



Klimawandel und Wasserwirtschaft

Schriftenreihe, Heft 40/2011



Auswertung und Darstellung der Zusammenhänge zwischen Klima- und Wassertemperaturdaten

Dr. Petra Schneider, Ralf Löser, Nicole Gottschalk, Dr. Bernd Spänhoff

1	Veranlassung und Zielstellung	8
2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorstudie	8
3	Datengrundlage Klimadaten	10
3.1	Datengrundlage	10
3.1.1	Standort- bzw. stationsbezogene Daten	11
3.1.2	Rasterklimadaten	11
3.2	Datenaufbereitung und -verarbeitung	11
3.3	Veränderungen infolge des zu erwartenden Klimawandels	12
4	Datengrundlage Wassertemperatur	14
4.1	Datenbereinigung.....	14
4.2	Jahresgang und Saisonbereinigung.....	15
4.3	Mittlere Wassertemperaturen.....	16
4.4	Veränderungen der Beobachtungsdaten der Wasser- und Lufttemperatur.....	19
4.5	Saisonale Schwankungen von Wasser- und Lufttemperatur	25
4.5.1	Zeitliche Verschiebung der saisonalen Verläufe	26
4.5.2	Amplituden der saisonalen Verläufe	30
4.5.3	Streuung der saisonbereinigten Messwerte.....	33
4.6	Messstellen mit Stichtagsmessungen	34
4.7	Zusammenfassung der Auswertung der Datengrundlage.....	40
5	Recherche und Bewertung statistischer Verfahren	41
5.1	KAUSHAL et al. (2010): Rising stream and river temperatures in the United States.....	42
5.1.1	Beschreibung des Verfahrens.....	42
5.1.2	Bewertung der Eignung der Verfahren für die aktuelle Datenauswertung	43
5.2	MOHSENI et al. (1998): A nonlinear regression model for weekly stream temperatures.....	43
5.2.1	Beschreibung des Verfahrens.....	44
5.2.2	Bewertung der Eignung des Verfahrens für die aktuelle Datenauswertung	47
5.3	MORILL et al. (2005): Estimating Stream Temperature from Air Temperature – Implications for Future Water Quality.....	48
5.3.1	Beschreibung des Verfahrens.....	48
5.3.2	Bewertung der Eignung des Verfahrens für die aktuelle Datenauswertung	49
5.4	BOGAN et al. (2005): Estimating extreme stream temperatures by the standard deviate method.....	49
5.4.1	Beschreibung des Verfahrens.....	49
5.4.2	Bewertung der Eignung des Verfahrens für die aktuelle Datenauswertung	50
6	Entwicklung eines Verfahrens zur Anwendung auf die konkrete Datenbasis	51
7	Ergebnisse	60
7.1	Elbe.....	61
7.2	Südliche Elbzuflüsse (Polenz, Sebnitz, Gottleuba, Müglitz, Weißeritz, Triebisch)	63
7.3	Nördliche Elbzuflüsse	65
7.4	Lausitzer Neiße und Mandau	66
7.5	Spree (Kleine Spree, Löbauer Wasser, Schwarzer Schöps, Weißer Schöps)	68
7.6	Schwarze Elster mit Zuflüssen (Hoyerswerdaer Schwarzwasser, Klosterwasser), Große Röder, Pulsnitz	70
7.7	Freiberger Mulde.....	72
7.8	EZG Zschopau.....	74
7.9	Zwickauer Mulde.....	76
7.10	EZG Vereinigte Mulde.....	78
7.11	EZG Weiße Elster in Südwestsachsen	80
7.12	EZG Weiße Elster in Nordwestsachsen.....	81
8	Zusammenfassung der Ergebnisse	83
9	Literatur	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Veränderung der Lufttemperatur bis 2050 im jahreszeitlichen Verlauf (Basis: WEREX IV, A1B).....	12
Abbildung 2:	Mittlere gemessene Wassertemperatur in sächsischen Fließgewässern	16
Abbildung 3:	Differenz Wassertemperatur – Lufttemperatur (Mittelwerte, 1.084 Pegel).....	17
Abbildung 4:	Differenz Wassertemperatur – Lufttemperatur (Mittelwerte, 122 ausgewählte Pegel mit langjährigen Datenreihen).....	18
Abbildung 5:	Häufigkeitsverteilung der Abweichung der mittleren Wassertemperatur von der Lufttemperatur (1.084 Pegel) .	19
Abbildung 6:	Entwicklung der an sächsischen Wetterstationen aufgezeichneten Lufttemperatur	20
Abbildung 7:	Fließgewässerpegel mit täglichen Temperaturmessungen.....	21
Abbildung 8:	Exemplarische Darstellung der Jahresmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur (hydrologische Jahre), Pegel Lichtenwalde, Zschopau.....	22
Abbildung 9:	Exemplarische Darstellung der Jahresmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur (hydrologische Jahre), Pegel Erlin, Freiburger Mulde.....	24
Abbildung 10:	Exemplarische Darstellung der Jahresmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur (hydrologische Jahre), Pegel Särichen, Weißer Schöps.....	25
Abbildung 11:	Exemplarischer Vergleich der saisonalen Schwankungen der Luft- und Wassertemperatur.....	26
Abbildung 12:	Saisonale Verzögerung des Jahresganges der Lufttemperatur in Bezug auf die astronomische Tageslänge ...	27
Abbildung 13:	Saisonale Verzögerung der Wassertemperatur in Bezug auf die astronomische Tageslänge (Messstellen mit ≥ 10 -jährigen Monatsreihen).....	28
Abbildung 14:	Saisonale Verzögerung der Wassertemperatur in Bezug auf die astronomische Tageslänge (alle Messstellen, die nicht als anthropogen beeinflusst eingestuft wurden)	29
Abbildung 15:	Amplituden der mittleren saisonalen Schwankung der Wassertemperatur.....	31
Abbildung 16:	Maxima der mittleren saisonalen Verläufe der Wassertemperatur an den Oberflächenwasserpegeln.....	32
Abbildung 17:	Maximum der gemessenen Wassertemperatur im Gesamtzeitraum, Pegel mit Daten über ≥ 10 Jahre und mindestens monatlichem Messintervall	33
Abbildung 18:	Saisonbereinigte Streuung der Wassertemperatur (Standardabweichung der Abweichungen der Einzelwerte vom saisonbedingten Erwartungswert).....	34
Abbildung 19:	Pegel mit langjährigen Datenreihen monatlicher Stichtagsmessungen in Fließgewässern (Datenquelle: LfULG, LD Leipzig, WISMUT GmbH).....	36
Abbildung 20:	Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten aller Pegelmessungen, alle Monate	37
Abbildung 21:	Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten aller Pegelmessungen, Monat Juli	38
Abbildung 22:	Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten Pegel Schmilka, rechts (Elbe), alle Monate	39
Abbildung 23:	Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten Pegel Plöstitz (Parthe), alle Monate	39
Abbildung 24:	Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten Pegel Plöstitz (Parthe), Monat Juli	40
Abbildung 25:	Exemplarischer Vergleich eines linearen Regressionsansatzes (grün) mit der nichtlinearen Modellvorstellung (rote Hüllkurven), Pegel Bad Düben 1, Wochenmittelwerte.....	44
Abbildung 26:	Exemplarische Darstellung der saisonalen Hysterese der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur, Pegel Dresden, Bad Düben 1, Jänkendorf, Regis-Serbitz; mittlere Monatsmittelwerte im Beobachtungszeitraum.....	45
Abbildung 27:	Exemplarische Anpassung einer exponentiellen Regressionsfunktion nach MOHSENI et al. (1998) an die Daten des Pegels Bad Düben 1 (Wochenmittelwerte).....	47
Abbildung 28:	Jahresmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur, Pegel Strehla	52
Abbildung 29:	Monatsmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur, Pegel Strehla	53
Abbildung 30:	Wichtungsfaktoren für die Tageswerte bei Mittelung TS030 und TL030 mit Wichtung 0.69 : 0.31.....	55

Abbildung 31: Optimierung der Einflussgröße mittels Reduzierung der Streuung um die lineare Regressionsgerade (dargestellt für $T_A > 0 \text{ }^\circ\text{C}$). Stichtag = Tageswerte, Wochenmittel = Wochenmittelwerte der Luft- und Wassertemperatur	56
Abbildung 32: Lineare (blau) und nichtlineare (rot) Regressionsberechnung, Pegel Strehla.....	58
Abbildung 33: Gemessene und anhand der nichtlinearen Regressionsgleichung berechnete Wassertemperatur, Pegel Strehla, Elbe	59
Abbildung 34: Ausgewertete Messstellen, Elbe.....	61
Abbildung 35: Ausgewertete Messstellen, südliche Elbzuflüsse	63
Abbildung 36: Ausgewertete Messstellen, nördliche Elbzuflüsse	65
Abbildung 37: Ausgewertete Messstellen, Lausitzer Neiße und Mandau	66
Abbildung 38: Ausgewertete Messstellen, EZG Spree	68
Abbildung 39: Ausgewertete Messstellen, Schwarze Elster, Große Röder, Pulsnitz.....	70
Abbildung 40: Ausgewertete Messstellen, Freiburger Mulde.....	72
Abbildung 41: Ausgewertete Messstellen: Zschopau	74
Abbildung 42: Ausgewertete Messstellen: EZG Zwickauer Mulde	76
Abbildung 43: Ausgewertete Messstellen: EZG Vereinigte Mulde.....	78
Abbildung 44: Ausgewertete Messstellen im EZG Weiße Elster in Südwestsachsen	80
Abbildung 45: Ausgewertete Messstellen: EZG Weiße Elster in Nordwestsachsen.....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittlere gemessene Lufttemperatur der Stationen Chemnitz, Cottbus, Doberlug-Kirchhain, Dresden-Klotzsche, Fichtelberg, Gera-Leumnitz, Görlitz, Hof-Hohensaas, Leipzig-Holzhausen, Marienberg, Plauen, Ceska Lipa, Jablonne v. P., Nova Ves, Varnsdorf ¹⁾	20
Tabelle 2:	Fließgewässerpegel mit keinen oder geringen Unterschieden der Veränderungen von Wasser- und Lufttemperatur.....	21
Tabelle 3:	Anstiege der Wasser- (TW) und Lufttemperatur (TA).....	23
Tabelle 4:	Fließgewässerpegel mit abnehmendem Trend der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur.....	23
Tabelle 5:	Fließgewässerpegel mit zunehmendem Trend der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur.....	25
Tabelle 6:	Saisonale Verschiebung der Wassertemperatur in Bezug auf die astronomische Tageslänge an den sächsischen Fließgewässerpegeln	27
Tabelle 7:	Zeitliche Verschiebung des saisonalen Verlaufes der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur.....	30
Tabelle 8:	Fließgewässerpegel (LfULG) mit >1 Stichtagsmessung pro Monat	34
Tabelle 9:	Fließgewässerpegel der LD Leipzig und der WISMUT GmbH.....	35
Tabelle 10:	MANN-KENNDALL-Trendtest – Anzahl an erforderlichen Werten	43
Tabelle 11:	Einfluss- und Zielgrößen für die lineare und nichtlineare Regressionsanalyse	53
Tabelle 12:	Bestimmtheitsmaße und Parameter der linearen Regressionsanalyse von Luft und Wassertemperatur, Pegel Strehla (alle Datenpaare mit TA > 0).....	54
Tabelle 13:	Parameter K der logistischen Regressionsgleichung (standard deviate)	57
Tabelle 14:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: Elbe.....	62
Tabelle 15:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: Polenz, Sebnitz, Gottleuba, Müglitz, Weißeritz, Triebisch.....	64
Tabelle 16:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: nördliche Elbzuflüsse	65
Tabelle 17:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: Lausitzer Neiße und Mandau	67
Tabelle 18:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Spree.....	69
Tabelle 19:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Schwarze Elster, Pulsnitz, Große Röder	71
Tabelle 20:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: Freiburger Mulde.....	73
Tabelle 21:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Zschopau.....	75
Tabelle 22:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Zwickauer Mulde	77
Tabelle 23:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Vereinigte Mulde.....	79
Tabelle 24:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Weiße Elster in Südwestsachsen	81
Tabelle 25:	Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Weiße Elster in Nordwestsachsen.....	82
Tabelle 26:	Ergebnisse für die Fließgewässer mit starker Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur	84
Tabelle 27:	Ergebnisse für die Fließgewässer mit geringer Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur.....	85
Tabelle 28:	Berechnete Anstiege der Wassertemperatur für die sächsischen Fließgewässer	85

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Aufarbeitung und Auswertung der meteorologischen Daten
- Anlage 2 Veränderungen der Lufttemperatur, des Niederschlages und der Sonnenscheindauer vom Kontrollzeitraum (Ist-Zustand) zur Mitte des 21. Jahrhunderts
- Anlage 3 Zeitreihen der gemessenen Luft- und Wassertemperaturen und saisonale Entwicklung
- Anlage 4 Darstellung saisonaler Hystereseeffekte
- Anlage 5 Ergebnisse der Regressionsanalyse des Zusammenhangs Lufttemperatur – Fließgewässertemperatur: Pegel mit täglichen Messungen
- Anlage 6 Ergebnisse der Regressionsanalyse des Zusammenhangs Lufttemperatur – Fließgewässertemperatur: exemplarische Darstellung der Messstellen mit Stichtagsmessungen
- Anlage 7 Ergebnisse der Anwendung der Regressionsfunktionen zur Prognose der Wassertemperatur an Fließgewässermessstellen: Pegel mit täglichen Messungen
- Anlage 8 Ergebnisse der Anwendung der Regressionsfunktionen zur Prognose der Wassertemperatur an Fließgewässermessstellen: Messstellen mit Stichtagsmessungen

Die Anlagen 1-4 sind als separater Anlagenband veröffentlicht. Die Anlagen 5-8 (15 MB) können bei Dr. Bernd Spänhoff, E-Mail: bernd.spaenhoff@smul.sachsen.de angefordert werden.

1 Veranlassung und Zielstellung

Die Wassertemperatur ist ein entscheidender Faktor für physikalische, chemische und biologische Prozesse wie z. B. Sauerstofflöslichkeit, Photosyntheseraten, Algenproduktion und mikrobielle Abbauraten organischer Verbindungen in Gewässern. In Oberflächengewässern spielt die Temperatur darüber hinaus auch eine wichtige Rolle bei der Verbreitung von höheren Lebewesen wie z. B. Fischen oder benthischen Invertebraten. Die Wassertemperatur von Oberflächengewässern hängt im Wesentlichen vom lokalen Klima ab, wird aber auch von weiteren Faktoren wie Schneeschmelze, Aufstau, Hydromorphologie und Abfluss beeinflusst.

Der prognostizierte Klimawandel wird in den kommenden Jahrzehnten zu einer Erhöhung der Lufttemperatur führen, was sich auch auf die Wassertemperaturen insbesondere der Oberflächengewässer auswirken wird. Historische Trends zeigen schon heute eine Erwärmung von Fließgewässern und Seen, die zwar auch durch direkte anthropogene Beeinflussung (z. B. Kühl- und Abwassereinleitungen, Ufergehölzbeseitigung, Urbanisierung), aber auch durch den Anstieg der Lufttemperaturen in den zurückliegenden Jahrzehnten bedingt ist.

Im Rahmen einer Vorstudie zur Recherche, Homogenisierung und Plausibilisierung von verfügbaren Daten zu Langzeit-Temperaturreihen von Oberflächen-, Boden-, Sicker- und Grundwasser in Sachsen wurde durch C&E GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) eine umfangreiche Datenbasis zur Entwicklung der Wassertemperatur erstellt. Diese Datenbasis soll in der angebotenen Projektfortführung genutzt werden zur Beantwortung der Frage, wie sich der projizierte Klimawandel auf Wassertemperaturen in Oberflächengewässern auswirken wird. Auf dieser Grundlage können entsprechende Anpassungsstrategien für die zukünftige Wassernutzung entwickelt bzw. Anforderungen an die Entwicklung von Anpassungsstrategien gestellt werden.

2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorstudie

In der Vorstudie „Klimawandel und Wasserwirtschaft“ erfolgte durch die C&E GmbH die Recherche, Homogenisierung und Plausibilisierung von verfügbaren Daten zu Langzeitreihen der Wassertemperatur. Dabei bestanden folgende Ziele:

- Klärung der verfügbaren Datenlage zu möglichst lückenlosen Langzeit-Temperaturreihen für Oberflächengewässer, Sicker-, Boden- und oberflächennahem Grundwasser sowie Aufbereitung aller verfügbaren Daten,
- Analyse der statistischen Zusammenhänge zwischen Lufttemperatur und den Wassertemperaturen der genannten Kompartimente und
- Überprüfung der Möglichkeiten, die erhobenen Daten für die Kalibrierung eines Modells zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperaturen in Sachsen zu nutzen.

Datenrecherche, Homogenisierung und Plausibilisierung

In der Vorstudie wurde eine Recherche von Temperaturen im Oberflächenwasser (Standgewässer, Fließgewässer, Quellen), Boden- und Sickerwasser und im oberflächennahen Grundwasser durchgeführt. Diese Recherche betraf in erster Linie das LfULG und die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL). Darüber hinaus waren weitere Behörden, Institutionen und Betreiber in die Recherche einzubeziehen. Hierzu wurde im projektbegleitenden Arbeitskreis eine Vorauswahl in Frage kommender Einrichtungen und Ansprechpartner getroffen.

Die in der Vorstudie recherchierten umfangreichen Messdaten der Temperatur von Oberflächen-, Grund- und Boden-/Sickerwasser umfassen ca. 600.000 Datensätze. Sie wurden in eine Projektdatenbank überführt und einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Ausreißer wurden weitgehend entfernt. Die Zeitreihen der Temperatur wurden

saisonbereinigt, grafisch dargestellt und auf Veränderungen überprüft. Im Rahmen der Saisonbereinigung wurden für alle Messstellen die Parameter zur Beschreibung der mittleren saisonalen Verläufe der Wassertemperatur wie Amplitude, Minima, Maxima und zeitliche Verschiebung bestimmt.

Zur Auswertung der Wassertemperaturen unter Berücksichtigung der meteorologischen Randbedingungen wurden Tagesreihen der Klimadaten sächsischer Wetterstationen beschafft und allen Messstellen der Wassertemperatur mittels räumlicher Interpolation zugeordnet. Hierzu wurde die Landesfläche in Regionen ähnlicher klimatischer Bedingungen untergliedert. Es wurde ein Verfahren entwickelt, welches eine Berücksichtigung der Wetterbedingungen unterschiedlich langer vorangegangener Zeiträume bei der Auswertung von Stichtagsmessungen der Wassertemperatur ermöglicht.

Die durchgeführte Homogenisierung der Daten zeigt einen Wertesprung der Grundwassertemperaturen der Stichtagsmessungen, der auf eine Veränderung der Messmethodik zurückgeht. Dies sollte bei der Anwendung der Grundwasserdaten zur Modellkalibrierung oder weiterführenden statistischen Auswertung beachtet werden. Die Datenreihen des Grundwassers reichen oft nicht weit in die Vergangenheit. Weitere Schwierigkeiten bestehen bei der Auswertung der Daten der Standgewässer, insbesondere wenn Rückschlüsse auf die limnologische Schichtung des Gewässers gezogen werden sollen, weil die Temperaturentwicklung durch die Gewässerbewirtschaftung und sonstige Einwirkungen beeinflusst wird, diese jedoch normalerweise nicht hinreichend bekannt sind. Bei den Fließgewässertemperaturen vieler Messstellen ist im teils langjährigen Messzeitraum von einer zeitlich wechselnden anthropogenen Beeinflussung auszugehen. Abgesehen von den aufgezeigten Schwierigkeiten ist die Datenbasis umfangreich und kann der weiterführenden statistischen Auswertung und Modellkalibrierung dienen.

Auswahl eines Modellgebietes

Das südöstliche Einzugsgebiet der Parthe eignet sich als Modellgebiet für die Fortführung des Vorhabens, weil es kaum anthropogen beeinflusst ist. Dies gilt insbesondere für das Einzugsgebiet des Schnellbachs, welches bereits Gegenstand entsprechender Untersuchungen war. Es enthält neben verschiedenen Landnutzungen und den Vorfluter auch ein Standgewässer.

Die genannten Teilgebiete sind relativ klein (Schnellbach: 8 km², Oberlauf Parthe: 33 km³). Soll ein meso- oder makroskaliges Einzugsgebietsmodell angewandt werden, sollte ein anderes gut beobachtetes sächsisches Gewässereinzugsgebiet als Modellgebiet verwendet werden.

Modellrecherche und -auswahl

Im Ergebnis der durchgeführten Modellrecherche konnte kein Modell gefunden werden, welches alle energetischen Prozesse im Einzugsgebiet nachbildet, beginnend beim meteorologischen Geschehen und den Energieumsätzen an der Landoberfläche, über die Wärmebewegung im Boden- und Grundwasserbereich bis zu den Fließ- und Standgewässern mit deren spezifischen Energieumsätzen. Es werden jedoch alle relevanten Teilmodelle mit vorhandenen Modellen berücksichtigt, allerdings wurden die vorhandenen Modelle mit einer eigenen Zielstellung entwickelt, die nur einen Bereich einer ganzheitlichen integrierten Betrachtung abdeckt. Viele Modelle, insbesondere Bodenwasser-, Grundwasser-, Fließgewässer- und Standgewässermodelle, betrachten jeweils nur ein Kompartiment. Darüber hinaus gibt es Modelle, welche sowohl die ungesättigte Zone (Bodenwasser) als auch die gesättigte Zone (Grundwasser) hydraulisch und auch thermisch nachbilden. Darüber hinaus gibt es zwar ganzheitliche Einzugsgebietsmodelle, welche die hydrologischen Prozesse vom Boden bis zum Gewässer nachbilden, diesen fehlt jedoch die Möglichkeit einer prozessorientierten Berechnung der Wassertemperaturen. Bestenfalls wird die Interaktion zwischen Gewässer- und Grundwassertemperatur mit vereinfachten statistischen Ansätzen nachgebildet.

3 Datengrundlage Klimadaten

3.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage zur Projektbearbeitung standen Klimadaten sowohl in Form von Datenreihen für konkrete Standorte bzw. Klimastationen zur Verfügung als auch flächendeckend für den Freistaat Sachsen in Form von Rasterdaten. Alle Daten gehen auf Beobachtungsdaten und auf Ergebnisse der aktuellen Klimamodelle zurück. Die verwendeten Daten sind in Anlage 1 ausführlich dokumentiert.

Bei den Beobachtungsdaten handelt es sich um Datenreihen, die u. a. an Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes erhoben wurden (Datenquelle: CLISAX, SMUL 2008). Die verwendeten Datenreihen beginnen im Jahr 1961 und reichen bis Mitte des Jahres 2009, sie beschreiben das aktuelle Klima.

Die Ergebnisse des aktuellen globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM T63L31 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg ermöglichen Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden klimatischen Veränderungen. Sie wurden mit einem dynamisch-statistischen Verfahren wetterlagenabhängig regionalisiert (zugrundeliegendes Regionalisierungsverfahren: WETTREG, ENKE et al. 2006, aktuell angewandt für Sachsen als WEREX IV). In der vorliegenden Studie wurde das Modellszenario A1B betrachtet, welches von einem moderaten CO₂-Anstieg in der Atmosphäre bei einer ausgewogenen Nutzung fossiler und nichtfossiler Energieträger im 21. Jahrhundert ausgeht. Dieses Szenario wird häufig bei der Anwendung der Ergebnisse des globalen Klimamodells betrachtet, z. B. liegen für dieses Szenario Projektionen der meisten relevanten Regionalisierungsverfahren für Sachsen vor (LFULG 2010).

Die Anwendung von Absolutwerten der Klimaprojektion zur Beschreibung zukünftiger klimatischer Verhältnisse ist problematisch, weil trotz des durchgeführten Abgleichs der Klimamodelle anhand der derzeitigen Verhältnisse mittels entsprechender Kontrollläufe (20C-Läufe) eine systematische Abweichung (Bias) verbleibt. Um diese systematischen Abweichungen zu umgehen, werden für die Klimafolgenmodellierung mit WEREX-IV-Projektionsdaten unterschiedliche Vorgehensweisen empfohlen (LFUG 2008):

- 1) Modell an Beobachtungsdaten kalibrieren, anschließend mit den WEREX-Daten des Kontrollklimas und des Projektionszeitraumes rechnen und prozentuale Änderungen der Modellergebnisse für die Beobachtungsdaten interpretieren,
- 2) Aus den WEREX-Datensätzen die Tendenz im meteorologischen Regime (Niederschlag, Temperatur, ...) ableiten und den Beobachtungsdaten aufprägen, die veränderte Beobachtungsdatenreihe anschließend als Modellinput für den Projektionszeitraum verwenden,
- 3) nach Einzelfallprüfung die Modellierung mit den Beobachtungsdaten beginnen und nahtlos durch eine ausgewählte Projektionsreihe fortführen.

In der vorliegenden Studie wurden zunächst die Klimaänderungssignale der Modelle als Differenz oder prozentuale Veränderung zwischen den WEREX-Daten des Projektionszeitraums und denen des Kontrollzeitraums ermittelt (Vorgehensweise 2). Aus diesen Veränderungen können unter Berücksichtigung der gemessenen Daten des derzeitigen Zustandes die zukünftigen klimatischen Größen geschätzt werden. In WEREX IV wurde der Kontrollzeitraum auf die Jahre 1971-2000 gelegt. In der vorliegenden Studie erfolgt die Projektion der Veränderungen des Klimas für die Mitte des 21. Jahrhunderts. Hierzu werden die Ergebnisse des Klimamodells für den Zeitraum 2041-2060 ausgewertet und mit den Ergebnissen für den Kontrollzeitraum verglichen (WEREX IV, Szenario A1B). Aufgrund der Auswertung zweier Dekaden werden auch mittelfristige Schwankungen ausreichend berücksichtigt. Hinsichtlich der Entwicklung des Niederschlags wird von mittleren Annahmen ausgegangen (Realisierung „normal“).

3.1.1 Standort- bzw. stationsbezogene Daten

In der Bearbeitung der Vorstudie zur aktuellen Arbeit (LfULG 2009) wurden Datenreihen für 21 Standorte von Wetterstationen in Sachsen und angrenzenden Ländern beim LfULG eingeholt. Dabei handelt es sich um Datenreihen, die an den Stationen im Zeitraum 1961-2008 gemessen oder mit dem Regionalisierungsverfahren WEREX IV aus den Ergebnissen des globalen Klimamodells für diese Stationen ermittelt wurden. Die Ergebnisse des 20C-Kontrolllaufes wurden für vier Dekaden übergeben und in der aktuellen Studie ausgewertet. Zur Charakterisierung des zukünftigen Klimas wurden die Dekaden 2041-2050 und 2051-2060 ausgewertet (Szenario A1B, Realisierung „normal“).

3.1.2 Rasterklimadaten

Von der TU Dresden wurde in Zusammenarbeit mit dem LfULG der Internetdienst RaKliDa erarbeitet, der die Bereitstellung von Rasterklimadaten an Hochschulen und Universitäten, Behörden, Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros und Privatpersonen ermöglicht (RAKLIDA 2010). Bei der zugrundeliegenden Datenbasis handelt es sich sowohl um die CLISAX-Beobachtungsdaten (SMUL 2008) als auch um die Ergebnisse des globalen Klimamodells, regionalisiert mit WEREX IV (ENKE et al. 2006). Die Beobachtungsdaten liegen ab dem Jahr 1961 vor, die Ergebnisse der Klimamodellierung für vier Dekaden (20C-Kontrolllauf) und den Projektionszeitraum 2000-2100. Die Daten wurden von der TU Dresden durch Interpolation auf ein flächendeckendes Raster von 1 x 1 km gebracht. Sie werden als Tageswerte oder in Form von Mittelwerten für Teilflächen von 10 x 10 km Größe zur Verfügung gestellt. Zur Bearbeitung der vorliegenden Studie wurden Rasterklimadaten des Niederschlages ausgewertet.

3.2 Datenaufbereitung und -verarbeitung

Die Vorgehensweise bei der Aufbereitung und Auswertung der Daten ist in Anlage 1 dokumentiert.

Die stationsbezogenen Beobachtungsdaten der 21 Standorte inner- und außerhalb Sachsens wurden zunächst interpoliert mit dem Ziel, die Daten für jeden beliebigen Standort in Sachsen verfügbar zu machen. Die Interpolation wurde für jeden Tag der 48-jährigen Beobachtungsperiode, des 40-jährigen Kontrolllaufes und des 20-jährigen Projektionszeitraumes durchgeführt. Dabei wurden die Größen Lufttemperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit bearbeitet. Anschließend wurden für die 54 Klimaregionen, welche im Rahmen der Vorstudie zur vorliegenden Arbeit (LfULG 2009) ausgehalten wurden, mittlere Tageswerte der genannten Größen berechnet. Diese interpolierten und gemittelten Beobachtungsdaten (Tageswerte) wurden in die Datenbank der Wassertemperaturen (LfULG 2009) integriert, so für jeden Datensatz einer gemessenen Wassertemperatur die zugehörigen Daten der meteorologischen Größen der betreffenden Klimaregion ermittelt werden konnten.

Im Falle der Lufttemperatur wurden neben dem gemessenen Tagesmittel auch gleitende Mittelwerte berücksichtigt (vgl. C&E 09-5), welche die Vorbedingungen des Messtages in unterschiedlichem Umfang widerspiegeln. Damit soll eine größere Aussagekraft der Lufttemperatur bei der Auswertung von Stichtagsmessungen ermöglicht werden.

Hinsichtlich des Niederschlages muss berücksichtigt werden, dass dieser kleinräumig stark variieren kann und z. B. oft nur auf einer Teilfläche der jeweiligen Klimaregion auftritt. Deshalb sind die mittleren Tagessummen der Klimaregionen zwar bilanztreu, repräsentieren aber nicht die Niederschlagsintensität an konkreten Standorten. Bei der Windgeschwindigkeit bestehen oft noch stärkere standortbezogene Unterschiede. Die kleinräumigen Unterschiede sind bei der Lufttemperatur, Luftfeuchte und Sonnenscheindauer geringer, deren Mittelwerte der Klimaregionen können auf einzelne Standorte übertragen werden.

Die Ergebnisse des Klimamodells wurden zunächst verwendet, um die Veränderungen der meteorologischen Größen Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung zu berechnen. Die mittleren Veränderungen wurden monatsbezogen berechnet. Die berechneten Veränderungen wurden auf die gemessenen Tagesreihen angewandt, woraus Tagesreihen resultieren, welche das Klima um das Jahr 2050 beschreiben sollen.

Dabei wurden folgende Größen berücksichtigt:

■ **Lufttemperatur:**

Berechnung Differenz Prognoselauf - Kontrolllauf (Monatsmittel) und Addition der Differenz zum gemessenen Tageswert des Ist-Zustandes

■ **Niederschlag, Sonnenscheindauer:**

Berechnung Quotient Prognoselauf/Kontrolllauf (Monatsmittel) und Multiplikation des Quotienten mit dem gemessenen Tageswert des Ist-Zustandes

Die Rasterklimadaten des Niederschlages wurden vorrangig zum Abgleich der Interpolationsmethode mit der Vorgehensweise von RAKLiDA (2010) verwendet, weil es sich hierbei lediglich um Monatsmittelwerte handelt (vgl. Anlage 1).

3.3 Veränderungen infolge des zu erwartenden Klimawandels

Die Veränderungen der Lufttemperatur, des Niederschlages und der Sonnenscheindauer ausgehend vom Kontrollzeitraum (Ist-Zustand 1971-2000) bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts sind als Ergebnisse der WEREX-IV-Projektion in Anlage 2 in Form von Jahresmittelwerten und Mittelwerten für die meteorologischen Jahreszeiten dargestellt.

Die **Lufttemperatur** nimmt ausgehend vom Ist-Zustand bis 2050 im Jahresmittel um 1.18 K bis 1.32 K zu. Dabei ist die Erwärmung in den Wintermonaten am stärksten (vgl. Abbildung 1). Den markanten Temperaturanstieg im Winter zeigen alle auf der Basis von ECHAM5/MPI-OM T63L31 laufenden Regionalmodelle für Sachsen (LfULG 2010). Im Sommer und Herbst steigt die Jahresmitteltemperatur ebenfalls an, allerdings ist die Veränderung nicht so stark wie im Winter. Die Temperatur steigt in den Frühjahrsmonaten im Unterschied zum restlichen Jahr kaum an. Wenngleich die Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen in Sachsen eher gering sind, lässt sich feststellen, dass insbesondere Nordwestsachsen von der Erwärmung betroffen ist, weiterhin Nordostsachsen, während die Temperaturerhöhung in Südwestsachsen, im Erzgebirge und in Südostsachsen weniger stark ausfällt (vgl. Anlage 2).

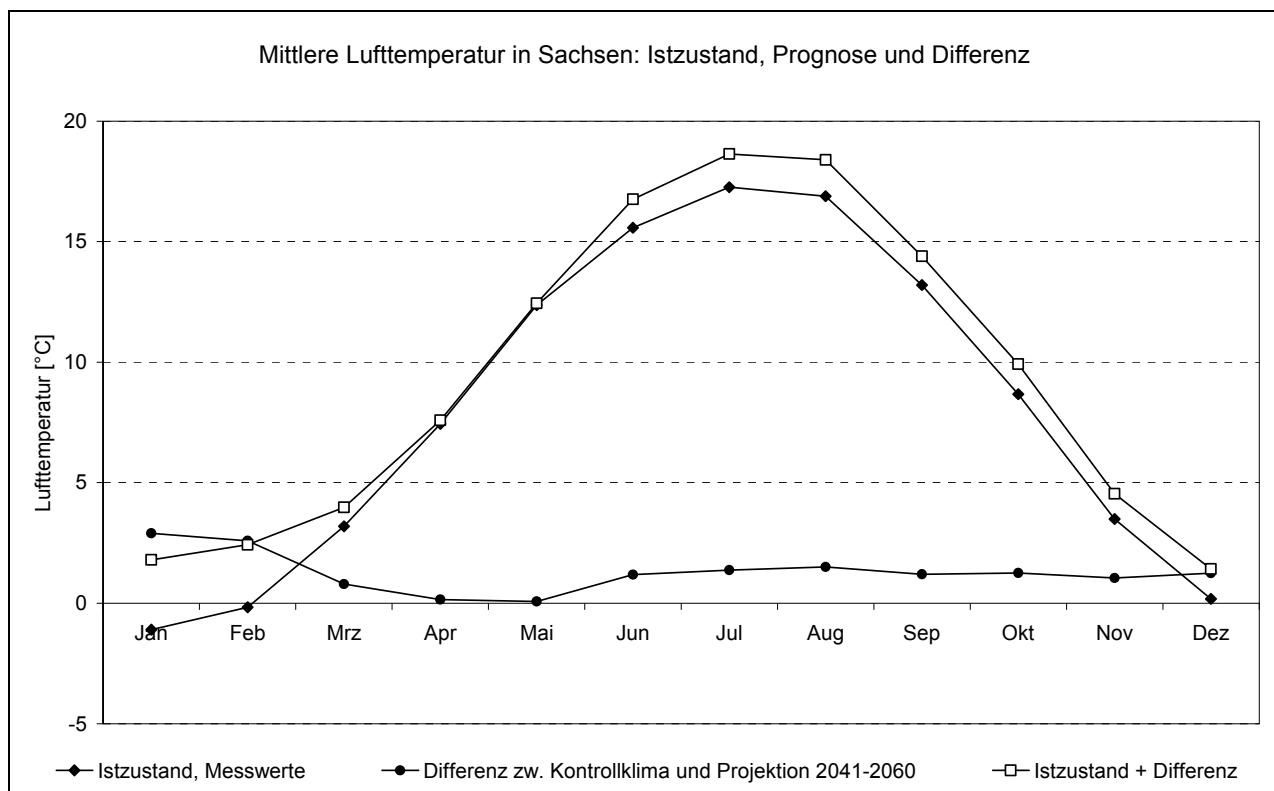


Abbildung 1: Veränderung der Lufttemperatur bis 2050 im jahreszeitlichen Verlauf (Basis: WEREX IV, A1B)

Die Veränderungen des **Niederschlages** als Ergebnis von WEREX IV sind in Anlage 2 dargestellt. Der Jahresniederschlag verändert sich zum Prognosezeitraum um ca. -21 mm/a bis ca. -64 mm/a. Der stärkste Rückgang wird für Ostsachsen prognostiziert, während der Rückgang in Westsachsen weniger stark erwartet wird. Im jahreszeitlichen Verlauf verändern sich die Winterniederschläge kaum (Westsachsen +16 mm/a, Ostsachsen -6 mm/a). Für die Herbstmonate wurde der stärkste Rückgang berechnet, im Frühjahr und Sommer geht der Niederschlag weniger stark zurück, wie die mittleren Veränderungen für Sachsen zeigen:

Winter	+5.7 mm/a	(+4.1 %)
Frühjahr	-12.3 mm/a	(-8.1 %)
Sommer	-11.4 mm/a	(-5.2 %)
Herbst	-24.6 mm/a	(-16.4 %)
Jahr	-42.6 mm/a	(-6.4 %)

Die Niederschlagsverknappung im Frühjahr und Sommer betrifft neben Ostsachsen vor allem auch die höheren Lagen des Erzgebirges (vgl. Anlage 2).

Die deutliche Abnahme der Niederschläge im Herbst in WEREX IV wird von einigen anderen Regionalmodellen nicht bestätigt (LFULG 2010). Auch für das Frühjahr sind die Ergebnisse anderer Modelle weniger eindeutig. Die Niederschlagsverknappung im Sommer und die gleichbleibende bis leicht zunehmende Tendenz im Winter zeigen aber alle Regionalmodelle für Sachsen.

Anhand der projizierten Tagesreihen des Niederschlages wurde versucht, Schlussfolgerungen hinsichtlich der Veränderungen bei den Starkniederschlägen und den Dürreperioden abzuleiten. Für die Starkniederschläge wurden Veränderungen der jährlichen Niederschlagsmaxima ausgewertet. Es konnten anhand der Tagesreihen keine systematischen Veränderungen festgestellt werden. Dies liegt u. a. darin begründet, dass zwischen der Tagessumme des Niederschlages und der Niederschlagsintensität keine unmittelbaren Zusammenhänge bestehen, sodass anhand der Tagesdaten keine sinnvolle Extremwertstatistik durchgeführt werden kann. Auch hinsichtlich der Häufigkeit niederschlagsarmer Perioden konnte keine systematische Veränderung festgestellt werden. Hierzu wurde die Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschlagssummen verglichen. Allerdings wird im Ergebnis von WEREX IV und anderer Regionalmodelle bereits bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts von einer Zunahme des Klimasignals „Sommertrockenheit“, welches von mehreren Klimagrößen bestimmt wird, ausgegangen (LFULG 2010).

Ein aktuelles Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes und anderer Institutionen beschäftigt sich mit der Zunahme von Gefahren durch extreme Niederschläge infolge des Klimawandels (UBA 2011). In Mitteleuropa ist demnach ab dem Jahr 2040 ganzjährig mit einer starken Zunahme extremer Niederschläge zu rechnen. Dies betrifft insbesondere die winterlichen Starkniederschläge und Norddeutschland. Für Sachsen werden dagegen keine wesentlichen Veränderungen der Starkniederschlagshäufigkeit prognostiziert. Dies gilt auch für den Sommer, in dem sich die Häufigkeit der Starkniederschläge in Mitteleuropa insgesamt wenig ändern soll. Zur Auswertung kamen in UBA (2011) u. a. die Ergebnisse des Regionalisierungsverfahrens WETTREG (ENKE et al. 2006).

Die **Sonnenscheindauer** lässt Rückschlüsse auf die Energiezufuhr zu Oberflächengewässern zu. Deshalb wurden auch die Veränderungen der Sonnenscheindauer aufgrund des Klimawandels untersucht (vgl. Anlage 2). Sie steigt im Jahresmittel um 58 h/a bis 127 h/a an. Der höchste Anstieg wurde für das Elbtal bei Dresden und die umgebenden Regionen berechnet. Im jahreszeitlichen Verlauf werden auf der Basis von WEREX IV für den Winter kaum Veränderungen erwartet, während im Sommer die Sonnenscheindauer am stärksten ansteigt:

Winter	-2 h/a	(-0.9 %)
Frühjahr	+23 h/a	(+4.7 %)
Sommer	+52 h/a	(+8.4 %)
Herbst	+16 h/a	(+4.8 %)
Jahr	+89 h/a	(+5.5 %)

Dieser jahreszeitliche Verlauf korrespondiert mit den Vorhersagen für den Niederschlagstrend, d. h. bei einem Rückgang der Niederschlagssumme nimmt die Sonnenscheindauer tendenziell zu und umgekehrt. Die vergleichsweise starke Zunahme der Sonnenscheindauer im Sommer ist auf das häufigere Auftreten von Starkniederschlägen in dieser Jahreszeit zurückzuführen.

4 Datengrundlage Wassertemperatur

Weil bei Probenahmen zur Oberflächenwasserbeschaffenheit in Fließgewässern im Allgemeinen auch die Wassertemperatur mit standardisierten Verfahren gemessen wird und darüber hinaus in Sachsen Pegel mit täglich gemessenen Wassertemperaturen vorhanden sind, konnte im Rahmen der Vorstudie (LfULG 2009) eine umfangreiche Datenbank mit Wassertemperaturen und anderen relevanten Informationen erstellt werden. Die Datenbank enthält unter anderem insgesamt ca. 280.000 Messwerte der Wassertemperatur von 1.316 Messstellen in Fließgewässern. Dabei handelt es sich um teilweise langjährige Wassertemperaturdaten von 29 Fließgewässerpegeln des Basismessnetzes, die täglich um dieselbe Uhrzeit (07:00 Uhr) gemessen wurden, um Stichtagsmessungen, die im Rahmen von Probenahmen an ca. 1.250 Pegeln zu unterschiedlichen Zeiten und in unterschiedlicher Anzahl durchgeführt wurden, und um wenige Pegel mit Temperaturdaten im Einzugsgebiet der Parthe und im Umweltmonitoringsystem der WISMUT GmbH (LfULG 2009).

Die gemessenen Wassertemperaturen zeigen naturgemäß einen ausgeprägten jahreszeitlichen Verlauf, der sehr gut mit einer Sinusfunktion nachgebildet werden kann. Der Tagesgang kann dagegen nicht beschrieben werden, weil jeweils nur ein Messwert pro Tag vorliegt. Allerdings muss beachtet werden, dass die Stichtagsmessungen zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt wurden. Für jeden Messwert ist der Zeitpunkt der Messung i. d. R. vorhanden.

