

Gefördert durch:



ANPASSUNGSSTRATEGIEN FÜR DIE KÜHLWASSERNUTZUNG AUS OBERFLÄCHENGEWÄSSERN AM BEISPIEL DER LIPPE IN NORDRHEIN- WESTFALEN (DYNACLIM AKTIVITÄT 3.4.5)

Oliver Dördelmann, Ute Ruhrberg, Martin Strathmann

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH

Moritzstr. 26

45476 Mülheim an der Ruhr

<http://www.iww-online.de>

Hintergrund und Einleitung

Längere Trocken- und Hitzeperioden im Sommer können niedrigere Wasserstände in Oberflächengewässern verbunden mit höheren Temperaturen nach sich ziehen. Für Nutzer von Oberflächenwasser als Kühlwasser (z. B. thermische Kraftwerke) steht damit besonders bei konkurrierender Nutzung weniger Kühlkapazität bzw. eine verminderte nutzbare Temperaturspanne zur Verfügung. Hieraus bedingte Verschlechterungen des Wirkungsgrades der Kraftwerke können zu Produktionseinbußen bis hin zu -ausfällen führen.

In diesem *dynaklim* Arbeitspaket A3.4.5 sollten Wärmeeinleitungen in Oberflächengewässern (exemplarisch am Beispiel der Lippe) analysiert und Anpassungsmöglichkeiten für die Kühlwassernutzung aus Oberflächengewässern aufgezeigt werden, um die Versorgungs-/Produktionssicherheit und damit Wettbewerbsfähigkeit von Kühlwassernutzern an Oberflächengewässern auch unter den zu erwartenden Folgen des Klimawandels sicherzustellen und einer (lokalen) Verschlechterung von Wasserqualität und Gewässergüte vorzubeugen.

Im Teil A der Untersuchungen erfolgte zunächst eine Bestandsaufnahme der relevanten Wärmeeinleiter an der Lippe.

Im Teil B wurden Pilotversuche am RWE-Kraftwerksstandort Westfalen in Hamm durchgeführt, um mögliche Anpassungsmaßnahmen zur Verringerung der Wärmeeinträge in die Lippe darzustellen.

Am Ende dieses Dokuments befinden sich die zu liefernden Ergebnisse ("Deliverables").

1. Bestandsaufnahme zur Wärmesituation an der Lippe

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde deutlich, dass vor allem Kraftwerke für den Wärmeeintrag in die Lippe verantwortlich sind. Wärmeeinleitungen durch andere Punktquellen (z. B. Kläranlagen, Grubenwässer sowie sonstige Industrie) spielen hingegen nur eine untergeordnete Rolle.

Abbildung 1 zeigt die existierenden und geplanten Kraftwerke entlang der Lippe.

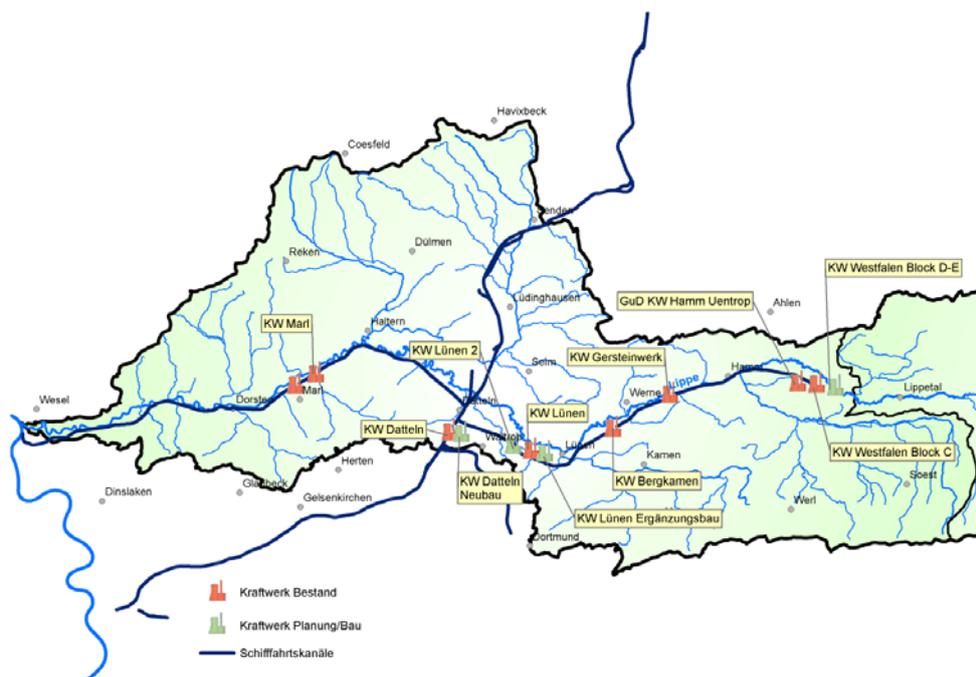


Abbildung 1: Lage existierender und geplanter Kraftwerke an der Lippe (Quelle: Lippeverband)

An den sieben Kraftwerksstandorten an der Lippe beträgt die installierte Kraftwerksleistung derzeit ca. 4,8 Gigawatt (GW). Eine Durchlaufkühlung (direkte Kühlung mit Flusswasser) die - im Gegensatz zur Kühlturm-Umlaufkühlung - mit verhältnismäßig hohen Wärmeeinleitungen verbunden ist, wurde 2013 noch an drei Standorten (Westfalen, Lünen und Marl) praktiziert. In Zukunft wird die installierte Kraftwerksleistung an der Lippe zwar noch weiter erhöht (auf dann ca. 7 – 8 GW), allerdings werden nur noch Kraftwerke mit Umlaufkühlung in Betrieb gehen.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse von Temperatur-Profilmessungen aus den Jahren 2006 – 2010 entlang der Lippe durch das LANUV NRW. (Aktuellere Messdaten waren nicht verfügbar.)

