

# **WÜRZBURGER GEOGRAPHISCHE ARBEITEN**

**Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Würzburg**

**Herausgeber:**

**R. Baumhauer - B. Hahn - H. Job - H. Paeth - J. Rauh - B. Terhorst**

Heft 106

**Ulrike Strauch**

## **Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland und die Entwicklung rezenter und zukünftiger Flusswassertemperaturen im Kontext des Klimawandels**



Im Selbstverlag des Institutes für Geographie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg  
in Verbindung mit der Geographischen Gesellschaft Würzburg

2011



**Ulrike Strauch**

**WASSERTEMPERATURBEDINGTE  
LEISTUNGSEINSCHRÄNKUNGEN KONVENTIONELLER  
THERMISCHER KRAFTWERKE IN DEUTSCHLAND UND DIE  
ENTWICKLUNG REZENTER UND ZUKÜNFTIGER  
FLUSSWASSERTEMPERATUREN IM KONTEXT DES  
KLIMAWANDELS**

# **WÜRZBURGER GEOGRAPHISCHE ARBEITEN**

Herausgegeben vom Institut für Geographie der Universität Würzburg  
in Verbindung mit der Geographischen Gesellschaft Würzburg

Herausgeber:

R. Baumhauer – B. Hahn – H. Job – H. Paeth – J. Rauh – B. Terhorst

Schriftleitung: B. Sponholz

# **WÜRZBURGER GEOGRAPHISCHE ARBEITEN**

Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Würzburg

---

Herausgeber:

R. Baumhauer – B. Hahn – H. Job – H. Paeth – J. Rauh – B. Terhorst

---

Heft 106

**WASSERTEMPERATURBEDINGTE  
LEISTUNGSEINSCHRÄNKUNGEN  
KONVENTIONELLER THERMISCHER KRAFTWERKE  
IN DEUTSCHLAND UND  
DIE ENTWICKLUNG REZENTER UND ZUKÜNFTIGER  
FLUSSWASSERTEMPERATUREN IM KONTEXT DES  
KLIMAWANDELS**

Ulrike Strauch

2011

---

Im Selbstverlag des Instituts für Geographie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg  
in Verbindung mit der Geographischen Gesellschaft Würzburg



Computersatz:

Ulrike Strauch, European Institute for Energy Research (EIFER), 2006 bis 2010

Druck: Verlag T. Lindemann  
Stiftstrasse 49  
63075 Offenbach

Bezug über den Buchhandel oder direkt bei:

Institut für Geographie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg  
– *Würzburger Geographische Arbeiten* –  
Am Hubland  
D-97074 Würzburg

E-Mail: [geographie@uni-wuerzburg.de](mailto:geographie@uni-wuerzburg.de)

URL: [http://www.geographie.uni-wuerzburg.de/vortraege\\_schriftenreihen/wuerzburger\\_geographische\\_arbeiten/](http://www.geographie.uni-wuerzburg.de/vortraege_schriftenreihen/wuerzburger_geographische_arbeiten/)

Zuschriften:

Geographische Gesellschaft Würzburg  
c/o Institut für Geographie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg  
Am Hubland  
D-97074 Würzburg

© Institut für Geographie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg  
ISSN 0510 - 9833

## DANKSAGUNG

Prof. Dr. Roland Baumhauer danke ich für die Übernahme der Betreuung und des Gutachtens meiner Doktorarbeit. Mein Dank gilt gleichermaßen Prof. Dr. Heiko Paeth für die Betreuung bei methodischen Fragestellungen sowie für die Übernahme des Zweitgutachtens meiner Doktorarbeit. PD Dr. Ralf Klein danke ich als Prüfer.

Das Management des Europäischen Instituts für Energieforschung ermöglichte es mir, meine Doktorarbeit am Institut durchführen zu können. Insbesondere Prof. Dr. Ute Karl gilt mein Dank für die unkomplizierte Unterstützung während der Endphase meiner Doktorarbeit. Dem gesamten ehemaligen EIFER Kollegium danke ich für die angenehme und dynamische Arbeitsatmosphäre. Stefanie Greis gilt dabei mein besonderer Dank für die stets konstruktiven Diskussionen und die angenehme Zusammenarbeit während ihrer Diplomarbeit sowie als Kollegin bei EIFER. Prof. Dr. Benno Rothstein danke ich für den Impuls, den er mir für meine Doktorarbeit gab.

Dirk Leyens, EnBW, Dr. Yannick Delauny, EDF, sowie allen Personen der EnBW, mit denen ich im Rahmen der Projekte zum Thema „Einfluss des Klimawandels auf die Elektrizitätswirtschaft“ zusammenarbeitete, danke ich für den konstruktiven Austausch. Dirk Leyens gilt zudem mein Dank für das Korrekturlesen meiner Arbeit. Prof. Dr. Daniela Jacob und Kevin Sieck, MPI-MET, danke ich ganz besonders für die sehr gute, konstruktive und freundliche Zusammenarbeit im Projekt.

Mein Dank geht an alle Kraftwerksbetreiber, die an der Befragung teilnahmen und wertvolle Informationen für meine Doktorarbeit lieferten. Ebenso danke ich allen Ämtern, Flussgebietsgemeinschaften und Behörden, die mir Wassertemperaturzeitreihen übermittelten. Mein besonderer Dank richtet sich dabei an Dr. Martin Keller, BfG, für den freundlichen und informativen Austausch sowie für die überlassenen Wassertemperaturzeitreihen. Dem DWD danke ich für die zur Verfügung gestellten Lufttemperaturzeitreihen.

Meinen ehemaligen Kollegen bei EIFER Dr. Till Bachmann, Dr. Solveig Berg, Bastian Hoffmann und meinen Freunden Heike Bischof, Dr. Alexander Fekete, Kristof Hofmeister, Susanne Linder, und Yvonne Walz danke ich für ihr Korrekturlesen und ihre konstruktiven Ratschläge. Mein besonderer Dank gilt dabei Susanne, Yvonne und Solveig für die vielen motivierenden Gespräche und ihre geduldige Unterstützung. Andreas Huber und dem FC Bayern danke ich für die großartige Ablenkung während der letzten Monate meiner Arbeit durch aufregende Fussball- und entspannte Schafkopfabende.

Meiner Familie, insbesondere Mama und Papa danke ich für ihre Unterstützung bei meiner Aus- und Weiterbildung, vor allem während der letzten Wochen meiner Doktorarbeit. Meinem Papa und meiner Schwester Michaela danke ich für ihr Korrekturlesen und meiner Mama für den leckeren selbstgesammelten Kräutertee.

Mein größter Dank gilt meinem Mann Jens-Uwe Strauch für seine Begleitung und Unterstützung während der gesamten Zeit meiner Doktorarbeit sowie für sein Korrekturlesen. Vor allem aber danke ich Jens von ganzem Herzen und in Liebe für seine Geduld, wenig Zeit füreinander gehabt zu haben. Ich freue mich auf die freie Zeit mit Dir und auf unsere gemeinsamen Erlebnisse, die Berge rufen!

Schöffelding im März 2011

## ZUSAMMENFASSUNG

Mit der vorliegenden Arbeit werden konventionelle thermische Kraftwerke an deutschen Flüssen identifiziert, bei denen aufgrund hoher Flusswassertemperaturen im Zusammenhang mit wasserrechtlichen Grenzwerten Leistungseinschränkungen auftraten. Weiterhin wird aufgezeigt, wie sich die Wassertemperaturen der Flüsse in der Vergangenheit (rezent) entwickelt haben und wie sie sich zukünftig im Kontext des Klimawandels entwickeln könnten.

Mittels Literaturrecherche, Medienanalyse und schriftlicher Befragung wurden konventionelle thermische Kraftwerke identifiziert, welche wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen verzeichneten. Die meisten dieser Leistungseinschränkungen zwischen 1976 und 2007 zeigen sich bei großen Kraftwerken mit einer elektrischen Bruttoleistung über 300 Megawatt, bei Steinkohle- und Kernkraftwerken, bei Kraftwerken mit Durchlaufkühlung und bei solchen, die zwischen 1960 und 1990 in Betrieb gingen.

Trendanalysen interpolierter und homogenisierter, rezenter Wassertemperaturzeitreihen deutscher Flüsse ergeben positive Trends v. a. im Frühjahr und Sommer. Die Zählstatistik zeigt in den Jahren 1994, 2003 und 2006 die meisten Tage mit sehr hohen und extrem hohen Wassertemperaturen in den Sommermonaten. In diesen Jahren traten gleichzeitig 63 % aller identifizierter wassertemperaturbedingter Leistungseinschränkungen bei Kraftwerken, meist zwischen Juni und August, auf.

Für die Trendanalysen und den Mittelwertvergleich simulierter zukünftiger Wassertemperaturzeitreihen wurden drei Szenarien – B1, A1B und A2 sowie drei Zukunftsperioden 2011-2040, 2011/2041-2070, 2011/2071-2100 betrachtet. Es ergeben sich für die Zukunftsperiode 2011-2040 des A1B- oder A2-Szenarios in mindestens einem der Sommermonate eine Erwärmung und für das B1-Szenario negative oder keine Trends. Die mittleren Wassertemperaturen der Zukunftsperiode 2011-2040 zeigen in allen drei Szenarien gegenüber denen der Klimanormalperiode 1961-1990 positive Unterschiede in mindestens einem der Sommermonate. Für die beiden späteren Zukunftsperioden bis 2070 bzw. bis 2100 liegen in allen Wassertemperaturzeitreihen der drei Szenarien im Sommer positive Trends bzw. Differenzen gegenüber den mittleren Wassertemperaturen der Klimanormalperiode vor.

Durch die Synthese der drei Analysen ist erkennbar, dass Isar, Rhein, Neckar, Saar, Elbe und Weser die meisten Kraftwerksstandorte mit wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen verzeichnen. Es zeigen sich hier positive Trends sowohl in den rezenten als auch zukünftigen Wassertemperaturen für die Zukunftsperiode 2011-2040 des A1B- und A2-Szenarios in jeweils mindestens einem der Sommermonate. Gegenüber den mittleren Wassertemperaturen der Klimanormalperiode liegen für alle drei Szenarien positive Unterschiede der Wassertemperaturen vor.

Bei einer Kraftwerkslaufzeit von 40-50 Jahren und einem Kernenergieausstieg 2022 bzw. 2034, werden 48-64 % bzw. 67-91 % der Kraftwerke mit wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen bis 2022 bzw. 2034 außer Betrieb gehen. Bei einer Laufzeitverlängerung würden nach 2022 fünf der elf betroffenen Kernkraftwerke weiter am Netz bleiben. Somit kann es wieder zu wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen kommen. In Deutschland sind nach wie vor große Kraftwerke an Flüssen geplant. Deren Kühlsysteme müssen entsprechend ausgewählt und konstruiert werden, um der zu erwartenden Erhöhung der Flusstemperaturen Rechnung zu tragen.

## SUMMARY

The research described in this thesis identified a subset of German power plants that suffered from power generation reductions (WT-GR) due to high water temperature (WT) of the rivers along which they lie and due to statutory thresholds concerning mixed WT after waste heat discharge. An analysis of the recent WT and a prediction of those temperatures due to global warming were conducted.

Power plants with WT-GR were identified based on a thorough literature search, scan of press releases and surveys. Most of WT-GR in the years between 1976 and 2007 occurred in a) power plants with a gross power output of larger than 300 MW b) black coal and nuclear power plants c) power plants with once-through cooling system and d) power plants, which started operation between 1960 and 1990.

Trend analysis of interpolated and harmonised recent WT of German rivers shows rising trends, predominantly in the spring and summer. Statistical analysis on numbers indicates most of days per year with either 'very high' or 'extremely high' WT in the years 1994, 2003 and 2006 in the summer. Those years also represent 63 % of all identified WT-GR, mostly between the months of June and August.

The simulation of future WT considered three scenarios (named B1, A1B and A2) and three different time periods (TP) (2011-2040, 2011/2041-2070 and 2011/2071-2100). The trend analysis for 2011-2040 shows an increase in WT of the A1B and A2 scenario for at least one summer month and negative or no trends for the B1 scenario. Positive differences exist between mean WT of all three scenarios for TP 2011-2040 and mean WT of climate normal period (CNP) for at least one summer month. Estimates for the TP 2011/2041-2070 and 2011/2071-2100 and the three scenarios also show rising trends and an increase in mean WT in comparison to the CNP.

Integration of above mentioned analyses indicates that plants along the rivers Isar, Rhine, Neckar, Saar, Elbe and Weser suffered most of WT-GR. Positive trends were identified by analyzing recent WT as well as the predictive WT for the period 2011-2040 and the scenarios A1B and A2 for at least one summer month.

The average lifetime of a conventional thermal power plant in Germany is between 40 and 50 years. Hence it can be assumed that between 48-64 % and 67-91 %, respectively, of the power plants with an identified WT-GR will be decommissioned before 2022 and 2034, respectively, depending on the nuclear phaseout. In the case of hot summers further power generation reductions can be expected.

The implication for new German power plants along rivers is that the selection, design and sizing of cooling systems must consider a further increase in river temperatures.

# INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung .....	I
Zusammenfassung .....	II
Summary .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abbildungen .....	VI
Tabellen .....	XII
Abkürzungen .....	XIV
Einheiten .....	XVII
Symbole .....	XVIII
Formeln .....	XVIII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Kontext: Die Elektrizitätserzeugung konventioneller thermischer Kraftwerke und Flusstemperaturen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Elektrizitätserzeugung konventioneller thermischer Kraftwerke und die Kühlwassernutzung .....	3
2.1.1 Funktionsweise und Kühlsysteme konventioneller thermischer Kraftwerke .....	3
2.1.1.1 Elektrizitätserzeugung in konventionellen thermischen Kraftwerken .....	3
2.1.1.2 Typen konventioneller thermischer Kraftwerke .....	5
2.1.1.3 Kühlsysteme, Kühlverfahren, deren Vorteile und Nachteile .....	9
2.1.2 Einfluss der Kühlwassernutzung auf die Gewässerökologie und gesetzliche Rahmenbedingung der Kühlwassernutzung .....	14
2.1.2.1 Auswirkungen von Kühlwassereinleitungen auf die Gewässerökologie .....	15
2.1.2.2 Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie und Grenzwerte der Kühlwasserentnahme und -einleitung für Wassertemperaturen in Deutschland .....	17
2.2 Natürliche und anthropogene Einflussgrößen auf die Wassertemperaturen von Flüssen und die Entwicklung der Lufttemperaturen in Deutschland .....	20
2.2.1 Natürliche Einflussgrößen auf das Wassertemperaturregime von Flüssen .....	20
2.2.2 Anthropogen bedingte Einflussgrößen auf das Wassertemperaturregime von Flüssen .....	23
2.2.3 Entwicklung der Lufttemperatur in Deutschland im Kontext des Klimawandels .....	26
2.2.3.1 Rezente Lufttemperaturentwicklung seit 1901 .....	27
2.2.3.2 Regionale Klimamodelle und Emissionsszenarien .....	28
2.2.3.3 Zukünftige Entwicklung der Lufttemperatur bis 2100 .....	31
<b>3 Stand der Forschung .....</b>	<b>33</b>
3.1 Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke .....	33
3.2 Studien zu Analysen rezenter und zukünftiger Entwicklungen der Wassertemperaturen von Flüssen .....	35
3.2.1 Studien zu Trendanalysen rezenter Wassertemperaturzeitreihen .....	35
3.2.2 Angewandte Modellansätze zur Simulation von Wassertemperaturen .....	38
3.2.3 Studien zur Simulation zukünftiger Wassertemperaturen .....	40
3.3 Fazit .....	42
<b>4 Datengrundlage, Datenaufbereitung und Methodik .....</b>	<b>43</b>

4.1 Konventionelle thermische Kraftwerke und Untersuchung wassertemperaturbedingter Leistungseinschränkungen in Deutschland .....	44
4.1.1 Datenbank des konventionellen thermischen Kraftwerksparks mit installierten Kühlsystemen.....	45
4.1.2 Literaturrecherche.....	51
4.1.3 Medienanalyse.....	51
4.1.4 Schriftliche Befragung der Betreiber konventioneller thermischer Kraftwerke.....	53
4.1.5 Deskriptive Auswertung .....	54
4.2 Analyse rezenter Wassertemperaturzeitreihen deutscher Flüsse.....	55
4.2.1 Auswahl der Wassertemperaturzeitreihen und Charakterisierung der Flüsse.....	56
4.2.2 Datenaufbereitung.....	63
4.2.2.1 Zeitlich gewichtete und räumliche Interpolation von Datenlücken.....	63
4.2.2.2 Homogenisierung.....	66
4.2.3 Trendanalyse.....	81
4.2.3.1 Mann-Kendall Trendtest.....	81
4.2.3.2 Sen's Nonparametric Estimator of Slope.....	83
4.2.4 Häufigkeitsanalyse extrem hoher Wassertemperaturen.....	84
4.3 Simulation zukünftiger Wassertemperaturen .....	86
4.3.1 Datengrundlage: gemessene und projizierte Lufttemperaturzeitreihen .....	87
4.3.1.1 Auswahl und Aufbereitung der gemessenen Lufttemperaturen .....	87
4.3.1.2 Auswahl, Aufbereitung und Validierung der projizierten Lufttemperaturen .....	89
4.3.2 Logistische Regressionsanalyse.....	96
4.4 Analyse zukünftiger Wassertemperaturen .....	104
<b>5 Ergebnisse .....</b>	<b>107</b>
5.1 Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke .....	107
5.2 Die Entwicklung rezenter Wassertemperaturen zwischen 1948 und 2007.....	116
5.2.1 Trends in den rezenten Wassertemperaturzeitreihen.....	117
5.2.2 Häufigkeit extrem hoher Wassertemperaturen.....	124
5.3 Die Entwicklung zukünftiger Wassertemperaturen zwischen 2011 und 2100 .....	129
5.3.1 Trends in zukünftigen Wassertemperaturen zwischen 2011 und 2100 .....	129
5.3.2 Vergleich der mittleren Wassertemperaturen der Zukunftsperioden mit denen der Klimanormalperiode .....	135
5.4 Synthese.....	139
<b>6 Diskussion.....</b>	<b>147</b>
6.1 Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke .....	147
6.2 Entwicklung rezenter Wassertemperaturen.....	152
6.3 Entwicklung zukünftiger Wassertemperaturen .....	158
6.4 Synthese.....	162
<b>7 Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>164</b>
Anhang I.....	167
Anhang II.....	191
Literaturverzeichnis.....	197
Autorenangabe.....	224

## ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Klassifizierung von KTKW nach verwendetem Energieträger .....	5
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Dampfkraftwerks mit KWK und/oder Kondensator .....	6
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Durchlauf- (a), Ablauf- (b) und Kreislauf-Nasskühlung (c).....	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung verschiedener Nasskühltürme mit Bauhöhe und Durchmesser in Metern .....	11
Abbildung 5: Prinzip der indirekten Trockenkühlung mittels Naturzugkühlturm.....	12
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Hybridrundkühlturms.....	13
Abbildung 7: Flussgebietseinheiten in Deutschland nach der WRRL 2000/60/EG. Gestrichelte Flächen stellen internationale Gebiete der Flussgebietseinheiten dar .....	17
Abbildung 8: Natürliche Einflussgrößen auf das WT-Regime eines Flusses.....	20
Abbildung 9: Charakteristische Jahressganglinien der WT eines Gebirgsflusses sowie eines Flachlandflusses im Vergleich mit der LT.....	22
Abbildung 10: Veränderung der LT in den vergangenen 140 und 1000 Jahren.....	27
Abbildung 11: Jahresmitteltemperaturen (Abweichung vom Mittel 1901-2000) für Deutschland: a) 1901-2000, b) 1991-2000, c) Differenz b) - a).....	28
Abbildung 12: Änderung des Sommermittels (Juni, Juli, August) der 2 m-Temperatur in K für die ZP 2071-2100 gegenüber der KNP 1961-1990, von links nach rechts: B1-, A1B- und A2-Szenario .....	32
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Vorgehens der Untersuchung der WT-LE bei KTKW in Deutschland .....	44
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Datengrundlage und des Vorgehens zur Erstellung der Datenbank „Kraftwerke“ .....	46
Abbildung 15: Anzahl der KTKW in den Leistungsklassen (links). Anteil der KTKW in den Leistungsklassen am GKP der Datenbank „Kraftwerke“ (rechts) .....	48
Abbildung 16: Anzahl der KTKW in den Betriebsbeginnklassen.....	48
Abbildung 17: Anzahl der KTKW in den Energieträgerklassen. Sonstige = Biomasse/Ersatzbrennstoffe/Restmüll. ....	49
Abbildung 18: Anzahl der KTKW in den Kühlsystemklassen.....	49
Abbildung 19: Anzahl der KTKW in den Kühlverfahrensklassen.....	50
Abbildung 20: Auswahlverfahren und Ergebnis der Artikelrecherche .....	52
Abbildung 21: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Analyse rezenter WT-Zeitreihen .....	56
Abbildung 22: Räumliche Verteilung der 72 WT-Stationen und 197 KTKW .....	60
Abbildung 23: Autokorrelationsrechnung der täglichen WT für zwei Beispielstationen.....	64
Abbildung 24: Schematische Darstellung des Homogenisierungsablaufs .....	67
Abbildung 25: Streudiagramme der $dX/dt$ -Test- und Vergleichsreihe mit dem Korrelationskoeffizient nach Spearman und Pearson sowie den $p$ -Werten beispielhaft an drei Zeitreihen dargestellt .....	70

Abbildung 26: Zwölfjährige gleitende Mittel der saisonbereinigten Zeitreihen am Beispiel ausgewählter Stationen.....	72
Abbildung 27: Kumulierte Summen saisonbereinigter Wassertemperaturzeitreihen beispielhaft dargestellt für ausgewählte Stationen.....	73
Abbildung 28: Kumulierte Differenzenkurven am Beispiel von sechs Testzeitreihen mit den jeweiligen Vergleichszeitreihen.....	74
Abbildung 29: Ergebnis der ersten relativen Homogenitätsprüfung mittels des SNHT nach ALEXANDERSSON (1986).....	77
Abbildung 30: Ergebnis der zweiten relativen Homogenitätsprüfung mittels des SNHT für die Zeitreihen „Lenggries“ (oben links), „Worms“, „Saarbruecken“ und „Oldendorf“ sowie nach der dritten relativen Homogenitätsprüfung bzw. nach der zweiten Homogenisierung der identifizierten Shift-Inhomogenität in der Zeitreihe „Lenggries“ (oben rechts).....	80
Abbildung 31: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Simulation zukünftiger WT-Zeitreihen.....	86
Abbildung 32: Räumliche Verteilung der 72 WT- und 82 DWD-Stationen.....	88
Abbildung 33: Über die KNP gemittelter Jahresgang der gemessenen (DWD) und simulierten (REMO) LT sowie die Differenz der Jahresgänge (DWD-REMO) beispielhaft dargestellt an drei Zeitreihen.....	92
Abbildung 34: Streudiagramm der Tages-, Wochen- und Monatsmittel gemessener LT und WT am Beispiel ausgewählter Zeitreihen mit den jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman sowie mit den jeweiligen $p$ -Werten.....	97
Abbildung 35: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für die Tagesmittel mit einem Zeitversatz von $\tau = 0, 1, 2, \dots, 5$ sowie für die Wochen- und Monatsmittel beispielhaft dargestellt für ausgewählte Zeitreihenpaare mit Angabe des maximalen Korrelationskoeffizienten aller zeitlichen Auflösungen und bei Tagesmitteln aller Zeitversätze.....	98
Abbildung 36: Schematische Darstellung der logistischen Funktion nach MOHSENI et al. (1998).....	99
Abbildung 37: Simulierte und gemessene WT-Zeitreihen mit den Regressionskoeffizienten $a, b, c$ und $d$ sowie dem $RMSE$ , dem $NSC$ und der maximalen absoluten Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten in °C am Beispiel der Station „Lenggries“ an der Isar.....	101
Abbildung 38: Wie Abbildung 37 für die Zeitreihe „Kemmern“ am Main.....	102
Abbildung 39: Wie Abbildung 37 für die Zeitreihe „Rielasingen_RadolfzAach“.....	103
Abbildung 40: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse simulierter WT-Zeitreihen beispielhaft dargestellt für ausgewählte Zeitreihen und Szenarien jeweils für die ZP 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 sowie für die KNP 1961-1990.....	106
Abbildung 41: Anzahl der KTKW mit WT-LE in den Leistungsklassen (oben links). Anteil der KTKW mit WT-LE in den Leistungsklassen am GKP (oben rechts) und innerhalb der Leistungsklassen (unten links).....	111
Abbildung 42: Anteil der KTKW mit WT-LE in den Betriebsbeginnklassen am GKP (oben) und innerhalb der Betriebsbeginnklassen (unten).....	112
Abbildung 43: Anteil der KTKW mit WT-LE in den Energieträgerklassen am GKP (oben) und innerhalb der Energieträgerklassen (unten).....	113

Abbildung 44: Anteil der KTKW mit WT-LE in den Klassen eingeteilt nach Kühlverfahren am GKP der Datenbank „Kraftwerke“ (oben) und an der Gesamtzahl der Kraftwerke in der jeweiligen Klasse eingeteilt nach Kühlverfahren (unten) .....	114
Abbildung 45: Anzahl der KTKW mit WT-LE pro Jahr zwischen 1976 und 2007 von oben nach unten nach den Ergebnissen der Auswertung der Literaturrecherche, der Medienanalyse und der Befragung sowie der Zusammenfassung aller drei Auswertungen.....	115
Abbildung 46: Anzahl der KTKW mit WT-LE pro Fluss (oben) und Anteil der KTKW mit WT-LE pro Fluss an der Gesamtzahl der Kraftwerksstandorte am jeweiligen Fluss (unten).....	116
Abbildung 47: Anzahl der signifikant ( $\alpha = 0,05$ ) positiven und negativen Trends in den 185 analysierten WT-Zeitreihen pro Zeitintervall und Saison für alle zehn Zeitschnitte.....	117
Abbildung 48: Anzahl der signifikant positiven und negativen Trends pro Saison für die jeweiligen Zeitintervalle, die von mindestens einer Zeitreihe der Isar, Donau, Radolfzeller Aach und Rhein abgedeckt werden (vgl. Tabelle 15).....	119
Abbildung 49: Anzahl der signifikant positiven und negativen Trends pro Saison für die jeweiligen Zeitintervalle, die von mindestens einer Zeitreihe der Flüsse Neckar, Kocher, Main und Saar abgedeckt werden (vgl. Tabelle 15).....	120
Abbildung 50: Anzahl der signifikant positiven und negativen Trends pro Saison für die jeweiligen Zeitintervalle, die von mindestens einer Zeitreihe der Flüsse Ems, Werra, Weser und Elbe abgedeckt werden (vgl. Tabelle 15).....	121
Abbildung 51: Anzahl der signifikant positiven und negativen Trends pro Saison für die jeweiligen Zeitintervalle, die von mindestens einer Zeitreihe der Flüsse Ems, Werra, Weser und Elbe abgedeckt werden (vgl. Tabelle 15).....	122
Abbildung 52: Signifikante (dunkelgrau) und nicht signifikante (hellgrau) Trends und deren Größe in °C in den Monatsmitteln der rezenten WT-Zeitreihe „Schweinfurt_Pegel“ für die Zeitintervalle 1971-2007, 1976-2005, 1979-1998, 1984-2003, 1986-2005 und 1988-2007 ( $\alpha = 0,05$ ).....	123
Abbildung 53: Übersicht über die 72 WT-Stationen mit dem Jahr (dunkelblau, blau und hellblau), in dem die höchste Anzahl an WT-Werten des 95. (links) und des 99. Perzentils (rechts) in der jeweiligen WT-Zeitreihen auftreten.....	125
Abbildung 54: Anzahl der Tage mit sehr hohen (hellgrau) und extrem hohen (dunkelgrau) WT-Werten in den Sommermonaten Juni, Juli und August in den Zeitreihen „Passau“ (Donau), „Petershagen“ (Weser) und „Hohensaaten“ (Oder) stellvertretend für die Zeitreihen der Flüsse in Süd-, Nord- und Ostdeutschland.....	126
Abbildung 55: Anzahl der Tage pro Jahr mit WT-Werten über definierten Schwellwerten $\geq 23$ °C in einem Grad Schritt bis $> 28$ °C für die acht WT-Zeitreihen des Rheins.....	128
Abbildung 56: Übersicht über signifikante (dunkelgrau, $\alpha = 0,05$ ) und nicht signifikant positive Trends (hellgrau) in den Jahresmitteln der 72 simulierten WT-Zeitreihen jeweils für die ZP 2011-2040, 2011-2070 und 2011-2100 (links nach rechts) sowie für die Szenarien B1, A1B und A2 (oben nach unten).....	130
Abbildung 57: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des B1- (oben), A1B- (Mitte) und A2-Szenarios (unten).....	132
Abbildung 58: Wie Abbildung 57 für die ZP 2011-2070.....	133
Abbildung 59: Wie Abbildung 57 für die ZP 2011-2100.....	135

Abbildung 60: Übersicht über signifikant positive (dunkelgrau) und nicht signifikante (hellgrau) Unterschiede ( $\alpha = 0,05$ ) zwischen den jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario (von oben nach unten) über die ZP 2011-2040 gemittelten und über die KNP 1961-1990 gemittelten Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die Sommermonate Juni, Juli und August (von links nach rechts).	138
Abbildung 61: Räumliche Verteilung der bestehenden KTKW mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 sowie der bestehenden KTKW ohne identifizierter WT-LE mit dem jeweils angewandten Kühlverfahren sowie eingeteilt in die Klassen nach elektrischer Bruttoleistung	140
Abbildung 62: Räumliche Verteilung der bestehenden KTKW mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 sowie der WT-Stationen mit mindestens einem signifikant positivem Trend in den Monatsmitteln der entsprechenden rezenten WT-Zeitreihe in den Sommermonaten Juni, Juli oder August jeweils für die sechs Zeitintervalle 1971-2007, 1976-2005, 1979-1998, 1984-2003, 1986-2005 und 1988-2007 ( $\alpha = 0,05$ ).	142
Abbildung 63: Räumliche Verteilung der bestehenden KTKW mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 (rot) sowie der geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW (grün) mit dem jeweils angewandten Kühlverfahren (Raute) sowie eingeteilt in die Klassen nach elektrischer Bruttoleistung	144
Abbildung 64: Räumliche Verteilung der KTKW mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 (dunkelgraues Rechteck) und der geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW (hellgraues Rechteck) sowie der WT-Stationen mit mindestens einem positivem Trend (dunkelgrauer Kreis) in den Monatsmitteln der simulierten WT-Zeitreihen in den Sommermonaten Juni, Juli oder August jeweils für die ZP 2011-2040 des B1-, A1B- und A2-Szenarios ( $\alpha = 0,05$ ).	146
Abbildung 65: Anschreiben für die schriftliche Befragung der KTKW-Betreiber.	176
Abbildung 66: Fragebogen (1/3) der schriftlichen Befragung der KTKW-Betreiber.	177
Abbildung 67: Fragebogen (2/3) der schriftlichen Befragung der KTKW-Betreiber.	178
Abbildung 68: Fragebogen (3/3) der schriftlichen Befragung der KTKW-Betreiber.	179
Abbildung 69: Autokorrelationsrechnung der täglichen WT für die 72 WT-Zeitreihen. Die gestrichelte blaue Linie stellt den Autokorrelationskoeffizient $r_X = 0,7$ dar.	191
Abbildung 70: Streudiagramme der 72 $dX/dt$ -Testreihen und jeweiligen $dX/dt$ -Vergleichsreihen mit entsprechenden Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Pearson sowie den $p$ -Werten.	191
Abbildung 71: Zwölfjährige gleitende Mittel der jeweiligen saisonbereinigten Zeitreihen für einen Fluss.	191
Abbildung 72: Kumulierte Summenkurve der saisonbereinigten WT für jeweils einen Fluss.	191
Abbildung 73: Kumulierte Differenzenkurven der 72 saisonbereinigten WT-Testzeitreihen mit den jeweiligen saisonbereinigten WT-Vergleichszeitreihen.	191
Abbildung 74: Ergebnis der ersten relativen Homogenitätsprüfung mittels des SNHT nach Alexandersson (1986) für die 72 WT-Zeitreihen ( $\alpha = 0,1$ ).	191
Abbildung 75: Über die KNP gemittelter Jahresgang der gemessenen (DWD) und simulierten (REMO) LT sowie die Differenz der Jahresgänge (DWD-REMO) für die 72 LT-Zeitreihen.	191
Abbildung 76: Streudiagramm der Tagesmittel gemessener LT und WT für alle 72 WT- und entsprechenden LT-Zeitreihen mit den jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman sowie mit den jeweiligen $p$ -Werten.	191

Abbildung 77: Streudiagramm der Wochenmittel gemessener LT und WT für alle 72 WT- und entsprechenden LT-Zeitreihen mit den jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman sowie mit den jeweiligen $p$ -Werten.....	191
Abbildung 78: Streudiagramm der Monatsmittel gemessener LT und WT für alle 72 WT- und entsprechenden LT-Zeitreihen mit den jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman sowie mit den jeweiligen $p$ -Werten.....	191
Abbildung 79: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für die Tagesmittel mit einem Zeitversatz von $\tau = 0, 1, 2, \dots, 5$ sowie für die Wochen- und Monatsmittel für die 72 Zeitreihenpaare mit Angabe des maximalen Korrelationskoeffizienten aller zeitlichen Auflösungen und bei Tagesmitteln aller Zeitversätze.....	191
Abbildung 80: Korrelationskoeffizienten nach Pearson für die Tagesmittel mit einem Zeitversatz von $\tau = 0, 1, 2, \dots, 5$ sowie für die Wochen- und Monatsmittel für die 72 Zeitreihenpaare mit Angabe des maximalen Korrelationskoeffizienten aller zeitlichen Auflösungen und bei Tagesmitteln aller Zeitversätze.....	192
Abbildung 81: Simulierte und gemessene Tagesmittel der 72 WT-Zeitreihen mit den Regressionskoeffizienten a, b, c und d sowie dem <i>RMSE</i> , dem <i>NSC</i> und der maximalen absoluten Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten in °C.....	192
Abbildung 82: Simulierte und gemessene Wochenmittel der 72 WT-Zeitreihen mit den Regressionskoeffizienten a, b, c und d sowie dem <i>RMSE</i> , dem <i>NSC</i> und der maximalen absoluten Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten in °C.....	192
Abbildung 83: Simulierte und gemessene Monatsmittel der 72 WT-Zeitreihen mit den Regressionskoeffizienten a, b, c und d sowie dem <i>RMSE</i> , dem <i>NSC</i> und der maximalen absoluten Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten in °C.....	192
Abbildung 84: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die KNP 1961-1990.....	192
Abbildung 85: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des B1-Szenarios.....	192
Abbildung 86: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 des B1-Szenarios.....	192
Abbildung 87: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 des B1-Szenarios.....	192
Abbildung 88: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des A1B-Szenarios.....	192
Abbildung 89: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 des A1B-Szenarios.....	192
Abbildung 90: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 des A1B-Szenarios.....	192
Abbildung 91: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des A2-Szenarios.....	192
Abbildung 92: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 des A2-Szenarios.....	192
Abbildung 93: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 des A2-Szenarios.....	192

Abbildung 94: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der rezenten WT-Zeitreihen Dresden (1948-1993), Gartz (1952-1973), Magwitz (1956-1978) und ErlIn (1986-2006).....	193
Abbildung 95: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der sechs rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1971-2007. ....	193
Abbildung 96: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 13 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1976-2005. ....	193
Abbildung 97: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 26 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1979-1998. ....	193
Abbildung 98: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 49 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1984-2003. ....	193
Abbildung 99: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 53 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1986-2005. ....	193
Abbildung 100: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 34 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1988-2007. ....	193
Abbildung 101: Anzahl der Tage pro Jahr mit sehr hohen (95. Perzentil, orange) und extrem hohen (99. Perzentil, rot) WT-Werten in den 72 rezenten WT-Zeitreihen. ....	194
Abbildung 102: Anzahl der Tage im Juni pro Jahr mit sehr hohen (95. Perzentil, orange) und extrem hohen (99. Perzentil, rot) WT-Werten in den 72 rezenten WT-Zeitreihen. ....	194
Abbildung 103: Anzahl der Tage im Juli pro Jahr mit sehr hohen (95. Perzentil, orange) und extrem hohen (99. Perzentil, rot) WT-Werten in den 72 rezenten WT-Zeitreihen. ....	194
Abbildung 104: Anzahl der Tage im August pro Jahr mit sehr hohen (95. Perzentil, orange) und extrem hohen (99. Perzentil, rot) WT-Werten in den 72 rezenten WT-Zeitreihen. ....	194
Abbildung 105: Anzahl der Tage im Juni pro Jahr mit WT-Werten über definierten Schwellwerten $\geq 23$ °C in einem Grad Schritt bis $> 28$ °C für die acht WT-Zeitreihen des Rheins. ....	194
Abbildung 106: Anzahl der Tage im Juli pro Jahr mit WT-Werten über definierten Schwellwerten $\geq 23$ °C in einem Grad Schritt bis $> 28$ °C für die acht WT-Zeitreihen des Rheins. ....	194
Abbildung 107: Anzahl der Tage im August pro Jahr mit WT-Werten über definierten Schwellwerten $\geq 23$ °C in einem Grad Schritt bis $> 28$ °C für die acht WT-Zeitreihen des Rheins. ....	194
Abbildung 108: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des B1-Szenarios. ....	194
Abbildung 109: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2070 des B1-Szenarios. ....	194
Abbildung 110: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2100 des B1-Szenarios. ....	194
Abbildung 111: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des A1B-Szenarios. ....	195
Abbildung 112: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2070 des A1B-Szenarios. ....	195
Abbildung 113: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2100 des A1B-Szenarios. ....	195

Abbildung 114: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des A2-Szenarios.....	195
Abbildung 115: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2070 des A2-Szenarios.....	195
Abbildung 116: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2100 des A2-Szenarios.....	195
Abbildung 117: Ergebnisse des t-Tests für die Jahresmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).....	196
Abbildung 118: Ergebnisse des t-Tests für die Jahresmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).....	196
Abbildung 119: Ergebnisse des t-Tests für die Jahresmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).....	196
Abbildung 120: Ergebnisse des t-Tests für die Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).....	196
Abbildung 121: Ergebnisse des t-Tests für die Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).....	196
Abbildung 122: Ergebnisse des t-Tests für die Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).....	196

## TABELLEN

Tabelle 1: Einsatz der nach eingesetzter Primärenergie klassifizierten Typen von KTKW in Deutschland in den drei Lastbereichen Grund-, Mittel- und Spitzenlast.....	8
Tabelle 2: Klassifizierung der KTKW-Blöcke nach elektrischer Bruttoleistung.....	8
Tabelle 3: Kennwerte der Kühlsysteme. Angegebene Werte pro 1.000 MW <sub>el</sub> Bruttoleistung.....	13
Tabelle 4: Mitteleuropäische Gewässertypen mit Jahresmittel der WT, Lage und festgelegte Grenzwerte der Gewässeraufwärmspanne und maximalen Mischtemperatur nach Kühlwassereinleitung.....	18
Tabelle 5: Grenzwerte der maximalen Kühlwassereinleittemperatur und maximalen Aufwärmspanne des Kühlwassers vor und nach dem Kondensator in Abhängigkeit des Kühlsystems.....	19
Tabelle 6: Wärmelasten ausgewählter Flüsse bezogen auf deutsche Streckenabschnitte durch eingeleitete Wärmemengen anthropogener Nutzung.....	24
Tabelle 7: Übersicht über Studien zur Untersuchung der Entwicklung rezenter WT.....	37
Tabelle 8: Übersicht über Studien zur Modellierung und Untersuchung der Entwicklung zukünftiger WT.....	41
Tabelle 9: Verwendete Suchbegriffe in der Zeitschriften- und Zeitungsrecherche.....	51
Tabelle 10: Übersicht über die WT-Zeitreihen der 72 Messstationen.....	58

Tabelle 11: Charakteristika der Flüsse mit ausgewählten WT-Stationen bezüglich der Lage, des Abflussverhaltens und wasserbaulichen Eingriffen.....	61
Tabelle 12: Minimale und maximale Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Pearson für die WT-Zeitreihen der aufgeführten Flüsse.....	71
Tabelle 13: Kritische Werte des SNHT nach ALEXANDERSSON (1986), angegeben für das 90 % Signifikanzniveau und $n \geq 50$ .....	78
Tabelle 14: Signifikanzniveau und Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ für die Prüfgröße $\hat{z}$ des Mann-Kendall Trendtests.....	83
Tabelle 15: Anzahl der WT-Zeitreihen, die die angegebenen Zeitintervalle für die Trendanalyse abdecken.....	84
Tabelle 16: DWD-Stationen zu WT-Zeitreihen mit zeitlicher Abdeckung der LT-Zeitreihen, der Distanz zwischen WT- und DWD-Station in km, dem Rechts- und Hochwert im GK3 und der Höhe der DWD-Stationen über NN.....	93
Tabelle 17: Übersicht über die durch die Literaturrecherche identifizierten WT-LE bei Kernkraftwerken zwischen 1997 und 2007.....	108
Tabelle 18: Übersicht über die durch die Medienanalyse identifizierten KTKW mit WT-LE zwischen 1976 und 2007.....	109
Tabelle 19: Minimale, maximale und mittlere Differenz zwischen den Jahresmitteln der ZP 2041-2070 und 2071-2100 des B1-, A1B- und A2-Szenarios sowie der KNP 1961-1990 aus dem Ergebnis aller 72 simulierter WT-Zeitreihen.....	136
Tabelle 20: Minimale, maximale und mittlere Differenz zwischen den Monatsmitteln der ZP 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 des B1-, A1B- und A2-Szenarios sowie der KNP 1961-1990 für die Sommermonate Juni, Juli und August der 72 simulierten WT-Zeitreihen.....	139
Tabelle 21: Liste der bestehenden und geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW mit einer Leistung $\geq 50 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$ in Deutschland.....	167
Tabelle 22: Liste der WT-Zeitreihen mit Anzahl der Datenlücken, die $\leq 32$ Tage, $> 32$ und $\leq 365$ Tage sowie $> 365$ Tage sind; prozentualer Anteil fehlender Werte an gesamten Zeitreihe jeweils vor der zeitlich gewichteten und räumlichen Interpolation.....	180
Tabelle 23: Liste der 72 WT-Testzeitreihen und den entsprechenden WT-Vergleichsreihen zur Bildung der WT-Referenzreihen für den SHNT nach ALEXANDERSSON (1986).....	183
Tabelle 24: Liste der rezenten WT-Zeitreihen, die die Zeitintervalle 1971-2007, 1976-2005, 1979-1998, 1984-2003, 1986-2005 und 1988-2007 abdecken, sowie deren Einteilung nach den Regionen Süd-, Nord- und Ostdeutschland.....	185
Tabelle 25: Liste der 72 LT-Stationen mit dem Mittelwert (MW), der Standardabweichung (SD) und der Amplitude jeweils gemittelt über die KNP 1961-1990 der DWD- und REMO-LT-Zeitreihen sowie der jeweiligen Differenzen (DWD - REMO).....	188

## ABKÜRZUNGEN

a. M.	am Main
AD Consultants	AD Consultants Resource Management Associates
AG	Aktiengesellschaft
AG. L. N.	Dr. Ulrich Tränkle Landschaftsplanung und Naturschutzmanagement
AK	Ablaufkühlung
AK KLIWA	Arbeitskreis Klimaänderung und Wasserwirtschaft
ANN	Artificial Neural Network, künstliches neuronales Netzwerk
Apr	April
ArGe Elbe	Arbeitsgemeinschaft zur Reinhaltung der Elbe
ArGe Weser	Arbeitsgemeinschaft zur Reinhaltung der Weser
atw	atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie
Aug	August
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BLfW	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, heute Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. - Friends of the Earth Germany
BW	Baden-Württemberg
CCCM	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CEC	Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
CNP	Climate Normal Period
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
dena	Deutsche Energie-Agentur GmbH
Dez	Dezember
Diff.	Differenz
DK	Durchlaufkühlung
dK	direkte Kühlung
DWD	Deutscher Wetterdienst
e. V.	eingetragener Verein
ECHAM5	European Centre Model Hamburg Version 5
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EG	Europäische Gemeinschaft
EIFER	European Institute for Energy Research
el	elektrisch
ELRM	einfaches lineares Regressionsmodell
EnBW	EnBW Energie Baden-Württemberg AG
EP	Europäisches Parlament
EPA	United States Environmental Protection Agency
ERA15	ECMWF Re-Analysis
EU	Europäische Union
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen
Feb	Februar

FGG Weser	Flussgebietsgemeinschaft Weser
GCM	Global Climate/Circulation Model
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GIS	Geoinformationssystem
GISS	Goddard Institute for Space Studies
GK3	Gauß-Krüger-Koordinatensystem, dritter Meridianstreifen
GKM	Großkraftwerk Mannheim
GKP	Gesamtkraftwerkspark der Datenbank „Kraftwerke“
Gl.	Gleichung
GLOBE	Global Learning and Observations to Benefit the Environment
GLOWA	Globaler Wandel des Wasserkreislaufs
GPS	Global Positioning System
GuD-Kraftwerk	Gas- und Dampfkraftwerk
HADCM	Hadley Centre for Climate Prediction and Research des Met Office
HEW	Hamburgische Electricitäts-Werke
HKW	Heizkraftwerk
HMUELV	Hessisches Ministerium für Umwelt’ Energie’ ländlichen Raum und Verbraucherschutz,
HND	Hochwassernachrichtendienst
HW	Hochwert
IKSMS	Internationale Kommission zum Schutz der Mosel und der Saar gegen Verunreinigung
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimafragen
Jan	Januar
JEER	Jahrbuch der Europäischen Energie- und Rohstoffwirtschaft
JM	Jahresmittel
Jul	Juli
Jun	Juni
k. A.	keine Angaben
Kap.	Kapitel
KK	Kreislaufkühlung
KKW	Kernkraftwerk
KlimU	Klimaänderung der Unterweserregion
KLIWAS	Klimawandel, Wasserstraßen, Schifffahrt, Ressortforschungsprogramm des BMVBS „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt“
KNN	Künstliches Neuronales Netzwerk
KNP	Klimanormalperiode
KomPass	Kompetenzzentrum für Klimafolgen und Anpassung
KTKW	konventionelle(s) thermische(s) Kraftwerke
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LARSIM	Large Area Runoff Simulation Model, Ingenieurbüro Dr. Ludwig
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LRM	Logistisches Regressionsmodell
LT	Lufttemperatur
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
MAA	maximale absolute Abweichung
Mär	März
max.	maximal

Max.	Maximum
MB	Mischbetrieb
min.	minimal
Min.	Minimum
MLRM	multiple lineares Regressionsmodell
MM	Monatsmittel
Mmax	mittleres Monatsmaximum
Mmin	mittleres Monatsminimum
MNLRM	multiple nicht-lineares Regressionsmodell
MPI-MET	Max-Planck-Institut für Meteorologie
MUFV	Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz
MUGV	Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MW	Mittelwert
NAO	Nordatlantische Oszillation
NK	Nasskühlung
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
Nov	November
Nr.	Nummer
NSC	Nash-Sutcliffe Coefficient
Okt	Oktober
OSU	Oregon State University
P/DM	physikalisches / deterministisches Modell
PCU	PlanConsultUmwelt Partnerschaft
Platts	Platts UDI Products Group
ProClim	Forum for Climate and Global Change
PRUDENCE	Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects
RAPS	Rescaled Adjusted Partial Sum
RCM	Regional Climate Model
RDK	Rheinhafen-Dampfkraftwerk
REMO	Regionales Klimamodell des MPI-MET
RMSE	Root Mean Square Error
RW	Rechtswert
RWE	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG, RWE AG
SD	standard deviation
Sep	September
SKW	Steinkohlekraftwerk
SM	stochastisches Modell
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
SNES	Sen's Nonparametric Estimator of Slope
SNHT	Standard Normal Homogeneity Test
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSE	Sum of Squares of Error
Std.-F.	Standardfehler
STEAG	Steinkohlen-Elektrizität AG, heute Evonik Steag GmbH
StM	Stundenmittel
StMUGV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt' Gesundheit und Verbraucherschutz

th	thermisch
TK	Trockenkühlung
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
TM	Tagesmittel
Tmax	Tagesmaximum
Tmin	Tagesminimum
TP	time period
ü. NN	über Normalnull
UBA	Umweltbundesamt
UBA-Liste	„Datenbank Kraftwerke in Deutschland - Liste der sich in Betrieb befindlichen Kraftwerke bzw. Kraftwerksblöcke ab einer elektrischen Bruttoleistung von 100 Megawatt“
UBC	University of British Columbia
UDI	Utility Data Institute
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
UK	United Kingdom
UKCIP	UK Climate Impacts Programme
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USA	United States of America
USGS	United States Geological Survey
UVM	Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VGB	Verband der Großkraftwerksbetreiber PowerTech e.V.
WEPP	UDI World Electric Power Plants Data Base
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WM	Wochenmittel
Wmax	mittleres Wochenmaximum
Wmin	mittleres Wochenminimum
WMO	World Meteorological Organization
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSA Eberswalde	Wasser- und Schifffahrtsamt Eberswalde
WT	Wassertemperatur
WT-GR	water temperature related generation reduction
WT-LE	wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkung
WUK	Wasseruntersuchungs- und -kontrollstationen
WWAKC	Wasserwirtschaftsamt Kronach
ZP	Zukunftsperiode

## EINHEITEN

K	Kelvin
%	Prozent
°C	Grad Celcius
h	Stunde

km	Kilometer
kV	Kilovolt
l	Liter
m	Meter
m <sup>3</sup> /s	Kubikmeter pro Sekunde
mg	Milligramm
mg/l	Milligramm pro Liter
MW	Megawatt
V	Volt

## SYMBOLE

U235	Uran 235
≤	kleiner gleich
≥	größer gleich
≠	ungleich
Σ	Summe
Δ	Differenz
~	ungefähr
<	kleiner als
=	gleich
>	größer als

## FORMELN

$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\hat{z}$	Prüfgröße Mann-Kendall Trendtest
$\bar{T}_{obs}$	Mittelwert aller gemessenen WT-Werte der Zeitreihe
$\hat{\tau}$	Prüfgröße des t-Tests
$\bar{x}$	Mittelwert aller Werte der Zeitreihe X
$\bar{y}$	Mittelwert aller Werte der Zeitreihe Y
$\sigma_{\bar{q}_b - \bar{q}_a}$	Standardfehler
$\bar{q}_a$	Mittelwert der unabhängigen Stichprobe a
$\bar{q}_b$	Mittelwert der unabhängigen Stichprobe b
$\tilde{z}_1$	kumulierte Summenkurve aus $Z_i$
$\tilde{z}_2$	kumulierte Summenkurve aus $Z_i$
a	Maximum der gemessenen WT-Zeitreihe
b	Wert der gemessenen LT am Wendepunkt der logistischen Regressionsfunktion
c	Wert an der steilsten Steigung der logistischen Regressionsfunktion
d	Minimum der gemessenen WT-Zeitreihe
e	Exponentialfunktion
$H_0$	Nullhypothese
$H_1$	Alternativhypothese
i	Laufindex i
j	Laufindex j

$L$	Intervalllänge
$l$	bestimmtes ganzzahliges Vielfaches eines Zeitschritts
$M_{LT}$	Lage der DWD-Messstation in m ü. NN
$M_{WT}$	Lage der WT-Messstation in m ü. NN
$n$	Stichprobenumfang, Anzahl der Werte einer Zeitreihe
$n_a$	Stichprobenumfang
$Q$	Schätzgröße des SNES
$Q$	Abfluss
$q$	Anzahl der Gruppe verbundener Ränge
$Q_a$	Wärmestromdichte aufgrund des advektiven Austauschs durch Niederschlag
$Q_e$	Wärmestromdichte aufgrund der Evaporation und Kondensation
$Q_{fc}$	Wärmestromdichte aufgrund der Reibung
$Q_h$	Wärmestromdichte aufgrund des Austauschs zwischen Atmosphäre und Wasser
$Q_{hb}$	Wärmestromdichte aufgrund der Flussbettleitfähigkeit
$Q_i$	Differenzenzeitreihe
$Q_n$	gesamter Nettowärmeaustausch
$Q_r$	Wärmestromdichte aufgrund Nettoeinstrahlung
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$r_R$	Rang-Korrelationskoeffizient nach Spearman
$r_X$	Autokorrelationskoeffizient
$r_{X,Y}$	Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient nach Pearson
$S$	Zufallsvariable
$s^2$	Varianz
$sgn$	Vorzeichenfunktion Signum
$T$	oberes Temperaturniveau
$t$	Zeitpunkt
$T_0$	Testgröße des SNHT
$T_L$	gemessener LT-Wert
$T_{obs}$	gemessener WT-Wert
$t_p$	Anzahl Daten in p-ter Gruppe
$T_S$	geschätzter WT-Wert der logistischen Regressionsfunktion
$T_S$	simulierter WT-Wert
$T_U$	unteres Temperaturniveau bzw. Umgebungstemperatur
$U$	Prüfgröße des U-Tests
$U_{krit}$	kritischer Wert des U-Tests
$x_i$	i-ter Wert x einer Zeitreihe
$X_{kum}$	kumulierte Summenkurve
$y_i$	i-ter Wert y einer Zeitreihe
$Z_i$	standardisierte Differenzenzeitreihe
$\eta_C$	Carnot-Wirkungsgrad
$\rho$	Korrelationskoeffizient der Test- und Referenzzeitreihe
$\tau$	Zeitverschiebung



Die Elektrizitätswirtschaft trägt nicht nur als einer der größten Kohlenstoffdioxid-Emittenten zum Klimawandel bei. Sie wird selbst in allen drei Bereichen Produktion, Transport und Verteilung sowie Nachfrage durch hydro-meteorologische Größen beeinflusst, die sich im Zuge des Klimawandels ändern. Ein häufigeres Auftreten von extremen Wetter- oder Witterungsereignissen wie Hoch- und Niedrigwasser oder Hitzeperioden können beispielsweise zu Überschwemmungen von Umspannwerken, zu einem eingeschränkten Betrieb von Laufwasserkraftwerken oder zu einem veränderten Nachfrageverhalten nach Elektrizität führen. Gleichzeitig können Hitzeperioden mit hohen Luft- und Wassertemperaturen zu Einschränkungen der Elektrizitätsproduktion führen. Denn je nach Kraftwerkstyp und Kühlsystem hängen der Kraftwerkswirkungsgrad sowie der Wirkungsgrad der Kühlsysteme unter anderem von der trockenen und feuchten Lufttemperatur ab. Neben physikalischen und technischen Zusammenhängen sind zudem gesetzliche Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit hydro-meteorologischen Größen zu berücksichtigen. Wenn beispielsweise während einer Hitzeperiode wie in den Sommern 2003 oder 2006 die natürlichen Wassertemperaturen der Flüsse Grenzwerte erreichen, können wasserrechtliche Auflagen der Kühlwassernutzung eine Einschränkung der Elektrizitätsproduktion bis hin zum Abfahren eines Kraftwerkblockes bedingen (LAWA 1991, S. 92f; MANIAK 2005, S. 422).

Diese wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen (WT-LE) konventioneller thermischer Kraftwerke (KTKW) in Deutschland und die Entwicklung der Wassertemperaturen (WT) deutscher Flüsse in der Vergangenheit und in der Zukunft im Kontext des Klimawandels stehen im Fokus der vorliegenden Dissertation. Die Arbeit wurde am European Institute for Energy Research (EIFER, Europäisches Institut für Energiewirtschaft) in Rahmen zweier Projekte zum Thema „Klimawandel – Einfluss auf die Elektrizitätswirtschaft“ erstellt. Für ein Energieversorgungsunternehmen sind im Kontext sich ändernder hydro-meteorologischer Größen folgende Fragen von Interesse: Welche Kraftwerkstypen an welchem Standort bzw. Fluss und mit welchem installierten Kühlsystem sind von WT-LE betroffen? Wie haben sich die WT deutscher Flüsse in den vergangenen Dekaden (rezent) entwickelt? Wie werden sich die WT der Flüsse im Kontext des Klimawandels zukünftig entwickeln?

Studien zum Park der KTKW und zu WT-LE lassen sich weder für Deutschland noch für andere Länder finden. Dagegen gibt es bereits in vielen Ländern Untersuchungen der Entwicklung rezenter und zukünftiger WT der Flüsse, jedoch nicht umfassend für deutsche Flüsse. Daher soll diese Arbeit erstens dazu beitragen, die Forschungslücke zu schließen, welche Kraftwerkstypen mit welchen installierten Kühlsystemen im Park der KTKW in Deutschland bisher WT-LE verzeichneten. Zweitens soll mit der Analyse der rezenten und zukünftigen Entwicklung der WT deutscher Flüsse untersucht werden, ob und wie sich die Temperaturen geändert haben bzw. ändern könnten. Die Ergebnisse könnten als zusätzliche Standortinformationen in die Planungsphase neuer Kraftwerke und der Kühlsysteme einbezogen werden.

Im zweiten Kapitel wird der Zusammenhang zwischen der Elektrizitätserzeugung der KTKW, deren Einfluss auf die Gewässerökologie sowie der Einfluss der WT auf die Elektrizitätserzeugung in Verbindung mit wasserrechtlichen Auflagen dargestellt (vgl. Abschnitt 2.1). Anschließend werden die anthropogenen und natürlichen Einflussgrößen auf die WT der Flüsse aufgezeigt. Da die WT insbesondere auf Änderungen der Lufttemperaturen (LT) reagieren, wird die Entwicklung rezenter

und zukünftiger LT in Deutschland dargestellt. Letztere werden mittels regionaler Klimamodelle modelliert, weswegen diese ebenfalls vorgestellt werden (vgl. Abschnitt 2.2).

In Kapitel 3 wird im ersten Teil der Stand der Forschung zu WT-LE bei KTKW dargestellt (vgl. Abschnitt 3.1). Abschnitt 3.2 umfasst den Stand der Forschung zu Untersuchungen rezenter WT von Flüssen, der Wassertemperaturmodellierung sowie der Analyse simulierter zukünftiger WT. In Abschnitt 3.3 wird als Fazit der Forschungsbedarf als Grundlage für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

Im vierten Kapitel werden die Datengrundlage und die Methodik der Analyse zu WT-LE bei KTKW in Deutschland, der rezenten Entwicklung der WT sowie der Simulation und Analyse zukünftiger WT deutscher Flüsse vorgestellt. Für die erste Analyse wird in Abschnitt 4.1 die Erstellung einer Datenbank beschrieben, die alle KTKW in Deutschland mit einer elektrischen Bruttoleistung  $\geq 50$  Megawatt (MW) enthält. Anschließend werden in einer Literaturrecherche, einer Medienanalyse sowie einer schriftlichen Befragung aller in der Datenbank aufgenommenen Kraftwerksbetreiber mögliche WT-LE der KTKW identifiziert. Die Auswertung der Datenbank, der Literaturrecherche, der Medienanalyse sowie der schriftlichen Befragung bezüglich der Kraftwerkstypen, deren Kühlsysteme und möglicher WT-LE findet deskriptiv statt.

Für die Analyse der Entwicklung rezenter WT wird in Abschnitt 4.2 zu Beginn die Auswahl von 72 WT-Zeitreihen mit einer Länge von mindestens 20 Jahren zwischen 1948 und 2007 erläutert. Die Datengrundlage erfordert neben der Interpolation von Datenlücken insbesondere eine Überprüfung möglicher Inhomogenitäten in den WT-Zeitreihen. Diese Datenaufbereitung stellt den methodischen Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Um mögliche Trends in den aufbereiteten WT-Zeitreihen zu identifizieren, werden anschließend Trendanalysen durchgeführt. Zusätzlich soll mit einer Zählstatistik untersucht werden, wie häufig extrem hohe Wassertemperaturen in den einzelnen Jahren bzw. Monaten vorkamen.

Simulation und Analyse zukünftiger WT werden in Abschnitt 4.3 beschrieben. Dazu werden für die ausgewählten 72 Messstationen logistische Regressionsmodelle mittels Zeitreihen gemessener Luft- und Wassertemperaturen erstellt. Nach der Validierung der Regressionsmodelle sowie der simulierten WT im Vergleich mit den gemessenen werden die Modelle zur Berechnung zukünftiger WT im Kontext des Klimawandels eingesetzt. Die Modellierung der WT erfolgt mittels simulierter LT eines regionalen Klimamodells für die Klimanormalperiode (KNP) bzw. dem Kontrolllauf 1961-1990 sowie für die Zukunftsperioden (ZP) 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100. Schließlich wird erstens eine Trendanalyse zukünftiger WT für die ZP 2011-2040, 2011-2070 und 2011-2100 durchgeführt. Und zweitens werden die über 30 Jahre gemittelten WT der ZP 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 jeweils mit den über die KNP 1961-1990 gemittelten Werte verglichen.

Die Ergebnisse der Analysen werden in Kapitel 5 untergliedert nach den WT-LE der KTKW in Deutschland (vgl. Abschnitt 5.1) sowie der rezenten und zukünftigen Entwicklung der WT deutscher Flüsse (vgl. Abschnitt 5.2 und 5.3) beschrieben. In Abschnitt 5.4 werden ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen zu WT-LE bei KTKW sowie der Entwicklung rezenter und zukünftiger WT räumlich dargestellt. Ziel ist es, dadurch Flüsse zu identifizieren, an denen einerseits eine große Anzahl an KTKW mit WT-LE liegt, und deren rezente und zukünftige WT andererseits signifikant positive Trends aufzeigen.

Abschließend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse im Zusammenhang mit der Datengrundlage und der Methodik diskutiert, bevor in Kapitel 7 die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen gezogen werden und ein Ausblick gegeben wird.

## 2 KONTEXT: DIE ELEKTRIZITÄTSERZEUGUNG KONVENTIONELLER THERMISCHER KRAFTWERKE UND FLUSSTEMPERATUREN

Im Folgenden wird auf die Elektrizitätserzeugung der KTKW, auf die Klassifizierung der Kraftwerke in Typen, auf die Kühlsysteme und -verfahren sowie auf die Kühlwassernutzung eingegangen (vgl. Abschnitt 2.1). Im zweiten Teil werden anthropogene und natürliche Einflussgrößen der WT dargestellt. Dabei liegt der Fokus sowohl auf der Entwicklung rezenter und zukünftiger LT als bedeutendste, natürliche Einflussgröße der WT als auch auf regionalen Klimamodellen für Deutschland, die zukünftige LT simulieren (vgl. Abschnitt 2.2).

### 2.1 Elektrizitätserzeugung konventioneller thermischer Kraftwerke und die Kühlwassernutzung

Im deutschen Kraftwerkspark nimmt die Elektrizitätserzeugung der KTKW mit 77 % trotz des Ausbaus erneuerbarer Energien nach wie vor den größten Anteil an der gesamten Bruttostromerzeugungskapazität von 138 Gigawatt ein (Stand 2009) (BMWi 2010, S. 1). Im Folgenden werden die Funktionsweise der KTKW, die Kraftwerkstypen und deren Kühlsysteme sowie -verfahren in Deutschland dargestellt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Anschließend wird in Abschnitt 2.1.2 der Einfluss der Kühlwassernutzung auf die Gewässerökologie sowie gesetzliche Rahmenbedingungen und Grenzwerte zur Kühlwassernutzung aufgezeigt.

#### 2.1.1 Funktionsweise und Kühlsysteme konventioneller thermischer Kraftwerke

In KTKW wird chemische oder nukleare Energie in thermische Energie umgewandelt. Ein Teil der Wärmeenergie kann zur Umwandlung in elektrische Energie genutzt werden. Der größere Teil bleibt jedoch als Wärmeenergie übrig und findet entweder durch die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Verwendung oder muss an die Umgebung abgeführt werden. In Abschnitt 2.1.1.1 werden die Funktionsweisen der KTKW beschrieben und ausgewählte Begrifflichkeiten aus der Elektrizitätserzeugung definiert. Anschließend werden die Kraftwerke nach Art der eingesetzten Primärenergie, nach Art des Einsatzes im Verbundnetz sowie nach elektrischer Kraftwerksleistung eingeteilt (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). In Abschnitt 2.1.1.3 wird auf die an deutschen Kraftwerken installierten Kühlsysteme und -verfahren eingegangen.

##### 2.1.1.1 Elektrizitätserzeugung in konventionellen thermischen Kraftwerken

In einem KTKW wird Primärenergie (z. B. Uran, Kohle, Gas, Ersatzbrennstoffe) in drei Schritten in Elektrizität umgewandelt. Im ersten Schritt findet eine Umwandlung chemischer oder nuklearer Energie durch Verbrennung in thermische Energie (Wärmeenergie) statt. Hierbei werden in der

industriellen Kraftwerkstechnik zwei Prozesse bezüglich der für den Wärmetransport verwendeten Arbeitsmittel unterschieden: das homogene Medium Gas und das heterogene Medium Wasser bzw. Dampf. In einem zweiten Schritt wird die thermische Energie in thermodynamischen Kreisprozessen in nutzbare oder auch mechanische Energie überführt. Turbinen wandeln dabei die Wärmeenergie in mechanische Energie um. Dabei wird zum einen nutzbare Arbeit geleistet und zum anderen Niedertemperaturwärme abgegeben. Im dritten Schritt wird die mechanische in elektrische Energie (Elektrizität) mittels Generatoren umgewandelt (STRAUSS 2009, S. 20f).

Allerdings kann nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik die thermische Energie nur eingeschränkt in Arbeit oder eine andere nicht thermische Energie umgewandelt werden. Dagegen kann mechanische und elektrische Energie ohne thermische Verluste fast beliebig in andere Energieformen umgewandelt werden (KONSTANTIN 2007, S. 150). In KTKW können zwischen 35 und 55 % der eingesetzten Primärenergie in elektrische Energie umgewandelt werden, die restliche thermische Energie muss als Abwärme abgeführt werden (MANIAK 2005, S. 419f). Inwieweit eine Energieform in einem thermodynamischen Kreisprozess in Arbeit umgewandelt werden kann, stellt der Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_C$  als Maß für die Umwandlungsfähigkeit dar

$$\eta_C = 1 - T_U / T \quad \text{Gl. 1}$$

In einem thermodynamischen Kreisprozess wird die thermische Energiedifferenz zwischen zwei Temperaturniveaus genutzt. Dabei entspricht  $T_U$  dem unteren Temperaturniveau, das gleichzeitig gleich der Umgebungstemperatur ist, solange keine weiteren technischen Maßnahmen ergriffen werden.  $T$  stellt das obere Temperaturniveau dar und wird bestimmt durch die genutzte Wärmequelle (z. B. Verbrennung). Die maximal nutzbare Arbeit wird als Arbeitsfähigkeit oder Exergie bezeichnet. Je geringer die Differenz zwischen dem höheren und dem niedrigeren Temperaturniveau ist, desto geringer ist die Exergie. Der nicht umwandelbare Teil der thermischen Energie in Arbeit wird als Anergie bezeichnet. Somit ist die Summe aus Exergie und Anergie gleich der Energie. In der Energietechnik kann der Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_C$  technisch nicht erreicht werden. Grund hierfür ist vor allem die technisch nur bedingt umsetzbare isotherme Wärmezu- und -abfuhr. In der Praxis finden somit Varianten des Carnot-Prozesses Anwendung, bei denen eine möglichst hohe technisch realisierbare und materialabhängige Temperatur- und Druckdifferenz vor und nach der Turbine erzielt werden soll (ZAHORANSKY 2007, S. 6ff). Um ein möglichst niedriges unteres Temperatur- und Druckniveau zu erreichen, findet die Kondensation entweder z. T. durch Abführung der Wärmeenergie durch KWK und bzw. oder im Kondensator nach der Turbine statt (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) (BOHN 1986, S. 443f).

Die in einem KTKW in der Turbine abgegebene thermische Energie ist die thermische Leistung eines Kraftwerks und wird in Megawatt thermisch ( $MW_{th}$ ) angegeben. Die in einem Generator umgewandelte mechanische Energie und an den Generatorklemmen abgegebene elektrische Leistung wird als elektrische Bruttoleistung ( $MW_{el, brutto}$ ) bezeichnet. Die elektrische Nettoleistung ( $MW_{el, netto}$ ) eines Kraftwerks wird aus der Differenz der Bruttoleistung und des Eigenbedarfs des Kraftwerks berechnet (VDI 2005, S. 21). Der Eigenbedarf eines Kraftwerks ergibt sich aus dem gesamten Elektrizitätsbedarf aller Verbraucher im Kraftwerk wie z. B. Elektromotoren für den Antrieb von Ventilatoren, Pumpen und Trocknungsanlagen. Dampfkraftwerke benötigen 7 bis 10 % der Kraftwerksleistung als Eigenbedarfsleistung, Gasturbinenkraftwerke bis zu 2 % und Kernkraftwerke zwischen 5 und 16 % (KALIDE 2005, S. 330). Die Kraftwerkstypen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 2.1.1.2 Typen konventioneller thermischer Kraftwerke

Kraftwerke werden nach Konstantin (2007, S. 715) nach Art des Prozesses der eingesetzten Primärenergie und des Einsatzes im Verbundnetz unterteilt. Nach Art des Prozesses werden thermische Kraftwerke und nicht-thermische Kraftwerke unterschieden. Die folgende Beschreibung der Kraftwerkstypen bezieht sich ausschließlich auf thermische Kraftwerke mit Ausnahme solarthermischer Kraftwerke, da der Fokus der Arbeit auf KTKW und deren Kühlsysteme liegt (vgl. Kapitel 1). Im Folgenden werden die Kraftwerkstypen nach Art der eingesetzten Primärenergie, des Einsatzes im Verbundnetz sowie nach Kraftwerksleistung untergliedert.

Abbildung 1 folgt der Klassifizierung von KTKW nach Art der eingesetzten Primärenergie bzw. des Energieträgers (KALIDE 2005, S. 335). Diese sind Brennstoffe, die chemisch gebundene Energie enthalten (KONSTANTIN 2007, S. 161).

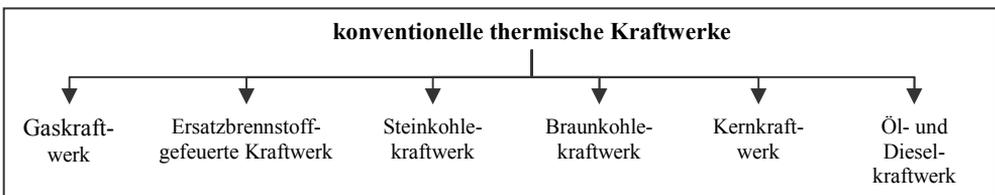


Abbildung 1: Klassifizierung von KTKW nach verwendetem Energieträger. Zusammenstellung nach KALIDE (2005, S. 335).

Dabei werden Dampfkraftwerke unterschieden nach Art des Brennstoffes oder der abgegebenen Nutzenergie. Nach erster Einteilung existieren im konventionellen Sinn Stein- und Braunkohle-, Torf-, Öl-, Gas- und Ersatzbrennstoff geheizte Kraftwerke. Die zweite Unterteilung unterscheidet Kondensations-, Heiz- und Industriekraftwerke. Während in Kondensationskraftwerken ausschließlich Elektrizität erzeugt wird, wird in letzteren beiden die KW zur Elektrizitäts- und Wärmeproduktion genutzt (KALIDE 2005, S. 343).

In einem Kondensationskraftwerk werden Heizflächen von Verbrennungsgasen erhitzt. Diese entstehen durch das Verbrennen des eingesetzten Brennstoffes (Kohlestaub, Gas, Öl, Ersatzbrennstoff). Im Dampferzeuger wird Speisewasser über die rauchgasbeheizten Vorwärmeplatten geführt und verdampft. Der Sattdampf wird nachfolgend auf ca. 560 Grad Celsius (°C) erhitzt und dem Hochdruckteil der Dampfturbine zugeführt. Ein Teil des Dampfes wird nach der Turbine zur Aufwärmung des frischen Speisewassers entnommen, der restliche Dampf wird dem Dampferzeuger zurückgeführt. Durch Strömungsverluste steht der Dampf zwar nun unter vermindertem Druck, wird jedoch im Zwischenerhitzer auf eine höhere Temperatur erneut erwärmt. Anschließend wird der Dampf dem Mittel- und Niederdruckteil der Turbine zugeführt. Während wiederum ein Teil des Dampfes abgeführt wird, um das frische Speisewasser vorzuwärmen, wird der größte Teil dem Kondensator zugeführt und dort verflüssigt. Das Kondensat wird nach Entgasung im Speisewasserbehälter gesammelt und dem Dampfkreislauf erneut zugeführt. Die Dampfturbinen sind an einen Drehstromgenerator angeschlossen, der elektrischen Strom in einer Spannung von bis zu 21.000 Volt (V) erzeugt. Um den Strom mit möglichst wenigen Verlusten transportieren zu können,

spannt ein Transformator diesen auf bis zu 380 Kilovolt (kV) um. Über das Verbundnetz wird der Strom auf den Spannungsebenen Hoch-, Mittel- und Niederspannung über das Übertragungs- und Verteilnetz zu den Verbrauchern transportiert und jeweils zuvor in Umspannwerken auf eine niedrigere Spannungsebene umgespannt (KALIDE 2005, S. 343ff; KONSTANTIN 2007, S. 330) (vgl. Abbildung 2).

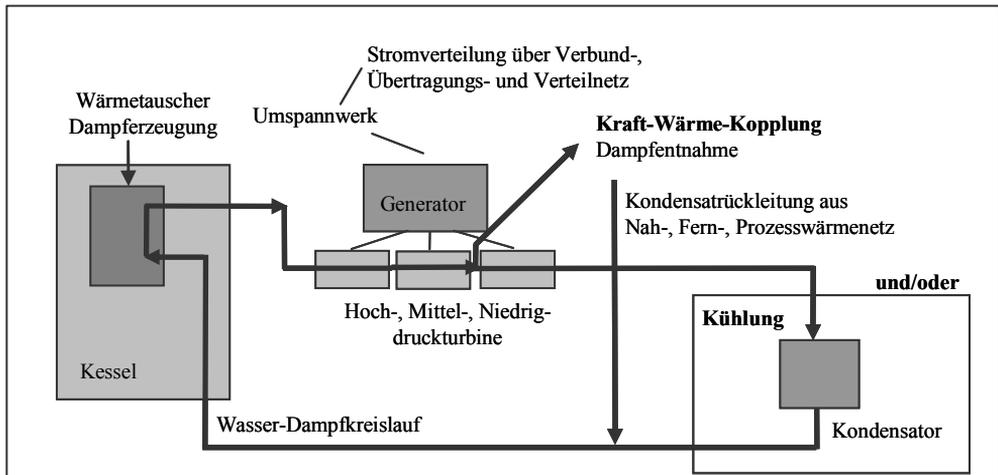


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Dampfkraftwerks mit KWK und/oder Kondensator.

Die Elektrizitätsproduktion in einem Kernkraftwerk (KKW) erfolgt prinzipiell wie in einem Dampfkraftwerk: Wasser wird erhitzt und der erzeugte Dampf wird in eine Dampfturbine geleitet. Diese ist an einen Generator angeschlossen, in dem die mechanische in elektrische Energie umgewandelt wird. Der entscheidende Unterschied eines Kernkraftwerks zu einem Dampfkraftwerk liegt im Brennstoffeinsatz: Die Wärme wird nicht durch Verbrennung, sondern durch Kernspaltung erzeugt. Die spaltbaren Atomkerne befinden sich in Brennstäben, welche in einem Kühlmittel aufbewahrt werden. In Abhängigkeit des Reaktortyps werden unterschiedliche Kühlmittel eingesetzt, in deutschen Kernkraftwerken wird ausschließlich leichtes Wasser verwendet. Dieses erfüllt zugleich die Funktion des Moderators. Zu den Leichtwasserreaktoren zählen die in Deutschland ausschließlich existierenden Siede- und Druckwasserreaktoren. In beiden Reaktortypen wird die durch die Kernspaltung entstandene Wärmeenergie an das Kühlmittel übertragen. Im Falle des Siedewasserreaktors verdampft das leichte Wasser im Reaktor selbst, der erzeugte Dampf wird in die außerhalb des Reaktors stehenden Dampfturbinen geleitet. Im Druckwasserreaktor bleibt das radioaktive Kühlwasser dagegen in einem geschlossenen Primärkreislauf. In einem Wärmetauscher außerhalb des Reaktordruckbehälters wird mit dem erhitzten Kühlmittel Dampf in einem sekundären Wasserkreislauf erzeugt. Dieser Dampf wird den Turbinen zugeführt, die wie der gesamte Sekundärkreislauf des Druckwasserreaktors von radioaktiven Strahlen unbeeinflusst bleiben. Bei beiden Reaktortypen wird der aus den Turbinen tretende Dampf in einem Kondensator abgekühlt, so dass das Kondensat erneut dem Reaktordruckbehälter im Falle des Siedewasserreaktors und dem Wärmetauscher im Falle des Druckwasserreaktors zugeführt werden kann (KALIDE 2005, S. 383).

Eine Gas- oder Ölturbinenanlage setzt sich zusammen aus einem Verdichter, einem Luftvorwärmer, einer Brennkammer, einer Gasturbine und evtl. einem Kühler. Prinzipiell ähnelt die Funktionsweise einer Gasturbine der Funktionsweise einer Dampfturbine. Allerdings wird im Gegensatz zu Dampfturbinen keine Kesselanlage benötigt. Die Brennstoffenergie wird innerhalb der Gasturbine in mechanische Arbeit umgewandelt. Die entstehende Nutzleistung kann als überschüssige Druckluft in Form von kinetischer Energie beschleunigter Abgase oder zum Antrieb elektrischer Generatoren über eine Kupplung einer Maschinenwelle abgegeben werden. Kombinationen wie z.B. die Abgabe von Druckluft und gleichzeitiger Erzeugung elektrischer Energie sind ebenfalls möglich. Als Brennstoff können in gasförmigem Zustand Edel- oder Gichtgas oder in flüssigem Zustand Öl eingesetzt werden. Wird der Gasturbinenanlage eine Dampfturbinenanlage (Gas- und Dampfkraftwerk, GuD-Kraftwerk) nachgeschaltet, kann die Abhitze nach der Gasturbine weiter zur Dampferzeugung genutzt und somit der thermische Wirkungsgrad von ca. 40 % auf über 58 % gesteigert werden (KALIDE 2005, S. 318ff; ZAHORANSKY 2007, S. 19).

Bei allen KTKW fällt abzuführende Wärme an. In Wärme- bzw. Heizkraftwerken (HKW) oder Industriekraftwerken wird diese durch die KWK entnommen und einem Nah-, Fern- oder Prozesswärmenetz zugeführt. Die Wärmeenergie kann bei Gasturbinenkraftwerken ohne eine Minderung der Elektrizitätserzeugung ausgekoppelt werden, indem die heißen Abgase nach der Gasturbine verwendet werden. Bei einem Dampfkraftwerk muss der Abdampf vor der Niederdruckturbine dem Kreislauf entnommen werden, um die im Dampf enthaltene Wärme nutzen zu können (vgl. Abbildung 2). Ein Teil des Dampfes steht somit der Elektrizitätserzeugung nicht mehr zur Verfügung. Dennoch ist die KWK auch bei Dampfkraftwerken energetisch sinnvoll, wenn in der Umgebung des Kraftwerks neben Elektrizität auch ausreichend Wärme benötigt wird. Denn der Brennstoffnutzungsgrad ist bei KWK höher als der auf die elektrische Leistung bezogene Wirkungsgrad. Ein weiterer Vorteil der KWK ergibt sich aus der Kondensation des abgeführten Dampfes beim Verbraucher. Das Kondensat kann dem Dampfkreislauf des Kraftwerks rückgeleitet werden, so dass am Kraftwerk lediglich ein geringer Anteil an Abwärme abgeführt werden muss. Die KWK unterliegt jedoch im Sommer der Einschränkung, dass der Wärmebedarf gering ist und die Kraftwerke zum Teil ohne KWK ausschließlich zur Elektrizitätserzeugung betrieben werden. In Deutschland ist die KWK prinzipiell ausbaufähig. Viele Großkraftwerke liegen jedoch so weit entfernt von Siedlungs- und Industriegebieten, so dass der Ausbau und Betrieb eines Fernwärmenetzes häufig nicht wirtschaftlich ist (BOHN 1986, S. 443f; KALIDE 2005, S. 349; ZAHORANSKY 2007, S. 19).

In Abhängigkeit des Einsatzes im Verbundnetz werden die Kraftwerke nach Konstantin (2007, S. 215) in folgende Typen unterschieden:

- Grundlastkraftwerk mit mehr als 7.000 Volllaststunden pro Jahr
- Mittellastkraftwerk mit 4.500 bis 5.500 Volllaststunden pro Jahr
- Spitzenlastkraftwerk mit weniger als 1.250 Volllaststunden pro Jahr
- Reservekraftwerk.

Dabei stellen die Volllaststunden die Ausnutzungsdauer dar, also die abgegebene Energiemenge eines Kraftwerks in einer Zeitspanne dividiert durch die Nennleistung. Wobei die Nennleistung als die höchst abgebbare installierte Dauerleistung eines Kraftwerks definiert ist (VDI 2005, S. 22f).

Die langen Hochfahrtszeiten thermischer Grundlastkraftwerke bis zur vollen Leistung bedingen den praktisch ständigen Betrieb dieser Kraftwerke im Jahresverlauf auf nahezu derselben Leistung. Ohne Störfälle wird ein Grundlastkraftwerk lediglich während der Revisionsphase<sup>1</sup> abgeschaltet. Mittellastkraftwerke erlauben ein im Verhältnis zu Grundlastkraftwerken schnelleres Hoch- und Abfahren. Sie kommen an Werktagen mit hoher Netzbelastung zum Einsatz und werden nachts und an arbeitsfreien Tagen meist abgeschaltet. Wenige Minuten Hochfahrtszeit erlauben den flexiblen Einsatz thermischer Spitzenlastkraftwerke zur Abdeckung von Spitzenlasten. Außer Betrieb genommene, ältere Anlagen werden teilweise als Reservekraftwerke verwendet. Diese kommen in Revisionsphasen anderer Kraftwerke zum Einsatz (KONSTANTIN 2007, S. 216). Tabelle 1 zeigt die nach eingesetzter Primärenergie unterteilten Kraftwerkstypen, wie diese in Deutschland in den jeweiligen Lastbereichen eingesetzt werden.

Tabelle 1: Einsatz der nach eingesetzter Primärenergie klassifizierten Typen von KTKW in Deutschland in den drei Lastbereichen Grund-, Mittel- und Spitzenlast. Quelle: OEDING & OSWALD (2004, S. 8).

Kraftwerkstyp nach eingesetzter Primärenergie	Lastbereich
Kernkraftwerk	Grundlast
Braunkohle	Grundlast
Steinkohle	Mittellast
Gas- und Dampfkraftwerk	Mittel- und Spitzenlast
Gasturbinenkraftwerk	Spitzenlast
Ölturbinenkraftwerk	Spitzenlast

Eine offizielle Klassifizierung der Kraftwerke nach elektrischer Leistung existiert nicht. Der Verband der Großkraftwerksbetreiber PowerTech e. V. (VGB PowerTech e. V., VGB) unterteilt jedoch Blockanlagen nach in Tabelle 2 stehende elektrische Leistungsbereiche.

Tabelle 2: Klassifizierung der KTKW-Blöcke nach elektrischer Bruttoleistung. Zusammenstellung nach VGB (2006, S. 64-98).

Bezeichnung	Elektrische Bruttoleistung in MW <sub>el, brutto</sub>
Blockanlage bis 99	≤ 99
Blockanlage 100 bis 199	> 100 und ≤ 199
Blockanlage 200 bis 399	> 200 und ≤ 399
Blockanlage 400 bis 599	> 400 und ≤ 599
Blockanlage 600 bis 999	> 600 und ≤ 999
Blockanlage ab 1000	> 1000

---

<sup>1</sup> Phase, in der Kraftwerke zur Überprüfung der technischen Anlagen heruntergefahren werden.

Bei allen Kraftwerkstypen unabhängig der Einteilung muss die thermische Energie nach den Turbinen an die Umgebung abgeführt werden, sofern keine KWK installiert ist. Im folgenden Abschnitt werden die in Deutschland an Kraftwerken installierten Kühlsysteme und -verfahren sowie deren Vor- und Nachteile beschrieben.

### 2.1.1.3 Kühlsysteme, Kühlverfahren, deren Vorteile und Nachteile

Um einen möglichst hohen thermischen Wirkungsgrad zu erreichen, müssen sowohl die heißen Abgase in Gas- und Ölturbinenkraftwerken als auch der Dampf in Dampf- und Kernkraftwerken nach Verlassen der Turbine abgekühlt bzw. kondensiert werden. Sofern die Wärmeenergie nicht durch die KWK abgeführt wird (vgl. Abschnitt 2.1.1.2), werden die Abgase bzw. der Dampf in einen Kondensator geleitet. Dort findet die Kondensation entweder über eine direkte oder eine indirekte Kühlung statt. Bei der direkten Kühlung (direkte Trockenkühlung) werden Wärmetauschröhre von der Luft umströmt, so dass die Abwärme direkt an die Umgebungsluft abgegeben wird. Der Prozessdampfkreislauf und die Kühlung bilden somit einen Kreislauf. Dagegen ist bei der indirekten Kühlung ein weiterer Wasserkreislauf, der Kühlwasserkreislauf installiert. In diesem wird Wasser als Kühlmedium durch Rohre in den Kondensator geleitet. Der zugeführte Dampf kondensiert außenseitig am Rohr und die latente Wärme des Dampfes wird an das Kühlwasser übertragen (KONSTANTIN 2007, S. 219). Sofern das im Kondensator erwärmte Kühlwasser nicht vollständig aus dem Kühlwasserkreislauf abgeführt wird, muss es in einem Kühlsystem abgekühlt werden.

Die im deutschen Kraftwerkspark installierten Kühlsysteme und -verfahren sind nach Held und Schnell (2000, S. 2f) unterteilt in die Frischwasser- und die Kreislaufkühlung. Zur Frischwasserkühlung zählen die Durch- und Ablauf- (Rücklaufkühlung), während der Kreislaufkühlung die Nass-, direkte und indirekte Trockenkühlung sowie Hybridkühlung zugeordnet sind. Das Kühlwasser wird je nach Standortbedingung dem Grund-, Fluss-, See-, Brack- oder Meerwasser entnommen (HELD & SCHNELL 2000, S. 4). Im Folgenden werden die einzelnen Kühlsysteme beschrieben.

Steht an einem Kraftwerksstandort genügend Kühlwasser in Form von Oberflächenwasser mit Süßwasserqualität (z. B. Flüsse) zur Verfügung, ist die Frischwasserkühlung das einfachste und kostengünstigste Kühlverfahren in Deutschland. Dies begründet die vielen Kraftwerksstandorte entlang deutscher Flüsse (vgl. Abbildung 22) (HELD & SCHNELL 2000, S. 3; WAGNER 2003, S. 3; WASSERWIRTSCHAFTSAMT KRONACH 2010, S. 1).

Bei der Durchlaufkühlung wird das dem Oberflächengewässer (z. B. Fluss bzw. Vorfluter) entnommene und im Kondensator aufgewärmte Kühlwasser direkt rückgeleitet (vgl. Abbildung 3a). In der Vergangenheit wurde die Durchlaufkühlung vor allem in Kondensations- und Kernkraftwerken aufgrund geringer Investitionen und Betriebskosten sowie des hohen erreichbaren thermischen Wirkungsgrads angewandt. Eine Ausnahme bilden die Braunkohlekraftwerke: da standortbedingt nicht ausreichend viel Oberflächengewässer zur Verfügung steht, wird dort Wasser aus dem Tagebau verwendet. Eine eingeschränkte Anwendbarkeit der Durchlaufkühlung ergibt sich zudem aus ökologischen Gesichtspunkten. Durch die direkte Rückleitung wird die gesamte Abwärme dem Oberflächengewässer zugeführt und wirkt sich somit auf dessen Gewässerökologie aus. Deswegen unterliegt die Kühlwassereinleitung in Deutschland wasserrechtlichen Bestimmungen (vgl. Abschnitt 2.1.2) (HELD & SCHNELL 2000, S. 2f). Bei der Ablaufkühlung hingegen ist ein Kühlturm zwischen Kondensator und Kühlwasserrückleitung geschaltet (vgl. Abbildung 3b). Das Kühlwasser

wird hierbei ganz oder teilweise mittels eines sogenannten Nasskühlturms abgekühlt, wobei die Wärmeabgabe an die Atmosphäre hauptsächlich durch Verdunstung geschieht. Die verdunstete Menge Wasser fehlt somit in der Wasserbilanz des Gewässers und liegt im Mittel zwischen 0,01 und 0,02 % der Umlaufwassermenge. Der Rest des abgekühlten Wassers wird danach in das Gewässer geleitet (LAWA 1991, S. 14; HELD & SCHNELL 2000, S. 20).

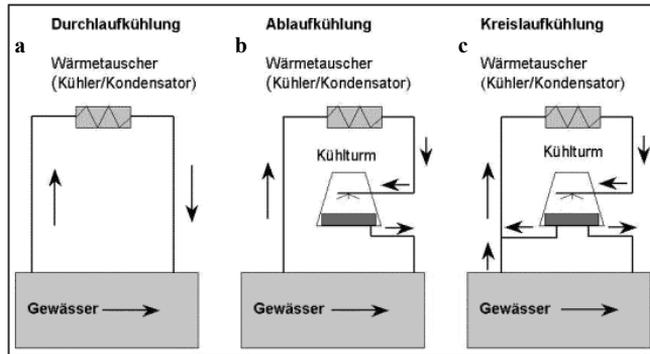


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Durchlauf- (a), Ablauf- (b) und Kreislauf-Nasskühlung (c). Quelle: WWA KC (2010, S. 1).

Eine Kreislaufkühlung kommt an Kraftwerksstandorten zum Einsatz, wenn kein Fluss vorhanden ist, welcher den abzuführenden Wärmestrom aufnehmen kann (HELD & SCHNELL 2000, S. 20). Die Kreislaufkühlung wird unterteilt in die Kreislauf-Nasskühlung, direkte und indirekte Trockenkühlung sowie die Hybridkühlung.

Wie bei der Ablaufkühlung ist bei der Kreislauf-Nasskühlung ein Kühlturm installiert, wobei bis zu 97 % der Abwärme an die Umgebungsluft abgeführt werden kann (LAWA 1991, S. 10). Das abgekühlte Wasser wird dabei nicht dem Oberflächengewässer, sondern größtenteils dem Kühlkreislauf rückgeleitet (vgl. Abbildung 3c). Die Verdunstungsverluste betragen hierbei etwa 2,4 % der Umlaufwassermenge (SAUER 1984, S. 77). Zudem steigt der Primärenergieeinsatz bei Kreislaufkühlung gegenüber der Durchlaufkühlung um ca. 3 bis 5 % bei gleicher elektrischer Leistung (MANIAK 2005, S. 421). Bei der Mischkühlung werden die Kühlsysteme Ablauf- und Kreislaufkühlung kombiniert, sofern dies die Kühlanlage technisch zulässt. Dadurch wird einerseits die Wärmeabgabe in das Oberflächengewässer im Verhältnis zur Durchlaufkühlung und andererseits die Verdunstungsverluste im Verhältnis zur Kreislaufkühlung verringert (LAWA 1991, S. 7).

Sowohl bei der Ablauf-, der Kreislauf-Nasskühlung als auch der Mischkühlung kommen folgende Nasskühlturmtypen zum Einsatz: Naturzugkühlturm, hyperbolischer Kühlturm mit Ventilatorunterstützung und Ventilatorkühltürme. Bei einem Naturzugkühlturm entsteht durch Temperatur- und Druckunterschiede sowie durch die hyperbolische Form ein natürlicher Luftstrom von unten nach oben. Das warme Kühlwasser wird in ca. zwölf Meter Höhe verrieselt, gibt die latente Wärme an die Atmosphäre ab und fließt über Prallteller und Rieseleinbauten nach unten in die Kühlturmtasse. Dort wird es auf die Kühlgrenztemperatur abgekühlt, gesammelt und dem Oberflächengewässer oder dem Kühlkreislauf rückgeleitet. Die nach oben steigende erwärmte Luft kondensiert und erzeugt die für Nasskühltürme typischen Dampffahnen. Sind dem Kraftwerksstandort

hinsichtlich der Kühlturmhöhe genehmigungsrechtliche Grenzen gesetzt, können Nasskühltürme mit Ventilatoren ausgestattet werden (Hyperbolischer Kühlturm mit Ventilatorunterstützung und Ventilatorkühltürme). Diese bewirken einen künstlich erzeugten Luftstrom und unterscheiden sich hinsichtlich ihrer geringeren Bauhöhe und einer geringeren Kühlleistung mit abnehmender Größe. Zudem resultiert aus dem Ventilatorbetrieb ein höherer Eigenenergiebedarf des Kraftwerks, wodurch die Nettoleistung abnimmt (vgl. Abschnitt 2.1.1.1) (SAUER 1984, S. 95f). Abbildung 4 zeigt Nasskühlturmtypen mit Bauhöhe und Durchmesser in Meter, wobei die Bauhöhe von Naturzugkühltürmen bis zu 200 m betragen kann.

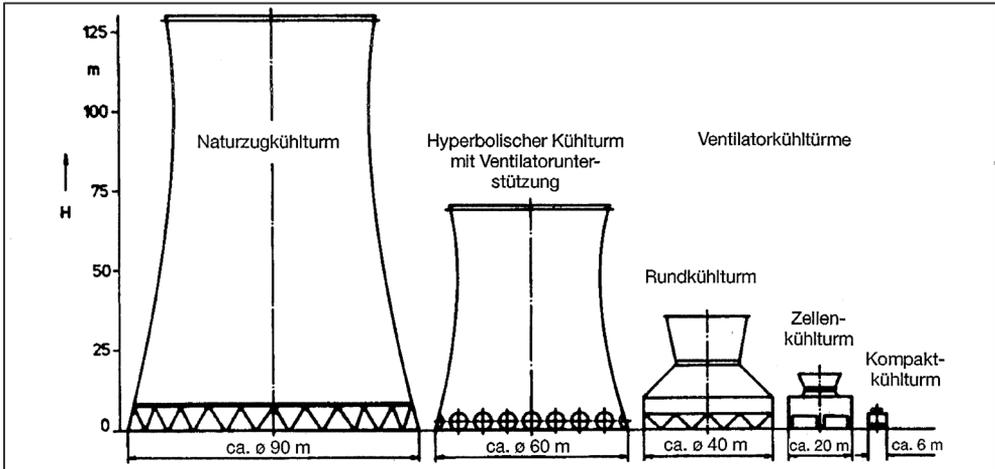


Abbildung 4: Schematische Darstellung verschiedener Nasskühltürme mit Bauhöhe und Durchmesser in Metern. Quelle: HELD & SCHNELL (2000, S. 29).

Sollen Dampfschwaden und der Verdunstungsverlust vermieden werden, kann die Trockenkühlung eingesetzt werden. Die Wärmeübertragung erfolgt in einem geschlossenen Kühlkreislaufsystem an die Umgebungsluft. Diese wird unterschieden in die direkte und indirekte Trockenkühlung. Bei der direkten Kühlung wird der Prozessdampf (die heißen Abgase) mittels Luftkondensatoren gekühlt und als Prozesswasser in die Brennkammer zurückgeführt. Der Prozessdampf wird durch Wärmetauscherrohre geführt, und die Wärme wird durch Konvektion an die Atmosphäre abgegeben. Die maximal theoretisch erreichbare Kühlgrenztemperatur entspricht hierbei der Umgebungstemperatur. Aufgrund hoher Umgebungstemperaturen ist die direkte Trockenkühlung im Sommer nur begrenzt einsetzbar. Zudem ist die Kaltwassertemperatur bzw. die Temperatur des Prozesswassers oder des Gases nach der Turbine höher als bei indirekter Kühlung, bei der die latente Wärme an das Kühlwasser abgegeben wird. Die direkte Trockenkühlung wird häufig bei geringer oder keiner Kühlwasserverfügbarkeit oder bei zeitlich begrenztem Kraftwerkeinsatz sowie relativ geringer Kraftwerksleistung wie bei thermischen Spitzenlastkraftwerken (Gas- und Ölturbinenkraftwerke) eingesetzt (HELD & SCHNELL 2000, S. 32, 39; ZAHORANSKY 2007, S. 111, 125). Bei der indirekten Trockenkühlung ist wie bei der Frischwasser- und Kreislauf-Nasskühlung ein Kühlwasserkreislauf installiert. Der Unterschied besteht darin, dass das Kühlwasser in einem Rohrsystem durch einen Kühlturm geleitet wird. Dabei erfolgt die Wärmeabgabe des Kühlwassers an die Atmosphäre durch Konvektion und nicht durch Verdunstung

oder direkt an ein Oberflächengewässer (vgl. Abbildung 5). Naturzug-Trockenkühltürme finden hierbei ebenso Verwendung wie Ventilatorunterstützte Trockenkühltürme. Theoretisch ist die Abkühlung des Kühlwassers bis zur Umgebungstemperatur möglich. Der fehlende Abkühlungseffekt durch den Verdunstungsprozess hat jedoch zur Folge, dass das Kühlwasser weniger tief als bei einer Nasskühlung abgekühlt werden kann. Allerdings wird auf diese Weise eine Dampfschwadenbildung vermieden.

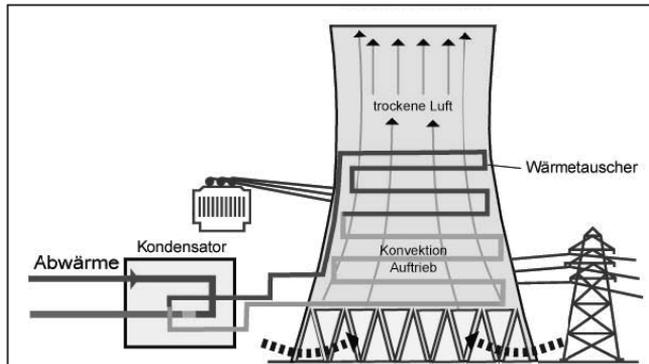


Abbildung 5: Prinzip der indirekten Trockenkühlung mittels Naturzugkühlturm. Quelle: LANGE (2009, S. 6).

Mit der Hybridkühlung werden Nass- und Trockenkühlssysteme kombiniert und somit jeweils deren Vorteile ausgenutzt und Nachteile verringert (vgl. Abbildung 6). Vorteil der Nasskühlung ist beispielsweise im Vergleich zur Trockenkühlung die geringere theoretisch erreichbare Kühlgrenztemperatur. Ein Nachteil besteht jedoch in der aus der Verdunstung resultierenden Kondensation der mit Feuchtigkeit angereicherten Luft bei Austritt aus dem Kühlturm und die damit einhergehende Dampfschwadenbildung. Letzteres wird mit der indirekten Trockenkühlung vermieden. In einem Hybridkühlturm sind beide Verfahren kombiniert und können je nach Bedarf und technischer Auslegung gesondert oder gemeinsam gefahren werden. In kombiniertem Betrieb wird beispielsweise die feuchte Luft der Nasskühlung mit der relativ trockenen Abluft der Trockenkühlung vermischt, wodurch die Kondensation und Dampfschwadenbildung bei Austritt aus dem Kühlturm verringert wird. Eine weitere Möglichkeit besteht in einem überlagerten Betrieb. So kann bei niedrigen Umgebungstemperaturen die Trockenkühlung der geeignete Betrieb sein. Bei steigender Umgebungstemperatur kann die Nasskühlung zugeschaltet werden. Allerdings ist das Hybridkühlverfahren regel- und messtechnisch sehr aufwändig, da unterschiedliche klimatische Verhältnisse berücksichtigt werden müssen, um die Dampfschwadenbildung zu verhindern und gleichzeitig eine möglichst große Abkühlung zu erreichen. Hinzu kommt, dass Hybridkühltürme hohe Betriebskosten verursachen und höhere Investitionen benötigen. Generell können Hybridkühltürme sowohl als Hybrid-Naturzug- oder als ventilatorbetriebene Hybridkühltürme gebaut werden (HELD & SCHNELL 2000, S. 35).

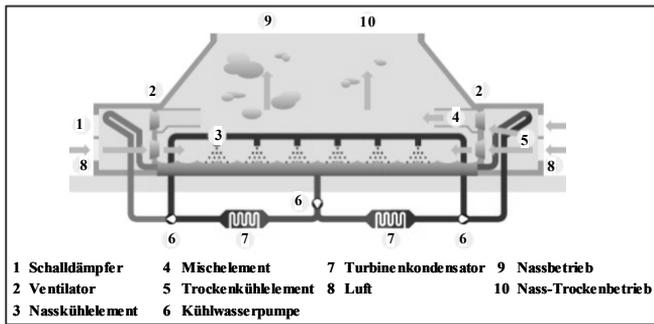


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Hybriddrückkühlturms.  
 Quelle: AXPO (2010, S. 1).

Zusammenfassend werden in Tabelle 3 die Kennwerte der oben beschriebenen Kühlsysteme bzw. -verfahren unter anderem bezüglich des Wasserbedarfs gegenübergestellt. Die Spannweite der angegebenen Werte resultiert vor allem aus dem Vergleich installierter Kühlsysteme an Kondensations- oder an Kernkraftwerken.

Tabelle 3: Kennwerte der Kühlsysteme. Angegebene Werte pro 1.000 MW<sub>el</sub> Bruttoleistung.  
 Zusammenstellung nach LAWA (1991, S. 10, 16), WWA KC (2010, S. 1) und WAGNER (2003, S. 3).

Kennwerte	Frischwasser- serkühlung - Durchlaufkühlung	Frischwasser- kühlung - Ablaufkühlung	Kreislauf- Nass- kühlung	Kreislauf- Trocken- kühlung	direkte Trocken- kühlung
Aufwärmspanne am Kondensator $\Delta T$ in K	10-15	10-15	13-15	0	0
Wasserentnahme/Zusatzwasser in m <sup>3</sup> /s	19-50	19-50	0,6-5,61	nur zur Füllung des Systems	0
Kühlwasseraufwärmung $\Delta T$ in K	10-15	2-3 (Sommer) 8-12 (Winter)	~ 35 (max. Abflut- temperatur)	0	0
Rückleitung/Abflutung in m <sup>3</sup> /s	19-50	18,9-44,8	0,2-5,1	0	0
Wärmeeintrag ins Gewässer (in die Atmosphäre) in %	100 (0)	20-90 (10-80)	3-10 (90-97)	0 (100)	0 (100)
Wärmeeintrag ins Gewässer in MW	1200-1900	240-1520	10-376	0	0
Verdunstung im Kraftwerk in m <sup>3</sup> /s	0	0,08-0,52	0,33-0,63	0	0
Verdunstung im Gewässer in m <sup>3</sup> /s	~ 0,25-0,4	~ 0,05-0,31	~ 0,01-0,08	0	0

Aus Tabelle 3 wird ersichtlich, dass die Wärmebelastung der Oberflächengewässer bei der Durchlaufkühlung am höchsten und bei der Trockenkühlung am geringsten ist. Da bei der Trockenkühlung die gesamte Abwärme des Prozessdampfes bzw. des Kühlwassers direkt oder indirekt an die Atmosphäre abgegeben wird, findet hier kein Wärmeeintrag ins Oberflächengewässer statt. Allerdings erreichen bei der Trockenkühlung die Kaltwassertemperaturen relativ zum Nasskühlverfahren hohe Werte, so dass die direkte und indirekte Trockenkühlung einen geringeren thermischen Wirkungsgrad zur Folge haben und im Sommer aufgrund hoher Umgebungstemperaturen nur eingeschränkt zur Verfügung stehen.