4.1 Datenbereinigung

Vor der Auswertung der Daten wurden zunächst Messstellen aus dem Datenkollektiv entfernt, die zur Mittelwertbildung wenig geeignet sind. Dabei handelt es sich sowohl um Messstellen mit einer zu geringen Anzahl an Messdaten (<6 Messungen) als auch um Messstellen, an denen nicht regelmäßig über das gesamte Jahr gemessen wurde. Dies betrifft auch Messstellen, die auch über viele Jahre hinweg nur zu bestimmten Jahreszeiten beprobt wurden. Anthropogen beeinflusste Daten und Messstellen wurden nach Möglichkeit von der statistischen Auswertung ausgeschlossen. Hierzu wurden insbesondere Messstellen mit deutlich zu hohen oder zu geringen mittleren Wassertemperaturen auf Einleitungen von Abwasser oder Kühlwasser geprüft und bei Vorliegen von Einleitungen im Anstrom aus dem Datenkollektiv entfernt. Weiterhin wurden alle Messstellen auf folgende Kriterien überprüft:

- Lage im näheren Abstrom industrieller Einleiter, besonders von Einleitern $>1.000 \text{ m}^3/\text{a}$ und $25\text{...}38 \text{ }^\circ\text{C}$ (vgl. Vorstudie LfULG 2009)
- Lage im näheren Abstrom von Einleitstellen kommunaler Kläranlagen
- Lage im Abstrom von Kraftwerken (vgl. Vorstudie LfULG 2009)
- Lage in Gebieten mit hoher Siedlungs- und Industriedichte (nur als Entscheidungshilfe verwendet)

Von den 1.316 Fließgewässermessstellen wurden 227 Messstellen wegen der genannten Gründe von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Aufgrund der vielfältigen Art der anthropogenen Beeinflussung der Wassertemperatur von Fließgewässern, der in vielen Regionen hohen Besiedlungs-, Industrie- und Bergbaudichte und weiterer Einflüsse wie Gewässerverbau, Landnutzung, Stauanlagen u. ä. sollte die Wassertemperatur bei einem großen Teil der verbleibenden 1.089 Messstellen immer noch anthropogen beeinflusst sein. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dieser verbleibende Einfluss das Ergebnis der Temperaturprognosen nicht wesentlich beeinflusst.

4.2 Jahresgang und Saisonbereinigung

Aufgrund der Erdrotation und der nahezu kreisförmigen Bahn der Erde um die Sonne kann die Intensität der direkten Sonnenstrahlung auf die Erdoberfläche eines Standortes ohne Berücksichtigung von Verlusten in sehr guter Näherung ausschließlich mit Winkelfunktionen beschrieben werden [Jun 69]. Dies gilt auch mit zeitlicher Verzögerung annähernd für den mittleren Jahresgang der Luft- und Wassertemperatur. Im Rahmen der Vorstudie wurde der Jahresgang der Wassertemperatur für alle Pegel mit folgender Winkelfunktion nachgebildet:

$$f(x) = \sin(a + b \cdot x) \cdot c + d$$

mit x Temperatur
 a, b, c, d Parameter

Die Parameter a, b, c und d bestimmen die Verschiebung der Sinuskurve in x - und y -Richtung, die Amplitude und die Periodendauer:

- a Parameter zur Verschiebung in x -Richtung (zeitliche Verschiebung)
- b Parameter zur Festlegung der Periodendauer
- c Parameter zur Festlegung der Amplitude
- d Parameter zur Verschiebung in y -Richtung

Weil die Periodendauer der Dauer eines astronomischen Jahres entspricht, ist zur Nachbildung eines jahreszeitlichen Ganges der Parameter b stets gleich groß und beträgt nach (DVWK 238):

$$b = (2 \cdot \pi) / 365.2425$$

Die Zahl 365.2425 entspricht der mittleren Andauer eines astronomischen Jahres in Tagen. Der Parameter d entspricht der mittleren Temperatur, der Parameter c der halben Amplitude der Sinuskurve:

$$d = \bar{x}$$
$$c = (x_{\max} - x_{\min}) / 2$$

Anhand der gemessenen Temperaturen wurden die Parameter der Winkelfunktion für jeden Pegel angepasst, bis die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen Messwerten und Funktionswerten ein Minimum erreicht. Die angepassten Winkelfunktionen beschreiben den mittleren Jahresgang der Wassertemperatur, sodass für jeden Zeitpunkt ein mittlerer Erwartungswert der Wassertemperatur berechnet werden kann. Die Abweichungen (Residuen) der Messwerte von diesem Erwartungswert sind annähernd normalverteilt und weisen keine saisonalen Schwankungen auf (vgl. LFULG 2009). Sie können als saisonbereinigte Zeitreihe statistisch ausgewertet werden. Damit besteht insbesondere die Möglichkeit, langfristige Trends zu erkennen und zu quantifizieren, aber auch andere statistische Parameter wie die Streuung können ermittelt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zusätzlich alle saisonalen Verläufe der Lufttemperaturen für alle Klimaregionen berechnet. Die Parameter der Winkelfunktionen, insbesondere die zeitlichen Verschiebungen im Vergleich zur astronomischen Tageslänge bzw. zwischen Luft- und Wassertemperatur, die Amplituden und die Maxima, wurden ausgewertet.

4.3 Mittlere Wassertemperaturen

Abbildung 2 zeigt die räumliche Verteilung der mittleren gemessenen Wassertemperaturen. Im Erzgebirge, insbesondere in den Hochlagen, werden deutlich geringere mittlere Wassertemperaturen gemessen als im Flach- und Hügelland.

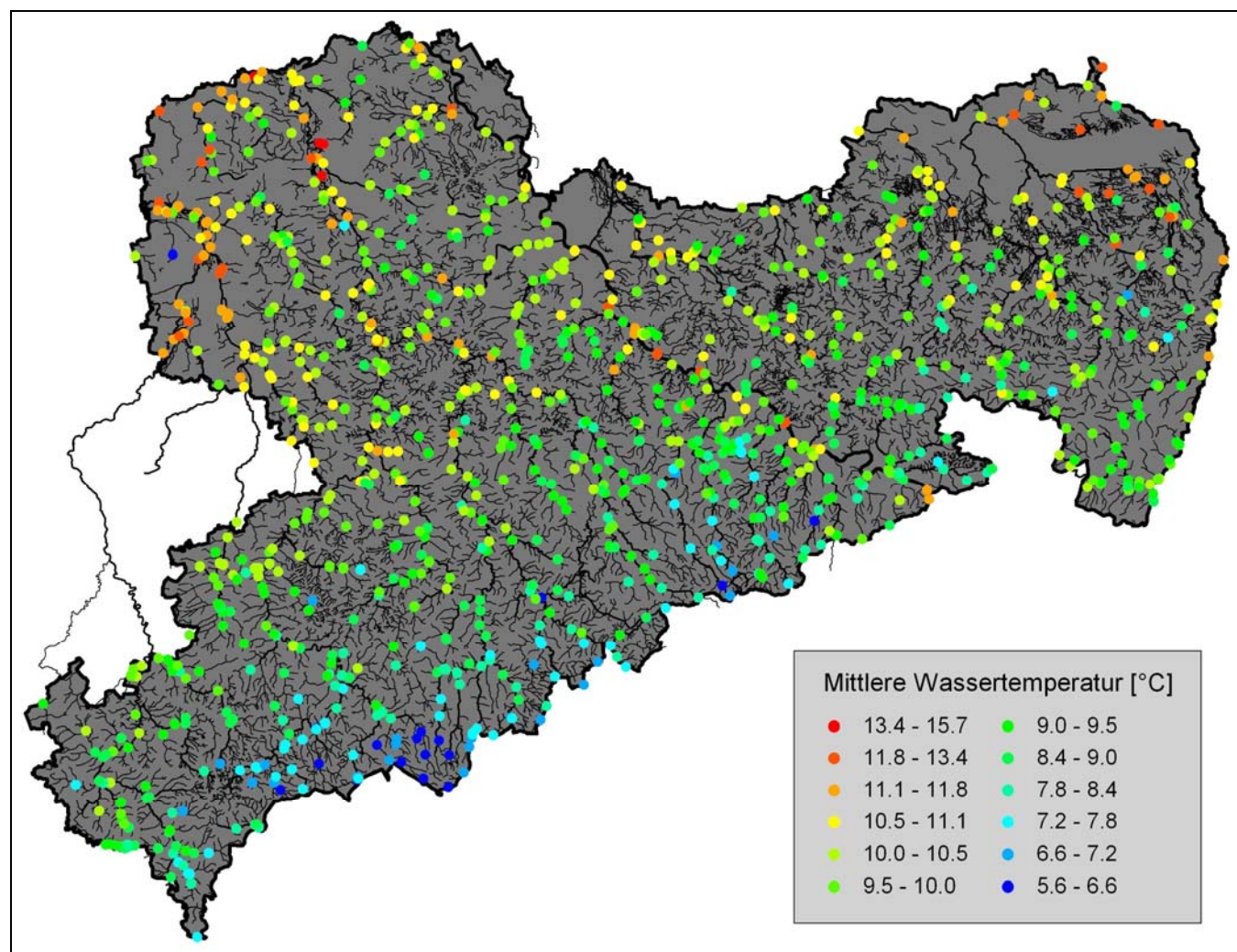


Abbildung 2: Mittlere gemessene Wassertemperatur in sächsischen Fließgewässern

Die mittlere Wassertemperatur korreliert über die Lufttemperatur und andere klimatische Einflussfaktoren mit der Höhenlage, nimmt aber auch mit zunehmender Fließlänge zu. Damit werden insbesondere im nordsächsischen Hügelland und Flachland und in der Elbe oftmals hohe mittlere Wassertemperaturen erreicht. Dies gilt offensichtlich insbesondere für Fließgewässer mit geringer Strömungsgeschwindigkeit wie z. B. bei den verbliebenen Altarmen der größeren Flüsse oder in der Lausitz bei geringem Geländegefälle. Auch in Nordsachsen finden sich Messpunkte mit kleinem Einzugsgebiet und geringer Entfernung zur Quelle, an denen vergleichsweise geringe Temperaturen gemessen werden.

In der Abbildung 3 ist die Differenz zwischen der mittleren Wassertemperatur und der mittleren Lufttemperatur dargestellt. Es wurden ausschließlich Wertepaare ausgewertet, d. h. die mittlere Lufttemperatur wurde aus den Lufttemperaturen der Tage berechnet, an denen die Wassertemperatur gemessen wurde. An 59 % der Pegel weicht die mittlere Wassertemperatur um maximal ± 0.5 K von der Lufttemperatur ab. Die mittlere Wassertemperatur entspricht bei diesen Pegeln etwa der mittleren Lufttemperatur im Messzeitraum. Die im Vergleich zur Lufttemperatur im Frühjahr/Sommer geringeren und im Herbst/Winter höheren Wassertemperaturen gleichen sich im Jahresmittel offenbar in vielen Fällen aus.

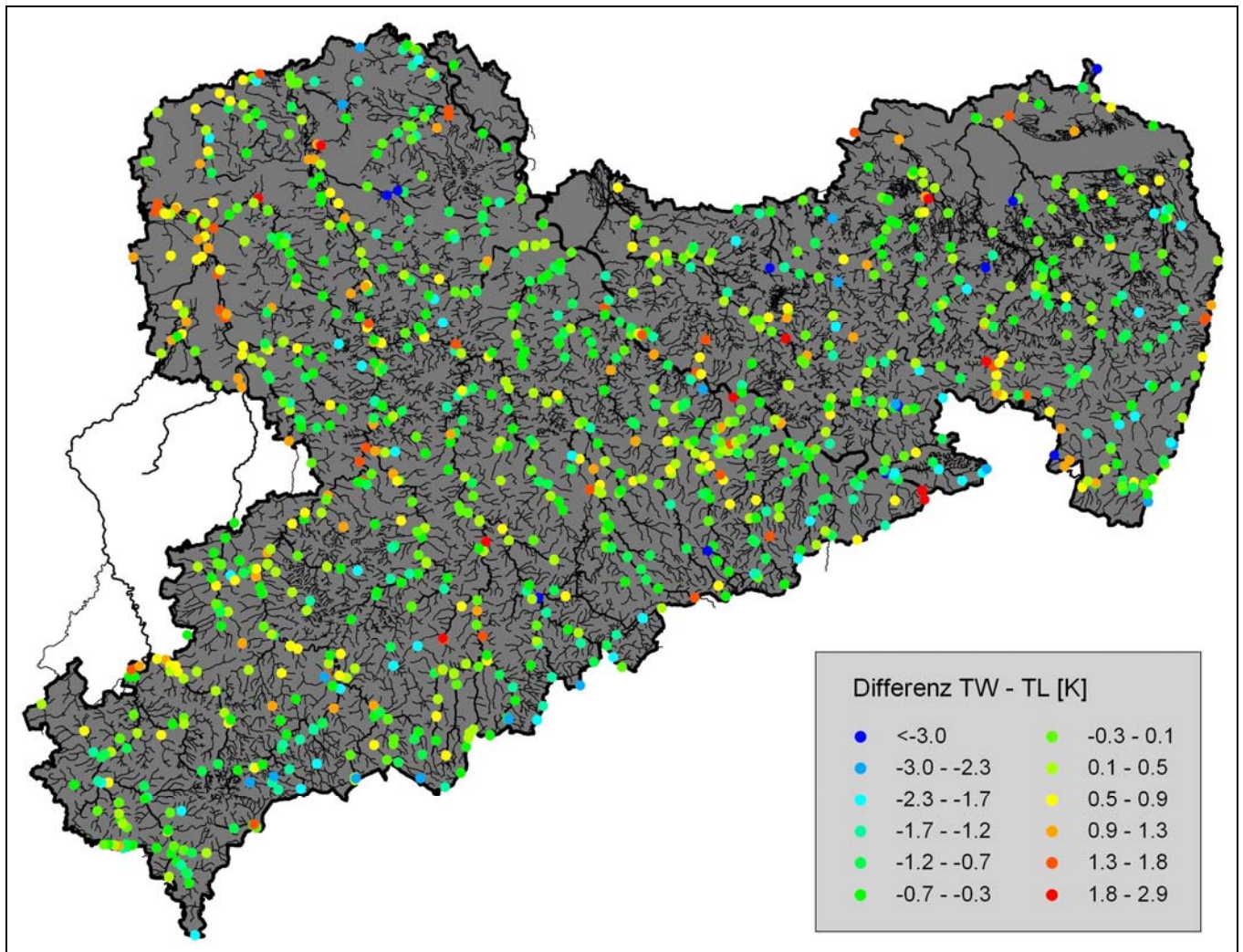


Abbildung 3: Differenz Wassertemperatur – Lufttemperatur (Mittelwerte, 1.084 Pegel)

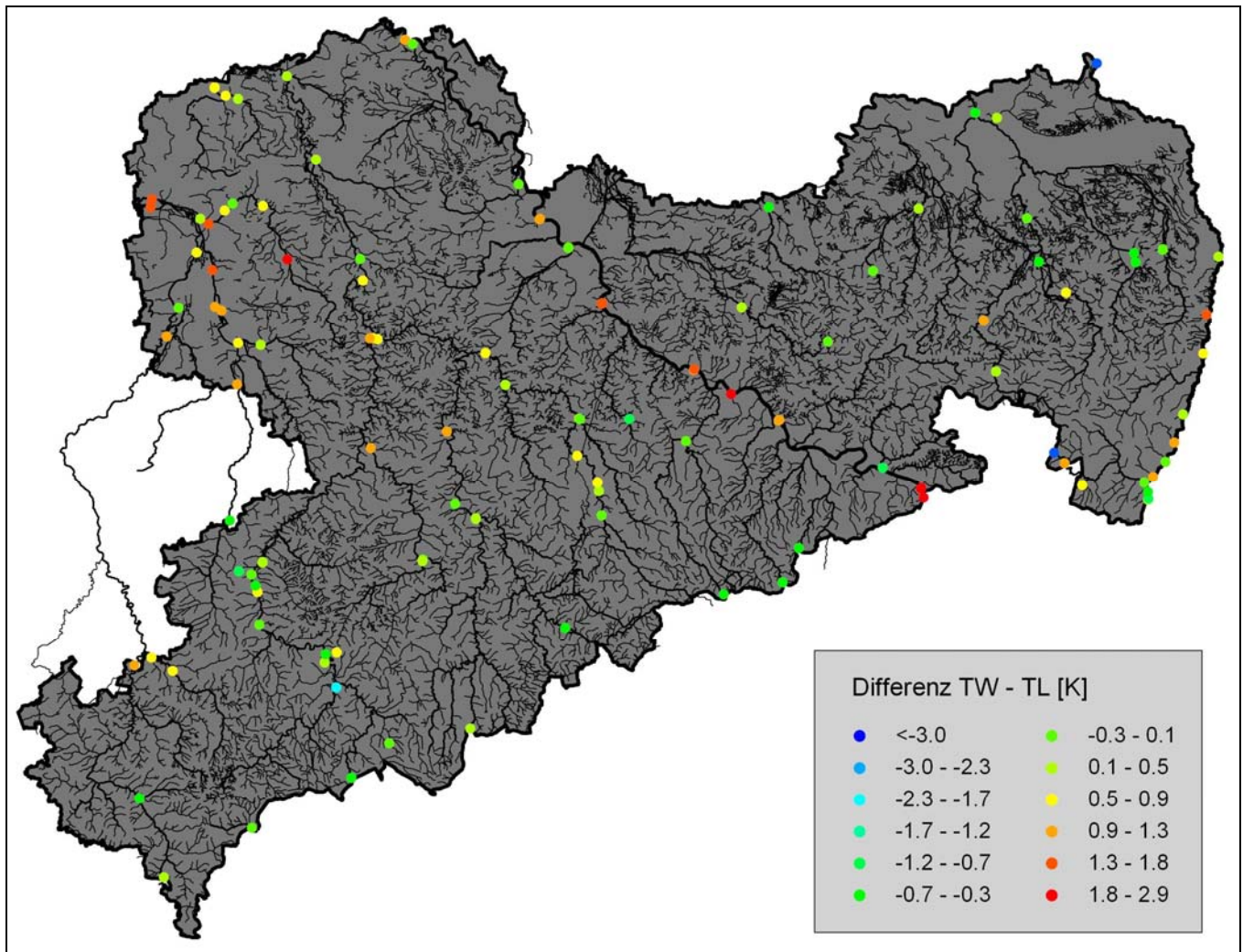


Abbildung 4: Differenz Wassertemperatur – Lufttemperatur (Mittelwerte, 122 ausgewählte Pegel mit langjährigen Datenreihen)

Die Häufigkeitsverteilung der dargestellten Abweichungen an 1.084 Pegeln ist symmetrisch, allerdings tritt der Fall, dass die mittlere Wassertemperatur geringer ist als die Lufttemperatur, etwas häufiger auf (vgl. Abbildung 5). Die mittlere Wassertemperatur ist insgesamt um 0.2 K geringer als die mittlere Lufttemperatur. Die Abweichung der Wassertemperatur an den Pegeln liegt zwischen -4.0 K und +2.9 K.

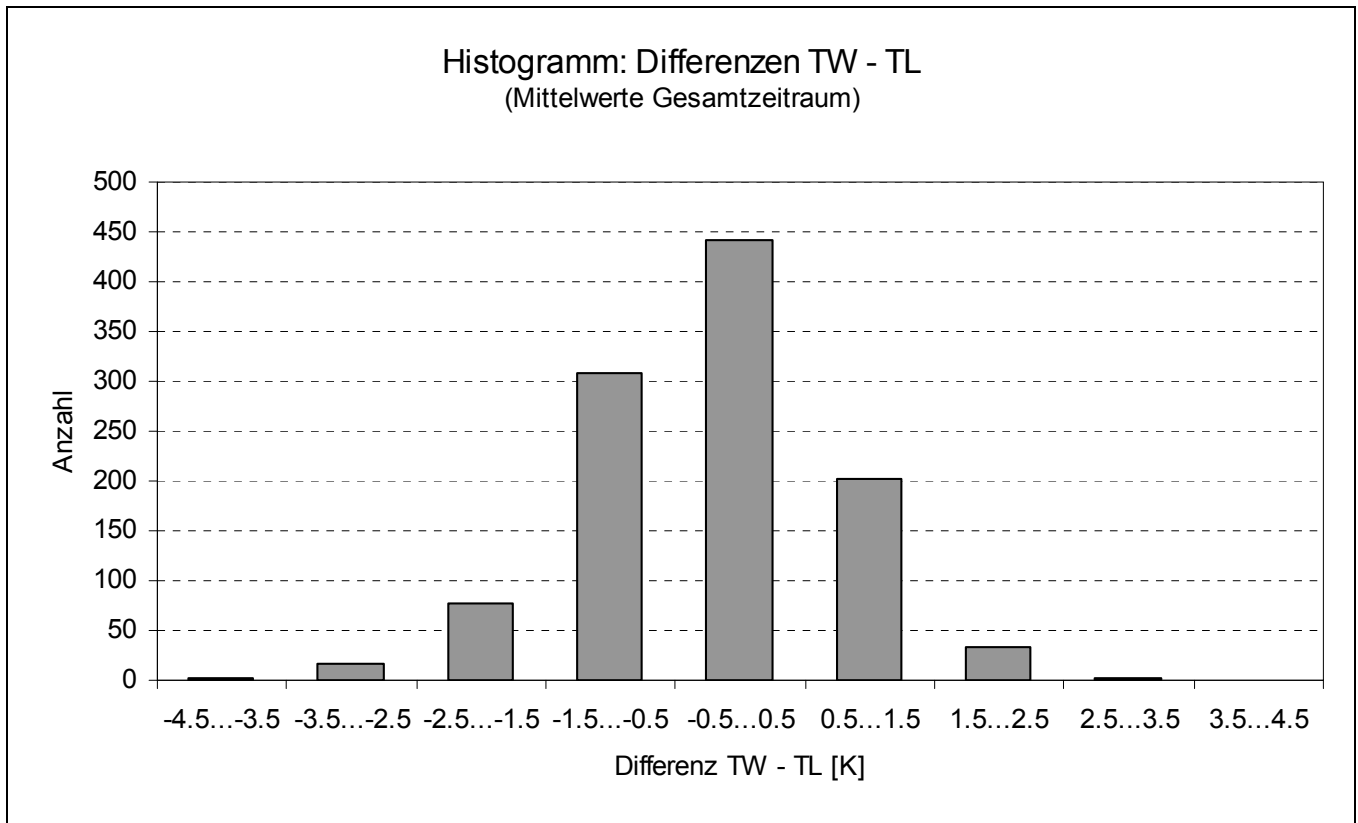


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Abweichung der mittleren Wassertemperatur von der Lufttemperatur (1.084 Pegel)

Deutliche Abweichungen können durch verbliebene anthropogene Einflüsse bedingt sein. Dies gilt neben einzelnen Pegeln in ansonsten unauffälligen Fließgewässern insbesondere für die Weiße Elster und Pleiße in Nordwestsachsen, für die Elbe im Elbsandsteingebirge und in der Dresdner Elbtalweitung oder den Oberlauf der Spree im Oberlausitzer Bergland.

Anhand der Daten kann im Wesentlichen kein Zusammenhang zwischen den Abweichungen der Wassertemperatur von der Lufttemperatur und Einflussgrößen wie die mittlere Lufttemperatur, die Höhenlage oder die geografische Lage der Pegel oder Fließgewässertypen und -ordnung festgestellt werden. Für das Westerzgebirge deutet sich an, dass die mittleren Wassertemperaturen vergleichsweise deutlich niedriger sind als die Lufttemperaturen. Für die Fließgewässer oder Regionen mit höheren Wassertemperaturen sollte der Unterschied im Wesentlichen auf den anthropogenen Einfluss zurückzuführen sein.

4.4 Veränderungen der Beobachtungsdaten der Wasser- und Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist eine wesentliche Einflussgröße für die Wassertemperatur in den Fließgewässern. Sie hat sich seit Beginn des Messzeitraumes im Jahr 1961 teilweise deutlich verändert, was sowohl auf natürliche längerfristige Schwankungen des Klimas zurückgeht als auch bereits auf eine anthropogen bedingte Erwärmung.

Die Lufttemperatur stieg an nahezu jeder Klimastation in Sachsen und in den angrenzenden Regionen seit 1961 kontinuierlich an. Die Veränderung der mittleren Temperaturverhältnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Mittlere gemessene Lufttemperatur der Stationen Chemnitz, Cottbus, Doberlug-Kirchhain, Dresden-Klotzsche, Fichtelberg, Gera-Leumnitz, Görlitz, Hof-Hohensaas, Leipzig-Holzhausen, Marienberg, Plauen, Ceska Lipa, Jablonne v. P., Nova Ves, Varnsdorf ¹⁾

Zeitraum	mittlere Lufttemperatur [°C]	Veränderung [K]	Veränderung (kumuliert) [K]
1961-1970	7.17	-	0
1971-1980	7.39	+0.22	+0.22
1981-1990	7.72	+0.33	+0.55
1991-2000	8.13	+0.41	+0.96
2001-2008	8.43	+0.30	+1.26

¹⁾ Stationen wurden nur berücksichtigt, wenn die Datenreihen keine größeren Lücken aufwiesen

Der Anstieg der Lufttemperatur wird ebenso deutlich, werden ausschließlich die sächsischen Hauptwetterstationen zur Auswertung herangezogen (Stationen Chemnitz, Dresden, Görlitz, Fichtelberg, Leipzig, Plauen). In Abbildung 6 ist die mittlere Lufttemperatur an diesen Stationen in Form eines gleitenden Mittelwertes dargestellt. Es resultiert ein Anstieg von 0.34 K pro Dekade im Zeitraum 1961 bis 2009.

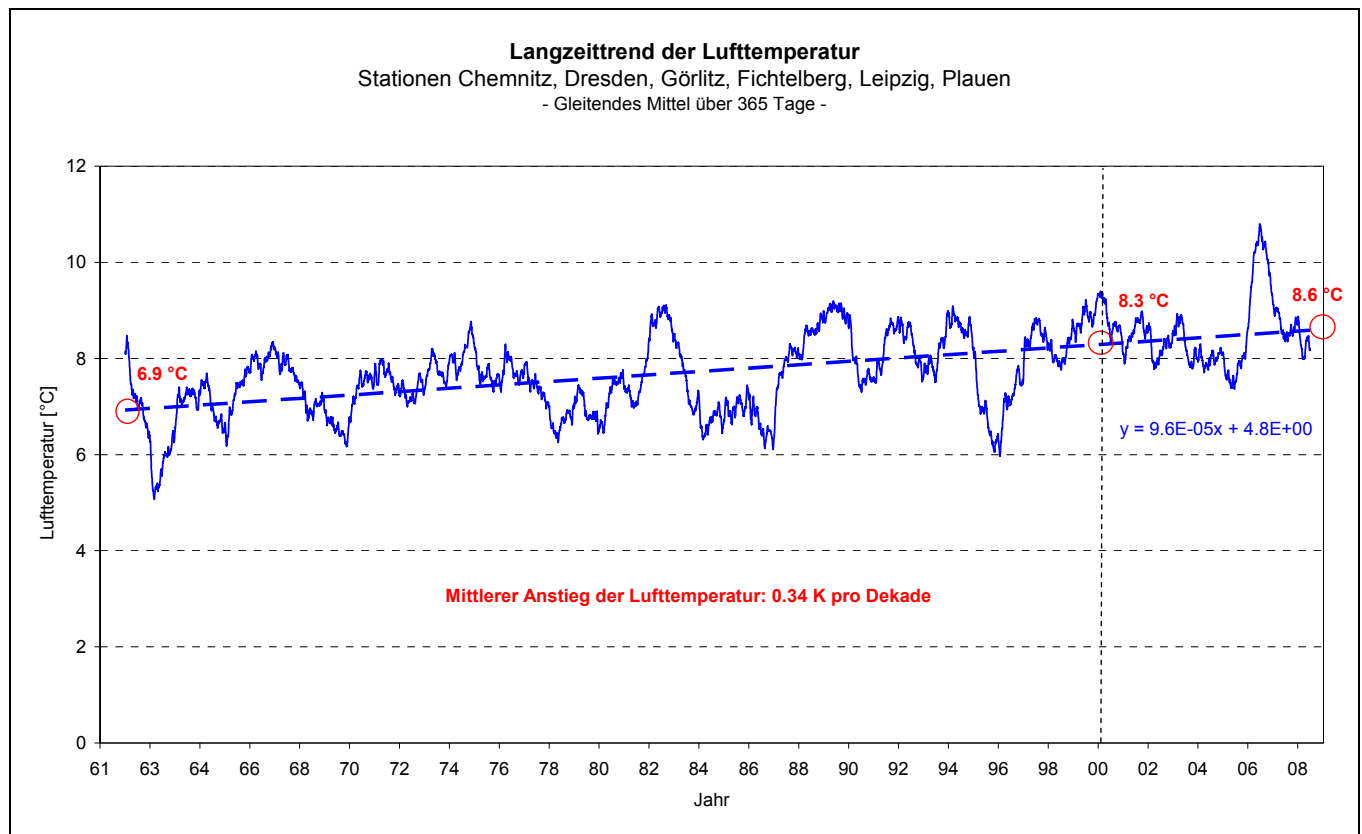


Abbildung 6: Entwicklung der an sächsischen Wetterstationen aufgezeichneten Lufttemperatur

Weil ursächliche Zusammenhänge zwischen Luft- und Wassertemperatur bestehen, wurde die Veränderung der Wassertemperatur im Zusammenhang mit der Lufttemperatur untersucht. Hierzu wurden die Fließgewässerpegel mit vieljährigen Datenreihen täglicher Messungen der Wassertemperatur ausgewertet. Diese Pegel liegen in der Elbe und den großen Flüssen: Bad Dübener See, Bautzen UP, Bautzen Weite Bleiche, Boxberg, Dresden, Erlin, Görlitz, Golzern 1, Gröditz, Jänkendorf, Kleindalzig, Leipzig-Thekla, Lichtenwalde, Lieske, Mylau, Regis-Serbitz, Rosenthal, Särchen, Schirgiswalde, Schöna, Strehla, Zeitz, Zittau, Zwickau-Pöhlitz

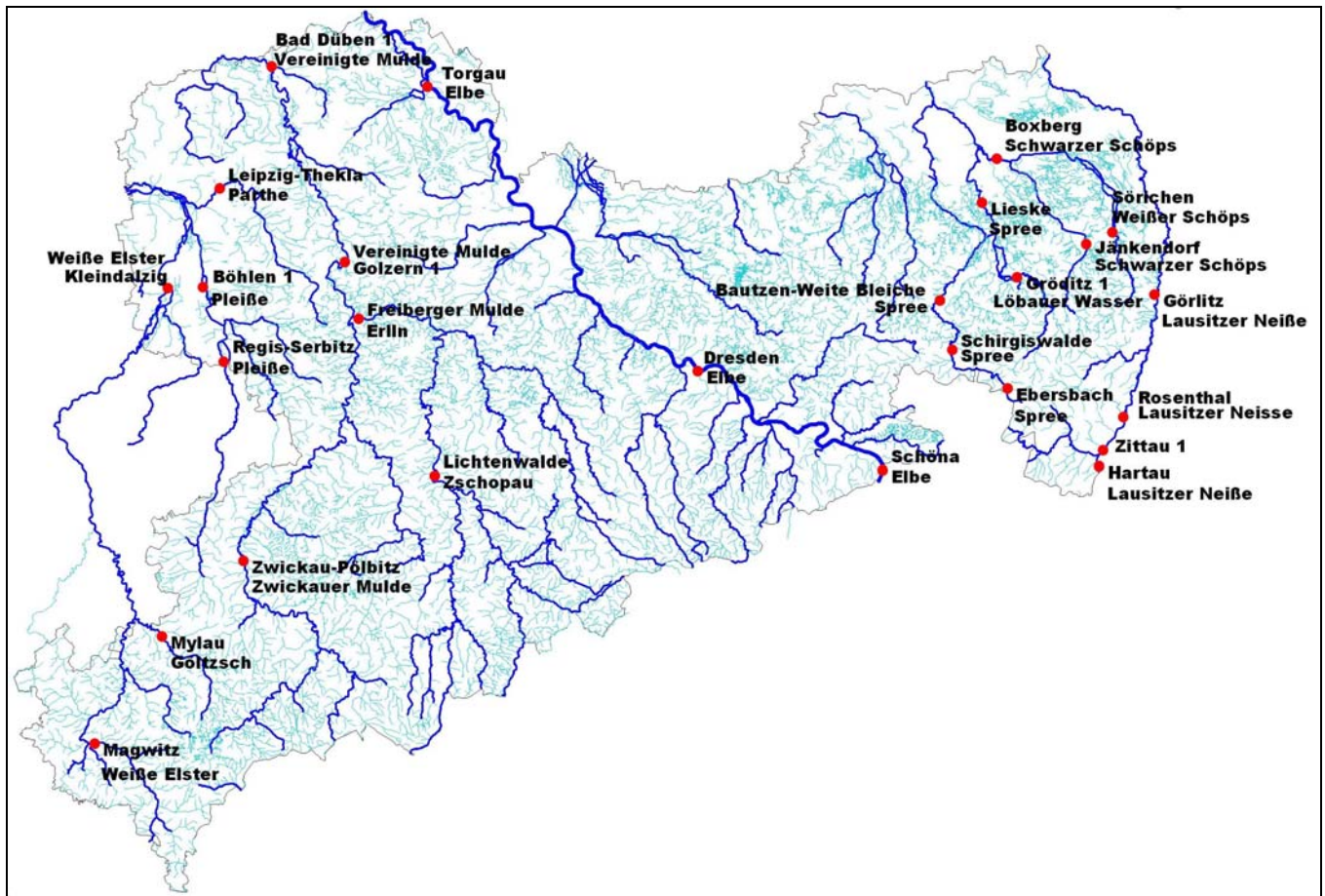


Abbildung 7: Fließgewässerpegel mit täglichen Temperaturmessungen

Anhand der Datenreihen wurden Jahresmittelwerte der Lufttemperatur der betreffenden Klimaregionen (vgl. Abschnitt 3.2) und der Wassertemperatur berechnet. Anschließend wurde jeweils der Trend der Jahresmittelwerte ermittelt, sodass die mittleren Veränderungen der Wasser- und Lufttemperaturen einander gegenübergestellt werden können (vgl. Anlage 3). Im Ergebnis lassen sich die Fließgewässerpegel bezüglich der Entwicklung der Wassertemperatur im Zusammenhang mit der Lufttemperatur in Gruppen einteilen. Die Mehrzahl der Pegel zeigt einen parallelen Trend der Wasser- und Lufttemperaturen, d. h. die mittelfristigen Veränderungen der Wassertemperatur erfolgten annähernd um den gleichen Temperaturbetrag wie bei der Lufttemperatur. Dabei handelt es sich um folgende Pegel (Tabelle 2):

Tabelle 2: Fließgewässerpegel mit keinen oder geringen Unterschieden der Veränderungen von Wasser- und Lufttemperatur

Pegel	Gewässer	Bemerkung
Bad Düben 1	Vereinigte Mulde	deutliche parallele Zunahme von 1986 bis 2007 saisonale Schwankungen nahezu identisch und ohne zeitliche Verzögerung
Bautzen UP	Spree	deutliche Zunahme von 1977 bis 1989 typische saisonale Schwankungen mit zeitlicher Verzögerung
Boxberg	Schwarzer Schöps	Zunahme von 1981 bis 1999 saisonale Amplitude der Wassertemperatur deutlich kleiner als die der Lufttemperatur
Dresden	Elbe	Zunahme von 1962 bis 1994 typische saisonale Schwankungen mit zeitlicher Verzögerung, Wassertemperatur stets höher als Lufttemperatur
Golzern 1	Vereinigte Mulde	deutliche Zunahme von 1987 bis 2007 saisonale Schwankungen mit geringer Verzögerung, Amplitude nahezu identisch

Pegel	Gewässer	Bemerkung
Gröditz	Löbauer Wasser	Zunahme von 1972 bis 1999 saisonale Schwankungen mit geringer Verzögerung
Jänkendorf	Schwarzer Schöps	Zunahme von 1981 bis 1999 saisonale Amplitude der Wassertemperatur deutlich kleiner als die der Lufttemperatur
Lichtenwalde	Zschopau	parallele Zunahme von 1966 bis 1991 saisonale Schwankungen mit geringer zeitlicher Verzögerung, Amplitude der Wassertemperatur kleiner als die der Lufttemperatur
Lieske	Spree	parallele Zunahme von 1976 bis 1989 saisonale Schwankungen mit geringer zeitlicher Verzögerung
Mylau	Göltzsch	ab 1965 bis 1991 ähnliche Zunahmen bei Luft- und Wassertemperatur, nur 1962-1964 höhere Wassertemperaturen saisonale Schwankungen mit zeitlicher Verzögerung, Amplitude der Wassertemperatur deutlich kleiner als die der Lufttemperatur
Regis-Serbitz	Pleiße	ähnliche Zunahme der Luft- und Wassertemperatur 1986-2006 saisonale Schwankungen mit geringer zeitlicher Verzögerung und ähnlichen Amplituden
Schöna	Elbe	Zunahme von 1981 bis 1990 saisonale Schwankungen mit deutlicher zeitlicher Verzögerung und ähnlicher Amplitude, Wassertemperatur stets höher als Lufttemperatur
Strehla	Elbe	parallele Zunahme von 1963 bis 1998 typische saisonale Schwankungen mit deutlicher zeitlicher Verzögerung und ähnlicher Amplitude, Wassertemperatur stets höher als Lufttemperatur
Zittau	Lausitzer Neiße	starke parallele Zunahme von 1979 bis 2008 saisonale Schwankungen mit geringer zeitlicher Verzögerung und geringerer Amplitude bei der Wassertemperatur

Die mit Messdaten belegten Perioden überdecken bei allen Pegeln unterschiedliche Zeiträume. Dennoch resultiert für jeden Zeitraum stets eine Zunahme sowohl der Lufttemperatur als auch der Wassertemperatur. Bei einigen Pegeln verläuft der Trend nahezu parallel (Bad Dübener See, Lichtenwalde, Lieske, Strehla, Zittau). Einen solchen parallelen Trend mit Temperaturzunahme über einen langen Zeitraum zeigen z. B. die Daten des Pegels Lichtenwalde/Zschopau (Abbildung 8).

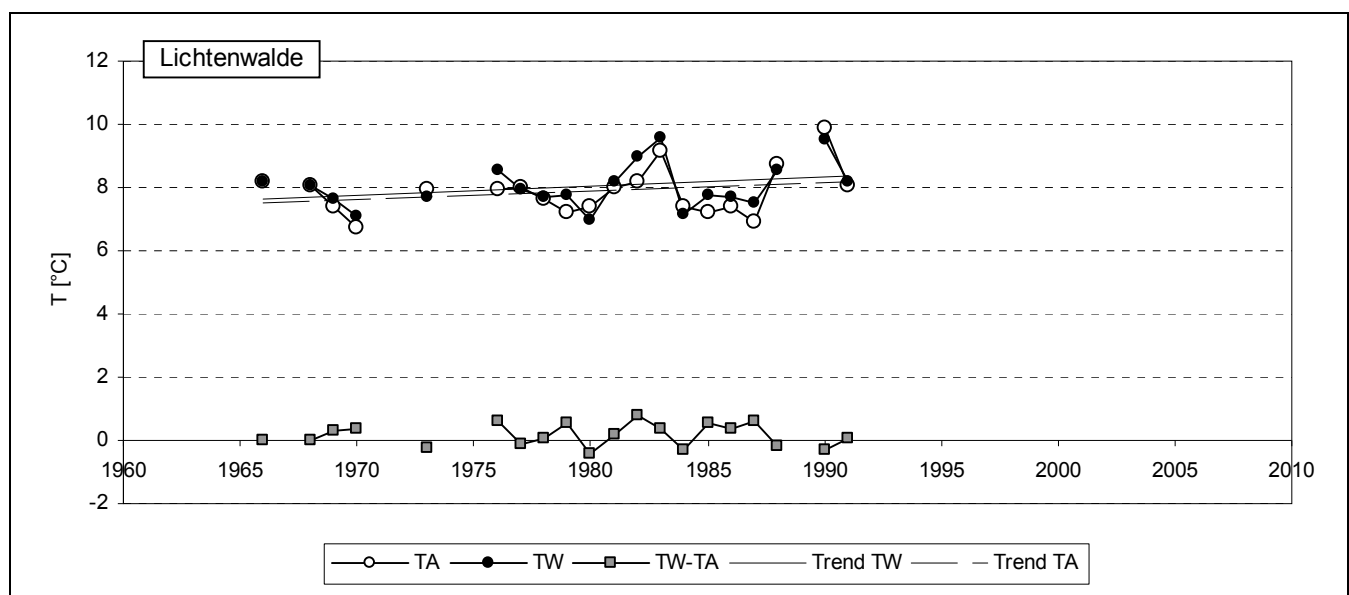


Abbildung 8: Exemplarische Darstellung der Jahresmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur (hydrologische Jahre), Pegel Lichtenwalde, Zschopau

Bei den in Tabelle 3 genannten Pegeln verändert sich die Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur nicht bzw. kaum. Das heißt, eine anthropogene Beeinflussung der Wassertemperatur blieb über den gesamten Beobachtungszeitraum konstant und ist demnach eher unwahrscheinlich. Die Daten dieser Pegel eignen sich damit gut zur Auswertung. Die folgende Tabelle verdeutlicht, dass sich die Temperaturanstiege bei den einzelnen Pegeln zwar unterscheiden, zwischen Wasser- und Lufttemperatur dagegen nur geringe Unterschiede vorhanden sind:

Tabelle 3: Anstiege der Wasser- (TW) und Lufttemperatur (TA)

Pegel	Anstieg TW	Anstieg TA
Bad Dübén 1	+0.055 K/a	+0.056 K/a
Bautzen UP	+0.086 K/a	+0.056 K/a
Dresden	+0.038 K/a	+0.037 K/a
Golzern 1	+0.044 K/a	+0.059 K/a
Gröditz	+0.016 K/a	+0.027 K/a
Jänkendorf	+0.047 K/a	+0.034 K/a
Lichtenwalde	+0.027 K/a	+0.027 K/a
Lieske	+0.053 K/a	+0.045 K/a
Mylau	+0.001 K/a	+0.015 K/a
Regis-Serbitz	+0.027 K/a	+0.043 K/a
Schöna	+0.135 K/a	+0.082 K/a
Strehla	+0.027 K/a	+0.034 K/a
Zittau 1	+0.046 K/a	+0.052 K/a
Mittlerer Anstieg	+0.046 K/a	+0.044 K/a

Bei einer weiteren Teilmenge der Fließgewässerpegel mit täglichen Messungen veränderte sich die Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur. Dies äußert sich in einem unterschiedlichen Trend und in der Veränderung der Differenz Wassertemperatur - Lufttemperatur (TW-TA). Die Tabelle 4 enthält die Pegel, bei denen die Wassertemperatur im Beobachtungszeitraum im Vergleich zur Lufttemperatur abgenommen hat.