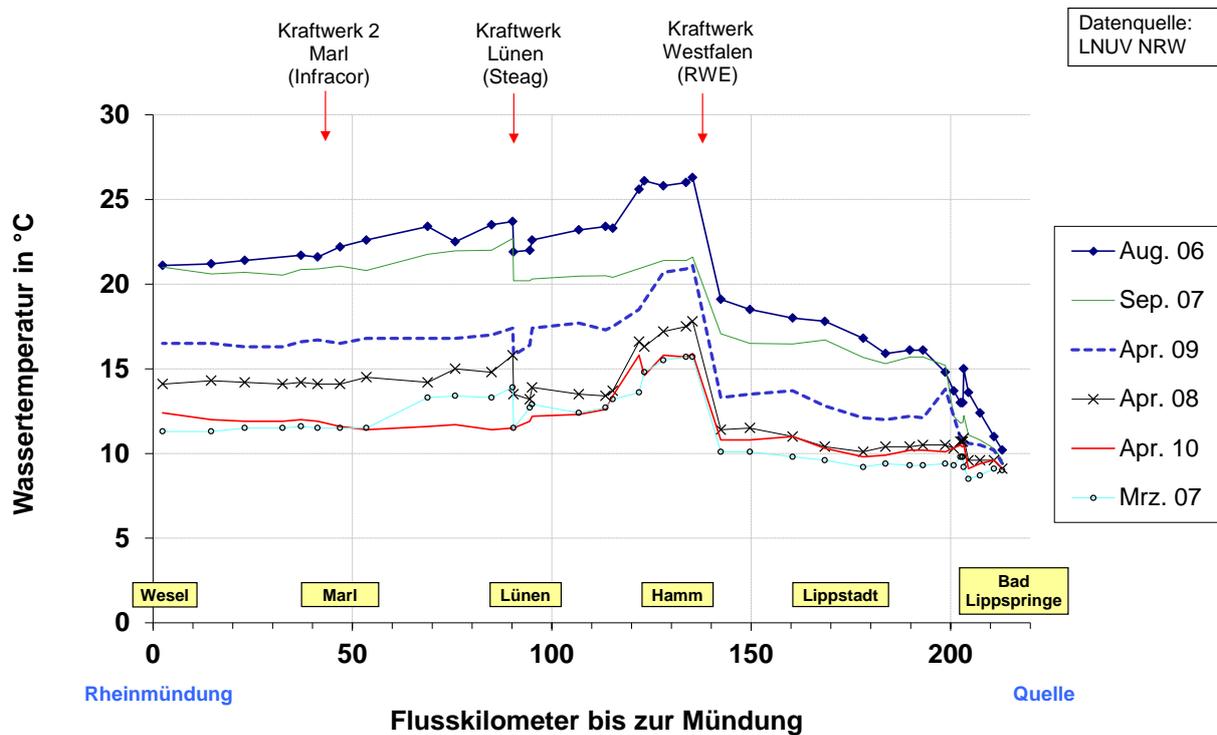


Abbildung 2: Temperatur-Profilmessungen entlang der Lippe (2006 – 2010)

In der Vergangenheit waren im Wasser der Lippe oberhalb von Hamm und in Lünen jeweils deutliche Temperaturanstiege zu erkennen. Diese Anstiege standen im Zusammenhang mit den Wärmeeinleitungen aus den Kraftwerken Westfalen und Lünen, die beide mit Durchlaufkühlung betrieben wurden (Westfalen) bzw. werden (Lünen). Hingegen wurden am Standort Marl, trotz des dort vorhandenen Kraftwerks mit Durchlaufkühlung, zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine Temperaturanstiege beobachtet. Die Ursache hierfür ist unklar, möglicherweise war an den Untersuchungstagen das betreffende Kraftwerk in Marl nicht in Betrieb.

Die größte Wärmebelastung für die Lippe ging in der Vergangenheit (bis 2011) vom Kraftwerk Westfalen aus, als noch zwei ältere Kraftwerksblöcke mit Durchlaufkühlung in Betrieb waren. Die maximal erlaubte Aufwärmspanne betrug dort zuletzt 7 Kelvin. Ab 2014, wenn die neuen Blöcke mit Umlaufkühlung in Betrieb gehen werden, wird die maximal erlaubte Aufwärmspanne am Standort Westfalen bei 3 Kelvin liegen (neuer Genehmigungsbescheid). Die reale Aufwärmspanne wird zukünftig voraussichtlich die meiste Zeit unter 0,5 Kelvin liegen. Dadurch wird es im Vergleich zur Vergangenheit - nicht nur im Bereich Hamm sondern im gesamten Bereich flussabwärts - zu deutlich verringerten Wärmeeinträgen kommen.

2. Pilotuntersuchungen zur Kühlwasserkonditionierung

Von November 2011 bis Januar 2013 wurden Pilotversuche zur Kühlwasserkonditionierung mit dem originalen Kühlturmzusatzwasser des RWE-Kraftwerks Westfalen vor Ort durchgeführt. Die mobile Versuchsanlage von BKG Water Solutions (Abbildung 3) bildet ein Kühlsystem komplett ab inklusive Wärmeaustauscher, Kühlturm, Produktdosierung, Zusatzwasserregelung über Niveausteuern und Abflut bei überschrittener Soll-Leitfähigkeit.



Abbildung 3: Teil der Container-Versuchsanlage zur Kühlwasserkonditionierung

Zusätzlich zu den klassischen Prozess-Sensoren (Durchfluss, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotential) wurden in der Kühlwasserkreislauf-Versuchsanlage einige neuartige Sensoren installiert, um eine mögliche Belagsbildung oder Korrosionseffekte in Echtzeit (online) zu protokollieren. Parallel dazu wurden regelmäßig Laborproben des Zusatz- und Kreislaufwassers analysiert sowie Test-Coupons aus nichtrostendem Stahl und GFK ausgewertet. Es wurden insgesamt 12 Versuche mit saisonal unterschiedlichen Zusatzwasserqualitäten, mit unterschiedlichen Eindickungszahlen (3 bzw. 6) und verschiedenen Phosphor-freien Konditionierungsmitteln (Härtestabilisatoren, Dispergatoren) durchgeführt.

Bei den mikrobiologischen Untersuchungen zeigte sich, dass das verwendete Zusatzwasser hinsichtlich Gesamtzellzahl (GZZ) und Gesamtkoloniezahl (HPC) bei allen Versuchen vergleichbar war. Ebenso war das Kreislaufwasser bei allen Versuchen hinsichtlich GZZ und HPC vergleichbar. Es zeigte sich kein Anstieg der mikrobiologischen Parameter über den Versuchsverlauf.

Auf den Oberflächen der Test-Coupons erfolgte eine Biofilmbildung, welche sich auf Edelstahl und GFK nicht unterschied. Unerwarteterweise zeigten die verschiedenen Fahrweisen bei den Versuchen (mit und ohne Konditionierung und bei einer Eindickung von 3 und 6) keinen Einfluss auf die Menge des gebildeten Biofilms. Das Wasser scheint daher hinsichtlich des Nährstoffangebots als mikrobiologisch stabil und führte auch bei erhöhter Eindickung nicht zu einer vermehrten Biofilmbildung. Ebenso führte die Zugabe der Konditionierungsmittel nicht zu einer erhöhten Biofilmbildung, d.h. die getesteten Produkte sind mikrobiell nicht verwertbar und stellen keine zusätzliche Nährstoffquelle dar.