Da Wasser als Wärmeträger eine höhere Wärmeaufnahmekapazität als Luft besitzt und dadurch der thermische Wirkungsgrad steigt, wird es in Dampf- und Kernkraftwerken mit einer thermischen Leistung größer  $900 \text{ MW}_{\text{th}}$ , meist aber auch in Kraftwerken mit geringerer thermischer Leistung als Kühlmedium verwendet (EUROPEAN COMMISSION 2000, S. V; HELD & SCHNELL 2000, S. 1). Allerdings sind Trockenkühltürme aufgrund des großen Platzbedarfs der Wärmetauscher nur bis zu einer Bruttoleistung von etwa  $300 \text{ MW}_{\text{el}}$  anwendbar (KALIDE 2005, S. 405). Für den Kraftwerksbetreiber gelten bei der Wahl des Kühlsystems nicht nur technologische und Leistungskriterien, sondern auch Standortfaktoren wie geografische Lage und Flussnähe. Liegt ein Kraftwerk beispielsweise in einem Siedlungsgebiet, kann es erforderlich sein, Hybridkühltürme zur Reduzierung von Dampfschwaden zu bauen. Des Weiteren sind die Betreiber durch administrative Vorgaben bei der Wahl des Kühlsystems eingeschränkt. Zuständige Behörden in Deutschland genehmigen an neu geplanten Kraftwerksstandorten oder an neuen -blöcken kaum noch die Durchlaufkühlung aus Gründen des Gewässerschutzes. So wird beispielsweise am neuen Block 8 des Rheinhafen-Dampfkraftwerks (RDK) in Karlsruhe neben einer Durchlaufkühlung ein ventilatorbetriebener Nasskühlturm für eine Ablaufkühlung installiert. Diese soll zukünftig zumindest bei hohen Wassertemperaturen zum Einsatz kommen (HELD & SCHNELL 2000, S. 21; AG.L.N. & PCU 2007, S. 97). Die Auswirkungen der Kühlwasserentnahme und -einleitung auf die Gewässerökologie sowie die damit verbundenen wasserrechtlichen Auflagen in Abhängigkeit der Kühlsysteme werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 2.1.2 Einfluss der Kühlwassernutzung auf die Gewässerökologie und gesetzliche Rahmenbedingung der Kühlwassernutzung

Die Nutzung von Oberflächengewässern zu Kühlzwecken beeinflusst die WT, den Sauerstoffhaushalt, den biologischen und chemischen Zustand, die Wasserverluste der Gewässer sowie die Nebelbildung und weitere Wasserbenutzer. Im Folgenden wird ausschließlich die Abwärmeverteilung des eingeleiteten Kühlwassers in Flüsse sowie deren Auswirkung auf den chemischen und biologischen Zustand der Gewässer beschrieben (vgl. Abschnitt 2.1.2.1). Weder in diesem noch in folgenden Abschnitten wird auf den Verdunstungsverlust bei Ablauf- und Kreislaufkühlung und dessen Einfluss auf den Abfluss, die Gewässerökologie sowie auf die damit verbundenen wasserrechtlichen Grenzwerte eingegangen. Ebenso findet die Auswirkung der Kühlwassernutzung auf die Nebelbildung und auf weitere Wassernutzer wie beispielsweise die Fischzucht keine Beachtung. Informationen hierzu finden sich in LAWA (1991, S. 63ff). Grund hierfür ist, dass der Fokus dieser Arbeit auf der Untersuchung der rezenten und zukünftigen WT-Entwicklung und möglicher WT-LE bei KTKW aufgrund hoher WT liegt. Unter anderem führten Auswirkungen der Wärmeeinleitung auf die Gewässerökologie zu wasserrechtlichen Rahmenbedingungen und Grenzwerten der Kühlwassernutzung auf europäischer und nationaler Ebene (vgl. Abschnitt 2.1.2.2).

### 2.1.2.1 Auswirkungen von Kühlwassereinleitungen auf die Gewässerökologie

In diesem Abschnitt wird zu Beginn die Kühlwasserverteilung in einem Gewässer beschrieben. Wie sich die Kühlwassereinleitung auf chemische und biologische Zustände des Gewässers auswirkt, wird im zweiten Teil dargestellt.

Kühlwasser aus den in Abschnitt 2.1.1.3 beschriebenen Durchlauf-, Ablauf und zu geringem Teil aus der Kreislauf-Nasskühlung wird über Auslassbauwerke in den Fluss geleitet und auf den gesamten Abfluss verteilt. Dies geschieht durch Wärmeleitung, Konvektion und Vermischung. Die Zeitspanne und der Fließweg, nach dem sich ein Temperaturengleich bzw. eine völlige Durchmischung einstellt, ist einerseits abhängig von der Konstruktion der Einleitbauwerke und andererseits von Tiefe und Breite des Vorfluters, seiner Fließgeschwindigkeit, Turbulenz und Fließrichtung (ZIMMERMANN & GELDNER 1978a, S. 151f; LAWA 1991, S. 43).

Nach der Kühlwassereinleitung ist eine ausgeprägte Temperaturschichtung im Gewässer vorzufinden, bei der sich an der Oberfläche eine Warmwasserfahne, eine Zone mit um mindestens ein Kelvin (K) erhöhter Temperatur bildet. Wegen der geringeren Dichte des wärmeren Kühlwassers bleibt dieses nahe der Oberfläche, während sich darunter vom Kühlwasser unbeeinflusste Schichten finden. Bei großen, breiten Flüssen mit im Vergleich zum Abfluss geringen Kühlwassermengen bildet sich am Einleitungsufer eine Warmwasserfahne, die oft viele Kilometer weit nachweisbar ist (ZIMMERMANN & GELDNER 1978b, S. 177; LAWA 1991, S. 43f; HELD & SCHNELL 2000, S. 573f; MANIAK 2005, S. 423).

Ein weiterer auf die Abwärmeverteilung wirkender Faktor ist die Restaufwärmung. Dies ist die durch flussaufwärts gelegene Wärmeeinleiter verursachte Vorbelastung der Wärmeaufnahmefähigkeit der Gewässer. Grundsätzlich darf nur so viel Kühlwasser eingeleitet werden, dass sich das Gewässer bis zum nächsten Einleiter wieder auf die natürliche Temperatur abkühlt. Die Abkühlung von Flüssen wird dabei rechnerisch ermittelt (LAWA 1991, S. 43ff; HELD & SCHNELL 2000, S. 573f; MANIAK 2005, S. 430f).

Die Kühlwassereinleitungen in Flüsse haben aufgrund ihrer hohen Temperaturen Auswirkungen auf die chemische und biologische Zusammensetzung und dabei vor allem auf den Sauerstoffgehalt und die Gewässerfauna. Der Sauerstoffgehalt eines Gewässers ergibt sich aus der Summe der Sauerstoff verbrauchenden (z. B. Atmung der Organismen) und liefernden Prozesse (z. B. Photosynthese) sowie den Austauschvorgängen mit der Atmosphäre. Je nach Gewässertyp, -güte und -ausbau schwankt der Sauerstoffgehalt tages- und jahreszeitlich und hängt vom Abfluss, von meteorologischen Bedingungen sowie Abwassereinleitungen ab (LAWA 1991, S. 47ff).

Durch eine Wärmeeinleitung wird die Flusstemperatur erhöht und damit der Sauerstoffsättigungswert erniedrigt. Zudem beschleunigt sich der mikrobielle Abbau der organischen Substanzen, was mit einem erhöhten Sauerstoffverbrauch einhergeht (LAWA 1991, S. 51; HELD & SCHNELL 2000, S. 583ff). Da die meiste Zeit des Jahres die Sauerstoffwerte jedoch unter der Sättigungsgrenze liegen, wirkt sich eine niedrigere Sauerstoffsättigungsgrenze durch Temperaturerhöhung meist nicht negativ aus. Wird das Kühlwasser in einem Kühlturm abgekühlt, findet durch die Verrieselung zusätzlich eine Sauerstoffaufnahme des Wassers bis nahe an die Sättigungsgrenze statt. Somit oder mit eigens dafür installierten Belüftungsanlagen bei der

Durchlaufkühlung kann der Sauerstoffgehalt des Gewässers sogar erhöht werden (LAWA 1991, S. 37f).

Beschleunigte Abbauprozesse organischer Substanzen aufgrund höherer Temperaturen führen jedoch zu einem höheren Sauerstoffverbrauch. Der Wärmeeintrag ist aus diesem Grund in Verbindung mit dem Eintrag organischer Stoffe und Stickstoffverbindungen zu betrachten. Diese führen in hoher Konzentration bei zusätzlichem Wärmeeintrag zu Sauerstoffdefiziten. Sie treten bei zusätzlichem Wärmeeintrag vor allem im Sommer auf, da diese die aktivste und somit Sauerstoff intensivste Zeit der Organismen ist, und zusätzlich natürlich bedingt, die höchsten Gewässertemperaturen im Jahresgang auftreten (vgl. Abschnitt 2.2.1). Allerdings können die Sauerstoffdefizite wie oben beschrieben durch künstliche Belüftung bei Kühlwasserrückleitung ausgeglichen werden (LAWA 1991, S. 57; HELD & SCHNELL 2000, S. 583ff; MANIAK 2005, S. 425).

Fische sind poikilotherm<sup>2</sup>, d. h. mit steigenden Temperaturen laufen die meisten chemischen Reaktionen im Körper schneller ab, was einen höheren Sauerstoffbedarf zur Folge hat. Die WT beeinflusst alle biochemischen und physiologischen Aktivitäten wie beispielsweise die Nahrungsaufnahme, Reife, Krankheitsabwehr, Vermehrung und Hormonbildung, Laichzeit und -intensität oder das Wachstum. Zudem ändern sich die Ansprüche an die WT mit fortschreitender Entwicklung des Fisches. Das Eistadium weist z. B. einen wesentlich kleineren Temperaturtoleranzbereich auf als das adulte Stadium<sup>3</sup>. Indirekt wirken sich WT über Stoffhaushalt, Pflanzen- und Planktonentwicklung, Mineralisation sowie das Nahrungsangebot auf die Lebensvorgänge der Fische aus (LAWA 1991, S. 52f; KÜTTEL et al. 2002, S. 3f). Jede Fischart hat einen bestimmten Temperaturtoleranzbereich, der anderen Arten wiederum schaden kann. Die Vorzugstemperatur ist dabei die Temperatur, in der sich eine Fischart normalerweise aufhält. Als maximale Letaltemperatur einer Fischart ist die Temperatur definiert, bei der mindestens die Hälfte dieser Fischart verendet. Die maximale Letaltemperatur der einzelnen Fischarten ist wiederum abhängig von der Temperatur, auf die sich eine Fischart bereits angepasst hat (Adaption). Je nach Art liegen die Vorzugstemperatur der Fische in deutschen Flüssen zwischen 8 und 28 °C und die maximale Letaltemperatur je nach Adaption zwischen 26 und 37 °C (LAWA 1991, S. 54f). Kurzzeitig sind Fische zwar fähig, sich zumindest teilweise und für kurze Zeit an höhere Temperaturen anzupassen oder ungünstigen Temperaturen auszuweichen (LAWA 1991, S. 53; KÜTTEL et al. 2002, S. 4; KOOP et al. 2007, S. 207). Aber beim plötzlichen Auftreten größerer Temperaturunterschiede wie bei Kühlwassereinleitungen verfallen Fische häufig in eine Wärmestarre. Denn eine so kurzfristige Anpassung an höhere Temperaturen ist ihnen nicht möglich (LAWA 1991, S. 54; HELD & SCHNELL 2000, S. 589).

Neben der Fischfauna werden ebenso Mikro- und Makroorganismen durch Temperaturänderungen beeinflusst. Je nach Gewässerbeschaffenheit, betrachteter Art und deren Vorzugstemperatur nimmt die Artenzahl zu oder ab. In Warmwasserbereichen wie in der Nähe von Kühlwasserauslassbauwerken siedeln sich zum Beispiel verstärkt thermotolerante Arten wie die subtropische Schnecke *Melanoides tuberculata* an (LAWA 1991, S. 56f). Sowohl für die Fischfauna als auch für Mikro- und Makroorganismen ist ein weiterer entscheidender Faktor für die Anpassungsfähigkeit, ob Kühlwasser kontinuierlich (Grundlast/Mittellast) oder diskontinuierlich

---

<sup>2</sup> wechselwarm

<sup>3</sup> Erwachsenenstadium

(Mittellast/Spitzenlast) rückgeleitet wird. Wassertemperaturschwankungen resultieren für die gesamte Gewässerfauna in Dauerstress (LAWA 1991, S. 56).

Der Einfluss hoher WT und damit der Einfluss von Kühlwassereinleitungen auf die chemische und biologische Zusammensetzung eines Flusses führten zu gesetzlichen Rahmenbedingungen zum Schutz der Gewässer in Europa. Diese sowie gesetzlich festgelegte Grenzwerte der Kühlwassernutzung für deutsche Oberflächengewässer werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 2.1.2.2 Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie und Grenzwerte der Kühlwasserentnahme und -einleitung für Wassertemperaturen in Deutschland

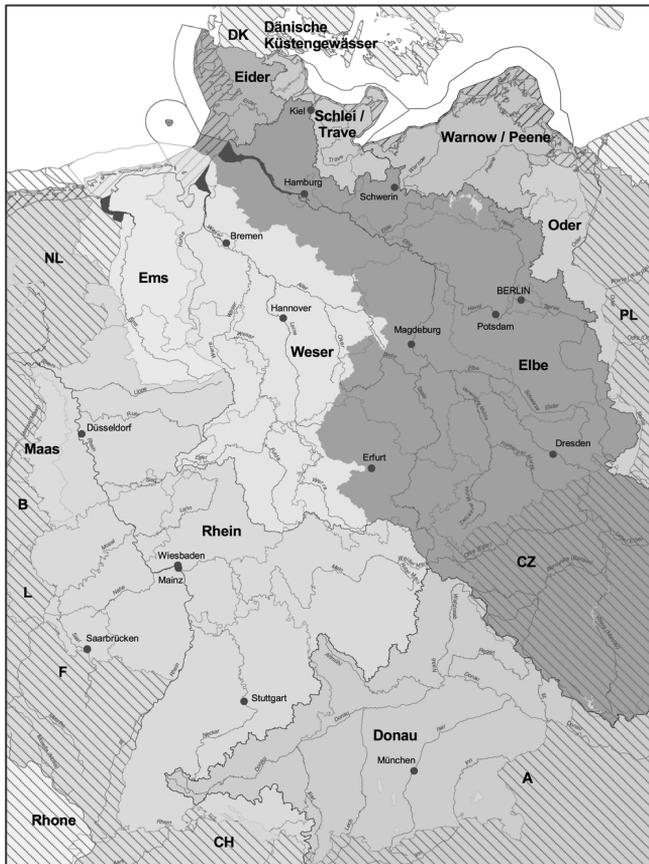


Abbildung 7: Flussgebietseinheiten in Deutschland nach der WRRL 2000/60/EG. Gestrichelte Flächen stellen internationale Gebiete der Flussgebietseinheiten dar. Quelle: UBA (2004, S. 1).

Um einen flächendeckenden Gewässerschutz in europäischen Flussgebieten zu erreichen, verabschiedete das Europäische Parlament im Jahr 2000 die „Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik“, die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000/60/EG). Dabei soll die Planung, Verwaltung und Bewirtschaftung auf der Ebene geographischer und hydrologischer und nicht politisch definierter Flussgebietseinheiten stattfinden (EP & RAT DER EU 2000, S. 9). In Deutschland wurde die Richtlinie mit der Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) 2002 in Bundesrecht und durch Novellierung der Landeswassergesetze bis Ende 2003 in Landesrecht umgesetzt (BREUER 2007, S. 503).

Wie in Abbildung 7 zu sehen wurden in Deutschland zehn, davon sechs internationale, Flussgebietseinheiten ausgewiesen (BMU & UBA 2004, S. 7). Mit der WRRL und der Umsetzung in Bundes- und Landesrecht soll ein guter Zustand des Grundwassers und der Oberflächengewässer erreicht bzw. erhalten, und eine Verschlechterung des Gewässerzustandes verhindert werden (EP & RAT DER EU 2000, S. 4f).

Bereits vor der Umsetzung der WRRL in Bundes- und Landesrecht, wurde 1969 durch die Länderarbeitsgemeinschaft (LAWA) die Arbeitsgruppe Wärmebelastung der Gewässer gegründet. Diese erarbeitete Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastung von Gewässern durch industrielle Wassernutzung. Im Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes bzw. WHG sind die genehmigungspflichtigen Entnahmen von Wasser zur industriellen Nutzung und die Einleitung von Abwasser geregelt (HELD & SCHNELL 2000, S. 558). Die daraus resultierenden Grenzwerte für ein Kraftwerk sind je nach Größe und Typ des Flusses und den spezifischen Standortbedingungen in wasserrechtlichen Bescheiden (Betriebshandbüchern) festgelegt (LAWA 1991, S. 94).

Tabelle 4: Mitteleuropäische Gewässertypen mit Jahresmittel der WT, Lage und festgelegte Grenzwerte der Gewässeraufwärmspanne und maximalen Mischtemperatur nach Kühlwassereinleitung. Zusammenstellung nach LAWA (1991, S. 40ff, 93) und SAUER (1984, S. 69).

Gewässertyp	WT-Mittel in °C	Lage	max. Aufwärmspanne vor und nach Einleitung in K	max. Mischtemperatur nach Einleitung in °C
ständig kühler (Salmoniden) Fluss	5-10 (natürlich, relativ geringe Temperaturschwankungen)	Gebirgslagen Alpen, Gletscherabflüsse	1,5	18-21,5
sommerkühler Fluss	bis 20 (natürlich)	Gebirgslagen, Gebirgsrandlagen und Mittelgebirge	3	25
sommerwarmer (Cypri- nidengewässer) Fluss	bis 25 (natürlich)	alle großen Flüsse im Flachland	3-5	28

In Mitteleuropa sind Flüsse in ständig kühle, sommerkalte und sommerwarme Gewässer eingeteilt (vgl. Tabelle 4). In Abhängigkeit dieser Gewässertypen wurden Grenzwerte für die Aufwärmspanne

der Gewässertemperatur vor Entnahme und nach Einleitung und die rechnerisch ermittelte maximale Mischtemperatur nach Einleitung bestimmt. Eine Übersicht der Gewässertypen mit charakteristischer Jahresmitteltemperatur und Lage sowie der zugehörigen Grenzwerte findet sich in Tabelle 4 (LAWA 1991, S. 42).

In den langsamer fließenden sommerwarmen Flüssen im Flachland und in aufgestauten Flüssen verändert sich die Biozönose<sup>4</sup> von reophilen<sup>5</sup> zu limnophilen<sup>6</sup> Organismen. In den schneller fließenden sommerkühlen Gewässern der Gebirgs(rand)- und Mittelgebirgslagen leben reophile Organismen. Diese reagieren auf Wärmeeinleitungen empfindlicher als limnophile Organismen. Letztere weisen eine höhere Temperaturtoleranz auf, weswegen eine kurzzeitige Überschreitung der Aufwärmspanne von über 3 auf bis zu 5 K nicht unbedingt zu nachteiligen Veränderungen führt und in Ausnahmefällen zeitlich begrenzt erlaubt sein kann. Für die in Abschnitt 2.1.1.3 beschriebenen Kühlsysteme legte die LAWA zusätzlich Grenzwerte der Kühlwassereinleittemperatur sowie der Aufwärmspanne des Kühlwassers vor und nach dem Kondensator fest (vgl. Tabelle 5) (LAWA 1991, S. 42f, 93f).

Tabelle 5: Grenzwerte der maximalen Kühlwassereinleittemperatur und maximalen Aufwärmspanne des Kühlwassers vor und nach dem Kondensator in Abhängigkeit des Kühlsystems. Zusammenstellung nach LAWA (1991, S. 93f) und MANIAK (2005, S. 423).

Kühlsystem	max. Einleittemperatur des Kühlwassers in den Vorfluter in °C	max. Aufwärmspanne des Kühlwassers vor und nach dem Kondensator in K
Durchlaufkühlung	30 (bis 33 in Ausnahmefällen)	10-15
Ablaufkühlung	33	10-15
Kreislaufkühlung	35	15

Somit üben Gewässertemperaturen als hydrologische Größe aufgrund wasserrechtlicher Bestimmungen Einfluss auf den Kraftwerksbetrieb aus. Erreichen die Flusstemperaturen natürlich bedingt die in Tabelle 4 dargestellten Grenzwerte, bzw. werden die Grenzwerte nach Rückleitung des Kühlwassers erreicht, sind die Kraftwerke zur Leistungsreduktion bis hin zum Abschalten der Blöcke gezwungen. Die WT werden wiederum einerseits von natürlichen wie auch anthropogenen Faktoren beeinflusst. Diese und die rezente und zukünftige Entwicklung der LT in Deutschland werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

---

<sup>4</sup> eine Gemeinschaft von Organismen verschiedener Arten

<sup>5</sup> in fließendem bzw. strömendem Gewässer lebende Organismen

<sup>6</sup> in stillem bzw. nicht oder kaum fließendem Gewässer lebende Organismen

## 2.2 Natürliche und anthropogene Einflussgrößen auf die Wassertemperaturen von Flüssen und die Entwicklung der Lufttemperaturen in Deutschland

Die WT ist ein Maß für die Konzentration der Wärmeenergie im Wasser. Wird einem gegebenen Wasservolumen beispielsweise Wärme hinzugeführt, steigt die Temperatur, wird diesem Wärmeenergie entzogen, sinkt sie (WEBB 1996, S. 206; POOLE et al. 2001, S. 2). Neben der bereits in Abschnitt 2.1.2.1 beschriebenen Wärmeeinleitung durch KTKW wird die WT erstens durch natürliche (vgl. Abschnitt 2.2.1) und zweitens durch anthropogene Einflussgrößen (vgl. Abschnitt 2.2.2) bestimmt. Im Abschnitt 2.2.3 werden die rezenten und zukünftigen Entwicklungen der LT in Deutschland dargestellt, da die LT den größten Einfluss auf die WT mitteleuropäischer Flüsse ausüben.

### 2.2.1 Natürliche Einflussgrößen auf das Wassertemperaturregime von Flüssen

WT von Flüssen variieren über die Zeit und die Fließstrecke und werden dabei von natürlichen Größen beeinflusst. Da eine einzelne Temperatur nicht die des gesamten Flusses wiedergibt, wird der Begriff WT-Regime verwendet. Dieses beinhaltet die Höhe der Temperatur, die Frequenz, mit welcher eine Temperatur auftritt, deren Dauer über oder unter einer bestimmten Temperatur und die Änderungsrate der Temperatur. Das natürliche Temperaturregime eines Flusses wird nach WARD (1985, S. 32) durch die Hydrologie, das Klima und die Sonneneinstrahlung bestimmt. Diese und deren Einflussgrößen sind in Abbildung 8 dargestellt.

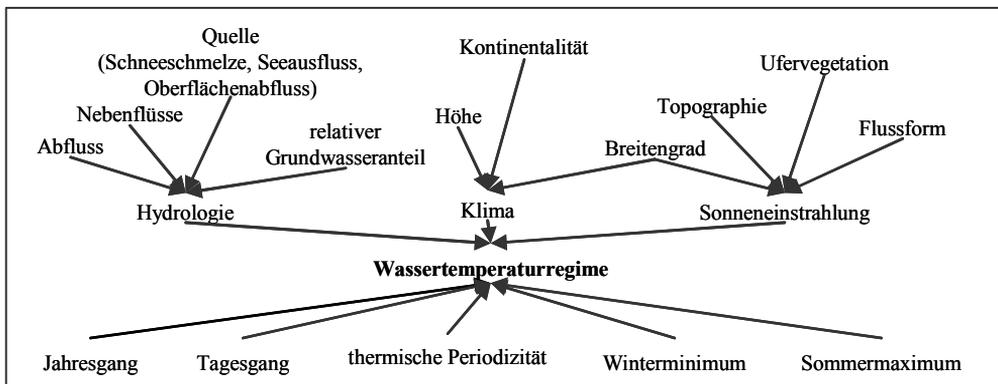


Abbildung 8: Natürliche Einflussgrößen auf das WT-Regime eines Flusses. Darstellung nach WARD (1985, S. 32).

In einer Formel des Energie- bzw. Wärmebudgets eines Flusses können die natürlichen Einflussgrößen folgendermaßen zusammengefasst werden

$$Q_n = \pm Q_r \pm Q_e \pm Q_h \pm Q_{hb} \pm Q_{fc} \pm Q_a \quad \text{Gl. 2}$$

Dabei stellt  $Q_n$  den gesamten Nettowärmeaustausch dar.  $Q_r$  ist die Wärmestromdichte aufgrund der Nettoeinstrahlung,  $Q_e$  die aufgrund der Evaporation und Kondensation,  $Q_h$  die aufgrund des Austausches zwischen Luft und Wasser,  $Q_{hb}$  die aufgrund der Flussbettleitfähigkeit,  $Q_{fc}$  die aufgrund der Reibung sowie  $Q_a$  die Wärmestromdichte aufgrund des advektiven Austauschs durch den Niederschlag, das Grundwasser, die Nebenflüsse und den Abfluss. Das Energiebudget bestimmt die notwendige Energie, mit der das Temperaturregime eines Flusses geändert werden kann. Befindet sich die Flusstemperatur nicht im Gleichgewicht, stellt die Wärmekapazität die Größe dar, wie sensitiv die WT auf eine Änderung der Einflussgrößen der Wärmeenergie reagiert. Die Wärmekapazität hängt wiederum vom Wasservolumen ab (WEBB 1996, S. 206). Die natürlichen Einflussgrößen werden im Folgenden näher erläutert.

Die Basistemperatur eines WT-Regimes wird durch die Quelltemperatur und dabei häufig durch das Grundwasser mit relativ konstanten Temperaturen beeinflusst. Zusätzlich wird die Hydrologie durch den Anteil des Grundwassers bestimmt, welches im Flussverlauf mit relativ konstanter Temperatur zufließt. Nebenflüsse und deren Temperaturregime, die Abflussmenge und -geschwindigkeit stellen weitere Einflussgrößen der Hydrologie dar. Das Abflussregime eines Flusses ist je nach Naturraum glazial, nival, pluvial oder komplex, d. h. beispielsweise pluvio-nival oder nivo-pluvial geprägt. In den großen deutschen Flüssen herrschen die komplexen Abflussregime vor. Der Einfluss der Gletscherschmelze auf den Abfluss deutscher Flüsse ist dabei vernachlässigbar gering. Dies wurde im Rahmen des Projektes GLOWA (Globaler Wandel des Wasserkreislaufs) mithilfe des Modells DANUBIA für das Einzugsgebiet der oberen Donau bis zum Pegel Passau-Achleiten gezeigt. Der Anteil des Gletscherwassers am Gesamtabfluss im Jahresmittel beträgt in der Rofenache am Pegel Vent in Österreich im Jahresmittel 36,9 %. Dieser Anteil sinkt auf 5,4 % bei Wasserburg am Inn und auf 1,6 % am Pegel Passau-Achleiten an der Donau. Wenngleich der Anteil des Gletscherwassers am Gesamtabfluss in den Sommermonaten am Pegel Passau-Achleiten bei 6 bis 7 % liegt, kann dieser Anteil die sommerlichen Niederschlagsdefizite nicht kompensieren (WARD 1985, S. 32; WEBB 1996, S. 206; POOLE & BERMAN 2001, S. 789; WEBER et al. 2009, S. 2, 5, 7, 22).

Klimatische bzw. atmosphärische Bedingungen wie z. B. die LT, der Wind und der Wolkenbedeckungsgrad werden an einem Flusslauf durch die Kontinentalität, die Höhe und den Breitengrad des Flusses bestimmt. Von allen atmosphärischen Größen beeinflusst die LT die WT am stärksten und übt zudem einen Einfluss auf die Grundwassertemperatur aus (WARD 1985, S. 33). Vor allem Gewässer mit geringem Abfluss, einem großen Breiten-/Tiefenverhältnis und geringer Eingangstemperatur, an denen eine relativ hohe Windgeschwindigkeit und eine hohe relative Luftfeuchtigkeit herrschen, reagiert die WT am sensitivsten auf die Veränderungen der LT im Vergleich zu allen anderen natürlichen Einflussgrößen. Sind diese Bedingungen nicht gegeben, liegt eine geringere Sensitivität der WT gegenüber der LT vor (BARTHOLOW 1989, S. 8f; GU & LI 2002, S. 50). Dabei bewegt sich die Grundwassertemperatur ohne geothermischen Einfluss ca. um ein Grad Celsius um das Jahresmittel der regionalen LT. Sofern keine Sonneneinstrahlung und Temperaturpuffer vorhanden sind, beginnt nach Grundwasseraustritt der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und die WT nähert sich mit zunehmender Distanz von der Quelle den LT an. Dieses Regime weist dadurch gegenüber den relativ konstanten Grundwassertemperaturen eine Saisonalität auf. Die LT und der Dampfdruck bestimmen unter anderem die Gleichgewichtstemperatur, bei der kein Nettowärmeaustausch zwischen Fluss und Atmosphäre mehr stattfindet. Da die atmosphärischen Bedingungen einer ständigen Änderung unterliegen, tritt die Gleichgewichtstemperatur sehr selten ein. Flüsse mit geringerem Wasservolumen reagieren stärker auf die Änderung der LT. Dahingegen

puffern größere Wasservolumina kurzfristige Änderungen der LT, weswegen das WT-Regime eines größeren Flusses entsprechend träger reagiert (BARTHOLOW 1989, S. 8f).

Neben der LT beeinflussen weitere atmosphärische Größen wie Bewölkung, Niederschlagsereignisse oder Wind die WT (WARD 1985, S. 32f). Bewölkung führt zu einer geringeren direkten Sonneneinstrahlung und bedingt niedrigere Amplituden der WT im Tagesverlauf. Starkwinde verursachen Turbulenzen des Oberflächengewässers. Somit gelangen wärmere Wasserschichten in tiefere Wasserschichten und kühlere an die Wasseroberfläche. Je nach Ausgangstemperatur des Wasserregimes können durch ein Niederschlagsereignis die WT steigen oder fallen. Sommerliche Regenfälle und Gewitterregen verursachen beispielsweise eine Abkühlung der WT (LAWA 1991, S. 39).

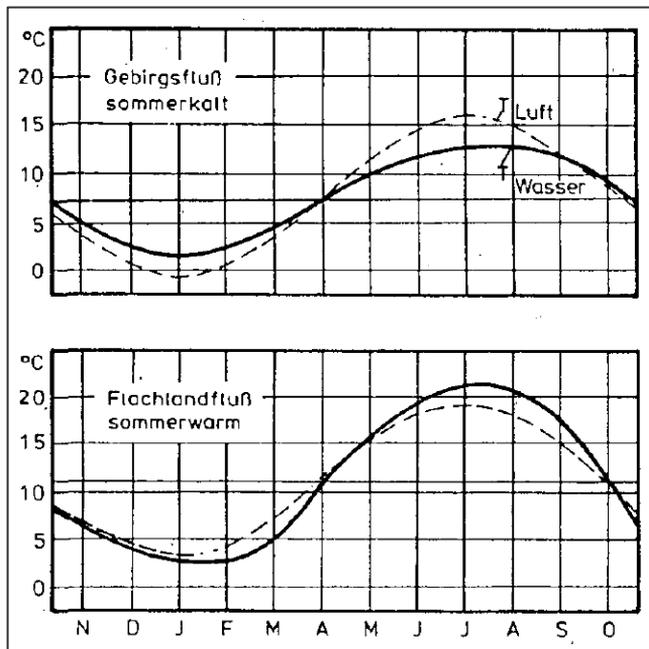


Abbildung 9: Charakteristische Jahresganglinien der WT eines Gebirgsflusses sowie eines Flachlandflusses im Vergleich mit der LT. Quelle: LAWA (1991, S. 39).

Ist ein Fluss der Sonneneinstrahlung stark ausgesetzt, kann der Effekt des Wärmeaustauschs mit der Atmosphäre reduziert oder eliminiert werden (POOLE & BERMAN 2001, S. 790). Die Sonneneinstrahlung wird durch die Topographie, Flussform und Ufervegetation beeinflusst. Der entscheidende Faktor ist dabei die Exposition des Flusses zum Sonnenlicht. So können eine dichte Ufervegetation, Hügel und Gebirgszüge trotz eines niedrigen Breitengrads die Sonneneinstrahlung durch den Schatteneffekt stark reduzieren. Breite und flache Flüsse erreichen bei langsamen Abfluss ohne Beschattungseffekt durch Sonneneinstrahlung höhere Temperaturen als schmälere, tiefere und schneller fließende Oberflächengewässer unter gleichen atmosphärischen Bedingungen (WARD 1985, S. 33; POOLE & BERMAN 2001, S. 790).

Die aufgeführten Einflussgrößen wirken sich in einem komplexen Zusammenspiel auf das WT-Regime eines Flusses aus. Dieses kann mithilfe statistischer Kennwerte wie das Temperaturmittel, -minimum, -maximum und die Standardabweichung sowie dem Jahres- und Tagesgang der WT beschrieben werden (vgl. Abbildung 9) (POOLE et al. 2001, S. 2f). Die jährlichen Maximal- und Minimaltemperaturen schwanken natürlicherweise von Jahr zu Jahr. Der Jahresgang der WT beschreibt eine Cosinuskurve mit einem Minimum im Winter und einem Maximum im Sommer. Während die Amplitude der WT an der Quelle gleich null ist, können an weiter entfernt liegenden Stellen Schwankungen größer 10 K im Jahresverlauf auftreten. Ebenso schwankt die Temperatur im Tagesverlauf natürlich bedingt in Abhängigkeit der beschriebenen Einflussgrößen. In den Breiten Mitteleuropas betragen diese zwischen 6 und 14 K in kleineren und bis zu ca. 3 K in größeren Flüssen. Die WT-Amplitude des Jahresgangs ist hier höher als die des Tagesgangs. Die mittleren LT liegen je nach Gewässertyp im Jahresverlauf unter oder über den mittleren WT. So liegen beispielsweise die mittleren WT sommerwarmer Flüsse im Flachland zwischen Mai und Oktober höher als die mittleren LT (LANGFORD 1983, S. 32; WARD 1985, S. 34; LAWA 1991, S. 39f; MANIAK 2005, S. 419). Abbildung 9 zeigt typische Jahresganglinien sommerwarmer sowie ständig kühler Flüsse.

Während an Gebirgsflüssen das Jahresmittel der LT höher als das der WT liegt, verhält es sich bei mitteleuropäischen sommerkalt- und -warmen Flüssen umgekehrt (LAWA 1991, S. 39). Das WT-Regime charakterisiert durch statistische Kennwerte und durch den Jahres- und Tagesgang wird neben natürlichen Größen zusätzlich durch anthropogen bedingte Einflussgrößen bestimmt. Diese werden im folgenden Abschnitt aufgezeigt.

### 2.2.2 Anthropogen bedingte Einflussgrößen auf das Wassertemperaturregime von Flüssen

Zu den anthropogen bedingten Faktoren, die das Temperaturregime eines Flusses bzw. dessen natürliche Einflussgrößen beeinflussen, zählen:

- die Wasserentnahme und -rückleitung durch Industrie und Kraftwerke zu Kühlzwecken (vgl. Abschnitt 2.1.1.3), durch Kläranlagen sowie durch Landwirtschaft zu Bewässerungszwecken,
- wasserbauliche Maßnahmen zur Elektrizitätserzeugung (Dämme, Wehre, Wasserkraftwerke etc.) und zur Wasserregulierung (Flussbegradigungen, Kanalbauten etc.) sowie
- die Landnutzung (Forstwirtschaft) (WARD 1985, S. 40; WEBB 1996, S. 207; POOLE & BERMAN 2001, S. 793; POOLE et al. 2001, S. 19).

Mit einer Wasserentnahme und somit einer Volumenreduzierung nimmt die Wärmeaufnahmefähigkeit des Oberflächengewässers ab (vgl. Abschnitt 2.2.1). Auch wenn das entnommene Wasser rückgeleitet wird, ist dies häufig nur ein Teil des entnommenen. Zudem unterscheidet sich die Temperatur des rückgeleiteten Wassers meist von der des Oberflächengewässers. Die Wasserentnahme und -rückleitung für Kühlzwecke unterliegt zwar wasserrechtlichen Grenzwerten, dennoch erreicht das rückgeleitete Wasser höhere Temperaturen als das entnommene und führt somit dem Oberflächengewässer zusätzlich Wärmeenergie zu (vgl. Abschnitt 2.1.2). Für den Rhein berechneten Zimmermann und GELDNER (1978) beispielsweise eine Erwärmung im Sommer und Herbst 1970 um bis zu 3 bzw. 2 K durch Kühlwassernutzung der Industrie und Kraftwerke (ZIMMERMANN & GELDNER 1978b zitiert in WEBB 1996, S. 207). Ebenso gelangen Abwasser über Kläranlagen mit höheren Temperaturen in das Oberflächengewässer, wengleich mit geringerem Volumen als bei Kühlwassereinleitung. Inwieweit rückgeleitetes Wasser aus der Landwirtschaft zu Bewässerungszwecken das WT-Regime eines Oberflächengewässers

beeinflusst, ist sehr viel komplexer zu bestimmen. Denn ein Teil des entnommenen Wassers steht durch Evapotranspiration dem Gewässer nicht mehr zur Verfügung. Ein weiterer Teil versickert und fließt wenn überhaupt als Grundwasser und damit mit veränderter Temperatur dem Gewässer zu. Zudem fließt das entnommene Wasser zum Teil über Bewässerungskanäle durch landwirtschaftliche Nutzflächen und wird über diese dem Oberflächengewässer rückgeleitet. Dabei können sich dessen Temperaturen von denen des natürlichen WT-Regimes ebenfalls deutlich unterscheiden (WEBB 1996, S. 206f; POOLE & BERMAN 2001, S. 794f). Um die Grenzen der thermischen Belastbarkeit eines Flusses aufzeigen zu können, werden in Deutschland alle Wärmeemittenten und Mengen der Wärmeinleitung entlang eines Flusses in einem Wärmelastplan zusammengetragen (EP & RAT DER EU 2000, S. 15; MANIAK 2005, S. 432). Für ausgewählte Flüsse werden in Tabelle 6 die Wärmelasten dargestellt.

Tabelle 6: Wärmelasten ausgewählter Flüsse bezogen auf deutsche Streckenabschnitte durch eingeleitete Wärmemengen anthropogener Nutzung. Zusammenstellung nach (ARGE ELBE 1973, Anlage 1; ARGE WESER 1974, S. 17; STMUGV & UVM 2005, S. 63f; FGG WESER 2005c, S. 26; IKSR 2006, S. 3; SCHWARTZ 2009, S. 17f).

Fluss	Streckenabschnitt	Gewässertyp	Jahr	Kühlwassernutzung in MW <sub>th</sub>			
				Gesamt	Industrie	thermisches Kraftwerk	Kläranlagen, Nebenflüsse
Rhein	BRD	Cyprinidengewässer; bis Breisach: Salmonidengewässer	2004	~31.000	~4.200	~21.800	~5.000
Donau	BRD	Cyprinidengewässer	2000	k. A.	~3.475		bis zu 4.670
Weser	Ober- und Mittelweser	Cyprinidengewässer	1974	~2.050			
Weser	Unteres	Cyprinidengewässer	1974	~1.400			
Weser	Tideweser	Cyprinidengewässer	2005	~2.330 <sup>1)</sup>			
Main	BRD	Cyprinidengewässer; Roter und Weißer Main streckenweise Salmonidengewässer	1989	~420			
Main	BRD	Cyprinidengewässer	2004	2.366			
Elbe	Schnackenburg bis Cuxhaven	Cyprinidengewässer	1973	~11.000			
Elbe	Tideelbe	Cyprinidengewässer	2009	~13.400			
Elbe	Tideelbe	Cyprinidengewässer	Prognose 2025	~9.100 <sup>2)</sup>			

<sup>1)</sup> Nach 1974 gingen folgende Kraftwerke an der Weser ans Netz: KKW Unterweser, Grohnde und Emsland  
<sup>2)</sup> Annahme: das HKW Wedel und die KKW Brunsbüttel, Krümmel und Brokdorf gehen wie vorgesehen vom Netz

Wasserbauliche Maßnahmen zur Elektrizitätserzeugung oder Flussregulierung beeinflussen ebenso wie die Wasserentnahme und -rückleitung das WT-Regime eines Flusses. Zu den baulichen Maßnahmen zählen vor allem Dämme, Wasserkraftwerke, Wehre, Flussbegradigungen und Deiche. Inwieweit beispielsweise Dämme, aber auch Wasserkraftwerke und Wehre das flussabwärts gelegene Temperaturregime ändern, hängt von operationellen und limnologischen Faktoren sowie vom Standort der Bauwerke im Längsprofil ab. Entscheidend ist dabei, wie der Abfluss, die Wassertiefe, Retentionszeiten<sup>7</sup> und Temperaturschichtung und der Temperaturgradient verändert werden. Häufig werden durch Dämme die sommerlichen Höchsttemperaturen gesenkt und die winterlichen Minimaltemperaturen erhöht. Ebenso können Schwankungen im Tagesverlauf in den Übergangsjahreszeiten gemindert werden. Typischerweise verzögern sich Temperaturab- und -zunahmen im Jahresverlauf in regulierten Flüssen nach Staudämmen im Vergleich zu natürlichen Flussläufen. So können monatliche Höchsttemperaturen im Herbst und nicht im Sommer auftreten. Zudem verändern Baumaßnahmen zur Flussbegradigung oder zum Hochwasserschutz wie beispielsweise Deiche die Interaktion zwischen Grundwasserfluss, hyporheischem<sup>8</sup> Fluss sowie dem Abfluss des Flusses selbst. Dies führt dazu, dass der Einfluss des Grundwasserflusses mit konstanten Temperaturen abnimmt und atmosphärische Einflussfaktoren eine größere Rolle spielen (WARD 1985, S. 40; WEBB 1996, S. 207; POOLE & BERMAN 2001, S. 795f).

Ein weiterer Faktor, der das WT-Regime eines Flusses beeinflusst, ist die Landnutzung entlang des Flusslaufs. Dabei tragen alle Formen der Landnutzung wie urbane Nutzung, Weideland, Ackerbau oder die Forstwirtschaft zu einem verändertem Sedimentabtrag und Oberflächenabfluss sowie zu einer veränderten Versickerungsrate und damit verändertem Grundwasserfluss bei. Daraus resultiert ein veränderter Oberflächen- und Spitzenabfluss. Gerade vermehrter Sedimenteintrag in das Flussbett verändert dessen Morphologie. Wird ein Flussbett dadurch breiter, verringert sich der Anteil der beschatteten Wasseroberflächen durch angrenzende Vegetation, gleichzeitig nimmt der Einfluss der LT und der Einstrahlung zu (vgl. Abschnitt 2.2.1). Dieser Effekt tritt ebenso auf, wenn flussangrenzende Vegetation z. B. durch Rodung entfernt wird. Ein höherer Anteil direkter Sonnenstrahlung gelangt an das Oberflächengewässer aufgrund des fehlenden Schatteneffekts. Studien über nordamerikanische Gewässer zeigen, dass Temperaturmaxima im Sommer um 2 bis 6 K steigen können, sofern keine ufernahe Vegetation bei der Holzernte stehen gelassen wird. Flächendeckende Abholzungen im Flusseinzugsgebiet haben zudem geringere Versickerungsraten und damit eine geringere Grundwasserbildung und einen geringeren Grundwasserabfluss zur Folge. Ein höherer Anteil des Niederschlags gelangt direkt über den Oberflächenabfluss in den Fluss. Dabei unterscheiden sich die Temperaturen des Oberflächenabflusses von denen des Grundwassers und verändern somit das WT-Regime eines Flusses. Vor allem ein durch Grundwasser beeinflusstes Regime mit relativ konstanten Temperaturen erreicht höhere Temperaturen durch eine Zunahme des Oberflächenabflusses. Dieses wird beispielsweise durch die Luft- und Oberflächentemperatur bestimmt und kann höhere Temperaturen als das Grundwasser erreichen (WARD 1985, S. 41; WEBB 1996, S. 207; POOLE & BERMAN 2001, S. 796).

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, reagiert das WT-Regime von Flüssen in den Breiten Mitteleuropas am sensitivsten auf die LT mit zunehmender Entfernung von der Quelle. Gleichzeitig unterliegt die Wassernutzung thermischer Kraftwerke zu Kühlzwecken wasserrechtlichen Auflagen (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). Erreichen die natürlichen WT des Flusses witterungsbedingt aufgrund hoher

---

<sup>7</sup> mittlere Aufenthaltszeit des Wassers in einem Gewässerabschnitt

<sup>8</sup> Fluss/Austausch zwischen Oberflächen- und Grundwasser

LT gesetzlich festgelegte Grenzwerte, ist die Kraftwerksleistung und somit die Kühlwasserrückleitung zu reduzieren. Im folgenden Abschnitt wird daher die rezente und zukünftige Entwicklung der LT im Kontext des Klimawandels in Deutschland dargestellt.

### 2.2.3 Entwicklung der Lufttemperatur in Deutschland im Kontext des Klimawandels

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert Klima „...als die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem mehr oder weniger großen Gebiet charakterisieren“ (DWD 2010e, S. 1). Statistische Kennzahlen wie Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten etc. wie beispielsweise der LT stellen über einen genügend langen Zeitraum, der Klimanormalperiode (KNP), meist über 30 Jahre, das Klima der betrachteten Region dar (DWD 2010e, S. 1). Als Klimawandel bezeichnet der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimafragen) jede Änderung des Klimas über einen Zeitraum. Dabei unterscheidet er nicht zwischen natürlichen Schwankungen und anthropogener Beeinflussung. Der IPCC wurde 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) gegründet, um die Vereinten Nationen in Klimafragen zu beraten. Seither werden vom IPCC weltweit Erkenntnisse der Forschung zum Klimawandel und dessen Auswirkungen zusammengetragen. Diese erscheinen seit 1990 in regelmäßigen Sachstandsberichten (IPCC 2007, S. 2; RAHMSTORF & SCHELLNHUBER 2007, S. 30).

Seit Bestehen der Erde verändert sich das Klima, und Kalt- und Warmzeiten wechseln sich regelmäßig ab. Während in den Kaltzeiten große Teile der Erdoberfläche eisbedeckt waren, war diese während der Warmzeiten ganz oder nahezu eisfrei. Innerhalb dieser Zeiten änderte sich das Klima jedoch zum Teil abrupt durch natürliche Einflüsse wie beispielsweise durch Vulkanausbrüche oder einem Meteoriteneinschlag. Waren in der Vergangenheit die globalen Klimaänderungen ausschließlich natürlich verursacht, treten seit der Industrialisierung im 19. Jahrhunderts zudem anthropogen beeinflusste Klimaänderungen in globalem Maßstab auf. Nach dem vierten Sachstandsbericht des IPCC sind die Klimaänderungen der letzten Jahrzehnte sehr wahrscheinlich, das heißt mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 90 %, auf die anthropogen bedingten angestiegenen Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre zurückzuführen. Die Änderung der globalen LT sowohl in den vergangenen 150 als auch in den vergangenen 1000 Jahren gegenüber der KNP 1961 bis 1900 ist in Abbildung 10 aufgetragen. Während seit 1850 direkte klimatologische Messwerte vorliegen, wurden für die Ermittlung der Temperaturen in den früheren Jahrhunderten indirekte Klimazeugen wie Eisbohrkerne, schriftliche Aufzeichnungen, Baumringe sowie Sedimente herangezogen (IPCC 2001, S. 3; IPCC 2007, S. 8; PAETH 2007, S. 44; RAHMSTORF & SCHELLNHUBER 2007, S. 9ff). In Abbildung 10 ist ein deutlicher Temperaturanstieg in den vergangenen Jahrzehnten zu sehen.

In den folgenden Abschnitten wird die Entwicklung gemessener LT der vergangenen 100 Jahre in Deutschland dargestellt (vgl. Abschnitt 2.2.3.1). Um außerdem das zukünftige Klima projizieren zu können, definierte der IPCC Szenarien zur künftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen. Diese dienen globalen Klimamodellen als Eingangsdaten (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). In Abschnitt 2.2.3.3 werden die Ergebnisse regionaler Klimamodelle für Deutschland bezüglich der projizierten LT beschrieben.

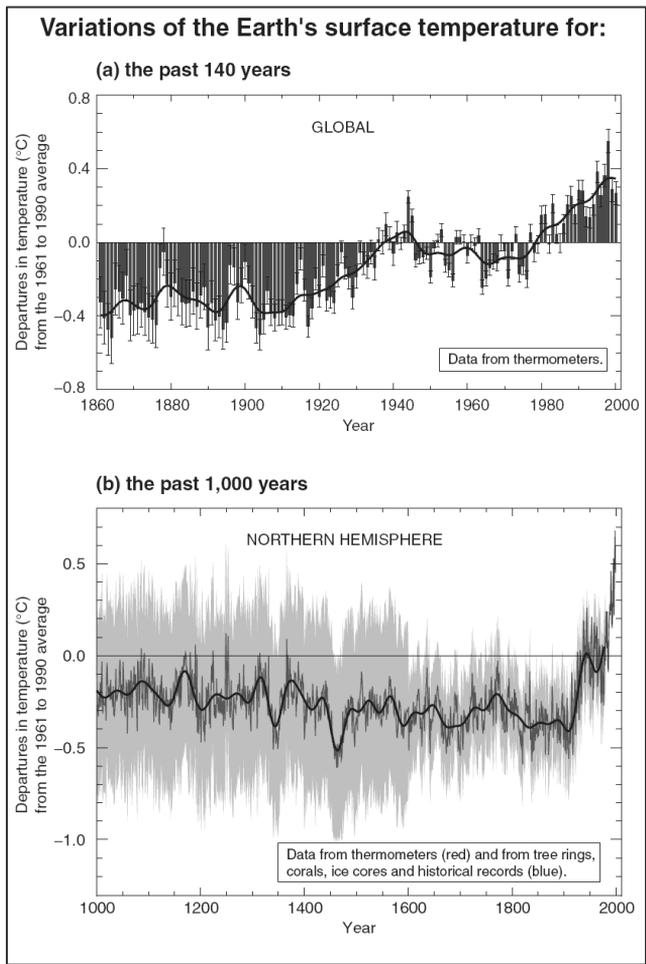


Abbildung 10: Veränderung der LT in den vergangenen 140 und 1000 Jahren. Quelle: IPCC (2001, S. 3).

2.2.3.1 Rezente Lufttemperaturentwicklung seit 1901

Langjährige Messreihen der LT an verschiedenen Orten in Deutschland lassen statistische Aussagen über die Entwicklung und Trends der LT in den letzten Jahrzehnten zu. Die Jahresmitteltemperatur ist im räumlichen Mittel in Deutschland zwischen 1901 und 2000 um 0,8 bis 1 °C gestiegen. Regional sind die Temperaturen vor allem im Süden und Südwesten Deutschlands überdurchschnittlich um mehr als 2 °C gestiegen, während der Nordosten die geringsten Zunahmen mit zum Teil weniger als 0,5 °C aufweist (vgl. Abbildung 11).

Die einzelnen Jahrzehnte im Vergleich zeigen einen Temperaturanstieg bis 1911, gefolgt von wechselhaften Dekaden. Während die 1940er Jahre wieder einen Temperaturanstieg aufwiesen, kühlten die Temperaturen bis Ende der 1970er Jahre ab. Seitdem ist bis heute ein starker und kontinuierlicher Temperaturanstieg zu verzeichnen. Dabei zeigen die Wintermonate einen höheren Temperaturanstieg seit den 1980er Jahren mit ca. 2,3 °C und die Sommermonate einen geringeren mit ca. 0,7 °C. Dahingegen sind im Herbst kaum Änderungen zu sehen. JONAS (2005) untersuchte die Entwicklung der Überschreitungswahrscheinlichkeit extremer Temperaturen an mehreren Messreihen in Deutschland zwischen 1901 bzw. 1951 und 2000. Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Häufigkeit extrem warmer Tage im Sommer, definiert als das obere 10 %-Perzentil. Die Häufigkeit extrem kalter Tage, definiert als das untere 10 %-Perzentil, weist hingegen einen negativen Trend auf (JONAS et al. 2005, S. 91f; ZEBISCH et al. 2005, S. 6; UBA 2006a, S. 3; GERSTENGARBE & WERNER 2007, S. 39f; SCHÖNWIESE 2007, S. 62f). Zwar führt der IPCC den rezenten Klimawandel als sehr wahrscheinlich auf anthropogene Einflussgrößen zurück, doch mit Sicherheit lässt sich dies nicht sagen. Denn theoretisch können ebenso wie in zurückliegenden Jahrhunderten und -tausenden natürliche Einflussgrößen den rezenten Temperaturanstieg bedingen. Um den möglichen Einfluss anthropogener Treibhausgase simulieren und das zukünftige Klima projizieren zu können, wurden globale und regionale Klimamodelle entwickelt (IPCC 2007, S. 8; PAETH 2007, S. 45). Regionale Klimamodelle für Deutschland sowie die Szenarien der Entwicklung künftiger Treibhausgasemissionen werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

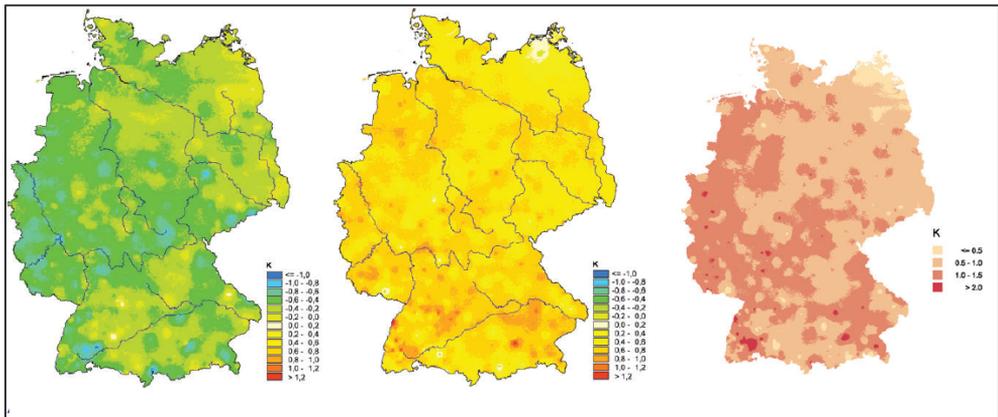


Abbildung 11: Jahresmitteltemperaturen (Abweichung vom Mittel 1901-2000) für Deutschland: a) 1901-2000, b) 1991-2000, c) Differenz b) - a). Quelle: GERSTENGARBE & WERNER (2007, S. 39).

### 2.2.3.2 Regionale Klimamodelle und Emissionsszenarien

Das Erdklima kann mithilfe von Klimamodellen unter Berücksichtigung bekannter Gesetzmäßigkeiten und Rahmenbedingungen sowie bekannter Austauschprozesse der Atmosphäre beispielsweise mit der Bio- und Hydrosphäre simuliert werden. Dadurch können Prozesse verstanden und deren Auswirkungen im Klimasystem quantifiziert werden. So konnte mittels Klimasimulationen nachgewiesen werden, dass der globale Temperaturanstieg seit den 1970er Jahren weder alleine durch

natürliche noch durch anthropogene Einflussgrößen verursacht wird. Erst unter gemeinsamer Berücksichtigung beider Faktoren kann das gemessene Klima reproduziert werden. (STOTT et al. 2000, S. 2134). Die technische Entwicklung der Computer erlaubt es zudem, das Klima mehrerer Jahrhunderte in wenigen Wochen oder Monaten zu simulieren. Klimamodelle können jedoch nicht nur vergangenes Klima reproduzieren, sondern ebenso zukünftiges projizieren. Dabei können insbesondere unterschiedliche Entwicklungen anthropogen bedingter Treibhausgasemissionen angenommen und die jeweiligen Auswirkungen im Klimasystem simuliert werden (PAETH 2007, S. 46).

Das komplexe Klimasystem wird in Klimamodellen vereinfacht in interaktiven Gleichungssystemen dargestellt. Diese werden nur an bestimmten Orten und für bestimmte Zeitpunkte aufgelöst, wodurch je nach räumlicher und zeitlicher Auflösung subskalige Prozesse wie beispielsweise Wolken- oder Niederschlagsbildung vernachlässigt werden. Um diese dennoch zu berücksichtigen, wird deren Einfluss auf die im Gleichungssystem berechneten Klimavariablen statistisch in Abhängigkeit der räumlichen und zeitlichen Auflösung beschrieben. Grundlage dieser sogenannten Parametrisierung sind empirische Parameter, die auf punktuellen Einzelmessungen basieren. Da diese statistischen Beziehungen global nicht gültig sein müssen, stellt die Parametrisierung die größte Modellunsicherheit dar. Allerdings verwenden die Modelliergruppen weltweit unterschiedliche Parametrisierungen. Somit wird im Gesamtergebnis der globalen Klimasimulationen diesen Modellunsicherheiten begegnet. Globale Klimamodelle (Global Climate/Circulation Model, GCM) weisen eine zeitliche Auflösung von etwa drei bis fünf Minuten und eine räumliche von zwischen 100 bis 250 km auf. Erst durch eine höhere räumliche Auflösung regionaler Klimamodelle (Regional Climate Model, RCM) sind Aussagen über die Entwicklung des Klimas in einer Region möglich. Die Verfahren regionaler Klimamodelle werden in dynamische und statistische unterschieden. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) wurden für Deutschland das dynamische „Regionale Klimamodell“ (REMO-UBA, im folgenden REMO) vom Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-MET) sowie das statistisch-dynamische Modell „Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode“ (WETTREG) von der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC Potsdam GmbH) entwickelt (UBA 2006b, S. 3; UBA 2007, S. 2).

Dynamische Verfahren wie das des REMO funktionieren nach demselben physikalisch dynamischen Prinzip wie ein GCM, wobei lediglich ein höher aufgelöster Ausschnitt der Erde betrachtet wird. Die Ergebnisse des GCM European Centre Model Hamburg Version 5 (ECHAM5), bilden die notwendigen Randbedingungen für REMO. Um zu große Skalensprünge zu vermeiden, wurde das REMO in einem Downscaling-Verfahren doppelt genestet. Dabei wurden in einem ersten Schritt die Startwerte des ECHAM5 an das REMO mit einer räumlichen Auflösung von 50 km übergeben. In einem zweiten Schritt stellen diese Ergebnisse die Randbedingungen und Startwerte für das REMO mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 km dar. Physikalische Vorgänge müssen z. T. an das höher aufgelöste Gitter angepasst werden. Ebenso werden soweit verfügbar regionenspezifische höher aufgelöste Informationen z. B. zur Landnutzung oder Topographie verwendet. Räumlich decken die Kacheln des REMO Mitteleuropa und damit ganz Deutschland und Teile angrenzender Staaten ab. Der Kontrolllauf umfasst den Zeitraum 1950-2000, die Simulationen des zukünftigen Klimas 2001-2100 in jeweils stündlicher Auflösung (PRUDENCE 2004, S. 2f,6; AK KLIWA 2006, S. 10f,18f; SPEKAT et al. 2007, S. 4; JACOB et al. 2008, S. 24f; MPI-MET o. J., S. 7).

Bei statistischen Verfahren wird davon ausgegangen, dass zwischen den großräumigen Klimaparametern und den Witterungsgrößen an ausgewählten Standorten statistische Beziehungen bestehen. Diese können für das gegenwärtige Klima aufgrund von Messdaten bestimmt werden. Auf dieser Grundlage werden dann die Ergebnisse des globalen Klimamodells auf höher aufgelöste Gebiete abgebildet. Eine Weiterentwicklung der statistischen Verfahren sind statistisch-dynamische Modelle wie beispielsweise das WETTREG. Hier werden zusätzlich zu den Arbeitsschritten eines statistischen Klimamodells, die von globalen Klimamodellen simulierten Änderungen in der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen berücksichtigt. Als globales Klimamodell diene ebenfalls ECHAM5. Das Klimasignal wird bei diesem Verfahren nicht direkt aus den Szenariorechnungen des globalen Klimamodells bestimmt, sondern mit Hilfe einer Kausalkette von sich ändernden Häufigkeiten der Wetterlagen in den täglichen Realisierungen des Klimamodells (AK KLIWA 2006, S. 10,13,16f; SPEKAT et al. 2007, S. 4; UBA 2007, S. 3).

Unabhängig von verwendeten Verfahren dienen Klimamodelle unter anderem dazu, nicht wie Wettervorhersagen, das Klima möglichst exakt vorherzusagen, sondern das Klima zu projizieren. Dies bedeutet, dass der Einfluss unterschiedlicher Entwicklungen anthropogen bedingter Treibhausgasemissionen auf das Klimasystem quantifiziert wird. Der IPCC identifizierte für den Special Report on Emission Scenarios (SRES) die wichtigsten Antriebskräfte für die Emissionsentwicklung: die Bevölkerungsentwicklung, das Wirtschaftswachstum, die Entwicklung des Pro-Kopf-Einkommens, die technologische Entwicklung besonders in Hinblick auf Energietechnologien, sowie die Landwirtschaft und Landnutzung. Dabei ist Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) das Gas, mit welchem der Mensch den größten Beitrag zum Treibhauseffekt liefert. Die Hauptquellen anthropogener CO<sub>2</sub>-Emissionen sind die Verbrennung fossiler Energieträger, die Nettofreisetzung von CO<sub>2</sub> durch Landnutzungsänderungen und in geringerem Maße industrielle Aktivitäten. Daneben werden im SRES weitere Treibhausgase wie Methan, Lachgas, Stickoxide, Kohlenmonoxid, flüchtige organische Nicht-Methanverbindungen, Schwefeldioxid, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Fluorkohlenwasserstoffe, vollhalogenierter Fluorkohlenwasserstoff, Schwefelhexafluoride und Schwefelemissionen berücksichtigt (NAKICENOVIC et al. 2000, S. 241). Einheitliche Annahmen über die Entwicklung dieser Treibhausgase sind notwendig, um die Ergebnisse der Klimamodelle bezüglich deren Auswirkungen auf das Klimasystem vergleichen zu können. Daher entwickelte der IPCC im Rahmen des SRES vier Emissionsszenarienfamilien für den Zeitraum 1990 bis 2100 mit jeweils einer qualitativen Storyline: A1, A2, B1 und B2 (NAKICENOVIC et al. 2000, S. 3). Diese beinhalten unterschiedliche Annahmen über die Entwicklung der Hauptantriebskräfte der Treibhausgasemissionen (IPCC 2000, S. 4f; NAKICENOVIC et al. 2000, S. 169f). Dabei gehen die A1 und B1 Storylines von einer ökonomisch zusammenrückenden Welt aus, in der soziale und kulturelle Interaktionen in hohem Maß stattfinden. Die A2 und B2 Storylines beschreiben dagegen eine Welt, in der auf regionale Entwicklungen gesetzt wird (NAKICENOVIC et al. 2000, S. 173). Im Folgenden werden die vier Szenariofamilien im Einzelnen dargestellt.

Die A1 Storyline beschreibt eine zukünftige Welt mit einer Zunahme der Bevölkerung bis Mitte des 21. Jahrhunderts und einer Abnahme bis 2100. Sowohl Geburten- als auch Sterblichkeitsrate sind auf niedrigem Niveau. Es findet ein sehr schnelles wirtschaftliches Wachstum statt, mit dem die regionalen Unterschiede im Pro-Kopf-Einkommen beträchtlich abnehmen und neue, effizientere Technologien rasch eingeführt werden. Aufgrund der neuen Technologien sind in dieser Zukunft Energie und mineralische Ressourcen reichlich vorhanden. Der Schwerpunkt dieser Storyline liegt auf der Konvergenz zwischen Regionen, auf Kompetenzaufbau und zunehmenden kulturellen und sozialen Interaktionen (NAKICENOVIC et al. 2000, S. 173,179f).

Die A2 Storyline geht von einer sehr heterogenen Welt mit einem kontinuierlichen, hohen Bevölkerungswachstum aus. Die Geburtenhäufigkeitsstruktur konvergiert sehr langsam zwischen den verschiedenen Regionen. Da die Wirtschaft in erster Linie regional orientiert ist, finden ein geringerer Handelsfluss und weniger internationale Beziehungen als in A1 statt. Das Pro-Kopf-Einkommen nimmt langsamer als in den anderen Storylines zu, und es liegen im Vergleich zu A1 größere regionale Unterschiede weltweit vor. Daher wird, anders als in A1 und B1, die Einkommenslücke zwischen den Industrie- und Entwicklungsländern nicht geringer. Die technologische Entwicklung ist global fragmentiert und hängt von den verfügbaren Ressourcen jeder Region ab. Insgesamt geht sie langsamer als in den anderen Storylines voran. All diese Entwicklungen finden vor dem Hintergrund der Autarkie und der Bewahrung lokaler Identitäten statt (NAKICENOVIC et al. 2000, S. 174,180f).

Die B1 Storyline geht wiederum von einer ähnlichen Entwicklung der Bevölkerung wie in A1 aus. Es findet ein rascher Wandel der Wirtschaftsstruktur zu einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft statt, was eine abnehmende Materialintensität zur Folge hat. 2050 wird das Pro-Kopf-Einkommen um ein Drittel niedriger sein als in A1, und davon wird mehr für Qualität als für Quantität ausgegeben. Es erfolgt die Einführung sauberer und ressourceneffizienter Technologien. Schwerpunkt dieser Storyline liegt auf der Konvergenz zwischen Regionen. Es werden globale Lösungen zur wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Nachhaltigkeit gefunden, welche eine verbesserte Verteilungsgerechtigkeit einschließt (NAKICENOVIC et al. 2000, S. 174,181f).

Die B2 Storyline geht von einem kontinuierlichen Bevölkerungswachstum aus, welches aufgrund einer schnelleren Abnahme der Geburtenrate eine geringere Rate als jenes in A2 hat. Auch die Sterblichkeitsrate nimmt ab. Die wirtschaftliche Entwicklung findet auf mittlerem Niveau statt, selbiges gilt für das Pro-Kopf-Einkommen. Die Änderungen bezüglich der Technologien gehen langsamer voran und sind vielfältiger, als dies bei den A1 und B1 Szenarien der Fall ist. Die Energieversorgungssysteme unterscheiden sich je nach Region stark. Zu Grunde liegt die Annahme, dass lokale Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit gefunden werden (NAKICENOVIC et al. 2000, S. 174,182f)

Den Szenarienfamilien A2, B1 und B2 ist jeweils eine, A1 sind drei Szenariengruppen zugeordnet. Letztere drei Gruppen unterscheiden sich in der technischen Entwicklung: A1F1 (Fossil Fuel Intensive), A1B (Balanced) und A1T (Predominantly Non-Fossil Fuel). Diese sechs Szenarien stellen dabei eine mögliche quantitative Umsetzung der jeweiligen Storyline dar. Wie für die Storylines gilt für die Szenarien, dass keines mehr oder weniger wahrscheinlich ist als ein anderes (NAKICENOVIC et al. 2000, S. 172,176). Sowohl REMO als auch WETTREG wurden für den Zeitraum 2001 bzw. 2010 bis 2100 jeweils mit dem B1, A1B und A2 Szenario, also unter Annahme eines gemäßigten, eines mittleren sowie eines starken Anstiegs anthropogen bedingter Treibhausgase gerechnet. Dem Kontrolllauf von 1950 bis 2000 und somit auch der KNP von 1961 bis 1990 dienten als Eingangsgrößen in beiden Modellen beobachtete Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre (JACOB et al. 2008, S. 26). Nachfolgend werden die Ergebnisse beider Modelle zur LT-Entwicklung in Deutschland bis 2100 in Abhängigkeit der Emissionsszenarien dargestellt.

### 2.2.3.3 Zukünftige Entwicklung der Lufttemperatur bis 2100

Die Simulationen des REMO und des WETTREG Modells ergeben im Jahresmittel für Deutschland ein konsistentes Ergebnis. Gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 zeigt die Jahresmitteltemperatur bis 2100 einen Anstieg zwischen 1,5 und 3,7 °C. Die Bandbreite ergibt sich

aus der Wahl der drei Szenarien, wobei das B1- den geringsten und das A2-Szenario den höchsten Anstieg der LT ergibt. Je nach Szenario simuliert das REMO bis 2100 einen Temperaturanstieg im Jahresmittel um 2,5 bis 3,5 °C und WETTREG um 2 bis 2,5 °C im Vergleich zur KNP 1961-1990. Im Vergleich der Jahreszeiten zeigen alle Modellläufe die größte Temperaturerhöhung im Winter, zwischen durchschnittlich 3,5 und 4 °C bei WETTREG und zwischen 2 und 5 °C bei REMO. Das Frühjahr zeigt hingegen in beiden Modellen die geringste Erwärmung mit unter 1 °C (WETTREG) und mit unter 1 bis 2,5 °C (REMO) (UBA 2006a, S. 7; SPEKAT et al. 2007, S. 29f; JACOB et al. 2008S. 41f, 115).

In den räumlichen Ergebnissen für Deutschland unterscheiden sich die Modellergebnisse zum Teil. REMO projiziert die höchsten Temperaturanstiege im Jahresmittel im Süden mit zwischen 2 und 4 °C und die geringsten mit zwischen 1,5 und 3 °C im Nordwesten. WETTREG zeigt zwar für den Süden ebenfalls gebietsweise höchste Temperaturänderungen mit bis zu 3 °C an, zusätzlich jedoch für Norddeutschland mit Ausnahme der Küstenregionen mit zwischen 2,2 und 2,8 °C. Die geringsten Temperaturzunahmen finden sich bei WETTREG an der Küste, in den zentralen Mittelgebirgen und im Osten Bayerns mit ca. 1,5 °C. Bedeutend für den Einfluss auf die Sommertemperaturen von Flüssen (vgl. Abschnitt 2.2.1) ist, dass alle drei Szenarienläufe des REMO und das A1B-Szenario des WETTREG die höchsten Temperaturanstiege im Sommer von zwischen 2 und 4,5 °C im Südwesten projiziert (vgl. Abbildung 12). (UBA 2006a, S. 4; SPEKAT et al. 2007, S. 32f, 34; UBA 2007, S. 7f; JACOB et al. 2008, S. 47, 111, 113).

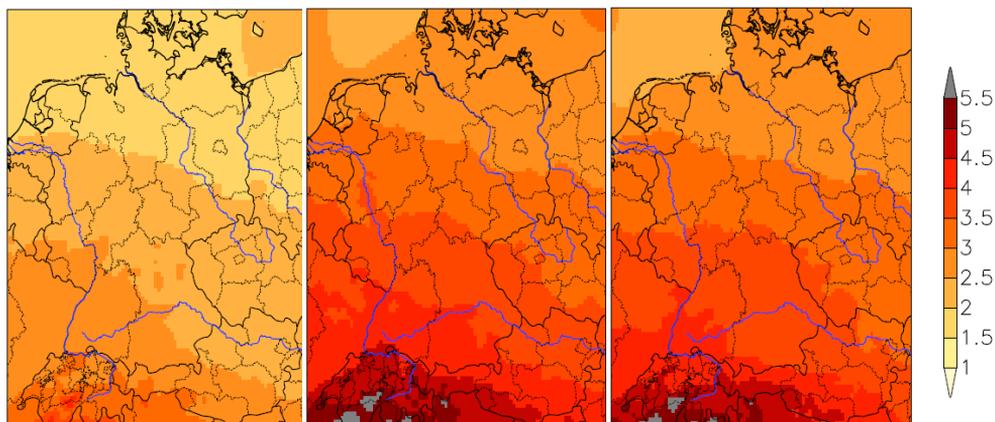


Abbildung 12: Änderung des Sommermittels (Juni, Juli, August) der 2 m-Temperatur in K für die ZP 2071-2100 gegenüber der KNP 1961-1990, von links nach rechts: B1-, A1B- und A2-Szenario. Quelle: JACOB et al. (2008, S. 113).

Die Ergebnisse beider Modelle stimmen ebenfalls bei der zu erwartenden Entwicklung der Extremwetterungssituationen überein. Sommertage (Tagesmaximaltemperatur > 25 °C) und heiße Tage (Tagesmaximaltemperatur > 30 °C) nehmen in ganz Deutschland stark zu. Nach den Ergebnissen des WETTREG steigt die Anzahl der Sommertage pro Jahr im zehnjährigen Mittel von mindestens zwei an der Station Arkona und höchsten 53 an der Station Karlsruhe (1981-1990) auf 10,6 bzw. 87,1 Tage pro Jahr (2091-2100). Während heiße Tage entsprechend zwischen 0 und 11,8

Mal im zehnjährigen Mittel (1981-1990) auftreten, steigt deren Anzahl auf zwischen 0,1 und knapp 34,6 für die ZP 2091 und 2100. Den Trend in der zunehmenden Anzahl von Sommer- und heißen Tagen zeigt sich ebenso in den Ergebnissen des REMO. Zusätzlich können zukünftig vor allem in der Oberrheingrabenregion Tropennächte (Minimaltemperatur > 20 °C) auftreten (SPEKAT et al. 2007, S. 55f, 69ff; JACOB et al. 2008, S. 58, 135).

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, reagiert das WT-Regime eines Flusses mit zunehmender Entfernung von der Quellregion von allen natürlichen Einflussgrößen am sensitivsten auf Änderungen der LT. Die WT der Flüsse beeinflussen im Zusammenhang mit wasserrechtlichen Auflagen und Grenzwerten die Kühlwassernutzung und damit den Betrieb der KTKW (vgl. Abschnitt 2.1.2.2).

### 3 STAND DER FORSCHUNG

Im ersten Teil des Kapitels wird der aktuelle Stand der Forschung zu Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke aufgrund hoher Wassertemperaturen in Verbindung mit wasserrechtlichen Auflagen beschrieben (vgl. Abschnitt 3.1). Abschnitt 3.2 befasst sich mit Untersuchungen zur Entwicklung rezenter Wassertemperaturen von Flüssen sowie zu Modellansätzen der Simulationen und Analysen zukünftiger Wassertemperaturen. Die Schlussfolgerungen aus den Abschnitten 3.1 und 3.2 werden in Abschnitt 3.3 dargelegt.

#### 3.1 Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke

Die Literaturrecherche ergab, dass bisher keine systematische Untersuchung des deutschen Kraftwerksparks, der installierten Kühlsysteme sowie der Leistungseinschränkungen der KTKW aufgrund hoher WT der Vorfluter stattgefunden hat. In Studien werden wie im Folgenden dargestellt die Auswirkungen von Hitzeperioden auf das Abflussverhalten und die WT der Flüsse untersucht. Dabei steht die Untersuchung der Kraftwerke, deren räumliche Verteilung und Kühlsysteme sowie mögliche Leistungseinschränkungen weniger im Mittelpunkt als die Untersuchung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität oder die Auswirkungen auf die Gewässerökologie.

So untersucht die Studie von HAUFF & KLUTH (2006) die energiewirtschaftliche Situation und den Stand der Versorgungssicherheit in Deutschland während der Trockenperiode 2003. Es werden zwar Kraftwerke aufgeführt, die von Leistungseinschränkungen betroffen waren. Allerdings sind die Angaben zu betroffenen Kraftwerken aus der Studie von LÖNKER (2003) übernommen. Es findet keine systematische Methode zur Identifizierung aller Kraftwerke mit WT-LE Anwendung. Das Ergebnis der Studie zeigt, dass trotz erhöhter Stromnachfrage aufgrund des gestiegenen Kühlgeräteinsatzes, wassertemperaturbedingter Leistungseinschränkungen und zeitgleicher Revisionen thermischer Kraftwerke die Energieversorgung in Deutschland im europäischen Vergleich relativ sicher war. Grund hierfür ist vor allem, dass die zuständigen Behörden, wie beispielsweise das Umweltministerium in Baden-Württemberg, Ausnahmegenehmigungen zur Kühlwassernutzung für die Kraftwerksbetreiber erließen (VON HAUFF & KLUTH 2006, S. 16f).

LÖNKER (2003) nennt in seinem Artikel „Hitze frei für Atomstrom“ die neun KKW Isar 1, Neckarwestheim Block 1 und 2, Obrigheim, Philippsburg Block 1 und 2, Unterweser, Stade, Krümmel, Brokdorf und Brunsbüttel, die aufgrund hoher WT ihre Leistung zwischen drei und 100 % reduzieren mussten. Um bis zu 50 % wurde die Leistung der Steinkohlekraftwerke Walsum, Voerde und Lünen gedrosselt. Ausnahmegenehmigungen bezüglich der einzuhaltenden wasserrechtlichen Grenzwerte in Baden-Württemberg und Bayern führten nicht zu einem kompletten Abschalten der Kraftwerke (LÖNKER 2003, S. 22-23).

Im wasserwirtschaftlichen Bericht des Bayerischen Landesamts für Wasserwirtschaft (BLfW, heute Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)) werden bezüglich der Wassernutzung und hohen WT bayerischer Flüsse die Kernkraftwerke in Bayern betrachtet. Danach unterlagen die KKW Gundremmingen an der Donau und Grafenrheinfeld am Main im Hitzesommer 2003 keinen Leistungseinschränkungen, da wasserrechtliche Grenzwerte bezüglich der WT beider Flüsse nicht erreicht worden waren. Allerdings hätten die geltenden wasserrechtlichen Bestimmungen und die WT der Isar zum Abfahren beider Blöcke des KKW Isar führen müssen. Das Wasserwirtschaftsamt Landshut erteilte jedoch eine Ausnahmegenehmigung, sodass die Versorgungssicherheit seitens der Betreiber gewährleistet werden konnte (BLFW 2004, S. 12; BLFW 2005, S. 136f).

In dem Bericht über die Wärmebelastung des Rheins im Hitzesommer 2003 stellt die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) fest, dass im deutschen Teilabschnitt des Rheins die WT über den erlaubten Grenzwerten lagen. Die Kraftwerksbetreiber waren durch Behörden dazu angehalten, alle Möglichkeiten und Kapazitäten der Ablauf- oder Kreislaufkühlung zu nutzen. Des Weiteren wurden Ausnahmegenehmigungen für den Kraftwerksbetrieb bezüglich der einzuhaltenden WT-Grenzwerte erteilt. Somit konnten die Energieversorger die Versorgungssicherheit gewährleisten (IKSR 2004, S. 12).

In dem Hintergrundpapier zum Thema Klimafolgen und -anpassung verweist das UBA allgemein auf den Kühlwasserbedarf thermischer Kraftwerke und die Leistungsreduktion einiger Kraftwerke im Hitzesommer 2003 (UBA 2005, S. 9). Zudem beschloss die Bundesregierung im Dezember 2008 die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS) und veröffentlicht im Rahmen des „Kompetenzzentrums für Klimafolgen und Anpassung“ (KomPass) Themenpapiere zur Anpassung der Energiewirtschaft an den Klimawandel (UBA 2008c, S. 1). Darin wird die Verfügbarkeit von Wasser und der Einfluss hoher WT auf den Betrieb thermischer Kraftwerke als entscheidender Faktor für die Energieversorgung im Allgemeinen genannt (BMU 2007, S. 1; UBA 2008b, S. 2).

In der Schweiz wurden Unternehmen am Hochrhein Ausnahmegenehmigungen bezüglich der Wassernutzung aufgrund hoher Rheintemperaturen erteilt. Das KKW Leibstadt am Hochrhein musste im Gegensatz zu den beiden KKW Beznau und Mühleberg an der Aare seine Leistung nicht reduzieren, da ein Kühlturm zum Einsatz kam. Ohne Nennung konkreter Kraftwerksstandorte sowie konkreter Leistungseinschränkungen erwähnt ProClim - Forum for Climate and Global Change (ProClim) in einem Synthesebericht, dass es im Hitzesommer 2003 zu Leistungseinschränkungen thermischer Kraftwerke in der Schweiz aufgrund hoher Flusstemperaturen gekommen sei (IKSR 2004, S. 6; PROCLIM 2005, S. 21).

In den USA traten nach den Ausführungen des NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (2009) 2006 und 2007 Hitzewellen auf. Wie in Europa gelten in den USA Wassergesetze, die die Kühlwassernutzung regeln. Nachdem Grenzwerte aufgrund hoher WT in Oberflächengewässern erreicht worden waren, waren Kraftwerke in den Bundesstaaten Illinois und

Minnesota zur Leistungsreduktion gezwungen. Die Studie des NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (2009) stellt jedoch den Einfluss von Niedrigwasserabflüssen auf die Elektrizitätsproduktion in den USA dar und nicht den von hohen WT auf den Betrieb der KTKW (NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY 2009, S. 2f).

Im Bereich der Analyse rezenter und zukünftiger Gewässertemperaturentwicklung liegen weitaus mehr Studien vor. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und angewandten Methoden findet sich im Folgenden.

### 3.2 Studien zu Analysen rezenter und zukünftiger Entwicklungen der Wassertemperaturen von Flüssen

Im Folgenden werden Untersuchungen über die Entwicklung rezenter WT von Flüssen vorgestellt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Modellansätze, die in verschiedenen Studien zur Simulation von WT Anwendung finden, sowie deren Vor- und Nachteile bezüglich der zeitlichen Auflösung der simulierten Daten sowie der notwendigen Eingangsdaten werden in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Eine Übersicht über Studien, in denen zukünftige WT im Kontext des Klimawandels simuliert werden, wird in Abschnitt 3.2.3 gegeben.

#### 3.2.1 Studien zu Trendanalysen rezenter Wassertemperaturzeitreihen

Untersuchungen zur Entwicklung rezenter WT von Flüssen liegen bisher in insgesamt 25 Studien in zehn Ländern vor. Am Ende des Abschnitts sind in Tabelle 7 das Land, in dem die Flusstemperaturen untersucht werden, die Anzahl der untersuchten WT-Zeitreihen, der Untersuchungszeitraum bzw. die Zeitreihenlänge, die angewandte Methodik, mit der die WT-Zeitreihen auf mögliche Änderungen untersucht werden sowie der/die Autoren (Quelle) der Studie aufgeführt.

Umfassende Studien mit Analysen von mindestens 15 bis zu 364 WT-Zeitreihen liegen für schweizer, österreichische, französische, kroatische und britische und US amerikanische Flüsse vor. Für Flüsse in der Slowakei, in Japan und Neuseeland liegen hingegen nur vereinzelt Analysen der Entwicklung rezenter WT vor. Mit Ausnahme der unveröffentlichten Diplomarbeit von GREIS (2007), in der 19 WT-Zeitreihen deutscher Flüsse auf mögliche Trends hin untersucht werden, existieren für Deutschland ebenfalls keine umfassenden Untersuchungen. Lediglich die WT der Donau an der Station Kachlet bei Passau werden für die Periode 1930-1990 bezüglich möglicher Trends analysiert. Im Vergleich mit der Zeitreihenlänge in den anderen Studien stellt diese eine der längsten Zeitreihen dar. Denn die Länge der untersuchten Zeitreihen beträgt in 17 Studien zwischen zwei und 35 Jahren. Der Untersuchungszeitraum beginnt in 15 Studien in den 1960er bis 1980er Jahren und endet in den 1990er bis 2000er Jahren. In sechs Studien liegen Zeitreihen mit einer Länge von mindestens 60 Jahren vor, die zwischen 1901 und 1938 beginnen und zwischen 1996 und 2005 enden (vgl. Tabelle 7).

Um mögliche Trends sowie deren Signifikanz in den Zeitreihen identifizieren zu können, finden in zehn der Studien der (saisonale) Mann-Kendall Trendtest<sup>9</sup> Verwendung. In vier dieser Studien wird zudem der (saisonale) Kendall Slope Estimator bzw. der Sen's Slope Estimator<sup>10</sup> verwendet, um die Richtung und Höhe der Trends bestimmen zu können. In jeweils einer Studie wird zur Untersuchung möglicher Trends der Rangkorrelationstest nach Spearman und die Methode der Rescaled Adjusted Partial Sum (RAPS)<sup>11</sup> eingesetzt. In fünf weiteren Studien liegen keine Informationen über die angewandten Methoden der Trendanalysen vor. Ob extrem hohe WT rezent häufiger auftraten, wird in einer Studie mittels einer Häufigkeitsanalyse der WT französischer Flüsse untersucht. In einer weiteren Studie werden die sommerlichen WT der Unterweser aus den Jahren 1991 und 1994 deskriptiv verglichen. Ebenso findet in einer Studie ein Vergleich der Sommertemperaturen der Mosel und des Rheins aus den Jahren 2003 und 2006 mit dem langjährigen Mittel der sommerlichen WT zwischen 1978 und 2002 statt. Zu drei Studien liegen bezüglich der angewandten Methode keine Angaben vor (vgl. Tabelle 7).

Da wie oben beschrieben die Zeitreihen erstens unterschiedlich lang sind, zweitens in unterschiedlichen Jahren beginnen bzw. enden und drittens unterschiedliche Methoden angewandt werden, ist ein Vergleich der Ergebnisse lediglich eingeschränkt möglich. Die Analysen resultieren je nach Studie in heterogenen Ergebnissen bezüglich signifikanter Trends in den Zeitreihen. In den meisten Zeitreihen werden zwar signifikant positive Trends identifiziert. Je nach Studie, Land und Flüsse treten diese jedoch im Winter, Frühjahr, Sommer oder Herbst bzw. in unterschiedlichen Monaten auf.

Die Ursache signifikant positiver Trends in den WT-Zeitreihen wird teils auf die anthropogen bedingten Änderungen der LT, teils auf steigende LT aufgrund einer positiven Phase der Nordatlantischen Oszillation (NAO) sowie teils auf anthropogene Einflussgrößen wie Kühlwassereinleitungen oder wasserbauliche Maßnahmen zurückgeführt. Zudem wird ein geändertes Abflussverhalten der Flüsse als Grund für die Änderungen in den WT herangezogen. Von Interesse ist jedoch nicht nur, wie sich rezente WT entwickelt haben, sondern auch wie sich WT in der Zukunft entwickeln können. Daher werden im folgenden Abschnitt Methoden vorgestellt, mit denen WT simuliert werden können.

---

<sup>9</sup> Der Mann-Kendall Trendtest identifiziert signifikante Trends in Zeitreihen auf Basis monatlicher Mittelwerte und wird in Abschnitt 4.2.3.1 detailliert beschrieben.

<sup>10</sup> Der Kendall Slope Estimator ermittelt die Höhe der identifizierten Trends in Anlehnung an den Sen's Slope Estimator und wird in Abschnitt 4.2.3.2 beschrieben.

<sup>11</sup> Mithilfe der RAPS Methode können Trends, Änderungen der Variabilität oder ein Versatz in den mittleren Werten der Datenreihe graphisch dargestellt werden. RAPS Wert wird nach Bonacci et al. (2008, S. 1016f) wie folgt berechnet:

$$RAPS_k = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t - \bar{Y}}{S_Y},$$

wobei  $Y$  den Wert zum Zeitpunkt  $t$ ,  $\bar{Y}$  den Mittelwert der Zeitreihe,  $S_Y$  die Standardabweichung der Zeitreihe und  $k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ) den Zählwert der aktuellen Summe darstellt.

Tabelle 7: Übersicht über Studien zur Untersuchung der Entwicklung rezenter WT. Angegeben ist das Land, in dem die WT-Analysen durchgeführt wurden, die Anzahl der untersuchten Zeitreihen, der Untersuchungszeitraum bzw. die Zeitreihenlänge, die verwendete Analyseverfahren sowie der/die Autor/en (Quelle). Zusammenstellung nach den angegebenen Quellen.

Land	Anzahl	Zeitraum/ Zeitreihenlänge	Methode	Quelle
Deutschland	1	1991,1994; 14 Tage	Temperaturvergleich	(GRABEMANN et al. 2005, S. 71)
	1	1930-1990	Trendanalyse	(DEISENHOFER 1992, S. 341f)
	2	1978-2006	Temperaturvergleich	(KOOP et al. 2007, S. 203)
	19	1976-2007	(Saisonal) Mann-Kendall Trendtest, (Saisonal) Kendall Slope Estimator	(GREIS 2007, S. 64ff, 96; MÜLLER et al. 2007, S. 1f)
Schweiz	20	30 Jahre	Mann-Kendall Trendtest	(PFAMMATTER 2004, S. 1f)
	25	1978-2002	Saisonaler Mann-Kendall Trendtest	(HARI et al. 2006, S. 16)
Österreich	2	1901-1990	Trendanalyse	(WEBB & NOBILIS 1994, S. 106; WEBB 1996, S. 216f)
	10	1901-1990	Saisonaler Mann-Kendall Trendtest	(WEBB & NOBILIS 1995, S. 87f, 93; WEBB 1996, S. 216f, 219f)
	3	1901-2000	Trendanalyse	(WEBB & NOBILIS 2007, S. 79, 84)
Slowakei	1	1931-2005	Trendanalyse	(PEKAROVA et al. 2008, S. 1119ff)
Frankreich	1	1979-1999	Mann-Kendall Trendtest	(DAUFRESNE et al. 2003, S. 125, 128f)
	4	1976-2003 und 1881-2003	Rangkorrelationstest nach Spearman	(MOATAR & GAILHARD 2006, S. 321f, 327)
	12	1977-2004	Häufigkeitsanalyse extrem hoher WT	(HUGUET et al. 2008, S. 72, 73)
Kroatien	15	1948-2005 ; 20-60 Jahre	Rescaled Adjusted Partial Sum	(BONACCI et al. 2008, S. 1016ff)
Großbritannien	15	1977-1990	Saisonaler Mann-Kendall Trendtest, Saisonaler Kendall Slope Estimator	(WEBB & WALLING 1992, S. 568, 574ff; WEBB 1996, S. 211)
	1	1968-1997	lineare Regressionsmodelle	(LANGAN et al. 2001, S. 204f)
	3	1981-2005	Multiple Regression	(DURANCE & ORMEROD 2007, S. 944, 946)
	107	1971 und 2005; 19-35 Jahre	Trendanalyse mit gleitenden Mittel	(HAMMOND & PRYCE 2007, S. 40, 54)
USA	364	1974-1981	Saisonaler Mann-Kendall Trendtest, Kendall Slope Estimator	(SMITH & ALEXANDER 1983 zitiert in WEBB 1996, S. 212-215)
	1	27 Jahre	Saisonaler Mann-Kendall Trendtest	(EHINGER 1993, S. 2, 5)
	2	1938-1996	Varianzanalyse	(PETERSEN & KITCHELL 2001, S. 1833ff, 1839)

Land	An-zahl	Zeitraum/ Zeitreihenlänge	Methode	Quelle
USA	15	1969-2000	Saisonaler Mann-Kendall Trendtest	(STEVENS 2003, S. 29f)
	13	1961-1993; 13-30 Jahre	Saisonaler Mann-Kendall Trendtest, Kendall Slope Estimator	(BARTHOLOW 2005, S. 154, 158)
Japan	1	1978-1998	lineare Regression, t-Test	(KINOUCI et al. 2007, S. 78, 87)
Neuseeland	k. A.	1987-1993	k. A.	(SMITH 1995 zitiert in WEBB et al. 2008, S. 909).

### 3.2.2 Angewandte Modellansätze zur Simulation von Wassertemperaturen

Um beispielsweise die Wasserqualität von Flüssen operationell überwachen zu können, werden Modelle zur WT-Simulation entwickelt. Diese sowie ihre Vor- und Nachteile bezüglich der zeitlichen Auflösung der simulierten Daten und der notwendigen Anzahl an Eingangsgrößen werden im Folgenden dargestellt.

Gewässertemperaturen können mittels Regressionsmodellen, stochastischer, physikalischer bzw. deterministischer Modelle sowie künstlicher neuronaler Netze simuliert werden. Für die Wahl eines Modellansatzes ist entscheidend, in welcher zeitlichen Auflösung die WT berechnet werden sollen, und welche Eingangsgrößen zur Berechnung vorliegen (LEAVESLEY 1994, S. 161-164; KACZMAREK et al. 1996, S. 34).

Regressionsmodelle werden in lineare, multiple und logistische Modelle unterteilt. Tägliche, wöchentliche und monatliche Mittelwerte der WT werden mittels einfacher, linearer Regression (ELRM) basierend auf den Tages-, Wochen- oder Monatsmitteln der LT berechnet (JOHNSON 1971, S. 333f; SMITH 1981, S. 22ff; CRISP & HOWSON 1982, S. 361f; STEFAN & PREUD'HOMME 1993, S. 27; ERICKSON & STEFAN 1996; WEBB & NOBILIS 1997, S. 137; MOHSENI & STEFAN 1999, S. 129; ERICKSON & STEFAN 2000, S. 317).

In Abhängigkeit des Flusses kann der Abfluss neben der LT eine entscheidende natürliche Einflussgröße sein (vgl. Abschnitt 2.2.1). Daher werden multiple, lineare Regressionsmodelle (MLRM) mit dem Abfluss als zusätzliche Eingangsgröße zur Vorhersage von Stunden-, Tages-, Wochen- oder Monatsmitteln der WT verwendet. Allerdings zeigen Studien, dass die LT vor allem bei Wochen- und Monatsmitteln meist bereits über 70 % der Varianz in den WT erklären. Lediglich bei der Vorhersage von Stundenmitteln oder mittleren Tagesmaximalwerten trägt der Abfluss zu einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit bei (CRISP & HOWSON 1982, S. 359; NEUMANN et al. 2003, S. 667, 669, 673f; WEBB et al. 2003, S. 3080ff; RIVERS-MOORE & JEWITT 2007, S. 39, 43; PEKAROVA et al. 2008, S. 1117ff).

In der Studie von MOHSENI et al. (1998) wird ein logistisches, nicht-lineares Regressionsmodell (LRM) dargestellt (vgl. Abschnitt 4.3.2), um wöchentliche WT auf Basis von LT simulieren zu können. Diesem Modell liegen die Überlegungen zugrunde, dass ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen LT und WT bei Wassertemperaturen zwischen 0 und etwa 20 °C gegeben ist. Fallen die LT über einen längeren Zeitraum unter 0 °C, gefriert das Wasser, die WT nähern sich

somit nicht mehr an die LT an. Bei WT über 20 °C bzw. bei LT über etwa 25 °C tritt ein Abkühlungseffekt durch die Wärmeabgabe auf. Die Verdunstungsrate steigt bei steigender Temperatur, da die Luft bei hohen Temperaturen eine höhere Feuchtigkeitsaufnahmekapazität besitzt. Infolgedessen wird dem Wasser gleichzeitig Verdunstungswärme entzogen, wodurch sich der Abkühlungseffekt verstärkt. Beide Effekte resultieren in einem nicht-linearen Zusammenhang der LT und WT bei sehr niedrigen und sehr hohen LT (MOHSENI et al. 1998, S. 2688ff). Die logistische Regressionsgleichung wird zur Vorhersage mittlerer täglicher und wöchentlicher WT sowie zur Projektion zukünftiger WT im Kontext des Klimawandels angewandt (MOHSENI et al. 1999, S. 3723; KYLE & BRABETS 2001, S. 13ff; WEBB & WALSH 2004, S. 178ff; PEDERSEN & SAND-JENSEN 2007, S. 352ff).

Zur Vorhersage von Stunden-, Tages- und Wochenmitteln sowie von mittleren Tagesminima bzw. -maxima der WT eignen sich sowohl stochastische als auch physikalische Modelle. Stochastische Modelle sind dabei einfacher anzuwenden, da lediglich die LT in entsprechender zeitlicher Auflösung als Eingangsgröße notwendig ist. Stehen die Daten zur Verfügung kann bei Bedarf der Abfluss als zusätzliche Eingangsgröße verwendet werden. Bei stochastischen Modellen wird sowohl eine langfristige, saisonale als auch eine kurzfristige Komponente der WT ermittelt. Dabei kommen die Fourieranalyse und sinusförmige Funktionen zum Einsatz, um die saisonalen Schwankungen zu identifizieren. Die kurzfristige Komponente, also die Abweichung von der langfristigen Komponente, kann durch die Subtraktion der aktuellen von der langfristigen Komponente berechnet werden. Stunden-, Tages- und Wochenmittel sowie Tagesminima und -maxima der WT werden mittels stochastischer Modelle simuliert (KOTHANDARAMAN 1972, S. 38, 44; KLITZSCH 1978, S. 393ff; EL-JABI et al. 1995, S. 78; CAISSIE et al. 2001, S. 20ff; AHMADI-NEDUSHAN et al. 2007, S. 24, 29, 31ff; BENYAHYA et al. 2007, S. 443, 446; REINARTZ 2007, S. 23; DOGLIONI et al. 2008, s. 319, 325).

Vor allem zur stündlichen, aber auch zur täglichen Simulation von WT werden physikalische bzw. deterministische Modelle (P/DM) eingesetzt. Diese berechnen das Energiebudget eines Gewässers. Vorteil dieses Modellansatzes ist, dass stündliche Werte der WT sehr exakt vorhergesagt werden können. Dies erlaubt eine Anwendung zur Vorhersage der Wasserqualität in Abhängigkeit der WT auf Stundenbasis. Ebenso finden deterministische Modelle Anwendung in der Kraftwerkseinsatzplanung in Abhängigkeit der WT und installierten Kühlsystemen. Der Nachteil deterministischer Modelle ist jedoch, dass sehr viele gemessene Eingangsgrößen wie beispielsweise die Solareinstrahlung, die Windgeschwindigkeit, die relative Luftfeuchtigkeit, die Beschattungseffekte durch Ufervegetation, der Grundwassereinfluss und der Abfluss von Nebenflüssen notwendig sind. Diese werden im Gegensatz zur LT nicht an allen meteorologischen Stationen flächendeckend gemessen. Somit sind diese Modelle lediglich für einzelne Flussläufe oder Messstationen geeignet. Zudem stehen nicht alle der oben genannten notwendigen Eingangsgrößen im Hinblick auf WT-Projektionen im Kontext des Klimawandels in globalen oder regionalen Klimamodellen zur Verfügung (z. B. Abfluss der Nebenflüsse, Grundwasserzufluss) (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) (BÖHM 1974, S. 388ff; VUGTS 1974, S. 268, 276; JEPPESEN & IVERSEN 1987, S. 149, 154; SINOKROT & STEFAN 1993, S. 2310; KIM & CHAPRA 1997, S. 38; AD Consultants 2002, S. 1, 10ff, 27ff; CAISSIE et al. 2005, S. 2139ff, 2156f; HAAG et al. 2005, S. 45ff; TUNG et al. 2006, S. 1630ff; MARCÉ & ARMENGOL 2008, S. 3418, 3428f).

Künstliche Neuronale Netze (KNN) werden ebenso für die Simulation täglicher WT verwendet. Vorteil der WT-Modellierung auf Basis von KNN sind erstens die guten Simulationsergebnisse im Vergleich mit gemessenen Werten. Zweitens wird eine geringe Anzahl an Eingangsdaten vergleichbar

mit der bei Regressionsmodellen benötigt. Drittens sind jedoch beliebig viele Eingangsgrößen verwendbar. Der Einsatz von KNN zur Simulation von WT setzt voraus, dass das Modell mit entsprechenden Daten trainiert wird. Eine Extrapolation der Daten kann daher nur mit Vorsicht vorgenommen werden, da unerwartete, nicht erklärbare Ergebnisse auftreten können (BÉLANGER et al. 2005, S. 404f; CHENARD & CAISSIE 2008, S. 3361, 3371). Die vorgestellten Modelle finden nicht nur für Kurzfristvorhersagen der WT Verwendung, sondern auch zur Projektion zukünftiger WT. Im Folgenden wird ein Überblick über die Studien gegeben, in denen zukünftige WT im Kontext des Klimawandels simuliert wurden.

### 3.2.3 Studien zur Simulation zukünftiger Wassertemperaturen

Eine Änderung der WT kann sich auf die Wasserqualität sowie auf die Gewässerökologie, insbesondere auf die Fischfauna auswirken (vgl. Abschnitt 2.1.2). Aus diesem Grund liegen bisher insgesamt 20 Untersuchungen vor, ob und wie sich die WT von Flüssen in 19 Ländern im Kontext des Klimawandels ändern werden. In Tabelle 8 sind die Studien aufgeführt, in denen die Ergebnisse simulierter, zukünftiger WT dargestellt sind. In Anlehnung an Tabelle 7 sind die Länder, in denen WT-Simulationen vorliegen, die Anzahl der simulierten Zeitreihen, der angewandte Modellansatz, die Eingangsgrößen in das Modell, die zeitliche Auflösung der simulierten WT-Daten, der Simulationshorizont sowie der/die Autor/en der Studie angegeben.

Während in Deutschland, Dänemark, Österreich und Kanada jeweils nur für eine bis zwei Stationen zukünftige WT simuliert bzw. abgeschätzt wurden, wurden in Großbritannien und den USA für zwischen 27 und 1.776 Stationen die WT von Flüssen unter Annahme eines veränderten zukünftigen Klimas simuliert. In der Studie „weltweit“ wurden insgesamt für 43 Stationen in den in der Tabelle 8 angegebenen Ländern Zeitreihen zukünftiger WT berechnet (vgl. Tabelle 8, „Land und Anzahl“).

Um die WT simulieren zu können, finden in elf der 20 Studien ein Regressionsmodell und in sechs Studien ein P/DM Verwendung. Für drei Studien liegen keine Angaben zum Modellansatz vor. Bei den verwendeten Regressionsmodellen handelt es sich sowohl um ELRM (fünf), MLRM (vier) als auch um LRM (fünf). Letztere werden vor allem in den Studien verwendet, in denen viele, d. h. zwischen 27 und 803 WT-Zeitreihen simuliert sind (vgl. Tabelle 8, „Modellansatz“).

In allen Modellen dient die LT als Eingangsgröße. In MLRM findet zudem der Abfluss (Q) Verwendung. Weitere meteorologische Größen wie der Niederschlag, die Solarstrahlung oder die relative Luftfeuchtigkeit werden für ein MLRM sowie für die P/DM als Eingangsgrößen herangezogen (vgl. Tabelle 8, „Eingangsgröße“).

Während für fünf Studien keine Angaben zum Simulationshorizont vorliegen, werden in acht Studien die WT-Zeitreihen bis zu den Jahren 2030 bis 2100 simuliert. Als Eingangsdaten der LT dienen die Simulationsergebnisse globaler Klimamodelle wie beispielsweise des United Kingdom Climate Impacts Programme (UKCIP), des Institute of Space Studies (GISS), des Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton University (GFDL), der Oregon State University (OSU), des Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCM) oder des Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HAD). In weiteren acht Studien werden die WT unter der Annahme berechnet, dass sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre gegenüber heute verdoppeln wird (vgl. Tabelle 8, „Horizont/Annahme“).

In nachfolgender Tabelle findet sich die Übersicht über die Studien zur Simulation zukünftiger WT. Anschließend wird in Abschnitt 3.3 ein Fazit der Literaturrecherche zu WT-LE der KTKW sowie der Untersuchung rezenter und zukünftiger WT in Deutschland gegeben.

Tabelle 8. Übersicht über Studien zur Modellierung und Untersuchung der Entwicklung zukünftiger WT. Zusammenstellung nach angegebenen Quellen.

