

# **WÜRZBURGER GEOGRAPHISCHE ARBEITEN**

**Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Würzburg**

**Herausgeber:**

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

Heft 106

**Ulrike Strauch**

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



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

2011

Computersatz:

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

Druck: Verlag T. Lindemann  
Stiftstrasse 49  
63075 Offenbach

Bezug über den Buchhandel oder direkt bei:

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

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

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

Zuschriften:

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

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

## ZUSAMMENFASSUNG

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

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

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

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

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

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

## SUMMARY

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

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

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

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

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

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

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

# INHALTSVERZEICHNIS

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

4.1 Konventionelle thermische Kraftwerke und Untersuchung wassertemperaturbedingter Leistungseinschränkungen in Deutschland .....	44
4.1.1 Datenbank des konventionellen thermischen Kraftwerksparks mit installierten Kühlsystemen .....	45
4.1.2 Literaturrecherche .....	51
4.1.3 Medienanalyse .....	51
4.1.4 Schriftliche Befragung der Betreiber konventioneller thermischer Kraftwerke .....	53
4.1.5 Deskriptive Auswertung .....	54
4.2 Analyse rezenter Wassertemperaturzeitreihen deutscher Flüsse .....	55
4.2.1 Auswahl der Wassertemperaturzeitreihen und Charakterisierung der Flüsse .....	56
4.2.2 Datenaufbereitung .....	63
4.2.2.1 Zeitlich gewichtete und räumliche Interpolation von Datenlücken .....	63
4.2.2.2 Homogenisierung .....	66
4.2.3 Trendanalyse .....	81
4.2.3.1 Mann-Kendall Trendtest .....	81
4.2.3.2 Sen's Nonparametric Estimator of Slope .....	83
4.2.4 Häufigkeitsanalyse extrem hoher Wassertemperaturen .....	84
4.3 Simulation zukünftiger Wassertemperaturen .....	86
4.3.1 Datengrundlage: gemessene und projizierte Lufttemperaturzeitreihen .....	87
4.3.1.1 Auswahl und Aufbereitung der gemessenen Lufttemperaturen .....	87
4.3.1.2 Auswahl, Aufbereitung und Validierung der projizierten Lufttemperaturen .....	89
4.3.2 Logistische Regressionsanalyse .....	96
4.4 Analyse zukünftiger Wassertemperaturen .....	104
<b>5 Ergebnisse .....</b>	<b>107</b>
5.1 Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke .....	107
5.2 Die Entwicklung rezenter Wassertemperaturen zwischen 1948 und 2007 .....	116
5.2.1 Trends in den rezenten Wassertemperaturzeitreihen .....	117
5.2.2 Häufigkeit extrem hoher Wassertemperaturen .....	124
5.3 Die Entwicklung zukünftiger Wassertemperaturen zwischen 2011 und 2100 .....	129
5.3.1 Trends in zukünftigen Wassertemperaturen zwischen 2011 und 2100 .....	129
5.3.2 Vergleich der mittleren Wassertemperaturen der Zukunftsperioden mit denen der Klimanormalperiode .....	135
5.4 Synthese .....	139
<b>6 Diskussion .....</b>	<b>147</b>
6.1 Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke .....	147
6.2 Entwicklung rezenter Wassertemperaturen .....	152
6.3 Entwicklung zukünftiger Wassertemperaturen .....	158
6.4 Synthese .....	162
<b>7 Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>164</b>
Anhang I .....	167
Anhang II .....	190
Literaturverzeichnis .....	196
Autorenangabe .....	223

## AUTORENANGABE

Dr. Ulrike Strauch  
European Institute for Energy Research (EIFER), Emmy-Noether-Str. 11, D-76131 Karlsruhe; von April 2006 bis April 2010  
Email: [ulrike.strauch@gmail.com](mailto:ulrike.strauch@gmail.com)