Tabelle 4: Fließgewässerpegel mit abnehmendem Trend der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur

Pegel	Gewässer	Bemerkung
Bautzen Weite Bleiche	Spree	bis 1989 Wassertemperatur und Lufttemperatur parallel, aber Wassertemperatur höher als im Zeitraum nach 1989 saisonale Schwankungen ohne wesentliche zeitliche Verzögerung, deutlich geringere Amplitude bei der Wassertemperatur
Böhlen 1	Pleißer	Wassertemperatur im Zeitraum 2001 bis 2003 deutlich höher im Vergleich zur Lufttemperatur als im Zeitraum ab 2004 saisonale Schwankungen ohne wesentliche zeitliche Verzögerung
Erlin	Freiberger Mulde	deutliche Abnahme der Wassertemperatur bis 1995 im Vergleich zur Lufttemperatur saisonale Schwankungen mit geringer zeitlicher Verzögerung und ähnlichen Amplituden

Pegel	Gewässer	Bemerkung
Görlitz	Lausitzer Neiße	stetige Abnahme der Wassertemperatur 1979 bis ca. 2000 saisonale Schwankungen mit geringer zeitlicher Verzögerung, deutlich geringere Amplitude der Wassertemperatur
Leipzig Groß- zschocher	Elsteraue	starke Abnahme der Wassertemperatur zwischen etwa 1990 bis 1995 saisonale Schwankungen ohne wesentliche Unterschiede
Leipzig-Thekla	Parthe	schwache Abnahme der Wassertemperatur in den 1990er Jahren saisonale Schwankungen ohne wesentliche zeitliche Verzögerung, deutlich geringere Amplitude der Wassertemperatur
Rosenthal	Lausitzer Neiße	bis 1989 hohe Wassertemperaturen, bis 1995 starker Rückgang, ab 1995 auf gleichbleibend niedrigem Niveau saisonale Schwankung mit geringer zeitlicher Verzögerung und geringerer Amplitude der Wassertemperatur
Schirgiswalde	Spree	stetige geringfügige Abnahme der Wassertemperatur 1976 bis 1990 saisonale Schwankungen ohne wesentlicher zeitlicher Verzögerung und geringerer Amplitude der Wassertemperatur
Zwickau- Pölbitz	Zwickauer Mulde	vor 1990 höhere Wassertemperaturen als nach 1990 typische saisonale Entwicklung mit im Vergleich zur Lufttemperatur höheren Wassertemperaturen im Winter und geringeren im Sommer

Die Abnahme der Wassertemperatur lässt auf die Veränderung eines anthropogenen Einflusses wie die Verringerung von Einleitungen warmer Abwässer schließen. Zur weiteren Auswertung eignen sich die Abschnitte der Datenreihen nach Abschluss dieser Veränderungen wie z. B. beim Pegel ErlIn ab 1995 (vgl. Abbildung 9).

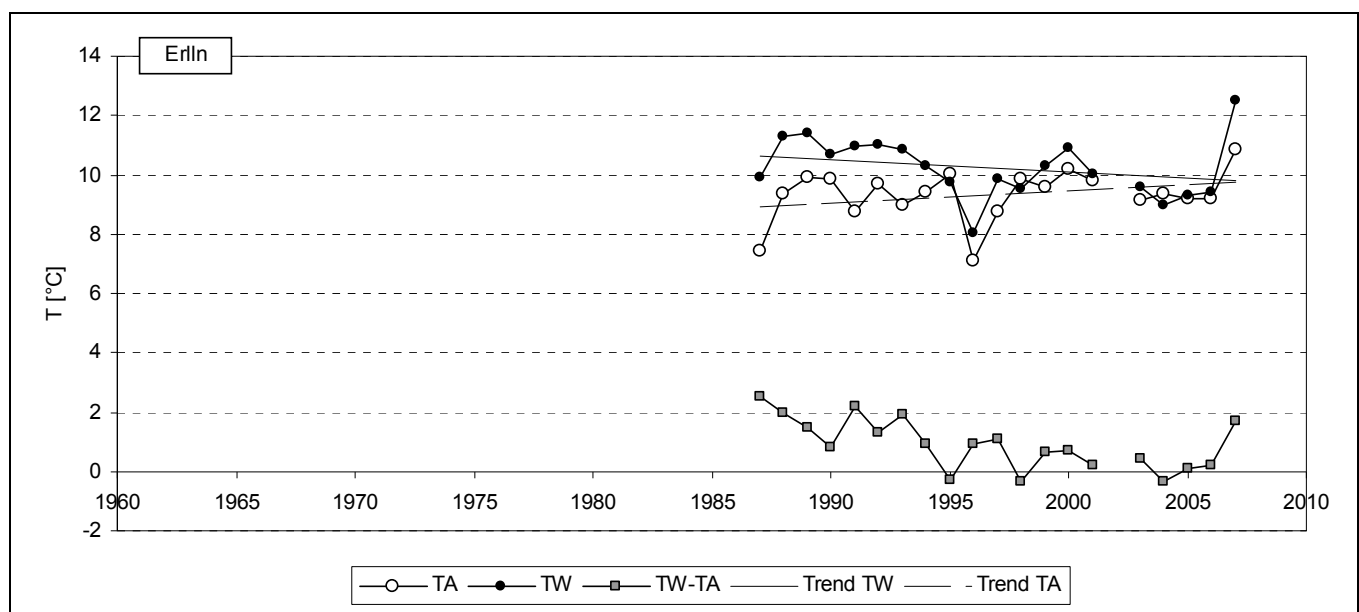


Abbildung 9: Exemplarische Darstellung der Jahresmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur (hydrologische Jahre), Pegel ErlIn, Freiburger Mulde

Bei zwei weiteren Pegeln ist eine Zunahme der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur erkennbar. Dies kann eine Folge einer erhöhten Einleitung warmer Abwässer sein, aber auch Veränderungen der Ufervegetation in Form einer Verlichtung/Beseitigung oder andere Nutzungsänderungen sind nicht auszuschließen. Die Veränderungen sind allerdings nur geringfügig und der Beobachtungszeitraum vergleichsweise kurz, sodass auch zufällige Abweichungen als Ursache für die unterschiedlichen Trends in Frage kommen.

Tabelle 5: Fließgewässerpegel mit zunehmendem Trend der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur

Pegel	Gewässer	Bemerkung
Kleindalzig	Weißer Elster	Zunahme von 1995 bis 2007, stärkere Zunahme bei der Wassertemperatur saisonale Schwankungen ohne wesentliche Unterschiede zwischen Wasser- und Lufttemperatur
Särichen	Weißer Schöps	bis 1995 keine Zu- oder Abnahme der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur, ab 1995 höhere Wassertemperaturen

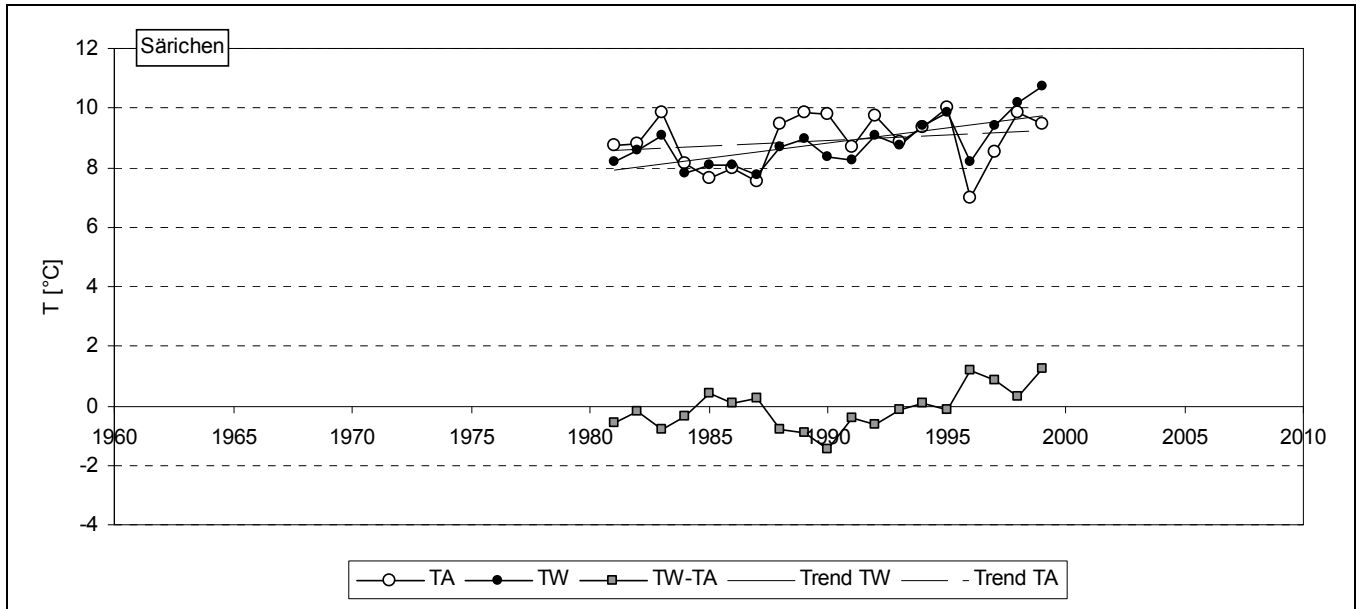


Abbildung 10: Exemplarische Darstellung der Jahresmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur (hydrologische Jahre), Pegel Särichen, Weißer Schöps

4.5 Saisonale Schwankungen von Wasser- und Lufttemperatur

Hinsichtlich der saisonalen Schwankungen sind ebenfalls unterschiedliche typische Verläufe festzustellen. Die Wassertemperatur (Monatsmittel) in der Elbe ist stets höher als die Lufttemperatur und es ist eine deutliche zeitliche Verzögerung bei der saisonalen Entwicklung der Wassertemperatur festzustellen (Abbildung 11, Beispiel Pegel Dresden). Bei den anderen größeren Flüssen schwankt die Wassertemperatur nur wenig verzögert bezüglich der Lufttemperatur (Abbildung 11, Beispiel Pegel Erlin). Dies äußert sich darin, dass die Wassertemperatur (Monatsmittel) im Frühjahr oft identisch ist mit der Lufttemperatur, im Herbst dagegen ist die Wassertemperatur ausgehend vom Sommer noch höher als die der Lufttemperatur. Dabei kann die Amplitude beider Größen ähnlich sein. Bei einigen Pegeln in Nordsachsen ist der saisonale Verlauf der Wassertemperaturen nahezu identisch mit dem der Lufttemperatur (Bad Dübener See, Kleindalzig, Leipzig-Großschocher, Böhlen 1). Wenn die Lufttemperatur im Winter unter den Nullpunkt sinkt, folgt die Wassertemperatur nicht, weil das Minimum der mittleren Wassertemperatur stets über 0 °C liegt (Abbildung 11, Beispiel Pegel Bautzen Weite Bleiche). Der Pegel Boxberg zeigt bei der Wassertemperatur eine deutlich kleinere Amplitude im Vergleich zur Lufttemperatur, wobei die Wintertemperaturen deutlich über und die Sommertemperaturen deutlich unter der Lufttemperatur liegen (Abbildung 11). Dies deutet auf eine starke anthropogene Beeinflussung hin (Einleitung von Grundwässern zur Wasserhaltung der Braunkohlentagebaue).

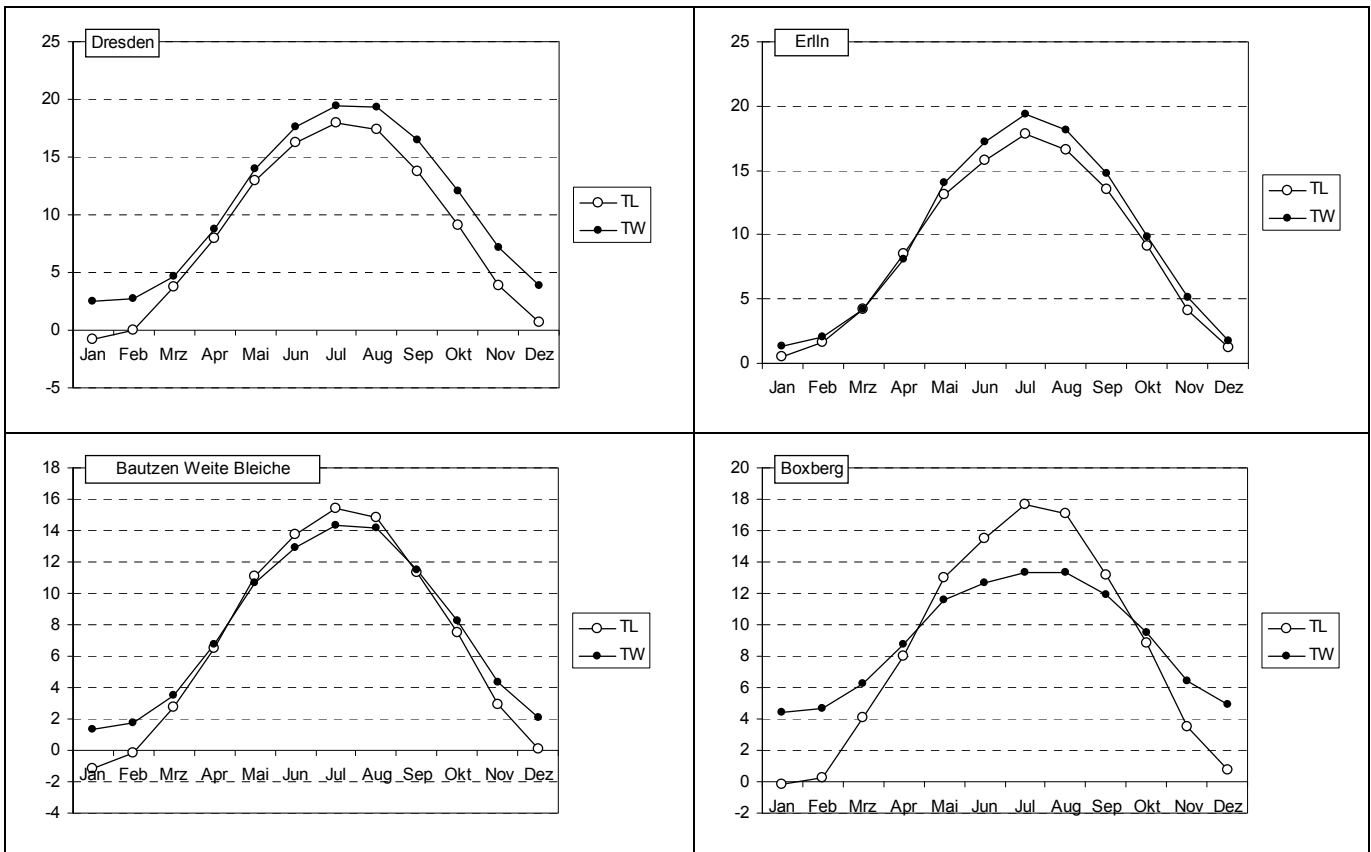


Abbildung 11: Exemplarischer Vergleich der saisonalen Schwankungen der Luft- und Wassertemperatur

Bei den Pegeln Rosenthal und Görlitz deuten die hohen winterlichen Wassertemperaturen ebenso wie die dort festgestellten mittelfristigen Temperaturrückgänge ggf. auf eine anthropogene Beeinflussung.

4.5.1 Zeitliche Verschiebung der saisonalen Verläufe

Die verzögerte saisonale Schwankung der Temperatur kann in Bezug auf die astronomische Tageslänge anhand der an die Messwerte angepassten Sinusfunktionen ermittelt werden (LFULG 2009). Sie wurde in Anlehnung an DVWK 238 wie folgt berechnet:

$$\Delta t = \frac{-a \cdot 365.25}{2\pi} + \frac{3}{4} \cdot 365.25 - 8.75$$

mit Δt zeitliche Verschiebung [d]
 a Parameter der Sinusfunktion des saisonalen Temperaturverlaufes (vgl. Abschnitt 4.2)

Der mittlere saisonale Jahresgang der Lufttemperatur verläuft in Bezug auf die astronomische Tageslänge bzw. Termine wie die Sommer- und Wintersonnenwende etwa um 9 bis 12 Tage verzögert (vgl. Abbildung 12). Die tiefsten Temperaturen im Winter werden im Mittel 9 bis 12 Tage nach der Wintersonnenwende am 21./22. Dezember gemessen. Dies gilt ebenso für die höchsten Temperaturen bezüglich der Sommersonnenwende am 21. Juni. Die zeitliche Verschiebung ist in den stärker ozeanisch beeinflussten Regionen in Westsachsen und insbesondere in den höheren Lagen des Erzgebirges etwas größer als im etwas kontinentaler geprägten Ostsachsen.

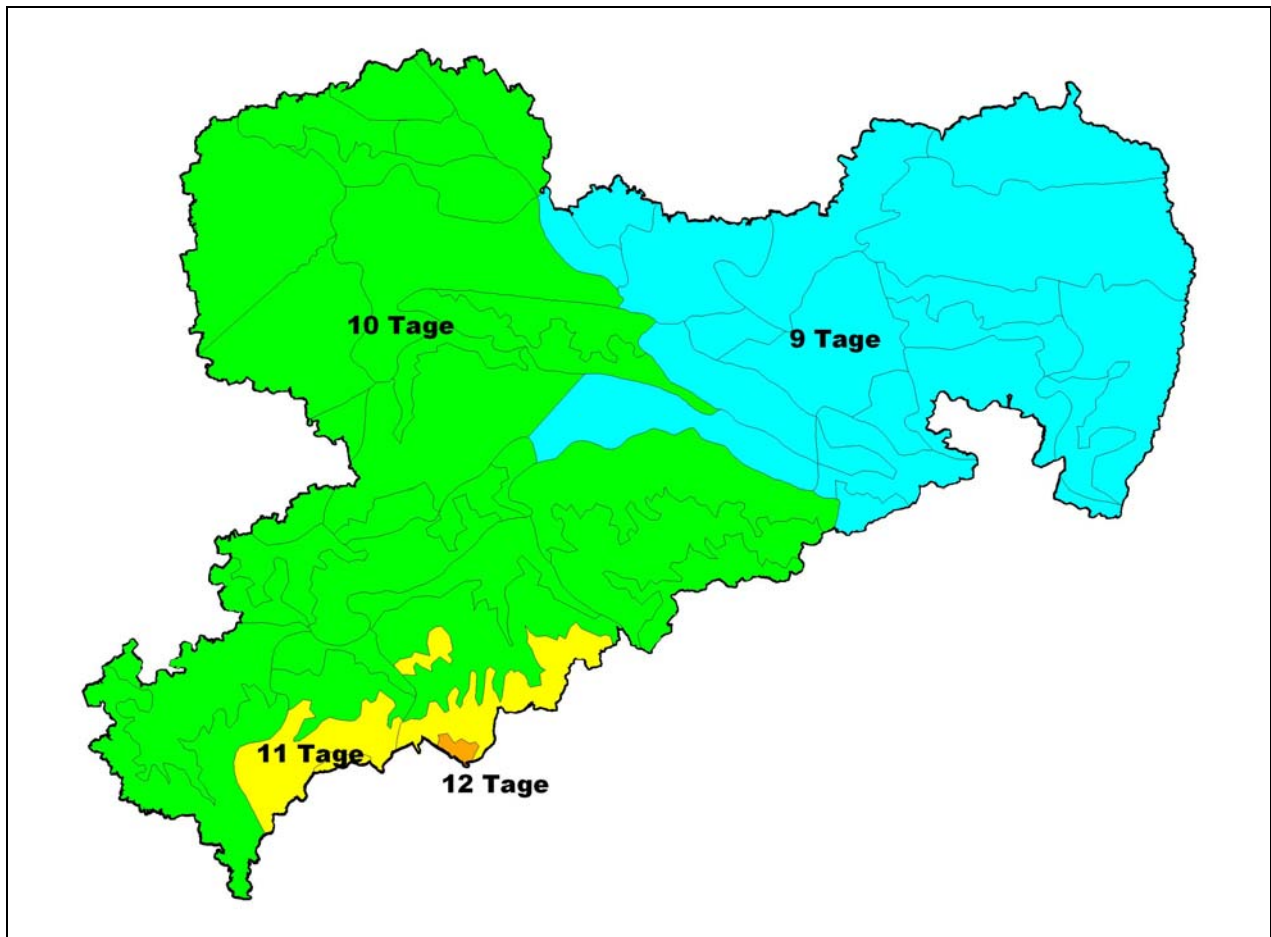


Abbildung 12: Saisonale Verzögerung des Jahrganges der Lufttemperatur in Bezug auf die astronomische Tageslänge

Die saisonale Verschiebung der gemessenen Wassertemperaturen ist für die Pegel mit mindestens 10-jährigen Monatsreihen in Abbildung 13 dargestellt. Für einige Pegel würde eine geringere zeitliche Verzögerung von <7 Tagen resultieren, was die Unsicherheiten der statistischen Aussagen verdeutlicht. Werden alle Pegel in die Auswertung einbezogen (Abbildung 14), zeigt sich, dass die zeitliche Verschiebung der Wassertemperatur insbesondere in den Mittelgebirgsbächen und kleineren Flüssen groß ist und dort in den meisten Fällen im Bereich von ca. 20...30 Tagen liegt. Diese deutlich längere Verschiebung ist zum großen Teil auf den dämpfenden Einfluss zurückzuführen, der von der Speisung durch Grundwasser ausgeht, ggf. auch auf den Einfluss durch die Beschattung in Wäldern, Kerbtälern oder bei dichtem Uferbewuchs. In den Unterläufen der Flüsse und in den Fließgewässern des Mittelgebirgsvorlandes und des Tieflandes liegt die zeitliche saisonale Verschiebung der Wassertemperatur in den meisten Fällen zwischen 9 und 20 Tagen. Sie ist damit ebenso groß wie bei der Lufttemperatur bis etwa doppelt so groß.

Tabelle 6: Saisonale Verschiebung der Wassertemperatur in Bezug auf die astronomische Tageslänge an den sächsischen Fließgewässerpegeln

Verschiebung in Tagen	Anzahl an Pegeln
<7	123
7...15	667
16...20	327
21...30	166
>30	23

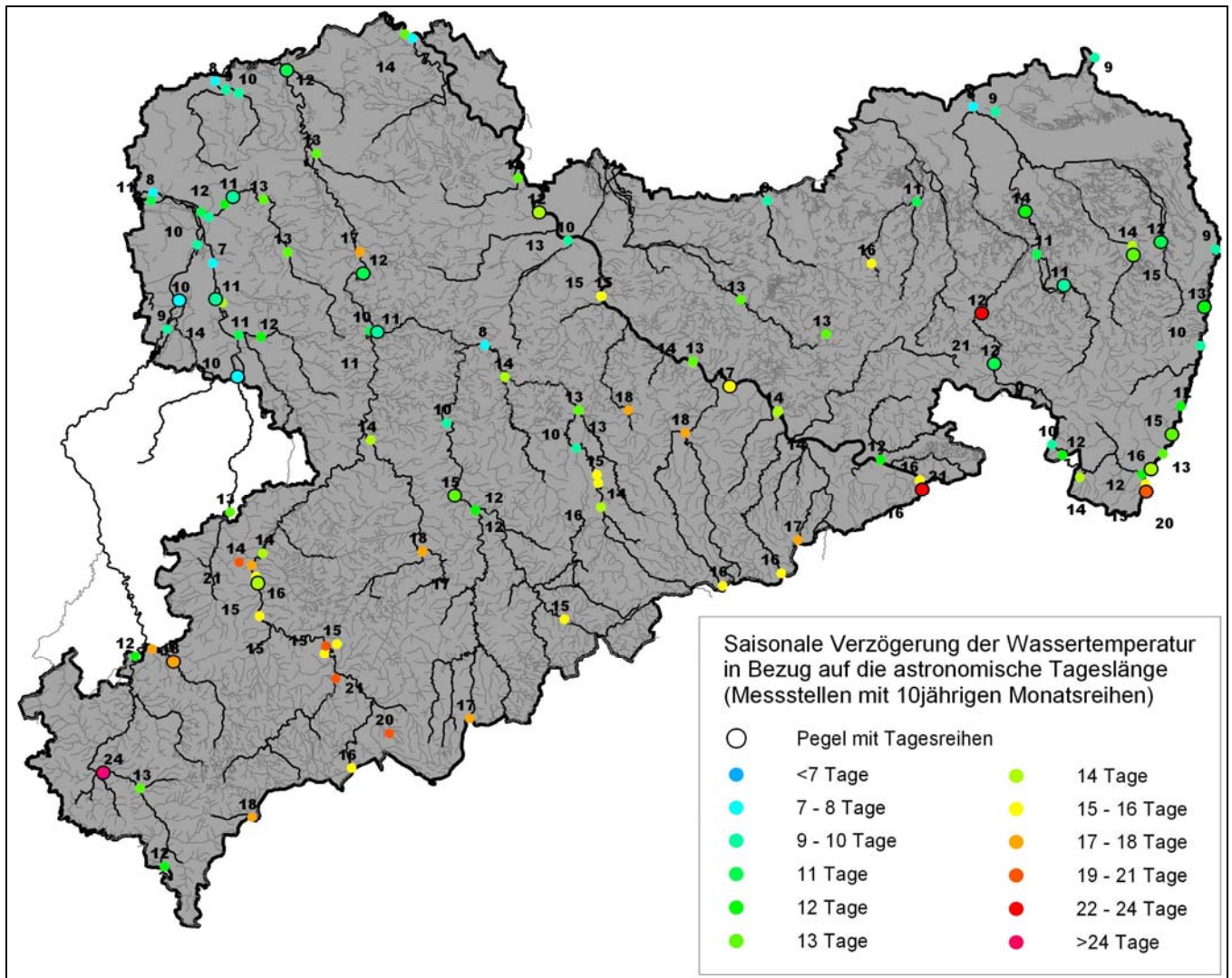


Abbildung 13: Saisonale Verzögerung der Wassertemperatur in Bezug auf die astronomische Tageslänge (Messstellen mit ≥ 10 -jährigen Monatsreihen)

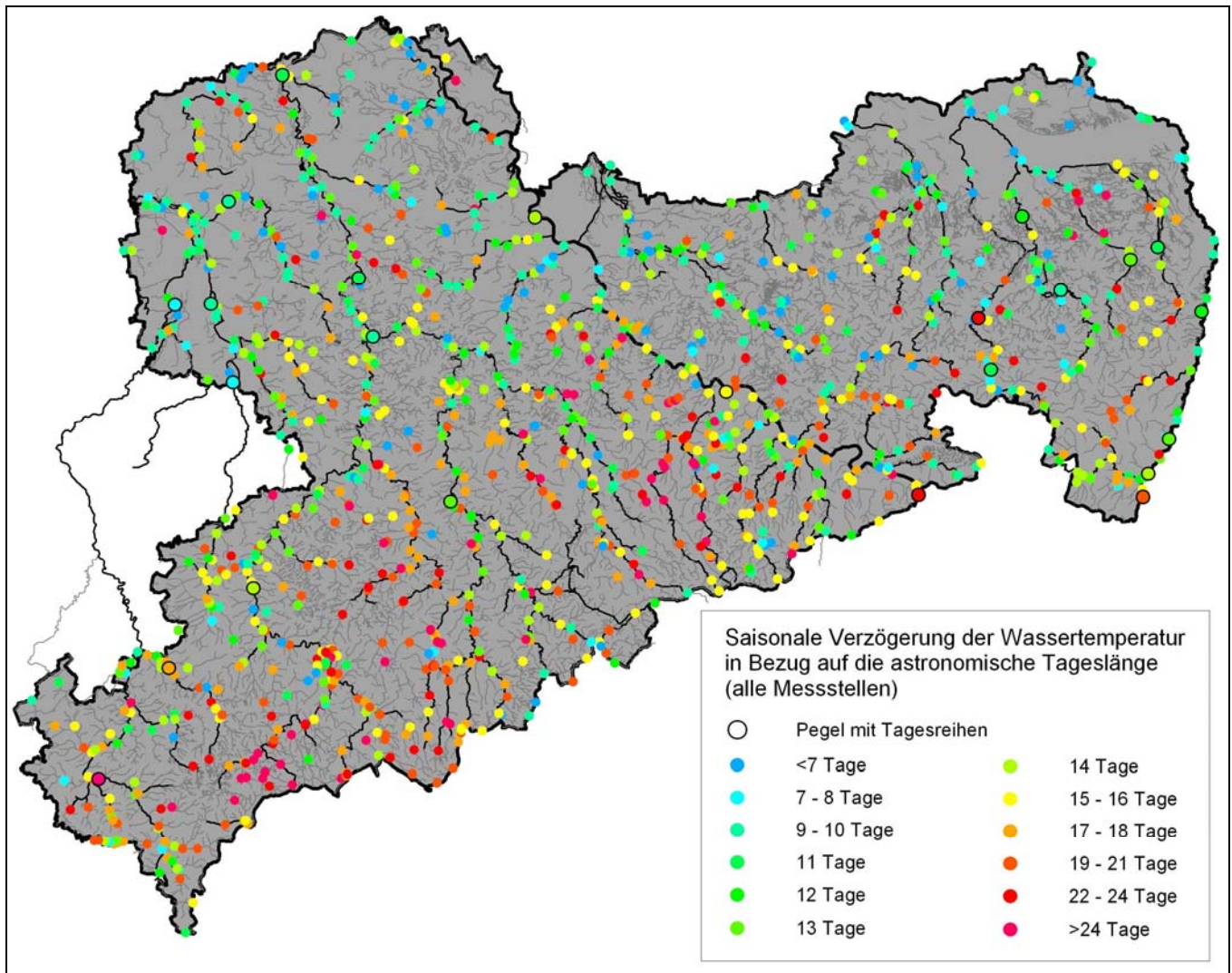


Abbildung 14: Saisonale Verzögerung der Wassertemperatur in Bezug auf die astronomische Tageslänge (alle Messstellen, die nicht als anthropogen beeinflusst eingestuft wurden)

Der saisonale Verlauf der Wassertemperatur ist bezüglich der Lufttemperatur im Mittel maximal 12 Tage verschoben, werden die Pegel mit täglichen Messungen ausgewertet (vgl. Abbildung 14). Es deutet sich zwar an, dass die zeitliche Verzögerung in der Elbe am größten und in Nordwestsachsen am geringsten ist, wie dies auch aus Abbildung 13 und Abbildung 14 entnommen werden kann, ein Bezug zum mittleren Durchfluss kann jedoch nicht hergestellt werden.

Tabelle 7: Zeitliche Verschiebung des saisonalen Verlaufes der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur

Pegel	MQ	Verzög. $T_L \Rightarrow T_W$	Pegel	MQ	Verzög. $T_L \Rightarrow T_W$
Schöna (Elbe)	313	+12 d	Gröditz (Löbauer Wasser)	1.3	+2 d
Dresden (Elbe)	327	+8 d	Zittau 1 (Lausitzer Neiße)	9.0	+7 d
Strehla (Elbe)	>330	+7 d	Rosenthal (Lausitzer Neiße)	10.4	+6 d
Lichtenwalde (Zschopau)	21.8	+5 d	Görlitz (Lausitzer Neiße)	17.3	+4 d
Zwickau-Pölbitz (Zw. Mulde)	14.3	+6 d	Leipzig-Thekla (Parthe)	0.9	+1 d
Erlin (Freibg. Mulde)	35.0	+1 d	Böhlen 1 (Pleiße)	6.8	+1 d
Golzern 1 (Vereinigte Mulde)	61.8	+2 d	Regis-Serbitz (Pleiße)	3.4	± 0 d
Bad Dübén (Verein. Mulde)	64.1	+2 d	Schirgiswalde (Spree)	2.1	+3 d
Mylau (Göltzsch)	1.9	+8 d	Bautzen UP (Spree)	3.1	+12 d
Kleindalzig (Weiße Elster)	16.2	± 0 d	Bautzen W. Bleiche (Spree)	2.6	+3 d
Jänkendorf (Schw. Schöps)	0.7	+6 d	Lieske (Spree)	4.5	+5 d
Särichen (Weißer Schöps)	0.8	+3 d			

Insgesamt ist die zeitliche Verzögerung nur gering, sie ist bei vielen Pegeln in größeren Fließgewässern ohne wesentlichen Grundwassereinfluss zu vernachlässigen.

4.5.2 Amplituden der saisonalen Verläufe

Die Amplituden der saisonalen Verläufe, d. h. die Differenz zwischen dem Jahresminimum und dem Jahresmaximum der mittleren saisonalen Verläufe der Wassertemperatur an den Pegeln, sind in Abbildung 15 dargestellt. Die Amplituden werden kleiner, je tiefer die Jahresmitteltemperatur liegt, weil die Temperatur des flüssigen Wassers größer als 0 °C ist. Lediglich an den Pegeln mit täglichen Messungen wird auch die Temperatur des Eises bestimmt, sodass auch negative Temperaturen gemessen wurden. So zeigt auch die Abbildung 15 die geringsten jahreszeitlichen Schwankungen bei den Pegeln in den oberen Lagen des Westerzgebirges, während die stärksten jahreszeitlichen Schwankungen in den größeren Flüssen des Tieflandes gemessen werden.

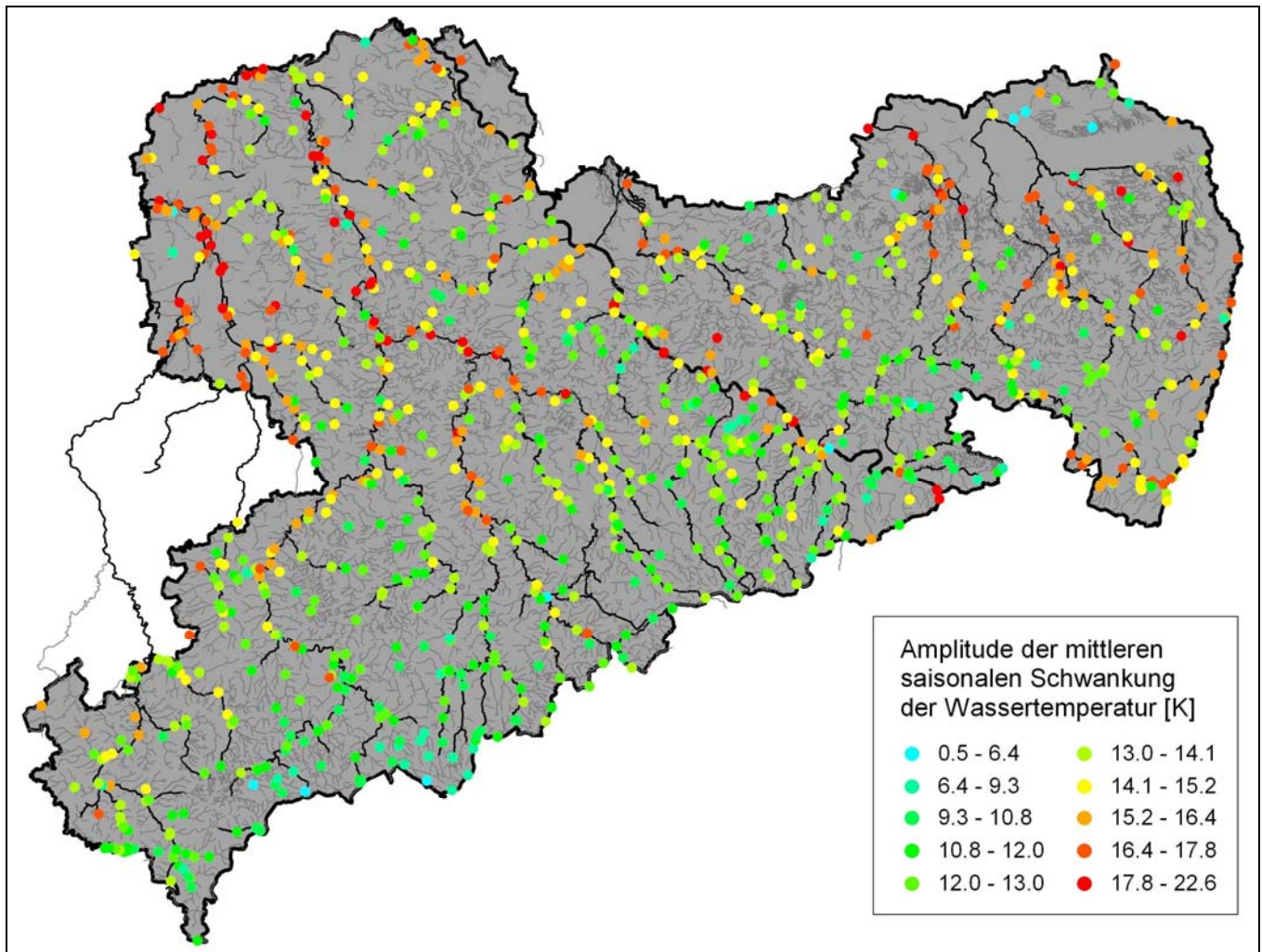


Abbildung 15: Amplituden der mittleren saisonalen Schwankung der Wassertemperatur

Die Amplituden sollten weiterhin umso geringer sein, je stärker der Durchfluss des Fließgewässers von Grundwasser gespeist wird. Dies verdeutlichen die mittleren Amplituden der saisonalen Jahresverläufe der Luft-, Fließgewässer- und Grundwassertemperaturen in Sachsen:

Mittlere saisonale Amplitude der Lufttemperatur	18.8 K
Mittlere saisonale Amplitude der Wassertemperatur in Fließgewässern	13.5 K
Mittlere saisonale Amplitude der Wassertemperatur in Grundwasserpegeln	2.1 K

Die sehr geringen Amplituden an einigen Fließgewässerpegeln in Nordostsachsen (vgl. Abbildung 15) sind demnach auf Einleitungen von Grundwasser zurückzuführen.

Weitere Einflüsse bewirken den deutlichen Unterschied zwischen den jahreszeitlichen Schwankungen der Wassertemperatur in größeren Flüssen und in kleinen Bächen. Hierzu gehören neben dem unterschiedlichen Einfluss durch Grundwasserzutritte auch die unterschiedliche Verweildauer des Wassers in Form von Oberflächenwasser seit Beginn der Abflussbildung, das unterschiedliche Verhältnis zwischen Wassermenge und der atmosphärisch wirksamen Fläche, das unterschiedliche Reflexionsvermögen gegenüber kurz- und langwelliger Strahlung oder die unterschiedliche Auswirkung der Horizontabschirmung durch Relief und Ufervegetation.

Die Maxima der mittleren saisonalen Verläufe der Wassertemperatur sind ähnlich verteilt wie die Amplituden (vgl. Abbildung 16). Diese Temperaturen werden in einem meteorologisch durchschnittlichen Jahr im Hochsommer stets erreicht und an Einzeltagen aufgrund der Streuung der Einzelwerte auch überschritten. Bei 95 % der Pegel liegt die saisonale

Maximaltemperatur über ca. 12 °C, nur an wenigen quellnahen Messstellen im Mittelgebirge liegt sie darunter. Die tiefste Maximaltemperatur liegt bei 8.5 °C (Saidenbach), an der betreffenden Messstelle dominiert offensichtlich der Einfluss des Grundwassers gegenüber dem atmosphärischen Einfluss. Im Mittel liegt das saisonale Maximum bei etwa 16 °C. Maxima über ca. 20 °C sind als vergleichsweise sehr hoch einzuschätzen und resultieren für ca. 5 % der Pegel. Die höchsten Temperaturen werden in den größeren Flüssen erreicht, insbesondere in der Weißen Elster, Pleiße und Vereinigten Mulde in Nordwestsachsen, in der Elbe und großen Röder und in der Schwarzen Elster, Spree und Lausitzer Neiße in Nordostsachsen. In Nordostsachsen werden auch in den kleineren Fließgewässern höhere Temperaturen erreicht.

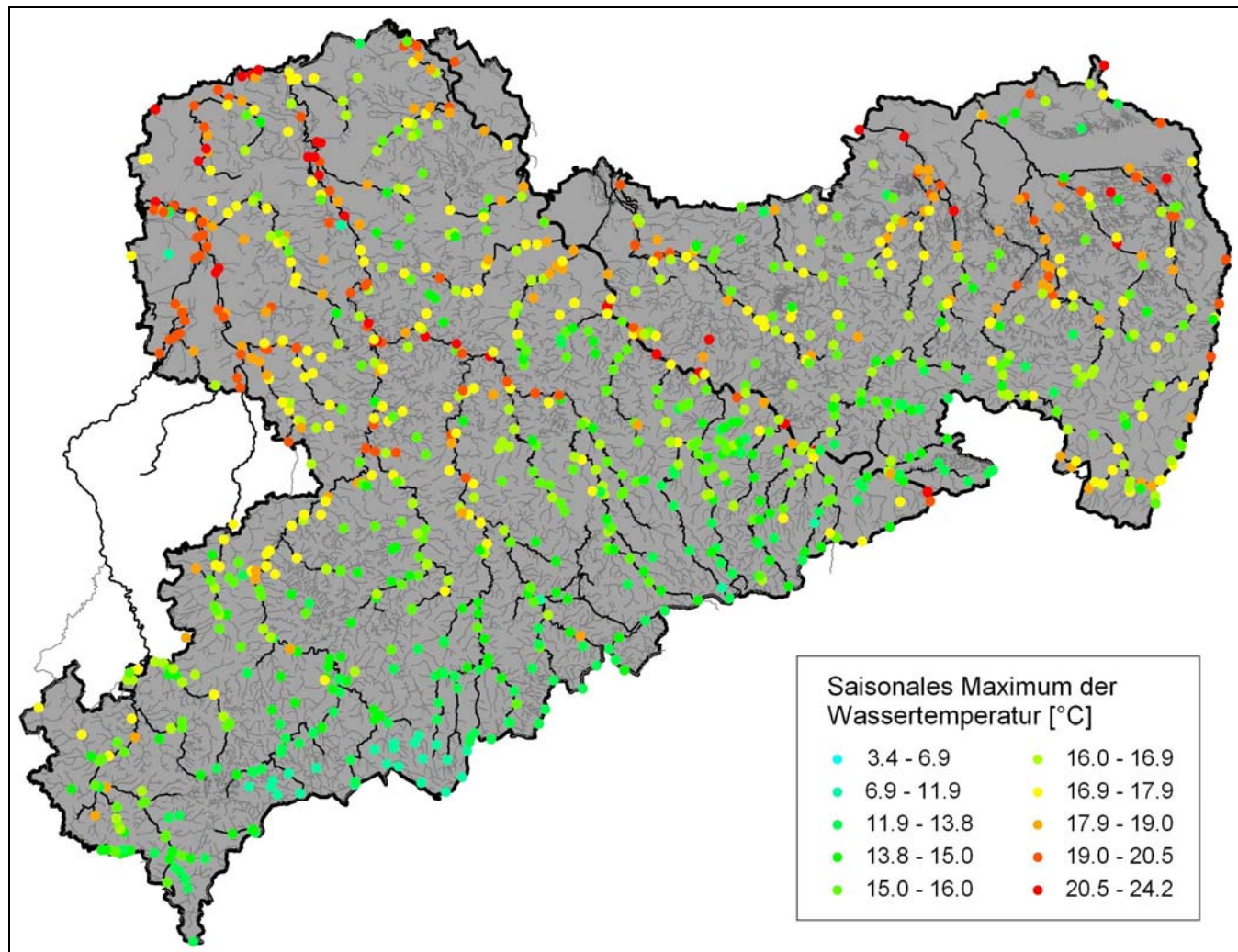


Abbildung 16: Maxima der mittleren saisonalen Verläufe der Wassertemperatur an den Oberflächenwasserpegeln

Die höchsten gemessenen Temperaturen im Beobachtungszeitraum ist für die Pegel mit ausreichender Anzahl an Messwerten in Abbildung 17 dargestellt. Die höchsten Temperaturen wurden an einigen Messstellen in der Elbe, Mulde, Lausitzer Neiße und in Nordwestsachsen gemessen. Am Beispiel der Zschopau und Mulde wird die Zunahme der Maximaltemperaturen beginnend bei den Mittelgebirgsbächen (15...20 °C) über das Gebirgsvorland (20...25 °C) bis zum Unterlauf (25...30 °C) deutlich. Sehr hohe Temperaturen werden insbesondere in flachen Bereichen langsam fließender Tieflandsflüsse erreicht. Die Wassertemperatur des gesamten Fließgewässers kann jedoch bei ufernaher Messung leicht überschätzt werden.