Land	Anzahl	Modellansatz	Eingangsgröße	zeitliche Auflösung	Horizont/Annahme	Quelle
Deutschland	2	k. A.	k. A.	TM	bis 2050, IS92a, LT-Anstieg 2,7 °C	(GRABEMANN et al. 2005, S. 52, 73)
Österreich	1	MLRM <sup>1)</sup>	LT, Q <sup>5)</sup>	MM <sup>6)</sup>	2030	(WEBB & NOBILIS 1994, S. 109ff)
Österreich	2	MLRM	LT, Q		2001-2049	(SCHMUTZ et al. 2004, S. 1f)
Türkei	1	MLRM	LT, Q	TM <sup>7)</sup> , Tmin <sup>8)</sup> , Tmax <sup>9)</sup> , 5-tägiges Mittel, JM <sup>10)</sup>	2050	(ALBEK 2007, S. 16f)
Dänemark	2	ELRM <sup>2)</sup> , MLRM, LRM <sup>3)</sup>	LT, Q, mehrere meteor. Größen	TM, WM <sup>11)</sup>	2070-2100	(PEDERSEN & SAND-JENSEN 2007, S. 355)
Großbritannien	4	ELRM	LT	MM	k. A.	(MACKEY & BERRIE 1991)
Großbritannien	4	ELRM	LT	MM, Mmax, Mmin	2050	(WEBB & WALLING 1992, S. 578)
Großbritannien	27	LRM	LT	WM	2020, 2050, 2080	(WEBB & WALSH 2004, S. 178f, 181f, 190)
USA	39	ELRM	LT	TM, WM, MM, JM	2 x CO <sub>2</sub> -Konzentration	(PILGRIM et al. 1998, S. 1109, 1120)
USA	803	LRM	LT	WM	2 x CO <sub>2</sub> -Konzentration	(MOHSENI et al. 1999, S. 3723f, 3732)
USA	32	LRM	LT	WM	2 x CO <sub>2</sub> -Konzentration	(KYLE & BRABETS 2001, S. 12, 17, 19)
USA	k. A.	P/DM <sup>4)</sup>	LT	JM	2 x CO <sub>2</sub> -Konzentration	(COOTER & COOTER 1990, S. 2, 8)
USA	4	P/DM	mehrere meteor. Größen	JM	2 x CO <sub>2</sub> -Konzentration	(STEFAN & SINOKROT 1993, S. 364, 367)
USA	4	P/DM	LT	k. A.	2 x CO <sub>2</sub> -Konzentration	(SINOKROT et al. 1995, S. 186, 188)
USA	k. A.	P/DM	LT, Solarstrahlung	k. A.	k. A.	(GOOSEFF et al. 2005, S. 345)
USA	1.776	k. A.	LT	WM	2 x CO <sub>2</sub> -Konzentration	(EATON & SCHELLER 1996, S. 1110f)
Kanada	2	P/DM	LT, Grund-WT	k. A.	k. A.	(MEISNER 1990, S. 282, 287ff)

Land	Anzahl	Modellansatz	Eingangsgroße	zeitliche Auflösung	Horizont/Annahme	Quelle
Kanada	k. A.	k. A.	LT, Niederschlag	MM	2010-2039, 2040-2069, 2070-2099	(MORRISON et al. 2002, S. 240f)
Taiwan	k. A.	P/DM	mehrere meteor. Größen	MM, JM	2010-39, 2040-69, 2070-99, 2 x CO <sub>2</sub> -Konzentration;	(TUNG et al. 2006, S. 1638, 1644f)
weltweit: Australien, Japan, China, Tschechien Kroatien, Mazedonien, Belgien, Deutschland, Polen, Estland, Finnland, Norwegen, USA	43	ELRM, LRM	LT	WM	k. A.	(MORRILL et al. 2005, S. 140f, 144f)
<sup>1)</sup> multiples lineares Regressionsmodell <sup>2)</sup> einfaches lineares Regressionsmodell <sup>3)</sup> logistisches Regressionsmodell <sup>4)</sup> physikalisches deterministisches Modell			<sup>5)</sup> Abfluss <sup>6)</sup> Monatsmittel <sup>7)</sup> Tagesmittel <sup>8)</sup> mittleres Tagesminimum		<sup>9)</sup> mittleres Tagesmaximum <sup>10)</sup> Jahresmittel <sup>11)</sup> Wochenmittel	

### 3.3 Fazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Studien auf die Problematik der WT-LE bei KTKW im Zusammenhang mit wasserrechtlichen Grenzwerten in Deutschland nur allgemein verweisen (vgl. Abschnitt 3.1). Die Ergebnisse der Studien zur rezenten Entwicklung der WT von Flüssen weltweit zeigen, dass mehrheitlich positive Trends in den WT vorliegen. Diese Trends werden teils den Änderungen der LT, teils den veränderten Abflusseigenschaften der Flüsse sowie der steigenden anthropogenen Nutzung und Wärmeeinleitung zugeordnet. Ein Vergleich der Ergebnisse ist nur beschränkt möglich, da erstens die WT-Zeitreihen in unterschiedlicher Länge zwischen zwei und 90 Jahren je nach Land und Fluss vorliegen. Ein möglicher Einfluss des Klimawandels auf die WT lässt sich zudem erst bei längeren Zeitreihen von mindestens 20-30 Jahren untersuchen. Zweitens werden unterschiedliche Zeiträume betrachtet, die unabhängig vom Klimawandel beispielsweise durch eine negative oder positive NAO beeinflusst waren. Und drittens werden unterschiedliche Methoden zur Identifizierung möglicher Trends und deren Höhe angewandt.

Mithilfe von Regressionsmodellen, stochastischen und physikalischen bzw. deterministischen Modellen sowie mithilfe künstlicher neuronaler Netze werden WT-Simulationen durchgeführt. Einfache und multiple lineare sowie logistische nicht-lineare Regressionsmodelle eignen sich sowohl für die Berechnung von Tages-, Wochen- als auch für Monatsmittel der WT. Vorteil logistischer Regressionsmodelle ist dabei, dass der nicht-lineare Zusammenhang zwischen LT und WT bei Lufttemperaturen unter 0 und über etwa 25 °C berücksichtigt wird. Daher werden v. a. bei Betrachtung mehrerer Flüsse logistische Regressionsmodelle eingesetzt, um zu untersuchen, wie sich WT im Kontext des Klimawandels entwickeln werden. Denn die Studien zeigen, dass die LT als

einzigste Eingangsgröße meist ausreicht, um die Varianz in den WT zu über 70-90 % zu erklären. Der Abfluss trägt lediglich bei der Simulation mittlerer stündlicher und z. T. täglicher WT zu einer signifikanten Verbesserung der Modellgüte bei.

Stochastische und physikalische bzw. deterministische Modelle werden aufgrund ihrer höheren Komplexität und des höheren Bedarfs an Eingangsgrößen lediglich für einzelne Flüsse oder Messstationen zur WT-Simulation im Kontext des Klimawandels eingesetzt. Sie eignen sich vielmehr zur stunden- oder tagesgenauen WT-Prognose für die Überwachung der Gewässerqualität. Zudem stehen aus Klimamodellen flächendeckend projizierte LT, nicht jedoch Abflussdaten oder Grundwasserzufluss zur Verfügung. Zur Projektion von WT werden jeweils in acht der Studien projizierte LT aus globalen Klimamodellen verwendet bzw. eine Änderung der LT unter Annahme einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre angenommen (vgl. Tabelle 8). Damit liegen grobe Abschätzungen über die Änderung der WT von Flüssen vor. Allerdings finden in den Studien regionale und kleinräumige Unterschiede in der Entwicklung der LT und damit auch in den WT-Regimen keine Beachtung.

Für Deutschland mangelt es an einer Übersicht der KTKW mit installierten Kühlsystemen, die möglicherweise in ihrem Betrieb durch hohe WT verbunden mit wasserrechtlichen Auflagen beeinflusst werden können. Ebenso fehlt eine systematische Untersuchung bezüglich standortbezogener WT-LE bei KTKW. Zudem wurde mit Ausnahme einer Untersuchung im Rahmen einer Diplomarbeit bisher keine umfassende Analyse der Entwicklung rezenter WT deutscher Flüsse durchgeführt. Auch existieren bisher keine Studien zur Simulation zukünftiger WT im Kontext des Klimawandels für Deutschland auf Basis regional hoch aufgelöster Klimamodelldaten. Zwar sollen im Rahmen des Projektes „Klimawandel, Wasserstraßen und Schifffahrt“ (KLIWAS) Simulationen der WT ausgewählter deutscher Bundeswasserstraßen durchgeführt werden (FISCHER 2009, S. 5). Ergebnisse liegen hierzu jedoch noch nicht vor. Zudem beschränken sich die Simulationen der WT auf wenige große Bundeswasserstraßen. Diese Forschungslücken sollen mit der vorliegenden Arbeit geschlossen werden.

#### 4 DATENGRUNDLAGE, DATENAUFBEREITUNG UND METHODIK

Um eine einheitliche Datengrundlage zur Untersuchung von WT-LE der KTKW in Deutschland zu erhalten, wurde im ersten Schritt eine Datenbank zum Park der KTKW erstellt. WT-LE bei KTKW wurden anschließend in drei Schritten identifiziert: mittels einer Literaturrecherche, einer Medienanalyse sowie einer Befragung von Kraftwerksbetreibern (vgl. Abschnitt 4.1). Um rezente WT zu analysieren und zukünftige WT zu simulieren und diese zu untersuchen, wurden statistische Methoden angewandt. Diese werden gemeinsam mit der Datengrundlage und -aufbereitung in den Abschnitten 4.2, 4.3 und 4.4 beschrieben. Der Zeitraum bezüglich der Untersuchung der WT-LE bei KTKW reicht von 1976 bis 2007, bezüglich der rezenter Entwicklung von WT deutscher Flüsse von 1948 bis 2007. Die Simulation der WT wurde für die KNP von 1961-1990 sowie für die Zukunft von 2011 bis 2100 durchgeführt. Für die Aufbereitung der Daten sowie für die statistischen Analysen wurden das Tabellenkalkulationsprogramm Excel und das Datenbankprogramm Access der Office Version 2003 der Firma Microsoft<sup>®</sup> sowie das kostenlose und öffentlich frei zugängliche Statistikprogramm R verwendet.

#### 4.1 Konventionelle thermische Kraftwerke und Untersuchung wassertemperaturbedingter Leistungseinschränkungen in Deutschland

Informationen über WT-LE bei KTKW liegen weder von Behörden- noch von Betreiberseite für alle Kraftwerke in Deutschland vor. Eine Ausnahme bilden dabei die Betreiber der Kernkraftwerke, die seit 1975 verpflichtet sind, Störfälle und sonstige Ereignisse zentralen Aufsichtsbehörden zu melden (BFS 2006, S. 1). Zudem veröffentlicht das Deutsche Atomforum e. V. (Deutsches Atomforum) Leistungsreduktionen der Kernkraftwerke, allerdings erst bei Leistungseinschränkungen > 10 % der Gesamtkraftwerksleistung bzw. bei solchen, die länger als 24 h andauern (DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. 1999-2007; ATW2008). Grund für das Fehlen umfassender Angaben zu Ausfällen bzw. Leistungsreduktionen der KTKW ist, dass diese Daten spätestens seit der Liberalisierung des europäischen Strommarktes 1997 für die Kraftwerksbetreiber wettbewerbsrelevante Informationen darstellen (SCHEIDT 2002, S. 82).

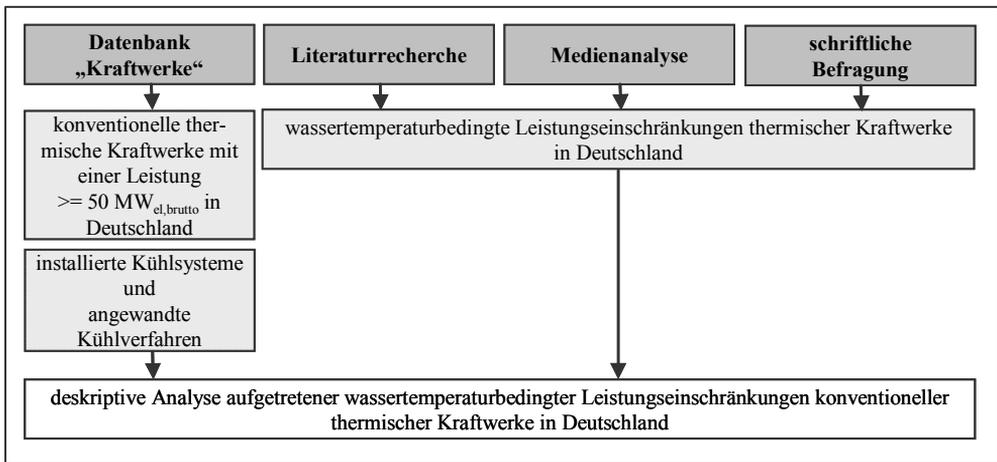


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Vorgehens der Untersuchung der WT-LE bei KTKW in Deutschland.

Um dennoch eine möglichst umfassende Übersicht über den Park der KTKW, deren installierten Kühlsysteme und WT-LE in Deutschland zu erhalten, wurden erstens Informationen aus verschiedenen Quellen zum Kraftwerkspark recherchiert und in der Datenbank „Kraftwerke“ erfasst (vgl. Abschnitt 4.1.1). Diese wurde zweitens um Informationen des Deutschen Atomforums (1998-2007) über WT-LE deutscher Kernkraftwerke im Zusammenhang mit wasserrechtlichen Auflagen erweitert (vgl. Abschnitt 4.1.2). Mittels einer Medienanalyse wurden drittens weitere WT-LE bei KTKW identifiziert (vgl. Abschnitt 4.1.3). Um die Datenbank, Literaturrecherche und Medienanalyse sowohl bezüglich der Kraftwerks- und Kühlsystemangaben als auch bezüglich der WT-LE bei KTKW zu ergänzen, wurde viertens eine schriftliche Befragung bei Kraftwerksbetreibern durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.1.4). Alle Kraftwerke in der Datenbank „Kraftwerke“ sowie die durch die Literaturrecherche, die Medienanalyse und die schriftliche Befragung identifizierten WT-LE der KTKW wurden anschließend deskriptiv ausgewertet (vgl. Abschnitt 4.1.5). Abbildung 13 gibt einen Überblick über das Vorgehen bei der Untersuchung WT-LE bei KTKW in Deutschland.

#### 4.1.1 Datenbank des konventionellen thermischen Kraftwerksparks mit installierten Kühlsystemen

Beim Vergleich unterschiedlicher Quellen zu den KTKW in Deutschland wurde festgestellt, dass diese weder bezüglich der Anzahl der Kraftwerke oder der angegebenen Kraftwerksleistung übereinstimmen, noch dass umfangreiche Informationen zu den jeweils installierten Kühlsystemen vorliegen. Aus diesem Grund wurde eine eigene Datenbank „Kraftwerke“ erstellt, die auf mehreren Quellen basiert und kraftwerksspezifische Informationen zur Leistung, zum Energieträger, zum Jahr, in dem die KTKW ans Netz gingen, zum installierten Kühlsystem und angewandten Kühlverfahren beinhaltet. Im Folgenden werden die Quellen und die Datenbankstruktur beschrieben.

Ziel war es, möglichst alle konventionellen thermischen Kraftwerke in Deutschland mit einer elektrischen Bruttoleistung  $\geq 50 \text{ MW}^{12}$  in eine Datenbank aufzunehmen. Somit sollten alle Kraftwerke mit einer möglichen indirekten Kühlung erfasst werden, deren Betrieb durch hohe WT eingeschränkt werden könnte (vgl. Abschnitt 2.1.1.3). Um dies zu erreichen, wurde in mehreren Rechenschritten vorgegangen, die nachfolgend beschrieben werden und in Abbildung 14 als Schaubild dargestellt sind.

Im ersten Schritt wurden aus der „Utility Data Institute (UDI) World Electric Power Plants Data Base“ (WEPP) der Firma Platts UDI Products Group (Platts) alle deutschen KTKW extrahiert. Bezugsjahr ist hierbei 2006, wobei Platts keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit der Datenbank erhebt (PLATTS UDI PRODUCTS GROUP 2007). Die nach einzelnen Blöcken aufgeführten Kraftwerke wurden jeweils zu einem Kraftwerksstandort mit einer Gesamtbruttoleistung zusammengefasst. Eine Ausnahme bildeten hierbei die Blöcke der Kernkraftwerke. Diese wurden aufgrund ihrer hohen Leistung jeweils getrennt voneinander in der Datenbank aufgeführt. Grund für die Verwendung der WEPP war, dass ausschließlich in dieser Datenbank Informationen zu installierten Kühlsystemen vorlagen – wenn auch nicht vollständig. Neben diesen gingen Informationen zur Brutto-, Netto- und thermischer Leistung, zur Anzahl der Blöcke, zum Kraftwerksnamen, -betreiber, -standort, Lastbereich, Jahr der Inbetriebnahme und zu Kraftwerksgesellschaftern sowie zu den Energieträgern in die eigens angelegte Datenbank „Kraftwerke“ ein.

Im zweiten Schritt wurden diese Angaben mit der „Datenbank Kraftwerke in Deutschland – Liste der sich in Betrieb befindlichen Kraftwerke bzw. Kraftwerksblöcke ab einer elektrischen Bruttoleistung von 100 MW“ des UBA (UBA-Liste) verglichen und ergänzt. Das Bezugsjahr der UBA-Liste ist 2008 (UBA 2008a). Postleitzahl und Ort des Kraftwerks wurden ebenfalls der UBA-Liste entnommen. Bereits bei diesem Vergleich stellte sich heraus, dass sich die Angaben bezüglich der Kraftwerksnamen und der -betreiber sowie der Brutto- und Nettoleistung teils voneinander unterscheiden. Ebenso sind in der WEPP gegenüber der UBA-Liste nicht alle Kraftwerke aufgeführt.

Im dritten Schritt wurde daher das „Jahrbuch der Europäischen Energie- und Rohstoffwirtschaft 2008“ (JEER) ergänzend herangezogen (MELLER et al. 2008). In diesem sind alle Energieversorger

---

<sup>12</sup> Im Folgenden werden konventionelle thermische Kraftwerke mit einer elektrischen Bruttoleistung  $\geq 50 \text{ MW}$  KTKW oder Kraftwerke genannt.

in Deutschland und Informationen bezüglich der Kraftwerksbetreiber, der Standorte sowie der Kraftwerksleistung und -leitung aufgeführt. Diese Informationen wurden – sofern sie zu den einzelnen Kraftwerken verfügbar waren – in die Datenbank „Kraftwerke“ übernommen. Dabei wurden gegebenenfalls die Angaben der WEPP überschrieben, da diese erstens nicht immer die korrekte Schreibweise aufweisen und zweitens die Angaben des JEER neueren Datums sind.

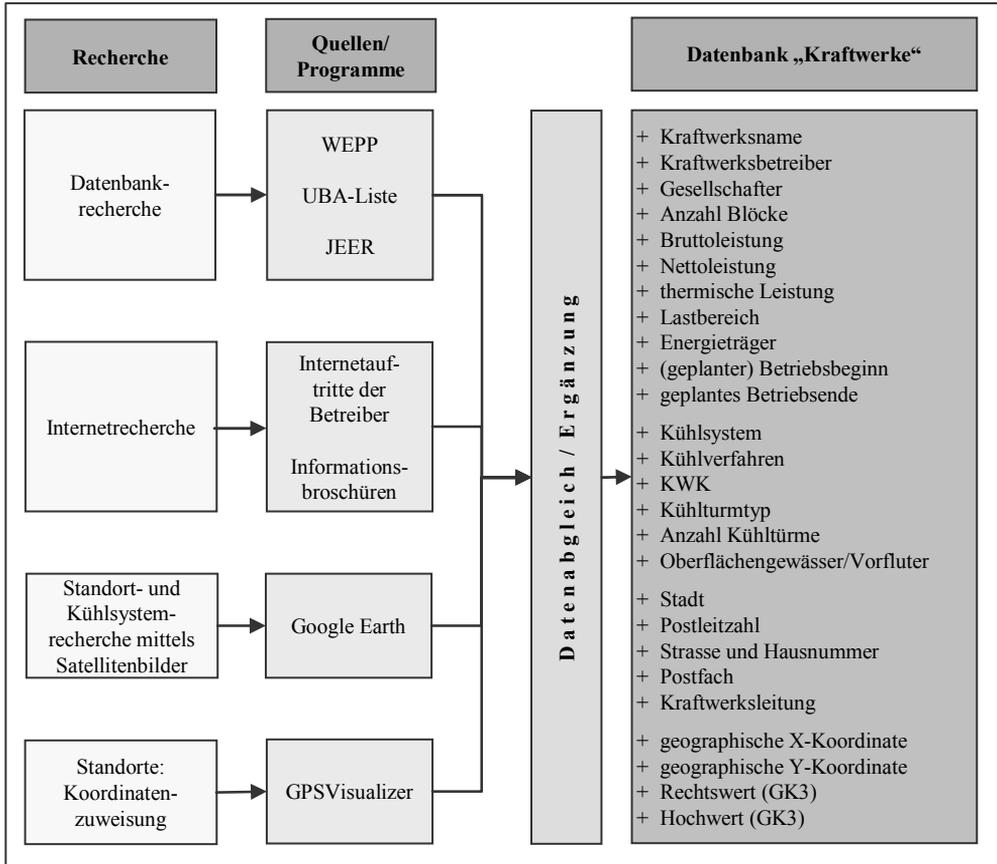


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Datengrundlage und des Vorgehens zur Erstellung der Datenbank „Kraftwerke“.

Nach diesen drei Schritten waren die Angaben zu Kraftwerksnamen, -betreiber, -gesellschafter sowie zur Brutto- und Nettoleistung vollständig. Allerdings fehlten mehrheitlich Informationen zu den installierten Kühlsystemen und zur Anschrift der Kraftwerke bzw. des Betreibers in Hinblick auf die später durchgeführte Umfrage (vgl. Abschnitt 4.1.4) sowie auf eine Verortung in einem Geoinformationssystem (GIS). Daher wurde zusätzlich eine umfassende Recherche auf den Internetseiten der Kraftwerksbetreiber und in Informationsbroschüren durchgeführt. Neben den Angaben über die installierten Kühlsysteme, -türme, -verfahren und/oder über die Nutzung der KWK

wurden die Adressen und Kraftwerksleiter als Ansprechpartner für die später durchgeführte schriftliche Befragung (vgl. Abschnitt 4.1.4) in die Datenbank „Kraftwerke“ aufgenommen. Zudem wurden im Internet und in den Informationsbroschüren alle verfügbaren Angaben über die Kraftwerke mit denen der Datenbank „Kraftwerke“ überprüft. Bei fehlenden Angaben in der Datenbank „Kraftwerke“ oder Abweichungen wurden jeweils die Angaben der Kraftwerksbetreiber übernommen.

Da auf den Internetseiten der Kraftwerksbetreiber ebenfalls keine vollständigen Informationen zu den Kühlsystemen vorliegen, wurden unter Verwendung der Satellitenbilder des Programms Google® Earth alle Kraftwerksstandorte auf installierte Kühltürme untersucht (GOOGLE INC. 2010). Die Anzahl der Kühltürme sowie die -typen wurden – sofern sie zugeordnet werden konnten – in die Datenbank „Kraftwerke“ aufgenommen. Sofern keine Kühltürme zu erkennen waren, wurde bei den KTKW mit einer Leistung  $> 300 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  die „Durchlaufkühlung“ unter Kühlverfahren eingetragen. Grund hierfür ist die Annahme, dass ab dieser Kraftwerksleistung keine direkte Kühlung installiert wird (vgl. Abschnitt 2.1.1.3). Somit kann bei fehlendem Kühlturm bzw. Zellenkühlern auf eine Durchlaufkühlung geschlossen werden.

Um die Kraftwerksstandorte in einem GIS darstellen zu können, wurden den Adressen mithilfe des „GPS (Global Positioning System) Visualizer's Address Locator“ von SCHNEIDER (2010) geographische Koordinaten zugewiesen. Diese wurden anschließend in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem, dritter Meridianstreifen (GK3) umgerechnet und in die Datenbank „Kraftwerke“ aufgenommen. Da der Betrachtungszeitraum der vorliegenden Arbeit bis 2100 reicht, wurden die oben beschriebenen Angaben zusätzlich – soweit in Informationsbroschüren von Instituten und Behörden sowie auf den Internetseiten der Betreiber verfügbar – für die in Bau befindlichen und geplanten Kraftwerke in die Datenbank „Kraftwerke“ aufgenommen. Sofern detaillierte Adressangaben nicht verfügbar waren, wurden die Koordinaten auf die jeweiligen Städte und dort auf bestehende Kraftwerksstandorte oder in Flussnähe festgelegt. Dabei lag die Annahme zugrunde, dass auch zukünftig die Kraftwerke Flusswasser zu Kühlzwecken benötigen werden.

Insgesamt enthält die Datenbank „Kraftwerke“ 194 Datensätze zu bestehenden und 49 Datensätze zu in Bau befindlichen bzw. geplanten KTKW. Zudem beinhaltet sie die zwei stillgelegten KKW Obrigheim und Stade. Außerdem sind bestehende und still gelegte KTKW der ehemaligen Hamburgische Electricitäts-Werke AG (HEW), heute Vattenfall Europe AG, in einem Datensatz zusammengefasst. Grund für die Aufnahme der Kraftwerke Stade, Obrigheim und der Kraftwerksgruppe der HEW ist, dass diese in der anschließenden Literaturrecherche und Medienanalyse als Kraftwerke bzw. Kraftwerksstandorte mit WT-LE auftreten (vgl. Abschnitt 5.1). Die Datenbank „Kraftwerke“ beinhaltet somit 197 KTKW, die im Folgenden als Gesamtkraftwerkspark (GKP,  $n = 197$ ) der Datenbank „Kraftwerke“ bezeichnet wird. In Tabelle 21 im Anhang I sind die bestehenden und geplanten KTKW der Datenbank „Kraftwerke“ aufgeführt. Um die spätere Auswertung identifizierter WT-LE bei KTKW Informationen zu haben, wie viele KTKW des GPK welche Leistung haben, wann in Betrieb gegangen sind, welchen Energieträger verwenden und welches Kühlsystem bzw. -verfahren installiert haben, wurden die KTKW in entsprechende Gruppen eingeteilt.

#### Einteilung nach elektrischer Bruttoleistung

Nach der elektrischen Bruttoleistung wurden die Kraftwerke in folgende vier Klassen eingeteilt: „ $\geq 50\text{-}100 \text{ MW}$ “, „ $\geq 101\text{-}300 \text{ MW}$ “, „ $\geq 301\text{-}1000 \text{ MW}$ “ und „ $> 1001 \text{ MW}$ “. Die Einteilung dieser Leistungsklassen erfolgte in Anlehnung an VGB POWER TECH E. V. (2006), wobei die mittleren

vier Klassen in zwei zusammengefasst wurden (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). Wie in Abbildung 15 (links) zu sehen, haben die meisten KTKW eine Leistung von  $\geq 101-1000 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$ . Insgesamt liegen zwischen 14,2 % und 35,0 % der KTKW in den einzelnen Leistungsklassen (vgl. Abbildung 15, rechts).

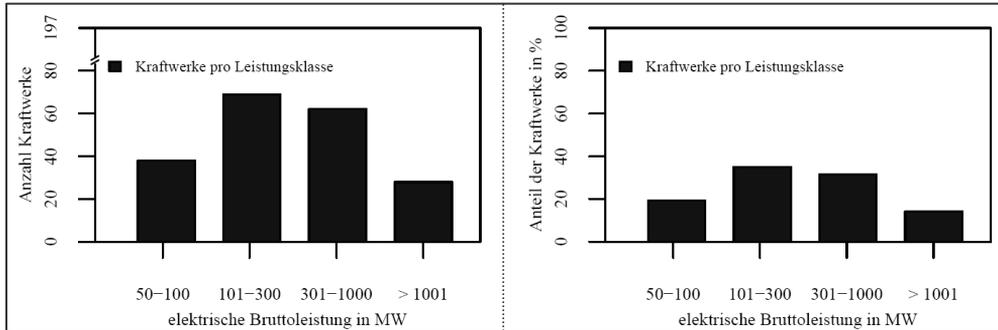


Abbildung 15: Anzahl der KTKW in den Leistungsklassen (links). Anteil der KTKW in den Leistungsklassen am GKP der Datenbank „Kraftwerke“ (rechts). Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“.

### Einteilung nach Betriebsbeginn

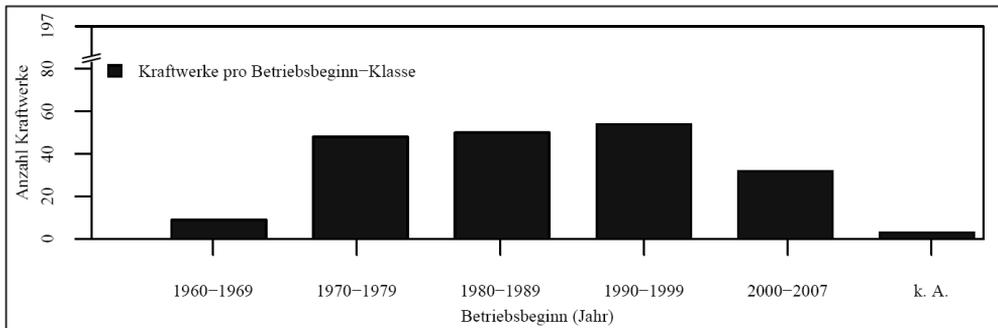


Abbildung 16: Anzahl der KTKW in den Betriebsbeginnklassen. k. A. = keine Angaben. Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“.

Die Einteilung nach Betriebsbeginn erfolgte jeweils in Jahrzehnte beginnend mit den 1960er Jahren: „1960-1969“, „1970-1979“, „1980-1989“, „1990-1999“, „2000-2007“ und „k. A.“. Für die Einteilung der Kraftwerke in die jeweiligen Klassen fand das jüngste Jahr Beachtung, in dem beispielsweise ein Block am Kraftwerk in Betrieb ging. In den drei Dekaden zwischen 1970 und 1999 wurden jeweils 22,8 bis 28,4 % der KTKW des GKP in Betrieb genommen. In jüngerer Zeit gingen 32 KTKW (16,2 % des GKP) zwischen 2000 und 2007 in Betrieb. Am geringsten ist mit 4,1 % der Anteil der KTKW am GKP, die zwischen 1960 und 1969 in Betrieb genommen wurden (vgl. Abbildung 16).

### Einteilung nach Energieträger

Bei der Einteilung der Kraftwerke gemäß Energieträger wurde jeweils der Hauptenergieträger herangezogen. Gewählt wurden folgende Klassen: „Uran“, „Braunkohle“, „Steinkohle“, „Gas“, „Öl“, „Biomasse/Ersatzbrennstoffe/Restmüll“ („Sonstige“) und „keine Angaben“ („k. A.“). In die Klasse „Gas“ fällt sowohl Erdgas, Grubengas als auch Gichtgas. Biomasse, Ersatzbrennstoffe und Restmüll wurden zur besseren Übersicht in eine Klasse zusammengefasst, da die einzelnen Energieträger in deutschen KTKW mit einer Leistung  $\geq 50 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  selten vorkommen. Mit 38,6 % bzw. 31,5 % werden die meisten KTKW des GKP mit dem Energieträger Gas (76) oder Steinkohle (62) betrieben. Mit Abstand folgen mit 10,2 % und 9,6 % Anteil am GKP Braunkohle- und Kernkraftwerke (vgl. Abbildung 17).

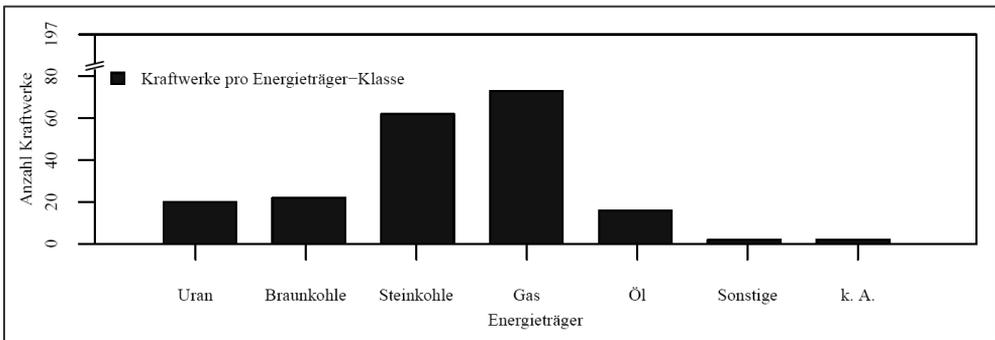


Abbildung 17: Anzahl der KTKW in den Energieträgerklassen. Sonstige = Biomasse/Ersatzbrennstoffe/Restmüll, k. A. = keine Angaben. Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“.

### Einteilung nach Kühlsystem

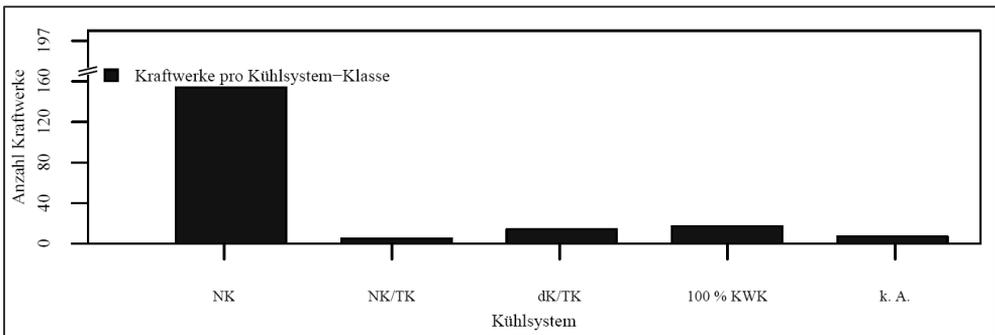


Abbildung 18: Anzahl der KTKW in den Kühlsystemklassen. NK = Nasskühlung, TK = Trockenkühlung, dK = direkte Kühlung (Luftkühlung), 100 % KWK = 100 % KWK (kein Kühlsystem installiert), k. A. = keine Angaben. Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“.

Um zu sehen, wie viele Kraftwerke eine Nass- oder Trockenkühlung installiert haben, wurden die Kraftwerke in die Klassen „Nasskühlung“ („NK“), „Nasskühlung/Trockenkühlung“ („NK/TK“), „direkte Kühlung/Trockenkühlung“ („dK/TK“), „100 % KWK“ und „k. A.“ unterteilt. Wie in Abbildung 18 zu sehen, ist an 80,7 % der KTKW des GKP als Kühlsystem eine Nasskühlung bzw. sowohl eine Nass- als auch Trockenkühlung installiert. Ohne Nasskühlung bzw. ohne Kühlsystem (100 % KWK) werden insgesamt 31 KTKW und damit 15,7 % des GKP betrieben.

### Einteilung nach Kühlverfahren

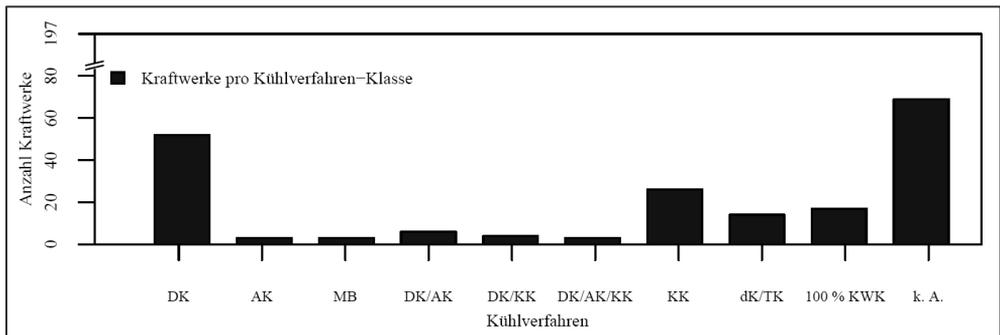


Abbildung 19: Anzahl der KTKW in den Kühlverfahrensklassen. DK = Durchlaufkühlung, AK = Ablaufkühlung, MB = Mischbetrieb, KK = Kreislaufkühlung, dK/TK = direkte Kühlung (Luftkühlung)/Trockenkühlung, 100 % KWK = 100 % Kraft-Wärme-Kopplung, k. A. = keine Angaben. Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“.

Die Einteilung der Kraftwerke nach Kühlverfahren fand geordnet nach der Größe der Wärmeabgabe bzw. nach der Höhe der Sensitivität bezüglich hoher WT in Zusammenhang mit wasserrechtlichen Grenzwerten statt: „Durchlaufkühlung“ („DK“), „Ablaufkühlung“ („AK“), „Mischbetrieb“ („MB“), „Durchlaufkühlung/Ablaufkühlung“ („DK/AK“), „Durchlaufkühlung/Kreislaufkühlung“ („DK/KK“), „Durchlaufkühlung/Ablaufkühlung/Kreislaufkühlung“ („DK/AK/KK“), Kreislaufkühlung („KK“), „direkte Kühlung/Trockenkühlung“ („dK/TK“), „100 % KWK“ (kein Kühlsystem installiert) und „k. A.“. Die Klassen mit verschiedenen Kühlverfahren (z. B. „DK/AK“, „DK/AK/K“) an einem Kraftwerksstandort sind darin begründet, dass je nach Kraftwerksstandort mehrere Blöcke zusammengefasst wurden (vgl. Abschnitt 4.1.1). An den einzelnen Blöcken kann jeweils ein eigenes Kühlsystem installiert sein, bzw. ein eigenes Kühlverfahren angewandt werden. Für die Klasse „100 % KWK“ ist zu beachten, dass zwar der Großteil der anfallenden Abwärme bei 100 %-iger KWK über ein Nah-, Fern- oder Prozesswärmenetz abgeführt werden kann. Ein Teil der Abwärme muss jedoch nach wie vor über ein Kühlsystem abgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.1.1.2).

33 % der KTKW des GKP werden ausschließlich mit Durchlaufkühlung (DK) oder mit DK in Kombination mit einer Ablauf- (AK), Kreislaufkühlung (KK) oder mit einem Mischbetrieb (MB) betrieben. An 13,2 % des GKP wird die KK angewandt. Zu 69 Kraftwerken (35 % des GKP) liegen keine Angaben über das Kühlverfahren vor (vgl. Abbildung 19).

#### 4.1.2 Literaturrecherche

Wie zu Beginn des Abschnitts 4.1 beschrieben, stehen in Deutschland öffentlich zugängliche Informationen zu WT-LE lediglich für die Kernkraftwerke in den Jahresberichten des Deutschen Atomforums sowie der atw - Internationalen Zeitschrift für Kernenergie (atw) zur Verfügung. Dort sind Leistungseinschränkungen aufgeführt, die größer als 10 % der Kraftwerksleistung betragen bzw. länger als 24 h andauern. Die Jahresberichte wurden – soweit zurückliegend verfügbar – für die Jahre 1998 bis 2007 ausgewertet (DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. 1999-2007; ATW – INTERNATIONALE ZEITSCHRIFT FÜR KERNENERGIE 2008).

#### 4.1.3 Medienanalyse

Um die Angaben zu den durch die Literaturrecherche identifizierten WT-LE bei Kernkraftwerken zu ergänzen, wurde auf die Methode einer Medienanalyse zurückgegriffen. Grund für die Wahl der Methode einer Medienanalyse ist, dass hohe WT über einen längeren Zeitraum insbesondere während Hitzeperioden wie beispielsweise im Sommer 2003 auftreten. Diese Zeit fällt auf die politische Sommerpause, sodass vermehrt über nicht-politische Themen in den Medien berichtet wird. So stellten LUKAS & WELP (2003) in ihrer Studie über den „Umgang der Printmedien mit extremen Wetterereignissen – am Beispiel der Hitzewelle 2003“ fest, dass sich in neun überregionalen großen deutschen Zeitungen 25 % aller Artikel mit Waldbränden befassen. Fast genauso häufig wurde über die „...Beeinträchtigungen der Atomkraftwerke durch die Hitze...“ berichtet (LUKAS & WELP 2003, S. 35). Im Folgenden werden das Vorgehen der Medienanalyse und die Datengrundlage beschrieben.

Tabelle 9: Verwendete Suchbegriffe in der Zeitschriften- und Zeitungsrecherche.

<b>Kraftwerke</b>	<b>Kühlsystem</b>	<b>Wasser</b>	<b>Wetter / Witterung / Klima</b>
(thermische) Kraftwerke	Kraftwerkskühlung	Wasserentnahme	Großwetterlage
Atom- bzw. Kernkraftwerke	Kühlturm	Wassereinleitung	Hitzeperiode
Kohlekraftwerke	Grundwasser	Einleitung	Witterung
Steinkohlekraftwerke	Kühlprozess	max. Einleittemperatur	Wetter
Braunkohlekraftwerke	Kühlsystem	Mischtemperatur	Extremwetterlage
Meiler	Kühlung	Wassertemperatur	hitzebedingt
Gas- und Dampfkraftwerke		Flusstemperatur	
Reduktion		Grenzwerte	
Auflagen		Grundwasser	
genehmigungsbedingt			
Genehmigungen			
Leistungsreduktionen			
herunterfahren			
Drosselung			

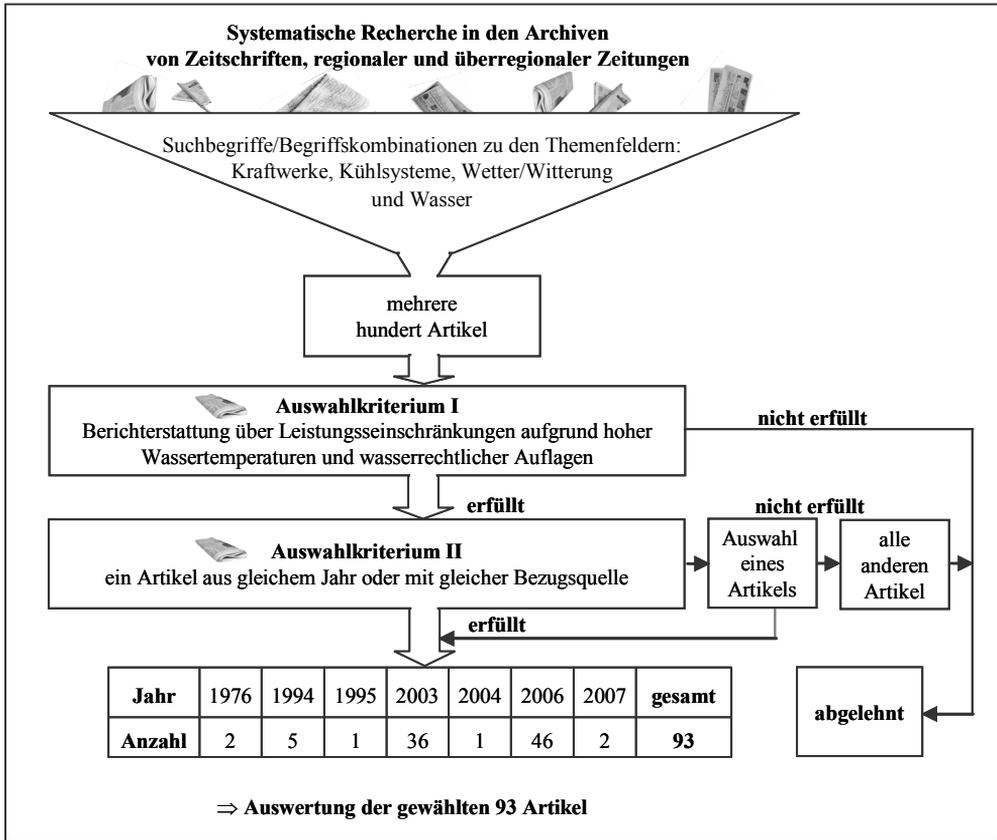


Abbildung 20: Auswahlverfahren und Ergebnis der Artikelrecherche.

Die Medienanalyse basiert auf einer umfassenden systematischen Archivrecherche großer deutscher Zeitschriften und nationaler sowie regionaler Wochen- und Tageszeitungen (z. B. Focus, Spiegel, Süddeutsche Zeitung (SZ), Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ) etc.). Die Recherche umfasste Artikel aus den Jahren 1976 bis 2007. Dazu wurde MEIER KRUKER & RAUH (2005) folgend zunächst eine quantitative Textanalyse durchgeführt. Anschließend wurden themenrelevante Suchbegriffe zu KTKW, zur Kraftwerkskühlung, zu Wasser, zum Wetter und zur Witterung aufgelistet. Die in Tabelle 9 dargestellten Suchbegriffe in der Kategorie „Kraftwerke“ wurde für die systematische Recherche jeweils mit den Begriffen der Kategorien „Kühlsystem“, „Wasser“ und „Wetter/Witterung/Klima“ kombiniert (MEIER KRUKER & RAUH 2005, S. 79f). So konnte gezielt, systematisch und belastbar nach relevanten Artikeln zu WT-LE der KTKW gesucht werden.

Insgesamt standen nach der Recherche mehrere hundert Artikel zur Verfügung. Für die Auswertung der Medienrecherche wurden anschließend jene Artikel ausgewählt, in denen über eine WT-LE in dem Jahr berichtet wurde, in dem der Artikel erschienen war. Artikel verschiedener Zeitungen mit identischer Bezugsquelle wie beispielsweise der Deutschen Presseagentur (DPA) und demselben Inhalt gingen dabei jeweils nur einmal in die Medienanalyse ein. Nach dieser Auswahl

umfasste die Medienanalyse insgesamt 93 Artikel, aufgeteilt auf sieben Jahre zwischen 1976 und 2007. Abbildung 20 zeigt schematisch das Auswahlverfahren der Artikel.

#### 4.1.4 Schriftliche Befragung der Betreiber konventioneller thermischer Kraftwerke

Ziel der Befragung war es erstens, für die Datenbank „Kraftwerke“ ergänzende Informationen zu den KTKW bezüglich der Kühlsysteme und -verfahren, eines möglichen KWK-Betriebs sowie dem Standort und Vorfluter zu erhalten. Zweitens hatte die Befragung zum Ziel, WT-LE in ihrer Höhe und Dauer in der Vergangenheit zu identifizieren. Somit wurde die Befragung als Ergänzung zu den Angaben in den Jahresberichten des Deutschen Atomforums sowie zur Medienanalyse durchgeführt. Drittens diente sie dazu, Zeitreihen der direkt am Kraftwerk vor der Wasserentnahme gemessenen WT von den Kraftwerksbetreibern für WT-Analysen zu erhalten. Im Folgenden werden der Aufbau des Fragebogens, das Vorgehen der Umfrage sowie die Datengrundlage beschrieben.

Erfahrungen während der Projektarbeit zum Thema „Einfluss des Klimawandels auf die Elektrizitätswirtschaft“ am EIFER in Zusammenarbeit mit einem großen deutschen Energieversorgungsunternehmen hatten gezeigt, dass das Thema WT und WT-LE für Kraftwerksbetreiber ein höchst sensibles Thema ist. Um dennoch über die Datenbank „Kraftwerke“ hinausgehende bzw. zusätzliche Informationen über die Kraftwerke, deren installierte Kühlsysteme und mögliche aufgetretene WT-LE zu erhalten, wurde als geeignete Methode die Form der schriftlichen standardisierten Befragung gewählt. Die Gründe für die Auswahl dieser Art der Befragung waren, dass dadurch erstens gewährleistet war, dass die Kraftwerksbetreiber in Ruhe über eine Informationsweitergabe und deren Umfang ohne Einfluss des Interviewers entscheiden konnten. Zweitens wurden somit bei jedem Kraftwerksbetreiber dieselben Informationen abgefragt, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit der Antworten gegeben ist. Drittens erlaubte die Abfrage ausschließlich technischer, kraftwerksspezifischer Daten und Fakten die standardisierte Form der Befragung. Und viertens waren persönliche Interviews mit allen Kraftwerksbetreibern in Deutschland aufgrund der Vielzahl und räumlichen Verteilung aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich.

Die schriftliche Befragung wurde im April 2008 durchgeführt. Dabei diente die Datenbank „Kraftwerke“ mit 194 bestehenden KTKW als Grundlage. Bei der Datenbank kann von einer vollständigen Erfassung aller bestehenden Kraftwerke ausgegangen werden. Dementsprechend wurde nach KIRCHHOFF et al. (2006) eine Totalerhebung durchgeführt (KIRCHHOFF et al. 2006, S. 15). In einem Anschreiben richtete sich die Umfrage persönlich an den Kraftwerksleiter, den technischen Leiter oder Geschäftsführer. Ziel dabei war, dass der Fragebogen möglichst auf direktem Weg zum höchsten Entscheidungsträger gelangte. Somit sollte gewährleistet werden, dass relativ zügig über die Bearbeitung und Rücksendung des Fragebogens entschieden werden konnte. Auf dem Anschreiben wurde das vorliegende Forschungsthema und die Motivation für die Befragung sowie die Auswahl der Kraftwerke für die Befragung vorgestellt. Zudem wurde aufgrund des sensiblen Themas darauf hingewiesen, dass die Daten anonym behandelt werden (MEIER KRUKER & RAUH 2005, S. 102; KIRCHHOFF et al. 2006, S. 29).

Neben dem Anschreiben wurde ein Fragebogen mit vier Themenblöcken erstellt (vgl. Abbildungen 65-68 im Anhang I). Der erste und zweite Block diente zur Hinführung an die zentralen Fragen des dritten und vierten Blocks. Im ersten Block wurden nicht sensible, öffentlich zugängliche Daten zum Kraftwerk abgefragt wie z. B. die Höhe der Brutto- und Nettoleistung, die Anzahl der Blöcke und der verwendete Energieträger. Der zweite Block richtete sich auf Informationen zum

installierten Kühlsystem. Sofern beim befragten Kraftwerk eine direkte Kühlung, eine indirekte Trockenkühlung oder eine KWK zu 100 % der Zeitverfügbarkeit vorlag, wurde der Befragte mit einem Vermerk darauf hingewiesen, dass die Befragung an dieser Stelle beendet war. In allen anderen Fällen wurden Informationen zu Kühltürmen, zum Vorfluter sowie zum Kühlwasser selbst wie Einleittemperatur etc. abgefragt. Der Hauptteil des Fragebogens wurde im dritten Themenblock abgehandelt: Hier ging es um Informationen zu standortbezogenen, wasserrechtlichen Grenzwerten, zu aufgetretenen Leistungseinschränkungen aufgrund hoher WT sowie um die Frage, ob ein neues Kühlsystem in Bau oder Planung ist. Ziel des vierten Themenblocks war, am Kraftwerk gemessene WT-Zeitreihen zu erhalten. Insgesamt umfasste der Fragebogen 17 sowohl geschlossene Fragen bzw. Faktfragen (z. B. Kühlsystem), bei denen die Antwortmöglichkeiten vorgegeben waren, als auch solche Fragen ohne Vorgaben von Antwortmöglichkeiten, d. h. offene Fragen (z. B. aufgetretene Leistungseinschränkungen).

Vor dem Versand wurde der Fragebogen einem Pre-Test durch Experten der Elektrizitätswirtschaft bei EIFER unterzogen. Bei Bedarf wurden die Fragen bezüglich einer besseren Verständlichkeit und bezüglich der Präzision angepasst (MEIER KRUKER & RAUH 2005, S. 91f; KIRCHHOFF et al. 2006, S. 20, 25f).

Insgesamt antworteten 68 Kraftwerksbetreiber, was einer Rücklaufquote von 34,5 % aller Kraftwerke der Datenbank „Kraftwerke“ entspricht. Prozentual am höchsten war der Rücklauf bei kleinen Kraftwerken mit einer elektrischen Bruttoleistung zwischen 50 und 100 MW (42,1 %), gefolgt von den Kraftwerksklassen, „> 1000 MW“ (35,7 %), „101-300 MW“ (34,7 %) und „301-1000 MW“ (28,8 %). Absolut wurden die meisten Fragebögen von den Kraftwerken mit einer Leistung zwischen 101 und 300 MW<sub>el,brutto</sub> (25) und die wenigsten von den Großkraftwerken mit einer Leistung > 1000 MW<sub>el,brutto</sub> (10) zurückgesandt (vgl. zur Einteilung der KTKW in Leistungsklassen Abschnitt 4.1.5).

#### 4.1.5 Deskriptive Auswertung

Im ersten Schritt wurden die 93 in der Medienanalyse ausgewählten Artikel nach MEIER KRUGER & RAUH (2005) in Form einer Auszählung bezüglich der WT-LE bei KTKW ausgewertet (MEIER KRUKER & RAUH 2005, S. 80). Eine qualitative Auswertung und Interpretation der Texte fand dabei nicht statt.

Im zweiten Schritt wurden die durch die Literaturrecherche (vgl. Abschnitt 4.1.2) und Medienanalyse (vgl. Abschnitt 4.1.3) identifizierten KTKW mit WT-LE jeweils tabellarisch nach den Jahren, in denen die WT-LE auftraten und nach den Flüssen, an dem die KTKW mit WT-LE stehen, dargestellt. Zudem wurden der Umfang der WT-LE jeweils absolut in MW<sub>el,brutto</sub> und in Relation zur Gesamtkraftwerksleistung sowie der Zeitraum der WT-LE in Tabellenform aufgeführt (vgl. Abschnitt 5.1).

Im dritten Schritt wurden die zurückgesandten Fragebögen der schriftlichen Befragung bezüglich der WT-LE und Kühlsysteme- bzw. -verfahren der KTKW ausgewertet. Um die Anonymität der Kraftwerksbetreiber zu gewährleisten, die an der schriftlichen Befragung teilgenommen hatten, wurden die Ergebnisse der schriftlichen Befragung nicht gesondert tabellarisch aufgeführt.

Die durch die Literaturrecherche, Medienanalyse und schriftlichen Befragung identifizierten WT-LE wurden den jeweiligen KTKW-Datensätzen in der Datenbank „Kraftwerke“ zugewiesen. Sofern die Informationen in den Fragebögen angegeben worden waren, wurden die Datensätze der KTKW zusätzlich um die Angaben zu Kraftwerksleistung, zum installierten Kühlsystem und zum Kühlverfahren ergänzt.

Im letzten Schritt wurden die Ergebnisse der Literaturrecherche, Medienanalyse und schriftlichen Befragung deskriptiv bezüglich des GKP der Datenbank „Kraftwerke“ ausgewertet. Dazu wurde die Einteilung der KTKW des GKP nach Leistung, Betriebsbeginn, Energieträger, Kühlsystem bzw. -verfahren herangezogen (vgl. Abschnitt 4.1.1). Durch die Zusammenfassung der Ergebnisse blieb die Anonymität der Kraftwerksbetreiber gewahrt, die an der schriftlichen Befragung teilnahmen. Für die durch die drei Analysen identifizierten KTKW mit WT-LE wurde die Anzahl

- in den einzelnen Klassen der Gruppen „Leistung“, „Betriebsbeginn“, „Energieträger“, „Kühlsystem“ und „Kühlverfahren“ absolut und
- im Verhältnis zu allen Kraftwerken in der Datenbank „Kraftwerke“,
- im Verhältnis zur Anzahl der Kraftwerke in der jeweiligen Klasse,
- absolut pro Jahr,
- absolut pro Fluss sowie
- im Verhältnis zur Anzahl der Kraftwerke am jeweiligen Fluss

ermittelt. Ein Kraftwerk, welches nach mehr als einer der drei Analyseverfahren für denselben Zeitraum eine WT-LE aufweist, wurde jeweils nur einmal gezählt. Die Auswertungen aller Kraftwerke in der Datenbank „Kraftwerke“ sowie der durch die drei Analysen identifizierten WT-LE bei KTKW waren damit abgeschlossen. Im Folgenden wird das Vorgehen der Analysen der Entwicklung rezenter WT-Zeitreihen erläutert.

#### 4.2 Analyse rezenter Wassertemperaturzeitreihen deutscher Flüsse

Dieser Abschnitt umfasst das Vorgehen der Untersuchung, ob und wie sich die WT ausgewählter Flüsse in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten (rezent) verändert haben. Dazu wird in Abschnitt 4.2.1 das Auswahlverfahren der WT-Zeitreihen beschrieben. Ferner werden die Charakteristika der Flüsse, an denen die Messstationen liegen, vorgestellt. Anschließend werden das Vorgehen der Datenaufbereitung dargestellt (vgl. Abschnitt 0), bevor in den Abschnitten 4.2.3 und 4.2.4 die statistischen Methoden der Trendanalyse sowie der Häufigkeitsanalyse extremer Werte erläutert werden. Das Schaubild in Abbildung 21 gibt einen Überblick über die genannten Schritte.

Die Analyseergebnisse der Datenaufbereitung finden sich im Folgenden z. T. graphisch aufbereitet. Da jedoch aus Platzgründen nicht für jeweils alle 72 Zeitreihen die Ergebnisse in Graphiken im Text gezeigt werden können, werden die Ergebnisse anhand von Beispielstationen herausgegriffen. Soweit nicht anders vermerkt, sind die Ergebnisse der Datenaufbereitung jeweils mit den übrigen Zeitreihen vergleichbar und in den im Text angegebenen Abbildungen im Anhang II zu finden.

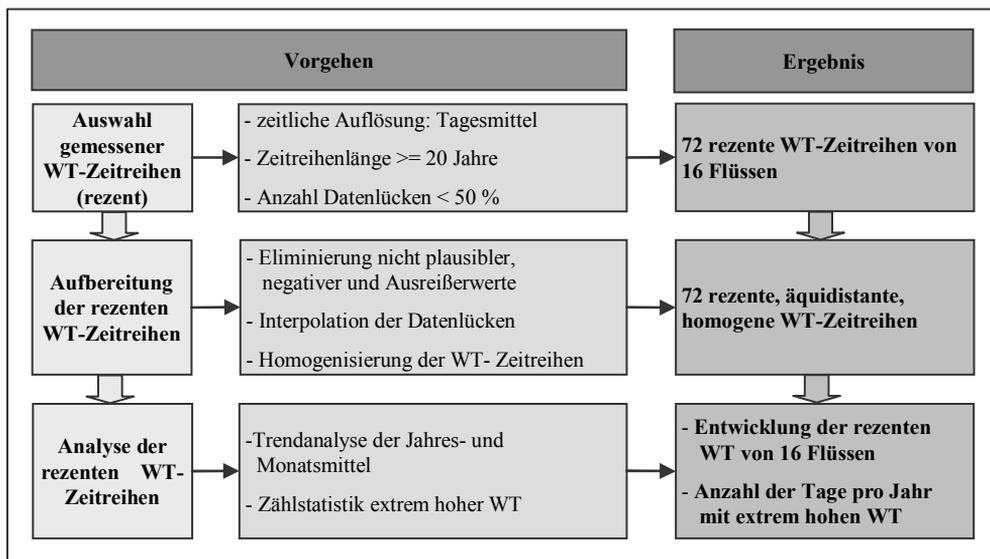


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Analyse rezenter WT-Zeitreihen.

#### 4.2.1 Auswahl der Wassertemperaturzeitreihen und Charakterisierung der Flüsse

Wassertemperaturen von Flüssen werden in Mittel- und Nordeuropa vor allem zur Überwachung niedriger Temperaturen wegen einer möglichen Vereisung gemessen (SMITH 1972, S. 211; WEBB & NOBILIS 1997, S. 138). Ein weiterer Grund der Messung ist die Überwachung der Wasserqualität von Flüssen (vgl. Abschnitt 2.1.2.1). In Deutschland begann eine systematische Erfassung der WT von Flüssen erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (BERGEMANN 2006).

WT-Daten wurden bei Umweltlandesämtern, Flussgebiets- und Arbeitsgemeinschaften größerer Flüsse, Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSA), bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) sowie im Rahmen der schriftlichen Befragung bei Kraftwerksbetreibern (vgl. Abschnitt 4.1.4) angefragt. Die Auswahl der für die Analysen geeigneten Zeitreihen aus den 188 erhaltenen Zeitreihen fand anhand folgender vier Kriterien statt:

1. Tagesmittel aus regelmäßig und über den Tag verteilt mehrmals gemessenen Temperaturwerten oder Stundenmittel verfügbar;
2. Zeitreihenlänge nach RAPP & SCHONWIESE (1996) größer bzw. gleich 20 Jahre (RAPP & SCHONWIESE 1996, S. 133);
3. Stationen wenn möglich räumlich vor und nach konventionellen thermischen Kraftwerken mit einer Leistung  $\geq 50 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$ ;
4. zweitrangig, Stationen an Flüssen ohne Kraftwerksstandorten.

Um die Analyseergebnisse später vergleichen zu können, wurde gleichzeitig geprüft, dass jeweils der Januar der erste und der Dezember der letzte Monat einer Zeitreihe ist. Gegebenenfalls wurden

die Zeitreihen entsprechend gekürzt. Eine Ausnahme bildet hierbei die der Station „Erln“ an der Mulde mit dem November als ersten und Oktober als letzten Monat, da die Zeitreihenlänge ansonsten weniger als 20 Jahre betragen hätte. Die nach diesen Kriterien ausgewählten 72 WT-Zeitreihen sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Die Reihenfolge entspricht der Lage der Messstationen am Fluss jeweils von der Quelle bis zur Mündung sowie nach den 16 Flüssen von Süd- über Nord- nach Ostdeutschland. Zwei der Zeitreihen stammen von Kraftwerksbetreibern. Um deren Anonymität zu wahren (vgl. Abschnitt 4.1.4), wurde die Herkunft der Daten den jeweiligen Quellen der WT-Zeitreihen der benachbarten Stationen zugewiesen.

116 der 188 Zeitreihen lagen zumeist in einer Länge von nur wenigen Jahren vor, so dass erstens statistische Auswertungen keine Aussage über mögliche klimawandelbedingte Trends in den Temperaturzeitreihen zulassen würden (RAPP & SCHÖNWIESE 1996, S. 133), und zweitens nach PETERSON & VOSE (1997) die Durchführung relativer Homogenitätstests nicht möglich wäre (vgl. Abschnitt 4.2.2.2) (PETERSON & VOSE 1997, S. 2841). Ein weiterer Grund für den Ausschluss von Zeitreihen ist in der Regelmäßigkeit der verfügbaren Messungen zu sehen. Vor allem in Nordrhein-Westfalen wurden bzw. werden WT zwar an vielen Stationen, jedoch nur zufällig oder sporadisch gemessen. Diese sind nach PILGRIM et al. (1998) für Analysen nicht brauchbar, da die WT im Tagesverlauf stark schwanken, und Einzelmessungen somit nicht repräsentativ für das Tagesmittel sind. Des Weiteren wurden Zeitreihen ausgeschlossen, in denen mehr als 50 % der Daten fehlen (PILGRIM et al. 1998, S. 1110, 1112).

Abbildung 22 zeigt die räumliche Verteilung der ausgewählten Messstationen und die Standorte der 197 Kraftwerke mit einer Leistung  $\geq 50 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$ . Die dunkelgrauen Linien stellen die 16 Flüsse dar, an denen die 72 WT-Stationen liegen. Die Flusscharakteristika bezüglich der Quelle, der Länge, des Einzugsgebiets, der Abflusseigenschaften und wasserbauliche Eingriffe sind in Tabelle 11 dargestellt. Bezüglich des Abflussregimes lassen sich die Flüsse wie folgt einteilen: Während die Isar im Voralpenland nivo-pluvial<sup>13</sup> geprägt ist, sind die Donau, der Oberrhein und die Flüsse, die den Mittelgebirgen entspringen, dem komplexen pluvo-nivalen<sup>14</sup> Abflussregime zugeordnet. Die Oder weist mit einem pluvo-nivalen Abflussregime zusätzlich im Winter längere Vereisungsperioden auf. Die Flachlandflüsse wie Mittel- und Niederrhein und die Mittel- und Unterläufe der Ems, Weser und Elbe gehören dem pluvialen Abflussregime an (vgl. Abschnitt 2.2.1). Zumindest in den Mittel- und Unterläufen sind alle Flüsse durch wasserbauliche Maßnahmen wie Begradigungen, Eindeichungen, Wehre, Wasserkraftwerke etc. beeinflusst. Vor allem der Neckar und die Spree weisen dabei einen stark regulierten Abfluss auf (REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART2005, S. 11; BUND 2010, S. 1). Die wasserbaulichen Maßnahmen beeinflussen das Abflussregime, welches sich neben der LT und den Wärmeeinleitungen thermischer Kraftwerke auf das WT-Regime der Flüsse auswirkt (vgl. Abschnitt 2.2).

---

<sup>13</sup> Bei einem nivo-pluvialen Regime existiert ein Hauptmaximum des Abflusses durch die Schneeschmelze und ein Nebenmaximum durch Regen.

<sup>14</sup> Bei einem pluvo-nival Regime existiert ein Hauptmaximum des Abflusses durch Regen und ein Nebenmaximum durch die Schneeschmelze.

Tabelle 10: Übersicht über die WT-Zeitreihen der 72 Messstationen. Nr. = Zeitreihennummer, Auflösung = zeitliche Auflösung, RW = Rechtswert GK3, HW = Hochwert GK3, Höhe = Höhe in Meter über Normalnull (NN), Quelle = Datenherkunft, WUK = Wasseruntersuchungs- und -kontrollstationen.

Nr.	WT-Station	WT-Zeitreihe	Fluss	Beginn	Ende	Auflösung	RW	HW	Höhe	Quelle
1	Lenggries	Lenggries	Isar	01.01.1981	31.12.2006	TM	3693176	5286060	670	LfU
2	München-Bogenhausen	Muenchen	Isar	01.01.1981	31.12.2006	TM	3693319	5337431	508	LfU
3	Landshut	Landshut_Regensburg	Isar	01.01.1981	31.12.2006	TM	3731495	5381400	388	LfU
4	Immendingen	Immendingen	Donau	01.01.1985	31.12.2007	TM	3480552	5311014	655	LUBW
5	Ulm-Boefingen	Ulm_Boefingen	Donau	01.01.1979	31.12.1998	TM	3575270	5364700	426	LUBW
6	Ingolstadt	Ingolstadt	Donau	01.01.1981	31.12.2006	TM	3678395	5404963	365	LfU
7	Regensburg	Regensburg	Donau	01.01.1987	31.12.2007	TM	3726441	5436079	328	BfG
8	Deggendorf	Deggendorf	Donau	01.01.1981	31.12.2006	TM	3790858	5417389	307	LfU
9	Vilshofen	Vilshofen	Donau	01.01.1981	31.12.2006	TM	3808609	5397091	297	LfU
10	Passau	Passau	Donau	01.01.1981	31.12.2006	TM	3829040	5391683	286	LfU
11	Rielasingen	Rielasingen_RadolfzellAach	Radolfzeller Aach	01.01.1983	31.12.2007	TM	3490198	5287056	417	LUBW
12	Breitsach	Breitsach	Rhein	01.01.1984	31.12.2007	TM	3393630	5323750	184	BfG
13	Karlsruhe	Karlsruhe	Rhein	01.01.1988	31.12.2007	TM	3448730	5430640	104	LUBW
14	Worms-Pegel	Worms	Rhein	01.01.1976	31.12.2005	TM	3455100	5499640	86	BfG
15	Biblis	Biblis	Rhein	01.01.1975	31.12.2007	Tmin, Tmax	3457449	5508396	91	BfG
16	Kaub	Kaub	Rhein	01.01.1979	31.12.2007	TM	3411643	5550478	67	BfG
17	Koblentz-Pegel	Koblentz_Pegel	Rhein	01.01.1982	31.12.2007	TM	3398938	5582004	57	BfG
18	Koblentz-WUK	Koblentz_WUK	Rhein	01.01.1978	31.12.2007	TM	3400420	5580230	57	BfG
19	Köln	Koeln	Rhein	01.01.1985	31.12.2007	TM	3356856	5646469	34	BfG
20	Wendlingen	Wendlingen	Neckar	01.01.1987	31.12.2007	TM	3527821	5393938	252	LUBW
21	Hofen	Hofen	Neckar	01.01.1983	31.12.2006	TM	3516470	5411160	214	LUBW
22	Poppenweiler	Poppenweiler	Neckar	01.01.1975	31.12.2007	TM	3518240	5419500	207	LUBW
23	Besigheim	Besigheim	Neckar	01.01.1975	31.12.2007	TM	3510860	5429342	169	LUBW
24	Stein	Stein	Kocher	01.01.1981	31.12.2007	TM	3520986	5457963	160	LUBW
25	Gundelsheim-	Gundelsheim	Neckar	01.01.1981	31.12.2007	TM	3511250	5460430	136	BfG
26	Rockenau	Rockenau	Neckar	01.01.1977	31.12.2007	TM	3500510	5477180	119	LUBW
27	Mannheim	Mannheim	Neckar	01.01.1977	31.12.2006	TM	3461600	5484340	85	LUBW
28	Kemmern	Kemmern	Main	01.01.1981	31.12.2007	TM	3634570	5536640	230	LfU
29	Trunstadt	Trunstadt	Main	01.01.1971	31.12.2007	TM	3626132	5534082	223	BfG
30	Schweinfurt-Pegel	Schweinfurt_Pegel	Main	01.01.1971	31.12.2007	TM	3587525	5544599	201	BfG
31	Schweinfurt	Schweinfurt	Main	01.01.1981	31.12.2006	TM	3587540	5544590	201	LfU
32	Würzburg	Wuerzburg	Main	01.01.1971	31.12.2007	TM	3566596	5518123	164	BfG
33	Erlabrunn	Erlabrunn	Main	01.01.1977	31.12.2006	TM	3561320	5524990	165	LfU
34	Steinbach	Steinbach	Main	01.01.1971	31.12.2007	TM	3543408	5541646	146	BfG
35	Rothenfels	Rothenfels	Main	01.01.1977	31.12.2006	TM	3542550	5529060	130	LfU
36	Kleinheubach-Pegel	Kleinheubach_P_Kahl	Main	01.01.1970	31.12.2007	TM	3516270	5508890	120	BfG

Nr.	WT-Station	WT-Zeitreihe	Fluss	Beginn	Ende	Auflösung	RW	HW	Höhe	Quelle
37	Kleinheubach	Kleinheubach_Kahl	Main	01.01.1981	31.12.2006	TM	3516270	5508890	120	LFU
38	Kleinstheim	Kleinstheim	Main	01.01.1987	31.12.2007	TM	3503359	5541116	107	BFG
39	Frankfurt a. M. Osthafen-Pegel	FrankfurtM_Osthafen	Main	01.01.1971	31.12.2007	TM	3479690	5552210	90	BFG
40	Raunheim	Raunheim	Main	01.01.1980	31.12.2007	TM	3460530	5542340	83	LFU
41	Saarbrücken	Saarbruecken	Saar	01.01.1988	31.12.2007	TM	3348992	5458077	190	BFG
42	Lisdorf	Lisdorf	Saar	01.01.1988	31.12.2007	TM	3337497	5464810	170	BFG
43	Kanzem	Kanzem	Saar	01.01.1988	31.12.2007	TM	3323915	5503346	134	BFG
44	Terborg	Terborg	Ems	01.01.1988	31.12.2007	TM	3393057	5907780	7	BFG
45	Allendorf	Allendorf	Werra	01.01.1986	31.12.2007	TM	3567637	5682263	143	BFG
46	Hemeln	Hemeln	Weser	01.01.1982	31.12.2007	TM	3542620	5707550	116	BFG Weser
47	Emmerthal	Emmerthal	Weser	01.01.1986	31.12.2007	TM	3528444	5767119	67	FGG Weser
48	Oldendorf	Oldendorf	Weser	01.01.1982	31.12.2003	TM	3516970	5780470	60	FGG Weser
49	Porta	Porta	Weser	01.01.1984	31.12.2006	TM	3494800	5790300	37	FGG Weser
50	Petershagen	Petershagen	Weser	01.01.1984	31.12.2006	TM	3498800	5802900	30	FGG Weser
51	Drakenburg	Drakenburg	Weser	01.01.1982	31.12.2007	TM	3514250	5839550	14	FGG Weser
52	Brake	Brake	Weser	01.01.1984	31.12.2007	TM	3465830	5909410	0	FGG Weser
53	Magwitz	Magwitz	Weißer Elster	01.01.1956	31.12.1978	TM	3719606	5592444	366	SMUL
54	Zwickau-Pölbitz	ZwickauPoelbitz	Mulde	01.01.1976	31.12.2003	TM	3746672	5628642	255	SMUL
55	Erlin	Erlin	Mulde	01.11.1986	31.10.2006	TM	3766837	5675828	133	SMUL
56	Golzern	Golzern	Mulde	01.01.1986	31.12.2005	TM	3763734	5686559	117	SMUL
57	Bad Dübren	BadDueben	Mulde	01.01.1986	31.12.2005	TM	3748179	5723462	81	SMUL
58	Bautzen	Bautzen	Spree	01.01.1965	31.12.1998	TM	3878125	5683833	180	SMUL
59	Schirgiswalde	Schirgiswalde	Spree	01.01.1976	31.12.1998	TM	3880856	5674528	269	SMUL
60	Dresden	Dresden	Elbe	01.01.1948	31.12.1993	TM	3832260	5668402	102	SMUL
61	Schmackenburg	Schnackenburg	Elbe	01.01.1980	31.12.2006	TM	3672406	5881525	15	ARGE Elbe
62	Lauenburg	Lauenburg	Elbe	01.01.1975	31.12.2000	TM	3603835	5916070	1	ARGE Elbe
63	Hamburg-Bunthaus	Hamburg_Bunthaus	Elbe	01.01.1978	31.12.2006	TM	3571469	5925375	3	ARGE Elbe
64	Hamburg-Seemannshöft	Hamburg_Seemannshoef	Elbe	01.01.1978	31.12.2006	TM	3558397	5934879	3	ARGE Elbe
65	Eisenhüttenstadt	Eisenhuettenstadt	Oder	01.01.1986	31.12.2005	bis 1994 7-Uhr-Werte; ab 1995 TM	3894332	5786979	25	WSA Eberswalde
66	Frankfurt (Oder)	FrankfurtO	Oder	01.01.1948	31.12.2004	bis 1994 7-Uhr-Werte; ab 1995 TM	3878454	5816604	17	WSA Eberswalde
67	Kietz	Kietz	Oder	01.01.1981	31.12.2005	bis 1994 7-Uhr-Werte; ab 1995 TM	3882110	5842720	8	WSA Eberswalde
68	Kienitz	Kienitz	Oder	01.01.1981	31.12.2005	bis 1994 7-Uhr-Werte; ab 1995 TM	3867333	5853010	5	WSA Eberswalde
69	Groß Neundorf	GrNeundorf	Oder	01.01.1970	31.12.2005	bis 1994 7-Uhr-Werte; ab 1995 TM	3865727	5855173	5	WSA Eberswalde
70	Neuglietzen	Neuglietzen	Oder	01.01.1976	31.12.2005	bis 1994 7-Uhr-Werte; ab 1995 TM	3845083	5868881	1	WSA Eberswalde
71	Hohensaaten-F'mow	Hohensaaten	Oder	01.01.1981	31.12.2005	bis 1994 7-Uhr-Werte; ab 1995 TM	3846126	5872111	0	WSA Eberswalde
72	Gartz	Gartz	Oder	01.01.1952	31.12.1973	bis 1994 7-Uhr-Werte; ab 1995 TM	3860290	5911331	-5	WSA Eberswalde

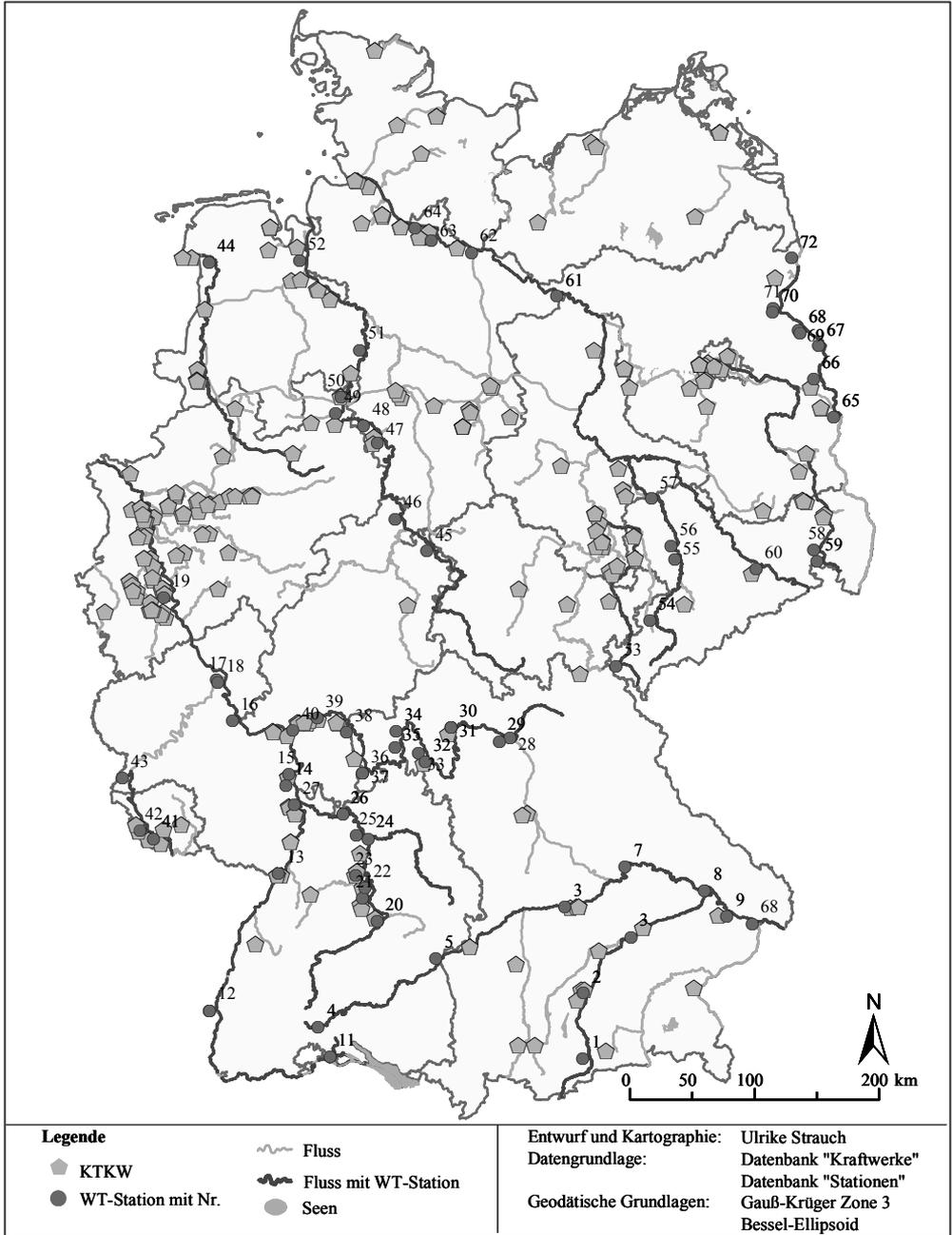


Abbildung 22: Räumliche Verteilung der 72 WT-Stationen und 197 KTKW.

Tabelle 11: Charakteristika der Flüsse mit ausgewählten WT-Stationen bezüglich der Lage, des Abflussverhaltens und wasserbaulichen Eingriffen. Darstellung nach angegebenen Quellen in der Spalte „Quelle“.

Fluss	Ursprung	Länge in km	Einzugsgebiet in km <sup>2</sup>	Abflussminimum	Abflussmaximum	Abflussregime	Wasserbauliche Veränderungen	Quelle
Isar	Karwendelgebirge, Österreich	295	8.964	Winter	Juni-Juli	nivo-pluvial	Sylvensteinspeicher zur Abflussregulierung, Ableitungen zur Loisach und zum Inn, Wehre, Isar-Kanal	(LFU 2004; STMUGV & UVM 2005)
Donau	Brigach und Breg	584	56.295	Winter, Spätsommer/Herbst	Frühjahr/Früh-sommer	pluvio-nival	Main-Donau-Kanal, Brombachüberleitung, Mittelwasserregulierung, Deiche, Stauregulierung zwischen Vilshofen und Kelheim, Wasserstraße	(STMUGV & UVM 2005)
Rhein	Vorder-/Hinterrhein, Schweizer Alpen	1.233	185.000	Oberrhein: Winter, Niederrhein: Aug.-Okt.	Oberrhein: Mai-Juli, Niederrhein: Jan.-Mär.	Oberrhein: nival, Mittel-/Niederrhein: pluvial	Wasserstraße, Begradigungen, Befestigungen, Vertiefungen, Seitenkanäle, 21 Staustufen von Schaffhausen bis Iffezheim	(MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN 2005) (IKSR 2010) (MUFV 2010)
Rodolfszeller Aach	Aach	32	261	k. A.	k. A.	nival	Systematische Eingriffe seit 1860, 11 Wehre	(BUND LANDESVERBAND BW 2010)
Neckar	bei Schwemningen	367	139.58	Spätsommer, Aug.-Sep.	Winter, v. a. Feb./Mär.	pluvial	Wasserstraße ab Plochingen, Vertiefung, 27 Staustufen, Überleitungen aus Donau-/Rheineinzugsgebiet	(UVM 2005; HMUELV 2010b; HND 2010)
Kocher	Schwarze/Weiße Kocher, Schwäbische Alp	168	1.931	Aug.-Dez.	Nov.-Mär.	pluvial	Abflussregulierung, Wehre, Hochwasserrückhaltebecken, Wasserkraftanlagen	(REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART 2010)
Main	Roter/Weißer Main	527	27.840	Sommer	Wintermonate	pluvio-nival	Wasserstraße bis Bamberg, Main-Donau-Kanal, Brombachüberleitung, 34 Staustufen	(LFU 2004; STMUGV et al. 2005; HMUELV 2010a)
Saar	Rote/Weiße Saar bei Sarre-bourg, Vogesen, Frankreich	227	7.431	k. A.	Herbst/Winter		Wasserstraße, Saarkanal, 6 Staustufen (u. a. bei Kanzem, Lisdorf, Saarbrücken), Eindeichung	(IKSMS 1998; IKSMS 2010)

Fluss	Ursprung	Länge in km	Einzugsgebiet	Abflussminimum (Aug.)	Abflussmaximum (Winter (Jan./Feb.))	Abflussregime	Wasserbauliche Veränderungen	Quelle
Ems	Naturschutzgebiet Moosheide bei Hóvelhof	371	18.000	Sommer (Aug.)	Winter (Jan./Feb.)		Ausbau zur Schiffsfahrtsstrasse, Begradigung, Dormund-Ems-Kanal, Mittellandkanal	(MUNLV LANDSCHAFTSVERBAND WESTFALEN-LIPPE 2004; 2009)
Werra	bei Eisfeld, Thüringer Wald, Thüringen	298	5.500	Aug.-Okt.	Dezember/Januar, März/April	pluvio-nival	Wasserkraftwerke, Staudämme, Wehre, Sohlschwellen	(FGG WESER 2004; FGG WESER 2005a; FGG WESER 2005b)
Weser	Zusammenfluss von Werra und Fulda	422	49.000	Jun.-Okt.	Dez./Jan., Mär./Apr.	pluvio-nival	Wasserstraße, Mittelweser: 7 Staustrufen, Ederalsperre, Uferbefestigungen, Deiche, Vertiefungen, künstliche Kanäle	(MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, NATURSCHUTZ UND UMWELT 2001; FGG WESER 2004; FGG WESER 2005a; FGG WESER 2005b; FGG WESER 2010)
Elbe	Riesengebirge, Tschechische Republik	1091	148.000	Aug.-Sep./ Jun.-Nov.	Wintermonate	pluvial, pluvio-nival	Wasserstraße, Begradigung, Deiche, Vertiefung, Staustrufen, Mittellandkanal (Elbe-Weser), Wehre, Elbe-Umflut-Kanal	(BFG 2002; BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT DER FREIEN UND HANSESTADT HAMBURG et al. 2004; MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN et al. 2004; SMUL et al. 2004; WECHSUNG et al. 2005; ARGE ELBE 2008)
Weißer Elster	Elstergebirge westlich des Kapellenberges	257	5.384		Dez./Feb.-März	pluvio-nival	Begradigung, Schutzdämme, Stauanlagen, Querbauwerke	(BFG 2002; UFZ 2004; SMUL et al. 2004; THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2010b; THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2010a)
Vereinigte (Zwickauer/Freiburger) Mulde	Rote und Weiße Mulde, Erzgebirge	143 (166, 124)	7.403			pluvio-nival	Querbauwerke, Muldestausee ist 1976/77 durch Flutung des Braunkohleresloches vom ehemaligen Tagebau Muldenstein	(BFG 2002; SMUL et al. 2004; BLAUES BAND 2010b; BLAUES BAND 2010a)
Spree	Oberlausitzer Bergland	400	9.793	Mat-Nov.		relativ gleichmäßiger, regulierter Abfluss	früher Einleitung Tagebauwasser aus Braunkohlerevier, heute teilweise Trockenfällen, Staustrufen, z. T. Schiffsfahrtsstraße, Zufluss Talsperrern, Speicher	(MUGV 2005; BUND 2010; FGG ELBE 2010)
Oder	Odergebirge, Tschechische Republik	854	119.046	Mat-Nov.	Mär./Apr.	pluvio-nival	steile, kurze Hochwasserwellen, Winter häufig Vereisungen	(MINISTERSTWO ŚRODOWISKA RZECZPOSPOLITEJ POLSKIEJ et al. 2005)

#### 4.2.2 Datenaufbereitung

Wassertemperaturen weisen wie die meisten Daten zur Bestimmung der Wasserqualität folgende Eigenschaften auf:

- Es existieren weder negative noch besonders hohe Werte.
- Die Daten sind abhängig, also positiv autokorreliert und nicht normalverteilt.

Zur Bestimmung der Datenqualität kann die Anzahl der Datenlücken herangezogen werden (LIETZ 2000, S. 11; HELSEL & HIRSCH 2002, S. 2f). Mit Ausnahme der Wassertemperaturen des Bayerischen LfU und der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) wurden die Zeitreihen weder auf negative oder extrem hohe Werte noch auf Plausibilität geprüft zur Verfügung gestellt. Zudem war keine der Zeitreihen auf Homogenität geprüft. Aus diesem Grund wurden die Zeitreihen vor den statistischen Analysen in zwei Schritten aufbereitet: Eliminierung extremer und nicht plausibler Werte und Interpolation der Datenlücken (vgl. Abschnitt 4.2.2.1) sowie Homogenisierung der Zeitreihen (vgl. Abschnitt 4.2.2.2).

##### 4.2.2.1 Zeitlich gewichtete und räumliche Interpolation von Datenlücken

Wie Tabelle 10 zu entnehmen ist, liegen die WT der 72 Zeitreihen zumeist als Tagesmittel vor. Im Falle der WT-Daten der Oder wurden die 7-Uhr-Messungen bis 1994 und die Tagesmittel ab 1995 in einer Zeitreihe zusammengeführt. Entsprechend der Methodik nach PILGRIM et al. (1998) und STEFAN & PREUD'HOMME (1993) wurden aus den Tagesminima und -maxima der Station „Biblis“ Tagesmittel der WT gebildet (STEFAN & PREUD'HOMME 1993, S. 29; PILGRIM et al. 1998, S. 1110, 1112). Um unrealistische WT-Werte zu eliminieren, wurden alle negativen Werte aus den Zeitreihen entfernt. Extrem hohe Tagesmittel wurden durch folgende Gleichung detektiert (PETERSON et al. 1998b, S. 1175)

$$\text{Extremwert} > MW + 3 \cdot SD \quad \text{Gl. 3}$$

Dabei stellen  $MW$  den Mittelwert und  $SD$  die Standardabweichung der Zeitreihe dar. Zudem wurden die Zeitreihen visuell auf Plausibilität geprüft, d. h. ob beispielsweise die Temperaturen über mehrere Tage und Wochen denselben Wert, also keinen saisonalen Gang aufweisen. Negative, extrem hohe sowie nicht plausible Werte wurden gemäß den Kriterien nach MANIAK (2005) eliminiert (MANIAK 2005, S. 103f). Da die anschließende Homogenitätsprüfung der Daten äquidistante Zeitreihen ohne Datenlücken voraussetzt (vgl. Abschnitt 4.2.2.2), wurden die Datenlücken zeitlich gewichtet und räumlich interpoliert, wie im Folgenden beschrieben.

Die Autokorrelation der WT-Werte diente als Grundlage für die zeitlich gewichtete Interpolation. Dazu wurde der Autokorrelationskoeffizient  $r_X$  auf Basis der Tagesmittelwerte wie folgt berechnet

$$r_X = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} x'_i x'_{i+\tau}}{\sqrt{\sum_{i=1+\tau}^n x_i'^2 \sum_{i=1}^{n-\tau} x_i'^2}} \dots \begin{cases} \text{mit } \tau = 0, 1, \dots, M < n \\ -1 \leq r_x < +1 \end{cases} \quad \text{Gl. 4}$$

Dabei sind  $x$  die Werte der Zeitreihe,  $n$  die Anzahl der Werte,  $i$  der Laufindex ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\tau$  die Zeitverschiebung, deren Werte zwischen 0 und  $M\Delta t$  liegen ( $\tau = 0, 1\Delta t, \dots, M\Delta t$ ;  $M < n$ ). Die Zeitreihe wird zu Beginn mit sich selbst ( $\tau = 0$ ) und nachfolgend jeweils um einen Zeitschritt verschoben korreliert (SCHÖNWIESE 2006, S. 227). Als Grenze für die zeitlich gewichtete Interpolation wurde die Höhe des Zeitversatzes (Zeitverschiebung) festgelegt, bei der für alle Zeitreihen  $r_X \geq 0,7$  gilt, und somit nach MEIER KRUKER & RAUH (2005) eine starke Korrelation vorliegt (MEIER KRUKER & RAUH 2005, S. 142).

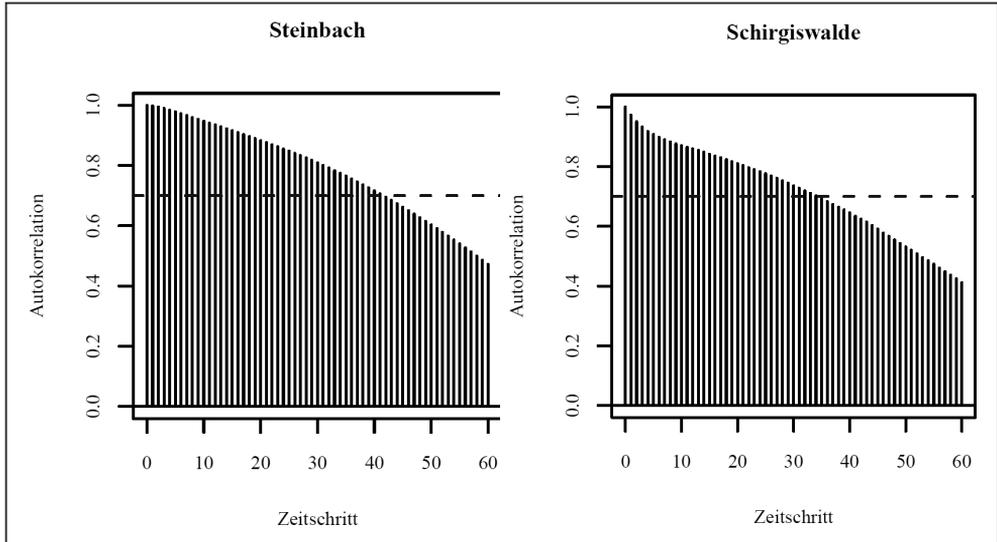


Abbildung 23: Autokorrelationsrechnung der täglichen WT für zwei Beispielstationen. Die gestrichelte horizontale Linie stellt den Autokorrelationskoeffizient  $r_X = 0,7$  dar.

In Abbildung 23 sind für die Beispielstationen „Steinbach“ am Main und „Schirgiswalde“ an der Spree die Ergebnisse der Autokorrelationsrechnung dargestellt. Alle Graphiken mit den Ergebnissen der Autokorrelationsrechnung finden sich in Abbildung 69 im Anhang II. Je nach Station beträgt der Zeitversatz für  $r_X \geq 0,7$  zwischen 32 bis 42 Tagen.

Die zeitlich gewichtete Interpolation wurde somit bei Datenlücken mit einer Länge von  $\leq 32$  Tagen durchgeführt. Dabei wurde dem jeweiligen fehlenden Wert das zeitlich gewichtete arithmetische Mittel zwischen den beiden nächst gelegenen vorhandenen Werten zugewiesen (RAPP 2001, S. 1).

Ab Autokorrelationswerten von  $< 0,7$ , also bei einem Zeitversatz ab 32 Tagen, fand das räumliche Interpolationsverfahren Verwendung. Denn bei größeren Datenlücken kann mittels der zeitlich gewichteten Interpolation, also durch das gewichtete Mittel des letzten bestehenden Wertes vor und des ersten bestehenden Wertes nach der Datenlücke, nicht der saisonale Gang der WT wiedergegeben werden. Dazu wurden einfache lineare Regressionsmodelle mit benachbarten Zeitreihen erstellt, an denen keine Datenlücken zur selben Zeit vorliegen (HARI et al. 2006, S. 11; HUGUET et al. 2008, S. 68). Für die Interpolation wurde das Regressionsmodell verwendet, welches am besten die

Streuung in der zu interpolierenden Zeitreihe erklärt. Dazu wurde das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , also das Maß, welches den Anteil der erklärten Varianz der zu interpolierenden Zeitreihe bestimmt, nach TOUTENBURG et al. (2009, S. 101f) wie folgt berechnet

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{y}_i)^2} . \quad \text{Gl. 5}$$

Neben der Anzahl der Werte  $n$  und dem Laufindex  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) stellt  $x_i$  den beobachteten Wert,  $\hat{y}_i$  den geschätzten Wert und  $\bar{x}$  den Mittelwert der Zeitreihe aus beobachteten Werten dar. Der zu schätzende fehlende Wert  $\hat{y}_i$  wurde mit der Gleichung

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad \text{Gl. 6}$$

berechnet. Dabei stellen  $a$  und  $b$  die ermittelten Regressionskonstanten und  $x_i$  den Wert der benachbarten Zeitreihe dar, mit dem der Wert  $\hat{y}_i$  geschätzt wird (TOUTENBURG et al. 2009, S. 97). In Tabelle 22 im Anhang I sind alle 72 WT-Zeitreihen und die entsprechenden Zeitreihen, mit denen die Datenlücken länger als 32 Tage interpoliert wurden, sowie das zugehörige Bestimmtheitsmaß  $R^2$  aufgelistet. Zusätzlich gibt diese Tabelle einen Überblick über

- die maximale Länge der Datenlücken,
- die Anzahl der Datenlücken mit einer Länge  $\leq 32$  Tage (zeitlich gewichtete Interpolation),  $> 32$  und  $\leq 365$  Tage (räumliche Interpolation bis zu einem Jahr) und  $> 365$  Tage (räumliche Interpolation ab einem Jahr),
- den Anteil der fehlenden Werte im Verhältnis zur Gesamtlänge nach der Eliminierung der negativen, der extrem hohen sowie der nicht plausiblen Werte und
- den Anteil der fehlenden Werte im Verhältnis zur Gesamtlänge nach der zeitlich gewichteten Interpolation.

In 70 der 72 Zeitreihen liegen nach der Eliminierung aller negativen, extrem hohen sowie nicht plausiblen Werte Datenlücken vor. Die maximale Länge der Datenlücken je Zeitreihe beträgt zwischen einem und 6940 (im Durchschnitt 544) Werten. In 69 Zeitreihen treten Datenlücken mit einer Länge  $\leq 32$  Tage, in 47 mit einer Länge  $> 32$  und  $\leq 365$  Tage und in 21 mit einer Länge  $> 365$  Tage auf. Insgesamt reichte bei 22 Zeitreihen die zeitlich gewichtete Interpolation aus, um alle Datenlücken zu schließen, für 48 Zeitreihen wurde zusätzlich die räumliche Interpolation mittels einfacher linearer Regression angewandt. Je nach Regression sind zwischen 81,2 und 99,3 % und im Durchschnitt 95,8 % der Varianz in der zu schätzenden Zeitreihe erklärt. Im Mittel aller Zeitreihen beträgt der Anteil der fehlenden Werte im Verhältnis zur Gesamtlänge der Zeitreihe vor der zeitlich gewichteten Interpolation 9,7 % und nach der zeitlich gewichteten Interpolation 6,2 %. Je nach Zeitreihe variieren diese Werte jedoch zwischen 0,008 und 49,1 % vor der zeitlich gewichteten und zwischen 0,3 und 46,5 % vor der räumlichen Interpolation. Dabei treten die hohen Anteile fehlender Werte größer als 20 % nach der zeitlich gewichteten Interpolation in fünf Zeitreihen auf.

Nach den zwei Interpolationsverfahren liegen die Tagesmittel der WT als äquidistante Zeitreihendaten  $x_i$ , also mit einem konstanten Zeitschritt  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  vor. Die Zeitreihen weisen nach SCHÖNWIESTE (2006) folgende mathematische Form auf:

$$x_i(t_i); t_{i+1} - t_i = \Delta t = \text{const.}; i = 1; \dots; n;$$

Gl. 7

Die Anzahl aller Werte der Zeitreihe ist dabei als  $n$  ( $i=1, \dots, n$ ) bezeichnet. Die Werte beziehen sich der Reihe nach auf diskrete Zeiten  $t_i$  (SCHÖNWIESE 2006, S. 217).

#### 4.2.2.2 Homogenisierung

Gemessene LT- oder Niederschlagszeitreihen können nach SCHÖNWIESE (2006) zeitliche Variationen aufzeigen, die nicht klimatologisch bedingt sind, sondern auf messtechnische Artefakte zurückzuführen sind (SCHÖNWIESE 2006, S. 224). Übertragen auf gemessene WT-Zeitreihen können ebenso systematische Fehler auftreten. Gründe hierfür können ein Wechsel der Messgeräte oder deren Handhabung, eine Änderung der Umgebungsbedingungen der Messstation (z. B. durch Beschattungseffekte hochgewachsener ufernaher Vegetation), eine Änderung der Beobachtungsprozedur (z. B. Veränderung des Zeitpunkts der Messung oder der Anwendung von Korrekturen) sowie eine örtliche Verlegung der Messstation sein. Neben sonstigen anthropogen bedingten Einflüssen (vgl. Abschnitt 2.2.2) kann dies zu Inhomogenitäten in den gemessenen Zeitreihen führen. Diese machen sich entweder in einem Versatz (Shift) oder einem Trend bemerkbar.

Ein Versatz zeigt sich in einer abrupt auftretenden Veränderung des Mittelwertes oder der Varianz. Diese sind z. B. durch eine Verlegung der Messstation oder einem Wechsel des Messgerätes, welches eine größere Empfindlichkeit als das vorherige aufweist, bedingt. Langsam hoch wachsende ufernahe Vegetation kann zu Schatteneffekten und damit zu längerfristigen Trends in den Zeitreihen führen (PAESLER 1983, S. 3f; PETERSON et al. 1998a, S. 1494; SCHÖNWIESE 2006, S. 224, und andere).

Versatz- bzw. Shift- und Trend-Inhomogenitäten in den Zeitreihen können eine Fehlinterpretation der Analyseergebnisse möglicher klimatisch bedingter Veränderungen zur Folge haben. Aus diesem Grund ist es notwendig, Inhomogenitäten vor den Analysen der Zeitreihen zu identifizieren und zu beseitigen (BEGERT et al. 2003, S. 9). Wenn – wie bei vorliegenden Zeitreihen – keine Informationen über messtechnische Eingriffe und deren Effekte bekannt sind, stehen neben der visuellen Überprüfung zwei statistische Verfahren zur Verfügung, die Zeitreihen auf Homogenität zu prüfen: absolute und relative Homogenitätstests.

- Absolute Homogenitätstests stützen sich auf nur eine, nämlich die zu untersuchende Zeitreihe.
- Relative Homogenitätstests beziehen Referenzzeitreihen, die aus benachbarten Vergleichszeitreihen gemittelt werden, zum Vergleich mit ein.

Die natürlichen zeitlichen Schwankungen in WT sind ähnlich wie in LT größer als die Variabilitäten aufgrund von Inhomogenitäten. Daher kann normalerweise anhand einer Zeitreihe nicht zwischen natürlich und nicht natürlich bedingter Variabilität unterschieden werden. Erst durch den Bezug zwischen den zu untersuchenden und benachbarten Zeitreihen kann die natürliche Variabilität entfernt und eine mögliche nicht natürliche detektiert werden. Wegen des Bezugs zweier Zeitreihen zueinander wird dies relative Homogenitätsprüfung genannt (ENKE 2002, S. 5; BEGERT et al. 2003, S. 24; SCHÖNWIESE 2006, S. 224f). Dadurch können insbesondere Shift-Inhomogenitäten identifiziert werden. Langfristige, nicht natürlich bedingte Trends sind ohne detaillierte Informationen über die Ursachen der Trend-Inhomogenität kaum zu detektieren. Grund hierfür ist, dass sich Trend-Inhomogenitäten in der zeitlichen Struktur mit natürlich bedingten Trends überlagern (SCHÖNWIESE 2006, S. 224).

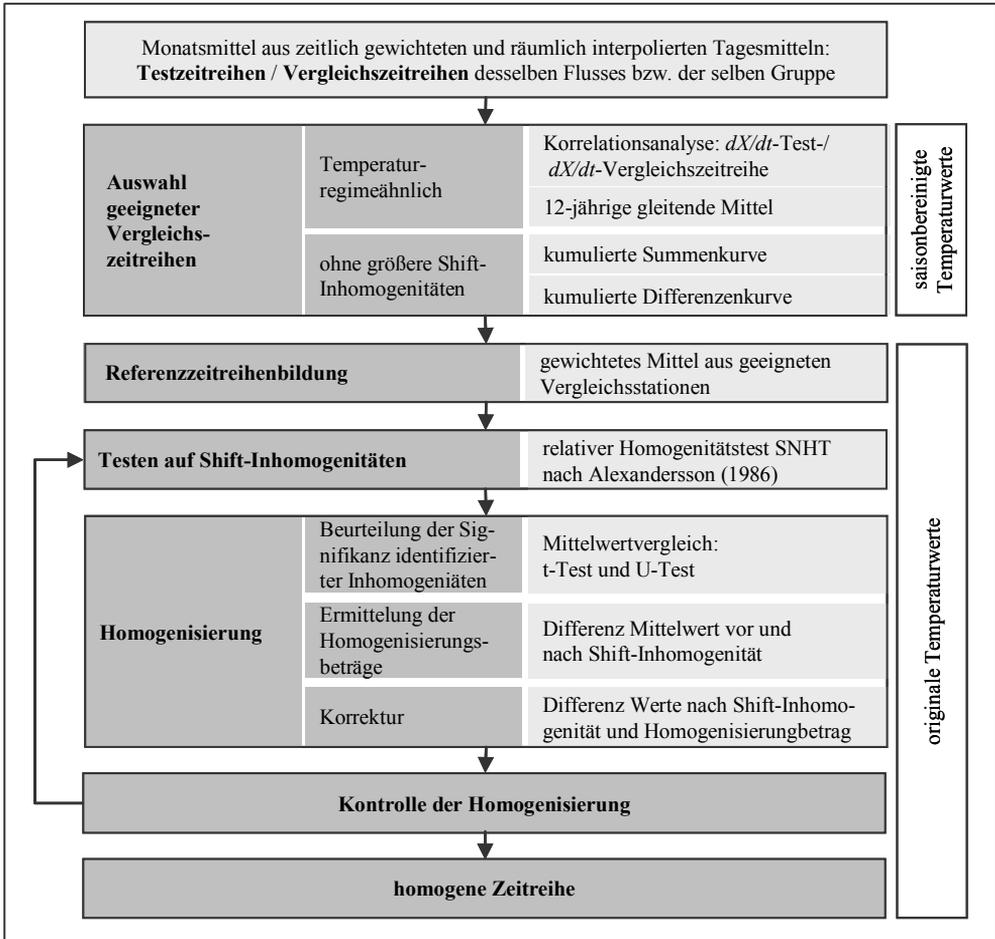


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Homogenisierungsablaufs. Darstellung nach BEGERT et al. (2003, S. 28).

Um mögliche Shift-Inhomogenitäten in den WT-Zeitreihen zu identifizieren, wurde aus oben genannten Gründen eine relative Homogenitätsprüfung durchgeführt. Dabei wurden die Testzeitreihen mit homogenen Referenzzeitreihen statistisch auf Inhomogenitäten verglichen. Die Referenzzeitreihen wurden aus temperaturregimeähnlichen benachbarten Vergleichszeitreihen ermittelt, die keine größeren Inhomogenitäten aufweisen. Die relative Homogenitätsprüfung wurde mithilfe des „Standard Normal Homogeneity Test“ (SNHT) nach ALEXANDERSSON (1986) durchgeführt. Inhomogene Zeitreihen wurden abschließend homogenisiert. Einen Überblick über die einzelnen Schritte der relativen Homogenitätsprüfung und Homogenisierung findet sich in Abbildung 24. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden beschrieben.

### Auswahl geeigneter Vergleichszeitreihen und Referenzzeitreihenbildung

Während des relativen Homogenitätstests SNHT nach ALEXANDERSSON (1986) werden Differenzenreihen zwischen den Test- und Referenzzeitreihen gebildet. Ein abweichendes Temperaturregimesignal dieser Zeitreihen kann in der Differenzenreihe zu einem Rauschen führen. Dadurch können Inhomogenitäten nur eingeschränkt oder gar nicht durch den Homogenitätstest identifiziert werden. Zudem kann der Test aufgrund des unterschiedlichen Temperaturregimesignals Inhomogenitäten detektieren, die in der Testreihe nicht existieren. Liegen in der Referenzzeitreihe größere Inhomogenitäten vor, kann dies ebenfalls zu Fehlinterpretationen führen. Entweder werden Inhomogenitäten in der Testreihe identifiziert, obwohl keine vorliegen, oder es wird keine Inhomogenität detektiert, da diese zum selben Zeitpunkt wie in der Referenzzeitreihe auftritt (BEGERT et al. 2003, S. 29). Aus diesem Grund wurden die Vergleichszeitreihen zur Bildung der Referenzzeitreihen nach zwei Kriterien ausgewählt:

- ähnliche klimatologische Entwicklung der Test- und Vergleichszeitreihe;
- keine größeren Inhomogenitäten in den Vergleichsstationen (PETERSON & EASTERLING 1994, S. 673; BEGERT et al. 2003, S. 29f).

