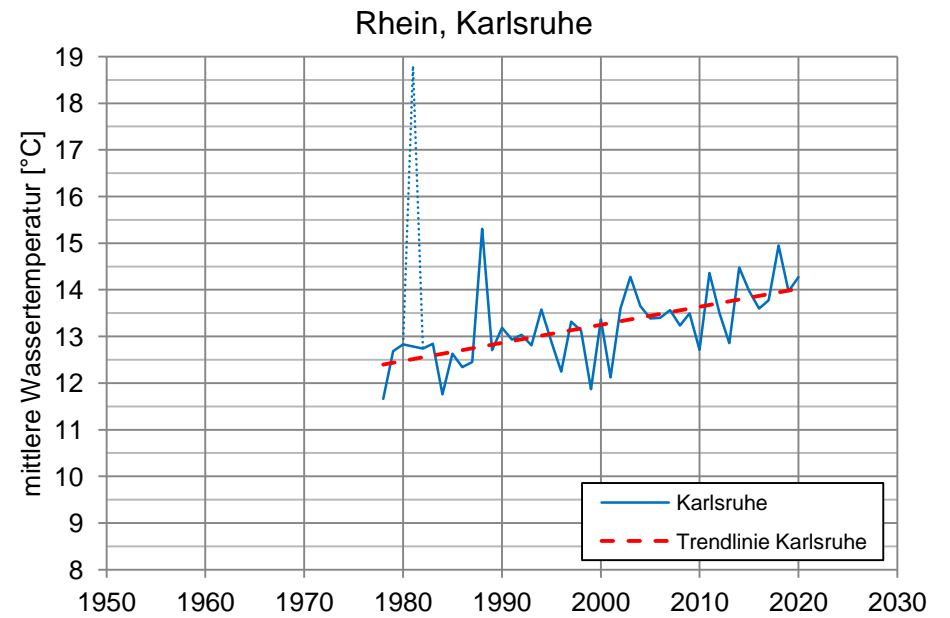
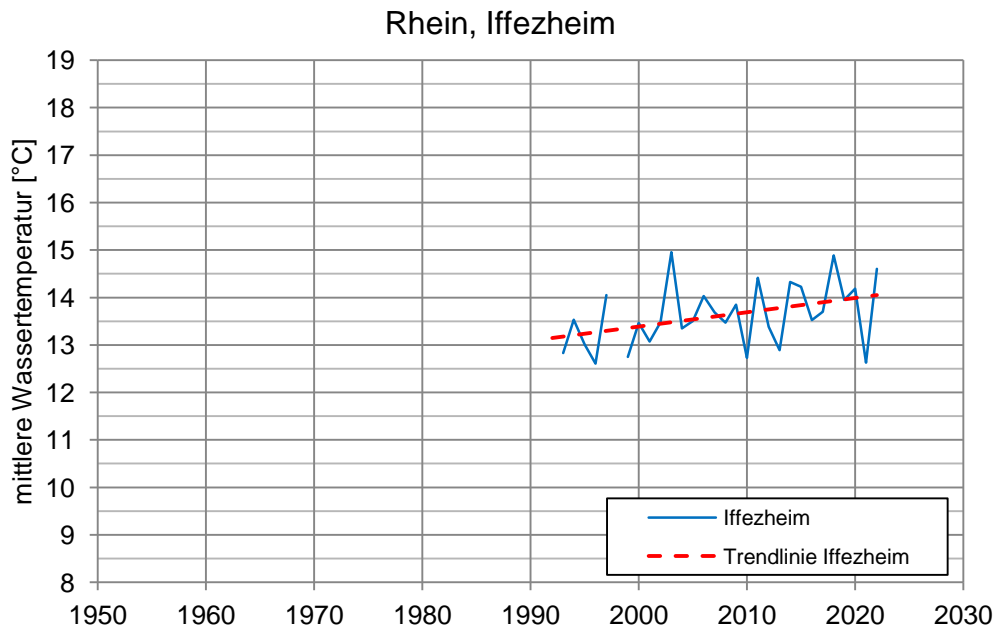
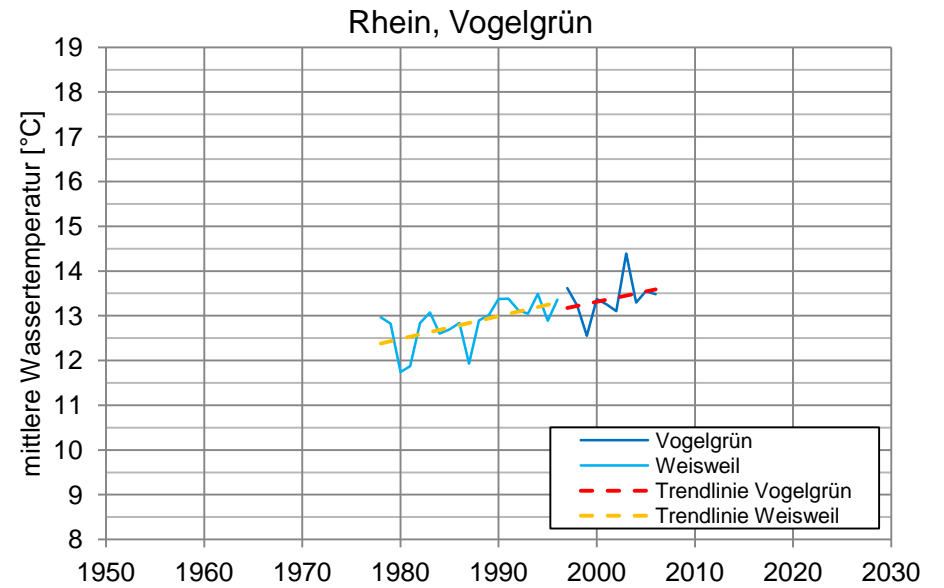
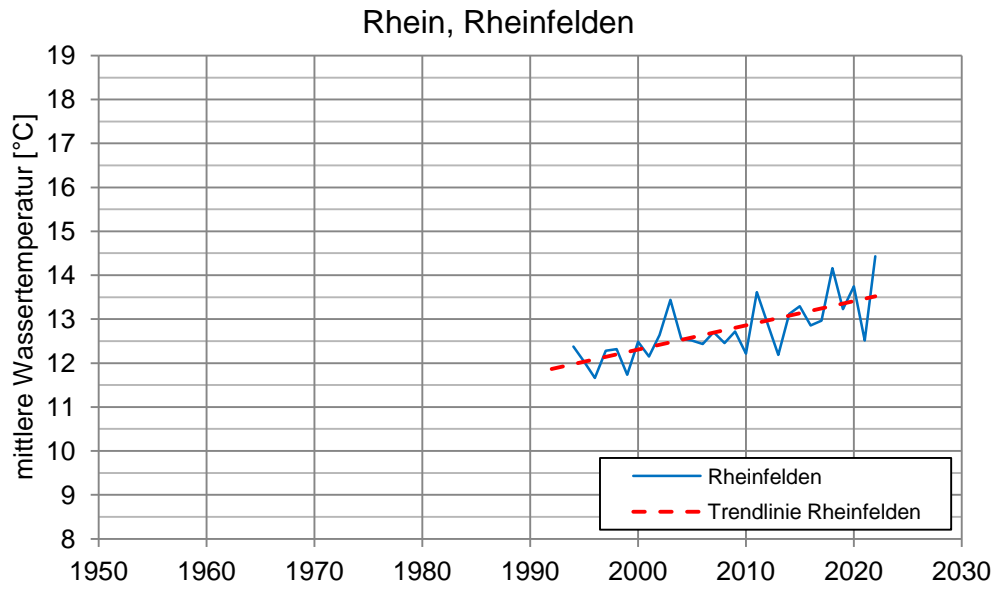


Bild 44: Temperaturverlauf der Rheinpegel Rheinfelden, Vogelgrün, Iffezheim und Karlsruhe

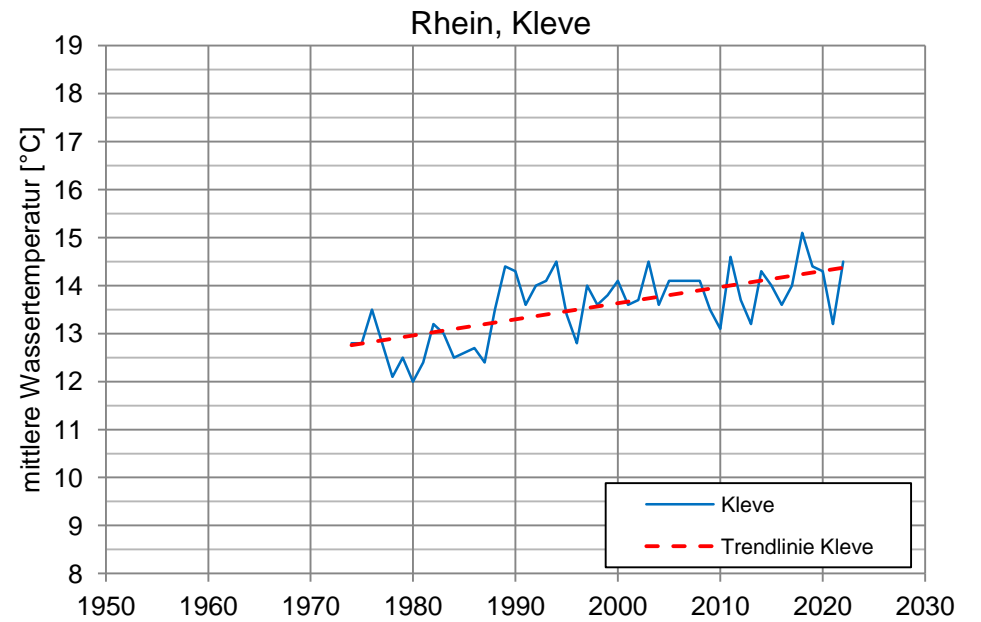
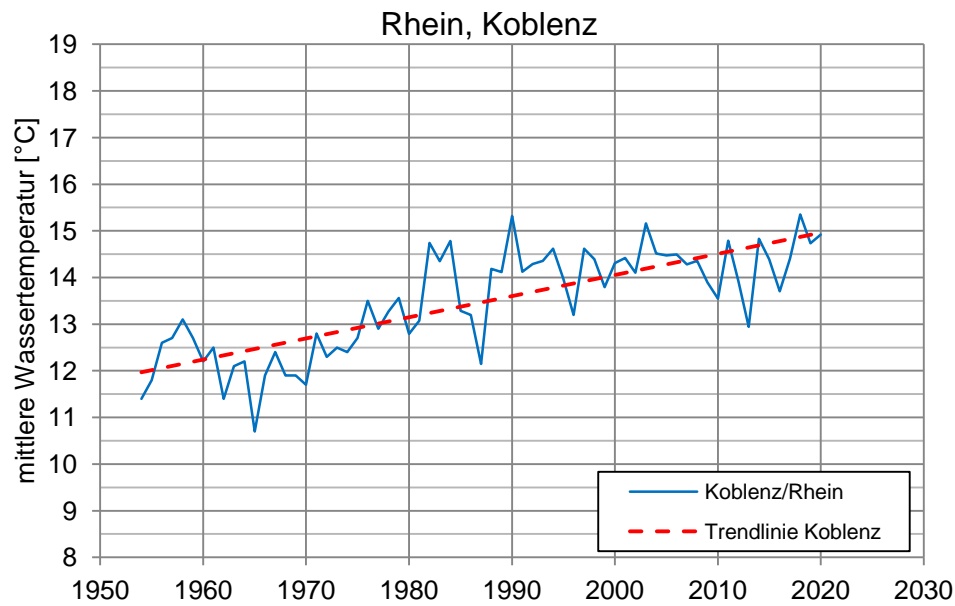
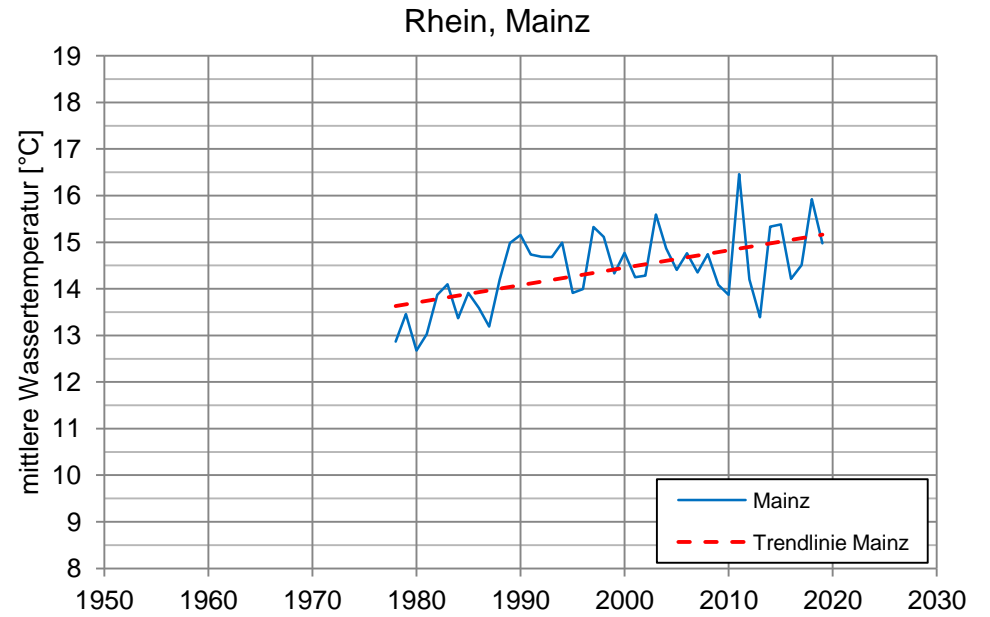
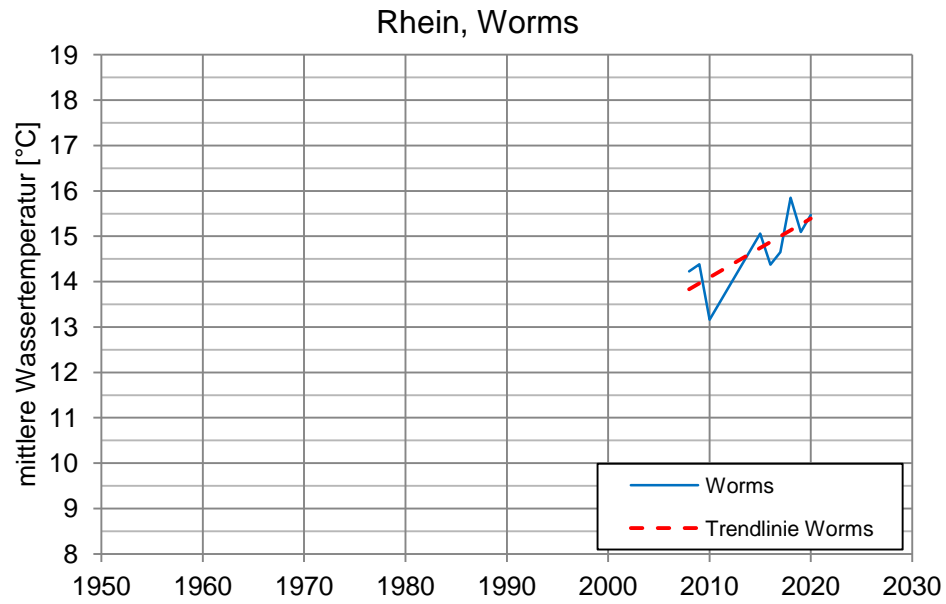
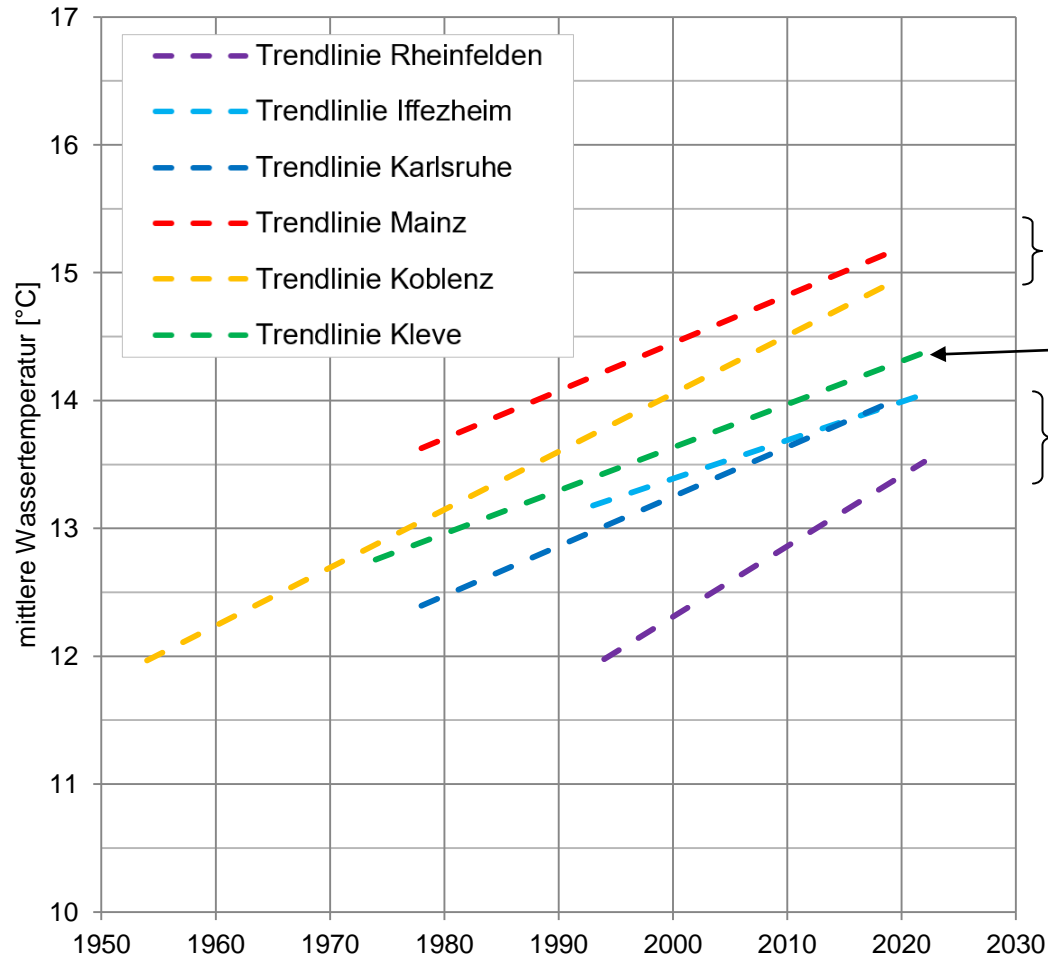


Bild 45: Langzeitlicher Temperaturverlauf der Rheinpegel Worms, Mainz, Koblenz und Kleve

Wassertemperatur Rhein



freifließender Bereich
Ober- und Mittelrhein

Niederrhein

staugeregelter Bereich
Hoch- und Oberrhein

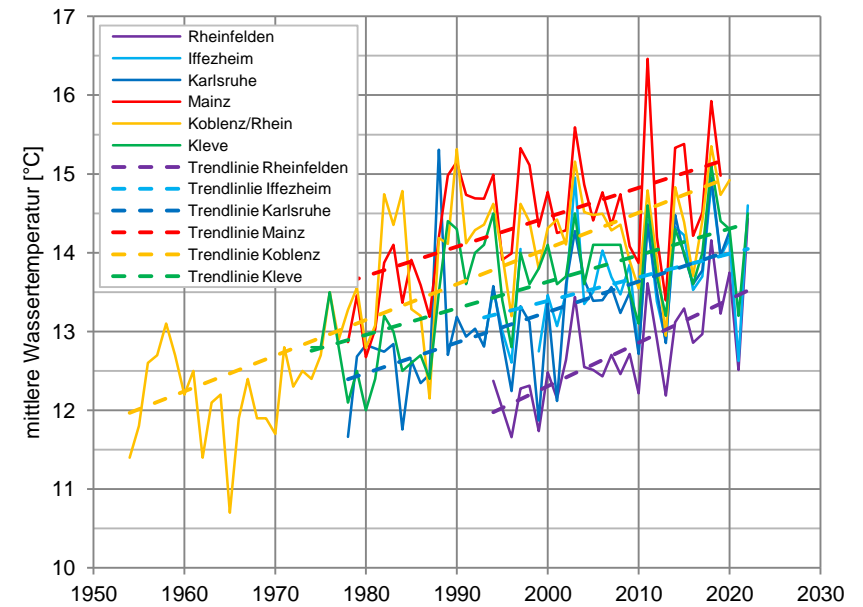
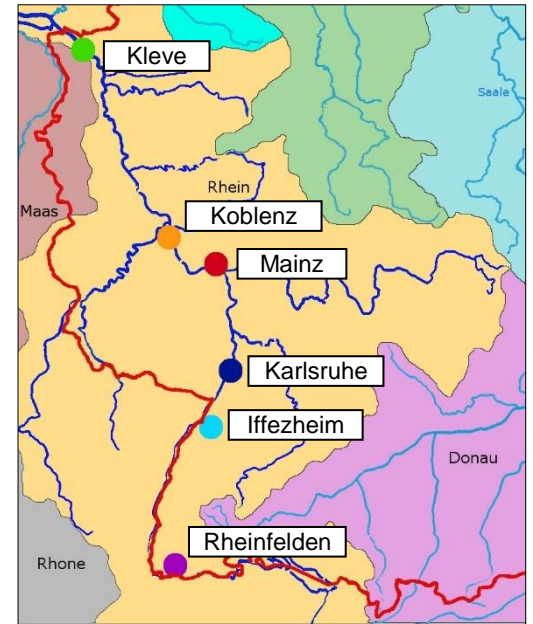


Bild 46: Langzeitlicher Trend der Wassertemperatur der untersuchten Rheinpegel

In Bild 45 sind die langjährigen Temperaturverläufe für die Rheinpegel Worms, Mainz, Koblenz und Kleve dargestellt. Für den Pegel Worms liegen bisher nur Daten für den Zeitraum von 2008 bis 2020 vor, so dass nur ein mittelfristiger Trend für die Temperatur an diesem Messpegel bestimmt werden kann. Für den Messpegel Koblenz sind dahingegen die Temperaturwerte für den Zeitraum von 1955 bis 2020 vorhanden, so dass der langjährige Anstieg der Gewässertemperatur des Rheins seit den 1950er Jahren eindeutig belegbar ist. Durchweg ist auch den in Bild 45 ebenso wie den in Bild 44 dargestellten Temperaturverläufen gemein, dass sie einen im Mittel stetigen Anstieg der Fließgewässertemperaturen zeigen. Die vieljährigen Trends der untersuchten Temperaturverläufe der verschiedenen untersuchten Rheinpegel stellt Bild 46 vergleichend dar. Es verdeutlicht, dass im frei fließenden Rheinabschnitt höhere Temperaturen vorliegen als im staugeregelten Abschnitt des Rheins, ebenso wie die mittleren Jahreswerte der Wassertemperaturen im freifließenden Rheinabschnitt deutlich höher sind.

Bild 43 zeigt, dass entlang der gesamten deutschen Rheinabschnitte Temperaturmessungen vorliegen. Wie die Auswertungen der Bilder 44 bis 46 demonstrieren, weisen alle untersuchten Messpegel einen eindeutigen Anstieg der Wassertemperaturen im Messzeitraum auf. Aufgrund der jährlichen Schwankung der Jahresmitteltemperaturen im vieljährigen Verlauf erfolgt die Bestimmung der Temperaturdifferenz über den Betrachtungszeitraum anhand der linearen Trendlinie. Darüber hinaus kann mit der Trendlinie auch eine Extrapolation der Entwicklung der Wassertemperaturen in zukünftige oder vergangene Zeiträume durchgeführt werden, so die grundsätzliche Charakteristik des Trends gültig ist.

Messpegel Standort	Gewässer	Fluss-km [km]	Jahr Beginn [a]	Jahr Ende [a]	Daten-Zeitraum [a]	Temperatur Beginn [°C]	Temperatur Ende [°C]	Temperatur Differenz [K]	Temperatur-anstieg Dekade [K/10a]
Rheinfelden	Rhein	147	1994	2022	28	12,013	13,558	1,546	0,552
Vogelgrün	Rhein	225	1978	1996	18	12,321	13,239	0,918	0,510
Iffezheim	Rhein	334	1993	2022	29	13,252	13,904	0,652	0,225
Karlsruhe	Rhein	360	1979	2020	41	12,443	14,034	1,591	0,388
Worms	Rhein	443	2008	2020	12	13,8	15,36	1,56	1,30
Mainz	Rhein	493	1978	2020	42	13,719	15,290	1,571	0,374
Koblenz	Rhein	591	1955	2020	65	12,071	15,022	2,951	0,454
Kleve	Rhein	858	1974	2022	48	12,687	14,304	1,618	0,337

Tabelle 21: Entwicklung der mittleren Wassertemperatur für den Rhein

In Tabelle 21 sind die in den Diagrammen dargestellten vieljährigen Verläufe der Gewässertemperaturen für die Temperaturdifferenzen zwischen dem Beginn und dem Ende der Messungen bezüglich der Entwicklung der linearen Trendlinie ausgewertet. Für eine Vergleichbarkeit der unterschiedlich langen Beobachtungszeiträume wird der Temperaturanstieg pro Dekade für die verschiedenen Meßpegel berechnet, da die Temperaturdifferenzen nicht direkt miteinander vergleichbar sind und daher der Temperaturanstieg beziehungsweise der Temperaturgradient der Trendlinie die maßgebende Vergleichsgröße darstellt. Für eine weiter detaillierte Analyse der Wassertemperaturentwicklung sind weitere Temperaturdaten erforderlich.

Grundsätzlich zeigt sich bei der Auswertung der Wassertemperaturdaten in Tabelle 21, dass die Dekadenanstiege der Wassertemperaturen an den verschiedenen Meßpegeln über den Rheinverlauf unterschiedlich ausfallen. Dies hat zum einen mit verschiedenen natürlichen Randbedingungen, der spezifischen Entwicklung der Wassertemperaturen über die Lauflänge eines Fließgewässers, der Länge der Beobachtungszeiträume zu tun und zum anderen mit den am Rhein und seinen Nebengewässern erfolgenden Wärmeeinleitungen.

Im Detail ist aus den Dekadenanstiegen der Wassertemperaturen zu erkennen, dass zunächst im Hochrhein und im Oberrhein im ausgewerteten Meßzeitraum relativ hohe Temperaturanstiege pro Dekade mit 0,552 K/10a in Rheinfelden und mit 0,510 K/10a in Vogelgruen zu verzeichnen sind. Die Temperaturerhöhungen am Pegel Vogelgruen sind teilweise durch die Kühlwassereinleitungen des französischen Kernkraftwerks Fessenheim mit einer maximalen Abwärmeleistung von 3.622 MW beeinflusst [64], welches 1977 in Betrieb gegangen ist und 2020 abgeschaltet wurde. Auch am Pegel Rheinfelden werden die Wassertemperaturen des Rheins durch die Warmwassereinleitungen von den fünf Atomkraftwerken Mühleberg (Betrieb seit 1972),

Beznau I und II (Betrieb seit 1969/1971), Gösgen (Betrieb seit 1979) und Leibstadt (Betrieb seit 1984) in der Schweiz mit einer Abwärmeleistung von 1.900 MW ein, ebenso wie die Wärmeleitungen der Papierfabrik Albruck mit 80 MW und von Degussa in Rheinfelden Nord und Rheinfelden Süd mit je 40 MW Abwärmeleistung [64].

An den Pegeln Iffezheim und Karlsruhe nehmen die Anstiege der Wassertemperaturen pro Dekade ab, da sich hier nach [65] ein weitgehend natürliches Niveau des Wärmeaustausches zwischen Fließgewässer und Atmosphäre einstellt, begünstigt durch die zahlreichen großen Stauhaltungen des Oberrheins, die u.a. dafür sorgen, das zum Beispiel die Einflüsse der Wärmeeinleitungen des Kernkraftwerks Fessenheim nach einer relativ kurzen Laufstrecke abklingen [65] und das obwohl der Oberrheingraben die höchsten mittleren Lufttemperaturen des Rheingebietes aufweist. Der höhere Dekadenanstieg der Wassertemperaturen im Rhein am Pegel Karlsruhe wird unter anderem durch die Wärmeeinleitungen der Badenwerke in Karlsruhe mit einer Abwärmeleistung von 1.465 MW und durch die Badischen Stahlwerke mit einer Abwärmeleistung von 46 MW [64] beeinflusst.

Die starke Zunahme des Anstiegs der Wassertemperaturen am Pegel Worms ist anteilig durch die großen Wärmeeinleitungen im relativ kurzen Abschnitt des Oberrheins von 83 km zwischen Karlsruhe und Worms verursacht. Hier erfolgen laut Internationaler Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) [65] rund 60 % der großen Wärmeeinleitungen in den Rhein unter anderem neben den Wärmeeinleitungen im Raum Karlsruhe mit 1.661 MW, durch das Kernkraftwerk Philippsburg mit 4.265 MW, die Neckareinmündung mit 2.600 MW und die Wärmeeinleitungen im Großraum Mannheim/Ludwigshafen mit 4.418 MW Abwärmeleistung [64, 65]. Im Rheinabschnitt bis Mainz kam dann noch einmal eine große Wärmeeinleitung durch das Kernkraftwerk Biblis I und II mit einer Abwärmeleistung von 4.940 MW dazu.

Mit der Abschaltung der großen Kernkraftwerke am Rhein in Deutschland und Frankreich 2011, 2019, 2020 und 2023 sind die Wärmeeinträge in den Rhein anteilig zurückgegangen, wohingegen die Wärmeeinträge infolge des Klimawandels weiter zunehmen.

Wird die Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Rheins angeschaut, so ist Tabelle 21 zu entnehmen, das 2022 der mittlere Jahreswert der Wassertemperatur des Rheins vom Meßpegel Rheinfelden bis zum Meßpegel Kleve-Bimmen von 13,56° auf 14,3°C bezogen auf die Entwicklung der Trendlinie gestiegen ist. Die tatsächlichen Jahresmitteltemperaturen des Rheins lagen in Rheinfelden bei 14,4°C und in Kleve-Bimmen bei 14,5°C. Für die Trendlinie ergibt sich damit eine mittlere Temperaturzunahme über den Längsverlauf des Rheins im Jahr 2022 von 0,74 K und für die tatsächlichen Jahresmitteltemperaturen des Rheins von 0,1 K. In [65] wird im Mittel eine Zunahme der Wassertemperaturen des Rheins zwischen dem stromaufwärts von Rheinfelden liegenden Meßpegel Rekingen und dem stromabwärts von Kleve-Bimmen liegenden Meßpegel Lobith von knapp 2 K im Zeitraum von 2000 bis 2010 festgestellt.

Im Hinblick auf die vieljährige Entwicklung der Wassertemperaturen des Rheins wird der Pegel Koblenz betrachtet, für den Meßwerte seit 1955 bis 2020 und damit für einen Meßzeitraum von 65 Jahren vorliegen. Wie in Abschnitt 5.1. bereits ausgeführt, liegt am Pegel Koblenz ein Anstieg der mittleren Wassertemperaturen des Rheins innerhalb des ausgewerteten Beobachtungszeitraums von 3 K vor. Diese Temperaturentwicklung des Rheins passt sehr gut mit den niederländischen Untersuchungen am Pegel Lobith zusammen, in denen im Zeitraum zwischen 1900 und 2000 ebenfalls eine mittlere Zunahme der Wassertemperaturen des Rheins von 3 K ermittelt wurde [64]. Ähnliches zeigen vom Trend her auch die Schweizer Untersuchungen am Pegel Basel, an dem beobachtet wurde, dass die Wassertemperaturen des Rheins bis 2011 in einem Zeitraum von 50 Jahren um 2 K zugenommen haben.

5.3.1.1. Temperatúrauswertungen im Moselgebiet

Die Mosel entspringt in den Vogesen und fließt durch Lothringen, vorbei an Luxemburg und am Saargebiet, zwischen den Mittelgebirgen Hunsrück und Eifel und mündet bei Koblenz in den Rhein. Sie ist mit 544 km einer der längsten Nebenflüsse des Rheins. Der mittlere Durchfluss der Mosel beträgt an der Mündung in den Rhein 320 m³/s. Die Mosel ist über einen Großteil ihrer Länge bis zur Rheinmündung staugeregelt und durch eine hohe Anzahl an Staustufen in ihrem gesamten Flusslauf gekennzeichnet.

Die Saar ist ein 235 km langer Nebenfluss der Mosel und entspringt ebenfalls in Frankreich. Die Saar ist auch über einen Großteil ihrer Fließlänge ausgebaut und durch zahlreiche Staustufen gekennzeichnet. Sie entspringt in den Vogesen, fließt durch das Elsass und das Saarland und mündet bei Konz in die Mosel. Wie die Mosel ist auch die Saar durch stark mäandrierende Bereiche charakterisiert wie zum Beispiel an der Saarschleife bei Mettlach gut erkennbar. Der mittlere Durchfluss der Saar beträgt an der deutsch-französischen Grenze ca. 39,7 m³/s und an der Mündung in Mosel 78,2 m³/s.

Die Untersuchung der Gewässertemperaturen für die Pegel der Mosel und der Saar erfolgt in gleicher Weise wie für den Rhein. Hierbei werden die langjährigen Messwerte für die Gewässertemperatur über den jeweiligen Betrachtungszeitraum für die Pegel aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass für die Mosel und die Saar für die Mosel-Pegel Palzem und Koblenz bzw. für den Saar-Pegel Saarbrücken die Gewässertemperatur im langfristigen Zeitmaßstab betrachtet ebenfalls wie beim Rhein ansteigt, siehe die Bilder 47 und 48. Der Vergleich der Temperaturentwicklung des Rheins mit der Temperaturentwicklungen von Mosel und Saar in Bild 49 verdeutlicht, dass der Rhein einen wesentlich stärkeren Temperaturanstieg und höhere mittlere Wassertemperaturen über den betrachteten Zeitraum als die staugeregelten Flüsse Mosel und Saar aufweist. Betrachtet man den langzeitlichen Trend im 40-jährigen Zeitraum von 1978 bis 2018, zeigt sich aus den Auswertungen, dass für den frei fließenden Rhein-Abschnitt die Temperaturdifferenz 1,91 K trägt und für die staugeregelte Mosel 1,28 K und die staugeregelte Saar nur 0,74 K.

Pegel	Gewässer	T _{Trend} [°C] 1950	T _{Trend} [°C] 1980	T _{Trend} [°C] 2020	delta T [K] 1950-2020
Koblenz	Rhein	11,79	13,12	15,02	3,18
Koblenz	Mosel	11,63	12,51	13,79	2,13
Saarbrücken	Saar	11,43	11,96	12,70	1,23

Tabelle 22: Entwicklung der mittleren Wassertemperatur für den Rhein, Mosel und Saar

Tabelle 22 zeigt den Trend der langzeitlichen Entwicklung der Gewässertemperatur für den Rhein, die Mosel und die Saar. Für die Bestimmung der Zunahme der Gewässertemperatur im vieljährigen Betrachtungszeitraum von 70 Jahren wird die lineare Trendlinie herangezogen, da sie die Schwankungen der jeweiligen Jahresmitteltemperatur über diesen langen Zeitraum ausgleicht. Hierbei zeigt sich, dass der im Bereich der Moselmündung freifließende Rhein über den Zeitraum von 1950 bis 2020 eine Zunahme der Gewässertemperatur von 3,18 K aufweist, hingegen die Mosel und die Saar als staugeregelte Gewässer 2,13 K bzw. 1,23 K. Darüber hinaus weist der Rhein eine wesentlich höhere Gewässertemperatur im Vergleich zu den beiden staugeregelten Fließgewässer Mosel und Saar auf, die zum Beispiel 2020 bei 15,02°C und bei der Mosel und Saar bei 13,79 C bzw. 12,70 C lag.

Die Ergebnisse für die Mosel und die Saar verdeutlichen wie auch die Ergebnisse am staugeregelten Oberrhein, dass in den staugeregelten Bereichen eine geringere Temperaturzunahme infolge des Klimawandels zu verzeichnen ist als in den freifließenden Gewässerabschnitten. Ursache ist, dass bei staugeregelten Gewässern gerade während der sommerlichen Niedrigwasserphasen in Kombination mit hohen Lufttemperaturen ein Vielfach größeres Gewässervolumen vorliegt und sich infolge der wesentlich größeren Gewässertiefe der Stauräume im Gegensatz zu den freifließenden Gewässerabschnitten eine Temperaturschichtung ausbilden kann, die eine dämpfende Wirkung auf die Erhöhung der Wassertemperaturen im Gesamtwasserkörper und den Wärmeeintrag abpuffert.

Auch die Untersuchungen der IKSR [65] ermittelt für den Zeitraum von 1990 bis 2010 eine im Mittel um 1 K niedrigere Wassertemperatur der Mosel im Vergleich zum Rhein bei Koblenz. Die Mosel kühlt damit rein rechnerisch den Rhein um 0,2 K ab.

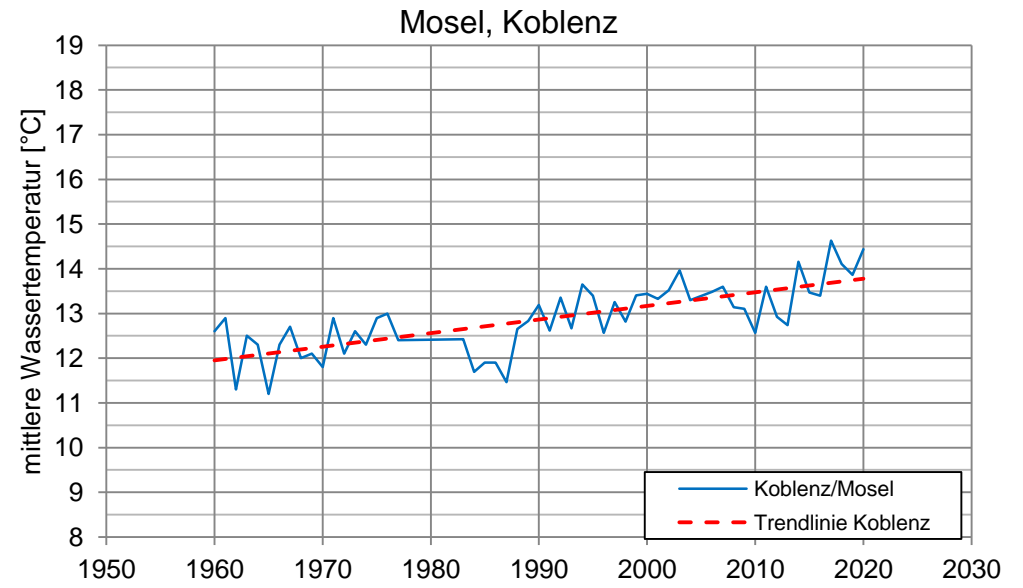
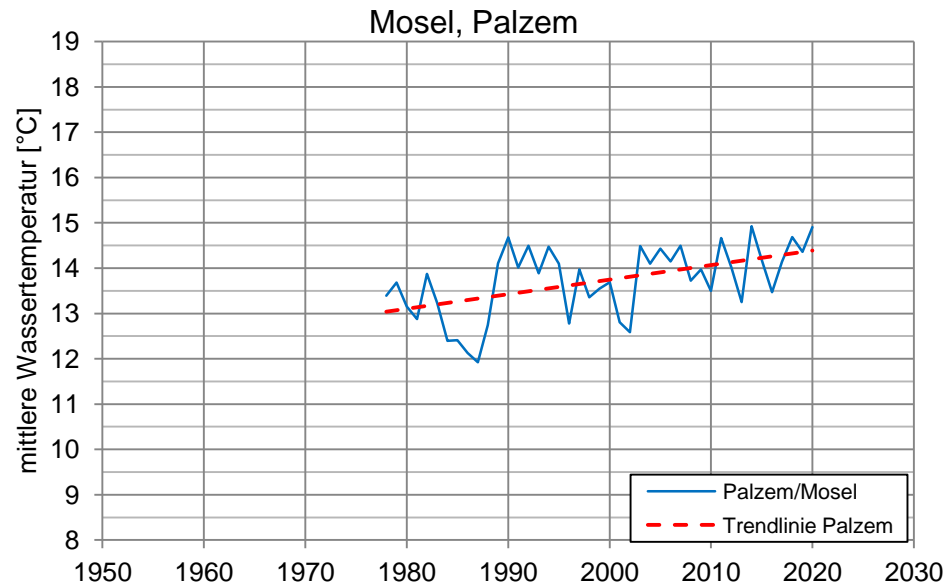


Bild 47: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur der Mosel für die Pegel Koblenz und Palzem

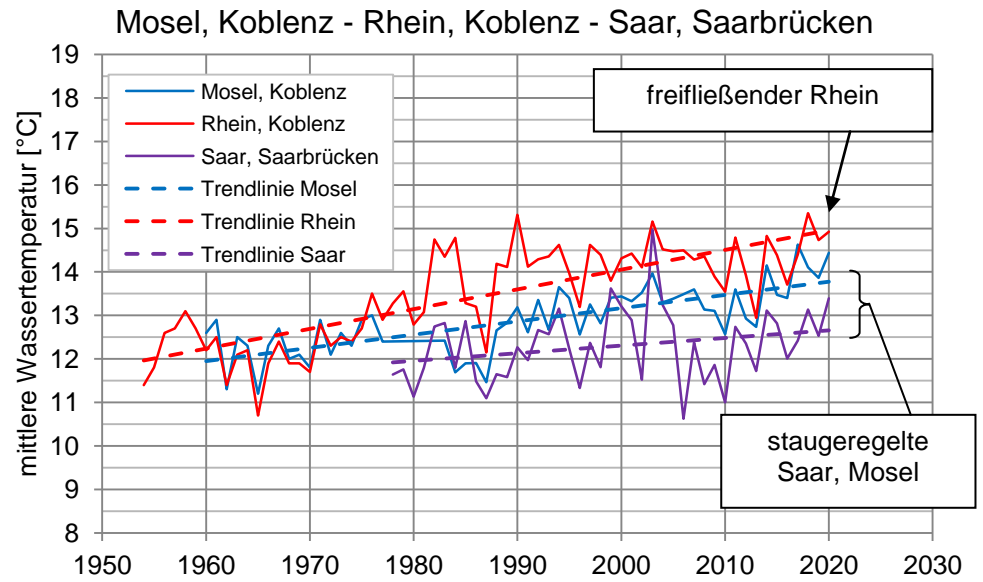
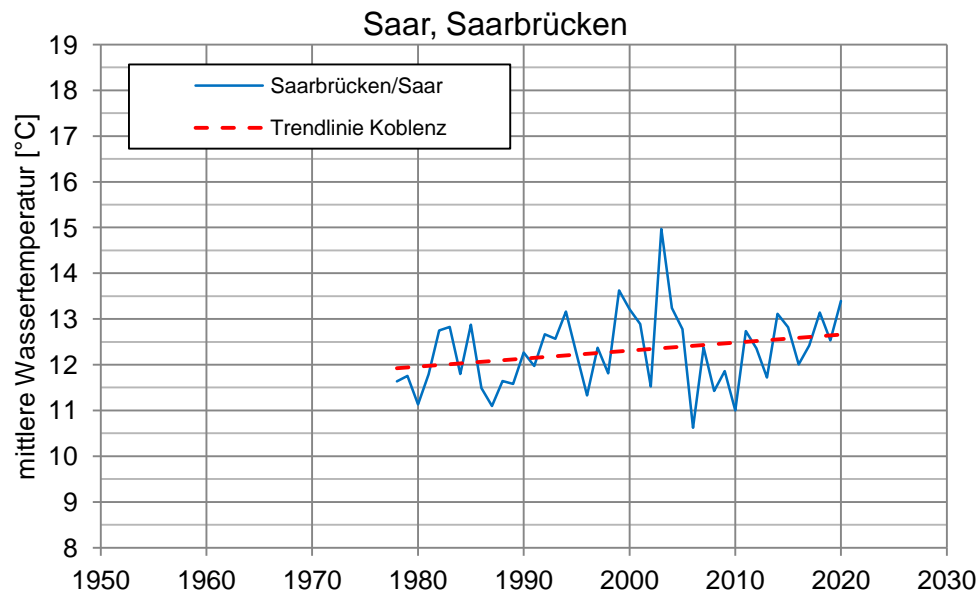


Bild 48: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur der Saar für die Pegel (a) Saarbrücken, Vergleich mit dem Rhein-Pegel Koblenz

5.3.1.2. Temperaturevaluations in the Main region

The Main is one of the main tributaries of the Rhine and empties into the Rhine at Mainz at a mouth height of 82 mNN. It is primarily fed by the central mountains such as Thuringian Forest, Fichtelgebirge, Franconian Alb, Rhön, Odenwald and Spessart and is shaped by the tributaries originating from these central mountains such as Kinzig, Mumlung, Tauber, Franconian Saale and Regnitz. The source height of the Red Main is 580 mNN and that of the White Main is 887 mNN. The Main has a total length of 527 km and shows at its mouth into the Rhine an average discharge of 211 m³/s. The size of the catchment area of the Main is 27,292 km². As an important link between the waterways of the Rhine region and the Danube region and thus the connection between the North Sea and the Black Sea, the Main is regulated over most of its length.

The evaluation of the water temperature for the Main is carried out at the gauges Raunheim, Würzburg, Schweinfurt and Kahl. The measurement values are taken from the publicly accessible data of the FGG Rhein [53] and the GKD Bayern [55]. The long-term temperature curves shown in Bild 49 and 50 show the calculated annual average values as well as the linear trend of the water temperature over the observation period. The images clarify that in the Main a continuous increase in water temperature at all investigated measurement points over the last decade can be observed.