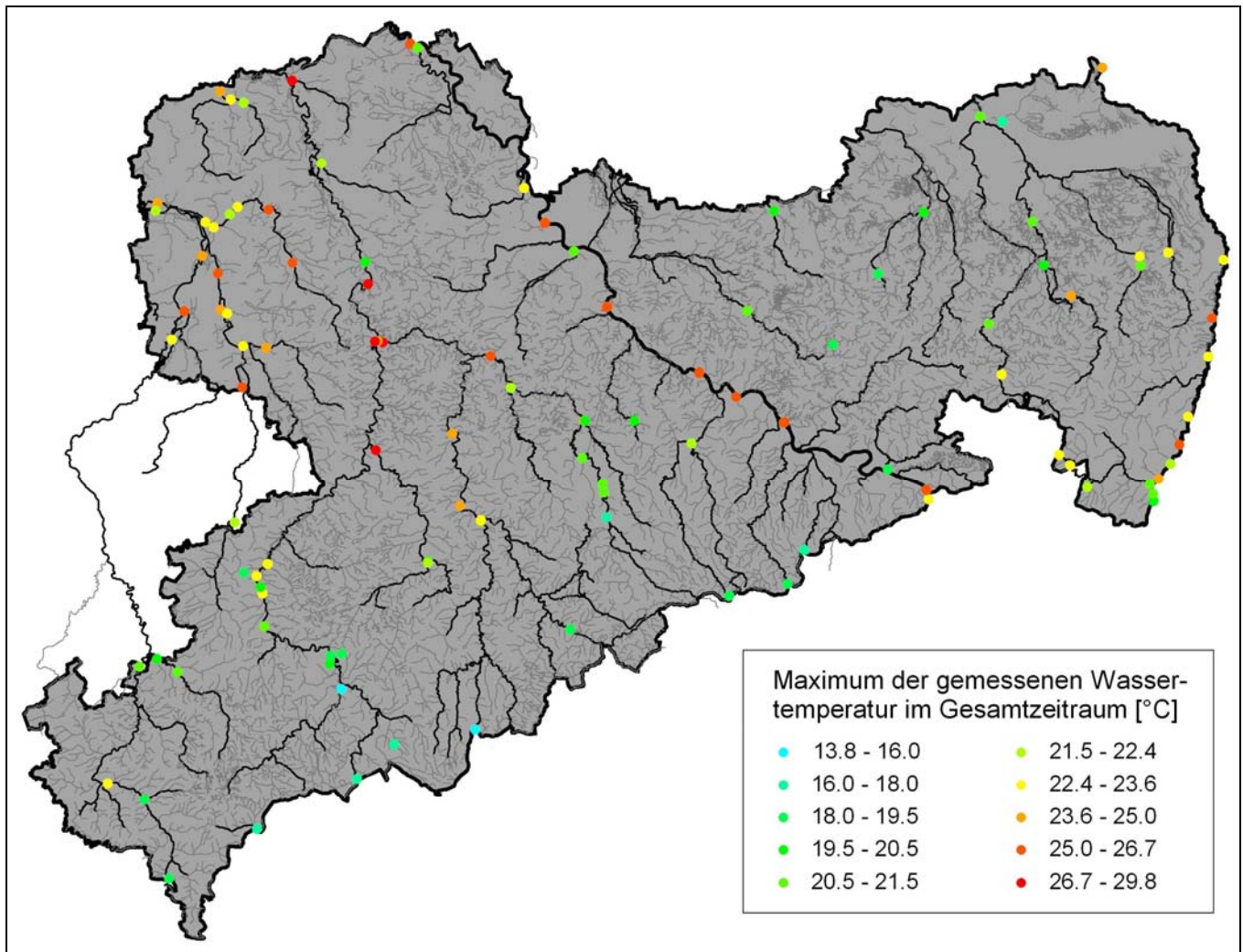


Abbildung 17: Maximum der gemessenen Wassertemperatur im Gesamtzeitraum, Pegel mit Daten über ≥ 10 Jahre und mindestens monatlichem Messintervall

4.5.3 Streuung der saisonbereinigten Messwerte

Als Maß für die Streuung von Tageswerten der Wassertemperatur um den mittleren saisonbedingten Erwartungswert ist die Standardabweichung der Residuen in Abbildung 18 dargestellt. Die Werte streuen in den Mittelgebirgsbächen vergleichsweise wenig um den saisonalen Mittelwert, in den größeren Fließgewässern im Tiefland dagegen ist die Streuung größer. Auch hier verhindern offensichtlich der Zufluss von Grundwasser und andere Ursachen größere kurzfristige Abweichungen und Extremwerte, während langsam fließende breite Flüsse mit dunklem Wasser bzw. Gewässergrund und großer Oberfläche stärker auf die meteorologischen Schwankungen reagieren. Die Streuung der Lufttemperatur ist erwartungsgemäß größer als die der Wassertemperatur im Fließgewässer und die Grundwassertemperatur weicht am wenigsten vom mittleren saisonalen Verlauf ab:

Mittlere Standardabweichung der saisonbereinigten Lufttemperatur	3.95 K
Mittlere Standardabweichung der saisonbereinigten Wassertemperatur (Fließgewässer)	1.77 K
Mittlere Standardabweichung der saisonbereinigten Wassertemperatur (Grundwasser)	0.45 K

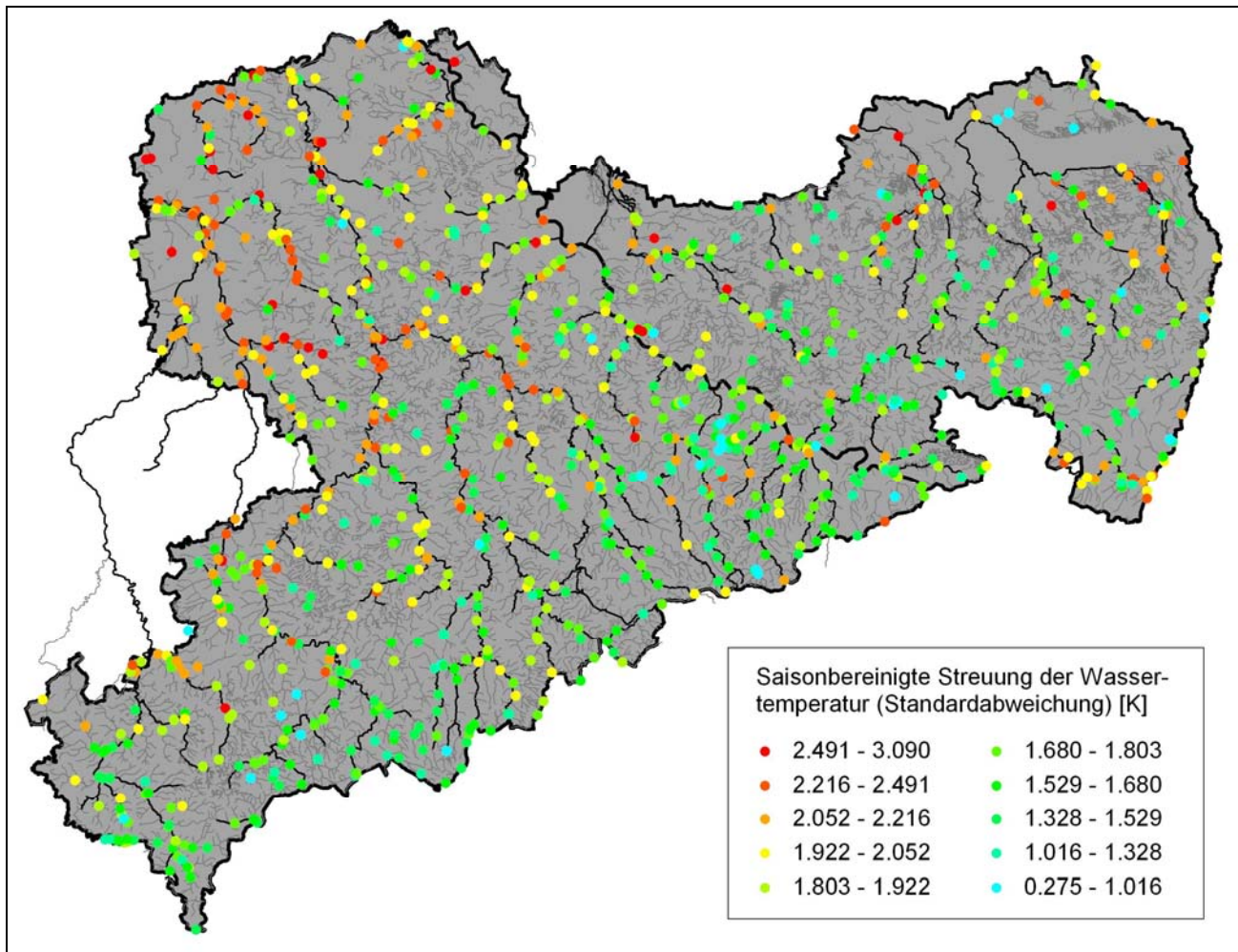


Abbildung 18: Saisonbereinigte Streuung der Wassertemperatur (Standardabweichung der Abweichungen der Einzelwerte vom saisonbedingten Erwartungswert)

4.6 Messstellen mit Stichtagsmessungen

Die an Stichtagen gemessenen Wassertemperaturen der Messstellen des sächsischen Messstellennetzes liegen ab dem Jahr 1999 i. d. R. in monatlichem oder zweimonatigem Abstand oder als Einzelmessungen pro Quartal vor. Lediglich die folgenden Messstellen wurden in zweiwöchigem Abstand untersucht (Tabelle 8):

Tabelle 8: Fließgewässerpegel (LfULG) mit >1 Stichtagsmessung pro Monat

Pegel	MKZG	Art	Anzahl Werte	Anzahl Jahre
Dommitzsch, links (Elbe)	OBF02810	LfULG-Stichtagsmessung	264	10
Dommitzsch, rechts (Elbe)	OBF02820	LfULG-Stichtagsmessung	211	10
Schmilka, links (Elbe)	OBF00100	LfULG-Stichtagsmessung	218	10
Schmilka, rechts (Elbe)	OBF00200	LfULG-Stichtagsmessung	321	10
Zehren, links (Elbe)	OBF01800	LfULG-Stichtagsmessung	255	10
Zehren, rechts (Elbe)	OBF01900	LfULG-Stichtagsmessung	213	10

Weiterhin sind einige Fließgewässerpegel der LD Leipzig und des Umweltmonitorings der WISMUT GmbH vorhanden, die über viele Jahre beprobt wurden oder für die mehr als eine Messung pro Monat vorliegt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Fließgewässerpegel der LD Leipzig und der WISMUT GmbH

Pegel	MKZG	Art	Anzahl Werte	Anzahl Jahre
Plöszitz	F5520	Parthe LD Leipzig	323	30
Thekla	F5530	Parthe LD Leipzig	320	30
Erdmannshain	F5500	Parthe LD Leipzig	321	29
Zoo	F5539	Parthe LD Leipzig	515	28
Lindhardt	F5495	Parthe LD Leipzig	165	18
Grethen	F5490	Parthe LD Leipzig	164	18
Pöhla, Luchsbach im Anstrom LBH	m-115	Monitoring WISMUT	311	17
EZG Kohlunzbach, Halde 371/I, N-Rand	m-066	Monitoring WISMUT	170	17
Alberoda, Alberodabach, vor Mündung	m-155	Monitoring WISMUT	144	16
Oberrothenbacher Bach vor Mündung	M-204	Monitoring WISMUT	338	15
Zinnborn gesamt Höhe Pegel 780	M-232	Monitoring WISMUT	333	15
F5510	F5510	Parthe LD Leipzig	154	15
Zwickauer Mulde Muldenbrücke Schlunzig	M-205	Monitoring WISMUT	330	14
Zwickauer Mulde Wehr Mühlgraben	M-201	Monitoring WISMUT	315	14

Bei vielen der 1.035 Messstellen des LfULG sind mehrjährige Datenlücken vorhanden oder die Anzahl der Messungen variiert. Zur näheren Betrachtung wurden deshalb Messstellen ausgewählt, die

- nicht von der Auswertung ausgeschlossen wurden (s. Abschnitt oben),
- für die über einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren Daten vorliegen (gesamter Beobachtungszeitraum LfULG-Daten) und
- für die monatlich eine gemessene Wassertemperatur vorliegt, in einzelnen Jahren aber mindestens neun Werte.

Die genannten Kriterien erfüllen insgesamt 95 Pegel (vgl. Abbildung 19).

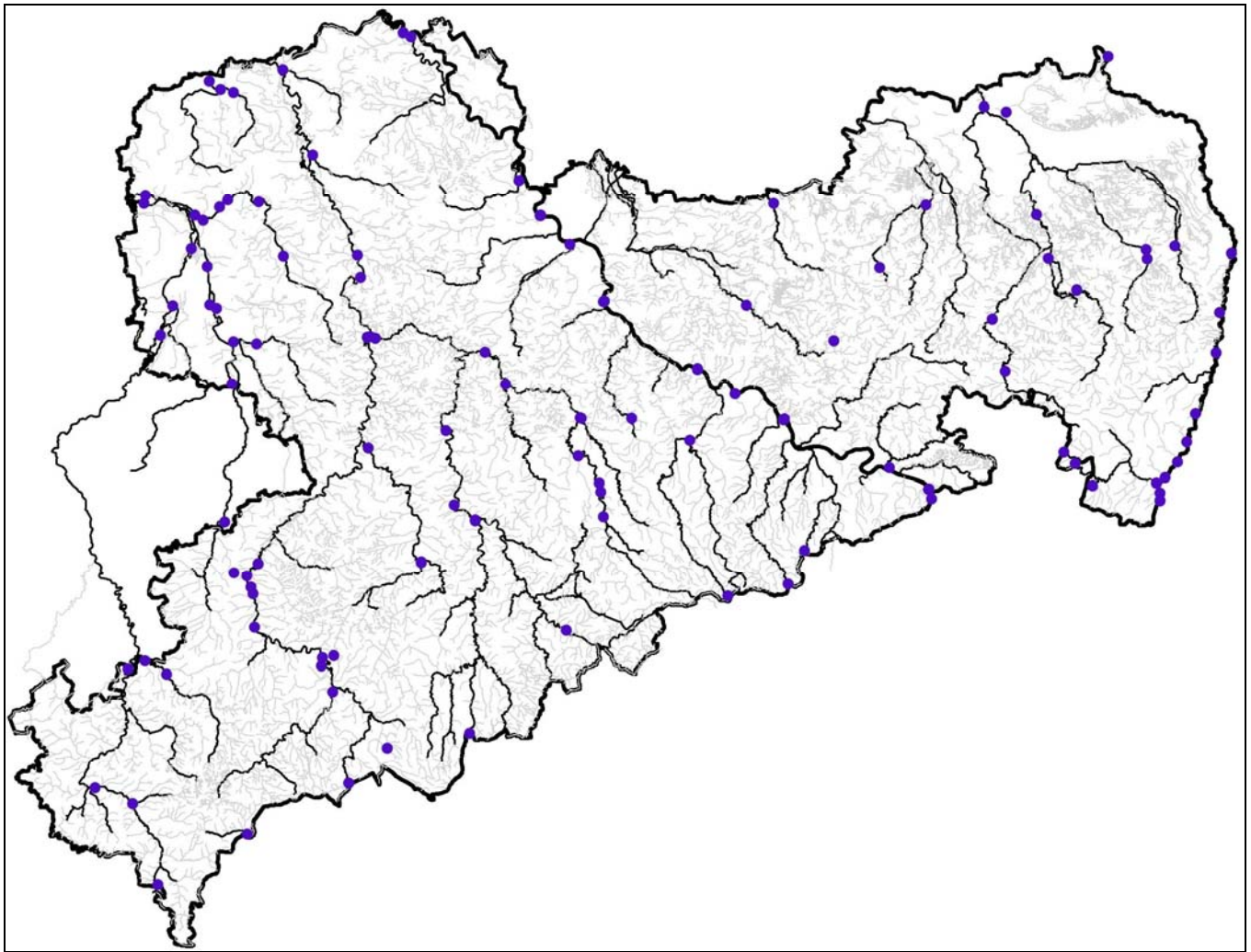


Abbildung 19: Pegel mit langjährigen Datenreihen monatlicher Stichtagsmessungen in Fließgewässern (Datenquelle: LFULG, LD LEIPZIG, WISMUT GMBH)

Wird ein Bezug der gemessenen Wassertemperatur zur Lufttemperatur hergestellt, besteht das Problem, dass die unterschiedlichen Vorbedingungen zum Termin der Messung den Zusammenhang sehr stark und anhand der Wertepaare allein nicht reproduzierbar beeinflussen. Mit der Berechnung gleitender Mittelwerte der Lufttemperatur und Zuordnung dieser Mittelwerte zu den Temperaturdatensätzen der Projektdatenbank wurde eine Möglichkeit eröffnet, die Vorbedingung der Stichtagsmessungen in die Auswertung einzubeziehen. Allerdings ist die Auswertung von Wochen- oder Monatsmittelwerten, wie sie einig in Abschnitt 5 erläuterten Auswerteverfahren zugrunde liegt, anhand der Stichtagsmessungen nicht möglich.

Weiterhin besteht bei den Stichtagsmessungen das Problem, dass die Messungen zu jeweils unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt wurden. Der tägliche Wechsel von Abkühlung und Erwärmung des Oberflächenwassers beeinflusst die gemessene Wassertemperatur und müsste deshalb explizit berücksichtigt werden, was auf der Grundlage der vorhandenen Daten auf Tagesbasis jedoch nicht möglich ist.

Die Abbildung 20 zeigt die Abweichungen (Residuen) der gemessenen Wassertemperatur vom saisonalen Mittelwert in Abhängigkeit von der Uhrzeit. Zur Darstellung wurden die Datenpaare der Uhrzeit und der Wassertemperatur nach der Uhrzeit sortiert, anschließend zu jeweils 20 bzw. 200 Wertepaaren gruppiert und die mittlere Uhrzeit und Wassertemperatur für die Gruppen gebildet. Es besteht zwar ein Zusammenhang zwischen Uhrzeit der Messungen und der saisonbereinigten Wassertemperatur, allerdings ist dieser Zusammenhang aufgrund der starken Streuung der Einzeldaten kaum auswertbar. Zudem resultiert eine geringe mittlere Schwankung der Wassertemperatur von nur ca. 0.5 K über den ca. 4-stündigen Zeithorizont, in dem die meisten Messungen durchgeführt wurden. Diese Schwankung ist im Hinblick auf andere Einflussgrößen zu vernachlässigen.

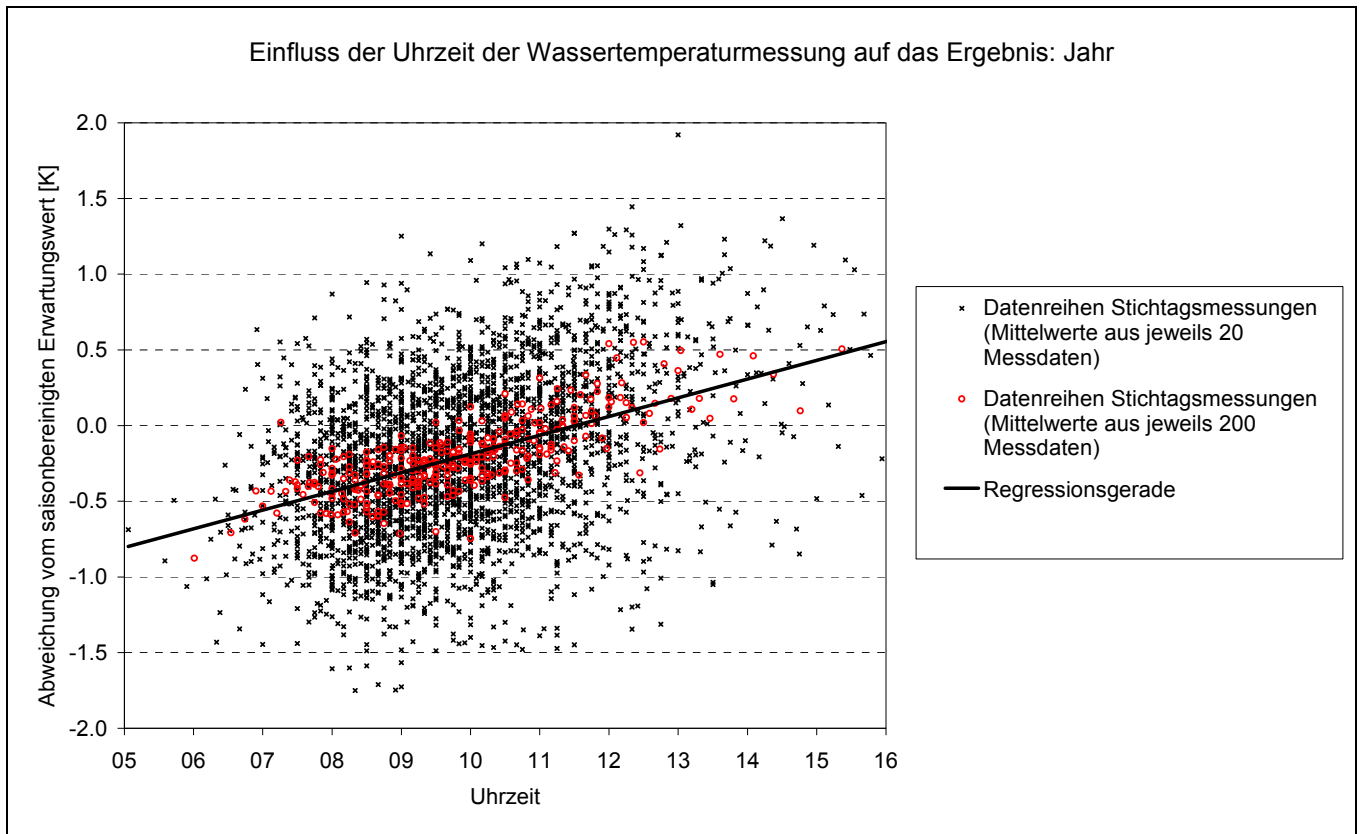


Abbildung 20: Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten aller Pegelmessungen, alle Monate

Der Einfluss der Uhrzeit im Sommer (Monat Juli) auf die gemessene Wassertemperatur ist in Abbildung 21 dargestellt. Für den Sommermonat beträgt der Unterschied zwischen 8 Uhr und 12 Uhr etwa 1 K. Allerdings verbleibt auch hier eine starke Streuung, sodass von der Anwendung dieses Zusammenhangs Abstand genommen wurde.

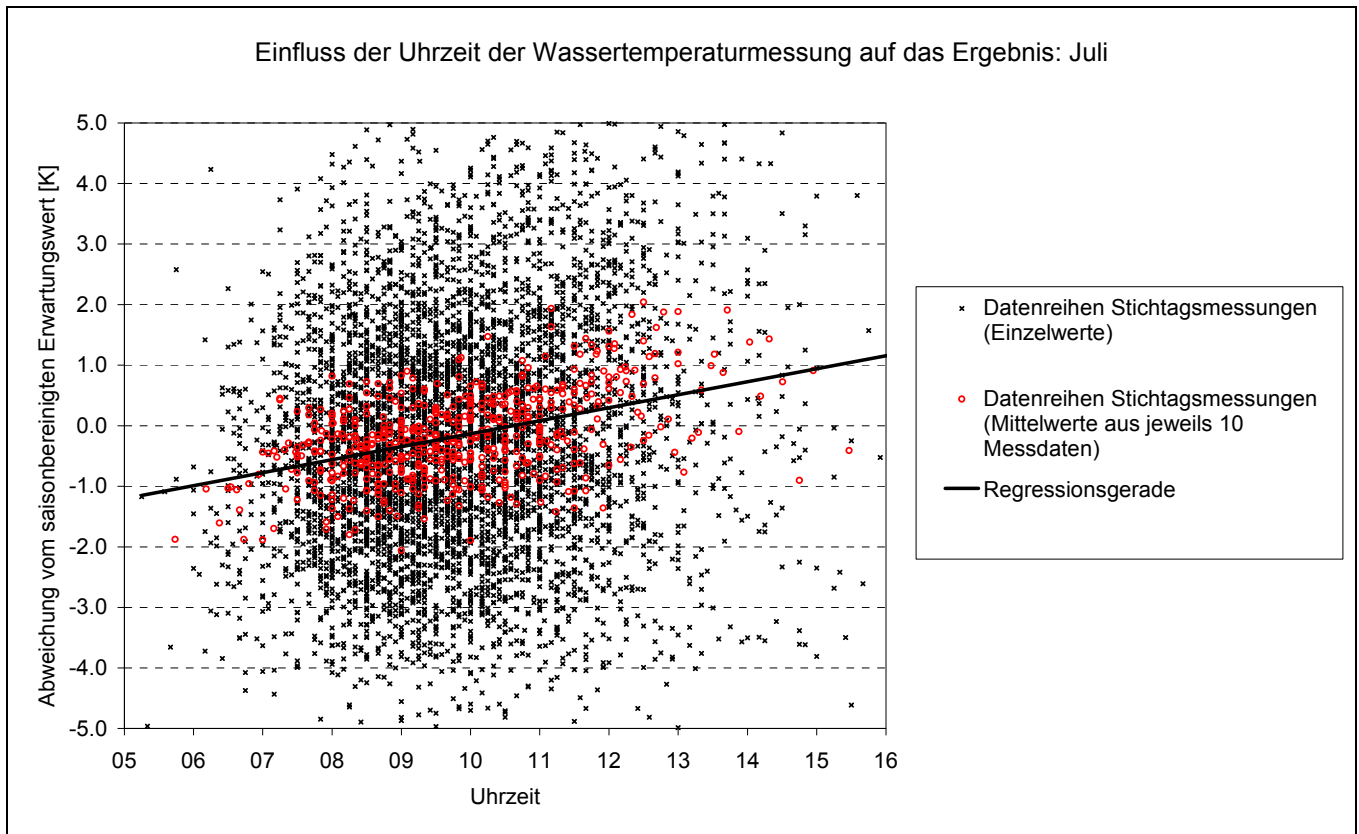


Abbildung 21: Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten aller Pegelmessungen, Monat Juli

Werden statt der saisonbereinigten Wertepaare aller Pegel einzelne Pegel betrachtet, resultiert zwar ebenfalls eine etwas höhere Wassertemperatur zu Mittag bzw. Nachmittag im Vergleich zu den morgendlichen Messungen, allerdings verbleibt auch hier eine sehr hohe Streuung (Abbildung 22, Abbildung 23).

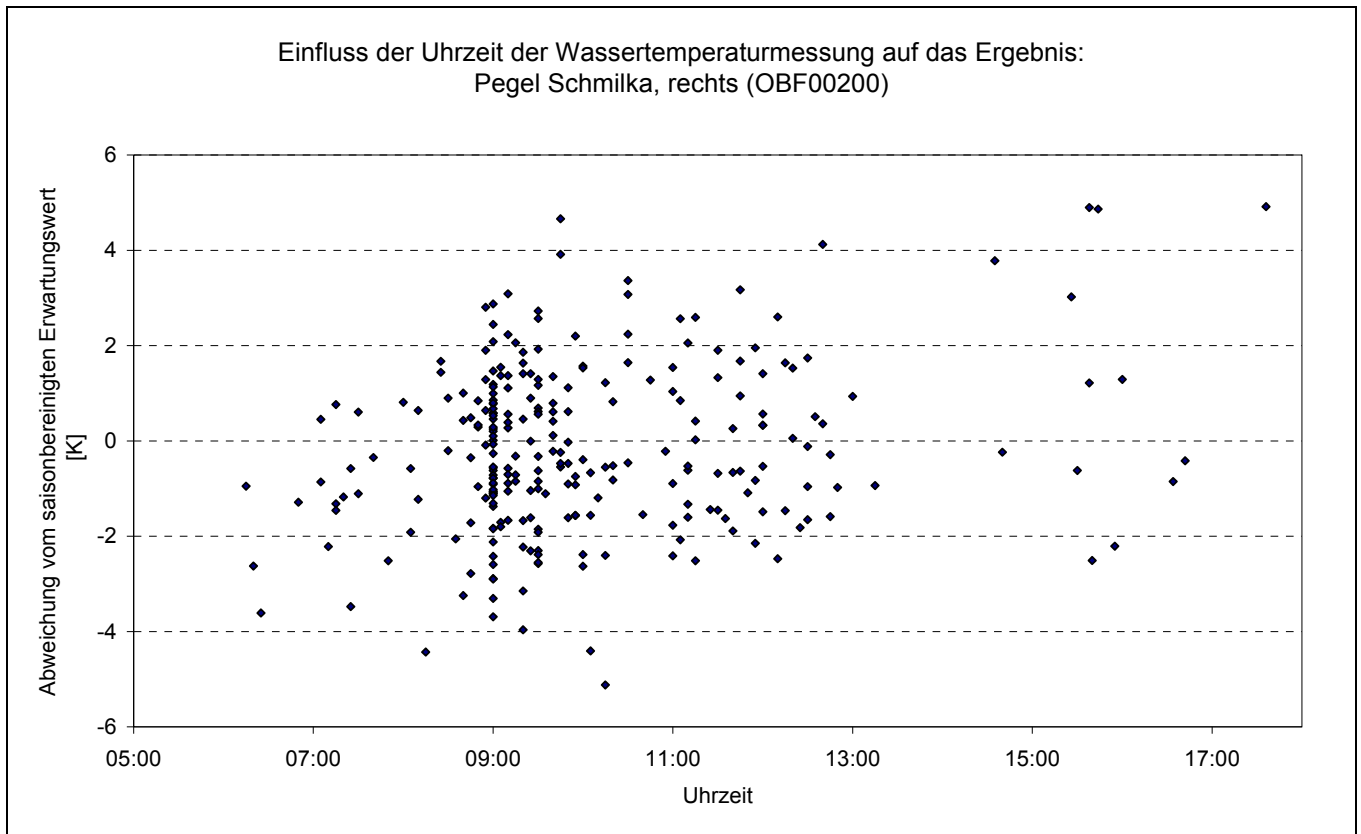


Abbildung 22: Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten Pegel Schmilka, rechts (Elbe), alle Monate

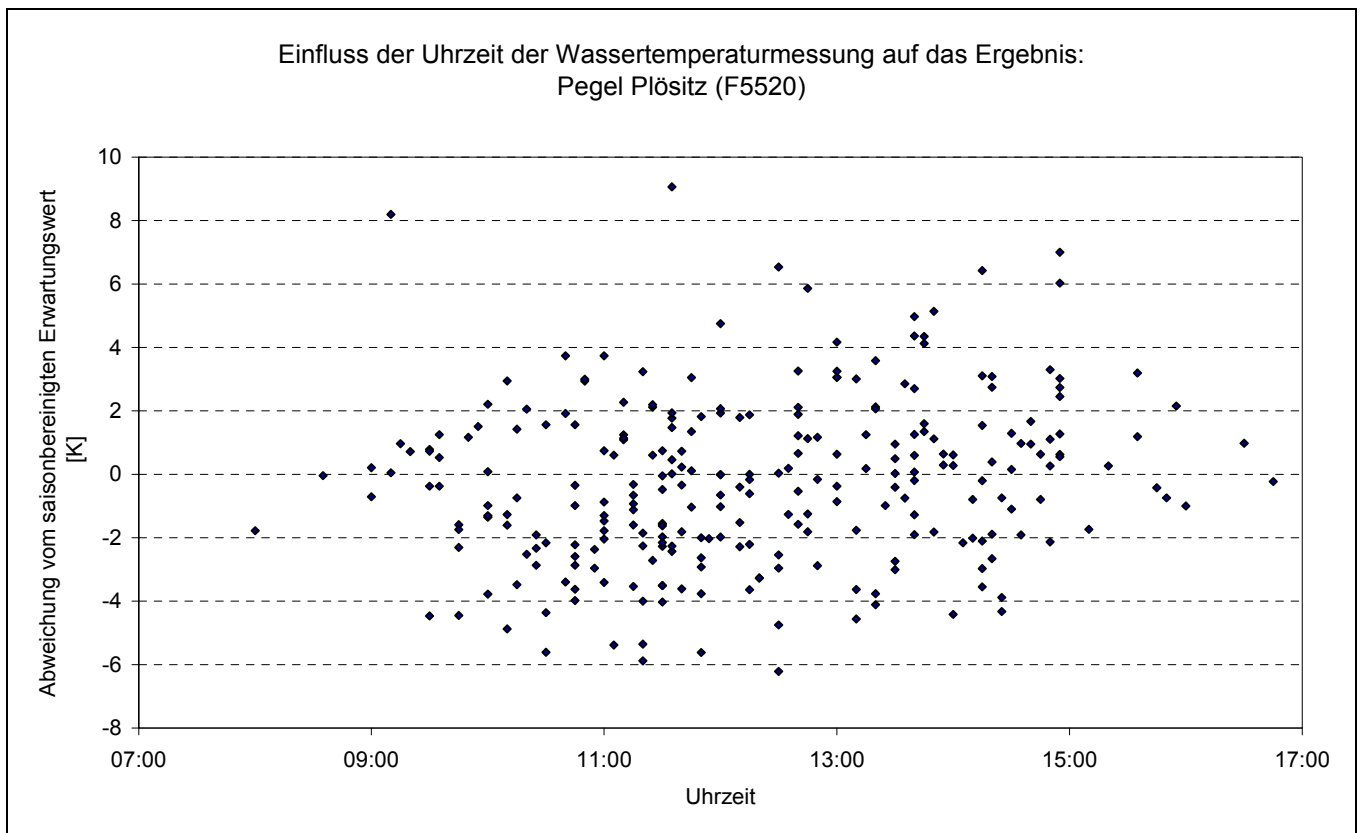


Abbildung 23: Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten Pegel Plöszitz (Parthe), alle Monate

Werden nur die Daten eines Monats betrachtet, so ist z. B. für den Sommermonat Juli festzustellen, dass die Wassertemperatur vormittags einige Grad unter dem jahreszeitlichen Erwartungswert liegt, am Nachmittag dagegen auch deutlich darüber liegen kann (vgl. Abbildung 24). Auch hier verbleibt eine hohe Streuung, die z. B. auf unterschiedliche Wetterbedingungen zurückzuführen ist.

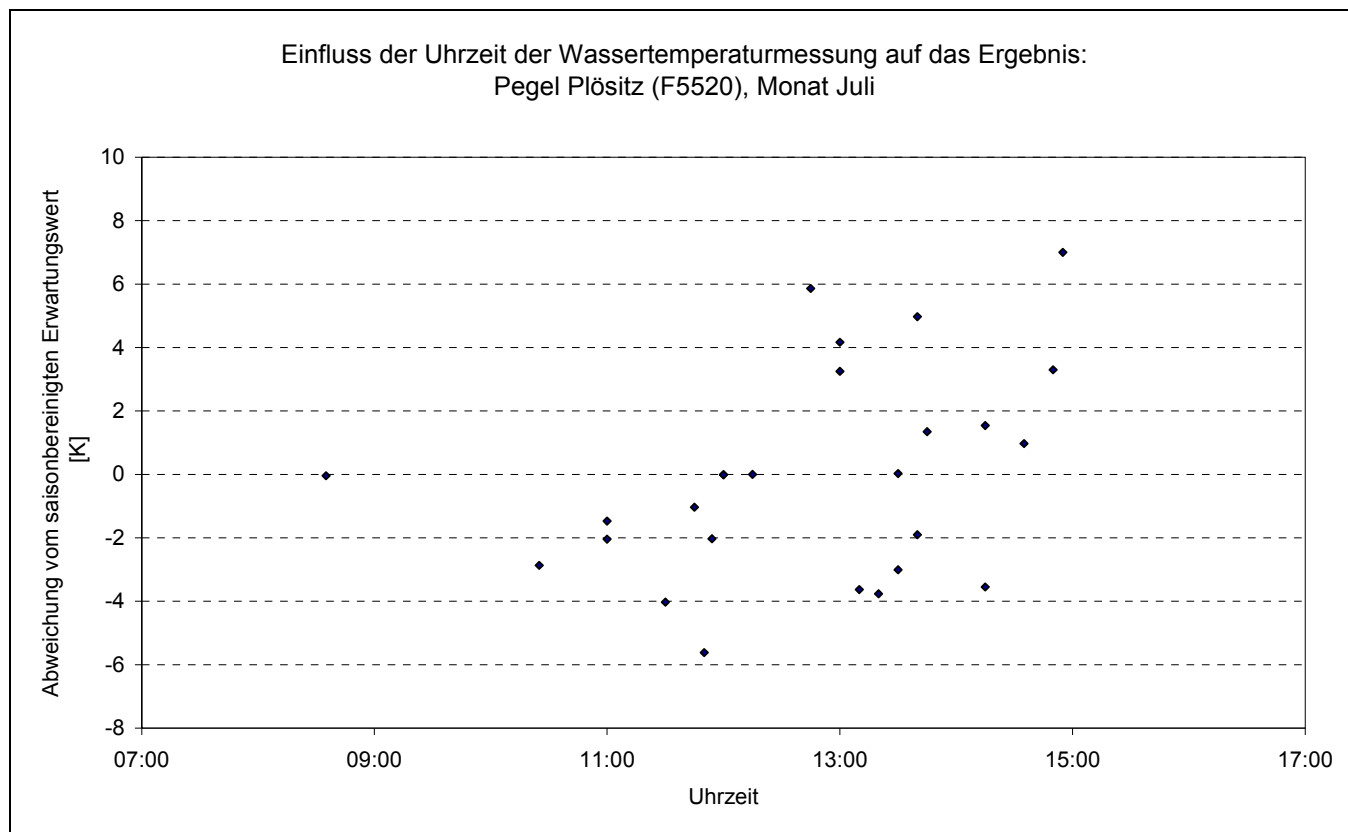


Abbildung 24: Einfluss der Uhrzeit der Wassertemperaturmessung auf das Ergebnis: Daten Pegel Plörsitz (Parthe), Monat Juli

Insgesamt ist festzustellen, dass auch bei Betrachtung einzelner Pegel der Zusammenhang zwischen Uhrzeit der Messungen und gemessener Wassertemperatur nicht zielführend auszuwerten bzw. zur Bereinigung der Daten anzuwenden ist.

4.7 Zusammenfassung der Auswertung der Datengrundlage

Die im Abschnitt 3 durchgeführte Darstellung der Datengrundlage lässt bereits einige Schlussfolgerungen hinsichtlich der Veränderung der Wassertemperatur bei langfristiger Erhöhung der Lufttemperaturen aufgrund von Klimaveränderungen zu.

Die mittlere Wassertemperatur im Fließgewässer weicht nur wenig von der mittleren Lufttemperatur ab. Die Abweichungen liegen bei 59 % der Pegel im Bereich von ± 0.5 K, im Mittel ist die Wassertemperatur um 0.2 K kleiner als die Lufttemperatur. Es können keine wesentlichen systematischen Einflüsse auf die Temperaturabweichung wie z. B. aufgrund der Höhenlage festgestellt werden, die Abweichungen sind in allen Fließgewässern mit Ausnahme anthropogener Einflüsse ähnlich groß. Die mittlere Wassertemperatur hängt damit sehr stark von der Lufttemperatur ab bzw. die Werte beider Größen haben ähnliche Ursachen. Dies lässt vermuten, dass eine Veränderung der mittleren Lufttemperatur ähnliche Veränderungen der mittleren Wassertemperatur nach sich ziehen wird bzw. die Veränderungen anderer klimatischer Größen bei beiden Größen ähnliche Wirkungen haben.

Die Auswertung bisheriger Veränderungen der Luft- und Wassertemperaturen ermöglicht eine ähnliche Einschätzung. Hier zeigte sich, dass bei Ausschluss von anthropogenen Einflüssen

- die Temperaturmittelwerte für Luft und Wasser zwischen einzelnen Jahren gleichgerichtet und mit vergleichbarer Amplitude schwanken und
- die mittleren Temperaturveränderungen ähnlich sind und im Mittel $+0.044$ K/a bei der Lufttemperatur und $+0.046$ K/a bei der Wassertemperatur betragen.

Der beschriebene Sachverhalt zeigt sich bei 14 von 25 Pegeln. Bei neun Pegeln wurde eine relative Abnahme der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur festgestellt und als Rückgang der Einleitung warmer Abwässer in den 1990er-Jahren interpretiert. Bei nur zwei Pegeln stieg die Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur an.

Einen weiteren Hinweis auf die offensichtlich sehr engen Zusammenhänge zwischen Wasser- und Lufttemperatur stellt die geringe zeitliche Verschiebung der saisonalen Jahresverläufe beider Größen dar. Diese beträgt bei den 23 ausgewerteten Pegeln maximal 12 Tage, d. h. der mittlere saisonale Verlauf der Wassertemperatur ist im Vergleich zur Lufttemperatur um 12 Tage verzögert. Bei der Hälfte der Pegel mit langjährigen Tagesreihen ist praktisch keine zeitliche Verzögerung der mittleren Jahresgänge der Wassertemperatur gegenüber der Lufttemperatur festzustellen (null bis drei Tage).

Die Amplituden der saisonalen Schwankungen der Wassertemperatur sind in den größeren Flüssen des Tieflandes und in der Elbe am größten und in den Bächen mit kleineren Einzugsgebieten am kleinsten. Zurückzuführen ist dies sowohl auf die unterschiedliche Höchsttemperatur im Sommer, welche die saisonalen Schwankungen bestimmt, während die Tiefsttemperatur im Winter stets wenig größer als 0 °C ist. Weiterhin sind die saisonalen Schwankungen umso geringer, je größer die Speisung des Fließgewässers mit Grundwasser ist. Selbst die saisonbereinigten Einzelmesswerte der Wassertemperatur streuen in vielen größeren Fließgewässern stärker als in kleinen Bächen.