Die Auswahl wird im Folgenden beschrieben und fand in vier Schritten statt:

1. Korrelationsanalyse zwischen den  $dX/dt$ -Zeitreihen der Test- und Vergleichsstation;
2. Bilden des zwölfjährigen gleitenden Mittels;
3. Bilden der kumulativen Summenkurve;
4. Bilden der kumulierten Differenz zwischen Test- und Vergleichszeitreihe.

Damit für die Zeitreihen zur Auswahl geeigneter Vergleichsstationen die statistischen Voraussetzungen wie Normalverteilung und Datenunabhängigkeit besser erfüllt sind, wurden zu Beginn saisonbereinigte Zeitreihen erstellt. Dazu wurden aus den Tagesmitteln Monatsmittel berechnet und diese nach folgender Gleichung saisonbereinigt

$$X_i = x_i - \bar{x}_j . \quad \text{Gl. 8}$$

Dabei stellen  $X_i$  den saisonbereinigten Monatsmittelwert mit dem Laufindex  $i$  für die einzelnen Monate ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ),  $x_i$  den Monatsmittelwert und  $\bar{x}_j$  das arithmetische Mittel aller Beobachtungen des gleichen Monats mit dem Laufindex  $j$  für die einzelnen Jahre ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) dar. Gleichung 8 besagt, dass von jedem einzelnen Monat das arithmetische Mittel aller Beobachtungen des gleichen Monats abgezogen wird. Somit werden die saisonalen Schwankungen entfernt (RHOADES & SALINGER 1993, S. 901; BEGERT et al. 2003, S. 29).

Temperaturregimeähnliche Test- und Vergleichszeitreihen zeichnen sich durch eine positive Korrelation aus. Allerdings führen Inhomogenitäten, die in beiden Zeitreihen gleichzeitig auftreten, zu höheren Korrelationen. Zu ungleichen Zeitpunkten auftretende Inhomogenitäten führen indes zu niedrigeren Korrelationen als dies bei homogenen Zeitreihen der Fall wäre. Aus diesem Grund wurde im ersten Schritt die Korrelationsanalyse nach PETERSON & EASTERLING (1994) mit der  $dX/dt$ -Zeitreihe durchgeführt. Diese ergibt sich aus folgender Formel:

$$(dX / dt)_i = X_{i+1} - X_i . \quad \text{Gl. 9}$$

Dabei ist  $X_i$  der saisonbereinigte Monat,  $i$  der Laufindex für alle Zeitschritte bzw. Monate der Zeitreihe ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) und  $dt$  beträgt einen Monat (BEGERT et al. 2003, S. 30). Die

$dX/dt$ -Zeitreihe stellt die Veränderung der saisonbereinigten Zeitreihen pro Monat dar. Durch die Korrelation der  $dX/dt$ -Zeitreihen können ähnliche Temperaturregime in den Zeitreihen klarer identifiziert werden. Denn im Vergleich zur Korrelation mit homogenen Zeitreihen weichen bei saisonbereinigten Zeitreihen alle Werte nach der Shift-Inhomogenität von den homogenen Werten ab. Dagegen unterscheidet sich die  $dX/dt$ -Zeitreihe nur in einem Wert, nämlich zum Zeitpunkt des Auftretens der Shift-Inhomogenität, von den Werten einer homogenen Zeitreihe (PETERSON & EASTERLING 1994, S. 675).

Die Korrelation wurde für jede  $dX/dt$ -Testreihe eines Flusses mit jeweils allen  $dX/dt$ -Vergleichsreihen desselben Flusses ermittelt. Die Flüsse, an denen jeweils nur eine oder zwei Stationen liegen, wurden mit den Stationen des nächst gelegenen Flusses als Gruppe zusammengefasst, um die Auswahl der Vergleichsstationen zu vergrößern:

- Isar,
- Donau,
- Rhein mit Rielasingen an der Radolzeller Aach,
- Neckar mit Stein am Kocher,
- Main,
- Saar,
- Weser mit Terborg an der Ems und Allendorf an der Werra,
- Magwitz an der Weißen Elster, Erlin an der Freiburger Mulde, Zwickau-Pölbitz an der Zwickauer Mulde, Bad Düben und Golzern an der Vereinigten Mulde, Bautzen und Schirgiswalde an der Spree und Dresden an der Elbe,
- Elbe und
- Oder

Die einzelnen Stationen können Tabelle 10 entnommen werden. Die Station „Dresden“ an der Elbe wurde aufgrund der ähnlichen Klimaregion und der Zeitreihenlänge zusätzlich der Gruppe „Weiße Elster/Mulde/Spree“ zugeordnet. Diese Einteilung wurde für das gesamte Vorgehen der Auswahl der Vergleichszeitreihen beibehalten.

Für die Korrelationsanalyse wurden der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient nach Pearson und der Rang-Korrelationskoeffizient nach Spearman angewandt. Der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient  $r_{X,Y}$  nach Pearson wird wie folgt berechnet:

$$r_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - (1/n) \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n X_i^2 - (1/n) \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n Y_i^2 - (1/n) \left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}}, \quad \text{Gl. 10}$$

wobei  $r_{X,Y} = r_{Y,X}$  mit dem Wertebereich  $-1 \leq r_{X,Y}$  bzw.  $r_{Y,X} \leq +1$  gilt.  $X_i$  stellt den  $i$ -ten Wert der  $dX/dt$ -Testreihe,  $Y_i$  den  $i$ -ten Wert der  $dX/dt$ -Vergleichsreihe und  $i$  den Laufindex für alle Werte der Zeitreihen mit  $i = 1, 2, \dots, n$  dar (SCHÖNWIESE 2006, S. 164, 168f). Der Rang-Korrelationskoeffizient nach Spearman wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$r_R = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n^3 - n},$$

Gl. 11

mit dem Zeitindex  $i$  für die einzelnen Monate der  $dX/dt$ -Zeitreihen ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) und dem Wertebereich  $0 \leq |r_R| \leq +1$ . Zeitreihen werden dabei in eine aufsteigende Rangfolge gebracht, so dass  $D_i$  die Rangplatzdifferenzen ergeben (SCHÖNWIESE 2006, S. 178f).

Die Signifikanz der Korrelationsaussage wurde nach SCHÖNWIESE (2006) mit einem zweiseitigen t-Test auf dem Signifikanzniveau 95 % ( $\alpha = 0,05$ ) getestet. Dabei wird die Alternativhypothese  $H_1$  „signifikante Korrelation“ gegen die Nullhypothese  $H_0$  „keine signifikante Korrelation“ durch

$$\hat{t} = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

Gl. 12

mit  $\varphi = n - 2$  Freiheitsgraden geprüft (SCHÖNWIESE 2006, S. 176).

Der Korrelationskoeffizient nach Pearson setzt eine Normalverteilung und Unabhängigkeit der Daten voraus und ist zudem anfälliger auf Ausreißer. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman ist dagegen bezüglich Ausreißer robuster und setzt weder eine Normalverteilung noch Unabhängigkeit der Daten voraus. Bei größeren Abweichungen der Korrelationskoeffizienten wurde daher der robustere nach Spearman für die Auswahl geeigneter Vergleichsstationen herangezogen (BEGERT et al. 2003, S. 30).

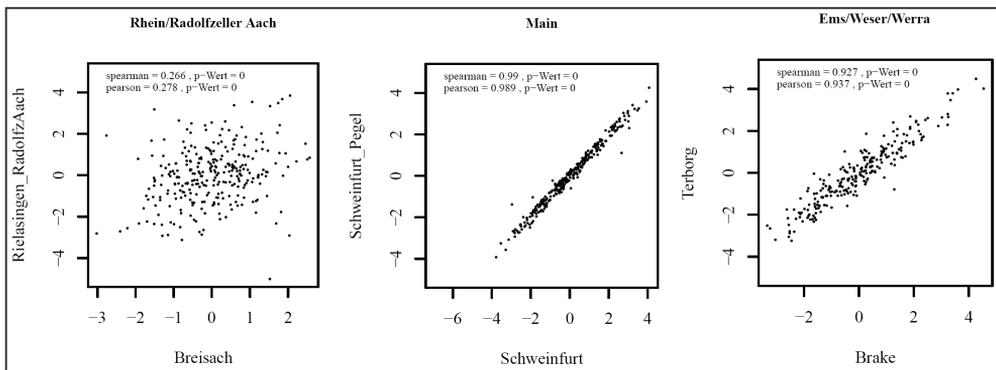


Abbildung 25: Streudiagramme der  $dX/dt$ -Test- und Vergleichsreihe mit dem Korrelationskoeffizient nach Spearman und Pearson sowie den p-Werten beispielhaft an drei Zeitreihen dargestellt.

In Abbildung 25 sind beispielhaft für die drei Stationen „Rielasingen\_RadolfzAach“ an der Radolfzeller Aach, „Schweinfurt\_Pegel“ am Main und „Terborg“ an der Ems die  $dX/dt$ -Zeitreihe gegen die jeweilige  $dX/dt$ -Vergleichsreihe „Breisach“ am Rhein, „Schweinfurt“ am Main und „Brake“ an der Weser aufgetragen. Die Größe des Zusammenhangs ist nicht nur visuell durch das Streudiagramm zu sehen, sondern ebenso statistisch durch die Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Pearson mit den jeweiligen  $p$ -Werten zu erkennen.

Insgesamt liegt für die Mehrzahl der Teststationen eine signifikant positive Korrelation mit den jeweiligen Vergleichsstationen bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  vor. Ausnahmen bilden die Stationen „Magwitz“ an der Weißen Elster und „Gartz“ an der Oder, die jeweils nur mit zwei Zeitreihen positiv signifikant korrelieren. In Tabelle 12 sind für jeden Fluss bzw. für die einzeln gelegenen Stationen die minimalen und maximalen Korrelationskoeffizienten  $r_R$  und  $r_{X,Y}$  nach Spearman und Pearson dargestellt.

Tabelle 12: Minimale und maximale Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Pearson für die WT-Zeitreihen der aufgeführten Flüsse.

Fluss/Station	min. $r_R$	min. $r_{X,Y}$	max. $r_R$	max. $r_{X,Y}$
Isar	0,766	0,784	0,902	0,911
Donau	0,798	0,78	0,992	0,992
Rhein	0,788	0,799	0,971	0,975
Rielasingen/Radolfzeller Aach	0,178	0,175	0,267	0,299
Neckar	0,812	0,813	0,936	0,945
Stein am Kocher	0,801	0,813	0,928	0,938
Main	0,764	0,723	0,99	0,99
Saar	0,809	0,797	0,892	0,898
Terborg an der Ems	0,338	0,321	0,927	0,937
Weser	0,29	0,269	0,929	0,932
Allendorf an der Werra	0,335	0,332	0,853	0,832
Magwitz an der Weißen Elster	0,566	0,563	0,571	0,59
Zwickau-Pölbitz an der Zwickauer Mulde	0,721	0,695	0,809	0,785
ErlIn	0,544	0,587	0,768	0,793
Golzern	0,767	0,767	0,882	0,887
Bad Dübén	0,756	0,736	0,882	0,887
Bautzen	0,728	0,739	0,904	0,904
Schirgiswalde	0,684	0,694	0,904	0,904
Elbe	0,786	0,802	0,977	0,973
Oder	0,845	0,824	0,963	0,97

Die geringsten signifikant positiven Korrelationskoeffizienten von 0,175 bis 0,268 zeigen sich für die Station „Rielasingen\_RadolfzAach“ an der Radolfzeller Aach in Verbindung mit den Stationen am Rhein. Dies, wie auch das Streudiagramm der Stationen „Rielasingen\_RadolfzAach“ und „Breisach“ in Abbildung 25, weisen auf ein unterschiedliches Temperaturregime der Radolfzeller Aach und des Rheins hin. Die Stationen am Rhein eignen sich somit nach der Korrelationsanalyse lediglich bedingt zur Homogenitätsprüfung der Station „Rielasingen\_RadolfzAach“. Wie in Abbildung 25 zu sehen, eignen sich jedoch insbesondere benachbarte Stationen wie „Schweinfurt Pegel“ und „Schweinfurt“ am Main aufgrund einer hohen Korrelation von 0,99 besonders gut als gegenseitige Vergleichsstationen. Selbiges kann auch für Stationen an unterschiedlichen Flüssen gelten – wie in Abbildung 25 anhand der Stationen „Terborg“ an der Ems und „Brake“ an der Weser mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,93 bzw. 0,94 zu sehen ist. Beide Stationen liegen in einer ähnlichen Klimaregion und die Unterläufe der Ems und Weser zeichnen sich zudem durch ein ähnliches, pluviales Temperaturregime aus (vgl. Abschnitt 4.2.1). Ausgehend von hohen Korrelationskoeffizienten  $\geq 0,7$  eignen sich für jede Station mit Ausnahme der

Stationen „Rielasingen\_RadolfzAach“ und „Magwitz“ jeweils mehrere Zeitreihen als Vergleichsreihen. Alle Streudiagramme für jede Station jeweils mit allen anderen Stationen am selben Fluss bzw. aus derselben Gruppe finden sich mit den Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Pearson sowie den jeweiligen  $p$ -Werten in Abbildung 70 im Anhang II.

Im zweiten Schritt wurden mittels eines visuellen Vergleichs geglätteter saisonbereinigter Zeitreihen potentiell geeignete Vergleichsstationen zur Ermittlung einer Referenzzeitreihe identifiziert. Dazu wurden die zwölfjährigen gleitenden Mittel der saisonbereinigten Zeitreihen anhand der übergreifenden Mittelung nach SCHÖNWIESE (2006) berechnet

$$\tilde{X}_j = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{i+L-1} X_i, \quad \text{Gl. 13}$$

mit  $L = l\Delta t$  und  $i = 1, \dots, n$  und  $j = L/2, L/2+1, \dots, n-L/2$ . Dabei ist  $L$  die Intervalllänge, über die jeweils gemittelt wird, und  $l$  ein bestimmtes ganzzahliges Vielfaches des Zeitschrittes  $\Delta t$  (SCHÖNWIESE 2006, S. 259f). Bei vorliegenden Monatswerten gilt für das zwölfjährige gleitende Mittel somit  $L = 144 = 12$  (Monate)  $\times$  12 (Jahre). Die Saisonbereinigung der Zeitreihen mit ursprünglich unterschiedlichen Mittelwerten führt zu einer Streuung der Werte um Null. Durch die zusätzliche Glättung der Zeitreihen können nun visuell Zeitreihen mit einem ähnlichen Temperaturregime identifiziert werden (BEGERT et al. 2003, S. 30f).

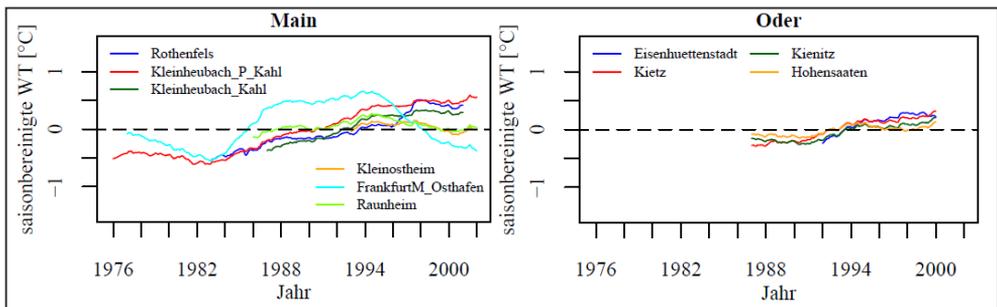


Abbildung 26: Zwölfjährige gleitende Mittel der saisonbereinigten Zeitreihen am Beispiel ausgewählter Stationen.

In Abbildung 26 sind für ausgewählte Stationen an den Flüssen Main und Oder beispielhaft die geglätteten saisonbereinigten Zeitreihen dargestellt. Die Stationen an der Oder weisen alle einen ähnlichen Verlauf der Zeitreihen auf. Dies ist ebenso am Main für die Stationen „Kleinheubach\_Pegel“, „Kleinheubach“, „Kleinostheim“ und „Raunheim“ der Fall. Dagegen zeigt sich in den Zeitreihen „Rothenfels“ und „FrankfurtM\_Osthafen“ um das Jahr 1996 bzw. 1983 eine Änderung des Temperaturverlaufs, welche in den benachbarten Zeitreihen nicht zu erkennen ist. Aus diesem Grund entfallen diese Zeitreihen als potentielle Vergleichsreihen für die relative Homogenitätsprüfung. In Abbildung 71 im Anhang II finden sich für die jeweiligen Flüsse bzw. Flussgruppen alle geglätteten saisonbereinigten Zeitreihen. Anhand des visuellen Vergleichs der geglätteten Zeitreihen und der Ergebnisse der Korrelationsanalyse wurden für jede Testzeitreihe potentielle Vergleichszeitreihen ausgewählt.

Im dritten und vierten Schritt wurden mittels graphischer Methoden größere Inhomogenitäten in den Zeitreihen identifiziert. Kleinere Inhomogenitäten, wie beispielsweise die in der Reihe „Rothenfels“ im Jahr 1985 (geringe negative Abweichung von maximal ca. 0,1 °C zu der Reihe „Kleinheubach\_P\_Kahl“) wurden dabei nicht beachtet. Denn bei der Bildung der Referenzzeitreihen wurden jeweils mehrere ausgewählte Vergleichszeitreihen gemittelt. Kleinere Inhomogenitäten üben somit einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Werte der Referenzzeitreihen aus (BEGERT et al. 2003, S. 31).

Nach RHOADES & SALINGER (1993) wurden pro Fluss bzw. Gruppe für alle saisonbereinigten Zeitreihen die kumulierten Summenkurven berechnet und in eine Graphik aufgetragen. Die Formel lautet nach RHOADES & SALINGER (1993, S. 901)

$$X_{kum} = \sum_{i=1}^n X_i, \tag{Gl. 14}$$

wobei  $X_{kum}$  die kumulierte Summenkurve darstellt,  $i$  den Laufindex für alle Zeitschritte mit  $i = 1, 2, \dots, n$  und  $X_i$  den jeweiligen saisonbereinigten Monatsmittelwert nach Gleichung 8.

Um die Unterschiede zwischen einer Test- und Vergleichsstation noch deutlicher zu machen, wurden zudem von jeder saisonbereinigten Test- die jeweiligen potentiellen Vergleichszeitreihen abgezogen. Von diesen Differenzzeitreihen wurden wiederum die kumulierten Summenkurven nach Gleichung 14 berechnet (RHOADES & SALINGER 1993, S. 902f).

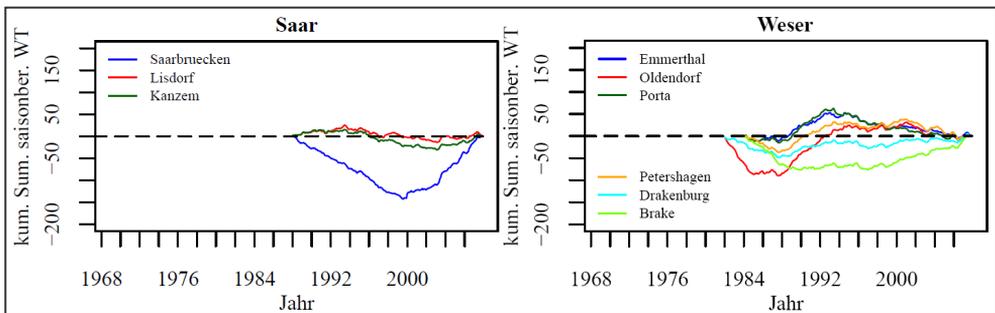


Abbildung 27: Kumulierte Summen saisonbereinigter Wassertemperaturzeitreihen beispielhaft dargestellt für ausgewählte Stationen.

Pro Testzeitreihen wurden alle entsprechenden kumulierten Differenzenkurven in einer Graphik dargestellt. Die Saisonbereinigung lässt die Zeitreihen der kumulierten Summenkurve jeweils bei Null beginnen und enden (vgl. Abbildung 27). Dies lässt nach BEGERT et al. (2003) einen direkten Vergleich der Änderungen pro Zeitschritt in den Zeitreihen zu (BEGERT et al. 2003, S. 32). Gleiches würde bei gleicher Länge der Test- und den jeweiligen Vergleichsstationen für die kumulierten Differenzenkurven zutreffen. Da die vorliegenden WT-Zeitreihen jedoch häufig unterschiedlich lang sind (vgl. Tabelle 10), beginnen die kumulierten Differenzzeitreihen zwar in dem Jahr, in dem die Testzeitreihe beginnt, mit dem Wert Null, enden allerdings bei Werten ungleich Null, wenn die Vergleichszeitreihen kürzere oder längere Längen aufweisen. Dies ist in Abbildung 28 beispielhaft

für die Testzeitreihen „Petershagen“, „Oldendorf“ und „Porta“ an der Weser zu sehen. Ein Vergleich der Änderungen pro Zeitschritt in den Zeitreihen ist dennoch für Testzeitreihen möglich, deren Länge von Vergleichszeitreihen abgedeckt wird.

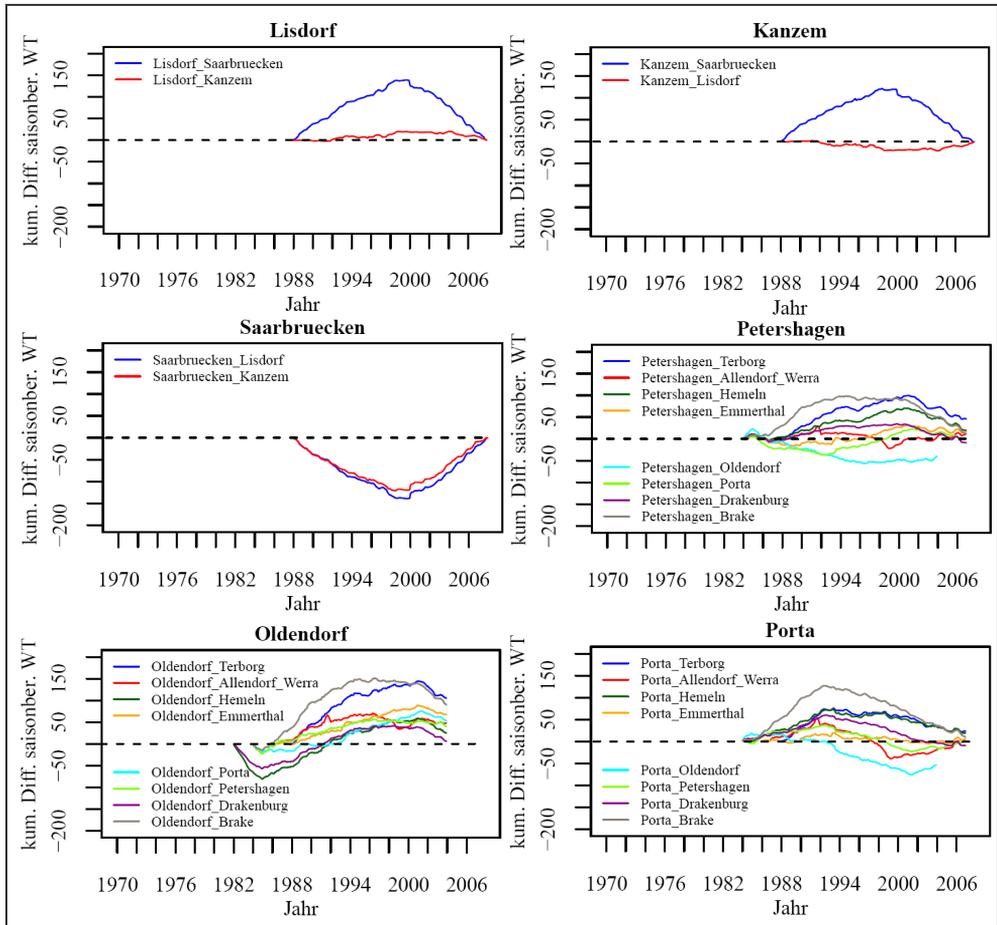


Abbildung 28: Kumulierte Differenzenkurven am Beispiel von sechs Testzeitreihen mit den jeweiligen Vergleichszeitreihen.

Visuell homogene Zeitreihen zeichnen sich durch parallele oder ähnliche Kurvenverläufe wie die der Stationen „Lisdorf“ und „Kanzem“ an der Saar sowie „Emmerthal“, „Porta“, „Petershagen“ und „Drakenburg“ an der Weser aus. Größere sprunghafte Änderungen in den Zeitreihen, die in den anderen Zeitreihen zum selben Zeitschritt nicht auftreten, machen sich durch abrupte Knicks sowohl in den kumulierten Summenkurven als auch in den kumulierten Differenzzeitreihen bemerkbar (RHOADES & SALINGER 1993, S. 902ff; BEGERT et al. 2003, S. 32). Diese weisen auf mögliche Shift-Inhomogenitäten hin und sind beispielhaft in den Zeitreihen „Saarbruecken“ an der Saar im Jahr

1999 (vgl. Abbildung 28, oben links und rechts) und „Oldendorf“ an der Weser im Jahr 1984 (vgl. Abbildung 28, Mitte rechts, unten links und rechts) zu sehen.

Tritt zudem ein Knick zum selben Zeitschritt in allen kumulierten Differenzzeitreihen einer Teststation auf – wie in Abbildung 28 für die Testzeitreihen „Oldendorf“ im Jahr 1984 zu erkennen – deutet dies auf eine Shift-Inhomogenität der Testzeitreihe hin. Konkave oder konvexe Verläufe der kumulierten Summen spiegeln Trends in der jeweiligen Zeitreihe wider. Treten konkave oder konvexe Kurvenverläufe in allen kumulierten Differenzzeitreihen einer Teststation auf, weist dies auf einen Trend in der Testzeitreihe hin. Tritt dies bei unterschiedlichen Testzeitreihen jeweils mit derselben Vergleichsstation auf, deutet dies auf einen Trend in der Vergleichszeitreihe hin (BEGERT et al. 2003, S. 32). Dies zeigt sich z. B. für die Saar in den kumulierten Differenzkurven „Saarbruecken\_Lisdorf“ und „Saarbruecken\_Kanzem“ bzw. „Lisdorf\_Saarbruecken“ und „Kanzem\_Saarbruecken“ in Abbildung 28 (oben links und rechts, Mitte links). Die kumulierten Summenkurven und kumulierten Differenzkurven aller Zeitreihen finden sich in den Abbildungen 72 und 73 im Anhang II. Trends können wie oben beschrieben sowohl auf langsame, nicht klimatisch bedingte als auch auf natürliche, klimatisch bedingte Änderungen der Umgebungsbedingungen der Messstationen zurückzuführen sein. Aufgrund fehlender Informationen zu den Messverfahren und -stationen können mögliche Trend-Inhomogenitäten in vorliegenden Zeitreihen jedoch nicht statistisch gesichert festgestellt werden.

Aus klimatologisch ähnlichen Vergleichszeitreihen ohne größere Shift-Inhomogenitäten wurden schließlich die Referenzzeitreihen gebildet. Diese wurden aus dem gewichteten Mittel der Originalwerte der ausgewählten Vergleichszeitreihen jeweils für die Länge der Testzeitreihe berechnet. Für die Gewichtung wurden nach BEGERT et al. (2003) die quadrierten Korrelationskoeffizienten nach Pearson aus der Korrelation zwischen der  $dX/dt$ -Test- und entsprechenden Vergleichszeitreihen verwendet (BEGERT et al. 2003, S. 32f). In Tabelle 23 im Anhang I sind für jede WT-Testzeitreihe die entsprechenden WT-Vergleichszeitreihen zur Bildung der WT-Referenzzeitreihe aufgeführt. Die Korrelationskoeffizienten nach Pearson, die quadriert wurden und mit denen anschließend die WT-Vergleichszeitreihen zur Berechnung der WT-Referenzzeitreihe gewichtet wurden, sind der Abbildung 70 im Anhang II zu entnehmen.

#### Relativer Homogenitätstest nach ALEXANDERSSON (1986)

Nachdem die geeigneten Referenzzeitreihen gebildet wurden, kann der relative Homogenitätstest SNHT nach ALEXANDERSSON (1986) und ALEXANDERSSON & MOBERG (1997) angewandt werden. Der SNHT hat gegenüber anderen Homogenitätstests den Vorteil, dass erstens eine Shift-Inhomogenität mit einer definierten Irrtumswahrscheinlichkeit mittels Testentscheid identifiziert werden kann. Und zweitens können sowohl der Zeitpunkt als auch das Ausmaß der Inhomogenität bestimmt werden (RAPP & SCHÖNWIESE 1995, S. 44). Nach ALEXANDERSSON (1986) und ALEXANDERSSON & MOBERG (1997) wird zwischen der Test- und Referenzzeitreihe mit den originalen Temperaturwerten eine neue standardisierte Verhältniszeitreihe auf Basis der Monats- oder Jahresmittel gebildet. Für vorliegende Temperaturwerte wurde auf Basis von Monatsmittelwerten eine standardisierte Differenzzeitreihe aus einer Test- und der entsprechenden Referenzzeitreihe berechnet und mithilfe des SNHT auf Inhomogenitäten geprüft. Die Differenzzeitreihe  $Q_i$  wurde nach ALEXANDERSSON & MOBERG (1997) wie folgt berechnet:

$$Q_i = x_i - \frac{\sum_{j=1}^k \rho_j^2 [y_{i,j} - \bar{y}_j + \bar{x}]}{\sum_{j=1}^k \rho_j^2} . \quad \text{Gl. 15}$$

Die nicht saisonbereinigten, also originalen Monatsmittel der WT der Testzeitreihe sind  $x_i$  mit  $i = 1, 2, \dots, n$ . Die originalen Monatsmittel der  $j$ -ten Referenzzeitreihe stellt  $y_{j,i}$  dar mit  $j = 1, 2, \dots, k$ , wobei die jeweilige Referenzzeitreihe dieselbe Länge wie die Testzeitreihe aufweisen muss. Die Mittelwerte der Test- und der  $j$ -ten Referenzzeitreihe werden als  $\bar{x}$  und  $\bar{y}_j$  bezeichnet. Mit  $\rho$  wird der Korrelationskoeffizient der Test- und Referenzzeitreihe bezeichnet (ALEXANDERSSON & MOBERG 1997, S. 26). Aus der Differenzenreihe  $Q_i$  wird die standardisierte Differenzenreihe  $Z_i$  nach folgender Gleichung ermittelt:

$$Z_i = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma_Q} . \quad \text{Gl. 16}$$

Dabei sind  $\bar{Q}$  der Mittelwert und  $\sigma_Q$  die Standardabweichung der Differenzenreihe  $Q_i$  (ALEXANDERSSON 1986, S. 662; ALEXANDERSSON & MOBERG 1997, S. 27). Aus der standardisierten Differenzenreihe  $Z_i$  wurden anschließend die kumulierten Summenreihen  $\tilde{z}_1$  und  $\tilde{z}_2$  gebildet

$$\tilde{z}_1(v) = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v Z_i \quad \text{und} \quad \text{Gl. 17}$$

$$\tilde{z}_2(v) = \frac{1}{n-v} \sum_{i=v+1}^n Z_i . \quad \text{Gl. 18}$$

Die Testgröße  $T_0$  ergibt sich schließlich aus

$$T_0 = \max_{1 \leq v \leq n} \{T_v\} = \max_{1 \leq v \leq n} \left[ v \tilde{z}_1^2 + (n-v) \tilde{z}_2^2 \right], \quad \text{Gl. 19}$$

wobei  $v_0$  den Zeitpunkt der Inhomogenität darstellt, wenn die Testgröße  $T_0$  größer ist als der tabellierte Wert bei einem definierten Signifikanzniveau ( $v_0 = v$  für  $T_v = \max$ ) (ALEXANDERSSON 1986, S. 663; RAPP & SCHÖNWIESE 1995, S. 45). Die kritischen Werte des SNHT nach ALEXANDERSSON (1986), mit denen die Testgröße  $T_0$  verglichen wird, finden sich in Tabelle 13. Die 72 Testzeitreihen wurden jeweils auf dem 90 % Signifikanzniveau (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,1$ ) auf mögliche Shift-Inhomogenitäten getestet.

In Abbildung 29 finden sich die Ergebnisse der Testgröße  $T$  des SNHT nach ALEXANDERSSON (1986) beispielhaft für sechs Testzeitreihen. Die horizontale gestrichelte Linie stellt jeweils den tabellarischen Wert auf dem 90 % Signifikanzniveau bei entsprechendem  $n$  der Zeitreihe dar (vgl. Tabelle 13). Die schwarze durchgezogene Linie zeichnet die Testgröße  $T$  über den Zeitverlauf nach. Da der SNHT nach ALEXANDERSSON (1986) mit den originalen, nicht saisonbereinigten Zeitreihen durchgeführt wird, ergeben sich die saisonalen Schwankungen der Testgröße in den Zeitreihen.

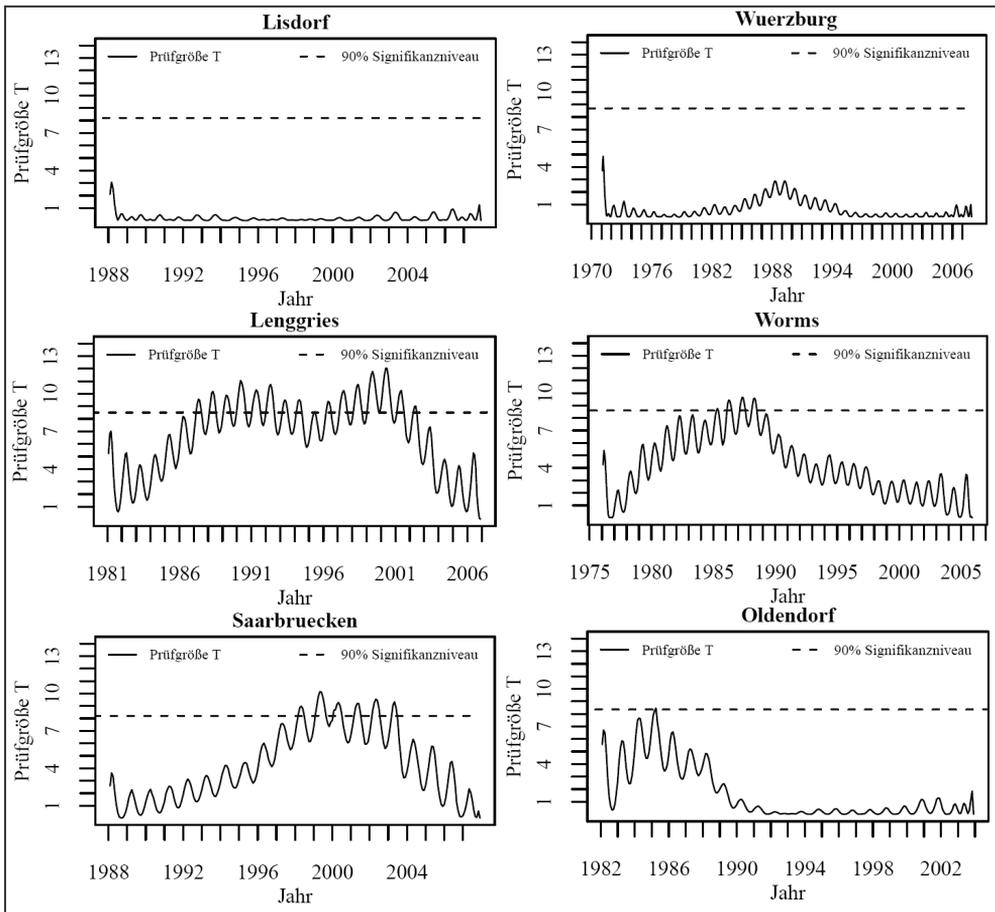


Abbildung 29: Ergebnis der ersten relativen Homogenitätsprüfung mittels des SNHT nach ALEXANDERSSON (1986). Beispielhaft dargestellt anhand der homogenen Zeitreihen der Stationen „Lisdorf“ und „Wuerzburg“ am Main und der auf dem 90 % Signifikanzniveau inhomogenen Zeitreihen „Lenggries“ an der Isar, „Worms“ am Rhein, „Saarbruecken“ an der Saar sowie „Oldendorf“ an der Weser.

Für 68 der 72 Testzeitreihen zeigt der relative Homogenitätstest SNHT nach ALEXANDERSSON (1986) keine signifikanten Shift-Inhomogenitäten (vgl. Abbildung 74 im Anhang II). Als Beispiel homogener Zeitreihen sind die der Stationen „Lisdorf“ an der Saar und „Wuerzburg“ am Main dargestellt. Die Prüfgröße  $T$  ist in jedem Zeitschritt kleiner als der tabellierte kritische Wert bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,1$ . Dagegen übersteigt die Prüfgröße  $T$  in den Zeitreihen „Lenggries“ an der Isar, „Worms“ am Rhein, „Saarbruecken“ an der Saar und „Oldendorf“ an der Weser den tabellierten Wert auf dem 90 % Signifikanzniveau. Die signifikanten Shift-Inhomogenitäten, als das Maximum der Prüfgröße  $T$ , treten in den Jahren 2000 („Lenggries“), 1987

(„Worms“), 1999 („Saarbruecken“) und 1985 („Oldendorf“) auf. Die identifizierten Shift-Inhomogenitäten wurden im nächsten Schritt korrigiert.

Tabelle 13: Kritische Werte des SNHT nach ALEXANDERSSON (1986), angegeben für das 90 % Signifikanzniveau und  $n \geq 50$ . Quelle: ALEXANDERSSON & MOBERG (1997, S. 32).

Signifikanzniveau	$n=50$	$n = 100$	$n = 150$	$n = 250$
$T_{90}$	7,25	7,85	8,05	8,35

### Homogenisierung der Zeitreihen mit Shift-Inhomogenitäten

Für die Homogenisierung wurden nach BEGERT et al. (2003) die arithmetischen Mittelwerte der Differenzenreihe zwischen inhomogener Testreihe und entsprechender homogener Referenzzeitreihe vor und nach der Shift-Inhomogenität ermittelt. Dabei stellt  $\bar{q}_a$  den Mittelwert vor und  $\bar{q}_b$  den Mittelwert nach der Shift-Inhomogenität dar. Ob sich die Mittelwerte statistisch signifikant unterscheiden, wurde anhand des t-Tests und des robusten U-Tests bzw. Wilcoxon-Rangsummen-Tests festgestellt (BEGERT et al. 2003, S. 42). Bei unterschiedlich großen Stichprobenumfängen  $n_a$  und  $n_b$  prüft der Zweistichproben t-Test für unabhängige Zufallsstichproben aus normalverteilten Grundgesamtheiten mit  $n_a + n_b - 2$  Freiheitsgraden, ob sich die Erwartungswerte  $\mu_a$  und  $\mu_b$  signifikant unterscheiden (SACHS & HEDDERICH 2006, S. 377). Nach dem zentralen Grenzwertsatz kann in guter Näherung von einer Standardnormalverteilung der Daten ausgegangen werden, da  $n_a + n_b - 2 \geq 50$  ist. Für die Nullhypothese  $H_0$  und Alternativhypothese  $H_1$  gilt:

$$H_0 : \mu_a - \mu_b = 0 \text{ und} \quad \text{Gl. 20}$$

$$H_1 : \mu_a - \mu_b \neq 0 . \quad \text{Gl. 21}$$

Im vorliegenden Fall sind die Mittelwerte  $\bar{q}_a$  und  $\bar{q}_b$  der unabhängigen Stichproben mit den unterschiedlich großen Umfängen  $n_a$  und  $n_b$  ( $n_1 \neq n_2$ ) sowie den unbekanntem Varianzen  $s_a^2$  und  $s_b^2$  gegeben. Unter der Nullhypothese  $H_0$  gilt:

$$\bar{q}_a - \bar{q}_b = 0 . \quad \text{Gl. 22}$$

Der Standardfehler ist dabei:

$$\sigma_{\bar{q}_b - \bar{q}_a} = \sqrt{\frac{\sigma_a^2}{n_a} + \frac{\sigma_b^2}{n_b}} . \quad \text{Gl. 23}$$

Folgende Gleichung führt zu einer unverzerrten Schätzung des Standardfehlers, wenn die Varianzen der beiden Grundgesamtheiten unbekannt sind:

$$\hat{\sigma}_{\bar{q}_b - \bar{q}_a} = \sqrt{\left(\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}\right) \frac{(n_a - 1)s_a^2 + (n_b - 1)s_b^2}{(n_a - 1) + (n_b - 1)}} . \quad \text{Gl. 24}$$

Schließlich ist die Prüfgröße

$$\hat{t} = \frac{|\bar{q}_a - \bar{q}_b|}{\sqrt{\left[ \frac{n_a + n_b}{n_a n_b} \right] \cdot \left[ \frac{(n_a - 1)s_a^2 + (n_b - 1)s_b^2}{n_a + n_b - 2} \right]}} \quad \text{Gl. 25}$$

t-verteilt. Überschreitet diese den kritischen Wert bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$ , unterscheiden sich die Mittelwerte signifikant voneinander. Unterschreitet die Prüfgröße den kritischen Wert ist die Nullhypothese anzunehmen (SACHS & HEDDERICH 2006, S. 378).

Zusätzlich wurde der U-Test für unabhängige Stichproben angewandt, da er keine Normalverteilung der Grundgesamtheiten voraussetzt (SACHS & HEDDERICH 2006, S. 392). Geprüft wird wieder, ob die Mittelwerte  $\bar{q}_a$  und  $\bar{q}_b$  signifikant voneinander abweichen. Für die Nullhypothese  $H_0$  und Alternativhypothese  $H_1$  gilt nach SACHS & HEDDERICH (2006):

$$H_0 : \bar{q}_a \leq \bar{q}_b \quad \text{und} \quad \text{Gl. 26}$$

$$H_1 : \bar{q}_a > \bar{q}_b \quad \text{Gl. 27}$$

Die  $n_a + n_b = n$  Werte der Reihen  $q_a$  und  $q_b$  werden der Größe nach geordnet und von 1 bis  $n$  durchnummeriert. Danach werden die Rangsummen  $R_a$  und  $R_b$  der beiden Stichproben berechnet. Die Prüfgröße  $U$  ergibt sich aus der kleineren der beiden Größen

$$U_a = n_a \cdot n_b + \frac{n_a(n_a + 1)}{2} - R_a \quad \text{und} \quad \text{Gl. 28}$$

$$U_b = n_a \cdot n_b + \frac{n_b(n_b + 1)}{2} - R_b \quad \text{Gl. 29}$$

Wenn die Prüfgröße  $U$  kleiner oder gleich dem kritischen Wert  $U_{krit}$  bei definierter Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  ist, wird  $H_0$  abgelehnt und die Alternativhypothese akzeptiert, dass sich  $\bar{q}_a$  und  $\bar{q}_b$  signifikant unterscheiden (SACHS & HEDDERICH 2006, S. 393ff). Ergeben beide Testergebnisse signifikant unterschiedliche Mittelwerte der  $q_a$  und  $q_b$  Reihen vor und nach der Shift-Inhomogenität, werden die Homogenisierungsbeträge für die einzelnen Monate nach BEGERT et al. (2003) mit  $\bar{q}_b - \bar{q}_a$  berechnet (BEGERT et al. 2003, S. 42). Die Werte der Testzeitreihe werden ab dem Zeitpunkt der Shift-Inhomogenität um die ermittelten Homogenisierungsbeträge korrigiert. Für die mittels des SNHT identifizierten signifikanten Shift-Inhomogenitäten in den Zeitreihen „Lenggries“, „Worms“, „Saarbruecken“ und „Oldendorf“ ergeben sowohl der t-Test als auch der U-Test einen signifikanten Unterschied der Mittelwerte  $\bar{q}_a$  und  $\bar{q}_b$ . Die Monatswerte ab der Shift-Inhomogenität wurden daraufhin wie oben beschrieben korrigiert, und die korrigierten Testzeitreihen wurden erneut mittels des SNHT auf eine mögliche weitere Shift-Inhomogenität geprüft.

Die Homogenitätsprüfung mittels des SNHT zeigt in den Zeitreihen „Worms“, „Saarbruecken“ und „Oldendorf“ nach der ersten Homogenisierung und in der Zeitreihe „Lenggries“ nach der zweiten Homogenisierung keine weiteren signifikanten Shift-Inhomogenitäten. Die Ergebnisse der zweiten

bzw. dritten relativen Homogenitätsprüfung mittels des SNHT zeigt Abbildung 30 für die Zeitreihen „Lenggries“, „Worms“, „Saarbruecken“ und „Oldendorf“.

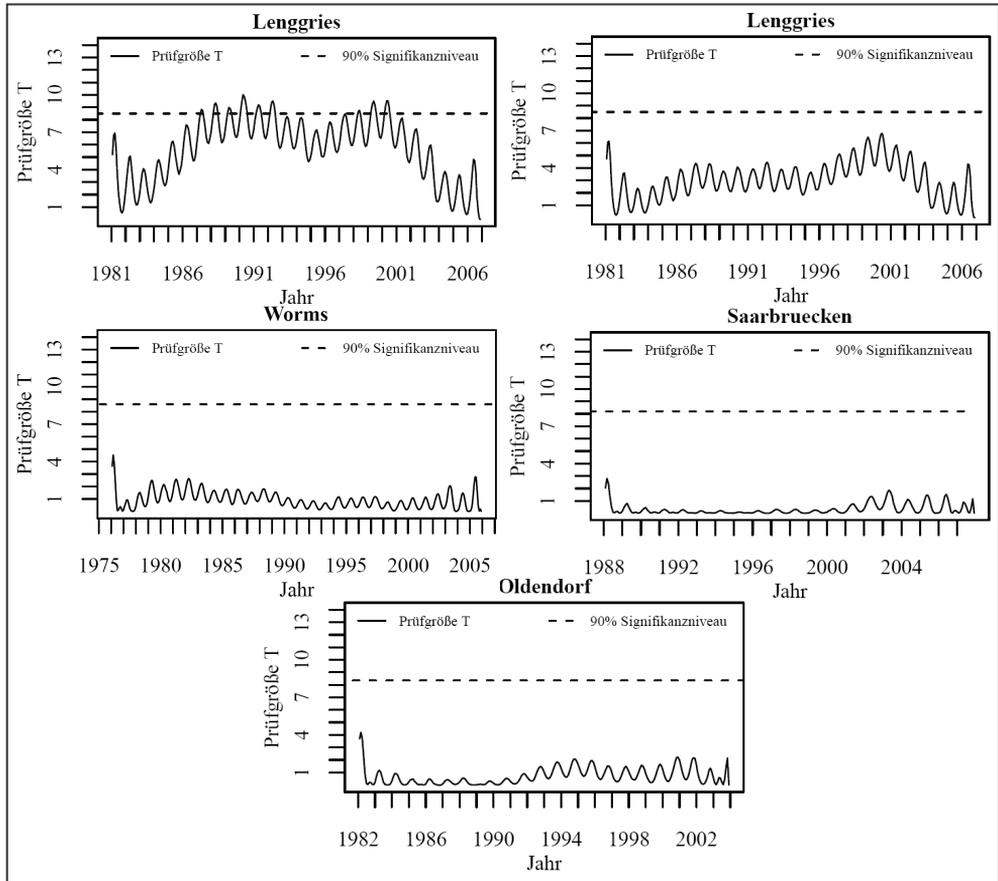


Abbildung 30: Ergebnis der zweiten relativen Homogenitätsprüfung mittels des SNHT für die Zeitreihen „Lenggries“ (oben links), „Worms“, „Saarbruecken“ und „Oldendorf“ sowie nach der dritten relativen Homogenitätsprüfung bzw. nach der zweiten Homogenisierung der identifizierten Shift-Inhomogenität in der Zeitreihe „Lenggries“ (oben rechts).

Nach der zeitlich gewichteten und räumlichen Interpolation von fehlenden, negativen, extrem hohen und nicht plausiblen Werten, liegen die WT in äquidistanten Zeitreihen als Tagesmittel vor. Äquidistante Zeitreihen ohne Datenlücken sind eine Voraussetzung, um Zeitreihen statistisch auf Inhomogenitäten zu prüfen. Mithilfe des relativen Homogenitätstests SNHT nach ALEXANDERSSON (1986) wurden die Zeitreihen auf Shift-Inhomogenitäten geprüft. Nach deren Homogenisierung liegen alle 72 Zeitreihen statistisch signifikant homogen vor. Die interpolierten und

homogenisierten Zeitreihen der WT dienen somit als Datengrundlage zu nachfolgender Trendanalyse, Zählstatistik extrem hoher WT sowie zur Erstellung eines Modells zur WT-Simulation.

#### 4.2.3 Trendanalyse

Um Aussagen über die Entwicklung der WT deutscher Flüsse in den vergangenen Jahrzehnten treffen zu können, wurden die 72 interpolierten und homogenisierten WT-Zeitreihen auf Trends hin untersucht. Dabei ist ein Trend das Maß der Veränderung einer Variablen, in diesem Fall der WT, im Laufe eines bestimmten Zeitraums. Bei einer Trendanalyse wird in einem ersten Schritt untersucht, ob ein signifikanter Trend vorliegt. Im zweiten Schritt werden die Richtung und die Größe des Trends berechnet. Mathematisch betrachtet ist ein Trend somit ein Vektor, der sich aus der Signifikanz, der Richtung und dem Betrag zusammensetzt (RAPP & SCHÖNWIESE 1995, S. 54, 59; SCHÖNWIESE 2006, S. 232f). Ziel ist eine diagnostische Trendanalyse, was bedeutet, dass eine Entwicklung in der Vergangenheit beschrieben wird, die gegebenenfalls bis in die Gegenwart reicht (rezent).

Beobachtete Trends sind grundsätzlich diagnostisch und nicht prognostisch, also nicht über den Untersuchungszeitraum hinaus extrapolierbar (RAPP & SCHÖNWIESE 1995, S. 57). In Zeitreihen können zyklische Variationen auftreten, die sich durch relative Maxima und Minima in mehr oder weniger regelmäßigen Zeitabständen auszeichnen. Beispiel hierfür sind saisonale Schwankungen. Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten bei der Trendanalyse mit zyklischen bzw. saisonalen Daten zu verfahren. Die saisonale Komponente kann durch Saisonbereinigung aus den Daten entfernt werden (vgl. Gleichung 8), bevor Trends berechnet werden, oder es kommen statistische Tests zum Einsatz, die nicht durch die Saisonalität beeinträchtigt werden wie beispielsweise der saisonale Mann-Kendall Trendtest (GILBERT 1987, S. 225; SCHÖNWIESE 2006, S. 219f). Werden die Jahres- oder einzelnen Monatsmittel auf Trends untersucht, liegen keine saisonalen Schwankungen in den Zeitreihen vor. Somit kann der Mann-Kendall Trendtest verwendet werden, um zu ermitteln, ob ein signifikanter Trend vorliegt (vgl. Abschnitt 4.2.3.1). Die Richtung und die Größe der Trends kann mithilfe des „Sen’s Nonparametric Estimator of Slope“ berechnet werden (vgl. Abschnitt 4.2.3.2).

##### 4.2.3.1 Mann-Kendall Trendtest

Der Mann-Kendall Trendtest setzt keine Normalverteilung oder Linearität des Trends voraus und ist gegenüber Ausreißern, fehlenden und abhängigen Daten unempfindlich. Der Test bewertet das relative Ansteigen oder Abfallen der Reihenwerte. Er gibt zwar keine Auskunft über den zeitlichen Verlauf der Veränderung, aber über existierende Trends in der Zeitreihe (GILBERT 1987, S. 208f; RAPP & SCHÖNWIESE 1995, S. 59). Im Falle nicht normalverteilter Daten ist der Test nach Mann und Kendall (Mann-Kendall Trendtest) nach HIRSCH et al. (1982) anderen Trendtests vorzuziehen (HIRSCH et al. 1982, S. 107f). Daher wurde der Mann-Kendall Trendtest bisher häufig zur Abschätzung der Signifikanz eines Trends in Zeitreihen von Parametern der Gewässergüte wie z. B. in WT-Zeitreihen angewandt (WEBB & WALLING 1992, S. 574; WEBB & NOBILIS 1994, S. 106; WEBB & NOBILIS 1995, S. 85; DAUFRESNE et al. 2003, S. 128; STEVENS 2003, S. 3; BARTHOLOW 2005, S. 154; HARI et al. 2006, S. 17). Die vorliegenden 72 WT-Zeitreihen wurden daher ebenfalls mit dem Mann-Kendall Trendtest auf mögliche Trends der einzelnen Monate und Jahre hin untersucht. Dazu wurden aus den Tagesmitteln der Wassertemperaturen sowohl Monats- als auch Jahresmittel berechnet.

Ursprünglich entwickelte Mann den Test, Kendall modifizierte ihn für den Fall identischer Zeitreihenwerte (RAPP & SCHÖNWIESE 1995, S. 60; SCHÖNWIESE 2006, S. 235). Dieser prüft die Nullhypothese  $H_0$  „kein Trend“ gegen die Alternativhypothese  $H_1$  „Trend liegt vor“. Zuerst wird die Zufallsvariable  $S$  wie folgt berechnet:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{Gl. 30}$$

mit

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{mit } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{mit } x_j - x_i = 0. \\ -1, & \text{mit } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 31}$$

Die aufeinanderfolgenden Zeitpunkte  $i = 1, 2, \dots, n$  sind dabei die Rangplätze. Die Vorzeichenfunktion Signum  $\text{sgn}$  ergibt die Anzahl der Vorzeichenwechsel bei dem Vergleichsschritt der Wertepaare  $x_j$  und  $x_i$  (GILBERT 1987, S. 209). Die Varianz von  $S$  ergibt sich dann aus

$$s^2 = \frac{1}{18} \cdot \left( n \cdot (n-1) \cdot (2 \cdot n + 5) \cdot \sum_{p=1}^q t_p \cdot (t_p - 1) \cdot (2 \cdot t_p + 5) \right), \quad \text{Gl. 32}$$

wobei  $q$  die Anzahl der Gruppen verbundener Ränge und  $t_p$  die Anzahl der Daten in der  $p$ -ten Gruppe sind (GILBERT 1987, S. 211).

Die Prüfgröße  $\hat{z}$  wird schließlich nach GILBERT (1987, S. 211) aus  $S$  und der Varianz von  $S$  folgendermaßen ermittelt

$$\hat{z} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & \text{mit } S > 0 \\ 0, & \text{mit } S = 0. \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & \text{mit } S < 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 33}$$

Dabei kann für  $n > 10$  die Prüfgröße  $\hat{z}$  als annähernd normalverteilt angenommen werden. Der Testentscheid wird mit der Prüfgröße  $\hat{z}$  anhand der in

Tabelle 14 aufgeführten Werte und der zugehörigen Irrtumswahrscheinlichkeit durchgeführt (RAPP & SCHÖNWIESE 1995, S. 62).

Tabelle 14: Signifikanzniveau und Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  für die Prüfgröße  $\hat{z}$  des Mann-Kendall Trendtests. Zusammenstellung nach RAPP & SCHÖNWIESE (1995, S. 62).

$\hat{z}$	Signifikanzniveau	Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$
> 1,645	> 90 %	> 0,1
> 1,960	> 95 %	> 0,05
> 2,576	> 99 %	> 0,01

#### 4.2.3.2 Sen's Nonparametric Estimator of Slope

Da der Mann-Kendall Trendtest lediglich die Signifikanz eines Trends feststellt, wurde zusätzlich der „Sen's Nonparametric Estimator of Slope“ (SNES) angewandt, um die Richtung und Größe der Trends zu ermitteln. Der SNES berechnet den mittleren Anstieg des Trends als Veränderung pro definierten Zeitschritt, im vorliegenden Fall also pro Monat bzw. Jahr. Der Test gibt die Größe des Trends in der Einheit der Daten, in diesem Fall also in °C aus und ist eng verbunden mit dem Mann-Kendall Trendtest. Denn er setzt ebenso wie dieser keine Normalverteilung voraus und ist weder anfällig gegenüber Datenlücken noch gegenüber Ausreißern (SEN 1968, S. 218). Zuerst werden nach SEN (1962) die  $N'$  Werte der Schätzgröße  $Q$  wie folgt berechnet

$$Q = \frac{x_{i'} - x_i}{i' - i} . \quad \text{Gl. 34}$$

Dabei sind  $x_{i'}$  und  $x_i$  die Werte zu den Zeitpunkten  $i'$  und  $i$ , wobei  $i' > i$  gilt. Mit  $N'$  wird die Anzahl der Wertepaare bezeichnet, für die  $i' > i$  gilt. Der Median wird aus den  $N'$  Werten der Schätzgröße  $Q$  ermittelt. Dazu werden die  $N'$  Werte der Reihe nach vom kleinsten zum größten Wert geordnet. Ist  $N'$  gerade, wird der Median aus dem arithmetischen Mittel der beiden mittleren Werte der Reihe berechnet. Bei ungeradem  $N'$  wird der Median aus dem mittlerem Wert der Reihe ermittelt. Der Median stellt dann den SNES, also die Größe des Trends in der Zeitreihe pro definiertem Zeitschritt dar (GILBERT 1987, S. 218).

Um die Ergebnisse des Mann-Kendall Trendtests sowie des SNES vergleichen zu können, wurden die Analysen mit WT-Zeitreihen durchgeführt, die folgende 20-jährige Zeitintervalle abdecken: 1988-2007, 1986-2005, 1984-2003 und 1979-1998. Zudem wurden alle Zeitreihen analysiert, die das 30-jährige Zeitintervall 1976-2005, 1975-2004 sowie das 37-jährige Zeitintervall 1971-2007 abdecken. Da die Zeitreihen „Gartz“ (1952-1973), „Erlin“ (01.11.1986-31.10.2006), „Dresden“ (1948-1993) und „Magwitz“ (1956-1978) Perioden außerhalb der oben genannten Zeitintervalle abdecken, wurden diese gesondert für die komplette Zeitreihenlänge auf mögliche Trends hin

untersucht. Grund für die Wahl dieser Zeitintervalle war, dass erstens alle verfügbaren Zeitreihen mindestens einmal analysiert und mit den Ergebnissen anderer Zeitreihen verglichen werden sollten. Zweitens wurden anhand der Zeitreihen, die mehr als einen dieser Zeitintervalle abdecken, untersucht, ob die Wassertemperaturwerte des Anfangs- und Endjahres einen Einfluss auf die Ergebnisse der Trendanalysen haben. Die Zeitreihen wurden jeweils auf dem Signifikanzniveau 95 % getestet. Eine Übersicht der WT-Zeitserien, die die einzelnen Zeitintervalle abdecken, sowie deren Einteilung nach Süd-, Nord- und Ostdeutschland befindet sich in Tabelle 24 im Anhang I. In Tabelle 15 ist die Anzahl der Zeitreihen pro Fluss und Zeitintervall aufgelistet, die das jeweilige Zeitintervall abdecken.

Tabelle 15: Anzahl der WT-Zeitserien, die die angegebenen Zeitintervalle für die Trendanalyse abdecken.

Fluss	Anzahl analysierter Zeitreihen pro Zeitintervall						Anzahl analysierter Zeitreihen pro Fluss
	1988-2007	1986-2005	1984-2003	1979-1998	1976-2005	1971-2007	
Isar		3	3				6
Donau	2	5	4	1			12
Radolfzeller Aach	1	1	1				3
Rhein	7	7	6	4	2		26
Neckar	5	6	6	4	2		23
Kocher	1	1	1				3
Main	9	12	12	8	6	6	53
Saar	3						3
Ems	1						1
Werra	1	1					2
Weser	4	6	6				16
Elbe		1	3	3			7
Mulde		2	1	1		1	5
Spree				2			2
Oder		6		3		2	11
Gesamtzahl	34	53	49	26	13	6	181

#### 4.2.4 Häufigkeitsanalyse extrem hoher Wassertemperaturen

Um neben der Trendanalyse zu untersuchen, wie häufig extrem hohe Werte in den WT-Zeitserien aufgetreten sind, wurde die Anzahl extremer Werte in den Zeitserien untersucht. Extremwerte sind unregelmäßig auftretende relative Maxima und Minima. Eine Möglichkeit, extreme Werte zu definieren, ist, alle Werte über einem definierten Schwellwert als Extremwert zu bezeichnen. Eine zweite Möglichkeit ist, Werte mithilfe beispielsweise des 90. oder 95. Perzentil als Extremwerte zu definieren (SCHÖNWIESE 2006, S. 220, 271). Die Wahl der Definition eines Extremwertes ist dabei abhängig von der Fragestellung der Untersuchung.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland sind ausschließlich extrem hohe Temperaturwerte von

Interesse, die insbesondere in den Sommermonaten auftreten (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). Zur Definition extrem hoher Werte wurde für alle WT-Zeitreihen die Methode der Perzentile und für die WT-Zeitreihen des Rheins zusätzlich die Methode der Schwellwerte angewandt. Die Gründe hierfür werden im Folgenden beschrieben.

Die 16 Flüsse, die in dieser Arbeit untersucht werden, weisen unterschiedliche Temperaturregime auf. (vgl. Abschnitt 2.2.1 und 4.2.1). Somit liegen unterschiedliche Temperaturspannen in den Zeitreihen vor. Beispielsweise treten in den Zeitreihen „Lenggries“ an der Isar und „Rockenau“ am Neckar die absoluten Maxima bei etwa 16 °C bzw. 31 °C auf. Daher wurden sehr hohe und extrem hohe Werte aller WT-Zeitreihen mit der Methode der Perzentile, und zwar durch das 95. und das 99. Perzentil definiert. Dies bedeutet, dass beim 95. bzw. 99. Perzentil jeweils fünf bzw. einem Prozent aller Daten der Zeitreihe über einem bestimmten Schwellwert liegen. Je nach der mittleren WT und dem Temperaturverlauf in den Zeitreihen ergeben sich zwar somit unterschiedliche Schwellwerte für die jeweiligen Perzentile. Diese Methode gewährleistet jedoch, dass die Ergebnisse der unterschiedlichen Zeitreihen bezüglich der Häufigkeit extrem hoher WT vergleichbar bleiben (SCHÖNWIESE et al. 2005, S. 13).

Die maximal erlaubte Mischtemperatur nach Kühlwassereinleitung liegt je nach Fluss in Deutschland zwischen 25 °C (z. B. Isar) und 28 °C (z. B. Neckar, Rhein, Elbe, Weser) (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). Um diese Grenzwerte nicht zu überschreiten, müssen Kraftwerke in Abhängigkeit der eingeleiteten Kühlwassermenge und -temperatur und somit in Abhängigkeit der Kraftwerksleistung, des Kühlsystems bzw. -verfahrens bereits zuvor ihre Leistung sukzessive drosseln, bevor die maximal erlaubten Mischtemperaturen erreicht werden. So muss beispielsweise ein Kraftwerk am Rhein bei einer erlaubten maximalen Mischtemperatur des Rheins von 28 °C (vgl. Abschnitt 2.1.2.2) nach Kühlwassereinleitung die Leistung des Kraftwerks bereits ab 23 °C Zulauftemperatur<sup>15</sup> schrittweise mit steigenden Temperaturen verringern<sup>16</sup>. Die Werte, ab dem die Kraftwerke ihre Leistung sukzessive reduzieren müssen, sind für kein weiteres Kraftwerk bekannt, da sie werbewerbsrelevante Informationen darstellen (vgl. Abschnitt 4.1). Aus diesem Grund wurden nur für die WT-Zeitreihen des Rheins zusätzlich zur Methode der Perzentile die Extremwerte der WT ab 23 °C jeweils mit einem 1 °C-Schritt bis > 28 °C festgelegt. Die Häufigkeit der mit beiden Methoden definierten extrem hohen WT des Rheins wurde anschließend verglichen.

Die Zählstatistik sehr hoher und extrem hoher WT-Werte wurde auf Basis der Tagesmittel für die gesamte Zeitreihenlänge aller 72 Zeitreihen sowohl für die einzelnen Jahre als auch für die Sommermonate Juni, Juli und August pro Jahr durchgeführt. Der Fokus auf den Sommermonaten liegt darin begründet, dass in diesen Monaten die höchsten WT im Jahresverlauf auftreten (vgl. Abschnitt 2.2.1).

---

<sup>15</sup> Die Zulauftemperatur ist die Wassertemperatur des Vorfluters bzw. Flusses bei Kühlwasserentnahme.

<sup>16</sup> Freundliche mündliche Mitteilung eines Kraftwerksbetreibers am Rhein am 14.05.2008. Um die Anonymität des Standortes zu gewährleisten, werden hier keine näheren Angaben zum Kraftwerk und Betreiber gemacht.

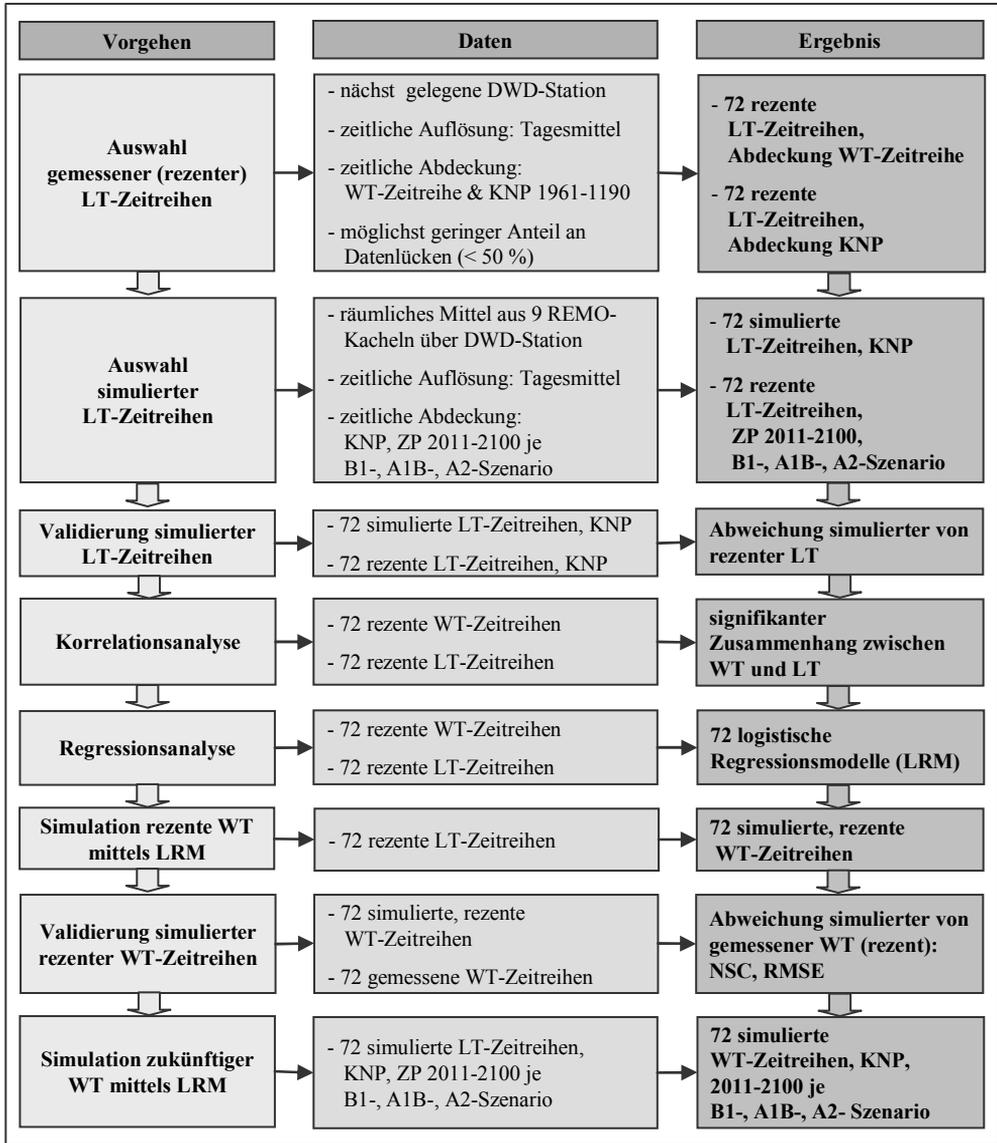


Abbildung 31: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Simulation zukünftiger WT-Zeitreihen.

#### 4.3 Simulation zukünftiger Wassertemperaturen

Für operative Entscheidungen im Bereich des Wassermanagements ist ein täglicher bis saisonaler Zeithorizont von Bedeutung. Dagegen ist bei strategischen Entscheidungen unter Berücksichtigung des Klimawandels ein längerer Zeithorizont bis zu 50 Jahre relevant (UNESCO 2007, S. 2). Während in der Wasserwirtschaft und im Wassermanagementbereich vergangene und aktuelle Informationen über das Klima berücksichtigt werden, gehen Informationen über Klimavariabilität und Klimaänderung bisher selten in die Planungen ein (UNESCO 2007, S. 3). Gleiches gilt für die Elektrizitätswirtschaft: Die Entwicklung zukünftiger WT von Flüssen im Kontext des Klimawandels spielt zwar für strategische Entscheidungen wie bei der Standortwahl neuer Kraftwerke bezüglich der Wahl der Kühlsysteme eine Rolle, wurde bisher jedoch noch nicht untersucht.

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen der Simulation zukünftiger WT und deren Analysen aufgeführt (vgl. Abbildung 31). Dazu werden in Abschnitt 4.3.1 die rezenten und projizierten LT beschrieben, die für die Simulation der WT deutscher Flüsse als Datengrundlage dienen. Die Methode der WT-Simulation, die Modellgüte und die Validierungsergebnisse werden in Abschnitt 4.3.2 dargestellt.

#### 4.3.1 Datengrundlage: gemessene und projizierte Lufttemperaturzeitreihen

Für die Simulation der WT wurden sowohl gemessene (rezente) als auch projizierte LT verwendet. Dabei wurden die gemessenen LT eingesetzt, um erstens die Güte der projizierten LT festzustellen und zu prüfen, ob sich diese für die Projektion der WT eignen. Zweitens wurde mittels der gemessenen LT und WT untersucht, ob es einen statistischen Zusammenhang zwischen beiden Größen gibt. Und drittens wurden die beobachteten LT zum Aufbau des Vorhersagemodells der WT verwendet. Die Datenauswahl und -aufbereitung der rezenten LT-Zeitreihen werden in Abschnitt 4.3.1.1 beschrieben. Für die Simulation zukünftiger WT wurden projizierte LT des REMO eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Das Vorgehen der Datenaufbereitung und die Validierung der projizierten LT werden in Abschnitt 4.3.1.2 dargestellt. Am Ende dieses Abschnitts sind in Tabelle 16 die verwendeten LT-Zeitreihen aufgelistet.

##### 4.3.1.1 Auswahl und Aufbereitung der gemessenen Lufttemperaturen

Die Zeitreihen der beobachteten LT wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bezogen und nach folgenden drei Kriterien ausgewählt:

- Aus dem DWD Stationsnetz wurden nach PILGRIM et al. (1998) erstens diejenigen Stationen bestimmt, die möglichst nahe an einer Messstation für WT liegen, um sicherzustellen, dass die Stationen aus einer ähnlichen Klimaregion stammen (PILGRIM et al. 1998, S. 1110).
- Zweitens sollten die LT-Zeitreihen sowohl den Zeitraum der KNP 1961-1990 für die Validierung der simulierten LT-Daten als auch den der jeweiligen WT-Zeitreihe abdecken.
- Drittens sollten die Zeitreihen möglichst wenige Datenlücken aufweisen.

Die ausgewählten DWD- und WT-Stationen sind in Abbildung 32 zu sehen. Für 62 der 72 WT-Zeitreihen standen LT-Zeitreihen einer Messstation zur Verfügung. Für zehn WT-Zeitreihen musste auf jeweils zwei LT-Zeitreihen des DWD zurückgegriffen werden, da keine der benachbarten LT-Zeitreihen alleine die erforderliche Länge der WT-Zeitreihen aufweist. Zudem wurden 22 LT-Zeitreihen jeweils für zwei oder drei WT-Zeitreihen verwendet, da keine anderen benachbarten Klimastationen zur Verfügung standen, deren Zeitreihe die der WT abdeckt. Die Distanz zwischen

den jeweiligen WT- und DWD-Stationen beträgt zwischen einem und 71,5 km und im Mittel 16,1 km Luftlinie (vgl. Tabelle 16). Die LT-Zeitreihen liegen als Tagesmittel vor. Der DWD stellt die LT

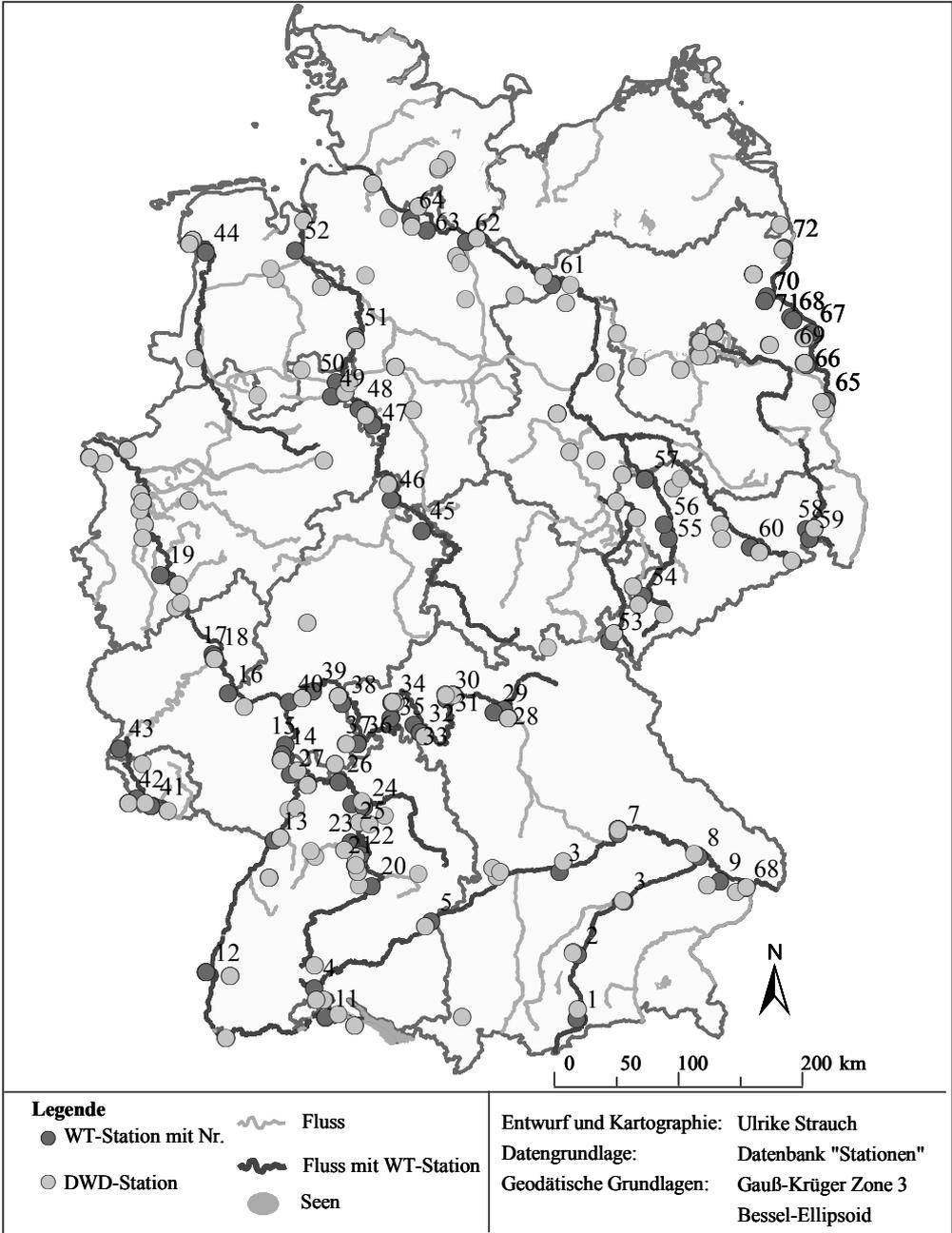


Abbildung 32: Räumliche Verteilung der 72 WT- und 82 DWD-Stationen.

bereits auf Plausibilität und Homogenität geprüft zur Verfügung (DWD 2010a, b, c, S. 1). Vorhandene Datenlücken wurden nicht interpoliert, da für die Korrelations- und Regressionsanalyse keine äquidistanten Zeitreihen benötigt werden.

Wie den Tabellen 10 und 16 zu entnehmen ist, liegen die WT- und Klimastationen auf unterschiedlichen Höhen ü. NN. Um eine Verzerrung in den Ergebnissen der Korrelations- und Regressionsanalyse aufgrund des Höhenunterschieds zu vermeiden, wurden die LT bezogen auf die WT-Station mit folgender Formel höhenkorrigiert

$$X'_i = X_i - \frac{(M_{WT} - M_{LT}) \cdot 0,64^\circ\text{C}}{100\text{m}} \quad \text{Gl. 35}$$

$X'_i$  sind die höhenkorrigierten und  $X_i$  die originalen Tagesmittel der LT mit  $i = 1, 2, \dots, n$ .  $M_{WT}$  und  $M_{LT}$  stellen jeweils die Lage der Wassertemperatur- und Klimastation in Meter ü. NN und  $0,64^\circ\text{C}/100\text{m}$  den konstanten Gradienten der Höhenkorrektur dar (MPI-MET o. J., S. 4).

Die zehn LT-Zeitreihen, die aus den Zeitreihen zweier Klimastationen zusammengesetzt sind, wurden auf Inhomogenität der Zeitreihe überprüft. Da der Zeitpunkt der potentiellen Inhomogenität durch die Zusammensetzung bekannt ist, fand der t-Test nach den Gleichungen 20-25 Verwendung. Mit diesem wurde geprüft, ob ein signifikanter Unterschied der Mittelwerte der beiden LT-Zeitreihen vorliegt. Dies ist für keine der Zeitreihen der Fall. Die LT-Zeitreihen wurden jeweils auf die Länge der WT-Zeitreihen für die Korrelations- und Regressionsanalyse angepasst (vgl. Abschnitt 4.3.2). Eine Übersicht über die ausgewählten DWD-Messstationen, ihrer Entfernung (Luftlinie) zu den jeweiligen WT-Stationen, ihre Höhe ü. NN, den Beginn und das Ende der Zeitreihen angepasst auf die Länge der WT-Zeitreihen sowie den Rechts- und Hochwert im GK3 liefert Tabelle 16 am Ende des Abschnitts 4.3.1.2. Im Folgenden wird die Datengrundlage der simulierten LT beschrieben.

#### 4.3.1.2 Auswahl, Aufbereitung und Validierung der projizierten Lufttemperaturen

Für Deutschland liegen Ergebnisse verschiedener regionaler Klimamodelle vor (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Für die Simulation zukünftiger WT wurden in dieser Studie tägliche LT des REMO verwendet, da sie für ganz Deutschland in einer räumlichen Auflösung von  $10 \times 10$  km und für die drei SRES Szenarien B1, A1B und A2 vorliegen. Im Folgenden wird die allgemeine Qualität der 2m-Lufttemperaturdaten aus dem REMO beschrieben. Anschließend werden die Auswahl der REMO-Kacheln sowie die Aufbereitung und Validierungsergebnisse der ausgewählten LT-Zeitreihen dargestellt.

Im Rahmen des UBA Projektes (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) wurde die Qualität der REMO-Ergebnisse seitens des MPI-MET für den Zeitraum 1979-2003 überprüft. Die Daten aus dem Reanalyseprojekt ERA 15 des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW) und die operationellen Analysen des EZMW für den Zeitraum 1979-1992 bzw. 1994-2003 dienen dem REMO-Lauf als Randwerte. Diese stellen „...die bestmögliche Abschätzung der realen großskaligen atmosphärischen Verhältnisse in den entsprechenden Zeiträumen...“ dar (JACOB et al. 2008, S. 25). Treten zwischen den Beobachtungsdatensätzen und dem REMO-Validierungslauf Unterschiede auf,

liegt dies sehr wahrscheinlich an Defiziten der Modellformulierung bzw. der Nestungsstrategie. Dagegen kann beim ECHAM5/MPI-OM-angetriebenen REMO-Kontrolllauf (1950-2000) der Grund für Unterschiede zu den Beobachtungsdatensätzen in unrealistischen großskaligen Strömungsverhältnissen liegen. Dem Kontrolllauf liegen die für diesen Zeitraum gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre zu Grunde (JACOB et al. 2008, S. 25f). Die LT des Validierungslaufs 1979-2000 entsprechen im räumlichen Mittel über Deutschland den beobachteten Werten des Climate Research Unit (CRU)<sup>17</sup>. Regional ergeben sich allerdings durch die unterschiedliche räumliche Auflösung der REMO-Daten und der beobachteten Daten Unterschiede. So liegen beispielsweise die beobachteten LT für den Oberrheinraben zwischen 10 und 11 °C und die des REMO-Validierungslaufs zwischen 11 und 12 °C, was zumindest zum Teil auf die unterschiedliche räumliche Auflösung und damit verbundene unterschiedliche Höhe der einzelnen Kacheln zurückzuführen ist (JACOB et al. 2008, S. 34). Im Jahresverlauf weisen die räumlich gemittelten simulierten LT des REMO-Validierungslaufs prinzipiell eine gute Übereinstimmung gegenüber den gemessenen Werten auf. Allerdings werden die Temperaturen der Sommermonate um 1 bis 2 °C überschätzt und die der Wintermonate um ca. 1 °C unterschätzt (JACOB et al. 2008, S. 36). Die Häufigkeitsanalyse zeigte, dass gegenüber den gemessenen Werten in den simulierten LT des REMO-Validierungslaufs Werte größer 15 °C häufiger und Werte kleiner 15 °C weniger häufig vorkommen. Ein deutlicher Unterschied ergibt sich bei der Anzahl der 0 °C Werte, die in den REMO-Daten wesentlich häufiger als in den beobachteten Daten auftreten. Dies resultiert daraus, dass im REMO die Oberflächenschicht des Erdbodens mächtiger aufgelöst ist, als dies in der Realität der Falls ist. In dieser Oberflächenschicht finden Schmelz- und Gefrierprozesse statt. Ist diese nicht komplett aufgetaut, treten konstante Temperaturwerte von 0 °C auf. Die im REMO mächtigere Oberflächenschicht des Erdbodens führt zu einer längeren Dauer der Schmelzprozesse im REMO, so dass Temperaturwerte von 0 °C häufiger vorkommen (JACOB et al. 2008, S. 37f).

Im Gegensatz zum Validierungslauf hängt die Qualität des Kontrolllaufs nicht nur von der Qualität des REMO ab, sondern vor allem von der Qualität des im ECHAM5 berechneten Kontrollklimas, welches wiederum das REMO antreibt (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Der REMO-Kontrolllauf zeichnet den Jahresgang beobachteter Daten generell gut nach. Lediglich die Mittel der Winter- und Sommermonate werden leicht unterschätzt und die der Übergangsjahreszeiten leicht überschätzt. Insgesamt zeigt der Vergleich der Jahresgänge zwischen simulierten LT des REMO-Kontrolllaufs und beobachteten Werten für das räumliche Mittel über Deutschland ein zufriedenstellendes Ergebnis (JACOB et al. 2008, S. 39f, 90).

Für den Vergleich der simulierten LT des REMO mit Beobachtungsdaten empfiehlt das MPI-MET sowohl eine räumliche Mittelung der LT über 3 x 3 REMO-Kacheln als auch eine Höhenkorrektur auf die jeweilige Klimastation (MPI-MET JACOB et al. 2008, S. 32; o. J., S. 4). Daher wurden zu jeder der 72 Klimastationen des DWD das räumliche, arithmetische Mittel aus den neun entsprechenden LT-Zeitreihen des REMO-Kontrolllaufs sowie der drei REMO-Szenarienläufe B1, A1B und A2 gebildet. Die Höhenkorrektur der simulierten LT-Werte fand in Anlehnung an das Vorgehen für die gemessenen LT nach Gleichung 35 auf die Höhe der entsprechenden WT-Stationen statt. Um die Qualität der simulierten gegenüber den gemessenen LT beurteilen zu können, wurde aus den simulierten und gemessenen Zeitreihen jeweils die KNP 1961-1990 gewählt. Neun Zeitreihen gemessener LT decken entweder diesen Zeitraum nicht ab oder enthalten mehrere Jahre Datenlücken.

---

<sup>17</sup> Die CRU der University of East Anglia liegen in einem 1/6°-Gitter für Europa u. a. für die LT für den Zeitraum 1901-2000 vor.

Im ersten Fall wurden sowohl der Beginn als auch das Ende der Zeitreihen entsprechend in jüngere Jahre verschoben. Im zweiten Fall beginnen die Zeitreihen im Jahr 1961. Das Zeitreihenende wurde ebenfalls in jüngere Jahre verschoben. Das Jahr 2000 stellt das maximale Ende dieser neun Zeitreihen dar, da hier der REMO-Kontrolllauf endet. Ziel war es dabei, 30 Jahre bzw. einen möglichst langen Zeitraum abzudecken. In Tabelle 16 finden sich neben den Informationen zu den ausgewählten DWD-Stationen die Bezeichnung der LT-Zeitreihen, der Beginn und das Ende der jeweiligen KNP-Zeitreihe, die mittlere Höhe der neun ausgewählten REMO-Kacheln in Meter ü. NN (Höhe) sowie die den DWD-Stationskoordinaten entsprechenden X- und Y-Werte der REMO-Kachel (REMO X- und Y-Wert), um die jeweils 3 x 3 Kacheln ausgewählt wurden.

Die Validierung des REMO-Kontrolllaufs anhand beobachteter LT fand erstens durch den Vergleich der statistischen Charakteristika Mittelwert, Standardabweichung und Jahresamplitude der KNP statt. Im zweiten Schritt wurden die über die KNP gemittelten Jahresgänge visuell auf Unterschiede in den einzelnen Monaten hin überprüft. Dazu wurden die über die KNP gemittelten Monatsmittelwerte der gemessenen und simulierten LT gemeinsam mit deren Differenz in Graphiken dargestellt. Das höchste über die KNP gemittelte Jahresmittel der gemessenen LT tritt mit 11,3 °C in der höhenkorrigierten Zeitreihe der Station „Stuttgart\_N\_Poppenweiler“ auf. Die über 30 Jahre gemittelte minimale Jahresmitteltemperatur tritt in der Zeitreihe „Aach“ mit 7,2 °C auf. Im Mittel über alle 72 Zeitreihen gemessener LT beträgt es 9,3 °C. Die Jahresmittel der simulierten LT überschätzen im Mittel über die KNP in 69 der 72 Zeitreihen die der gemessenen Werte zwischen 0,1 °C („Bueckeberg“) und 2,1 °C („Metten“). Leicht unterschätzt werden die gemessenen durch die simulierten Werte in den Zeitreihen „Stuttgart\_N\_Wendlingen“ und „Stuttgart\_N\_Poppenweiler“ mit 0,2 °C und „Heidelberg“ mit 0,6 °C. Die Jahresmittel der simulierten LT im Mittel über die KNP liegen zwischen 8,7 °C („Aach“) und 11,4 °C („Freiburg“). Im Mittel über alle Zeitreihen liegt das Jahresmittel bei 10,1 °C und somit um 0,8 °C über dem der gemessenen LT. Die Standardabweichungen der simulierten LT betragen zwischen 5,7 °C („Emden“) und 7,8 °C („Passau“) sowie im Mittel 7,1 °C, die der gemessenen LT-Zeitreihen zwischen 6,5 °C („Emden“) und 8,0 °C („Regensburg\_Landshut“) sowie im Mittel 7,5 °C jeweils im Jahresmittel über die KNP gemittelt. Somit fallen die Standardabweichungen der simulierten LT im Mittel über die KNP mit im Mittel 0,45 °C geringer aus als die der gemessenen LT-Zeitreihen. Die über die KNP gemittelten Amplituden der gemessenen und simulierten LT-Zeitreihen liegen im Mittel aller Stationen bei 18,0 °C bzw. 17,8 °C. Die Maximalwerte betragen jeweils 20,0 °C und die Minimalwerte 15,2 °C bzw. 14,5 °C. Die Werte der über die KNP gemittelten Jahresmittel, Standardabweichungen und Amplituden der gemessenen (DWD) und simulierten (REMO) Zeitreihen finden sich in Tabelle 25 im Anhang I.

In Abbildung 33 sind beispielhaft für vier Zeitreihen die über die KNP gemittelten Jahresgänge der gemessenen (DWD) und simulierten (REMO) LT sowie die Differenzen (DWD-REMO) aufgetragen. In Abbildung 75 im Anhang II finden sich die Ergebnisse des Vergleichs der Jahresgänge für alle Zeitreihen. Die bereits im Vergleich der über die KNP gemittelten Jahresmittel festgestellte Überschätzung der gemessenen durch die simulierten LT ist im mittleren Jahresgang der Zeitreihen „BadToelz“, „Emden“, „Boizenburg\_Lauenburg“ und „Boizenburg\_Schnackenburg“ zu sehen. Vor allem in den Wintermonaten und in den Übergangsjahreszeiten werden die Monatsmittel der gemessenen LT durch die Daten des REMO-Kontrolllaufs überschätzt. Allerdings werden in 35 der 72 Zeitreihen die Mittelwerte der Sommermonate so exakt wie in der Reihe „BadToelz“ oder „Boizenburg\_Lauenburg“ wiedergegeben. Geringe Über- oder Unterschätzungen wie in der Zeitreihe „Emden“ treten in 27 der Zeitreihen auf, während eine größere Überschätzung gemessener durch

simulierte LT um bis zu ca. 2 °C wie in der Zeitreihe „Boizenburg\_Schnackenburg“ lediglich in zehn Reihen auftritt (vgl. Abbildung 33).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die simulierten LT des REMO-Kontrolllaufs die gemessenen LT der einzelnen Stationen zufriedenstellend wiedergeben. Vor allem die Mittelwerte der Sommermonate weisen in der Mehrheit keine oder nur geringe Unterschiede zwischen den gemessenen und simulierten Temperaturen auf. Dies ist von besonderer Bedeutung, da insbesondere in den Sommermonaten hohe WT und damit verbunden mögliche Leistungseinschränkungen thermischer Kraftwerke im Zusammenhang mit wasserrechtlichen Grenzwerten auftreten (vgl. Abschnitt 2.1.2.2).

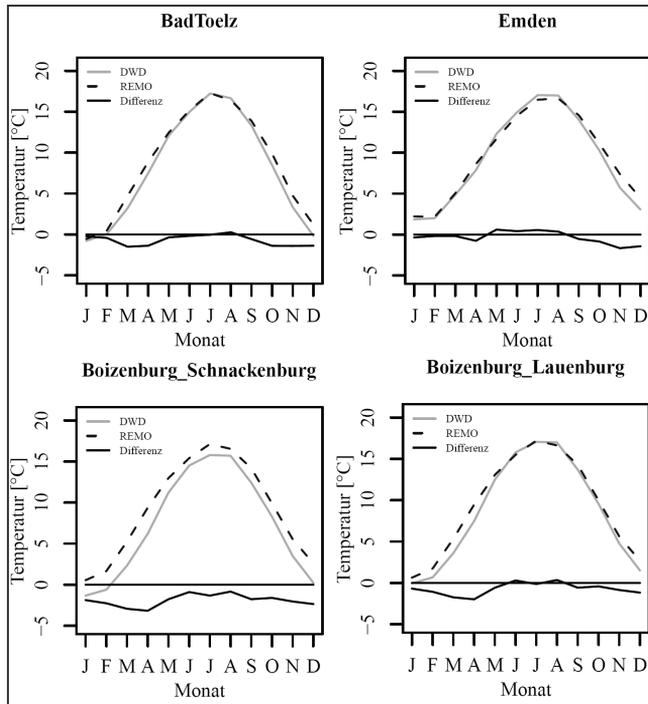


Abbildung 33: Über die KNP gemittelter Jahresgang der gemessenen (DWD) und simulierten (REMO) LT sowie die Differenz der Jahresgänge (DWD-REMO) beispielhaft dargestellt an drei Zeitreihen.

Abschließend findet sich in Tabelle 16 die Übersicht über die ausgewählten LT-Zeitreihen des DWD und des REMO. Alle Angaben zu den ausgewählten WT- sowie den LT-Zeitreihen des DWD und REMO wie z. B. Stationsnummer, Koordinaten, wurden in einer Datenbank „Stationen“ zusammengefasst. Diese wurde als Datengrundlage im GIS zur Kartenerstellung verwendet.

Tabelle 16: DWD-Stationen zu WT-Zeitreihen mit zeitlicher Abdeckung der LT-Zeitreihen, der Distanz zwischen WT- und DWD-Station in km, dem Rechts- und Hochwert im GK3 und der Höhe der DWD-Stationen über NN.

Nr.	WT-Zeitreihe	DWD-Station	LT-Zeitreihe	Distanz in km	DWD Beginn	DWD Ende	KNP Beginn	KNP Ende	Höhe Station	DWD RW	DWD HW	Höhe MO Wert	RE-MO X-Y Wert
45	Allendorf	Wahlsb.-Lippoldsberg	Wahlsburg_Allendorf	47,5	01.01.1986	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	176	3540398	5720266	255	47
57	BadDueben	Leipzig-Schkeuditz	Leipzig_BadDueben	29,5	01.01.1986	31.12.2005	01.01.1973	31.12.2000	131	3725228	5705433	111	66
58	Bautzen	Kubschuetz/Kr. Bautzen	Kubschuetz_Bautzen	6,5	01.01.1965	31.12.1998	01.01.1961	31.12.1990	232	3884529	5684442	245	82
23	Besigheim	Stuttg.-Schmarrenberg	Stuttgart_S_Besigheim	18,5	01.01.1975	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	314	3514681	5410559	313	41
15	Biblis	Worms	Worms_Biblis	13	01.01.1975	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	88	3454223	5495987	102	36
52	Brake	Bremerhaven	Bremerhaven	25	01.01.1984	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	7	3472376	5933444	4	43
12	Breisach	Freiburg	Freiburg	20	01.01.1984	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	236	3412976	5320397	329	29
8	Deggendorf	Metten	Metten	5,5	01.01.1981	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	313	3787384	5419795	429	69
51	Drakenburg	Nienburg	Nienburg	3	01.01.1982	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	25	3514656	5836947	37	46
60	Dresden	Dresden-Hosterwitz	Dresden	8,5	01.01.1961	31.12.1993	01.01.1961	31.12.2000	114	3840210	5664564	222	77
65	Eisenhuettenstadt	Manschnow	FrankfO_Eisenhuettenstadt	55	01.01.1985	31.12.2005	01.01.1985	31.12.1990	12	3876274	5838431	27	83
65	Eisenhuettenstadt	Frankfurt-O	FrankfO_Eisenhuettenstadt	36,5	01.01.1961	31.12.1984	01.01.1961	31.12.1990	48	3876710	5817971	52	83
47	Emmerthal	Hamel	Hamel	10,5	01.01.1986	31.10.2007	01.01.1961	31.12.1990	66	3522830	5775783	162	46
33	Erlabrunn	Wuerzburg	Wuerzburg_Erlabrunn	13,5	01.01.1977	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	268	3569632	5514778	268	48
55	Erlin	Leipzig_Holzhausen	Leipzig_Erlin	31,5	01.11.1986	31.10.2006	01.01.1961	31.12.1990	138	3740469	5692386	127	67
39	FrankfM_Osthafen	Frankfurt-Flughafen	FrankfurtM_Osthafen	10	01.01.1971	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	112	3471355	5545917	128	38
66	FrankfurtO	Frankfurt-O	FrankfurtO	2,5	01.01.1985	31.12.2004	01.01.1985	31.12.1990	12	3876274	5838431	27	83
66	FrankfurtO	Manschnow	FrankfurtO	22	01.01.1961	31.12.1984	01.01.1961	31.12.1984	48	3876710	5817971	52	83
72	Gartz	Angermuende	Angermuende_Gartz	33	01.01.1961	31.12.1973	01.01.1961	31.12.1990	54	3835269	5889425	50	79
56	Golzern	Leipzig-Holzhausen	Leipzig_Golzern	24	01.01.1986	31.12.2005	01.01.1961	31.12.1990	138	3740469	5692386	127	67
69	GrNeuendorf	Muencheberg	Muencheb_GrNeuendorf	29	01.01.1970	31.12.2005	01.01.1961	31.12.1990	63	3848310	5832631	52	59
25	Gundelsheim	Stuttg.-Schmarrenberg	Stuttgart_S_Gundelsheim	49,5	01.01.1981	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	314	3514681	5410559	313	41
63	HH_Bunthaus	Hamburg-Fuhlsbuettel	Hamburg_Fuhlsbuettel	20,5	01.01.1978	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	11	3565039	5944941	23	53
64	HH_Seemannshoefl	HH-Neuwiedenthal	Hamburg_Neuwiedenthal	7	01.01.1978	31.12.2006	01.01.1963	31.12.1990	3	3559739	5928176	23	52
46	Hemeln	Wahlsb.-Lippoldsberg	Wahlsburg	13	01.01.1982	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	176	3540398	5720266	255	47
21	Hofen	Stuttg.-Schmarrenberg	Stuttgart_S_Hofen	2,5	01.01.1983	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	314	3514681	5410559	313	41
71	Hohensaaten	Angermuende	Angerm_Hohensaaten	20,5	01.01.1981	31.12.2005	01.01.1961	31.12.1990	54	3835269	5889425	50	79
4	Immendingen	Engen	Aach	10	01.01.1985	30.06.1986	01.01.1961	30.06.1986	478	3488775	5301220	573	37
4	Immendingen	Aach	Aach	13	01.08.1986	31.12.2007	01.08.1986	31.12.1990	540	3482539	5301235	614	36

Nr.	WT-Zeitreihe	DWD-Station	LT-Zeitreihe	Dis- tanz in km	DWD Beginn	DWD Ende	KNP Beginn	KNP Ende	Hö-he DWD Sta- tion	DWD RW	DWD HW	Hö- he RE- MO	RE- MO Y- Wert	RE- X- Wert	RE- Y- Wert
6	Ingolstadt	Koesching	Koesching	9,5	01.01.1981	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	417	3682286	5413515	413	58	38	38
43	Kanzem	Weiskirchen	Weiskirchen	22	01.01.1988	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	380	3342033	5492525	349	24	50	50
13	Karlsruhe	Karlsruhe	Karlsruhe	5,5	01.01.1988	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	112	3453695	5432973	129	35	43	43
16	Kaub	Geisenheim	Geisenheim	17,5	01.01.1979	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	110	3424703	5538954	257	33	54	54
28	Kemmern	Bamberg	Bamberg_Kemmern	9	01.01.1981	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	239	3637728	5529066	330	55	50	50
68	Kienitz	Muencheberg	Muencheberg_Kienitz	28	01.04.1981	31.12.2005	01.01.1961	31.12.1990	63	3848310	5832631	52	80	79	79
67	Kietz	Manschnow	FrankfurtO_Kietz	7,5	01.01.1981	31.12.1984	01.01.1961	31.12.1984	48	3876710	5817971	52	83	77	77
67	Kietz	Frankfurt-O	FrankfurtO_Kietz	25	01.01.1985	31.12.2005	01.01.1985	31.12.1990	12	3876274	5838431	27	83	79	79
37	Kleinheubach_Kahl	Kahl	Kahl_Kleinheubach	42,5	01.01.1981	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	107	3500000	5547694	149	41	54	54
36	Kleinheubach_P_Kahl	Kahl	Kahl_Kleinheubach_P	42,5	01.01.1970	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	107	3500000	5547694	149	41	54	54
38	Kleinstheim	Kahl	Kahl_Kleinstheim	8	01.01.1987	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	107	3500000	5547694	149	41	54	54
17	Koblenz	Koblenz-Horchheim	Koblenz-Horchheim	4,5	01.01.1982	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	85	3400336	5578290	233	31	58	58
18	Koblenz_WUK	Koblenz-Horchheim	Koblenz_WUK	1,5	01.01.1978	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	85	3400336	5578290	233	31	58	58
19	Koeln	Koeln	Koeln	17	01.01.1985	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	92	3370956	5638276	102	29	65	65
3	Landshut_Regensburg	Regensburg	Regensburg_Landshut	59	01.01.1981	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	365	3726562	5439264	396	63	40	40
62	Lauenburg	Boizenburg	Boizenburg_Lauenburg	9	01.01.1975	31.12.2000	01.01.1961	31.12.1990	45	3611949	5919846	21	57	90	90
1	Lenggries	Bad Toelz	BadToelz	7,5	01.01.1982	31.12.2006	01.01.1961	31.12.2000	724	3693682	5293324	809	58	26	26
42	Lisdorf	Berus	Berus	7,5	01.01.1988	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	363	3331419	5461309	256	23	47	47
53	Magwitz	Plauen	Plauen_Magwitz	7	01.01.1961	31.12.1978	01.01.1961	31.12.1990	386	3722338	5598728	493	64	56	56
27	Mannheim	Mannheim	Mannheim	6,5	01.01.1977	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	96	3467419	5486624	139	37	48	48
2	Muenchen	Muenchen-Stadt	Muenchen	5	01.01.1981	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	515	3689651	5339561	502	58	31	31
70	Neuglitzten	Angermuende	Angerm_Neuglitzten	23	01.01.1976	31.12.2005	01.01.1961	31.12.1990	54	3835269	5889425	50	79	84	84
48	Oldendorf	Hameln	Hameln_Oldendorf	7,5	01.01.1982	31.12.2003	01.01.1961	31.12.1990	66	3522830	5775783	162	46	77	77
10	Passau	Passau-Oberhaus	Passau	1	04.01.1997	31.12.2006			476	3821078	5388180	407	72	34	34
10	Passau	Fuerstenzell	Passau	9	01.01.1981	03.01.1997	01.01.1961	31.12.1990	409	3829470	5392382	407	72	34	34
50	Petershagen	Bueckeberg	Bueckeberg_Petersha	10,5	01.01.1984	31.12.2006	01.01.1979	31.12.2000	68	3505686	5794277	97	45	79	79
22	Poppenweiler	Stuttg-Neckartal	Stuttgart_N_Poppenweiler	15	01.01.1980	31.12.2007	01.01.1980	31.12.2000	224	3515921	5405003	348	41	39	39
49	Porta	Bueckeberg	Bueckeberg	11,5	01.01.1984	31.12.2006	01.01.1979	31.12.2000	68	3505686	5794277	97	45	79	79
40	Raunheim	Frankfurt-Flughafen	FrankfurtM_Raunheim	12	01.01.1980	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	112	3471355	5545917	128	38	54	54

Nr.	WT-Zeitreihe	DWD-Station	L.T-Zeitreihe	Dis- tanz in km	DWD Beginn	DWD Ende	KNP Beginn	KNP Ende	Höhe DWD Sta- tion	DWD RW	DWD HW	Hö- he RE- MO	RE- MO X- Y- Wert	RE- MO Wert
7	Regensburg	Regensburg	Regensburg	3,5	01.01.1987	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	365	3726562	5439264	396	63	40
11	Rielasingen	Radolfzell	Radolfzell	10	01.01.1983	31.12.1996	01.01.1961	30.11.1990	407	3500000	5290091	495	38	28
26	Rockenau	Heidelberg	Heidelberg	24,5	01.01.1977	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	110	3475816	5475460	211	38	47
35	Rothenfels	Lohr-Steinbach	Lohr_Rothenfels	13,5	01.11.2005	31.12.2006			285	3546580	5542336	299	46	53
35	Rothenfels	Lohr-Halsbach	Lohr_Rothenfels	14,5	01.01.1977	31.10.2005	01.01.1961	31.12.1990	161	3544192	5542315	342	45	53
41	Saarbruecken	Saarbruecken-Emmsheim	Saarbruecken	14,5	01.01.1988	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	320	3362812	5454873	280	26	46
59	Schirgiswalde	Kubschuetz/Kr. Bautzen	Kubschuetz_Schirgiswalde	10,5	01.01.1976	31.12.1998	01.01.1961	31.12.1990	232	3884529	5684442	245	82	63
61	Schnaackenburg	Boizenburg	Boizenburg_Schnaackenburg	71,5	01.01.1980	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	45	3611949	5919846	21	57	90
31	Schweinfurt	Schweinfurt	Schweinfurt	4	01.03.2005	31.12.2007			304	3593063	5548504	293	51	53
31	Schweinfurt	Schonungen	Schweinfurt	7	01.01.1981	31.12.2003	01.01.1961	31.12.1990	240	3587097	5548403	289	50	53
30	Schweinfurt_Pegel	Schonungen	Schweinfurt_Pegel	4	01.01.1971	31.12.2003	01.01.1961	31.12.1990	240	3587097	5548403	288	50	53
30	Schweinfurt_Pegel	Schweinfurt	Schweinfurt_Pegel	7	01.03.2005	31.12.2007			304	3593063	5548504	293	51	53
24	Stein	Stuttgart-Schmarrenberg	Stuttgart_S_Stein	47	01.01.1981	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	314	3514681	5410559	313	41	40
34	Steinbach	Lohr-Halsbach	Lohr_Steinbach	4	01.11.2005	31.12.2007			285	3546580	5542336	299	46	53
34	Steinbach	Lohr-Steinbach	Lohr_Steinbach	1,5	01.01.1971	31.10.2005	01.01.1961	31.12.1990	161	3544192	5542315	342	45	53
44	Terborg	Emden-Nesslerland	Emden	14,5	01.07.1997	31.12.2007	01.07.1997	31.12.2000	0	3382464	5918126	2	34	93
44	Terborg	Emden	Emden	15	01.01.1988	30.06.1997	01.01.1976	30.06.1997	5	3380153	5914472	1	33	93
29	Trunstadt	Bamberg	Bamberg_Trunstadt	12,5	01.01.1971	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	239	3637728	5529066	330	55	50
5	Ulm_Boefingen	Ulm	Ulm	6	01.01.1979	31.12.1998	01.01.1961	31.12.1990	567	3570358	5360941	533	46	34
9	Vilshofen	Aldersbach-Kriestorf	Aldersbach	10,5	01.01.1981	31.12.2006	01.01.1961	31.12.1990	340	3798546	5394372	366	69	35
20	Wendlingen	Stuttgart-Neckartal	Stuttgart_N_Wendlingen	16,5	01.01.1987	31.12.2007	01.01.1980	31.12.2000	224	3515921	5405003	348	41	39
14	Worms	Worms	Worms	4	01.01.1976	31.12.2005	01.01.1961	31.12.1990	88	3454223	5495987	102	36	49
32	Wuerzburg	Wuerzburg	Wuerzburg	5	01.01.1971	31.12.2007	01.01.1961	31.12.1990	268	3569632	5514778	268	48	50
54	ZwickauPoelbitz	Plauten	Plauten_ZwickauPoelbitz	38,5	01.01.1976	31.12.2003	01.01.1961	31.12.1990	386	3722338	5598728	493	64	56

#### 4.3.2 Logistische Regressionsanalyse

Bevor die WT mittels LT simuliert werden können, ist festzustellen, ob ein statistischer Zusammenhang zwischen den gemessenen Luft- und WT-Zeitreihen besteht. Dazu wurde jeweils für alle 72 Zeitreihenpaare der LT und WT (vgl. Tabelle 16) eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Nach den Gleichungen 10 und 11 wurden für die LT und WT der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient  $r_{X,Y}$  nach Pearson und der Rangkorrelationskoeffizient  $r_R$  nach Spearman berechnet sowie nach Gleichung 12 die Korrelationen auf Signifikanz getestet (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,01$ ). Um festzustellen, für welche zeitliche Auflösung die höchste Korrelation vorliegt, wurde die Korrelationsanalyse für die Tages-, Wochen- und Monatsmittel der LT und WT durchgeführt. Da bei Zeitreihenkorrelationen eine zeitliche Verschiebung der Zeitreihen zueinander mit  $\tau \neq 0$  zu höheren Korrelationswerten führen kann, wurde zusätzlich mit den Tagesmitteln der Zeitreihen eine Kreuzkorrelation durchgeführt. Dazu wurden ebenfalls die Korrelationskoeffizienten nach Pearson und nach Spearman verwendet. Die WT wurden jeweils um einen Tag Zeitversatz mit  $\tau = 1, 2, \dots, 5$  gegen die LT verschoben und jeweils auf einen signifikanten Zusammenhang getestet mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,01$ .