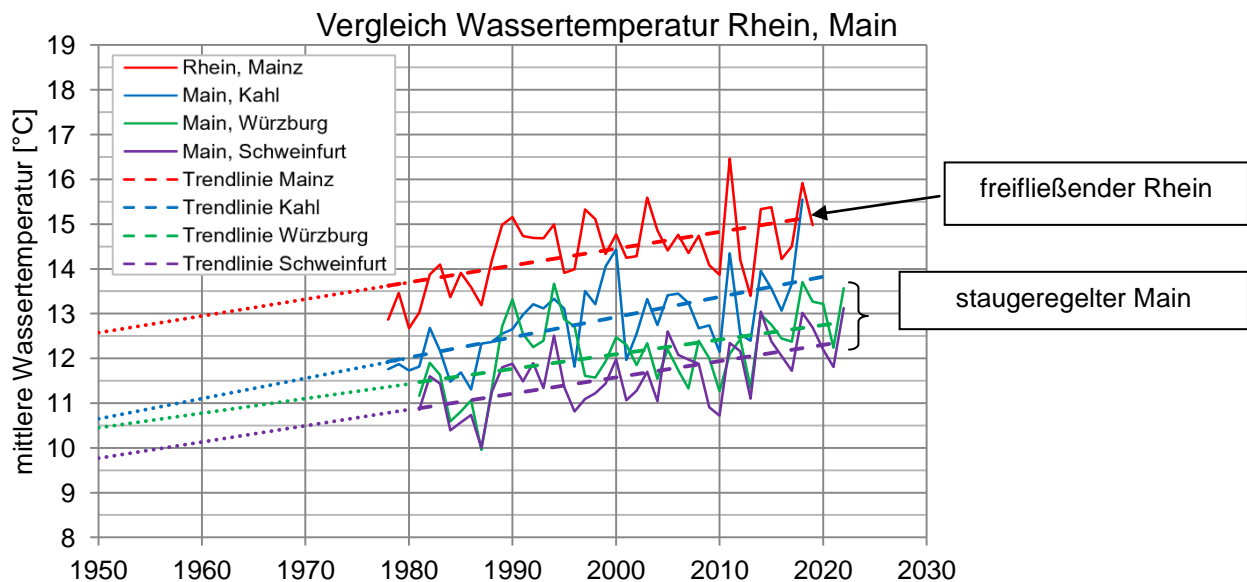


Bild 49: Vergleich der mittleren Wassertemperatur des Mains und des Rheins am Pegel Mainz

In Bild 49 sind die vieljährigen mittleren Wassertemperaturverläufe des Mains an den Pegeln Kahl, Würzburg und Schweinfurt dem Wassertemperaturverlauf des Rheins am Pegel Mainz gegenüber gestellt. Im Vergleich zum freifließenden Rhein am Pegel Mainz, wo der Main in den Rhein mündet, zeigt sich, dass die Gewässertemperaturen im Main an allen untersuchten Pegeln geringer sind als die Gewässertemperatur des Rheins.

Pegel	Fließ-gewässer	Fluss-km	T _{Trend} [°C] 1950	T _{Trend} [°C] 1980	T _{Trend} [°C] 2020	ΔT _{Trend} [K] 1950-2020
Mainz	Rhein	498	12,57	13,69	15,19	2,61
Schweinfurt	Main	331	9,77	10,85	12,30	2,54
Würzburg	Main	252	10,45	11,43	12,74	2,29
Kahl	Main	67	10,65	12,01	13,82	3,17

Tabelle 23: Vergleich der Temperaturentwicklung am Main und am Rhein

Tabelle 23 zeigt den Vergleich der Temperaturentwicklung am Main für die Pegel Schweinfurt, Würzburg und Kahl und den der Mainmündung am nächstgelegenen Rheinpegel Mainz. Für die Bewertung der Temperaturentwicklung wird auf die Trendlinie der Gewässertemperatur des jeweiligen Pegels zurückgegriffen, da die lineare Trendlinie die Schwankungen im Jahresbereich

ausgleicht und die langzeitliche Tendenz der Gewässertemperatur am besten verdeutlicht. Die Ergebnisse in Tabelle 23 belegen, dass über den vieljährigen Trend im Betrachtungszeitraum von 1950 bis 2020 die Gewässertemperatur um 2,61 K am Rhein und um 2,29 bis 3,2 K am Main ansteigt. Darüber hinaus zeigen die Gewässertemperaturen in Tabelle 23, dass die mittlere Wassertemperatur am freifließenden Rhein mit 15,2 °C deutlich höher ist als im staugeregelten Main mit 12,3 bis 13,8 °C.

Über die Lauflänge betrachtet nimmt die mittlere Wassertemperatur vom Pegel Schweinfurt bis zum Pegel Kahl bezüglich der Auswertung in Tabelle 23 um 0,9 K (1950) bis 1,52 K (2020) zu. Nach Untersuchungen der Internationalen Kommission zu Schutz des Rheins (IKSR) [65] betrug die mittlere Wassertemperatur des Mains für den Zeitraum von 2000 bis 2010 an der Mündung in den Rhein 13,7°C und am Rhein am Pegel Mainz 14,7°C. Wie die Auswertungen in Tabelle 23 verdeutlichen haben sich hier die mittleren Wassertemperaturen bis 2020 noch einmal erhöht. Die Abkühlung des Rheins durch den Main beträgt rein rechnerisch analog zur Mosel 0,2 K [65].

Die in Tabelle 23 aufgeführte Temperaturzunahme des Mains von 3,17 K am Pegel Kahl im Zeitraum von 1950 bis 2020, die die größte Temperaturzunahme innerhalb der Tabelle 21 darstellt, ist unter anderem durch die Wärmeeinleitungen durch das Kernkraftwerk Grafenrheinfeld beeinflusst. Alleine 2004 wurden 158 Mio. m³ Kühlwasser aus dem Kernkraftwerk Grafenrheinfeld in den Main eingeleitet, was zu einer maximalen Wärmeeinleitung von 210 MW Abwärme führt [64]. Zusätzlich kommen noch sieben weitere große Wärmeeinleiter im bayrischen Teil des Mains mit Wärmeeinleitungen größer 10 MJ/s hinzu [57], die in [64] nicht erfasst wurden.

Die gesamte Abwärmeleistung die unterhalb vom Pegel Kahl über Wärmeeinleitungen in den Main geht, liegt nach [64] bei 752 MW und wird unter anderem durch die Wärmekraftwerke Staudinger, Offenbach, Niederrad, Mainova Heizkraftwerk West, und verschiedene Industrieparks und Unternehmen verursacht. Das Kernkraftwerk Grafenrheinfeld ist bei dieser Zusammenstellung mit 200 MW berücksichtigt.

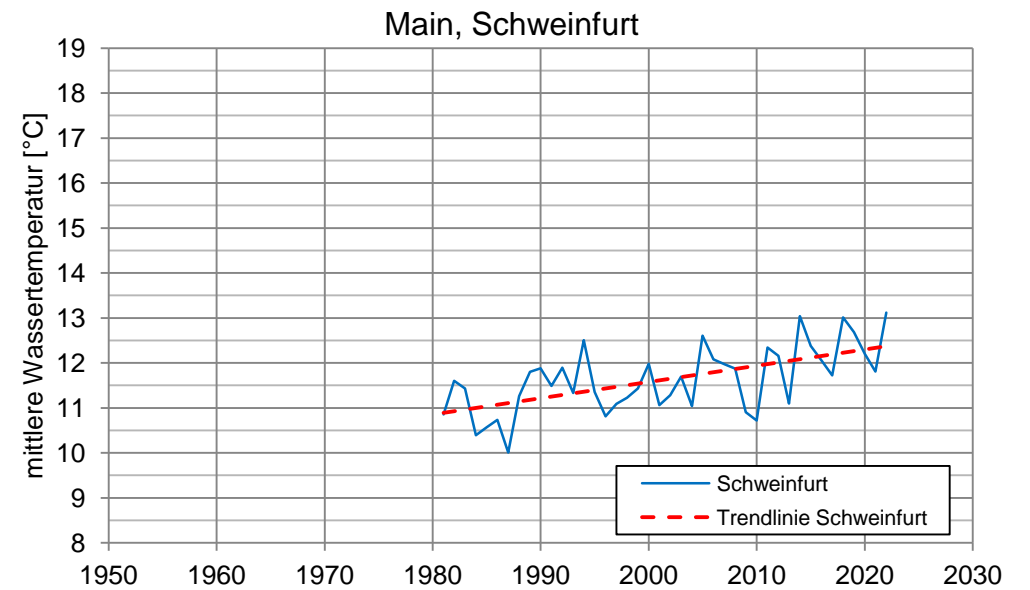
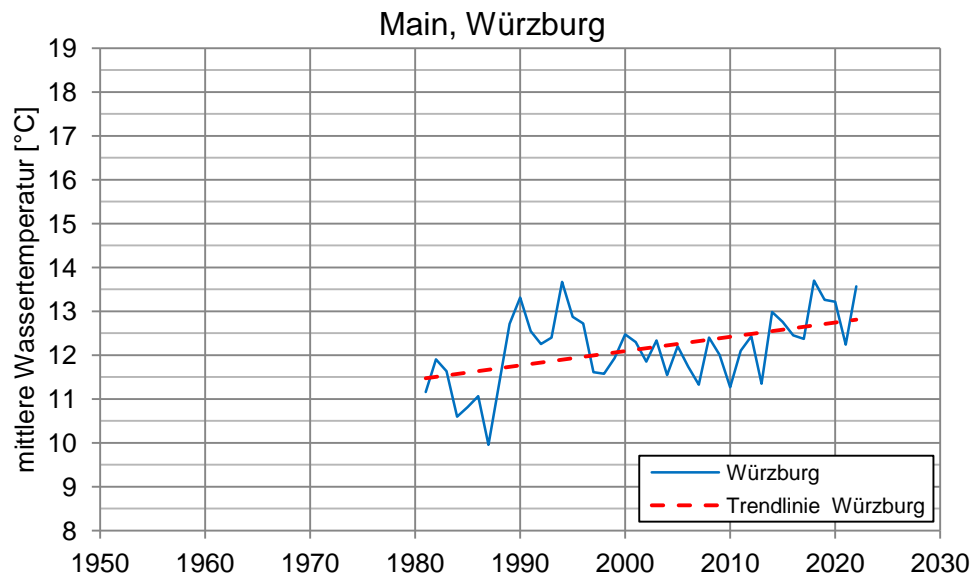
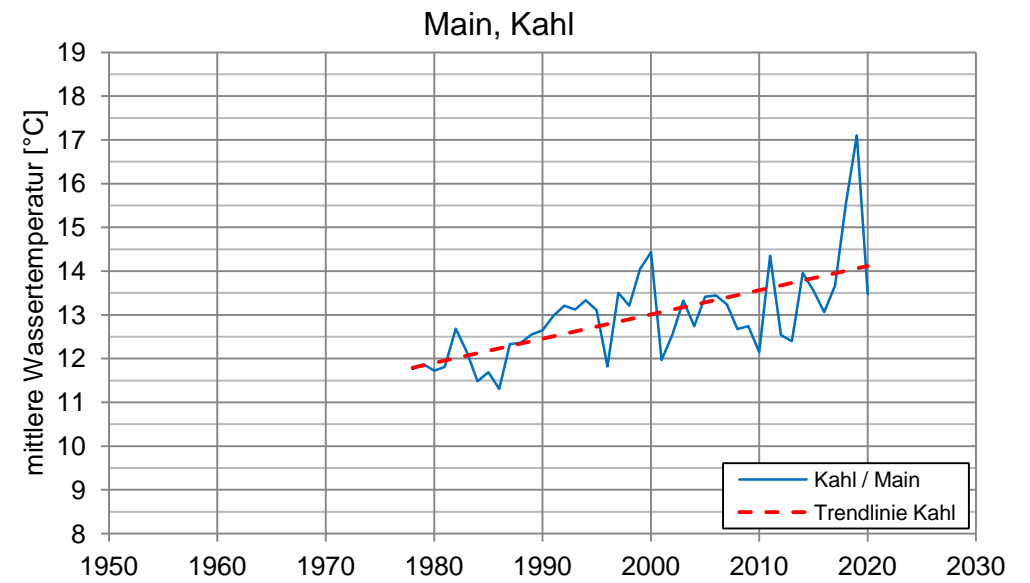
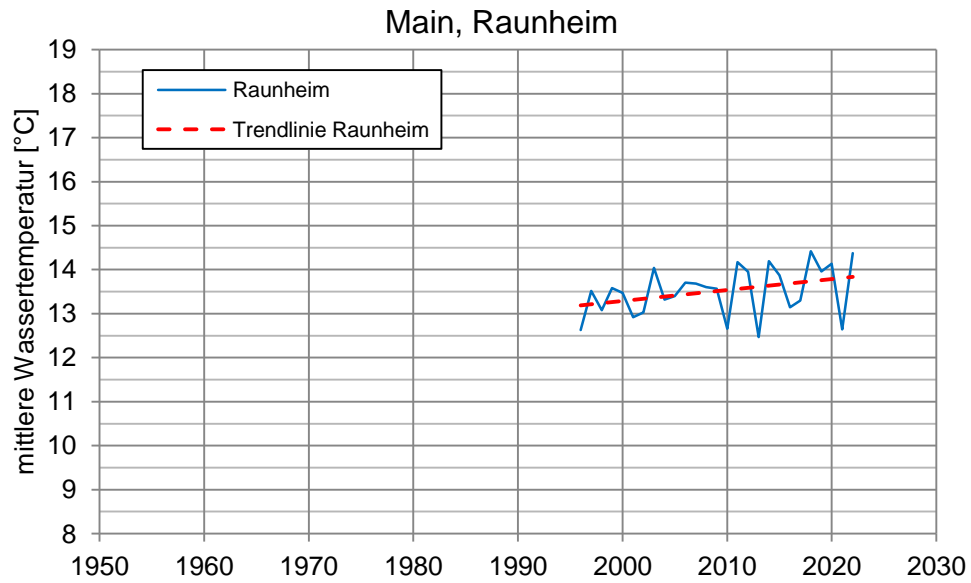


Bild 50: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur des Main für die Pegel (a) Raunheim, (b) Kahl, (c) Würzburg und (d) Schweinfurt

5.3.1.3. Temperaturlauswertungen im Neckargebiet

Der Neckar ist ein staugeregelter rechter Nebenfluss des Rheins und entspringt bei Schweningen auf einer Höhe von 705 mNN. Auf einer Länge von 380 km baut der Neckar eine Höhe von insgesamt 617 m ab, um auf 88 mNN bei Mannheim in den Rhein mit einem mittlerem Durchfluss von 145 m³/s zu münden. An seiner Mündung weist der Neckar ein Einzugsgebiet von 13.917 km² auf. Der Neckar wurde seit den 1920-iger Jahren ebenso wie der Main als Kraftwasserstraße ausgebaut und wird heute als Bundeswasserstraße betrieben, so dass er durch zahlreiche Stauhaltungen geprägt ist.

In der Vergangenheit wurden am Neckar zahlreiche thermische und nuklear betriebene Großkraftwerke errichtet, die den Neckar für ihren Kühlwasserbedarf nutzen bzw. genutzt haben. Dies kann neben der Klimaerwärmung einen Beitrag dazu geleistet haben, dass die Wassertemperatur im Neckar über viele Jahrzehnte angestiegen ist. Durch die Inbetriebnahme und später wiederum erfolgte Abschaltung der großen Kernkraftwerke hat der Neckar nicht die ausgeprägte Charakteristik der langzeitlichen kontinuierlichen klimabedingten Temperatursteigerung, wie sie bei anderen Gewässern zu beobachten ist.

Im Vergleich zum Rhein und seinen oben betrachteten Nebenflüssen Mosel und Main mit einer durchweg vorhandenen Tendenz der Zunahme der Gewässertemperatur zeigt sich beim Neckar zunächst eine uneinheitliche langzeitliche Tendenz. Die in Bild 51 dargestellten Verläufe der Temperaturen mit Hilfe der gemessenen Daten des LUBW [66] weisen für die Messpegel Mannheim und Neckargemünd über die vieljährige Trendlinie eine Abnahme der Gewässertemperatur auf. Für die Messpegel Stuttgart und Wendlingen lässt sich dahingegen eine Zunahme der Gewässertemperatur zeigen. Es liegt nahe, dass durch die Abschaltung der Kernkraftwerke am Neckar mit ihrem großen Bedarf an Kühlwasser die Gewässertemperatur sinkt. Dies lässt sich am Messpegel Mannheim bei Untersuchung des langzeitlichen Temperaturverlaufs nachweisen. Bei einer Unterteilung der langjährigen Trendlinie am Zeitpunkt der Abschaltung des Kernkraftwerks Obrigheim im Jahr 2005, welches sein Kühlwasser aus dem Neckar bezieht, wird deutlich, dass nach Abschaltung des Kernkraftwerks auf Grund der wegfallenden Kühlwassereinleitung ein signifikanter Sprung im Temperaturverlauf als auch in der Trendlinie des Neckars zu beobachten ist, wie Bild 52 verdeutlicht. Für die Entwicklung der Wassertemperaturen ab 2005 ist in Bild 52 eine kontinuierliche Zunahme der Gewässertemperatur infolge des Klimawandels besonders in den Sommermonaten zu beobachten, wie sie sich auch an anderen untersuchten Fließgewässern zeigt.

Ebenfalls weisen die anderen untersuchten Pegel des Neckars, Neckargemünd, Stuttgart und Wendlingen einen ähnlichen charakteristischen Verlauf der langzeitlichen Jahresmitteltemperatur auf. Bild 51 verdeutlicht, dass am Pegel Neckargemünd wie beim Pegel Mannheim der Wechsel im langzeitlichen Temperaturtrend verbunden mit einem Temperatursprung besonders stark ausgeprägt ist. Der Temperatursprung lässt sich auch hier mit der Abschaltung des AKW Obrigheim im Jahr 2005 zeigen, welches bei beiden Pegeln stromaufwärts liegt, siehe Bild 53. Bei den Pegeln Stuttgart und Wendlingen lassen sich in Bild 51 die Einflüsse der Hitzesommer 2003 und 2006 im Temperaturverlauf des Neckars nachweisen ebenso wie 2018. Wird von den Wärmeeinleitungen der Kraftwerke abgesehen, zeigen die langzeitlichen Temperaturverläufe in Bild 51, dass infolge des Klimawandels die an den verschiedenen Meßpegeln gemessenen Gewässertemperaturen auch am Neckar einen Anstieg im langjährigen Trend aufweisen.

Bild 53 zeigt, dass am Neckar zahlreiche große Wärmekraftwerke bestehen, die einen großen Bedarf an Kühlwasser aufweisen. Nach [64] führen diese Kraftwerke sowie weitere Wärmeeinleiter zu einer Wärmelast im Neckar von 2.600 MW. Auch die beiden Kernkraftwerke Obrigheim und Neckarwestheim haben bis zu ihrer Stilllegung 2005 und 2023 zu den Wärmeeinleitern des Neckars gehört. In Mannheim lagen nach [65] bis 2005 die mittleren Wassertemperaturen des Neckars für den Zeitraum von 2000 bis 2005 bei 14,8°C. Die Temperaturen waren damit um 0,93 K höher als die mittleren Temperaturen des Rheins mit 13,8°C. Der Neckar hat damit zu einer Aufwärmung des Rheins geführt. Mit Abschaltung des Kernkraftwerks Obrigheims hat sich die mittlere Wassertemperatur des Neckars im Zeitraum von 2006 bis 2010 auf 13,2°C reduziert. Damit ist der Neckar um 0,72 K kälter als der Rhein, der in diesem Zeitraum eine mittlere Wassertemperatur von 13,9°C in Mannheim aufgewiesen hat [65]. Insgesamt wird damit der Rhein seit 2006 rechnerisch um 0,1 K durch den Neckar abgekühlt.

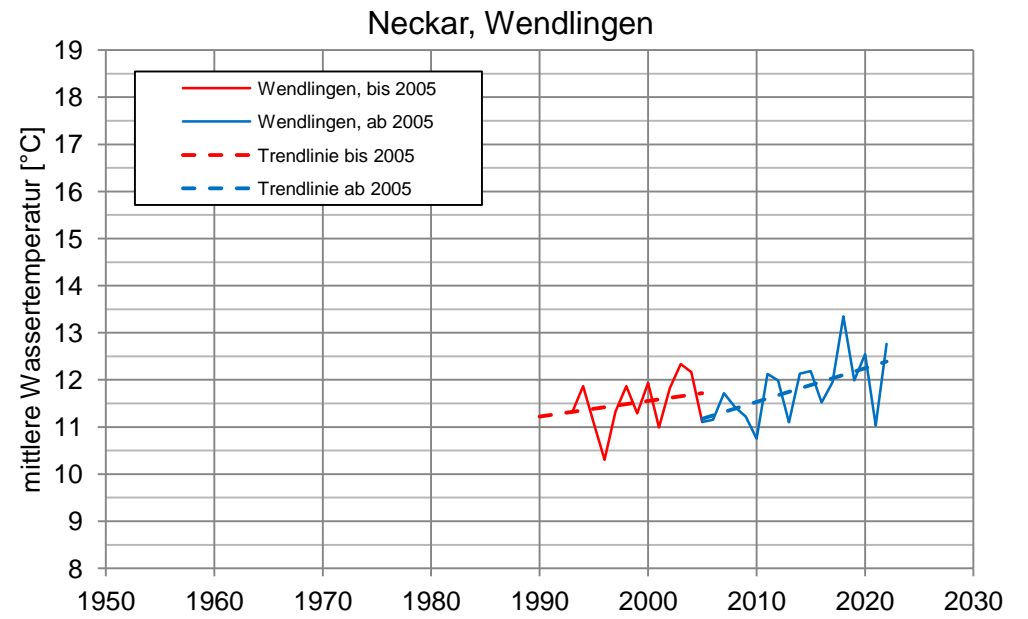
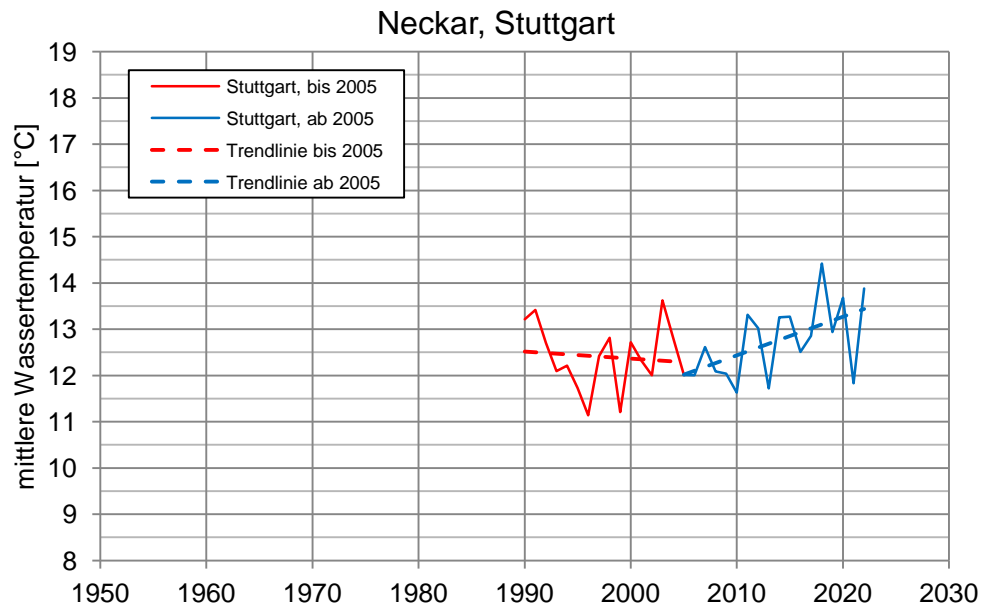
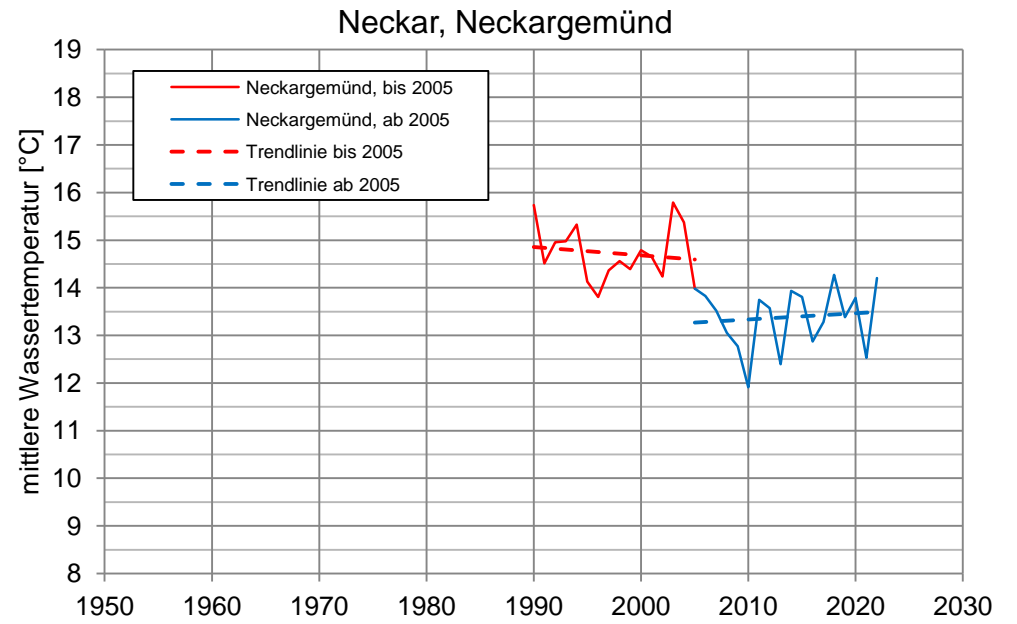
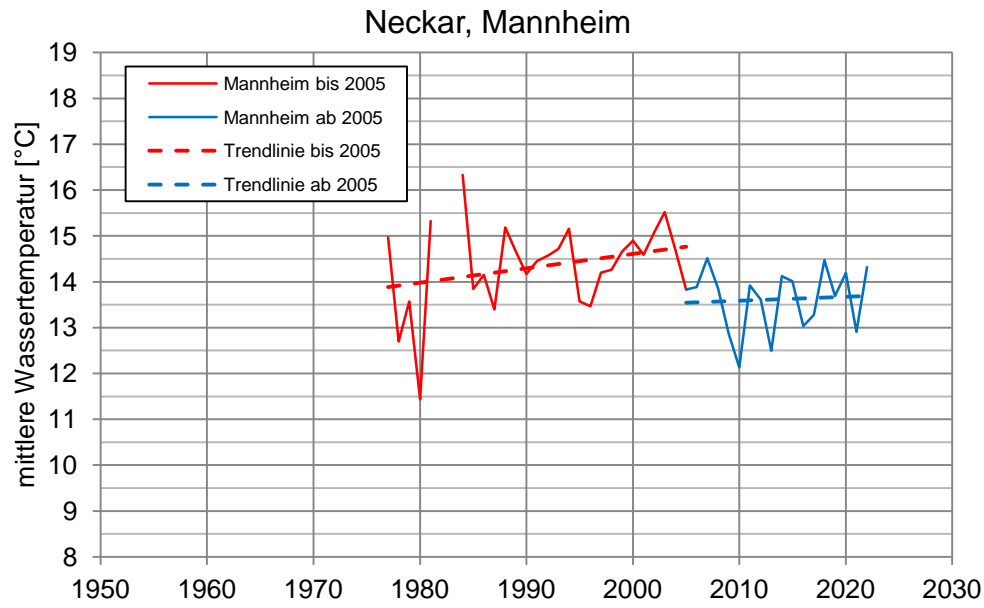


Bild 51: Verlauf der mittleren Wassertemperatur des Neckar für die Pegel Mannheim, Neckargemünd, Stuttgart und Wendlingen

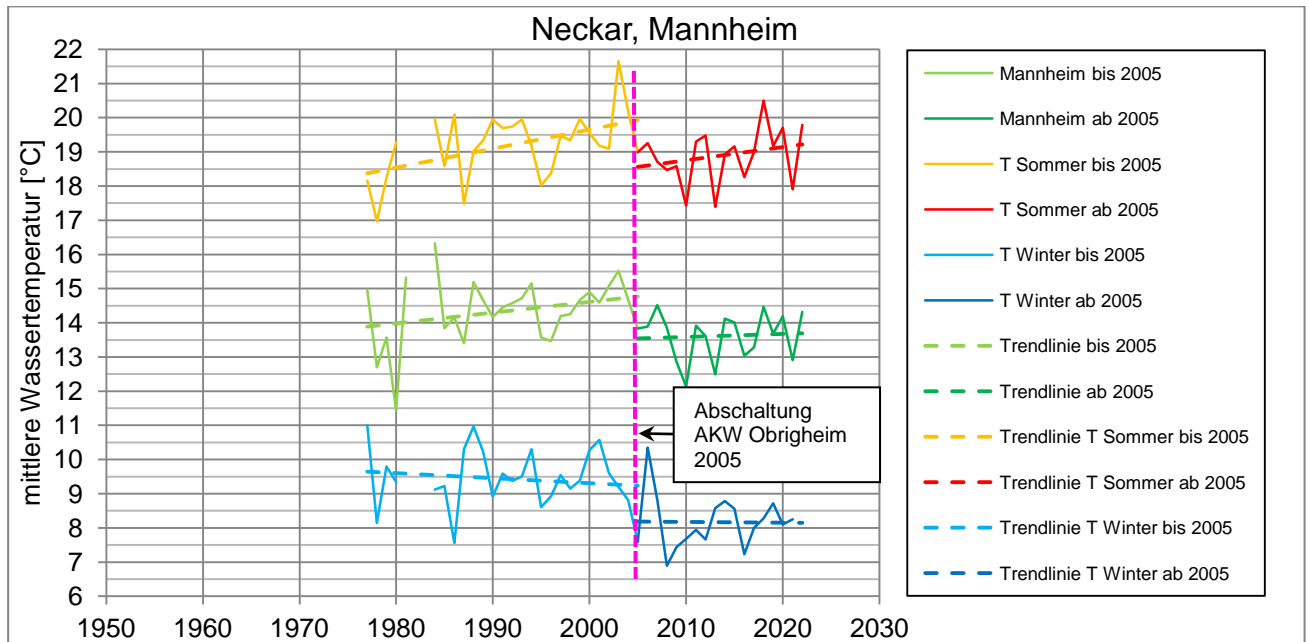
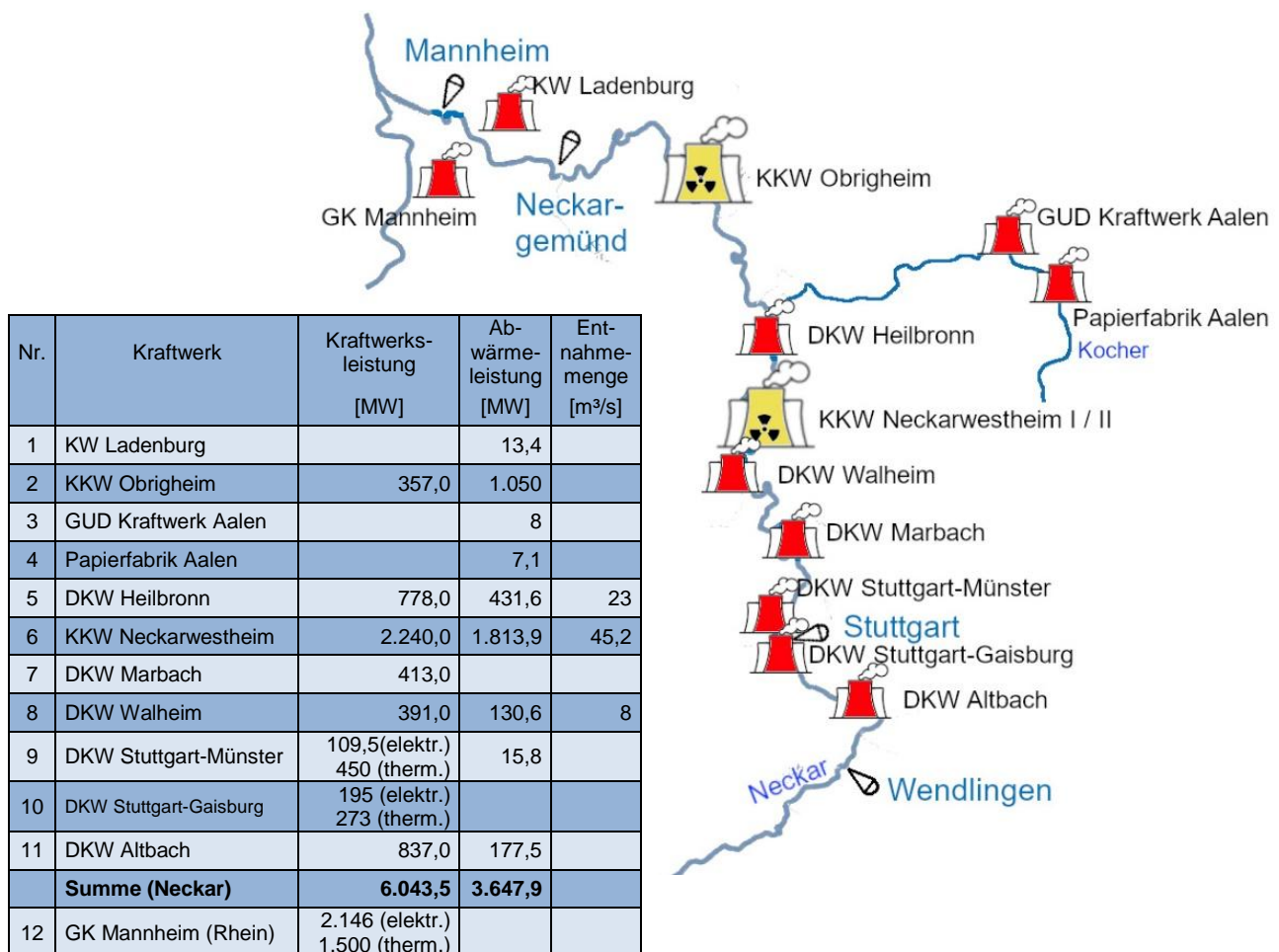


Bild 52: Verlauf der mittleren Wassertemperatur des Neckar für den Pegel Mannheim mit unterteilten Trendlinien für den Zeitraum vor und nach 2005



KKW – Kernkraftwerk
DKW – Dampfkraftwerk
GK- Großkraftwerk

Bild 53: Kraftwerke am Neckar, Kocher, Rhein und Messpegel am Neckar

5.3.2. Temperaturlauswertungen im Donaugebiet

Das Donaugebiet in Deutschland wird maßgeblich durch die von Süden kommenden Alpenabflüsse wie Iller, Lech Isar und Inn und durch die von Norden kommenden Mittelgebirgsabflüsse wie Altmühl, Naab und Regen geprägt. Darüber hinaus sind größere Flussabschnitte der Donau und ihrer Zuflüsse staugeregelt. Infolgedessen heizen sich die Gewässerabschnitte oberhalb von Stauhaltungen im Sommer weniger auf und kühlen im Winter nicht so stark aus, was in freifließenden Gewässern durchaus wahrscheinlicher ist. Die Auswertung der langzeitlichen Temperaturdaten erfolgt für den in Deutschland liegenden Gewässerabschnitt der Donau. Ebenfalls wird das langzeitliche Temperaturverhalten für die Donau-Nebenflüsse Isar, Lech und Inn untersucht. Auf Grund des alpinen und voralpinen Einzugsgebietes sind die rechten Nebenflüsse der Donau meist durch einen größeren Durchfluss im Sommer als im Winter geprägt. Darüber hinaus sind sowohl an der Donau als auch an ihren Zuflüssen wie Lech, Isar und am Unterlauf der Alz (Inn) zahlreiche Wärmeeinleiter mit Wärmeeinleitungen größer 10 MJ/s zu finden [57], die die Wassertemperaturen beeinflussen.

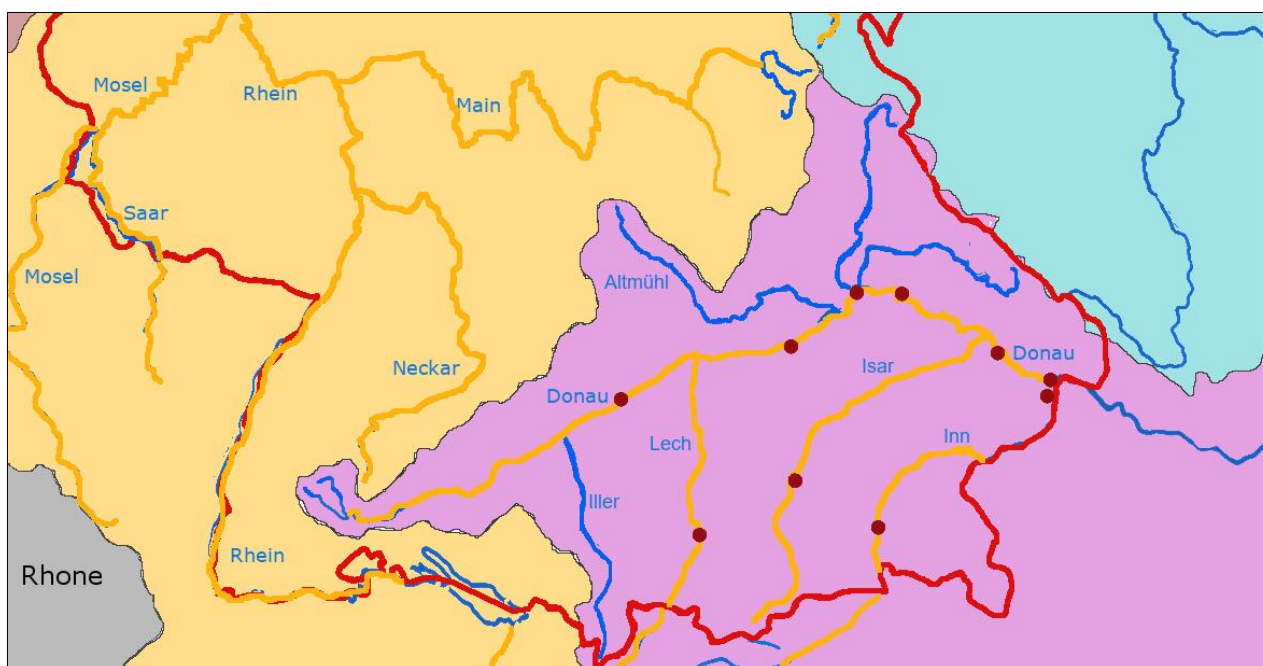


Bild 54: Untersuchte Pegel für Langzeit-Temperaturdaten im Donaugebiet

Die Auswertung der Temperaturdaten für das Donaugebiet erfolgt auf Grundlage der verfügbaren Daten des Gewässerkundlichen Dienstes Bayern [55], wo für viele Pegel die langzeitlichen Daten der Gewässertemperaturen vorliegen. Die untersuchten Pegel sind in Bild 54 dargestellt. Die mit Hilfe dieser Daten erfolgte Auswertung der jährlich gemittelten Gewässertemperatur zeigt in Bild 55 die Temperaturverläufe für die Donauegel Passau, Vilshofen, Straubing und Regensburg. Hier ist durchgehend ein Anstieg der Gewässertemperatur an der Donau im langzeitlichen Trend zwischen 2,97 K und 4,59 K zu beobachten, siehe Tabelle 24.

Pegel	Fließ-gewässer	Fluss-km	T _{Trend} [°C] 1950	T _{Trend} [°C] 1980	T _{Trend} [°C] 2020	ΔT _{Trend} [K] 1950-2020
Passau	Donau	2.225,50	9,63	10,90	12,60	2,97
Vilshofen	Donau	2.249,47	9,50	10,86	12,68	3,18
Straubing	Donau	2.321,29	8,09	10,06	12,68	4,59
Regensburg	Donau	2.376,49	8,14	9,82	12,06	3,92
Ingolstadt	Donau	2.457,85	8,11	9,80	12,04	3,93
Neu-Ulm	Donau	2.586,70	6,30	8,31	10,97	4,67
München	Isar	145,92	8,48	9,37	10,55	2,08
Rosenheim	Inn	185,50	6,26	7,28	8,63	2,37
Augsburg	Lech	38,65	8,08	9,46	11,29	3,21

Tabelle 24: Vergleich der Temperaturentwicklung an der Donau und den Zuflüssen Isar, Inn und Lech

Ein ähnlicher Temperaturanstieg liegt auch an den Pegeln der Nebenflüsse der Donau mit Augsburg am Lech, München an der Isar und Rosenheim am Inn.

Die Donau ist innerhalb Deutschlands zu einem großen Teil staugeregt und zum anderen Teil freifließend. Wie die Auswertung der mittleren Wassertemperaturen zeigen, steigt im staugeregelten Bereich die Gewässertemperatur weniger stark an als in den freifließenden Bereichen, da in staugeregelten Abschnitten größere Gewässertiefen und Wasserkörper vorzufinden sind als in den freifließenden Bereichen. In den Sommermonaten können sich hier Temperaturschichtungen ausbilden. Damit steigt die Gewässertemperatur während der Sommermonate in den staugeregelten Abschnitten der Donau weniger stark an als in den freifließenden Abschnitten mit geringerer Gewässertiefe, siehe Bild 56. Die mittleren Wassertemperaturen sind an den ausgewerteten Pegeln in den staugeregelten Abschnitten bis zu 1,5 K niedriger als in den freifließenden Abschnitten der Donau.

Die als Alpenabflüsse charakterisierbaren Flüsse Inn, Lech und Isar weisen ebenfalls über den langzeitlichen Verlauf einen Temperaturanstieg auf. Dieses Verhalten verdeutlicht Bild 57 anhand der Temperaturverläufe für die Pegel Augsburg, Rosenheim und München. Der Pegel Augsburg hat die Besonderheit, dass an diesem Pegel die Temperaturdaten für einen außergewöhnlich langen Zeitraum bis in das Jahr 1880 zurückliegen. Am Pegel Augsburg ist erkennbar, dass die Einflüsse in Folge des Klimawandels ab den 1950er Jahren sichtbar werden, wie in Abschnitt 5.1. gezeigt, und in den vorhergehenden Jahrzehnten die langzeitlichen Schwankungen der Gewässertemperatur wahrscheinlich auf andere Klimafaktoren zurückzuführen ist.