Die getesteten Online-Sensoren zur Belagsquantifizierung waren grundsätzlich geeignet, um die Belagsbildung zu detektieren. Mittels des „Optiquad-Sensors“ (Fa. Krohne Optosens, Neuss) war eine

Detektion der Biomasse über das Fluoreszenz-Signal möglich. Proteine im Biofilm haben sich als geeigneter Indikator für die Biomasse gezeigt.

Zur Detektion möglicher Korrosionseffekte an den Werkstoffen wurden das freie Korrosionspotential und das elektrochemische Strom-Rauschen mittels Online-Sensoren (CoulCount-Verfahren, IPS-Elektroniklabor, Münster/Hessen) untersucht. Mit beiden Verfahren konnten nur geringfügige Unterschiede zwischen Kühlwässern unterschiedlicher Eindickungszahlen, sowie zwischen zusatzfreien und konditionierten Kühlwässern ermittelt werden. Unter den gewählten Versuchsbedingungen lag das Ausmaß der Korrosionseffekte, die durch Erhöhung der Eindickungszahl und durch Zugabe von Konditionierungsmitteln hervorgerufen wurden, in einer moderaten Größenordnung, die kein Korrosionsrisiko für den im Kraftwerk Westfalen eingesetzten Werkstoff 1.4401 (nichtrostender Stahl) besorgen lässt.

Zur Untersuchung auf Ablagerungen wurde der Wärmeaustauscher der Pilotanlage mit mehreren Testrohren bestückt, die mantelseitig mit Heißwasser beheizt wurden. Diese Rohre wurden vor und nach den Versuchen gravimetrisch untersucht. Bei 3-facher Eindickung und ohne Dosierung von Härtestabilisatoren kam es auf den Testrohren bereits zu erheblichen Ablagerungen, bei einer Eindickung von 6 war die Belagsmenge erwartungsgemäß größer. Mit Produkten zur Stabilisierung der Wasserhärte konnte die Belagsmenge um über 95% gesenkt und somit auf ein zufriedenstellendes Maß reduziert werden. Im Einklang mit den elektrochemischen Verfahren waren die gravimetrisch gemessenen Korrosionsabträge auf Edelstahlcoupons mit Werten $< 0,01$ mm/Jahr vernachlässigbar.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden mit RWE außerdem die Möglichkeiten zur weitestgehenden Nutzung von Abwärme aus Kraftwerken (z.B. Fern- oder Nahwärme) umfassend erörtert. Neben der an vielen Kraftwerken realisierten Kraft-Wärme-Kopplung sieht RWE auch in der "Niedrigtemperaturwärme-Nutzung" ein attraktives Feld und praktiziert diese z. B. im Bereich des Kraftwerks Niederaußem. Die Niedrigtemperaturwärme-Nutzung setzt voraus, dass sich geeignete Wärmeabnehmer in der Nähe des Kraftwerksstandortes befinden, was jedoch oft nicht der Fall ist. An allen neuen RWE-Kraftwerksblöcken ist eine Wärmeauskopplung mindestens planerisch vorbereitet und damit technisch umsetzbar.

Fazit der Pilotversuche und Ausblick

Die Untersuchungen im RWE-Kraftwerk Westfalen haben gezeigt, dass bei Einsatz von geeigneten Produkten zur Härtestabilisierung eine deutliche Erhöhung der Eindickungszahl im Kühlwasserkreislauf der neuen Kraftwerksblöcke D und E möglich ist. Die Realisierung einer solchen Kühlwasserkonditionierung würde zu einer Verringerung der Abflutmenge und somit zu einem geringeren Wärmeeintrag in die Lippe führen. Allerdings beträgt die damit verbundene Reduzierung des Wärmeeintrags in die Lippe am Kraftwerksstandort Westfalen (Hamm) nach Modellrechnungen von IWW nur ca. $0,1 - 0,2$ K. Dies ist vergleichsweise gering, verglichen mit der Reduzierung, die mit dem Ersatz eines Kraftwerkes mit Durchlaufkühlung durch ein neues Kraftwerk mit Umlaufkühlung verbunden ist.

Aus Sicht von RWE sind eine höhere Eindickungszahl und der Einsatz von Produkten zur Härtestabilisierung ökonomisch vorteilhaft und es ergeben sich auch weitere betriebliche Vorteile. Dem gegenüber stehen u.a. die stofflichen Einträge durch die eingesetzten Konditionierungsmittel in das Gewässer (DOC- bzw. CSB-Eintrag). Derzeit prüft RWE den Einsatz von Härtestabilisatoren für den Betrieb der Kühlwasserkreisläufe für die beiden neuen Kraftwerksblöcke am Standort Hamm.

Die in den Pilotversuchen eingesetzten Online-Sensoren sind geeignet zur Detektion von Belägen und Korrosionseffekten an den Werkstoffen und können zur Betriebsüberwachung eingesetzt werden. RWE zieht eine Implementierung solcher Online-Sensoren in bestehenden Anlagen in Betracht, um dadurch zukünftig Kühlwasserkreisläufe besser überwachen und steuern zu können.

Grundsätzlich können mit den in diesem Projekt untersuchten Maßnahmen (optimierte Kühlwasser-Konditionierung bei gleichzeitigem Einsatz von Online-Sensoren) auch an anderen Kraftwerksstandorten höhere Kühlwasser-Eindickungszahlen und somit geringere Wärmeeinträge in Gewässer erzielt werden.

3. Deliverables zum *dynaklim*-Teilprojekt 3.4.5

Hinweise zu optimierten Betriebsweisen von Kühlwasserkreisläufen, inkl. innovativer Monitoringstrategien (Deliverable 3.4.5.1)

Umlauf- oder Durchlaufkühlung?

Ein Referenzdokument des Umweltbundesamtes über die „Besten Verfügbaren Techniken bei industriellen Kühlsystemen“ (UBA, 2001) gibt einen guten Überblick zu den verschiedenen Betriebsweisen von Kühlwasserkreisläufen. Es zeigt aber auch das Spannungsfeld des Themas Kühlung und die möglichen Zielkonflikte, die sich daraus ergeben. So heißt es an einer Stelle bzgl. der **Verminderung des Wasserverbrauchs und von Wärmeemissionen in das Wasser:**

*„Als beste verfügbare Technologie (BVT) gilt der wiederholte Umlauf von Kühlwasser in einem offenen oder geschlossenen **Umlaufnasskühlsystem**, sofern die Verfügbarkeit von Wasser gering oder unzuverlässig ist.“*

An einer anderen Stelle des UBA-Dokuments heißt es bzgl. der **Prozess- und Standortanforderungen:**

„Wenn zur Erfüllung der Prozess- und Standortanforderungen eine Auswahl zwischen Nasskühlung, Trockenkühlung und Nass-/Trockenkühlung erfolgt, sollte dabei der höchste energetische Gesamtwirkungsgrad angestrebt werden. Zur Erzielung eines hohen Gesamtwirkungsgrads bei der Bewältigung großer Wärmemengen im niedrigen Temperaturbereich (10-25 °C) gilt als BVT die Kühlung durch offene Durchlaufsysteme.“

Je nachdem, welches der Ziele Priorität hat, also z.B. a) geringe Wärmeemissionen in das Gewässer oder b) hoher energetischer Wirkungsgrad, ergeben sich daraus somit unterschiedliche Konsequenzen z.B. für die bevorzugte Art der Kühlung (a) Umlauf- oder b) Durchlaufkühlung).