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den gemessenen LT- und WT-Zeitreihen zeigen sowohl für den Korrelationskoeffizienten nach Pearson als auch für den nach Spearman für alle Zeitreihen und alle zeitlichen Auflösungen hohe Werte zwischen 0,80 und 0,99 (Pearson) bzw. zwischen 0,82 und 0,99 (Spearman). Die Korrelationen sind alle hoch signifikant auf dem Niveau 99 %. Die niedrigsten Korrelationen ergeben sich je nach Zeitversatz für die Tagesmittel mit zwischen 0,8 und 0,95 (Pearson) bzw. 0,82 und 0,96 (Spearman). Für die Wochenmittel weisen die Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman Werte zwischen 0,84 und 0,96 bzw. zwischen 0,86 und 0,97 auf. Die höchsten Werte treten bei der Korrelationsanalyse für die Monatsmittel der LT und WT mit 0,9-0,99 (Pearson und Spearman) auf. Am Beispiel der gemessenen Luft- und WT-Zeitreihen „Bamberg\_Kemmern“/„Kemmern“, „BadToelz“/„Lenggries“ und „Kubschuetz\_Schirgiswalde“/„Schirgiswalde“ sind in Abbildung 34 die Streudiagramme für die Tages-, Wochen- und Monatsmittel jeweils mit den zugehörigen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman und den jeweiligen  $p$ -Werten dargestellt. Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen aller gemessenen 72 LT- und WT-Zeitreihen jeweils für die Tages-, Wochen- und Monatsmittel finden sich in den Abbildungen 76 bis 78 im Anhang II.

Zu erkennen ist, dass die Korrelationskoeffizienten mit abnehmender zeitlicher Auflösung jeweils von links nach rechts zunehmen. Die Korrelation fällt für die Zeitreihe der quellnahen, durch die Wasserregulierung des Sylvensteinspeichers und durch den alpinen Naturraum beeinflusste Station „Lenggries“ geringer aus (oben) als für die Zeitreihen an den Stationen „Kemmern“ am Main (Mitte) und „Schirgiswalde“ an der Spree (unten). In den beiden letzteren zeichnen die Streudiagramme aller drei zeitlichen Auflösungen eine S-Kurve nach, mit flacherer Steigung bei WT-Werten knapp über Null und über etwa 20 °C und einem nahezu linearen Zusammenhang und steilerer Steigung bei Wasser- und LT zwischen ca. 5-20 °C. In der LT-Zeitreihe „Kubschuetz\_Schirgiswalde“ verursachen Datenlücken ein gestreiftes Muster im Streudiagramm der Tagesmittel (links unten).

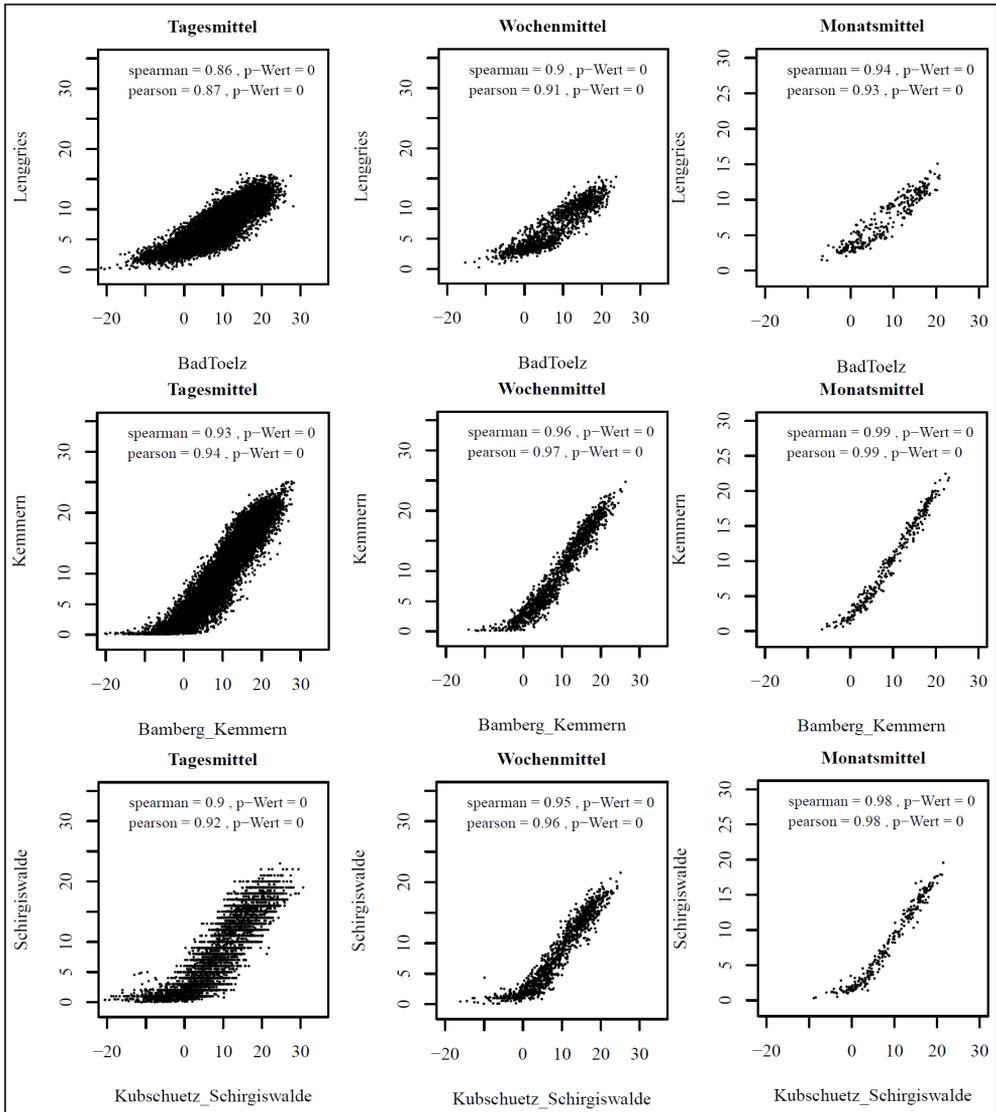


Abbildung 34: Streudiagramm der Tages-, Wochen- und Monatsmittel gemessener LT und WT am Beispiel ausgewählter Zeitreihen mit den jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman sowie mit den jeweiligen  $p$ -Werten. Die Korrelationen sind signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,01$ .

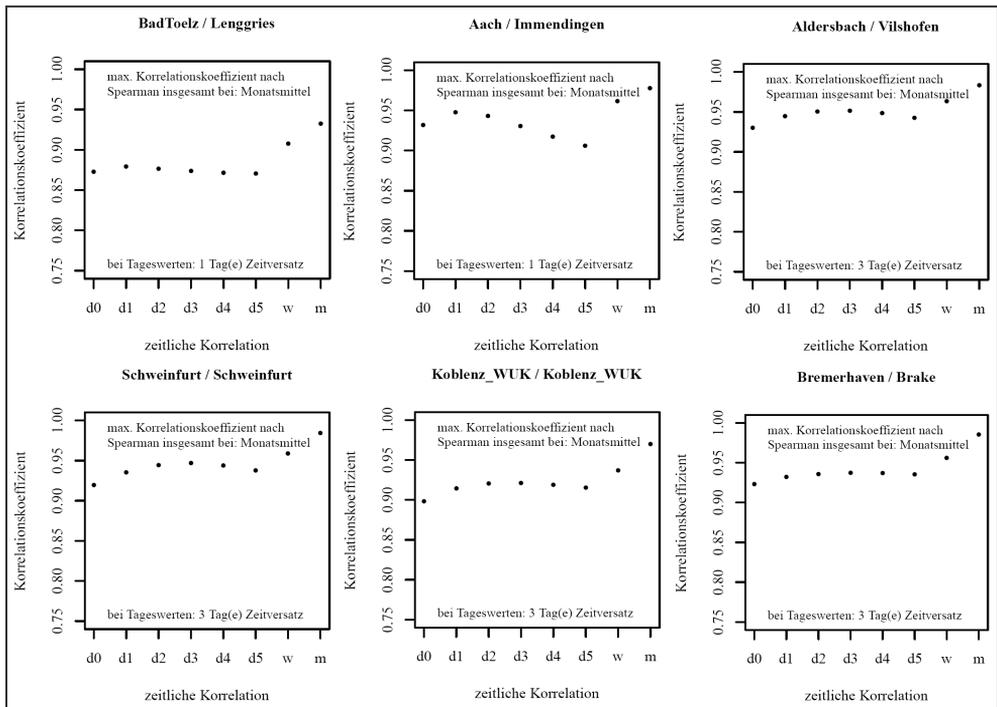
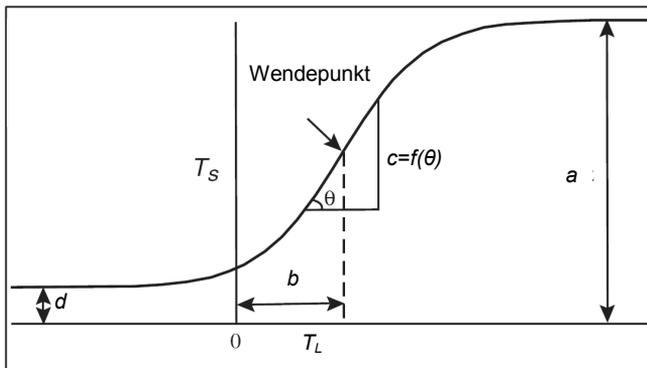


Abbildung 35: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für die Tagesmittel mit einem Zeitversatz von  $\tau = 0, 1, 2, \dots, 5$  sowie für die Wochen- und Monatsmittel beispielhaft dargestellt für ausgewählte Zeitreihenpaare mit Angabe des maximalen Korrelationskoeffizienten aller zeitlichen Auflösungen und bei Tagesmitteln aller Zeitversätze.

Die Kreuzkorrelationsanalysen nach Pearson bzw. nach Spearman ergeben für 24 bzw. 23 Zeitreihen den größten statistisch signifikanten Zusammenhang bei einem Zeitversatz von zwei Tagen, für 23 bzw. 26 Zeitreihen bei drei Tagen, für zwölf bzw. elf Zeitreihen sowohl bei zwei als auch bei drei Tagen sowie bei zehn bzw. neun Zeitreihen bei einem Zeitversatz von einem Tag. Drei der 72 Zeitreihen zeigen bei keinem, bei vier oder fünf Tagen Zeitversatz die höchsten Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman. Abbildung 35 zeigt die Werte der Korrelationskoeffizienten nach Spearman für die Tagesmittel bei einem Zeitversatz von 0-5 Tagen sowie für die Wochen- und Monatsmittel am Beispiel der sechs Zeitreihenpaare „BadToelz“/„Lenggries“ an der Isar, „Aach“/„Immendingen“ und „Aldersbach“/„Vilshofen“ an der Donau, „Schweinfurt“/ „Schweinfurt“ am Main, „Koblenz\_WUK“/„Koblenz\_WUK“ am Rhein und „Bremerhaven“/„Brake“ an der Weser. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Pearson ergeben ähnliche, meist etwas geringere Werte. In den Abbildungen 79 und 80 im Anhang II finden sich zu allen 72 Zeitreihenpaaren die Werte der Korrelationskoeffizienten nach Spearman sowie nach Pearson graphisch dargestellt.

Generell weisen Zeitreihen an Stationen, die näher zur Quellregion (z. B. „Immendingen“ und „Ulm\_Boefingen“ an der Donau, „Lenggries“ an der Isar) oder an kleineren Flüssen (z. B. „ZwickauPoelbitz“ und „Erlbn“ an der Mulde) liegen, die höchsten Korrelationskoeffizienten bei einem Tag Zeitversatz auf (vgl. Abbildung 35, oben links). Die höchsten Korrelationswerte bei einer zeitlichen Verschiebung von zwei bis drei Tagen treten für die meisten Zeitreihen an größeren Flüssen gelegenen Stationen (z. B. „Schweinfurt“ am Main, „Koblenz“ am Rhein, „Brake“ an der Weser) bzw. an weiter flussabwärts gelegenen Stationen (z. B. „Vilshofen“ an der Donau) auf (vgl. Abbildung 35, oben Mitte und rechts, unten).

Insgesamt rechtfertigen die Ergebnisse der Korrelationsanalyse mit hohen Korrelationskoeffizienten  $> 0,8$  die WT sowohl auf Basis von Tagesmitteln mit einem zeitlichen Versatz je nach Zeitreihenpaar von einem bis vier Tagen als auch auf Basis von Wochen- und Monatsmitteln zu simulieren. Für die Simulation zukünftiger WT wurde das LRM nach MOSENI et al. (1998) verwendet. Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, hat dieses gegenüber einem ELRM den Vorteil, dass sowohl der annähernd lineare Zusammenhang zwischen LT und WT bei LT zwischen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  und etwa  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  als auch der nicht-lineare Zusammenhang bei sehr niedrigen LT unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  und bei hohen LT über  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  berücksichtigt werden (MOHSENI et al. 1999, S. 3723). Das Modell zeichnet einen S-förmigen Graphen mit geringeren Steigungen bei hohen und niedrigen Temperaturwerten wie in Abbildung 36 dargestellt und in den Streudiagrammen in Abbildung 34 zu



erkennen.

Abbildung 36: Schematische Darstellung der logistischen Funktion nach MOHSENI et al. (1998). Darstellung nach KYLE & BRABETS (2001, S. 12).

Die logistische Funktion zur Berechnung der WT lautet nach MOHSENI et al. (1998, S. 2687):

$$T_s = d + \frac{a - d}{1 + e^{c(b - T_L)}} \quad \text{Gl. 36}$$

$T_s$  stellt den geschätzten WT-Wert dar und  $T_L$  den gemessenen LT-Wert der entsprechenden LT-Zeitreihe. Die untere und obere Grenze der WT-Zeitreihe ist  $d$  bzw.  $a$ . Der Wert der gemessenen LT am Wendepunkt der Funktion wird als  $b$  bezeichnet und der Wert für die steilste Steigung in der

Funktion als  $c$ . Aus den Zeitreihen der gemessenen WT wurden jeweils die minimalen und maximalen Temperaturwerte bestimmt und für  $d$  und  $a$  eingesetzt,  $c$  wurde für alle Zeitreihen empirisch ermittelt.

Aus den gemessenen LT-Zeitreihen, die die jeweiligen gemessenen WT-Zeitreihen abdecken (vgl. Abschnitt 4.3.1.1), wurde für jede der 72 WT-Stationen ein eigenes Modell mittels der logistischen Regression nach Gleichung 36 erstellt. Die Simulation zukünftiger WT setzt eine Validierung der Modellgüte sowie der simulierten Daten voraus. Aus diesem Grund wurden rezente WT mittels der Tagesmittel mit einem Zeitversatz von je nach Zeitreihe einem bis vier Tagen, der Wochen- und Monatsmittel der gemessenen LT berechnet und mit den gemessenen WT verglichen. Zur Feststellung der jeweiligen Modellgüte wurde der Nash-Sutcliffe Coefficient ( $NSC$ ) nach NASH & SUTCLIFFE (1970) herangezogen. Mit diesem wird geschätzt, wie gut das Modell die realen Werte wiedergeben kann. Der  $NSC$  wird nach NASH & SUTCLIFFE (1970) folgendermaßen berechnet:

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_{s_i} - T_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{T}_{obs} - T_{obs_i})^2} . \quad \text{Gl. 37}$$

Dabei sind  $T_s$  die simulierten und  $T_{obs}$  die beobachteten WT,  $\bar{T}_{obs}$  der Mittelwert der beobachteten Temperaturen,  $n$  die Anzahl der Werte sowie  $i$  der Laufindex für alle Werte ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) (NASH & SUTCLIFFE 1970, S. 288; MOHSENI et al. 1998, S. 2688; MOHSENI et al. 1999, S. 3724). Für den  $NSC$  existiert kein Minimum, der höchste Wert ist 1. Wird der Wert 1 erreicht, bedeutet dies, dass das Modell die beobachteten Temperaturen perfekt simuliert.

Die Qualität der simulierten gegenüber den beobachteten WT wurde mithilfe des „Root Mean Square Errors“ ( $RMSE$ , Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler) bestimmt. Der Wert des  $RMSE$  ist ein absoluter Wert in der Einheit der Daten, in diesem Fall also in °C. Existieren keine Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Werten, liegt eine sehr gute Qualität der simulierten Werte vor und der  $RMSE$  nimmt den Wert 0 an. Allerdings ist der  $RMSE$  insofern mit Vorsicht zu interpretieren, als dass Ausreißer einen großen Einfluss auf ihn ausüben können (MOHSENI et al. 1998, S. 2688; KYLE & BRABETS 2001, S. 16). Der  $RMSE$  wird wie folgt ermittelt:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{s_i} - T_{obs_i})^2}{n - 4}} , \quad \text{Gl. 38}$$

wobei  $T_s$  und  $T_{obs}$  die simulierten und beobachteten Temperaturen,  $n$  die Anzahl der Werte in den Zeitreihen sowie  $i$  den Laufindex ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) bezeichnen. Der  $RMSE$  stellt den Standardfehler der simulierten Werte dar und gibt somit Auskunft über die Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Temperaturen.

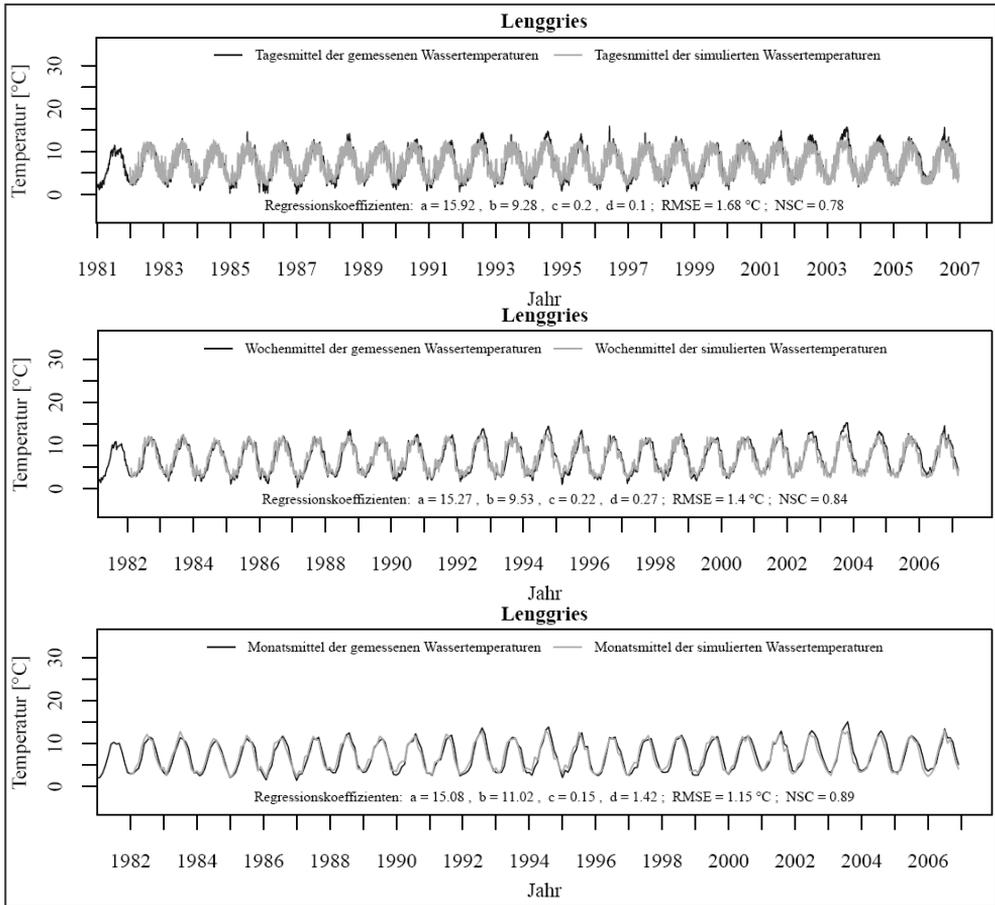


Abbildung 37: Simulierte und gemessene WT-Zeitreihen mit den Regressionskoeffizienten  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$  sowie dem  $RMSE$ , dem  $NSC$  und der maximalen absoluten Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten in  $^{\circ}C$  am Beispiel der Station „Lenggries“ an der Isar.

Die Validierungsergebnisse der Modellgüte und Qualität der Simulationen sind beispielhaft für die Stationen „Lenggries“ an der Isar, „Rielasingen\_RadolfzAach“ an der Radolfzeller Aach und „Koblenz\_WUK“ am Rhein in den Abbildungen 37-39 zu sehen. Dargestellt sind neben der gemessenen (dunkelgrau) und simulierten (hellgrau) WT-Zeitreihe die Regressionskoeffizienten  $d$ ,  $a$ ,  $b$  und  $c$  sowie der  $RMSE$ , der  $NSC$ . Die Simulations- und Validierungsergebnisse aller Zeitreihen finden sich für die Tages- Wochen- und Monatsmittel in den Abbildungen 81 bis 83 im Anhang II.

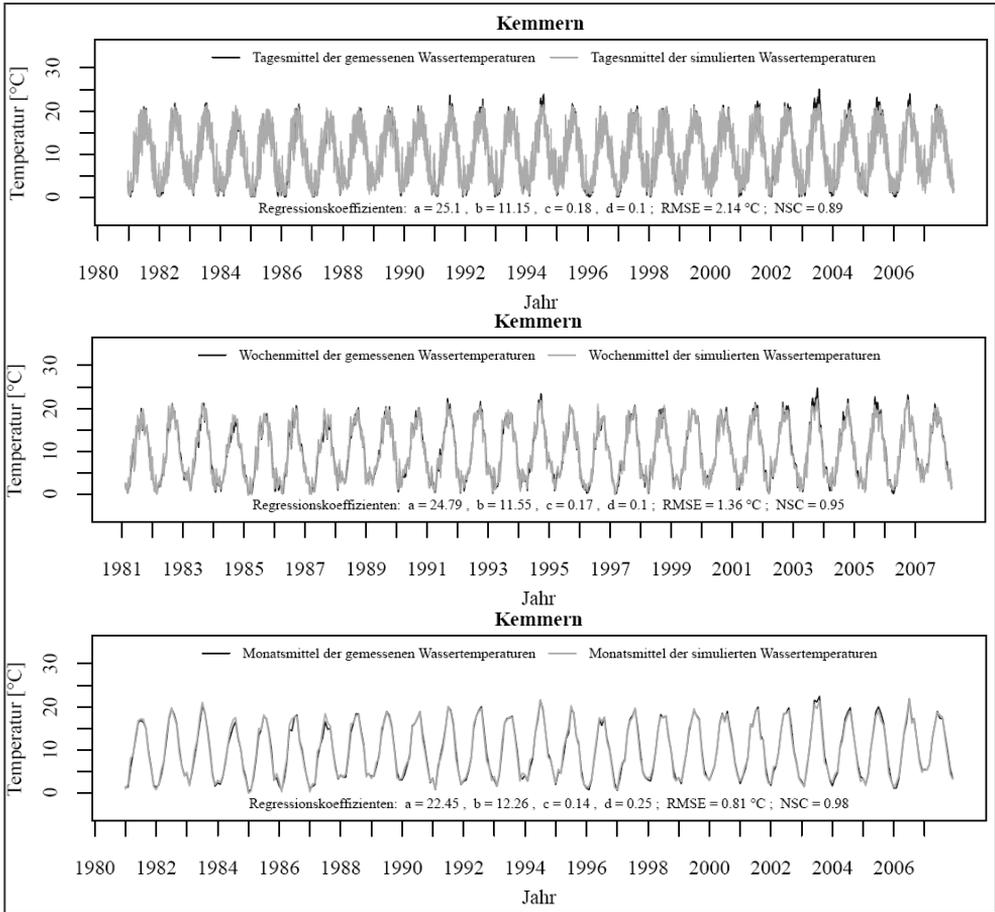


Abbildung 38: Wie Abbildung 37 für die Zeitreihe „Kemmern“ am Main.

Die gemessenen Tagesmittel der WT der Zeitreihe „Lenggries“ werden durch die simulierten Temperaturen mit einem *RMSE* von 1,68 °C und *NSC* 0,78 gut wiedergegeben. Die simulierten zeigen wie die gemessenen Werte ein relativ niedriges Temperaturniveau bei maximal um die 13-15 °C. Allerdings werden die Temperaturmaxima der gemessenen sommerlichen Werte in den Jahren 1985, 1988, 1992-1997, 2001-2004 sowie 2006 durch die simulierten um bis zu ca. 2-3 °C unterschätzt. Wie beispielsweise an den Werten im Jahr 1986 zu sehen, überschätzen die simulierten vor allem sehr geringe, gemessenen WT um knapp über 0 °C im Winter um 2-3 °C (vgl. Abbildung 37, oben).

Eine Unterschätzung der gemessenen durch simulierte Temperaturen tritt ebenso bei extrem hohen Wochen- und Monatsmitteln auf. Das ist in den Jahren 1994, 2002 oder insbesondere 2003 zu erkennen (vgl. Abbildung 37, Mitte und unten). Ebenso werden die monatlichen Wochen- und Monatsmittel überschätzt, wenngleich mit bis zu ca. 1-2 °C in geringerem Umfang als die

Tagesmittel. Wie aufgrund der höheren Korrelation zu erwarten, nimmt der *RMSE* der simulierten Tages- über die Wochen- bis zu den Monatsmitteln ab und der *NSC* entsprechend zu. Die Monatsmittel der gemessenen und simulierten WT der Zeitreihe „Lenggries“ stimmen somit am besten überein.

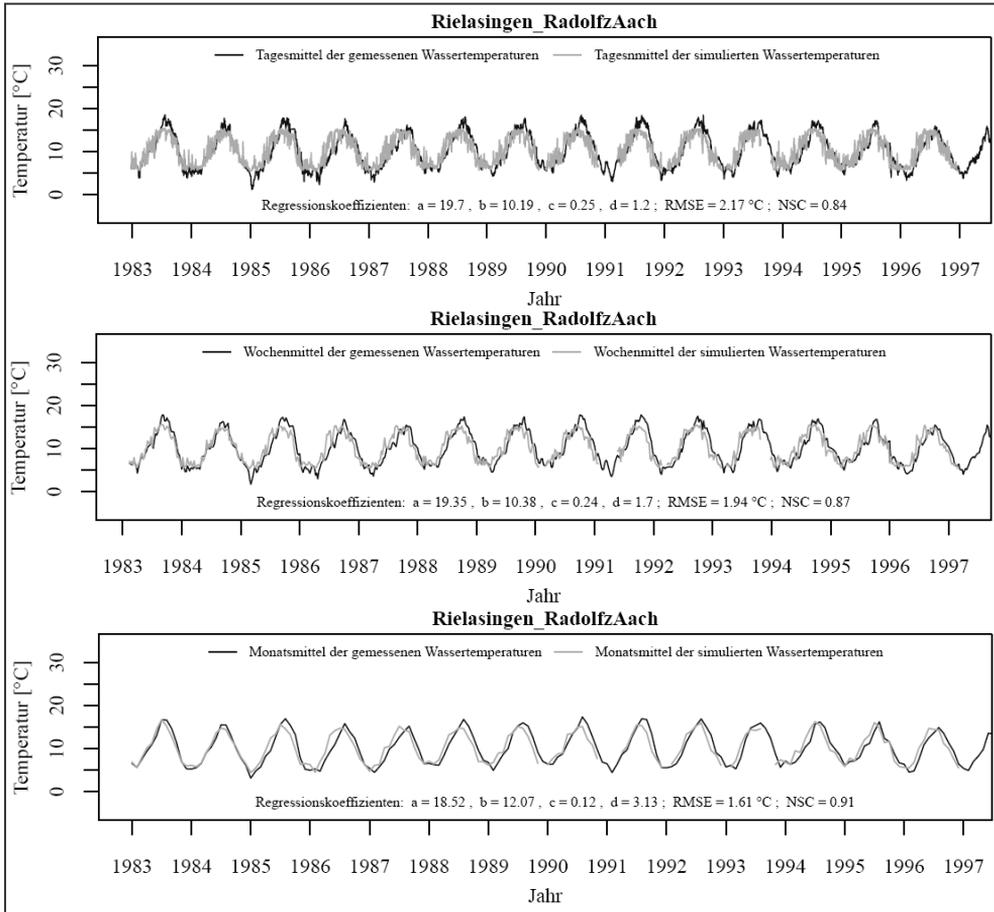


Abbildung 39: Wie Abbildung 37 für die Zeitreihe „Rielasingen\_RadolfzAach“.

Ein ähnliches Ergebnis ist für die Zeitreihe „Kemmern“ zu erkennen (vgl. Abbildung 38). Der *RMSE* nimmt von den Tages-, über die Wochen- bis zu den Monatsmitteln ab und der *NSC* von 0,89 auf 0,98 zu. Während die tiefen gemessenen und simulierten Wintertemperaturen bei allen drei zeitlichen Auflösungen gut übereinstimmen, werden extrem hohe Sommertemperaturen wiederum um bis zu ca. 2-3 °C bei den Tagesmitteln, um bis zu ca. 1-2 °C bei den Wochenmitteln und um bis zu ca. 0,5-1 °C bei den Monatsmitteln unterschätzt. Für alle drei Zeitreihen der Station „Kemmern“ treten dabei die höchsten Abweichungen im Sommer 2003 bei den höchsten Temperaturen der gesamten Zeitreihe auf.

Die Zeitreihe „Rielasingen RadolfzAach“ ist die Simulation, die für alle drei zeitlichen Auflösungen die gemessenen WT mit der geringsten Übereinstimmung wiedergibt (vgl. Abbildung 39). Neben der deutlichen Unterschätzung hoher gemessener und der Überschätzung geringer gemessener WT, zeigt sich sowohl bei den Tages- als auch Wochen- und Monatsmitteln ein zeitlicher Versatz. Die simulierten Werte steigen jeweils um einige Tage bzw. um einen Monat früher an bzw. fallen früher gegenüber den gemessenen Werten. Die zum Vergleich der anderen Zeitreihen geringen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman von 0,81-0,9 bzw. 0,83-0,9 deuten bereits auf einen relativ geringen Zusammenhang zwischen den LT und WT der Zeitreihen „Radolfzell“ und „Rielasingen RadolfzAach“ hin. Abgesehen von dem zeitlichen Versatz werden die gemessenen durch die simulierten WT für die Monatsmittel jedoch gut wiedergegeben. Dies zeigt sich an dem relativ hohen *NSC* von 0,91.

Zusammenfassend ergibt sich für die simulierten Tagesmittel der WT mit einem zwei- bis dreitägigen Zeitversatz über alle Zeitreihen gemittelt ein *NSC* von 0,84, wobei der geringste *NSC* mit 0,62 bei der Zeitreihe „Rothenfels“ am Main und der höchste mit 0,93 bei der Zeitreihe „Dresden“ an der Elbe auftritt. Der *RMSE* beträgt zwischen 1,74 °C („Lenggries“) und 4,34 °C („Rothenfels“) und im Mittel über alle Zeitreihen 2,58 °C. Das logistische Regressionsmodell zur Simulation der Wochenmittel ergibt beim *NSC* mit im Mittel über alle Zeitreihen 0,91 einen höheren Wert und beim mittleren *RMSE* über alle Zeitreihen einen geringeren Wert mit 1,89 °C. Ebenso weisen aus allen Zeitreihen der minimale und maximale *NSC* mit 0,68 („Rothenfels“) und 0,96 („Dresden“) höhere und der maximale und minimale *RMSE* mit 3,99 °C („Rothenfels“) und 1,25 °C („Bautzen“) geringere Werte gegenüber den Simulationen der Tagesmittelwerte auf. Aufgrund der höchsten Korrelationskoeffizienten zwischen den Monatsmitteln der LT und WT setzt sich dieser Trend wie zu erwarten für die Simulation der mittleren monatlichen WT fort. Der mittlere *NSC* über alle Zeitreihen beträgt 0,96, das Minimum aus allen Zeitreihen 0,7 („Rothenfels“) und das Maximum 0,99 („Gartz“). Der *RMSE* fällt entsprechend im Mittel über alle Zeitreihen mit 1,23 °C geringer aus, wobei die Zeitreihe „Rothenfels“ den höchsten *RMSE* mit 3,72 °C und die Zeitreihe „Bautzen“ den geringsten *RMSE* mit 0,68 °C aufweisen (vgl. Abbildungen 81 bis 83 im Anhang II). Im Allgemeinen werden die gemessenen durch die simulierten WT-Zeitreihen zufriedenstellend wiedergegeben. Am besten jedoch werden die Monatsmittel der WT im Vergleich zu den gemessenen Werten simuliert, was sich in dem im Mittel geringsten *RMSE* und dem im Mittel höchsten *NSC* widerspiegelt. Somit eignen sich die logistischen Regressionsmodelle insbesondere zur Simulation zukünftiger Monatsmittel der WT.

Da die in Abschnitt 4.4 beschriebenen Analysen zudem auf monatlichen Mittelwerten der WT basieren, wurden aus den simulierten täglichen LT des REMO-Kontrolllaufs und der drei REMO-Szenarienläufe B1, A1B und A2 (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) Monatsmittel gebildet. Mit diesen und den erstellten logistischen Regressionsmodellen auf Basis der mittleren Monatswerte der gemessenen LT wurden anschließend für die 72 Messstationen Monatsmittel der WT sowohl für die KNP 1961-1990 als auch für die ZP 2011-2100 simuliert. Abschnitt 4.4 beinhaltet schließlich das Vorgehen der Analyse der zukünftigen WT-Zeitreihen.

#### 4.4 Analyse zukünftiger Wassertemperaturen

Die zukünftigen WT-Zeitreihen wurden erstens hinsichtlich möglicher Trends und zweitens hinsichtlich möglicher signifikanter Unterschiede zu den in die Vergangenheit simulierten WT untersucht. Um festzustellen, ob ein signifikanter Trend vorliegt, wurde der in Abschnitt 4.2.3.1

beschriebene Mann-Kendall Trendtest nach den Gleichungen 30-33 für die ZP 2011-2040, 2011-2070 und 2011-2100 angewandt. Sowohl die Jahresmittel als auch die Monatsmittel wurden bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  (Signifikanzniveau 95 %) auf Trends getestet. Die Richtung und Höhe der Trends wurden mithilfe des „Sen’s Nonparametric Estimator of Slope“ nach Gleichung 34 ermittelt (vgl. Abschnitt 4.2.3.2).

Zur Untersuchung möglicher signifikanter Unterschiede zwischen zukünftiger und vergangener WT-Regime kam der in Abschnitt 4.2.2.2 beschriebene t-Test zum Einsatz. Geprüft wurden jeweils die über die KNP 1961-1990 gemittelten Jahres- und Monatsmittel sowie die über die ZP 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 gemittelten Jahres- und Monatsmittel auf einen signifikanten Unterschied. Da der t-Test Unabhängigkeit der Daten voraussetzt, wurde dies für die saisonbereinigten Monatsmittel (vgl. Gleichung 8) der jeweiligen Perioden mittels der Autokorrelationsfunktion nach Gleichung 4 geprüft (vgl. Abschnitt 4.2.2.2 und 4.2.2.1). Wie an den Beispielen der Zeitreihen „Lenggries“ an der Isar (Szenario B1), „Wuerzburg“ am Main (Szenario A1B) und „Gartz“ an der Oder (Szenario A2) jeweils für die ZP 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 sowie für die KNP 1961-1990 in Abbildung 40 zu sehen, liegen die Autokorrelationskoeffizienten  $r_{\chi}$  unter 0,2-0,4.

Die Ergebnisse der Autokorrelationsanalyse der drei ZP und Szenarien sowie des Kontrolllaufs ergeben für die übrigen 69 Zeitreihen ebenfalls niedrige Autokorrelationskoeffizienten von bis zu maximal 0,4 (vgl. Abbildungen 84 bis 93 im Anhang II). Somit kann bei den Monatsmitteln der simulierten WT-Zeitreihen von Datenunabhängigkeit ausgegangen werden.

Die Voraussetzung der Normalverteilung ist nach dem zentralen Grenzwertsatz ebenso erfüllt. Denn sowohl für die KNP als auch die jeweiligen ZP gilt  $n = 30$  und somit ist  $n_a + n_b - 2 \geq 50$ . Der t-Test wurde nach den Gleichungen 20-25 in Abschnitt 4.2.2.2 durchgeführt. Da die Untersuchungszeiträume zudem äquidistante Zeitintervalle  $n = n_a = n_b = 30$  aufweisen wird Gleichung 24 vereinfacht zu

$$\hat{\sigma}_{\bar{n}_b - \bar{n}_a} = \sqrt{\frac{s_a^2 + s_b^2}{n}} \quad \text{Gl. 39}$$

Ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten der jeweiligen ZP und KNP für die Jahresmittel und Monatsmittel vorliegt, wurde schließlich auf dem Signifikanzniveau 95 % ( $\alpha = 0,05$ ) getestet.

Eine Häufigkeitsanalyse extrem hoher WT auf Basis täglicher Werte wie sie für die rezenten WT-Zeitreihen durchgeführt wurde, fand für die simulierten WT nicht statt. Grund hierfür sind die im Vergleich zu den gemessenen LT zu häufig aufgetretenen LT des REMO über 15 °C (vgl. Abschnitt 4.3.1.2). Dies würde bei der Simulation täglicher WT zu einer Verzerrung der Anzahl hoher WT führen und das Ergebnis einer Häufigkeitsanalyse fälschen. Im nächsten Kapitel werden die Ergebnisse der Analysen zu WT-LE deutscher Kraftwerke sowie der Entwicklung rezenter und zukünftiger WT erläutert.

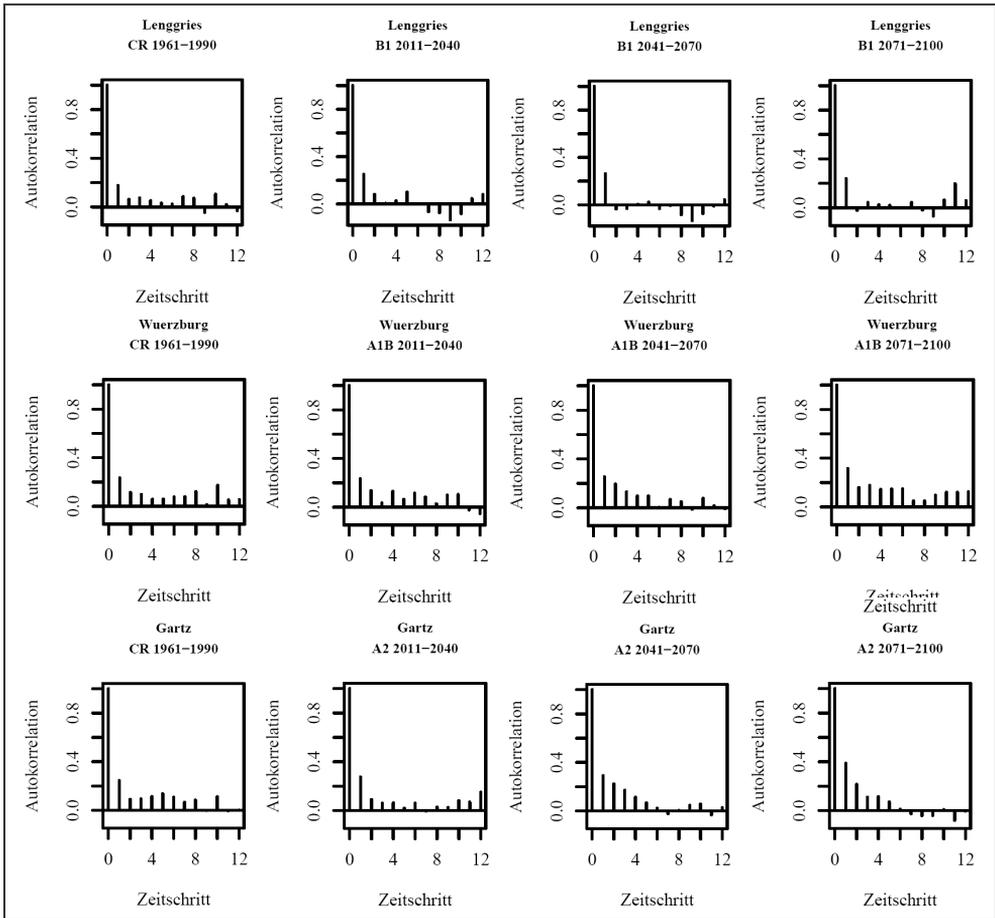


Abbildung 40: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse simulierter WT-Zeitreihen beispielhaft dargestellt für ausgewählte Zeitreihen und Szenarien jeweils für die ZP 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 sowie für die KNP 1961-1990.

Nach den Analysen der WT-LE bei KTKW und rezenter sowie zukünftiger WT, wurden ausgewählte Ergebnisse abschließend zusammengefasst in Karten mithilfe des GIS-Programms ArcGIS 9.3 der Firma ESRI® DEUTSCHLAND GMBH (2010) dargestellt. Durch den räumlichen Vergleich wurden erstens Flüsse identifiziert, an denen KTKW mit WT-LE auftraten und die gleichzeitig einen signifikant positiven Trend in den rezenten WT bzw. ein häufiges Auftreten extrem hoher WT aufweisen. Zweitens wurden anhand der KTKW mit WT-LE und geplanter Kraftwerksstandorte zusammen mit den Ergebnissen der Entwicklung zukünftiger WT abgeschätzt, ob zukünftig KTKW-Standorte besonders stark von WT-LE beeinflusst werden könnten.

Hohe Wassertemperaturen können im Zusammenhang mit wasserrechtlichen Grenzwerten zu Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke führen (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). Ziel dieser Arbeit ist erstens festzustellen, an welchen KTKW bisher WT-LE aufgetreten sind. Dies wird im ersten Teil des Kapitels anhand der Ergebnisse der Literaturrecherche, der Medienanalyse und der schriftlichen Befragung dargestellt (vgl. Abschnitt 5.1). Das zweite Ziel dieser Arbeit ist festzustellen, wie sich die WT deutscher Flüsse entwickelt haben und zukünftig im Kontext des Klimawandels entwickeln könnten. Dazu werden die Ergebnisse der Trendanalyse rezenter WT sowie der Zählstatistik extrem hoher rezenter WT in Abschnitt 5.2 dargestellt. Ob Trends in den zukünftigen WT vorliegen und ob sich das WT-Regime der ZP von dem der KNP unterscheidet, wird in Abschnitt 5.3 erläutert. An welchen Flüssen in Deutschland sich KTKW mit WT-LE bzw. geplante KTKW befinden und welche Flüsse bereits steigende WT zu verzeichnen haben bzw. an denen zukünftig steigende zu erwarten sind, wird in Abschnitt 5.4 aufgezeigt.

### 5.1 Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auszählung der durch die Literaturrecherche und Medienanalyse identifizierten KTKW mit WT-LE tabellarisch aufgeführt und beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung der Literaturrecherche, der Medienanalyse sowie der schriftlichen Befragung bezüglich der WT-LE bei KTKW zusammengefasst dargestellt, um die Anonymität der Kraftwerksbetreiber zu wahren, die an der Befragung teilnahmen (Abschnitt 4.1).

#### Literaturrecherche

Die Auswertung der Literaturrecherche bezüglich der WT-LE bei KTKW (vgl. Abschnitt 4.1.5) resultiert in insgesamt 23 WT-LE bei zehn KTKW in acht Jahren (vgl. Tabelle 17). Die meisten WT-LE sind mit sieben bzw. vier und drei KTKW für das Jahr 2003, 1997 und 2006 zu sehen. Mit zehn WT-LE treten die meisten an KTKW an der Elbe auf, gefolgt von fünf bzw. vier WT-LE an KTKW am Rhein und an der Isar. Prozentual und absolut sind dabei die größten WT-LE am KKW Unterweser mit bis zu 88 % bzw. 1.184 MW<sub>el,brutto</sub> im Jahr 2006 zu verzeichnen. Die WT-LE treten zwischen Mai und Oktober, die meisten im Juni, Juli und August auf (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Übersicht über die durch die Literaturrecherche identifizierten WT-LE bei Kernkraftwerken zwischen 1997 und 2007. Darstellung nach DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (1999-2007) und ATW (2008).

KKW	Fluss	Kraftwerksleistung in MW	Leistungseinschränkung				
			Jahr	in %	in MW	Zeitraum	Anzahl Tage
Stade	Elbe	640	1997	k. A.	k. A.	13.07.-16.07., 09.08.- 06.09.	34
Krümmel	Elbe	1402	1997	bis zu 13	bis zu 182	08.08.- 20.08., 24.08.- 29.08.	19
Biblis 1	Rhein	1167	1997	bis zu 8	bis zu 93	18.08.- 29.08.	12
Unterweser	Weser	1410	1997	Bis zu 27	bis zu 380	Juni - September, 20.10.- 25.10.	72
Obrigheim	Neckar	328	1998	0-58	0-190	Juni - September	27
Philippsburg 1	Rhein	926	1998	bis zu 18	bis zu 166	09.09.	1
Krümmel	Elbe	1402	2000	5-10	70-140	21.06.- 22.06.	2
Isar 1	Isar	912	2002	2-35	18-319	18.06.- 24.06.	7
Unterweser	Weser	1345	2003	3-78	40-1049	25.05.- 10.10.	138
Isar 1	Isar	912	2003	0-67	0-611	Juni - August	56
Krümmel	Elbe	1402	2003	4-38	56-533	05.06.- 09.06., 17.07.-28.07., 31.07.-14.08.	32
Stade	Elbe	640	2003	3-32	19-205	27.07.- 19.08.	24
Biblis 2	Rhein	1285	2003	12-33	154-424	03.08.- 11.08.	9
Philippsburg 1	Rhein	926	2003	22-28	204-259	05.08.- 20.08.	16
Philippsburg 2	Rhein	1458	2003	bis zu 28	bis zu 408	07.08.- 15.08.	9
Krümmel	Elbe	1402	2004	bis zu 15	bis zu 210	04.08.-13.08.	10
Krümmel	Elbe	1402	2005	bis zu 12	bis zu 168	13.06.-16.07.	4
Isar 1	Isar	912	2005	4-58	36-529	25.06.-30.06.	6
Unterweser	Weser	1345	2006	2-88	27-1184	Juni - Oktober	67
Krümmel	Elbe	1402	2006	2-44	28-617	Juli - August	47
Brokdorf	Elbe	1440	2006	1-24	14-356	18.07.- 06.08.	20
Isar 1	Isar	912	2007	2-82	18-748	23.05.- 28.05., 20.07.- 22.07.	9
Krümmel	Elbe	1402	2007	3-32	42-449	09.06.- 15.06.	7

### Medienanalyse

Die Ergebnisse der 93 in der Medienanalyse ausgewerteten Artikel bezüglich einer WT-LE eines KTKW sind in Tabelle 18 aufgelistet. Die Medienanalyse ergibt für die sieben identifizierten Jahre 1976, 1994, 1995, 2003, 2004, 2006 und 2007 insgesamt 42 WT-LE bei 30 KTKW an neun Flüssen. Die KKW Krümmel und Unterweser weisen mit drei bzw. vier WT-LE die meisten WT-LE auf. Bei den übrigen 26 KTKW treten zwischen einer und zwei WT-LE. Das Jahr 2003 weist mit 15 WT-LE die meisten WT-LE auf, gefolgt von den Jahren 2006, 1994 und 1976 mit 13, fünf und drei WT-LE. An der Elbe treten mit elf WT-LE an KTKW die meisten WT-LE im Vergleich der Flüsse auf, gefolgt vom Rhein, der Weser und dem Neckar mit neun bzw. sieben WT-LE an KTKW.

Tabelle 18: Übersicht über die durch die Medienanalyse identifizierten KTKW mit WT-LE zwischen 1976 und 2007, k. A. = keine Angaben. In der Spalte Quelle stehen die Autoren bzw. deren Kürzel, die in den Medien angegeben sind. Liegen keine Angaben zu den Autoren vor, ist der Name der Zeitung oder Zeitschrift aufgeführt. Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“ und Medienanalyse, Darstellung nach im Text angegebenen Quellen.

KTKW	Fluss	Kraftwerksleistung in MW	Jahr der WT-LE	WT-LE in %	WT-LE in MW	Zeitraum der WT-LE	Quelle
KW Ensdorf	Saar	430	1976	k. A.	k. A.	k. A.	(DER SPIEGEL 1976a, S. 67; DER SPIEGEL 1976b, S. 69)
KW Vaiheln	Weser	885	1976	größeres Ausmaß	k. A.	k. A.	
KW Heyden	Weser	923	1976	größeres Ausmaß	k. A.	k. A.	
KKW Unterweser	Weser	1410	1994	bis zu 100	bis zu 1410	04.-11.08.	(DIE TAGESZEITUNG 1994, S. 40; LEUSCHNER 2007a, S. 1)
Kraftwerke der HEW	Elbe	k. A.	1994	k. A.	k. A.	k. A.	(FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG 1994a, S. 1; 1994b, S. 11)
KW Charlottenburg	Spree	215	1994	bis zu 78	bis zu 168	03.-10.08.	
KW Lichterfelde	Teltowkanal	450	1994	bis zu 60	bis zu 270	03.-10.08.	(FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG 1994a, S. 1; 1994b, S. 11; NATZ 1994, S. 17)
Bewag gesamt		2500	1994	k. A.	bis zu 1500	03.-10.08.	
Kraftwerke der HEW	Weser/Elbe	k. A.	1995	k. A.	k. A.	k. A.	(LEUSCHNER 2007c, S. 1)
KKW Unterweser	Weser	1410	2003	bis zu 50	bis zu 673	05.-08.08.	(AP 2003, S. 5; DPA 2003b, S. 1; DRI 2003, S. 4; DW 2003, S. 42; MP & AL 2003, S. 81; RA 2003, S. 3; SL & JA 2003, S. 40)
KKW Unterweser	Weser	1410	2003	44-70	620-987	09.-13.08. (zeitweise)	
KKW Krümmel	Elbe	1402	2003	bis zu 40	bis zu 561	k. A.-09.08. (nachmittags)	(TJ 2003, S. 9; HS et al. 2003b, S. 255; SO & BK 2003, S. 316; TJ & EH 2003a, S. 35; TJ & EH 2003b, S. 16; TJ & SBI 2003, S. 195)
KKW Brunsbüttel	Elbe	800	2003	bis zu 13	bis zu 104	05.-08.08. (zeitweise)	(DPA 2003a, S. 5; EM et al. 2003, S. 70; GROSSE 2003, S. 1; HEIMANN 2003, S. 2; NIC 2003, S. 37; HILLMER 2006, S. 11)
KKW Brokdorf	Elbe	1440	2003	k. A.	k. A.	frühestens ab 09.08.-k. A.	
KKW Stade	Elbe	640	2003	44105	64-128	07.08.-k. A. (stundenweise)	(DW 2003, S. 42; MK 2003, S. 7; MP & SL 2003, S. 83,95; SO & BK 2003, S. 316; VOGES 2003, S. 6)
KKW Stade	Elbe	640	2003	bis zu 36	bis zu 230	08.08.-24.08. (stundenweise)	
KKW Biblis 2	Rhein	1285	2003	geringfügig	mind. 40	07.08.-k. A. (nachmittags)	(CVS 2003, S. 25; SO & BK 2003, S. 316; DPA 2006a, S. 1; LEUSCHNER 2007b, S. 1)
KKW Philippsburg 1	Rhein	926	2003	bis zu 20	bis zu 185	05.08.-k. A.	(BADISCHE ZEITUNG 2003, S. 1; BHR 2003, S. 4; BL & WG 2003, S. 36; ED & OV 2003, S. 466; HS et al. 2003b, S. 255; SPANNBAUER 2003, S. 6; VOGES 2003, S. 6)
KKW Philippsburg 2	Rhein	1458	2003	bis zu 20	bis zu 292	05.-10.08.	
KW Voerde	Rhein	2222	2003	k. A.	k. A.	spätestens ab 12.08.-k. A.	(KISS 2003, S. 1; SCHULTE 2003, S. 1; WD et al. 2003, S. 189)
KW Walsum	Rhein	600	2003	k. A.	k. A.		
KW Lünen Block 1	Lippe	150	2003	k. A.	k. A.		

Kraftwerk (KW)	Fluss	KW-Leistung	Jahr der WT-LE	WT-LE in %	WT-LE in MW	Zeitraum der WT-LE	Quelle
KKW Neckarwestheim 1	Neckar	840	2003	bis zu 20	bis zu 168	04.-07.08.	(BL et al. 2003, S. 63; BREINING 2003, S. 7; GROSSE 2003, S. 1; HEIMANN 2003, S. 2; SCHE 2003, S. 6; SO & BK 2003, S. 316)
KKW Neckarwestheim 2	Neckar	1395	2003	bis zu 20 bis zu 14	bis zu 279 bis zu 195	04.-07.08. (Streckbetrieb bis 16.08.) 08.-16.08. (Streckbetrieb)	
KKW Obrigheim	Neckar	328	2003	eingeschränkter Betrieb bis zu 100	bis zu k. A. bis zu 328	vor 06.08., seit Wochen verminderte Leistung 06.08.-k. A. (ganztags, vorgezogene Revision)	(BREINING 2003, S. 7)
KKW Isar 1	Isar	912	2003	bis zu 50	bis zu 456	05.-11.08. (stundenweise)	(DPA 2003a, S. 5; DPA 2003b, S. 1; HS et al. 2003a, S. 392; 2003, S. 48)
KKW Unterweser	Weser	1410	2004	30-60	423-846	~ ab 11.08.-k. A.	(KM & HOE 2004, S. 1)
KKW Unterweser	Weser	1410	2006	30-70	423-987	19.07.-k. A.	(DPA 2006c, S. 225; DPA 2006a, S. 1; 2006, S. 1; FK & IRE 2006, S. 2; GEIGER 2006, S. 10; 2006, S. 1; HILLMER 2006, S. 11; JG & SI 2006a, S. 409; JG & SI 2006b, S. 352; JUF 2006, S. 12; KOCH 2006, S. 12; LNO 2006, S. 57; 2006, S. 1; RB & PK 2006, S. 118; RSO 2006, S. 7; RUTKOWSKI 2006, S. 2; SCHULTE 2006, S. 9)
KKW Brunshüttele	Elbe	1402	2006	bis zu 25	bis zu 351	20.-27.07.	
KKW Brunshüttele	Elbe	800	2006	bis zu 20	bis zu 160	20.-27.07.	
KKW Brokdorf	Elbe	1440	2006	bis zu 5	bis zu 72	20.-27.07.	
KKW Biblis 1	Rhein	1167	2006	leicht reduziert	k. A.	27.07.-k. A.	(AP 2006a, S. 1; BCE et al. 2006, S. 14; DPA 2006, S. 1; DJG et al. 2006, S. 1; 2006, S. 1; HEITKER 2006, S. 1; LNW et al. 2006, S. 63; MVOLLWEITER et al. 2006, S. 32; NZ 2006, S. 1; WETZEL et al. 2006, S. 9)
KKW Biblis 2	Rhein	1285	2006	leicht reduziert	k. A.	27.07.-k. A.	
KW Voerde	Rhein	700	2006	bis zu 33	bis zu 231	19./20.07.-k. A.	
RDK Karlsruhe	Rhein	910	2006	k. A.	k. A.	um den 28.07.	(AP 2006b, S. 1; BECK & WEHAUS 2006, S. 1; BECK & WIESIGEL 2006, S. 1; DPA 2006a, S. 1; GI & BOLD 2006, S. 78; HEITKER 2006, S. 1; MÜL 2006, S. 1; PG & BB 2006, S. 508; PS & GIJ 2006, S. 1; RED 2006, S. 1; 2006, S. 1)
RWE Kraftwerk	Lippe	150	2006	bis zu 100	bis zu 150	21.07.	
KW Lünen	Lippe	500	2006	bis zu 6	bis zu 30	25./26.07.-k. A.	(BCE et al. 2006, S. 14; KOCH 2006, S. 12; LNW et al. 2006, S. 63; SCHULTE 2006, S. 9)
KW Heilbronn	Neckar	950	2006	leicht reduziert	k. A.	20.-29.07.	(AP 2006b, S. 1; BECK & WEHAUS 2006, S. 1; BECK & WIESIGEL 2006, S. 1; DPA 2006a, S. 1; GI & BOLD 2006, S. 78; HEITKER 2006, S. 1; MÜL 2006, S. 1; PG & BB 2006, S. 508; PS & GIJ 2006, S. 1; RED 2006, S. 1; 2006, S. 1)
KW Altbach	Neckar	1200	2006	bedarfsgerecht mit reduzierter Leistung	k. A.	20.-29.07.	
KKW Isar 1	Isar	878	2006	23-50	202-439	21.-31.07.	(DPA 2006b, S. 29; HAK 2006, S. 47; HEITKER 2006, S. 1; LBY 2006, S. 80)
KKW Krümmel	Elbe	1346	2007	bis zu 20	bis zu 269	ab 09.06.-k. A.	(DPA 2006b, S. 29; HAK 2006, S. 47; HEITKER 2006, S. 1; LBY 2006, S. 80)

Die Höhe der WT-LE in Prozent der Gesamtkraftwerksleistung beträgt zwischen 6 % (KW Lünen) und 100 % (KKW Obrigheim, RWE-Kraftwerk). Absolut liegen die geringsten WT-LE bei 15 MW<sub>el,brutto</sub> (KW Lünen) und die höchsten bei 987 MW<sub>el,brutto</sub> (KKW Unterweser) im Jahr 2003 bzw. bei 1500 MW<sub>el,brutto</sub> Kraftwerke der Bewag) im Jahr 1994. Die Dauer der WT-LE umfasst einen Tag bis zehn Tage. Die WT-LE der KTKW tritt in den Jahren 1976, 1994, 1995 und 2003 im August, 2004 und 2006 im Juli sowie 2007 im Juni auf (vgl. Tabelle 18).

Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken nach Kraftwerksleistung

Zusammengefasst ergeben die deskriptiven Auswertungen der Literaturrecherche, der Medienanalyse und der schriftlichen Befragung 35 KTKW mit WT-LE. Mit 19 bzw. elf WT-LE weisen die größeren KTKW mit einer Leistung  $\geq 301$  MW<sub>el,brutto</sub> die meisten WT-LE auf. Die wenigsten WT-LE kommen bei den kleinen KTKW mit einer Leistung  $\geq 50$  und  $\leq 100$  MW<sub>el,brutto</sub> vor (vgl. Abbildung 41, oben links).

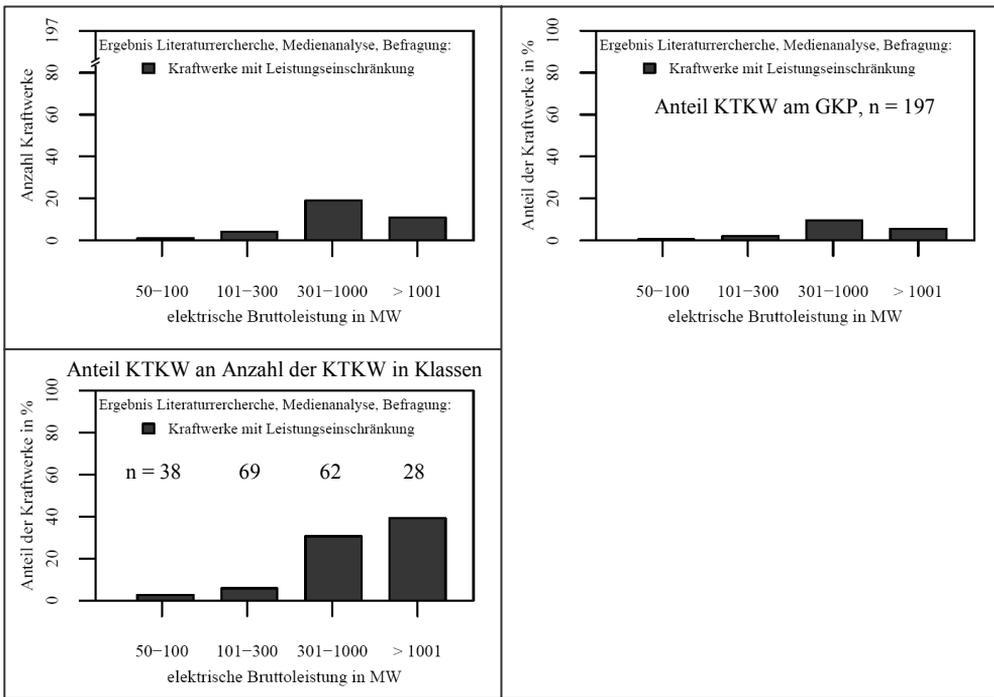


Abbildung 41: Anzahl der KTKW mit WT-LE in den Leistungsklassen (oben links). Anteil der KTKW mit WT-LE in den Leistungsklassen am GKP (oben rechts) und innerhalb der Leistungsklassen (unten links). Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“, Literaturrecherche, Medienanalyse und Befragung.

Je nach Leistungsklasse tritt bei 0,5 bis 9,6 % der KTKW eine WT-LE im Verhältnis zum GKP ( $n = 197$ ) auf (vgl. Abbildung 41, oben rechts). Mit 39,3 % bzw. 30,7 % zeigen die größeren

Kraftwerke mit einer Leistung  $\geq 301 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  bzw.  $\geq 1001 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  den größten Anteil an der Anzahl aller KTKW in den jeweiligen Klassen auf (vgl. Abbildung 41, unten links).

Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken nach Betriebsbeginn

Je nach Jahrzehnt, in dem ein KTKW ans Netz ging, liegen zwischen einem und 16 KTKW mit WT-LE vor. Die meisten KTKW mit WT-LE (bis zu 8,1 % des GKP) sind älter und in den 1970er und 1980er Jahren in Betrieb gegangen. Die jüngeren KTKW, die zwischen 1990 und 2007 in Betrieb genommen wurden, weisen mit 0,5 % des GKP die wenigsten WT-LE auf (vgl. Abbildung 42, oben). Der Anteil der KTKW mit WT-LE innerhalb der jeweiligen Klassen nimmt ebenfalls mit 33,3 % von den ältesten zu den jüngsten KTKW mit 3,1 % ab (vgl. Abbildung 42, unten).

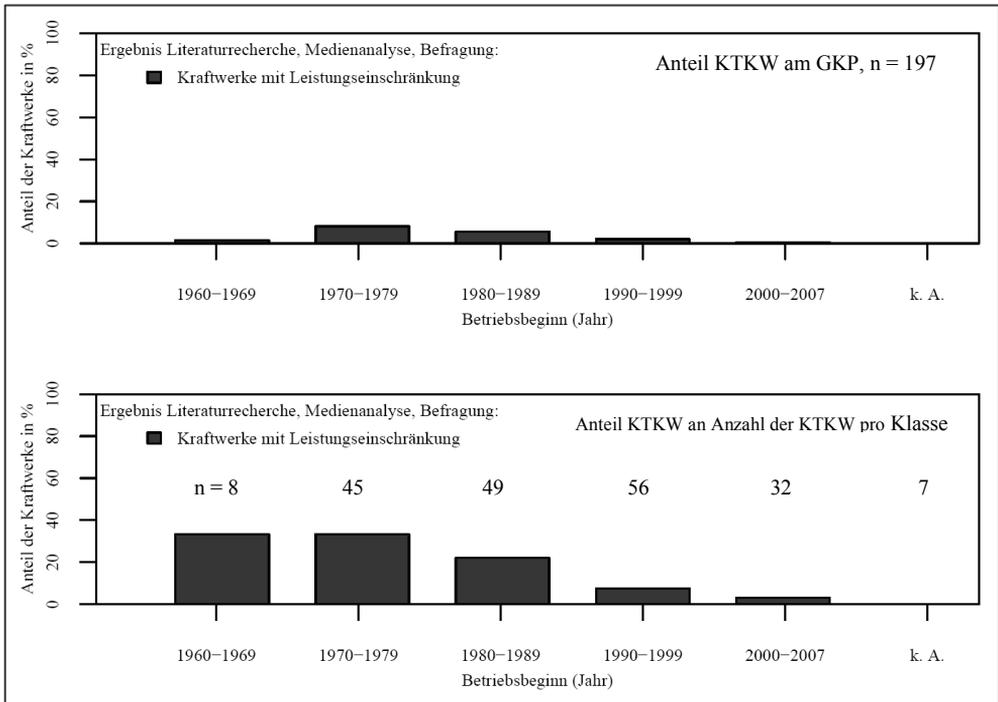


Abbildung 42: Anteil der KTKW mit WT-LE in den Betriebsbeginnklassen am GKP (oben) und innerhalb der Betriebsbeginnklassen (unten). Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“, Literaturrecherche, Medienanalyse und Befragung.

Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken nach Energieträger

Steinkohlekraftwerke zeigen mit 16 WT-LE die höchste Anzahl an KTKW mit WT-LE und damit den höchsten Anteil am GKP mit 8,1 % auf. Es folgen Kernkraftwerke mit 13 WT-LE bzw. 6,6 % des GKP und Gaskraftwerke mit vier WT-LE bzw. 2,0 % des GKP (vgl. Abbildung 43, oben). Innerhalb der jeweiligen Energieträgerklassen weisen die Kernkraftwerke mit 65 % den höchsten Anteil an KTKW mit WT-LE auf, gefolgt von den Steinkohle- und Gaskraftwerken mit 25,8 % bzw. 5,5 % (vgl. Abbildung 43, unten).

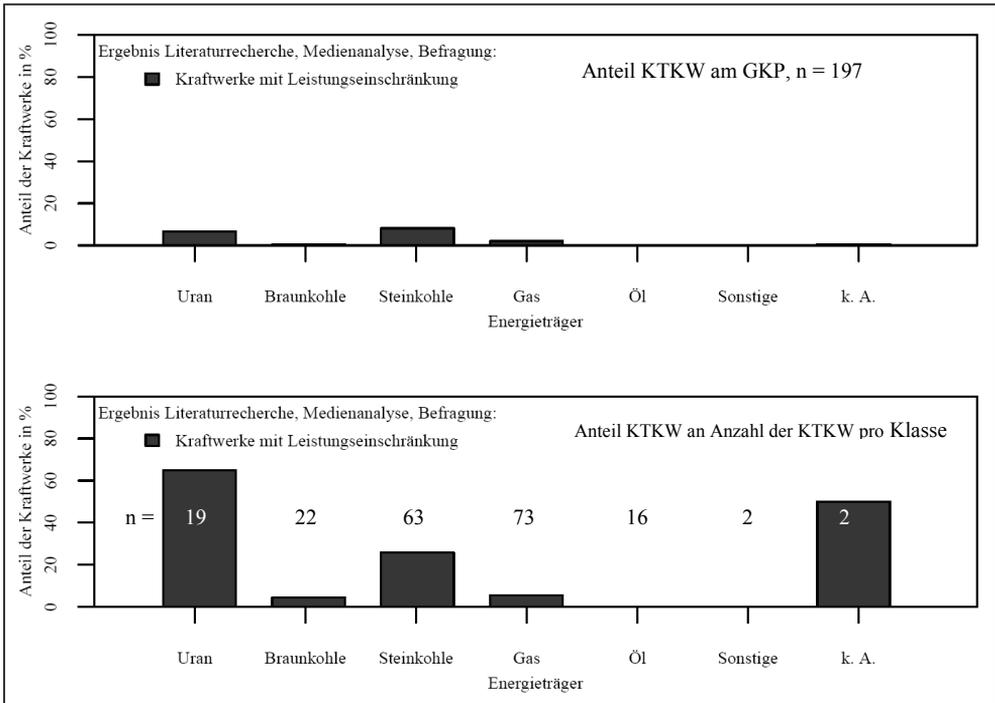


Abbildung 43: Anteil der KTKW mit WT-LE in den Energieträgerklassen am GKP (oben) und innerhalb der Energieträgerklassen (unten). Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“, Literaturrecherche, Medienanalyse und Befragung.

Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken nach Kühlsystem und Kühlverfahren

Alle WT-LE treten bei KTKW auf, die ein Nasskühlsystem (NK) installiert haben. Dies entspricht einem Anteil von 22,1 % aller Kraftwerke mit einer installierten Nasskühlung. Bei 71,4 % der KTKW mit WT-LE kommt die Durchlaufkühlung (DK) alleine oder in Kombination mit der Ablaufkühlung (AK), der Kreislaufkühlung (KK) oder dem Mischbetrieb (MB) zum Einsatz. Dies entspricht einem Anteil von 12,6 % der KTKW mit WT-LE am GKP (vgl. Abbildung 44, oben). Abbildung 44 unten zeigt, dass zwischen 25 und 66,7 % aller KTKW mit Durchlaufkühlung, Mischbetrieb oder mit Durchlaufkühlung in Kombination mit einem weiteren Kühlverfahren sowie 7,7 % aller KTKW mit Kreislaufkühlung eine WT-LE aufweisen.

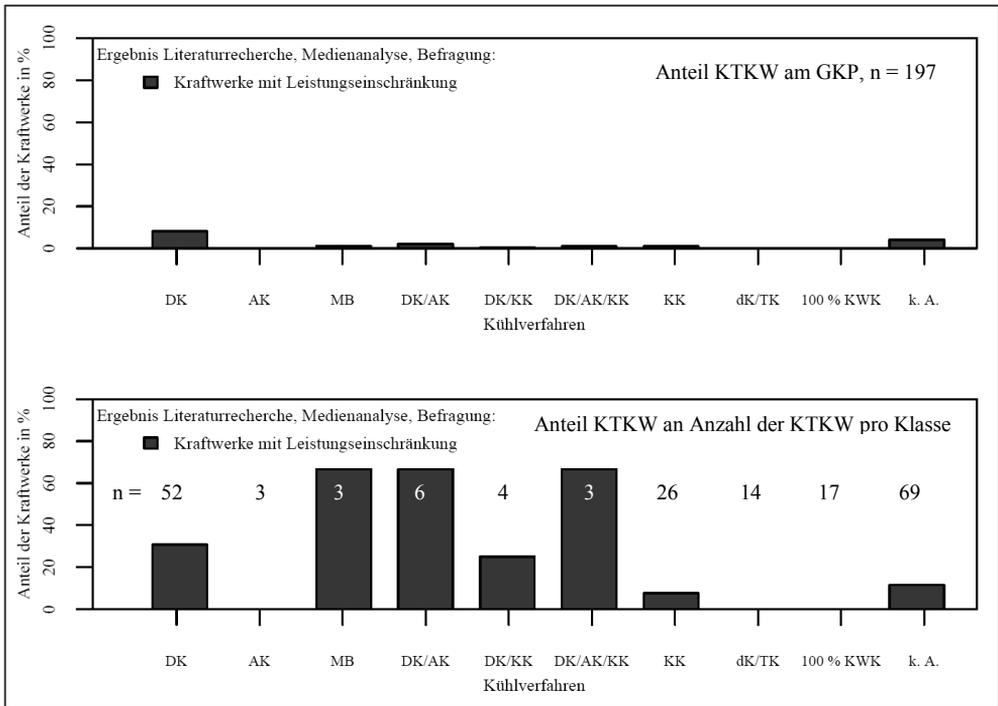


Abbildung 44: Anteil der KTKW mit WT-LE in den Klassen eingeteilt nach Kühlverfahren am GKP der Datenbank „Kraftwerke“ (oben) und an der Gesamtzahl der Kraftwerke in der jeweiligen Klasse eingeteilt nach Kühlverfahren (unten). Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“, Literaturrecherche, Medienanalyse und Befragung.

Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken nach Jahren

Abbildung 45 zeigt die Anzahl der KTKW mit WT-LE für die Jahre 1976 bis 2007. Insgesamt treten 69 WT-LE bei KTKW zwischen 1976 und 2007 auf. Die meisten (19) WT-LE bei KTKW treten im Jahr 2003 auf, gefolgt von 16 im Jahr 2006, acht im Jahr 1994. Zwischen einer und fünf WT-LE treten in den Jahren 1976, 1991, 1993, 1996-1998, 2000, 2002, 2004, 2005 und 2007 auf.

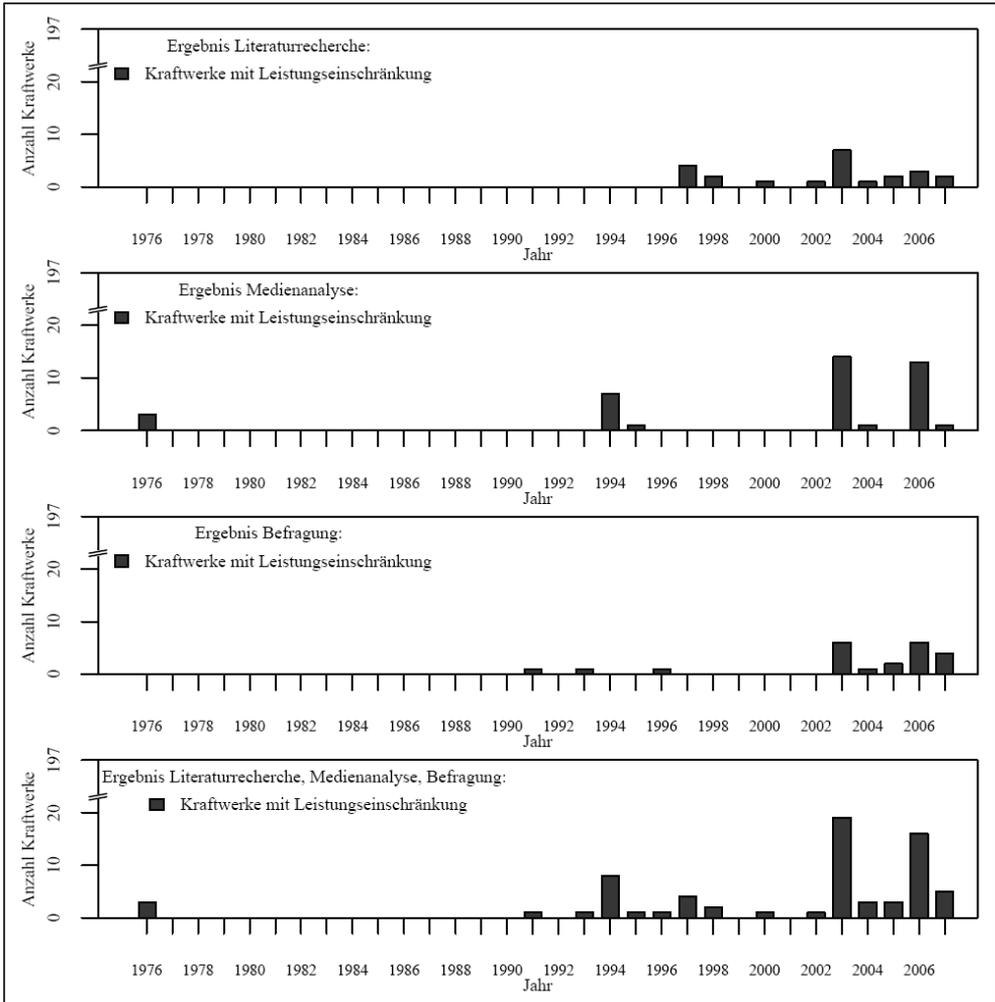


Abbildung 45: Anzahl der KTKW mit WT-LE pro Jahr zwischen 1976 und 2007 von oben nach unten nach den Ergebnissen der Auswertung der Literaturrecherche, der Medienanalyse und der Befragung sowie der Zusammenfassung aller drei Auswertungen. Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“, Literaturrecherche, Medienanalyse und Befragung.

Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken nach Flüssen

Insgesamt ergeben die Auswertungen 35 KTKW mit WT-LE an 13 Flüssen in Deutschland (vgl. Abbildung 46). Die meisten KTKW mit WT-LE befinden sich am Rhein (acht) und am Neckar (sechs). An der Elbe, Spree und Weser liegen drei bis vier KTKW mit WT-LE. An den übrigen Flüssen befinden sich zwischen einem und zwei KTKW mit WT-LE (vgl. Abbildung 46, oben). Gemessen an der Gesamtzahl der KTKW pro Fluss sind 25 % der KTKW am Rhein und 100 % der KTKW an der Jade und am Teltowkanal von einer WT-LE betroffen (vgl. Abbildung 46, unten).

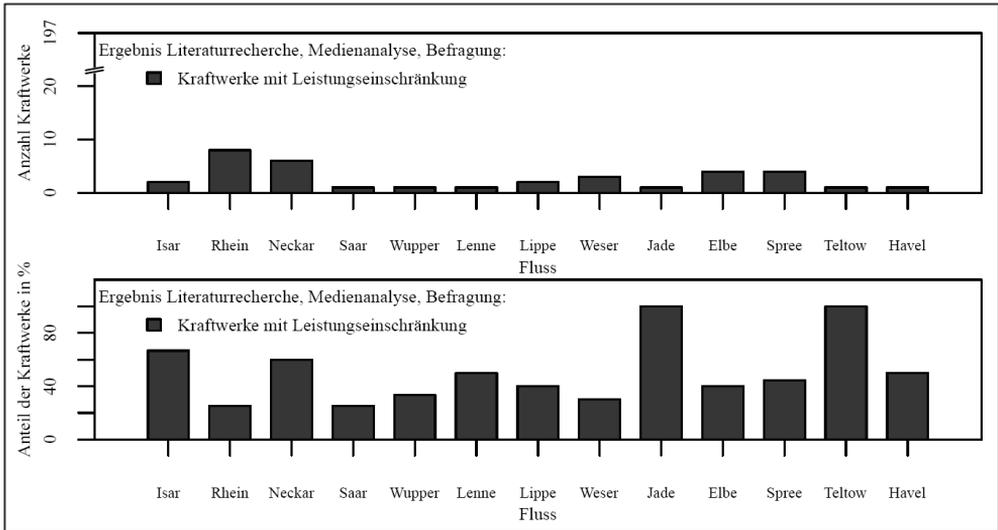


Abbildung 46: Anzahl der KTKW mit WT-LE pro Fluss (oben) und Anteil der KTKW mit WT-LE pro Fluss an der Gesamtzahl der Kraftwerksstandorte am jeweiligen Fluss (unten). Datengrundlage: Datenbank „Kraftwerke“, Literaturrecherche, Medienanalyse und Befragung.

5.2 Die Entwicklung rezenter Wassertemperaturen zwischen 1948 und 2007

Im Zusammenhang mit WT-LE bei KTKW ist es von Interesse, ob die rezenteren WT deutscher Flüsse im Kontext des Klimawandels bereits Trends hin zu höheren Werten aufweisen. Die in Abschnitt 5.1 identifizierten WT-LE bei KTKW traten zwischen 1976 und 2007 zwischen Mai und Oktober und dabei gehäuft im Juni, Juli und August auf (vgl. Tabellen 17 und 18). Daher liegt der Fokus der Ergebnisbeschreibung der Trendanalysen und Zählstatistik extrem hoher rezenter WT auf den Sommermonaten Juni, Juli und August. Die Ergebnisse der Trendanalyse für die einzelnen Monate sowie für die Jahresmittel werden zusammengefasst dargestellt (vgl. Abschnitt 5.2.1). Im zweiten Teil werden die Ergebnisse der Häufigkeitsanalyse extrem hoher Werte in den rezenteren WT-Zeitreihen für die einzelnen Jahre sowie die Sommermonate pro Jahr dargestellt (vgl. Abschnitt 5.2.2).

## 5.2.1 Trends in den rezenten Wassertemperaturzeitreihen

Um Signifikanz, Richtung und Höhe von Trends in den rezenten WT-Zeitserien zu identifizieren, wurden der Mann-Kendall Trendtest und der Sen's Nonparametric Estimator of Slope angewandt. Dabei wurden jeweils alle rezenten WT-Zeitserien, die dasselbe Zeitintervall abdecken, bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  auf Trends hin untersucht. Die Ergebnisse werden für folgende Zeitintervalle dargestellt: 1988-2007, 1986-2005, 1984-2003, 1979-1998, 1976-2005, 1971-2007 sowie jeweils die Zeitserien der Stationen „Magwitz“ (1956-1978, Weiße Elster), „Erlin“ (1986-2006, Mulde), „Dresden“ (1948-1993, Elbe) und „Gartz“ (1952-1973, Oder) (vgl. Tabelle 15 im Abschnitt 4.2.3.2 und Tabelle 24 im Anhang I).

Die Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel finden sich für alle Zeitserien für die jeweiligen Zeitintervalle in den Abbildungen 94 bis 100 im Anhang II. Signifikant positive und negative Trends werden im Folgenden als positive und negative Trends bezeichnet.

### Trendanalyse Jahresmittel

Im Jahresmittel der WT treten positive Trends in insgesamt vier Zeitserien für vier Zeitintervalle auf (vgl. Abbildungen 94 bis 100 im Anhang II).

### Trendanalyse Monatsmittel

#### *Trendergebnisse nach Saison*

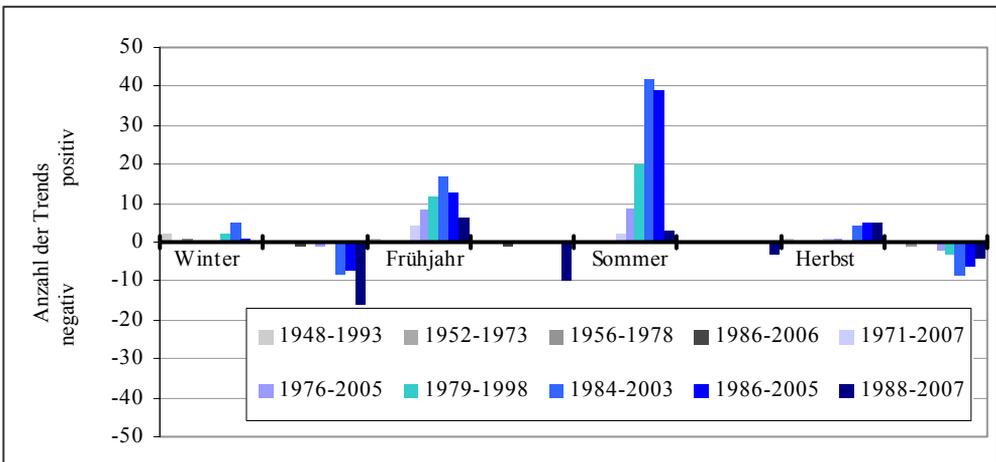


Abbildung 47: Anzahl der signifikant ( $\alpha = 0,05$ ) positiven und negativen Trends in den 185 analysierten WT-Zeitserien pro Zeitintervall und Saison für alle zehn Zeitschnitte.

Für die Zeitschnitte, die von mehr als einer Zeitreihe abgedeckt werden (ohne „Dresden“, „Magwitz“, „Erlin“ und „Gartz“), weisen zwischen 9,7 und 13,5 % und im Mittel 12,4 % aller Monate signifikante Trends in den analysierten Zeitserien der Flüsse auf. Auffallend ist, dass für

diese Zeitintervalle zwischen 80 und 100 % aller signifikanten Trends positiv sind. Eine Ausnahme stellt dabei das Zeitintervall 1988-2007 mit umgekehrtem Verhältnis dar: etwa 29 % der signifikanten Trends sind positiv und 71 % negativ.

In Abbildung 47 ist die Anzahl der negativen und positiven Trends in den 185 analysierten WT-Zeitreihen aller Flüsse pro Saison und für alle zehn Zeitintervalle zusammengefasst dargestellt. Dabei ist jeder positive oder negative Trend pro Monat in einer Saison einzeln gezählt.

Der Sommer weist mit 42,8 % den höchsten Anteil an allen Trends auf, gefolgt vom Frühjahr mit 26 %. 97,5 % der Trends im Sommer sind positiv. Während im Frühjahr ebenfalls mehr positive (84,7 %) als negative Trends auftreten, kehrt sich im Winter das Verhältnis um: 75 % der Trends sind negativ. Im Herbst kommen ebenfalls mit 60 % mehr negative als positive Trends vor (vgl. Abbildung 47).

#### *Trendergebnisse nach Flüssen und Saison*

Die Trendergebnisse für die Monatsmittel werden im Folgenden für die Flüsse in Süd-, Nord- und Ostdeutschland (vgl. Tabelle 24 im Anhang I) jeweils pro Saison zusammengefasst dargestellt. Dazu sind in den Abbildungen 48 bis 51 pro Fluss die Anzahl der positiven und negativen Trends pro Saison und für das jeweilige Zeitintervall aufgetragen, den mindestens eine Zeitreihe des entsprechenden Flusses abdeckt. Treten in einer Zeitreihe mehrere negative oder positive Trends in den drei Monaten einer Saison auf, sind diese als ein negativer oder positiver Trend pro Saison zusammengefasst. Süddeutschland

In 39 % der Zeitreihen der acht Flüsse in Süddeutschland treten signifikante Trends auf. Wie in den Abbildungen 48 und 49 zu sehen, sind mit 30 % die meisten von diesen positiv. Der Sommer weist mit 16 % den höchsten Anteil an Trends, gefolgt vom Frühjahr mit 10 %. Im Sommer treten in allen analysierten Zeitreihen ausschließlich positive Trends auf, mit Ausnahme der Zeitreihen des Mains und der Saar. Im Winter, Frühjahr und Herbst kommen sowohl positive als auch negative Trends vor, mit Ausnahme der analysierten Zeitreihen der Isar (vgl. Abbildung 48). Dabei treten die negativen Trends ausschließlich im Zeitintervall 1988-2007 auf, mit Ausnahme der Zeitreihen des Neckars und Mains. Der Neckar zeigt zudem für alle Zeitintervalle negative Trends auf (vgl. Abbildung 49).

In 43 % der analysierten Zeitreihen der norddeutschen Flüsse Ems, Werra, Weser und Elbe treten signifikante Trends auf (vgl. Abbildung 50). Die meisten Trends kommen mit 15 % im Sommer vor. Von diesen Trends sind alle positiv. Insgesamt sind die meisten Trends (25 %) positiv. Im Winter, Frühjahr und Herbst kommen sowohl negative als auch positive Trends vor.

In 46 % der analysierten Zeitreihen der Flüsse in Ostdeutschland liegen signifikante Trends vor (vgl. Abbildung 51). Die meisten von diesen kommen mit 22 % im Sommer vor, gefolgt vom Frühjahr mit 11 %. Die signifikanten Trends im Sommer und Frühjahr sind alle positiv mit Ausnahme eines negativen Trends im Frühjahr an der Mulde.

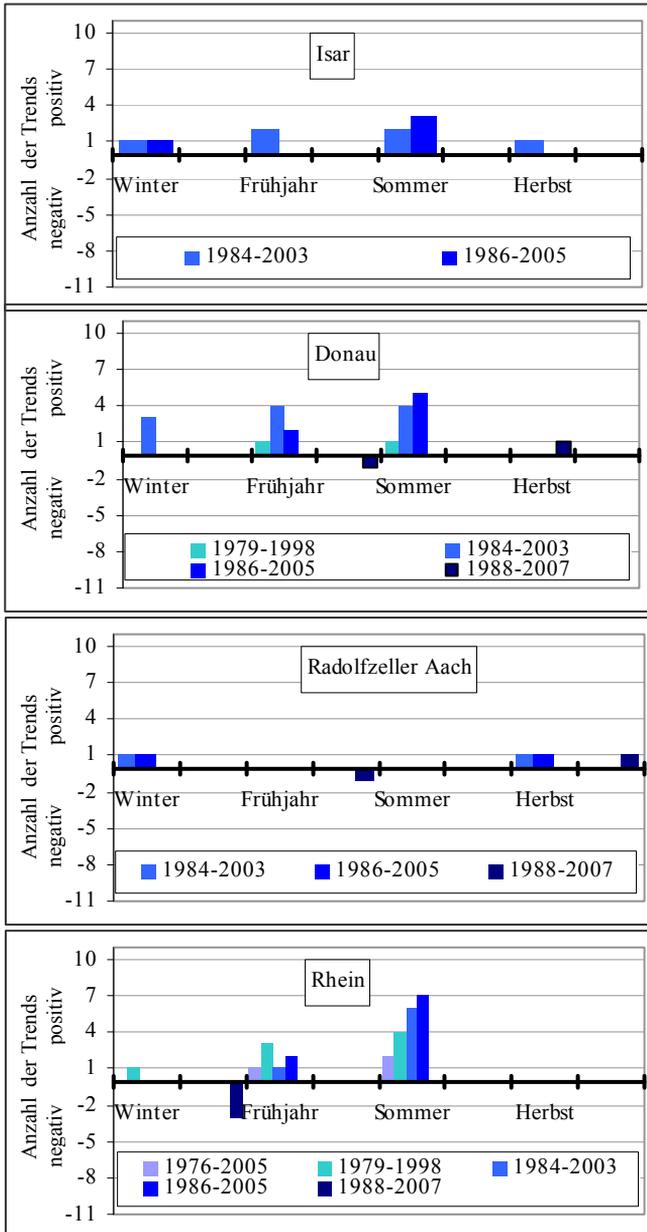


Abbildung 48: Anzahl der signifikant positiven und negativen Trends pro Saison für die jeweiligen Zeitintervalle, die von mindestens einer Zeitreihe der Isar, Donau, Radolfzeller Aach und Rhein abgedeckt werden (vgl. Tabelle 15). Sind Zeitintervalle nicht als Balken vertreten, liegt kein signifikanter Trend vor.

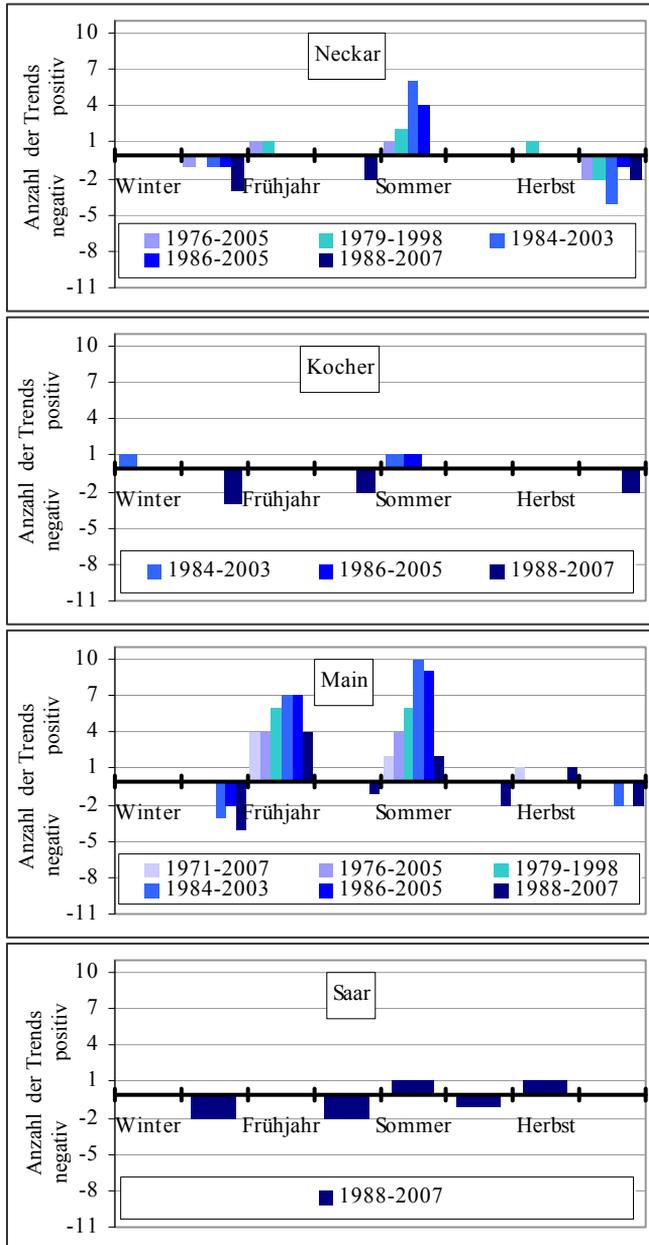


Abbildung 49: Anzahl der signifikant positiven und negativen Trends pro Saison für die jeweiligen Zeitintervalle, die von mindestens einer Zeitreihe der Flüsse Neckar, Kocher, Main und Saar abgedeckt werden (vgl. Tabelle 15). Sind Zeitintervalle nicht als Balken vertreten, liegt kein signifikanter Trend vor.

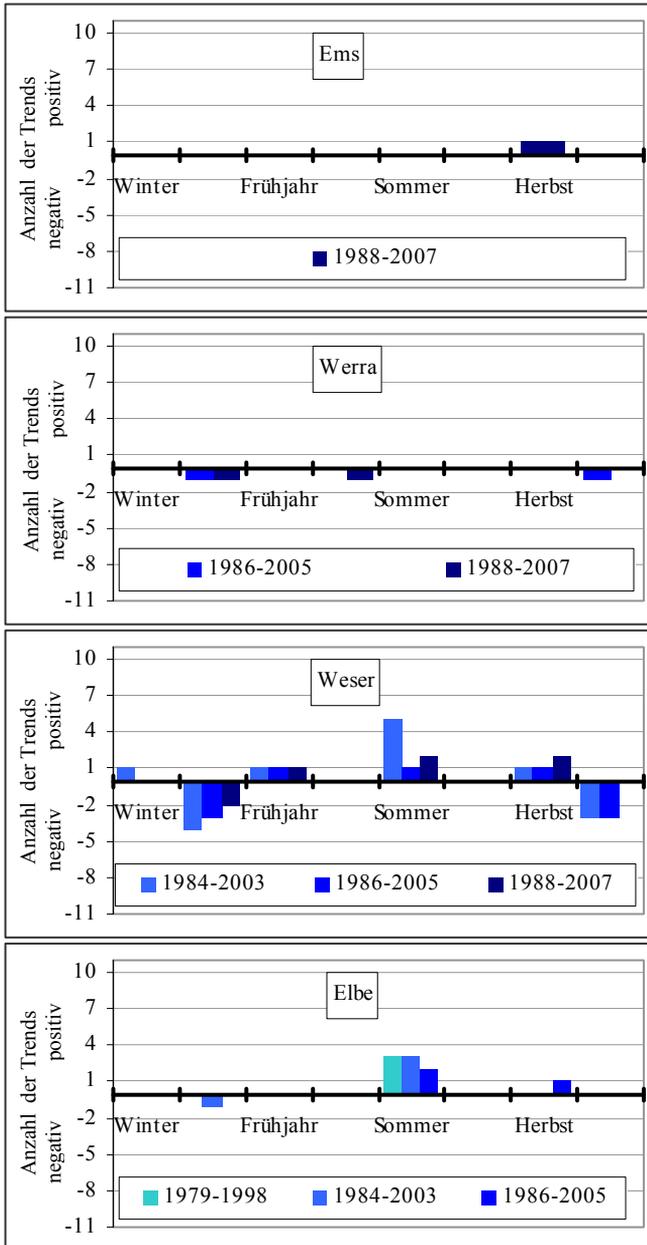


Abbildung 50: Anzahl der signifikant positiven und negativen Trends pro Saison für die jeweiligen Zeitintervalle, die von mindestens einer Zeitreihe der Flüsse Ems, Werra, Weser und Elbe abgedeckt werden (vgl. Tabelle 15). Sind Zeitintervalle nicht als Balken vertreten, liegt kein signifikanter Trend vor.

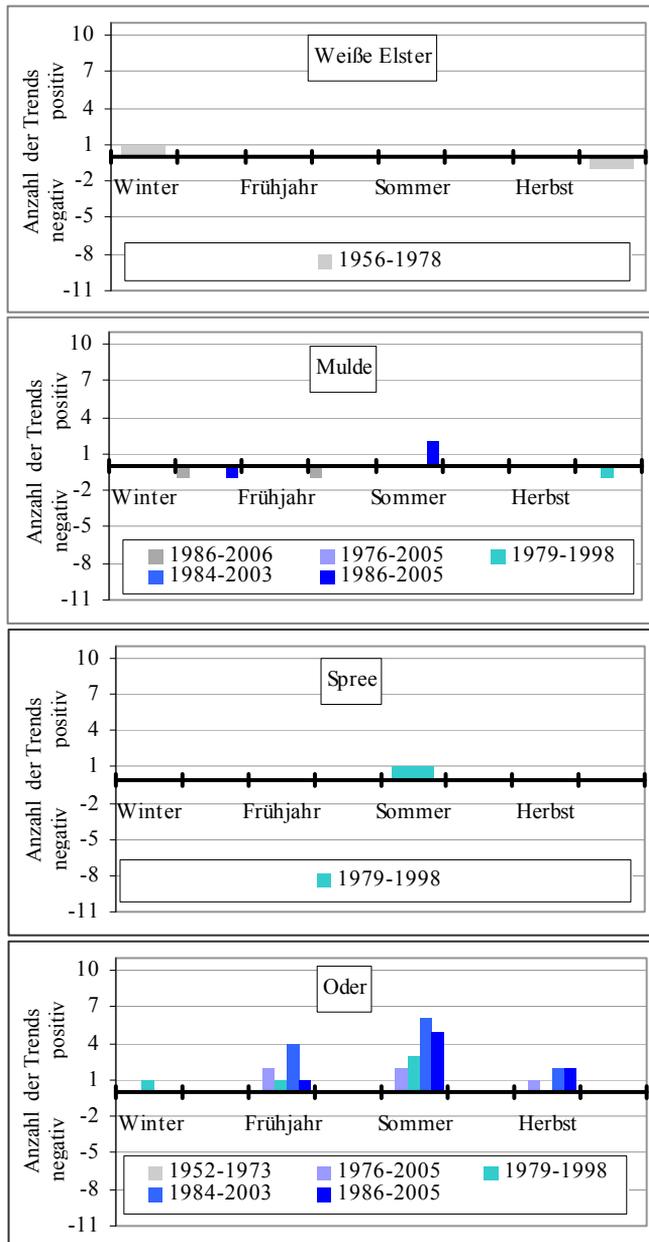


Abbildung 51: Anzahl der signifikant positiven und negativen Trends pro Saison für die jeweiligen Zeitintervalle, die von mindestens einer Zeitreihe der Flüsse Ems, Werra, Weser und Elbe abgedeckt werden (vgl. Tabelle 15). Sind Zeitintervalle nicht als Balken vertreten, liegt kein signifikanter Trend vor.

## Größe der Trends

Die Trendgrößen fallen sowohl in den analysierten Zeitreihen der einzelnen Flüsse für ein Zeitintervall als auch im Vergleich der Monate unterschiedlich hoch aus. Die größten positiven Trends von etwa 0,7-5,9 °C treten für alle Zeitintervalle in den Sommermonaten auf, gefolgt von den Frühjahr- und Herbstmonaten mit bis zu 4,5 °C. Im Vergleich der Zeitintervalle liegen die größten positiven Trends für 1984-2003 vor. Die größten negativen Trends von -0,7 bis -4,2 °C treten im Winter gefolgt vom Herbst auf (vgl. Abbildungen 94 bis 100 im Anhang II).