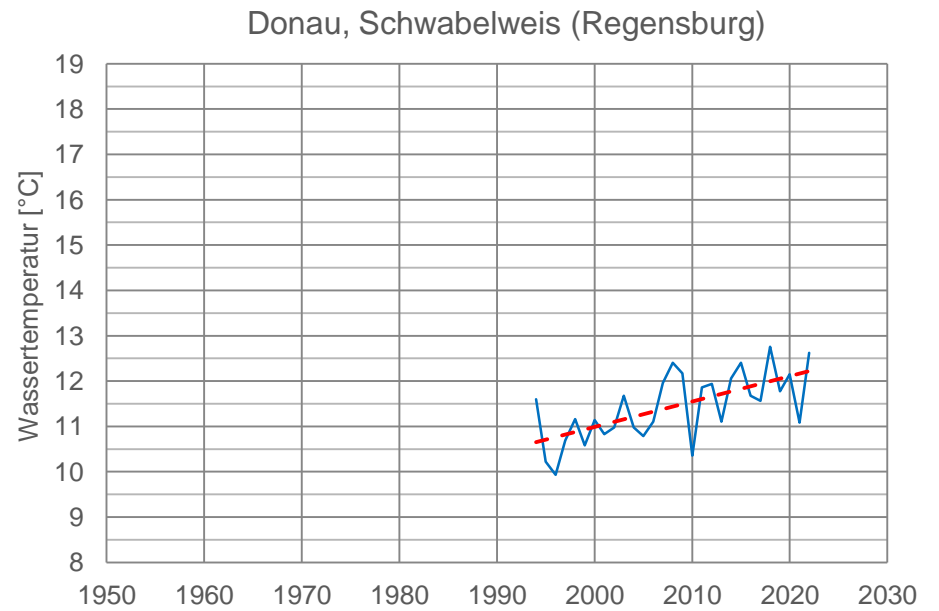
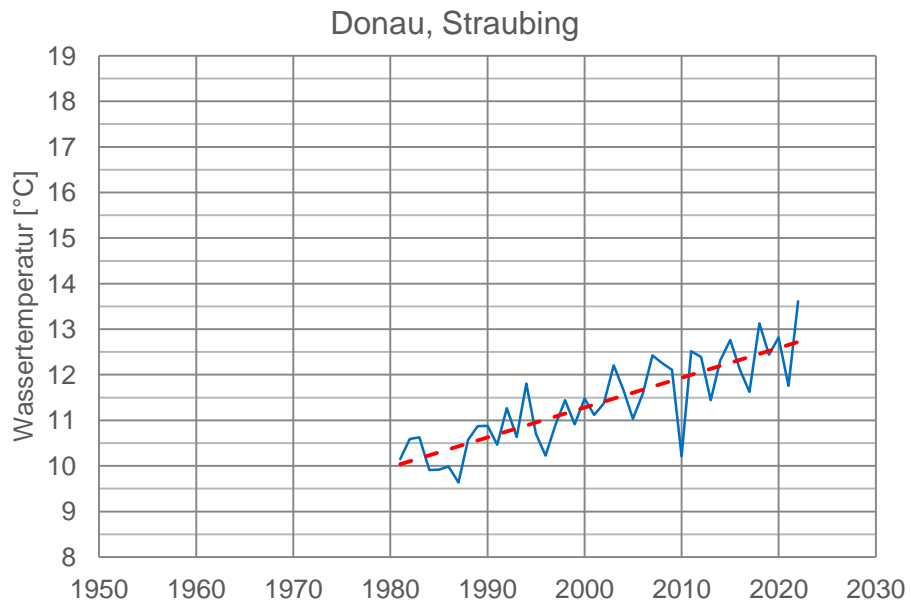
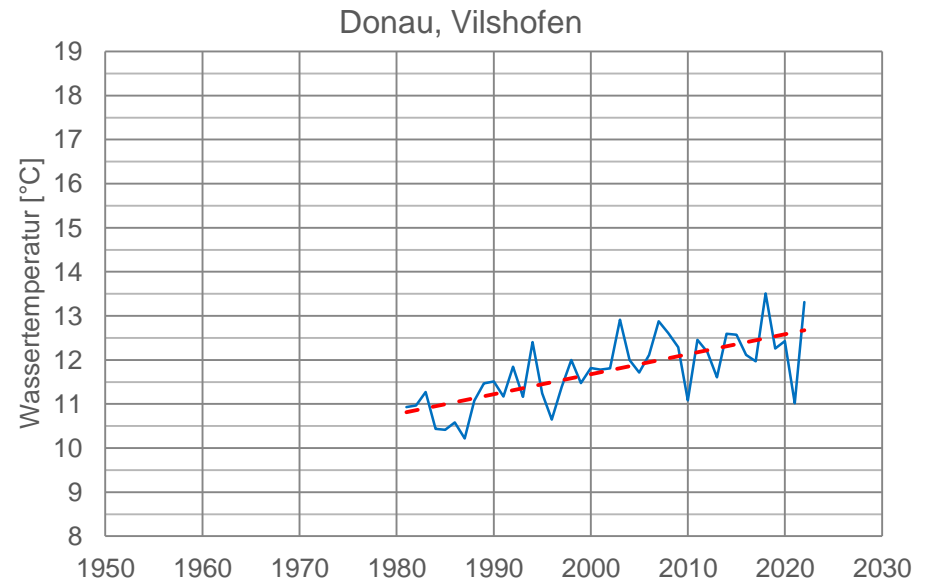
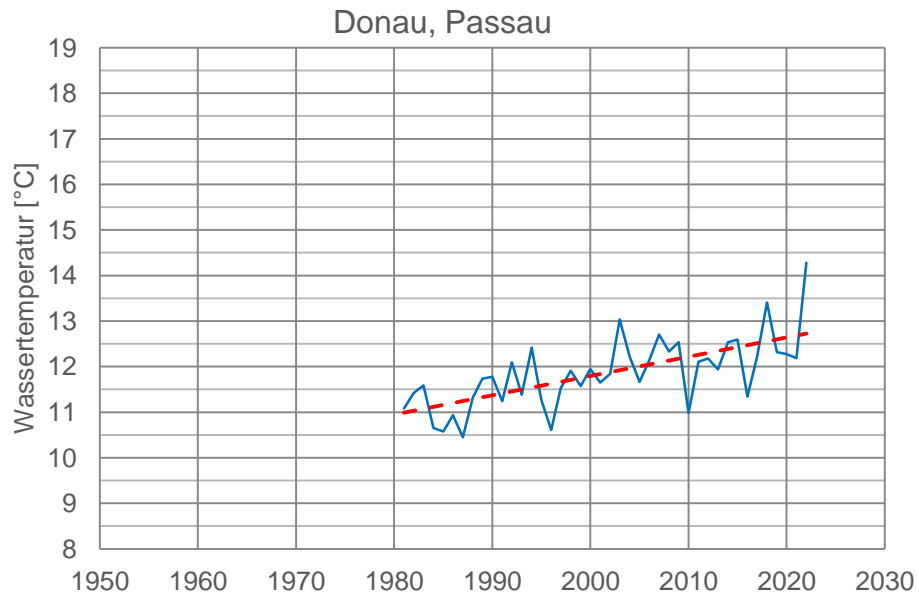


Bild 55: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur der Donau für die Pegel Passau, Vilshofen, Straubing und Schwabelweis (Regensburg)

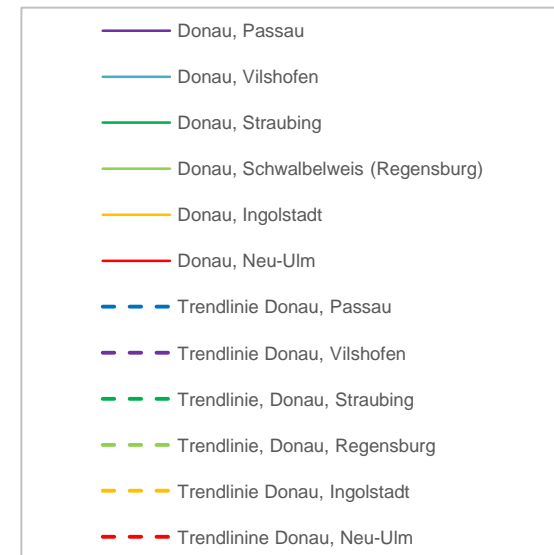
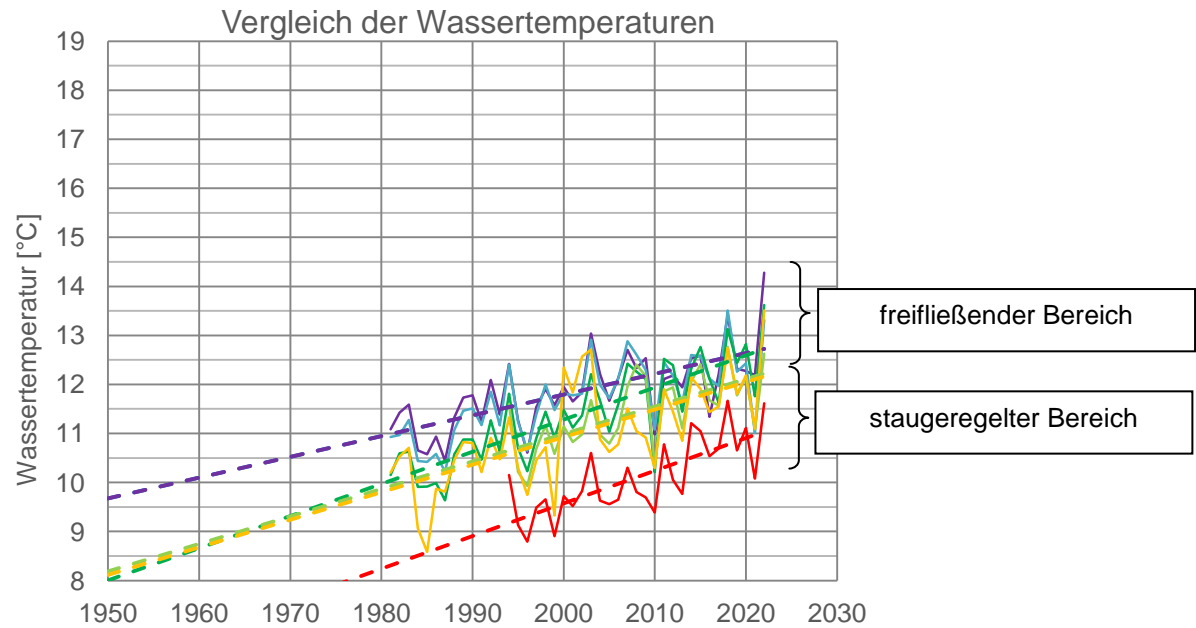
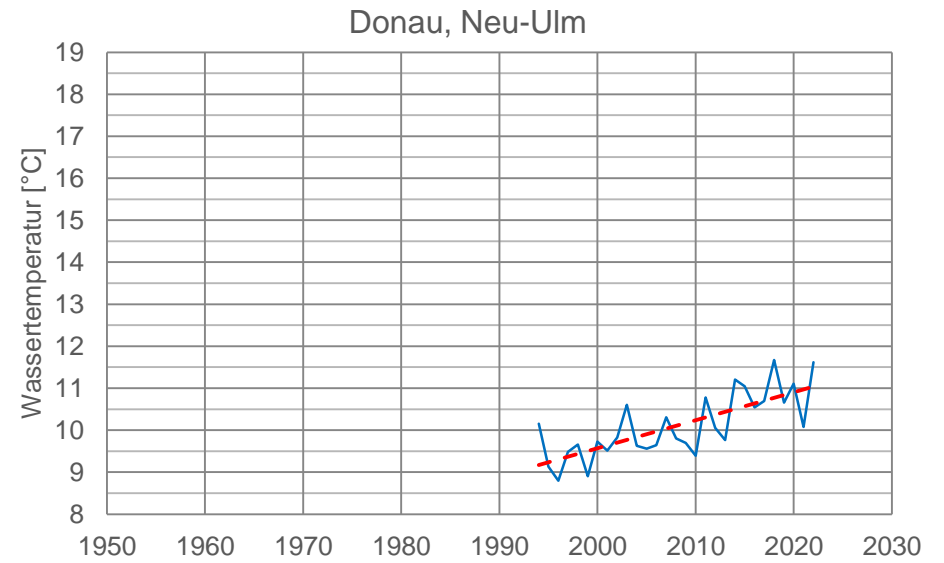
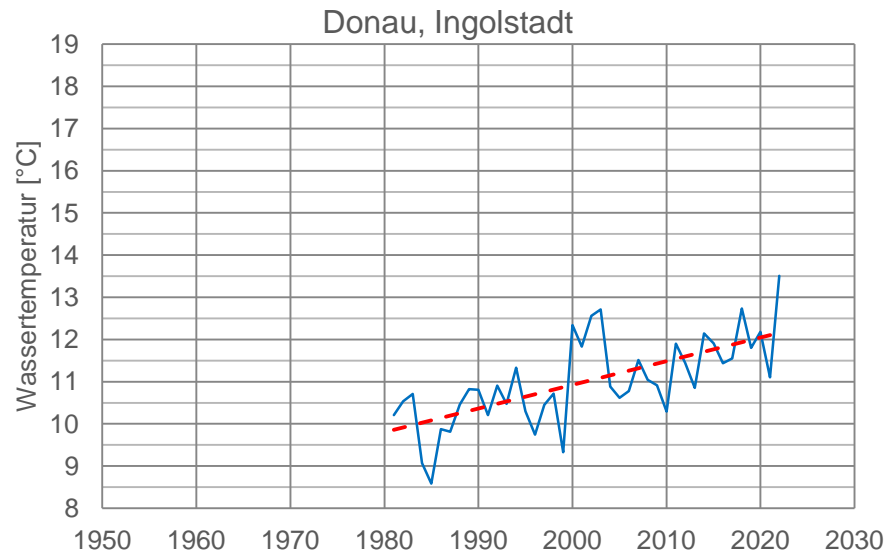


Bild 56: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur der Donau für die Pegel Ingolstadt, Neu-Ulm sowie Vergleich der Gewässertemperaturen der Donau

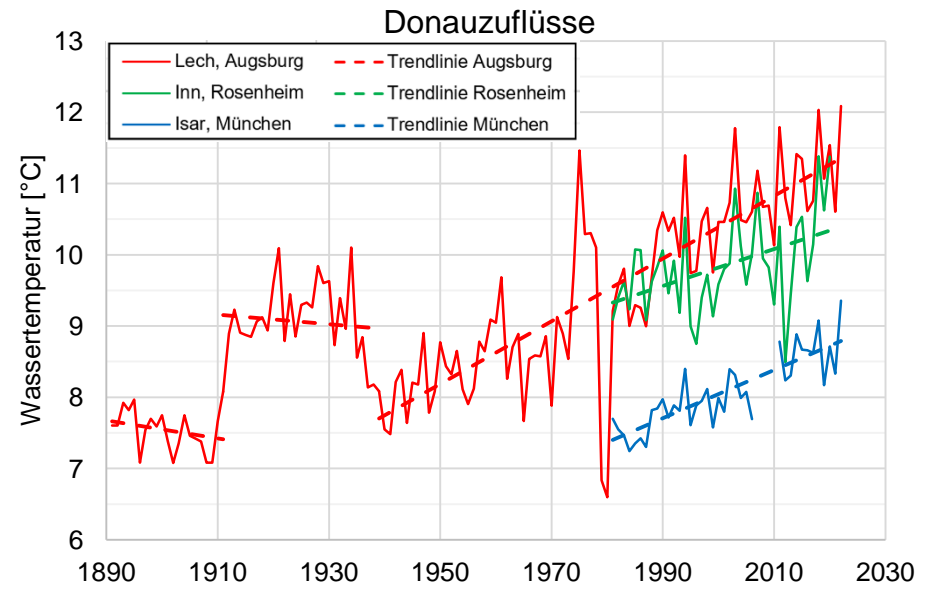
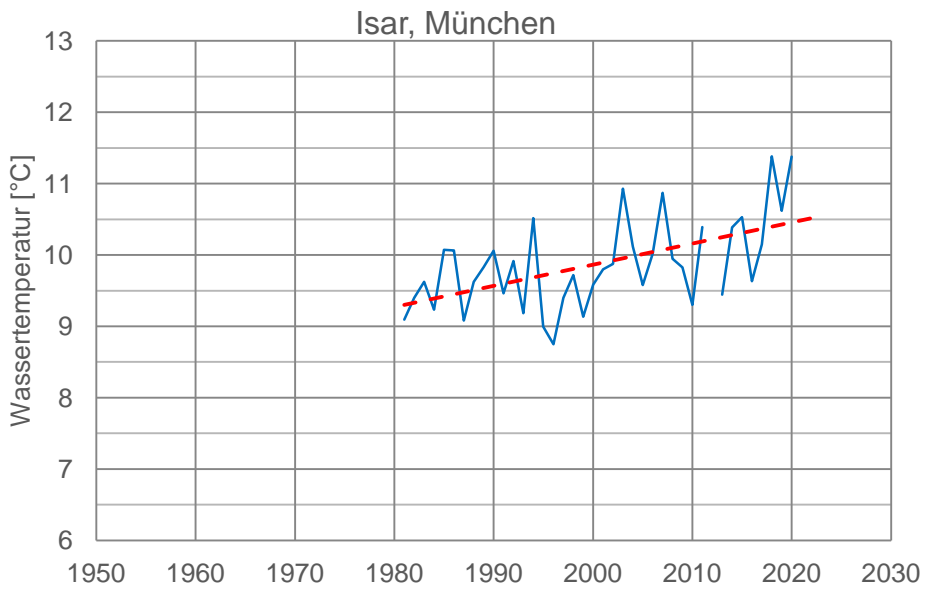
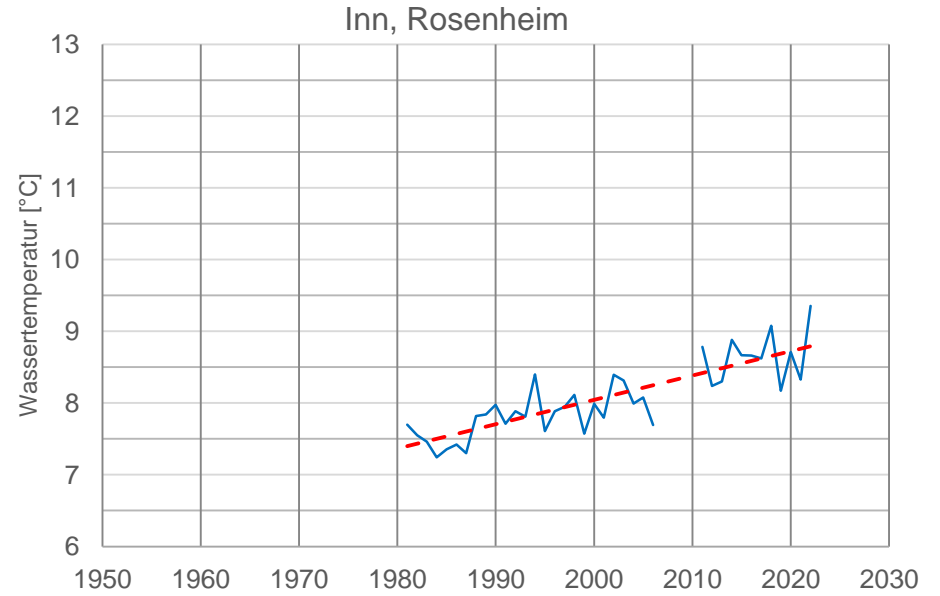
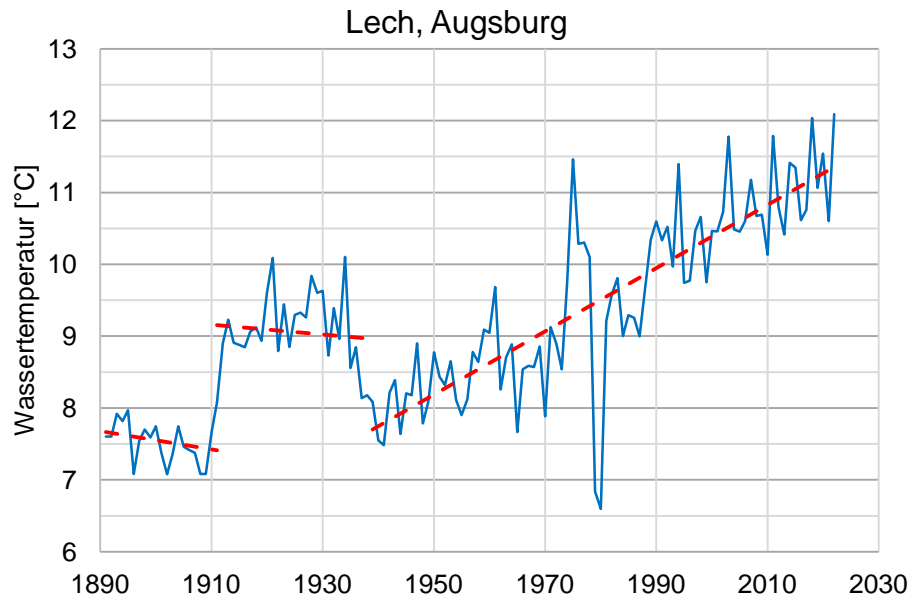


Bild 57: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur für die Pegel Augsburg, Rosenheim, München

5.3.3. Temperaturlauswertungen im Elbe- und Odergebiet

Das Elbegebiet in Deutschland wird maßgeblich durch die Mittelgebirgsabflüsse wie Saale, Mulde und Bode sowie die Flachlandflüsse Spree und Havel geprägt. Darüber hinaus beeinflussen ebenfalls die Nebengewässer der Elbe in Tschechien das Abflussverhalten und die Temperatur im sächsischen Elbabschnitt. An der Elbe liegen die 3 Großstädte Dresden, Magdeburg und Hamburg. In Bild 58 sind die untersuchten Temperatur-Meßpegel des Elbegebiets dargestellt. Die Auswertung erfolgt im Elbegebiet an 11 Pegeln von 6 Gewässern und im Odergebiet an zwei Pegeln.



Bild 58: Untersuchte Pegel der Wassertemperaturen im Elbe- und Odergebiet

Auf Grund der unvollständig veröffentlichten Daten im Elbegebiet sind nur wenige Auswertungen mit langfristigen Temperaturdaten möglich. Für eine genauere Auswertung ist in einem anschließenden Projekt eine weitergehende Recherche erforderlich. Die Temperaturdaten für die Durchführung der Langzeitauswertungen sind den Veröffentlichungen der Flussgebietsgemeinschaft Elbe entnommen, siehe [54].

Die Temperaturlauswertungen erfolgen für die Meßpegel in der Nähe der drei Großstädte sowie für die Nebengewässer Mulde, Saale, Weiße Elster, Havel und Spree. Die in Bild 59 dargestellten Temperaturverläufe zeigen, dass sich die Gewässertemperatur an den Pegeln der Elbe über den gesamten langjährigen Zeitraum signifikant erhöht haben. Dies ist wie bei den zuvor untersuchten Gewässern maßgeblich auf den Klimawandel zurückzuführen. Der Temperaturanstieg über den langzeitlichen Verlauf ist in Dresden, Magdeburg und Hamburg in ähnlicher Höhe ausgeprägt. Die Temperaturzunahme beträgt in Magdeburg 4,09 K und in Hamburg 3,25 K für den langzeitlichen Trend von 1950 bis 2022. Für Dresden wird auf Grund des geringeren Zeitraumes der vorhandenen Temperaturdaten die Temperaturdifferenz für den Zeitraum von 1996 bis 2021 bestimmt und beträgt bereits für diesen kurzen Zeitraum 0,5 K.

Im Gegensatz zu den Pegeln an der Elbe liegt an den Pegeln der Saale und an den anderen Nebenflüssen der Elbe bis auf die Havel eine deutlich geringere Datengrundlage vor, so dass langzeitliche Aussagen über die Temperaturentwicklung nur eingeschränkt möglich sind. Der Temperaturverlauf der Havel in Bild 60 zeigt wie bei den anderen Fließgewässern eine deutliche Temperaturzunahme. Im Vergleich mit der Temperaturentwicklung der Elbe ist in Bild 60 ersichtlich, dass Elbe und Havel eine ähnliche Temperaturentwicklung aufweisen, wobei die Trendlinie der Wassertemperatur der Havel eine höhere Temperaturdifferenz zeigt.

Die Oder fließt auf polnischem Boden durch ganz Schlesien und ist hier der größte Flusslauf. Sie weist eine Länge von fast 900 Kilometer von der Quelle bis zur Mündung in die Ostsee auf, wobei 163 Kilometer der Oder als deutsch-polnischer Grenzfluss zurückgelegt werden. Ein wichtiger Zufluss auf deutschem Gebiet ist die Lausitzer Neiße, die fast über ihre gesamte Länge als deutsch-polnischer Grenzfluss dient und bei Ratzdorf in die Oder mündet. Der mittlere Abfluss beträgt am Pegel Guben $30,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Temperatur an der Neiße wird am Neiße-Pegel un. Muskau ausgewertet. Bereits für den vorliegenden Zeitraum von 1990 bis 2020 lässt sich für die Neiße im vieljährigen Trend eine Temperaturerhöhung von rund $2,0 \text{ K}$ nachweisen, siehe Bild 61. Bei Fortschreibung des linearen Trends zurück bis 1950 ergibt sich daraus eine Temperaturdifferenz von $4,3 \text{ K}$. Für eine genauere Aussage sollten Wassertemperaturdaten aus dem Zeitraum vor 1990 hinzugezogen werden, die aber derzeit nicht vorliegen.

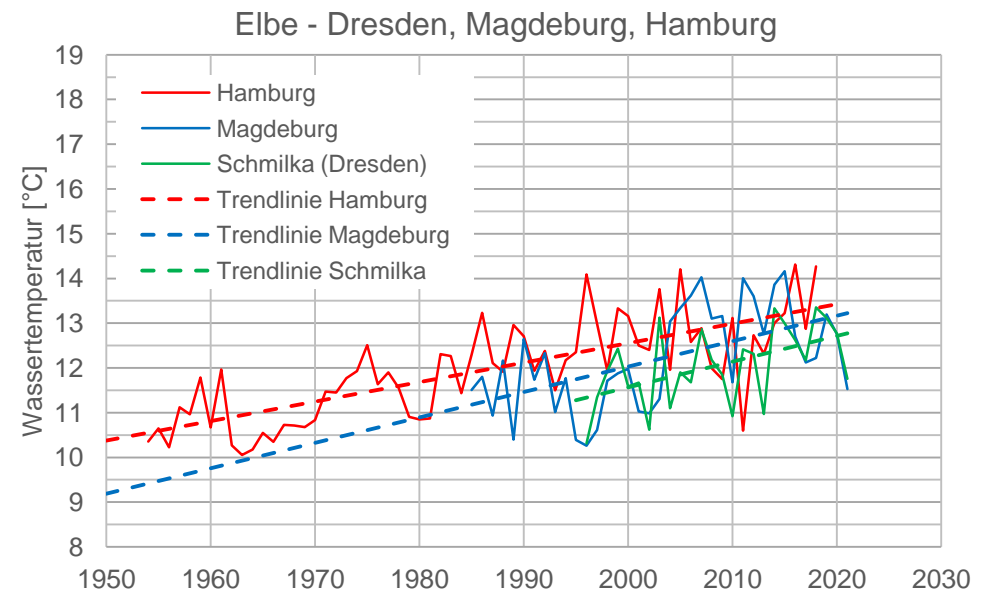
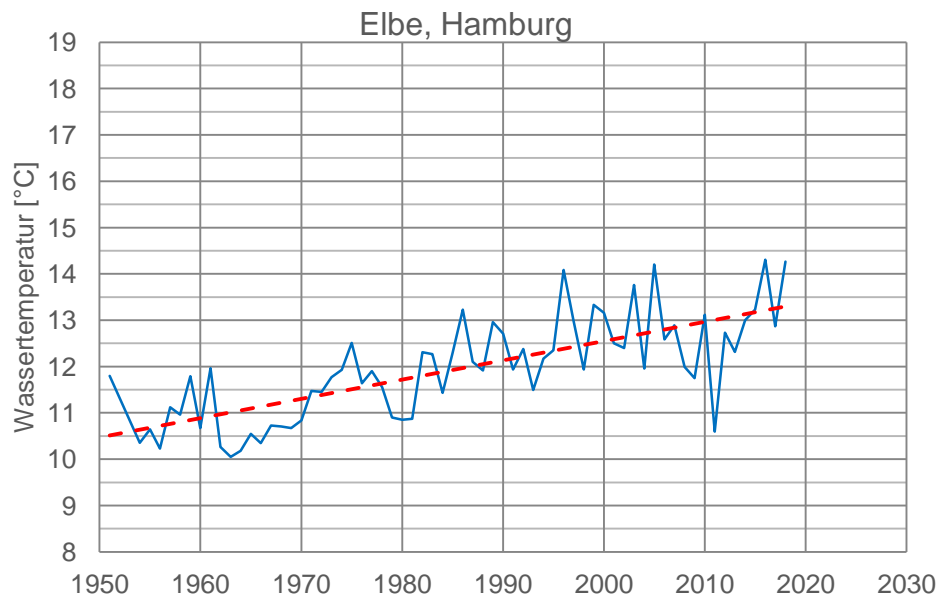
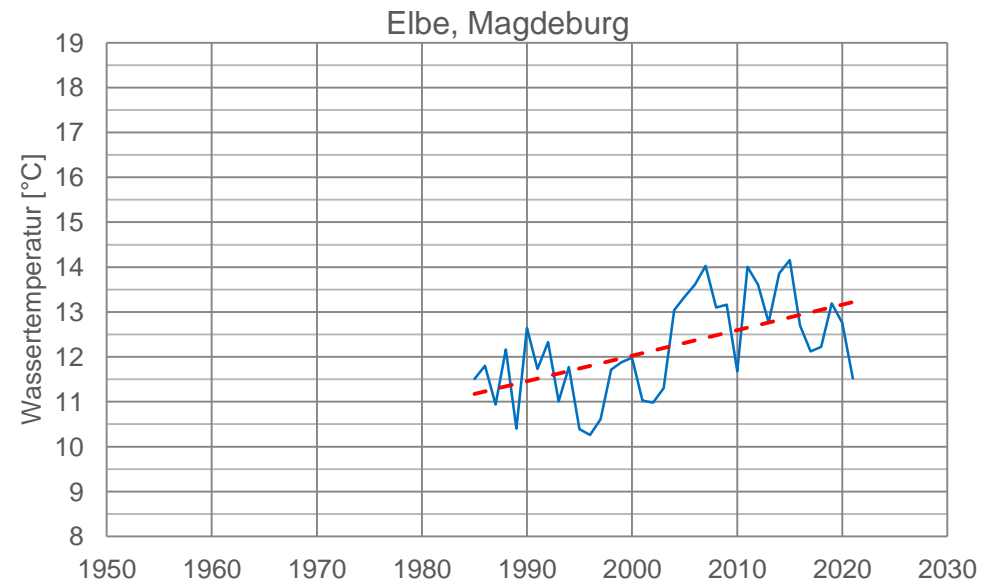
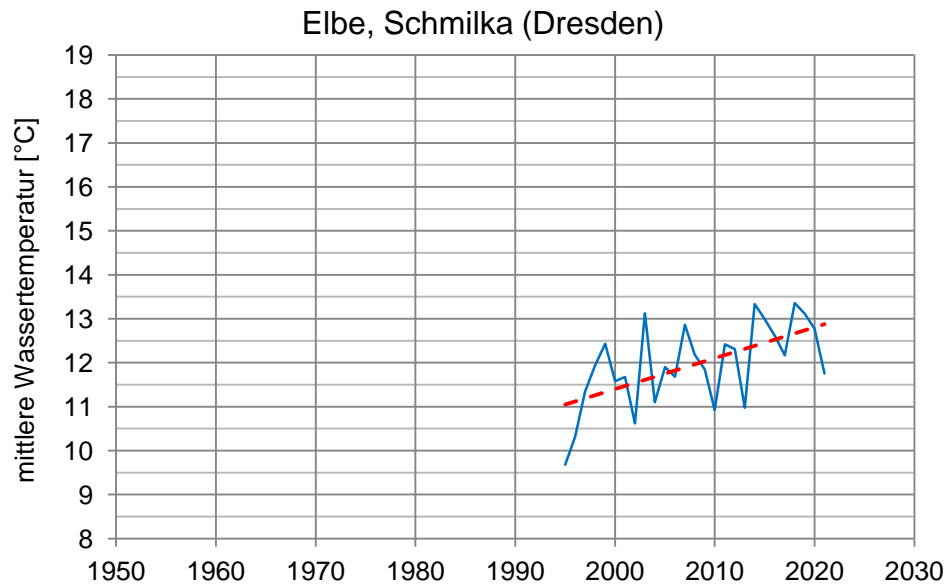


Bild 59: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur der Elbe für die Pegel Schmilka (Dresden), Magdeburg und Hamburg sowie Vergleich der Pegel

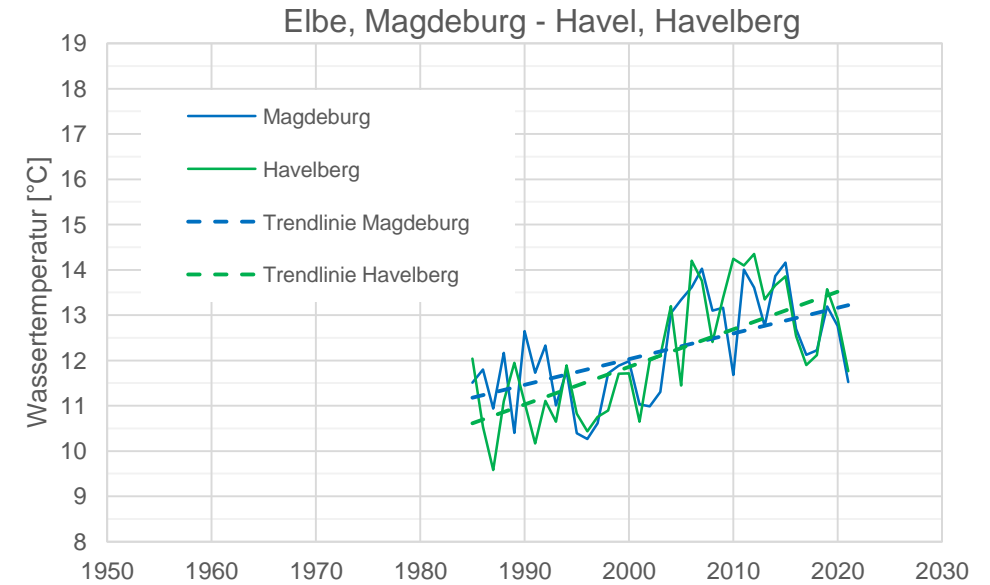
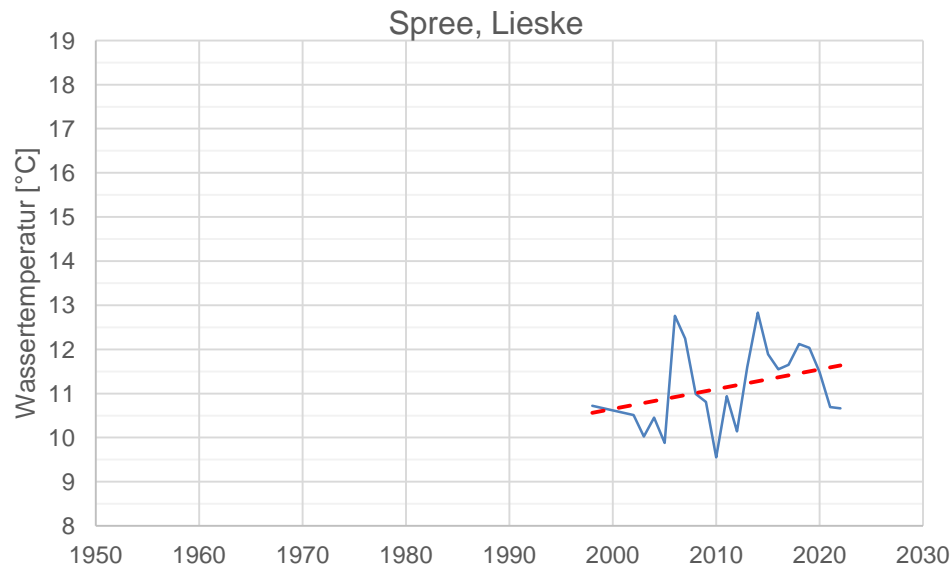
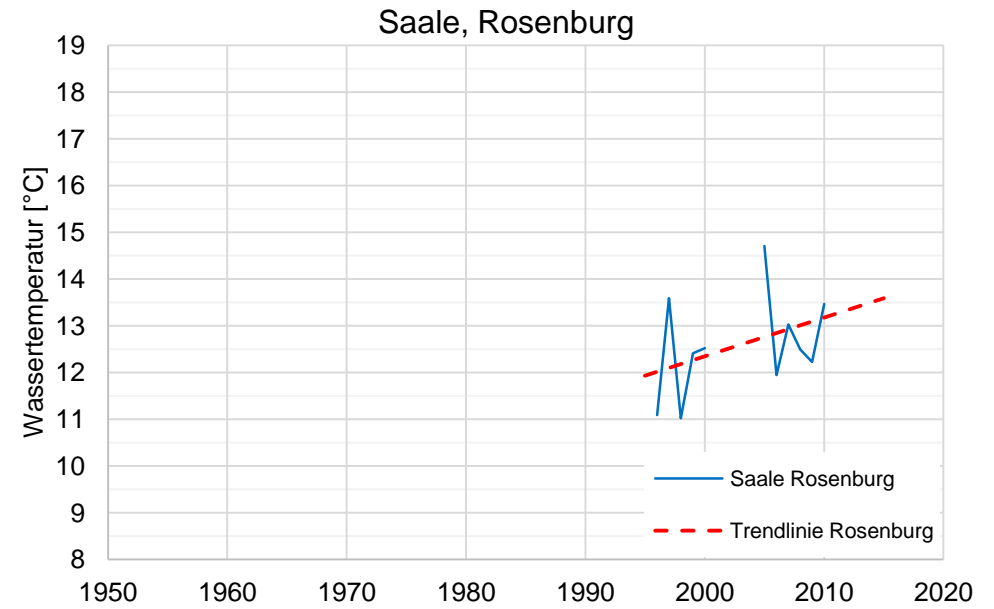
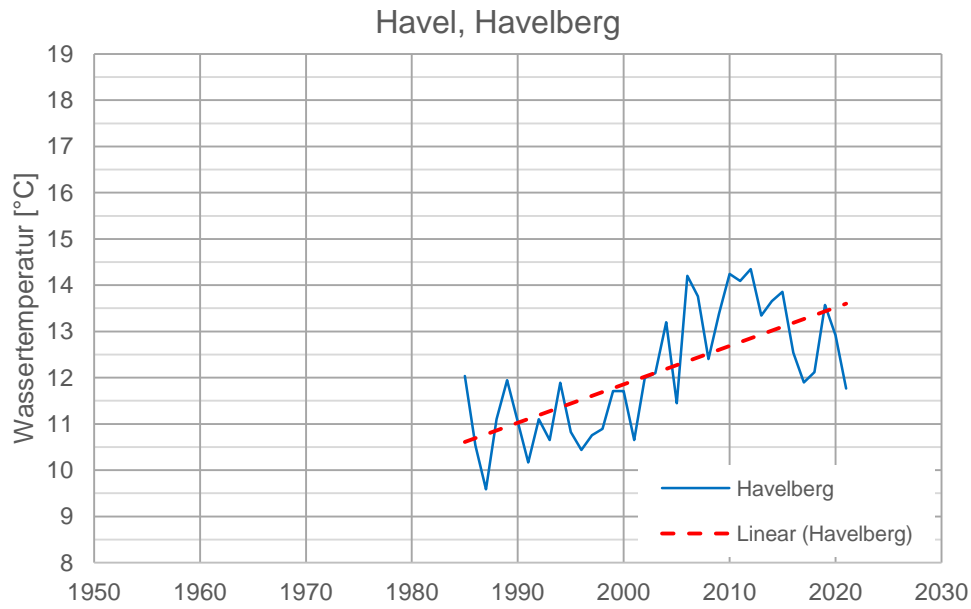


Bild 60: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur für Havel (Havelberg) und Saale (Rosenburg) sowie Vergleich der Pegel Magdeburg und Havelberg

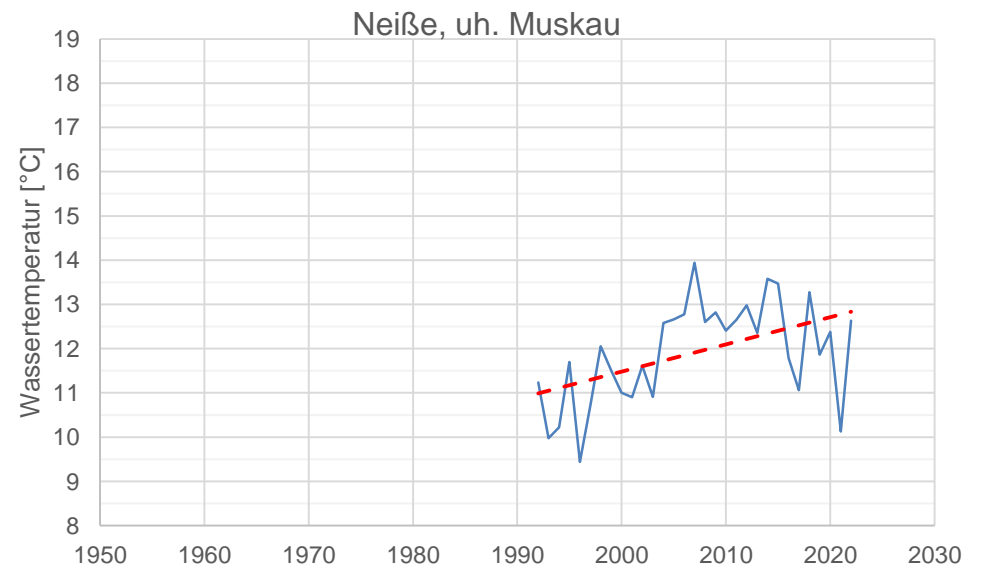
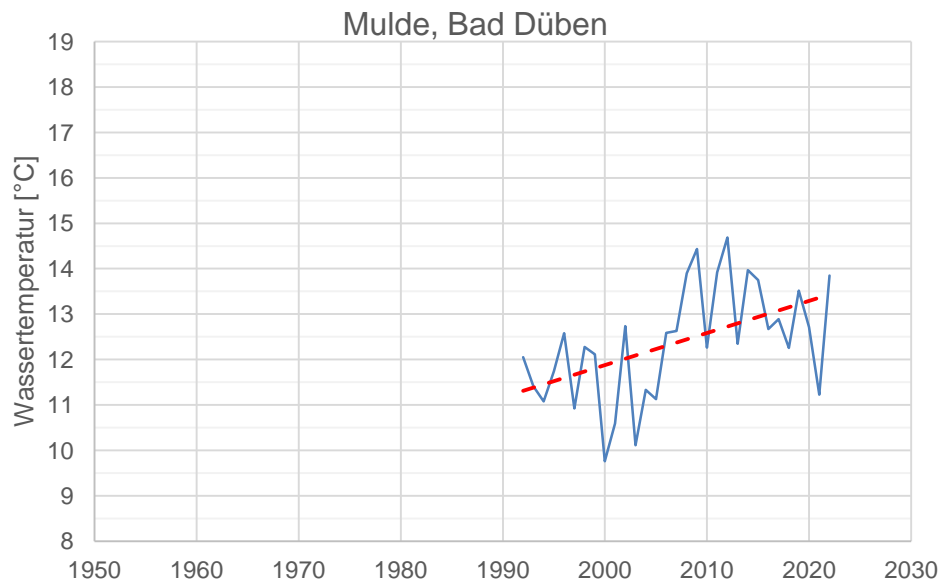
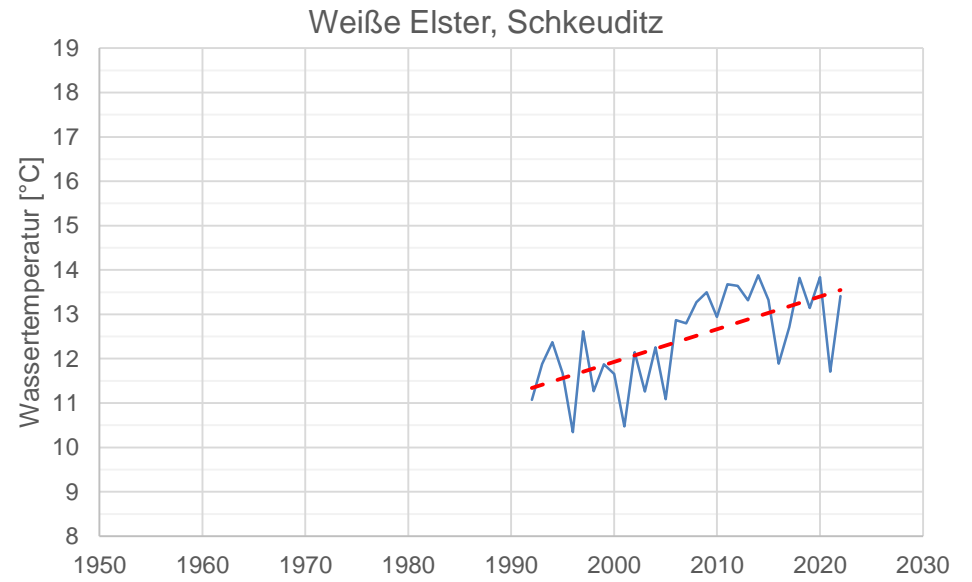
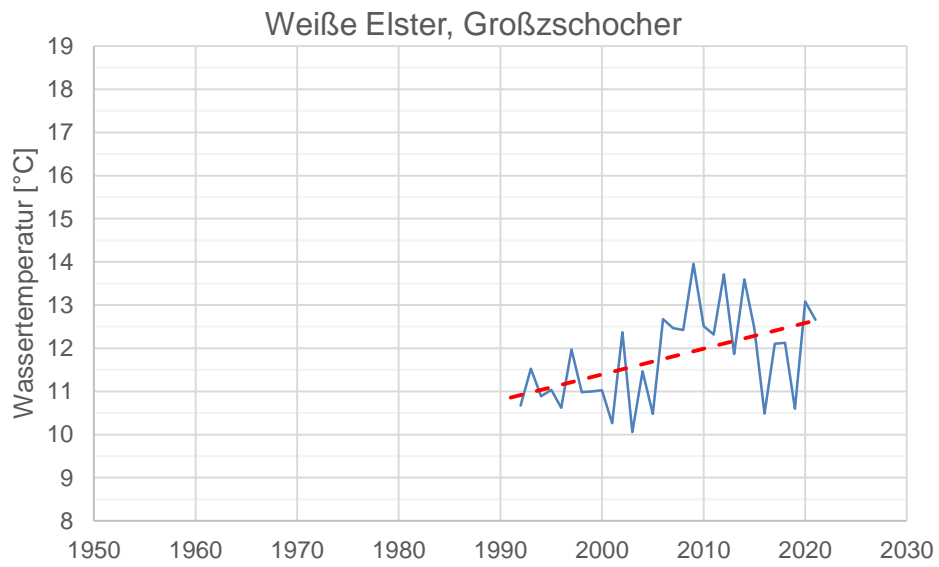


Bild 61: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur für Weiße Elster, Mulde und Neiße (Odergebiet)

5.3.4. Temperaturlauswertungen im Wesergebiet

Die Weser entsteht aus dem Zusammenfluss von Fulda und Werra in Hann. Münden. Die Fulda hat einen mittleren Durchfluss in Guntershausen von 57,2 m³/s und die Werra in Hann. Münden von 50,1 m³/s. Im Bereich des Zusammenflusses zur Weser beträgt der mittlere Durchfluss 113 m³/s [67]. Von Hann. Münden fließt die Weser als Oberweser durch das Weserbergland bis zur Porta Westfalica. In diesem Bereich befindet sich mit Hameln die einzige Staustufe der Oberweser. Im Bereich der sich unterhalb anschließenden Mittelweser kreuzt der Mittellandkanal den Fluss. Darüber hinaus befinden sich im Bereich der Mittelweser die 7 Staustufen Minden, Petershagen, Schlüsselburg, Landesbergen, Drakenburg, Dörverden, Langewedel und Bremen-Hemelingen zur Regulierung des Flusses. Die Staustufe Bremen-Hemelingen stellt die Grenze zwischen der Mittel- und der Unterweser dar. Die Unterweser und die sich daran anschließende Außenweser sind von der Tide der Nordsee beeinflusst. Der Tideinfluss der Nordsee beeinflusst damit in diesem Weserabschnitt die Nutzung der Weser als Flusswärmequelle. Das Einzugsgebiet der Weser beträgt insgesamt 46.259 km².

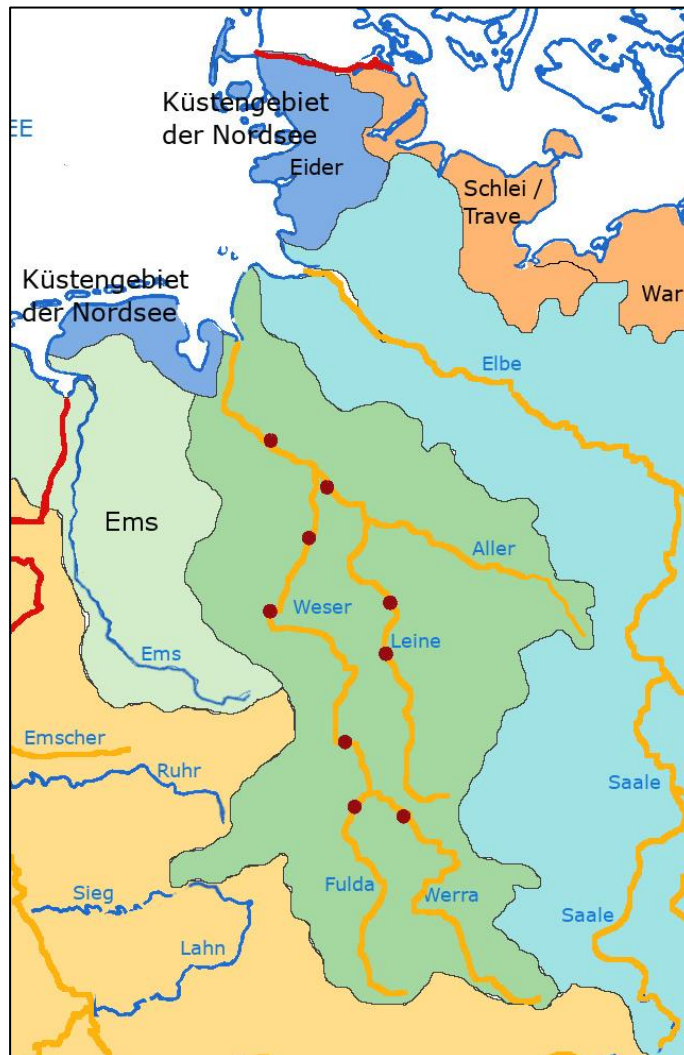


Bild 62: Untersuchte Pegel der Wassertemperaturen im Wesergebiet

Für die Auswertung der Entwicklung der Gewässertemperaturen im Wesergebiet sind die derzeit vorhandenen Daten nicht durchgehend vollständig und weisen größere Bereiche ohne Messwerte auf, siehe [68]. Darüber hinaus liegen für das Wesergebiet aktuell nur Temperaturwerte im 2-Wochen-Intervall vor, während in den anderen Flussgebieten tagesaktuelle Werte im Langzeitbereich vorhanden sind. Für die Auswertung der Gewässertemperaturen im Wesergebiet werden die Pegel Bremen-Hemelingen (Weser), Drakenburg (Weser), Petershagen (Weser), Hameln (Weser), Wahnhausen (Fulda), Witzhausen (Werra) und Verden (Aller) untersucht, die in Bild 62 dargestellt sind. Teilweise sind bei einigen Pegeln die Daten nicht vollständig, bestätigen aber trotzdem den

in vielen Gewässern in Deutschland zu beobachtenden Trend des langjährigen Anstiegs der Wassertemperaturen.