Die täglichen Schwankungen der Wassertemperatur bewirkt bei den Stichtagsmessungen eine zusätzliche Streuung der Daten. Allerdings konnte anhand der Datengrundlage aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren und der generell hohen Streuung der Daten kein belastbarer Zusammenhang gefunden werden.

5 Recherche und Bewertung statistischer Verfahren

Die Wassertemperatur in Fließgewässern kann mit einer Vielzahl von Methoden berechnet werden. Die Methoden unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich ihrer Komplexität und Vielfalt an Eingangsdaten (MOHSENI et al. 1998):

- vollständige Modellierung des konvektiven und dispersiven Wärmetransportes und der Energieumsätze
- Modellierung der Energieumsätze zwischen Strahlung bzw. Atmosphäre und dem Wasserkörper nach dem Konzept der Gleichgewichtstemperatur
- statistische Analyse und Nachbildung der saisonalen Schwankungen (vgl. LFULG 2009), insbesondere der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur und der Globalstrahlung
- Analyse der linearen Abhängigkeit zwischen Lufttemperatur und Wassertemperatur

In der vorliegenden Studie wird auf die statistische Analyse der Abhängigkeit zwischen den in Sachsen gemessenen Wasser- und Lufttemperaturen und die Übertragung dieser Abhängigkeit auf projizierte Lufttemperaturen des Klimamodells orientiert. Hierzu wurden in einem ersten Schritt statistische Methoden in der Fachliteratur recherchiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit unter Berücksichtigung der verfügbaren Inputdaten bewertet.

5.1 KAUSHAL et al. (2010): Rising stream and river temperatures in the United States

Es wurden historische Daten von 40 Messpunkten in Strömen und Flüssen der USA auf signifikante Temperaturveränderungen untersucht. An 20 Punkten konnte eine statistisch gesicherte langfristige Erwärmung festgestellt werden. Hier stieg der Jahresmittelwert der Wassertemperatur um 0.009 K/a bis 0.077 K/a. Die Erwärmung hat in vielen Fällen besonders stark in Gebieten mit Verstädterung stattgefunden, wenngleich dies nicht immer der Fall war. Die Studie unterstreicht den vielfältigen anthropogenen Einfluss auf die Wassertemperatur. Es werden wesentliche Auswirkungen auf die Fließgewässerökosysteme erwartet, wenn sich die bisherige Entwicklung in der Zukunft fortsetzen sollte. Der Einfluss des Klimawandels auf die Wassertemperatur wird nicht explizit quantifiziert.

5.1.1 Beschreibung des Verfahrens

Aus den Tagesreihen der Wassertemperatur wurden zunächst Jahresmittelwerte berechnet:

1. Berechnung von Monatsmittelwerten aus den Tageswerten
2. Berechnung von Jahresmittelwerten aus jeweils mindestens neun Monatsmittelwerten

Anschließend wurde ein langfristiger Trend berechnet mit zwei parallel angewandten Methoden:

- Berechnung linearer Regressionsgeraden, x = Jahreszahl, y = Jahresmittelwert der Wassertemperatur und Test auf Signifikanz der Korrelation
- Anwendung des nichtparametrischen Mann-Kendall-Trendtests mit der Schätzung des Anstieges nach Sen (robust gegenüber Ausreißer)

Im Ergebnis zeigten sich nur wenige Unterschiede hinsichtlich der mit beiden Verfahren ermittelten Signifikanz der Temperaturtrends.

Lineare Regressionsanalyse

Die lineare Regressionsanalyse ist ein statistisches Standardverfahren. Im Ergebnis der Berechnung der Regressionsgeraden nach der Methode der kleinsten Quadrate ist die lineare Abhängigkeit einer Zielgröße von einer Einflussgröße zu beschreiben. Der Korrelationskoeffizient und das Bestimmtheitsmaß charakterisieren die Stärke und Richtung des Zusammenhanges. Mittels eines einfachen statistischen Tests kann das Vorhandensein einer Korrelation nachgewiesen werden. Der Korrelationskoeffizient, das Bestimmtheitsmaß und die Ergebnisse des statistischen Tests sind nicht abhängig von der Zeitskala und von der Skalierung der Zielgröße. Für die Parameter der linearen Regressionsgeraden (Steigung, Achsenabschnitt) können Konfidenzintervalle berechnet werden.

Mann-Kendall-Trendtest

Der MANN-KENDALL-Trendtest (GILBERT 1987 in SALMI et al. 2002) ist nichtparametrisch und verteilungsunabhängig und damit flexibel anwendbar. Er wird deshalb häufig zur Trendanalyse von Messdaten natürlicher Prozesse angewandt wie z. B. auf meteorologische Datenreihen, Durchflussreihen, Stoffgehalte oder Veränderungen der Auftrittshäufigkeit bestimmter Ereignisse mit der Zeit (Trockentage, Extremniederschläge usw.). Der Test liefert ein Signifikanzmaß für einen eventuell vorhandenen linearen oder auch nichtlinearen monotonen Trend in der Datenreihe und die Richtung des Trends, jedoch keine weiteren Informationen über diesen Trend. Um diese weiteren Informationen zu erhalten, wurde in KAUSHAL et al. (2010) der Anstieg eines linearen Trends mit der nichtparametrischen Methode nach SEN ermittelt (GILBERT 1987 in SALMI et al. 2002). Beide Methoden fordern dieselben Voraussetzungen an die Datenreihe (verteilungsunabhängig, nichtparametrisch, Varianz bleibt konstant) und werden deshalb oft in Kombination angewandt. Vom Finnish Meteorological Institute Helsinki wurde eine Excel-Applikation beider Methoden zur Analyse von Schadstoffgehalten in der Atmosphäre entwickelt, die einschließlich der Dokumentation frei verfügbar ist und die von KAUSHAL et al. (2010) verwendet wurde (SALMI et al. 2002).

Der MANN-KENDALL-Trendtest untersucht die Vorzeichenwechsel der Änderungen der Daten einer Zeitreihe mit fortschreitender Zeit. Je mehr positive Änderungen auftreten, desto wahrscheinlicher ist das Vorhandensein eines positiven Trends und umgekehrt. Anhand der Vorzeichenänderungen wird die Testgröße S berechnet und mit einer Prüfgröße verglichen. Wird die

Prüfgröße überschritten, wird die Nullhypothese abgelehnt und das Vorzeichen der Testgröße gibt Auskunft über die Richtung des Trends:

- H0: Variable ist zufällig über die Zeit verteilt (kein Trend vorhanden)
- H1: es ist ein steigender oder fallender monotoner Trend vorhanden

Schätzung des Anstiegs nach Sen

Wird im MANN-KENDALL-Trendtest das Vorzeichen der Änderungen von einem Zeitschritt zum nächsten ausgewertet, ist dies bei der Methode nach SEN der Anstieg von einem Wert zu einem späteren Wert. Es wird der Erwartungswert des Anstiegs eines linearen monotonen Trends berechnet unabhängig davon, ob die zeitlichen Veränderungen signifikant sind. Darüber hinaus werden für ein vorgegebenes Signifikanzniveau der kleinste und der größte Anstieg, d. h. das Konfidenzintervall des Anstiegs, berechnet. Dies gilt auch für den Achsenabschnitt der Trendgeraden.

5.1.2 Bewertung der Eignung der Verfahren für die aktuelle Datenauswertung

Die Auswertung der historischen Daten in KAUSHAL et al. (2010) beschränkt sich auf die Berechnung linearer Trends der gemessenen Wassertemperatur und deren Signifikanzniveau. Ein Bezug zu Einflussgrößen wie die Lufttemperatur wurde nicht hergestellt. Die beschriebene Vorgehensweise der Bildung von Jahresmittelwerten vor der eigentlichen statistischen Auswertung zeigt, dass die Berücksichtigung des jahreszeitlichen Ganges bei der Auswertung von Temperaturdaten von wesentlicher Bedeutung ist.

Die lineare Regressionsanalyse kann insbesondere verwendet werden, um Stärke und Richtung von zeitlichen Temperaturänderungen zu beschreiben (Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß) und um die Signifikanz solcher Veränderungen nachzuweisen.

Der MANN-KENDALL-Trendtest ist insbesondere zur statistischen Absicherung des Trends von Zeitreihen mit wenigen Werten geeignet:

Tabelle 10: MANN-KENDALL-Trendtest – Anzahl an erforderlichen Werten

Signifikanzniveau α	erforderliche Anzahl an Werten
0.1	≥ 4
0.05	≥ 5
0.01	≥ 6
0.001	≥ 7

Dabei ist unerheblich, ob die Zeitreihe Datenlücken enthält. Damit bietet sich der MANN-KENDALL-Trendtest auch zur Auswertung der kürzeren Datenreihen der Stichtagsmessungen der Wassertemperatur in den Fließgewässern an. Die Methode nach SEN erfordert das Vorhandensein von ≥ 10 Werten, die sich von Zeitschritt zu Zeitschritt ändern müssen.

5.2 MOHSENI et al. (1998): A nonlinear regression model for weekly stream temperatures

Das Ziel der Arbeit bestand in der Entwicklung einer Methodik zur Ableitung von Wassertemperaturen in Fließgewässern aus der Lufttemperatur für die gegenwärtigen klimatischen Verhältnisse und für projizierte Klimaszenarien. Hierzu wurde ein Regressionsmodell der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur entwickelt. Als Datenbasis wurden tägliche Messwerte von 584 Pegelstationen der USA einer dreijährigen Periode verwendet. Die entwickelte Regressionsfunktion ist nichtlinear und berücksichtigt die unterschiedlichen Maße der Abhängigkeit im kalten, normalen und warmen Bereich der Lufttemperatur. Darüber hinaus wird die Periode der saisonalen Erwärmung getrennt von der Periode der saisonalen Abkühlung

nachgebildet (saisonale Hysterese der Abhängigkeit). Es wird eine gute Anwendbarkeit des Regressionsmodells zur Ableitung der Wassertemperatur von der Lufttemperatur erreicht, wenngleich die maximalen Wassertemperaturen unterschätzt werden.

5.2.1 Beschreibung des Verfahrens

Das erarbeitete Regressionsmodell basiert auf wöchentlichen Temperaturmittelwerten. Frühere ausgewertete Studien zeigten, dass insbesondere Wochenmittelwerte der Luft- und Wassertemperatur stark miteinander korrelieren. Außerdem sind extreme Wochenmittelwerte der Wassertemperatur für die Fischfauna eher limitierend als kurzzeitig auftretende Temperaturextreme, weshalb Wochenmittelwerte von Biologen zur Abgrenzung von Habitaten herangezogen werden.

Mit dem erarbeiteten Regressionsmodell sollte weiterhin die Nichtlinearität der Korrelation zwischen Wasser- und Lufttemperatur berücksichtigt werden. Diese resultiert aus der Tatsache, dass die Wassertemperatur nicht allein von der Lufttemperatur abhängt, sondern von vielen weiteren Faktoren. Diese führen insbesondere im saisonalen Extrembereich dazu, dass die Wassertemperatur weniger stark der Lufttemperatur folgt als im Normalbereich (vgl. Abbildung 25). Bei niedrigen Temperaturen wird die Wassertemperatur zunehmend unabhängiger von der Lufttemperatur aufgrund der Wärmezufuhr über den Bodenwärmestrom, über Grundwasserzutritte oder aus anderen Wärmequellen wie Einleitungen oder Abflüsse aus Standgewässern. Zudem kann die Wassertemperatur physikalisch nicht unter 0 °C fallen im Gegensatz zur Lufttemperatur (allerdings liefern festinstallierte Temperaturgeber Werte unter Null, wenn sie einfrieren). Bei hohen Lufttemperaturen steigt der Einfluss des Wärmeverlustes im Fließgewässer durch Evaporation, weil das Wasseraufnahmevermögen der Atmosphäre mit steigender Temperatur exponentiell ansteigt. Dies dämpft den Anstieg der Wassertemperatur bei zunehmender Lufttemperatur.

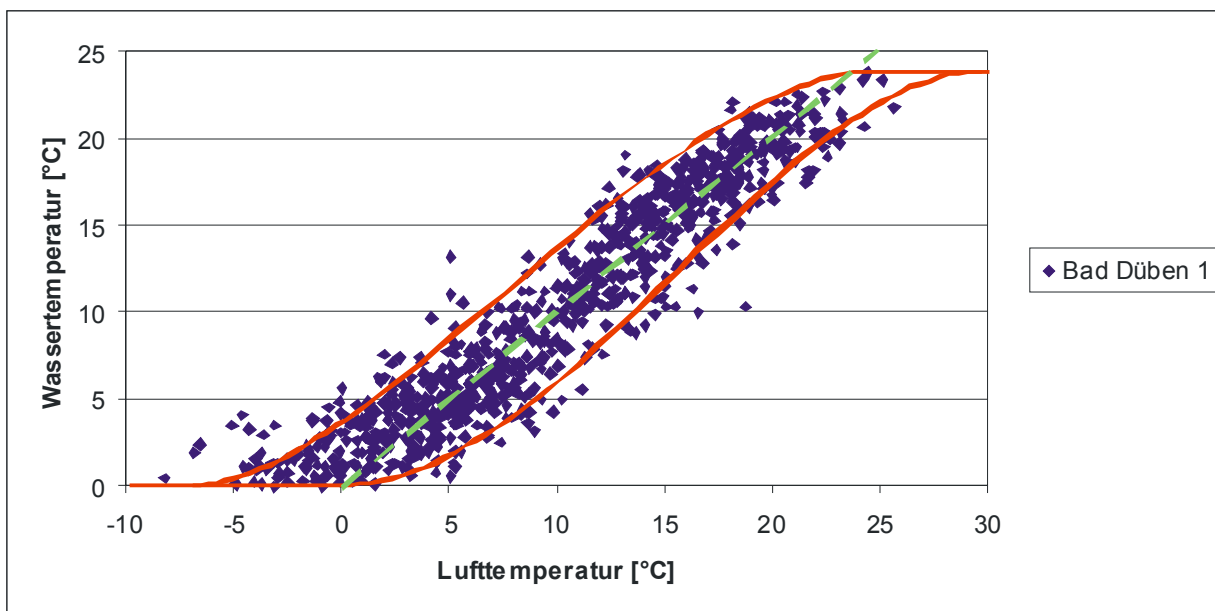


Abbildung 25: Exemplarischer Vergleich eines linearen Regressionsansatzes (grün) mit der nichtlinearen Modellvorstellung (rote Hüllkurven), Pegel Bad Dübener See, Wochenmittelwerte

Letztlich zeigte die Auswertung der Messdaten durch MOHSENI et al. (1998) einen saisonalen Hystereseeffekt. Die Wassertemperatur folgt der Lufttemperatur saisonal verzögert. Es werden bei gleicher Lufttemperatur im Frühjahr tendenziell tiefere Wassertemperaturen gemessen und im Herbst höhere. Die zeitliche Verzögerung spielt insbesondere bei den großen Strömen mit hohem Durchflussvolumen eine Rolle, ebenso im Abstrom größerer Wasserreservoirs. Auch der Schmelzwasserabfluss im zeitigen Frühjahr führt zu tieferen Wassertemperaturen als im Herbst bei vergleichbarer Lufttemperatur.

Saisonale Hystereseeffekte können auch anhand der gemessenen Wassertemperaturen in Sachsen festgestellt werden (vgl. Abbildung 26). Die Anlage 4 enthält Darstellungen der Abhängigkeiten der Wasser- von der Lufttemperatur auf der Basis mittlerer Monatsmittelwerte aller Pegel mit täglichen Temperaturmessungen. In der Elbe ist die beschriebene Hysterese am größten. Die zeitliche Verzögerung der saisonalen Entwicklung der Wassertemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur ist damit

in der Elbe am größten. Dies ist größtenteils auf das große Freiwasservolumen der Elbe zurückzuführen, dessen Wärmekapazität entsprechend groß ist, sodass die saisonale Erwärmung und Abkühlung eine längere Zeit erfordert. Reagiert die Wassertemperatur dagegen unmittelbar auf die Veränderungen der Lufttemperatur, ist die zeitliche Verzögerung gering. Das Freiwasservolumen der betreffenden Pegel sollte vergleichsweise klein sein. Dies ist beispielsweise beim Pegel Regis-Serbitz der Fall (vgl. Abbildung 26).

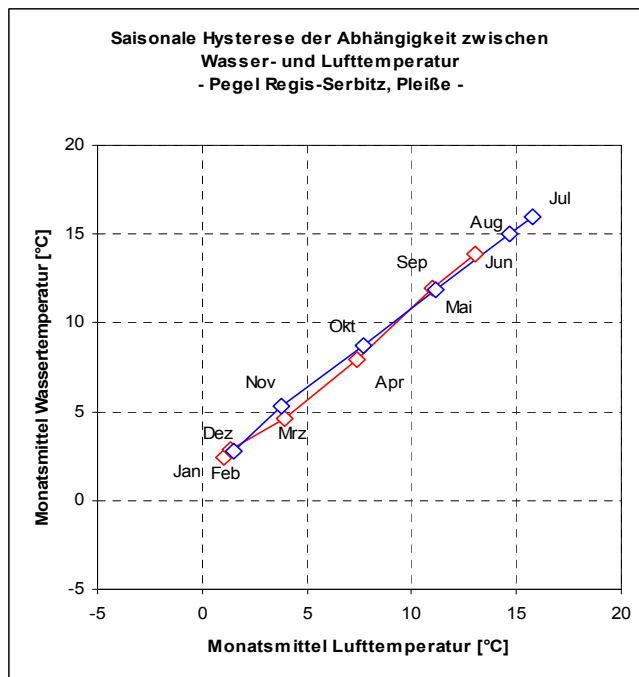
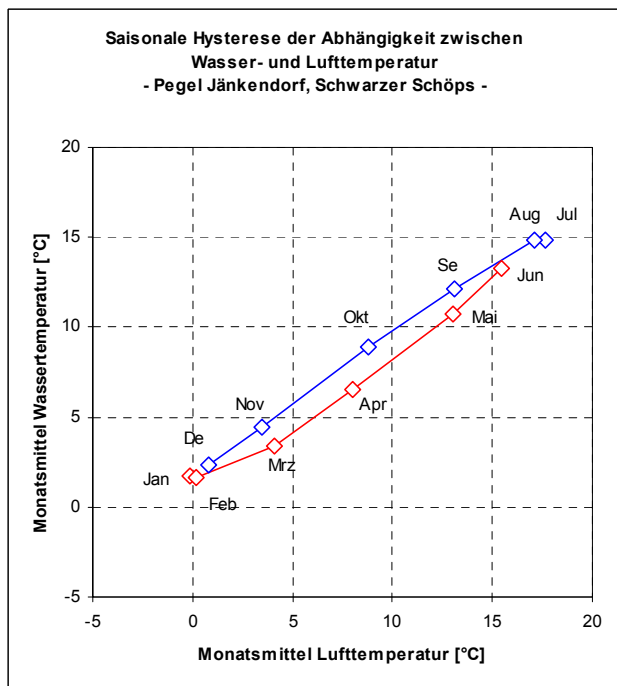
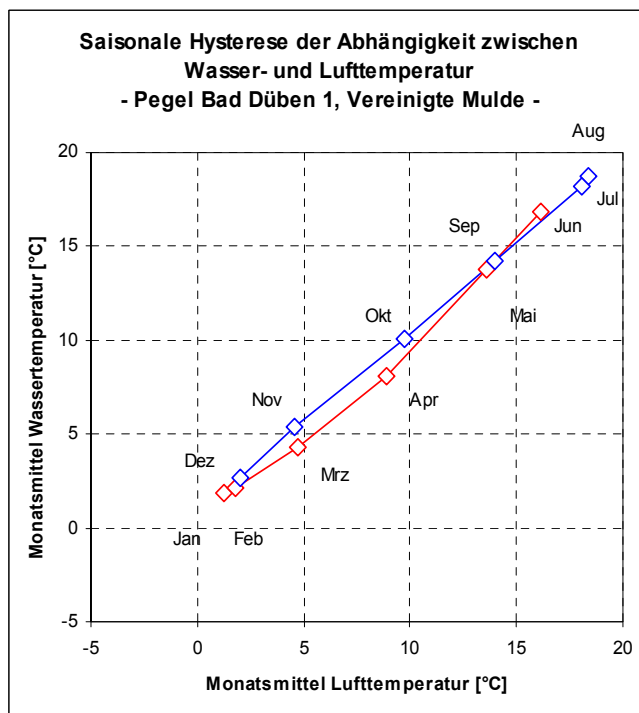
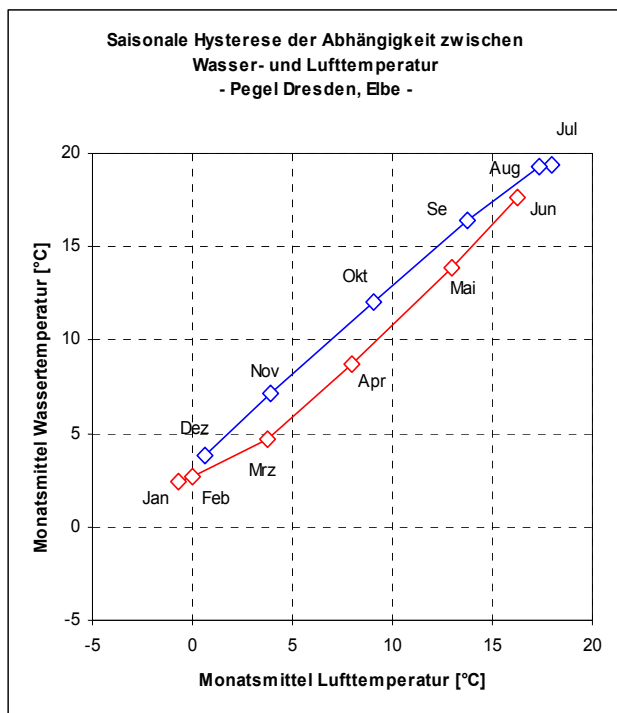


Abbildung 26: Exemplarische Darstellung der saisonalen Hysterese der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur, Pegel Dresden, Bad Dübener Heide, Jänkendorf, Regis-Serbitz; mittlere Monatsmittelwerte im Beobachtungszeitraum

Als Regressionsmodell wurde in MOHSENI et al. (1998) eine S-förmige Exponentialfunktion der Form $f(x) = 1/(1+\exp(-x))$ gewählt. Diese Funktion wird sehr oft zur Beschreibung natürlicher Vorgänge, insbesondere des exponentiellen Wachstums bei

beschränkten Ressourcen, verwendet (logistische Funktion). Darüber hinaus gibt es Anwendungen zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen physikalischen Zustandsgrößen wie z. B. der Abhängigkeit des Bodenwassergehaltes (Zielgröße y) von der Saugspannung (Einflussgröße x).

$$T_w = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + \exp(\gamma \cdot (\beta - T_L))}$$

mit T_w Wassertemperatur
 T_L Lufttemperatur
 $\alpha, \mu, \gamma, \beta$ Parameter

Die Parameter α und μ definieren die Wassertemperatur, an welche sich die Regressionsfunktion bei geringen und hohen Lufttemperaturen asymptotisch annähert. Dabei handelt es sich unter gemäßigten klimatischen Bedingungen zumindest beim Maximum α um einen Wert, der unter natürlichen Bedingungen nicht erreicht wird. Die Parameter einer optimal angepassten Regressionsfunktion werden deshalb i. d. R. vom gemessenen Minimum und Maximum der Wassertemperatur abweichen, auch kann für μ ein Wert kleiner als Null angenommen werden (vgl. Abbildung 27). MOHSENI et al. (1998) gaben dagegen für μ eine Untergrenze von Null vor.

Der Parameter β ist definiert durch die Lufttemperatur am Wendepunkt der Kurve. Dieser Parameter kann auf der Grundlage der Wertepaare geschätzt werden anhand des Erwartungswertes der Lufttemperatur bei $T_w = (\alpha - \mu)/2$.

Der Parameter γ ist ein Maß für die Steigung der Regressionskurve an deren Wendepunkt. Er entspricht nicht der Steigung, sondern kann aus der Steigung wie folgt berechnet werden:

$$\gamma = \frac{4 \cdot \tan \Theta}{\alpha - \mu}$$

mit Θ Steigung der Kurve am Wendepunkt

Als Schätzung für die Steigung am Wendepunkt der Regressionskurve kann die Steigung einer linearen Regressionsgeraden nach Ausschluss der Wertepaare mit geringen und hohen Temperaturen berechnet werden.

Eine exemplarische Darstellung der exponentiellen Regressionsfunktion nach MOHSENI et al. (1998) und deren Parameter enthält Abbildung 27. Zur Anwendung des Regressionsmodells können die Parameter in einem ersten Arbeitsschritt geschätzt werden, in einem zweiten Schritt sollten die Parameter iterativ angepasst werden mit dem Ziel, die Summe der quadratischen Abweichungen zu minimieren. Dabei besteht zusätzlich die Möglichkeit, für die halbjährigen Perioden mit steigender und fallender Lufttemperatur zwei unterschiedliche Kurven zu berechnen zur Berücksichtigung der saisonalen Hysterese. In MOHSENI et al. (1998) wurde dies nicht in allen Fällen durchgeführt, bei 57 % aller Pegel wurde keine Hysterese berücksichtigt.

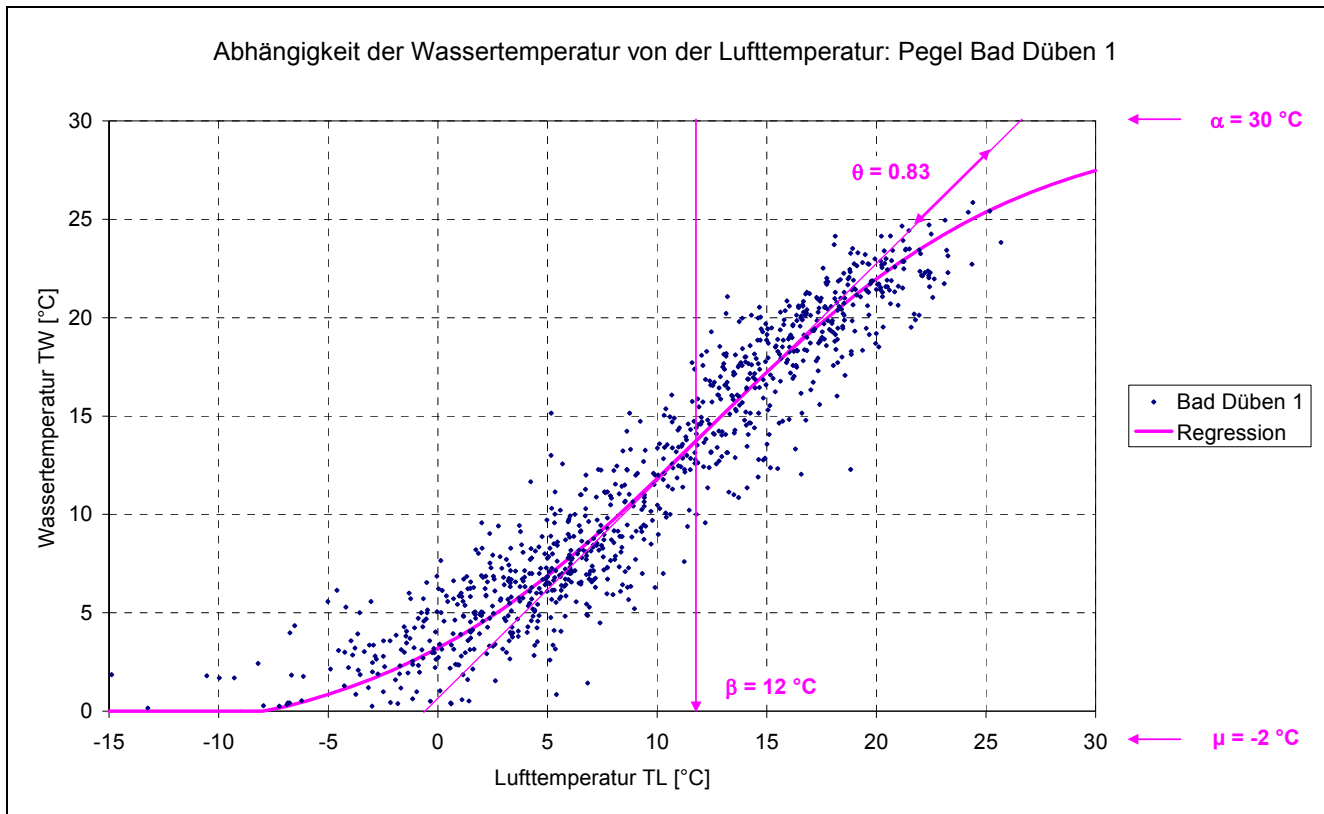


Abbildung 27: Exemplarische Anpassung einer exponentiellen Regressionsfunktion nach MOHSENI et al. (1998) an die Daten des Pegels Bad Dübener 1 (Wochenmittelwerte)

Die Berücksichtigung einer Hysterese ist möglich durch Anwendung zweier Regressionsfunktionen getrennt für saisonale Erwärmung und Abkühlung. Die Berücksichtigung einer Hysterese kann aber auch unterbleiben (57 % der Fälle in der Auswertung von MOHSENI et al. 1998).

5.2.2 Bewertung der Eignung des Verfahrens für die aktuelle Datenauswertung

MOHSENI et al. (1998) führen mit der S-förmigen Exponentialfunktion zur Beschreibung des Zusammenhanges von Wasser- und Lufttemperatur eine Funktion ein, die in vielen Bereichen der Naturwissenschaften Anwendung findet. Sie ist insbesondere geeignet, einen eigentlich annähernd linearen Zusammenhang nachzubilden, bei dem sich die Zielgröße an physikalische Grenzen asymptotisch annähert und diese nicht überwinden kann. Dies ist am Beispiel des negativen Wertebereiches der Wassertemperatur der Fall. Die Funktion sollte deshalb die Nichtlinearität des Zusammenhanges zwischen Wasser- und Lufttemperatur im Bereich geringer oder negativer Lufttemperaturen in ausreichendem Maße nachbilden. Im oberen Bereich mit hohen Lufttemperaturen besteht die Schwierigkeit, dass hier keine obere unüberwindbare Grenze im infrage kommenden Temperaturbereich existiert. Hier gelingt die Nachbildung des Zusammenhanges weniger gut, sodass die tatsächlichen Wassertemperaturen unterschätzt werden können. Allerdings besteht hier die Möglichkeit, den Parameter α der Funktion über den größten gemessenen Wert der Wassertemperatur hinaus zu erhöhen und den annähernd linearen Bereich der Funktion zu erweitern. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der Anpassung der Funktion für jeden auszuwertenden Fließgewässerpegel.

Das Verfahren wertet Wochenmittelwerte der Einfluss- und Zielgröße aus. Es kann damit nur anhand von Zeitreihen angewandt werden, deren Datendichte die Berechnung von Wochenmittelwerten erlaubt. Im Hinblick auf die vorliegenden, im Rahmen der Vorstudie (LFULG 2009) aufbereiteten Daten gilt dies lediglich für die 29 Fließgewässerpegel des sächsischen Basismessnetzes mit täglich gemessenen Wassertemperaturen, von denen jedoch einige bereits aufgrund kurzer Datenreihen oder anthropogener Beeinflussungen nicht ausgewertet werden können. Die Pegel befinden sich zudem nur in größeren Fließgewässern des sächsischen Hügel- und Tieflandes.

Die Stichtagsmessungen können mit dem Verfahren nach MOHSENI et al. (1998) nicht ohne Anpassung der Methodik ausgewertet werden. Allerdings ist die Verwendung von Tageswerten der Wassertemperatur anstelle von Wochenmittelwerten

ohne weiteres möglich. Hierzu wurden im Rahmen der Vorstudie bereits Zeitreihen gewichteter Mittelwerte der Lufttemperatur berechnet, welche die Vorbedingungen für jeden Tag der Zeitreihen mit unterschiedlicher Dauer und Wichtung berücksichtigen. Auch in MORILL et al. (2005) werden Mittelwerte der Lufttemperatur vorangegangener Tage als Einflussgröße und Stichtagsmessungen der Wassertemperatur als Zielgröße verwendet (vgl. Abschnitt 5.3).

5.3 MORILL et al. (2005): Estimating Stream Temperature from Air Temperature – Implications for Future Water Quality

In MORILL et al. (2005) wird versucht, durch Anwendung linearer und nichtlinearer Regressionsgleichungen die Zusammenhänge zwischen der Lufttemperatur als Einflussgröße und der Fließgewässertemperatur als Zielgröße nachzubilden. Das Ziel bestand in der Abschätzung der Veränderungen der Wassertemperatur durch den Klimawandel und der Prognose des Gehaltes an gelöstem Sauerstoff als wichtiger gewässerökologischer Zustandsgröße. Es wurden Daten von 43 vorrangig nordamerikanischen und westeuropäischen Standorten ausgewertet. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Veränderungen der Lufttemperatur zu einer Erhöhung der Fließgewässertemperatur führen werden. Allerdings wird sich die Wassertemperatur vieler Fließgewässer um weniger große Beträge ändern als die Lufttemperatur. Insbesondere wird für die Wassertemperatur im Sommer eine eher geringe Erhöhung prognostiziert, jedoch wird sich auch diese geringere Erhöhung kritisch auf die Konzentration an gelöstem Sauerstoff auswirken.

5.3.1 Beschreibung des Verfahrens

Als Einflussgröße für die Wassertemperatur wurde die Lufttemperatur betrachtet. Die Lufttemperatur lag in Form von Tagesmittelwerten vor bzw. es wurden Tagesmittelwerte aus den Tagesminima und -maxima zur Anwendung des Verfahrens berechnet. Die Wassertemperatur lag in Form von Stichtagsmessungen vor. Die Problematik der Uhrzeit der Stichtagsmessungen wird nicht näher betrachtet.

Der Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Wassertemperatur wurde mittels linearer und nichtlinearer Regressionsanalyse untersucht. Hierzu wurde die Einflussgröße vor der Berechnung von Regressionsgleichungen drei unterschiedlichen Mittelungsverfahren unterzogen:

- keine Mittelung (Anwendung von Tageswerten der Lufttemperatur)
- Mittelung der Lufttemperatur am Stichtag und der letzten zwei zurückliegenden Tage (3-Tages-Mittelwert)
- Mittelung der Temperatur am Stichtag und der letzten sechs zurückliegenden Tage (7-Tages-Mittelwert)

Bei der Wassertemperatur wurde stets der konkrete Messwert am Stichtag verwendet. Die teilweise zeitversetzte Anwendung von Einfluss- und Zielgröße stellt den wesentlichen Unterschied zu MOHSENI et al. (1998) dar, wo Wochenmittelwerte der Lufttemperatur als Einflussgröße und Wochenmittelwerte der Wassertemperatur als Zielgröße ausgewertet wurden (vgl. Abschnitt 5.2). In letzterem Fall wird keine zeitliche Verzögerung der Zielgröße gegenüber der Einflussgröße berücksichtigt, was in MORILL et al. (2005) durch die Betrachtung des zurückliegenden Zeitraumes bei der Lufttemperatur geschieht. Die Betrachtung der Lufttemperatur im zurückliegenden Zeitraum führt zu einer Verbesserung der Schätzung der Wassertemperatur (MORILL et al. 2005).

Es wurde sowohl eine lineare als auch eine nichtlineare Regressionsbeziehung zur Berechnung der Wassertemperatur aus der Lufttemperatur angewandt. Die lineare Regressionsgerade wurde unter Auswertung der Wertepaare mit positiver Lufttemperatur berechnet, weil im Bereich negativer Lufttemperaturen ein nichtlinearer Zusammenhang vorliegt (vgl. Abschnitt 5.2). Als nichtlineare Regressionsbeziehung wurde die Exponentialgleichung nach MOHSENI et al. (1998) angewandt (Abschnitt 5.2). Die Parameter der nichtlinearen Regressionsbeziehung wurden iterativ unter Minimierung der quadratischen Abweichungen ermittelt. Es wurde die Güte der Anpassung der Regressionsfunktionen berechnet. Die Regressionsfunktionen mit hoher Güte der Anpassung wurden verwendet, um die vom Klimawandel beeinflusste Wassertemperatur zu schätzen anhand von prognostizierten Lufttemperaturen der Monate Juni bis August aus der Klimamodellierung. Anschließend wurde der Gehalt an gelösten Sauerstoff im Fließgewässer berechnet.

Im Ergebnis zeigten die mit der nichtlinearen Regressionsbeziehung berechneten Wassertemperaturen geringere Abweichungen von den Messwerten als bei Anwendung einer linearen Regressionsbeziehung. Allerdings unterscheiden sich die Ergebnisse beider Ansätze zum Teil nur wenig. Die Anwendung von mehreren zurückliegenden gemessenen Lufttemperaturen als Einflussgröße erwies sich als besser geeignet als die Verwendung der Lufttemperaturen am Stichtag.

Es wurde insgesamt eine hohe Güte der Anpassung erreicht. Allerdings verbleiben Unsicherheiten bei der Schätzung der höchsten Wassertemperaturen, die bei einigen Standorten nicht befriedigend nachgebildet werden konnten. Die Anwendung des nichtlinearen Modells führt zur Unterschätzung der Wassertemperaturen bei hohen Lufttemperaturen $>27\text{ °C}$, die Anwendung des linearen Modells zu einer Überschätzung.

5.3.2 Bewertung der Eignung des Verfahrens für die aktuelle Datenauswertung

Die in MORILL et al. (2005) beschriebenen Auswerteverfahren unterscheiden sich nur unwesentlich von der linearen Regressionsanalyse oder der Anwendung der nichtlinearen Regressionsgleichung nach MOHSENI et al. (1998). Die nichtlineare Regressionsgleichung ist besser geeignet. Der wesentliche Unterschied zu MOHSENI et al. (1998) besteht in der Auswertung zurückliegender Zeiträume für die Einflussgröße und der Anwendung der konkreten Stichtagsdaten für die Zielgröße. Eine saisonale Hysterese wird nicht berücksichtigt, dies kann aber auch unterbleiben, weil die Einfluss- und Zielgröße mit zeitlicher Verschiebung in Beziehung zueinander gesetzt werden, womit ein im Jahresverlauf symmetrischer Hystereseeffekt nachgebildet wird. Die Vorgehensweise nach MORILL et al. (2005) enthält mit der Verwendung zurückliegender Zeiträume für die Einflussgröße eine Modifikation, deren Anwendung auch für die Daten der sächsischen Wassertemperaturen als sinnvoll erscheint. Es eröffnet zudem die Möglichkeit der Auswertung von Stichtagsmessungen.

5.4 BOGAN et al. (2005): Estimating extreme stream temperatures by the standard deviate method

Kommt die Exponentialfunktion zur Beschreibung der Abhängigkeit der Fließgewässertemperatur von der Lufttemperatur nach MOHSENI et al. (1998) in Zusammenhang mit der Klimaerwärmung zur Anwendung, verbleibt das Problem, dass für den zu erwartenden Extrembereich der hohen Temperaturen bisher keine gemessenen Wassertemperaturen vorliegen. Damit kann anhand von Messdaten nicht beschrieben werden, inwieweit die maximalen Wassertemperaturen im Sommer noch weiter steigen würden als Folge der Erwärmung und Zunahme der Einstrahlung, Sommertrockenheit und anderer Veränderungen, weil diese Bedingungen derzeit nicht gegeben sind. Dagegen ist bekannt, dass die Wassertemperatur bei Anstieg der Lufttemperaturen über etwa 25 °C zunehmend nichtlinear und langsamer ansteigt aufgrund der zunehmenden Energieverluste durch Freiwasserevaporation.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung bzw. Verbesserung eines Verfahrens zur fundierten Ableitung der oberen Grenze der Wassertemperatur als Parameter der Exponentialfunktion nach MOHSENI et al. (1998). Hierzu wurden die drei- bis 30-jährigen Datenreihen von 993 Pegeln des U.S. Geological Survey (USGS) ausgewertet.

5.4.1 Beschreibung des Verfahrens

Ausgegangen wird wie in den oben beschriebenen Arbeiten von einer S-förmigen Exponentialfunktion mit den folgenden Parametern (vgl. Abschnitt 5.2):

- α obere Grenze der Wassertemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- μ untere Grenze der Wassertemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- γ Anstieg der Regressionsbeziehung am Wendepunkt (=maximaler Anstieg im mittleren Temperaturbereich) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- β Lufttemperatur am Wendepunkt ($^{\circ}\text{C}$)

Der Parameter α bestimmt den Zusammenhang zwischen Luft- und Wassertemperatur im Bereich der höchsten gemessenen oder zu erwartenden Temperaturen. Er ist nicht bekannt, weil zur Temperaturprognose von höheren Temperaturen ausgegangen werden muss als bisher gemessen. Der Parameter ist aus physikalischen Gründen stets größer als die bisher gemessene Maximaltemperatur. Werden die Parameter durch Kurvenanpassung an die gemessenen Wertepaare mittels Minimierung der quadratischen Abweichungen bestimmt, resultiert eine zu geringe obere Grenze der Wassertemperatur α . Dies

äußert sich insbesondere darin, dass nicht selten eine obere Grenze α berechnet wird, die im Bereich oder sogar noch unter dem bisher beobachteten Maximum liegt. Außerdem hängt die unter Minimierung der quadratischen Abweichungen berechnete obere Grenze häufig ab von der Anzahl der Daten und ist stark zufällig beeinflusst von den gemessenen Werten im oberen Temperaturbereich.