## Einfluss des gewählten Zeitintervalls auf die Trendergebnisse

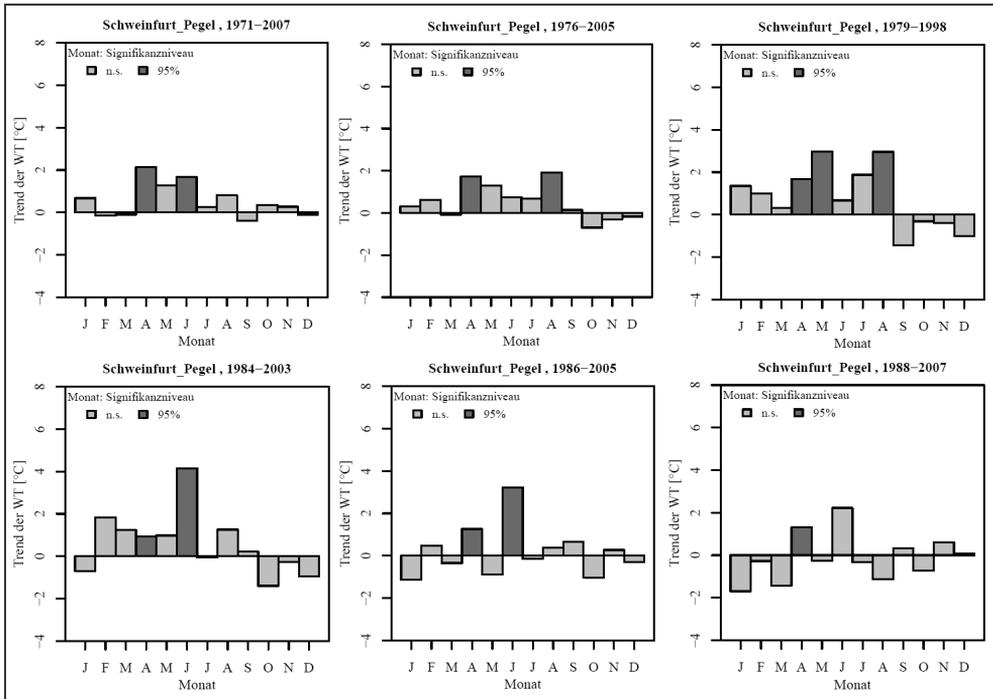


Abbildung 52: Signifikante (dunkelgrau) und nicht signifikante (hellgrau) Trends und deren Größe in °C in den Monatsmitteln der rezenten WT-Zeitreihe „Schweinfurt\_Pegel“ für die Zeitintervalle 1971-2007, 1976-2005, 1979-1998, 1984-2003, 1986-2005 und 1988-2007 ( $\alpha = 0,05$ ).

In Abbildung 52 wird am Beispiel der Zeitreihe „Schweinfurt\_Pegel“, die alle sechs Zeitintervalle abdeckt, der Einfluss des gewählten Zeitintervalls auf das Trendergebnis deutlich. Zwar treten für alle Zeitintervalle positive Trends im April auf, doch deren Größe variiert zwischen 0,7 (1984-2003) und 2,1 °C (1971-2007). Zudem liegen für ein bis drei Zeitintervalle positive Trends im Mai, Juni oder August vor. Auch hier variiert die Trendgröße z. B. für den Juni zwischen 1,8 und 4 °C. Im Gegensatz zum April liegt dabei der größte Trend für das Zeitintervall 1984-2003 und der geringste für das Zeitintervall 1971-2007 vor. Die Trendergebnisse für die sechs Zeitintervalle zeigen sich insofern

homogen, als dass in den Frühjahr- und Sommermonaten positive Trends und keine signifikanten Trends im Winter und Herbst auftreten.

## 5.2.2 Häufigkeit extrem hoher Wassertemperaturen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Zählstatistik sehr hoher (95. Perzentil) und extrem hoher (99. Perzentil) Tagesmittel in den rezenten WT-Zeitreihen pro Jahr dargestellt. Da im Sommer die höchsten WT-Werte auftreten (vgl. Abschnitte 2.2.1) und die meisten WT-LE bei KTKW in den Sommermonaten auftraten (vgl. Abschnitt 5.1), wird zudem die Anzahl an Tagen mit sehr hohen und extrem hohen WT-Werten für den Juni, Juli und August beschrieben. Für den Rhein werden zusätzlich die Ergebnisse der Auszählung der Anzahl an Tagen pro Jahr bzw. in den Sommermonaten mit hohen bis extrem hohen WT ab  $\geq 23$  °C in je einem Grad Schritt bis  $> 28$  °C dargestellt (vgl. Abschnitt 4.2.4).

### Anzahl sehr hoher und extrem hoher Wassertemperaturen pro Jahr

In Abbildung 53 ist jeweils das Jahr an den WT-Stationen zu sehen, in dem für die jeweilige Zeitreihe die höchste Anzahl an Tagen mit sehr hohen (links) und extrem hohen WT-Werten (rechts) vorkommt. In 71 % bzw. 50 % der 72 Zeitreihen tritt das Jahr 2003 mit der höchsten Anzahl an Tagen pro Jahr mit sehr hohen bzw. extrem hohen WT-Werten auf. Im Falle der höchsten Anzahl an Tagen mit sehr hohen WT-Werten folgen die Jahre 1992, 1994 und 1995, im Falle der höchsten Anzahl an Tagen mit extrem hohen WT-Werten die Jahre 1991, 1994, 1995 und 2006. In Zeitreihen aller Flüsse in Süddeutschland sowie der Weser in Nord- und der Mulde in Ostdeutschland tritt insgesamt die größte Anzahl sehr hoher und extrem hoher WT-Werten pro Jahr auf.

Unterteilt in die Zeitreihen der Flüsse in Süd-, Nord- und Ostdeutschland ergibt sich allerdings ein differenziertes Bild. Die Anzahl an Tagen mit sehr hohen und extrem hohen WT-Werte pro Jahr ist für alle Zeitreihen in Abbildung 101 im Anhang II dargestellt.

#### *Süddeutschland*

Hier treten in 93 % der Zeitreihen die meisten Tage mit sehr hohen WT-Werte im Jahr 2003 auf (vgl. Abbildung 53, links). Dies trifft ebenso für die Anzahl der Tage mit extrem hohen WT-Werten für 67 % der Zeitreihen zu. Für die übrigen 33 % zeigt sich in Zeitreihen der Donau, des Rheins, Neckars und Mains die höchste Anzahl an Tagen pro Jahre mit extrem hohen WT-Werten in den Jahren 1976, 1991, 1998 oder 2006 (vgl. Abbildung 53, rechts).

#### *Norddeutschland*

Die Anzahl der Tage mit sehr hohen WT-Werten pro Jahr liegt in 64 % der Zeitreihen der Weser und Elbe am häufigsten im Jahr 1994 oder 2003 vor. Die größte Anzahl sehr hoher WT-Werte pro Jahr verteilt sich in den übrigen 36 % der Zeitreihen der Ems, Werra, Weser und Elbe auf die Jahre 1992, 1995, 1998 und 2006. Das Jahr 1994 tritt mit der größten Anzahl an Tagen mit extrem hohen WT-Werten in 64 % der Zeitreihen am häufigsten auf, gefolgt von den Jahren 2006 und 1984.

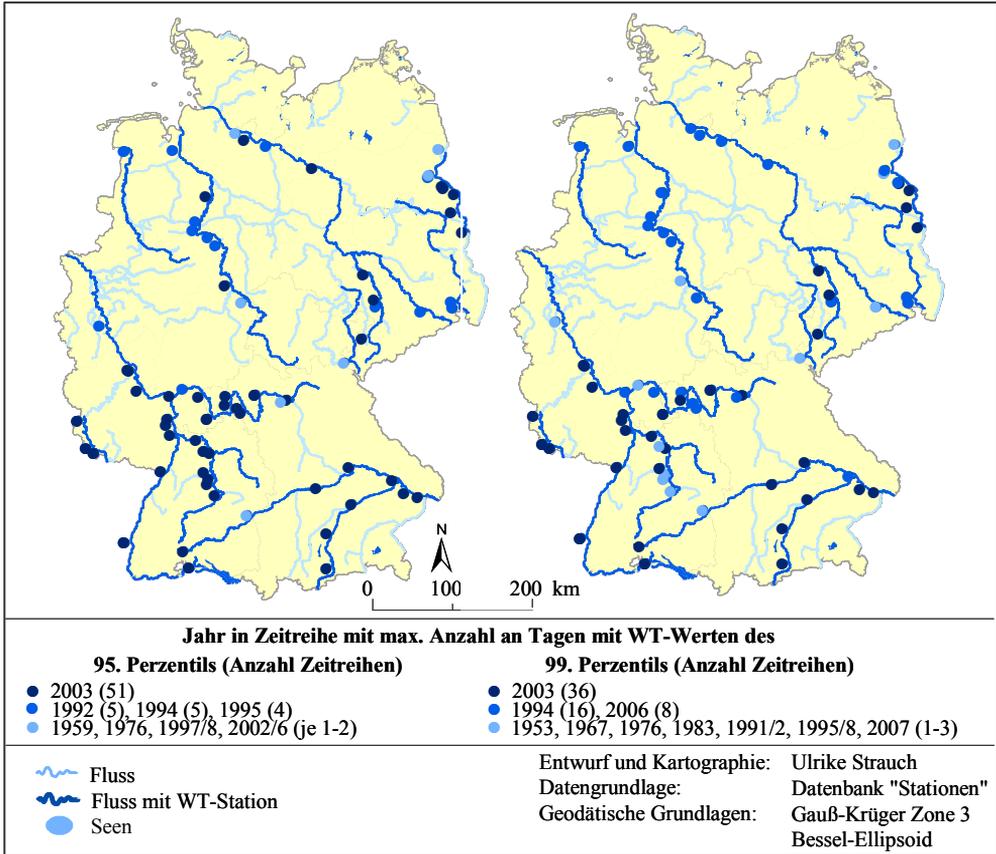


Abbildung 53: Übersicht über die 72 WT-Stationen mit dem Jahr (dunkelblau, blau und hellblau), in dem die höchste Anzahl an WT-Werten des 95. (links) und des 99. Perzentils (rechts) in der jeweiligen WT-Zeitreihen auftreten.

### Ostdeutschland

2003 treten in 46 % bzw. 40 % der Zeitreihen in Ostdeutschland die größte Anzahl an Tagen mit sehr hohen und extrem hohen WT-Werten auf. In den übrigen Zeitreihen verteilt sich die höchste Anzahl an Tagen pro Jahr mit sehr hohen bzw. extrem hohen Werten auf die Jahre 1953, 1959, 1963, 1967, 1968, 1976, 1983, 1992 oder 1995.

### Anzahl sehr hoher und extrem hoher Wassertemperaturen in den Sommermonaten

Für den Juni, Juli und August sind stellvertretend für die Zeitreihen der Flüsse in den drei Regionen anhand der Zeitreihen „Passau“ (Donau, Süddeutschland), „Petershagen“ (Weser, Norddeutschland) und „Hohensaaten“ (Oder, Ostdeutschland) die Anzahl der Tage pro Monat mit sehr hohen (hellrau) und extrem hohen (dunkelgrau) WT-Werten in Abbildung 54 dargestellt. Die

Ergebnisse der Zählstatistik sehr hoher und extrem hoher WT in den Sommermonaten sind für alle Zeitreihen in den Abbildungen 102 bis 104 im Anhang II zu finden.

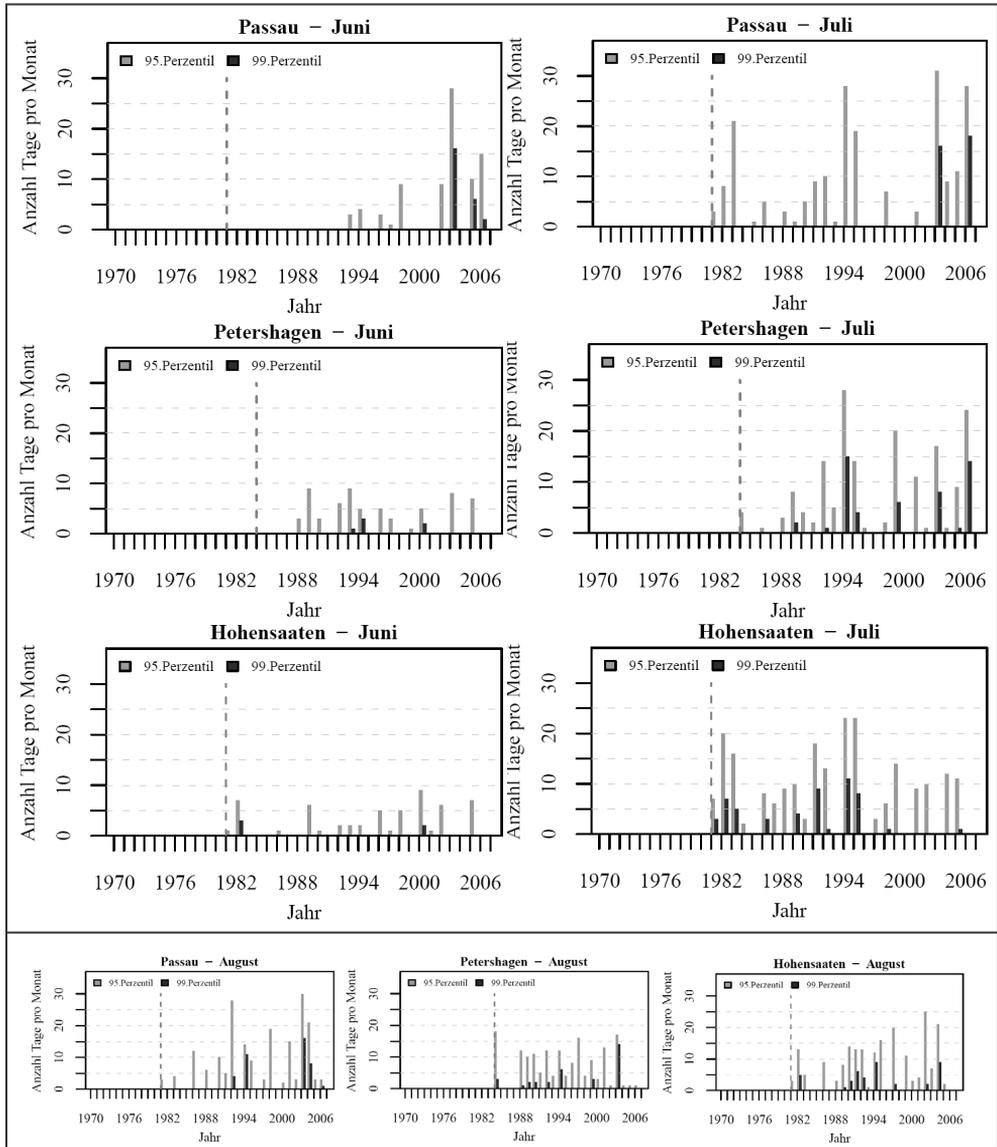


Abbildung 54: Anzahl der Tage mit sehr hohen (hellgrau) und extrem hohen (dunkelgrau) WT-Werten in den Sommermonaten Juni, Juli und August in den Zeitreihen „Passau“ (Donau), „Petershagen“ (Weser) und „Hohensaaten“ (Oder) stellvertretend für die Zeitreihen der Flüsse in Süd-, Nord- und Ostdeutschland. Senkrechte grau gestrichelte Linie = jeweiliger Zeitreihenbeginn.

Insgesamt kommen in den Sommermonaten Juni bis August die größte Anzahl sehr hoher und extrem hoher WT-Werte im Jahresverlauf vor. Im Vergleich der Sommermonate tritt die höchste Anzahl an Tagen mit sehr hohen bzw. extrem hohen WT-Werten für den Juni im Jahr 2003 in 76 bzw. 46 % und für den August in 47 bzw. 65 % der 72 Zeitreihen auf. Für den Juli kommen in 29 bzw. 44 % der Zeitreihen im Jahr 2006 die meisten Tage mit sehr hohen bzw. extrem hohen WT-Werten vor (vgl. Abbildung 54, oben Mitte, „Passau“).

### *Juni*

Für den Juni folgen nach 2003 die Jahre 1992, 1998 oder 2006 mit der höchsten Anzahl an Tagen mit sehr hohen WT-Werten in 13 % aller Zeitreihen und die Jahre 1976, 1994, 1998, 2005 oder 2006 mit der höchsten Anzahl an Tagen mit extrem hohen Werten in 32 % der Zeitreihen (vgl. Abbildung 54, Mitte links, „Petershagen“).

### *Juli*

Nach 2006 kommt im Jahr 1994 für den Juli die größte Anzahl an Tagen mit sehr hohen und extrem hohen WT-Werten in 19 bzw. 25 % der Zeitreihen v. a. in Nord- und Ostdeutschland vor (vgl. Abbildung 54, Mitte und unten Mitte, „Petershagen“ und „Hohensaaten“). Zusätzlich tritt die größte Anzahl an Tagen mit sehr hohen WT-Werten in 25 % aller Zeitreihen für den Juli sowohl 2006 als auch 1994 auf.

### *August*

Nach 2003 tritt die höchste Anzahl an Tagen mit sehr hohen WT-Werten für den August in den Jahren 1997, 1995, 1992 oder 1991 in insgesamt 42 % der Zeitreihen auf. Die größte Anzahl an Tagen mit extrem hohen Werten im August kommen in 31 % der Zeitreihen verteilt auf die Jahre 1994, 1992 oder 1995 vor (vgl. Abbildung 54, unten rechts, Hohensaaten).

### *Zusammenfassung Anzahl sehr hoher und extrem hoher Wassertemperaturwerte*

Zusammengefasst treten in den Jahren 2003, 1994 und 2006 in den meisten Zeitreihen die größte Anzahl an sehr hohen und extrem hohen WT-Werten auf. Die größte Anzahl an Tagen mit sehr hohen und extrem hohen WT liegt im Vergleich aller Zeitreihen im Jahr 2003 vor. Es folgen die Jahre 1992, 1994 und 1995 mit der größten Anzahl an Tagen mit sehr hohen WT-Werten und die Jahre 1991, 1994, 1995 und 2006 mit der größten Anzahl an Tagen mit extrem hohen Werten. Je nach Zeitreihe und Zeitreihenlänge treten zusätzlich in den Jahren 1976, 1982, 1983, 1989, 1991, 1998, 2002, 2004 und 2007 vergleichsweise relativ viele Tage pro Jahr mit sehr hohen und extrem hohen WT-Werten auf. Im räumlichen Vergleich zeigen das Jahr 2003 in den Zeitreihen der Flüsse in Süd- und Ostdeutschland und die Jahre 1994 und 2006 in den Zeitreihen der Flüsse in Norddeutschland die größte Anzahl an Tagen mit extrem hohen WT-Werten pro Jahr. Während die meisten Zeitreihen in den Jahren 2003 und 1994 die größte Anzahl an Tagen mit sehr hohen und extrem hohen WT-Werten im Juni und August aufweisen, ist dies im Jahr 2006 im Juli der Fall.

Anzahl Wassertemperaturwerte über definierten Schwellwerten in den Zeitreihen des Rheins

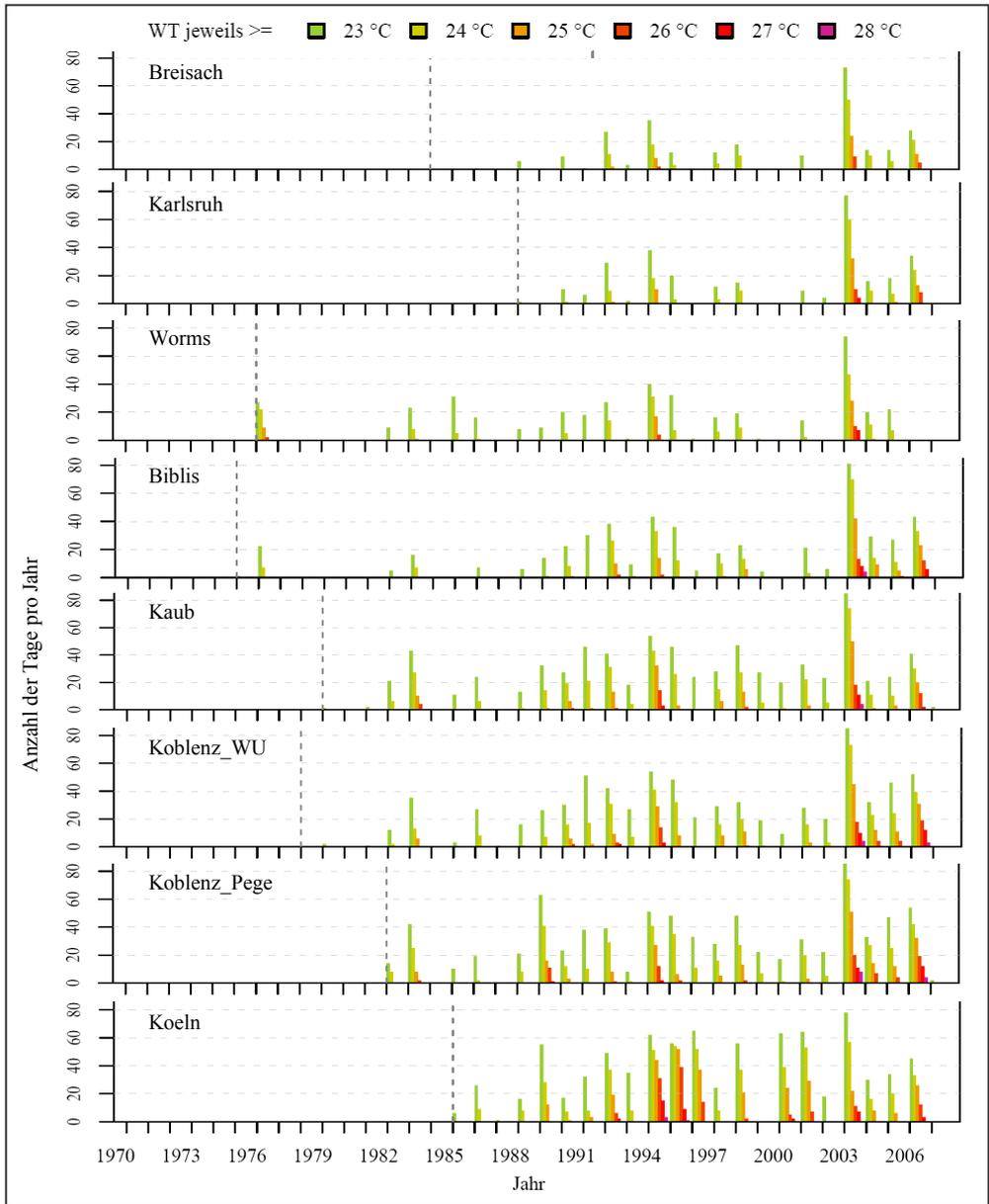


Abbildung 55: Anzahl der Tage pro Jahr mit WT-Werten über definierten Schwellwerten  $\geq 23\text{ °C}$  in einem Grad Schritt bis  $> 28\text{ °C}$  für die acht WT-Zeitreihen des Rheins. Senkrechte grau gestrichelte Linie = jeweiliger Zeitreihenbeginn.

### *Pro Jahr*

Insgesamt nimmt die Anzahl an Tagen pro Jahr mit WT-Werten  $\geq 23$  °C in den Zeitreihen des Rheins mit zunehmender Entfernung der WT-Stationen vom Bodensee zu (vgl. Abbildung 55). Zwischen 1985 und 2006 nimmt außerdem von Breisach bis Koblenz\_ Pegel die Anzahl der Jahre, in denen WT-Werte  $\geq 23$  °C vorliegen, von 15 auf 21 Jahre zu. Am häufigsten werden die WT-Werte  $\geq 23$  °C im Jahr 2003 überschritten, gefolgt von den Jahren 1994, 1989 und 1996. Extrem hohe WT-Werte  $\geq 28$  °C treten in den Zeitreihen „Biblis“ bis „Koeln“ je nach Zeitreihe 2003, 2006, 1994 und 1995 auf. Zudem fallen folgende Jahre je nach Zeitreihe und deren Länge auf, in denen sehr hohe WT-Werte  $\geq 26$  °C vorkommen: 1976, 1983, 1989, 1992, 1995, 1996, 2001, 2002, 2004 und 2005.

### *Für die Sommermonate pro Jahr*

Die Anzahl an Tagen mit WT-Werten  $\geq 23$  °C für die Sommermonate Juni, Juli und August nimmt ebenfalls in den Zeitreihen mit zunehmender Entfernung der WT-Stationen vom Bodensee zu. Ebenso nimmt die Anzahl der Tage mit WT-Werten  $\geq 23$  °C von Juni bis August in allen Zeitreihen zu. Für den Juni sind im Jahr 2003 in allen Zeitreihen die meisten WT-Werte  $\geq 23$  °C zu sehen, wobei der Schwellwert  $\geq 26$  °C nicht überschritten wird. Für den Juli liegen die meisten Tage mit WT-Werten  $\geq 23$  °C je nach Zeitreihe im Jahr 2006 oder 1994 gefolgt vom Jahr 2003 vor. Mit Ausnahme der Zeitreihe „Koeln“ liegen im August 2003 gefolgt vom August 1992 in allen Zeitreihen die größte Anzahl an Tagen mit WT-Werten  $\geq 23$  °C vor. Sehr hohe WT-Werte  $\geq 26$  °C treten allerdings im August nach 2003 am häufigsten im Jahr 1994 auf (vgl. Abbildungen 105 bis 107 im Anhang II).

## 5.3 Die Entwicklung zukünftiger Wassertemperaturen zwischen 2011 und 2100

Wie sich die WT der Flüsse zukünftig im Kontext des Klimawandels unter Annahme unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre entwickeln könnten, wird in diesem Abschnitt beschrieben. In Abschnitt 5.3.1 werden die Ergebnisse der Trendanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2100 der drei Szenarien B1, A1B und A2 dargestellt (vgl. Abschnitte 4.3 und 4.4). Im zweiten Teil werden die Ergebnisse des Mittelwertvergleichs zwischen den 72 WT-Zeitreihen der ZP des B1-, A1B- und A2-Szenarios einerseits und denen der KNP andererseits beschrieben (vgl. Abschnitt 5.3.2). Da für die Sommermonate die meisten WT-LE bei KTKW identifiziert wurden (vgl. Abschnitt 5.1), werden die Ergebnisse für die Jahresmittel sowie für die Jahreszeiten mit Schwerpunkt auf Juni, Juli und August dargestellt.

### 5.3.1 Trends in zukünftigen Wassertemperaturen zwischen 2011 und 2100

Um die für die ZP 2011-2040, 2011-2070 und 2011-2100 simulierten WT der drei Szenarien B1, A1B und A2 auf Trends hin zu analysieren, wurden der Mann-Kendall Trendtest sowie der Sen's Nonparametric Estimator of Slope angewandt ( $\alpha = 0,05$ ) (vgl. Abschnitt 4.4). Im Folgenden werden die Ergebnisse der Trendanalyse der simulierten WT in der Reihenfolge der ZP 2011-2040, 2011-2070 und 2011-2100 jeweils für die drei Szenarien B1, A1B und A2 beschrieben. Signifikant negative oder positive Trends werden als negative oder positive Trends bezeichnet.

Trendanalyse der Jahresmittel

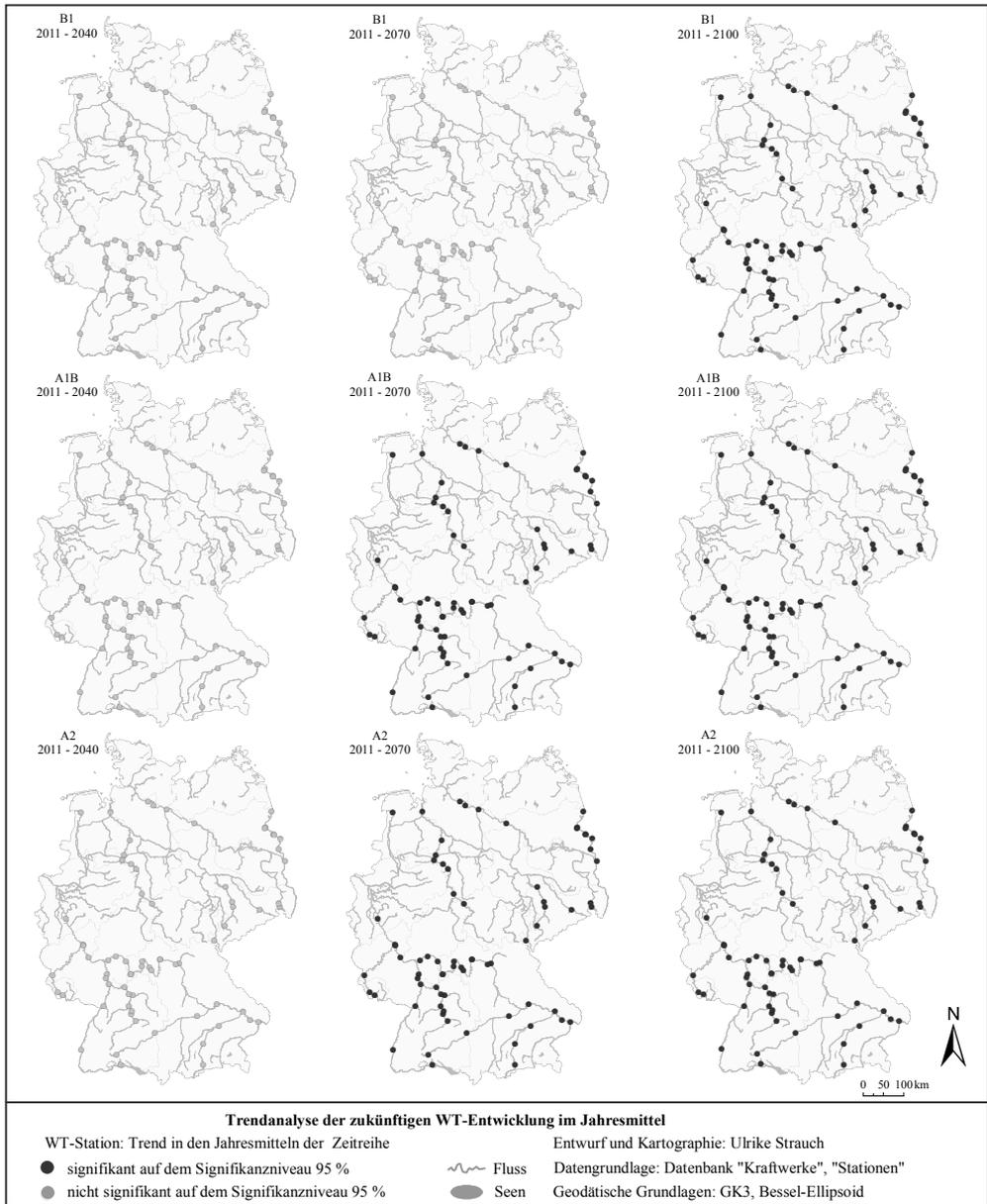


Abbildung 56: Übersicht über signifikante (dunkelgrau,  $\alpha = 0,05$ ) und nicht signifikant positive Trends (hellgrau) in den Jahresmitteln der 72 simulierten WT-Zeitreihen jeweils für die ZP 2011-2040, 2011-2070 und 2011-2100 (links nach rechts) sowie für die Szenarien B1, A1B und A2 (oben nach unten).

Abbildung 56 zeigt die räumliche Verteilung signifikanter (dunkelgrau) und nicht signifikanter (hellgrau) Trends in den WT-Zeitreihen der Jahresmittel für die drei ZP des B1-, A1B- und A2-Szenarios. Die Größe der signifikanten Trends in den Jahresmitteln nimmt insgesamt von der kürzesten ZP 2011-2040 über die mittlere ZP 2011-2070 bis zur längsten ZP 2011-2100 zu. Das B1-Szenario weist jeweils für alle ZP die geringsten signifikanten Trends auf, das A1B- und A2-Szenario zeigen größere und zugleich ähnlich hohe Trends.

Für die ZP 2011-2040 liegen für keines der drei Szenarien in den simulierten WT-Zeitreihen signifikanten Trends vor (vgl. Abbildung 56, links). Gleiches gilt für die ZP 2011-2070 des B1-Szenarios (vgl. Abbildung 56, oben Mitte). Für die ZP 2011-2070 kommen dagegen in den Jahresmitteln aller WT-Zeitreihen der A1B- und A2-Szenarios positive Trends von 1,7-2,2 °C bzw. 1,7-2,3 °C vor (vgl. Abbildung 56, Mitte und Mitte unten). Die längste ZP von 2011-2100 zeigt in allen Zeitreihen aller drei Szenarios positive Trends der Jahresmittel von 1,2-2,1 °C für das B1-Szenario, von 2-3,9 °C für das A1B-Szenario und von 2,1-3,9 °C für das A2-Szenario (vgl. Abbildung 56, rechts).

### Trendanalyse der Monatsmittel

Die Trendanalyse der Monatsmittel fallen bezüglich der Signifikanz, der Richtung sowie der Größe der Trends homogen für die Flüsse in Süd-, Nord und Ostdeutschland aus. Aus diesem Grund werden die Trendergebnisse der einzelnen Monate für die drei ZP der drei Szenarien B1, A1B und A2 anhand der Zeitreihen „Muenchen“ (Isar, Süddeutschland), „Emmerthal“ (Weser, Norddeutschland) und „Eisenhuettenstadt“ (Oder, Ostdeutschland) stellvertretend für alle Zeitreihen dargestellt. Alle Ergebnisse der Trendanalysen der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die drei ZP und drei Szenarien finden sich in den Abbildungen 108 bis 116 im Anhang II.

Insgesamt nimmt die Anzahl positiver Trends in den Monatsmitteln von der kürzesten bis zur längsten ZP sowie vom B1- über das A1B- zum A2-Szenario zu. Negative Trends treten ausschließlich im B1-Szenario für die ZP 2011-2040 auf. Die Größe der Trends nimmt, wie bei den Trendergebnissen der Jahresmittel, mit zunehmender Länge der ZP zu. Die Trends des B1-Szenarios weisen ebenfalls vergleichsweise geringere Größen auf als die ähnlich großen Trends des A1B- und A2-Szenarios.

#### *ZP 2011-2040*

In je etwa 50 % der Zeitreihen des B1-Szenarios treten entweder keine Trends in den Monatsmitteln (vgl. Abbildung 57, oben links) oder negative Trends von -0,7 bis -3 °C im Winter und Frühjahr auf (vgl. Abbildung 57 oben Mitte und rechts). Sowohl die Zeitreihen ohne als auch die mit negativem Trend kommen in Flüssen in Süd-, Nord- und Ostdeutschland vor.

Für das A1B-Szenario zeigen sich in allen Zeitreihen positive Trends von 0,7 bis 3 °C mit Ausnahme der Zeitreihen „Lenggries“ und „Muenchen“ (vgl. Abbildung 57, links Mitte). Die positiven Trends treten im Winter und/oder Sommer (vgl. Abbildung 57, Mitte und Mitte rechts) sowie z. T. in Norddeutschland zusätzlich im Herbst auf (vgl. Abbildung 57, Mitte).

Die WT-Zeitreihen des A2-Szenarios weisen keine Trends in den Zeitreihen der Flüsse in Süddeutschland mit Ausnahme von fünf Zeitreihen am Rhein und Main auf. In allen Zeitreihen der Flüsse in Nord- und Ostdeutschland treten im Juli positive Trends von 1-1,9 °C auf (vgl. Abbildung 57, unten Mitte und rechts).

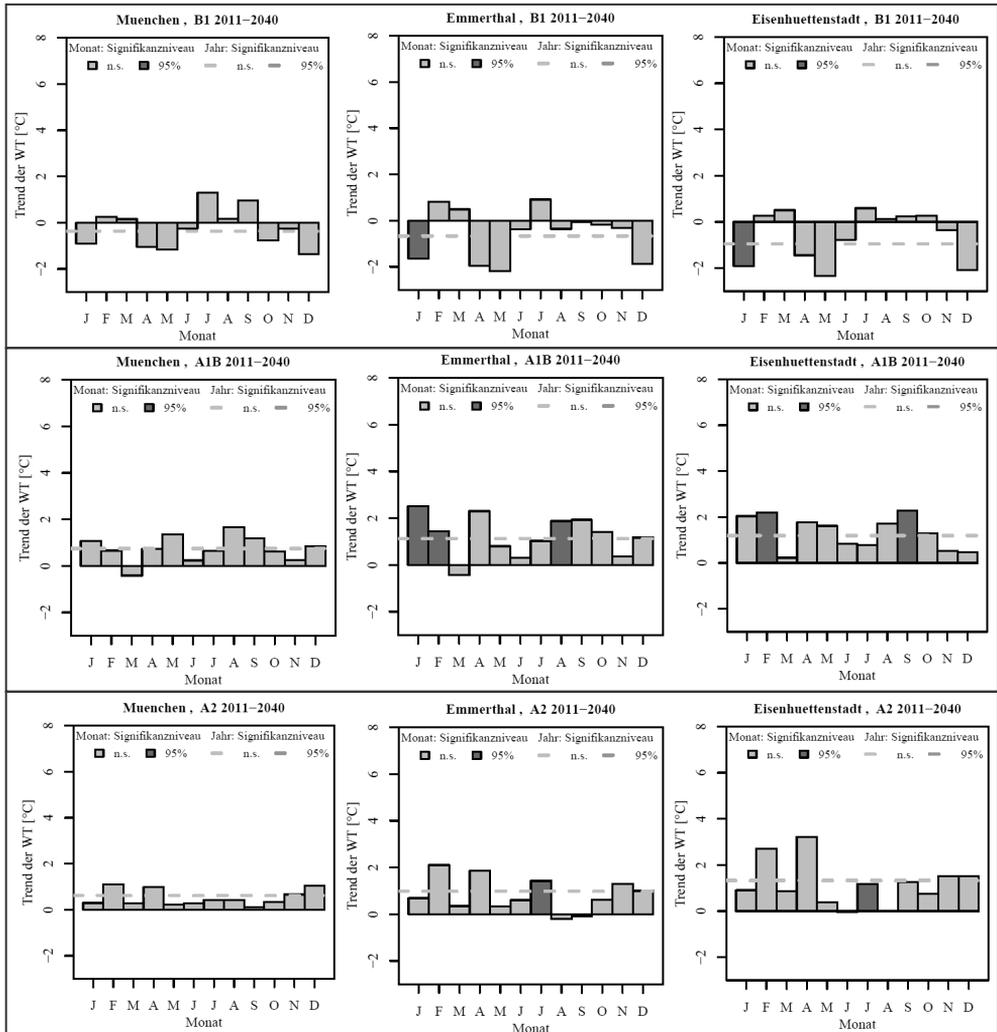


Abbildung 57: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des B1- (oben), A1B- (Mitte) und A2-Szenarios (unten). Beispielhaft an ausgewählten Zeitreihen dargestellt die signifikanten (dunkelgrau) und nicht signifikanten (hellgrau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember sowie die Größe der Trends in °C ( $\alpha = 0,05$ ). Dunkelgraue, horizontal gestrichelte Linie = signifikanter und hellgraue, horizontal gestrichelte Linie = nicht signifikanter Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen ( $\alpha = 0,05$ ).

Für die ZP 2011-2070 tritt in allen Zeitreihen der Monatsmittel der drei Szenarien entweder kein bzw. mehrheitlich ein positiver Trend auf. In den Zeitreihen des B1-Szenarios kommen positive Trends im Sommer bis Herbst vor (vgl. Abbildung 58, oben). Zeitreihen in Norddeutschland weisen z. T. einen zusätzlichen positiven Trend im Winter und/oder Frühjahr auf (vgl. Abbildung 58, oben rechts). In Süddeutschland sind die Trends im Sommer und/oder Herbst und in Nord- und Ostdeutschland im Herbst mit bis zu 2,5 °C am größten (vgl. Abbildung 58, oben).

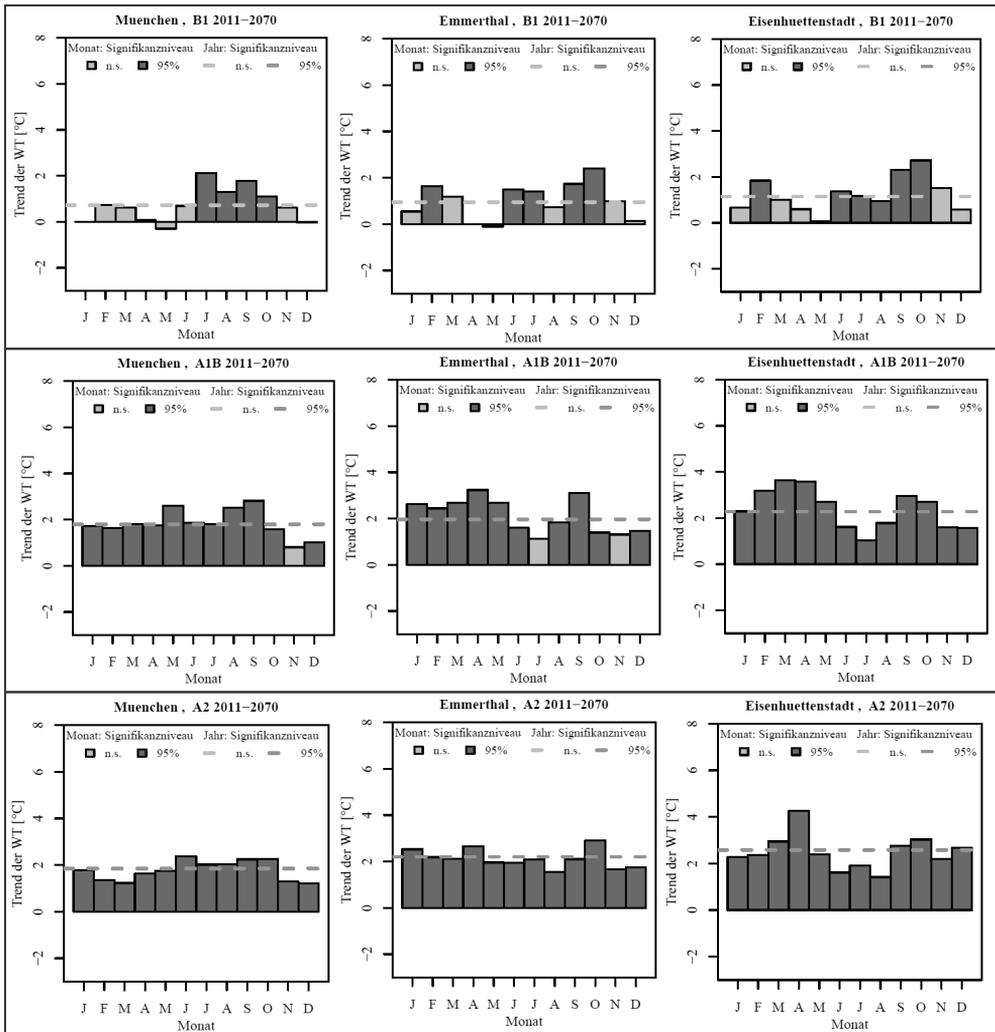


Abbildung 58: Wie Abbildung 57 für die ZP 2011-2070.

Die WT-Zeitreihen des A1B-Szenarios zeigen für die ZP 2011-2070 positive Trends in allen Jahreszeiten auf (vgl. Abbildung 58, Mitte). Die höchsten positiven Trends von 2,5 bis 4 °C treten in Herbst- und Frühjahrmonaten, die niedrigsten in Sommer-, Herbst- oder Wintermonaten mit 0,5 bis 2,3 °C auf.

Das A2-Szenario zeigt für die ZP 2011-2070 in 92 % der Zeitreihen in allen Monaten positive Trends (vgl. Abbildung 58, unten). Die größten Trends kommen in den Flüssen in Süddeutschland im Sommer, Herbst (September, Oktober) und Winter mit 1,8 bis 3,9 °C vor. Die geringsten Trends treten ebenfalls im Herbst (November) mit 1-2 °C vor (vgl. Abbildung 58, unten links). In den Zeitreihen der nördlichen und östlichen Flüsse zeigen sich die höchsten Trends von 2,5-4,5 °C im Winter und in Monaten der Übergangsjahreszeiten sowie die niedrigsten Trends im Sommer und Herbst (November) mit 0,7-1,5 °C.

#### *ZP 2011-2100*

Für die ZP 2011-2100 weisen alle Zeitreihen des B1, A1B- und A2-Szenarios in allen Monaten positive Trends auf mit Ausnahme von Frühjahr- und Wintermonaten im B1-Szenario (vgl. Abbildung 59, oben, Mitte und unten).

Für das B1-Szenario zeigen sich in den Zeitreihen der Flüsse in Süddeutschland die größten Trends von 1,7 °C-3,9 °C im Sommer und Herbst. Die Wintermonate und der November zeigen die geringsten Trends mit 0,9-2 °C. In Nord- und Ostdeutschland kommen die größten Trends von 2,2-3,2 °C im Herbst vor. Die Trends mit der geringsten Größe zwischen 0,7 und 2 °C treten in den Sommermonaten sowie im Winter auf (vgl. Abbildung 59, oben).

Für das A1B-Szenario weisen die Zeitreihen in Süddeutschland die größten Trends in den Sommer-, Herbst und Wintermonaten mit 3,8-5,8 °C auf. Die geringsten Trends von 2,2-3 °C sind ebenfalls in Sommer- und zusätzlich in den Frühjahrmonaten zu erkennen. Die größten Trends in den Zeitreihen der Flüsse in Nord- und Ostdeutschland zeigen sich in den Herbst-, Winter- und Frühjahrmonaten mit 2,5-5 °C. Die geringsten Trends von 1-2,5 °C kommen im Sommer vor (vgl. Abbildung 59, Mitte).

Für das A2-Szenario liegen in den Zeitreihen der Flüsse in Süddeutschland die größten Trends mit 2,2-5,5 °C in den Sommer- und Herbstmonaten und die niedrigsten im Frühjahr mit 1,7-2,5 °C vor (vgl. Abbildung 59, unten links). In den WT-Zeitreihen in Nord- und Ostdeutschland kommen die größten Trends im Herbst, Winter und Frühjahr bis April und mit Ausnahme des Januars vor. Die Trends mit der geringsten Größe von 1-3 °C treten zwischen Frühjahr und Herbst sowie im Januar auf (vgl. Abbildung 59, unten).

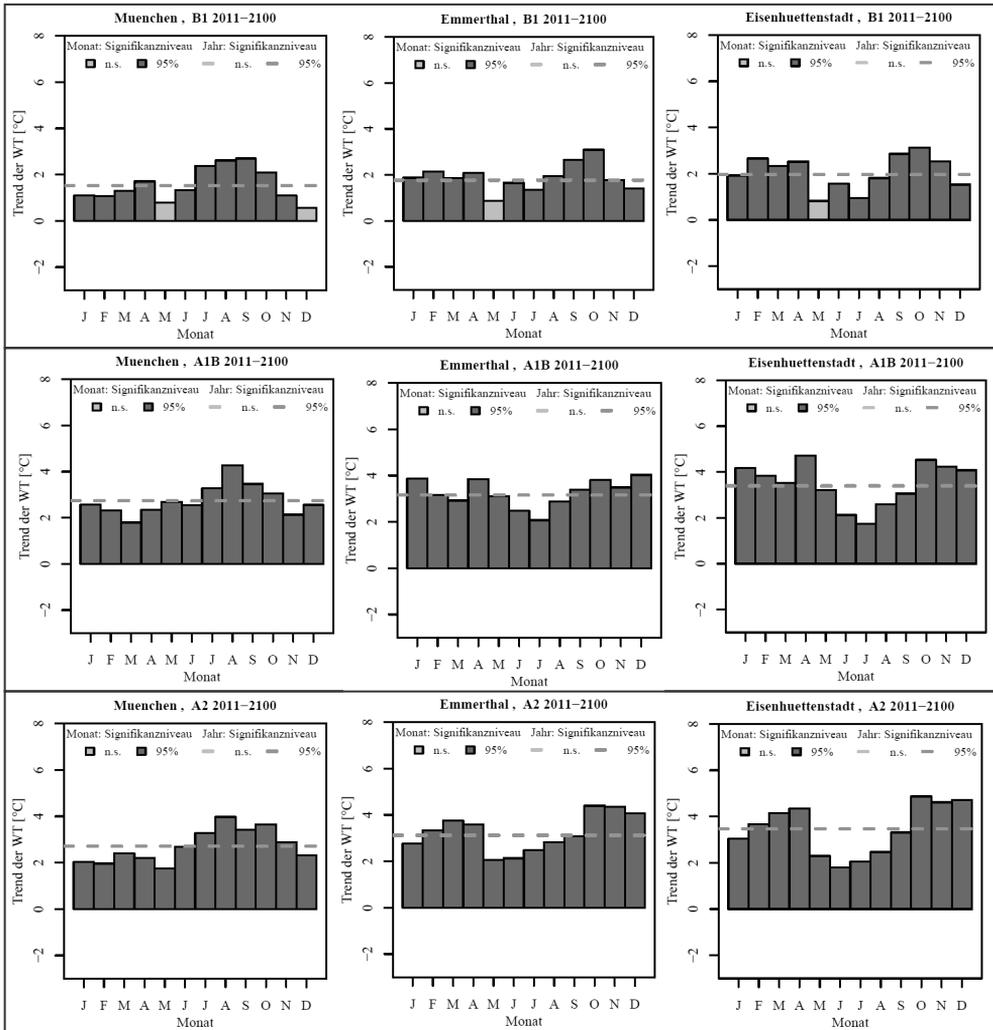


Abbildung 59: Wie Abbildung 57 für die ZP 2011-2100.

### 5.3.2 Vergleich der mittleren Wassertemperaturen der Zukunftsperioden mit denen der Klimanormalperiode

In diesem Abschnitt werden für die 72 simulierten WT-Zeitreihen die Ergebnisse des t-Tests dargestellt, ob sich die jeweils über die ZP 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 sowie über die vergangene KNP 1961-1990 gemittelten Jahres- und Monatsmittel auf dem Signifikanzniveau von 95 % voneinander unterscheiden (vgl. Abschnitt 4.4). Signifikant positive oder negative Unterschiede der Mittelwerte werden im Folgenden als positive bzw. negative Unterschiede oder Differenzen bezeichnet. Dabei bedeutet positiver Unterschied, dass der Mittelwert der ZP signifikant höher als der

der KNP ist. Die Ergebnisse des t-Tests für die Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen der jeweiligen ZP und KNP 2011-2040/1961-1990, 2041-2070/1961-1990 sowie 2071-2100/1961-1990 sind für alle drei Szenarien in den Abbildungen 117 bis 122 im Anhang II zu finden.

### Vergleich der Jahresmittel

Das über die ZP 2011-2040 gemittelte Jahresmittel der drei Szenarien unterscheidet sich bei keiner Zeitreihe signifikant von dem der KNP mit Ausnahme der Zeitreihe „Poppenweiler“ am Neckar für das A1B-Szenario. Dagegen zeigt sich für die ZP 2041-2070 und 2071-2100 der drei Szenarien bei allen WT-Zeitreihen ein positiver Unterschied zur KNP mit Ausnahme der Zeitreihe „Rothenfels“ am Main für die ZP 2041-2070 des B1-Szenarios. Die geringsten positiven Unterschiede der Jahresmittel zeigen sich im Vergleich der Szenarien sowohl für die ZP 2041-2070 als auch 2071-2100 für das B1-Szenario und der KNP mit 0,5 bis 2 °C (vgl. Tabelle 19). Für die WT-Zeitreihen des A1B- und des A2-Szenarios zeigen sich ähnlich große minimale (0,9-1,6 °C) und maximale (1,9-3,2 °C) sowie mittlere positive Unterschiede (1,6-2,7°C) jeweils zwischen den ZP 2041-2070 und 2071-2100 sowie der KNP (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Minimale, maximale und mittlere Differenz zwischen den Jahresmitteln der ZP 2041-2070 und 2071-2100 des B1-, A1B- und A2-Szenarios sowie der KNP 1961-1990 aus dem Ergebnis aller 72 simulierter WT-Zeitreihen.

ZP	Differenz B1-Szenario - KNP in °C			Differenz A1B-Szenario - KNP in °C			Differenz A2-Szenario - KNP in °C		
	min.	max.	mittlere	min.	max.	mittlere	min.	max.	mittlere
<b>2041-2070</b>	0,5	1,2	1	0,9	2	1,6	0,9	1,9	1,6
<b>2071-2100</b>	1	2	1,8	1,6	3,2	2,7	1,5	3	2,6

### Vergleich der Monatsmittel im Sommer

Alle Sommermonate weisen bei allen Zeitreihen für die ZP 2041-2070 und 2071-2100 aller drei Szenarien gegenüber denen der KNP einen positiven Unterschied auf. Ein heterogenes Ergebnis zeigt sich dagegen in Abbildung 60 für die ZP 2011-2040 sowohl in der räumlichen Verteilung der WT-Stationen mit signifikanten Unterschieden der Monatsmittel als auch im Vergleich der drei Szenarien. Allerdings kommt zumindest in einem der Sommermonate bei allen Zeitreihen aller drei Szenarien ein positiver Unterschied der Monatsmittel der ZP 2011-2040 gegenüber denen der KNP vor (vgl. Abbildung 60). Für alle drei Szenarien treten bei den Zeitreihen des Rheins, der Saar, Weser und Oder die meisten positiven Unterschiede der Mittelwerte auf. Die Zeitreihen der Flüsse in Süd- bzw. Südostdeutschland weisen weniger häufig positive Unterschiede der Monatsmittel auf.

Insgesamt nehmen, wie die Größe der Trends (vgl. Abschnitt 5.3.1), die minimalen, maximalen und mittleren signifikant positiven Unterschiede der Monatsmittel aller Zeitreihen von der frühesten ZP 2011-2040 über die mittlere ZP 2041-2070 bis zur spätesten ZP 2071-2100 zu. Im Vergleich der drei Szenarien sind die geringsten positiven Unterschiede der Mittelwerte bei den Zeitreihen des B1-Szenarios für alle drei ZP zu finden. Das A1B- und A2-Szenario weisen für alle drei ZP ähnlich hohe positive Differenzen auf. Die größten positiven Unterschiede der Monatsmittel von 4,6 °C zeigt das A1B-Szenario für den August für die ZP 2071-2100 (vgl. Tabelle 20).

### *Vergleich ZP 2011-2040 mit KNP 1961-1990*

Der Juni weist sowohl für das B1- als auch für das A1B-Szenario bei 29 bzw. 18 % aller Zeitreihen keine signifikanten Unterschiede auf. Dies trifft für Zeitreihen der Radolfzeller Aach, des Rheins und der Saar in Süddeutschland, der Werra und Weser in Norddeutschland sowie der Weiße Elster, Spree und der Oder in Ostdeutschland zu (vgl. Abbildung 60, oben links und Mitte links). Für das A2-Szenario liegt bei allen Zeitreihen ein positiver Unterschied vor (vgl. Abbildung 60, links unten). Die positiven Unterschiede der Mittelwerte liegen je nach Szenario zwischen 0,3 und 1,3 °C, wobei die höchsten Unterschiede in den Mittelwerten des A1B- und A2-Szenarios auftreten (vgl. Tabelle 20).

Für den Juli liegen lediglich bei 19 % aller Zeitreihen (Rhein, Saar, Werra, Weser, Weiße Elster, Oder) für das B1- und bei 3 % aller Zeitreihen (Rhein, Oder) für das A2-Szenario positive Unterschiede der Monatsmittel vor (vgl. Abbildung 60, Mitte oben und unten). Die Zeitreihen des A1B-Szenarios weisen alle einen positiven Unterschied für den Juli zwischen 0,4 und 1,3 °C auf (vgl. Abbildung 60, Mitte und Tabelle 20).

Für den August zeigen sich für das B1-Szenario positive Unterschiede bei 46 % aller WT-Zeitserien. Diese treten bei Zeitserien der Donau, Radolfzeller Aach, des Rheins, Kochers, der Saar, Werra, Weser, Mulde, Elbe und Oder auf (vgl. Abbildung 60, rechts oben). 88 % aller Zeitserien des A1B-Szenarios weisen positive Unterschiede der Augustmittel auf. Keine signifikanten Unterschiede liegen bei Zeitserien der Donau, des Rheins, Neckars und der Elbe vor (vgl. Abbildung 60, rechts Mitte). Für das A2-Szenario kommen im August die wenigsten positiven Unterschiede der Monatsmittel bei 29 % aller Zeitserien vor. Bei Zeitserien des Rheins, Mains, der Saar, Weser, Weiße Elster, Spree, Elbe und Oder liegen positive Unterschiede der Monatsmittel vor (vgl. Abbildung 60, rechts unten). Die Differenzen der Mittelwerte betragen je nach Zeitreihe und Szenario zwischen 0,4 und 1,2 °C. Die größten Unterschiede weisen die Mittelwerte der Zeitserien für das A1B-Szenario auf (vgl. Tabelle 20).

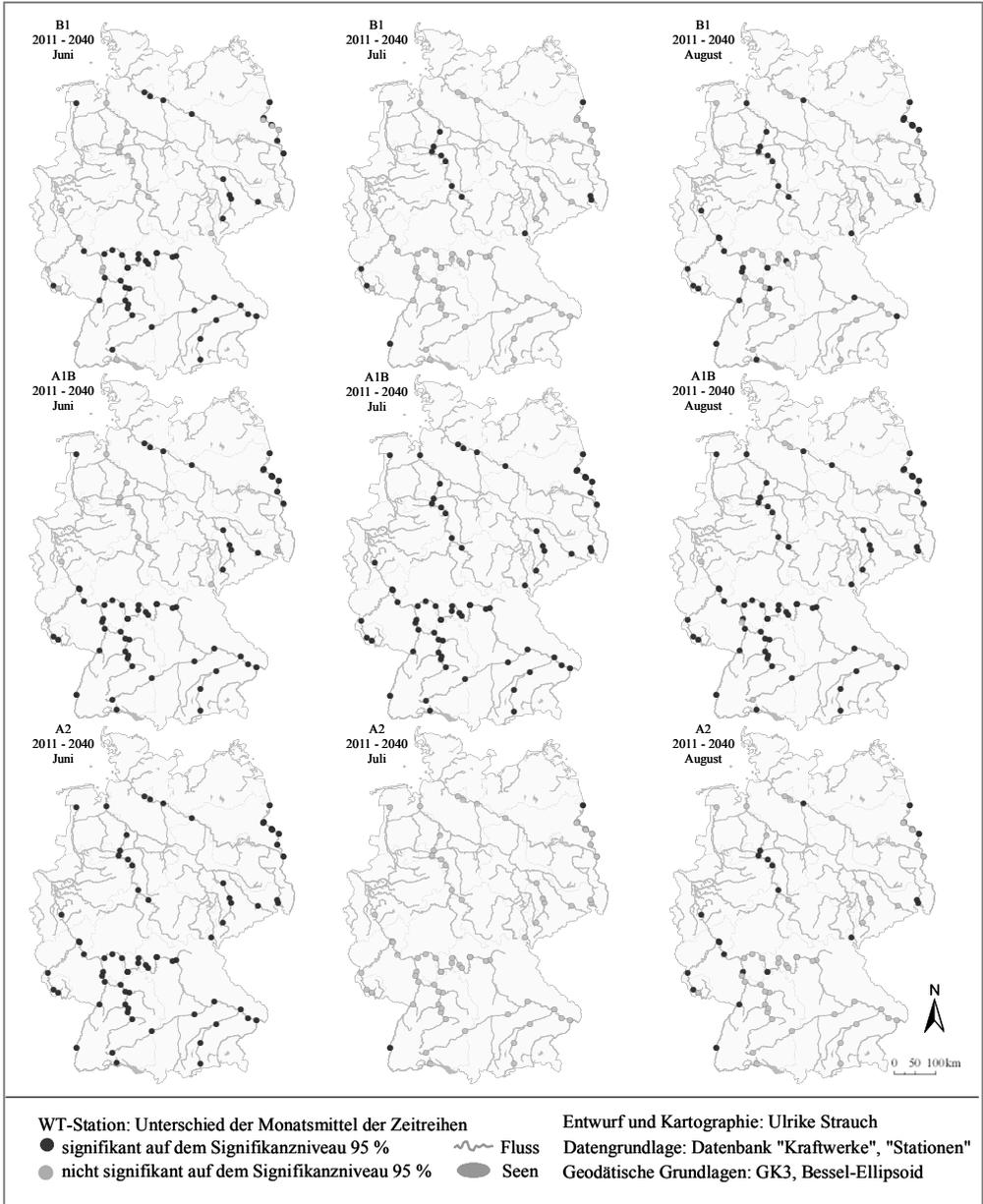


Abbildung 60: Übersicht über signifikant positive (dunkelgrau) und nicht signifikante (hellgrau) Unterschiede ( $\alpha = 0,05$ ) zwischen den jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario (von oben nach unten) über die ZP 2011-2040 gemittelten und über die KNP 1961-1990 gemittelten Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die Sommermonate Juni, Juli und August (von links nach rechts).

Tabelle 20: Minimale, maximale und mittlere Differenz zwischen den Monatsmitteln der ZP 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 des B1-, A1B- und A2-Szenarios sowie der KNP 1961-1990 für die Sommermonate Juni, Juli und August der 72 simulierten WT-Zeitreihen. Diff. = Differenz.

2011-2040				2041-2070				2071-2100			
B1	Jun	Jul	Aug	B1	Jun	Jul	Aug	B1	Jun	Jul	Aug
min. Diff.	0,3	0,1	0,4	min. Diff.	0,6	0,4	0,7	min. Diff.	0,9	0,6	1,1
max. Diff.	1,2	0,8	1,0	max. Diff.	1,8	1,3	1,6	max. Diff.	2,3	2,1	3,2
mittlere Diff.	0,7	0,4	0,7	mittlere Diff.	1,3	1,0	1,2	mittlere Diff.	1,7	1,4	2,3

A1B	Jun	Jul	Aug	A1B	Jun	Jul	Aug	A1B	Jun	Jul	Aug
min. Diff.	0,5	0,4	0,4	min. Diff.	0,9	0,5	0,9	min. Diff.	1,3	0,9	1,4
max. Diff.	1,2	1,3	1,2	max. Diff.	2,3	1,9	2,6	max. Diff.	3,6	3,4	4,6
mittlere Diff.	0,8	0,9	0,8	Mittlere Diff.	1,7	1,3	1,8	mittlere Diff.	2,6	2,3	3,1

A2	Jun	Jul	Aug	A2	Jun	Jul	Aug	A2	Jun	Jul	Aug
min. Diff.	0,5	0,2	0,4	min. Diff.	1,0	0,6	0,8	min. Diff.	1,3	1,0	1,3
max. Diff.	1,3	0,8	0,9	max. Diff.	2,6	2,1	2,2	max. Diff.	3,5	3,4	4,2
mittlere Diff.	0,9	0,4	0,6	mittlere Diff.	2,0	1,5	1,6	mittlere Diff.	2,5	2,3	2,9

*Vergleich ZP 2041-2070 und 2071-2100 mit KNP 1961-1990*

Im Vergleich der Monate zeigt der Juli für alle drei Szenarien und für beide ZP die geringsten positiven Differenzen. Im Durchschnitt aller Zeitreihen liegen die Monatsmittel im Juli zukünftig um zwischen einem und 2,3 °C höher als in der KNP. Die Unterschiede der Monatsmittel im Juni liegen mit durchschnittlich 1,3-2 °C je nach Szenario für die ZP 2041-2070 etwas höher als die positiven Differenzen im August mit durchschnittlich 1,2-1,8 °C. Für die letzte ZP weist der August mit im Mittel 2,3-3,1 °C gegenüber dem Juni mit im Mittel 1,7-2,6 °C höhere positive Unterschiede der Monatsmittel der WT auf (vgl. Tabelle 20).

5.4 Synthese

Mit dieser Synthese werden erstens Flüsse identifiziert, die bereits steigende WT in den Sommermonaten Juni, Juli und August aufweisen und an denen zugleich KTKW stehen, an denen zwischen 1976 und 2007 mindestens einmal eine WT-LE auftrat. Zweitens wird eine erste Abschätzung gegeben, welche bestehenden KTKW mit WT-LE und welche geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW an welchen Flüssen zukünftig durch steigende WT beeinflusst werden könnten.

Bestehende konventionelle thermische Kraftwerke mit und ohne wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen

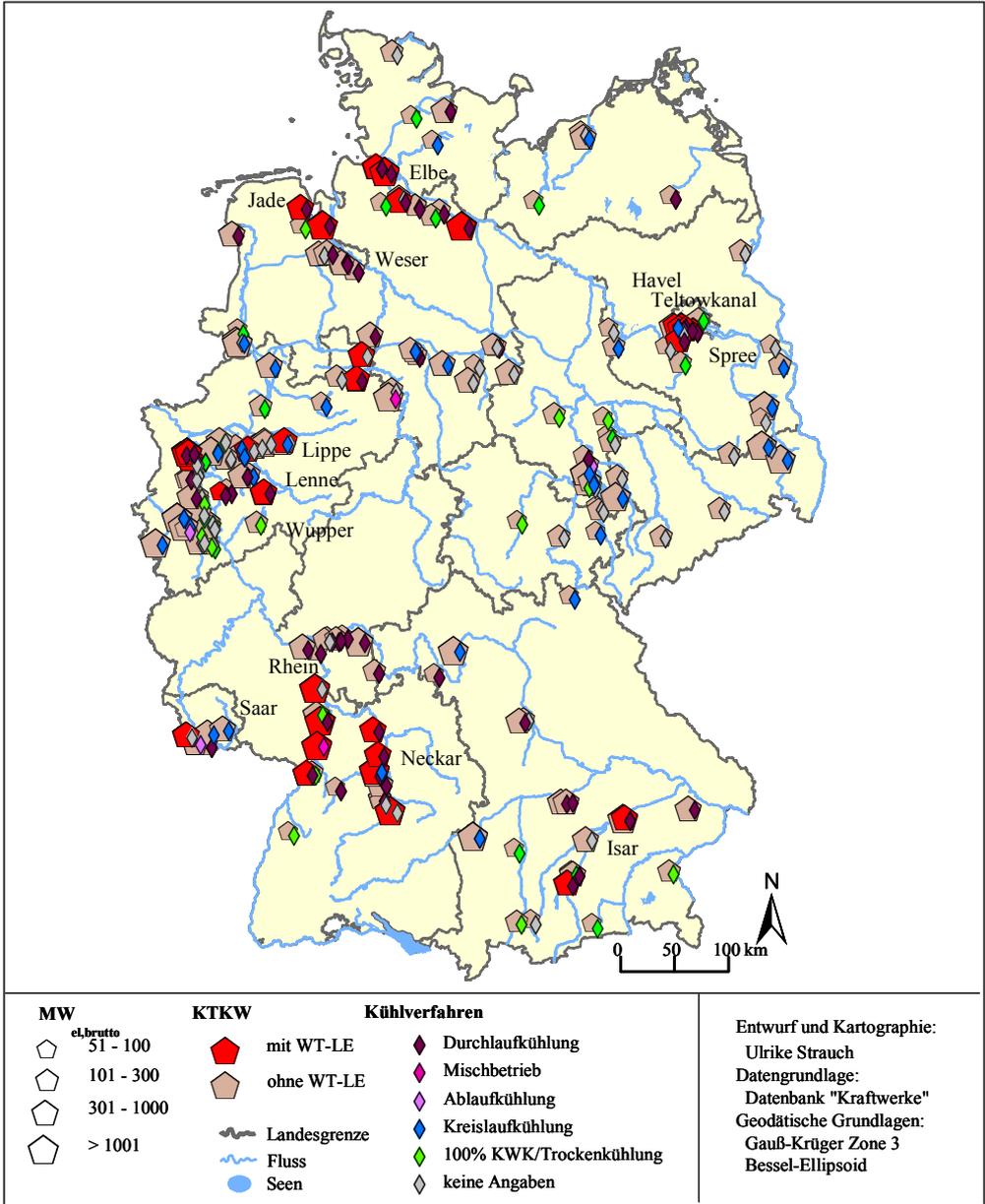


Abbildung 61: Räumliche Verteilung der bestehenden KTKW mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 sowie der bestehenden KTKW ohne identifizierter WT-LE mit dem jeweils angewandten Kühlverfahren sowie eingeteilt in die Klassen nach elektrischer Bruttoleistung. Sofern an einem Standort mehrere Kühlverfahren und dabei u. a. die Durchlaufkühlung zum Einsatz kommen, ist die Durchlaufkühlung angezeigt.

In Abbildung 61 wird deutlich, dass die meisten KTKW (Fünfeck), für die zwischen 1976 und 2007 eine WT-LE identifiziert wurde, entlang des Rheins, des Neckars, der Weser und der Elbe stehen. An fast allen der KTKW mit WT-LE kommt entweder nur das Durchlaufkühlverfahren oder dieses in Kombination mit einem weiteren Kühlverfahren zum Einsatz (dunkellila Raute). Zudem weisen fast alle KTKW mit WT-LE eine Leistung  $\geq 301 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  auf (vgl. Abschnitt 5.1). Die KTKW  $\geq 301 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  mit Durchlaufkühlung an der Donau, am Main oder der Ems weisen jedoch keine WT-LE auf.

#### Konventionelle thermische Kraftwerke mit wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen und rezente Wassertemperaturzeitreihen mit positivem Trend

In Abbildung 62 sind zum einen jeweils die KTKW-Standorte abgebildet, an denen in der Vergangenheit eine WT-LE auftrat (vgl. Abschnitt 5.1). Zum anderen sind für die sechs rezenten Zeitintervalle jeweils die WT-Stationen dargestellt, deren analysierte WT-Zeitreihen in den Sommermonaten Juni, Juli oder August mindestens einen positiven Trend aufweisen (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Die WT-Zeitreihen der Isar, des Rheins, Neckars, der Saar, Weser und Elbe weisen einen positiven Trend im Sommer auf. Zugleich liegen an diesen Flüssen KTKW-Standorte mit WT-LE. Dagegen tritt zwar in den analysierten Zeitreihen der Donau, des Mains, der Mulde, Spree und Oder zumindest für ein Zeitintervall ein positiver Trend im Sommer auf, doch stehen an diesen Flüssen keine KTKW mit WT-LE. Am Niederrhein, an der Wupper, Lippe, Lenne, Jade, Havel, Spree und am Teltowkanal liegen zwar KTKW mit WT-LE, doch existieren dort keine Zeitreihen, um Aussagen über die Entwicklung der WT treffen zu können. An der Ems liegt ein KTKW mit Durchlaufkühlung, doch wurden weder eine WT-LE noch ein positiver Trend in der einzigen WT-Zeitreihe der Ems identifiziert (vgl. Abbildung 62).

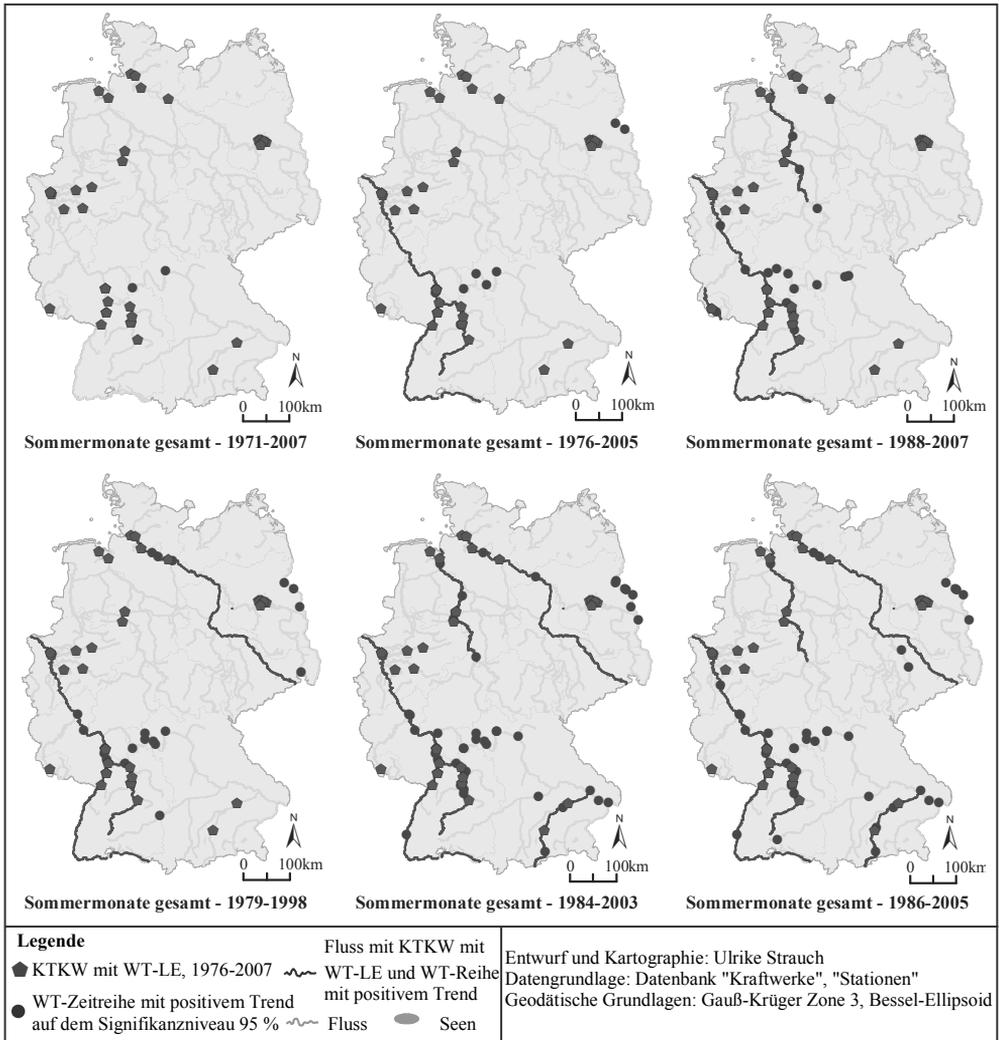


Abbildung 62: Räumliche Verteilung der bestehenden KTKW mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 sowie der WT-Stationen mit mindestens einem signifikant positivem Trend in den Monatsmitteln der entsprechenden rezenten WT-Zeitreihe in den Sommermonaten Juni, Juli oder August jeweils für die sechs Zeitintervalle 1971-2007, 1976-2005, 1979-1998, 1984-2003, 1986-2005 und 1988-2007 ( $\alpha = 0,05$ ).

Bestehende konventionelle thermische Kraftwerke mit wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen und geplante bzw. im Bau befindliche Kraftwerke

In Abbildung 63 sind die bestehenden KTKW mit WT-LE zwischen 1976 und 2007 sowie die geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW (geplante KTKW) jeweils mit den angewandten bzw. geplanten Kühlverfahren abgebildet. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei den bestehenden KTKW, für die in der Vergangenheit keine WT-LE identifiziert wurde auch zukünftig keine WT-LE auftreten wird. Die Karte zeigt, dass die meisten der geplanten KTKW (grün) ebenfalls entlang von Flüssen liegen sollen (Donau, Rhein, Main, Saar, Mittellandkanal, Weser-Datteln-Kanal, Dortmund-Ems-Kanal, Rhein-Herne-Kanal, Küstenkanal, Fulda, Ems, Elbe, Oker, Grünebach bzw. Saale, Oder-Spree-Kanal, Teltowkanal und Spree). Zu den meisten der geplanten KTKW liegen zwar keine Informationen über das Kühlsystem oder -verfahren vor (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die KTKW, zu denen Informationen vorliegen, sollen jedoch mit Kreislauf- (blaue Raute) oder Trockenkühlung (grüne Raute) betrieben werden (vgl. Abbildung 63).

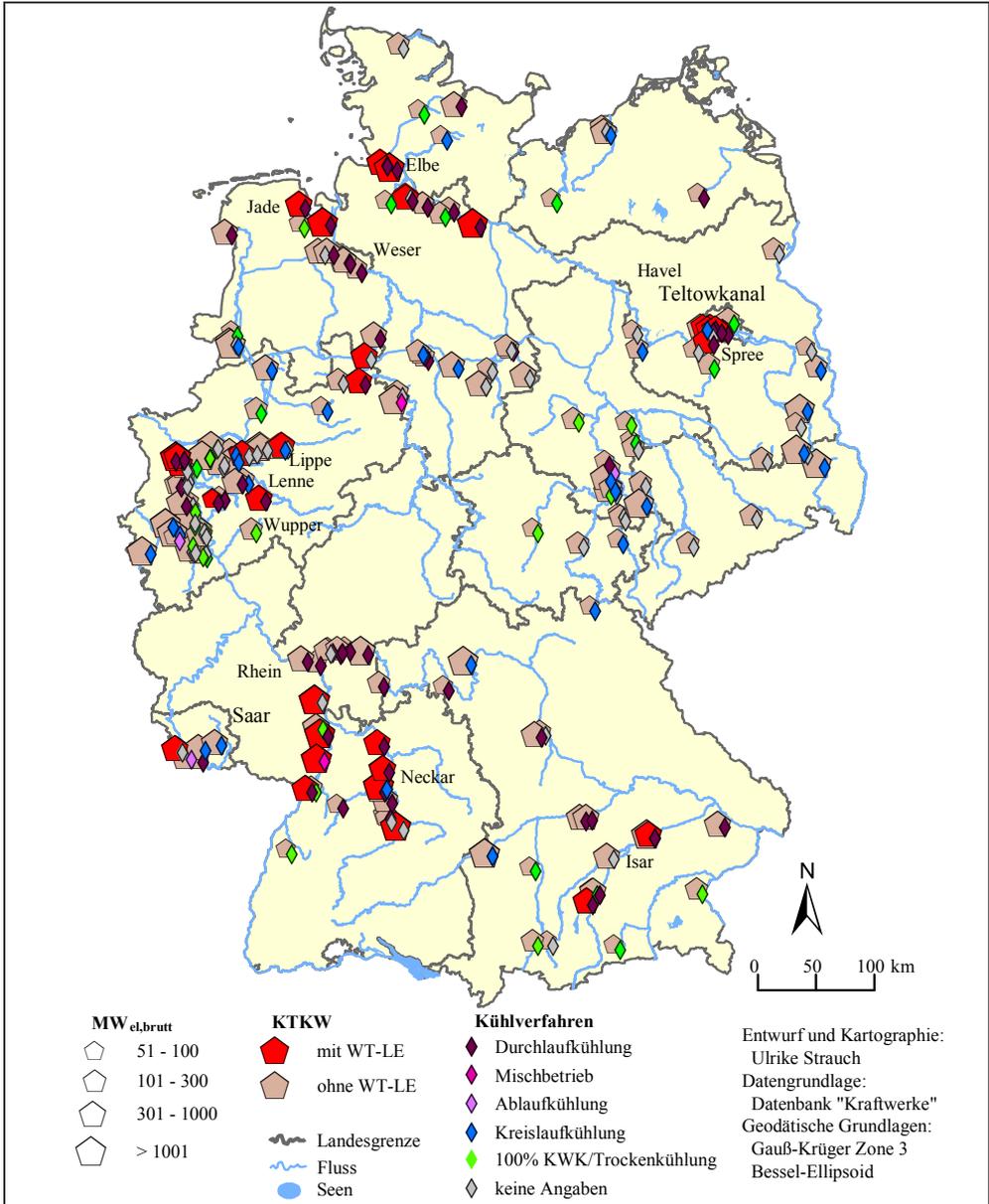


Abbildung 63: Räumliche Verteilung der bestehenden KTKW mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 (rot) sowie der geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW (grün) mit dem jeweils angewandten Kühlverfahren (Raute) sowie eingeteilt in die Klassen nach elektrischer Bruttoleistung. Sofern an einem Standort mehrere Kühlverfahren und dabei u. a. die Durchlaufkühlung zum Einsatz kommen, ist die Durchlaufkühlung angezeigt.

### Konventionelle thermische Kraftwerke mit wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen, geplante Kraftwerke und zukünftige Wassertemperaturzeitreihen mit positivem Trend

In Abbildung 64 sind zum einen die bestehenden KTKW mit WT-LE zwischen 1976 und 2007 sowie die geplanten KTKW dargestellt. Zum anderen sind die WT-Stationen abgebildet, deren simulierte WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 in den Sommermonaten Juni, Juli oder August mindestens einen signifikanten Trend in den Monatsmitteln für das B1-, A1B- und A2-Szenario aufzeigen (vgl. Abschnitt 5.3.1). Die Trendergebnisse für die ZP 2011-2040 zeigen räumliche Unterschiede in den Signifikanzen der Trends in den WT-Zeitreihen der drei Szenarien auf. Dagegen treten in allen WT-Zeitreihen in mindestens einem, meist in allen Sommermonaten für die ZP 2011-2070 und 2011-2100 aller drei Szenarien positive Trends auf, so dass sich keine räumlichen Unterschiede ergeben (vgl. Abschnitt 5.3.1). Zudem wird in der Praxis bei KTKW mit Laufzeiten von 40-50 Jahren gerechnet (DENA 2008, S. 3). D. h. jetzt geplante bzw. im Bau befindliche Kraftwerke werden etwa bis 2040-2060 betrieben werden. Daher fokussiert die Ergebnisbeschreibung auf die ZP 2011-2040.

Für das B1-Szenario liegen in insgesamt fünf Zeitreihen an der Oder, der Radolfzeller Aach sowie an der Donau positive Trends im Sommer vor. An der Donau befindet sich ein KTKW in Planung. Es liegt allerdings flussaufwärts von der WT-Station mit einem positiven Trend in der Zeitreihe.

Für das A1B-Szenario treten in WT-Zeitreihen der Donau, des Rheins, Neckars, Mains, der Saar, Ems, Weser, Weiße Elster und der Elbe positive Trends im Sommer auf. Mit Ausnahme der Weißen Elster liegen an diesen Flüssen entweder bestehende KTKW mit WT-LE oder sind KTKW geplant.

Für das A2-Szenario treten positive im Sommer in den WT-Zeitreihen der Flüsse am Main, Niederrhein, Ems, Werra, Weser, Elbe und Oder auf. An diesen Flüssen stehen entweder KTKW mit WT-LE und/oder sind KTKW geplant mit Ausnahme der Werra und Oder.

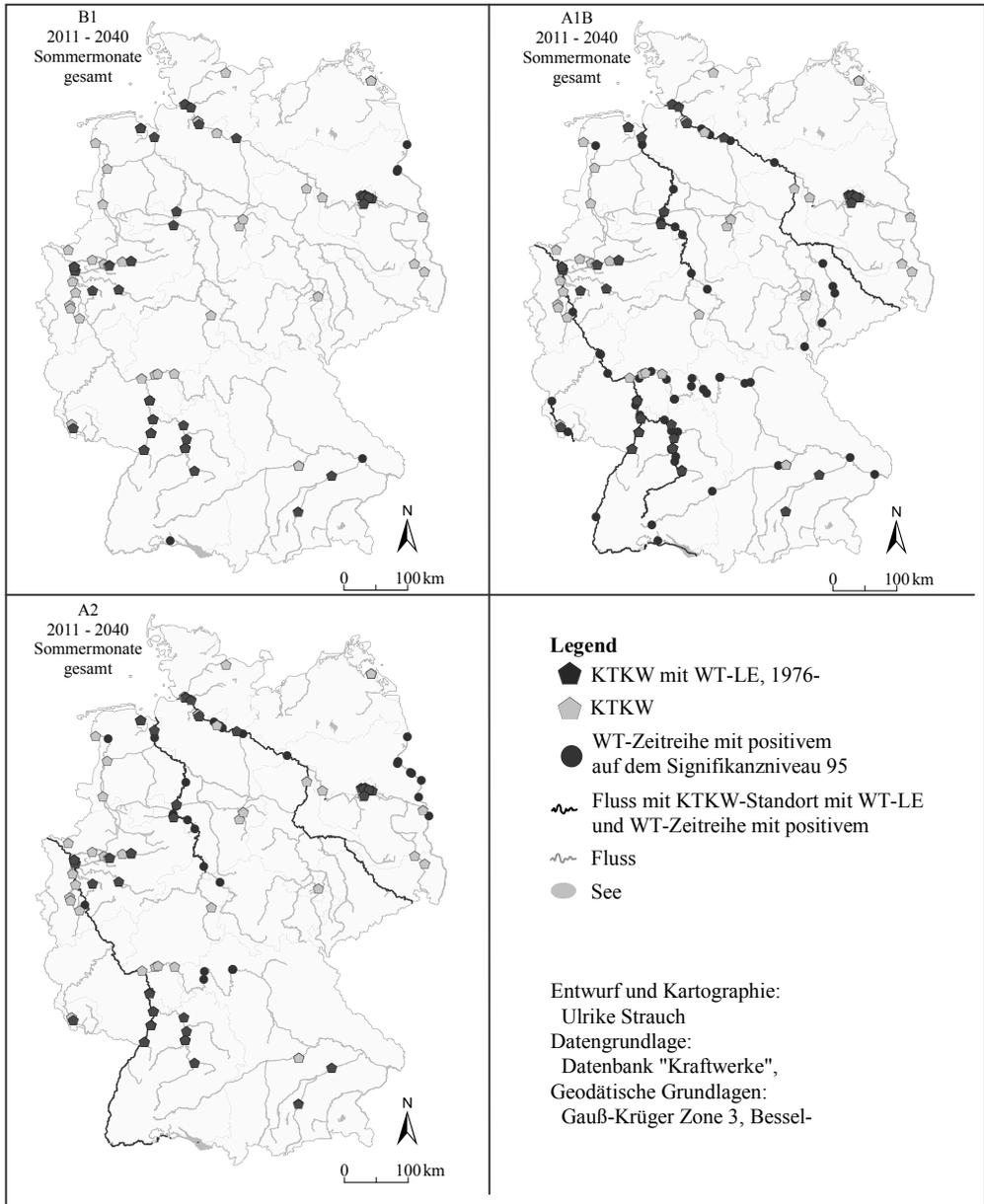


Abbildung 64: Räumliche Verteilung der KTKW mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 (dunkelgraues Rechteck) und der geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW (hellgraues Rechteck) sowie der WT-Stationen mit mindestens einem positivem Trend (dunkelgrauer Kreis) in den Monatsmitteln der simulierten WT-Zeitreihen in den Sommermonaten Juni, Juli oder August jeweils für die ZP 2011-2040 des B1-, A1B- und A2-Szenarios ( $\alpha = 0,05$ ).

Zusammenfassend treten an den Flüssen Rhein, Neckar, Saar, Weser und Elbe, an denen KTKW mit WT-LE zwischen 1976 und 2007 liegen, sowohl in den rezenten als auch in den zukünftigen WT des A1B-Szenarios sowie z. T. des A2-Szenarios für die ZP 2011-2040 positive Trends in mindestens einem der Sommermonate auf. In den WT-Zeitreihen der Isar mit zwei KTKW mit WT-LE zwischen 1976 und 2007 liegen zwar rezent positive Trends im Sommer vor, nicht jedoch für die ZP 2011-2040 der drei Szenarien. In den simulierten WT-Zeitreihen der Donau, des Mains und der Ems treten für die ZP 2011-2040 des A1B- oder des A2-Szenarios positive Trends im Sommer auf. An diesen Flüssen sind gleichzeitig neue KTKW in Planung. Dies ist ebenso an den Flüssen Fulda, Mittellandkanal, Weser-Datteln-Kanal, Dortmund-Ems-Kanal, Rhein-Herne-Kanal, Küstenkanal, Oker, Grünebach bzw. Saale, Oder-Spree-Kanal, Teltowkanal und Spree der Fall. Allerdings liegen weder Informationen über Kühlsystem und -verfahren der meisten der geplanten KTKW noch simulierten WT-Zeitreihen in Standortnähe dieser KTKW vor. Letzteres gilt ebenso für die Flüsse, an denen KTKW mit WT-LE zwischen 1976 und 2007 liegen: Niederrhein, die Wupper, Lippe, Lenne, Jade in Norddeutschland sowie der Spree, Havel und am Teltowkanal in Ostdeutschland.

## 6 DISKUSSION

Ziel der Arbeit war es erstens, KTKW-Standorte zu identifizieren, die in der Vergangenheit WT-LE verzeichneten. Zweitens war das Ziel zu untersuchen, wie sich die WT deutscher Flüsse bisher entwickelt haben und wie sie sich in Zukunft im Kontext des Klimawandels entwickeln könnten. Ziel der Synthese der Analysen war, sowohl Flüsse mit KTKW-Standorten mit WT-LE und steigenden, rezenten WT als auch Flüsse mit geplanten KTKW-Standorten und zukünftigen, steigenden WT zu identifizieren. Wie die Ergebnisse im Zusammenhang mit der verwendeten Datengrundlage und Methodik zu bewerten sind, wird im Folgenden beschrieben.

### 6.1 Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke

Die Analyse der WT-LE bei KTKW in Deutschland basiert auf Grundlage der Datenbank „Kraftwerke“ sowie auf der Literaturrecherche, Medienanalyse und schriftlichen Befragung (vgl. Abschnitt 4.1).

#### Datenbank „Kraftwerke“

Die Informationen zu den einzelnen Blöcken der insgesamt 256 bestehenden und geplanten KTKW des GKP wurden für jeden Standort zusammengefasst, mit Ausnahme der Kernkraftwerke. Einzelne Blöcke an einem KTKW-Standort können mit unterschiedlicher Leistung, unterschiedlichem Energieträger und Kühlverfahren betrieben werden, sowie in unterschiedlichen Jahren in Betrieb genommen worden sein. Dadurch kann es bei der Anzahl der KTKW des GKP in den einzelnen Klassen der Gruppen „Leistung“, „Energieträger“, „Betriebsbeginn“ und „Kühlverfahren“ im Vergleich zum Kraftwerksbestand in Deutschland zu Unterschieden kommen.

Die Bruttostromerzeugungskapazität der Energieträger des GKP weicht jedoch lediglich bis zu maximal 10 % von den Angaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Kern-, Stein-, Braunkohle- und Gaskraftwerke ab. Dabei decken die KTKW des GKP 95 %

der Bruttostromkapazität der KTKW in Deutschland ab, wodurch die Abweichungen im Verhältnis geringer werden (vgl. Tabelle 21 im Anhang I) (BMWI 2010, S. 1). Bezüglich der Kraftwerksleistung ist zu beachten, dass die meisten der KTKW des GKP Gas- oder Steinkohlekraftwerke sind (vgl. Abbildung 15). Gemessen an der Bruttostromerzeugungskapazität aller KTKW in Deutschland nehmen jedoch die Stein- und Braunkohlekraftwerke mit 29 % bzw. 23 % den größten Anteil ein, gefolgt von den Kern- und Gaskraftwerken mit je 21 % (BMWI 2010, S. ).

Die Altersstruktur der KTKW des GKP stimmt ebenfalls gut mit der Alterstruktur des Kraftwerksbestandes in Deutschland überein, bei dem ca. 50 % der KTKW älter als 25 Jahre sind (WAGNER & BRÜCKL zitiert in MILLES 2004, S. 5). Dies trifft ebenso für den GKP der Datenbank „Kraftwerke“ zu (vgl. Abschnitt 4.1.1, Abbildung 16).

Um Informationen zum Kühlsystem und -verfahren zu erlangen, erwiesen sich die Satellitenbilder des Programms Google Earth® als geeignet, installierte Kühlturmtypen an KTKW-Standorten zu identifizieren (vgl. Abschnitt 4.1.1). Bei den KTKW  $> 300 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  mit installiertem Naturzugkühlturm oder Nasszellenkühlern konnte somit auf eine Nasskühlung bzw. ohne Kühlturm auf eine Durchlaufkühlung rückgeschlossen werden (vgl. Abschnitt 2.1.1.3). Doch lassen die Satellitenbilder bei einem KTKW mit einer Leistung  $> 300 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  und Kühlturm oder mit einer Leistung  $< 300 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  ohne Kühlturm nicht auf das Kühlverfahren schließen. Ebenso kann nicht eindeutig festgestellt werden, ob alle Blöcke eines KTKW-Standortes mit dem gleichen Kühlverfahren betrieben werden. Dies erklärt den hohen Anteil an KTKW des GKP, für die keine Angaben zum Kühlverfahren vorliegen (vgl. Abschnitt 4.1.1, Abbildung 16). Dennoch erwies sich die Methode als geeignet, um bei der Mehrzahl der KTKW das verwendete Kühlverfahren zu ermitteln. Der große Anteil der KTKW mit Durchlaufkühlung liegt darin begründet, dass eine Durchlaufkühlung die geringsten Investitionen und Betriebskosten verursacht. Zudem wird mittels der Durchlaufkühlung die ungenutzte Wärmeenergie am effizientesten abgeführt (vgl. Abschnitt 2.1.1.3). Aus der Datenbank „Kraftwerke“ geht hervor, dass insbesondere in den 1970er Jahren, aber auch noch in den 1980er, 1990er und 2000er Jahren KTKW mit Durchlaufkühlung gebaut wurden.

Zusammenfassend kann bei der Datenbank „Kraftwerke“ davon ausgegangen werden, dass sie alle bestehenden KTKW mit einer Leistung  $\geq 50 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  in Deutschland enthält (vgl. Abbildung 17). Die Bruttostromerzeugungskapazität der einzelnen Energieträger sowie die Altersstruktur der KTKW stimmen mit denen des Kraftwerkspark in Deutschland gut überein. Bezüglich der Angaben zu Kühlsystemen und -verfahren kann allerdings kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Dennoch zeichnet sich die Datenbank „Kraftwerke“ dadurch aus, dass erstmalig umfassende Informationen zu den installierten Kühlsystemen und angewandten Kühlverfahren für KTKW in Deutschland vorliegen und bezüglich der WT-LE ausgewertet werden können. Insgesamt eignet sich die Datenbank „Kraftwerke“ somit erstens als Datengrundlage für die schriftliche Befragung bei den Kraftwerksbetreibern und zweitens liefert sie eine geeignete Grundlage, um die Ergebnisse der Untersuchungen zu WT-LE bei KTKW bezüglich der Kraftwerksleistung, dem Energieträger, Kraftwerksalter sowie Kühlsystem bzw. -verfahren auswerten zu können.

### Literaturrecherche

Mithilfe der Literaturrecherche wurden insgesamt 23 WT-LE bei zehn KTKW an insgesamt fünf Flüssen in acht Jahren auf Grundlage der Jahresberichte des Deutschen Atomforums und des atw identifiziert (vgl. Abschnitte 4.1.2 und 5.1, Tabelle 17). Diese Informationen liegen erstens erst ab 1997 vor, zweitens nur für Kernkraftwerke und drittens nur für WT-LE, die mindestens 24 h andauern

oder  $\geq 10\%$  der Kraftwerksleistung betragen. Da die Kernkraftwerksbetreiber zur Meldung von Leistungseinschränkungen verpflichtet sind, kann von der Richtigkeit der Angaben ausgegangen werden. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die Angaben zu WT-LE mit einer Dauer länger als 24 h und mit einer Höhe  $\geq 10\%$  der Kraftwerksleistung vollständig vorliegen. Zudem konnten geringere WT-LE  $< 10\%$  der Kraftwerksleistung aus den Graphiken in den Jahresberichten abgelesen werden (vgl. Abschnitt 4.1.2).

### Medienanalyse

Die Auswertung von 93 Artikeln im Rahmen der Medienanalyse ergab in sieben Jahren zwischen 1976 und 2007 insgesamt 42 WT-LE bei 30 KTKW an neun Flüssen (vgl. Abschnitt 4.1.3 und 5.1). Es kann allerdings kein Anspruch auf eine vollständige Erfassung aller jemals vorgekommenen WT-LE bei KTKW durch die Medienanalyse erhoben werden. Denn die Berichterstattung über WT-LE bei KTKW hängt davon ab, ob ein Medieninteresse vorhanden ist, oder ob anderen regionalen, nationalen oder internationalen Ereignissen je nach Jahr und Zeitraum eine höhere Bedeutung beigemessen wird (vgl. Abschnitt 4.1.3). Dies kann regional variieren. Zudem richtet sich der Umfang der Berichterstattung danach, ob Journalisten bei allen Kraftwerksbetreibern und Behörden in der Region, aber auch überregional nach möglichen WT-LE nachfragen und darüber berichten. Schließlich hängt der Umfang der Berichterstattung von der Bereitschaft der Kraftwerksbetreiber ab, auch über WT-LE Auskunft zu geben, die nicht meldepflichtig sind. Da Leistungseinschränkungen seitens der Betreiber als wettbewerbsrelevante Informationen gelten (vgl. Abschnitt 4.1), erteilen sie, wenn überhaupt, relativ allgemeine Auskunft zu WT-LE (z. B. keine stundengenauen Angaben, Zeiträume anstelle bestimmter Tage, vgl. Tabelle 18). Die Ergebnisse in Tabelle 18 zeigen jedoch, dass sich die Medienanalyse als eine geeignete Methode darstellt, um erstens weiter zurückliegende WT-LE bei KTKW bis in die 1970er Jahre identifizieren zu können, und um zweitens nicht nur WT-LE bei Kernkraftwerken, sondern ebenso WT-LE bei KTKW mit anderen Energieträgern zu identifizieren.

### Schriftliche Befragung

Die Rücklaufquote von 34,5 % ist für eine schriftliche Befragung als zufriedenstellend anzusehen. Allerdings können die durch die schriftliche Befragung identifizierten WT-LE bei KTKW nicht als repräsentativ für den GKP gelten. Grund hierfür ist erstens, dass die meisten Antworten von den Betreibern kleinerer KTKW mit einer Leistung  $< 100 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  kamen (vgl. Abschnitt 4.1.4). Diese können aufgrund der geringeren abzuführenden Wärmeenergie mit direkter oder Trockenkühlung betrieben werden. Somit werden sie nicht durch hohe Flusstemperaturen beeinflusst und haben nicht über wettbewerbsrelevante Informationen wie WT-LE zu berichten. Ist dennoch eine Nasskühlung installiert, ist der Kühlwasserbedarf kleinerer KTKW geringer als bei größeren KTKW. Im Falle der Kühlwasserrückleitung wird somit weniger Abwärme in den Vorfluter eingeleitet, wodurch die maximal erlaubte Mischtemperatur weniger schnell als bei großen KTKW mit hoher Wärmeabgabe erreicht wird (vgl. Abschnitt 2.1.1.3 und 2.1.2.2). Zweitens erteilte ein Teil der an der Befragung teilnehmenden Kraftwerksbetreiber keine Angaben zu WT-LE mit der Begründung, dass diese Angaben vertraulich seien. Drittens ist zu beachten, dass die Person, die den Fragebogen bearbeitete, nicht unbedingt alle jemals am Kraftwerk aufgetretenen WT-LE persönlich miterlebte bzw. nicht alle Informationen zu WT-LE zur Verfügung hatte.

Dennoch wurden die Ziele der schriftlichen Befragung erreicht, erstens die Medienanalyse und die Literaturrecherche um weitere Informationen zu WT-LE bei KTKW zu ergänzen. Zweitens wurde die Datenbank „Kraftwerke“ um Informationen zum Kühlsystem und -verfahren einzelner KTKW

erweitert. Drittens übermittelten zehn Kraftwerksbetreiber am Standort gemessene WT-Zeitreihen. Von letzteren erfüllten zwei Zeitreihen die Kriterien für die WT-Analyse und wurden in diese einbezogen (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Zusammenfassend ergab jede der drei Analysen einen Mehrwert bezüglich der Anzahl identifizierte WT-LE. Einschränkend kann jedoch nicht von einer vollständigen Erfassung aller jemals in Deutschland aufgetretenen WT-LE bei KTKW ausgegangen werden. Teils wurden zwar durch alle drei Analysen dieselben KTKW mit WT-LE in einem Jahr identifiziert (z. B. 2003). Andernteils wurden jedoch WT-LE bei KTKW in einem Jahr nur durch eine der Analysen WT-LE (z. B. Literaturrecherche: 2002, Medienanalyse: 1976, schriftliche Befragung: 1991) identifiziert (vgl. Abbildung 45). Da allerdings weder Angaben zur Dauer noch zur Höhe der WT-LE für die entsprechenden KTKW stundengenau vorliegen, eignen sich diese Daten nicht für eine quantitative Auswertung möglicher Stromversorgungsengpässe in Deutschland. Die Angaben zur Dauer oder zum Zeitraum der WT-LE eigneten sich jedoch dazu, die Sommermonate Juni, Juli und August zu identifizieren, in denen am häufigsten WT-LE bei KTKW auftreten (vgl. Tabellen 16 und 17). Mittels der drei Analysen wurden somit erstmalig WT-LE bei KTKW in Deutschland systematisch identifiziert und bezüglich der Leistung, der Alterstruktur, dem verwendeten Energieträger sowie Kühlsystem bzw. -verfahren deskriptiv ausgewertet.

#### Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke

Die meisten WT-LE bei größeren KTKW mit einer Leistung  $> 300 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  (vgl. Abbildung 41) lassen sich dadurch erklären, dass bei großen Kraftwerken mehr abzuführende Abwärme anfällt als bei kleineren Kraftwerken. Die Abwärme wird am effizientesten und wirtschaftlichsten über eine Nasskühlung und dabei über eine Durchlaufkühlung abgeführt. Dabei können aufgrund der höheren Wärmeeinleitung bei einer Durchlaufkühlung wasserrechtliche Grenzwerte eher erreicht werden als bei anderen Kühlsystemen bzw. -verfahren (vgl. Abschnitt 2.1.1.3 und 2.1.2.2). Da 50 der 90 KTKW des GKP mit einer Leistung  $> 300 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  eine Durchlaufkühlung verwenden, begründet dies den hohen Anteil größerer Kraftwerke an den KTKW mit WT-LE.

Der abnehmende Anteil der KTKW mit WT-LE gemessen an der Anzahl der Kraftwerke, die in jeweils einem Jahrzehnt in Betrieb gingen, von den 1960er bis zu den 2000er Jahren (vgl. Abbildung 42), ist dadurch zu erklären, dass zwischen den 1960er und 1980er Jahren Kraftwerke häufig nur mit Durchlaufkühlung gebaut wurden. Jüngere oder im Bau befindliche Kraftwerke wie beispielsweise die neuen Blöcke des Rheinhafen-Dampfkraftwerks in Karlsruhe oder des Großkraftwerks Mannheim können zwar teils mit Durchlaufkühlung betrieben werden, haben jedoch für den Fall hoher Rheintemperaturen einen Kühlturm für die Ablauf-, Kreislaufkühlung oder den Mischbetrieb installiert (vgl. Abschnitt 2.1.1.3).

Der größte Anteil der Kern- und Steinkohlekraftwerke mit WT-LE gemessen am GKP sowie innerhalb der jeweiligen Energieträgerklassen (vgl. Abbildung 43) lässt sich dadurch begründen, dass erstens alle Kern- und 70 % der Steinkohlekraftwerke des GKP eine Leistung  $> 300 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  aufweisen und somit, wie oben beschrieben, mit einer Nasskühlung betrieben werden. Dies trifft zwar ebenso für 50 % der Braunkohlekraftwerke zu, bei diesen wird jedoch standortbedingt die Kreislaufkühlung verwendet, so dass lediglich ein geringer Teil der Abwärme an einen Vorfluter abgegeben wird (vgl. Abschnitt 2.1.1.3). Dagegen werden die meist an Flüssen gelegenen Kern- und Steinkohlekraftwerke meistens mit Durchlaufkühlung oder Kreislaufkühlung betrieben. Insbesondere die älteren Kern- und Steinkohlekraftwerke wenden, wie oben beschrieben, ausschließlich die Durchlaufkühlung mit einer hohen Wärmeabgabe an den Vorfluter an (vgl. Abschnitt 2.1.1.3). Der

größte Anteil der Kernkraftwerke mit WT-LE gemessen an allen KTKW in den einzelnen Energieträgerklassen ist zudem auf den mit 33 % geringeren Wirkungsgrad von Kernkraftwerken gegenüber durchschnittlich 38 % von deutschen Steinkohlekraftwerken zurückzuführen (STRAUSS SCHILLING 2004, S. 4; 2009, S. 27). Durch den geringeren Wirkungsgrad fällt bei Kernkraftwerken ein höherer Anteil an ungenutzter Wärmeenergie an, die über ein Kühlsystem abgeführt werden muss (Abschnitt 2.1.1.1).

71,4 % der WT-LE treten bei KTKW auf, bei denen ausschließlich die Durchlaufkühlung oder diese in Kombination mit anderen Kühlverfahren zum Einsatz kommt (vgl. Abbildung 44). Ursache ist die hohe Wärmeabgabe an den Vorfluter bei der Durchlaufkühlung. Durch die hohe Wärmezufuhr können bei bereits hohen natürlichen Wassertemperaturen die wasserrechtlichen Grenzwerte der maximalen Mischtemperatur schneller erreicht werden als beispielsweise bei der Kreislaufkühlung mit einer geringen Wärmeabgabe (vgl. Abschnitte 2.1.1.3 und 2.1.2.2). Dass dennoch bei knapp 8 % der KTKW mit Kreislaufkühlung eine WT-LE identifiziert wurde, könnten erstens auf extrem hohe Wassertemperaturen zurückzuführen sein. Die Wassertemperaturen könnten bereits vor der Kühlwasserentnahme die maximal erlaubte Mischtemperatur erreicht haben. Dadurch könnte auch die Einleitung geringer Abwärmemengen nicht mehr erlaubt bzw. nur durch Ausnahmegenehmigungen möglich sein. Ausnahmegenehmigungen zur Erlaubnis, wasserrechtliche Grenzwerte aufgrund hoher natürlich bedingter Flusstemperaturen überschreiten zu dürfen, werden den KTKW-Betreibern durch die zuständigen Behörden erteilt. Dies geschah beispielsweise im Hitzesommer 2003 (LÖNKER 2003, S. 22-23) (vgl. Abschnitt 3.1). Zweitens könnten die identifizierten WT-LE bei 8 % der KTKW mit Kreislaufkühlung ihre Ursache darin haben, dass mehrere Blöcke mit möglicherweise unterschiedlichen Kühlsystemen zu einem Kraftwerksstandort und einem Kühlsystem zusammengefasst wurden (vgl. Abschnitt 4.1.1). An den KTKW mit Kreislaufkühlung könnte beispielsweise zusätzlich eine Durchlaufkühlung Anwendung finden. Dies kann somit die WT-LE bei hohen Wassertemperaturen erklären.