Auch für die Weser ist wie in den zuvor untersuchten Flussgebieten erkennbar, dass die Gewässertemperatur über die Jahre klimabedingt ansteigt. Der vieljährige Trend ergibt einen Anstieg der Gewässertemperatur der Weser über die Jahre 1950 bis 2020 in Bremen-Hemelingen von 2,3 K. Einen stärkeren Anstieg der Gewässertemperatur in der Weser lässt sich für die Standorte Petershagen mit 2,5 K, Drakenburg mit 3,2 K und Hemeln mit 3,8 K für den linearen Trend im Zeitraum von 1950 bis 2020 ermitteln, siehe Bild 63.

In Wahnhausen an der Fulda beträgt der Temperaturanstieg 2,2 K anhand des langjährigen Trends und an der Aller in Verden 1,5 K, wie Bild 64 zeigt. In Verden sind ebenso wie an der Werra die Daten nur sehr lückenhaft, so dass für eine endgültige Aussage des Langzeittrends weitere Temperaturmessungen über einen längeren Zeitraum benötigt werden. In Bild 64 ist auch die Trendentwicklung der Wassertemperaturen seit 1950 dargestellt. Daran lässt sich feststellen, dass sowohl bei der Weser als auch bei den Nebengewässern ein Anstieg der Gewässertemperatur von 2 K und mehr vorliegt.

Darüber hinaus liegen für die Leine für die Messpegel Neustadt am Rübenberge und Poppenburg die vieljährigen Zeitreihen für die Wassertemperatur für den Zeitraum von 1980 bis 2010 vor [69]. Bild 65 zeigt die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur sowie des Jahresminimums und des Jahresmaximums für die Messpegel Neustadt am Rübenberge und Poppenburg. Bei den mittleren Wassertemperaturen ist bei beiden Pegeln ein Anstieg von 1 K im Betrachtungszeitraum zu beobachten. Wird die Projektion der Trendlinie bis 2020 berechnet, zeigt sich, dass zum einen die Jahresmitteltemperatur im betrachteten Zeitraum in Poppenburg um 1,6969 K an und in Neustadt um 1,452 K ansteigen, siehe Tabelle 25. Die Temperaturerhöhung pro Dekade liegt am Pegel Neustadt a. R. bei 0,424 K/10a und am Pegel Poppenburg bei 0,363 K/10a. Ein stärkerer Anstieg ist bei den Maximaltemperaturen beider Pegel zu verzeichnen – hier ergibt sich ein Temperaturanstieg von 2 K, wie in Bild 65 ersichtlich. Als Ursache kann der Klimawandel und die damit verbundenen, sommerlichen Extremwetterereignisse mit hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum gesehen werden. Der Anstieg der jährlichen Minimaltemperatur der Leine ist dahingegen weniger stark ausgeprägt. Eventuell besitzen die höheren Luft- und Wassertemperaturen infolge des Klimawandels einen gewissen dämpfenden Einfluss auf die Ausprägung der Minimaltemperaturen.

Messpegel Standort	Fluss	Jahr Beginn [a]	Jahr Ende [a]	Daten-Zeitraum [a]	Temperatur Beginn [°C]	Temperatur Ende [°C]	Temperatur-Differenz [K]	Temperaturerhöhung pro Dekade [K/10a]
Neustadt a. R.	Leine	1980	2020	40	11,251	12,947	1,696	0,424
Poppenburg	Leine	1980	2020	40	10,259	11,711	1,452	0,363

Tabelle 25: Vergleich der Temperaturentwicklung an der Leine

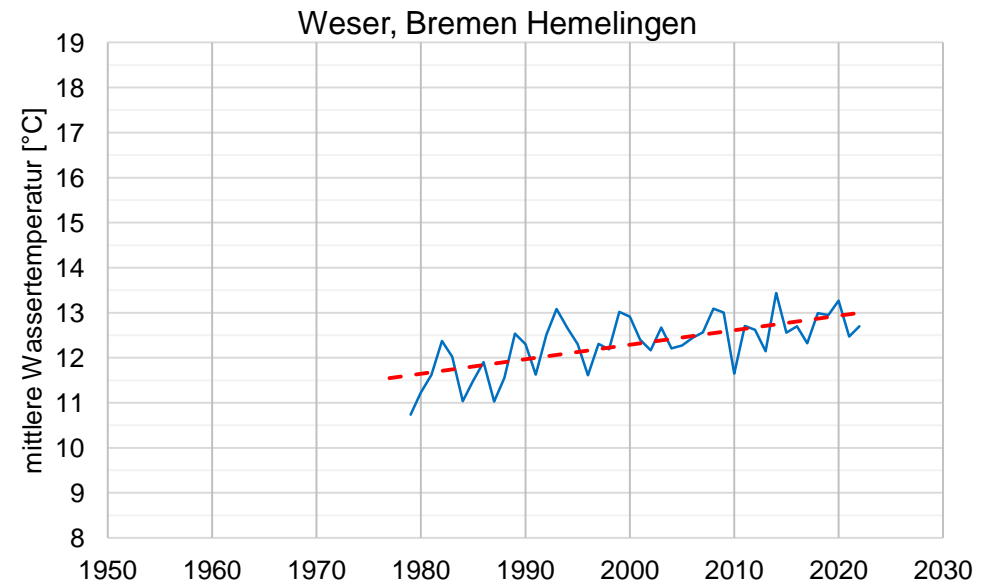
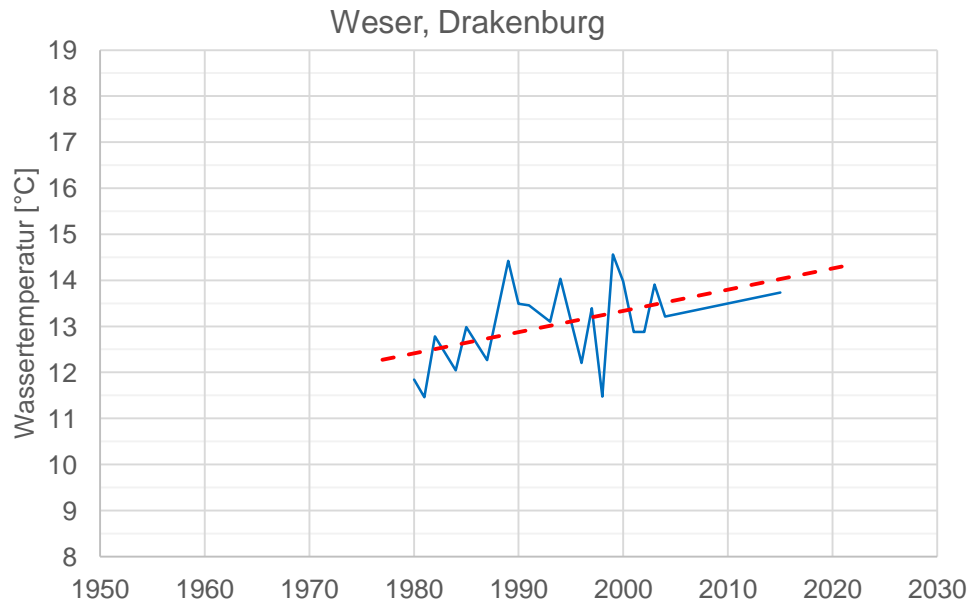
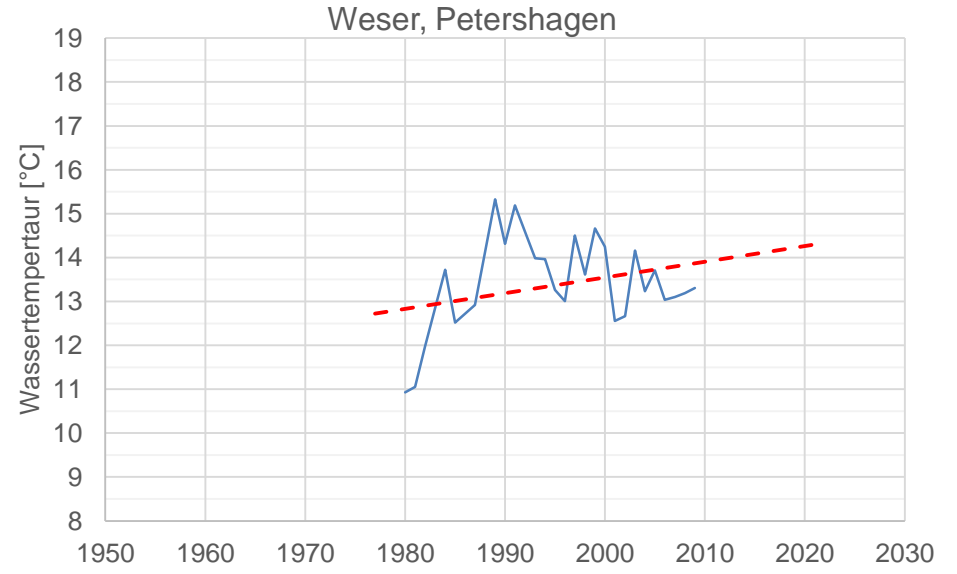
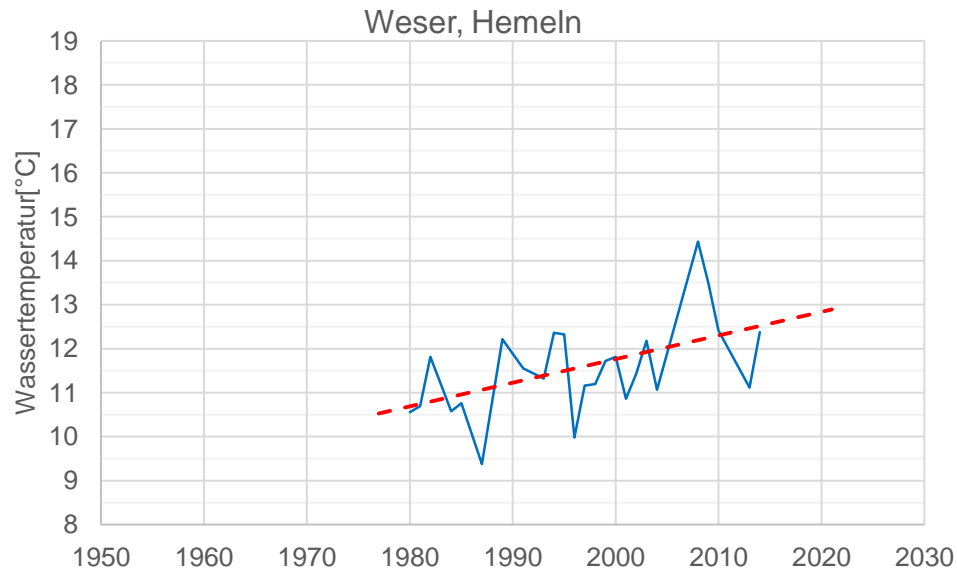


Bild 63: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur für die Weser in Hemeln, Petershagen Drakenburg und Hemelingen

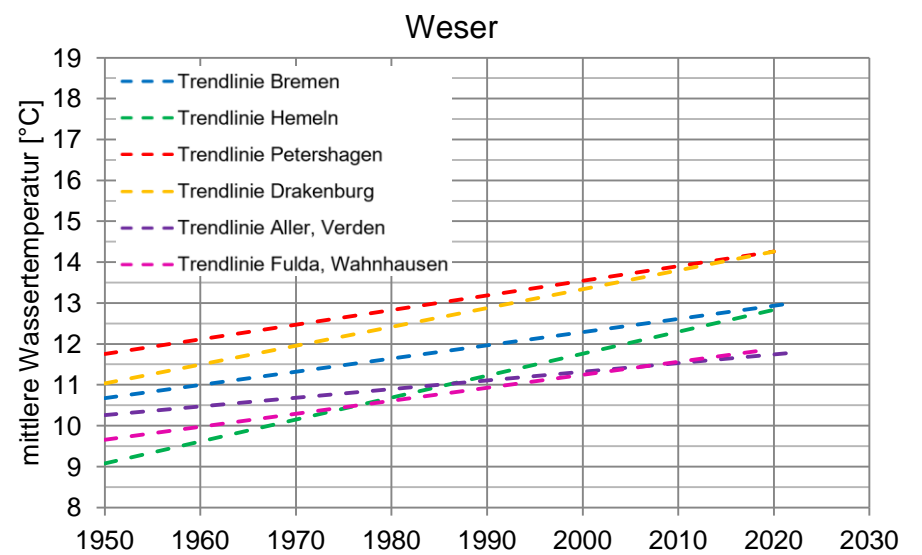
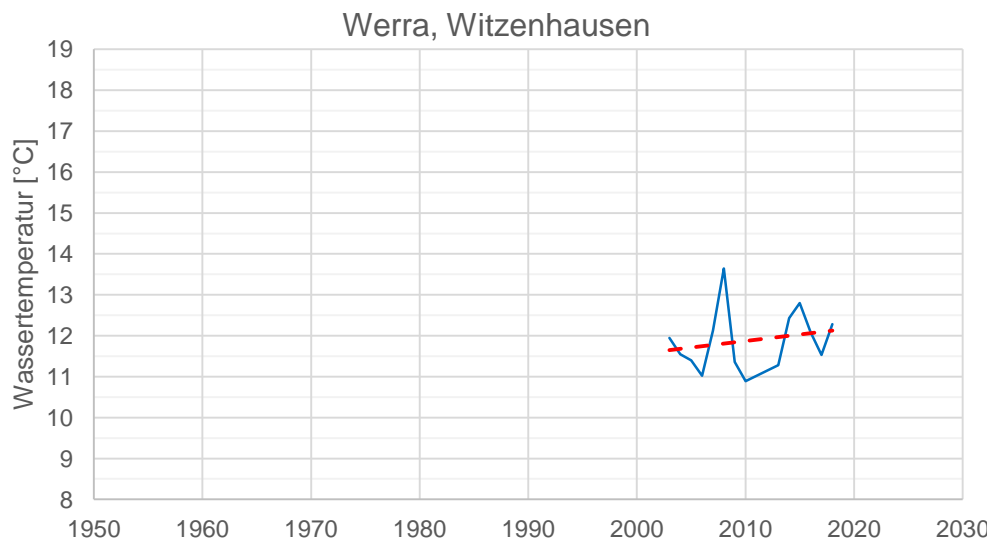
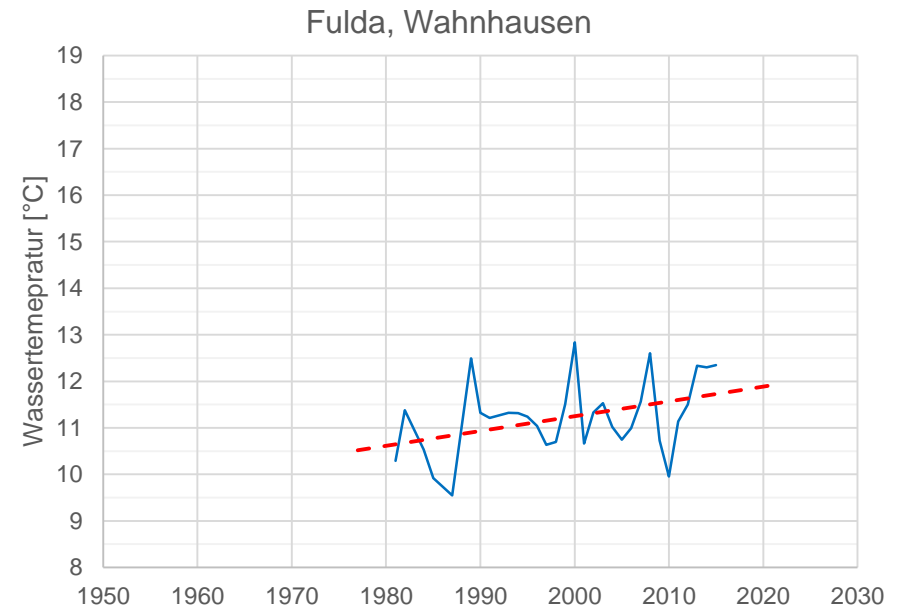
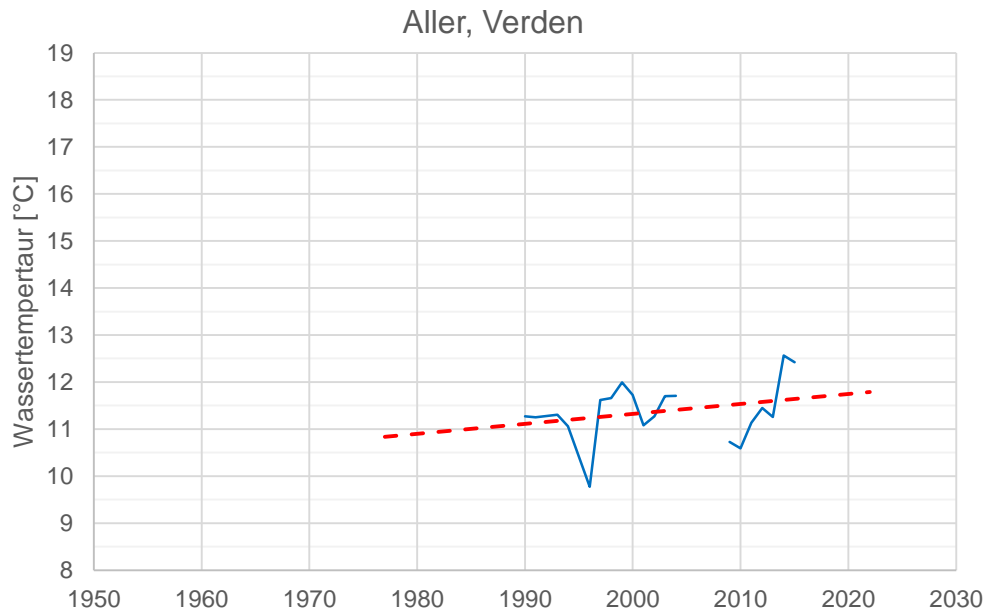


Bild 64: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur für die Aller, Fulda und Werra sowie der Vergleich der Trendlinien

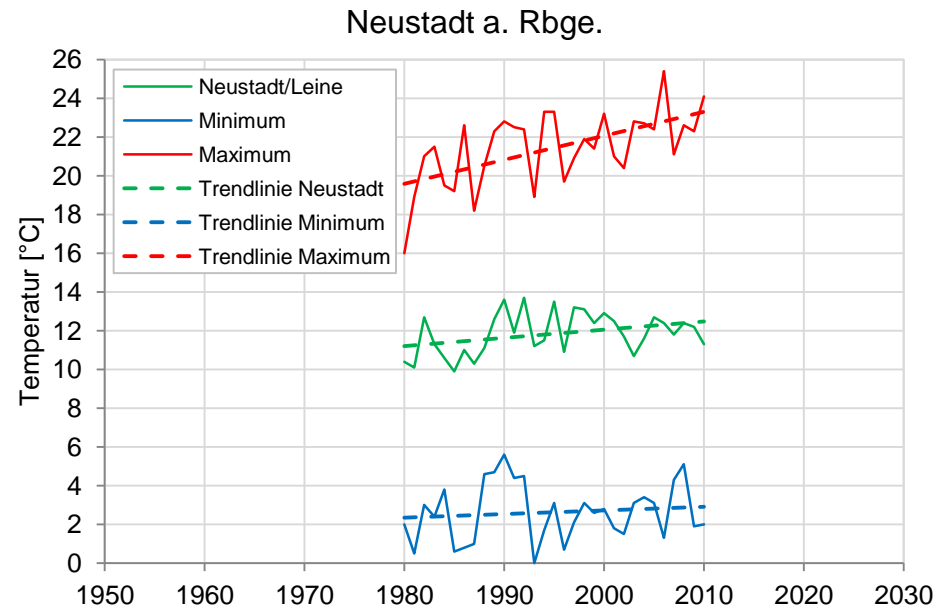
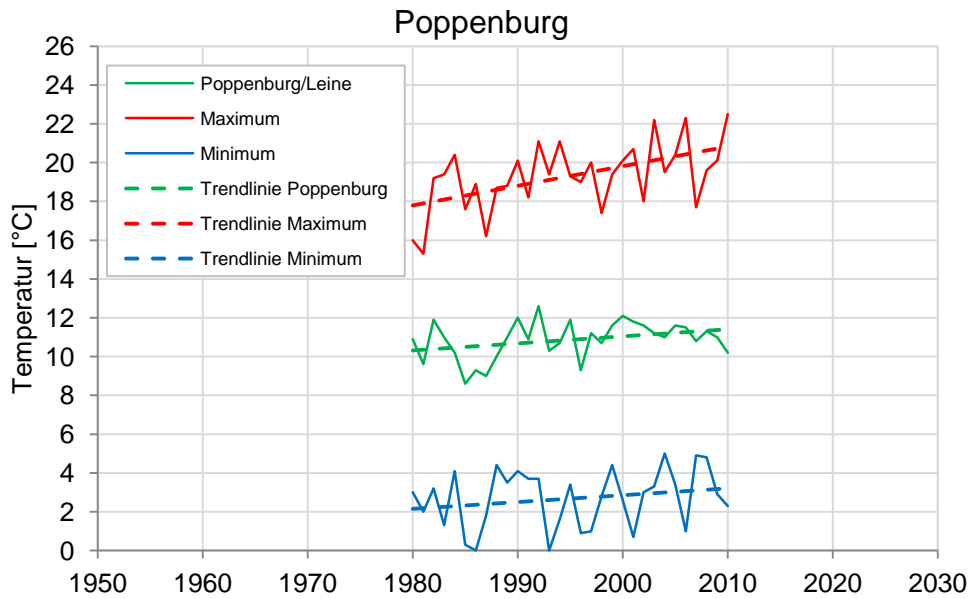
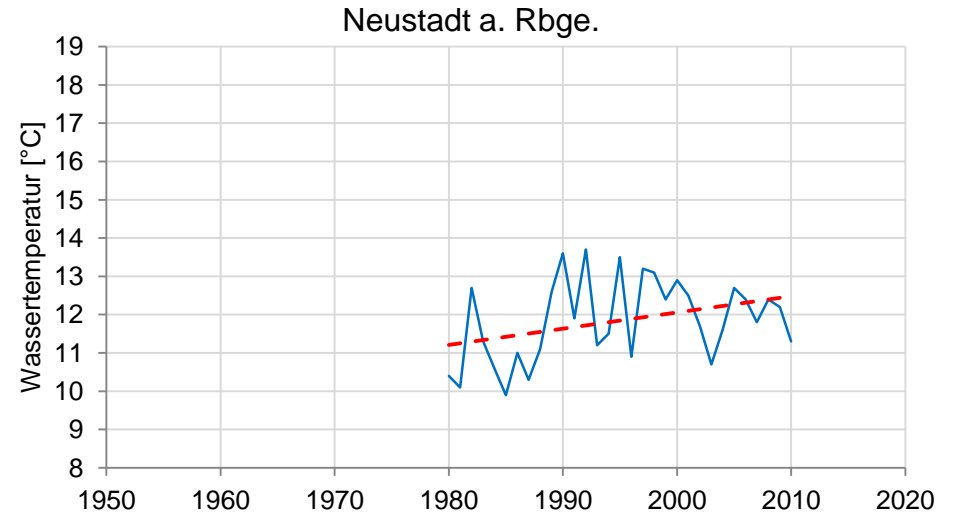
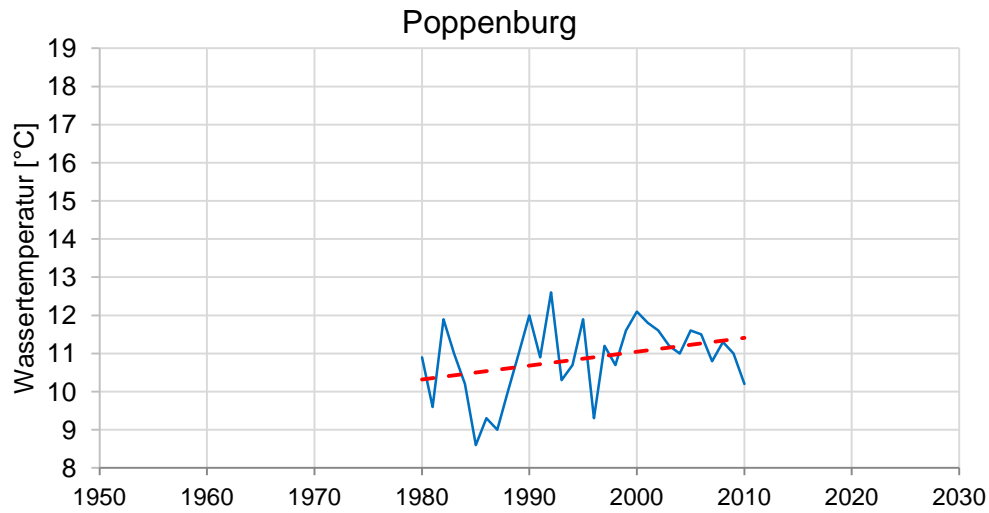


Bild 65: Langzeitlicher Verlauf der Wassertemperatur für die Leine an den Pegeln Poppenburg und Neustadt

5.4. Jahresgänge der Gewässertemperatur

Für eine Untersuchung des Verlaufes der Temperatur über den jahreszeitlichen Gang werden deutschlandweit verschiedene Meßpegel an Fließgewässern betrachtet. Mit den jahreszeitlichen Verläufen der Gewässertemperaturen soll untersucht werden, in wie weit bei genauer Betrachtung der Tageswerte der Gewässertemperaturen die Nutzung der Fließgewässerwärme in der Wintersaison möglich ist. Hierfür werden exemplarisch die Temperaturdaten der letzten verfügbaren Jahre genutzt, wobei für weitergehende Untersuchungen geplant ist, längere Zeitreihen über eine oder mehrere Dekaden zu nutzen. Generell zeigen die erzielten Ergebnisse, dass die betrachteten Fließgewässer eine hohe Verfügbarkeit für die Nutzung der Fließgewässerwärme bis hin zu einer vollständigen Verfügbarkeit in der Wintersaison aufweisen. Da auch im Winter, wie in Abschnitt 5.1. herausgearbeitet, die Fließgewässer vielfach zu warm sind, ist die Temperaturentnahme von 2 K für die meisten Fließgewässer unkritisch.

Die erforderlichen Daten für die Untersuchung der Jahresgänge der Gewässertemperatur werden den verfügbaren Temperaturmessungen der Gewässerkundlichen Dienste der Bundesländer und der Flussgebietsgemeinschaften entnommen. Soweit die Daten verfügbar sind, werden die Tagesmittelwerte für den Zeitraum von einem Jahr und von 3 Jahren dargestellt, so dass mit den Temperaturdaten eine tagesgenaue Aussage bezüglich der Verfügbarkeit für jeden Standort abgeleitet werden kann.

Die Verfügbarkeit des Wärmepotenzials der Fließgewässer wird in den hier erfolgten Untersuchungen jeweils über die Tagesmittelwerte der Gewässertemperatur definiert. Damit kann für jeden Kalendertag die Aussage getroffen werden, ob das Gewässer für die Nutzung als Wärmequelle vollständig oder nur zum Teil zur Verfügung steht oder an diesem Tag nicht genutzt werden kann. Die Anzahl der Unterschreitungstage gibt dabei an, an wieviel Tagen die Gewässertemperatur bei Nutzung der Fließgewässerwärme und einer Absenkung der Fließgewässertemperatur um 2 K unter die Grenze von 0°C sinken würde. Dabei ist an den Unterschreitungstagen auch eine teilweise Entnahme von Wärme aus dem Fließgewässer eingeschränkt möglich, wenn eine geringere Temperaturspreizung angesetzt wird und zum Beispiel mit einer geringeren Wärmeleistung gearbeitet oder die fehlende Wärmeleistung mit einer größeren Durchflussmenge ausgeglichen wird. Maßgebend bei der Nutzung der Wärme aus Fließgewässern für die Gewinnung Grüner Nah- und Fernwärme ist vielfach nicht die winterliche Gewässertemperatur sondern der Temperaturbetriebsbereich der Wärmetauscher. Hier können durch den Einsatz geeigneter Technologien, Kältemittel, Zwischenkreisläufe etc. grundsätzlich aber auch tiefere Temperaturen genutzt werden.

Die untersuchten Jahresgänge verdeutlichen in den nachfolgend dargestellten Bildern 66 bis 79, dass bei einer Nutzung der Fließgewässerwärme und der damit verbundenen Absenkung der Gewässertemperatur um 2 K, die Gewässertemperatur oftmals gar nicht und wenn, dann nur in einem sehr kurzem Zeitraum des Jahres unter die betrachte Grenze von 0°C fällt.

Der Verlauf der Gewässertemperatur bei Nutzung der Fließgewässerwärme und der damit verbundenen Absenkung um 2 K für den Rhein-Pegel Karlsruhe zeigt für das Jahr 2022 [66], dass die um 2 K abgesenkte Gewässertemperatur an keinem Zeitpunkt unter die Null-Grad-Grenze fällt, siehe Bild 66. Damit wäre eine Nutzung der Fließgewässerwärme des Rheins in Karlsruhe über die gesamte Heizperiode in 2022 beziehungsweise über das ganze Jahr 2022 möglich. Für den am Neckar gelegenen Temperaturmesspegel Mannheim [66] kann die gleiche Aussage abgeleitet werden. Bild 67 zeigt den Temperaturverlauf der Gewässertemperatur und den um 2 K abgesenkten Verlauf für das Jahr 2022. Die Gewässertemperatur des Neckars liegt wie in Karlsruhe am Rhein bei Nutzung der Fließgewässerwärme mit einer Absenkung um 2 K über die gesamte Heizperiode deutlich ganzjährig über 0°C, d.h. es gibt keine Unterschreitungstage im Jahr 2022. Für den Main in Würzburg [55] zeigt der für 2022 ermittelte Temperaturverlauf bei einer Absenkung um 2 K, dass eine Nutzung der Fließgewässerwärme bis auf 4 Unterschreitungstage im Dezember über die gesamte Heizperiode vollständig möglich ist siehe Bild 68. Dies entspricht auf die Heizperiode von 212 Tage bezogen einer Verfügbarkeit von 98,1 % und von 98,9 % für das Gesamtjahr.

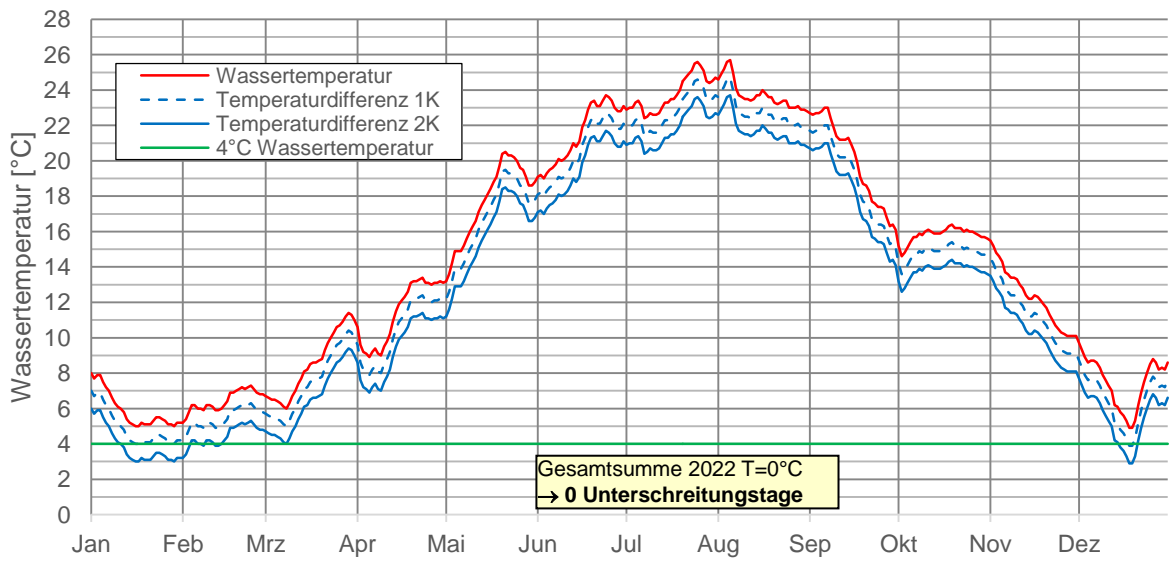


Bild 66: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur des Rheins in Karlsruhe 2022

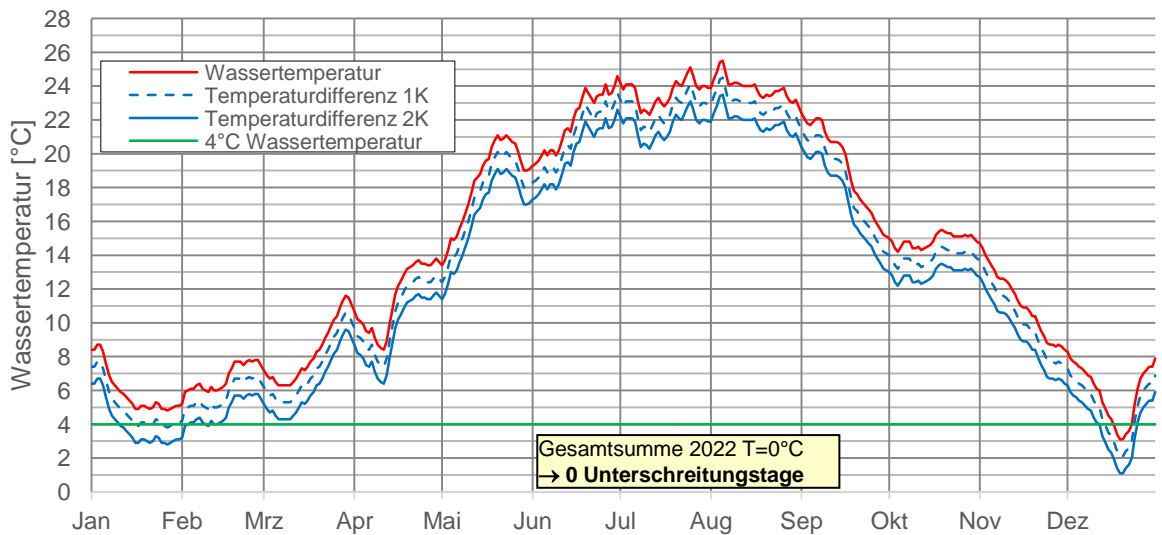


Bild 67: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur des Neckars in Mannheim 2022

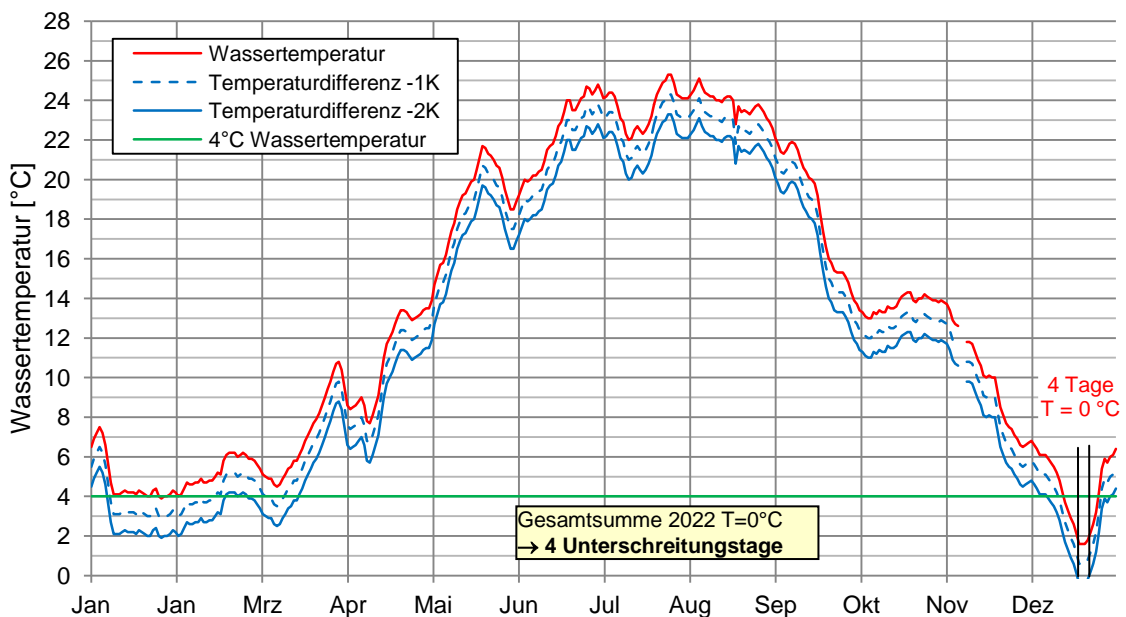


Bild 68: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur des Mains in Würzburg für 2022

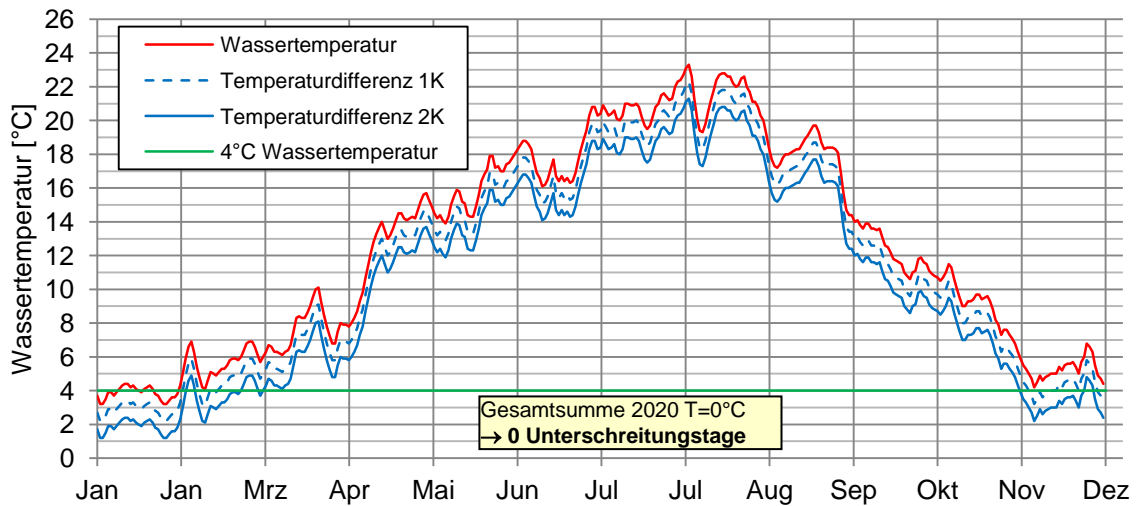


Bild 69: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur der Donau in Regensburg für 2020

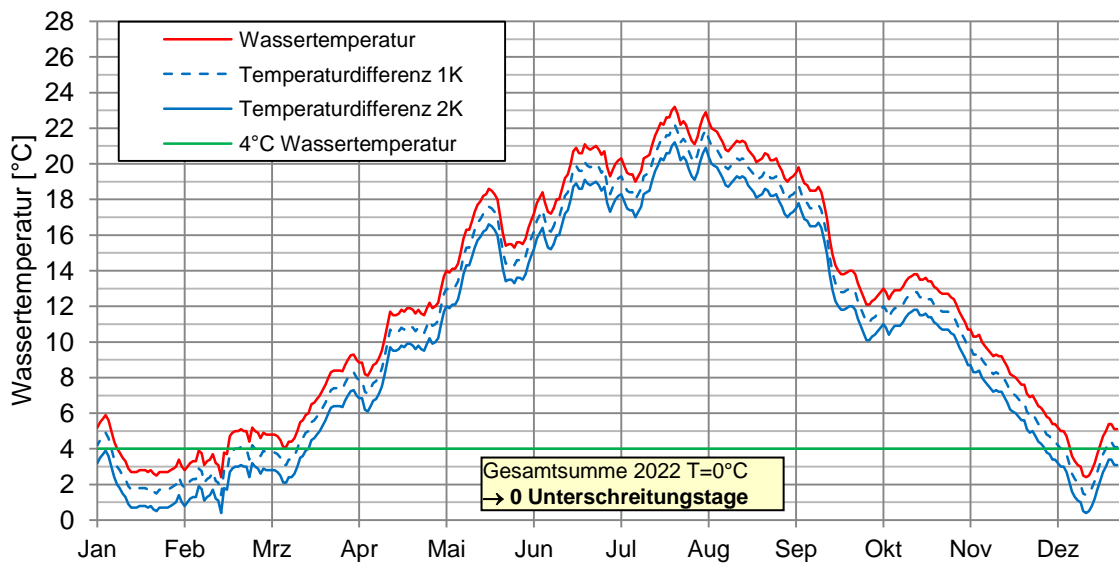


Bild 70: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur des Lech in Augsburg 2022

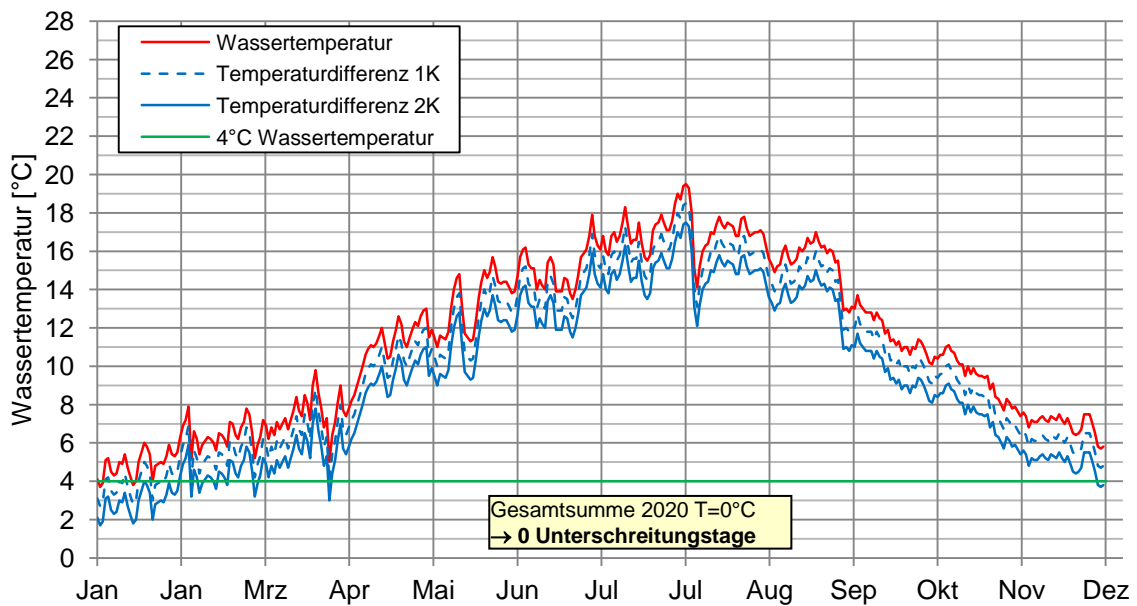


Bild 71: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur der Isar in München für 2020

Eine ähnliche Beobachtung bei der Verfügbarkeit der Fließgewässer für die Wärmenutzung wie bei den untersuchten Standorten im Rheingebiet lässt sich auch für die untersuchten Pegel im Donaugebiet machen. In Bild 69 ist der Verlauf der Gewässertemperatur für die Donau in Regensburg für 2020 [55] dargestellt. Der um 2 K abgesenkte Temperaturverlauf infolge einer Nutzung der Fließgewässerswärme zeigt durchgängig Werte über 0°C, so dass eine vollständige Nutzung der Fließgewässerswärme über die gesamte Heizperiode möglich ist. Die gleiche Aussage kann für den Lech in Augsburg für 2022 [55] getroffen werden, siehe Bild 70. Auch an diesem Standort liegt der um 2 K abgesenkte Temperaturverlauf über die gesamte Heizperiode über 0°C. Am Pegel der Isar in München [55] gilt für das Jahr 2020 ebenfalls, dass eine um 2 K abgesenkte Gewässertemperatur keine Fließgewässertemperatur unter 0°C zur Folge hätte, was eine Nutzung der Gewässerswärme der Isar auch hier für 2020 ganzjährig ermöglicht hätte, siehe Bild 71.

Über die betrachteten Ein-Jahresgänge hinaus werden die Jahresgänge der Temperaturen der letzten 3 Jahre betrachtet, soweit die Gewässertemperaturen vorliegen. Mit den ausgewerteten Verläufen von Hamburg, Dresden, Potsdam, Hannover, Stuttgart und München werden in dieser ersten Betrachtung das Gebiet von Deutschland und die Flussgebiete von Elbe, Weser, Rhein und Donau stichprobenartig abgedeckt und ermöglichen ein vertieftes Bild zur Verfügbarkeit der Fließgewässerswärme in Deutschland. Wie in den vorherigen Auswertungen erfolgt, werden bei den Temperaturverläufen über 3 Jahre die Tagesmittelwerte der Gewässertemperatur sowie die um 1 K und die um 2 K abgesenkte Gewässertemperatur bei einer potenziellen Wärmenutzung dargestellt. Mit den abgesenkten Temperaturverläufen wird exemplarisch eine mögliche Nutzung des Gewässers zur Erzeugung der Fließgewässerswärme dargestellt und eine Bewertung der tagesgenauen Verfügbarkeit der Fließgewässerswärme ermöglicht.

Der Verlauf der Temperaturen für den Messpegel der Elbe in Hamburg ist in Bild 72 für die Jahre 2020 bis 2022 zusammen mit der Länge der Heizperiode von Oktober bis April dargestellt [70]. Hierbei zeigt sich, dass die Gewässertemperatur in 2021 an 16 Tagen bei einer Absenkung der Fließgewässertemperatur um 2K und in 2022 an 11 Tagen die 0°C Grenze erreicht. An diesen Tagen wäre die vollständige Nutzung des Gewässers für die Fernwärmeerzeugung nur eingeschränkt möglich. Da in Hamburg der Durchfluss der Elbe 752 m³/s im vieljährigen Jahresmittel beträgt, ist auf Grund der Größe des zur Verfügung stehenden Durchflusses der Elbe auch an diesen Tagen eine Wärmeerzeugung möglich, da an allen spezifizierten Tagen die Wassertemperatur über 0°C liegen. Darüber hinaus ist in Bild 72 ff die Länge der Heizperiode von Oktober bis April exemplarisch dargestellt.