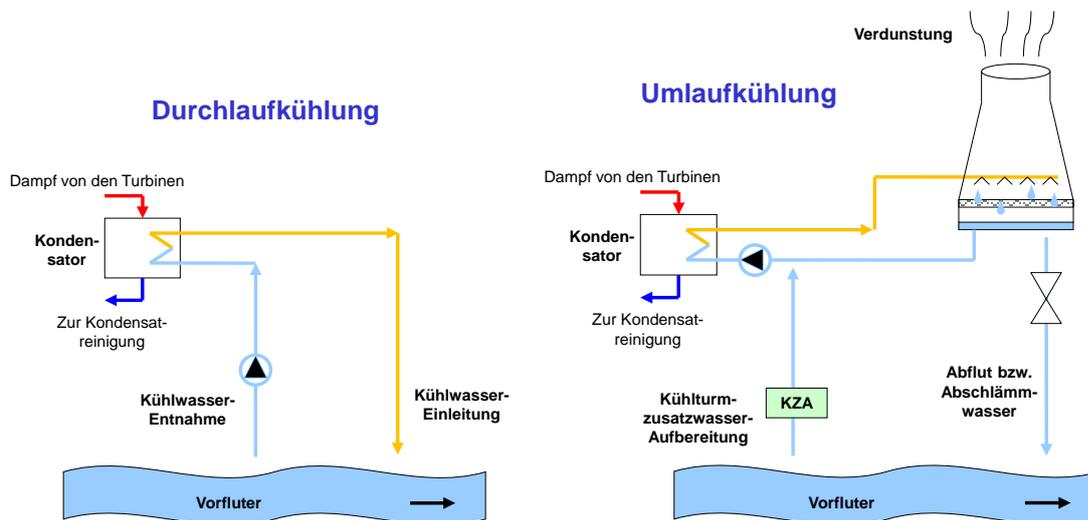


Abbildung 4: Schematische Darstellung von Durchlauf- und Umlaufkühlung (IWW)

Weitere Aspekte, die beachtet werden müssen sind u.a.

- Bei einer Umlaufkühlung ist in den meisten Fällen eine Aufbereitung des Zusatzwassers (KZA) sowie eventuell der Einsatz von Behandlungskemikalien (z.B. Härtestabilisatoren und Dispergatoren) erforderlich. Die Abflut der eingedickten Kühlwässer enthält dann somit ebenfalls die o.g. Chemikalien, was insbesondere bei kleinen Flüssen zu einer Beeinträchtigung der Gewässerqualität führen kann.
- Bei einer Umlaufkühlung verdampft ein signifikanter Teil des Kühlwassers, welcher durch Frischwasser ersetzt werden muss. Der damit verbundene Wasserverlust kann – insbesondere bei kleinen Fließgewässern - zu einer messbaren Verringerung des Abflusses führen.
- Kühltürme können darüber hinaus eine Lärmbelastung für die nähere Umgebung darstellen. Daneben gibt es noch weitere – meist unerwünschte – Beeinträchtigungen für die Anwohner (z.B. Veränderung des Landschaftsbildes, Nebelbildung ...).

Optimierte Betriebsweisen bei der Umlaufkühlung

Die meisten der heutzutage in Deutschland neu geplanten thermischen Kraftwerke werden – zur Verringerung der Wärmeeinträge in Gewässer -mit einer Umlaufkühlung (mit Kühlturm) genehmigt.

Bei bestehenden Kraftwerken mit Umlaufkühlung kann eine Erhöhung der Eindickung bzw. Zykluszahl BVT sein. Hierbei sind dann in der Regel die Dosierung von Härtestabilisatoren und/oder Dispergatoren erforderlich. Diese Vorgehensweise wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens an einer Pilotanlage unter Praxisbedingungen getestet. Gleichzeitig kamen neu entwickelte Monitoringsysteme zum Einsatz, die eine Detektion von (unerwünschten) Belägen in Echtzeit sowie von eventuellen Korrosionseffekten ermöglichen. Diese Monitoringsysteme haben ihre Tauglichkeit unter Beweis gestellt und können somit zukünftig von Kraftwerksbetreibern zur Überwachung von Kühlkreisläufen eingesetzt werden (siehe Kapitel 2 dieses Dokuments).

Weitere technische Ansätze zur optimierten Betriebsweisen der Umlaufkühlung und zur Verringerung der Wärmeeinträge in Gewässer können sein:

- Weitergehende Aufbereitung des Kühlturmzusatzwassers (z.B. Entsalzung mittels Umkehrosmose oder Nanofiltration)
- Seitenstromfiltrierung zur Entfernung von partikulären Stoffen aus dem Kühlwasser
- Einsatz von speziellen Biofiltern zur Verringerung der DOC-Konzentration und ggf. anderer Nährstoffe im Kühlwasser
- Einsatz von Reinigungskugeln am Wärmetauscher (z.B. System "Taprogge")
- Monitoring des mikrobiologischen Bewuchses und von Belägen
- Monitoring von Korrosionseffekten an Werkstoffen (z.B. durch Coupons oder online)
- Ggf. Einsatz von Härtestabilisatoren, Dispergatoren und/oder Korrosionsinhibitoren sowie Monitoring dieser Substanzen im Kühlwasser
- UV-Desinfektion des Kühlwassers
- Ggf. temporärer Einsatz von Ozon, Wasserstoffperoxid, Chlordioxid oder anderen Bioziden sowie Monitoring dieser Substanzen im Kühlwasser

Mehr Details zu den o.g. Möglichkeiten enthält das Referenzdokument des Umweltbundesamtes (UBA, 2001).

Darstellung des Spannungsfeldes zwischen Kühlwassereinleitungen und gesetzlichen Anforderungen sowie Entwicklung von praktikablen Lösungsmöglichkeiten (Deliverable 3.4.5.2)

Einen guten Überblick zu den vielen Facetten, Wechselwirkungen und Rahmenbedingungen von Kühlwassereinleitungen liefert die kürzlich überarbeitete und neu veröffentlichte Publikation „Grundlagen für die Beurteilungen von Kühlwassereinleitungen in Gewässer“ von der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2012). In der Vergangenheit war die LAWA-Schrift das wichtigste allgemein anerkannte fachlich Hintergrundpapier, um Wärmeeinleitungen aus Kraftwerken und der Industrie im wasserrechtlichen Vollzug zu beurteilen.