Das Konzept zur Abschätzung der oberen Grenze der Wassertemperatur α geht auf eine frühere Arbeit von MOHSENI, ERICKSON und STEFAN (MOHSENI et al. 2002 in BOGAN et al. 2005) zurück. Die Methode beruht auf der Auswertung mehrjähriger Zeitreihen von Wochenmittelwerten der Wassertemperatur. Weil eine Extremwertstatistik auf der Grundlage von Jahresmaxima wegen der meist geringen Anzahl von Jahren nicht möglich war, wurden für jeden Pegel die höchsten 4 % der Wassertemperaturen (alle Werte oberhalb des 96 %-Perzentsils) aus der Datenbasis ausgewählt und der Mittelwert dieser Extremwerte und deren Standardabweichung berechnet. Die statistische Verteilung der Extremwerte erlaubt anschließend die Abschätzung von Werten mit beliebiger Wahrscheinlichkeit. Weiterhin wurde ein Parameter K eingeführt, der die Abweichung (standard deviate) des maximal am Pegel gemessenen Wertes vom Mittelwert der Extremwerte beschreibt:

$$T_{\max} = T_{\text{mean}} + s \cdot K$$

mit	T_{\max}	höchster gemessener Wochenmittelwert der Wassertemperatur am Pegel
	T_{mean}	Mittelwert der 4 % höchsten gemessenen Wochenmittelwerte am Pegel
	s	Standardabweichung der 4 % höchsten gemessenen Wochenmittelwerte am Pegel
	K	pegelspezifische Abweichung (standard deviate) des T_{\max} vom T_{mean} (als Vielfaches der Standardabweichung)

Weil aus der Gleichung mit dem Wert K für einen Pegel lediglich das bisher gemessene Maximum resultiert, die gesuchte obere Grenze der Wassertemperatur α aber deutlich größer sein sollte, wurde eine Vielzahl von Pegeln ausgewertet, um eine alle Pegel repräsentierende maximale Abweichung K_E abzuschätzen. In MOHSENI et al. 2002 in BOGAN et al. 2005 wurde ein Parameter K_E von 4.88 ermittelt. Dieser Parameter entspricht der größten Abweichung K von 146 Pegeln in Nordamerika. Wird die obere Grenze der Wassertemperatur für eine größere Anzahl von Pegeln mit $K_E = 4.88$ berechnet, finden sich allerdings Pegel, an denen bereits höhere Temperaturen gemessen wurden. Damit erweist sich der Wert $K_E = 4.88$ als zu klein.

In der Studie BOGAN et al. 2005 wurde die Bestimmung von K_E auf einer größeren Datenbasis von 720 USGS-Pegeln durchgeführt. Insbesondere die Daten der Pegel mit extrem hohen Temperaturen wurden detailliert auf Plausibilität geprüft. Es wurde festgestellt, dass weder der Parameter K noch die Standardabweichung der 4 % höchste Temperaturwerte abhängig sind von der Anzahl der ausgewerteten Datensätze. Auf der Grundlage unterschiedlicher Detailauswertungen und Plausibilitätsbetrachtungen wurde für die Fließgewässer der USA eine maximale Abweichung K_E von 7 bis 8 empfohlen. Dieser Bereich kann verwendet werden, um die obere Grenze der Wassertemperatur α abzuschätzen.

5.4.2 Bewertung der Eignung des Verfahrens für die aktuelle Datenauswertung

BOGAN et al. (2005) erarbeiteten eine Empfehlung für die obere Grenze der Wassertemperatur, welche als Parameter α in der nichtlinearen Regressionsfunktion nach MOHSENI et al. (1998) verwendet wird. Beide Arbeiten basieren auf der Auswertung von Wochenmittelwerten der Wassertemperatur. Die obere Grenze der Wassertemperatur stellt auch bei der Auswertung der in Sachsen gemessenen Wassertemperatur einen wichtigen Parameter dar. Allerdings muss der Parameterwert, der in BOGAN et al. vorgeschlagen wird, angepasst werden, wenn die Auswertung abweichend zur Vorgehensweise in BOGAN et al. nicht auf der Berechnung von Wochenmittelwerten beruht.

6 Entwicklung eines Verfahrens zur Anwendung auf die konkrete Datenbasis

In der vorliegenden Studie wurde versucht, die Zusammenhänge zwischen der gemessenen Lufttemperatur und der Fließgewässertemperatur zu beschreiben und anschließend zu nutzen, um die Veränderung der Wassertemperaturen bei gegebener Veränderung der Lufttemperatur zu prognostizieren. Gemessene Fließgewässertemperaturen korrelieren sehr stark mit der Lufttemperatur, insbesondere wenn Mittelwerte über mehrere Tage betrachtet werden (MOHSENI et al. 1998, MORILL et al. 2005, BOGAN et al. 2005). Bei dem Zusammenhang zwischen beiden Größen handelt es sich nicht um die eindeutige Wirkung einer Einflussgröße auf eine Zielgröße, vielmehr umfasst das Wirkungsgefüge viele Einflussgrößen, die sich auch untereinander beeinflussen. So lässt eine relativ hohe Lufttemperatur über mehrere Tage hinweg auf eine hohe Energiezufuhr durch direkte Sonnenstrahlung schließen. Die Lufttemperatur kann deshalb als Summenparameter betrachtet werden, welcher den Zustand mehrerer meteorologischer Größen beinhaltet.

Wird die Wirkung der Einstrahlung oder der Strahlungsbilanz auf die Fließgewässertemperatur zusätzlich zur Lufttemperatur in einem statistischen Verfahren berücksichtigt, sollte eine bessere Vorhersagbarkeit der Wassertemperatur erreichbar sein. Allerdings ist dieser Vorteil verbunden mit einem deutlich höheren Aufwand bezüglich der Bereitstellung der Daten und einer hohen Komplexität der Methodik (BOGAN et al. 2004). Sollen noch weitere Einflussfaktoren wie Windgeschwindigkeit, Durchflussdynamik, Fließgewässer- und Uferbeschaffenheit berücksichtigt werden, sind die Grenzen statistischer Methoden schnell erreicht und es empfiehlt sich die Anwendung numerischer Modelle anhand gut untersuchter Fließgewässerabschnitte. Damit wird allerdings eine flächendeckende Bearbeitung unmöglich. Aus diesem Grunde widmeten sich in der Vergangenheit eine Vielzahl internationaler Studien dem statistischen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Wassertemperatur mit dem Ergebnis, dass aufgrund der starken Korrelation zwischen beiden Größen belastbare Aussagen auch auf der Grundlage einfacher Regressionsanalysen zu erzielen sind.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird wie in MOHSENI et al. (1998) eine nichtlineare logistische Regressionsfunktion angewandt. Diese bildet im Gegensatz zur linearen Regression den Zusammenhang zwischen Luft- und Wassertemperatur auch im Bereich tiefer und hoher Lufttemperaturen in ausreichendem Maße ab. In MOHSENI et al. (1998) erfolgt die Auswertung auf der Grundlage von Wertepaaren der Wochenmittelwerte von Luft- und Wassertemperaturen. Damit ist die Auswertung von Stichtagsmessungen, die z. B. monatlich vorgenommen wurden wie an vielen Messstellen in Sachsen, nicht möglich. Abweichend von MOHSENI et al. (1998) wird die Regressionsanalyse der sächsischen Wassertemperaturen deshalb anhand der Tageswerte der Wassertemperatur vorgenommen. Die Wassertemperaturen werden einem gleitenden Mittel der Lufttemperatur gegenübergestellt, welches die Bedingungen während eines beliebig langen vorangegangenen Zeitraumes repräsentiert. Eine ähnliche Vorgehensweise wird in MORILL et al. (2005) gewählt, die im Wesentlichen auf MOHSENI et al. (1998) aufbaut. Hier werden die Mittelwerte der Lufttemperatur der vorangegangenen Tage zusammen mit den Stichtagsmessungen der Wassertemperatur ausgewertet.

Die Verwendung der gleitenden Mittelwerte der Lufttemperatur hat weitere wesentliche Vorteile. Neben der Möglichkeit, Stichtagsmessungen der Wassertemperatur auszuwerten, kann auch die explizite Berücksichtigung einer saisonalen Hysterese, d. h. der zeitlichen Verschiebung der saisonalen Verläufe zwischen Wasser- und Lufttemperatur, unterbleiben. Diese zeitliche Verschiebung beträgt nur wenige Tage bis etwa zwei Wochen (vgl. Abschnitt 4.5.1). Weil die Wassertemperatur zum Stichtag einer mittleren Lufttemperatur des vorangegangenen Zeitraumes gegenübergestellt wird und die Länge dieses Zeitraumes so angepasst wird, dass später eine möglichst minimale Streuung der Wertepaare um die Regressionsbeziehung erreicht wird, wird der Einfluss der saisonalen Verschiebung zwangsläufig minimiert. Insgesamt zeigte sich, dass mit der Verwendung gleitender Mittelwerte der Lufttemperatur eine deutlich geringere Reststreuung der Wertepaare um die Regressionsbeziehung erreicht werden kann als mit der Verwendung von Wochenmittelwerten.

Die Anwendung der nichtlinearen logistischen Regressionsfunktion, welche in MOHSENI et al. (1998) und MORILL et al. (2005) und in anderen Arbeiten verwendet wird, birgt eine Unsicherheit bezüglich der Bestimmung der maximal möglichen Wassertemperatur als obere Grenze des Wertebereiches. Die Ermittlung des Parameters, der diese obere Grenze bestimmt, ist Gegenstand der weiterführenden Arbeiten von MOHSENI et al. (2002) und BOGAN et al. (2005). Die Erkenntnisse aus diesen

Studien werden bei der Auswertung der in Sachsen gemessenen Fließgewässertemperaturen in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt.

Bezüglich der unteren Grenze der Fließgewässertemperatur wurde von den genannten Arbeiten abgewichen. Die untere Grenze wurde in jedem Fall iterativ angepasst, auch wenn sie bei optimaler Anpassung der Regressionsbeziehung unter 0 °C liegt. Damit wurde in den meisten Fällen eine deutliche Verbesserung der Güte der Anpassung erreicht.

Im Folgenden wird die Methodik zur Auswertung der Fließgewässertemperaturen der sächsischen Messstellen am Beispiel des Pegels Strehla/Elbe beschrieben. Die Vorgehensweise wurde für alle Pegel angewandt, an denen die Wassertemperatur täglich gemessen wird und an denen über längere Zeiträume keine Veränderungen durch anthropogene Einflüsse stattfanden (24 Pegel). Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Anlage 5 grafisch dargestellt. Weiterhin wurde die Vorgehensweise auch an 92 Pegeln mit Stichtagsmessungen angewandt, für die über mindestens 10 Jahre monatliche Messergebnisse vorliegen (vgl. Abschnitt 4.6). Die Ergebnisse der Berechnungen für die Stichtagsmessungen sind exemplarisch in Anlage 6 grafisch dargestellt.

1. Beurteilung der gemessenen Wassertemperaturen auf anthropogenen Einfluss

Zur Auswertung kommen lediglich Messstellen, für die keine anthropogene Beeinflussung festgestellt werden konnte. Beeinflusste Messstellen sind im Rahmen der Vorauswahl von der weiteren Auswertung ausgeschlossen worden (vgl. Abschnitt 4.1). Verbleibende anthropogene Einflüsse führen u. a. zu Veränderungen der längerfristigen Entwicklung der Wassertemperatur von der Lufttemperatur (vgl. Abschnitt 4.4). Deshalb wurden zunächst die Veränderungen beider Größen in Form der vollständigen Zeitreihen der Jahresmittelwerte grafisch dargestellt und ggf. Zeiträume bestimmt, die zur weiteren Auswertung verwendet werden können bzw. ausgeschlossen werden müssen. Diese Prüfung wurde bei allen auszuwertenden Pegeln durchgeführt. Zusätzlich wurden zur Beurteilung die Monatsmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur herangezogen. Im Beispiel des Pegels Strehla ist eine konsistente Entwicklung der Wasser- und Lufttemperatur mit leicht ansteigendem Trend festzustellen, ohne dass die Abweichungen zwischen Luft- und Wassertemperatur sich abrupt oder wesentlich verändern (vgl. Abbildung 28).

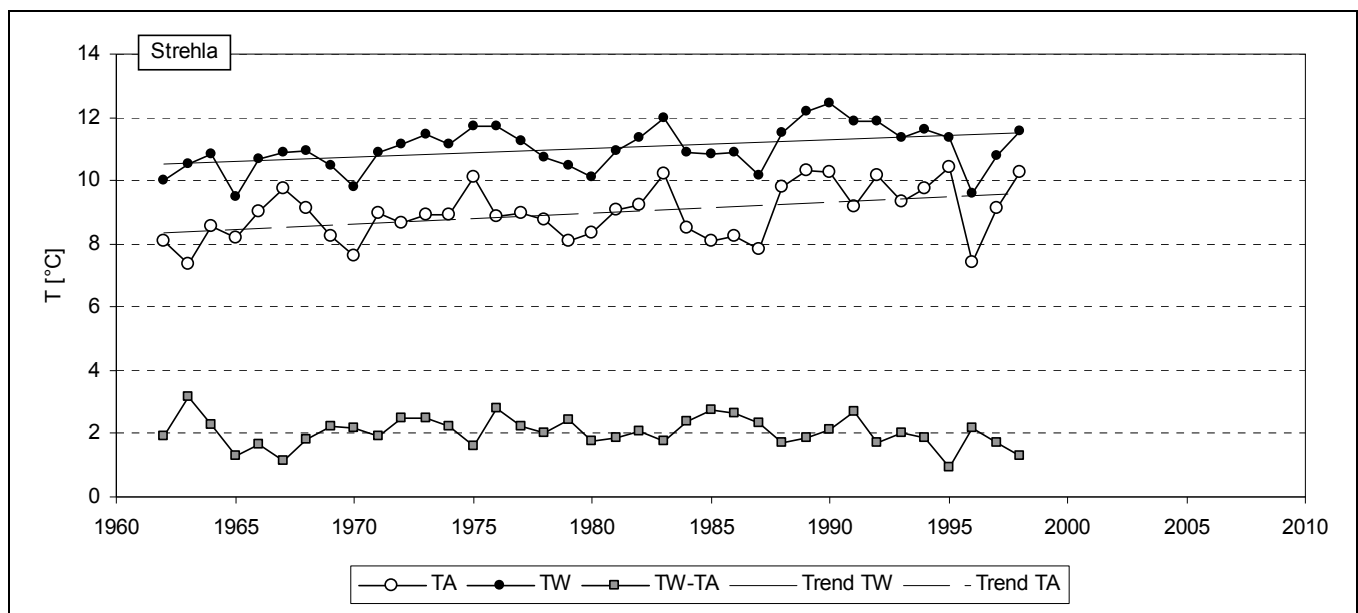


Abbildung 28: Jahresmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur, Pegel Strehla

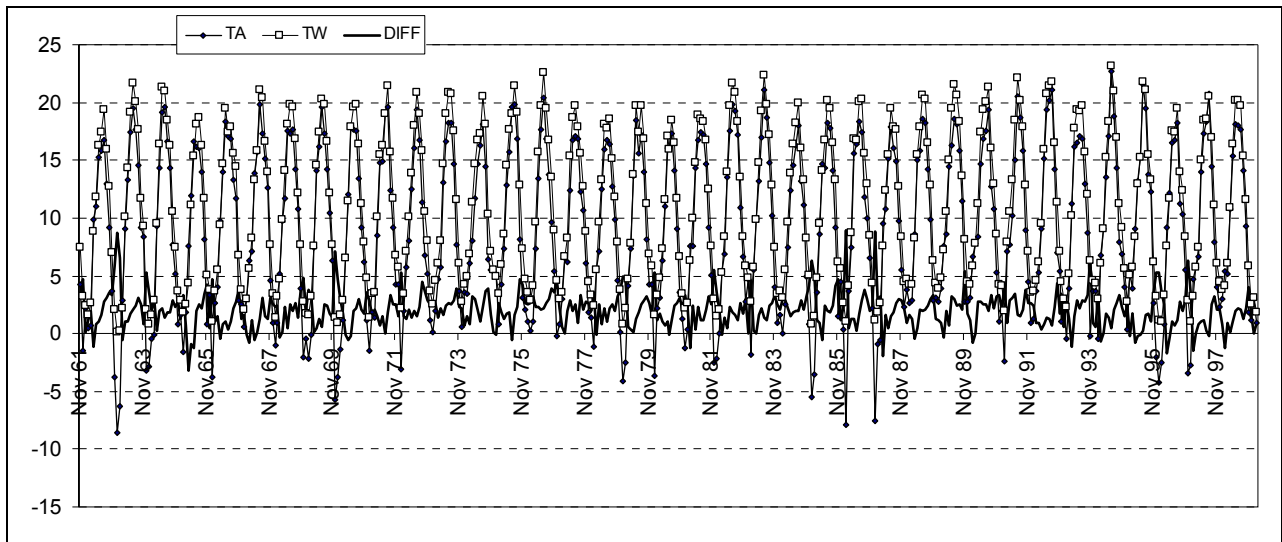


Abbildung 29: Monatsmittelwerte der Wasser- und Lufttemperatur, Pegel Strehla

Die zeitliche Entwicklung am Pegel Strehla lässt vermuten, dass keine wesentlichen Veränderungen der anthropogenen Beeinflussung stattgefunden haben, sodass die Daten des gesamten Zeitraums zur Regressionsanalyse herangezogen werden können. In anderen Fällen wurden offensichtlich anthropogen beeinflusste Daten, die oftmals anhand der höheren Wassertemperaturen im Zeitraum vor Mitte der 1990er-Jahre erkennbar sind, von der Regressionsanalyse ausgeschlossen.

2. Lineare Regressionsanalyse zur optimalen Verwendung der Einflussgröße

Die Bestimmtheitsgrade der linearen Regressionsgleichung zwischen Einflussgröße und Zielgröße wurden verwendet, um eine geeignete Einflussgröße auszuwählen. Als Einflussgrößen stehen unterschiedliche gleitende Mittelwerte der Lufttemperaturen zur Verfügung, die im Rahmen der Vorstudie berechnet wurden (LfULG 2009). Die gleitenden Mittelwerte berücksichtigen jeweils unterschiedlich lange vorangegangene Zeiträume bis zum Stichtag und zwei Arten der Wichtung der Lufttemperatur in diesen vorangegangenen Zeiträumen. Es standen folgende Daten als Einfluss- und Zielgröße zur Regressionsanalyse zur Verfügung (Tabelle 11):

Tabelle 11: Einfluss- und Zielgrößen für die lineare und nichtlineare Regressionsanalyse

Einflussgröße	Zielgröße
TA (Lufttemperatur am Messtag) TS007, TS015, TS030, TS060, TS090, TS180, TS365 TL007, TL015, TL030, TL060, TL090, TL180, TL365 Mittel TS007+TL007, Mittel TS015+TL015, Mittel TS030+TL030, Mittel TS060+TL060, Mittel TS090+TL090, Mittel TS180+TL180, Mittel TS365+TL365	TW (Wassertemperatur am Messtag)
mit TS gleitender Mittelwert der letzten 7, 15, 30... Tage mit reziprokem Wichtungsfaktor für die Tageswerte TL gleitender Mittelwert der letzten 7, 15, 30... Tage mit linearem Wichtungsfaktor für die Tageswerte	

Die gleitenden Mittelwerte wurden für jeden Stichtag der Wassertemperaturmessungen berechnet. Sie berücksichtigen den Zeitraum der vorangegangenen n Tage einschließlich des Stichtages mit n = 7, 15, 30, 60, 90, 180 bzw. 365. Der Stichtag selbst erhält einen Wichtungsfaktor von Eins, der Tag n erhält den kleinsten Wichtungsfaktor. Die „linearen“ Wichtungsfaktoren wurden für die dazwischen liegenden Werte linear von Eins bis Null interpoliert. Die „reziproken“ Wichtungsfaktoren gehen ausgehend vom Stichtag überproportional zurück:

- Messtag (Tag i) Wichtungsfaktor = 1/1
- Vortag (Tag i-1) Wichtungsfaktor = 1/2
- Tag i-2 Wichtungsfaktor = 1/3
- Tag i-3 Wichtungsfaktor = 1/4
- ...
- Tag n Wichtungsfaktor = 1/(n+1)

Für den Pegel Strehla wurden die in Tabelle 12 enthaltenen Bestimmtheitsmaße und Parameter für den linearen Zusammenhang zwischen Luft- und Fließgewässertemperatur ermittelt. Es wurden lediglich die Wertepaare mit positiver Lufttemperatur zur linearen Regressionsanalyse ausgewertet, weil der Zusammenhang im negativen Bereich deutlich nichtlinear verläuft.

Tabelle 12: Bestimmtheitsmaße und Parameter der linearen Regressionsanalyse von Luft und Wassertemperatur, Pegel Strehla (alle Datenpaare mit TA > 0)

Einflussgröße	R ²	Steigung m	Achsenabschnitt n
TA	0.8059	0.8777	2.7476
TS007	0.9174	0.9540	2.0619
TS015	0.9477	0.9754	1.9186
TS030	0.9617	0.9898	1.8492
TS060	0.9561	1.0090	1.7430
TS090	0.9342	1.0317	1.5900
TS180	0.8645	1.1607	0.5221
TS365	0.9072	1.4211	-1.9069
TL007	0.9213	0.9482	2.1526
TL015	0.9495	0.9594	2.1689
TL030	0.9446	0.9532	2.3783
TL060	0.8835	0.9321	2.7529
TL090	0.7765	0.8952	3.2615
TL180	0.3547	0.7092	5.4773
TL365	0.0169	0.3395	9.2030
Mittel TS007 TL007	0.9195	0.9532	2.0796
Mittel TS015 TL015	0.9513	0.9735	1.9645
Mittel TS030 TL030	0.9621	0.9842	1.9551
Mittel TS060 TL060	0.9434	0.9955	1.9524
Mittel TS090 TL090	0.8997	1.0067	1.9387
Mittel TS180 TL180	0.7331	1.0959	1.3645
Mittel TS365 TL365	0.7729	1.6953	-4.1583

Die stärkste Korrelation besteht im Fall des Pegels Strehla zwischen den gewichteten Mittelwerten der letzten 30 Tage (reziproke Wichtung, TS030) und der Wassertemperatur, bei linearer Wichtung zwischen dem Mittelwert der letzten 15 Tage (TL015) und der Wassertemperatur. Werden die gewichteten Mittelwerte TS030 und TL030 zusammengeführt zu einem gewichteten Gesamtmittelwert der letzten 30 Tage (Mittel TS030 TL030), erreicht das Bestimmtheitsmaß einen noch höheren Wert. Das heißt, wird die Lufttemperatur auf diese Weise statistisch ausgewertet und als Einflussgröße verwendet, stimmt die

mit der resultierenden Regressionsfunktion berechnete Wassertemperatur am besten mit den gemessenen Werten überein und die verbleibende Streuung der Wertepaare wird minimiert. Die Zusammenführung beider Mittelwerte wurde bei jedem Pegel zusätzlich optimiert mittels Wichtungsfaktoren, im Beispiel Pegel Strehla betragen diese:

Wichtungsfaktor für TS030 0.69
 Wichtungsfaktor für TL030 0.31

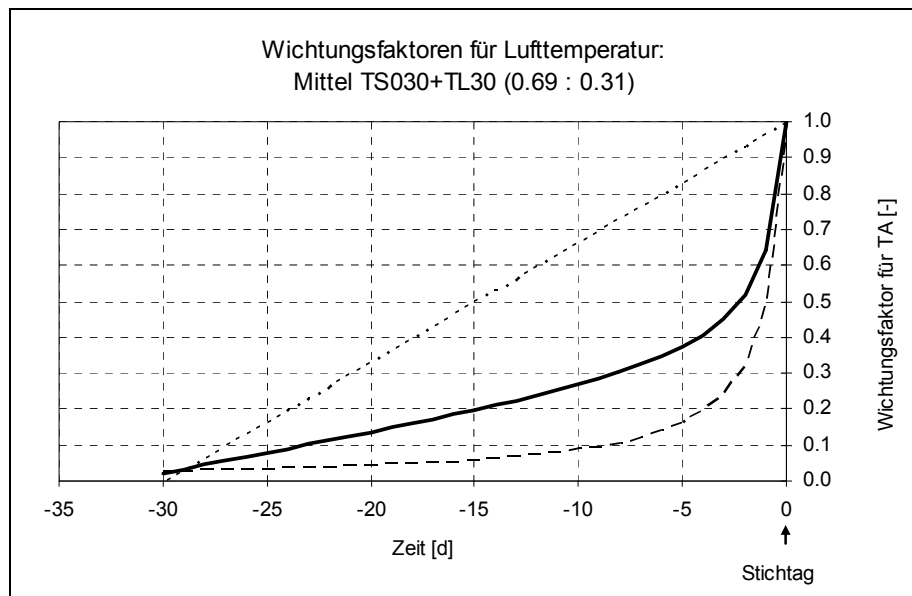
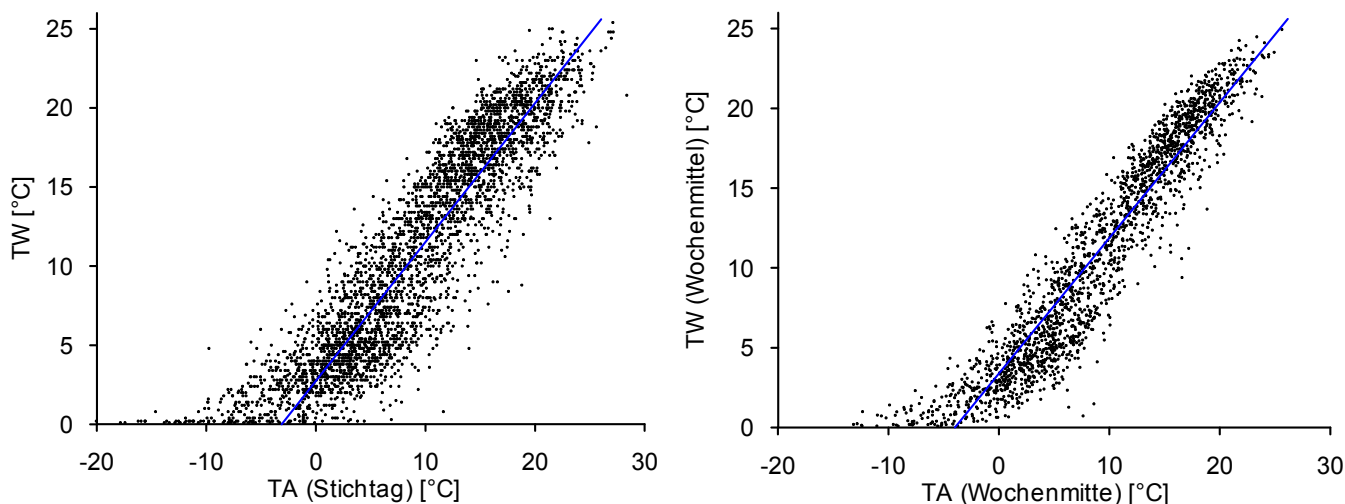


Abbildung 30: Wichtungsfaktoren für die Tageswerte bei Mittelung TS030 und TL030 mit Wichtung 0.69 : 0.31

Die Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse sind für alle Pegel mit täglichen Wassertemperaturdaten in Anlage 5 grafisch dargestellt. Die Daten des Pegels Strehla werden exemplarisch im vollständigen Umfang dargestellt, für die übrigen Pegel wurden lediglich die gleitenden Mittelwerte für die letzten 7, 15, 30 und 60 Tage herangezogen. Die grafischen Darstellungen der Ergebnisse der Stichtagsmessungen sind exemplarisch für wenige Messstellen in Anlage 6 enthalten.

Die folgende Abbildung verdeutlicht die Reduzierung der Streuung der Datenpunkte um die Regressionsgerade durch die gezielte Bildung von gleitenden Mittelwerten der Lufttemperatur als Einflussgröße. Die Verwendung gleitender Mittelwerte nur für die Einflussgröße führt zu deutlich geringeren Streuungen im Vergleich zur Verwendung von Wochenmittelwerten aus beiden Größen wie in MOHSENI et al. (1998) (vgl. Abbildung 31).



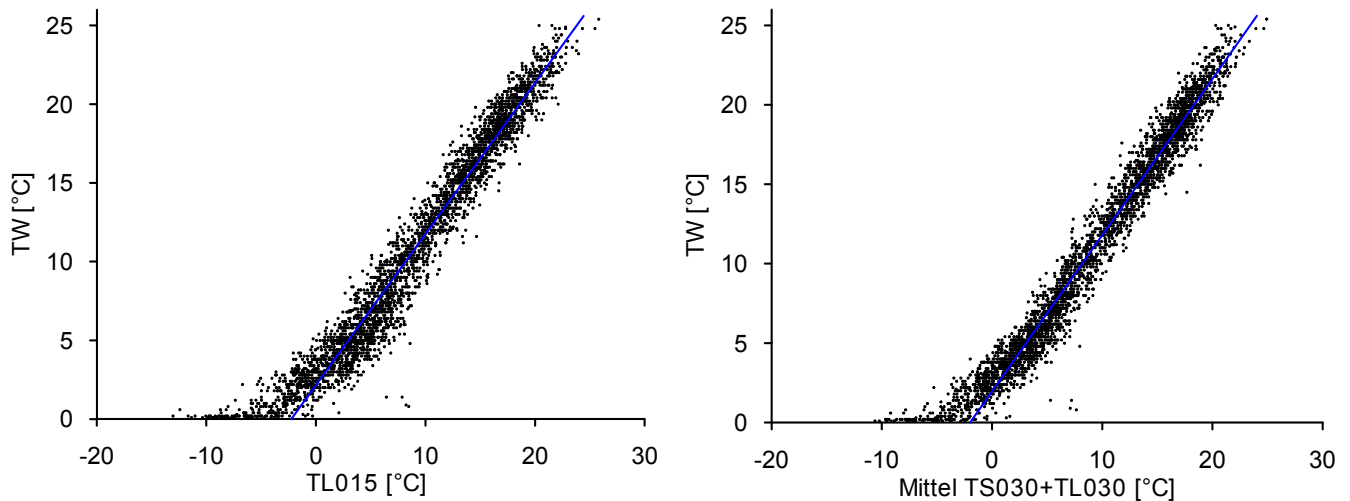


Abbildung 31: Optimierung der Einflussgröße mittels Reduzierung der Streuung um die lineare Regressionsgerade (dargestellt für TA > 0 °C). Stichtag = Tageswerte, Wochenmittel = Wochenmittelwerte der Luft- und Wassertemperatur

Die Uhrzeit der Messung der Wassertemperatur wurde nicht explizit ausgewertet, weil kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Uhrzeit und der gemessenen Wassertemperatur gefunden werden konnte (vgl. Abschnitt 4.6).

3. Nichtlineare Regressionsanalyse

Zur nichtlinearen Regressionsanalyse wurde die in MOHSENI et al. (1998) verwendete logistische Regressionsgleichung verwendet (vgl. Abschnitt 5.2). Bezüglich der unteren Grenze der Wassertemperatur wurde von der Vorgehensweise in MOHSENI et al. abgewichen, wo der Parameter μ die untere Grenze der Wassertemperatur auf mindestens 0 °C begrenzt wurde und die Wassertemperatur damit bei geringen Lufttemperaturen asymptotisch gegen Null verläuft. Die Abweichung wurde aus zwei Gründen vorgenommen. An nicht wenigen Messstellen wurden regelmäßig negative Wassertemperaturen gemessen, was auf das Zufrieren des Sensors deutet. Bei der gemessenen Temperatur handelt es sich eher um eine Schätzung der Temperatur der flüssigen und festen Wassermasse im Fließgewässer. Weiterhin zeigte sich, dass unter Verwendung eines Parameters $\mu < 0$ °C regelmäßig eine bessere Güte der Anpassung der Regressionsbeziehung auch für den Bereich mit positiven Lufttemperaturen gelingt. Allerdings wurde die Wassertemperatur der Regressionsgleichung auf 0 °C begrenzt:

$$T_w = \max \left[\mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + \exp(\gamma \cdot (\beta - T_L))}; 0 \right]$$

mit T_w Wassertemperatur
 T_L Lufttemperatur
 $\alpha, \mu, \gamma, \beta$ Parameter

Die Bestimmung der oberen Grenze der Wassertemperatur nach der Gleichung

$$\alpha \sim T_{\max} = T_{\text{mean}} + s \cdot K$$

erfolgte in Anlehnung an MOHSENI et al. (2002) und BOGAN et al. (2005). Diese Autoren verwendeten für alle Pegel einen konstanten hypothetischen Wert K_E (enveloping standard deviate) zur Berechnung von α . Der Parameter K_E wurde bestimmt, indem die Parameter K für alle verfügbaren Messstellen ermittelt wurden und ein Wert für K_E festgelegt wurde, der entweder dem größten K entspricht oder als Maximum für K auf der Grundlage der gesamten Datenbasis abgeschätzt wurde:

MOHSENI et al. (2002), 141 Messstellen: $K_E = 4.88$
 BOGAN et al. (2005), 720 Messstellen: $K_E = 7... (8)$

Der Parameter K_E liegt demnach bei 7... (8) auf der Grundlage der weit umfangreicheren Datenbasis von BOGAN et al. (2005).

Weil beide Studien auf der Auswertung von Wochenmittelwerten beruhen, musste zunächst geprüft werden, ob diese Parameter auch auf die Streuung der Wertepaare aus gleitenden Mittelwerten der Lufttemperatur und Tageswerten der Wassertemperatur angewandt werden können. Hierzu wurden für alle Pegel, bei denen aus Tagesreihen der Wassertemperatur Wochenmittelwerte gebildet werden, die Parameter K sowohl für die Wochenmittelwerte berechnet als auch für die optimierten gleitenden Mittelwerte und Stichtags-Wassertemperaturen nach der oben dargestellten Vorgehensweise. Im Ergebnis sind alle Parameter K bei der Verwendung gleitender Mittelwerte größer als bei der Verwendung von Wochenmittelwerten (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Parameter K der logistischen Regressionsgleichung (standard deviate)

Pegel	Gleitende Mittelwerte T_L + Stichtagswert T_W	Wochenmittelwerte T_L und T_W
Bad Dübén 1	2.67	2.33
Bautzen Weite Bleiche	2.83	2.26
Bautzen UP 1	1.98	1.94
Böhlen 1	2.16	1.96
Dresden	3.44	2.82
Erlin	3.43	3.10
Görlitz	3.68	2.76
Golzern 1	2.99	2.17
Gröditz	4.60	3.79
Jänkendorf	3.86	3.40
Kleindalzig	3.82	2.94
Leipzig-Großschochern	2.62	2.29
Leipzig-Thekla	3.26	2.20
Lichtenwalde	4.00	2.37
Lieske	2.94	1.86
Mylau	3.59	3.17
Regis-Serbitz	3.94	3.17
Rosenthal	3.40	2.11
Särichen	3.71	3.26
Schirgiswalde	4.03	3.21
Strehla	3.28	3.08
Zittau 1	3.01	2.81
Zwickau-Pölbitz	2.95	2.34
Mittelwert	3.31	2.67

Anhand des mittleren Verhältnisses der Parameter K der sächsischen Pegel und der Empfehlung von BOGAN et al. (2005) wird für alle Anpassungen der logistischen Regressionsgleichung ein Parameter K_E von $8 \cdot 3.31/2.67 \approx 10$ verwendet. Der Parameter α der Regressionsgleichung ist somit bekannt:

$$\alpha = T_{\max} + s \cdot K_E$$

mit K_E enveloping standard deviate, $K_E = 10$
 s Standardabweichung der 4 % höchsten Wassertemperaturen am Pegel
 T_{\max} Maximum der Wassertemperatur am Pegel

Zur Anpassung der Regressionsbeziehung wurden die verbleibenden Parameter μ , γ und β iterativ angepasst, bis die quadratischen Abweichungen ein Minimum erreichten.

Für den Pegel Strehla konnte mit der Auswahl einer optimalen Einflussgröße die Streuung der Punktwolke soweit reduziert werden, dass für die lineare Regressionsgleichung ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.6921$ resultiert (vgl. Abbildung 32 und Anlage 7). Der Zusammenhang ist in einem sehr weiten Bereich der Einflussgröße zwischen ca. $>2\text{ °C}$ und $<20\text{ °C}$ linear. Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt 0.9842, d. h. die Veränderung der Lufttemperatur im linearen Bereich des Zusammenhanges bewirkt eine nahezu gleichgroße Veränderung der Wassertemperatur.

Die logistische nichtlineare Regressionsgleichung bildet am Pegel Strehla insbesondere den Bereich $<2\text{ °C}$ der Einflussgröße sehr gut wieder im Unterschied zur linearen Regressionsgleichung. Bei Temperaturen $>20\text{ °C}$ resultiert aufgrund der Annahmen zur maximalen Wassertemperatur nach BOGAN et al. (2005) aus der logistischen Regressionsfunktion ein zunehmend nichtlinearer Bereich, der beim Pegel Strehla allerdings anhand der Messwerte nicht gefunden werden kann. Auch bei den meisten anderen Pegeln bzw. Messstellen scheint der Zusammenhang im Bereich $>20\text{ °C}$ eher linear zu verlaufen mit derselben Steigung wie im Bereich $<20\text{ °C}$ (vgl. Anlagen 5 und 6).

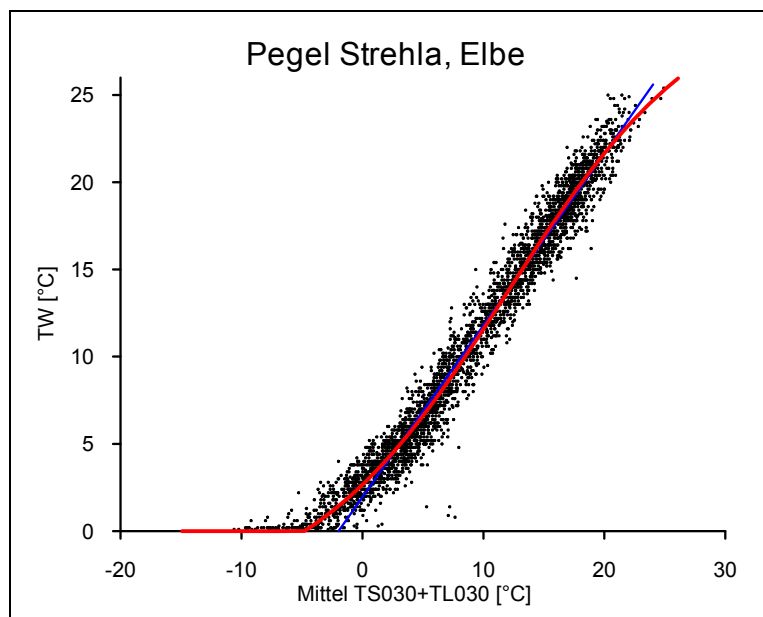


Abbildung 32: Lineare (blau) und nichtlineare (rot) Regressionsberechnung, Pegel Strehla

Der quadratische Mittelwert der Abweichungen RMSE (root mean square error) der angepassten logistischen Regressionsgleichung beträgt 1.2306. Er wurde wie folgt berechnet (BOGAN et al. 2005):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{i,obs} - T_{i,pre})^2}$$

mit	RMSE	mittlere quadratische Abweichung
	N	Anzahl an Wertepaaren
	$T_{i,obs}$	gemessene Wassertemperatur [°C]
	$T_{i,pre}$	berechnete Wassertemperatur [°C]

In MORILL et al. (2005) wurden mittlere quadratische Abweichungen RMSE zwischen 1.47 und 3.02, im Mittel bei 2.20, erreicht. Für den Pegel Strehla ist damit eine sehr gute Nachbildung der Wassertemperatur mittels nichtlinearer Regression gelungen. Der Effektivitätskoeffizient nach Nash-Sutcliffe wurde wie in MORILL et al. (2005) wie folgt berechnet:

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_{pre,i} - T_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^N (T_{obs,i} - \bar{T}_{obs})^2}$$

mit NSC Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (MORILL et al. 2005)

Für den Pegel Strehla wurde ein sehr hoher Effektivitätskoeffizient von 0.9727 berechnet (vgl. Anlage 7). Dieser Wert ist höher als die in MORILL et al. Erreichten Werte von maximal 0.93.

4. Anwendung der nichtlinearen Regressionsgleichung

Die nichtlineare Regressionsgleichung wurde verwendet, um die Wassertemperatur für alle betrachteten 24 Pegel mit Tagesreihen und 92 Messstellen mit Stichtagsmessungen unter Anwendung der nichtlinearen Regressionsgleichung aus der Lufttemperatur zu berechnen. Die Parameter der Regressionsgleichung wurden für alle Pegel angepasst, bis die Summe der quadratischen Abweichungen ein Minimum erreicht. Die Berechnung erfolgte sowohl anhand der Tagesreihen der Lufttemperatur für den Zeitraum 1961 bis 2008 (Ist-Zustand) als auch anhand der projizierten Tagesreihen des Prognosezeitraumes 2041 bis 2060. Die Datenreihen des Prognosezeitraumes entsprechen denen des Zeitraums 1961 bis 2008, allerdings wurden der Lufttemperatur im Ist-Zustand die prognostizierten Veränderungen anhand der Klimaprojektion aufgeprägt (vgl. Abschnitt 3). Deshalb können bereits anhand der Tagesreihen die Veränderungen der Wassertemperatur dargestellt werden (Abbildung 33).

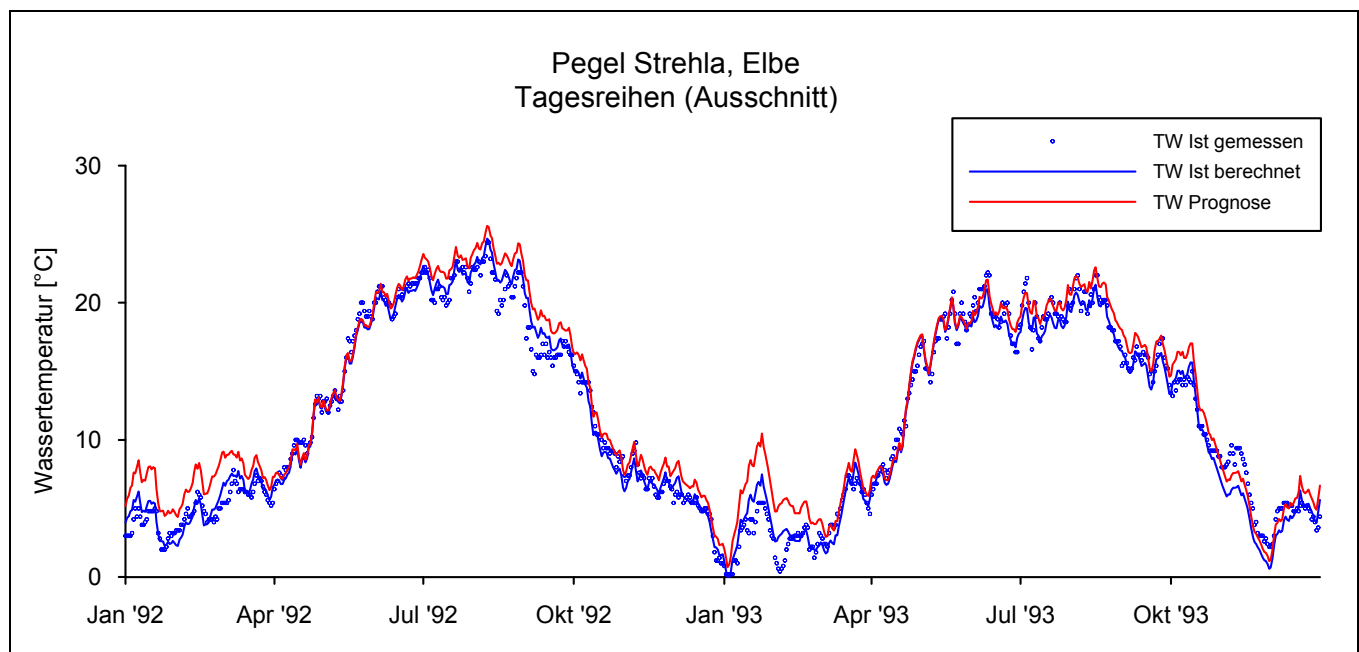


Abbildung 33: Gemessene und anhand der nichtlinearen Regressionsgleichung berechnete Wassertemperatur, Pegel Strehla, Elbe

Die Abbildung 33 zeigt, dass das einfache statistische Modell des nichtlinearen Zusammenhanges zwischen Luft- und Wassertemperatur in der Lage ist, die gemessenen Daten sehr gut nachzubilden. Im Beispiel des Pegels Strehla weichen 95 % der berechneten Wassertemperaturen weniger als 2 K von den gemessenen Werten ab.