Für den gleichen Zeitraum von 2020 bis 2022 zeigt Bild 73 der Verlauf für die Gewässertemperatur am Messpegel Zehren bei Dresden für die Elbe [71]. Für das Jahr 2021 liegen bei vollständiger Nutzung der Elbe und einer damit verbundenen Temperaturabsenkung von 2 K insgesamt 9 Unterschreitungstage für 2021 und 2 Tage für 2022 vor. Für die Havel in Potsdam zeigt Bild 74 den jahreszeitlichen Gang der Gewässertemperatur der Havel in Potsdam für 2019 bis 2021 [72]. Hier besteht für 2021 ein Zeitraum von 12 Tagen, bei welchem die Gewässertemperatur bei Nutzung der Fließgewässerswärme und einer Absenkung von 2 K die 0°C-Grenze erreichen würde. Die anderen Jahre 2020 und 2022 könnte die Fließgewässerswärme über den gesamten Zeitraum durchgehend genutzt werden.

In Hannover wird der Temperaturverlauf der Leine untersucht. Hierfür sind die Temperaturdaten in Bild 75 für die Jahre 2019 bis 2021 zusammengestellt [73]. Aus dem jahreszeitlichen Gang der Gewässertemperatur der Leine in Hannover wird deutlich, dass die Nutzung für die Erzeugung der Fließgewässerswärme in 2019 nur an 3 Tagen und in 2021 nur an 8 Tagen eingeschränkt ist. Dies zeigt für Hannover, dass auch hier eine Nutzung der Fernwärme im nahezu gesamten Zeitraum der Heizperiode bei einer Absenkung der Leine um 2 K möglich ist. In Bild 76 stellt den Temperaturverlauf in Verden für 2013 bis 2015 mit einem ähnlichen Temperaturverlauf wie Hannover dar mit 8 bzw. 9 Unterschreitungstagen in 2013 bzw. 2015 in gleicher Größenordnung. Der in Bild 77 ersichtliche Verlauf des Mains in Frankfurt a.M. würde für 2020 bis 2022 mit 0 Unterschreitungstagen eine durchgehende vieljährige Nutzung für die Fließgewässerswärme mit 2 K Absenkung ermöglichen.

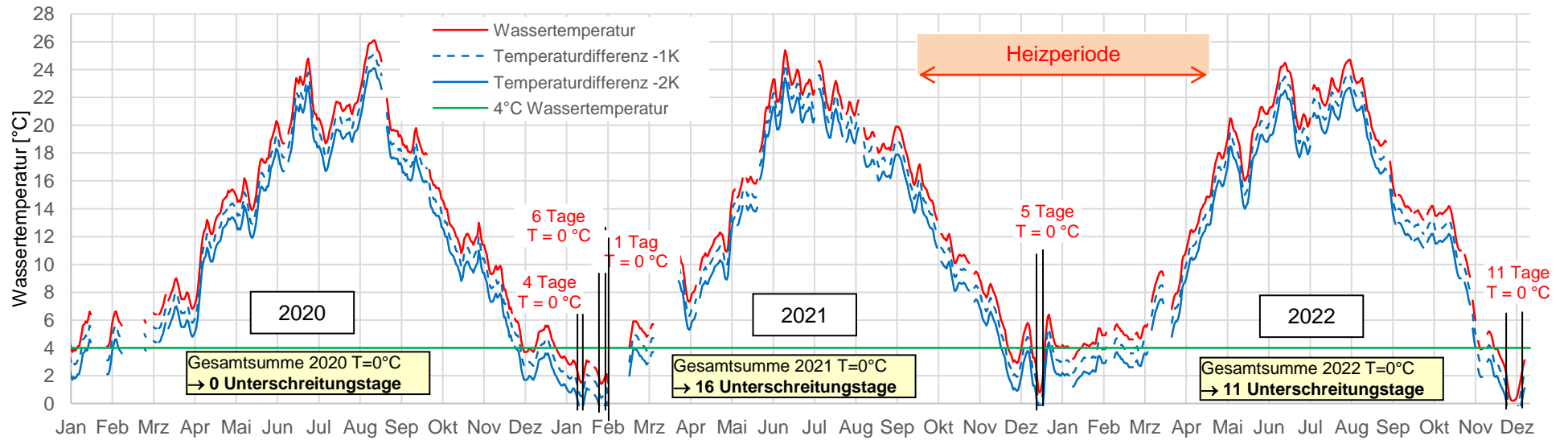


Bild 72: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur der Elbe in Hamburg für 2020 bis 2022

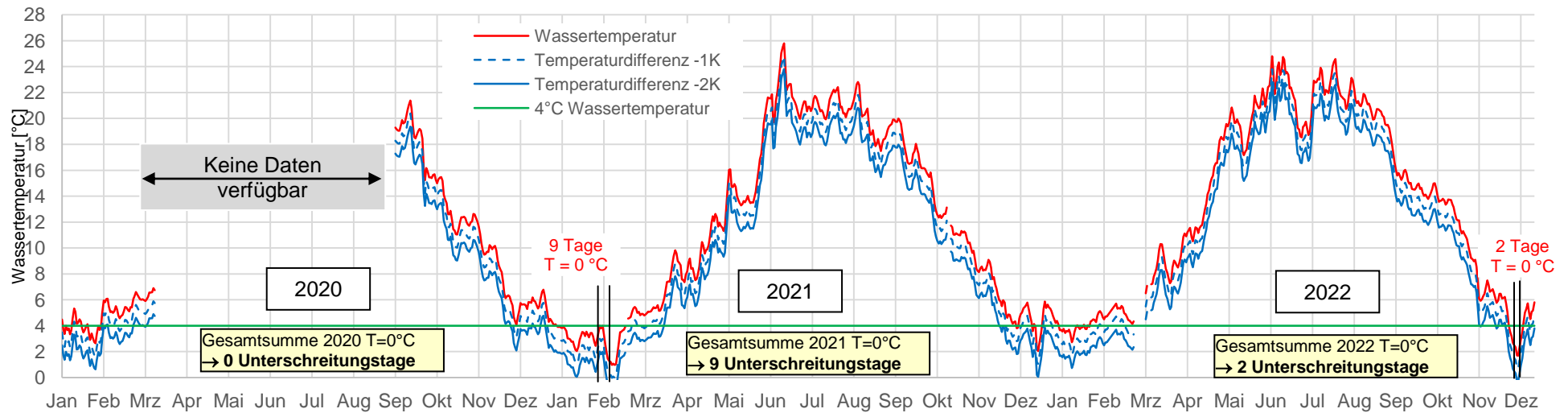


Bild 73: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur der Elbe in Zehren (Dresden) für 2020 bis 2022

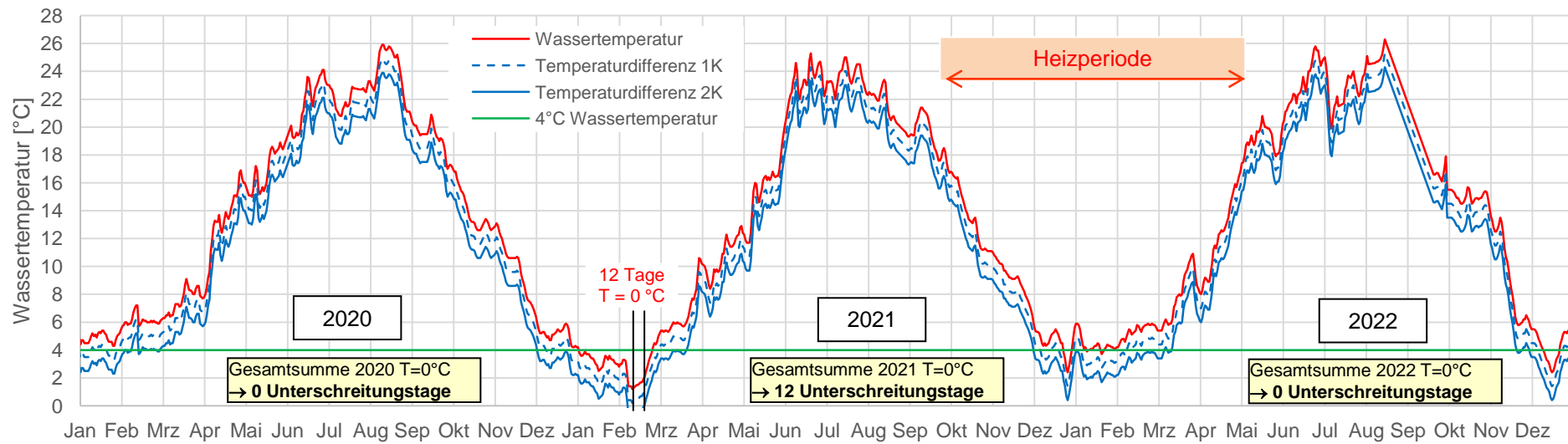


Bild 74: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur der Havel in Potsdam für 2019 bis 2021

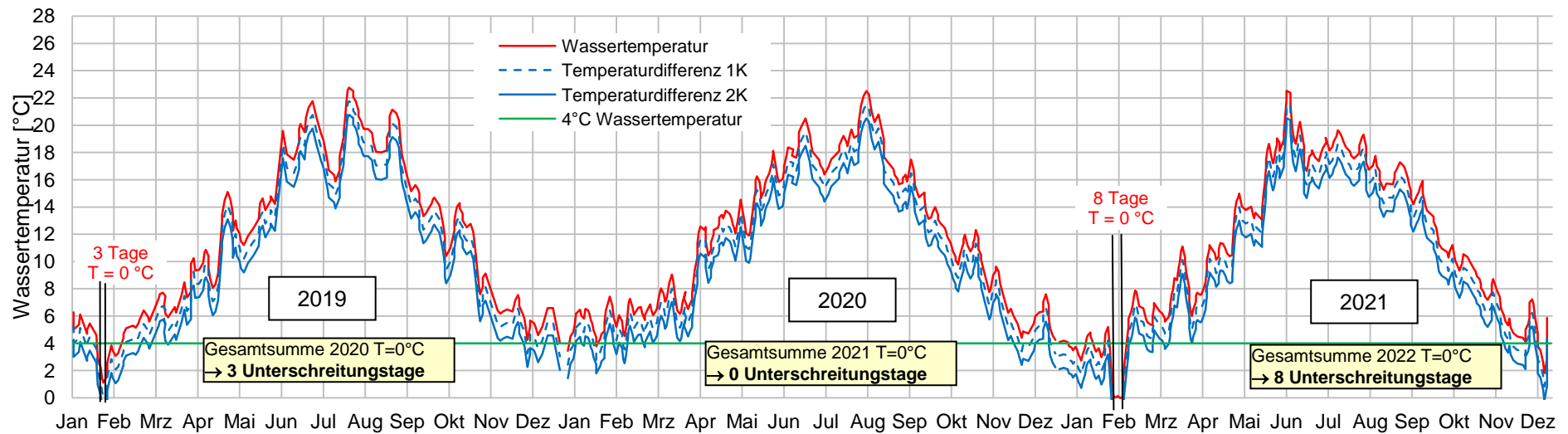


Bild 75: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur der Leine in Hannover für 2019 bis 2021

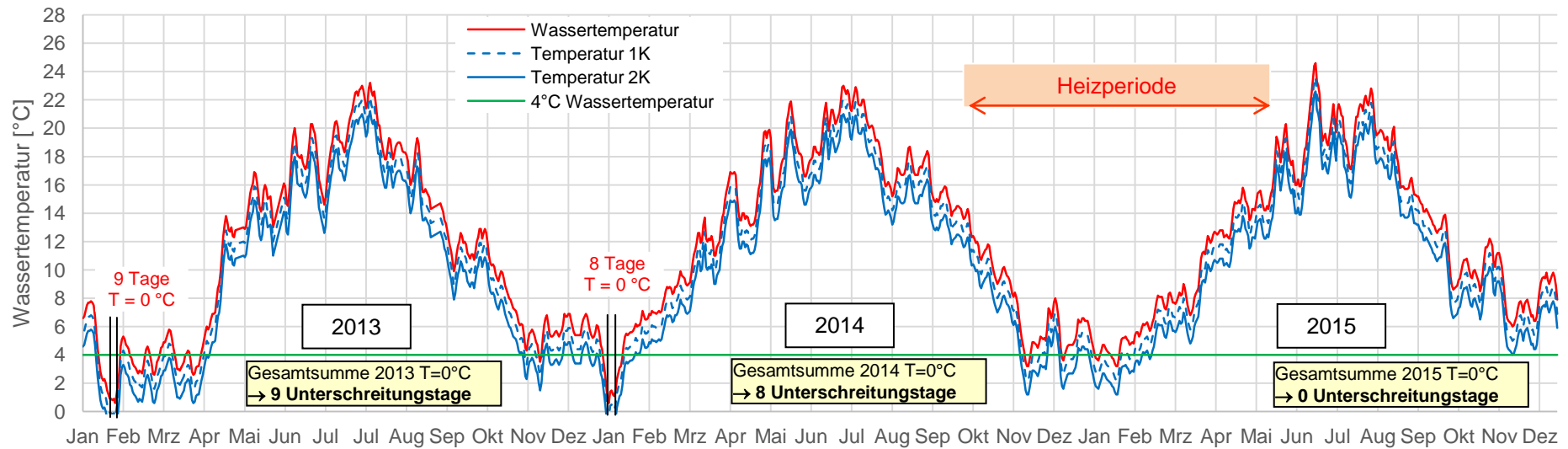


Bild 76: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur der Aller in Verden für 2013 bis 2015

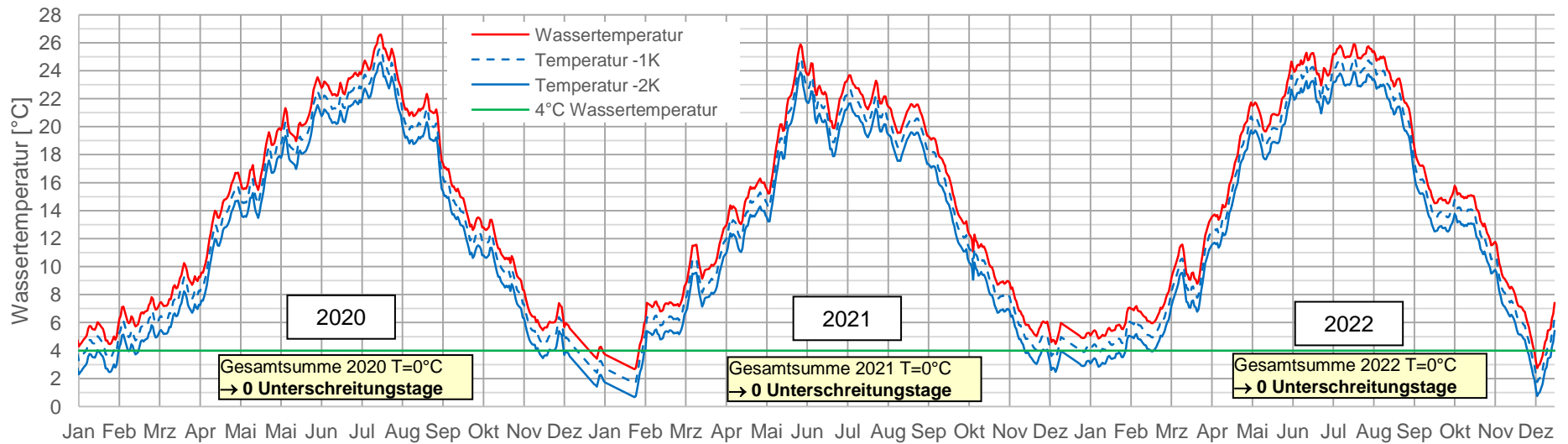


Bild 77: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur des Mains in Frankfurt a.M. für 2020 bis 2022

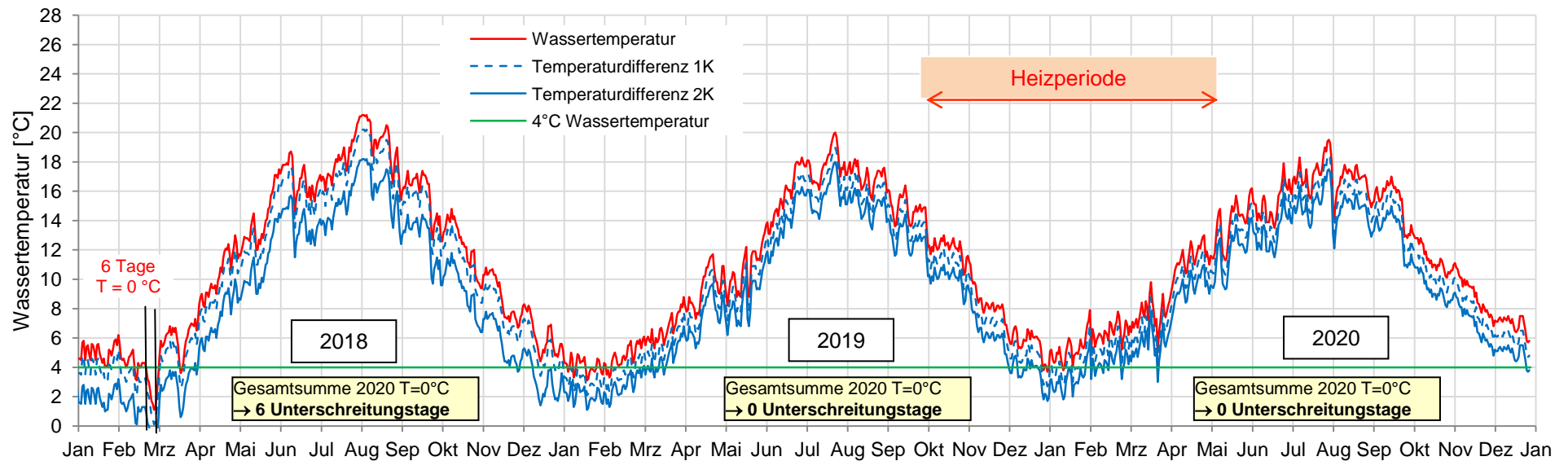


Bild 78: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur der Isar in München für 2018 bis 2020

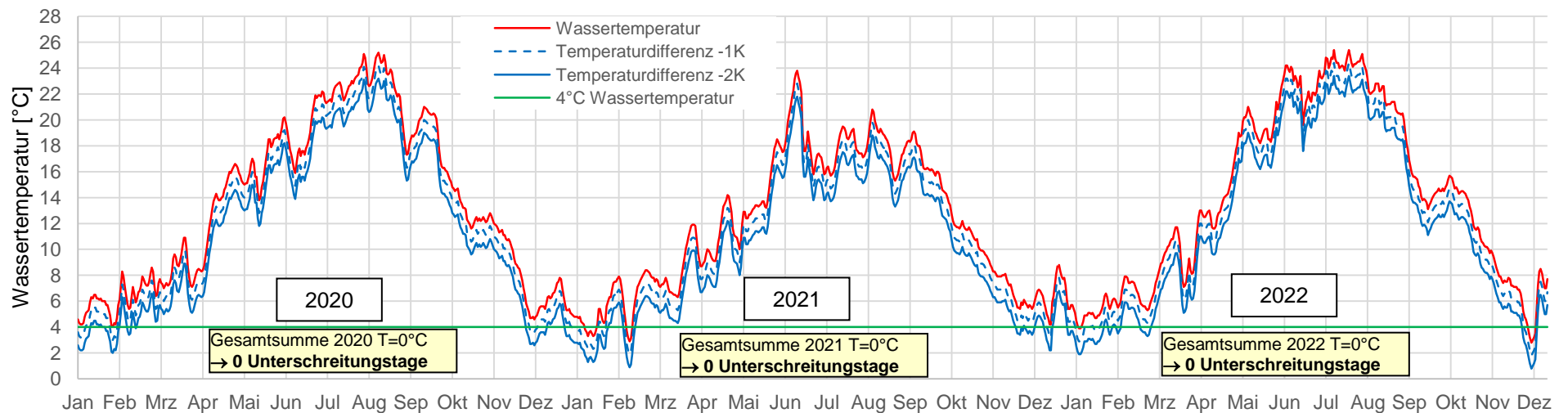


Bild 79: Jahreszeitlicher Gang der Gewässertemperatur des Neckar in Stuttgart für 2020 bis 2022

Bild 78 zeigt den jahreszeitlichen Gang der Gewässertemperatur der Isar in München für 2018 bis 2020. Im Jahr 2018 wird die Gewässertemperatur um 6 Tage bei einer Temperaturabsenkung von 2 K unterschritten. Dies entspricht einer Verfügbarkeit der Fließgewässerswärme von 97,2 % bezogen auf die Heizperiode von 212 Tagen im Jahr 2018. Über den gesamten beobachteten Zeitraum von 3 Heizperioden liegt die Verfügbarkeit der Isar in München bezüglich der Fließgewässerswärmenutzung bei 99,1 %. Eine vollständige Verfügbarkeit der Fließgewässerswärme bei einer Absenkung um 2 K weist der Neckar in Stuttgart für die Jahre 2020 bis 2022 in Bild 79 auf.

Stadt	Fließgewässer	Betrachtungszeitraum	Unterschreitungs-tage [d]	Versorgungssicherheit [%]
Mannheim	Rhein	2022	0	100 %
Karlsruhe	Rhein	2022	0	100 %
Würzburg	Main	2022	4	98,1 %
Regensburg	Donau	2020	0	100 %
Augsburg	Lech	2022	0	100 %
Potsdam	Havel	2020 - 2022	12	98,1 %
Hannover	Leine	2019 - 2021	11	98,3 %
Hamburg	Elbe	2020 - 2022	27	95,7 %
Dresden	Elbe	2020 - 2022	11	98,2 %
Verden	Aller	2013 - 2015	17	97,3%
Frankfurt a.M.	Main	2020 - 2022	0	100 %
Stuttgart	Neckar	2018 - 2020	0	100 %
München	Isar	2020 - 2022	6	99,1 %

Tabelle 26: Versorgungssicherheit für ausgewählte Städte in Deutschland

In Tabelle 26 sind die Ergebnisse der zuvor untersuchten Verläufe der Fließgewässertemperaturen für 10 Fließgewässer und 13 Messpegel in den vier großen Flusseinzugsgebiete Rhein, Donau, Elbe und Weser zusammengefasst. Die Verfügbarkeit der Fließgewässerswärme wurde für die Anzahl der untersuchten Heizperioden berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass in den untersuchten Messzeiträumen bei allen Städten eine Versorgungssicherheit von über 95 % besteht. Bei den betrachteten 1-Jahreszeiträumen liegt für die Städte Mannheim, Karlsruhe und Augsburg im Jahr 2022 sowie für Regensburg in 2020 eine 100% prozentige, aus der Gewässertemperatur abgeleitete Versorgungssicherheit vor. Bei Würzburg treten 4 Unterschreitungstage für das Jahr 2022 auf, was einer Versorgung über die gesamte Heizperiode von 98,1 % entspricht.

Ähnlich hohe Werte sind auch für die betrachteten 3-Jahreszeiträume der untersuchten Gewässertemperaturen zu beobachten. Hier beträgt für Hamburg die Versorgungssicherheit über die betrachteten drei Heizperioden 95,7 %, für Dresden 98,2 %, für Hannover 98,3 %, für München 99,1% sowie für Frankfurt a.M. und Stuttgart sogar 100 %. Auch bei den betrachteten 3-Jahreszeiträumen ist damit fast durchgehend die Gewässertemperatur für eine Erzeugung der Wärme aus dem Fließgewässer ausreichend hoch.

Die Verläufe verdeutlichen, dass die Fließgewässer während der gesamten Heizperiode bei einer um 1 K bzw. 2 K abgesenkten Gewässertemperatur durch die Wärmeentnahme eine Temperatur von über 4°C haben mit Ausnahme einiger weniger Extremtage, so dass die Wärmeentnahme für Wärmetauscher grundsätzlich unkritisch ist. Darüber hinaus zeigen die über ganz Deutschland ermittelten Jahresverläufe, dass die geografische Lage innerhalb Deutschlands bei der Versorgungssicherheit nur eine untergeordnete Rolle spielt, da die Wassertemperaturen im Winter bei den untersuchten Messpegeln ähnlich groß sind.

6. Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des Wärmepotenzials aus Fließgewässern

6.1. Berechnung der theoretischen Wärmeleistung und des Wärmepotenzials

Für die Entwicklung des Berechnungsmodells zur theoretischen Wärmeleistung aus einem Fließgewässer werden zum einen die physikalischen Grundlagen als auch die hydrologischen und klimatologischen Randbedingungen einbezogen. Die hydrologischen Randbedingungen beinhalten die Verteilung des Durchflusses des Fließgewässers über den jahreszeitlichen Gang mit Hilfe langzeitlicher Messreihen. Die klimatologischen Randbedingungen umfassen den Temperaturverlauf über die Jahreszeiten.

Die Wärmemenge aus einem Fließgewässer setzt sich aus der Wärmekapazität des Wasserkörpers und der Temperaturdifferenz vor und nach dem Wärmetauscher zusammen. Die Wärmemenge folgt aus dem Produkt von der Wärmekapazität des Wasserkörpers C mit der Temperaturdifferenz ΔT .

$$Q_{th} = C \cdot \Delta T$$

Für die Berechnung der Wärmeleistung P_{therm} mit

$$\int P_{therm} dt = Q_{th}$$

gilt für eine quasistationäre Temperaturdifferenz

$$P_{therm} = \frac{dC}{dt} \cdot \Delta T .$$

Die Zeitableitung der Wärmekapazität ergibt sich aus

$$\frac{dC}{dt} = \rho \cdot c \cdot \frac{dV}{dt}$$

mit der spezifischen Wärmekapazität des Wassers c und der Dichte ρ . Die Zeitableitung des Volumens ist der Durchfluss Q . Damit erhält man für die theoretische Wärmeleistung folgende Modellgleichung

$$P_{therm} = \rho \cdot c \cdot Q \cdot \Delta T .$$

Hierbei ist es sinnvoll zwischen dem Sommer-Szenario und dem Winter-Szenario zu unterscheiden, da der Durchfluss in der Winterperiode Q_{Winter} bei fast allen Fließgewässern höher als im Sommer ist. Den höheren mittleren Winterdurchfluss $Q_{mWinter}$ gilt es daher, so bekannt, bei der Berechnung der theoretischen mittleren Wärmeleistung für das Winterhalbjahr und den mittleren Sommerdurchfluss $Q_{mSommer}$ bei der Berechnung der theoretischen mittleren Wärmeleistung für das Sommerhalbjahr zu berücksichtigen

$$P_{thermW} = \rho \cdot c \cdot Q_{mWinter} \cdot \Delta T .$$

$$P_{thermS} = \rho \cdot c \cdot Q_{mSommer} \cdot \Delta T .$$

Mit den genaueren saisonal erfassten Durchflüssen ist eine Bestimmung der theoretischen Wärmeleistung für das relevante Winter- und Sommerhalbjahr möglich.

$$P_{therm} = \rho \cdot c \cdot \frac{dV}{dt} \cdot (T_1 - T_2) .$$

Die spezifische Wärmekapazität c kann für Wassertemperaturen von 0 bis 20°C nach [74] als konstant bei $c = 4,19 \text{ kJ/kgK}$ angenommen werden. Tatsächlich liegt die spezifische Wärmekapazität bei $T = 0^\circ\text{C}$ bei $c = 4,21877 \text{ kJ/kgK}$ und bei $T = 20^\circ\text{C}$ bei $c = 4,1819 \text{ kJ/kgK}$. Nur bei Wassertemperaturen von $T = 9$ bis 11°C wird der Bereich von $c = 4,19 \text{ kJ/kgK}$ erreicht und ist bei $T = 10^\circ\text{C}$ bei $c = 4,1922 \text{ kJ/kgK}$. Die geringste spezifische Wärmekapazität für Wasser ergibt sich bei $T = 35^\circ\text{C}$ mit $c = 4,1782 \text{ kJ/kgK}$. Bei höheren oder niedrigeren Wassertemperaturen steigt die spezifische Wärmekapazität des Wassers wieder an.

Das Wärmepotenzial eines Fließgewässers $Q_{\text{th,Bezugszeit}}$ wird aus der zeitlichen Länge eines zu untersuchenden Zeitraumes und der in diesem Zeitraum erzielbaren Wärmeleistung berechnet

$$Q_{\text{th,Bezugszeit}} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{therm}} dt$$

mit den Zeitpunkten t_0 als Beginn und t_1 als Ende des Bezugszeitraums.

6.2. Rechtlich definierte Heizperiode

Für die Ermittlung des Wärmepotenzials ist die Festlegung eines Bezugszeitraums von Bedeutung innerhalb dessen die berechnete mittlere Wärmeleistung des Fließgewässers wirkt. Neben der Betrachtung des Gesamtjahres mit 365 Tagen und einer Jahresstundenzahl von 8.760 h als Bezugszeitraum, für den eine Wärmepotenzialermittlung sinnvoll ist, bietet sich auch der Zeitraum der Heizperiode in Deutschland an.

Um hierfür einen allgemein gültigen Zeitraum festlegen zu können werden die Regelungen für die Vermietung von Wohnungen in Deutschland betrachtet. Aufgrund fehlender gesetzlicher Regelung wird in Deutschland häufig in Mietverträgen eine Heizperiode oder Heizzeit vereinbart. Gibt es hierzu keine Regelung oder Vereinbarung im Mietvertrag hat die deutsche Rechtsprechung als Heizperiode die Zeit vom

1. Oktober bis 30. April

festgelegt (Düsseldorf [75, 76]). Dieser Zeitraum umfasst 212 Tage, was 5.088 Stunden entspricht. In Tabelle 27 sind die betrachteten Zeiträume, auf deren Basis die Potenzialermittlung erfolgt, zusammengestellt.

	Anzahl der Tage	Anzahl der Stunden
Gesamtjahr	365	8.760
Heizperiode	212	5.088

Tabelle 27: Bezugszeiträume zur Ermittlung des Wärmepotenzials

6.3. Mehrfachentnahmen zur Wärmegewinnung aus Fließgewässern

Die Fließgewässer in Deutschland weisen neben den 400.000 km Gewässerlänge eine Wasserfläche von 3.606 km² auf, was 1,01 % der Fläche der Bundesrepublik entspricht. Werden die stehenden Gewässer, die i.a. ebenfalls an das Fließgewässersystem mit angebunden sind bzw. durch Fließgewässer durchflossen werden oder diese speisen, mit einer Gewässerfläche von 4.214 km² hinzugenommen, so ergibt sich eine Gesamtfläche des Fließgewässer- und Stehgewässersystems von 7.820 km², was bezogen auf die Landesfläche 2,19 % entspricht. Die verschiedenen Gewässerflächen sind in Tabelle 28 nach [77] dargestellt und auf die Fläche der Bundesrepublik mit 357.587,77 km² bezogen.

Gewässer	Fläche [km ²]	Fläche [%]
Fließgewässer	3.606	1,0084
Hafenbecken	74	0,0207
Stehende Gewässer	4.214	1,1785
Meer	336	0,0940
Summe	8.230	2,3015

Tabelle 28: Gewässerflächen in Deutschland [77]

In Anbetracht der großen Gewässerlängen und der zur Verfügung stehenden Wasserflächen stellen Fließgewässer gewaltige Flächenwärmetauscher zur Übertragung von Wärme zwischen verschiedenen Medien dar, die die Gesamtfläche Deutschlands erfassen und sowohl auf klein-, mittel- und großskaliger Ebene durchziehen. Die Fließgewässer treten hierbei in Interaktion mit der Außenluft an den Wasseroberflächen der Gewässer und dem dort vorliegenden Wärmestrom in Abhängigkeit von den Luft- und Gewässertemperaturen. Über das Gewässerbett, was den Großteil der Fließgewässerberandung ausmacht, erfolgt die Interaktion mit dem Erdreich, wo ein effizienter oberflächennaher geothermischer Wärmeaustausch zwischen Wasser und Boden stattfindet. Durch die anteilige Grundwasserspeisung der Fließgewässer wird der geothermische Wärmeaustausch weiter erhöht. Zusätzlich zu dem Wärmeaustausch zwischen Wasser, Luft und Boden erfolgt durch die direkte Sonneneinstrahlung auf die Fließgewässeroberfläche ein weiterer Wärmeeintrag in den Gewässerkörper. Verschiedene Einträge in das Fließgewässer aus Umgebungswärme sind schematisch in Bild 80 dargestellt.

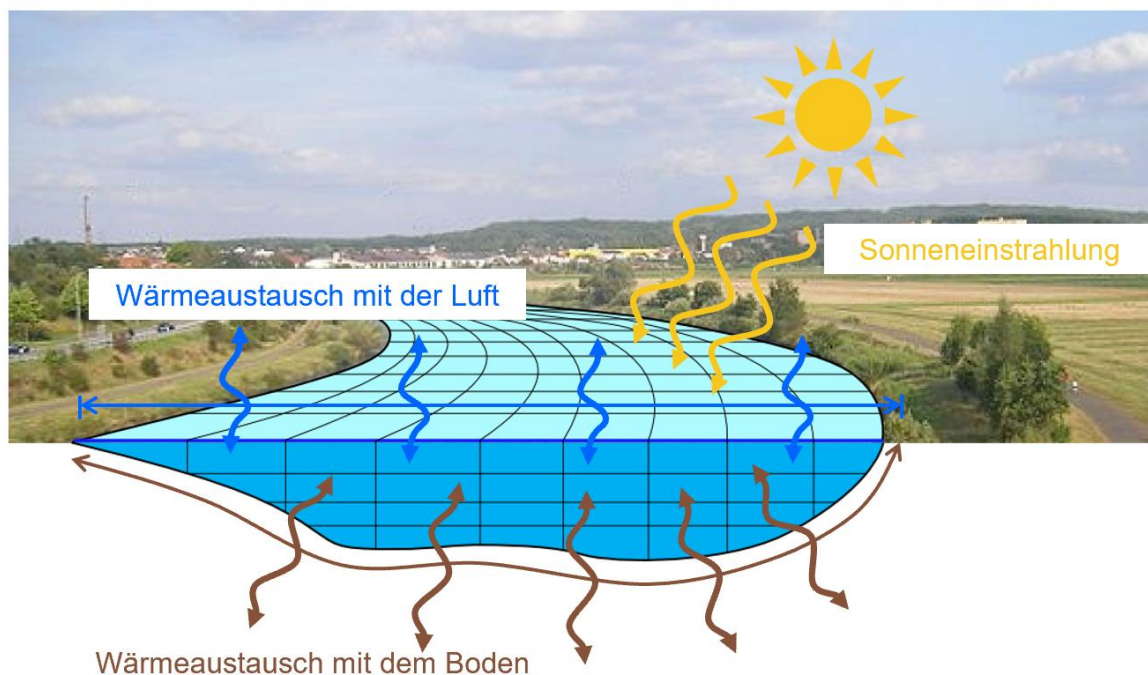


Bild 80: Spezifizierung verschiedener Einträge in das Fließgewässer aus Umgebungswärme
 Fließgewässer wirken auf großen Raum- und Zeitskalen, da sie zum einen die gesamte Fläche eines Landes und über die Landesgrenzen hinweg einen Kontinent entwässern und zum anderen diese Entwässerung mit verhältnismäßig geringen Fließgeschwindigkeiten und damit über größere Zeiträume vollziehen. Bezüglich der anteiligen Grundwasserspeisung der Fließgewässer weist diese eine nochmal um Größenordnungen kleinere Fließgeschwindigkeit auf, was die saisonalen Einflüsse auf die Gewässertemperaturen besonders in den Quellgebieten der Fließgewässer stark dämpft und zu einer Vergleichmäßigung der Wassertemperaturen und zu geringen jahreszeitliche Schwankungen dieser führt.

Als Flächenwärmetauscher können Fließgewässer mit ihrer weitverzweigten Struktur daher sehr effizient in Interaktion mit den verschiedenen Medien der Umgebung treten. Darüber hinaus stehen die Fließgewässer beständig und kontinuierlich sich immer wieder erneuernd zur Verfügung.

Alleine auf Grund der gewaltigen Dimension des Fließgewässersystems und den Zeiträumen, mit denen die Entwässerung erfolgt, sind Mehrfachentnahmen der Wärme bei einem Fließgewässer möglich. Ebenso wie bei den Kühlprozessen der thermischen Kraftwerke mittels Fließgewässern, wo anstelle einer Wärmeentnahme ein Wärmeeintrag erfolgt, muss bei einer vorherigen vollständigen Entnahme der Fließgewässerswärme innerhalb der zugelassenen Temperaturspreizung eine ausreichende Fließlänge des Gewässers berücksichtigt werden, bis eine Wiedererwärmung des Gewässers durch den Austausch mit den umgebenden Medien erfolgt ist. Ist dieser Prozess vollzogen, ist eine vollständig Wiederentnahme der Wärmemenge erneut möglich genauso wie in umgekehrter Weise bei Kühlprozessen eine weitere Wärmeeinleitung erfolgen kann.

Die Wassertemperaturentwicklung über die Länge eines Fließgewässers zeigt, dass sich die Fließgewässer von der Quelle bis zur Mündung bezüglich der mittleren Wassertemperaturen über den Austausch mit der Umgebung um 2 bis 3 K erwärmen. Diese Größenordnung kann als untere Grenze für die Wiedererwärmungsfähigkeit eines Fließgewässers über die Lauflänge gesehen werden. Tatsächlich ist diese Fähigkeit aber höher, da ein kühleres Gewässer wesentlich mehr Wärme der Umgebung entziehen kann als ein wärmeres Gewässer.

In Hinblick auf diese Aspekte kann eine mit einer Temperaturabsenkung von 2 bis 3 K verbundene Wärmeentnahme im gesamten Fließgewässernetz in Deutschland mehrfach erfolgen. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen ergibt sich das in Tabelle 30 dargestellte Gesamtwärmepotenzial aus Fließgewässern für Deutschland.

6.4. Einfluss der Gewässergröße auf die nutzbare Wärmeleistung

Gewässer mit einem Einzugsgebiet $A_{E0} \leq 10 \text{ km}^2$ weisen beim Erreichen der 10 km^2 Einzugsgebietsgröße bereits Abflüsse von 30 bis 300 l/s je nach Region in Deutschland auf. In den Hochgebirgslagen können diese Abflüsse bei weitem noch überschritten werden.

Bei einem mittleren Gesamtabfluss von 188 Milliarden m^3 in Deutschland [30] ergibt sich eine Abflussspende nur auf die Fläche von Deutschland mit $357.587,77 \text{ km}^2$ bezogen von $16,67 \text{ l/s/km}^2$. Damit würden die Gewässer beim Erreichen der 10 km^2 Einzugsgebietsgröße einen mittleren Abfluss von $166,7 \text{ l/s}$ in Deutschland aufweisen. Diese Abflussmenge stellt eine beachtliche Größe dar und verdeutlicht, dass auch die kleinen Gewässereinzugsgebiete unterhalb von 10 km^2 nennenswerte und mit zu betrachtende Abflüsse aufweisen.

Werden die Einzugsgebiete die außerhalb von Deutschland am Einströmrand maßgeblich für Rhein, Elbe und Oder vorliegen mit erfasst, ergibt sich ein zu berücksichtigendes Gesamteinzugsgebiet bis zum Ausströmrand an den Grenzen bzw. an den Küsten von Deutschland von 576.294 km^2 . Wird der mittleren Gesamtabfluss auf dieses Gebiet bezogen, so liegt die mittlere Abflussspende für ganz Deutschland bei $10,34 \text{ l/s/km}^2$. Bezogen auf ein Einzugsgebiet von 10 km^2 liegt dann ein mittlerer Jahresabfluss von $103,4 \text{ l/s}$ vor, was ebenfalls beachtlich ist.

Bei einer Temperaturabsenkung des Fließgewässers von nur 2 bis 3 K ergibt sich eine Wärmeleistung bei einem Abfluss von 10 l/s von 100 bis 150 kW. Bei einem Abfluss von 100 l/s liegt die Wärmeleistung des Fließgewässers bereits bei 1 MW bis 1,5 MW und bei einem Abfluss von $1 \text{ m}^3/\text{s}$ bei 10 bis 15 MW.

D.h. neben den mittleren und großen Fließgewässern können auch die kleinen Fließgewässer mit Einzugsgebietsgrößen von $A_{E0} \leq 10 \text{ km}^2$, die mit einer Gewässerlänge von 258.274 km $64,57 \%$ der gesamten Fließgewässer in Deutschland ausmachen, bereits beachtliche Wärmeleistungen bereitstellen.

Besonders die an den kleinen und an den mittleren Gewässern seit Jahrhunderten existierenden historischen Altstandorte der traditionellen Mühlen, Gewerke und Fabriken, die den Großteil der Wasserkraftanlagen in Deutschland ausmachen, können hier einen wesentlichen Beitrag für die zukünftige Wärmeversorgung in Deutschland liefern.

Die an diesen Standorten vorliegenden mechanischen Leistungen zur Elektrizitätsgewinnung von $P_{\text{mech}} = 3$ bis 4 kW bis zu 200 kW weisen zusätzlich Wärmeleistungen im Bereich von $P_{\text{th}} = 500$ kW bis 10 MW und mehr auf.

Der Faktor zwischen der mechanischen Leistung zur möglichen Wärmeleistung liegt bei 1:100 bis zu 1:300.

6.5. Leistungskennzahlen der Wärmepumpe

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) beschreibt für den Zeitraum eines Jahres die Effizienz eines Heizungssystems und gibt damit Auskunft über die Effizienz einer Wärmepumpe, da sie die zugeführte elektrische Energie und die abgegebene Wärmemenge erfasst [78]. Die JAZ wird dabei unter realen Bedingungen mit Hilfe eines Stromzählers und eines Wärmemengenzählers bestimmt und berücksichtigt dadurch auch die Effizienz des Heizsystems und des Gebäudes sowie das individuelle Nutzungsverhalten. Je höher die JAZ ist und je niedriger die erforderlichen Vorlauftemperaturen sind, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe. Auch ganzjährig hohe Quelltemperaturen wie bei Wasser-Wasser-Wärmepumpen erhöhen die Effizienz. Luft-Wärmepumpen haben im Gegensatz zur Wasser-Wasser-Wärmepumpe kleinere JAZ, da die genutzte Außenluft im Winter stärker abkühlt als die Wassertemperatur, wodurch der Temperaturunterschied zur Vorlauftemperatur deutlich ansteigt und damit die Effizienz sinkt [78]. Auch im Vergleich der anderen Umweltwärmequellen untereinander gibt es Unterschiede. So ist z.B. die Temperatur des Abwassers im Vergleich zum Erdreich und zum Grundwasser höher [74] und ermöglicht einen effizienteren Wärmepumpenbetrieb. Die JAZ moderner Wärmepumpen liegt nach [78] bei 3 bis 5 und nach [74] bei 4 für Bestandsgebäude und bei 5 für Neubauten. Daraus wird auch in Auswertung weiterer Arbeiten in [79] eine realisierbare Jahresarbeitszahl von 4,5 abgeleitet, die bei der Berechnung des Abwasserwärmepotenzials und der gewinnbaren Heizenergie in Kapitel 6.2 verwendet wird. Nach [80] können sogar JAZ von 6 erzielt werden.

Der coefficient of performance (COP) ist ebenfalls eine Leistungskennzahl der Wärmepumpe und wird nicht wie die JAZ unter realen Bedingungen sondern unter standardisierten Normbedingungen im Labor gemessen und beschreibt die bei einer Wärmepumpe aufgewendete elektrische Energie für den Antrieb einer Wärmepumpe im Verhältnis zur Nutzwärme [78]. Der COP erfasst damit das Verhältnis von Nutz- oder Heizleistung einer Wärmepumpe (thermische Leistung) zur benötigten elektrischen Antriebsleistung [74]. Tabelle 29 zeigt für verschiedene Wärmepumpentypen die Jahresarbeitszahlen nach [81].

Art der Wärmepumpe	Jahresarbeitszahl (JAZ)
Luft-Luft-Wärmepumpe	2,5
Luft-Wasser-Wärmepumpe	3
Sole-Wasser-Wärmepumpe	3,5 - 4,5
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5

Tabelle 29: Jahresarbeitszahlen der verschiedenen Wärmepumpentypen [81]

Luft-Luft-Wärmepumpen und Luft-Wasser-Wärmepumpen nutzen zur Wärmegewinnung als Umweltwärmequelle die Energie aus der Außenluft. Auf Grund der starken Abkühlung der Außenluft im Winter und den bestehenden stärkeren Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht weisen Luft-Luft-Wärmepumpen und Luft-Wasser-Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen von 2,5 und 3 auf, wie Tabelle 28 zeigt.

Sole-Wasser-Wärmepumpen, die auch als Erdwärmepumpen bezeichnet werden, werden über Erdsonden oder Erdreichkollektoren betrieben, und nutzen die im Erdreich gespeicherte Wärme, die in Europa auch im Winter ab einer Tiefe von über 1,2 m über 0°C liegt und über das ganze Jahr nahezu konstant ist. Erdwärmepumpen weisen ähnlich wie die Wasser-Wasser-Wärmepumpen geringe Leistungsschwankungen auf. Die Jahresarbeitszahlen liegen bei Sole-Wasser-Wärmepumpen bei 3,5 bis 4,5, wie in Tabelle 29 ersichtlich.

Die Wasser-Wasser-Wärmepumpen nutzen als Umweltwärmequelle Grundwasser, sie können aber auch zur Wärmegegewinnung aus Oberflächengewässer, Trinkwasser oder Abwasser verwendet werden. Sie besitzen mit 5 die höchsten Jahresarbeitszahlen. Laut [80] sind sogar Jahresarbeitszahlen von 5,5 bis über 6 möglich. Damit arbeiten Wasser-Wasser-Wärmepumpen besonders effizient und liefern im Vergleich zu allen anderen Wärmepumpentypen die meiste Wärme im Bezug auf den eingesetzten elektrischen Strom. Ihr Einsatz lohnt sich besonders, wenn ein großer Wärmebedarf zu decken ist.