Technische Aspekte der Kühlwassereinleitung

Aus thermodynamischen Gründen sollte in einem thermischen Kraftwerk die Dampf-Eintrittstemperatur möglichst hoch und die Dampf-Austrittstemperatur möglichst niedrig sein. Um letzteres zu erreichen, wird der Dampf am "kalten Ende" des Prozesses soweit wie möglich abgekühlt. Das bedeutet, dass mit einer Durchlaufkühlung (mit kühlem Flusswasser) ein höherer Wirkungsgrad erzielt wird als mit einer Umlaufkühlung, bei der sich am Kondensator eine höhere Temperatur einstellt.

Aus energetischen Gründen (geringerer Primärenergiebedarf und geringere CO₂-Emissionen eines Kraftwerks) ist eine Durchlaufkühlung somit der Umlaufkühlung vorzuziehen. Der Primärenergiebedarf ist bei der Durchlaufkühlung ca. 3-4 % geringer als bei der Umlaufkühlung.

Ein weiterer relevanter Aspekt ist, dass bei der Durchlaufkühlung meist keine Chemikalien zur Kühlwasserbehandlung benötigt werden, bei der Umlaufkühlung hingegen meistens schon (z.B. Härtestabilisatoren, Korrosionsinhibitoren sowie ggf. Biozide).

Wenn die oberste Priorität jedoch auf die Verringerung von Kühlwasserentnahmen und Wärmeeinleitungen in ein Gewässer gelegt wird, dann ist die Umlaufkühlung gegenüber der Durchlaufkühlung klar im Vorteil:

- Bei der Umlaufkühlung liegt der Kühlwasserbedarf in der Regel deutlich unter 2 % der Kühlwassermenge im Vergleich zur Durchlaufkühlung.
- Während bei der Durchlaufkühlung 100 % der Abwärme vom Kondensator in das Gewässer gelangen, liegt dieser Anteil bei der Umlaufkühlung bei deutlich unter 10 %. Der größte Teil der Abwärme (> 90 %) gelangt bei der Umlaufkühlung über den Kühlturm in die Atmosphäre.

Möglichkeiten, die zu einer Reduzierung von Kraftwerks-Wärmeeinleitungen in ein Gewässer führen können sind u.a.:

- Erhöhung des Nettowirkungsgrades des Prozesses (durch moderne Kraftwerkstechnik)
- Abwärmenutzung z.B. durch Kraft-Wärme-Kopplung (Fernwärme-Produktion) und/oder Niedertemperaturwärme-Nutzung (z. B. für Gewächshäuser)
- Abwärmeverstromung z.B. durch ORC oder CRC¹-Prozesse (z. Zt. technisch noch nicht sinnvoll einsetzbar)
- Umstellung des Kühlverfahrens (z.B. von Durchlauf- auf Umlaufkühlung)
- Erhöhung der Eindickungs- bzw. Kreislaufzahl bei der Umlaufkühlung

¹ ORC (Organic Rankine Cycle) und CRC (Clausius Rankine Cycle) sind thermodynamischer Kreisprozesse, bei denen Wärme in mechanische Arbeit umgewandelt wird.

- Abschalten von Kraftwerken bzw. Drosselung der Kraftwerksleistung (wie z.B. im „Jahrhundertsommer“ 2003 geschehen)

Ökologische Aspekte der Kühlwassereinleitung

Die nachfolgende Textpassage ist ein Auszug aus der LAWA-Schrift „Grundlagen für die Beurteilungen von Kühlwassereinleitungen in Gewässer“ (LAWA, 2012)

„Zusammen mit dem Abflussverhalten, der Gewässermorphologie einschließlich des Geschiebehaltungs ist das Temperaturregime in Gewässern der die Flora und Fauna am stärksten prägende abiotische Faktor. Die hohe Bedeutung der Gewässertemperatur ergibt sich aus der Tatsache, dass ihr alle Wasserorganismen dauerhaft ausgesetzt sind und diese weit überwiegend poikilotherm sind (d.h. keine eigene Regelung der Körpertemperatur haben). Damit hängen alle physiologischen Prozesse bzw. Lebensvorgänge von der Umgebungstemperatur ab. Neben der direkten Wirkung auf die biotischen Prozesse werden auch alle chemischen Umsetzungen in ihrer Geschwindigkeit und ihrer Wirkungsweise von der Wassertemperatur bestimmt, wodurch die Wassertemperatur vielfältig und vielschichtig die Rahmenbedingungen für die Organismen bestimmt.

Beispiele für direkte Wirkungen sind u.a.:

- *Mortalität durch Hitze oder Temperaturschock (Temperaturdifferenz)*
- *Reversible oder irreversible Schädigung von Organen oder physiologischen Leistungen (u.a. Nervenfunktion, Atmung, Blutkreislauf)*
- *Störung der Gonadenentwicklung, Störung der Reifung der Geschlechtsprodukte*
- *Verschiebung von Laichperioden und Larvalphasen*
- *Störung der Nahrungskette*
- *Einstellung der Nahrungsaufnahme, Energieverlust*
- *Vermeidungsverhalten, Abwanderung.*

Beispiele für indirekte Wirkungen sind u.a.:

- *Veränderung der Artenspektren*
- *Verlust von Arten*
- *Verschiebung der Artenabundanz (z.B. Konkurrenzverhältnisse)*
- *Veränderung von Zönosen*
- *Förderung unerwünschter, habitatfremder Arten (z.B. Neozoen, Neophyten)*
- *Verstärkte Virulenz von Parasiten und Krankheiten*
- *Einfluss auf den Stoffhaushalt, z.B. Mobilisierung von Nährstoffen aus dem Sediment und damit Auswirkungen auf die Primärproduktion und trophische Situation*
- *Einfluss auf biologische Abbauprozesse*
- *Unterschiedliche Wirkung abiotischer Einflüsse (z.B. Sauerstoff-Löslichkeit)*
- *Beeinträchtigungen des Reproduktionserfolges.*

Die jeweilige Schadwirkung ist in Ausprägungsform und Intensität u.a. abhängig von:

- der Tier- bzw. Pflanzenart (unterschiedliche Toleranzen der einzelnen Fisch-, Krebs-, Insekten-, Molluskenarten, Algen, Makrophyten)
- dem Entwicklungsstadium (z.B. Ei, Larve, Juvenile, Adulte)
- dem Adaptationszustand bzw. der Temperaturvorgeschichte
- der Dauer und dem Zeitmuster der Temperaturbelastung
- anderen ökologischen Stressoren bzw. Rahmenbedingungen (Strömung, Gehalt an Sauerstoff oder anderer Stoffe etc.)