Die Veränderungen der Wassertemperatur aufgrund des Klimawandels ausgehend vom derzeitigen Zustand (Kontrollzeitraum Ist-Zustand 1971-2000, vgl. Abschnitt 3.3) bis zum Prognosezeitraum 2041-2060 sind in Anlage 7 dokumentiert. Es resultiert für alle Pegel bzw. Messstellen ein ähnliches Bild. Im Fall des Pegels Strehla ist im Winter von einer Erhöhung der mittleren Lufttemperatur von +2.33 K auszugehen. Die Wassertemperatur erhöht sich nur um +1.64 K aufgrund der nichtlinearen Zusammenhänge im Bereich tiefer Temperaturen. Im Frühjahr ist die geringste mittlere Erwärmung sowohl der Luft als auch der Fließgewässer zu erwarten. Im Sommer und Herbst erhöht sich die Lufttemperatur nach WEREX IV um +1.33 K bzw. +1.21 K und die Wassertemperatur annähernd um dieselben Beträge von +1.10 K bzw. +1.25 K.

Die höchsten Wassertemperaturen wurden in Form der Daten ausgewertet, die das 95%-Perzentil übersteigen. Hier ist im Mittel von einer Temperaturerhöhung um +1.07 K auszugehen, d. h. ausgehend von einer mittleren Höchsttemperatur von derzeit 22.25 °C auf eine mittlere Höchsttemperatur von 23.32 °C im Zeitraum 2041-2060 (vgl. Anlage 7).

7 Ergebnisse

Die linearen und nichtlinearen Regressionsfunktionen sind für alle Pegel mit täglichen Messwerten der Wassertemperatur in Anlage 5 und exemplarisch für die Messstellen mit Stichtagsmessungen in Anlage 6 grafisch dargestellt. Rot hervorgehoben ist jeweils die nichtlineare Regressionsfunktion der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur, die zur Prognose der Veränderungen aufgrund des Klimawandels herangezogen wurde. Die Ergebnisse der Prognose sind in Anlage 7 für die Pegel mit täglichen Messungen und in Anlage 8 für die Pegel mit Stichtagsmessungen der Wassertemperatur.

7.1 Elbe

Die ausgewerteten Messstellen in der Elbe sind in Abbildung 34 dargestellt.

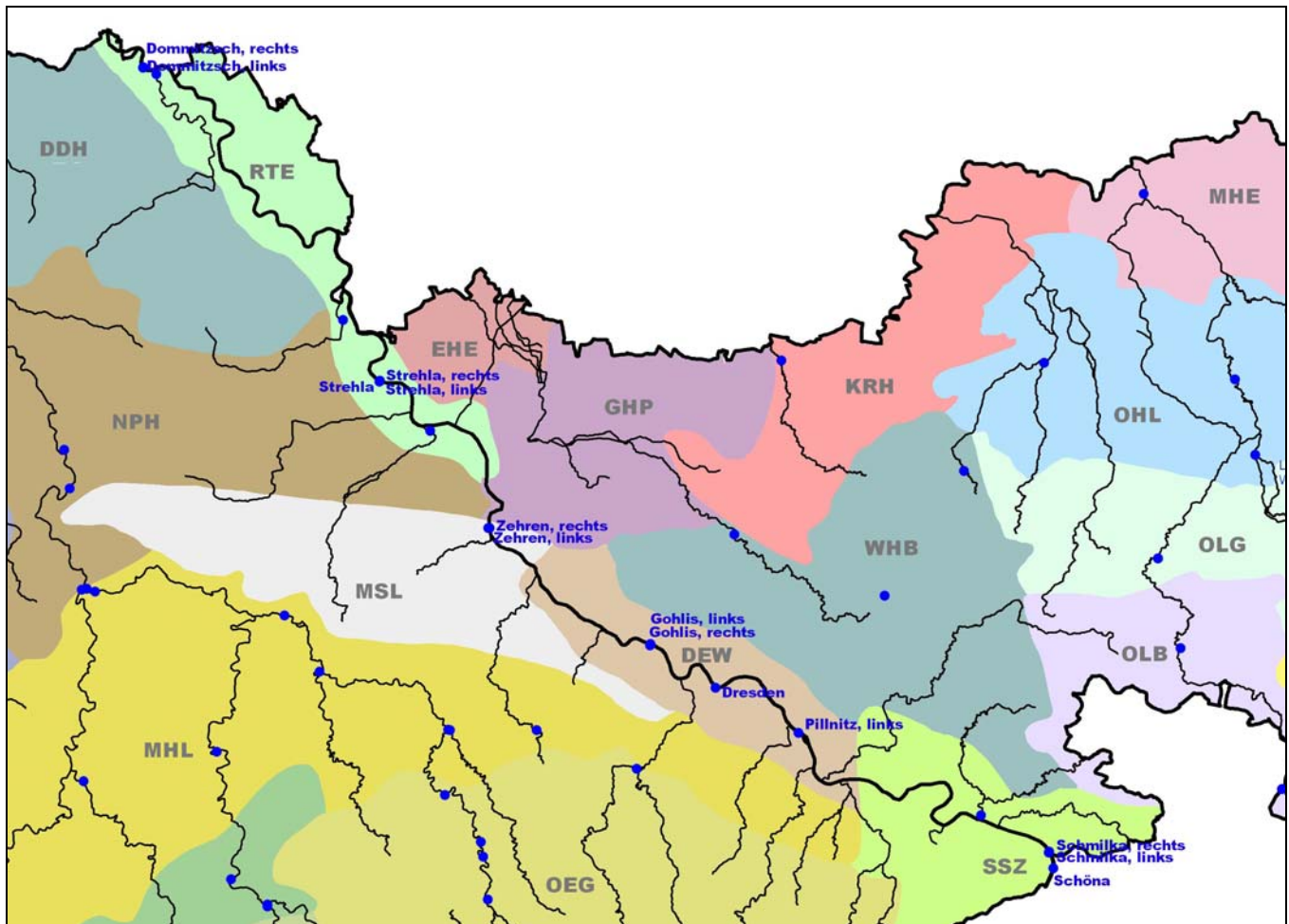


Abbildung 34: Ausgewertete Messstellen, Elbe

Die mittlere Wassertemperatur in der Elbe ändert sich über den Fließweg auf sächsischer Landesfläche nicht signifikant. Sie liegt mit ca. 11.0 °C etwa 1.1 K höher als die Lufttemperatur (Tabelle 14).

Eine Änderung der Lufttemperatur um 1.0 K im linearen Bereich der Abhängigkeit führt zu einer Änderung der Wassertemperatur um ebenfalls 1.0 K. Der nichtlineare Zusammenhang zwischen beiden Größen ist sehr stark. Die Temperaturerhöhung aufgrund des Klimawandels ist im Winter am größten und beträgt im Zeitraum Dezember bis Februar im Mittel +1.51 K. Im Frühjahr ist die Erhöhung mit +0.45 K am geringsten. Die mittlere Temperaturerhöhung im Sommer und Herbst beträgt etwa +1.22 K. Dies gilt auch für die jährlichen Maximal der Wassertemperatur.

Tabelle 14: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Elbe

Pegel/Messstelle	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Elbe											
Schöna	8.2	11.0	SSZ1	1.00	1.8556	0.9568	+1.37	+0.60	+0.90	+1.21	+0.87
Schmilka, links	8.2	11.0	SSZ1	1.00	1.2747	0.9714	+1.48	+0.43	+1.24	+1.18	+1.26
Schmilka, rechts	8.2	10.9	SSZ1	0.98	1.3320	0.9696	+1.36	+0.38	+1.23	+1.15	+1.20
Pillnitz, links	8.9	10.8	DEW	1.00	1.6856	0.9630	+1.55	+0.46	+1.26	+1.23	+1.36
Dresden	8.9	11.0	DEW	0.96	1.1599	0.9732	+1.53	+0.46	+1.09	+1.21	+1.07
Gohlis, links	8.9	10.9	DEW	0.99	1.7904	0.9599	+1.55	+0.45	+1.25	+1.22	+1.34
Gohlis, rechts	8.9	11.2	DEW	0.96	2.1659	0.9520	+1.51	+0.37	+1.27	+1.17	+1.29
Zehren, links	8.9	10.9	MSL1	1.00	1.2928	0.9700	+1.42	+0.42	+1.31	+1.23	+1.34
Zehren, rechts	8.9	10.9	MSL1	1.01	1.4432	0.9670	+1.50	+0.44	+1.32	+1.25	+1.36
Strehla	9.3	11.2	RTE2	0.98	1.2306	0.9727	+1.64	+0.49	+1.10	+1.25	+1.07
Strehla, links	9.3	11.0	RTE2	1.03	1.3946	0.9701	+1.61	+0.47	+1.26	+1.28	+1.29
Strehla, rechts	9.3	11.1	RTE2	1.03	1.4612	0.9683	+1.60	+0.46	+1.27	+1.28	+1.28
Dommitzsch, links	9.4	11.0	RTE1	1.03	1.6535	0.9633	+1.48	+0.45	+1.20	+1.30	+1.09
Dommitzsch, rechts	9.4	11.0	RTE1	1.04	1.2522	0.9719	+1.53	+0.46	+1.22	+1.31	+1.13
Mittelwert	8.9	11.0		1.00	1.4994	0.9664	+1.51	+0.45	+1.21	+1.23	+1.21

mit ØTA Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 ØTW Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)
 Logist.: RMSE quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
 Logist.: NSC Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
 ΔT Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)
fett Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur

7.2 Südliche Elbzuflüsse (Polenz, Sebnitz, Gottleuba, Müglitz, Weißeritz, Triebisch)

Die Einzugsgebiete der Fließgewässer Polenz, Sebnitz, Gottleuba, Müglitz, Weißeritz und Triebisch erstrecken sich über die Sächsische Schweiz und von den höchsten Lagen des Osterzgebirges (OEG3) bis ins Elbtal (Abbildung 35). Bei allen Messstellen handelt es sich um solche mit Stichtagsmessungen der Wassertemperatur. Die mittlere Wassertemperatur liegt bei allen Messstellen nur unwesentlich über der mittleren Lufttemperatur.

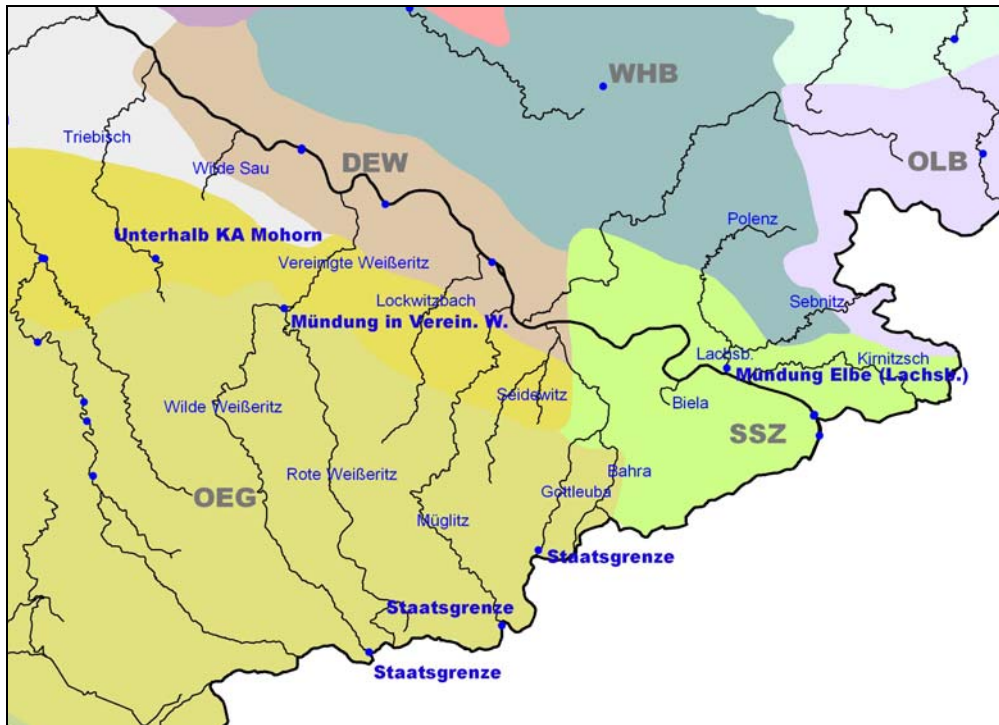


Abbildung 35: Ausgewertete Messstellen, südliche Elbzuflüsse

Trotz der etwas geringeren Güte der Anpassung der Regressionsfunktionen im Vergleich zu Pegeln mit täglichen Messungen kann festgestellt werden, dass die Steigung der linearen Regressionsfunktion zwischen 0.66 und 0.78 liegt. In der Wilden Weißeritz nimmt die Steigung mit zunehmender Fließlänge, zunehmender Einzugsgebietsgröße und abnehmender Geländehöhe von 0.67 an der Staatsgrenze bis 0.78 an der Mündung zu.

Die Zunahme der Wassertemperatur im Winter ist bei den Messstellen in den oberen Höhenlagen mit kleinem Einzugsgebiet am geringsten (+0.93...+0.98 K) und in den unteren Höhenlagen am größten (+1.05...+0.21 K). Die höchsten Wassertemperaturen nehmen im Vergleich zu den mittleren Temperaturen im Sommer in gleichem Maße zu.

Tabelle 15: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Polenz, Sebnitz, Gottleuba, Müglitz, Weißeritz, Triebisch

Pegel/Messstelle	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Polenz, Sebnitz											
Mündung Elbe (Lachsb.)	8.6	8.7	SSZ3	0.72	0.9427	0.9615	+1.21	+0.27	+0.82	+0.84	+0.74
Gottleuba											
Staatsgrenze	6.8	7.1	OEG2	0.66	1.3486	0.9423	+1.04	+0.30	+0.80	+0.78	+0.74
Müglitz											
Staatsgrenze	6.0	6.6	OEG3	0.74	2.3156	0.9117	+0.98	+0.28	+1.00	+0.79	+1.01
Wilde Weißeritz											
Staatsgrenze	6.0	6.3	OEG3	0.67	1.1983	0.9455	+0.93	+0.21	+1.02	+0.71	+1.06
Mündung in Verein. W.	7.7	8.3	OEG1	0.78	2.0000	0.9317	+1.05	+0.25	+1.18	+0.88	+1.25
Triebisch											
Unterhalb KA Mohorn	8.3	8.5	MLH4	0.72	0.9878	0.9610	+1.14	+0.32	+0.95	+0.89	+0.98
Mittelwert	7.2	7.6		0.72	1.4655	0.9423	+1.06	+0.27	+0.96	+0.82	+0.96

mit ØTA Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 ØTW Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)
 Logist.: RMSE quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
 Logist.: NSC Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
 ΔT Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst,
 >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)
fett Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur

7.3 Nördliche Elbzuflüsse

Die Messstellen in der Jahna, Dahle und im Schwarzen Graben liegen im Riesa-Torgauer Elbtal. Die Einzugsgebiete liegen westlich der Elbe im sächsischen Hügel- und Tiefland und erstrecken sich bis zur Wasserscheide der Mulde.

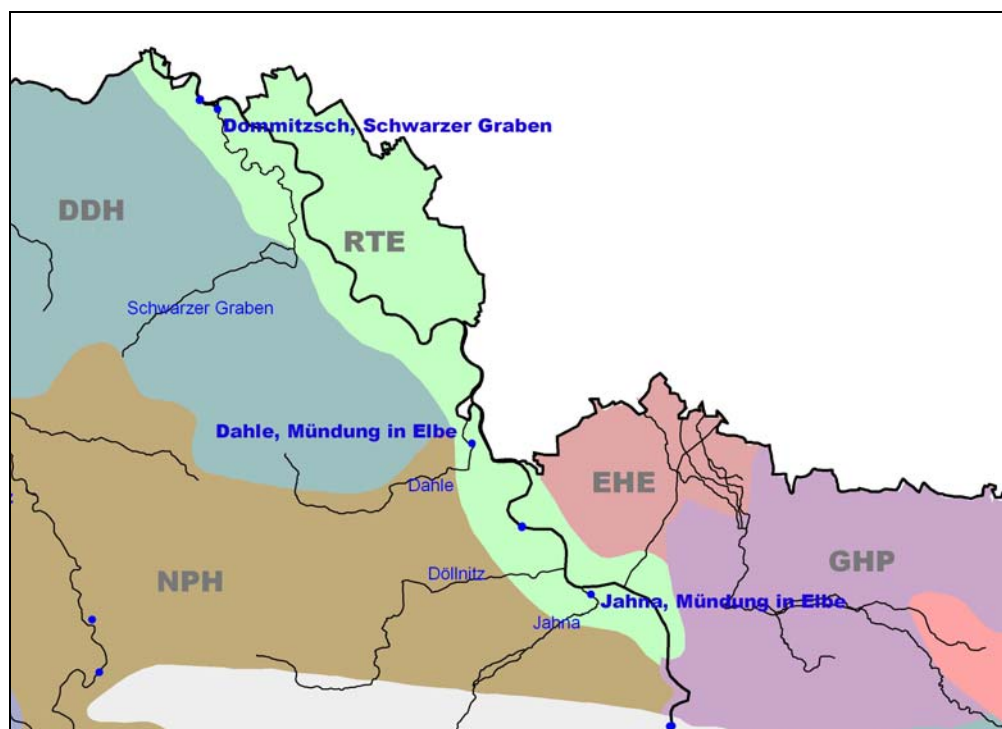


Abbildung 36: Ausgewertete Messstellen, nördliche Elbzuflüsse

Die mittlere Wassertemperatur liegt ≤ 0.5 K über der Lufttemperatur. Die Steigung der linearen Regressionsgleichung liegt bei ca. 0.8, beim Schwarzen Graben bei 0.9. Bei den Wintertemperaturen ist von der größten Erhöhung von bis zu +1.62 K bis 2050 auszugehen. Die Maximaltemperaturen im Sommer steigen weniger stark an im Vergleich zu den mittleren Wassertemperaturen im Sommer.

Tabelle 16: Ergebnisse der Regressionsanalyse: nördliche Elbzuflüsse

Pegel/Messstelle	$\bar{\varnothing} T_A$ [°C]	$\bar{\varnothing} T_W$ [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Jahna, Mündung in Elbe	9.3	9.7	RTE2	0.81	1.1911	0.9657	+1.47	+0.30	+0.94	+0.99	+0.81
Dahle, Mündung in Elbe	9.3	9.6	RTE2	0.79	1.5085	0.9571	+1.35	+0.32	+1.06	+0.99	+1.04
Dommitzsch, Schwarzer Graben	9.4	9.9	RTE1	0.91	1.3497	0.9641	+1.62	+0.37	+0.87	+1.13	+0.59
Mittelwert	9.3	9.7		0.84	1.3498	0.9623	+1.48	+0.33	+0.96	+1.04	+0.81

mit $\bar{\varnothing} T_A$ Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 $\bar{\varnothing} T_W$ Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit $T_A > 0^\circ\text{C}$)
 Logist.: RMSE quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
 Logist.: NSC Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
 ΔT Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)

7.4 Lausitzer Neiße und Mandau

Das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße erstreckt sich auf sächsischem Gebiet vom Zittauer Gebirge und Oberlausitzer Bergland über die östliche Oberlausitz und das Oberlausitzer Heide- und Teichgebiet bis in die Muskauer Heide an der Grenze zu Brandenburg (Abbildung 37).

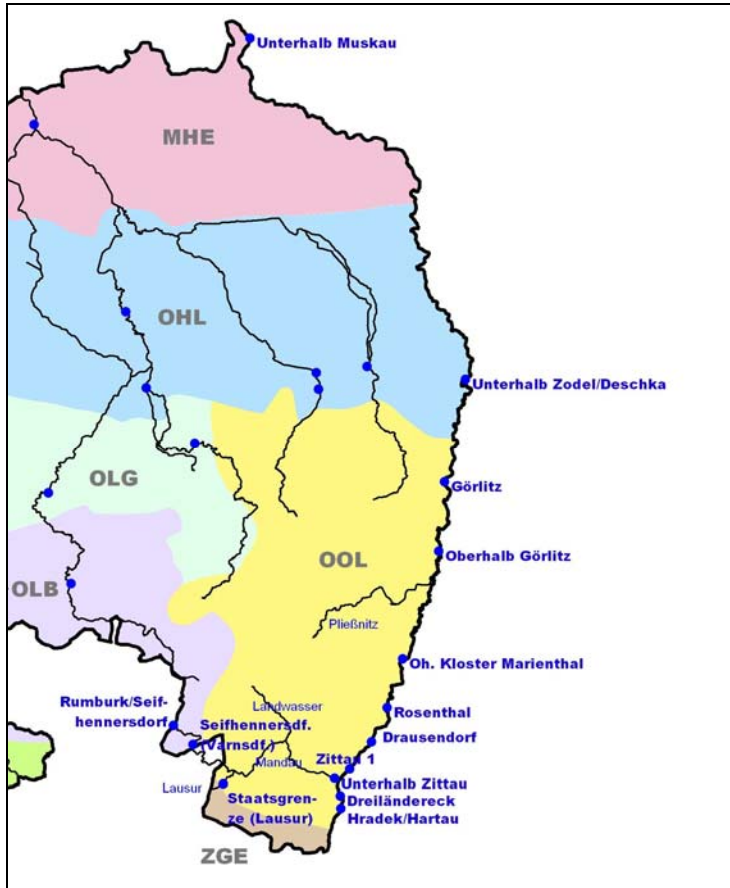


Abbildung 37: Ausgewertete Messstellen, Lausitzer Neiße und Mandau

Der Zufluss Mandau an der Grenze zur Tschechischen Republik weist bei vergleichsweise hohen Höhenlagen und geringerer mittlerer Lufttemperatur eine relativ hohe Wassertemperatur auf, die bis zu 1.4 K über der mittleren Lufttemperatur liegt. Auch die Steigung der Regressionsgeraden ist hier höher als in der oberen Lausitzer Neiße bei Hartau/Dreiländereck. Die Lausitzer Neiße selbst zeigt mit zunehmendem Fließweg eine deutliche Zunahme der mittleren Wassertemperatur, was hauptsächlich auf die Veränderungen der klimatischen Bedingungen zurückzuführen ist. Die Steigung der Regressionsgeraden nimmt von ca. 0.75 auf ca. 0.9 zu. Die prognostizierte Erwärmung des Fließgewässers findet im Norden deutlicher statt als im Süden. Es sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Steigerung der mittleren Wassertemperatur im Sommer und der Temperaturmaxima festzustellen.

Tabelle 17: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Lausitzer Neiße und Mandau

Pegel	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Mandau, Lausur											
Rumburk/Seifhennersdf.	7.8	9.1	OLB	0.87	1.2191	0.9687	+1.23	+0.23	+1.24	+0.93	+1.15
Seifhennersdf./Varnsd.	7.8	9.2	OLB	0.92	1.0925	0.9748	+1.30	+0.25	+1.20	+0.99	+1.00
Staatsgrenze (Lausur)	7.8	9.0	OOL2	0.84	1.2252	0.9661	+1.22	+0.25	+1.12	+0.91	+1.07
Unterhalb Zittau	8.3	8.9	OOL1	0.85	1.1161	0.9706	+1.31	+0.25	+0.98	+0.94	+0.75
Mittelwert	7.9	9.1		0.87	1.1632	0.9700	+1.26	+0.24	+1.14	+0.94	+0.99
Lausitzer Neiße											
Hradek/Hartau	8.3	8.6	OOL1	0.75	0.8694	0.9673	+1.22	+0.31	+0.86	+0.85	+0.81
Dreiländereck	8.3	8.5	OOL1	0.74	0.8031	0.9705	+1.15	+0.28	+1.00	+0.85	+1.04
Zittau 1	8.3	9.3	OOL1	0.84	2.1006	0.9395	+1.37	+0.34	+1.06	+0.95	+1.08
Drausendorf	8.3	8.8	OOL1	0.80	0.9259	0.9701	+1.19	+0.30	+1.08	+0.92	+1.11
Rosenthal	8.3	8.9	OOL1	0.83	1.4802	0.9572	+1.37	+0.34	+1.02	+0.93	+1.03
Oh. Kloster Marienthal	8.3	9.4	OOL1	0.86	1.0675	0.9690	+1.25	+0.32	+1.13	+0.97	+1.14
Oberhalb Görlitz	8.3	9.8	OOL1	0.89	0.8575	0.9759	+1.32	+0.27	+1.18	+0.98	+1.12
Görlitz	8.3	9.7	OOL1	0.81	2.1777	0.9352	+1.44	+0.34	+1.00	+0.91	+1.04
Unterhalb Zodel/Deschka	8.7	10.0	OHL	0.88	1.3266	0.9631	+1.38	+0.36	+1.08	+1.03	+1.05
Unterhalb Muskau	9.0	10.4	MHE	0.92	1.3154	0.9637	+1.50	+0.31	+1.21	+1.03	+1.18
Mittelwert OOL1	8.3	9.1	OOL1	0.82	1.2852	0.9606	+1.29	+0.31	+1.04	+0.92	+1.05
Mittelwert OHL, MHE	8.8	10.2		0.90	1.3210	0.9634	+1.44	+0.34	+1.14	+1.03	+1.12

mit ØTA Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 ØTW Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)
 Logist.: RMSE quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
 Logist.: NSC Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
 ΔT Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst,
 >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)
fett Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur

7.5 Spree (Kleine Spree, Löbauer Wasser, Schwarzer Schöps, Weißer Schöps)

Das Einzugsgebiet der Spree umfasst weite Teile der Oberlausitz (Abbildung 38). Die mittlere Wassertemperatur in den Messstellen der Spree, Kleinen Spree, dem Löbauer Wasser, dem Schwarzen und Weißen Schöps ist mit 8.9 °C nur unwesentlich höher als die mittlere Lufttemperatur mit 8.7 °C.

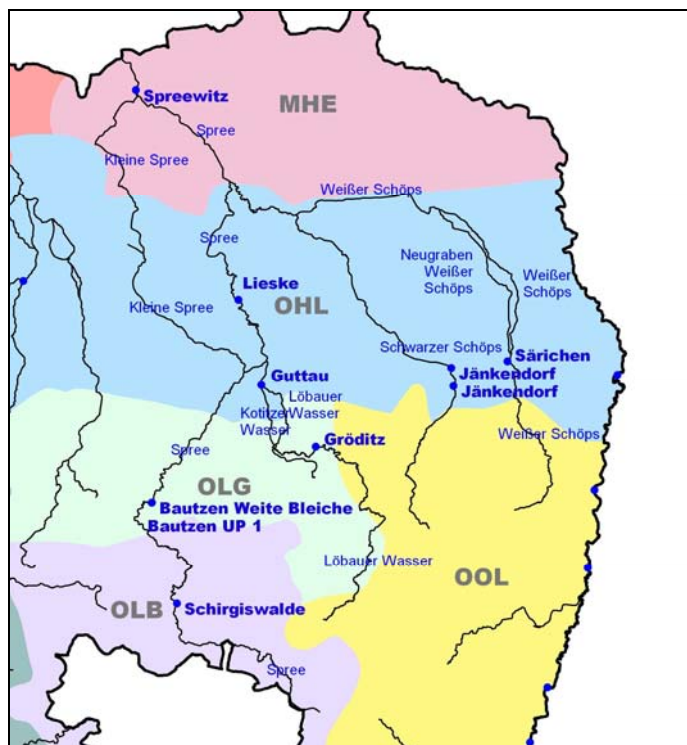


Abbildung 38: Ausgewertete Messstellen, EZG Spree

Die Steigung der Regressionsgeraden liegt mit Ausnahme des Pegels in der Kleinen Spree ähnlich wie bei Neiße und Mandau zwischen etwa 0.80 und 0.90. Die Temperatursteigerungen bis 2050 sind im Winter am größten. Die Steigerung der maximalen Wassertemperaturen liegt unwesentlich unter der Steigerung der mittleren Temperaturen im Sommer.

Tabelle 18: Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Spree

Pegel	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Löbauer Wasser											
Gröditz	8.7	9.0	OLG1	0.88	2.1502	0.9425	+1.39	+0.32	+1.08	+1.02	+1.00
Guttau	8.9	9.3	OHL	0.85	0.6401	0.9818	+1.41	+0.31	+0.94	+0.98	+0.77
Spree											
Schirgiswalde	7.8	8.2	OLB	0.85	1.3951	0.9593	+1.15	+0.26	+1.20	+0.95	+1.14
Bautzen Weite Bleiche	8.4	8.8	OLG2	0.83	0.8907	0.9737	+1.29	+0.29	+1.03	+0.95	+0.94
Bautzen UP 1	8.4	9.5	OLG2	0.91	1.6419	0.9572	+1.29	+0.42	+1.01	+1.11	+0.95
Lieske	8.9	8.9	OHL	0.90	1.5814	0.9577	+1.33	+0.30	+1.09	+1.04	+0.94
Spreewitz (Kleine Spree)	9.0	9.4	MHE	0.73	2.4776	0.9091	+1.34	+0.27	+0.89	+0.85	+0.80
Schwarzer Schöps											
Jänkendorf	8.9	8.2	OHL	0.80	1.2151	0.9611	+1.25	+0.33	+0.96	+0.95	+0.91
Jänkendorf	8.9	9.1	OHL	0.87	1.1229	0.9699	+1.29	+0.28	+1.20	+0.98	+1.19
Weißer Schöps											
Särichen	8.9	8.5	OHL	0.88	1.1623	0.9683	+1.34	+0.30	+1.10	+1.01	+1.03
Mittelwert	8.7	8.9		0.85	1.4277	0.9581	+1.31	+0.31	+1.05	+0.98	+0.97

mit ØT_A Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 ØT_W Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit T_A > 0°C)
 Logist.: RMSE quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
 Logist.: NSC Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
 □T Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)
fett Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur

7.6 Schwarze Elster mit Zuflüssen (Hoyerswerdaer Schwarzwasser, Klosterwasser), Große Röder, Pulsnitz

Die Einzugsgebiete der Schwarzen Elster, Pulsnitz und Großen Röder mit ihren Zuflüssen umfassen im Wesentlichen das Westlausitzer Hügel- und Bergland und die Gebiete der Königsbrück-Ruhländer Heiden und der Großenhainer Pflege (Abbildung 39).

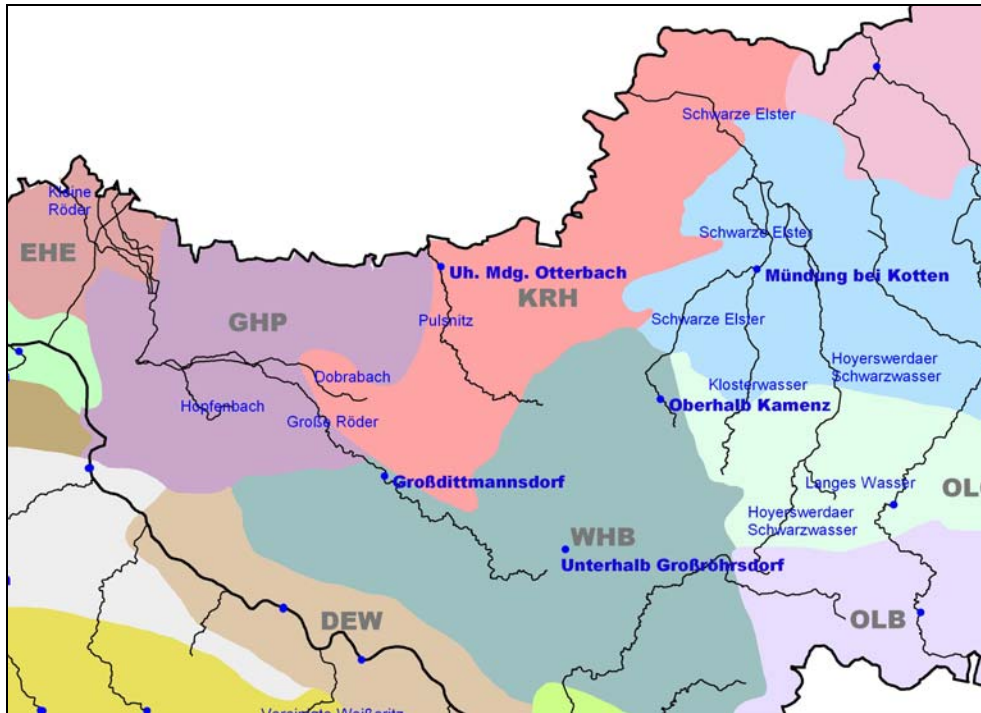


Abbildung 39: Ausgewertete Messstellen, Schwarze Elster, Große Röder, Pulsnitz

Die mittleren Temperaturverhältnisse ähneln denen im Einzugsgebiet der Spree. Allerdings ist die Steigung der Regressionsgeraden im Mittel mit 0.77 vergleichsweise gering, d. h. eine Änderung der Lufttemperatur ist mit einer geringeren Änderung der Wassertemperatur verbunden als dies im EZG der Spree der Fall ist. Die geringe Steigerung der Wassertemperatur im Sommer bis zum Prognosezeitraum ist relativ gering, auch die Maximaltemperaturen ändern sich vergleichsweise wenig.

Tabelle 19: Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Schwarze Elster, Pulsnitz, Große Röder

Pegel	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Schwarze Elster											
Oberhalb Kamenz	8.4	8.7	WHB2	0.72	0.9103	0.9649	+1.29	+0.34	+0.75	+0.86	+0.67
Klosterwasser											
Mündung bei Kotten	8.9	9.4	OHL	0.89	0.8994	0.9760	+1.34	+0.27	+0.80	+0.99	+0.47
Große Röder											
Unterhalb Großröhrsdorf	8.4	8.7	WHB2	0.70	0.9876	0.9615	+1.14	+0.25	+0.87	+0.81	+0.79
Großdittmannsdorf	8.9	9.5	WHB1	0.76	0.8277	0.9730	+1.32	+0.30	+0.96	+0.92	+0.91
Pulsnitz											
Uh. Mdg. Otterbach	9.0	9.1	KRH	0.78	1.2176	0.9581	+1.42	+0.32	+0.77	+0.93	+0.60
Mittelwert	8.7	9.1		0.77	0.9685	0.9667	+1.30	+0.30	+0.83	+0.90	+0.69

mit ØTA Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 ØTW Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)
 Logist.: RMSE quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
 Logist.: NSC Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
 □T Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)
fett Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur

7.7 Freiburger Mulde

Die ausgewerteten Messstellen in der Freiburger Mulde, Bobritzsch und Großen Striegis sind in Abbildung 40 dargestellt.

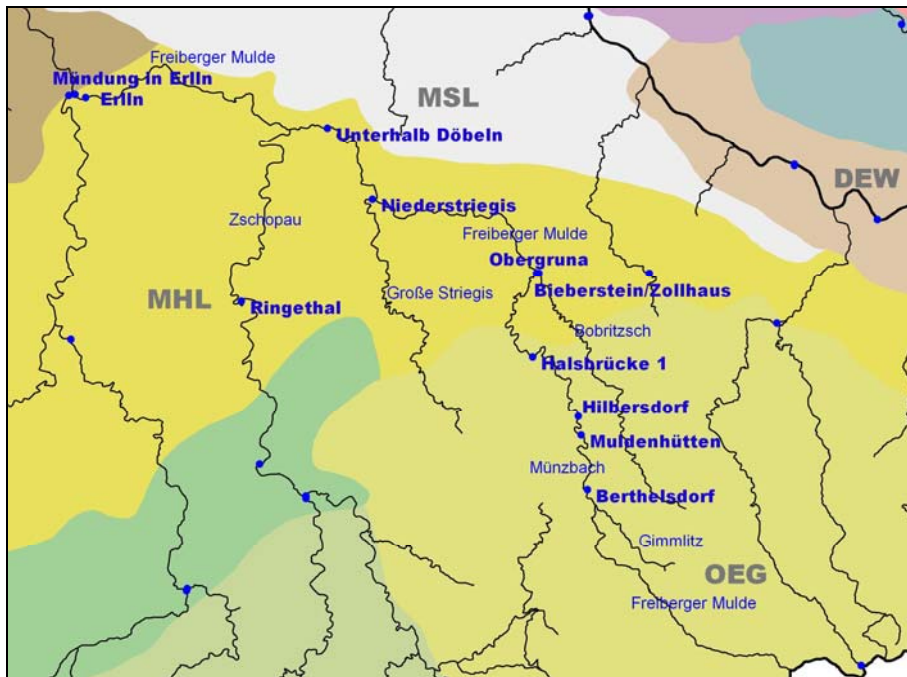


Abbildung 40: Ausgewertete Messstellen, Freiburger Mulde

In der Freiburger Mulde steigt die Wassertemperatur mit zunehmendem Fließweg deutlich an. Die Steigung der Regressionsgeraden zwischen Luft- und Wassertemperatur ist in den höheren Lagen des Erzgebirges deutlich kleiner als im Hügelland. In den höheren Lagen beträgt sie 0.68 (Pegel Berthelsdorf), während sie im Hügelland mit abnehmender Entfernung zur Mündung den Wert 1.00 erreicht. In den höheren Lagen des Mittelgebirges bewirkt eine Veränderung der Lufttemperatur eine geringere Änderung der Wassertemperatur als im Tiefland.

Die genannten Unterschiede bei den Veränderungen der Wassertemperatur werden anhand der berechneten Mittelwerte deutlich. Es wurde eine Veränderung der mittleren Wassertemperatur von +1.11 K am Pegel Berthelsdorf berechnet, bei den Pegeln an der Mündung beträgt diese Veränderung dagegen im Mittel +1.44 K. Die Unterschiede werden in allen Jahreszeiten deutlich. Die Steigerung der maximalen Wassertemperaturen liegt in einem ähnlichen Bereich wie die der Sommertemperaturen.

Die Temperaturverhältnisse in den beiden Messstellen der Bobritzsch und Großen Striegis ähneln denen in der Freiburger Mulde in vergleichbarer Höhenlage.

Tabelle 20: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Freiburger Mulde

Pegel	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Freiberger Mulde											
Berthelsdorf	7.7	7.8	OEG1	0.68	1.1539	0.9518	+1.11	+0.31	+0.87	+0.83	+0.85
Muldenhütten	7.7	8.4	OEG1	0.75	1.2256	0.9560	+1.14	+0.32	+1.03	+0.91	+1.06
Hilbersdorf	7.7	8.6	OEG1	0.76	1.2163	0.9592	+1.18	+0.33	+1.07	+0.93	+1.13
Halsbrücke 1	7.7	8.7	OEG1	0.78	1.1408	0.9614	+1.20	+0.28	+1.10	+0.90	+1.12
Obergruna	8.3	9.3	MLH4	0.87	0.9741	0.9713	+1.32	+0.31	+1.25	+1.02	+1.32
Unterhalb Döbeln	8.9	10.1	MLH1	0.99	1.6620	0.9659	+1.44	+0.34	+1.36	+1.20	+1.28
Erlin	8.9	9.2	MLH1	1.07	2.1610	0.9607	+1.40	+0.40	+1.43	+1.32	+1.45
Mündung in Erlin	8.9	10.4	MLH1	1.00	1.8150	0.9615	+1.49	+0.39	+1.22	+1.26	+1.07
Bobritzsch											
Bieberstein/Zollhaus	8.3	8.5	MLH4	0.77	1.0972	0.9626	+1.17	+0.28	+1.04	+0.91	+1.02
Große Striegis											
Niederstriegis	8.4	9.0	MLH2	0.88	1.1543	0.9692	+1.35	+0.34	+1.12	+1.06	+1.08
Mittelwert OEG1	7.7	8.4	OEG1	0.74	1.1842	0.9571	+1.16	+0.31	+1.02	+0.89	+1.04
Mittelwert MLH2...4	8.3	8.9	MLH2-4	0.84	1.0752	0.9677	+1.28	+0.31	+1.14	+1.00	+1.14
Mittelwert MLH1	8.9	9.9	MLH1	1.02	1.8793	0.9627	+1.44	+0.38	+1.34	+1.26	+1.27
mit	ØTA	Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000									
	ØTW	Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000									
	Lin. Reg.: Steig.	Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)									
	Logist.: RMSE	quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)									
	Logist.: NSC	Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe									
	ΔT	Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)									
fett	Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur										

7.8 EZG Zschopau

Das Einzugsgebiet der Zschopau erstreckt sich bis in die höchsten Kammlagen des Erzgebirges (Abbildung 41). Die Zschopau mündet westlich von Döbeln in die Freiburger Mulde. Aufgrund der Höhenunterschiede reicht die mittlere Wassertemperatur an den ausgewerteten Messstellen von 6.6 °C bis 9.7 °C.