7. Gesamtwärme Potenzial aus Fließgewässern in Deutschland

7.1. Wärmepotenzial aus Fließgewässern

Im Zuge der Untersuchung erfolgt für Deutschland die Berechnung des zur Verfügung stehenden Gesamtwärme potentials aus Fließgewässern. Für ganz Deutschland wird dabei über die Erfassung und Auswertung der langjährig gemessenen Abflussdaten über die Gebietsgrenzen als Ausflussränder und unter Berücksichtigung der Einflussränder der mittlere Jahresabfluss der Fließgewässer bestimmt, siehe Bild 81. Das nutzbare thermische Wärmepotenzial der Fließgewässer kann dann aus diesem für die jeweilige Temperaturspannung berechnet werden. Hierfür werden verschiedene Randbedingungen betrachtet.



Bild 81: Auswertung des mittleren Jahresabflusses der Flussgebietseinheiten in Deutschland

In Bild 81 sind mit den blauen Strichen die Einströmränder der großen und mittleren Fließgewässer Rhein, Elbe, Oder, Inn, Mosel, Saar, Iller, Lech, Isar, Tiroler Achen, Traun, Salzach und Neiße sowie weiterer Gewässer an der Gebietsgrenze von Deutschland gekennzeichnet. Mit den roten Strichen sind die Ausströmränder von Donau, Rhein, Ems, Weser, Elbe, Eider, Schwentine, Trave, Warnow, Peene, Oder und weitere Gewässer an der Grenze zu einem anderen Staat, wie Polen, Österreich oder die Niederlande oder bei der Einmündung in die Ostsee oder Nordsee dargestellt. Ebenso sind einige der verwendeten Abflussmesspegel in Bild 81 eingezeichnet.

Bei den Untersuchungen der Fließgewässer wurde für das gesamte Staatsgebiet von Deutschland bei Auswertung der Abflussbilanz über die Ein- und Ausströmränder ein **langjähriger mittlerer Jahresabfluss der Fließgewässer** von

5.868 m³/s

ermittelt. Dies entspricht einem **mittleren Gesamtjahresabfluss für Deutschland** von

185,06 Milliarden m³ pro Jahr

aus Fließgewässern.

In [30] und [32] wird für Deutschland ein langjähriger mittlerer Gesamtabfluss von 188 Milliarden m³ pro Jahr angegeben, der als Wasserdargebot bzw. erneuerbare Wasserressource im Wasserkreislauf als Grund- und Oberflächenwasser zur Verfügung steht und theoretisch nutzbar ist.

7.1.1. Technisches und theoretisches Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Deutschland

Aus den erfassten Gesamtabflussdaten kann unter Berücksichtigung der jeweiligen Temperaturspreizung das theoretisch, technisch und ökologisch nutzbare Gesamtwärmepotenzial der Fließgewässer für Deutschland berechnet werden.

Bei der Ermittlung des Wärmepotenzials aus Fließgewässern werden über die Festlegung der zu untersuchenden Temperaturspreizung ΔT Grenzen eingeführt. Hierbei ist zwischen einer oberen und einer unteren Grenze zu unterscheiden. Für die untere Grenze muss zunächst geklärt werden, was überhaupt die untere Bezugstemperatur ist, auf die sich eine festzulegende Temperaturspreizung für Wärmepotenzialuntersuchungen beziehen kann. Ist es der absolute Nullpunkt bei $-273,15^{\circ}\text{C}$ oder 0 K , der nicht unterschritten werden kann, ist es der Gefrierpunkt bei ca. 0°C , worauf sich die Celsiuskala bezieht oder eine andere Temperatur. Dabei gilt ein Gefrierpunkt von Wasser bei 0°C nur bei verunreinigtem Wasser, da bei reinem Wasser frei von Gefrierkernen der Gefrierpunkt bei ca. -40°C liegt.

Technisch und theoretisch kann von der physikalischen Seite und den bestehenden Technologien in Abhängigkeit der Kältemittel, der gewählten Kreisläufe etc. eine Wärmege-
winnung auch im Minustemperaturbereich bezogen auf die Celsiuskala erfolgen. Die Wärmege-
winnung bis ca. 0°C ist zum Beispiel mit der Vakuum-Flüssigeis-Technologie vom
ILK Dresden [92, 93] möglich, genauso wie bei der Verwendung eines Zwischenkreislaufes.
Auch Meerwassergroßwärmepumpen werden so zum Beispiel von MAN in den Projekten
Aalborg oder Esbjerg für Meerwassertemperaturen bis 1°C ausgelegt [94]. Auch tiefere
Temperaturen sind möglich.

Als untere technische Grenze und Bezugstemperatur für die zu untersuchende
Temperaturspreizung ΔT zur Berechnung des technischen Gesamtwärmepotenzials aus
Fließgewässern kann daher $T = 0^{\circ}\text{C}$ angenommen werden, was aus physikalischer und
technischer Sicht grundsätzlich sinnvoll und möglich ist. Zukünftige ebenso wie bestehende
Entwicklungen können diese untere technische Grenze aber auch weiter nach unten
verschieben und hier eine niedrigere untere Bezugstemperatur ermöglichen.

Als obere Bezugstemperatur für die zu untersuchende Temperaturspreizung ΔT bietet sich
für die Ermittlung des Wärmepotenzials aus Fließgewässern die langjährige mittlere
Wassertemperatur an, da hiermit die gesamte über das Jahr zur Verfügung stehende

Wärmemenge in den Fließgewässern erfasst wird. Die langjährige mittlere Wassertemperatur in Deutschland für die Fließgewässer schwankt zwischen 10 bis 14°C, einige alpine Flüsse können auch 9 bis 11°C aufweisen – Tendenz aber auch hier steigend. In Bild 82 ist die aus 19 Fließgewässer und 50 Pegeln bestimmte deutschlandweit gemittelte mittlere Jahrestemperatur der Fließgewässer in Deutschland für den Zeitraum von 1954 bis 2022 dargestellt und die hier zu beobachtende Trendlinie bezüglich der Temperaturentwicklung. Ebenfalls zeigt Bild 82 die deutschlandweit gemittelte Entwicklung der vieljährigen mittleren Lufttemperatur in Deutschland [95] für den Zeitraum von 1950 bis 2023 und die dazugehörige lineare Trendlinie.

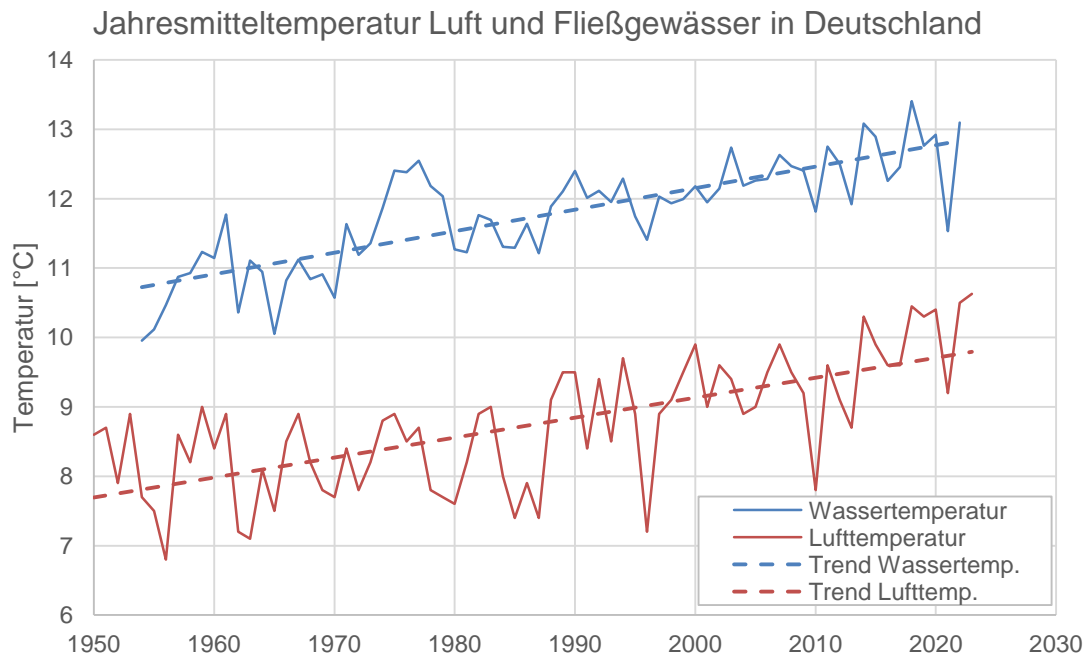


Bild 82: langzeitliche Entwicklung der Luft- und Fließgewässertemperaturen in Deutschland

In Bild 82 ist erkennbar, dass die mittleren jährlichen Wassertemperaturen der Fließgewässer in Deutschland höher sind als die mittleren Lufttemperaturen. Ausnahmen können Hochgebirgs- und Gletscherabflüsse in den oberen Höhenlagen bilden, die aber nicht repräsentativ für die Charakteristik der Wassertemperaturen der Fließgewässer in Deutschland sind. Der Temperaturunterschied zwischen der mittleren Wasser- und Lufttemperatur liegt, wie in Bild 82 ersichtlich und in Tabelle 30 aus den linearen Trendlinien bestimmt, bei ca. 3 K. Auch weisen in Bild 82 die Verläufe der Trendlinien und der gemessenen mittleren Wasser- und Lufttemperaturen fast den gleichen Anstieg auf, was auf einen unmittelbaren Zusammenhang mit der Klimaerwärmung hinweist. In Tabelle 30 sind die Anstiege der deutschlandweit gemittelten Lufttemperatur und Fließgewässertemperatur für den Zeitraum von 1950 bis 2022 dargestellt sowie die Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Wassertemperatur und Lufttemperatur.

Zeitraum	Temperatur 1950 [°C]	Temperatur 2022 [°C]	Temperaturdifferenz [K]
mittlere Fließgewässertemperatur	10,62	12,86	2,23
mittlere Lufttemperatur	7,61	9,68	2,07
Differenz Luft- und Wassertemperatur	3,01	3,18	

Tabelle 30: Langzeitentwicklung der mittleren Luft- und Fließgewässertemperatur in Deutschland

Für das Jahr 2023 lag die mittlere Lufttemperatur in Deutschland bei 10,63 °C, wie in Bild 82 ersichtlich. Die mittlere Wassertemperatur der untersuchten Fließgewässer betrug 2022 in

Deutschland 13,1°C, während die mittlere Lufttemperatur hier bei 10,5°C lag. Alleine im Zeitraum von 1954 bis 2022 hat sich die untersuchte mittlere Wassertemperatur der Fließgewässer von 9,96°C im Jahr 1954 auf 13,10°C im Jahr 2022 erhöht, was einer Zunahme von 3,14 K entspricht. In den letzten 10 Jahren lagen die mittleren Jahrestemperaturen der untersuchten Fließgewässer in Deutschland zwischen 11,92°C im Jahr 2013 und 13,41°C im Jahr 2018. In den letzten drei Dekaden hat sich die über die jeweilige Dekade gemittelte Wassertemperatur für den Zeitraum von 1990-1999 von 11,99°C, über 12,32°C für 2000-2009 auf 12,58°C für 2010-2019 erhöht.

Als obere Bezugstemperatur bietet sich damit eine mittlere Wassertemperatur der Fließgewässer in Deutschland von 12,5°C für die Berechnung des Wärmepotenzials aus Fließgewässern an, zumal in den letzten 10 Jahren von 2013 bis 2022 die mittlere Wassertemperatur bereits bei 12,63°C lag.

Für die gewählte obere Bezugstemperatur und die untere Grenze bei 0°C beträgt die Temperaturspreizung von $\Delta T = 12,5$ K. Das **technische Fließgewässerwärmepotenzial** liegt bei diesem Ansatz **für Deutschland** bei:

2.692,329 TWh/a

bei einer thermischen Entzugsleistung von:

307,344 GW.

Damit ist das grundsätzlich technisch nutzbare Wärmepotenzial der Fließgewässer größer als der gesamte Endenergiebedarf von Deutschland im Jahr 2021 mit 2.410,7 TWh. Bezüglich des **theoretischen Fließgewässerwärmepotenzials** zeigt sich, dass dieses mindestens die Größe des technischen Fließgewässerwärmepotenzial aufweist oder größer. Zu klären ist hierbei, was für Gewässer als untere Bezugstemperatur sinnvoll für die Berechnung des **theoretischen Fließgewässerwärmepotenzials** angesetzt werden kann. Die tiefste mögliche Bezugstemperatur stellt der absolute Nullpunkt dar.

Infolge des Klimawandels kommt es in Deutschland darüber hinaus zu einer stetigen Zunahme des theoretisch und technisch nutzbaren Wärmepotenzials der Fließgewässer. Dies wird bedingt zum einen durch die Zunahme der Jahresmitteltemperaturen und zum anderen durch die Zunahme der Abflüsse der Fließgewässer. In der letzten Dekade hat so zum Beispiel die Jahresmitteltemperatur der untersuchten Fließgewässer in Deutschland um 0,3 K zugenommen. Damit ist das technisch nutzbare Fließgewässerwärmepotenzial für Deutschland um 64,6 TWh/a größer geworden. Im Hinblick auf die untersuchte Entwicklung der Langzeittrendlinien der Jahresmitteltemperaturen ist je nach Gewässer bis 2050 von einer weiteren Zunahme der Jahresmitteltemperatur der Fließgewässer von 1°C auszugehen. Dies würde das technisch nutzbare Fließgewässerwärmepotenzial in Deutschland von 2.692 TWh/a auf 2.908 TWh/a erhöhen, wenn der derzeit zu beobachtende Trend der Fließgewässererwärmung weiter anhält. Die thermische Entzugsleistung würde hier dann bei 332 GW liegen.

7.1.2. Ökologisch nutzbare Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Deutschland

Das **ökologisch nutzbare Wärmepotenzial** aus Fließgewässern kann aus den Untersuchungen in Kapitel 5 hergeleitet werden. Wie in Kapitel 5 dargestellt, ist in Hinblick auf die Jahresmitteltemperatur der Fließgewässer festzustellen, dass die Fließgewässer in Deutschland seit 1950 um 3 bis 4°C wärmer geworden sind. Hierzu wurden im Forschungsvorhaben 22 Fließgewässer in Deutschland an 53 Meßstellen ausgewertet. Bezogen auf das Sommer- und Winterhalbjahr zeigen die Untersuchungen in Kapitel 5, dass der Winterhalbjahresabfluss um 2 bis 3°C wärmer geworden ist und der Sommerhalbjahresabfluss um 3 bis 5°C. Daraus folgt, dass für die Berechnung des ökologischen Fließgewässerwärmepotenzials eine **Temperaturspreizung von $\Delta T = 2$ bis 3 K** angesetzt werden kann. Grundsätzlich ist sogar bei einer anteiligen Entnahme über die Länge eines Fließgewässers und einer schrittweisen Gewässerabkühlung eine Gesamttemperaturspreizung von $\Delta T = 3$ bis 4 K für besonders stark erwärmte Gewässer denkbar, wenn längerfristig

angestrebt wird, den Temperaturzustand der Fließgewässer von vor 1950 wieder zu erreichen. Abgeleitet aus der Langzeittrendentwicklung der untersuchten Fließgewässer ist von einer weiteren Erwärmung der Fließgewässer in Deutschland auszugehen, die je nach Gewässer im Jahr 2050 ca. 1 K betragen kann.

Auch andere Untersuchungen an Fließgewässern zeigen eine ökologisch mögliche Temperaturspreizung an einem Standort von $\Delta T = 2$ bis 3 K, wovon eine Temperaturspreizung von $\Delta T = 3$ K in anthropogen stark veränderten Gewässern denkbar ist. Temperaturspreizungen von $\Delta T = 4$ bis 5 K und mehr sind bei einer Wärmeentnahme an einem Standort aus ökologischer Sicht kritisch zu beurteilen.

Darüber hinaus fungieren Fließgewässersysteme als riesige Flächenwärmetauscher und können über ihre Lauflänge große Wärmemengen aus der durch sie durchflossenen Umwelt absorbieren und sich nach einem Wärmeentzug entsprechend wiedererwärmen. Dabei gilt, je kühler die Gewässer sind, desto größer ist der mögliche Wärmeentzug von Umweltwärme. Besonders in urbanen Räumen können Fließgewässer größere Wärmemengen entziehen und so zur lokalen Kühlung der sich infolge des Klimawandels im stärker aufheizenden urbanen Räume führen. Grundsätzlich ermöglicht das Phänomen der Wiedererwärmung der Fließgewässer Mehrfachentnahmen der Fließgewässerwärme über die Gewässerlauflänge.

Aus den erfassten Gesamtabflussdaten mit einem langjähriger mittlerer Jahresabfluss der Fließgewässer von 5.868 m³/s und der ökologisch verträglichen Temperaturspreizung von 2 bis 3 K kann das ökologisch nutzbaren Wärmepotenzial der Fließgewässer für Deutschland berechnet werden. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 31 dargestellt.

Gesamtjahr							
Abfluss- charak- teristik	Abfluss Deutschland [m ³ /s]	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT
		1,0 K	2,0 K	3,0 K	1,0 K	2,0 K	3,0 K
Wärmeleistung [MW]				Wärmeerzeugung Gesamtjahr [TWh]			
MQ	5.868,13	Einfach-Entnahme					
		24.587	49.175	73.762	215,386	430,773	646,159
		Zweifach-Entnahme					
		49.175	98.350	147.525	430,773	861,545	1.292,318

Tabelle 31: Wärmepotenzial aus Fließgewässern für Deutschland

Wie die Untersuchungen zeigen, weisen die Fließgewässer in Deutschland ein gewaltiges thermisches Potenzial auf und es können hohe thermische Entzugsleistungen gewonnen werden. Bei einer Temperaturabsenkung der Fließgewässer von nur 2 bis 3 K ergibt sich eine Wärmeleistung der Fließgewässer von

49,175 GW bis 73,762 GW

bei einer Einmalentnahme der Wärmemenge. Bei einer Mehrfachentnahme, die grundsätzlich, wie in Abschnitt 6.1.2. erläutert, möglich ist, vervielfacht sich die thermische Entzugsleistung. Das ökologisch nutzbare Fließgewässerwärmepotenzial für Deutschland für das Gesamtjahr liegt bei einer Einmalentnahme der Wärmemenge bei einem Temperaturspreizung von $\Delta T = 2$ bis 3 K bei

430,8 TWh/a bis 646,2 TWh/a.

In Anbetracht der tatsächlichen Gewässererwärmung und in Hinblick auf die Regeneration der Fließgewässerwärme über die Lauflänge der Fließgewässer ergibt sich ein **ökologisch nutzbares Fließgewässerwärmepotenzial für Deutschland** von:

860 bis 900 TWh/a.

Größenordnungsmäßig entspricht dieses Wärmepotenzial aus Fließgewässern 35,8 % des Endenergiebedarfs, bis zu 64 % des Gesamtwärmebedarfs und bis zu 94 % des Wärmebedarfs im Niedertemperaturbereich in Deutschland.

Die flächendeckend in Deutschland zur Verfügung stehenden Fließgewässer können dementsprechend einen wesentlichen Beitrag für die zukünftige Wärmeversorgung leisten. Auch die Stehgewässer, deren Potenzial kleiner ist ebenso wie Abwässer weisen interessante Potenziale für die Wärmebereitstellung und zur Speicherung auf.

Besonders interessant ist dies, da die Fließgewässer in Deutschland im Winter 60 bis 70 % mehr Wasser als im Sommer führen. Darüber hinaus ist die Wärmeentnahme aus Fließgewässern auch in den Wintermonaten trotz niedrigerer Gewässertemperaturen von der ökologischen Seite her von Bedeutung, da infolge des Klimawandels eine ganzjährige Durchwärmung der Fließgewässer auch im Winterhalbjahr erfolgt und zu dieser Jahreszeit die Gewässertemperaturen wesentlich höher als noch in den 1950-iger Jahren sind. Die Tendenz der Temperaturzunahme in den Fließgewässern hält darüber hinaus weiter an, so dass die Wärmeentnahme aus Fließgewässern eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Klimafolgeanpassung darstellt und zur ökologischen Verbesserung der Gewässer beiträgt.

7.2. Wärmepotenzial aus Abwässern

Nach [32] sind in Deutschland 95 % der Bevölkerung sowie die Betriebe und öffentlichen Einrichtungen an das Wasserver- und Abwasserentsorgungsnetz angebunden. Alleine das Abwasserkanalnetz weist in Deutschland eine Länge von 594.335 km und das Trinkwassernetz von 540.000 km auf [32]. Der Vorteil dieser Netze ist, dass sie direkt an die Verbraucher angeschlossen sind und damit in den Siedlungsgebieten Vorort für eine Wärmeabgabe oder Kühlung zur Verfügung stehen, so die Abflüsse ausreichend groß sind. Infolge der kurzen Zuleitungen zu den Wärmeabnehmern sind die Wärmeverluste gering. Ein großer Teil der Kanäle ist sehr alt und daher sanierungsbedürftig [32], so dass sich im Zuge der Sanierungsmaßnahmen zukünftig die Integration von Wärmenutzungen anbieten. Auch außerhalb von Sanierungsmaßnahmen ist der Einbau von Wärmetauschern in Kanalnetzen zur Nutzbarmachung der Abwasserwärme möglich. Für die Erschließung der Abwasserwärme ist die Genehmigung des Kanalnetzbetreibers erforderlich [82].

Insgesamt werden in Deutschland nach [32] 10 Milliarden m³ Abwasser jährlich behandelt. 5 Milliarden m³ sind davon Niederschlags- und Fremdwasser. Das Fremdwasser setzt sich hauptsächlich aus Grund-, Sicker- und Schichtenwasser zusammen, welches in die Kanalisation eintritt [79]. Infolge von Undichtigkeiten kann sich der Anteil an Fremdwasser in den Kanälen erhöhen, was zu einer Abkühlung des Abwassers führen kann. Das Schmutzwasser besteht aus häuslichem und betrieblichem Schmutzwasser aus Gewerbe und Industrie und macht den Großteil des in Deutschland zu behandelnden Abwassers aus.

In Tabelle 32 ist die in Deutschland behandelte Abwassermenge in den 8.891 öffentlichen Kläranlagen [83] für verschiedene Jahre innerhalb des Zeitraums von 1991 bis 2019 nach Angaben des Statistischen Bundesamtes [84] zusammengestellt. Die Gesamtsumme der in den Jahren behandelten Abwassermenge liegt zwischen 10,47 und 8,51 Mrd. m³ und der Mittelwert bei 9,639 Mrd. m³. Beim häuslichen und betrieblichen Schmutzwasser schwankt die zu behandelnde Jahresmenge zwischen 4,85 und 5,25 Mrd. m³ und beträgt 5,081 Mrd. m³ im Mittel. Das Fremd- und Niederschlagswasser umfasst je nach Jahresniederschlagsmenge 3,35 bis 5,22 Mrd. m³ pro Jahr. Das Fremdwasser macht dabei einen Anteil von 1,81 bis 2,24 Mrd. m³ und das Niederschlagswasser von 2,39 bis 3,04 Mrd. m³ aus. Im Mittel liegt der Anteil des Fremd- und Niederschlagswassers in Deutschland bei 4,558 Mrd. m³ und ist damit etwas geringer als der Schmutzwasseranteil. Für die vier in Tabelle 32 erfassten Jahre einer getrennten Fremd- und Niederschlagswasserausweisung ergeben sich als Mittelwert für das Fremdwasser 2,051 Mrd. m³ und für das Niederschlagswasser 2,744 Mrd. m³. Das Fremdwasser macht damit im Mittel 21,3 % und das Niederschlagswasser 28,5 % aus.

Für die Wärmenutzung sind nach [79] vor allem das nicht periodisch auftretende Abwasser aus häuslichem und betrieblichem Schmutzwasser und das Fremdwasser geeignet. Das Fremdwasser unterliegt anteilig zu den Trocken- und Regenwetterperioden und den Grundwasserständen gewissen Schwankungen [79]. Das Niederschlagswasser tritt dahingegen nur periodisch auf, kann aber grundsätzlich in diesen Phasen auch für die Wärmeabgabe genutzt werden.

Abwassermenge in [Millionen m ³]	1991	1995	1998	2001	2004	2007	2010	2013	2016	2019	Mittel- wert
Schmutzwasser	5.157,6	4.854	4.905,3	5.254,3	5.204,4	5.213	5.013	5.021	5.055	5.133	5.081
Fremdwasser			1.976,2	2.177,2	1.812			2.240			2.051
Niederschlagswasser			2.758	3.041,8	2.393,7			2.781			2.744
Summe Fremd- und Niederschlagswasser	3.354,4	4.992,6	4.734,2	5.219	4.205,7	4.857	4.976	4.804	4.526	3.915	4.558
Gesamtsumme Jahresabwassermenge	8.512	9.846,6	9.639,5	10.473,3	9.410,1	10.070	9.989	9.825	9.581	9.048	9.639

Tabelle 32: behandelte Abwassermenge in öffentlichen Kläranlagen in Deutschland nach [84]

Die Temperaturen des Abwassers liegen über das gesamte Jahr betrachtet zwischen 10°C und 22 bis 23°C. Im Winter liegen die Temperaturen zwischen 10 bis 12°C, laut DWA [79] und [74] sogar zwischen 10 bis 15°C, und im Sommer zwischen 17 bis 20°C [82]. Im Jahresmittel können daher Abwassertemperaturen von 15°C angenommen werden. Laut Berliner Wasserbetrieben liegt in den Abwasserkanälen im Winter eine Mischtemperatur von 16°C und im Sommer von 21°C vor [86]. Um eine optimale Abwasserreinigung sicher zu stellen, sollte die minimale Einlauftemperatur in die Kläranlagen nach [82] nicht unterhalb von 10°C sein. Bei Mehrfachentnahmen sind entsprechende Laufstrecken als Erholungsstrecken einzuplanen, um eine ausreichende Wiedererwärmung des Abwassers durch das umgebende Erdreich und durch Neueinleitungen aus weiteren Abwasseranschlüssen sicherzustellen. In [85] wird angenommen, dass sich die Abwassertemperatur entsprechend der Erdbodentemperatur entwickelt und eine Minimaltemperatur von 10°C nicht unterschreitet.

Eine Untersuchung der Entwicklung der Abwassertemperaturen nach einer Wärmenutzung wurde in der Schweiz im Rahmen eines Forschungsvorhabens über 2 Jahre durchgeführt [74]. Für mittlere Parameterwerte bei einer typischen Wintertrockenwettersituation zeigen sich die vorliegende Abwassertemperatur nach Wärmeentnahme, die Durchflussmenge sowie die Feuchtigkeit und Temperatur der Kanalisationsluft als relevante Parameter. Wenn die Abwassertemperatur infolge der Wärmeentnahme unter 8°C sinkt, steigt diese über eine ausreichend lange Erholungsstrecke nach [74] wieder an, auf Grund der Tatsache, dass die Temperatur des umgebenden Erdreichs im Winter mit 8 bis 12°C wärmer ist. Ebenfalls wurde in den Untersuchungen nach [74] festgestellt, dass die natürlichen Wärmeverluste in der Kanalisation bei ca. 1 K liegen. Ein Bezug dieses Verlustes z.B. auf eine Streckenlänge wurde in [74] nicht angegeben. Die Untersuchungen zeigen, dass die Temperaturabsenkung infolge Wärmeentnahme durch die Zuführung weiterer Teilströme kompensiert wird.

Nach [74] sind die in Abwasserreinigungsanlagen durch Temperatureinflüsse am meisten betroffenen Prozesse die Nitrifikation und die Denitrifikation. Bei Abkühlung der Abwässer nimmt dabei der Wirkungsgrad der Stickstoffelimination auf Grund der verminderten Wachstumsgeschwindigkeit der Mikroorganismen ab, weshalb die Abwassertemperatur nicht deutlich unter der Dimensionierungstemperatur in Deutschland bei 10°C und in der Schweiz bei 8 bis 10°C liegen soll. In den Kläranlagen können kurzfristige Tagesschwankungen von 2 bis 3 K auf 0,5 K Schwankung gedämpft werden. Auch die Tag-Nacht-Schwankungen haben nach [74] keinen relevanten Einfluss auf die Nitrifikation und die NH_4 -Konzentration im Ablauf der Kläranlage. Gleichzeitig erhöht sich infolge der biologischen Prozesse innerhalb einer Kläranlage die Abwassertemperatur um 0,5 K, was zu höheren Ablauftemperaturen führt [74]. Im Hinblick auf diese Aspekte wird eine mittlere Temperaturabsenkung von 0,5°C als Grenzkriterium bei Abwassertemperaturen im Bereich von 10°C beim Einlauf in die Kläranlage innerhalb der kritischen Wintermonate als unproblematisch angesehen [74; 79]. Die Auswirkungen von Temperaturabsenkungen beim Abwasser sind umso unbedenklicher, je größer die Dimensionierungsreserve der Abwasserreinigungsanlage ist.

Grenzfälle bzgl. der Einhaltung der Ammonium (NH_4) und Nitrit (NO_2) – Ablaufgrenzwerte infolge der Temperatureinflüsse durch Wärmeentnahme ergeben sich nach [74] ggf. in den Wintermonaten, so dass hier genauere Untersuchungen notwendig sein können. Für Frühling, Sommer und Herbst liegen nach [74] die Abwassertemperaturen alleine in der Schweiz durchschnittlich zwischen 12 bis 20°C, so dass hier die Wärmeentnahme für die meisten Kläranlagen unproblematisch ist. Bei der Einleitung der Abwässer in die Fließgewässer sollte nach [74] die Abwassertemperatur nicht niedriger als 3 K im Vergleich zu der im Fließgewässer vorliegenden Temperatur sein, um die Möglichkeit der lokalen Beeinträchtigung der Flora und Fauna ausschließen zu können.

Unter den oben genannten Randbedingungen kann für eine Abschätzung des Wärmepotenzials aus Abwässern eine Temperaturabsenkung von $\Delta T = 2$ bis 5 K für die Wärmegewinnung angesetzt werden. In [79] wird eine Temperaturdifferenz von 3 bis 4 K als praktikabel betrachtet und auf realisierte Projekte und Vorstudien hingewiesen, bei denen Temperaturabkühlungen von 4°C keine Beeinträchtigung der Funktionsweise der Kläranlagen bewirkt haben. Das berechnete Wärmepotenzials aus Abwässern zeigt Tabelle 33.

Abfluss- charak- teristik	Abwasser- abfluss [m ³ /s]	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT
		2,0 K	3,0 K	4,0 K	5,0 K	2,0 K	3,0 K	4,0 K	5,0 K	2,0 K	3,0 K	4,0 K	5,0 K
		Wärmeleistung [MW]				Wärmeerzeugung Heizperiode [TWh]				Wärmeerzeugung Gesamtjahr [TWh]			
MQ _{gesamt}	305,66	2.561	3.842	5.123	6.404	13,0	19,5	26,1	32,6	22,4	33,7	44,9	56,1
MQ _S	161,12	1.350	2.025	2.700	3.375	6,9	10,3	13,7	17,2	11,8	17,7	23,7	29,6
MQ _{F+N}	144,55	1.211	1.817	2.423	3.028	6,2	9,2	12,3	15,4	10,6	15,9	21,2	26,5
MQ _F	65,05	545	818	1.090	1.363	2,8	4,2	5,5	6,9	4,8	7,2	9,6	11,9
MQ _N	87,00	729	1.094	1.458	1.823	3,7	5,6	7,4	9,3	6,4	9,6	12,8	16,0

Tabelle 33: Wärmepotenzial aus Abwässern für Deutschland
mit MQ_S, MQ_F und MQ_N - mittlerer Abfluss Schmutz-, Fremd- und Niederschlagswasser

Bei der Potenzialabschätzung wurde nur eine Einfachentnahme berücksichtigt. Grundsätzlich sind auch Mehrfachentnahmen denkbar, hierzu müssen dann aber genaue Untersuchungen in dem jeweiligen Kanalnetz erfolgen und die notwendigen Erholungsstrecken ermittelt werden.

Eine Abwassernutzung zur Wärmegegewinnung ist ab einem Abwasseraufkommen von ca. 10 l/s sinnvoll [86], d.h. es werden gewisse Einleitungsgebietsgrößen bzw. ausreichende Strecken der Sammelkanäle benötigt. Für 10 l/s Abwasser sind nach [86] ca. 2.500 Haushalte erforderlich. Die nutzbare Wärmeleistung beträgt 100 bis 200 kW bei einer Spreizung von 3 bis 5 K Temperaturdifferenz zzgl. 25 bis 50 kW elektrischer Energie. Das gewinnbare Abwasserwärmepotenzial liegt bei 10 l/s innerhalb der Heizperiode bei 850 MWh und für das gesamte Jahr bei 1.460 MWh bei einer Temperaturabsenkung von $\Delta T = 4$ K. Innerhalb der Heizperiode können damit von der Wärmemenge 85 Haushalte versorgt werden. Bezieht man das Ganze nur auf die reine Leistung so sind es 17 bis 34 Haushalte. Nach [74] ist die Nutzung der Abwasserwärme für mittlere Trockenwetterabflüsse von 15 l/s sinnvoll, was bei Gemeinden ab 3.000 bis 5.000 Einwohnern vorliegt. In [79] werden 10 bis 15 l/s als geringste Durchflussrate angesehen, ab der eine ökonomische Nutzung der Abwasserwärme möglich ist. In [79] wird aber auch darauf hingewiesen, dass auch kleinere Projekte mit Heizlasten bis 20 kW erfolgreich umgesetzt wurden, so dass es sinnvoll erscheint, die jeweiligen Projekte im Einzelfall zu bewerten und auch kleinere Abwasserpotenziale nicht außer Acht zu lassen.

Bei der Untersuchung wurde die Ausgangstemperatur von Niederschlagswasser, Fremdwasser und Abwasser als gleich angesetzt. Tatsächlich ist aber gerade im Winterhalbjahr die Temperatur des Niederschlagswassers niedriger als die Abwassertemperatur, so dass hier eigentlich mit unterschiedlich nutzbaren Temperaturdifferenzen gearbeitet werden muss. Auch das Fremdwasser weist phasenweise geringere Temperaturen als das Abwasser auf. Deshalb wurden in Tabelle 33 Niederschlagswasser, Fremdwasser und das reine Abwasser getrennt ausgewiesen, um zukünftig solche Unterschiede erfassen und bewerten zu können. In [79] werden die nur phasenweise auftretenden Abwasseranteile aus Niederschlag nicht betrachtet. Da diese Anteile aber trotzdem in die Abwasserbehandlung eingehen und durch das Abwasserkanalnetz strömen und hier zur Verfügung stehen, sind die Niederschlagsanteile in Tabelle 33 mituntersucht worden, da spätestens bei Wärmegegewinnungen in oder hinter der Kläranlage diese Anteile durch die große Speicherwirkung der Kläranlage nutzbar sind.

Insgesamt lässt sich unter Berücksichtigung der oben benannten Randbedingungen das Gesamtwärmepotenzial aus Abwässern in Deutschland für eine Temperaturabsenkung von $\Delta T = 4$ K auf mindestens 26,1 TWh/a für die Heizperiode von 212 Tagen und auf 44,9 TWh/a für den Ganzjahresbetrieb abschätzen, wie in Tabelle 33 ersichtlich. Hierbei wurde nur eine Einfachentnahme berücksichtigt. Für die Temperaturspreizung von 3 bis 5 K liegt das Gesamtwärmepotenzial bei 19,5 bis 32,6 TWh für die Heizperiode und für das Gesamtjahr bei 33,7 bis 56,1 TWh. Die zur Verfügung stehende Wärmeleistung variiert von 3.842 MW bis 6.404 MW und für $\Delta T = 4$ K ergibt sich eine Wärmeleistung von 5.123 MW. Der

Gesamtabwasserstrom für den Mittelwert der Jahresabwassermenge von 9,639 Mrd. m³ nach Tabelle 33 beträgt 305,66 m³/s, siehe auch Tabelle 33. Für die langjährige mittlere Schmutzwassermenge liegt ein Abfluss von 161,12 m³/s und für das Fremd- und Niederschlagswasser von 144,55 m³/s vor. Diese beiden Anteile lassen sich im Mittel auf 65,05 m³/s Fremdwasser und auf 87 m³/s Niederschlagswasser aufteilen. Für eine unterschiedliche Bewertung von Schmutzwasser, Fremdwasser und Niederschlagswasser bezüglich des nutzbaren Wärmepotenzials und der hier jeweils erschließbaren Temperaturdifferenz kann Tabelle 33 ebenfalls genutzt werden, da hier eine Temperaturpreizung von 2 bis 5 K ausgewiesen ist.

In [85] wird das gesamte theoretische Potenzial der Abwasserwärme auf 156,5 TWh und das technische Potenzial auf 98,4 bis 101,4 TWh geschätzt. Hierbei wird offensichtlich von einem Ganzjahresbetrieb ausgegangen. Der technische Ausnutzungsgrad bezogen auf das theoretische Potenzial liegt bei [85] bei ca. 62,9 bis 64,8 %. Der benötigte Strom zur Hebung des Wärmepotenzials wird bei einer Jahresarbeitszahl von 4,5 zu 22 TWh ermittelt. In der Studie [85] wird nicht angegeben, welche Abwassermenge angenommen wurde. Nach [85] macht das Fremdwasser 1/3 des gesamten Abwasseraufkommens aus. Auch ist die für die Auswertung gewählte Temperaturabsenkung nicht benannt. Ebenfalls liegen keine Aussagen vor, ob eine Mehrfachentnahme angesetzt worden ist.

Bei 9,581 Milliarden m³ Abwasser im Jahr 2016 ergeben sich bei einer Temperaturabsenkung von 14 K bei den eigenen Untersuchungen 90,676 TWh für die Heizperiode und 156,117 TWh bei einer Einfachentnahme für das Gesamtjahr, was dem in [85] ermittelten 156,5 TWh für das theoretische Potenzial entspricht. Das bedeutet, dass im Hinblick auf eine mittlere Abwassertemperatur von ca. 14 bis 15°C über das gesamte Jahr in [85] das vollständige Wärmepotenzial des Abwassers in Deutschland bis zu einer Abkühlung auf 0°C ausgewertet wurde. Dies stellt tatsächlich das vollständige theoretische Gesamtpotenzial aus Abwasser in Deutschland dar, von dem im Hinblick auf die möglichen Temperaturabsenkungen im Bezug auf die Prozesse der Abwasserreinigung ca. ein Drittel technisch nutzbar ist. In [79] wird ebenfalls eine in [85] angesetzte Temperaturdifferenz von 14 K ermittelt, um das in [85] angegebene theoretische Potenzial zu erhalten.

Wird das theoretische Gesamtpotenzial der Abwasserwärme für den Mittelwert der Jahresabwassermenge von 9,639 Mrd. m³ bestimmt, so ergibt sich ein Potenzial von 157,069 TWh bei einer Temperaturdifferenz von 14 K.

In [79] wird bei einer Temperaturabsenkung von 4 K und einer Abwassermenge von 10 Milliarden m³ sowie bei einer Jahresarbeitszahl von 4,5 ein Nutzwärmebedarf von 59 TWh ermittelt. Bei den eigenen Untersuchungen ergibt sich unter diesen Randbedingungen ein Abwasserwärmepotenzial von 27,041 TWh für die Heizperiode und 46,556 TWh bei einer Einfachentnahme für das Gesamtjahr. Bei Mitberücksichtigung des für die Wärmepumpen erforderlichen Stroms von 10,346 TWh bei einer Jahresarbeitszahl von 4,5, liegt die gewinnbare Heizenergie bei 56,902 TWh für das Gesamtjahr. Das Potenzial von 59 TWh wird in [79] auf 43 TWh unter Vernachlässigung der Abwassermenge aus Niederschlag und für einen Mindestabwasserabfluss ab 15 l/s und infolge auf 21,7 bis 32,7 TWh reduziert.

Andere Studien wie [73] weisen für eine Temperaturdifferenz von 8 K ein Abwasserwärmepotenzial von 79 TWh aus. In [74] wird für eine Temperaturdifferenz von 0,5 K, einem Abwasservolumenstrom von 6,302 Milliarden m³ ein Nutzwärmepotenzial von 4,887 TWh für Deutschland berechnet. Hierbei ist das reine Abwasserwärmepotenzial bei 3,665 TWh und der dazu gehörige Strombedarf bei 1,222 TWh bei einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 4. Die gesamte Wärmeleistung beträgt 558 MW von denen 418 MW auf die Abwasserwärme und 139 MW auf den Strom entfallen.

Die beachtliche Größe der Wärmemenge im Wasser zeigt sich nach [74] auch darin, dass bei einer Temperaturabsenkung von 1 K aus 1 m³ Abwasser 1,164 kWh Wärme auf das Jahr bezogen gewonnen werden können. Verglichen mit der Klärgasgewinnung kann aus 1 m³ Abwasser 0,05 m³ Klärgas erzeugt werden, was einem Energiegehalt von 0,3 kWh entspricht [74]. Da bei Abwasser sowohl die Wärmegewinnung aus Temperaturabsenkung als auch

das Klärgas nutzbar ist, ergibt sich insgesamt für 1 K Temperaturabsenkung eine Energiemenge von ca. 1,5 kWh pro 1 m³ Abwasser.

Zusammenfassung Abwasserwärmepotenzial Deutschland:

Das theoretische Gesamtpotenzial der Abwasserwärme für Deutschland liegt für den langjährigen Mittelwert der Jahresabwassermenge von 9,639 Mrd. m³ bei 157,069 TWh bei einer Temperaturdifferenz von 14 K. Davon technisch nutzbar ist eine Temperaturdifferenz von 4°C woraus sich bei einer Einfach-Entnahme ein Wärmepotenzial von 26,1 TWh/a für die Heizperiode mit 212 Tagen und von 44,9 TWh/a für den Ganzjahresbetrieb berechnen lässt. Zur Hebung des Wärmepotenzials wird zum Betrieb der Wärmepumpen bei einer Jahresarbeitszahl von 4,5 der Wärmepumpe 5,8 TWh Strom in der Heizperiode und 9,97 TWh Strom für einen Ganzjahresbetrieb benötigt.

Um eine Vorstellung für die Größe der zur Verfügung stehenden Abwasserpotenziale im städtischen Bereich zu vermitteln, sind nachfolgend beispielhaft die Abwasserwärmepotenziale für Berlin und London zusammengestellt und in Tabelle 34 berechnet und gezeigt.

Abfluss- charak- teristik	Ab- wasser- abfluss [m ³ /s]	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT
		2,0 K	3,0 K	4,0 K	5,0 K	2,0 K	3,0 K	4,0 K	5,0 K	2,0 K	3,0 K	4,0 K	5,0 K
		Wärmeleistung [MW]				Wärmeerzeugung Heizperiode [GWh]				Wärmeerzeugung Gesamtjahr [GWh]			
MQ Abwasser Berlin	7,87	66	99	132	165	336	503	671	839	578	867	1.156	1.444
MQ Abwasser London	53,24	446	669	892	1.115	2.270	3.405	4.540	5.675	3.908	5.863	7.817	9.771

Tabelle 34: Wärmepotenzial aus Abwässern am Beispiel Berlin und London

Für Berlin wurde von den Wasserbetrieben eine generierbare Wärmeleistung aus Abwasser von 300 MW ermittelt, was für die Versorgung von 60.000 bis 70.000 Haushalten ausreicht und 3 bis 5 % der in Berlin benötigten Wärmemenge entspricht [86]. Bei einem Abwasseraufkommen von 248,2 Mio. m³ im Jahr 2022, was 680.000 m³ am Tag darstellt [87], ergeben sich bei einer Einfach-Entnahme für Berlin aus Abwasser Wärmeleistungen von 100 bis 160 MW (Spreizung 3 bis 5 K) und Erzeugungen von 0,67 TWh in der Heizperiode und 1,15 TWh für das gesamte Jahr bei einer Temperaturabsenkung von 4 K, siehe Tabelle 34. Der mittlere Abwasserstrom liegt hier bei 7,87 m³/s. In Berlin gehen zusätzlich ca. 7,2 Mio. m³ ungefiltertes Schmutzwasser bei Regenereignissen verloren [87], die nicht der Abwasserreinigung zugeführt werden können, sondern in die Fließgewässer abgeschlagen werden, was einem Volumenstrom von 228 l/s gleich kommt. In Anbetracht des vorhandenen großen Wärmepotenzials, den ca. 10.000 km Kanalnetz und den 166 Pumpwerken [87], ist die Nutzung der Abwasserwärme eine vielversprechende Option für die zukünftige Wärmeversorgung von Berlin.

In London wurde im Auftrag von Thames Water, dem größten Wasserver- und Abwasserentsorger Großbritanniens, ein nutzbares Wärmepotenzial aus Abwasser von 10 TWh/a identifiziert [88], was für die Versorgung von 1 Mio. Haushalten bei einem durchschnittlichen Wärmebedarf von 10.000 kWh/a pro Haushalt ausreicht. Damit können ungefähr 20 % der Londoner Haushalte mit Wärme versorgt werden. Der Wärmebedarf 2020 lag bei den Londoner Haushalten bei 12.900 kWh/a pro Haushalt [88], was 775.000 versorgbaren Haushalten entspricht. Bei dem in [88] angegebenen Wärmepotenzial ist davon auszugehen, dass hier das Gesamtjahr und nicht nur die reine Heizperiode betrachtet wurde. Die gewählte Temperaturabsenkung und die untersuchte Abwassermenge zur Potenzialermittlung sind in [88] nicht angegeben.

Wird die jährlich zu reinigende Abwassermenge von Thames Water nach [89] für 15 Millionen Menschen in 350 Klärwerken mit 1,679 Mrd. m³/a Abwasser bzw. 4,6 Mio. m³ Abwasser am Tag herangezogen, lässt sich bei einer Einfach-Entnahme eine Wärmeleistungen von 667 bis 1.112 MW (Spreizung 3 bis 5 K) und Erzeugungen von 4,53 TWh in der Heizperiode und 7,79 TWh für das gesamte Jahr bei einer Temperaturabsenkung von 4 K berechnen, siehe Tabelle 34. Wird eine Temperaturabsenkung von 5 K angesetzt,

ergibt sich ein Wärmepotenzial für das Gesamtjahr von 9,743 TWh/a, was mit der Potenzialabschätzung von KMPG in [88] mit 10 TWh/a identisch ist.

Der mittlere Abwasserstrom liegt nach den Angaben von Thames Water bei 53,24 m³/s. In London gingen zusätzlich ca. 50 Mio. m³ ungefiltertes Schmutzwasser bei Regenereignissen verloren, die in die Themse abgeschlagen wurden. Zur Reduktion dieser Verlustwassermenge wurden technische Lösungen erarbeitet, so dass 2020 nur noch 3,5 Mio. m³ ungefiltertes Schmutzwasser bei Regenereignissen in die Themse gelangt sind [90].