Die Wirkung der auftretenden Gewässertemperaturen auf Organismen und Zönosen kann reversibel oder irreversibel sein. Für die verschiedenen biologischen Habitattypen (z.B. Gewässerregionen, fischökologische Zonen u.a.) ist die Wirkungsweise je nach Temperaturniveau und Änderungscharakteristik unterschiedlich.

Bei der Betrachtung der Gewässertemperaturen ist wesentlich, dass die Betrachtung nicht auf letale Ereignisse eingeschränkt werden darf. Subletale und chronische Wirkungen, die sich abhängig von Temperaturmaxima, Akkumulationswirkungen von Temperatursummen, Vorbelastungen, Änderungshäufigkeiten und -geschwindigkeiten der Aufwärmungen ergeben, können langfristig betrachtet ebenso negativ in den Lebenszyklus des einzelnen Fisches und damit in die Zusammensetzung der Zönose einwirken wie akut auftretende Fischsterben, selbst dann wenn kurzfristig betrachtet keine akute Wirkung erkennbar ist.

Wärmeeinleitungen können natürliche Tageschwankungen überlagern und verstärken. Die Einleitung von Kühlwasser während der kühleren Jahreszeit kann dazu führen, dass viele Organismen ihr Fortpflanzungsverhalten ändern. In der wirbellosen Fauna werden ökologische Nischen von wenigen Arten besetzt, die ihrerseits hohe Organismendichten erreichen können. Darunter überwintern zunehmend Einwanderer (Neozoen, Neophyten), die die natürliche Nahrungskette vollständig verändern können oder für den Menschen Schäden verursachen.“

Der vorstehende Textauszug verdeutlicht die vielfältigen ökologischen Auswirkungen, die Wärmeeinleitungen in Gewässer zur Folge haben können. Hinzu können ggf. noch weitere Effekte kommen, wenn die eingeleiteten Kühlwässer mit Konditionierungsmitteln behandelt worden sind.

Rechtliche Randbedingungen bzgl. Kühlwassereinleitungen

Die bzgl. Kühlwassereinleitung relevante der Abwasserverordnung (AbwV, Anhang 31: Wasseraufbereitung, Kühlsysteme, Dampferzeugung) enthält Anforderungen (Emissionsgrenzwerte) zu einigen chemischen Wasserinhaltsstoffen (z.B. CSB), aber keine Anforderungen bzgl. der Temperatur.

Aus dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG, Bundesrecht) und der Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) ergibt sich ein generelles Verschlechterungsverbot bzw. Verbesserungsgebot für die Gewässerqualität auch im Falle von Einleitungen in Gewässer. Das bedeutet, dass auch Kühlwassereinleitungen zu keiner Verschlechterung der Gewässergüte des Vorfluters führen dürfen.

In der ebenfalls relevanten Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2011) sind u.a. Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial für Fließgewässer im Hinblick auf Temperatur und Temperaturänderung festgelegt. Daneben enthält die OGewV auch zahlreiche Anforderungen bzgl. chemischer Wasserinhaltsstoffe (z.B. organische Spurenstoffe).

Zusätzlich existieren - basierend auf der EG-Fischgewässerqualitäts-Richtlinie - noch Fischgewässerverordnungen der einzelnen Bundesländer.

Die Situation in NRW:

In einem Runderlass des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft von 1991 wurden „Allgemeine Güteanforderungen für Fließgewässer“ (AGA, 1991) für sommerkühle Gewässer und für sommerwarme Gewässer festgelegt. (Maximaltemperaturen: 25 bzw. 28 °C, Maximale Aufwärmspannen: 3 bzw. 5 Kelvin, siehe Tabelle 1)

In der NRW-Fischgewässerverordnung von 1997, die auf der EG-Fischgewässerqualitäts-Richtlinie basiert, wurde zunächst für alle Gewässer in NRW definiert, ob es sich um Cypriniden- oder Salmonidengewässer handelt. Zudem wurden für diese beiden Gewässertypen u.a. ganzjährig geltende Maximaltemperaturen und maximale Aufwärmspannen festgelegt (Maximaltemperaturen: 21,5 bzw. 28 °C, Maximale Aufwärmspannen: 1,5 bzw. 3 Kelvin). Von manchen Experten wurde im Hinblick auf die Fischfauna kritisiert, dass in der alten NRW-Fischgewässerverordnung keine Jahreszeiten und damit keine Laich- und Ruhezeiten berücksichtigt wurden.

Tabelle 1: Temperaturanforderungen in NRW (Niemann et al., 2013)

		Allgemeine Güteanforderungen für Fließgewässer (AGA)		Angaben der EU (EG-Fischgewässerqualitäts-Richtlinie vom 6.9.2006)		Orientierungswert guter ökologischer Zustand (OGewV, Anlage 6)		Immissionsseitige Anforderungen für einen Wassertemperatur-Jahresgang
		Empfehlender Charakter, im wasserwirtschaftlichen Vollzug bewährt		Nur z. T. so in Landesrecht übernommen. Läuft aus am 22.12.2013		Kein gesetzlicher Grenzwert, wird aber bei der Bewertung des GÖZ unterstützend hinzugezogen		Neu: Berücksichtigung von Laichzeit und Entwicklungsstadien
Gewässerart	Fischregion	Maximaltemperatur	Aufwärmspanne	Maximaltemperatur	Aufwärmspanne	Maximaltemperatur	Aufwärmspanne	Maximaltemperatur
		°C	K	°C	K	°C	K	°C
Überprüfung der Temperaturkategorien der OGewV	Gruppierung der Fischgewässertypen nach Ähnlichkeit der Temperaturanforderungen	28	5	28	3	28	3	Maximaltemperaturen im Jahresverlauf ableiten, Ziel: Guter ökologischer Zustand der Fischfauna
						28	3	
		25	3	21,5	1,5	25	3	
						21,5	1,5	
						20	1,5	

Die NRW-Fischgewässerverordnung lief im Dezember 2013 aus. Für eine Neufassung ist eine Überarbeitung der Kriterien für die Temperaturbelastung im Sinne der seit 2011 gültigen OGewV erforderlich. Vor diesem Hintergrund hat im Jahr 2013 eine Arbeitsgruppe in NRW eine „Handreichung zur Ableitung von Wassertemperaturen als Baustein zur Erreichung des guten ökologischen Zustandes für die nordrhein-westfälischen Fließgewässer“ erarbeitet. Darin enthalten sind nun u.a. jahreszeitlich variierende Schwellenwerte für die Fischfauna sowie Empfehlungen für den wasserwirtschaftlichen Vollzug und die Bewirtschaftung.