Die meisten WT-LE bei KTKW wurden zwischen 1976 und 2007 für die Jahre 2003, 2006 und 1994 identifiziert (vgl. Abbildung 45), in denen ebenso die meisten Tage mit sehr hohen und extrem hohen Wassertemperaturen der deutschen Flüsse auftraten (vgl. Abbildung 53). Die extrem hohen Wassertemperaturen könnten auf die hohen Sommeranomalien der Lufttemperaturen von ca. 2,1 bis ca. 3,4 °C für den Juni, Juli und August 1994 und 2003 sowie von ca. 1,5 bzw. 5,2 °C für den Juni und Juli 2006 gegenüber der KNP 1961-1990 zurückzuführen sein (DWD 2004, S. 123; DWD 2007, S. 5). Das Auftreten von WT-LE bei KTKW in den übrigen zwölf Jahren zwischen 1976 und 2007 lässt sich ebenfalls mit einer hohen Anzahl an Tagen mit sehr hohen und extrem hohen Wassertemperaturen pro Jahr erklären. Eine Ausnahme bilden lediglich die Jahre 1982, 1983, 1989 und 1992, in denen zwar eine hohe Anzahl sehr hoher und/oder extrem hoher Wassertemperaturen auftraten, aber keine WT-LE bei KTKW identifiziert wurden (vgl. Abbildung 54). Grund hierfür könnte sein, dass aus oben genannten Gründen kein Anspruch auf vollständige Erfassung aller jemals aufgetretenen WT-LE bei KTKW erhoben werden kann. An den Jahren 1993, 1996, 2000 und 2005 ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den oben genannten Jahren auch relativ wenige Tage pro Jahr mit sehr hohen und extrem hohen Flusstemperaturen zu WT-LE bei KTKW führen können (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Dass die meisten KTKW mit WT-LE an den Flüssen Rhein, Neckar, Weser, Elbe und Spree liegen (vgl. Abbildung 46), könnte darauf zurückzuführen sein, dass die KTKW mit WT-LE entlang dieser Flüsse relativ nah hintereinander liegen (vgl. Abbildung 61). Die Abwärme des flussaufwärts gelegenen KTKW erwärmt die natürlichen Wassertemperaturen und beeinflusst somit das

flussabwärts gelegene KTKW. Bei einem KTKW am Rhein liegen beispielsweise die Rheintemperaturen um 1,5 °C höher, wenn das flussaufwärts gelegene KTKW in Volllastbetrieb gefahren wird, als wenn es stillsteht<sup>18</sup>. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass die KTKW mit identifizierter WT-LE Großkraftwerke sind und die meisten von ihnen zusätzlich ausschließlich mit Durchlaufkühlung betrieben werden. Somit wird an jedem Standort eine große Abwärmemenge in die Flüsse geleitet. Am Main und der Donau wurden keine KTKW mit WT-LE identifiziert, obwohl die KTKW an diesen Flüssen ebenfalls z. T. nicht weit voneinander entfernt liegen und mit einer Durchlaufkühlung betrieben werden (vgl. Abschnitt 5.4, Abbildung 61). Dies kann zum einen darauf zurückzuführen sein, dass aus oben genannten Gründen nicht alle KTKW mit WT-LE identifiziert wurden. Im Falle der KTKW bei Frankfurt a. Main könnte allerdings ein weiterer Grund sein, dass zwar alle mit Durchlaufkühlung betrieben werden, die anfallende Abwärme aber zum Großteil über den KWK-Betrieb als Prozess- oder Fernwärme für die Werke im Industriegebiet abgeführt wird. (vgl. Abschnitt 2.1.1.2 und Tabelle 21 im Anhang I). Die drei KTKW an der Donau weisen zwar alle eine Durchlaufkühlung auf, doch kommt ebenso die Kreis- oder Ablaufkühlung zum Einsatz. Dies ist wiederum der Zusammenfassung mehrerer Blöcke an einem Standort zu einem KTKW geschuldet (vgl. Abschnitt 4.1.1) Durch die Kreislauf- und Ablaufkühlung wird eine geringere Abwärmemenge in die Donau geleitet und wasserrechtliche Grenzwerte könnten somit unterschritten werden (vgl. Abschnitt 2.1.1.3 und Tabelle 21 im Anhang I).

## 6.2 Entwicklung rezenter Wassertemperaturen

Die Analyse rezenter WT basiert auf gemessenen WT-Zeitreihen. Die WT-Werte wurden auf Plausibilität geprüft, Datenlücken wurden interpoliert und die WT-Zeitreihen zuletzt auf Homogenität geprüft. Anschließend wurden eine Trendanalyse der rezenter WT-Zeitreihen und eine Zählstatistik extrem hoher WT durchgeführt.

### Datenaufbereitung

72 rezente WT-Zeitreihen stehen für die Analysen zur Verfügung (vgl. Abschnitt 4.2.1). Für 88 % der WT-Zeitreihen liegen die Werte bereits als Tagesmittel vor. Die Tagesmittel der übrigen Zeitreihen wurden aus den gemessenen Tagesminima und -maxima ermittelt oder aus 7-Uhr-Messungen bis 1995 und Tagesmitteln ab 1996 zu einer Zeitreihe zusammengefasst. Zwar sind Messungen der Morgentemperatur im Allgemeinen nicht repräsentativ für das Tagesmittel (PILGRIM et al. 1998, S. 1110, 1112). Allerdings wurden die Zeitreihen in einem späteren Schritt auf möglicherweise entstandene Temperaturversätze geprüft.

Die Zeitreihenlänge von mindestens 20 Jahren ist bei Temperaturwerten ausreichend, um Aussagen über mögliche Trends in den Zeitreihen treffen zu können (RAPP & SCHÖNWIESE 1996, S. 133). In 74 % der bisherigen Studien zur Entwicklung rezenter WT von Flüssen, werden Zeitreihen mit einer Länge zwischen zwei und 35 Jahren verwendet, in den übrigen Studien Zeitreihen mit einer

---

<sup>18</sup> Freundliche mündliche Mitteilung eines Kraftwerksbetreibers am Rhein am 14.05.2008. Um die Anonymität des Standortes zu gewährleisten, werden hier keine näheren Angaben zum Kraftwerk und Betreiber gemacht.

Länge von mindestens 60 Jahren (vgl. Abschnitt 3.2.1). Mit 20 bis 57 Jahren weisen die ausgewählten 72 Zeitreihen somit eine ausreichende Länge auf.

Da bereits die meisten der erhaltenen Zeitreihen mit einer Länge  $< 20$  Jahre aus den Analysen ausgeschlossen wurden, konnte nicht mehr nach dem Standort der WT-Stationen vor und nach einem Kraftwerk gewählt werden. Die Anzahl der WT-Zeitserien mit mehr als 20 Jahren Zeitserienlänge hätte sich ansonsten weiter reduziert (vgl. Abschnitt 4.2.1).

#### *Zeitlich gewichtete und räumliche Interpolation*

Nach der Eliminierung nicht plausibler, negativer und extrem hoher Ausreißerwerte liegen in 97 % der Zeitserien Datenlücken mit einem Anteil von 0,008 bis 49,1 % an der Gesamtzahl der Werte vor (vgl. Abschnitt 4.2.2.1, Tabelle 22 im Anhang I). Zeitserien, in denen mehr als 50 % der Tagesmittel fehlen, wurden von vorneherein aus den Analysen ausgeschlossen. Dieses Kriterium stellt zwar einen relativ hohen Prozentwert fehlender Werte dar (PILGRIM et al. 1998, S. 1112), doch wurden die Datenlücken zeitlich gewichtet und räumlich interpoliert. Dadurch stehen mehr Zeitserien für die Analysen zur Verfügung. Die Interpolationsverfahren wurden so gewählt, dass die interpolierten Werte keinen Temperaturversatz in den Zeitserien verursachen. Allerdings ist zu beachten, dass die interpolierten Werte beider Verfahren nicht die realen WT-Werte wiedergeben, sondern lediglich Ersatzwerte darstellen (RAPP 2001, S. 1).

Die zeitlich gewichtete Interpolation bei Datenlücken mit einer Länge  $\leq 32$  Tagen ist durch Autokorrelationswerte der Tagesmittel  $> 0,7$  gerechtfertigt (vgl. Abschnitt 4.2.2.1). In 31 % aller Zeitserien sind damit alle Datenlücken interpoliert. Der Anteil der Datenlücken reduziert sich in den übrigen Zeitserien auf 0,3 bis 46,5 %. Dabei fehlen lediglich in fünf Zeitserien mehr als 20 % der Daten. Mit abnehmenden Autokorrelationswerten und zunehmender Länge der Datenlücken werden die Temperaturänderungen durch die zeitlich gewichtete Interpolation allerdings nicht mehr zufriedenstellend wiedergegeben.

Aus diesem Grund wurden Datenlücken mit einer Länge  $> 32$  Tage räumlich mittels einer einfachen linearen Regression mit benachbarten WT-Zeitserien interpoliert. Dabei ist zu beachten, dass die Qualität der räumlich interpolierten Werte von der Qualität der Zeitreihe abhängt, mit deren Werte die fehlenden geschätzt werden. Das WT-Regime benachbarter Stationen kann beispielsweise durch einen Nebenflusszufluss oder Kühlwassereinleitung beeinflusst sein (vgl. Abschnitt 2.2), während dies nicht bei den WT der zu interpolierenden Zeitreihe der Fall ist. Dennoch erwies sich das räumliche Interpolationsverfahren bei vorliegenden Zeitserien als geeignete Methode, fehlende WT-Werte mit den Schwankungen der WT über einen längeren Zeitraum zu interpolieren. Denn die WT der benachbarten Zeitserien, die zur räumlichen Interpolation herangezogen wurden, erklären im Mittel 96 % der Varianz in den WT der zu schätzenden Zeitreihe (vgl. Abschnitt 4.2.2.1). Zudem findet die räumliche Interpolation in anderen Studien zur Interpolation fehlender WT-Werte Verwendung (HUGUET et al. 2008, S. 68). Die gewählten Verfahren erweisen sich somit insgesamt als geeignet, um fehlende Werte zu interpolieren und äquidistante Zeitserien zu erhalten.

#### *Homogenisierung*

Natürlich und anthropogen bedingte Einflussfaktoren können Shift- oder Trendinhomogenitäten in Messzeitserien der WT verursachen. Diese können sich auf die Trendergebnisse auswirken (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Es liegen weder zur Historie der ausgewählten 72 Messstationen noch zu den angewandten Messverfahren Informationen vor. Zudem sind Angaben zu anthropogenen

Einflussgrößen (z. B. Staustufen) auf die Umgebungsbedingungen der Messstationen lediglich begrenzt und nur qualitativ vorhanden (vgl. Abschnitt 4.2.1, Tabelle 11). Es fehlen quantitative Angaben darüber, in welchem Jahr beispielsweise ein thermisches Kraftwerk ein WT-Regime eines Flusses um wie viel Grad im Jahresgang an welcher Messstelle durch Kühlwassereinleitung erwärmt (BEGERT et al. 2003, S. 25). Somit konnten anhand von Metadaten keine Shift- oder Trend-Inhomogenitäten in den Zeitreihen identifiziert werden.

Allerdings können Shift-Inhomogenitäten statistisch mithilfe des relativen Homogenitätstests SNHT nach ALEXANDERSSON (1986) detektiert werden (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Die Qualität der Testergebnisse ist jedoch von der Qualität der Referenzzeitreihen und damit von der der Vergleichszeitreihen abhängig. Kleinere Inhomogenitäten in den Vergleichszeitreihen üben durch die Gewichtung mehrerer Vergleichszeitreihen nur einen geringen Einfluss auf die Referenzzeitreihe aus (BEGERT et al. 2003, S. 31f). Doch erlangen diese einen größeren Einfluss, wenn nur wenige Vergleichszeitreihen zur Bildung einer Referenzzeitreihe vorhanden sind. Dies war für Zeitreihen der Stationen an der Isar, Saar, Mulde und Spree der Fall. Zudem liegen für die Radolfzeller Aach, den Kocher, die Ems, Werra und Weiße Elster jeweils nur eine Zeitreihe vor. Daher wurden diese im Rahmen des SNHT jeweils mit den Zeitreihen des Rheins, des Neckars der Weser und Mulde bzw. Spree verglichen. Die Streudiagramme und Korrelationsanalysen nach Spearman und Pearson wurden gemeinsam mit dem 12-jährigen gleitenden Mitteln, den kumulierten Summenkurven sowie der kumulierten Differenzenkurve herangezogen (vgl. Abbildungen 70-73 im Anhang II), um geeignete Vergleichszeitreihen zu identifizieren. Diese graphischen Methoden erwiesen sich als geeignet, WT-Regime ähnliche Vergleichszeitreihen für die jeweilige Testzeitreihe auszuwählen. Dabei fanden Zeitreihen mit visuell identifizierten Inhomogenitäten wie beispielsweise die Zeitreihe „Saarbruecken“ (vgl. Abbildung 27) keine Beachtung. Zwischen den ausgewählten Vergleichszeitreihen und der jeweiligen Testzeitreihe ergaben sich Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Pearson von 0,7 bis 0,9 (vgl. Tabelle 12 und Tabelle 23 im Anhang I). In einer Vergleichsstudie zur Homogenisierung von LT ergaben sich Korrelationskoeffizienten von 0,91-0,94 (BEGERT et al. 2003, S. 31). Somit können die vorliegenden Ergebnisse der Korrelationsanalyse der WT benachbarter Zeitreihen als zufriedenstellend betrachtet werden. Eine Ausnahme stellt lediglich die Zeitreihe „Riealsingen\_RadolfzAach“ dar, deren Korrelationskoeffizienten mit den Zeitreihen des Rheins bei 0,2-0,3 liegen (vgl. Abbildung 25, links). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich die WT der Radolfzeller Aach schneller an die LT anpassen als dies bei den WT des Oberrheins mit einem größeren Wasservolumen der Fall ist (vgl. Abschnitt 2.2.1). Dadurch kann es zu einem zeitlichen Versatz der beiden WT kommen. Für den SNHT der Zeitreihe „Rielasingen\_RadolfzAach“ wurde dennoch auf die Vergleichsreihen des Oberrheins zurückgegriffen. Denn wie in Abbildung 73 im Anhang II zu sehen, zeigen die WT-Regime einen ähnlichen Verlauf.

Insgesamt wurden mittels des SNHT in vier Zeitreihen signifikante Shift-Inhomogenitäten detektiert und diese anschließend homogenisiert. Die Zusammenführung der 7-Uhr-Messungen sowie der Tagesmittel ergeben keine Shift-Inhomogenität in den Zeitreihen der Oder. Dies könnte darin begründet sein, dass bei allen Zeitreihen zum selben Zeitschritt der Wechsel von 7-Uhr-Messung auf Tagesmittel stattfand. Somit könnte ein Temperatursprung zum selben Zeitschritt vorliegen, der durch den SNHT nicht identifiziert werden kann (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Visuell ist ein solcher Temperaturversatz in den Zeitreihen jedoch nicht zu erkennen, so dass die WT-Zeitreihen als homogen betrachtet werden können.

Die zweite Homogenitätsprüfung ergab für die Zeitreihe „Lenggries“ nach wie vor eine signifikante Shift-Inhomogenität (vgl. Abbildung 30, oben rechts). Dies könnte darauf

zurückzuführen sein, dass lediglich die zwei ca. 70 bis 130 km Isar abwärts gelegenen Vergleichsstationen „Muenchen“ und „Landshut“ zur Bildung der Referenzzeitreihe verfügbar sind. Das WT-Regime der Isar bei Lenggries unterscheidet sich jedoch von dem bei München oder Landshut insofern, dass es erstens stärker durch Quell- bzw. Grundwasser und zweitens durch das alpine Einzugsgebiet geprägt wird (vgl. Abschnitt 2.2.1). Zudem könnte sich der Einfluss der Wasserregulierung durch den flussaufwärts gelegenen Sylvensteinspeicher auf das WT-Regime der Isar bei Lenggries stärker auswirken als auf das bei München oder Landshut (vgl. Abschnitt 2.2.2). Nach der dritten Homogenitätsprüfung und Homogenisierung liegen schließlich alle 72 Zeitreihen signifikant homogen ohne Temperaturversatz vor (vgl. Abschnitt 4.2.2.2).

Allerdings könnte in den Zeitreihen eine statistisch nicht zu erfassende Shift-Inhomogenität vorhanden sein. Grund hierfür sind die fehlenden Informationen über die Historie der Temperaturmessungen und einer möglichen Veränderung der Umgebungsbedingungen der Messstationen. Dies gilt insbesondere für Trend-Inhomogenitäten. Diese können sich mit natürlichen, klimabedingten Trends überlagern. Ohne zusätzliche Informationen zu Einflussgrößen auf die Umgebungsbedingungen der Messstationen und der Quantifizierung des Einflusses auf das WT-Regime können die Trend-Inhomogenitäten nicht identifiziert werden (vgl. Abschnitt 4.2.2.2).

Der relative Homogenitätstest SNHT nach ALEXANDERSSON (1986) stellte dennoch für die große Anzahl der Zeitreihen und unter den beschriebenen Voraussetzungen eine geeignete Methode dar, Shift-Inhomogenitäten zu identifizieren und diese anschließend zu homogenisieren. Die interpolierten und homogenisierten WT-Zeitreihen eignen sich somit für die nachfolgenden Analysen unter Beachtung möglicher natürlich oder anthropogen bedingter Trendinhomogenitäten.

### Entwicklung rezenter Wassertemperaturen

Der Mann-Kendall Trendtest und der Sen's Nonparametric Estimator of Slope wurden bereits in anderen Studien zur Entwicklung rezenter WT von Flüssen eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Da beide Methoden u. a. keine Unabhängigkeit der Daten voraussetzen (vgl. Abschnitt 4.2.3), erwiesen sie sich auch für vorliegende WT-Zeitreihen als geeignet, um die Richtung und Größe möglicher Trends zu bestimmen ( $\alpha = 0,05$ ).

Der Mann-Kendall Trendtest und der SNES ergeben für die analysierten Zeitreihen der zehn Zeitintervalle lediglich in vier Zeitreihen positive Trends der Jahresmittel (vgl. 5.2.1). In den Jahresmitteln rezenter WT von Flüssen in Deutschland, Österreich, Kroatien, in der Schweiz und in Großbritannien zeigten sich allerdings positive Trends je nach Zeitreihelänge und Zeitintervall zwischen 0,5 und 2,4 °C (DEISENHOFER 1992, S. 341f; WEBB & NOBILIS 1994, S. 106; PFAMMATTER 2004, S. 1; WEBB & NOBILIS 2007, S. 79, 84; BONACCI et al. 2008, S. 1016ff). Dies könnte auf die unterschiedlichen Zeitintervalle der Studien und insbesondere auf die kürzeren Intervalllängen der vorliegenden Zeitreihen zurückzuführen sein.

Für einzelne Monate ergeben die Trendanalysen signifikante Trends, von denen insgesamt knapp 70 % im Sommer und Frühjahr auftreten. Diese sind zu 97,5 bzw. 84,7 % positiv. Während sich die übrigen gut 30 % der signifikanten Trends auf den Winter und Herbst aufteilen, sind diese mehrheitlich negativ. Die größten Trends von 0,7 bis 5,9 °C je nach Zeitintervall und Zeitreihe kommen im Sommer gefolgt vom Frühjahr und Herbst mit bis 4,5 °C vor (vgl. Abschnitt 5.2.1). Ähnliche Ergebnisse ergaben Trendanalysen der WT von Flüssen in Deutschland, Frankreich, Österreich und Großbritannien mit positiven Trends in den meisten Zeitreihen v. a. im Frühjahr und

Sommer. Im Herbst und Winter traten je nach Zeitreihe und Land positive, negative oder keine Trends auf. Allerdings unterscheiden sich die Größen der Trends von denen der vorliegenden Arbeit mit lediglich bis zu 2°C (LANGAN et al. 2001, S. 204f; PFAMMATTER 2004, S. 1; HARI 2006, S. 16; MOATAR & GAILHARD 2006, S. 321f, 327; GREIS 2007, S. 1). Allgemein positive Trends von 0,5 bis 1,3 °C in den Monatsmitteln der WT wurden für Flüsse in der Slowakei, Frankreich und Großbritannien festgestellt (WEBB & WALLING 1992, S. 568, 574ff; WEBB 1996, S. 211; DAUFRESNE et al. 2003, S. 125, 128f; PEKAROVA et al. 2008, S. 1119ff). Die Unterschiede in der Größe der Trends könnte darin begründet liegen, dass in vorliegender Arbeit die Trendanalysen für jeden Monat und nicht für eine Saison durchgeführt wurden (vgl. Abschnitt 4.2.3). So tritt beispielsweise für das Zeitintervall 1984-2003 im Juni ein starker Trend auf, keiner jedoch in allen Zeitreihen im Juli und August (vgl. Abbildung 30 im Anhang II). Die Trendanalyse für die Saison Sommer würde also zu keinem oder geringerem signifikanten Trend auf alle drei Sommermonate bezogen führen. Sind nun in den anderen Studien nicht monats- sondern saisonweise die Trendanalysen durchgeführt worden, resultiert dies in unterschiedlichen Trendgrößen.

Unterschiedliche Ergebnisse der Trendanalysen der Saisons ergaben sich für WT österreichischer Flüsse mit positiven Trends von 0,5 bis 2,9 °C v. a. im Winter. Im Frühjahr und Sommer traten jeweils in mindestens einer Zeitreihe negative Trends auf (WEBB & NOBILIS 1995, S. 87f, 93; WEBB 1996, S. 216f, 219f). In einer WT-Zeitreihe der Donau bei Passau lagen die größten positiven Trends im Winter und die geringsten im Sommer vor (DEISENHOFER 1992, S. 341f).

Insgesamt ist ein Vergleich der Ergebnisse der Entwicklung rezenter WT von Flüssen der vorliegenden Arbeit mit denen anderer Studien nur eingeschränkt aussagekräftig. Die Gründe hierfür sind, dass unterschiedlich lange Zeitintervalle in den verschiedenen Studien betrachtet wurden. Zudem beginnen und enden die Zeitintervalle in unterschiedlichen Jahren. Die Länge des Zeitintervalls sowie der Beginn und das Ende der Zeitreihe üben sowohl einen Einfluss auf die Signifikanz als auch auf die Größe der Trends aus (vgl. Abschnitt 5.2.1, Abbildung 52). Außerdem wurden nicht in allen Studien der Mann-Kendall Trendtest und der SNES angewandt, um Trends zu identifizieren (vgl. Tabelle 7). Werden die Trends auf unterschiedlichen Signifikanzniveaus getestet, ergeben sich bezüglich der Signifikanz eines Trends ebenso unterschiedliche Ergebnisse. Wie oben bereits beschrieben können Trendanalysen auf Monats- und Saisonbasis zwar ähnliche Ergebnisse bezüglich der Signifikanz eines Trends aufweisen, jedoch unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Größe der Trends. Ein weiterer Grund für die Heterogenität der Ergebnisse rezenter WT-Entwicklungen könnte in den je nach Fluss verschiedenen natürlich und anthropogen bedingten Ursachen der Änderungen liegen (vgl. Abschnitt 2.2).

Die LT weisen Trends in den Monatsmitteln von 0,7-1,7 °C je nach Zeitintervall und betrachteter Jahreszeit auf. Dabei liegen langjährige Zeitreihen seit Beginn des 20. Jahrhunderts vor (RAPP & SCHÖNWIESE 1996, S. 2; DWD 2002, S. 116). Die signifikanten Trends in den Monatsmitteln der WT liegen um bis zu 4°C höher, was z. T. auf unterschiedliche Zeitintervalllängen sowie Anfangs- und Endjahre der Intervalle zurückzuführen ist (vgl. Abbildungen 94-100 im Anhang II). Dadurch oder alleine durch steigende LT lässt sich der Unterschied in der Größe der Trends jedoch nicht erklären. Ein Grund für den starken WT-Anstieg könnte auf die zunehmende Wärmebelastung der Gewässer durch Wärmeeinleitung von KTKW und Industriebetrieben zurückzuführen sein (vgl. Tabelle 6). Zusätzlich könnten wasserbauliche Maßnahmen wie beispielsweise die Staustufen am Neckar zu einem veränderten WT-Regime geführt haben. Denn staureguliert Flüsse wärmen sich schneller auf als frei fließende (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese Gründe werden neben dem Anstieg der LT als Ursache für die steigenden WT in den meisten Studien zur Entwicklung rezenter WT von

Flüssen in Europa, in den USA oder in Japan genannt. Denn die Trends in den LT-Zeitreihen benachbarter LT-Messstationen sind teils geringer als die in den WT-Zeitreihen (DEISENHOFER 1992, S. 341; WEBB & NOBILIS 1995, S. 87f, 93; WEBB 1996, S. 212ff; PETERSEN & KITCHELL 2001, S. 1833ff, 1839; DAUFRESNE et al. 2003, S. 125, 128f; KINOUCI et al. 2007/2007, S. 87; WEBB & NOBILIS 2007, S. 79, 84; BONACCI et al. 2008, S. 1016ff; HUGUET et al. 2008, S. 72f). Als weiterer Grund für die Änderungen der WT wird das veränderte Abflussregime durch höhere Niederschläge und frühere Schneeschmelze genannt (LANGAN et al. 2001, S. 204f; MOATAR & GAILHARD 2006, S. 321f, 327; PEKAROVA et al. 2008, S. 1119ff). Studien zur Entwicklung rezenter WT von Flüssen in Großbritannien zeigen jedoch, dass sich der Anstieg der WT alleine auf den Anstieg der LT zurückzuführen lässt (WEBB & WALLING 1992, S. 568, 574ff; WEBB 1996, S. 211). Wie in Tabelle 11 gezeigt, unterliegen alle untersuchten Flüsse der vorliegenden Arbeit einer starken anthropogenen Veränderung und Nutzung. Darauf lassen sich die Trends in den rezenten WT, insbesondere aber deren Höhe zu einem Teil zurückführen. Ein weiterer Teil ist auf die steigenden LT und möglicherweise auf ein verändertes Abflussregime zurückzuführen. Eine Quantifizierung der Anteile der Ursachen an den Trends lässt sich jedoch nur mit quantitativen Daten zur Veränderung der Abflussregimes, zur Wärmeeinleitung durch Industrie und Kraftwerke sowie zur Auswirkung wasserbaulicher Maßnahme auf das WT-Regime durchführen. Dies war allerdings erstens nicht Fokus der vorliegenden Arbeit und zweitens lagen hierzu keine Informationen vor.

Auffallend in den Ergebnissen der Trendanalysen ist, dass in den analysierten Zeitreihen für das Zeitintervall 1988-2007 die meisten negativen Trends auftreten (vgl. Abschnitt 5.2.1). Grund hierfür könnte der Wechsel der negativen Phase der Nordatlantischen Oszillation (NAO) zu einer positiven Phase um 1987/1988 sein. PFAMMATTER (2004) und HARI et al. (2006) identifizierten einen Versatz der mittleren WT schweizer Flüsse um 1987/88. Dieser wird ebenso in den mittleren LT der Zeitreihen benachbarter LT-Stationen festgestellt. Zur gleichen Zeit tritt eine positive Phase der NAO auf, die eng mit den Änderungen der LT korreliert. Den Anstieg der WT führten sie somit zum einen auf steigende LT im Zuge des Klimawandels und zum anderen auf die positive Phase der NAO zurück (PFAMMATTER 2004, S. 1; HARI 2006, S. 18, 21). Seit 2005 überwiegen die negativen NAO Phasen (NOAA 2010, S. 1). Da das Zeitintervall 1988-2007 in einer positiven NAO Phase mit höheren LT beginnt und in einer negativen NAO Phase mit tendenziell kühleren LT endet, könnte dies die Ursache für die auffallend vielen negativen Trends für dieses Zeitintervall sein. Alle anderen Zeitintervalle beginnen in einer negativen und enden in einer positiven Phase der NAO (vgl. Tabelle 24 im Anhang I) (NOAA 2010, S. 1).

Alle aufgeführten Ergebnisse spiegeln sich in den Ergebnissen der einzelnen Flüsse in Süd- Nord- und Ostdeutschland wieder (vgl. Abbildungen 48-51). Regionale Unterschiede sind nicht festzustellen. Lediglich der Neckar fällt mit den meisten negativen Trends insgesamt auf, die zudem in den analysierten Zeitreihen des Neckars für alle Zeitintervalle auftreten (vgl. Abbildung 49). Dies könnte darin begründet liegen, dass am quellnächsten gelegenen KTKW-Standort Altbach/Deizisau Mitte bis Ende der 1980er Jahre die alten Kraftwerksblöcke durch das Heizkraftwerk 1 und 2 ersetzt wurden (ENBW o.J., S. 18, 22). Statt wie vorher mit Durchlaufkühlung werden diese Kraftwerke seitdem mit Kreislaufkühlung betrieben. Somit wurde die Wärmeeinleitung in den Neckar stark reduziert, was zu den negativen Trends in den Zeitreihen geführt haben könnte.

#### Zählstatistik sehr hoher und extrem hoher Wassertemperaturwerte

Im Gegensatz zu den Trendergebnissen lassen sich die Ergebnisse der Zählstatistik sehr hoher und extrem hoher WT alleine durch die hohen Monatsmittel der LT im Juni, Juli und/oder August erklären

(vgl. Abschnitt 2.2.1). Als hohe Monatsmittel der LT werden im Folgenden solche bezeichnet, die mindestens um 1,5 °C höher als die des langjährigen Mittels der KNP liegen. In 72 bzw. 50 % der Zeitreihen treten die meisten Tage pro Jahr mit sehr hohen und extrem hohen WT-Werten im Jahr 2003 auf (vgl. Abbildung 53). Das Jahr 2003 wies gleichzeitig die höchsten mittleren LT im Juni und August seit 1901 mit einer Abweichung von über 4 °C gegenüber der KNP auf (DWD 2010d, S. 1). In den Jahren 1991, 1992, 1994, 1995 und 2006, die in den übrigen Zeitreihen die meisten Tage mit sehr hohen oder extrem hohen WT-Werten aufzeigen, treten in zwei oder drei Sommermonaten hohe mittlere LT auf (DWD 2010d, S. 1). Die Unterschiede in den Ergebnissen der Zählstatistik für die Regionen Süd- Nord- und Ostdeutschland bezüglich der Jahre mit den meisten Tagen pro Jahr mit sehr hohen oder extrem hohen Werten lassen sich somit auf unterschiedliche regionale Witterungsbedingungen zurückführen. Während in Süd- und Ostdeutschland die meisten Zeitreihen im Jahr 2003 die meisten Tage mit sehr hohen und extrem hohen WT-Werten aufweist, ist das in den Zeitreihen in Norddeutschland für das Jahr 1994 der Fall. Insbesondere der Juli zeigte 1994 hohe Monatsmittel der LT mit einer Abweichung gegenüber der LT der KNP von über 3 °C auf (DWD 2010d, S. 1). Die Ergebnisse der Zählstatistik sehr hoher und extrem hoher WT für die einzelnen Sommermonate folgen ebenfalls dem Auftreten hoher Monatswerte der LT in den entsprechenden Sommermonaten. In allen in Abschnitt 5.2.2 aufgeführten Jahren mit der größten Anzahl an Tagen mit sehr hohen und extrem hohen WT im Juni, Juli und August lagen die Monatsmittel der LT mit bis zu 4,3 °C über denen der KNP (DWD 2010d, S. 1).

#### Zählstatistik Wassertemperaturwerte über definierten Schwellwert für die Zeitreihen des Rheins

Die Anzahl der Tage pro Jahr mit hohen WT-Werten über dem definierten Schwellwert  $\geq 23$  °C in den Zeitreihen des Rheins (vgl. Abbildung 55) lässt sich ebenfalls mit dem Auftreten hoher Monatsmittel der LT insbesondere in den Sommermonaten erklären (DWD 2010d, S. 1). Der positive Trend der LT in allen drei Sommermonaten und die steigende Anzahl an Jahren mit Monatsmitteln der LT über denen der KNP (DWD 2010d, S. 1) spiegelt sich in der Zunahme der Anzahl der Tage mit hohen WT-Werten  $\geq 23$  °C zwischen 1985 und 2006 wieder. Die zunehmende Anzahl an Tagen hoher WT  $\geq 23$  °C mit zunehmender Entfernung vom Bodensee könnte zum einen daran liegen, dass die WT des Rheins sich zunehmend an die LT angleichen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Zum anderen befindet sich mit zunehmender Flusskilometerzahl eine steigende Anzahl an Wärmeeinleitern entlang des Rheins (vgl. Tabelle 11). Die Wärmeeinleitungen führen zusätzlich zu einer WT-Erhöhung (vgl. Abschnitt 2.1.2), so dass dadurch die Schwellwerte häufiger erreicht werden könnten.

### 6.3 Entwicklung zukünftiger Wassertemperaturen

Die Analysen der Entwicklung zukünftiger WT deutscher Flüsse basiert auf simulierten WT-Zeitreihen. Die WT-Zeitreihen wurden mithilfe eines logistischen Regressionsmodells und modellierten LT-Zeitreihen des REMO simuliert. Anschließend wurden die simulierten WT-Zeitreihen auf mögliche Trends hin und auf mögliche Änderungen der WT in einem zukünftigen Klima gegenüber denen der KNP untersucht.

#### Korrelationsanalyse zwischen rezenten Luft- und Wassertemperaturen

Von allen natürlichen Einflussgrößen reagiert die WT am sensitivsten auf eine Änderung der LT (vgl. Abschnitt 2.2.1). Um herauszufinden, ob auch ein Zusammenhang zwischen LT in Deutschland und den vorliegenden WT vorhanden ist, wurden Korrelationsanalysen mit 72 gemessenen LT-

Zeitreihen des DWD und den 72 rezenten WT-Zeitreihen durchgeführt. Dabei wurden die LT-Zeitreihen der zur WT-Station jeweils nächst gelegenen DWD-Station verwendet. Die LT-Zeitreihen decken die jeweilige WT-Zeitreihe zeitlich ab. Die Korrelations- und Regressionsanalyse setzen keine Zeitreihen ohne Datenlücken voraus, so dass Datenlücken nicht interpoliert wurden. Die DWD-Stationen liegen mit im Mittel 16 km ähnlich nah oder näher an den WT-Stationen als im Vergleich zu den Entfernungen der Stationen in anderen Studien (ein bis zu über 200 km) (PILGRIM et al. 1998, S. 1110; WEBB et al. 2003, S. 3073; u. a.). Durch die Höhenkorrektur wurden höhenbedingte Unterschiede der WT und LT eliminiert (vgl. Abschnitt 4.3.1.1). Insgesamt stehen somit 72 höhenkorrigierte, homogene, auf Plausibilität geprüfte LT-Zeitreihen für die Analysen zur Verfügung.

Die Korrelationsanalysen nach Spearman und Pearson mit den Tages-, Wochen- und Monatsmitteln der rezenten LT und WT ergeben Korrelationskoeffizienten zwischen 0,8 und 0,99. Alle Korrelationen sind dabei signifikant auf dem Niveau 99 % (vgl. Abschnitt 4.3.2). Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den Korrelationsanalysen anderer Studien je nach zeitlicher Auflösung der Daten mit Korrelationskoeffizienten von 0,84-0,98 (CRISP & HOWSON 1982, S. 362; PILGRIM et al. 1998, S. 1113; ALBEK 2007, S. 15). Die hohen Korrelationskoeffizienten zeigen damit den starken statistischen Zusammenhang zwischen LT und WT und erlauben die Simulation der WT mithilfe der LT.

#### Regressionsanalyse mit rezenten Luft- und Wassertemperaturen

Zur Simulation fand das logistische Regressionsmodell nach MOHSENI et al. (1999) Verwendung. Mit diesem werden die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen LT und WT bei LT unter fünf bzw. über 25 °C berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.3.2). Für 72 Zeitreihen wurde mittels Gleichung 36 (vgl. Abschnitt 4.3.2), der Tages-, Wochen- und Monatsmittel der rezenten LT- und der entsprechenden WT-Zeitreihen jeweils ein LRM erstellt. Mit diesen Modellen und den rezenten LT-Zeitreihen wurden anschließend die Tagesmittel mit Zeitversatz beim höchsten Korrelationskoeffizienten, die Wochen- und Monatsmittel für 72 rezente WT-Zeitreihen simuliert. Die Validierung der Modellgüte und der simulierten WT gegenüber der gemessenen WT fand mit dem *NSC* und *RMSE* statt (vgl. Abschnitt 4.3.2). Der *NSC* beträgt für die Tagesmittel im Mittel 0,84, für die Wochenmittel im Mittel 0,91 und für die Monatsmittel im Mittel 0,96. Der *RMSE* liegt im Mittel bei 2,58 °C für die Tagesmittel, bei 1,89 °C für die Wochenmittel und bei 1,23 °C für die Monatsmittel. Im Vergleich zu anderen Studien mit *NSC* zwischen 0,64-0,95 (Wochenmittel) weisen die vorliegenden Modelle für die Simulation der Tages- Wochen- und Monatsmittel der WT eine gute Modellgüte auf. Ebenso werden im Mittel aller Zeitreihen die gemessenen Tages-, Wochen- und Monatsmittel durch die simulierten WT in den vorliegenden Zeitreihen im Vergleich zu anderen Studien mit *RMSE* von 0,47 bis 3,25 (Wochenmittel) gut wiedergegeben (KYLE & BRABETS 2001, S. 14; MORRIL et al. 2005, S. 142). Die größten *RMSE* von bis zu 4,34 °C könnte zum einen auf Messfehler in den WT-Zeitreihen zurückzuführen sein. Zum anderen könnten andere Einflussgrößen wie beispielsweise die Wärmeeinleitung durch Kraftwerke die WT zusätzlich zu den LT stark beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Dieser Anteil kann durch die LT nicht erklärt werden, so dass dies zu größeren Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen WT führen kann. Die gemessenen Werte der Tages-, Wochen- und Monatsmittel werden zudem bei extrem hohen WT um 0,5-3 °C durch die simulierten unterschätzt. (vgl. Abbildungen 37-39). Allerdings war das Ziel der vorliegenden Arbeit nicht, extrem hohe WT exakt zu simulieren, sondern mittlere zukünftige WT auf Basis simulierter LT. Die LRM erwiesen sich mit im Vergleich zu anderen Studien hohen *NSC* bzw. relativ geringen *RMSE* als geeignet, um für die Simulation zukünftiger WT verwendet zu werden.

### Simulation zukünftiger Wassertemperaturen

Um herauszufinden, ob die simulierten LT des REMO für die Simulation zukünftiger WT geeignet sind, wurden diese validiert. Dazu wurden die 72 über neun REMO-Kacheln gemittelten und höhenkorrigierten LT des REMO mit den gemessenen LT-Zeitreihen des DWD für die KNP verglichen (vgl. Abschnitt 4.3.1.2). In 96 % der Zeitreihen werden die gemessenen über die KNP gemittelten LT-Werte durch die simulierten LT-Werte um 0,1, bis 2,1 °C überschätzt. Im Mittel aller Zeitreihen wird das über die KNP gemittelte Jahresmittel der gemessenen LT durch die simulierten LT leicht um 0,8 °C überschätzt. Die mittlere Standardabweichung der gemessenen LT wird ebenfalls gut durch die der simulierten LT mit einer Differenz von 0,45 °C wiedergegeben. Die mittleren Amplituden der gemessenen und simulierten Zeitreihen differieren lediglich um 0,2 °C (vgl. Tabelle 25 im Anhang I). Der Vergleich der gemittelten Jahresgänge ergibt eine Überschätzung der gemessenen durch die simulierten LT v. a. in den Wintermonaten und Übergangsjahreszeiten. In 49 % der Zeitreihen werden die gemessenen über die KNP gemittelten LT der Sommermonate exakt durch die simulierten LT wiedergegeben, in 38 % der Zeitreihen mit einer Abweichung von maximal 0,2 °C. In den übrigen Zeitreihen werden die gemessenen durch die simulierten LT der Sommermonate um bis zu 2 °C überschätzt. Insgesamt werden die gemessenen LT durch die simulierten LT des REMO gut wiedergegeben. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Validierung der LT des REMO für das Gebietsmittel Deutschland durch das MPI-MET überein (vgl. Abschnitt 4.3.1.2). Die simulierten LT des REMO eignen sich somit für die Simulation der WT. Unter Annahme, dass die Güte des REMO stationär ist, sich also in der Zukunft nicht ändern wird, können Änderungen in den LT auf ein verändertes Klima zurückgeführt werden.

Mittels der LRM und der simulierten LT-Zeitreihen des REMO wurden für 72 Messstationen WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2100 sowie für die KNP 1961-1990 simuliert (vgl. Abschnitt 4.3.2). Dabei wurden die WT für die ZP jeweils unter Annahme eines geringen (B1-Szenario), eines mittleren (A1B-Szenario) und eines hohen (A2-Szenario) Anstiegs der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre modelliert (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Änderungen in den WT lassen sich somit auf sich ändernde LT zurückführen. Auswirkungen sich ändernder Abflussregime oder anthropogener Einflussgrößen (z. B. Ab- oder Zunahme der Wärmeeinleitungen durch Kraftwerke, wasserbauliche Maßnahmen) waren nicht Fokus dieser Arbeit und fanden daher keine Beachtung.

### Entwicklung zukünftiger Wassertemperaturen

Die zukünftigen WT-Zeitreihen wurden mittels des Mann-Kendall Trendtests und des SNES analysiert, ob Trends für die ZP 2011-2040, 2011-2070 und 2011-2100 der drei Szenarien vorliegen ( $\alpha = 0,05$ ). Um festzustellen, ob sich die mittleren WT in Zukunft von denen der KNP unterscheiden werden, wurde der t-Test angewandt ( $\alpha = 0,05$ ).

Die Trendanalyse für die ZP 2011-2040 und der Vergleich der Jahresmittel zwischen 2011-2040 und der KNP 1961-1990 ergeben weder signifikante Trends noch Unterschiede der Jahresmittel für alle WT-Zeitreihen der drei Szenarien. Ab der ZP 2011-2070 bzw. 2041-2070 der des A1B- und A2-Szenarios treten positive Trends in den Jahresmitteln aller Zeitreihen bzw. signifikant positive Unterschiede der Mittelwerte auf. Die Zeitreihen der ZP 2011-2070 des B1-Szenarios zeigen keine Trends in den Jahresmitteln. Die geringsten Trends in den WT und Unterschiede der mittleren WT kommen in den Zeitreihen des B1-Szenarios und etwa gleich große Trends in denen des A1B- und A2-Szenarios vor. Dabei nehmen die Größe der Trends und der Differenzen von der mittleren ZP 2011-2070 bzw. 2041-2070 bis zur entferntesten ZP 2011-2100 bzw. 2071-2100 zu (vgl. Abschnitt 5.3).

Die Entwicklung zukünftiger LT des REMO spiegelt sich in der Entwicklung der simulierten WT sowohl räumlich und zeitlich als auch für die Szenarien wieder. So ist der geringste WT-Anstieg in den Zeitreihen des B1-Szenarios (vgl. Abbildungen 58 und 59, Tabellen 19 und 20) auf die Annahme der geringsten Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) und damit auf den geringsten Anstieg der LT im Vergleich der Szenarien zurückzuführen (JACOB et al. 2008, S. 41). Die ähnlich hohen LT- bzw. WT-Anstiege des A1B- und A2-Szenarios trotz unterschiedlichem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) könnten auf die stärkere Abnahme der Schwefelaerosole ab Mitte des 21. Jahrhunderts im A1B-Szenario zurückzuführen sein. Schwefelaerosole wirken sich abkühlend auf das Klima aus, so dass ein geringerer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im A1B-Szenario ausgeglichen werden könnte, und somit die LT ähnlich stark wie die im A2-Szenario ansteigen (JACOB et al. 2008, S. 41). Ein weiterer Grund der ähnlichen Anstiege in den LT bzw. simulierten WT des A1B- und A2-Szenarios könnte ebenso sein, dass für jedes Szenario nur eine Realisation (ein REMO-Lauf) vorliegt. Unterschiedliche Anfangsbedingungen können in einem dynamischen Modell aufgrund der Nichtlinearität der Modellgleichungen zu unterschiedlichen Ergebnissen der simulierten Größen führen. Die daraus resultierenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der einzelnen Szenarien können sich überschneiden. Somit kann trotz Annahme eines geringeren Anstiegs der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (A1B-Szenario) ein höherer Anstieg der LT als bei Annahme eines höheren Anstiegs der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (A2-Szenario) resultieren (PAETH & HENSE 2002, S. 190).

Die Änderungen in den Jahresmitteln der WT zwischen der ZP 2071-2100 und der KNP fallen im Mittel aller WT-Zeitreihen mit je nach Szenario 1,6-2,7 °C geringer aus als die der über Deutschland gemittelten LT mit 2,5-3,5 °C (vgl. Tabelle 19 und Abschnitt 2.2.3.3). Geringere Anstiege zukünftiger WT gegenüber denen zukünftiger LT um meist 1-2 °C ergaben sich je nach verwendeten simulierten LT unter Annahme höherer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ebenso in Vergleichsstudien (MORRIL et al. 2005, S. 139; KYLE & BRABETS 2001, S. 22, MOHSENI et al. 1999, S. 3723). Dies ist auf den nicht-linearen Zusammenhang zwischen LT und WT bei LT-Werten über 25 °C zurückzuführen (MOHSENI et al. 1999, S. 3730). Die WT steigen zwar bei LT über 25 °C noch an, jedoch langsamer als die LT. Denn durch die höheren LT kann die Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen. Die höhere Verdunstung hat einen Abkühlungseffekt und somit einen geringeren Anstieg der WT zur Folge (vgl. Abschnitte 3.2.2 und 4.3.2).

Ebenso wie die Entwicklung der Jahresmittel folgen die Monatsmittel der WT den Änderungen der LT des REMO. Die geringen Anstiege bzw. sogar Abnahmen der LT bis Mitte des 21. Jahrhunderts im Frühjahr (JACOB et al. 2008, S. 99) spiegeln sich in negativen Trends im Frühjahr in 50 % der WT-Zeitreihen des B1-Szenarios bzw. in keinen Trends der WT des A1B- und A2-Szenarios für das ZP 2011-2040 wieder. Der gegenüber den anderen Jahreszeiten geringe WT-Anstieg im Frühjahr um 0,5-2 °C je nach Monat setzt sich in den Zeitreihen der Flüsse in Süddeutschland für die mittlere und entfernteste ZP in den Trends sowie im Mittelwertvergleich gegenüber der KNP in allen drei Szenarien fort (vgl. Abbildungen 57 und 58, Abbildungen 121 und 122 im Anhang II). Dies kann auf eine sich ändernde Druckverteilung im Frühjahr zurückgeführt werden. Schwach westliche, zonale Anströmungen werden von einer leicht meridionalen Anströmung mit kühleren Luftmassen aus dem Norden abgelöst. Die Änderung der mittleren LT im Frühjahr unterscheidet sich je nach Szenario und Monat um 1-2,5 °C zwischen der entferntesten ZP und der KNP (JACOB et al. 2008, S. 42, 100). Im räumlichen Vergleich verläuft der LT-Anstieg für ganz Deutschland gleichmäßig gering mit Ausnahme etwas höherer LT-Anstiege südlich der Donau im A1B- und A2-Szenario (JACOB et al. 2008, S. 112).

Allerdings weisen die WT der Flüsse in Nord- und Ostdeutschland für die mittlere und entfernteste ZP aller drei Szenarien neben den Herbst- und Wintermonaten im Frühjahr (März, April) die höchsten Trends bzw. Differenzen von 2-4 °C je Szenario und ZP auf. Die geringsten Trends und Differenzen der WT treten zwischen Mai und Juli bzw. August von ca. 1-2,5 °C je nach ZP und Szenario auf (vgl. Abbildung 59). Dagegen liegen bei den WT der Flüsse in Süddeutschland im Sommer die größten Trends in allen drei Szenarien für die ZP 2011-2070 bzw. 2011-2100 von bis zu 3,9-5,8 °C je nach Monat vor und die geringsten neben den Frühjahrmonaten im Herbst und Winter (vgl. Abbildungen 58 und 59). Grund hierfür könnte der Einfluss der Nord- und Ostsee auf die LT in Nord- und Ostdeutschland und damit auf die WT der dortigen Flüsse sein. Aufgrund der höheren Wärmekapazität des Wassers gegenüber der Luft werden die LT über Land in Küstennähe von den wärmeren WT der Meere positiv beeinflusst (JACOB et al. 2008, S. 115). Im Sommer dagegen erwärmen sich die LT über Land stärker als über Wasserflächen. In Küstennähe wirken sich die Nord- und Ostsee abkühlend auf die Sommertemperaturen über Land aus (JACOB et al. 2008, S. 113). Ein weiterer Grund könnte allerdings auch sein, dass insbesondere die Donau, Isar und Radolfzeller Aach geringere Jahres- und Sommermittel der WT aufweisen als die weiter nördlich gelegenen Flüsse. Dies spiegelt sich in der Einteilung der Gewässer in sommerkühle und sommerwarme Gewässer und den damit verbundenen maximal erlaubten Grenzwerten der Mischtemperatur wieder (vgl. Abschnitt 2.1.2.2, Tabelle 4). Durch die S-förmige logistische Regressionsfunktionen könnte für die WT der südlich gelegenen Flüsse ein stärkerer Anstieg simuliert werden als für die WT der weiter südwestlich (Rhein, Main, Neckar, Saar), nördlich und östlich gelegenen, größeren Flüsse bei einem ähnlichen LT-Anstieg. Denn aufgrund des nicht-linearen Anstiegs der WT mit steigenden LT bei WT über 20 °C bzw. LT über 25 °C können die bereits heute höheren WT der südwestlich, nördlich und östlich gelegenen, größeren Flüsse im Sommer nicht so stark ansteigen wie die WT der südlich gelegenen Flüsse mit mittleren WT < 20 °C (vgl. Abschnitte 3.2.2 und 4.3.2).

Im Gegensatz zu den Trendergebnissen zeigen sich beim Vergleich der Mittelwerte für die ZP 2011-2040 aller drei Szenarien gegenüber der KNP bereits positive Unterschiede in mindestens einem der Sommermonate bei jeder Zeitreihe (vgl. Abbildung 60). Dies bedeutet also, dass sich unter Annahme verschiedener Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen die zukünftigen WT von denen der vergangenen unterscheiden werden, selbst wenn keine einheitliche Entwicklung der WT innerhalb dieser ZP für die drei Szenarien vorliegt.

## 6.4 Synthese

Isar, Rhein, Neckar, Saar, Elbe und Weser erweisen sich als die stärksten betroffenen Flüsse hinsichtlich folgender Merkmale: KTKW-Standorte mit mindestens einer WT-LE zwischen 1976 und 2007 (vgl. Abbildung 61), signifikant positive Trends in den rezenten WT in mindestens einem der Sommermonate (vgl. Abbildung 62) und signifikant positive Unterschiede zwischen den mittleren zukünftigen (ZP 2011-2040) und vergangenen WT (1961-1990) in mindestens einem der Sommermonate (vgl. Abbildung 60). Außerdem zeigt sich bei diesen Flüssen mit Ausnahme der Isar ein signifikanter Anstieg der WT in mindestens einem der Sommermonate für die ZP 2011-2040 des A1B- und A2-Szenarios (vgl. Abbildung 62). Die WT-LE an diesen KTKW-Standorten können insbesondere auf das Kühlverfahren der Durchlaufkühlung und auf die Kraftwerksgröße mit einer Leistung > 300 MW<sub>el,brutto</sub> zurückgeführt werden. Zudem liegen die KTKW an diesen Flüssen relativ nah beieinander, wodurch das flussabwärts gelegene KTKW durch die eingeleitete Abwärme des flussaufwärts gelegenen beeinflusst werden kann (vgl. Abschnitt 5.1 und 6.1).

In der Annahme dass die KTKW in der Praxis zwischen 40 und 50 Jahren laufen (DENA 2008, S. 3), und dass der 2002 beschlossene Ausstieg aus der Kernenergie bestehen bleibt (BFS 2010, S. 1), werden ca. 48 bis 64 % der KTKW mit identifizierter WT-LE bis 2022 vom Netz gehen. Die Bundesregierung plant jedoch in ihrem Energiekonzept eine Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke um durchschnittlich 12 Jahre, so dass die ersten Kernkraftwerke bzw. Kernkraftwerksblöcke nicht 2011 sondern voraussichtlich 2019 und das letzte nicht 2022 sondern 2034 stillgelegt werden (NORDDEUTSCHER RUNDFUNK 2011, S. 1). Damit würden fünf der elf Kernkraftwerke bzw. Kernkraftwerksblöcke, an denen mindestens eine WT-LE identifiziert wurde nach 2022 weiterhin am Netz bleiben. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Laufzeit der übrigen KTKW von 40 bis 50 Jahren würden bis 2034 damit ca. 67 bis 91 % der KTKW mit WT-LE stillgelegt werden. Dabei sind die KKW Stade und Obrigheim nicht berücksichtigt, da diese bereits stillgelegt wurden (vgl. Abschnitt 4.1.1). Sollten bis 2022 bzw. 2034 ähnlich warme bzw. heiße Sommer mit entsprechend hohen Wassertemperaturen wie z. B. 1994, 2003 und 2006 auftreten (vgl. Abschnitte 5.1 und 5.2.2), könnten die bis dahin noch nicht stillgelegten KTKW mit identifizierter WT-LE erneut von hohen Wassertemperaturen beeinflusst werden.

Diese Leistungseinschränkungen können jedoch durch ein Nachrüsten der Kraftwerksblöcke mit einem Kühlturm oder weiteren Zellenkühlern vermieden bzw. vermindert werden. So wurden beispielsweise im Jahr 2009 am KKW Isar 1 „...infolge der Klimaerwärmung [...] die Zellenkühler saniert und erweitert“ (E.ON KERNKRAFT GMBH 2010, S. 18). Diese Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel sind ebenso für die KTKW mit identifizierter WT-LE, die erst nach 1980 in Betrieb gingen und somit voraussichtlich nach 2022 bzw. 2034 laufen werden, eine Möglichkeit zukünftig WT-LE zu vermeiden. Dies zeigen die KTKW am Main und an der Donau. Denn trotz signifikant positiver Trends in den WT können durch alternative Kühlverfahren wie beispielsweise der Ablauf- oder Kreislaufkühlung WT-LE vermieden werden (vgl. Abbildung 62). Eine WT-LE kann ebenso durch einen KWK-Betrieb reduziert oder vermieden werden. Denn ein Großteil der Abwärme muss nicht in die Atmosphäre oder Gewässer abgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.1.1.2 und 6.1). Allerdings ist dabei Voraussetzung, dass insbesondere in den warmen Sommermonaten, in denen kein oder wenig Heizbedarf bei Haushalten besteht, große Wärmeabnehmer wie Industriebetriebe in Kraftwerksnähe vorhanden sind.

Zukünftig könnten Großkraftwerke, die vom Netz genommen werden, durch kleinere, dezentrale Kraftwerke ersetzt werden. Denn kleinere thermische Kraftwerke haben erstens eine geringere Abwärmemenge abzuführen, und diese kann zweitens durch eine direkte oder indirekte Luftkühlung auch wirtschaftlich abgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.1.1.3). Kleine, dezentrale Kraftwerke hätten somit den Vorteil, dass diese nicht mehr zwangsläufig entlang von Flüssen stehen und keine Abwärme in die Vorfluter abgeben würden. Dadurch würden sie sich nicht wie die relativ nah aneinander stehenden KTKW mit WT-LE entlang des Rheins, des Neckars, der Weser und der Elbe durch die eingeleitete Abwärme beeinflussen (vgl. Abbildung 61 und Abschnitt 6.1).

Allerdings sind diese Punkte im Rahmen energiepolitischer und unternehmerischer Ziele zu betrachten. So sind in Deutschland nach wie Großkraftwerke geplant. Diese sollen teils an alten KTKW-Standorten teils an neuen Standorten und dabei zum größten Teil entlang von Flüssen gebaut werden, an denen bisher noch keine Großkraftwerke stehen (z. B. an der Fulda) (vgl. Abbildung 63). Über die Kühlsysteme und Kühlverfahren geplanter Kraftwerke liegen relativ wenige Informationen vor. Allerdings ist bei den geplanten Kraftwerken mit Informationen zu Kühlsystemen davon auszugehen, dass sie mit Kühlturm und damit mit Ablauf- oder Kreislaufkühlung betrieben werden können (vgl. Abschnitt 5.4). Dies ist beispielsweise für jeweils einen neuen, im Bau befindlichen

Block am Rheinlifendampfkraftwerk in Karlsruhe und am Großkraftwerk Mannheim der Fall (vgl. Abschnitt 2.1.1.3). Angesichts des zu erwartenden Anstiegs der mittleren Wassertemperaturen im Sommer in den Zeitreihen für die ZP 2011-2040 je nach Szenario und in allen Zeitreihen für die ZP 2011-2070 bzw. 2041-2070 aller drei Szenarien gegenüber der KNP (vgl. Abbildungen 58, 60 und 64), wäre die Berücksichtigung eines Kühlturms oder Zellenkühlers an allen neu geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW sinnvoll.

## 7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Frage, an welchen Kraftwerksstandorten wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen aufgetreten sind, kann mit dieser Arbeit eingeschränkt beantwortet werden, da seitens der Kraftwerksbetreiber Informationen über Leistungseinschränkungen als wettbewerbsrelevant eingestuft und nur zum Teil veröffentlicht werden. Mithilfe der Literaturrecherche, Medienanalyse und schriftlichen Befragung wurden zwar wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen bei Kraftwerken zwischen den Jahren 1976 und 2007 identifiziert. Allerdings kann kein Anspruch auf Vollständigkeit aller jemals aufgetretenen wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken erhoben werden. In telefonischen oder persönlichen Interviews mit Kraftwerksleitern könnten zusätzliche Informationen erhalten werden. Es zeigte sich jedoch, dass durch jede einzelne der drei Analysen zusätzliche Informationen über wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken in Deutschland gewonnen wurden. Somit liegt mit dieser Arbeit erstmalig eine umfassende und systematische Untersuchung dieser Thematik für Deutschland vor.

Die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung der wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen bei konventionellen thermischen Kraftwerken können gut mit der Kraftwerksleistung, dem -alter, dem Energieträger sowie dem verwendeten Kühlverfahren erklärt werden. Allerdings liegen die kraftwerksspezifischen Angaben nur auf Standortebene vor. Eine genaue Auswertung der Auswirkungen wassertemperaturbedingter Leistungseinschränkungen von Kraftwerken während Hitzeperioden auf die Versorgungssicherheit mit Elektrizität in Deutschland würde jedoch blockgenaue Angaben zum Kühlverfahren, zur Leistung und stundengenauen Angaben zur Höhe der WT-LE erfordern. Neben den Angaben zu wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen wären zusätzlich Informationen über andere Einflussfaktoren der Elektrizitätsproduktion wie beispielsweise der Nachfrage nach Strom im In- und Ausland (Importe und Exporte) oder den Strompreisen an der Strombörse in Leipzig notwendig. Allerdings liegen Daten zur Stromproduktion seitens der Kraftwerksbetreiber nicht öffentlich zugänglich vor. Somit können keine quantitativen Aussagen über die Versorgungssicherheit mit Elektrizität in Hitzeperioden getroffen werden. Allerdings liefern die Ergebnisse einen guten Überblick über betroffene Kraftwerke bezüglich ihrer Leistung, dem Alter, Energieträger, Kühlverfahren sowie dem Standort. Daraus wurden die am stärksten betroffenen Flüsse sowie Handlungsoptionen für bestehende und geplante Kraftwerke im Kontext des Klimawandels abgeleitet.

Bei der Interpretation der Entwicklung der rezenten Wassertemperaturen ist zu berücksichtigen, dass nicht-natürliche Trends die natürlichen Entwicklungen der Wassertemperaturen überlagern. Für detaillierte Untersuchungen der Wassertemperaturentwicklung deutscher Flüsse ist es daher notwendig, Informationen über die Historie der Messstationen, über die Messverfahren sowie die

Entwicklung der Umgebungsbedingungen in die Datenaufbereitung mit einzubeziehen. Für die Homogenisierung der Zeitreihen wäre es zudem von Vorteil, mehr Zeitreihen als Vergleichs- bzw. Referenzzeitreihen zur Verfügung zu haben. Erst quantitative Angaben über die Entwicklung nicht-natürlicher Einflussfaktoren wie beispielsweise die eingeleitete Kühlwassermenge und deren Auswirkung auf die Mischtemperaturen vor einer Messstation lassen quantitative Aussagen über den Anteil der natürlichen und nicht-natürlichen Änderung der Wassertemperaturen zu. Vorteil einer größeren Anzahl an Zeitreihen, die dasselbe Zeitintervall abdecken, wäre zudem, dass die Ergebnisse der Trendanalysen direkt vergleichbar wären. Somit können Aussagen zur Entwicklung der Wassertemperaturen eines Flusses getroffen werden. Die vorliegende Datengrundlage und Datenqualität lässt jedoch, unter Berücksichtigung eines nicht-natürlichen Anteils der Veränderung, Aussagen über die Tendenz der Wassertemperaturentwicklung deutscher Flüsse für die einzelnen Jahreszeiten zu.

Die Auswertung der Anzahl an Tagen pro Jahr mit extrem hohen Wassertemperaturen stellt einen hohen Anspruch an die Qualität der Wassertemperaturzeitreihen. Messfehler bzw. -ungenauigkeiten können zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen. Für weiterführende Extremwertstatistiken ist es daher von Bedeutung, die Wassertemperaturwerte mit denen benachbarter Zeitreihen zu vergleichen und die Ursachen möglicher Unterschiede in den Temperaturen zu identifizieren und zu eliminieren.

Die Trendergebnisse und die Ergebnisse der Mittelwertvergleiche weisen für alle Szenarien und Zukunftsperioden dieselbe Tendenz hin zu höheren zukünftigen Wassertemperaturen in allen Zeitreihen auf. Eine Ausnahme bildet lediglich das Trendergebnis für die ZP 2011-2040 des B1-Szenarios. Die Unsicherheiten der Ergebnisse liegen weniger in den Regressionsmodellen begründet als in der Unsicherheit wie sich das Klima tatsächlich verändern wird. Eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens der analysierten Trendergebnisse der Wassertemperaturen unter Annahme unterschiedlicher Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen kann nicht getroffen werden. Dies ist erst möglich, wenn mehrere Wassertemperatursimulationen auf Basis unterschiedlicher Lufttemperaturläufe verschiedener globaler und regionaler Klimamodelle durchgeführt werden. Hierzu könnten beispielsweise die simulierten Lufttemperaturen des REMO-BfG Laufs für das A1B-Szenario, die Realisationen des WETTREG oder die simulierten Lufttemperaturen globaler Klimamodelle herangezogen werden.

Die Lufttemperaturen erklären einen hohen Anteil der Varianzen in den Wassertemperaturen. Somit ist es gerechtfertigt, mittels logistischer Regressionsmodelle die Wassertemperaturen auf Basis von Lufttemperaturen zu simulieren. Allerdings ist bei der Interpretation der Trendergebnisse zu berücksichtigen, dass der Klimawandel zu einem veränderten Abflussregime der Flüsse führen kann. Das Abflussregime stellt eine der natürlichen Einflussgrößen auf die Wassertemperatur dar. In weiterführenden Untersuchungen der zukünftigen Entwicklung der Wassertemperaturen deutscher Flüsse ist daher von Interesse, wie sich die Abflussregime der einzelnen Flüsse im Kontext des Klimawandels ändern werden, und ob dies Auswirkungen auf die Wassertemperaturen haben wird. Allerdings sind hierzu flussspezifische hydrologische Modelle notwendig. Diese setzen eine einheitliche Methode voraus, um die Ergebnisse vergleichen zu können.

Mit dieser Arbeit wurden zum einen Kraftwerksstandorte mit wassertemperaturbedingten Leistungseinschränkungen identifiziert. Zum anderen ist aufgrund der Trendergebnisse mit steigenden Wassertemperaturen der Flüsse zu rechnen. Von Interesse für weitere Forschungsarbeiten ist, wie sich die Wassertemperaturentwicklung auf den Betrieb von Kühlsystemen und damit auf die Elektrizitätserzeugung der Kraftwerke im Kontext des Klimawandels auswirkt. Am EIFER finden

u. a. die in dieser Arbeit simulierten Wassertemperaturzeitreihen Verwendung in Kühlsystemmodellen. Somit können die Auswirkungen des Klimawandels auf die Kühlsysteme modelliert und die dadurch bedingten Änderungen der Kraftwerksleistung quantifiziert werden. Durch die Kopplung dieser Kühlsystemmodelle an ein Energiesystemmodell für Deutschland, sollen die Kosten von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel für den deutschen Kraftwerkspark quantifiziert werden. Eine Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel für einen bestehenden Kraftwerksstandort mit Durchlaufkühlung kann dabei beispielsweise der Bau eines Kühlturms sein. Aber auch die Berücksichtigung steigender Flusstemperaturen bei der Planung und Auslegung der Kühltürme an einem geplanten Kraftwerksstandort stellt eine Anpassungsmaßnahme dar. Eine weitere Anpassungsmaßnahme an steigende Wassertemperaturen deutscher Flüsse wäre, statt wenige große Kraftwerke mehrere kleinere, dezentrale Kraftwerke zu bauen, die einen geringeren oder keinen Kühlwasserbedarf haben.

## ANHANG I

Tabelle 21: Liste der bestehenden und geplanten bzw. im Bau befindlichen KTKW mit einer Leistung  $\geq 50 \text{ MW}_{\text{el,brutto}}$  in Deutschland.

Kraftwerksname	MW	Betriebsbeginn	Energieträger	Kuehl-system	Kuehl-betrieb	RW GK3	HW GK3
Frankfurt Oder	50	1996	Braunkohle	NK	k. A.	3876908	5812578
Duesseldorf-Henkel	50	1981-1990	Gas	KWK	KWK	3349297	5673165
Werk Wesseling	52	1996	Gas	TK	k. A.	3359229	5632688
Emsland Raffinerie	54	1996	Gas	TK	k. A.	3385166	5826196
HKW Schwerin-Sued	54	1994	Gas	TK	k. A.	3658693	5940719
EC Erdoelchemie	55	1969-1970	Oel	KWK/TK	KWK	3349137	5661175
Saegewerk Augsburg	55	k. A.	Gas	KWK/TK	KWK	3640661	5361784
Schwarze Pumpe	55	2009	Gas	k. A.	k. A.	3871716	5723279
Peißenberg	56	1987-1990	Oel	k. A.	k. A.	3655551	5297993
AVG Kraftwerk Koeln	56	1998	Restmuell/Biomasse	NK	k. A.	3356199	5653794
Blankenstein	57	2000	NA	NK	KK	3691951	5588496
Premnitz	58	1970	Steinkohle	k. A.	k. A.	3727909	5826885
Oberkirch	58	1980-1986	NA	KWK	KWK	3431849	5377430
Bielfeld-Ummeln	60	1973	Gas	KWK	KWK	3462060	5760959
Marl VEBA	60	1985	Steinkohle	KWK/TK	KWK	3367861	5727296
Offenbach-Andréstraße	64	1988	Steinkohle	NK	DK	3481767	5552551
Stuttgart-Gaisburg	65	1958-1971	Gas	KWK/NK	k. A.	3517087	5404784
Cottbus CHP	66	1999	Braunkohle	k. A.	k. A.	3868393	5746807
Papier- und Kartonfabrik Varel	66	1989-2002	Gas	KWK	KWK	3442559	5919219
Dessau	66	1996	Braunkohle	KWK	KWK	3722730	5748321
Neumuenster	68	1974-1997	Steinkohle	KWK/NK	KWK, KK	3564622	5994863
Rheinberg Werke	68	1996	Steinkohle	NK	DK, KK	3332507	5716907
Schwarze Pumpe SVZ	70	1997	Gas	NK	k. A.	3873643	5722523

Kraftwerksname	MW	Betriebsbeginn	Energieträger	Kuehl-system	Kuehl-betrieb	RW GK3	HW GK3
Frankfurt-Hoechst	70	2009	Ersatzbrennstoffe	KWK	k. A.	3466508	5549512
Wolfen	72	1997	Gas	KWK/TK	k. A.	3726493	5732376
Braunschweig	75	2010, im Bau	Erdgas	KWK	k. A.	3604195	5793236
Oberhausen-Friedrichstraße	75	1996	Gas	KWK/TK	KWK	3350452	5710712
Gera-Nord	76	1996	Gas	KWK/NK	KWK, KK	3715377	5645701
Neubrandenburg	77	1996	Gas	NK	DK	3784520	5945224
Buer	82	1985	Steinkohle	KWK	KWK	3361573	5719798
Wuppertal-Barmen	84	2005	Gas	NK	DK	3374472	5683021
Potsdam-Sued	84	1994	Gas	KWK	KWK	3780059	5811326
Halle-Trotha	85	1993	Gas	KWK/NK	KWK, DK	3704074	5714002
Deuben	86	1979-1990	Braunkohle	KWK/NK	KWK	3715801	5668696
Erfurt-Ost	86	1999	Gas	KWK	KWK	3642737	5655211
Koeln-Godorf	87	2004	Oel	KWK/NK	KWK	3357599	5637386
Audorf	90	1973	Oel	TK	k. A.	3545253	6017818
Itzehoe	90	1973	Oel	TK	k. A.	3516994	5939787
Dillingen	90	2009	Gichtgas	KWK	k. A.	3335903	5470510
Friedensbruecke	92	1966-2006	Gas	KWK/NK	KWK, DK	3566397	5518284
Fabrik Fortuna-Nord	93	1941-2008	Braunkohle	NK	AK	3335688	5648069
Braunschweig-Mitte	94	1984	Steinkohle	KWK/NK	KWK	3603545	5794742
Hausam	100	1982	Oel	TK	k. A.	3713073	5294289
Pforzheim	100	1969-1981	Steinkohle	NK/TK	100% DK	3475560	5416262
Elberfeld	100	1989	Steinkohle	NK	KWK, DK	3368772	5680746
Mider Raffinerie	101	1996	Oel	NK	k. A.	3710248	5687669
Hannover-Linden	102	1999	Gas	KWK/NK	KWK, DK	3548658	5804355
Muenster-Hafen	102	2005	Gas	KWK/TK	KWK	3405674	5758650
Hannover-Herrenhausen	106	1975	Gas	KWK/NK	KWK, DK	3546217	5807384
VEO Eisenhuettenstadt	110	1953	Gas	NK	KK	3885346	5795909
Mummsdorf-Phoenix	110	1968	Braunkohle	KWK/NK	KWK	3717674	5665829
Wedel	110	1972-1973	Gas	KWK/NK	DK	3548178	5937365
AKZO Obernburg	112	1996	Gas	NK	100% DK	3510943	5521887

Kraftwerksname	MW	Betriebsbeginn	Energieträger	Kuehl-system	Kuehl-betrieb	RW GK3	HW GK3
Konsortium Energieversorgung Opel	113	1999	Gas	KWK/NK	KWK, DK	3456964	5539896
Chemiepark Bitterfeld	114	1976/2000	Gas	KWK/NK	KWK	3728478	5726789
Saegewerk Schongau	116	1965-1989	Gas	KWK	KWK	3642507	5298190
Roemerbruecke	118	2004	Steinkohle	KWK/NK	KWK, DK	3355476	5455875
Rostock-Marienehe	120	1996	Gas	NK	k. A.	3701410	6003434
Burghausen	120	1987-2001	Gas	KWK	KWK	3783190	5343045
Karlsruhe-West	122	1985	Gas	KWK	KWK	3452341	5430821
Schwarzheide	124	1992-1996	Gas	KWK/NK	KWK	3838801	5716199
Leuna	127	1996	Gas	TK	KK	3709487	5691283
Halle-Dieselstraße	128	2005	Gas	KWK/NK	KWK, AK	3707933	5706616
Großkayna	129	1994	Oel	KWK	KWK	3704995	5687823
Niederaußem Bloecke G und H	130	2015	Braunkohle	NK	k. A.	3334030	5653474
Staßfurt	134	1996	Gas	KWK	KWK	3677130	5750992
Frankfurt-Niederrad	136	2005	Gas	NK	DK	3473443	5549926
Wolfsburg-Nord/Sued	140	1968-1999	Steinkohle	KWK/NK	KWK, DK	3621566	5812312
Brunsbuettel	140	2010	Ersatzbrennstoff	KWK	k. A.	3511770	5974283
Frankfurt Hoechst	143	2003	Steinkohle	KWK/NK	KWK, DK, AK	3466650	5550897
Flingern	145	1954-2000	Restmuell	KWK/NK	KWK	3347114	5678661
Berlin Lichterfelde	150	k. A.	Erdgas	k. A.	k. A.	3791755	5817425
Ahrensfelde	152	1990-1992	Gas	TK	k. A.	3810445	5836766
Shamrock	152	1957-1983	Steinkohle	KWK/NK	KWK	3373486	5711868
Berlin-Moabit	153	1972-1990	Steinkohle	KWK/NK	DK, AK	3794697	5831515
Ville-Berrenrath	158	1991	Braunkohle	KWK/NK	KWK	3346744	5638741
Muenchen-Freimann	162	1972	Gas	KWK/TK	KWK	3693043	5342002
Koeln-Merkenich	163	1969-2000	Gas	KWK/NK	k. A.	3357057	5655596
Solvay S.A. Bernburg Alkali	164	1994	Gas	KWK	KWK	3401901	5655088
Stuttgart-Muenster	164	1981	Steinkohle	KWK/NK	KWK, DK	3516047	5408231

Kraftwerksname	MW	Betriebsbeginn	Energieträger	Kuehl-system	Kuehl-betrieb	RW GK3	HW GK3
Kirchmoeser	165	1994	Gas	NK	KK	3732155	5812542
Berlin-Reuter	165	1953-1968	Steinkohle	NK	DK, AK	3788165	5830379
Moorburg	170	1980	Oel	TK	k. A.	3563063	5929087
Energie-Dienstleistungs-Zentrum - Kraftwerk Goldenberg	171	1991	Braunkohle	KWK/NK	KWK	3347950	5638242
Leipzig-Nord	172	1994	Gas	NK/TK	k. A.	3735174	5695792
Uerdingen Werke	173	1967-1969	Steinkohle	KWK	KWK, DK, KK	3337159	5694970
Raffinerie-Kraftwerk Leuna	174	1994	Oel	KWK/NK	KK	3709961	5691940
Flensburg	177	1971-1988	Braunkohle	KWK/NK	KWK	3527653	6074989
Hamel	187	1957-1979	Steinkohle	k. A.	k. A.	3526495	5773795
Berlin-Klingenberg	188	1981-1985	Braunkohle	KWK/NK	KWK, DK	3805290	5826584
Tiefstack	189	2007	Steinkohle	KWK/NK	KWK, DK	3570508	5933148
Jena-Sued	199	1995-1996	Gas	KWK/NK	KWK	3681770	5642982
Fabrik Frechen	202	1988	Braunkohle	KWK	KWK	3347319	5644235
Berlin-Charlottenburg	215	1975	Gas	KWK/NK	KWK, DK, AK	3792696	5829475
Kirchlengern	215	ca. 1905	Gas	k. A.	k. A.	3475934	5784580
Salzgitter	220	2010	Prozessgase	KWK	k. A.	3598012	5781892
Chemnitz-Nord	223	1986-1989	Braunkohle	KWK/NK	KWK	3775943	5642919
Nuernberg-Sandreuth	225	2005	Gas	KWK/NK	KWK	3649253	5479455
Industriepart Hoechst	225	2001	Gas	KWK/NK	KWK	3465316	5550061
Duisburg-Ruhrort	230	k. A.	Gas	k. A.	k. A.	3342194	5708623
Hagen-Kabel	235	1981-1982	Gas	KWK/NK	KK	3394916	5698228
Duisburg-Hamborn	240	2003	Grubengas	KWK/NK	k. A.	3343624	5708466
Frankfurt-West	244	1984-1995	Steinkohle	KWK/NK	KWK, DK	3475083	5551330
Wesseling BASF	246	1969-1999	Oel	KWK	k. A.	3355902	5634724
Bayer Chemiapark Leverkusen	250	1969-1988	Steinkohle	KWK	KWK	3358009	5654845
Flachstahl Salzgitter	253	1963	Gas	KWK/NK	k. A.	3598012	5781892
Wedel	260	1987	Steinkohle	NK	DK	3548178	5937365
Stade-Buetzfleth	268	1972-1983	Gas	KWK/NK	k. A.	3533617	5945385

Kraftwerksname	MW	Betriebsbeginn	Energieträger	Kuehl-system	Kuehl-betrieb	RW GK3	HW GK3
Brunsbuettel	268	1973-1974	Oel	NK	DK	3513374	5973600
Duisburg-Hochfeld	276	1975-1988	Steinkohle	KWK/NK	DK	3342711	5700932
Duisburg-Wanheim	280	1974-2005	Gas	KWK/NK	k. A.	3343541	5698697
Nossener Bruecke	285	1995	Gas	KWK/NK	k. A.	3830060	5666825
Berlin-Wilmersdorf	289	1976	Oel	KWK/NK	k. A.	3792392	5824865
Thyrow	300	1987-1990	Gas	TK	k. A.	3793984	5797297
Wolfsburg-West	300	1984-1985	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3619953	5813399
Schwedt Werke	300	1997	Oel	KWK/NK	KWK	3849072	5897509
Stoecken	300	1989	Steinkohle	KWK/NK	KK	3544288	5809622
Bremen-Hastedt	300	1972/1989	Steinkohle	KWK/NK	DK	3491547	5880787
Datteln	319	1964-1969	Steinkohle	NK	KK	3384351	5722730
Huntorf	321	1978	Gas	NK	k. A.	3460278	5895873
Hallendorf	342	1940-1966	Grubengas	KWK/NK	k. A.	3598012	5781892
Kiel	354	1970	Steinkohle	KWK/NK	KWK, DK	3576857	6023960
Obrigheim	357	1968	Uran	k. A.	k. A.	3510973	5469865
Bremen-Mittelsbueren	360	1974/1975/2002	Gas	KWK/NK	KWK, DK	3480879	5889366
Bremen-Farge	362	1969	Steinkohle	NK	DK	3467944	5896606
Knepper	363	1971	Steinkohle	NK	KK	3386228	5715479
Walheim	398	1964-1990	Steinkohle	NK	DK	3511558	5430608
Buschhaus	400	1985-1998	Braunkohle	NK	k. A.	3636059	5789673
Premnitz	400	2013/14	Gas	k. A.	k. A.	3727482	5827231
Frankfurt Griesheim	400	2010	Erdgas	k. A.	k. A.	3470624	5550716
Lausward	400	2012	Steinkohle	KWK, NK	DK	3341977	5678755
Muenchen-Nord	400	1992	Steinkohle	KWK/NK	DK	3695739	5341556
Kraftwerk Bocholt-Knapsack	400	2012	Gas	KWK	k. A.	3330859	5744630
Ludwigshafen-Sued	402	1997	Gas	KWK	KWK	3458454	5484443
Koeln-Niehl	405	2005	Gas	KWK/NK	k. A.	3358456	5651167
Marbach	412	1971-1974	Gas	NK	DK	3517381	5421066
Cuno Herdecke	424	2007	Gas	NK	DK	3389568	5697529
Ensdorf	430	1964-1971	Steinkohle	NK	k. A.	3338015	5465045
Bremen-Hafen	440	1968/1979	Steinkohle	NK	DK	3481862	5888230
Ludwigshafen-Mitte	440	2005	Gas	KWK	k. A.	3458654	5484402

Kraftwerksname	MW	Betriebsbeginn	Energieträger	Kuehl-system	Kuehl-betrieb	RW GK3	HW GK3
Huerth	450	2014	Braunkohle	NK	k. A.	3348052	5638103
Berlin-Lichterfelde	450	1971-1973	Gas	NK	DK, AK	3793154	5818522
Berlin-Mitte	460	1997	Gas	NK	DK	3800054	5828662
Voelklingen-Fenne	460	1982/1989	Steinkohle	KWK/NK	KWK, AK	3345797	5458782
Emden	470	1972	Restmuell/Biomasse	NK/TK	DK	3380758	5913355
Zolling	474	1985	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3707498	5372413
Rostock	520	1994	Steinkohle	KWK/NK	KK	3704945	5999869
Lausward	535	1967-2000	Gas	KWK/NK/TK	DK	3341977	5678755
Irsching 4	540	2011	Gas	NK	k. A.	3690882	5406217
Robert Frank	542	1973	Gas	NK	DK	3507828	5823540
Wilhemshaven	550	2015	Steinkohle	k. A.	k. A.	3443621	5937048
Bayer Dormagen	580	2000	Gas	KWK/NK	KWK	3348971	5663566
Chemiepark Marl	588	1964-1984	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3368744	5728763
Duisburg-Walsum	600	1959-1988	Steinkohle	KWK/NK	DK	3341342	5712488
Berlin-Reuter West	600	1979-1989	Steinkohle	KWK/NK	KK	3787740	5830915
Profen	600	2015	Braunkohle	k. A.	k. A.	3721381	5672938
Duisburg-Huckingen	614	1975-1976	Grubengas	KWK/NK	k. A.	3342185	5695534
Westfalen	625	1963-1969	Steinkohle	NK	k. A.	3428582	5728124
Luenen	625	1962-1970	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3395319	5721056
Stade	662	1976	Uran	k. A.	k. A.	3535122	5943139
Boxberg Block R	675	2011	Braunkohle	NK	k. A.	3887215	5710723
Werdohl-Elverlingsen	700	1975-1982	Steinkohle	NK	DK, KK	3409558	5682788
Muenchen-Sued	700	1979-2005	Gas	KWK/NK	DK	3690060	5333395
Voerde West	700	1970-1971	Steinkohle	NK	DK	3339697	5718111
Quierschied-Weiher	724	1976	Steinkohle	KWK/NK	KK	3357800	5467151
Pleinting	725	1976	Oel	NK	DK	3802682	5400214
Irsching	735	1974	Gas	NK	DK, AK	3689364	5406360
Bergkamen	747	1981	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3402649	5723078
Luenen	750	2012	Steinkohle	NK	k. A.	3393655	5720649
Duisburg-Walsum Block 10	750	2010	Steinkohle	NK	k. A.	3340990	5712626

Kraftwerksname	MW	Betriebsbeginn	Energie-treager	Kuehl-system	Kuehl-betrieb	RW GK3	HW GK3
Krefeld	750	2013/14	Steinkohle	KWK	k. A.	3337130	5695147
Mehrum	752	1979	Steinkohle	NK	KK	3574603	5798043
Ibbenbueren	752	1985	Steinkohle	NK	KK	3415014	5795585
Mainz-Wiesbaden 1 und 2	760	1972-2001	Gas	NK	DK	3445609	5543608
Gersteinwerk Block K Werne	770	1984	Steinkohle	NK	k. A.	3410815	5727214
Bexbach	773	1983	Steinkohle	NK	KK	3371860	5470977
Brunsbuettel	800	2010/2011	Steinkohle	k. A.	k. A.	3512799	5973281
Wilhemshaven	800	2012	Steinkohle	NK	DK	3443621	5937048
Brunsbuettel	800	2012/2013/2014	Steinkohle	NK	DK	3513295	5973595
Stade	800	2012	Steinkohle	NK	DK	3533305	5946909
Chemiepark Knapsack-Huerth	800	2007	Gas	NK	k. A.	3349218	5638280
Eisenhuettenstadt	800	2010	Gas	k. A.	k. A.	3884881	5796058
Kiel	800	2017	Steinkohle	NK	DK	3576870	6023910
Brunsbuettel	806	1976	Uran	NK	DK	3513374	5973600
Wilhelmshaven	820	1976	Steinkohle	NK	DK	3443621	5937048
Mainz Wiesbaden	823	2013/2014	Steinkohle	KWK, NK	DK, KK	3445713	5543397
Neckarwestheim 1	840	1976	Uran	NK	DK, AK, KK, MB	3512981	5433719
Ingolstadt	840	1973-1974	Oel	NK	DK, KK	3684292	5405790
Franken I	843	1973/1976	Gas	KWK/NK	DK, AK, KK, MB	3645974	5478053
Hamm-Uentrop	850	2007	Gas	KWK/NK	KK	3426475	5727218
Gemeinschaftskraftwerk Irsching Block 5	860	2009	Gas	NK	k. A.	3690882	5406217
Lingen	876	2009	Erdgas	KWK/NK	k. A.	3384694	5817590
Veltheim	885	1965-1975	Steinkohle	NK	DK	3495251	5783785
Doerpen	900	2013	Steinkohle	KWK/NK	KK	3391105	5873240
Marl	900	k. A.	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3368013	5730052
RDK Karlsruhe	910	1985-1998	Steinkohle	KWK/NK	DK	3449177	5430928
Mannheim Block 9	911	2013	Steinkohle	KWK, NK	DK, KK	3463126	5478716
Rheinhafen-Dampfkraftwerk	912	2011	Steinkohle	NK	DK, KK	3449002	5430697
Isar 1	912	1977	Uran	NK	DK, AK, KK, MB	3742586	5390668

Kraftwerksname	MW	Betriebsbeginn	Energieträger	Kuehl-system	Kuehl-betrieb	RW GK3	HW GK3
Heyden	923	1987	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3499733	5805189
Philippsburg 1	926	1979	Uran	NK	MB	3459916	5456894
Herne	950	1963-1989	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3373938	5714067
Schkopau	960	1996	Braunkohle	KWK/NK	KK	3705080	5700274
Emsland	974	1974-1975	Gas	KWK/NK	k. A.	3384313	5818267
Heilbronn	1000	1958-1985	Steinkohle	KWK/NK	DK	3515303	5448283
Stade	1000	2014	Steinkohle	KWK, NK	k. A.	3533305	5946909
Kraftwerke der HEW	1001	1970	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Datteln 4	1100	2011	Steinkohle	KWK, NK	k. A.	3385866	5724373
Stade	1100	2014	Steinkohle	NK	DK	3533305	5946909
Mecklar-Meckbach	1100	2013	Gas	k. A.	k. A.	3554197	5642574
Staudinger Bock 6	1100	2013	Steinkohle	KWK, NK	KK	3496581	5550074
Lubmin I	1200	2009	Gas	NK	DK	3804270	6011182
Lubmin II	1200	k. A.	Gas	NK	DK	3804270	6011182
Biblis 1	1240	1974	Uran	NK	k. A.	3457865	5507888
Altbach-Deizisau	1270	1972-1997	Steinkohle	KWK/NK	k. A.	3527587	5398076
Biblis 2	1285	1976	Uran	NK	k. A.	3457865	5507888
Gundremmingen B	1344	1984	Uran	NK	KK	3603890	5375131
Gundremmingen C	1344	1984	Uran	NK	KK	3603890	5375131
Grafenrheinfeld	1345	1981	Uran	NK	KK	3585860	5541366
Gersteinwerk	1350	1972- 1974	Gas	NK	k. A.	3410815	5727214
Neckarwestheim 2	1395	1989	Uran	NK	KK	3512981	5433719
Emsland	1400	1988	Uran	NK	KK	3386282	5816742
Kruemmel	1402	1983	Uran	NK	DK	3593515	5920698
Unterweser	1410	1978	Uran	NK	DK	3464945	5922027
Grohnde	1430	1985	Uran	NK	MB	3526234	5768002
Brokdorf	1440	1986	Uran	NK	DK	3522394	5969063
Mannheim	1455	1966-1993	Steinkohle	NK	DK	3463047	5478993
Philippsburg 2	1458	1985	Uran	NK	MB	3459916	5456894
Isar 2	1475	1988	Uran	NK	KK	3742586	5390668
Voerde	1522	1982-1985	Steinkohle	NK	KK	3339697	5718111
Hamm	1600	2011/2012	Steinkohle	NK	KK	3415132	5727455
Lubmin	1600	2012	Kohle	NK	DK	3804270	6011182
Kraftwerk Westfalen Bloecke D und E	1600	2012	Steinkohle	NK	KK	3428993	5727292

<b>Kraftwerksname</b>	<b>MW</b>	<b>Betriebsbeginn</b>	<b>Energieträger</b>	<b>Kuehl-system</b>	<b>Kuehl-betrieb</b>	<b>RW GK3</b>	<b>HW GK3</b>
Emden	1600	2015	Steinkohle	k. A.	k. A.	3373181	5913261
Arneburg	1600	2014/2015	Steinkohle	NK	k. A.	3703526	5841357
Schwarze Pumpe	1600	1997-1998	Braunkohle	NK	KK	3870650	5724211
Hamburg-Moorburg	1640	2012	Steinkohle	KWK, NK	KK	3562835	5929136
Brunsbuettel	1800	2010	Steinkohle	NK	DK	3513289	5973626
Staudinger	1850	1965-1992	Steinkohle	NK	DK	3497625	5549523
Lippendorf	1866	1999-2000	Braunkohle	KWK/NK	KK	3736231	5678550
Boxberg	1907	1978-2000	Braunkohle	NK	KK	3888236	5712696
Grevenbroich-Neurath Bloecke F/G	2100	2010	Braunkohle	NK	KK	3332758	5658106
Neurath	2208	1972-1976	Braunkohle	KWK/NK	KK	3330454	5660776
Scholven	2220	1968/1971/1979	Steinkohle	KWK/NK	KK	3361573	5719798
Frimmersdorf	2254	1959-1970	Braunkohle	KWK/NK	KK	3330454	5660776
Weisweiler	2293	1955-1975	Braunkohle	NK	KK	3310675	5636639
Jaenschwalde	3010	1981-1988	Braunkohle	KWK/NK	KK	3873877	5760192
Niederaußem	3801	1962-2003	Braunkohle	NK	KK	3336283	5653002

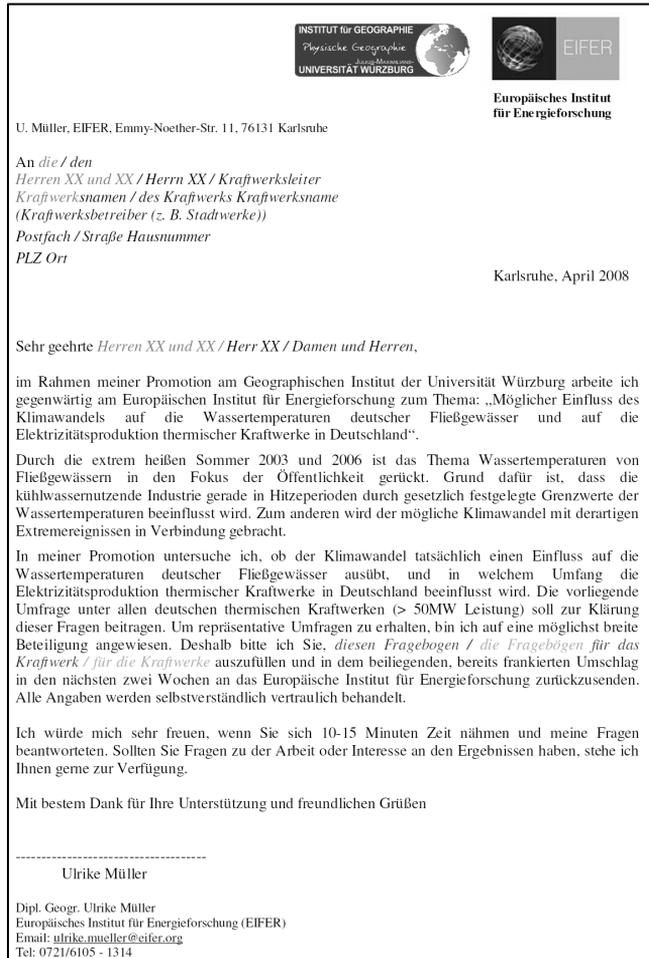


Abbildung 65: Anschreiben für die schriftliche Befragung der KTKW-Betreiber.<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Namensänderung Müller zu Strauch zwischen Abgabe der Dissertation und der vorliegenden Veröffentlichung.

INSTITUT FÜR GEGENSTÄNDE  
 Energie- und Umwelttechnik  
 UNIVERSITÄT WÜRZBURG

### Fragebogen



1) **Wie hoch ist die gesamte elektrische Brutto- und Nettoleistung des Kraftwerks?**  
 Bruttoleistung \_\_\_\_\_ MW    Nettoleistung \_\_\_\_\_ MW

2) **Wie hoch ist die durchschnittliche jährliche Elektrizitätserzeugung des Kraftwerks?**  
 \_\_\_\_\_ kWh

3) **Wie viele Blöcke sind am Kraftwerksstandort insgesamt vorhanden?**  
 Blockanzahl \_\_\_\_\_

4) **Wie viele der Blöcke werden mit welchem Brennstoff und in welchem Lastbereich gefahren?**

Energieträger	Blockanzahl in Grundlastbetrieb	Blockanzahl in Mittellastbetrieb	Blockanzahl in Spitzenlastbetrieb
Steinkohle			
Braunkohle			
Uran			
Gas			
Grubengas			
Öl			
Ersatzbrennstoffe			
Restmüll / Biomasse			

5) **Welches Kühlsystem kommt am Kraftwerk zum Einsatz?**

a) **Luftgekühlt**

Ansaugluft

Trockenkühlturm, Anzahl \_\_\_\_\_

b) **Wassergekühlt**

Durchlaufkühlung zu \_\_\_\_\_% der durchschnittlichen jährlichen Zeitverfügbarkeit

Rücklaufkühlung zu \_\_\_\_\_% der durchschnittlichen jährlichen Zeitverfügbarkeit

Kreislaufkühlung zu \_\_\_\_\_% der durchschnittlichen jährlichen Zeitverfügbarkeit

Mischbetrieb zu \_\_\_\_\_% der durchschnittlichen jährlichen Zeitverfügbarkeit

*Falls Ihr Kraftwerk wassergekühlt ist, fahren Sie bitte mit Frage 6 fort, ansonsten ist der Fragebogen an dieser Stelle beendet.*

6) **Welche Kühlturmtypen kommen am Kraftwerksstandort zum Einsatz?**

Naturzugkühlturm, Anzahl \_\_\_\_\_

Zellenkühler, Anzahl \_\_\_\_\_

Hybridkühlturm, Anzahl \_\_\_\_\_

7) **In welches Oberflächengewässer wird das Kühlwasser rückgeleitet?**  
 Gewässername \_\_\_\_\_

1/3

Abbildung 66: Fragebogen (1/3) der schriftlichen Befragung der KTKW-Betreiber.

INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE  
 Historische Geographie  
 UNIVERSITÄT WÜRZBURG

## Fragebogen

**8) Woher wird das Kühlwasser bezogen?**

Oberflächengewässer, Gewässername \_\_\_\_\_  
 Wasserwerke/Trinkwasser  
 Grundwasser  
 Tagebau  
 Sonstige Kühlwasserbezugsquelle \_\_\_\_\_

**9) Wie hoch ist der Kühlwasserbedarf in m<sup>3</sup> pro Zeiteinheit (Sekunde, Minute, Stunde, Tag)?**

Angaben beziehen sich auf  Volllastbetrieb  \_\_\_\_\_MW Leistung

Durchlaufkühlung \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/  
 Rücklaufkühlung \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/  
 Kreislaufkühlung \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/  
 Mischbetrieb \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/

**10) Wie hoch ist die Kühlwassereintragsmenge in m<sup>3</sup> pro Zeiteinheit (Sekunde, Minute, Stunde, Tag) in Abhängigkeit des Kühlsystems?**

Angabe bezieht sich auf  Volllastbetrieb  \_\_\_\_\_MW Leistung

Einleitmenge \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/  
 bei Durchlaufkühlung  
 Einleitmenge \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/  
 bei Rücklaufkühlung  
 Einleitmenge \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/  
 bei Kreislaufkühlung  
 Einleitmenge \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>/  
 im Mischbetrieb

**11) Wie hoch ist die durchschnittliche Kühlwassereintragsmenge in °C in Abhängigkeit des Kühlsystems?**

Angabe bezieht sich auf  Volllastbetrieb  \_\_\_\_\_MW Leistung

Einleittemperatur \_\_\_\_\_ °C bei Durchlaufkühlung  
 Einleittemperatur \_\_\_\_\_ °C bei Rücklaufkühlung  
 Einleittemperatur \_\_\_\_\_ °C bei Kreislaufkühlung  
 Einleittemperatur \_\_\_\_\_ °C im Mischbetrieb

**12) Um wie viel Kelvin wird der Vorfluter nach Kühlwassereintragsmenge im Mittel in Abhängigkeit des Kühlsystems aufgewärmt?**

Angabe bezieht sich auf  Volllastbetrieb  \_\_\_\_\_MW Leistung

Aufwärmspanne \_\_\_\_\_ K bei Durchlaufkühlung  
 Aufwärmspanne \_\_\_\_\_ K bei Rücklaufkühlung  
 Aufwärmspanne \_\_\_\_\_ K im Mischbetrieb

**13) Wie hoch ist der durchschnittliche Verdunstungsverlust in Liter pro Zeiteinheit (Sekunde, Minute, Stunde, Tag) bei Kühlmittelumsatz in Abhängigkeit des Kühlsystems?**

Angabe bezieht sich auf  Volllastbetrieb  \_\_\_\_\_MW Leistung

Verdunstungsverlust \_\_\_\_\_ l/  
 bei Rücklaufkühlung  
 Verdunstungsverlust \_\_\_\_\_ l/  
 bei Kreislaufkühlung  
 Verdunstungsverlust \_\_\_\_\_ l/  
 im Mischbetrieb

2/3

Abbildung 67: Fragebogen (2/3) der schriftlichen Befragung der KTKW-Betreiber.

INSTITUT FÜR GEOLOGIE  
 Wasserbau-Geotechnik  
 UNIVERSITÄT WÜRZBURG

### Fragebogen

**14) Welche wasserrechtlichen Grenzwerte gelten für das Kraftwerk / die Kraftwerksblöcke in Abhängigkeit des Kühlsystems?**

Block	Max. Mischtemp. nach Einleitung in °C	Max. Aufwärmspanne des Vorfluters in K	Max. Einleittemp. in °C (Durchlaufkühlung)	Max. Einleittemp. in °C (Rücklaufkühlung)	Max. Einleittemp. in °C (Kreislaufkühlung)	Max. Kühlwasserentnahmemenge in m³/s	Mindestabfluss des Vorfluters in m³/s
1							
2							
3							
4							

**15) Traten in der Vergangenheit Leistungseinschränkungen ausschließlich aufgrund wasserrechtlicher Bestimmungen bezüglich der Wassertemperatur oder des Abflusses auf?**

		Zeitraum in einem Jahr (von T/M/J bis T/M/J) oder Anzahl der Tage/Wochen eines Jahres	Ø Reduktion in % der Nettoleistung	tags	nachts
Ursache	Wassertemperatur				
	Niedrigwasser				

Keine Angabe, weil Daten vertraulich sind.  
 Es traten bisher keine Einschränkungen auf.

**16) Ist ein neues Kühlsystem am Kraftwerksstandort in Planung oder in Bau?**

ja, folgendes Kühlsystem:  
 Kühlturm, Kühlturmtyp \_\_\_\_\_, Anzahl \_\_\_\_\_  
 Zellenkühler, Anzahl \_\_\_\_\_  
 sonstiges Kühlsystem \_\_\_\_\_, Anzahl \_\_\_\_\_  
 nein

**17) Wer misst die Wassertemperatur vor und nach der Einleitung?**

Kraftwerksbetreiber  
 Behörde

Ist Ihr Unternehmen bereit, die Wassertemperaturzeitreihen für Analysen im Rahmen meiner Forschungsarbeit zur Verfügung zu stellen?

ja  
 nein, weil \_\_\_\_\_

**Vielen Dank für Ihre Unterstützung!**

Dipl. Geogr. Ulrike Müller, Email: [mueller@eifer.uka.de](mailto:mueller@eifer.uka.de), Tel: 0721/6105 – 1314

3/3

Abbildung 68: Fragebogen (3/3) der schriftlichen Befragung der KTKW-Betreiber.

Tabelle 22: Liste der WT-Zeitreihen mit Anzahl der Datenlücken, die  $\leq 32$  Tage,  $> 32$  und  $\leq 365$  Tage sowie  $> 365$  Tage sind; prozentualer Anteil fehlender Werte an gesamten Zeitreihe jeweils vor der zeitlich gewichteten und räumlichen Interpolation; WT-Zeitreihe, die für die räumliche Interpolation mittels einer einfachen, linearen Regression (ELRM) herangezogen wurde mit Angabe des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$ .