Ausführungsarten von Wärmetauschern zur Abwasserwärmenutzung

Die Nutzung der Abwasserwärme kann nach [79] und [74] durch die Nutzung des ungereinigten Rohabwassers in der Kanalisation in den Abwasserleitungen und –kanälen vor der Kläranlage, in der Kläranlage oder mit der Nutzung des gereinigten Abwassers hinter der Kläranlage erfolgen. Da nach [79] Kläranlagen meist in räumlichen Abstand zu Siedlungsgebieten errichtet werden, ist häufig die Nutzung der Abwasserwärme direkt in der Kanalisation interessant, da hier meist die Wärmeverbraucher in unmittelbarer Nähe zu finden sind. Für die Fernwärmebereitstellung kann die Abwasserwärmegewinnung in oder hinter der Kläranlage von Bedeutung sein, zumal dies technisch einfacher umsetzbar ist.

Für die Nutzung der Abwasserwärme können Kanalwärmetauscher oder Bypasswärmetauscher verwendet werden [79]. Kanalwärmetauscher werden als vorgefertigtes Element den Abmessungen und der Form des Abwasserkanals entsprechend als Modul gefertigt und können nachträglich in Abwasserkanäle mit einer Nennweite von mindestens DN 400 eingebaut werden. Beim Neubau können diese Module direkt in der Rohrleitung integriert werden [79]. Anderen Angaben bzw. Systemen zufolge bedarf es einer Nennweite von mindestens DN 600 [86] oder DN 800 [74]. Kanalwärmetauscher können z.B. als Rinnen- oder Rohrwärmetauscher ausgeführt werden [74]. Die Länge eines Kanalwärmetauschers kann 200 bis 300 m und mehr betragen und bei entziehbaren Temperaturdifferenzen von 3 bis 4 K Wärmeleistungen von 2 bis 4 kW pro m² ermöglichen [79]. Bypasswärmetauscher entnehmen einen Teilstrom des Abwassers und können als Platten- oder Doppelrohrwärmetauscher ausgeführt werden [79].

Bei größeren Entfernungen zu den Verbrauchern können nach [74] relativ kostengünstig Distanzen bis über 1 km mit kalter Fernwärme in unisolierten Leitungen überwunden werden, in denen sich das ursprüngliche Temperaturniveau des Abwassers von 10 bis 20°C erhält. Wird eine warme Fernwärme angestrebt, sind isolierte Leitungen und ein Temperaturniveau von 40 bis 60°C mit Leitungslängen bis 200 m sinnvoll.

8. Untersuchung des Wärmepotenzial aus Fließgewässern in Deutschland für die 80 Großstädte

Für die Berechnung des nutzbaren Wärmepotenzials aus Fließgewässern in den 80 Großstädten in Deutschland wurden die zur Verfügung stehenden Gewässerpegel und die Einzugsgebiete der Fließgewässer ausgewertet. Die in den jeweiligen Großstädten vorhandenen Fließgewässer wurden aufgenommen, lokale Gewässermodelle aufgebaut und aus den Abfluss- und Temperaturdaten die möglichen thermischen Entzugsleistungen bestimmt und anschließend das Wärmepotenzial ermittelt. Teilweise konnten Pegel am Ausfluss des städtischen Gewässergebietes genutzt werden, bei denen die Teilgewässer des Stadtgebietes durch den Zusammenfluss erfasst sind. Bei anderen Städten erfolgte die Auswertung über die Gewässereinzugsgebiete, um das zur Verfügung stehende Abflusspotenzial zu bestimmen. In Bild 82 sind das Fließgewässernetz und die Verteilung der 80 Großstädte in Deutschland dargestellt. Die grundsätzlich gute flächendeckende Verfügbarkeit der Fließgewässer in Bezug auf die 80 Großstädte ist in Bild 82 deutlich erkennbar.

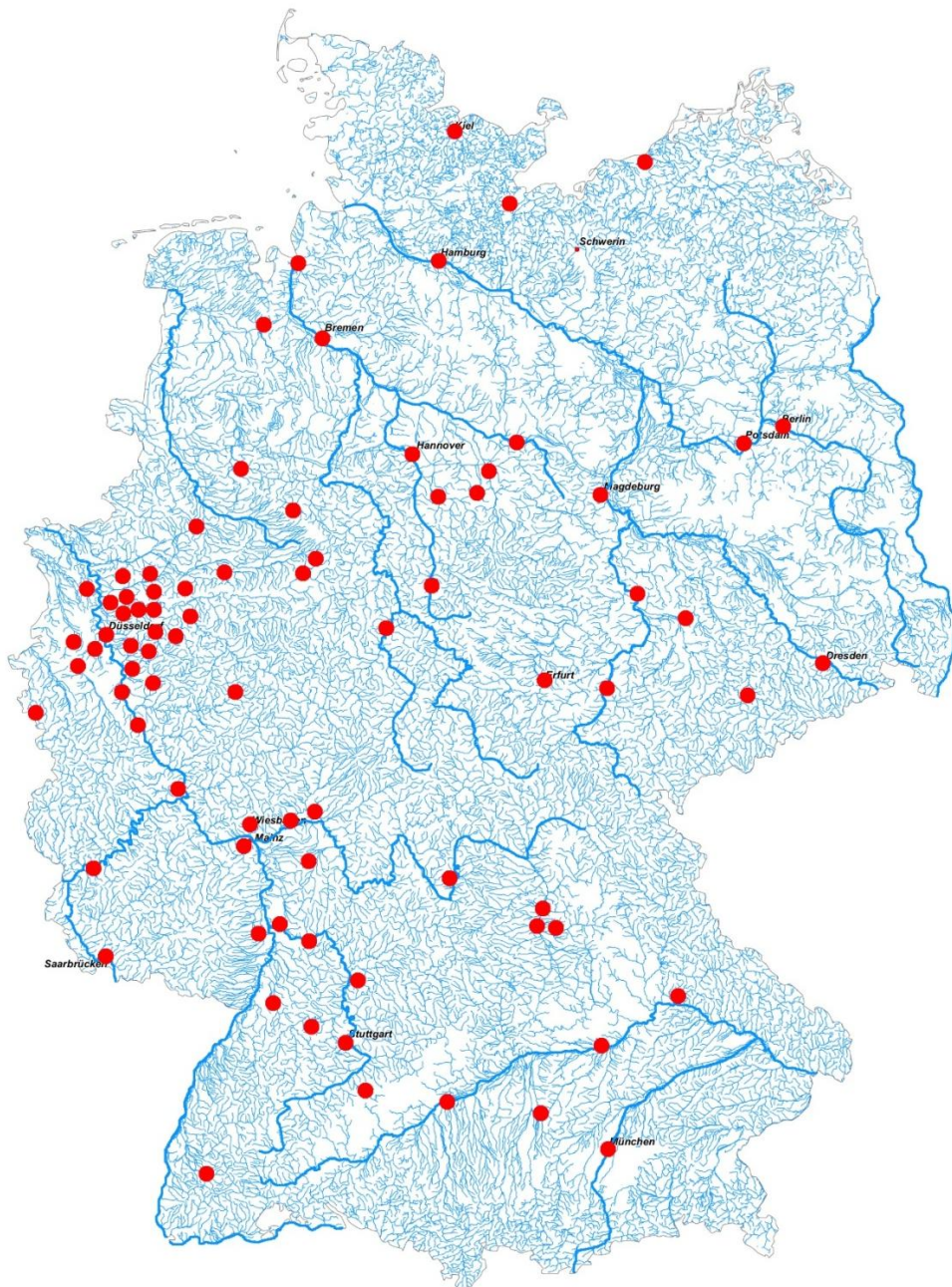


Bild 82: Fließgewässernetz und Lage der 80 Großstädte in Deutschland © BKG [33], ergänzt

Bezogen auf die verschiedenen Flussgebiete zeigt sich, dass von den 80 Großstädten 10 Großstädte im Elbe-, 10 Großstädte im Weser-, 4 im Ems-, 5 im Donau- und 48 im Rheineinzugsgebiet liegen. Wird das Rheineinzugsgebiet genauer aufgegliedert, befinden sich 7 Großstädte im Main-, 6 im Neckar- und 3 im Moseleinzugsgebiet. Im Bereich der Emscher, Ruhr und Wupper existieren die meisten Großstädte innerhalb des Rheineinzugsgebietes. Im Einzugsgebiet der Ostsee befinden sich 3 Großstädte, wobei Lübeck über die Trave und Rostock über die Warnow mit dieser verbunden sind, während Kiel über die Förde direkt an der Ostsee liegt.

Die Berechnung des Potentials der Grünen Nah- und Fernwärme für die 80 Großstädte in Deutschland erfolgt unter Zuhilfenahme der jeweiligen gewässerkundlichen Daten der Fließgewässer, welche das Stadtgebiet der zu untersuchenden Großstadt durchfließen. Die für die Auswertung benötigten hydraulischen Daten werden aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern sowie aus den Angaben der Flussgebietsgemeinschaften und –körperschaften, Kommunen, Bundesländer und weiterer Quellen entnommen.

Für die Berechnung der erschließbaren Wärmeleistung sind ein Temperaturentzug von 2 K und eine Einmalentnahme der Fließgewässerwärme innerhalb des jeweiligen Stadtgebietes angesetzt. Für die Heizperiode wurde der Zeitraum vom 1. Oktober bis 30. April und damit 212 Tage gewählt, wie in Abschnitt 6.2. erläutert. Für das Gesamtpotenzial der Aquathermie sind 365 Tage anzusetzen. Auf Grund der Betrachtung des Winterhalbjahres wird für die Potentialuntersuchung soweit vorliegend der mittlere winterliche Durchfluss des Fließgewässers für die jeweilige Großstadt herangezogen, um hier eine genaue Auswertung des in der Heizperiode zur Verfügung stehenden Fließgewässerwärmepotenzials zu ermöglichen.

Um eine Vorstellung der Größe des vorhandenen Wärmepotenzials aus Fließgewässern in den untersuchten Großstädten zu ermöglichen, werden der Endenergiebedarf und der hier erfasste Wärmebedarf für Deutschland betrachtet und daraus Einwohner bezogene Daten für die Großstädte gewonnen. Die Aquathermie ist besonders für die Bereitstellung von Raumwärme geeignet. Wird der gesamte Raumwärmebedarf für Deutschland nach Tabelle 4 in Kapitel 3 analysiert, so lag dieser 2021 bei 673,94 TWh. Davon entfielen auf die Haushalte 456,61 TWh, auf Gewerbe, Handel, Dienstleistungen 173,31 TWh, 40,83 TWh auf die Industrie und 3,19 TWh auf den Verkehr.

Für die 80 Großstädte und ihre Versorgungsmöglichkeit mittels Fließgewässerwärme wird für den gesamten Raumwärmebedarf von 673,94 TWh ein pro Kopf auf die Gesamtbevölkerung in Deutschland bezogener Schlüssel berechnet, der dann eine Abschätzung des gesamten Raumwärmebedarf pro Großstadt bezogen auf ihre Einwohnerzahl ermöglicht. Der pro Kopf bezogene Gesamttraumwärmebedarfs-Schlüssel liegt bei 83.237.124 Einwohnern (Stand 31.12.2021) in Deutschland bei:

$$f_{gesamt}^{RW} = \frac{\text{Gesamttraumwärmebedarf}}{\text{Gesamtbevölkerung}} = \frac{673,94 \cdot 10^9}{83.237.124} = 8.096,6 \text{ kWh/Ew.}$$

Wird für die 80 Großstädte nur der Raumwärmebedarf der Haushalte mit 456,61 TWh des Endenergiebedarfs in Deutschland betrachtet, ergibt sich der pro Kopf auf die Gesamtbevölkerung in Deutschland bezogener Schlüssel, aus dem analog zum Gesamttraumwärmebedarf auch der Raumwärmebedarf der Haushalte pro Großstadt ermittelt werden kann. Der pro Kopf bezogene Haushaltsraumwärmebedarfs-Schlüssel liegt bei:

$$f_{Haushalte}^{RW} = \frac{\text{Haushaltsraumwärmebedarf}}{\text{Gesamtbevölkerung}} = \frac{456,61 \cdot 10^9}{83.237.124} = 5.485,6 \text{ kWh/Ew.}$$

Die Ergebnisse der Untersuchung des Wärmepotenzials aus Fließgewässern für die 80 Großstädte in Deutschland sind in Bild 83 für die mögliche Wärmeerzeugung aufgeführt. Hierfür sind die Großstädte nach der Größe ihrer möglichen Fließgewässerwärmeerzeugung absteigend sortiert dargestellt. Auf Grund der starken Unterschiede bezüglich der

Größenordnung der möglichen Wärmeerzeugung aus Fließgewässern zwischen den einzelnen Großstädten untereinander wurde eine logarithmische Darstellung für die Wärmeerzeugung in Bild 83 gewählt. Die Ergebnisse der Untersuchung in Bild 83 und in Tabelle 35 zeigen, dass in den 80 Großstädten eine Wärmeleistung aus Fließgewässern im Winterhalbjahr von insgesamt 278,981 GW für die 26.576.802 Einwohnern generiert werden kann, was einer Wärmeerzeugung innerhalb der Heizperiode von 1.419,48 TWh/a entspricht. Die im Vergleich zum Gesamtwärmpotenzial aus Fließgewässern in den 80 Großstädten erschließbare höhere jährliche Wärmemenge liegt an der Mehrfachentnahme der Fließgewässerwärme wie z.B. am Rhein, da sich hier mehrere Großstädte befinden.

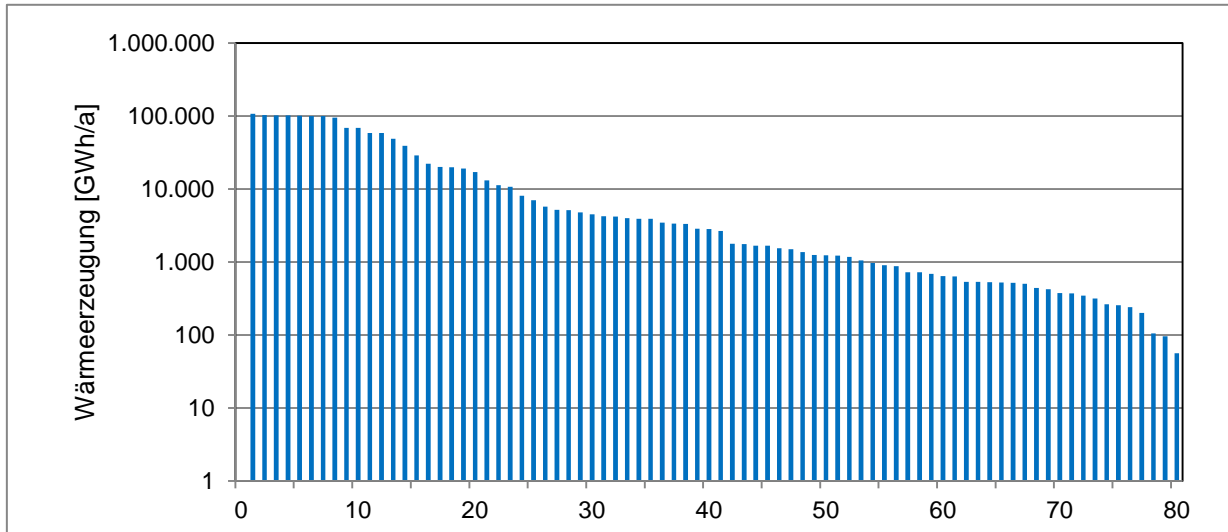


Bild 83: Fließgewässerwärmepotenzial der 80 Großstädte in der Heizperiode in Deutschland nach der Größe sortiert

Wie in Bild 83 ersichtlich, weist selbst die Großstadt mit dem kleinsten Fließgewässerpotenzial noch ein nutzbares Wärmepotenzial von 56,4 GWh in der Heizperiode bei einer Einmalentnahme auf, womit 10 % der Haushalte mit Raumwärme versorgt werden können. 77 Großstädte besitzen ein Wärmepotenzial aus Fließgewässern von weit über 200 GWh, davon 55 Großstädte ein Wärmepotenzial von 1.000 GWh und mehr und zwei Großstädte ein Wärmepotenzial von 100 GWh, wie Bild 83 verdeutlicht.

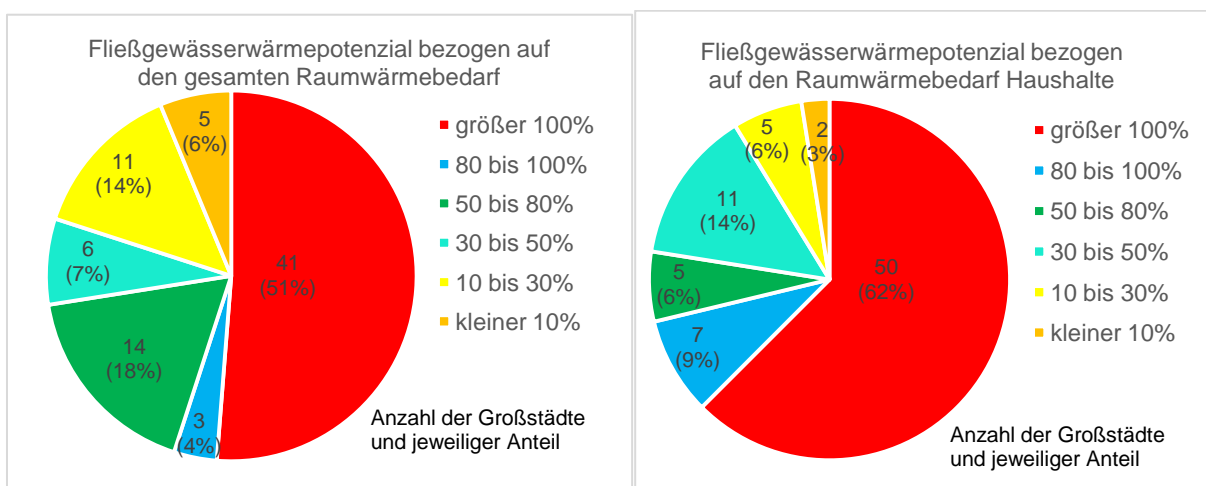


Bild 84: Fließgewässerwärmepotenzial der 80 Großstädte bezogen a) auf den gesamten Raumwärmebedarf und b) den Raumwärmebedarf der Haushalte

Neben der Potenzialermittlung wurde im Forschungsvorhaben auch untersucht, wie viel die Fließgewässerwärme im Bereich der Raumwärmeversorgung in der jeweiligen Großstadt grundsätzlich bereitstellen könnte. Hierzu wurde, wie oben gezeigt, ein personenbezogener

Schlüssel für den Gesamtraumwärmebedarf und für den Raumwärmebedarf der Haushalte aus dem Endenergiebedarf für Deutschland und den in Deutschland lebenden Personen ermittelt. Nachdem Schlüssel ergibt sich für die untersuchten 80 Großstädte in Deutschland als Gesamtsumme ein Gesamtraumwärmebedarf von 215,2 TWh/a und ein Haushaltsbezogener Raumwärmebedarf von 145,8 TWh/a.

In Bild 84 a) sind die Ergebnisse der Untersuchungen zum Wärmepotenzial der Fließgewässer dargestellt. 41 der 80 Großstädte in Deutschland und damit 51 % können ihren gesamten Raumwärmebedarf für Haushalte, Industrie, Dienstleistung, Handel und Gewerbe zu 100 % und mehr aus den Fließgewässern decken. 58 Großstädte können ihren Raumwärmebedarf zu mindestens 50 % aus der Fließgewässerwärme generieren, was 73 % aller Großstädte entspricht. Nur 5 Großstädte weisen ein Fließgewässerpotenzial von maximal 10 % der erforderlichen Raumwärmebereitstellung bei einer Einmalentnahme auf. Wird nur der für die Haushalte benötigte Raumwärmebedarf betrachtet, besitzen nur zwei Großstädte ein Potenzial von maximal 10 % bei einer Einmalentnahme der Fließgewässerwärme, wohingegen 50 Städte ein Potenzial von 100 % und mehr aufweisen. Für die kommunale Wärmeversorgung sind auch Umweltwärmequellen die 10 % des benötigten Raumwärmebedarfs bereitstellen können, von großer Bedeutung, da eine vollständige Versorgung einer Großstadt mit Nah- und Fernwärme i.a. nicht der Fall sein wird. Alleine bei einer Fernwärmeversorgung einer Großstadt zu 40 % würde eine Umweltwärmequelle mit 10 % des Gesamtwärmebedarfs ein Drittel der erforderlichen Fernwärme liefern können. Die Ergebnisse zum Wärmepotenzial aus Fließgewässern bezogen auf den Raumwärmebedarf der Haushalte sind in Bild 84 b) dargestellt.

In Tabelle 35 sind die Ergebnisse für die Auswertung des Wärmepotentials aus Fließgewässern für die 80 deutschen Großstädte tabellarisch zusammengefasst. Neben der Einwohnerzahl, den jeweiligen Fließgewässern sind in Tabelle 35 als Ergebnis der Potentialuntersuchung für jede Großstadt die Wärmeentzugsleistung und die Jahreswärmeerzeugung aus Fließgewässerwärme sowie der Anteil an der Wärmeversorgung der betrachteten Großstadt bezogen auf den Raumwärmebedarf der Haushalte angegeben.

Die Angabe des prozentualen Anteils an der Raumwärmeversorgung der Haushalte ermöglicht es, für jede Stadt die Aussage zu treffen, in welchem Maße eine Versorgung bis hin zu einer Vollversorgung mit Grüner Nah- und Fernwärme aus den jeweiligen Fließgewässern möglich ist. Der aus den Fließgewässern grundsätzlich zur Verfügung stehende Raumwärmeanteil für die Haushalte schwankt dabei sehr stark und ist maßgeblich vom winterlichen Durchfluss des Fließgewässers abhängig. Der Anteil schwankt dabei zwischen 7 % in Mönchengladbach, 10 % in Moers und 11 % in Darmstadt und bis zu 15.254 % in Koblenz, 12.048 % in Neuss, 11.167 % in Leverkusen und 8.183 % in Krefeld.

Die Städte mit einem Vielfachen der erforderlichen Menge an der Wärmeversorgung liegen meist an den großen Gewässern wie Rhein, Donau und Elbe. Aufgrund des großen winterlichen Durchflusses weist sogar die viertgrößte Stadt Deutschlands, Köln, einen Anteil von 1.690 % auf, was dem über 17-fachen Bedarf an Wärmeleistung für die Kölner Haushalte bedeuten würde.

Werden in Tabelle 35 alleine die 10 größten Großstädte in Deutschland Berlin, Hamburg, München, Frankfurt a.M., Stuttgart, Düsseldorf, Leipzig, Dortmund und Essen betrachtet, so zeigt sich, dass der Wärmebedarf von den 10 Großstädten bis auf Berlin, München, Stuttgart und Leipzig bei 6 Großstädten vollständig aus Fließgewässern gedeckt werden kann. Auch bei den anderen 4 Großstädten ergibt sich ein hoher möglicher Anteil bei der Wärmeversorgung mit 16 % bei Berlin, 42 % bei München, 82 % bei Stuttgart und 41 % bei Leipzig. Die Auswertung zeigt ebenfalls, dass auch für mittelgroße Gewässer wie der Mosel, dem Main, dem Neckar, der Saale, der Ruhr, dem Lech, der Havel, der Fulda und weiteren eine theoretische Überversorgung mit Wärme der anliegenden Großstädte vorliegt, wie bei Augsburg, Halle, Kassel, Mülheim, Fürth, Reutlingen und Jena ersichtlich. Auch kleinere Fließgewässer wie Pader, Innerste, Emscher, Enz etc. können bis zur Vollversorgung der betrachteten Großstädte bezogen auf den Raumwärmebedarf der Haushalte Wärme liefern.

	Stadt	Einwohner	Fließgewässer	Wärmeleistung [MW]	Wärmeerzeugung [MWh]	Anteil an Wärmeversorgung [%]
1	Berlin	3.677.472	Spree, Havel, Panke, Dahme	654	3.325.379	16
2	Hamburg	1.853.935	Elbe	7.676	39.058.007	384
3	München	1.487.708	Isar	679	3.453.228	42
4	Köln	1.073.096	Rhein	19.552	99.478.958	1.690
5	Frankfurt a.M.	759.224	Main	2.223	11.309.676	272
6	Stuttgart	626.275	Neckar	550	2.826.592	82
7	Düsseldorf	619.477	Rhein	20.003	101.773.092	2.995
8	Leipzig	601.866	Weißer Elster, Pleiße, Parthe	269	1.368.662	41
9	Dortmund	586.852	Ruhr, Emscher	825	4.197.458	130
10	Essen	579.432	Ruhr, Emscher	1.003	5.100.998	160
11	Bremen	563.290	Weser	3.927	19.982.577	647
12	Dresden	555.351	Elbe	3.334	16.964.577	557
13	Hannover	535.932	Leine, Ihme	563	2.865.602	97
14	Nürnberg	510.632	Pegnitz	244	1.239.140	44
15	Duisburg	495.152	Rhein	20.968	106.684.725	3.928
16	Bochum	363.441	Ruhr	828	4.211.066	211
17	Wuppertal	354.572	Wupper	135	687.519	35
18	Bielefeld	334.002	Johannisbach, Aa	52	264.363	14
19	Bonn	331.885	Rhein	19.486	99.145.962	5.446
20	Münster	317.713	Münstersche Aa	345	1.755.812	101
21	Mannheim	311.831	Rhein, Neckar	11.478	58.398.807	3.414
22	Karlsruhe	306.502	Rhein, Alb	9.574	48.714.087	2.897
23	Augsburg	296.478	Lech	784	3.986.601	245
24	Wiesbaden	278.950	Main	13.500	68.686.825	4.489
25	Mönchengladbach	261.001	Gladbach, Niers, Schwalm	21	105.221	7
26	Gelsenkirchen	260.126	Emscher	126	640.315	45
27	Aachen	249.070	Inde, Wildbach	39	200.778	15
28	Braunschweig	248.823	Oker, Schunter, Wabe	125	635.298	47
29	Kiel	246.243	Schwentine	105	532.011	39
30	Chemnitz	243.105	Chemnitz	50	256.634	19
31	Halle (Saale)	238.061	Saale	1.015	5.165.291	396
32	Magdeburg	236.188	Elbe	5.680	28.898.324	2.230
33	Freiburg i.Br.	231.848	Dreisam	99	502.940	40
34	Krefeld	227.050	Rhein	20.032	101.920.652	8.183
35	Mainz	217.556	Rhein	13.493	68.653.910	5.753
36	Lübeck	216.277	Trave	246	1.250.129	105
37	Erfurt	213.227	Gera	83	421.014	36
38	Oberhausen	208.752	Emscher	231	1.174.468	103
39	Rostock	208.400	Warnow	239	1.216.602	106
40	Kassel	200.406	Fulda	659	3.354.165	305

	Stadt	Einwohner	Fließgewässer	Wärmeleistung [MW]	Wärmeerzeugung [MWh]	Anteil an Wärmeversorgung [%]
41	Hagen	188.713	Ruhr, Volme	765	3.892.798	376
42	Potsdam	183.154	Havel	770	3.918.381	390
43	Saarbrücken	179.634	Saar	525	2.669.087	271
44	Hamm	179.238	Lippe	349	1.777.180	181
45	Ludwigshafen am Rhein	172.145	Rhein	11.488	58.450.956	6.190
46	Mülheim an der Ruhr	170.739	Ruhr	884	4.497.143	480
47	Oldenburg (Oldb)	170.389	Hunte	207	1.054.520	113
48	Osnabrück	165.034	Hase	73	371.105	41
49	Leverkusen	163.851	Rhein	19.727	100.371.560	11.167
50	Solingen	159.631	Wupper	172	873.517	100
51	Darmstadt	159.245	Modau	19	95.682	11
52	Heidelberg	158.957	Neckar	1.582	8.047.832	923
53	Herne	156.621	Emscher	103	524.539	61
54	Neuss	153.542	Rhein	20.112	102.328.829	12.048
55	Regensburg	152.731	Donau	3.900	19.844.354	2.369
56	Paderborn	152.531	Alme, Pader	142	724.955	87
57	Ingolstadt	138.016	Donau	2.572	13.086.229	1.728
58	Offenbach am Main	131.295	Main	2.112	10.744.635	1.492
59	Fürth	129.122	Regnitz	295	1.500.838	212
60	Würzburg	126.933	Main	1.379	7.018.093	1.008
61	Heilbronn	125.613	Neckar	938	4.770.050	692
62	Ulm	126.949	Donau	1.127	5.734.381	823
63	Pforzheim	125.529	Enz	191	969.528	141
64	Wolfsburg	123.949	Aller	74	374.399	55
65	Bottrop	117.311	Emscher	177	900.241	140
66	Göttingen	116.557	Leine	68	344.360	54
67	Reutlingen	116.456	Neckar, Echaz	303	1.543.835	242
68	Bremerhaven	113.638	Weser	4.359	22.176.896	3.558
69	Koblenz	113.292	Rhein, Mosel	18.632	94.797.629	15.254
70	Erlangen	113.173	Regnitz	330	1.678.279	270
71	Bergisch Gladbach	111.770	Dhünn	47	239.418	39
72	Remscheid	111.645	Wupper	142	720.450	118
73	Jena	110.714	Saale	328	1.671.388	275
74	Recklinghausen	110.570	Emscher	102	516.619	85
75	Trier	110.502	Mosel	3.729	18.971.283	3.130
76	Salzgitter	103.694	Fuhse	62	315.606	55
77	Moers	103.725	Moersbach	11	56.435	10
78	Siegen	101.516	Sieg	105	533.453	96
79	Hildesheim	100.319	Innerste	104	528.512	96
80	Gütersloh	101.158	Ems	86	439.054	79
	Summe	26.576.802		278.981	1.419.481.516	

Tabelle 35: Auswertung der Grünen Nah- und Fernwärme für die 80 deutschen Großstädte

Die Ergebnisse in Tabelle 35 zeigen zusammenfassend, dass viele der 80 Großstädte ihren Raumwärmebedarf vollständig oder zu einem großen Teil aus Fließgewässern decken können, wie auch die Bilder 84 a) und b) verdeutlichen. Werden die drei größten Städte Deutschlands Berlin, Hamburg und München noch einmal bezüglich des Wärmepotenzials aus Fließgewässern etwas genauer betrachtet, ergibt sich nachfolgendes Bild:

Berlin ist durch die beiden Hauptgewässer Spree und Havel sowie durch die Dahme und den daraus gespeisten Teltowkanal maßgeblich geprägt. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von kleinen Nebengewässern wie Tegler Fließ, Nordgraben, Erpe, Wuhle und Panke, so dass die gesamte Stadt durch ein dichtes Gewässernetz durchzogen ist. Das Wärmepotenzial der Berliner Fließgewässer liegt in der Heizperiode bei einer Einmalentnahme bei 2 K Temperaturentzug bei 3.325,379 MWh mit einer Wärmeentzugsleistung von 654 MW. Hiermit können 16 % der Berliner Haushalte mit Raumwärme bei einer Einmalentnahme der Fließgewässerwärme versorgt bzw. 11 % des gesamten Berliner Raumwärmebedarfs bereitgestellt werden. Das Gesamtwärmepotenzial der Fließgewässer für Berlin beträgt bezogen auf das langjährige statistische Mittel pro Jahr bei einer Einmalentnahme bei 2 K Temperaturentzug 4.607,577 MWh/a.

Auf Grund der großen Wasserflächen in Berlin von 5.847 ha [91] und den großen mit den Seen und Fließgewässern vorhandenen Wasserkörpern und deren Volumina sind Mehrfachentnahmen der Wärme auf das gesamte Stadtgebiet betrachtet vorstellbar, da das Gewässernetz wie ein großer effizienter Flächenwärmetauscher fungiert und die Umgebungswärme aus dem Stadtgebiet aufnimmt. Nach bestimmten Laufstrecken der Gewässer ist daher von einer entsprechenden Wiedererwärmung auszugehen vor allem in Bezug auf das gesamte Stadtgebiet Berlins von 891 km².

Alleine bei einer Zweifach-Entnahme könnten in der Heizperiode aus den Berliner Fließgewässern mit 6,65 TWh und damit 32 % des für die Haushalte benötigten Raumwärmebedarfs oder bezogen auf die 10 TWh Fernwärmeerzeugung in Berlin 66,5 % der Fernwärmeerzeugung gewonnen werden.

Werden neben den Fließgewässern auch das aquathermisch nutzbare Potenzial der Stillgewässer mit einer Vielzahl an Seen und Kanälen in Berlin betrachtet, ergibt sich hier ein noch viel größeres technisch nutzbares Potenzial zur Wärmeversorgung.

Hamburg als zweitgrößte Stadt Deutschlands besitzt auf Grund der Elbe ein wesentlich größeres Wärmepotenzial aus Fließgewässern als Berlin und könnte seinen gesamten Wärmebedarf alleine aus der Elbe decken. Das Gesamtwärmepotenzial aus Fließgewässern liegt bei den angesetzten Randbedingungen bei 39,06 TWh in der Heizperiode bei einer Wärmeleistung von 7.676 MW. 260 % des gesamten Raumwärmebedarfes und 384 % des Raumwärmebedarfs der Haushalte können damit aus Aquathermie bereitgestellt werden.

Aber nicht nur die großen Fließgewässer wie z.B. die Elbe in Hamburg besitzen große Wärmeleistungen und Wärmepotenziale aus Aquathermie, sondern auch die wesentlich kleineren Nebengewässer. So weisen alleine die Nebengewässer in Hamburg wie Düpenau, Alster, Wandse, Bille, Este und Seeve, die neben der Elbe das gesamte Stadtgebiet von Hamburg durchziehen, in der Heizperiode eine Gesamtwärmeentzugsleistung von mindestens 212,4 MW und ein Gesamtwärmepotenzial aus Flusswärme von mindestens 1,08 TWh auf. Auch in Berlin besitzen die kleineren Nebengewässer wie Tegler Fließ, Nordgraben, Erpe, Wuhle, Dahme und Panke in der Heizperiode mit mindestens 156,1 MW und 0,794 TWh beachtliche Wärmeleistungen und Wärmepotenziale. Kleine Gewässer sollten auf Grund ihrer großen Potenziale daher bei der zukünftigen Wärmeversorgung unbedingt berücksichtigt werden. Dies ist wichtig vor allem im Hinblick auf die Tatsache, dass gerade diese Gewässer besonders stark durch die Aufheizung infolge des Klimawandels betroffen sind und ein Wärmeentzug zu einer wesentlichen ökologischen Verbesserung des Gewässers führen wird.

München ist durch die beiden Hauptgewässer Isar und Würm geprägt, von denen eine große Anzahl von Kanälen, Gräben und Bäche gespeist wird. Ähnlich von der Größenordnung wie in Berlin liegt die mittlere Entzugsleistung aus den Fließgewässern in München bei 2 K

Temperaturspreizung bei einer Einmalentnahme im Winterhalbjahr während der Heizperiode bei 678,7 MW und einer Wärmeerzeugung von 3.453,228 MWh. Damit können 29 % des Gesamttraumwärmebedarfs von München und 42 % des Raumwärmebedarfs der Haushalte gedeckt werden. Bei einer Zweimalentnahme der Fließgewässerwärme bezogen auf das Stadtgebiet von München könnten 6,9 TWh Wärme in der Heizperiode aus Fließgewässern gewonnen werden, was 58 % des Gesamttraumwärmebedarfs und 84 % des Raumwärmebedarfs der Haushalte entsprechen würde.

Die komplexe Gewässerinfrastruktur von München mit der Vielzahl der Münchener Stadtbäche und 21 Wasserkraftanlagen bietet sich neben der Wärmeversorgung aus kombinierten Wasser-Wärme-Kraftwerken auch für die Nutzung eines Kaltwassernetzes an. Hierbei wird direkt beim Verbraucher die Wärme mit Hilfe einer Wärmepumpe gewonnen, wodurch Transportverluste bei der Wärme innerhalb von Nah- und Fernwärmenetzen vermieden werden, dafür aber ggf. höhere Volumenströme verarbeitet werden müssen.

Wurde bei den Untersuchungen ausschließlich das nutzbare Wärmepotenzial aus Fließgewässern betrachtet, verfügen Großstädte wie Kiel oder Rostock und Lübeck über einen direkten oder indirekten Zugang zur Ostsee, ebenso wie die Großstädte Hamburg, Bremen, Bremerhaven und Oldenburg mit der Nordsee durch die Flusseinzündungen der Elbe bzw. Weser verbunden sind. Auch bei diesen Großstädten wurde nur das für die Grüne Nah- und Fernwärme gewinnbare Wärmepotenzial aus Fließgewässern ausgewertet. Das eigentlich nutzbare Wärmepotenzial aus Aquathermie unter Berücksichtigung der Meerthermie ist wesentlich größer und sollte zukünftig gerade bei den Ostseestädten insbesondere im Fall von Kiel genutzt werden ebenso wie in Mittelstädten z.B. Flensburg.

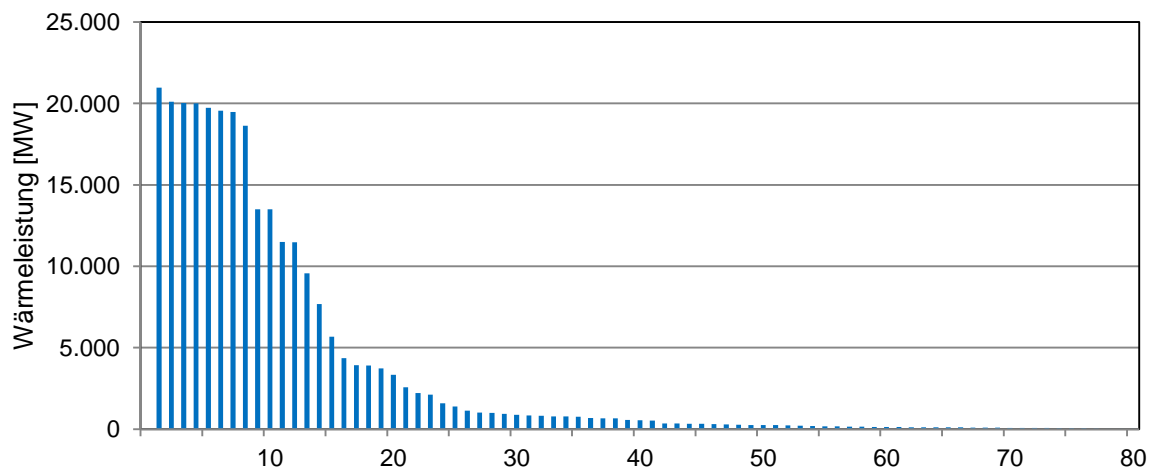


Bild 85: Wärmeleistung der 80 Großstädte aus Fließgewässer, nach Größe sortiert

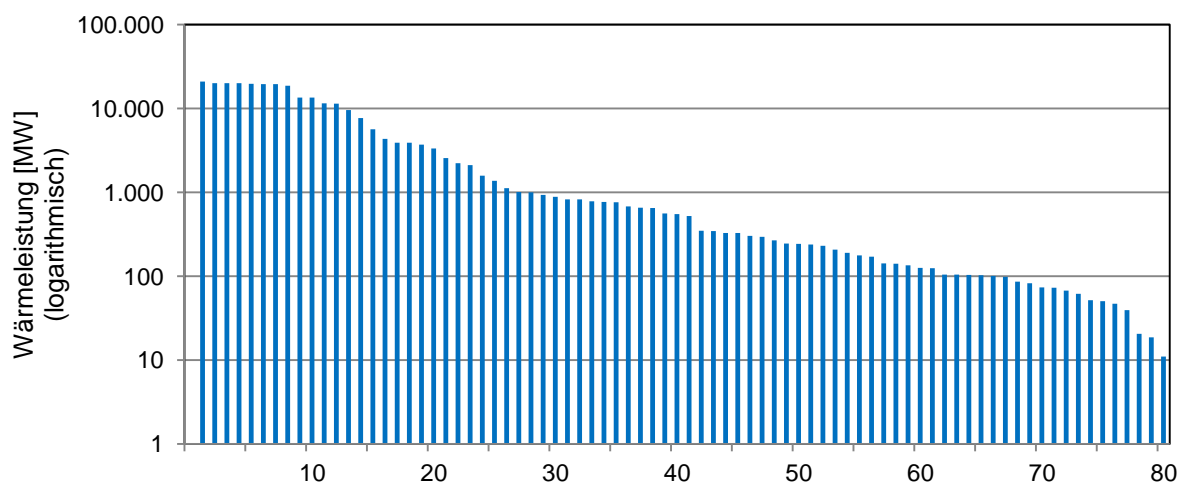


Bild 86: Wärmeleistung der 80 Großstädte aus Fließgewässer, nach Größe sortiert

Die mögliche Wärmeleistung aus Fließgewässern in den 80 Großstädten in Deutschland ist sehr heterogen verteilt, siehe Bild 85 und in logarithmischer Darstellung in Bild 86. Die

Anrainer großer Flüsse wie Rhein, Donau, Elbe, Main verfügen über ein enormes Potenzial an Fließgewässerwärme aus den jeweiligen Gewässern. Dieses reicht bei den großen Flüssen bei Wärmeleistungen von 18.000 bis an 20.967 MW Fließgewässerwärme heran. Daneben gibt es zahlreiche Großstädte mit zahlenmäßig kleinerem Potenzial und Wärmeleistungen. Es zeigt sich, dass die Großstädte, die nicht an den Hauptgewässern liegen, ebenfalls zu einer Versorgung mit Fließgewässerwärme bis hin zu einer Vollversorgung befähigt sind. Dabei beträgt bei 66 der 80 Großstädte die nutzbare Wärmeleistung 100 MW oder mehr an möglicher Fließgewässerwärme, wie in der logarithmischen Darstellung in Bild 86 gut erkennbar ist. Die kleinste generierbare Wärmeleistung aus Fließgewässern liegt noch mit beachtlichen 11 MW in Moers vor. In allen anderen Großstädten beträgt die aquathermische Leistung ein Vielfaches dieser Leistung.

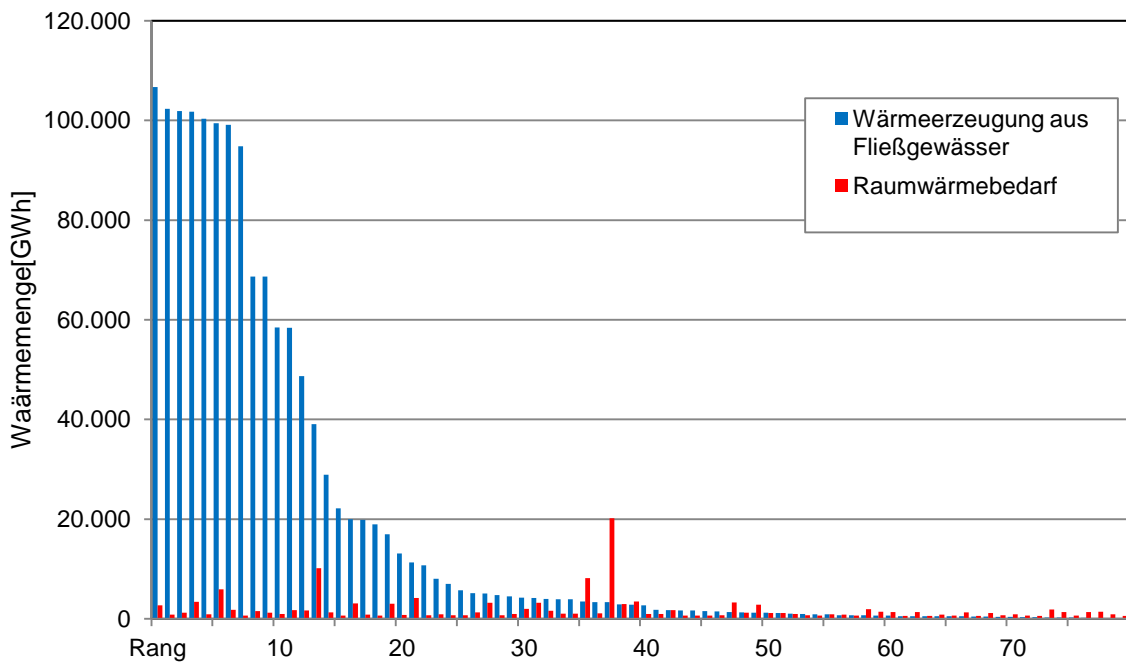


Bild 87: Wärmeerzeugung aus Fließgewässern in der Heizperiode und Raumwärmebedarf der 80 Großstädte, nach Wärmeerzeugung absteigend sortiert

In Bild 87 und in logarithmischer Darstellung in Bild 83 ist die mögliche Wärmeerzeugung aus Fließgewässern der 80 Großstädte in der Heizperiode jeweils nach der Größe der Erzeugung zusammen mit dem Raumwärmebedarf der Haushalte der 80 Großstädte dargestellt. Die Verteilung der möglichen Wärmeerzeugung zeigt einen großen Wertebereich von 56.000 GWh als kleinsten Wert bis 106.685.000 GWh als größten Wert für die Heizperiode in einer Großstadt. Die untersuchten Großstädte an den großen Flüssen wie Rhein, Donau, Elbe, Main weisen sehr hohe mögliche Erzeugungsmengen auf. An den kleineren Gewässern sind ebenfalls große Erzeugungsmengen an Fließgewässerwärme möglich, wie die Untersuchung der 80 Großstädte gezeigt hat und die Ergebnisse in Tabelle 35 verdeutlichen. Insbesondere liegt bei 53 der 80 Großstädte ein Potenzial von 1.000.000 GWh oder größer aus Fließgewässerwärme vor. Daher bestehen ebenfalls für Großstädte an kleineren und mittleren Gewässern beträchtliche Wärmepotenziale aus Fließgewässern.

Die Gegenüberstellung der möglichen Wärmeerzeugung aus Fließgewässern und des Raumwärmebedarfs der Haushalte ist in Bild 87 für jede Großstadt nach den möglichen Erzeugungsmengen absteigend sortiert. Das Diagramm verdeutlicht, dass die überwiegende Zahl der Großstädte ihren Raumwärmebedarf für die Haushalte aus der Fließgewässerwärme decken kann und das vorhandene Potenzial der Fließgewässerwärme den tatsächlichen Wärmebedarf teilweise sogar vielfach übersteigt.