Ob bzw. wann es in NRW zukünftig zur Einführung jahreszeitlich variierenden Temperatur-Schwellenwerten für Kühlwassereinleitungen kommen wird, ist derzeit (Ende 2013) noch unklar.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Aktuell und auch zukünftig finden im Energiesektor - in Deutschland und weltweit - umfassende Veränderungen statt, wodurch sich die Randbedingungen für den Betrieb von Kraftwerken stark verändern. Wichtige Aspekte in diesem Zusammenhang sind u.a. politische und rechtliche Randbedingungen, der Ausbau regenerativer Energien, neue technische Entwicklungen (z.B. bei der Stromspeicherung sowie bei der Kraftwerkstechnik), wirtschaftliche Randbedingungen (u.a. Preis und Verfügbarkeit von Brennstoffen), der Klimawandel sowie die demografische Entwicklung. Derzeit ist für viele dieser Faktoren noch unklar, wie sie sich in den nächsten Jahren oder Jahrzehnten im Einzelnen entwickeln werden, und welche Konsequenzen sich daraus für die Energiewirtschaft (in Deutschland) ergeben können. Unabhängig von diesen zukünftigen Entwicklungen ist aber davon auszugehen, dass thermische Kraftwerke zukünftig flexibler betrieben werden, um z.B. die Kraftwerksleistung in relativ kurzen Zeiträumen zu variieren.

Eine temporäre Leistungsrosselung von thermischen Kraftwerken könnte – soweit technisch möglich und wenn ausreichend andere Strom-Ressourcen verfügbar sind – zukünftig dazu genutzt werden, um in Hitze- und Trockenperioden die Wärmeeinleitungen in Gewässer temporär zu verringern.

Eine effektive Möglichkeit zur Verringerung von Wärmeeinleitungen aus Kraftwerken in Gewässer ist die Umstellung der Kraftwerkskühlung von Durchlauf- auf Umlaufkühlung. Eine solche Umstellung ist jedoch mit einem großen technischen und finanziellen Aufwand verbunden (z.B. Bau eines Kühlturms inkl. Zusatzwasseraufbereitung) und sicherlich nicht überall realisierbar (Platzbedarf!).

Für Systeme mit bereits vorhandener Umlaufkühlung ist eine weitere Verringerung von Wärmeemissionen ins Gewässer durch eine Erhöhung der Eindickungszahl im Kühlwasserkreislauf möglich. Hierfür sind u.a. folgende Strategien erfolgversprechend:

- a) Weitergehende Aufbereitung des Kühlturmzusatzwassers (z.B. Entsalzung)
- b) Zusatz von Härtestabilisatoren

Die Möglichkeit b) wurde im Rahmen von *dynaklim* im RWE-Kraftwerk Westfalen an einer Versuchsanlage untersucht (siehe Kapitel 2 dieses Dokuments). Die hierbei eingesetzten Sensoren zum Online-Monitoring von Belägen und Korrosionseffekten haben ihre Tauglichkeit bewiesen; sie können zukünftig dazu beitragen, dass Kühlkreisläufe in Kraftwerken optimal d.h. mit höheren Eindickungszahlen und somit mit geringeren Wärmeemissionen (in das Gewässer) betrieben werden können.

Die Zugabe von Härtestabilisatoren in Kühlkreisläufe von Kraftwerken führt immer zu zusätzlichen stofflichen Einträgen in das Gewässer. Zwar sind heutzutage stickstoff- und phospor-freie Härtestabilisatoren verfügbar, aber der Einsatz dieser Produkte ist zumindest mit einem Eintrag von organischen Substanzen (DOC) in das Gewässer verbunden. Hier ist letztlich im Einzelfall abzuwägen, welche Art der Emission - Wärme oder DOC - für das Gewässer weniger schädlich ist.

Für das Kraftwerk Westfalen hat IWW die mögliche Reduzierung des Wärmeeintrags in die Lippe durch Erhöhung der Eindickungszahl berechnet. Diese ist, verglichen mit der Reduzierung, die mit dem Ersatz eines Kraftwerkes mit Durchlaufkühlung durch ein neues Kraftwerk mit Umlaufkühlung verbunden ist, relativ gering.

Modellierungsrechnungen im Rahmen einer anderen *dynaklim*-Aktivität haben gezeigt, dass aufgrund des Klimawandels von einer deutlichen Erhöhung der Temperatur des Lippewassers auszugehen ist (siehe Abschlussbericht zu Aktivität A3.4.3b). Im Hinblick auf zukünftige gesetzliche Entwicklungen u.a. in NRW sind ökologische Aspekte von großer Relevanz. Bei der Festlegung von zukünftigen Temperaturgrenzwerten sollte jedoch auch geprüft werden, welche Auswirkungen sich daraus z.B. für Kraftwerks- und Industriebetriebe ergeben.

Als langfristig vielversprechender und nachhaltiger wird die verstärkte Nutzung der Abwärme von Kraftwerken angesehen, z.B. für die Erzeugung von Nah- und Fernwärme. Vor dem Hintergrund steigender Energiepreise könnte dieser Ansatz für die Kraftwerksbetreiber wesentliche ökonomische Vorteile bringen, deren Potenzial im Einzelfall überprüft werden sollte.

Publikationen und Konferenzbeiträge (Deliverable 3.4.5.4)

Publikationen

- Dördelmann O., Ruhrberg U., Strathmann M. (2014) Anpassungsstrategien für die Kühlwassernutzung aus Oberflächengewässern. *dynaklim-Kompakt*
- Gößling-Reisemann S., Bardt H., Biebeler H., Dördelmann O., Herrmann A., Stührmann S. Wachsmuth J. (2012) Klimawandel: Regionale Verwundbarkeit der Energieversorgung in Deutschland. *ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN* 62 (4) 60-63
- Gößling-Reisemann S., Biebeler H., Freese D., Dördelmann O., Hesselbach J., Dengler C., Herrmann A., Blöthe T., Stührmann S., Wachsmuth J. (2012) Klimaanpassungsoptionen in der Energieversorgung. *ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN* 62 (6) 65-68
- Huster, C., Turzinski C., Hater W., Matheis J., Schirmer A., Dördelmann O., Ruhrberg U., Strathmann M. (2013).Kühlwasserkonditionierung in Kraftwerken als Maßnahme zur Klimawandel-Anpassung: Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „*dynaklim*“. Tagungsband zur VGB-Konferenz „Chemie im Kraftwerk“ 2013, S.29-30, Essen