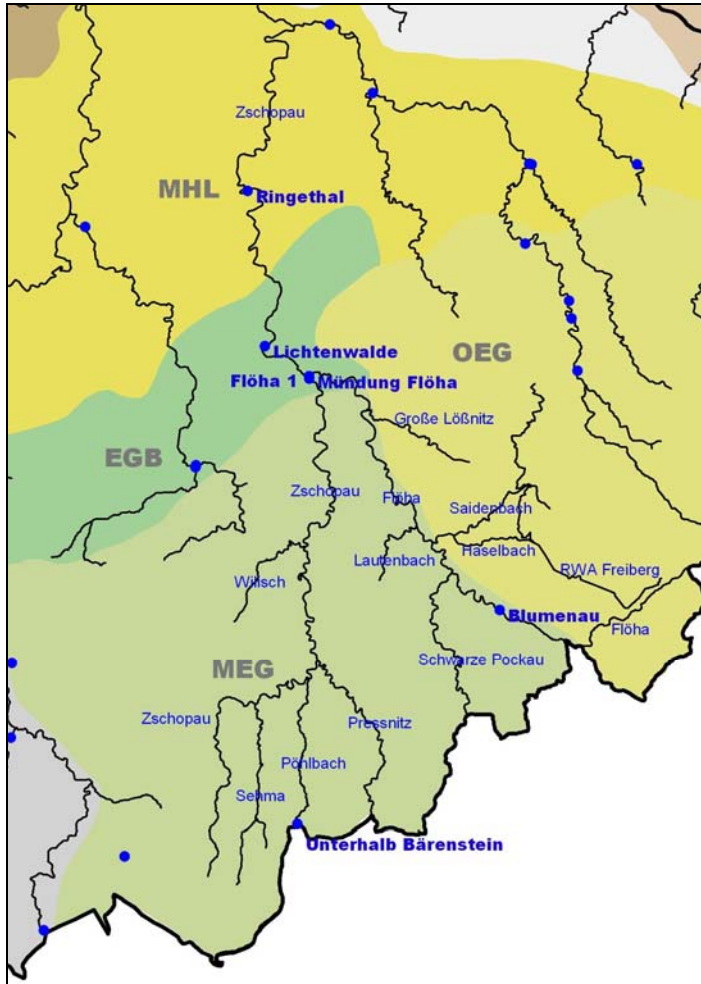


Abbildung 41: Ausgewertete Messstellen: Zschopau

Auch anhand der ausgewerteten Messstellen im Einzugsgebiet der Zschopau kann gezeigt werden, dass die Steigung der Regressionsgeraden der Wassertemperatur in Abhängigkeit von der Lufttemperatur in den höheren Lagen des Erzgebirges bei kleineren Einzugsgebieten und kürzerem Fließweg deutlich kleiner ist als 1.0 und mit zunehmendem Fließweg im Erzgebirgsvorland dem Wert 1.0 entgegengeht. An der Messstelle im Pöhlbach, die sich etwa 15 km vom Quellgebiet am Fichtelberg entfernt befindet, beträgt die Steigung 0.58, während sie im Unterlauf am Pegel Lichtenwalde den Wert von 0.90 und am Pegel Ringenthal den Wert von 0.96 erreicht. Damit steigt insgesamt auch die Veränderung der Wassertemperatur aufgrund des Klimawandels, was sowohl in allen Jahreszeiten der Fall ist als auch bei den Maximalwerten.

Tabelle 21: Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Zschopau

Pegel	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Pöhlbach											
Unterhalb Bärenstein	5.9	6.6	MEG4	0.58	0.6528	0.9577	+0.89	+0.21	+0.74	+0.63	+0.65
Flöha											
Blumenau	7.6	7.3	MEG1	0.73	1.0556	0.9601	+1.03	+0.31	+0.99	+0.90	+1.02
Mündung Flöha	8.3	8.8	EGB2	0.88	1.2528	0.9676	+1.25	+0.29	+1.17	+1.03	+1.09
Zschopau											
Flöha 1	8.3	8.9	EGB2	0.83	1.8928	0.9492	+1.25	+0.28	+1.07	+0.98	+0.96
Lichtenwalde	8.3	8.3	EGB2	0.90	1.3991	0.9611	+1.25	+0.34	+1.16	+1.10	+1.13
Ringethal	8.4	9.7	MLH2	0.96	2.2006	0.9507	+1.40	+0.36	+1.23	+1.15	+1.18
MEG4	5.9	6.6	MEG4	0.58	0.6528	0.9577	+0.89	+0.21	+0.74	+0.63	+0.65
MEG1	7.6	7.3	MEG1	0.73	1.0556	0.9601	+1.03	+0.31	+0.99	+0.90	+1.02
Mittelwert EGB2	8.3	8.7	EGB2	0.87	1.5149	0.9593	+1.25	+0.30	+1.13	+1.04	+1.06
MLH2	8.4	9.7	MLH2	0.96	2.2006	0.9507	+1.40	+0.36	+1.23	+1.15	+1.18
mit	ØTA	Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000									
	ØTW	Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000									
	Lin. Reg.: Steig.	Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)									
	Logist.: RMSE	quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)									
	Logist.: NSC	Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe									
	□T	Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)									
	fett	Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur									

7.9 Zwickauer Mulde

Die ausgewerteten Messstellen im Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde sind in Abbildung 42 dargestellt. Hier wurde auch die Messstelle OBF46900 bei Klingenthal ausgewertet, obwohl die Zwota im EZG der Eger liegt.

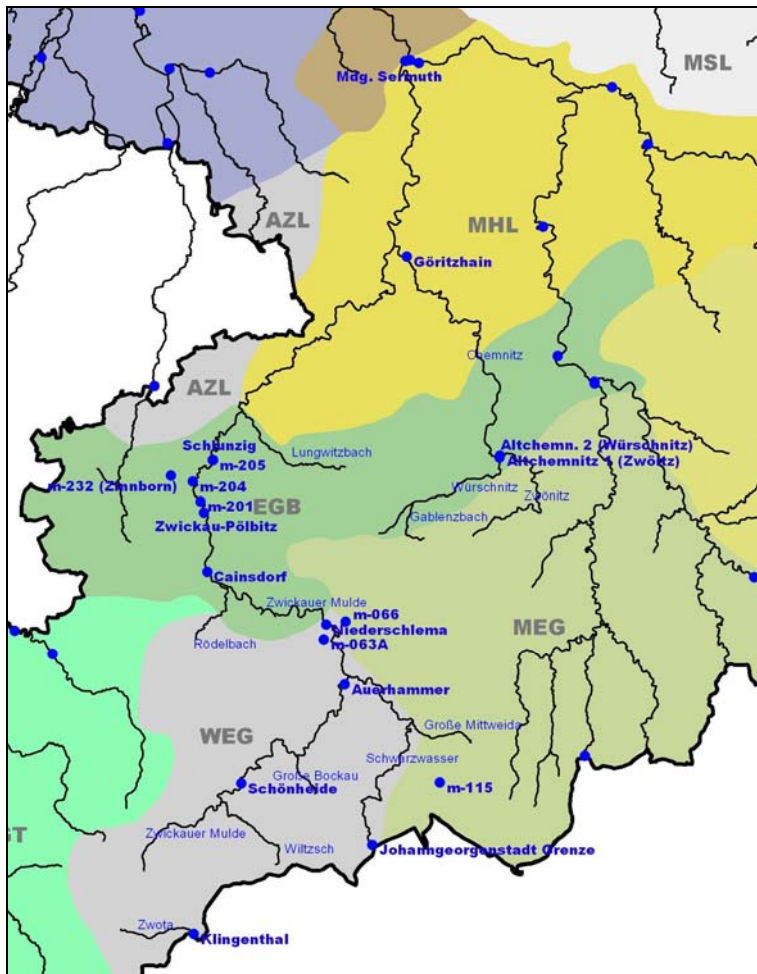


Abbildung 42: Ausgewertete Messstellen: EZG Zwickauer Mulde

Auch an der Zwickauer Mulde kann gezeigt werden, dass die Steigung der Regressionsgeraden des Zusammenhanges zwischen Luft- und Wassertemperatur in den höheren Lagen des Erzgebirges mit kleinen, bewaldeten Einzugsgebieten deutlich kleiner als 1.0 ist und die Steigung im Erzgebirgsvorland gegen 1.0 tendiert. Damit verbunden ist eine Zunahme der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur. Infolge des Klimawandels ist mit einer Zunahme der Wassertemperatur in allen Jahreszeiten und auch bei den sommerlichen Maximaltemperaturen auszugehen.

Für das Einzugsgebiet der Mulde liegen auch für das Schwarzwasser, den Luchsbach, Borbach, Kohlunbach, Oberrothenbacher Bach, Zinnbach und die Zwota (außerhalb EZG Mulde) Daten für kleine quellnahe Fließgewässer mit kleinen Einzugsgebieten vor (Datenquelle WISMUT GmbH und LfULG). In diesen Fließgewässern ist die Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur vergleichsweise gering, die Steigung der Regressionsgeraden liegt ausnahmslos unter 0.80. Dies gilt für die Fließgewässer im Erzgebirge (Schwarzwasser, Zwota, Luchsbach, Borbach, Kohlunbach) ebenso wie für die Fließgewässer im Erzgebirgsbecken (Oberrothenbacher Bach, Zinnbach). Die Messstelle im Zinnbach befindet sich in unmittelbarer Nähe des Quellbereiches. Daraus kann gefolgert werden, dass die Wassertemperaturen auch im Erzgebirgsbecken bei kleinen Einzugsgebieten noch so stark vom Grundwasser beeinflusst sind, dass die Bedeutung der klimatischen Bedingungen weniger groß ist im Vergleich zu den großen Fließgewässern. Dabei kann im Gebirgsvorland die mittlere Wassertemperatur kleiner sein als die mittlere Lufttemperatur.

Tabelle 22: Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Zwickauer Mulde

Pegel	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Zwickauer Mulde											
Schönheide	6.9	6.4	WEG2	0.70	1.3452	0.9356	+0.88	+0.28	+0.99	+0.85	+1.03
Auerhammer	7.6	6.8	WEG1	0.88	2.1515	0.8588	+0.94	+0.37	+0.58	+0.69	+0.62
Niederschlema	7.6	8.0	WEG1	0.68	1.2137	0.9440	+1.07	+0.42	+0.77	+0.87	+0.81
Cainsdorf	8.4	8.9	EGB4	0.78	1.4095	0.9528	+1.21	+0.37	+0.97	+1.01	+0.98
Zwickau-Pölbitz	8.4	8.6	EGB4	0.79	1.6565	0.9440	+1.24	+0.38	0.98	+1.01	+1.02
m-201	8.4	8.5	EGB4	0.77	1.3082	0.9496	+1.17	+0.36	+0.97	+0.99	+1.00
m-205	8.4	8.7	EGB4	0.78	1.5697	0.9434	+1.14	+0.36	+1.03	+1.00	+1.08
Schlunzig	8.4	9.3	EGB4	0.83	1.4702	0.9553	+1.34	+0.41	+0.98	+1.07	+0.99
Mdg. Sermuth	8.9	10.4	MLH1	0.99	1.5690	0.9664	+1.50	+0.38	+1.32	+1.21	+1.32
Chemnitz											
Altchemnitz 1 (Zwönitz)	8.0	8.4	EGB3	0.74	1.6813	0.9358	+1.14	+0.34	+0.93	+0.93	+0.94
Altchemn. 2 (Würschnitz)	8.0	8.7	EGB3	0.81	1.8000	0.9411	+1.12	+0.35	+1.15	+1.02	+1.24
Göritzhein (Chemnitz)	8.4	10.1	MLH2	0.89	1.5486	0.9591	+1.38	+0.30	+1.30	+1.05	+1.35
Mittelwert WEG	7.4	7.1	WEG	0.75	1.5701	0.9128	+0.96	+0.36	+0.78	+0.80	+0.82
Mittelwert EGB	8.3	8.7	EGB	0.79	1.5565	0.9460	+1.19	+0.37	+1.00	+1.00	+1.04
MLH	8.7	10.3	MLH	0.94	1.5588	0.9628	+1.44	+0.34	+1.31	+1.31	+1.34
Schwarzwasser											
Joh.-georgenst. Grenze	6.0	6.0	WEG3	0.71	1.3279	0.9266	+0.83	+0.27	+1.00	+0.81	+1.03
Luchsbach											
m-115	5.9	6.2	MEG4	0.53	1.1042	0.9169	+0.81	+0.30	+0.73	+0.64	+0.82
Borbach											
m-063A	7.6	8.4	WEG1	0.60	1.9845	0.8957	+1.02	+0.22	+0.81	+0.71	+0.82
Kohlungsbach											
m-066	6.9	7.7	MEG2	0.68	1.5806	0.9291	+1.04	+0.30	+0.93	+0.82	+0.96
Oberrothenbacher B.											
m-204	8.4	8.4	EGB4	0.74	1.9097	0.9227	+1.16	+0.46	+0.90	+0.98	+1.03
Zinnbach											
m-232 (Zinnborn)	8.4	7.8	EGB4	0.50	1.6222	0.8717	+0.89	+0.33	+0.58	+0.66	+0.66

Pegel	$\varnothing T_A$ [°C]	$\varnothing T_W$ [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
-------	---------------------------	---------------------------	------------------	-------------------------	------------------	-----------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------------

Zwota

Klingenthal	6.0	7.4	WEG3	0.60	0.8573	0.9422	+0.91	+0.27	+0.81	+0.69	+0.85
\varnothing kl. EZG im Ergeb.	6.5	7.1		0.62	1.3709	0.9221	+0.92	+0.27	+0.86	+0.73	+0.90
\varnothing kl. EZG im Vorland	8.4	8.1	EGB4	0.62	1.7670	0.8972	+1.02	+0.40	+0.74	+0.82	+0.84

mit	$\varnothing T_A$	Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
	$\varnothing T_W$	Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
	Lin. Reg.: Steig.	Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit $T_A > 0^\circ\text{C}$)
	Logist.: RMSE	quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
	Logist.: NSC	Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
	ΔT	Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)
	fett	Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur

7.10 EZG Vereinigte Mulde

Die ausgewerteten Messstellen im EZG der Vereinigten Mulde sind in Abbildung 43 dargestellt.

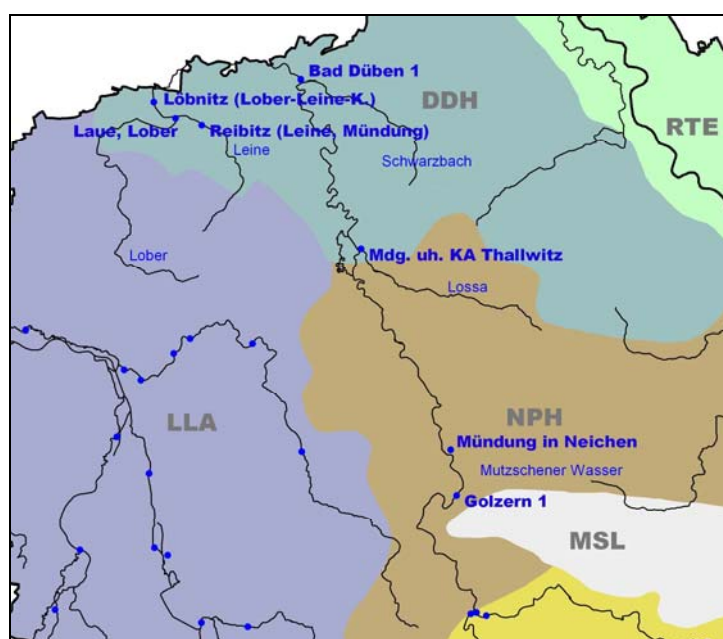


Abbildung 43: Ausgewertete Messstellen: EZG Vereinigte Mulde

Die beiden Pegel in der Vereinigten Mulde zeigen einen starken Zusammenhang zwischen Luft- und Wassertemperatur. Die Steigung der Regressionsgeraden liegt im Bereich von Eins. Die Veränderungen der Wassertemperatur aufgrund des Klimawandels sind im Vergleich zu anderen Fließgewässern relativ hoch. Dies gilt im ähnlichen Maße auch für die Lössa im Bereich ihrer Mündung, wengleich hier die Steigung der Regressionsgeraden bei 0.91 liegt. Das Mutzscher Wasser ist ein kleineres Fließgewässer, hier sind auch noch an der Mündung vergleichsweise geringe Veränderungen der Wassertemperatur zu erwarten, weil die Steigung der Regressionsgeraden der Abhängigkeit der Wasser- von der Lufttemperatur nur bei 0.81 liegt. Die Messstellen in der Lober und Leine bzw. des heutigen Lober-Leine-Kanals charakterisieren die Temperaturverhältnisse in kleineren Fließgewässern der Leipziger Tieflandsbucht. Selbst an diesen Fließgewässern kann gezeigt werden, dass die

Abhängigkeit der Wasser- von der Lufttemperatur mit zunehmendem Fließweg steigt (Steigung von 0.83 bis 0.90). Dies führt mit zunehmendem Fließweg zu stärkeren Temperaturzunahmen aufgrund der Klimaerwärmung.

Tabelle 23: Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Vereinigte Mulde

Pegel	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Vereinigte Mulde											
Golzern 1	9.1	9.9	NPH	1.04	2.3695	0.9509	+1.53	+0.47	+1.29	+1.31	+1.30
Bad Dübén 1	9.4	9.7	DDH4	1.02	2.8535	0.9404	+1.59	+0.49	+1.28	+1.30	+1.33
Mittelwert	9.2	9.8		1.03	2.6115	0.9456	+1.56	+0.48	+1.28	+1.30	+1.32
Mutzschener Wasser											
Mündung in Neichen	9.1	9.2	NPH	0.81	1.0915	0.9689	+1.35	+0.41	+0.83	+1.06	+0.69
Lossa											
Mdg. uh. KA Thallwitz	9.5	10.5	DDH3	0.91	1.4279	0.9678	+1.57	+0.39	+1.05	+1.16	+0.91
Lober, Leine											
Reibitz (Leine, Mündung)	9.4	9.7	DDH4	0.83	1.5674	0.9517	+1.43	+0.35	+1.06	+1.03	+1.05
Laue (Lober)	9.7	10.3	DDH4	0.89	1.4649	0.9626	+1.47	+0.33	+1.17	+1.10	+1.06
Löbnitz (Lober-Leine-K.)	9.7	10.5	DDH4	0.90	1.5427	0.9619	+1.52	+0.34	+1.18	+1.11	+1.09
Mittelwert	9.5	10.0		0.87	1.4189	0.9626	+1.47	+0.36	+1.06	+1.09	+0.96

mit ØTA Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 ØTW Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)
 Logist.: RMSE quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
 Logist.: NSC Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
 □T Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst,
 >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)
fett Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur

7.11 EZG Weiße Elster in Südwestsachsen

Das Einzugsgebiet der Weißen Elster in Südwestsachsen beinhaltet das Sächsische Vogtland (Weiße Elster, Göltzsch, Trieb) und den Oberlauf der Pleiße im Altenburg-Zeitzer Lösshügelland (vgl. Abbildung 44).

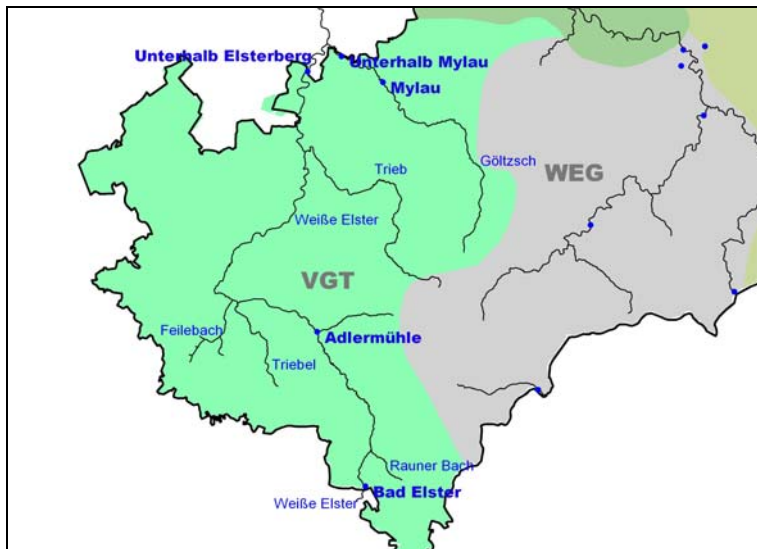


Abbildung 44: Ausgewertete Messstellen im EZG Weiße Elster in Südwestsachsen

Über den Fließweg der Weißen Elster zeigt sich eine Zunahme der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur (Steigung der linearen Regressionsgerade von 0.72 in Bad Elster bis 0.84 unterhalb Elsterberg). Die zu erwartenden Anstiege der Wassertemperatur in der Weißen Elster und der Göltzsch aufgrund des Klimawandels sind im Vergleich zu anderen Fließgewässern eher gering.

Tabelle 24: Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Weiße Elster in Südwestsachsen

Pegel	$\varnothing T_A$ [°C]	$\varnothing T_W$ [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Weiße Elster											
Bad Elster	7.1	8.2	VGT2	0.72	0.8111	0.9646	+1.09	+0.34	+0.89	+0.90	+0.89
Adlermühle	7.7	8.0	VGT1	0.77	1.0224	0.9618	+1.13	+0.31	+0.93	+0.95	+0.85
Unterhalb Elsterberg	7.7	9.3	VGT1	0.84	1.8521	0.9430	+1.29	+0.41	+0.94	+1.07	+0.88
Göltzsch											
Mylau	7.7	8.2	VGT1	0.78	2.1436	0.9251	+1.18	+0.38	+0.94	+1.00	+0.93
Unterhalb Mylau	7.7	8.9	VGT1	0.75	1.6851	0.9398	+1.21	+0.38	+0.87	+0.98	+0.83
Mittelwert VGT	7.6	8.5	VGT	0.77	1.5029	0.9469	+1.18	+0.36	+0.91	+0.98	+0.88

mit $\varnothing T_A$ Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 $\varnothing T_W$ Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit $T_A > 0^\circ\text{C}$)
 Logist.: RMSE quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)
 Logist.: NSC Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe
 ΔT Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst)
 >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil
fett Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur

7.12 EZG Weiße Elster in Nordwestsachsen

Das Einzugsgebiet der Weißen Elster in Nordwestsachsen liegt in der Leipziger Tieflandsbucht. Hier befindet sich der Mittel- und Unterlauf der Weißen Elster.

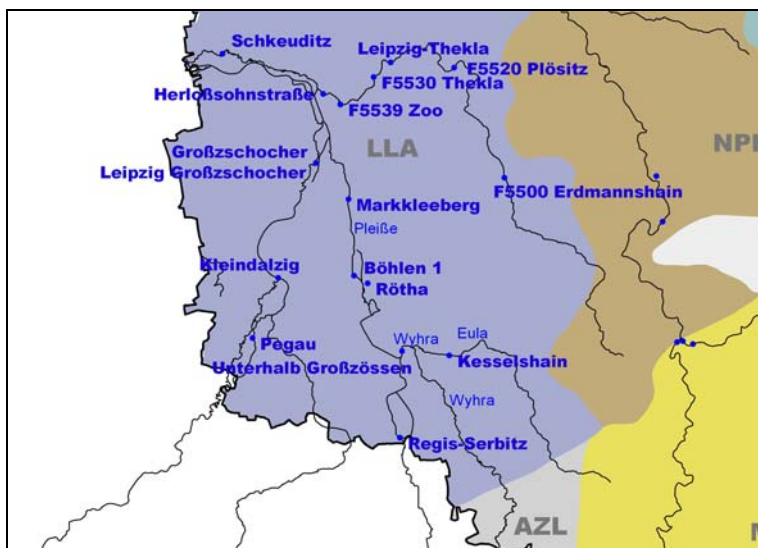


Abbildung 45: Ausgewertete Messstellen: EZG Weiße Elster in Nordwestsachsen

Die Steigung der Regressionsgeraden der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur vergrößert sich hier beginnend von 0.91 (Messstelle Pegau) bis auf den Wert 0.98 (Messstelle Schkeuditz). Bei den Veränderungen der Wassertemperatur aufgrund des Klimawandels kann demgegenüber keine Differenzierung vorgenommen werden.

In der Pleiße nimmt die Steigung der Regressionsgeraden mit zunehmendem Fließweg deutlich zu. Dies gilt auch für die zu erwartenden Temperaturerhöhungen des Wassers. Die übrigen ausgewerteten Messstellen in der Eula, Wyhra, Parthe und Neuen Luppe unterscheiden sich hinsichtlich der Temperaturverhältnisse kaum voneinander, allerdings streuen die prognostizierten Temperaturerhöhungen relativ stark, was ggf. auf anthropogene Beeinflussungen der gemessenen Daten zurückzuführen ist.

Tabelle 25: Ergebnisse der Regressionsanalyse: EZG Weiße Elster in Nordwestsachsen

Pegel	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Weißer Elster											
Pegau	9.4	10.3	LLA2	0.91	1.4554	0.9626	+1.53	+0.39	+1.00	+1.16	+0.86
Kleindalzig	9.3	9.9	LLA1	0.96	1.9153	0.9572	+1.50	+0.40	+1.24	+1.22	+1.20
Leipzig Großschocher	9.3	9.2	LLA1	0.95	2.4687	0.9428	+1.32	+0.38	+1.30	+1.21	+1.29
Großschocher	9.3	10.4	LLA1	0.94	1.3310	0.9666	+1.46	+0.38	+1.21	+1.18	+1.16
Schkeuditz	9.3	11.0	LLA1	0.98	1.4121	0.9686	+1.59	+0.42	+1.16	+1.25	+1.04
Mittelwert	9.3	10.2	LLA	0.95	1.7165	0.9596	+1.48	+0.39	+1.18	+1.20	+1.11
Pleiße											
Ponitz	9.1	9.4	LLA2	0.78	1.4436	0.9546	+1.29	+0.33	+1.04	+1.00	+1.04
Regis-Serbitz	9.1	10.3	LLA2	0.95	2.3049	0.9477	+1.45	+0.39	+1.22	+1.21	+1.17
Böhlen 1	9.1	10.0	LLA2	1.00	1.2911	0.9736	+1.51	+0.41	+1.21	+1.28	+1.09
Markkleeberg	9.3	11.2	LLA1	0.97	1.5956	0.9636	+1.59	+0.41	+1.29	+1.25	+1.27
Eula											
Kesselshain	9.1	9.9	LLA2	0.90	1.1820	0.9710	+1.47	+0.38	+1.12	+1.16	+1.06
Wyhra											
Unterhalb Großzössen	9.1	9.9	LLA2	0.85	1.1740	0.9685	+1.45	+0.37	+1.06	+1.09	+1.03
Parthe											
F5500 Erdmannshain	9.1	11.8	LLA2	0.83	5.8401	0.8309	+1.41	+0.35	+1.14	+1.05	+1.19
F5520 Plöszitz	9.3	10.2	LLA1	0.86	2.9554	0.9149	+1.45	+0.33	+1.20	+1.08	+1.20
Leipzig-Thekla	9.3	9.6	LLA1	0.73	1.4965	0.9455	+1.27	+0.38	+0.85	+0.96	+0.82
F5530 Thekla	9.3	10.4	LLA1	0.84	2.0413	0.9391	+1.47	+0.33	+1.04	+1.06	+0.92
F5539 Zoo	9.3	10.7	LLA1	0.84	3.8612	0.8893	+1.46	+0.37	+1.05	+1.08	+0.99
Herloßsohnstraße	9.3	10.4	LLA1	0.76	1.2847	0.9530	+1.37	+0.33	+0.98	+0.97	+0.98

Pegel	$\varnothing T_A$ [°C]	$\varnothing T_W$ [°C]	Klima- region	Lin. Reg.: Steig.	Logist.: RMSE	Logist.: NSC	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Neue Gösel											
Rötha	9.4	10.4	LLA2	0.83	1.5489	0.9526	+1.48	+0.43	+1.01	+1.09	+1.04
Neue Luppe											
Schkeuditz	9.3	10.9	LLA1	0.89	1.1914	0.9684	+1.67	+0.41	+0.89	+1.15	+0.71
Mittelwert	9.2	10.4	LLA	0.86	2.0865	0.9409	+1.45	+0.37	+1.08	+1.10	+1.04
mit	$\varnothing T_A$	Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000									
	$\varnothing T_W$	Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000									
	Lin. Reg.: Steig.	Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit $T_A > 0^\circ\text{C}$)									
	Logist.: RMSE	quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Messwerte von der nichtlinearen Regression (root mean square error)									
	Logist.: NSC	Effektivitätskoeffizient der nichtlinearen Regression nach Nash-Sutcliffe									
	$\square T$	Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)									
	fett	Pegel mit täglichen Messungen der Wassertemperatur									

8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ziel der vorliegenden Studie bestand in der Prognose der Veränderung der Wassertemperatur in sächsischen Fließgewässern aufgrund der globalen Erwärmung. Als Lösungsansatz wurden die statistische Auswertung von Messdaten und die Anwendung der statistischen Ansätze mit projizierten Klimadaten gewählt.

Anhand gemessener Wasser- und Lufttemperaturen im derzeitigen Zustand wurden lineare und nichtlineare Regressionsbeziehungen zwischen beiden Größen ermittelt. Die Lufttemperatur wurde als Einflussgröße betrachtet, die als Summenparameter vieler meteorologischer Teilgrößen betrachtet werden kann. Die Lufttemperatur wurde über unterschiedlich lange vorangegangene Zeiträume gemittelt und den an konkreten Pegeln bzw. Probenahmestellen gemessenen Wassertemperaturen gegenübergestellt. Diejenige Gegenüberstellung mit der geringsten Reststreuung um die Regressionsbeziehung am Pegel wurde zur Prognose von Veränderungen herangezogen.

Die Steigung der Regressionsgeraden der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur ist ein Maß für die Veränderung der Wassertemperatur im Zuge des Klimawandels unter den am häufigsten vorliegenden Bedingungen, d. h. außerhalb von kalten und sehr warmen Zeiträumen ($5^\circ\text{C} < \text{Lufttemperatur} < 20^\circ\text{C}$). Die Steigung liegt in folgenden Gewässern bzw. Gewässerabschnitten bei etwa 1.0, d. h. die Veränderung der mittleren Lufttemperatur um 1 K hat eine ebensogroße Veränderung der Wassertemperatur um 1 K zur Folge:

- Elbe
- Freiberger Mulde, Unterlauf nahe Mündung
- Zschopau, Unterlauf nahe Mündung
- Zwickauer Mulde, Unterlauf nahe Mündung
- Vereinigte Mulde
- Weiße Elster, Unterlauf

Dabei handelt es sich um die größten und durchflussreichsten Fließgewässer in Sachsen. Die prognostizierten Anstiege der Wassertemperatur ausgehend vom Zeitraum 1971-2000 bis zum Prognosezeitraum 2041-2060 liegen in diesen Flüssen in der selben Größenordnung, es sind keine wesentlichen Unterschiede festzustellen. Der mittlere Temperaturanstieg im Winter beträgt etwa 1.5 K, im Frühjahr nur 0.4 K und im Sommer-Herbst ca. 1.25 K (vgl. Tabelle 26).

Tabelle 26: Ergebnisse für die Fließgewässer mit starker Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur

Pegel/Messstelle	Ø T _A [°C]	Ø T _w [°C]	Lin. Reg.: Steig.	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Elbe	8.9	11.0	1.00	+1.51	+0.45	+1.21	+1.23	+1.21
Freiberger Mulde, Unterlauf	8.9	9.9	1.02	+1.44	+0.38	+1.34	+1.26	+1.27
EZG Zschopau, MLH2	8.4	9.7	0.96	+1.40	+0.36	+1.23	+1.15	+1.18
Zwickauer Mulde, MLH	8.7	10.3	0.94	+1.44	+0.34	+1.31	+1.31	+1.34
Vereinigte Mulde	9.2	9.8	1.03	+1.56	+0.48	+1.28	+1.30	+1.32
Weißer Elster Nordsachsen	9.3	10.2	0.95	+1.48	+0.39	+1.18	+1.20	+1.11
Min				+1.40	+0.34	+1.18	+1.15	+1.11
Mittel				+1.47	+0.40	+1.26	+1.24	+1.24
Max				+1.56	+0.48	+1.34	+1.31	+1.34

mit ØTA Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 ØTW Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)
 □T Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)

Die größten Anstiege der Wassertemperatur der genannten Fließgewässer sind ebenso wie bei der Lufttemperatur im Winter zu erwarten, die geringsten Anstiege im Frühjahr. Sommer und Herbst unterscheiden sich nicht hinsichtlich des Anstieges der Wassertemperatur. Bei den Maximaltemperaturen im Sommer sind ähnliche Anstiege wie bei den durchschnittlichen Sommertemperaturen zu erwarten. Die mittlere Steigerung der Wassertemperatur erfolgt in einem Temperaturbereich, in dem eine zunehmende Abkühlung durch Freiwasserevaporation oder andere dämpfende Prozesse noch keine wesentliche Bedeutung haben.

Die Steigung der Regressionsgeraden ist in den Unterläufen der Flüsse am größten und wird mit zunehmender Höhenlage, mit zunehmender Nähe zur Quellregion und mit abnehmender Einzugsgebietsgröße deutlich kleiner. Als ein wesentlicher Grund für diesen Sachverhalt kann der Einfluss des Grundwassers auf die Wassertemperatur genannt werden. Damit sind kleine durchflussschwache Fließgewässer mit kleinen Einzugsgebieten, insbesondere in Quellnähe und im Hügelland bzw. Mittelgebirge, am wenigsten von der Erwärmung betroffen. Dieser Zusammenhang wurde bei allen Fließgewässern mit längerem Fließweg gefunden. Er ist viel stärker als eventuell vorhandene regionale Unterschiede wie z. B. ein West-Ost-Gefälle.

Anhand der ausgewerteten Pegel können die kleinsten Steigungen der Regressionsgeraden und Temperaturanstiege wie folgt quantifiziert werden:

Tabelle 27: Ergebnisse für die Fließgewässer mit geringer Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur

Pegel/Messstelle	Ø T _A [°C]	Ø T _w [°C]	Lin. Reg.: Steig.	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
EZG Zschopau, MEG4	5.9	6.6	0.58	+0.89	+0.21	+0.74	+0.63	+0.65
EZG Zw. Mulde, kl. EZG im Erzgeb.	6.5	7.1	0.62	+0.92	+0.27	+0.86	+0.73	+0.90
EZG Zw. Mulde, kl. EZG im Vorland	8.4	8.1	0.62	+1.02	+0.40	+0.74	+0.82	+0.84
Mittel				+0.94	+0.29	+0.79	+0.73	+0.79

mit ØTA Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
 ØTW Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
 Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)
 □T Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)

Die Fließgewässer mit geringerer Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur befinden sich in unterschiedlicher Höhenlage von der Kammregion des Erzgebirges bis zum Erzgebirgischen Becken. Der prognostizierte Anstieg der Wassertemperatur ist deutlich geringer als bei den großen Flüssen und beträgt im Winter weniger als 1 K, im Frühjahr ca. 0.3 K und im Sommer-Herbst 0.75 K. Es sind keine Unterschiede zwischen dem Anstieg der mittleren und maximalen Temperatur im Sommer festzustellen.

Die übrigen Fließgewässer vermitteln hinsichtlich der Temperaturdynamik und Temperaturveränderung zwischen den beiden genannten Grenzfällen, einer geringen Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen in den quellenahen Bächen und einer starken Abhängigkeit bei den großen Flüssen. Dabei können keine regionalen Unterschiede festgestellt werden. Die Unterschiede sind insgesamt gering und methodisch begrenzt auf ein Maximum, das der Veränderung der Lufttemperatur entspricht. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse für alle Bereiche der Fließgewässer in Sachsen enthält die Tabelle 28.

Tabelle 28: Berechnete Anstiege der Wassertemperatur für die sächsischen Fließgewässer

Pegel/Messstelle	Ø T _A [°C]	Ø T _w [°C]	Lin. Reg.: Steig.	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Elbe	8.9	11.0	1.00	+1.51	+0.45	+1.21	+1.23	+1.21
Elbzuflüsse Süd	7.2	7.6	0.72	+1.06	+0.27	+0.96	+0.82	+0.96
Elbzuflüsse Nord	9.3	9.7	0.84	+1.48	+0.33	+0.96	+1.04	+0.81
Mandau	7.9	9.1	0.87	+1.26	+0.24	+1.14	+0.94	+0.99
Lausitzer Neiße, OOL1	8.3	9.1	0.82	+1.29	+0.31	+1.04	+0.92	+1.05
Lausitzer Neiße, OHL, MHE	8.8	10.2	0.90	+1.44	+0.34	+1.14	+1.03	+1.12
Spree und Zuflüsse	8.7	8.9	0.85	+1.31	+0.31	+1.05	+0.98	+0.97
Schwarze Elster, Pulsnitz, Röder	8.7	9.1	0.77	+1.30	+0.30	+0.83	+0.90	+0.69
Freiberger Mulde, OEG1	7.7	8.4	0.74	+1.16	+0.31	+1.02	+0.89	+1.04

Pegel/Messstelle	Ø T _A [°C]	Ø T _W [°C]	Lin. Reg.: Steig.	ΔT Wi. [K]	ΔT Fr. [K]	ΔT So. [K]	ΔT He. [K]	ΔT >95% [K]
Freiberger Mulde, MLH2...4	8.3	8.9	0.84	+1.28	+0.31	+1.14	+1.00	+1.14
Freiberger Mulde, MLH1	8.9	9.9	1.02	+1.44	+0.38	+1.34	+1.26	+1.27
EZG Zschopau, MEG4	5.9	6.6	0.58	+0.89	+0.21	+0.74	+0.63	+0.65
EZG Zschopau, MEG1	7.6	7.3	0.73	+1.03	+0.31	+0.99	+0.90	+1.02
EZG Zschopau, EGB2	8.3	8.7	0.87	+1.25	+0.30	+1.13	+1.04	+1.06
EZG Zschopau, MLH2	8.4	9.7	0.96	+1.40	+0.36	+1.23	+1.15	+1.18
Zwickauer Mulde, WEG	7.4	7.1	0.75	+0.96	+0.36	+0.78	+0.80	+0.82
Zwickauer Mulde, EGB	8.3	8.7	0.79	+1.19	+0.37	+1.00	+1.00	+1.04
Zwickauer Mulde, MLH	8.7	10.3	0.94	+1.44	+0.34	+1.31	+1.31	+1.34
EZG Zw. Mulde, kl. EZG im Erzgeb.	6.5	7.1	0.62	+0.92	+0.27	+0.86	+0.73	+0.90
EZG Zw. Mulde, kl. EZG im Vorland	8.4	8.1	0.62	+1.02	+0.40	+0.74	+0.82	+0.84
Vereinigte Mulde	9.2	9.8	1.03	+1.56	+0.48	+1.28	+1.30	+1.32
EZG Vereinigte Mulde (Zuflüsse)	9.5	10.0	0.87	+1.47	+0.36	+1.06	+1.09	+0.96
EZG Weiße Elster Südsachsen	7.6	8.5	0.77	+1.18	+0.36	+0.91	+0.98	+0.88
Weiße Elster Nordsachsen	9.3	10.2	0.95	+1.48	+0.39	+1.18	+1.20	+1.11
EZG W. Elster Nords. (Zuflüsse)	9.2	10.4	0.86	+1.45	+0.37	+1.08	+1.10	+1.04

mit ØTA Mittelwert der Lufttemperatur, 1971-2000
ØTW Mittelwert der berechneten Wassertemperatur, 1971-2000
Lin. Reg.: Steig. Steigung der linearen Regressionsgleichung (nur Datenpaare mit TA > 0°C)
□T Veränderung der Wassertemperatur von 1971/2000 bis 2041/2060 (Wi.: Winter, Fr.: Frühjahr, So.: Sommer, He.: Herbst, >95 %: Mittelwert aller Daten größer als das 95 %-Perzentil)

9 Literatur

- BOGAN, T., STEFAN, H., MOHSENI, O. (2004): Imprints of secondary heat sources on the stream temperature/equilibrium temperature relationship. *Water Resour. Res.*, 40, W12510, doi: 10.1029/2003WR002733
- BOGAN, T., OTHMER, J., MOHSENI, O., STEFAN, H. (2005): Estimating stream temperatures by the standard deviate method. *Journal of Hydrology* 317 (2006) 173-189
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2011): Gefahren durch extreme Niederschläge nehmen ab Mitte des Jahrhunderts deutlich zu. Zahlen und Fakten zur Rede von Dr. Paul Becker, Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_presse&T98029gsbDocumentPath=Content%2FPresse%2FPressekonferenzen%2F2011%2FPK__15__02__11%2FPressekonferenz.html (Stand 17.02.2011)
- DVWK-MERKBLÄTTER (DVWK 238): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Offenbach/Main 1996
- ENKE, W., KREIENKAMP, F., SPEKAT, A. (2006): WEREX IV – Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für den Freistaat Sachsen und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/ MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die Szenarios B1, A1B und A2. Abschlussbericht der Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH zum LfULG-Forschungsvorhaben WEREX, Potsdam, 79 S.
- GILBERT, R. O. (1987): *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Van Nostrand Reinhold. New York, 1987
- JUNGHANS, H. (1969): Sonnenscheindauer und Strahlungsempfang geneigter Ebenen. *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik* Nr. 85 (Band XI). Akademie-Verlag Berlin, 1969. 106 S.
- KAUSHAL, S. S., LIKENS, G. E., JAWORSKI, N. A., PACE, M. L., SIDES A. M., SEEKELL, D., BELT, K. T., SECOR, D. H., WINGATE, R. L. (2010): Rising stream and river temperatures in the United States. *Front Ecol Environ* 2010 doi: 10.1890/090037
- MOHSENI, O., STEFAN H. G., ERICKSON, T. R. (1998): A nonlinear regression model for weekly stream temperatures, *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 10, Oktober 1998
- MOHSENI, O., ERICKSON, T.R., STEFAN, H.G. (2002): Upper bounds for stream temperatures in the contiguous United States. *Journal of Environmental Engineering, ASCE* 1(4), 128
- MORRILL, C. J., BALES, R. C., ASCE, M., CONKLIN, M. H. (2005): Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality, *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING © ASCE*, Januar 2005
- RAKLIDA - Regionalisierte Klimadaten für Sachsen (Rasterklimadaten) (2010): Internetdienst der TU Dresden, Professur Meteorologie und graviss Ingenieure GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. https://141.30.160.222/RaKliDa_WebServlet/(Stand Dezember 2010)
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LfULG) (2009): Klimawandel und Wasserwirtschaft. Vorstudie zu Recherche, Homogenisierung und Plausibilisierung von verfügbaren Daten zu Langzeit-Temperaturreihen von Oberflächen-, Sicker-, Boden- und Grundwasser in Sachsen. Abschlussbericht. Erarbeitet durch C&E Consulting und Engineering GmbH im Auftrag des LfULG. Chemnitz, November 2009
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LfULG) (2010): F&E-Projekt: Synopse beobachteter und projizierter Klimate für Sachsen auf der Basis deutscher statistischer und dynamischer Regionalmodelle (REGKLIM). Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse. Dresden, Juni 2010
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (SMUL) (2008): Sachsen im Klimawandel – Eine Analyse. Publikation des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft, Dresden, September 2008, 211 S.
- SALMI, T., MÄÄTTÄ, A., ANTTILA, P., RUOHO-AIROLA, T., AMNELL, T. (2002): Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's slope estimates – the excel template application MAKESENS. Finnish Meteorological Institute, Helsinki 2002. <http://www.scribd.com/doc/38226055/Makesens-Manual>
- UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2011): Gefahren durch extreme Niederschläge werden ab 2040 deutlich zunehmen. Umweltbundesamt, Presseinformation Nr. 09/2011

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Dr. Petra Schneider, Ralf Löser, Nicole Gottschalk
C&E Consulting und Engineering GmbH
Jagdschänkenstr. 52, 09117 Chemnitz
Telefon: + 49 371 8814380
Telefax: + 49 371 8814589
E-Mail: info@cue-chemnitz.de

Dr. Bernd Spänhoff
LfULG, Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Oberflächen- und Grundwasser
Telefon: + 49 351 8928-4419
Telefax: + 49 351 8928-4099
E-Mail: bernd.spaenhoff@smul.sachsen.de

Redaktion:

Dr. Bernd Spänhoff
LfULG, Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Oberflächen- und Grundwasser

Redaktionsschluss:

10.11.2011

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/6447.htm> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.