Zeitreihen				nach Eliminierung negativer, extrem hoher und nicht plausibler Werte				nach zeitlich gewichteter Interpolation	räumliche Interpolation mittels ELRM		
Nr.	Zeitreihe	Beginn	Ende	max. Datenlücklänge in Tagen	Anzahl der Lücken mit einer Länge			Fehlende Werte in %	Fehlende Werte in %	Zeitreihe	$R^2$
					$\leq 32$ Tage	$> 32$ und $\leq 365$ Tage	$> 365$ Tage				
1	Lenggries	01.01.1981	31.12.2006	1	2	0	0	0,0	0,0		
2	Muenchen	01.01.1981	31.12.2006	12	31	0	0	0,7	0,0		
3	Landshut_Regensburg	01.01.1981	31.12.2006	7	18	0	0	0,5	0,0		
4	Immendingen	01.01.1985	31.12.2007	126	48	8	0	8,7	5,8	Ingolstadt	0,9
5	Ulm_Boefingen	01.01.1979	31.12.1998	343	50	5	0	18,1	12,7	Ingolstadt	0,9
6	Ingolstadt	01.01.1981	31.12.2006	8	9	0	0	0,3	0,0		
7	Regensburg	01.01.1987	31.12.2007	366	25	2	1	15,8	13,5	Vilshofen	1,0
8	Deggendorf	01.01.1981	31.12.2006	28	10	0	0	0,6	0,0		
9	Vilshofen	01.01.1981	31.12.2006	8	8	0	0	0,2	0,0		
10	Passau	01.01.1981	31.12.2006	5	9	0	0	0,2	0,0		
11	Rielasingen	01.01.1983	31.12.2007	147	31	3	0	5,3	3,1	Breisach	0,8
12	Breisach	01.01.1984	31.12.2007	65	55	5	0	6,3	2,6	Worms	1,0
13	Karlsruhe	01.01.1988	31.12.2007	71	30	3	0	3,8	1,8	Breisach	1,0
14	Worms	01.01.1976	31.12.2005	577	32	1	1	6,8	6,0	Biblis	1,0
15	Biblis	01.01.1975	31.12.2007	1	1	0	0	0,0	0,0		
16	Kaub	01.01.1979	31.12.2007	78	3	1	0	0,9	0,7	Koblenz_WUK	1,0
17	Koblenz	01.01.1982	31.12.2007	579	22	4	2	15,5	1,9	Kaub	1,0
18	Koblenz_WUK	01.01.1978	31.12.2007	69	76	7	0	6,2	13,1	Kaub	1,0
19	Koeln	01.01.1985	31.12.2007	0	0	0	0	0,0	0,0		

Zeitreihen				nach Eliminierung negativer, extrem hoher und nicht plausibler Werte				nach zeitlich gewich- teter Inter- polation		räumliche Interpolation mittels ELRM	
					Anzahl der Lücken mit einer Länge						
20	Wendlingen	01.01.1987	31.12.2007	276	84	2	0	8,7	4,5	Hofen	1,0
21	Hofen	01.01.1983	31.12.2006	58	80	1	0	5,2	0,7	Gundelsheim	1,0
22	Poppenweiler	01.01.1975	31.12.2007	730	56	8	1	13,4	10,3	Trunstadt	0,9
23	Besigheim	01.01.1975	31.12.2007	182	58	8	0	7,5	4,6	Poppen- weiler	0,9
24	Stein	01.01.1981	31.12.2007	159	38	4	0	5,2	3,7	Gundelsheim	0,9
25	Gundelsheim	01.01.1981	31.12.2007	0	0	0	0	0,0	0,0		
26	Rockenau	01.01.1977	31.12.2007	71	95	6	0	7,2	1,9	Mannheim	1,0
27	Mannheim	01.01.1977	31.12.2006	1045	104	7	1	17,5	12,7	Rockenau	1,0
28	Kemmern	01.01.1981	31.12.2007	10	9	0	0	0,3	0,0		
29	Trunstadt	01.01.1971	31.12.2007	15	3	0	0	0,2	0,0		
30	Schweinfurt_ Pegel	01.01.1971	31.12.2007	15	27	0	0	0,4	0,0		
31	Schweinfurt	01.01.1981	31.12.2006	10	4	0	0	0,2	0,0		
32	Wuerzburg	01.01.1971	31.12.2007	31	7	4	0	1,1	0,0		
33	Erlabrunn	01.01.1977	31.12.2006	731	17	0	2	11,2	10,3	Wuerzburg	1,0
34	Steinbach	01.01.1971	31.12.2007	181	10	2	0	1,8	1,3	Kleinheu- bach_P_Kahl	1,0
35	Rothenfels	01.01.1977	31.12.2006	326	14	1	0	5,6	14,6	Kleinheu- bach_P_Kahl	1,0
36	Kleinheubach _P_Kahl	01.01.1970	31.12.2007	31	8	1	0	0,5	0,0		
37	Kleinheubach Kahl	01.01.1981	31.12.2006	4	1	0	0	0,0	0,0		
38	Kleinostheim	01.01.1987	31.12.2007	252	38	3	0	7,5	4,1	Kleinheu- bach	1,0
39	FrankfurtM_ Osthafen	01.01.1971	31.12.2007	212	0	4	0	2,7	2,0	Kleinostheim	1,0
40	Raunheim	01.01.1980	31.12.2007	365	5	0	0	3,9	3,6	FrankfurtM_ Osthafen	1,0
41	Saarbruecken	01.01.1988	31.12.2007	549	72	0	1	12,2	10,3	Lisdorf	0,9
42	Lisdorf	01.01.1988	31.12.2007	2225	7	2	2	46,5	45,1	Biblis	1,0
43	Kanzem	01.01.1988	31.12.2007	1369	41	9	2	43,7	16,1	Lisdorf	1,0
44	Terborg	01.01.1988	31.12.2007	13	51	0	0	1,5	0,0		
45	Allendorf	01.01.1986	31.12.2007	365	17	4	0	11,7	10,9	Hemeln	0,9

Zeitreihen				nach Eliminierung negativer, extrem hoher und nicht plausibler Werte					nach zeitlich gewichteter Interpolation	räumliche Interpolation mittels ELRM	
					Anzahl der Lücken mit einer Länge						
46	Hemeln	01.01.1982	31.12.2007	70	176	5	0	9,6	2,6	Emmerthal	1,0
47	Emmerthal	01.01.1986	31.12.2007	1458	9	7	1	21,5	20,7	Porta	0,9
48	Oldendorf	01.01.1982	31.12.2003	145	182	4	0	12,1	4,1	Porta	0,8
49	Porta	01.01.1984	31.12.2006	24	250	0	0	10,3	0,0		
50	Petershagen	01.01.1984	31.12.2006	23	237	0	0	8,9	0,0		
51	Drakenburg	01.01.1982	31.12.2007	258	74	3	0	7,5	5,0	Petershagen	1,0
52	Brake	01.01.1984	31.12.2007	82	79	8	0	9,1	4,0	Petershagen	0,9
53	Magwitz	01.01.1956	31.12.1978	1096	1	0	1	12,5	13,0	Bautzen	0,9
54	Zwickau Poelbitz	01.01.1976	31.12.2003	365	72	1	0	9,7	7,5	Bautzen	0,9
55	Erlin	01.11.1986	31.10.2006	31	58	1	0	2,3	0,0		
56	Golzern	01.01.1986	31.12.2005	462	45	2	1	14,1	13,0	BadDueben	1,0
57	BadDueben	01.01.1986	31.12.2005	7	63	0	0	1,4	0,0		
58	Bautzen	01.01.1965	31.12.1998	366	146	1	1	15,6	8,8	Schirgiswalde	1,0
59	Schirgiswalde	01.01.1976	31.12.1998	365	77	2	0	10,3	5,7	Bautzen	1,0
60	Dresden	01.01.1948	31.12.1993	5	25	0	0	0,3	0,0		
61	Schnackenburg	01.01.1980	31.12.2006	127	183	6	0	8,2	1,2	Dresden	1,0
62	Lauenburg	01.01.1975	31.12.2000	133	119	23	0	25,1	19,7	Dresden	1,0
63	Hamburg_Bunthaus	01.01.1978	31.12.2006	1826	122	9	1	29,6	26,4	Schnackenburg	1,0
64	Hamburg_Seemannshoeft	01.01.1978	31.12.2006	4748	125	2	1	49,1	46,5	Hamburg_Bunthaus	1,0
65	Eisenhuettenstadt	01.01.1986	31.12.2005	366	7	1	1	5,4	5,0	Kietz	1,0
66	FrankfurtO	01.01.1948	31.12.2004	79	59	3	0	2,3	0,3	Eisenhuettenstadt	1,0
67	Kietz	01.01.1981	31.12.2005	35	35	1	0	1,8	0,4	Kienitz	1,0
68	Kienitz	01.01.1981	31.12.2005	5801	54	2	2	39,2	0,5	Kietz	1,0
69	GrNeuendorf	01.01.1970	31.12.2005	517	79	13	1	12,2	8,6	FrankfurtO	1,0
70	Neuglietzen	01.01.1976	31.12.2005	1053	59	4	1	13,1	10,9	FrankfurtO	1,0

Zeitreihen				nach Eliminierung negativer, extrem hoher und nicht plausibler Werte				nach zeitlich gewichteter Interpolation	räumliche Interpolation mittels ELRM		
					Anzahl der Lücken mit einer Länge						
71	Hohensaaten	01.01.1981	31.12.2005	1096	37	0	2	20,2	20,0	Neuglietzen	1,0
72	Gartz	01.01.1952	31.12.1973	6940	87	12	1	40,1	6,7	FrankfurtO	1,0

Tabelle 23: Liste der 72 WT-Testzeitreihen und den entsprechenden WT-Vergleichsreihen zur Bildung der WT-Referenzreihen für den SHNT nach ALEXANDERSSON (1986).

Nr.	WT-Testreihe	WT-Referenzreihe aus dem mit $r^2$ gewichteten Mittel der Vergleichsreihen				
1	Lenggries	Muenchen	Landshut_Regensburg			
2	Muenchen		Landshut_Regensburg			
3	Landshut_Regensburg	Muenchen				
4	Immendingen	Deggendorf	Vilshofen	Passau		
5	Ulm_Boefingen	Deggendorf	Vilshofen	Passau		
6	Ingolstadt	Deggendorf	Vilshofen	Passau		
7	Regensburg	Deggendorf	Vilshofen	Passau		
8	Deggendorf		Vilshofen	Passau		
9	Vilshofen	Deggendorf		Passau		
10	Passau	Deggendorf	Vilshofen			
11	Rielasingen	Karlsruhe	Biblis	Kaub	Koblenz_WUK	
12	Breisach	Karlsruhe	Biblis	Kaub	Koblenz_WUK	
13	Karlsruhe		Biblis	Kaub	Koblenz_WUK	
14	Worms	Karlsruhe	Biblis	Kaub	Koblenz_WUK	
15	Biblis	Karlsruhe		Kaub	Koblenz_WUK	
16	Kaub	Karlsruhe	Biblis		Koblenz_WUK	
17	Koblenz	Karlsruhe	Biblis	Kaub	Koblenz_WUK	
18	Koblenz_WUK	Karlsruhe	Biblis	Kaub		
19	Koeln	Karlsruhe	Biblis	Kaub	Koblenz_WUK	
20	Wendlingen		Gundelsheim	Poppenweiler		
21	Hofen	Wendlingen	Gundelsheim	Poppenweiler		

Nr.	WT-Testreihe	WT-Referenzreihe aus dem mit $r^2$ gewichteten Mittel der Vergleichsreihen				
22	Poppenweiler	Wendlingen	Gundelsheim			
23	Besigheim	Wendlingen	Gundelsheim	Poppenweiler		
24	Stein	Wendlingen	Gundelsheim	Poppenweiler		
25	Gundelsheim	Wendlingen		Poppenweiler		
26	Rockenau	Wendlingen	Gundelsheim	Poppenweiler		
27	Mannheim	Wendlingen	Gundelsheim	Poppenweiler		
28	Kemmern		Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
29	Trunstadt	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
30	Schweinfurt_Pegel	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
31	Schweinfurt	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
32	Wuerzburg	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
33	Erlabrunn	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
34	Steinbach	Kemmern		Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
35	Rothenfels	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
36	Kleinheubach_P_Kahl	Kemmern	Steinbach		Kleinheubach_Kahl	Raunheim
37	Kleinheubach_Kahl	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl		Raunheim
38	Kleinostheim	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
39	FrankfurtM_Osthafen	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	Raunheim
40	Raunheim	Kemmern	Steinbach	Kleinheubach_P_Kahl	Kleinheubach_Kahl	
41	Saarbruecken	Lisdorf	Kanzem			
42	Lisdorf	Kanzem				
43	Kanzem	Lisdorf				
44	Terborg	Hemeln	Porta	Drakenburg		
45	Allendorf	Hemeln	Porta	Drakenburg		
46	Hemeln		Porta	Drakenburg		
47	Emmerthal	Hemeln	Porta	Drakenburg		
48	Oldendorf	Hemeln	Porta	Drakenburg		
49	Porta	Hemeln		Drakenburg		
50	Petershagen	Hemeln	Porta	Drakenburg		
51	Drakenburg	Hemeln	Porta			

Nr.	WT-Testreihe	WT-Referenzreihe aus dem mit $r^2$ gewichteten Mittel der Vergleichsreihen				
52	Brake	Hemeln	Porta	Drakenburg		
53	Magwitz	Zwickau Poelbitz	Bautzen	Schirgiswalde	Dresden	
54	ZwickauPoelbitz	Zwickau Poelbitz	Bautzen	Schirgiswalde	Dresden	
55	Erlin	Zwickau Poelbitz	Bautzen	Schirgiswalde	Dresden	
56	Golzern	Zwickau Poelbitz	Bautzen	Schirgiswalde	Dresden	
57	BadDueben	Zwickau Poelbitz	Bautzen	Schirgiswalde	Dresden	
58	Bautzen	Zwickau Poelbitz		Schirgiswalde	Dresden	
59	Schirgiswalde	Zwickau Poelbitz	Bautzen		Dresden	
60	Dresden	Schnackenburg	Lauenburg	Hamburg_Bunthaus	Hamburg_ Seemannshoeft	
61	Schnackenburg	Schnackenburg	Lauenburg	Hamburg_Bunthaus	Hamburg_ Seemannshoeft	
62	Lauenburg	Schnackenburg		Hamburg_Bunthaus	Hamburg_ Seemannshoeft	
63	Hamburg_Bunthaus	Schnackenburg	Lauenburg		Hamburg_ Seemannshoeft	
64	Hamburg_ Seemannshoeft	Schnackenburg	Lauenburg	Hamburg_Bunthaus		
65	Eisenhuettenstadt	Kietz	Kienitz	Neuglietzen	Hohensaaten	
66	FrankfurtO	Kietz	Kienitz	Neuglietzen	Hohensaaten	
67	Kietz	Kienitz	Neuglietzen	Hohensaaten		
68	Kienitz	Kietz	Neuglietzen	Hohensaaten		
69	GrNeuendorf	Kietz	Kienitz	Hohensaaten		
70	Neuglietzen	Kietz	Kienitz	Hohensaaten		
71	Hohensaaten	Neuglietzen	Kienitz			
72	Gartz	FrankfurtO	GrNeuendorf			

Tabelle 24: Liste der rezenten WT-Zeitreihen, die die Zeitintervalle 1971-2007, 1976-2005, 1979-1998, 1984-2003, 1986-2005 und 1988-2007 abdecken, sowie deren Einteilung nach den Regionen Süd-, Nord- und Ostdeutschland.

Nr.	WT-Zeitreihe	Region	1956	1986	1952	1948	1971	1976	1979	1984	1986	1988
			- 1978	- 2006	- 1973	- 1993	- 2007	- 2005	- 1988	- 2003	- 2005	- 2007
1	Lenggries	Süddeutschland								x	x	
2	Muenchen	Süddeutschland								x	x	
3	Landshut	Süddeutschland								x	x	

Nr.	WT-Zeitreihe	Region	1956 - 1978	1986 - 2006	1952 - 1973	1948 - 1993	1971 - 2007	1976 - 2005	1979 - 1988	1984 - 2003	1986 - 2005	1988 - 2007
	Regensburg											
4	Immendingen	Süddeutschland									x	X
5	Ulm_Boefingen	Süddeutschland							x			
6	Ingolstadt	Süddeutschland								x	x	
7	Regensburg	Süddeutschland										X
8	Deggendorf	Süddeutschland								x	x	
9	Vilshofen	Süddeutschland								x	x	
10	Passau	Süddeutschland								x	x	
11	Rielasingen	Süddeutschland								x	x	X
12	Breisach	Süddeutschland								x	x	X
13	Karlsruhe	Süddeutschland										X
14	Worms	Süddeutschland						x	x	x	x	
15	Biblis	Süddeutschland						x	x	x	x	X
16	Kaub	Süddeutschland							x	x	x	X
17	Koblenz	Süddeutschland								x	x	X
18	Koblenz_WUK	Süddeutschland							x	x	x	X
19	Koeln	Süddeutschland									x	X
20	Wendlingen	Süddeutschland										X
21	Hofen	Süddeutschland								x	x	
22	Poppenweiler	Süddeutschland						x	x	x	x	
23	Besigheim	Süddeutschland						x	x	x	x	X
24	Stein	Süddeutschland								x	x	X
25	Gundelsheim	Süddeutschland								x	x	X
26	Rockenau	Süddeutschland							x	x	x	X
27	Mannheim	Süddeutschland							x	x	x	
28	Kemmern	Süddeutschland								x	x	X
29	Trunstadt	Süddeutschland					x	x	x	x	x	X
30	Schweinfurt_Pegel	Süddeutschland					x	x	x	x	x	X
31	Schweinfurt	Süddeutschland								x	x	
32	Wuerzburg	Süddeutschland					x	x	x	x	x	X
33	Erlabrunn	Süddeutschland							x	x	x	
34	Steinbach	Süddeutschland					x	x	x	x	x	x
35	Rothenfels	Süddeutschland							x	x	x	
36	Kleinheubach_P_Kahl	Süddeutschland					x	x	x	x	x	x
37	Kleinheubach_Kahl	Süddeutschland								x	x	
38	Kleinostheim	Süddeutschland										x

Nr.	WT-Zeitreihe	Region	1956 - 1978	1986 - 2006	1952 - 1973	1948 - 1993	1971 - 2007	1976 - 2005	1979 - 1988	1984 - 2003	1986 - 2005	1988 - 2007
39	FrankfurtM_ Osthafen	Süddeutschland					x	x	x	x	x	x
40	Raunheim	Süddeutschland								x	x	x
41	Saarbruecken	Süddeutschland										x
42	Lisdorf	Süddeutschland										x
43	Kanzem	Süddeutschland										x
44	Terborg	Norddeutschland										x
45	Allendorf	Norddeutschland									x	x
46	Hemeln	Norddeutschland								x	x	x
47	Emmerthal	Norddeutschland									x	x
48	Oldendorf	Norddeutschland								x		
49	Porta	Norddeutschland								x	x	
50	Petershagen	Norddeutschland								x	x	
51	Drakenburg	Norddeutschland								x	x	x
52	Brake	Norddeutschland								x	x	x
53	Magwitz	Ostdeutschland	x									
54	Zwickau Poelbitz	Ostdeutschland						x	x	x		
55	ErlIn	Ostdeutschland		x								
56	Golzern	Ostdeutschland									x	
57	BadDueben	Ostdeutschland									x	
58	Bautzen	Ostdeutschland							x			
59	Schirgiswalde	Ostdeutschland							x			
60	Dresden	Norddeutschland				x						
61	Schnackenburg	Norddeutschland								x	x	
62	Lauenburg	Norddeutschland							x			
63	Hamburg_ Bunthaus	Norddeutschland							x	x	x	
64	Hamburg_ Seemannshoef	Norddeutschland								x	x	x
65	Eisenhuettenstadt	Ostdeutschland									x	
66	FrankfurtO	Ostdeutschland							x	x		
67	Kietz	Ostdeutschland								x	x	
68	Kienitz	Ostdeutschland								x	x	
69	GrNeuendorf	Ostdeutschland						x	x	x	x	
70	Neuglietzen	Ostdeutschland						x	x	x	x	
71	Hohensaaten	Ostdeutschland								x	x	
72	Gartz	Ostdeutschland			x							

Tabelle 25: Liste der 72 LT-Stationen mit dem Mittelwert (MW), der Standardabweichung (SD) und der Amplitude jeweils gemittelt über die KNP 1961-1990 der DWD- und REMO-LT-Zeitreihen sowie der jeweiligen Differenzen (DWD - REMO); am Ende der Tabelle: Mittelwert, Maximum und Minimum aller Werte aus je 72 Zeitreihen.

Nr.	LT-Station	MW			SD			Amplitude		
		DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO	DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO	DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO
1	BadToelz	8,0	8,8	-0,7	7,7	7,4	0,3	18,0	17,8	0,2
2	Muenchen	9,2	9,5	-0,3	8,0	7,4	0,5	19,1	18,7	0,4
3	Regensburg_Landshut	8,0	9,4	-1,4	8,0	7,5	0,5	20,0	19,3	0,7
4	Aach	7,2	8,7	-1,5	7,7	6,9	0,8	19,1	17,3	1,7
5	Ulm	8,7	9,7	-0,9	7,7	7,2	0,5	19,0	18,4	0,6
6	Koesching	8,2	9,7	-1,5	7,9	7,5	0,4	19,3	19,2	0,1
7	Regensburg	8,4	9,8	-1,4	8,0	7,5	0,5	20,0	19,3	0,7
8	Metten	7,8	9,9	-2,1	7,9	7,7	0,2	19,7	19,8	-0,1
9	Aldersbach	8,0	10,1	-2,1	8,0	7,6	0,3	19,8	19,6	0,1
10	Passau	8,8	10,2	-1,4	8,0	7,8	0,2	19,8	20,0	-0,1
11	Radolfzell	9,0	10,3	-1,3	7,5	6,9	0,6	18,9	17,8	1,1
12	Freiburg	11,0	11,4	-0,3	7,6	6,9	0,8	18,2	17,1	1,1
13	Karlsruhe	10,3	11,3	-1,0	7,5	7,0	0,6	18,4	17,7	0,7
14	Worms	10,4	11,0	-0,6	7,4	7,1	0,4	18,1	18,0	0,1
15	Worms_Biblis	10,4	11,0	-0,6	7,4	7,1	0,4	18,1	18,0	0,1
16	Geisenheim	10,2	11,1	-0,9	7,2	6,8	0,4	17,4	17,2	0,2
17	Koblenz_WUK	10,6	11,0	-0,4	7,0	6,6	0,5	16,7	16,5	0,2
18	Koblenz_Pegel	10,6	11,0	-0,4	7,0	6,6	0,5	16,7	16,5	0,2
19	Koeln	10,1	10,6	-0,5	7,0	6,5	0,5	16,2	16,1	0,0
20	Stuttgart_N_Wendlingen	11,0	10,8	0,2	7,6	7,6	0,0	18,3	19,2	-0,9
21	Stuttgart_S_Hofen	10,1	10,8	-0,7	7,5	7,1	0,4	17,9	17,8	0,1
22	Stuttgart_N_Poppenweiler	11,3	11,1	0,2	7,6	7,6	0,0	18,3	19,2	-0,9
23	Stuttgart_S_Besigheim	10,4	11,1	-0,7	7,5	7,1	0,4	17,9	17,8	0,1
24	Stuttgart_S_Stein	10,4	11,2	-0,8	7,5	7,1	0,4	17,7	17,8	-0,1
25	Stuttgart_S_Gundelsheim	10,6	11,3	-0,7	7,5	7,1	0,4	17,9	17,8	0,1
26	Heidelberg	10,8	10,2	0,6	7,4	7,0	0,5	17,9	17,6	0,3
27	Mannheim	10,4	11,1	-0,7	7,5	7,1	0,5	18,2	17,9	0,3
28	Bamberg_Kemmern	8,6	9,9	-1,3	7,7	7,3	0,4	18,8	18,5	0,3
29	Bamberg_Trunstadt	8,6	9,9	-1,3	7,7	7,3	0,4	18,8	18,5	0,3
30	Schweinfurt_Pegel	9,1	10,0	-0,9	7,6	7,2	0,4	18,4	18,4	0,0

Nr.	LT-Station	MW			SD			Amplitude		
		DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO	DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO	DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO
31	Schweinfurt	9,1	10,0	-0,9	7,6	7,2	0,4	18,4	18,4	0,0
32	Wuerzburg	9,8	10,5	-0,7	7,7	7,2	0,5	18,6	18,4	0,3
33	Wuerzburg_Erlabrunn	9,8	10,5	-0,7	7,7	7,2	0,5	18,6	18,4	0,3
34	Lohr_Steinbach	8,8	10,7	-1,9	7,4	7,0	0,4	18,1	17,9	0,2
35	Lohr_Rothenfels	8,7	10,8	-2,1	7,4	7,0	0,4	18,1	17,9	0,2
36	Kahl_Kleinheubach_P	9,7	10,6	-0,9	7,5	7,1	0,3	17,9	18,0	-0,1
37	Kahl_Kleinheubach	9,7	10,6	-0,9	7,5	7,1	0,3	17,9	18,0	-0,1
38	Kahl_Kleinostheim	9,6	10,7	-1,1	7,5	7,1	0,3	17,9	18,0	-0,1
39	FrankfurtM_Osthafen	9,8	10,9	-1,0	7,5	7,1	0,4	18,2	18,3	-0,1
40	FrankfurtM_Raunheim	9,9	10,9	-1,0	7,5	7,1	0,4	18,2	18,3	-0,1
41	Saarbruecken	9,8	10,5	-0,7	7,2	6,6	0,6	17,2	16,6	0,6
42	Berus	10,0	10,7	-0,6	7,2	6,6	0,6	17,2	16,5	0,7
43	Weiskirchen	10,2	10,7	-0,5	7,1	6,5	0,5	16,7	16,3	0,4
44	Emden	9,3	9,6	-0,3	6,5	5,7	0,7	15,2	14,5	0,7
45	Wahlsburg_Allendorf	9,0	9,7	-0,7	7,1	6,7	0,4	16,7	16,8	-0,1
46	Wahlsburg	9,2	9,9	-0,7	7,1	6,7	0,4	16,7	16,8	-0,1
47	Hameln	9,2	9,9	-0,7	7,0	6,6	0,4	16,2	16,3	-0,1
48	Hameln_Oldendorf	9,3	9,9	-0,7	7,0	6,6	0,4	16,2	16,3	-0,1
49	Bueckeburg	9,9	10,0	-0,1	7,1	6,9	0,2	16,4	17,0	-0,6
50	Bueckeburg_Petershagen	10,0	10,1	-0,1	7,1	6,9	0,2	16,4	17,0	-0,6
51	Nienburg	9,1	9,8	-0,7	7,1	6,5	0,5	16,4	16,3	0,1
52	Bremerhaven	9,1	9,3	-0,2	6,7	5,9	0,7	15,8	14,9	0,9
53	Plauen_Magwitz	7,7	9,0	-1,3	7,6	7,1	0,5	18,0	17,7	0,3
54	Plauen_ZwickauPoelbitz	8,4	9,7	-1,3	7,6	7,1	0,5	18,0	17,7	0,3
55	Leipzig_ErlIn	9,1	9,9	-0,8	7,7	7,3	0,4	18,3	18,7	-0,4
56	Leipzig_Golzern	9,2	10,0	-0,8	7,7	7,3	0,4	18,3	18,7	-0,4
57	Leipzig_BadDueben	9,5	10,1	-0,6	7,6	7,7	-0,1	17,7	19,6	-1,9
58	Kubschuetz_Bautzen	9,2	9,7	-0,5	7,9	7,3	0,6	19,0	18,3	0,7
59	Kubschuetz_Schirgis- walde	8,6	9,1	-0,5	7,9	7,3	0,6	19,0	18,3	0,7
60	Dresden	9,6	10,2	-0,6	7,6	7,6	0,0	18,1	18,9	-0,8
61	Boizenburg_Schnackenburg	7,4	9,3	-1,9	7,3	6,6	0,6	17,1	16,6	0,5
62	Boizenburg_Lauenburg	8,7	9,4	-0,7	7,3	6,6	0,6	17,1	16,6	0,5
63	Hamburg_Fuhlsbuettel	8,7	9,4	-0,7	7,0	6,5	0,5	16,3	16,3	0,0
64	Hamburg_Neuwiedenthal	8,9	9,4	-0,5	7,1	6,4	0,6	16,6	16,1	0,5

Nr.	LT-Station	MW			SD			Amplitude		
		DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO	DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO	DWD	REMO	Diff- erenz DWD- REMO
65	FrankfurtO_Eisenhuetten- stadt	8,8	9,6	-0,8	7,9	7,4	0,5	19,1	18,8	0,3
66	FrankfurtO	8,9	9,3	-0,4	7,9	7,4	0,5	19,1	18,8	0,3
67	FrankfurtO_Kietz	8,9	9,7	-0,8	7,9	7,4	0,5	19,1	18,8	0,3
68	Muencheberg_Kienitz	8,8	9,8	-0,9	7,9	7,3	0,6	19,1	18,6	0,5
69	Muencheberg_ GrNeuendorf	8,8	9,8	-0,9	7,9	7,3	0,6	19,1	18,6	0,5
70	Angermuende_ Neuglietzen	8,7	9,5	-0,8	7,8	7,0	0,7	18,8	17,9	0,9
71	Angermuende_ Hohensaaten	8,7	9,5	-0,8	7,8	7,0	0,7	18,8	17,9	0,9
72	Angermuende_Gartz	8,7	9,6	-0,8	7,8	7,0	0,7	18,8	17,9	0,9
Mittelwert		9,3	10,1	-0,8	7,5	7,1	0,5	18,0	17,8	0,2
Maximum		11,3	11,4	0,6	8,0	7,8	0,8	20,0	20,0	1,7
Minimum		7,2	8,7	-2,1	6,5	5,7	-0,1	15,2	14,5	-1,9

## ANHANG II

*CD-ROM „Anhang II“ - erhältlich bei Autorin, siehe Autorenangabe*

Abbildung 69: Autokorrelationsrechnung der täglichen WT für die 72 WT-Zeitreihen. Die gestrichelte blaue Linie stellt den Autokorrelationskoeffizient  $r_X = 0,7$  dar.

Abbildung 70: Streudiagramme der 72  $dX/dt$ -Testreihen und jeweiligen  $dX/dt$ -Vergleichsreihen mit entsprechenden Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Pearson sowie den  $p$ -Werten.

Abbildung 71: Zwölfjährige gleitende Mittel der jeweiligen saisonbereinigten Zeitreihen für einen Fluss.

Abbildung 72: Kumulierte Summenkurve der saisonbereinigten WT für jeweils einen Fluss.

Abbildung 73: Kumulierte Differenzenkurven der 72 saisonbereinigten WT-Testzeitreihen mit den jeweiligen saisonbereinigten WT-Vergleichszeitreihen.

Abbildung 74: Ergebnis der ersten relativen Homogenitätsprüfung mittels des SNHT nach Alexandersson (1986) für die 72 WT-Zeitreihen ( $\alpha = 0,1$ ).

Abbildung 75: Über die KNP gemittelter Jahresgang der gemessenen (DWD) und simulierten (REMO) LT sowie die Differenz der Jahresgänge (DWD-REMO) für die 72 LT-Zeitreihen.

Abbildung 76: Streudiagramm der Tagesmittel gemessener LT und WT für alle 72 WT- und entsprechenden LT-Zeitreihen mit den jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman sowie mit den jeweiligen  $p$ -Werten. Die Korrelationen sind signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,01$ .

Abbildung 77: Streudiagramm der Wochenmittel gemessener LT und WT für alle 72 WT- und entsprechenden LT-Zeitreihen mit den jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman sowie mit den jeweiligen  $p$ -Werten. Die Korrelationen sind signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,01$ .

Abbildung 78: Streudiagramm der Monatsmittel gemessener LT und WT für alle 72 WT- und entsprechenden LT-Zeitreihen mit den jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman sowie mit den jeweiligen  $p$ -Werten. Die Korrelationen sind signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,01$ .

Abbildung 79: Korrelationskoeffizienten nach Spearman für die Tagesmittel mit einem Zeitversatz von  $\tau = 0, 1, 2, \dots, 5$  sowie für die Wochen- und Monatsmittel für die 72 Zeitreihenpaare mit Angabe des maximalen Korrelationskoeffizienten aller zeitlichen Auflösungen und bei Tagesmitteln aller Zeitversätze.

- Abbildung 80: Korrelationskoeffizienten nach Pearson für die Tagesmittel mit einem Zeitversatz von  $\tau = 0, 1, 2, \dots, 5$  sowie für die Wochen- und Monatsmittel für die 72 Zeitreihenpaare mit Angabe des maximalen Korrelationskoeffizienten aller zeitlichen Auflösungen und bei Tagesmitteln aller Zeitversätze.
- Abbildung 81: Simulierte und gemessene Tagesmittel der 72 WT-Zeitreihen mit den Regressionskoeffizienten a, b, c und d sowie dem *RMSE*, dem *NSC* und der maximalen absoluten Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten in °C.
- Abbildung 82: Simulierte und gemessene Wochenmittel der 72 WT-Zeitreihen mit den Regressionskoeffizienten a, b, c und d sowie dem *RMSE*, dem *NSC* und der maximalen absoluten Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten in °C.
- Abbildung 83: Simulierte und gemessene Monatsmittel der 72 WT-Zeitreihen mit den Regressionskoeffizienten a, b, c und d sowie dem *RMSE*, dem *NSC* und der maximalen absoluten Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten in °C.
- Abbildung 84: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die KNP 1961-1990.
- Abbildung 85: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des B1-Szenarios.
- Abbildung 86: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 des B1-Szenarios.
- Abbildung 87: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 des B1-Szenarios.
- Abbildung 88: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des A1B-Szenarios.
- Abbildung 89: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 des A1B-Szenarios.
- Abbildung 90: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 des A1B-Szenarios.
- Abbildung 91: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des A2-Szenarios.
- Abbildung 92: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 des A2-Szenarios.
- Abbildung 93: Ergebnis der Autokorrelationsanalyse der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 des A2-Szenarios.

- Abbildung 94: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der rezenten WT-Zeitreihen Dresden (1948-1993), Gartz (1952-1973), Magwitz (1956-1978) und Erlin (1986-2006). Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für das jeweilige Zeitintervall ist in °C angegeben.
- Abbildung 95: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der sechs rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1971-2007. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für das jeweilige Zeitintervall ist in °C angegeben.
- Abbildung 96: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 13 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1976-2005. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für das jeweilige Zeitintervall ist in °C angegeben.
- Abbildung 97: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 26 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1979-1998. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für das jeweilige Zeitintervall ist in °C angegeben.
- Abbildung 98: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 49 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1984-2003. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für das jeweilige Zeitintervall ist in °C angegeben.
- Abbildung 99: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 53 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1986-2005. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für das jeweilige Zeitintervall ist in °C angegeben.
- Abbildung 100: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 34 rezenten WT-Zeitreihen für das Zeitintervall 1988-2007. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht

signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für das jeweilige Zeitintervall ist in °C angegeben.

Abbildung 101: Anzahl der Tage pro Jahr mit sehr hohen (95. Perzentil, orange) und extrem hohen (99. Perzentil, rot) WT-Werten in den 72 rezenten WT-Zeitreihen. Senkrechte, graue, gestrichelte Linie = Zeitreihenbeginn.

Abbildung 102: Anzahl der Tage im Juni pro Jahr mit sehr hohen (95. Perzentil, orange) und extrem hohen (99. Perzentil, rot) WT-Werten in den 72 rezenten WT-Zeitreihen. Senkrechte, graue, gestrichelte Linie = Zeitreihenbeginn.

Abbildung 103: Anzahl der Tage im Juli pro Jahr mit sehr hohen (95. Perzentil, orange) und extrem hohen (99. Perzentil, rot) WT-Werten in den 72 rezenten WT-Zeitreihen. Senkrechte, graue, gestrichelte Linie = Zeitreihenbeginn.

Abbildung 104: Anzahl der Tage im August pro Jahr mit sehr hohen (95. Perzentil, orange) und extrem hohen (99. Perzentil, rot) WT-Werten in den 72 rezenten WT-Zeitreihen. Senkrechte, graue, gestrichelte Linie = Zeitreihenbeginn.

Abbildung 105: Anzahl der Tage im Juni pro Jahr mit WT-Werten über definierten Schwellwerten  $\geq 23$  °C in einem Grad Schritt bis  $> 28$  °C für die acht WT-Zeitreihen des Rheins. Senkrechte, graue, gestrichelte Linie = Zeitreihenbeginn.

Abbildung 106: Anzahl der Tage im Juli pro Jahr mit WT-Werten über definierten Schwellwerten  $\geq 23$  °C in einem Grad Schritt bis  $> 28$  °C für die acht WT-Zeitreihen des Rheins. Senkrechte, graue, gestrichelte Linie = Zeitreihenbeginn.

Abbildung 107: Anzahl der Tage im August pro Jahr mit WT-Werten über definierten Schwellwerten  $\geq 23$  °C in einem Grad Schritt bis  $> 28$  °C für die acht WT-Zeitreihen des Rheins. Senkrechte, graue, gestrichelte Linie = Zeitreihenbeginn.

Abbildung 108: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des B1-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 109: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2070 des B1-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 110: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2100 des B1-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember

( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 111: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des A1B-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 112: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2070 des A1B-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 113: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2100 des A1B-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 114: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 des A2-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 115: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2070 des A2-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 116: Ergebnisse der Trendanalyse der Jahres- und Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2100 des A2-Szenarios. Dargestellt sind signifikante (blau) und nicht signifikante (grau) Trends in den Monaten Januar bis Dezember ( $\alpha = 0,05$ ). Eine grün gestrichelte Linie stellt einen signifikanten und eine grau gestrichelte Linie einen nicht signifikanten Trend in den Jahresmitteln der Zeitreihen dar ( $\alpha = 0,05$ ). Die Größe der Trends für die ZP ist in °C angegeben.

Abbildung 117: Ergebnisse des t-Tests für die Jahresmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).

Abbildung 118: Ergebnisse des t-Tests für die Jahresmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).

Abbildung 119: Ergebnisse des t-Tests für die Jahresmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).

Abbildung 120: Ergebnisse des t-Tests für die Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2011-2040 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).

Abbildung 121: Ergebnisse des t-Tests für die Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2041-2070 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).

Abbildung 122: Ergebnisse des t-Tests für die Monatsmittel der 72 simulierten WT-Zeitreihen für die ZP 2071-2100 und die KNP 1961-1990 jeweils für das B1-, A1B- und A2-Szenario ( $\alpha = 0,05$ ).

## LITERATURVERZEICHNIS

- AD CONSULTANTS RESOURCE MANAGEMENT ASSOCIATES (2002): Stanislaus River Water Temperature Model. 75 S.
- AG. L. N. DR. ULRICH TRÄNKLE LANDSCHAFTSPLANUNG UND NATURSCHUTZMANAGEMENT und PCU PLANCONSULTUMWELT PARTNERSCHAFT (Hrsg.) (2007): FFH-Verträglichkeitsprüfung im Rahmen des immissionsschutzrechtlichen Genehmigungs- und B-Plan-Verfahrens Kraftwerkserweiterung am Standort RDK (RDK 6S / RDK 8). Blaubeuren, Saarbrücken, 134 S.
- AHMADI-NEDUSHAN, B., A. ST-HILAIRE, T. B. M. J. OUARDA, L. BILODEAU, É. ROBICHAUD, N. THIÉMONGE und B. BOBÉE (2007): Predicting river water temperatures using stochastic models: case study of the Moisie River (Québec, Canada). - In: Hydrological Processes 21(1), S. 21-34.
- ALBEK, M. (2007): Predicting water temperatures based on air temperatures and estimating the effects of climate change. - In: Third International Conference on Climate Change and Water, 03-06.09.2007, 03.-06.09.2007, Helsinki, Finnish Environment Institute, S. 13-18.
- ALEXANDERSSON, H. (1986): A homogeneity test applied to precipitation data. - In: Journal of Climatology 6(6), S. 661-675.
- ALEXANDERSSON, H. und A. MOBERG (1997): Homogenization of Swedish Temperature Data. Part I: Homogeneity Test for Linear Trends. - In: International Journal of Climatology 17(1), S. 25-34.
- AP (2003): Atomkraftwerk Unterweser nähert sich Hitzepause. - In: Frankfurter Rundschau, 14.08.2003, Frankfurt am Main, S. 1.
- AP (2006a): Kernkraftwerk wegen Hitzewelle gedrosselt. - In: Ostsee Zeitung, 20.07.2006, Rostock, S. 1.
- AP (2006b): Stromversorgung nicht gefährdet. - In: Badisches Tagblatt, 27.07.2006, Baden-Baden, S. 1.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LÄNDER ZUR REINHALTUNG DER ELBE (2008): Wärmelastplan für die Tideelbe. Sonderaufgabenbereich Tideelbe der Länder Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein. Hamburg, Hannover, Kiel, 15 S.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER LÄNDER ZUR REINHALTUNG DER WESER (1974): Wärmelastplan Weser. Bremen, 23 S.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR DIE REINHALTUNG DER ELBE (1973): Wärmelastplan für die Elbe von Schnackenburg bis Cuxhaven. Hamburg, 8 S.

- ARBEITSKREIS KLIMAÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Projekt B 1.1.1/1.1.4: "Entwicklung und Vergleich regionaler Klimaszenarien", KLIWA-Projekt B 2.4/2.5: "Simulation des Abflusskontinuums und des Hochwasserabflusses mit regionalen Klimaszenarien". 3-88251-305-5, Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW); Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Deutscher Wetterdienst (DWD), Karlsruhe, 104 S.
- ATW – INTERNATIONALE ZEITSCHRIFT FÜR KERNENERGIE (Hrsg.) (2008): Kernkraftwerke in Deutschland: Betriebsergebnisse 2007. Berlin, 43 S.
- AXPO (2010): Ersatzkernkraftwerk Beznau - Betrieb: Kühlung. - In: <http://www.axpo.ch/axpo/de/kernenergie/wissen/ersatzkernkraftwerkbeznau/betrieb.html> (zuletzt aufgerufen am 16.02.2010).
- BADISCHE ZEITUNG (2003): Gefahr von Stromausfällen gebannt. - In: [www.wetterforum.com](http://www.wetterforum.com), 18.08.2003.
- BARTHOLOW, J. M. (1989): Stream Temperature Investigations: Field and Analytic Methods. 139 S.
- BARTHOLOW, J. M. (2005): Recent Water Temperature Trends in the Lower Klamath River, California. - In: North American Journal of Fisheries Management 25(1), S. 152-162.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2004): Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie und ihre Umsetzung in Bayern. Bestandsaufnahme 2004 in Bayern. 92 S. - In: [http://www.wasserrahmenrichtlinie.bayern.de/bestandsaufnahme/doc/bestandsaufnahme\\_2004\\_lang.pdf](http://www.wasserrahmenrichtlinie.bayern.de/bestandsaufnahme/doc/bestandsaufnahme_2004_lang.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2004): Wasserwirtschaftlicher Bericht Trockenperiode 2003 - Kurzfassung. München, 18 S.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2005): Wasserwirtschaftlicher Bericht – Niedrigwasserperiode 2003. Informationsberichte 2/05, München, 162 S.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ und MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTEMBERG (2005): Anhang zum „Bericht zur Bestandsaufnahme für das deutsche Donaugebiet“. München, 314 S.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTEMBERG, HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ und MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, NATURSCHUTZ UND UMWELT FREISTAAT THÜRINGEN (2005): Bearbeitungsgebiet Main. Bericht zur Bestandsaufnahme. Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG (WRRL), 142 S. - In:

[http://www.wasserrahmenrichtlinie.bayern.de/bestandsaufnahme/berichte\\_an\\_eu/rhein/main/doc/bearbeitungsgebiet\\_main.pdf](http://www.wasserrahmenrichtlinie.bayern.de/bestandsaufnahme/berichte_an_eu/rhein/main/doc/bearbeitungsgebiet_main.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ und MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG (2005): Bericht zur Bestandsaufnahme gemäß Art. 5, Anhang II und Anhang III, sowie Art. 6, Anhang IV, der WRRL für das Deutsche Donaugebiet. München, 132 S.
- BCE, GIZ, GK und FA (2006): Sogar die Fische schwitzen. - In: Kölner Stadt-Anzeiger, 26.07.2006, Köln, S. 1.
- BECK, W. und R. WEHAUS (2006): Erste Kraftwerke gedrosselt. - In: Stuttgarter Zeitung, 29.07.2006, Stuttgart, S. 1.
- BECK, W. und J. WIESIGEL (2006): Hitze treibt Strompreise in die Höhe. - In: Stuttgarter Nachrichten, 27.07.2006, Stuttgart, S. 1.
- BEGERT, M., G. SEIZ, T. SCHLEGEL, M. MUSA, G. BAUDRAZ und M. MOESCH (2003): Homogenisierung von Klimamessreihen der Schweiz unter Bestimmung der Normwerte 1961-1990. Schlussbericht des Projekts NORM90. MeteoSchweiz, Zürich, 170 S.
- BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT DER FREIEN UND HANSESTADT HAMBURG, NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM und MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (2004): Bericht über die Umsetzung der Anhänge II, III und IV der Richtlinie 2000/60/EG im Koordinierungsraum Tideelbe (B-Bericht). 60 S. - In: [http://fgg-elbe.de/pdf/b-bericht\\_tideelbe.pdf](http://fgg-elbe.de/pdf/b-bericht_tideelbe.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).
- BÉLANGER, M., N. EL-JABI, D. CAISSIE, F. ASHKAR und J.-M. RIBI (2005): Water temperature prediction using neural networks and multiple linear regression. - In: Revue Des Sciences De l'Eau 18(3), S. 19.
- BENYAHYA, L., A. ST-HILAIRE, T. B. M. J. OUARDA, B. BOBÉE und B. AHMADI-NEDUSHAN (2007): Modeling of water temperatures based on stochastic approaches: case study of the Deschutes River. - In: Journal of Environmental Engineering 6, S. 12.
- BERGEMANN, M. (2006), Arbeitsgemeinschaft Elbe, Hamburg. Freundliche, schriftliche Mitteilung am 13.10.2006.
- BHR (2003): Strom wird nicht abgeschaltet - Versorgungslage in Baden-Württemberg hat sich entspannt / Keine Ausnahme mehr für Kühlwasser. - In: Frankfurter Allgemeine, 19.08.2003, Frankfurt am Main, S. 1.
- BL, HS und WG (2003): Kühlwasser für Atomkraftwerke zu warm - Sprühaktion beendet. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.

- BL und WG (2003): Atomkraftwerk hat zu wenig Kühlwasser -Leistung gedrosselt. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.
- BLAUES BAND (2010a): Die Mulde mit dem Muldestausee. - In: <http://www.blaues-band.de/mulde/index.htm> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- BLAUES BAND (2010b): Die Weiße Elster. - In: <http://www.blaues-band.de/elster> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- BÖHM, R. (1974): Ein Rechenverfahren zur Bestimmung der Wassertemperatur eines Flusses. - In: Archiv für Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie 23, S. 21.
- BOHN, T. (Hrsg.) (1986): Handbuchreihe Energie. Fritz, A., Qittek, Ch. und E. Wittchow (1986): Fossil beheizte Dampfkraftwerke. 6, Köln, Gräfelfing, Technischer Verlag Resch/Verlag TÜV Rheinland GmbH, 703 S.
- BONACCI, O., D. TRNINIC und T. ROJE-BONACCI (2008): Analysis of the water temperature regime of the Danube and its tributaries in Croatia. - In: Hydrological Processes 22(7), S. 1014-1021.
- BREINING, T. (2003): Kein Engpass bei der Stromversorgung - Atomkraftwerk Obrigheim vorzeitig abgeschaltet - Wasser in den Flüssen wird zu warm. - In: Stuttgarter Zeitung, 08.08.2003, Stuttgart, S. 1.
- BREUER, R. (2007): Praxisprobleme des deutschen Wasserrechts nach der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. - In: Natur und Recht 29(8), S. 503-513.
- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND E. V. (2010): Die Spree - Lebensader Berlins. - In: [http://www.flussbuero.de/bund\\_flussbuero/home/fluesse/spree/](http://www.flussbuero.de/bund_flussbuero/home/fluesse/spree/) (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND, LANDESVERBAND BADEN-WÜRTTEMBERG E.V. (2010): 20 Jahre Renaturierung der Radolfzeller Aach. - In: <http://www.bund-bawue.de/themen-projekte/wasser-und-gewaesser/baeche-fluesseen/radolfzeller-aach> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (2006): Einführung zu den Meldepflichtigen Ereignissen. - In: <http://www.bfs.de/de/kerntechnik/ereignisse/einfuehrung.html> (zuletzt aufgerufen am 30.03.2010).
- BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (2010): Erfassung und Dokumentation der in den deutschen Kernkraftwerken erzeugten Strommengen. - In: <http://www.bfs.de/de/kerntechnik/strommengen.html> (zuletzt aufgerufen am 17.05.2010).
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2002): Das Augusthochwasser 2002 im Elbegebiet. 49 S. - In: <http://www.sterr.geographie.uni-kiel.de/downloads/elbe2002.pdf> (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2007): Discussion Paper: Electricity. Berlin, S. 6. In: <http://www.climate-water-adaptation-berlin2007.org/documents/electricity.pdf> (zuletzt aufgerufen am 12.1-14.02.2007).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT und UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2004): Die Wasserrahmenrichtlinie - Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland. Umweltpolitik, Berlin, 68 S.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (2010): Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi: Stromerzeugungskapazitäten und Bruttostromerzeugung nach Energieträgern, Deutschland. - In: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html> (zuletzt aufgerufen am 09.03.2010).
- CAISSIE, D., N. EL-JABI und M. G. SATISH (2001): Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures. - In: Journal of Hydrology 251(1-2), S. 14-28.
- CAISSIE, D., M. G. SATISH und N. EL-JABI (2005): Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). - In: Hydrological Processes 19, S. 2137-2159.
- CHENARD, J.-F. und D. CAISSIE (2008): Stream temperature modelling using artificial neural networks: application on Catamaran Brook, New Brunswick, Canada. - In: Hydrological Processes 22(17), S. 3361-3372.
- COOTER, E. und W. COOTER (1990): Impacts of greenhouse warming on water temperature and water quality in the southern United States. - In: Climate Research 1, S. 1-12.
- CRISP, D. T. und G. HOWSON (1982): Effect of air temperature upon mean water temperature in streams in the north Pennines and English Lake District. - In: Freshwater Biology 12(4), S. 359-367.
- CVS (2003): Hitze bremst Atomkraftwerk. - In: Frankfurter Rundschau, 09.08.2003, Frankfurt am Main, S. 1.
- DAUFRESNE, M., M. C. ROGER, H. CAPRA und N. LAMOUREUX (2003): Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhone River: effects of climatic factors. - In: Global Change Biology 10(1), S. 124-140.
- DEISENHOFER, E. (1992): Das Wassertemperaturregime der deutschen Donau Koblenz. - In: XVI. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen und hydrologisch-wasserwirtschaftliche Grundlagen, 18. - 22. Mai 1992, Kelheim, S. 337-342.
- DER SPIEGEL (1976a): "Dass der Fluss so krank ist..." - In: Der Spiegel, 27.09.1976, Hamburg, S. 1.

- DER SPIEGEL (1976b): Wir können keinen dünneren Strom schicken. - In: Der Spiegel, 05.07.1976, Hamburg, S. 1.
- DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH (2008): Kurzanalyse der Kraftwerks-und Netzplanung in Deutschland bis 2020 (mit Ausblick auf 2030). Kurzfassung der zentralen Ergebnisse. 18 S. - In: [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Download/Dokumente/Studien\\_\\_\\_Umfragen/Kurzanalyse\\_KuN-Planung\\_D\\_2020\\_2030\\_kurz.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien___Umfragen/Kurzanalyse_KuN-Planung_D_2020_2030_kurz.pdf) (zuletzt aufgerufen am 12.04.2010).
- DEUTSCHE PRESSEAGENTUR GMBH (2003a): AKW drosseln wegen Hitze ihre Leistung. - In: Frankfurter Rundschau, 06.08.2003, Frankfurt am Main, S. 1.
- DEUTSCHE PRESSEAGENTUR GMBH (2003b): Kraftwerke als Hitzeopfer Kühlwasser zu heiß - 40 Grad möglich - Verletzte in Freiburg. - In: Hamburger Abendblatt, 06.08.2003, Berlin, S. 1.
- DEUTSCHE PRESSEAGENTUR GMBH (2006a): Experte: Bei längerer Hitzeperiode droht Fischsterben. - In: Waldportal, 26.07.2006, Tübingen, S. 1.
- DEUTSCHE PRESSEAGENTUR GMBH (2006b): Heiße Isar - BN wehrt sich gegen Eon-Pläne. - In: Süddeutsche Zeitung, 26.07.2006, München, S. 1.
- DEUTSCHE PRESSEAGENTUR GMBH (2006c): Hitzewelle rollte gen Osten - Bis 40 Grad in Brandenburg möglich. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 20.07.2006, Hamburg, S. 1.
- DEUTSCHE PRESSEAGENTUR GMBH und ASSOCIATED PRESS GMBH (2006): Hitze und Unwetter. - In: Frankfurter Rundschau, 27.07.2006, Frankfurt a. M. , S. 1.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2002): Klimastatusbericht 2001. Klimastatusbericht, Offenbach, 290 S.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2004): Klimastatusbericht 2003. Klimastatusbericht, Offenbach, 190 S.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2007): Klimastatusbericht 2006. Offenbach, 55 S.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2010a): AMDA I/II - Automatische Meteorologische Datenerfassungsanlage für hauptamtliche Wetterwarten und -stationen. - In: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_result\\_page&gsbSearchDocId=111572](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&gsbSearchDocId=111572) (zuletzt aufgerufen am 04.03.2010).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2010b): AMDA III - Automatische Meteorologische Datenerfassungsanlage für nebenamtliche Stationen. - In: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_result\\_page&gsbSearchDocId=111574](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&gsbSearchDocId=111574) (zuletzt aufgerufen am 04.03.2010).

- DEUTSCHER WETTERDIENST (2010c): Qualitätskontrolle Stufe 1 (QC 1). - In: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_result\\_page&portletMasterPortlet\\_i1gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FTI%2FTI2%2FTI21%2FQualitaet%2FQ\\_\\_Stufe1.html](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&portletMasterPortlet_i1gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FTI%2FTI2%2FTI21%2FQualitaet%2FQ__Stufe1.html) (zuletzt aufgerufen am 04.03.2010).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2010d): Trends in Deutschland. Gebietsmittel Deutschland. - In: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=\\_dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_ueberwachung\\_deutschland&T15803638371146814774368gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Umwelt%2FKlimaueberwachung%2FDeutschland%2Fresultate\\_\\_monatlich%2Fhome\\_gebietsmittel\\_\\_deutschland\\_\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_ueberwachung_deutschland&T15803638371146814774368gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimaueberwachung%2FDeutschland%2Fresultate__monatlich%2Fhome_gebietsmittel__deutschland__node.html%3F__nnn%3Dtrue) (zuletzt aufgerufen am 30.05.2010).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2010e): Wetterlexikon. - In: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_menu2\\_wetterlexikon&\\_nfls=false](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_wetterlexikon&_nfls=false) (zuletzt aufgerufen am 01.03.2010).
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (1999): Jahresbericht 1998 - Kernenergie in Deutschland. Bonn, 71 S.
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (2000): Jahresbericht 1999 - Kernenergie in Deutschland. Bonn, 72 S.
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (2001): Jahresbericht 2000 - Kernenergie in Deutschland. Bonn, 73 S.
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (2002): Jahresbericht 2001 - Kernenergie in Deutschland. Bonn, Berlin, 72 S.
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (2003): Jahresbericht 2002 - Kernenergie in Deutschland. Berlin, 75 S.
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (2004): Jahresbericht 2003 - Kernenergie in Deutschland. Berlin, 77 S.
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (2005): Jahresbericht 2004 - Kernenergie in Deutschland. Berlin, 77 S.
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (2006): Jahresbericht 2005 - Kernenergie in Deutschland. Berlin, 77 S.
- DEUTSCHES ATOMFORUM E. V. (Hrsg.) (2007): Jahresbericht 2006 - Kernenergie in Deutschland. Berlin, 77 S.
- DIE TAGESZEITUNG (1994): Warme Weser legt Kraftwerk lahm. - In: Die Tageszeitung, 06.08.1994, Berlin, S. 1.

- DIE WELT (2006): Drosseln der Atomkraftwerke treibt Börsenpreis für Strom. - In: Die Welt, 27.07.2006, Berlin, S. 1.
- DJG, A. HEITKER und BRB (2006): Kraftwerke müssen wegen Hitze ihren Betrieb drosseln - Die Welt. - In: FAZ.NET, 19.07.2006, Frankfurt a. M., S. 1.
- DJN, CSJ und HWA (2006): VDEW: Stromversorgung in Deutschland trotz Hitze stabil. - In: business-wissen.de, 21.07.2006, S. 1.
- DOGLIONI, A., O. GIUSTOLISI, D. A. SAVIC und B. W. WEBB (2008): An investigation on stream temperature analysis based on evolutionary computing. - In: Hydrological Processes 22(3), S. 12.
- DRI (2003): Hitze führt zu Abschaltung von Atomkraftwerken - Baden-Württemberg fürchtet Energieengpass in der kommenden Woche - Flüsse können Reaktoren nicht mehr ausreichend kühlen. - In: Handelsblatt, 14.08.2003, Düsseldorf, S. 1.
- DURANCE, I. und S. J. ORMEROD (2007): Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over a 25-year period. - In: Global Change Biology 13(5), S. 942-957.
- DW (2003): Norddeutsche Atomkraftwerke müssen Produktion weiter drosseln. - In: Die Welt, 09.08.2003, Berlin, S. 1.
- E.O N KERNKRAFT GMBH (Hrsg.) (2010): Kernkraftwerk Isar - Konsolidierte Umwelterklärung 2010. Hannover, 58 S.
- EATON, J. G. und R. M. SCHELLER (1996): Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States. - In: Limnology and Oceanography 41(5), S. 7.
- ED und OV (2003): Gefahr von Stromausfällen gebannt - Keine Ausnahme für Kühlwasser. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 18.08.2003, Hamburg, S. 1.
- EHINGER, B. (1993): Water quality data summary and linear trend analysis of the wenatchee river basin. - In: Water Body WA-45 1010/1020, S. 47.
- EL-JABI, N., G. EL-KOURDAHI und D. CAISSIE (1995): Stochastic modeling of water temperatures in running waters. - In: Revue Des Sciences De l'Eau 8, S. 19.
- EM, TJ, KS und MK (2003): Supersommer: Mehr Licht als Schatten - zu heiß für Atomkraftwerke. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.
- ENBW ENERGIE BADEN-WÜRTTEMBERG AG Heizkraftwerk Altbach/Deizisau. 25 S. - In: [http://www.enbw.com/content/de/der\\_konzern/\\_media/pdf/imagebroschuere\\_standorte/Heizkraftwerk\\_Altbach-Deizisau.pdf](http://www.enbw.com/content/de/der_konzern/_media/pdf/imagebroschuere_standorte/Heizkraftwerk_Altbach-Deizisau.pdf) (zuletzt aufgerufen am 27.03.2010).
- ENKE, W. (2002): Verbesserung der bundesweiten Immissionsdaten durch Entwicklung und Anwendung einer operationellen Methode zur Validierung und Korrektur kontinuierlich

ermittelter Immissionswerte nach einheitlichen objektiven Kriterien. Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesumweltamtes. UBA-FB, I.D.E.A., Karin Seewöster, Gelsenkirchen, 67 S.

ERICKSON, T. R. und H. G. STEFAN (1996): Correlation of Oklahoma stream temperatures with air temperatures. - In: University of Minnesota, St. ANthony Falls Laboratory, Project Report 398.

ERICKSON, T. R. und H. G. STEFAN (2000): Linear air/water temperature correlations for streams during open water periods. - In: Journal of Hydrologic Engineering 5(3), S. 317-321.

ESRI DEUTSCHLAND GMBH (2010): ArcGIS 9.3.Kranzberg. - In: <http://www.esri-germany.de/products/arcgis>.

EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. 72 S.

EUROPEAN COMMISSION (2000): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on the Application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems. Seville, 313 S.

FISCHER, H. (2009): Gewässermorphologie, Gewässergüte und ökologischer Zustand im Binnenbereich. KLIWAS 1. Statuskonferenz, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 18. und 19. März 2009.

FK und IRE (2006): Die Dauerhafte Hitzewelle belastet nicht nur die menschliche Psyche, sondern hinterlässt auch Spuren in der deutschen Wirtschaft. Viele Branchen profitieren aber auch. Bis an die Schmerzgrenze. - In: Handelsblatt, 26.07.2006, Düsseldorf, S. 3.

FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT ELBE (2010): Flächennutzung in Brandenburg. - In: [http://www.fgg-elbe.de/learnmaterial/bl/bb/brandenburg\\_nutzung1.php](http://www.fgg-elbe.de/learnmaterial/bl/bb/brandenburg_nutzung1.php) (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).

FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT WESER (2004): Flussgebietseinheit Weser. Bericht gemäß Art. 3 Abs. 8 und Anhang I der Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates

vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie) für die Flussgebietseinheit Weser. Anlage 1. 7 S.  
- In:  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/wrrl\\_bericht\\_umsetzung\\_anlage07.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/wrrl_bericht_umsetzung_anlage07.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT WESER (2005a): Bewirtschaftungsplan Flussgebietseinheit Weser 2005. Bestandsaufnahme Teilraum Ober- und Mittelweser. 44 S. - In:

[http://www.arge-weser.de/wrrl/pdf/endafassung\\_050322/b\\_omw\\_gesamt\\_050322.pdf](http://www.arge-weser.de/wrrl/pdf/endafassung_050322/b_omw_gesamt_050322.pdf)  
(zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT WESER (2005b): Bewirtschaftungsplan Flussgebietseinheit Weser 2005. Bestandsaufnahme Teilraum Tideweser. EG-Wasserrahmenrichtlinie, 54 S. - In: [http://www.arge-weser.de/wrrl/pdf/endafassung\\_050322/b\\_tide\\_gesamt\\_050322.pdf](http://www.arge-weser.de/wrrl/pdf/endafassung_050322/b_tide_gesamt_050322.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT WESER (2005c): Bewirtschaftungsplan Flussgebietseinheit Weser. Bestandsaufnahme. Hildesheim, 240 S.

FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT WESER (2010): Hydrologie im Einzugsgebiet der Weser. - In: [http://www.arge-weser.de/hydrologie\\_neu.html](http://www.arge-weser.de/hydrologie_neu.html) (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).

FRANKFURTER ALLGEMEINE (1994a): Die Hitzewelle machte dem Stromkreislauf zu schaffen. - In: Frankfurter Allgemeine, 11.08.1994, Frankfurt am Main, S. 1.

FRANKFURTER ALLGEMEINE (1994b): Wir können keinen dünneren Strom schicken. - In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 11.08.1994, Frankfurt am Main, S. 1.

FRANKFURTER ALLGEMEINE (2003): Kernkraftwerke drosseln ihre Produktion - Ein Stromausfall ist trotz der Hitze aber nicht zu befürchten - Die Preise steigen. - In: Frankfurter Allgemeine, 09.08.2003, Frankfurt am Main, S. 1.

GEIGER, F. (2006): Hitze sorgt für hohe Nachfrage. - In: Financial Times Deutschland, 27.07.2006, S. 2.

GERSTENGARBE, F.-W. und P. C. WERNER (2007): Der rezente Klimawandel. - In: W. Endlicher und F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Einblicke, Potsdam, G & S Druck und Medien, S. 34-43.

GI und S. BOLD (2006): Erste Kraftwerke schränken wegen Hitze ihre Leistung ein. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 28.07.2006, Hamburg, S. 1.

GILBERT, R. O. (1987): Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. New York, Van Nostrand Reinhold, 320 S.

GOOGLE INC. (2010): Google Earth.Mountain View, USA. - In: <http://earth.google.de/intl/de/>.

GOOSEFF, M. N., K. STRZEPEK und S. C. CHAPRA (2005): Modeling the potential effects of climate change on water temperature downstream of a shallow reservoir, lower madison river, MT. - In: Climatic Change 68(3), S. 331-353.

GRABEMANN, H.-J., I. GRABEMANN und A. MÜLLER (2005): Die Auswirkungen eines Klimawandels auf Hydrografie und Gewässergüte der Unterweser. - In: B. Schuchardt und M. Schirmer (Hrsg.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, S. 59-77.

- GREIS, S. (2007): Gewässertemperaturentwicklung und industrieller Kühlwasserbedarf. Eine statistische Analyse der Wassertemperaturentwicklung ausgewählter deutscher Flüsse im Zuge rezenter Klimatrends und deren Bedeutung für den industriellen Kühlwasserbedarf. Diplomarbeit, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg, S. 134 (unveröffentlicht).
- GROSSE, A. (2003): Zu heiß für die Kernkraft. - In: Hamburger Abendblatt, 06.08.2003, Berlin, S. 1.
- GU, R. R. und Y. LI (2002): River temperature sensitivity to hydraulic and meteorological parameters -In: Journal of Environmental Management 66(1), S. 43-56.
- HAAG, I., A. LUCE und U. BADDE (2005): Ein operationelles Vorhersagemodell für die Wassertemperatur im Neckar. - In: Wasserwirtschaft 7-8, S. 45-51.
- HAK (2006): Eon will Grenzwert für Isar überschreiten. - In: Süddeutsche Zeitung, 22.07.2006, München, S. 1.
- HAMBURGER ABENDBLATT (2006): Atomkraftwerke an der Elbe drosseln Leistung. - In: Hamburger Abendblatt, 20.07.2006, Hamburg, S. 1.
- HAMMOND, D. und A. R. PRYCE (2007): Climate change impacts and water temperature. - In: Environment Agency Science Report SC060017/SR. Bristol, UK 102 S.
- HARI, R. E., D. M. LIVINGSTONE, R. SIBER, P. BURKHARDT-HOLM und H. GÜTTINGER (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. - In: Global Change Biology 12(1), S. 10-26.
- HEIMANN, G. (2003): Das kostet Energie Klimaanlagen, Ventilatoren, Kühltürme - die Wärme fördert den Stromverbrauch. Nun wird Wasser knapp, und die Kraftwerke können nicht richtig gekühlt werden. - In: Der Tagesspiegel, 06.08.2003, Berlin, S. 1.
- HEITKER, A. (2006): Strompreise an der EEX nach Rekordwerten wieder normalisiert. - In: Finanztreff.de, S. 1.
- HELD, H.-D. und H. G. SCHNELL (2000): Kühlwasser - Verfahren und Systeme der Aufbereitung, Behandlung und Kühlung von Süßwasser, Brackwasser, Meerwasser in der Industrie. Essen, Vulkan-Verlag GmbH, 653 S.
- HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG GMBH - UFZ (2004): Einzugsgebiet der Weissen Elster. - In: <http://www.ufz.de/index.php?de=4554> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- HELSEL, D. R. und R. M. HIRSCH (2002): Statistical Methods in Water Resources. - In: United States Geological Survey (Hrsg.): Techniques of Water-Resources Investigations. 4, Amsterdam, Elsevier, S. 524.

- HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2010a): Beschreibung des Bearbeitungsgebietes Main. - In: <http://www2.hmuelv.hessen.de/umwelt/wasser/wrrl/stadtlandfluss/main> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2010b): Beschreibung des Bearbeitungsgebietes Neckar. - In: <http://www2.hmuelv.hessen.de/umwelt/wasser/wrrl/stadtlandfluss/neckar> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- HILLMER, A. (2006): In der Elbe droht das große Fischsterben. - In: Hamburger Abendblatt, 26.07.2006, Hamburg, S. 1.
- HIRSCH, R. M., J. R. SLACK und R. A. SMITH (1982): Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. - In: Water Resource Research 18(1), S. 107-121.
- HOCHWASSERNACHRICHTENDIENST BAYERN (2010): Gewässerkundlicher Monatsbericht Februar 2009 – Hochwasser. Fließgewässer. 3 S. - In: [http://www.hnd.bayern.de/ereignisse/monatsberichte/md\\_fghw\\_0209.pdf](http://www.hnd.bayern.de/ereignisse/monatsberichte/md_fghw_0209.pdf) (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- HS, BL, TJ und JG (2003a): Hitze erhöht Temperaturen der Flüsse - Atomkraftwerke senken Leistung. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.
- HS, BL, TJ, SM und PN (2003b): Hitze wirkt sich auf Betrieb von Kernkraftwerken aus. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.
- HUGUET, F., S. PAREY, D. DACUNHA-CASTELLE und F. MALEK (2008): Is there a trend in extremely high river temperature for the next decades? A case study for France. - In: Natural Hazards and Earth System Sciences 8, S. 13.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2000): Summary for Policymakers. Emissions Scenarios. 92-9169-113-5, Genf, 21 S.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2001): Summary for Policymakers. A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 20 S.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). Bern, Wien, Berlin, 89 S.
- INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS (2004): Wärmebelastung der Gewässer im Sommer 2003. Zusammenfassung der nationalen Situationsberichte. Bern, 46 S.
- INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS (2006): Vergleich der Wärmeeinleitungen 1989 und 2004 entlang des Rheins. Synthese. Koblenz, 4 S.

- INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS (2010): Neun Staaten - ein Flussgebiet. - In: <http://www.iksr.org/index.php?id=117> (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).
- INTERNATIONALE KOMMISSIONEN ZUM SCHUTZ DER MOSEL UND DER SAAR GEGEN VERUNREINIGUNG (1998): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet von Mosel und Saar - Bestandsaufnahme. 101 S. - In: <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/411/Bestandsaufnahme%20Hochwasserschutz.pdf?command=downloadContent&filename=Bestandsaufnahme%20Hochwasserschutz.pdf> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- INTERNATIONALE KOMMISSIONEN ZUM SCHUTZ DER MOSEL UND DER SAAR GEGEN VERUNREINIGUNG (2010): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet von Mosel und Saar - Bestandsaufnahme. - In: <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/1604> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- JACOB, D., H. GÖTTEL, S. KOTLARSKI, P. LORENZ und K. SIECK (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Dessau, 154 S.
- JEPPESEN, E. und T. M. IVERSEN (1987): Two Simple Models for Estimating Daily Mean Water Temperatures and Diel Variations in a Danish Low Gradient Stream. - In: *Oikos* 49(2), S. 149-155.
- JG und SI (2006a): Meteorologen: Es wird kühler - Wasserstand in Flüssen und Seen sinkt. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 25.07.2006, Hamburg, S. 1.
- JG und SI (2006b): Wasserstand der Gewässer sinkt - Umwege für Binnenschiffe. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, Hamburg, S. 1.
- JOHNSON, F. A. (1971): Stream temperatures in an Alpine area. - In: *Journal of Hydrology* 14(3-4), S. 4.
- JONAS, M., T. STAEGER und C.-D. SCHÖNWIESE (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland. Dessau, 250 S.
- JUF (2006): Atomreaktoren drosseln wegen Hitze Leistung. - In: *Handesblatt*, 21.07.2006, Düsseldorf, S. 1.
- KACZMAREK, Z., K. M. STRZEPEK, L. SOMLYODY und V. PRIAZHINSKAYA (Hrsg.) (1996): *Water Resources Management in the Face of Climatic/Hydrologic Uncertainties*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 395 S.
- KALIDE, W. (2005): *Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen. Kolbenmaschinen - Strömungsmaschinen - Kraftwerke*. München, Wien, Carl Hanser Verlag, 413 S.

- KIM, K. S. und S. C. CHAPRA (1997): Temperature Model for Highly Transient Shallow Streams. - In: Journal of Hydraulic Engineering 123(1), S. 30-40.
- KINOUCI, T., H. YAGI und M. MIYAMOTO (2007): Increase in stream temperature related to anthropogenic heat input from urban wastewater. - In: Journal of Hydrology 335(1-2), S. 78-88.
- KIRCHHOFF, S., S. KUHN, P. LIPP und S. SCHLAWIN (2006): Der Fragebogen. Datenbasis, Konstruktion und Auswertung. Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften, BWV Fachverlage GmbH, 113 S.
- KISS, K. (2003): Deutschlands Kernkraftwerke kommen ins Brüten. - In: Westdeutsche Allgemeine Zeitung, 13.08.2003, Essen, S. 1.
- KLITZSCH, S. (1978): Zur statistischen Modellierung der Wassertemperatur in Fließgewässern. - In: Acta hydrochim. hydrobiol. 6(5), S. 393-398.
- KM und HOE (2004): Atomkraftwerk Unterweser muss Produktion wegen Hitze drosseln. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 11.08.2004, Hamburg, S. 1.
- KOCH, W. (2006): Stromversorgung trotz Hitzewelle gesichert. - In: Stuttgarter Zeitung, 21.07.2006, Stuttgart, S. 1.
- KONSTANTIN, P. (2007): Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung am liberalisierten Markt. Berlin, Heidelberg, Springer, 405 S.
- KOOP, J., T. BERGFELD und M. KELLER (2007): Einfluss von extremen Niedrigwasser-Ereignissen und gleichzeitigen „Hitzeperioden“ auf die Ökologie von Bundeswasserstraßen. - In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51(5), S. 202-209.
- KOTHANDARAMAN, V. (1972): Air-water temperature relationship in Illinois River. - In: Journal of the American Water Resources Association 8(1), S. 38-45.
- KÜTTEL, S., A. PERT und A. WÜEST (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer.
- KYLE, R. und T. P. BRABETS (2001): Water Temperature of Streams in the Cook Inlet Basin, Alaska, and Implications of Climate Change. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey,, Anchorage, Alaska, 24 S.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1991): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. Berlin, Erich Schmidt Verlag, 109 S.
- LANDSCHAFTSVERBAND WESTFALEN-LIPPE (2004): Die Ems. Lebensader für Mensch und Natur. 15 S. - In: [http://www.lwl.org/lmz-download/medienproduktion/booklet\\_ems.pdf](http://www.lwl.org/lmz-download/medienproduktion/booklet_ems.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

- LANGAN, S. J., L. JOHNSTON, M. J. DONAGHY, A. F. YOUNGSON, D. W. HAY und C. SOULSBY (2001): Variation in river water temperatures in an upland stream over a 30-year period. - In: *The Science of The Total Environment* 265(1-3), S. 13.
- LANGE, J. (2009): *Wärmelast Rhein*. Freiburg, 71 S.
- LANGFORD, T. E. (1983): *Electricity generation and the ecology of natural waters*. Liverpool, 342 S.
- LBY (2006): Leistung von Atomkraftwerk Isar 1 wegen Sommerhitze gedrosselt. - In: *Deutsche Presseagentur GmbH*, 31.07.2006, Hamburg, S. 1.
- LEAVESLEY, G. H. (1994): Modeling the effects of climate change on water resources - a review. - In: *Climatic Change* 28(1), S. 159-177.
- LEUSCHNER, U. (2007a): Flüsse zu warm: Mehrere Kraftwerke mussten Stromerzeugung reduzieren. - In: <http://www.udo-leuschner.de/energie-chronik/940814.htm> (zuletzt aufgerufen am 24.04.2010).
- LEUSCHNER, U. (2007b): Hitze führte zu Engpässen bei der Stromversorgung. - In: <http://www.udo-leuschner.de/energie-chronik/030801.htm> (zuletzt aufgerufen am 25.04.2010).
- LEUSCHNER, U. (2007c): Sommerliche Erwärmung der Flüsse nötigte Kraftwerke zum "Kurztreten". - In: <http://www.udo-leuschner.de/energie-chronik/950810.htm> (zuletzt aufgerufen am 25.04.2010).
- LIETZ, A. C. (2000): *Analysis of Water-Quality Trends at Two Discharge Stations - One within Big Cypress National Preserve and One near Biscayne Bay - Southern Florida, 1966-94*. Tallahassee, 35 S.
- LNO (2006): Hitze bringt weiter Waldbrandgefahr - Probleme für Binnenschiffer. - In: *Deutsche Presseagentur GmbH*, 25.07.2006, Hamburg, S. 1.
- LNW, TH und KP (2006): Auch in NRW werden Kraftwerke wegen Hitze gedrosselt. - In: *Deutsche Presseagentur GmbH*, 25.07.2006, Hamburg, S. 1.
- LÖNKER, O. (2003): Hitzefrei für Atomstrom. - In: *Neue Energie* 9(1507), S. 22-23.
- LUKAS, B. und M. WELP (2003): *Umgang der Printmedien mit extremen Wetterereignissen - am Beispiel der Hitzewelle 2003 - Klimawandel als unausweichliche Katastrophe oder bewältigbare Aufgabe? Studie des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung*. Potsdam, 45 S.
- MACKEY, A. P. und A. D. BERRIE (1991): The prediction of water temperatures in chalk streams from air temperatures. - In: *Hydrobiologia* 210, S. 183-189.

- MANIAK, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Berlin, Heidelberg, Springer, 666 S.
- MARCÉ, R. und J. ARMENGOL (2008): Modelling river water temperature using deterministic, empirical, and hybrid formulations in a Mediterranean stream. - In: Hydrological Processes 22(17), S. 13.
- MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE (o. J.): Hinweise für REMO - Datennutzer. 14 S. - In: [http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/staff/pfeifersusanne/REMO\\_UBA/REMO-UBA-Hinweise.pdf](http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/staff/pfeifersusanne/REMO_UBA/REMO-UBA-Hinweise.pdf) (zuletzt aufgerufen am 14.04.2010).
- MEIER KRUKER, V. und J. RAUH (2005): Arbeitsmethoden der Humangeographie. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 182 S.
- MEISNER, J. D. (1990): Potential Loss of Thermal Habitat for Brook Trout, Due to Climatic Warming, in Two Southern Ontario Streams. - In: Transactions of the American Fisheries Society 119, S. 282-291.
- MELLER, E., G. MILOJCIC, F.-J. WODOPIA und G. SCHÖNING (Hrsg.) (2008): Jahrbuch der europäischen Energie- und Rohstoffwirtschaft 2008. 115, Essen, VGE Verlag GmbH, 1146 S.
- MILLES, U. (2004): Effiziente Kraftwerke. BasisEnergie 17, 6 S. - In: [http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis\\_Energie/Basis\\_Energie\\_Nr.\\_17/BasisEnergie17internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr._17/BasisEnergie17internetx.pdf) (zuletzt aufgerufen am 10.03.2010).
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, NATURSCHUTZ UND UMWELT (2001): Vorbeugender Hochwasserschutz in Thüringen. 33 S. - In: <http://www.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload345.pdf> (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2005): Bestandsaufnahme Niederrhein. Umsetzung der WRRL in der FGE Rhein. 683 S. - In: [http://www.flussgebiete.nrw.de/Dokumente/NRW/Bestandsaufnahme\\_2005\\_NRW/Ergebnisberichte/bestandsaufnahme\\_niederrhein.pdf](http://www.flussgebiete.nrw.de/Dokumente/NRW/Bestandsaufnahme_2005_NRW/Ergebnisberichte/bestandsaufnahme_niederrhein.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2009): Steckbriefe der Planungseinheiten in den nordrhein-westfälischen Anteilen von Rhein, Weser, Ems und Maas. Oberflächengewässer und Grundwasser Teileinzugsgebiet Ems/Ems NRW. 216 S. - In: [http://www.flussgebiete.nrw.de/Dokumente/NRW/Bewirtschaftungsplan\\_2010\\_2015/Planungseinheiten-Steckbriefe/091026\\_Steckbrief\\_Ems\\_NRW.pdf](http://www.flussgebiete.nrw.de/Dokumente/NRW/Bewirtschaftungsplan_2010_2015/Planungseinheiten-Steckbriefe/091026_Steckbrief_Ems_NRW.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, FORSTEN UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2010): Neun Staaten - ein Flussgebiet. 7 S. - In:

<http://www.wrrl.rlp.de/servlet/is/8239/Kapitel%205.1.pdf?command=downloadContent&filename=Kapitel%205.1.pdf> (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

MINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2005): Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie Bericht zur Bestandsaufnahme für das Land Brandenburg. 133 S. - In: [http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2320.de/wrrl\\_052.pdf](http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2320.de/wrrl_052.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES BRANDENBURG, NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM, MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT DES LANDES SACHSEN-ANHALT und UMWELTMINISTERIUM MECKLENBURG-VORPOMMERN (2004): Bericht über die Umsetzung der Anhänge II, III und IV der Richtlinie 2000/60/EG im Koordinierungsraum Mittlere Elbe/Elde (B-Bericht). 60 S. - In: [http://fgg-elbe.de/pdf/b-bericht\\_mittlere\\_elbe-elde.pdf](http://fgg-elbe.de/pdf/b-bericht_mittlere_elbe-elde.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND VERKEHR (2005): EG – Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) Vorläufiger Bericht zur Bestandsaufnahme Teil B Bearbeitungsgebiet Neckar. 77 S. - In: <http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/10486/EU-WRRL%20B-Bericht%20BG%20Neckar.pdf?command=downloadContent&filename=EU-WRRL%20B-Bericht%20BG%20Neckar.pdf> (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

MINISTERSTWO ŚRODOWISKA RZECZPOSPOLITEJ POLSKIEJ, MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČESKÉ REPUBLIKY, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES BRANDENBURG, UMWELTMINISTERIUM MECKLENBURG-VORPOMMERN und SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2005): Internationale Flussgebietseinheit Oder. Merkmale der Flussgebietseinheit, Überprüfung der Umweltauswirkungen menschlicher Tätigkeiten und wirtschaftliche Analyse der Wassernutzung. 167 S. - In: <http://www.wasserblick.net/servlet/is/36275/servlet/is/36275/Bericht%202005%20-%2021032005.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht%202005%20-%2021032005.pdf> (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).

MK (2003): Heißestes Wochenende des Jahres in Niedersachsen. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 09.08.2003, Hamburg, S. 1.

MOATAR, F. und J. GAILHARD (2006): Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. - In: Comptes Rendus Geosciences 338(5), S. 10.

MOHSENI, O., T. R. ERICKSON und H. G. STEFAN (1999): Sensitivity of Stream Temperatures in the United States to Air Temperatures Projected Under a Global Warming Scenario. - In: Water Resource Research 35(12), S. 12.

- MOHSENI, O. und H. G. STEFAN (1999): Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. - In: Journal of Hydrology 218, S. 128-141.
- MOHSENI, O., H. G. STEFAN und T. R. ERICKSON (1998): A Nonlinear Regression Model for Weekly Stream Temperatures. - In: Water Resource Research 34, S. 8.
- MORRILL, J. C., R. C. BALES und M. H. CONKLIN (2005): Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality. - In: Journal of Environmental Engineering, S. 139-146.
- MORRISON, J., M. C. QUICK und M. G. G. FOREMAN (2002): Climate change in the Fraser River watershed: flow and temperature projections. - In: Journal of Hydrology 263(1-4), S. 230-244.
- MP und AL (2003): Kernkraftwerke an erwärmten Flüssen drosseln Leistung. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.
- MP und SL (2003): Atomkraftwerk Stade muss wegen Hitze Produktion weiter drosseln. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 08.08.2003, Hamburg, S. 1.
- MÜL (2006): Rhein wird zu warm für Reaktorkühlung. - In: Stuttgarter Zeitung, 29.07.2006, Stuttgart, S. 1.
- MÜLLER, U., S. GREIS und B. ROTHSTEIN (2007): Impacts on Water Temperatures of Selected German Rivers and on Electricity Production of Thermal Power Plants due to Climate Change. - In: 8. Forum Katastrophenvorsorge Disaster Reduction in a Changing Climate 15./16. Oktober 2007, Karlsruhe, S. 4.
- MVOLLWEITER, SWO und LHE (2006): Keine Einschränkung durch die Sommerhitze. - In: Frankfurter Rundschau, 24.07.2006, Frankfurt a. M., S. 1.
- NAKICENOVIC, N., J. ALCAMO, G. DAVIS, B. DE VRIES, J. FENHANN, S. GAFFIN, K. GREGORY, A. GRUBLER, T. Y. JUNG, T. KRAM, E. L. LA ROVERE, L. MICHAELIS, S. MORI, T. MORITA, W. PEPPER, H. M. PITCHER, L. PRICE, K. RIAHI, A. ROEHL, H.-H. ROGNER, A. SANKOVSKI, M. SCHLESINGER, P. SHUKLA, S. J. SMITH, R. SWART, S. VAN ROOIJEN, N. VICTOR und Z. DADI (2000): Special Report on Emissions Scenarios : a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, Cambridge University Press
- NASH, J. E. und J. V. SUTCLIFFE (1970): River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. - In: Journal of Hydrology 10(3), S. 8.
- NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (Hrsg.) (2009): Impact of Drought on U.S. Steam Electric Power Plant Cooling Water Intakes and Related Water Resource Management Issues. 58 S.

- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (2010): North Atlantic Oscillation. - In: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao\\_ts.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao_ts.shtml) (zuletzt aufgerufen am 30.05.2010).
- NATZ, S. (1994): West-Bezirke kurz vor Strom-Kollaps. - In: Berliner Zeitung, 03.08.1994, Berlin, S. 1.
- NEUMANN, D. W., B. RAJAGOPALAN und E. A. ZAGONA (2003): Regression Model for Daily Maximum Stream Temperature. - In: Journal of Environmental Engineering, S. 667-674.
- NIC (2003): AKW Krümmeln muss wegen Hitze Leistung reduzieren. - In: Die Welt, 06.08.2003, Berlin, S. 1.
- NORDDEUTSCHER RUNDFUNK (2006): Elbe und Weser zu warm: Stromversorger drosseln Leistung von Atomkraftwerken. S. 1.
- NORDDEUTSCHER RUNDFUNK (2011): Neue Restlaufzeiten - Wie lange bleibt welches AKW noch am Netz? - In: <http://www.tagesschau.de/wirtschaft/reststrommengen102.html> (zuletzt aufgerufen am 08.03.2011).
- NZ (2006): Kraftwerke drosseln Produktion wegen Hitze. - In: Netzzeitung.de, 19.07.2006, Berlin, S. 1.
- OEDING, D. und B. R. OSWALD (2004): Elektrische Kraftwerke und Netze. 968 S.
- PAESLER, M. (1983): Homogenisierung. - In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Statistische Methoden der Klimatologie. 13, Offenbach a. Main, Selbstverlag des DWD, S. 65.
- PAETH, H. (2007): Klimamodellsimulationen. - In: W. Endlicher und F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Einblicke, Potsdam, G & S Druck und Medien, S. 44-55.
- PAETH, H. und A. HENSE (2002): Sensitivity of climate change signals deduced from multi-model Monte Carlo experiments. - In: Climate Research 22(4), S. 189–204.
- PEDERSEN, N. L. und K. SAND-JENSEN (2007): Temperature in lowland Danish streams: contemporary patterns, empirical models and future scenarios. - In: Hydrological Processes 21(3), S. 348-358.
- PEKAROVA, P., D. HALMOVA, P. MIKLANEK, M. ONDERKA, J. PEKAR und P. SKODA (2008): Is the Water Temperature of the Danube River at Bratislava, Slovakia, Rising? - In: American Meteorological Society 9(5), S. 1115-1122.
- PETERSEN, J. H. und J. F. KITCHELL (2001): Climate regions and water temperature changes in the Columbia River: bioenergetic implications for predators of juvenile salmon. - In: Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences 58(9), S. 1831-1841.

- PETERSON, T. C. und D. R. EASTERLING (1994): Creation of Homogeneous Composite Climatological Reference Series. - In: International Journal of Climatology 14, S. 671-679.
- PETERSON, T. C., D. R. EASTERLING, T. R. KARL, P. GROISMAN, N. NICHOLLS, N. PLUMMER, S. TOROK, I. AUER, R. BOEHM und D. GULLETT (1998a): Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. - In: International Journal of Climatology 18(13), S. 1493-1517.
- PETERSON, T. C., R. VOSE, R. SCHMOYER und V. RAZUVAEV (1998b): Global historical climatology network (GHCN) quality control of monthly temperature data. - In: International Journal of Climatology 18(11), S. 1169-1179.
- PETERSON, T. C. und R. S. VOSE (1997): An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database. - In: Bulletin of the American Meteorological Society 78(12), S. 2837-2849.
- PFAMMATTER, F. (2004): Zur Abschätzung von Wassertemperaturen in schweizerischen Fließgewässern. Zusammenfassung. - In: Gewässerkunde 320. Universität Bern, 1-2 S.
- PG und BB (2006): Hitze treibt Stromverbrauch - Atomkraftwerke drosseln Leistung. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 20.07.2006, Hamburg, S. 1.
- PILGRIM, J. M., X. FANG und H. G. STEFAN (1998): Stream Temperature Correlations with air temperatures in Minnesota: Implications for Climate Warming. - In: Journal of the American Water Resources Association 34(5), S. 1109-1121.
- PLATTS UDI PRODUCTS GROUP (2007): UDI World Electric Power Plants Data Base. Power Plants Europe. Washington, DC.
- POOLE, G. C. und C. H. BERMAN (2001): An Ecological Perspective on In-Stream Temperature: Natural Heat Dynamics and Mechanisms of Human-Caused Thermal Degradation. - In: Environmental Management 27(6), S. 16.
- POOLE, G. C., J. RISLEY und M. HICKS (2001): Spatial and Temporal Patterns of Stream Temperature (Revised). Prepared as Part of EPA Region 10 Temperature Water Quality Criteria Guidance Development Project. 33 S.
- PREDICTION OF REGIONAL SCENARIOS AND UNCERTAINTIES FOR DEFINING EUROPEAN CLIMATE CHANGE RISKS AND EFFECTS (2004): Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects. - In: Conference of Parties (COP 10), 6.-17. Dezember 2004, Buenos Aires, S. 40.
- PROCLIM- FORUM FOR CLIMATE AND GLOBAL CHANGE (Hrsg.) (2005): Hitzesommer 2003. Synthesebericht. Bern, 28 S.

- PS und GIJ (2006): Erhöhte Wassertemperaturen im Rhein. - In: ka-news.de, 29.07.2006, Karlsruhe, S. 1.
- RA (2003): Niedersachsen-Bremen am -In: Deutsche Presseagentur GmbH, 24.08.2003, Hamburg, S. 1.
- RAHMSTORF, S. und H.-J. SCHELLNHUBER (2007): Der Klimawandel. München, C.H. Beck, 144 S.
- RAPP, J. (2001): Probleme bei der Analyse von Klimatrends auf der Basis von Stationszeitreihen. - In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.): Klimastatusbericht 2000, Offenbach, S. 6.
- RAPP, J. und C.-D. SCHÖNWIESE (1996): Niederschlags- und Temperaturtrends in Baden-Württemberg 1955-1994 und 1895-1994. - In: H. Lehn, M. Steiner und H. Mohr (Hrsg.): Wasser - Die elementare Ressource. Leitlinie einer nachhaltigen Nutzung. 52, Berlin, Springer, S. 114-170.
- RAPP, J. und C. D. SCHÖNWIESE (1995): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurt a. M., 255 S.
- RB und PK (2006): Warme Elbe zwingt Atomkraftwerke weiter zur Leistungsdrosselung. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 25.07.2006, Hamburg, S. 1.
- RED (2006): Bei Aldingen fehlt dem Neckar Sauerstoff. - In: Ludwigsburger Kreiszeitung, 29.07.2006, Ludwigsburg, S. 1.
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART (2010): EU – Wasserrahmenrichtlinie Bericht zur Bestandsaufnahme Bearbeitungsgebiet Neckar Teilbearbeitungsgebiet 47 (Kocher) Textband. 60 S. - In: <http://www.rp-stuttgart.de/servlet/PB/show/1297514/rps-ref52-wrrl-tg47-bericht.pdf> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART (HRSG.) (2005): EG – Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG). Vorläufiger Bericht zur Bestandsaufnahme Teil B. Bearbeitungsgebiet Neckar. 77 S. - In: <http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/10486/EU-WRRL%20B-Bericht%20BG%20Neckar.pdf?command=downloadContent&filename=EU-WRRL%20B-Bericht%20BG%20Neckar.pdf> (zuletzt aufgerufen am 22.04.2010).
- REINARTZ, R. (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns. Literaturstudie im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt Referat 57 / Gewässerökologie. Münster, 122 S.
- RHOADES, D. A. und M. J. SALINGER (1993): Adjustment of temperature and rainfall records for site changes. - In: International Journal of Climatology 13(8), S. 899-913.

- RIVERS-MOORE, N. A. und G. P. W. JEWITT (2007): Adaptive management and water temperature variability within a South African river system: What are the management options? - In: Journal of Environmental Management 82(1), S. 39-50.
- RSO (2006): Nachrichten aus der Hitze. - In: Frankfurter Allgemeine, 21.07.2006, Frankfurt a. M., S. 3.
- RUTKOWSKI, P. (2006): Cool bleiben. Keine Hitze Krise in Kraftwerken. - In: Frankfurter Rundschau, 21.07.2006, Frankfurt a. M., S. 1.
- SACHS, L. und J. HEDDERICH (2006): Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 702 S.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES BRANDENBURG und MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT DES LANDES SACHSEN-ANHALT (2004): Bericht über die Umsetzung der Anhänge II, III und IV der Richtlinie 2000/60/EG für den Koordinierungsraum Mulde-Elbe-Schwarze Elster (B-Bericht). 52 S. - In: [http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/B-Bericht\\_MES\\_2004-12-09.pdf](http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/B-Bericht_MES_2004-12-09.pdf) (zuletzt aufgerufen am 05.04.2010).
- SAUER, E. (1984): Abwärmetechnik: Kühlsysteme, Umweltprobleme, Abwärmenutzung. Köln, Verlag TÜV Rheinland
- SCHE (2003): Hitze kein Risiko für Atommeiler Kernkraftwerke drosseln Leistung. - In: Berliner Zeitung, 07.08.2003, Berlin, S. 1.
- SCHEIDT, M. (2002): Ein Modell zur Mikrosimulation des Spothandels von Strom auf der Basis eines Multi-Agenten-Systems. Dissertation^Doktorarbeit, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 211 S.
- SCHILLING, H.-D. (Hrsg.) (2004): Wir haben sich die Wirkungsgrade der Kohlekraftwerke entwickelt und was ist künftig zu erwarten. Energie-Fakten, Stuttgart, 7 S.
- SCHMUTZ, S., C. MATULLA, A. MELCHER, T. GERERSDORFER, P. HAAS und H. FORMAYER (2004): Beurteilung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Fischfauna anhand ausgewählter Fließgewässer. Wien, 47 S.
- SCHNEIDER, A. (2010): GPS Visualizer's Address Locator.Portland, Oregon. - In: <http://www.gpsvisualizer.com/geocoder/>.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, 302 S.

- SCHÖNWIESE, C.-D. (2007): Wird das Klima extremer? Eine statistische Perspektive. - In: W. Endlicher und F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, Potsdam, G & S Druck und Medien, S. 60-66.
- SCHÖNWIESE, C. D., T. STAEGER und S. TRÖMEL (2005): Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Klimastatusbericht 2005. 7-17 S. - In: [http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU22/klimastatusbericht/einzelne\\_berichte/ksb2005\\_\\_pdf/01\\_\\_2005,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/01\\_\\_2005.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU22/klimastatusbericht/einzelne_berichte/ksb2005__pdf/01__2005,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/01__2005.pdf) (zuletzt aufgerufen am 02.04.2010).
- SCHULTE, E. B. (2003): Hitze: Stromausfälle drohen - Energiekonzerne schließen regionale Abschaltungen nicht mehr aus - Atomanlagen wie Kohlekraftwerke müssen Produktion drosseln. - In: Berliner Zeitung, 09.08.2003, Berlin, S. 1.
- SCHULTE, E. B. (2006): Weniger Strom - aber mehr Exporte. - In: Berliner Zeitung, 21.07.2006, Berlin, S. 1.
- SCHWARTZ, R. (2009): Wärmelastplan Tidelbe. Bedeutung für die Maßnahmenplanung. - In: Informationsveranstaltung zum Bewirtschaftungsplan im deutschen Einzugsgebiet der Elbe, 24.02.2009, Hamburg, S. 21.
- SCHWARZWÄLDER BOTE (2006): Hitze treibt Strompreise in die Höhe. - In: Schwarzwälder Bote, 27.07.2006, Oberndorf, S. 1.
- SEN, P. K. (1968): Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. - In: Journal of the American Statistical Association 63(324), S. 1379-1389.
- SINOKROT, B. A. und H. G. STEFAN (1993): Stream temperature dynamics: Measurements and modeling. - In: Water Resource Research 29(7), S. 14.
- SINOKROT, B. A., H. G. STEFAN, J. H. MCCORMICK und J. G. EATON (1995): Modeling of climate change effects on stream temperatures and fish habitats below dams and near groundwater inputs. - In: Climatic Change 30, S. 181-200.
- SL und JA (2003): Atomkraftwerk Unterweser drosselt Leistung wegen Hitze weiter. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 11.08.2003, Hamburg, S. 1.
- SMITH, D. (1995): Temperature drop in New Zealand's rivers. - In: Water and Atmosphere 3, S. 27.
- SMITH, K. (1972): River water temperatures - an environmental review. - In: Scottish Geographical Journal 88(3), S. 211 - 220.
- SMITH, K. (1981): The prediction of river water temperature. - In: Hydrological Science Bulletin 26(1), S. 19-32

- SMITH, R. A. und R. B. ALEXANDER (1983): Statistical summary of data from the US Geological Survey's National Water Quality Networks. Related Information: USGS Open-File Report 83-533. Denver, 30 S.
- SO und BK (2003): Atomkraftwerke laufen wegen Hitze mit gedrosselter Leistung. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 08.08.2003, Hamburg, S. 1.
- SPANNBAUER, A. (2003): Die Affenhitze bringt den Atomausstieg voran - Kraftwerke fahren wegen hoher Temperaturen ihre Stromproduktion herunter. Grenzwerte bereits überschritten. - In: Die Tageszeitung, 06.08.2003, Berlin, S. 1.
- SPEKAT, A., W. ENKE und F. KREIENKAMP (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarien B1, A1B und A2. Potsdam, 140 S.
- STEFAN, H. G. und E. B. PREUD'HOMME (1993): Stream temperature estimation from air temperature. - In: Journal of the American Water Resources Association 29(1), S. 27-45.
- STEFAN, H. G. und B. A. SINOKROT (1993): Projected global climate change impact on water temperatures in five north central U.S. streams. - In: Climatic Change 24, S. 353-381,.
- STEVENS, M. R. (2003): Water Quality and Trend Analysis of Colorado-Big Thompson System Reservoirs and Related Conveyances, 1969 Through 2000. 34 S.
- STOTT, P. A., S. F. B. TETT, G. S. JONES, M. R. ALLEN, J. F. B. MITCHELL und G. J. JENKINS (2000): External Control of 20th Century Temperature by Natural and Anthropogenic Forcings. - In: Science 290(5499), S. 2133-2137.
- STRAUB, K. (2009): Kraftwerkstechnik. Zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen. Berlin, Heidelberg, 522 S.
- STRAUSS, K. (2009): Kraftwerkstechnik. Zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen. Berlin, Heidelberg, 522 S.
- SÜDDEUTSCHE ZEITUNG (2003): Atomkraftwerk muss Leistung drosseln. - In: Süddeutsche Zeitung, 06.08.2003, München, S. 1.
- THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2010a): Hydrogeologie. - In: [http://www.tlug-jena.de/uw\\_raum/umweltregional/grz/index.html?grz11.html](http://www.tlug-jena.de/uw_raum/umweltregional/grz/index.html?grz11.html) (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).
- THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2010b): Oberirdische Gewässer -In: <http://www.tlug-jena.de/umweltdaten/umweltdaten2005/ub2005/wasser.htm> (zuletzt aufgerufen am 04.04.2010).

- TJ und EH (2003a): Elbwasser zu warm - Atomkraftwerke drosseln Leistung. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.
- TJ und EH (2003b): Hitze: Atomkraftwerk Krümmel fährt mit reduzierter Leistung. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.
- TJ und SBI (2003): Hitze: Vattenfall-Atomkraftwerk Krümmel fährt mit reduzierter Leistung. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 05.08.2003, Hamburg, S. 1.
- TOUTENBURG, H., M. SCHOMAKER, M. WIßMANN und C. HEUMANN (2009): Arbeitsbuch zur deskriptiven und induktiven Statistik. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 356 S.
- TUNG, C.-P., T.-Y. LEE und Y.-C. YANG (2006): Modelling climate-change impacts on stream temperature of Formosan landlocked salmon habitat. - In: Hydrological Processes 20(7), S. 21.
- UMWELTBUNDESAMT (2004): Flussgebietseinheiten in der Bundesrepublik Deutschland (Richtlinie 2000/60/EG - Wasserrahmenrichtlinie). (zuletzt aufgerufen).
- UMWELTBUNDESAMT (2005): Klimafolgen und Anpassung an den Klimawandel in Deutschland - Kenntnisstand und Handlungsnotwendigkeiten. Dessau, 12 S.
- UMWELTBUNDESAMT (2006a): Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland - Regionale Szenarien und nationale Aufgaben. Dessau, 20 S.
- UMWELTBUNDESAMT (2006b): Künftige Klimaänderungen in Deutschland - Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert. Dessau, 8 S.
- UMWELTBUNDESAMT (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen - Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. Dessau, 27 S.
- UMWELTBUNDESAMT (2008a): Datenbank „Kraftwerke in Deutschland“. Liste der sich in Betrieb befindlichen Kraftwerke bzw. Kraftwerksblöcke ab einer elektrischen Bruttoleistung von 100 Megawatt. Dessau. 10 S. - In: [http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kraftwerke\\_in\\_deutschland.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kraftwerke_in_deutschland.pdf) (zuletzt aufgerufen am 27.03.2010).
- UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2008b): Finanz- und Energiewirtschaft - Klimawandel & Klimafolgen in Deutschland. Anpassung an Klimaänderung in Deutschland - Themenblatt: Wirtschaft, 4 S.
- UMWELTBUNDESAMT (2008c): Kompetenzzentrum für Klimafolgen und Anpassung. - In: [http://www.anpassung.net/nn\\_700812/DE/Anpassungsstrategie/anpassungsstrategie\\_\\_node.html?\\_\\_nnn=true](http://www.anpassung.net/nn_700812/DE/Anpassungsstrategie/anpassungsstrategie__node.html?__nnn=true) (zuletzt aufgerufen am 07.03.2010).
- UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION und WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2007): Expert Meeting on Water

Manager Needs for Climate Information in Water Resources Planning. WMO/TD-No. 1401, Genf,

- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.) (2005): VDI 4608, Blatt 1: Energiesysteme Kraft-Wärme-Kopplung. Begriffe, Definitionen, Beispiele. Berlin, Beuth-Verlag GmbH, 47 S.
- VGB POWERTECH E. V. (2006): Analyse der Nichtverfügbarkeit von Wärmekraftwerken 1996 - 2005. Ausfertigung für den VGB-AK "Betriebskennwerte". Essen, 121 S.
- VOGES, J. (2003): Atomkraft macht einen auf lau. - In: Die Tageszeitung, 11.08.2003, Berlin, S. 1.
- VON HAUFF, M. und K. KLUTH (2006): Die energiewirtschaftliche Situation und Stand der Versorgungssicherheit in Deutschland während der Trockenperiode 2003. Diskussionsbeitrag. 22-06
- VUGTS, H. F. (1974): Calculation of temperature variations of small mountain streams. - In: Journal of Hydrology 23(3-4), S. 267-278.
- WAGNER, E. (Hrsg.) (2003): Kühlwasser - warum benötigen Wärmekraftwerke das? Energie-Fakten, Stuttgart, 4 S.
- WARD, J. V. (1985): Thermal characteristics of running waters. - In: Hydrobiologia 125, S. 31-46.
- WASSERWIRTSCHAFTSAMT KRONACH (2010): Kühlwassernutzung.
- WD, JB und RU (2003): Steag drosselt drei Kohlekraftwerke - Kühlwasser zu warm. - In: Deutsche Presseagentur GmbH, 12.08.2003, Hamburg, S. 1.
- WEBB, B. W. (1996): Trends in stream and river temperature. - In: Hydrological Processes 10, S. 205-226.
- WEBB, B. W., P. D. CLACK und D. E. WALLING (2003): Water-air temperature relationships in a Devon river system and the role of flow. - In: Hydrological Processes 17(15), S. 3069-3084.
- WEBB, B. W. und F. NOBILIS (1994): Water temperature behaviour in the River Danube during the twentieth century. - In: Hydrobiologia 291, S. 105-113.
- WEBB, B. W. und F. NOBILIS (1995): Long term water temperature trends in Austrian rivers. - In: Hydrological Sciences Journal 40(1), S. 83-96.
- WEBB, B. W. und F. NOBILIS (1997): Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: a cas study. - In: Hydrological Processes 11, S. 137-147.
- WEBB, B. W. und F. NOBILIS (2007): Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. - In: Hydrological Sciences Journal 52(1), S. 74 - 85.

- WEBB, B. W. und D. E. WALLING (1992): Long term water temperature behaviour and trends in a Devon, UK, river system. - In: Hydrological Sciences-Journal 37(6, 12), S. 79-101.
- WEBB, B. W. und A. J. WALSH (2004): Changing UK river temperatures and their impact on fish populations. - In: B. W. Webb, M. Acreman, C. Maksimovic, H. Smithers und C. Kirby (Hrsg.): Hydrology: Science and practice for the 21 st century Volume II (Proceedings of the British Hydrological Society International Conference, Imperial College, London, July 2004), British Hydrological Society, S. 177-191.
- WEBER, M., L. BRAUN, W. MAUSER und M. PRASCH (2009): Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft. - In: Mitteilungsblatt des hydrologischen Dienstes in Österreich 86, S. 30.
- WECHSUNG, F., A. BECKER und P. GRÄFE (Hrsg.) (2005): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, 6, Potsdam, Weißensee Verlag Ökologie.
- WETZEL, D., G. WÜPPER und U. MÜLLER (2006): Hitziger Handel an der Strombörse. - In: Die Welt, 27.07.2006, Berlin, S. 1.
- ZAHORANSKY, R. A. (2007): Energietechnik. Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf. Wiesbaden, Friedrich Vieweg & Sohn, 360 S.
- ZEBISCH, M., T. GROTHMANN, D. SCHRÖTER, C. HABE, U. FRITSCH und W. CRAMER (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Kurzfassung. Potsdam, 12 S.
- ZIMMERMANN, C. und P. GELDNER (1978a): Case studies of thermal discharges. - In: Z. P. Zaric (Hrsg.): Thermal effluent disposal from power generation. Lectures presented at the international advanced course on heat disposal from power generation, gehalten vom 23. bis 28. August 1976, Dubrovnik, S. 151-173.
- ZIMMERMANN, C. und P. GELDNER (1978b): Thermal loading of river systems. - In: Z. P. Zaric (Hrsg.): Thermal effluent disposal from power generation. Lectures presented at the international advanced course on heat disposal from power generation, gehalten vom 23. bis 28. August 1976, Dubrovnik, S. 175-193.

## AUTORENANGABE

Dr. Ulrike Strauch  
European Institute for Energy Research (EIFER), Emmy-Noether-Str. 11, D-76131 Karlsruhe; von April 2006 bis April 2010  
Email: [ulrike.strauch@gmail.com](mailto:ulrike.strauch@gmail.com)