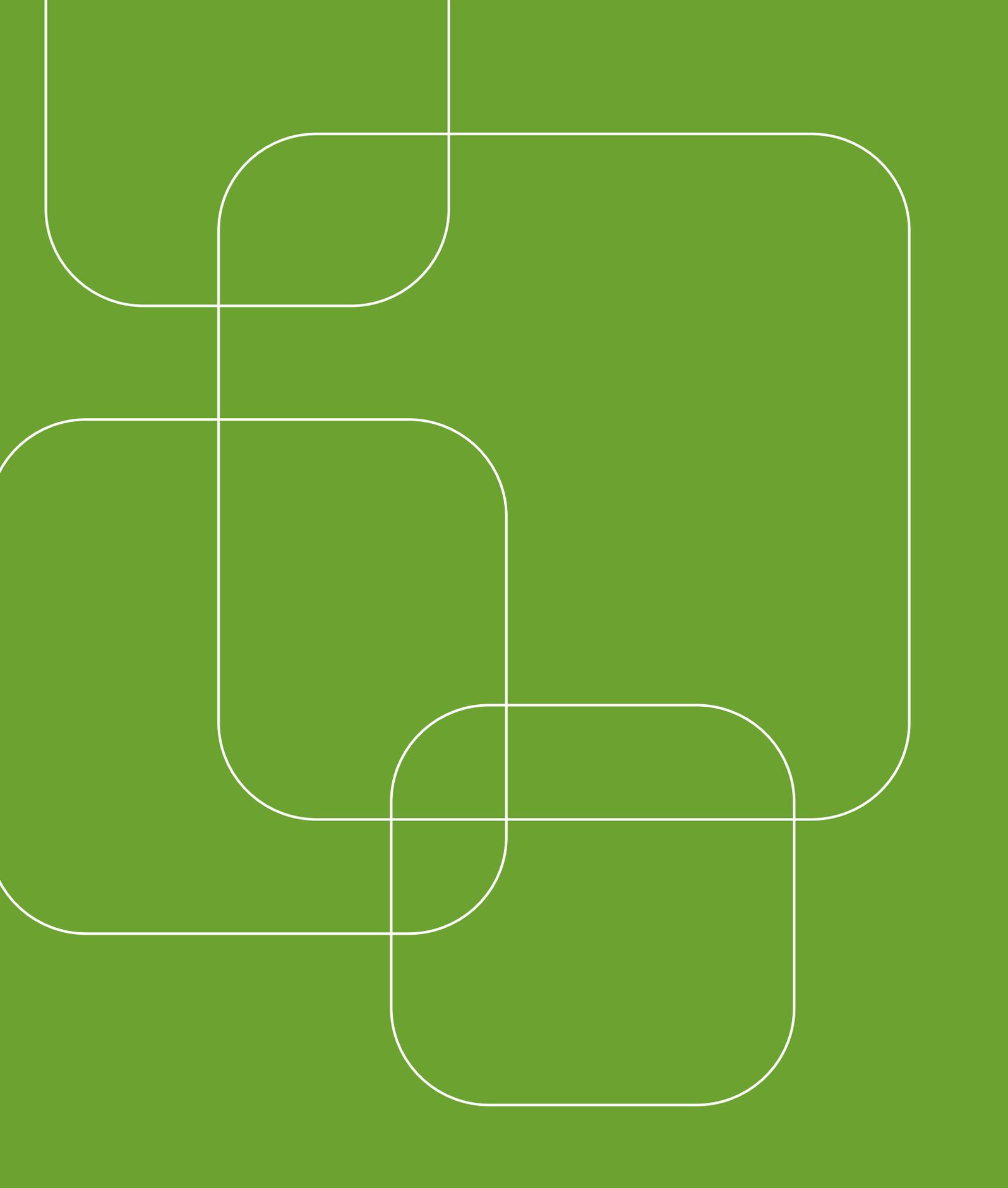
Beiträge zu Konferenzen und Workshops

Veranstaltung	Ort	Datum	Titel des Vortrags	Referent(en)
KLIMZUG-Workshop „Klimasichere Energieversorgung“	IW Köln	07.12.2011	Anpassungsstrategien für Kühlwassernutzungen aus Oberflächengewässern	Dördelmann
IWW-Innovationstag	Mülheim an der Ruhr	21.06.2012	Kühlwassernutzung an der Lippe: Einführung in das BMBF-Verbundvorhaben <i>dynaklim</i>	Dördelmann
Dynaklim-Abschlussveranstaltung „Konkurrierende Wassernutzungen an der Mittleren Lippe“	Waltrop	02.10.2013	Anpassungsstrategien für Kühlwassernutzungen aus Oberflächengewässern	Dördelmann
VGB-Konferenz "Chemie im Kraftwerk"	Leipzig	31.10.2013	Kühlwasserkonditionierung in Kraftwerken als Maßnahme zur Klimawandel-Anpassung – Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „ <i>dynaklim</i> “	Dördelmann, Matheis
KLIMZUG-Abschlussveranstaltung	Berlin	27.11.2013	Anpassungsstrategien für Kühlwassernutzungen aus Oberflächengewässern	Dördelmann

LITERATURVERZEICHNIS

- Abwasserverordnung (2013:) Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) vom 2. Mai 2013. BGBl. I S. 973
- AGA (1991): Allgemeine Güteanforderungen für Fließgewässer (AGA) Entscheidungshilfe für die Wasserbehörden in wasserrechtlichen Erlaubnisverfahren. Runderlass des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft - IV B 7 1571/11-30707
- EG-Fischgewässerqualitäts-Richtlinie (1978): RICHTLINIE DES RATES über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten. 78/659/EWG; ABl. L 222 vom 14.8.1978, S. 1
- LAWA (2012): Grundlagen für die Beurteilungen von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Kulturbuch-Verlag, Berlin
- Niemann, A. et al. (2013): Grundlagen für die Ableitung gewässertypspezifischer Temperaturanforderungen für wärmebelastete Fließgewässer in Nordrhein-Westfalen. Vortragspräsentation zur Veranstaltung „Symposium zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie“ am 17.04.2013 in Oberhausen. DWA-NRW (<http://www.dwa-nrw.de/wasserrahmenrichtlinie2013.html>, Stand 03/2014)
- Fischgewässerverordnung NRW (1997): Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Nordrhein-Westfalen V.NW, Nr. 41 S. 286; 5.4.2005 S. 332; 10.2.2006 S. 52
- OGewV (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV). BGBl. I S. 1429
- UBA (2001): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU) Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken bei industriellen Kühlsystemen. Umweltbundesamt, Berlin (www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_kuehlsysteme_vv.pdf, Stand 03/2014))
- WHG (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG). BGBl. I S. 2585
- WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000 S. 0001 - 0073

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01LR0804L gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein beim Autor.



Autor/in

Projektbüro *dynaklim*

Michaela Stecking
Mozartstraße 4
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 38
stecking@fiw.rwth-aachen.de

www.dynaklim.de