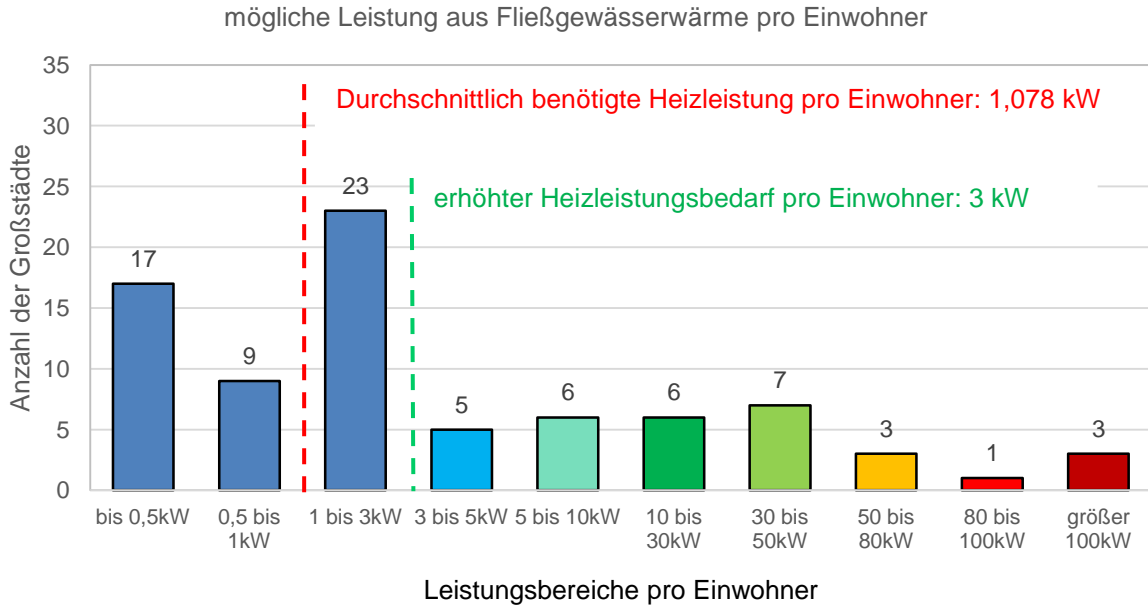


Bild 88: Anzahl der Großstädte nach Leistungsbereichen der möglichen Wärmeleistung aus Fließgewässern pro Einwohner klassifiziert

Für die Darstellung in Bild 88 ist die in den einzelnen Großstädten gewinnbare Wärmeentzugsleistung aus Fließgewässern pro Einwohner berechnet und nach Leistungsbereichen in Klassen sortiert. Die Darstellung der Leistungsbereiche pro Einwohner für die Nutzung der Fließgewässerwärme in Bild 88 zeigt, dass 54 der 80 deutschen Großstädte über eine Heizleistung pro Einwohner von über 1 kW aus der Fließgewässerwärme verfügen und damit den durchschnittlich in Deutschland benötigten Heizleistungsbedarf decken können. Sogar der erhöhte Heizleistungsbedarf pro Einwohner von 3 kW könnte bei 31 Großstädten aus der Fließgewässerwärme vollständig gedeckt werden, wie Bild 88 verdeutlicht.

Die Berechnung der in Bild 88 dargestellten erforderlichen Wärmeleistung folgt aus dem jährlichen Endenergiebedarf für die Raumwärme in den privaten Haushalten pro Einwohner von 5.485,6 kWh/a, bezogen auf den Stand von 2021. Wird als Bezugszeitraum die Heizperiode mit 212 Tagen angesetzt, ergibt sich eine erforderliche kontinuierliche Heizleistung von 1,078 kW pro Einwohner von:

$$P_{hydro,EW} = \frac{5485,6 \text{ kWh/a}}{212 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d}} = 1,078 \text{ kW}.$$

Tabelle 36 stellt die Anzahl der Großstädte dar, bei denen die mögliche Wärmeleistung aus Fließgewässerwärme pro Einwohner oberhalb der Grenze von 1,078 kW liegt. Die tatsächlich abgerufene Leistung zum Beispiel einer gasbefeuerten Therme bei einer Gasetagenheizung beträgt 3,4 - 10,9 kW (Leistungsklasse 10 kW laut Angaben der Hersteller), da die Heizung nicht kontinuierlich sondern meist in Intervallen ihre Heizleistung abgibt. Daher werden nicht nur die kontinuierlich benötigte Heizleistung von 1,078 kW pro Einwohner in Deutschland betrachtet, sondern auch die Leistungswerte von 1,0 kW bis 5,0 kW hinzugezogen und in Tabelle 36 bezüglich der 80 Großstädte ausgewertet. In der Auswertung zeigt sich, dass bereits 50 der 80 Großstädte die mittlere Heizleistung pro Einwohner von 1,078 kW über die Fließgewässerwärme innerhalb ihrer Gemeindegrenzen abbilden können. Darüber hinaus sind bei 39 Großstädten bzw. 48,8% der Großstädte Wärmeleistungen von 2 kW pro Einwohner aus der thermischen Nutzung der Fließgewässer möglich. Eine durchschnittlich kontinuierliche Leistungsbereitstellung von 5 kW pro Einwohner könnte sogar bei 26 Großstädten aus Fließgewässern gewonnen werden.

mögliche Wärmeleistung pro EW aus Fließgewässern	Anzahl der Großstädte	prozentualer Anteil
größer 1kW	54	67,5%
größer 1,078kW	50	62,5%
größer 2kW	39	48,8%
größer 3kW	31	38,8%
größer 4kW	30	37,5%
größer 5kW	26	32,5%

Tabelle 36: Klassifizierung der Großstädte nach möglicher Heizleistung pro Einwohner aus Fließgewässerwärme

Ein ähnliches Bild wie bei der Wärmeleistung pro Einwohner zeichnet sich auch bei der Untersuchung des jährlichen Wärmebedarfes pro Einwohner bezogen auf die in den Großstädten nutzbare Fließgewässerwärme ab. Der mittlere jährliche Endenergiebedarf für die Raumwärme in den privaten Haushalten pro Einwohner beträgt hierbei 5,486 MWh in Deutschland. In Bild 89 sind die Großstädte nach Wärmeerzeugungsbereichen aus Fließgewässern pro Einwohner klassifiziert und der jährliche Raumwärmebedarf pro Einwohner gekennzeichnet. 27 Großstädte haben hierbei ein Potenzial zur Wärmeerzeugung aus Fließgewässern das kleiner als der jährliche Raumwärmebedarf pro Einwohner ist. Dennoch liegen hier beachtliche Erzeugungsgrößen von 2 bis 5 MWh pro Einwohner alleine bei 18 Großstädten vor, wie in Bild 89 ersichtlich. 53 Großstädte können für alle ihre Einwohner den erforderlichen Raumwärmebedarf aus Fließgewässerwärme grundsätzlich bereitstellen, wie Bild 89 verdeutlicht.

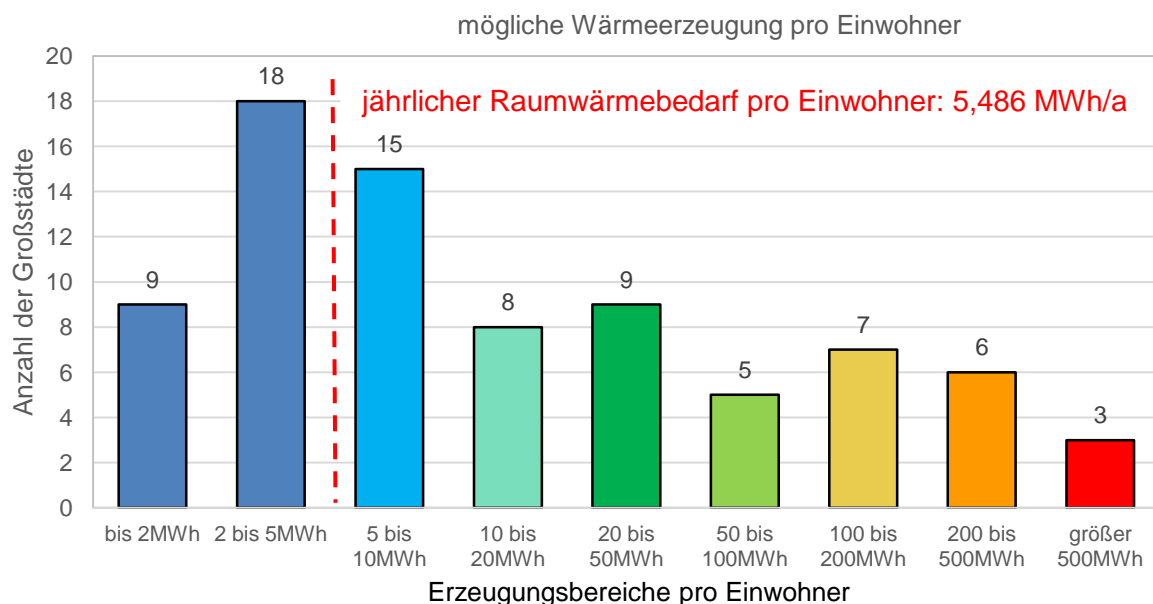


Bild 89: Anzahl der Großstädte nach Wärmeerzeugungsbereichen aus Fließgewässern pro Einwohner klassifiziert

9. Wärmegewinnung aus Wasserkraftanlagen in den 80 Großstädten

Bei der Untersuchung der 80 Großstädte wurden im Forschungsvorhaben auch die in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen erfasst und das durch diese Anlagen grundsätzlich bereitstellbare Wärmepotenzial aus Fließgewässern für die jeweilige Großstadt ausgewertet. Bild 90 zeigt die 80 Großstädte in Deutschland und die Hauptgewässer. Nicht aufgeführt sind die Nebengewässer. Desweiteren sind die Großstädte farblich gekennzeichnet, bei denen noch im Betrieb befindliche Wasserkraftanlagen erfasst werden konnten und die Großstädte, bei denen sich aktuell keine Wasserkraftanlagen mehr in Betrieb befinden.

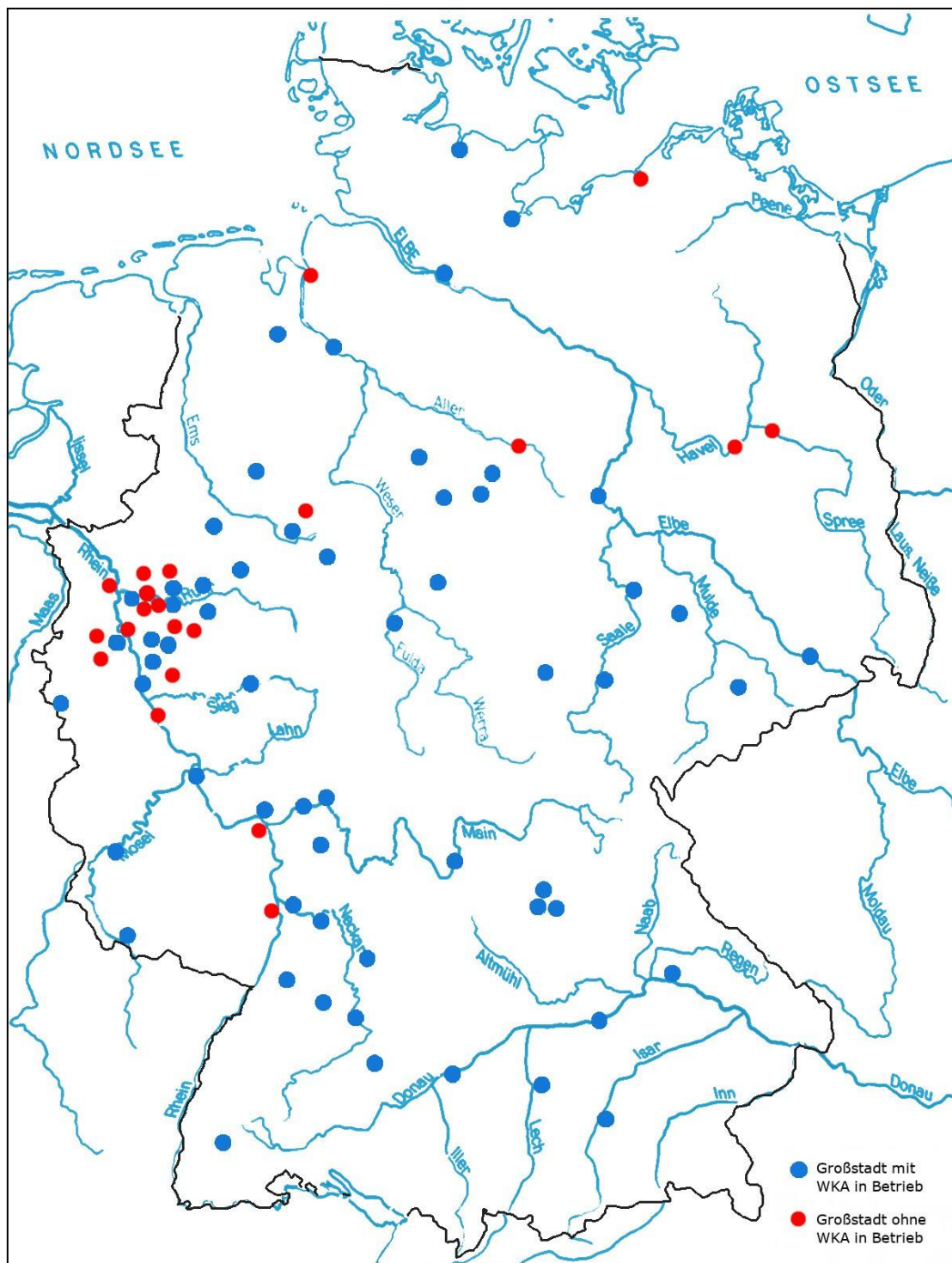


Bild 90: Hauptfließgewässer und Lage der Großstädte in Deutschland mit und ohne in Betrieb befindliche Wasserkraftanlagen (WKA)

Wie die Untersuchung verdeutlicht, besteht bei der Wasserkraft die Möglichkeit, neben ihrem derzeitigen ausschließlichen Einsatz zur Stromerzeugung, den im Kraftwerk verarbeiteten Durchfluss zusätzlich auch zur Wärmeengewinnung von grüner Nah- und Fernwärme aus Fließgewässern einzusetzen. In dieser Doppelfunktion ergeben sich vollkommen neue Nutzungsperspektiven für den zukünftigen Einsatz der Wasserkraft in Deutschland. Die Wasserkraft kann damit zukünftig als grundlastfähige, speicher- und regelbare erneuerbare Energiequelle eine wichtige Aufgabe bei der Energieversorgung mit Strom und Wärme als auch bei den in einem Energiesystem notwendigen Systemdienstleistungen übernehmen.

Darüber hinaus haben die Untersuchungen gezeigt, dass historisch in allen Großstädten eine Vielzahl von Wasserkraftanlagen betrieben wurde. Alleine in Aachen wurden so z.B. über 250 Tuchfabriken, Spinnereien und Färbereien durch die Aachener Bäche mit Wasserkraft versorgt und haben einen wichtigen Beitrag zum Wohlstand der Stadt Aachen geliefert. In Augsburg waren beispielsweise 1761 163 Wasserräder in 78 Werken, in Ulm um 1850 89 Wasserräder, in Erfurt 60 Werke und in Braunschweig 80 Wasserräder in 37 Werken in Betrieb. Heute haben, wie Bild 90 verdeutlicht, noch 59 Großstädte Wasserkraftanlagen im Betrieb, bei 21 Großstädten sind die bestehenden Mühlen und Wasserkraftanlagen derzeit stillgelegt, so dass sich hier ein großes Reaktivierungspotenzial für zukünftige Nutzungen ergibt.

Insgesamt werden in den 59 Großstädten über 271 Wasserkraftanlagen mit einer installierten Leistung von 298,416 MW betrieben. Durch die Wasserkraftanlagen werden 1.419 Millionen kWh (1,419 TWh) Strom verbrauchernah und grundlastfähig in den Großstädten erzeugt und die städtischen Netze stabilisiert. Die Stromerzeugung in den Großstädten macht 6,9 % der gesamten Wasserkrafterzeugung in Deutschland aus, die im langjährigen Mittel bei 20,5 TWh/a liegt.

Bezüglich der Wärmebereitstellung aus Fließgewässern könnten die in den 59 Großstädten in Betrieb befindlichen 271 Wasserkraftanlagen nur unter Nutzung ihres Ausbaudurchflusses bei einer Temperaturentnahme von 2 K eine Wärmeleistung von 59,325 GW zur Verfügung stellen und eine Wärmeerzeugung von 301,8 TWh/a für die Wärmeversorgung der Großstädte liefern, was 44,8 % des gesamten Raumwärmebedarfs in Deutschland mit 673,94 TWh (Stand 31.12.2021) ausmacht. Bezogen auf die elektrische Leistung ist die mögliche Wärmeleistung 198,8-mal größer und im Bezug auf die Stromerzeugung ist die mögliche Wärmeerzeugung in den in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen 212,7-mal größer. Um dieses große Potenzial zu heben, ist die Forschung und Entwicklung von kombinierten Wasser-Wärme-Kraftwerken zukünftig erforderlich.

Bei den untersuchten 271 Wasserkraftanlagen sind 27 Wasserkraftanlagen in der Trinkwasserversorgung und 2 Wasserkraftanlage aus der Abwasserentsorgung erfasst. Die in diesen Anlagen installierte elektrische Leistung liegt bei 3.146 kW bei einer Jahresstromerzeugung von 14 Millionen kWh/a. Die mögliche gewinnbare Wärmeleistung dieser Anlagen bei 2 K Temperaturentzug beträgt 104 MW, wobei für 11 Anlagen die Wärmeleistung nicht berechnet werden konnte, da die zu verarbeitenden Wassermengen der Anlagen bisher nicht bekannt ist. In der Heizperiode ergibt sich alleine bei diesen bezüglich des Durchflusses im Vergleich zu den anderen Wasserkraftanlagen verhältnismäßig kleinen Wasserkraftanlagen aus der Trink- und Abwasserinfrastruktur der Wasser- und Klärwerke eine mögliche Wärmeerzeugung von 528.190 MWh (0,53 TWh!).

In Bild 91 sind die Ergebnisse der Untersuchung zu dem durch die in den Großstädten betriebenen Wasserkraftanlagen erschließbaren Wärmepotenzial aus Fließgewässern dargestellt. Bezogen auf den Raumwärmebedarf der Haushalte können wie in Bild 91 a) ersichtlich 33 der 59 Großstädte mit in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen ihren Bedarf zu 100 % und darüber hinaus decken, 8 weitere Großstädte ihren Bedarf zu 50 bis 100 %. Im Hinblick auf den in Bild 91 b) erfassten Gesamttraumwärmebedarf können 30 Großstädte mit Hilfe der Wasserkraftanlagen ihren Bedarf vollständig aus dem Ausbaudurchfluss erschließen. 12 weitere Großstädte haben die Möglichkeit 50 bis 100 % und 17 Großstädte bis zu 30 % ihres Raumwärmebedarfes aus den Wasserkraftanlagen zu gewinnen.

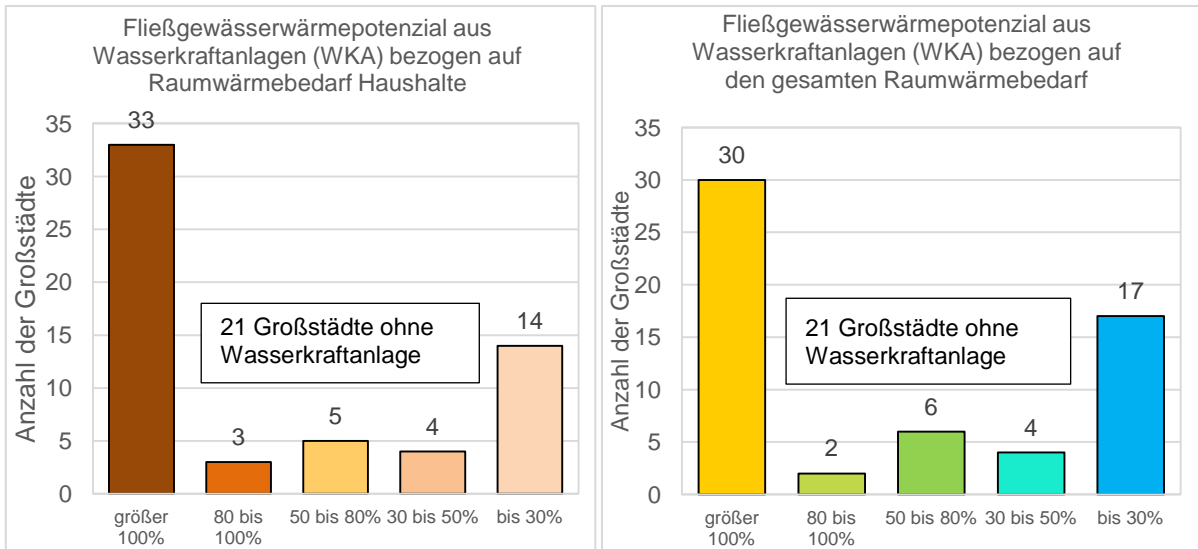


Bild 91: Fließgewässerwärmepotenzial aus Wasserkraftanlagen bezogen auf a) den Raumwärmebedarf Haushalte und b) den gesamten Raumwärmebedarf in 59 Großstädten

Bei einer Reaktivierung der in den Großstädten befindlichen Altstandorte und mit dem Neubau von Wasserkraftanlagen können sich fast alle Großstädte in Deutschland vollständig bzw. zu einem maßgeblichen Anteil über die Wasserkraftanlagen autark mit Raumwärme aus den im städtischen Gebiet zur Verfügung stehenden Fließgewässern versorgen.

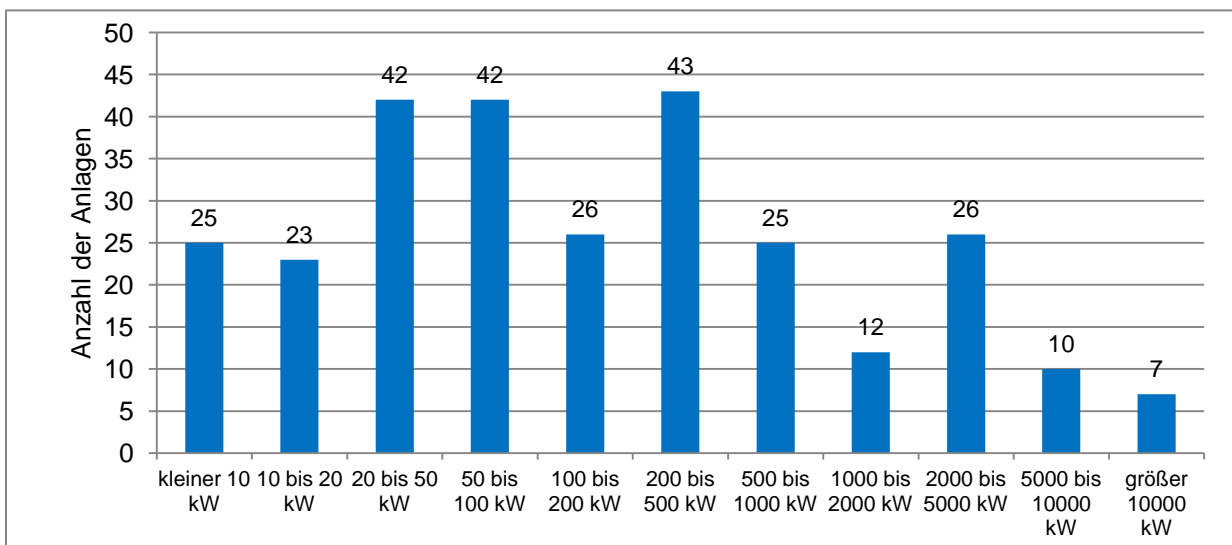


Bild 92: elektrische Leistung der in den 59 Großstädten betriebenen Wasserkraftanlagen (WKA) nach Größenklassen

In Bild 92 wurden die erfassten 271 in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen in den 59 Großstädten nach Größenklassen bezüglich ihrer elektrischen Leistung sortiert. Ebenfalls sind 10 weitere in den Großstädten reaktivierbare Altstandorte mit erfasst. Dabei zeigt sich, dass der Großteil der in Betrieb befindlichen Anlagen elektrische Leistungen unter 1.000 kW aufweist, wovon 132 Wasserkraftanlagen elektrische Leistungen unter 100 kW besitzen. Elektrische Leistungen ab 1 MW haben 58 der in Bild 92 erfassten Anlagen.

Die mögliche Wärmeleistung der in den 59 Großstädten in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen ist in Bild 93 ersichtlich. Hierbei wurden 265 Wasserkraftanlagen ausgewertet, da nicht für alle Standorte der Ausbaudurchfluss bekannt ist. Wie die Untersuchung demonstriert, besitzt der Großteil der Wasserkraftanlagen Wärmeleistungen von über 1 MW. Dies gilt für 258 Anlagen, wovon im Bereich von 2 bis 500 MW sich mit 213 Anlagen die meisten Anlagen häufen. Der Schwerpunkt liegt hierbei bei 111 Anlagen im

Bereich von 10 bis 100 MW. Nur 7 Wasserkraftanlagen weisen Wärmeleistungen kleiner 1 MW auf, die allesamt der Trinkwasserversorgung zuzurechnen sind.

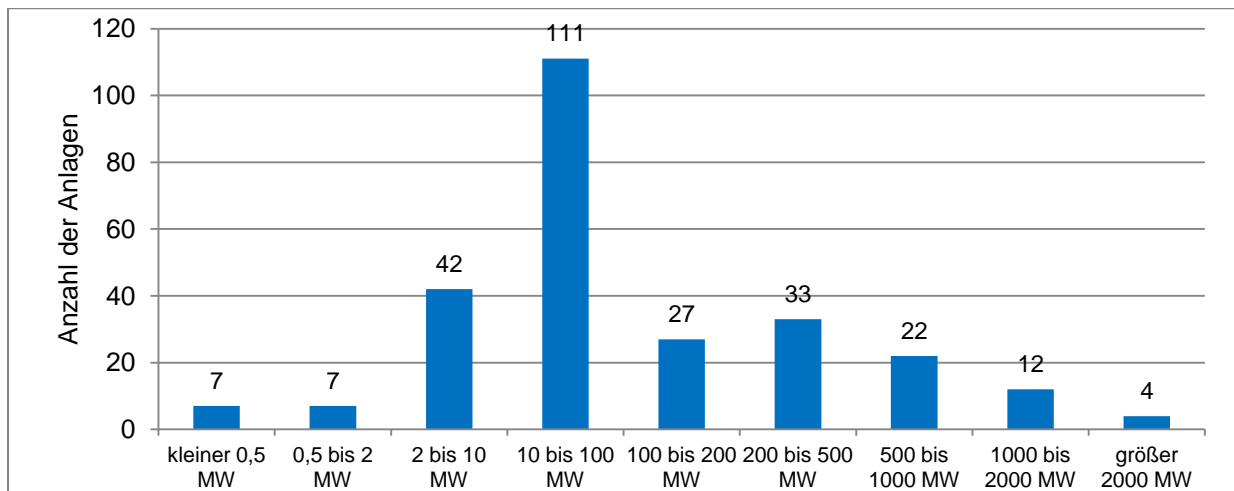


Bild 93: mögliche Wärmeleistung der in den 59 Großstädten betriebenen Wasserkraftanlagen (WKA) nach Größenklassen

Die Untersuchungen zeigen damit, dass auch schon kleine Wasserkraftanlagen mit einer elektrischen Leistung von 5 bis 10 kW große Wärmeleistungen von 1 bis 10 MW und mehr bereitstellen können und damit die Möglichkeiten besitzen, einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Wärmeversorgung der Kommunen zu leisten. Gerade diese traditionellen Mühlenstandorte sind in fast allen Städten und Dörfern vorhanden und liegen derzeit meist brach. So gab es 1895 bei der Reichsgewerbebezahlung noch 54.259 mit Wasserkraft arbeitende Betriebe in Deutschland. Heute werden noch ca. 7.600 Wasserkraftanlagen betrieben.

Ein Beispiel für diese nicht in Betrieb befindlichen Standorte ist die WKA Auermühle an der Dhünn in Leverkusen, wo ein Wasserkraftwerk neu gebaut wurde, welches aber außer Betrieb ist. Die mögliche elektrische Leistung beträgt 36 kW bei 2 m Fallhöhe. Die thermische Leistung liegt bei einem Mittelwasser und Ausbaudurchfluss von 2,3 m³/s bei 19 MW und einer Wärmeenergieerzeugung in der Heizperiode von 97.640 MWh. Hiermit alleine wären 11 % der 83.427 Haushalte in Leverkusen bei einer Reaktivierung der Wasserkraftanlage mit Raumwärme versorgbar. Mit dem in der Anlage erzeugten Strom könnten aus der Anlage 72 Haushalte versorgt werden.

Wie sich in den derzeit noch laufenden wissenschaftlichen Untersuchungen am ISD der TU Braunschweig zum Wasserkraftpotenzial in Deutschland abzeichnet, liegt das Reaktivierungs- und Modernisierungspotenzial der Altstandorte in Deutschland bei 9,3 TWh/a bezüglich der Stromerzeugung, was bei einer vollständigen Reaktivierung der Altstandorte ein zusätzliches Potenzial von 45 % erschließt und die Wasserkrafterzeugung in Deutschland von 20,5 TWh/a auf 30 TWh/a. erhöhen kann. Bei der Umsetzung von kombinierten Wasser-Wärme-Kraftwerken könnten diese Standorte zuzüglich zu den bereits in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen einen maßgeblichen Beitrag zur zukünftigen erneuerbaren Wärmeversorgung in Deutschland leisten.

Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland - Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken, 2022
- [2] <https://de.statista.com/themen/1251/waermemarkt/#dossierKeyfigures>
- [3] Grünes Licht für grüne Fernwärme, BMWK, 02.08.2022 <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/08/20220802-grunes-licht-fur-grune-fernwaerme.html>, abgerufen am 27.09.2022
- [4] Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.: BEE-Wärmeszenario 2045, Bilanzielle Darstellung der Umstellung der Wärmeversorgung auf 100 % Erneuerbare Energien, November 2022, <https://www.bee-ev.de/service/publikationen-medien/beitrag/bee-waermeszenario-2045>
- [5] www.destatis.de (2023), Bevölkerung nach Nationalität und Geschlecht (Quartalszahlen), <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/liste-zensus-geschlecht-staatsangehoerigkeit.html#651186>, abgerufen am 13.07.2023
- [6] Statistisches Bundesamt: Anzahl der Einwohner in Deutschland nach Gemeindegrößenklassen (Stand 31.12.2021), <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161806/umfrage/anzahl-der-einwohner-nach-gemeindegroessenklassen-in-deutschland/>, abgerufen am 13.07.2023
- [7] Statistisches Bundesamt (Destatis), Gemeinden nach Bundesländern und Einwohnergrößenklassen am 31.12.2021, Stand 10. Oktober 2022, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/08-gemeinden-einwohner-groessen.html>, abgerufen am 13.07.2023
- [8] Christian Bangel, Philip Faigle, Flavio Gortana, Andreas Loos, Fabian Mohr, Julia Speckmeier, Julian Stahnke, Sascha Venohr und Paul Blickle, Zeit Magazin (2017), Stadt, Land, Vorurteil, <https://www.zeit.de/feature/deutsche-bevoelkerung-stadt-land-unterschiede-vorurteile>, abgerufen 13.07.2023
- [9] ROADMAP TIEFE GEOTHERMIE FÜR DEUTSCHLAND - Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende, Herausgeber: R. Bracke, E. Huenges, 2022
- [10] DLR, 2016: Mit erneuerbaren Wärmequellen erzielbare Temperaturen, https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2016/20160310_prozesswaerme-fuer-die-industrie-einsatz-erneuerbarer-technologien-abhaengig-von-temperaturanforderungen_17040
- [11] Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE): Erzielte Temperaturen aus erneuerbaren Wärmequellen, Stand 6/2017, <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/erzielte-temperaturen-aus-erneuerbaren-waermequellen>
- [12] BMWK: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Aktuelle-Informationen/aktuelle-informationen.html
- [13] <https://de.statista.com/themen/1251/waermemarkt/#dossierKeyfigures>
- [14] Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2021, Herausgeber Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK), Oktober 2022
- [15] BDEW: Die Energieversorgung 2022, Jahresbericht, 20. Dezember 2022
- [16] AG Energiebilanzen: Pressemitteilung - Energieverbrauch fällt 2022 auf niedrigsten Stand seit der Wiedervereinigung, 2022
- [17] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Bioenergie: Biomasse-Potenziale. [Fnr.de. https://bioenergie.fnr.de/bioenergie/biomasse/biomasse-potenziale](https://bioenergie.fnr.de/bioenergie/biomasse/biomasse-potenziale), letzter Zugriff: 15.06.2023
- [18] Statista: Landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland nach Nutzungsart in den Jahren 2010 und 2022
- [19] Agentur für Erneuerbare Energien: Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern
- [20] de.statista.com (2023), Beitrag von Solarthermie zur Wärmebereitstellung in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2022, <https://de.statista.com/statistik/>

- daten/studie/171880/umfrage/waermebereitstellung-durch-solarthermie-in-deutschland-seit-1990/, letzter Zugriff: 20.06.2023
- [21] Annett Püschel: Das Strahlungsjahr 2022, Regionales Klimabüro Hamburg, Know-How-Center Strahlungsklimatologie, Deutscher Wetterdienst, März 2023
- [22] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg, <https://um.baden-wuerttemberg.de> (2023), Solarthermie: Mit Sonnenstrahlen Wärme erzeugen, <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/sonnenenergie/solarthermie>, letzter Zugriff: 20.06.2023
- [23] Deutscher Wetterdienst: Räumliche Verteilung der Globalstrahlung in Deutschland, mittlere Jahressumme für den Zeitraum von 1991 bis 2020, basierend auf Satellitendaten und Bodenwerte aus dem DWD-Messnetz, © Deutscher Wetterdienst, letzter Zugriff: 21.06.2023
- [24] Bernhard Mühr, Der Übergang zur neuen Bezugsperiode 1991 – 2020 und die klimatologischen Verhältnisse im Jahr 2020 in Deutschland, CEDIM, KIT Karlsruhe, 17. Januar 2021
- [25] Heizung.de (2023): Solare Deckungsrate, <https://www.heizung.de/lexikon/solare-deckungsrate.html>, letzter Zugriff: 20.06.2023
- [26] Hoffmann, H., Kohl, T., Shao, H.: Sichere Erschließung tiefer Erdwärmequellen als Beitrag zur Wärmewende, FVEE-Themen, Beiträge zur FVEE-Jahrestagung Berlin 2022 – Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel, S.60-64
- [28] Entwicklung der Luftqualität, Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/daten-karten/entwicklung-der-luftqualitaet#entwicklung-der-luftqualitat-in-deutschland>, abgerufen 18.10.2023
- [29] Umweltbundesamt: Trends der Niederschlagshöhen, 21.04.2023
- [30] Umweltbundesamt (BMU/UBA, Hrsg. 2017): Wasserwirtschaft in Deutschland, Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen, Dessau-Roßlau, Oktober 2017
- [31] Hauenstein, W.: Wasserkraft und Klimawandel. Wasser Energie Luft, 101. Jahrgang, Heft 2, S. 127-132, Baden (CH), 2009
- [32] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Nationale Wasserstrategie, Entwurf des Bundesumweltministeriums, Bonn, Juni 2021
- [33] © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, März 2014: Übersichtskarte Deutschland - Flüsse, Bäche und Kanäle, https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/themen-karten/wss-2014-03-gewaessernetz.pdf, abgerufen 13.07.2023
- [34] Bundesamt für Naturschutz 2004; © Geobasis-DE/BKG 2003; Stand der Daten: 12.2003; Flüsse mit Grenzverlauf in der Mitte des Flusses wurden je zur Hälfte beiden Ländern zugerechnet. Ausführliche Quelle: BfN - Bundesamt für Naturschutz (2004): Daten zur Natur 2004. Münster
- [35] ATV-DVWK Themen, ATV-DVWK-Arbeitsgruppe WW-8.1: Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle – Juli 2004
- [36] Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/fluesse>, abgerufen am 22.10.2023
- [37] Jürgen Mathes, Gudrun Plambeck, Jochen Schaumburg: Das Typisierungssystem für stehende Gewässer in Deutschland mit Wasserflächen ab 0,5 km² zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie, in: Rainer Denecke, Brigitte Nixdorf (Hrsg.): Implementierung der EU-Wasserrahmenrichtlinie in Deutschland: Ausgewählte Bewertungsmethoden und Defizite. Brandenburgische Technische Hochschule Cottbus, Reihe 5/2002
- [38] Stephan Naumann: Aktueller Gewässerzustand und Wasserkraftnutzung, Korrespondenz Wasserwirtschaft 15. Jahrgang, Heft 12, 2022, S.743 – 748
- [39] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Längen der Hauptschiffahrtswege der Binnenwasserstraßen des Bundes, Teil 4, Liste 3A, Längen (in km) der Hauptschiffahrtswege (Hauptstrecken und bestimmte Nebenstrecken) der Binnenwasserstraßen des Bundes, erstellt am: 08.12.2020
- [40] Zeit: <https://www.zeit.de/2013/51/deutschlandkarte-fluesse>, abgerufen am 22.10.2023
- [41] Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/flussgebietseinheiten-in-bundes-republik-deutschland>

- [42] Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, herausgegeben von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Kartographie: Geographisches Institut I, Universität Freiburg, 1979
- [43] Flussgebietsgemeinschaft Rhein (FGG Rhein): Das Einzugsgebiet, <https://fgg-rhein.de/servlet/is/88307/> , abgerufen am 26.09.2023
- [44] Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet, https://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user_upload/D/06_Publikationen/08_IKSE_Flyer/2015_IKSE-Flyer_Die_Elbe_und_ihr_Einzugsgebiet.pdf, abgerufen am 26.09.2023
- [45] Flussgebietsgemeinschaft Donau: Das deutsche Einzugsgebiet der Donau, https://www.fgg-donau.bayern.de/die_donau/das_dt_einzugsgebiet/index.htm, abgerufen am 26.9.2023
- [46] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Ems und Einzugsgebiet, <http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/sondersam/gewegue2000/ar430s177s183.pdf>, abgerufen 25.09.2023 über <https://archive.org/web/>
- [47] © Bundesanstalt für Gewässerkunde, Geoportal der BfG, Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD): <https://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HAD/index.html>, abgerufen 25.09.2023
- [48] Bundesamt für Naturschutz (BfN): PraxisInfo 6 – Wärmeversorgung nachhaltig für Natur und Landschaft gestalten, Bonn, März 2023
- [49] Ralf Busskamp, Karl-Heinz Schmidt: Mittlerer jährlicher Abfluss und Abflussvariabilität, Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser, S.126-129
- [50] Jankiewicz, P., Neumann, J., Duijnsveld, W., Wessollek, G., Wycisk, P., Hennings, V.: Abflusshöhe – Sickerwasserrate – Grundwasserneubildung – Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland, HW 49, 2005, H. 1, S. 2-13
- [51] Temperaturverteilung in 1km und 3km Tiefe in Deutschland auf Basis von Bohrungen und der Bodentemperatur, GeotIS / LIAG-Institut für Angewandte Geophysik, 2024
- [52] Deutscher Klimaatlas, © Deutscher Wetterdienst (DWD), https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html, abgerufen am 21.6.2023
- [53] Zahlentafeln der FGG Rhein, Flussgebietsgemeinschaft Rhein, <https://fgg-rhein.bafg.de/dkrr/> , abgerufen am 25.09.2023
- [54] Das Fachinformationssystem (FIS) der FGG Elbe, <https://www.elbe-datenportal.de/FisFggElbe/content/start/BesucherUnbekannt.action> , abgerufen am 25.09.2023
- [55] Gewässerkundlicher Dienst Bayern, Wassertemperatur Bayern, <https://www.gkd.bayern.de/de/fluesse/wassertemperatur> , abgerufen am 25.09.2023
- [56] Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB): Weder still noch starr, <https://www.leibniz-gemeinschaft.de/ueber-uns/neues/forschungsnachrichten/forschungsnachrichten-single/newsdetails/still-und-starr-ruht-der-see>, abgerufen am 28.10.2024
- [57] Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU): Thermische Nutzung von Gewässern, Fachdaten: Informationssystem Wasserwirtschaft, Stand 2022
- [58] Internetchemie.info – Die naturwissenschaftliche Wissensdatenbank, Sauerstoffgehalt von reinem Wasser, <https://www.internetchemie.info/chemielexikon/daten/s/sauerstoffgehalt-wasser.php>, abgerufen am 8.11.2023
- [59] Weiss, R.F., The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater, Deep-Sea Research, 1970, Vol. 17, pp. 721 to 735.
- [60] HydroX Chemie und Service, Löslichkeit von Sauerstoff und Stickstoff in Abhängigkeit der Temperatur, <https://hydro-x.gmbh/anwendungen/lo%CC%88slichkeit-von-sauerstoff-und-stickstoff-in-abha%CC%88ngigkeit-der-temperatur/> , abgerufen am 8.11.2023
- [61] Institut für Hygiene und Umwelt, <https://www.hamburg.de/hu/messgroessen/114352/sauerstoffgehalt/>, abgerufen am 25.09.2023
- [62] Chemie der Flüsse Unterer Main, GKD Bayern, https://www.gkd.bayern.de/de/fluesse/chemie/main_unten, abgerufen am 25.09.2023

- [63] Flussgebietsgemeinschaft Rhein, Daten, <https://fgg-rhein.de/servlet/is/100035/> , abgerufen am 25.09.2023
- [64] Lange, Jörg: Wärmelast Rhein, BUND Landesverbände Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz, BUND, 2009
- [65] Internationale Kommission zum Schutz des Rheins: Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011, Bericht Nr. 209, 2013
- [66] Daten- und Kartendienst der LUBW, Umwelt-Daten und -Karten Online <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de>, abgerufen am 25.09.2023
- [67] Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Weser- und Emsgebiet 2015, 1.11.2014 - 31.12.2015, Herausgeber Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden 2018
- [68] Weserdatenbank, Flussgebietsgemeinschaft Weser, <https://datenbank.fgg-weser.de/weserdatenbank/>
- [69] Girbig, A.K., Steffen, D., Langfristige Trendermittlung zur Wassertemperatur der Leine - Orientierende Betrachtungen zum Klimawandel, NLWKN, 2011
- [70] Institut für Hygiene und Umwelt, <https://www.hamburg.de/hu/daten/>, abgerufen am 17.10.2023
- [71] Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft, Messstation Zehren, Elbe links, (Fluss-km: 638; alte Kilometrierung 92) <https://www.wasser.sachsen.de/messstation-zehren-elbe-links-fluss-km-638-alte-kilometrierung-92-18337.html>, abgerufen am 8.11.2023
- [72] Auskunftsplattform Wasser, <https://apw.brandenburg.de/mapcontrol.aspx>, abgerufen am 28.11.2023
- [73] Droese, B.: Kommunale Wärmeplanung – Taktgeber für die (Fern-)Wärmewende, Niedersächsische Energietage, Hannover, 21.11.2023
- [74] Bundesamt für Energie Bern, Schweiz: Wärmenutzung aus Abwasser, Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen, Bern/Zürich November 2004
- [75] LG Düsseldorf BIGBW 55, 31
- [76] AG Düsseldorf ZMR 56, 332
- [77] Quelle: Statistisches Bundesamt, Bodenfläche insgesamt nach Nutzungsarten in Deutschland, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/bodenflaeche-insgesamt.html>, abgerufen am 25.09.2023
- [78] Was ist die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe?, Vaillant, <https://www.vaillant.at/privatanwender/tipps-und-wissen/lexikon-heizung-luftung-klima/jahresarbeitszahl/>, abgerufen am 09.10.2023
- [79] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Kommunale Abwässer als Potenzial für die Wärmewende?, Kurzstudie, September 2018
- [80] Stiebel-Eltron: https://www.stiebel-eltron.de/de/home/produkte-loesungen/erneuer-bare_energien/waermepumpe/ratgeber/waermepumpen-vergleich.html, abgerufen 25.11.2023
- [81] Jahresarbeitszahl Wärmepumpe, <https://gruenes.haus/jahresarbeitszahl-jaz/>, abgerufen am 25.11.2023
- [82] UHRIG-Gruppe, Abwassertemperatur – Grundlage der Abwasserwärmenutzung, <https://www.uhrig-bau.eu/lexikon/abwassertemperatur/>
- [83] Umweltbundesamt, Öffentliche Abwasserentsorgung, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft/oeffentliche-abwasserentsorgung#rund-10-milliarden-kubikmeter-abwasser-jaehrlich>, abgerufen am 06.10.2023
- [84] Statistisches Bundesamt (Destatis), 2022: Fachserie 19 Umwelt, R. 2.1. Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung
- [85] Julius Ecke, Leonard Göke, Energie aus Abwasser: Das bislang unentdeckte Potential für die Wärmewende, Eine enervis-Studie im Auftrag der Helmut UHRIG Straßen- und Tiefbau GmbH, Dez. 2017
- [86] ntv- Wirtschaft: Wärme aus Abwasser gewinnen „Wer sich zuletzt nach dieser Technologie umschaute hat das Nachsehen“, 17.11.2022

- [87] Entsorgung von Regen- und Abwasser, Umweltatlas Berlin, <https://www.berlin.de/umweltatlas/wasser/regen-und-abwasser>, abgerufen am 09.10.2023
- [88] KPMG, Thames Water: Waste Heat Beneath Our Feet, Unlocking hidden wastewater heat resources in the transition to green towns and cities, January 2023
- [89] The sewage treatment process, Thameswater, <https://www.thameswater.co.uk/about-us/responsibility/education/the-sewage-treatment-process>, abgerufen am 09.10.2023
- [90] River Thames: More than 2bn litres of raw sewage discharged over two days, BBC, 18.01.2022, <https://www.bbc.com/news/uk-england-london-60046320>, abgerufen am 09.10.2023
- [91] Berlin im Überblick, Zahlen und Fakten, berlin.de, <https://www.berlin.de/berlin-im-ueberblick/zahlen-und-fakten/>, abgerufen am 21.12.2023
- [92] Safarik, M., Honke, M., Steffan, C.: Flüssigeis zur Kälte- und Wärmeversorgung, Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH, 2017
- [93] Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH: Vakuum-Flüssigeis-Technologie, <https://www.ilkdresden.de/projekt/vakuum-fluessigeis-technologie>, Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH, abgerufen am 10.11.2024
- [94] Ropers, S.: Energie aus Nord- und Ostsee: MAN Großwärmepumpen für eine CO2-neutrale Wärme- und Kälteversorgung, Tagung „Großwärmepumpen für Wärmenetze“, Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen, Hannover, 8.10.2024
- [95] Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Zeitreihen und Trends (dwd.de) , <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>