

Wassernutzung für Kühlzwecke

Water Use for Cooling Purposes

Zusammenfassung / Summary

Mehr als die Hälfte des Wasserverbrauchs in der Bundesrepublik wird für Kühlzwecke eingesetzt. Da die Kühlkapazität der Gewässer in Engpaßzeiten zur Abwärmeseitigung nicht ausreicht, müssen Rückkühlverfahren eingesetzt werden. Ein wirtschaftlicher Einsatz der verfügbaren Kühlverfahren unter Beachtung der Umweltbestimmungen erfordert den Einsatz von Optimierungsmodellen. Die Anwendung eines solchen Modells auf den Oberrhein illustriert, daß mit Hilfe verfeinerter Methoden beträchtliche Energiemengen zusätzlich genutzt werden können und gibt ein Werkzeug zur Quantifizierung der Auswirkungen von Umweltbestimmungen an die Hand.

More than half of the water supply of West Germany is used for cooling purposes. Since the available minimum cooling capacity of natural waters is insufficient, recirculating systems have to be used. Economic application of available cooling modes under given environmental constraints requires the use of optimisation models. Applications of such a model to the upper Rhine illustrates that the use of such methods leads to considerable energy savings and provides a tool for quantification of the effect of various environmental criteria.

1 Abwärme und Kühlwasser

Wassernutzung besteht im Prinzip darin, Wasser dem natürlichen hydrologischen Kreislauf zu entziehen, durch die Nutzung zu verändern und dann wieder dem natürlichen System zuzuführen. Die Änderungen durch Wassernutzung sind:

- Wasserverbrauch durch direkte Verdunstung;
- Anreicherung mit Wasserinhaltsstoffen fester, flüssiger oder gasförmiger Art, also „Verschmutzung“;
- Erwärmung des Wassers.

Diese Veränderungen der Wasserbeschaffenheit blieben solange ohne spürbare Auswirkungen auf die Gewässer, als der mengenmäßige Anteil des Nutzwassers am Gesamtkreislauf klein war: die zugegebenen Wasserinhaltsstoffe wurden im natürlichen Transportsystem durch hydrodynamische Durchmischung ausreichend verdünnt und durch chemische und biologische Abbauprozesse („Selbstreinigung“) schließlich wieder auf natürliche Konzentrationen bzw. durch Wärmeabgabe an die Atmosphäre auf natürliche Gewässertemperaturen reduziert. Probleme ergeben sich erst dann, wenn der Nutzwasserbedarf Größenordnungen annimmt, die im hydrologischen Gesamtsystem nicht mehr vernachlässigt werden können. Dies ist in allen dichtbesiedelten Gebieten und insbesondere in den hochindustrialisierten Ländern der Fall.

Nach [6] fallen in der Bundesrepublik 1985 etwa 15% der gesamten Abwärme in Form von erwärmtem Wasser an. Dies führt zu einem Ausmaß der Produktion von Warmwasser, das für die Wasserwirtschaft von großer Bedeutung ist. Eine Betrachtung der Wassernutzung in der Bundesrepublik Deutschland [8] zeigt, daß die Verwendung für Kühlzwecke bereits heute mehr als die Hälfte des gesamten Wasserbedarfs ausmacht und daß dieser Anteil zukünftig noch stark zunehmen wird. Neben der Industrie wird dieser enorme Wasserbedarf vor allem durch (fossile und nukleare) Wärmekraftwerke bedingt, in welchen extrem große Abwärmemengen anfallen.

Wird erwärmtes Wasser in ein Fließgewässer eingeleitet, dann wird es aufgrund des Einleitungsimpulses und der Gewässerströmung von der Einleitungsstelle wegtransportiert und dabei einer turbulenten Durchmischung und damit Verdünnung unterworfen. Auf diese Weise tragen die Flüsse dazu bei, die punktuelle Abwärmelast von Wärmekraftwerken durch allmähliche Wärmeabgabe entlang des Flußlaufs entsprechend abzumindern. In Tidegewässern ist durch die periodische Umkehr der Fließrichtung ein solcher kontinuierlicher Weitertransport nicht gegeben, vielmehr kann das einmal eingeleitete Warmwasser die Einleitungsstelle mehrmals passieren.

Problematischer ist die Einleitung erwärmten Wassers in stehende Gewässer. Anders als in Fließgewässern, wo die sohl-

reibungsbedingte Turbulenz der Strömung eine vertikale Durchmischung erzwingt, können sich in Seen oder Reservoiren stabile Dichteschichtungen ausbilden, welche effektive vertikalen Austausch und Stofftransport (z.B. Sauerstoff) verhindern, was gravierende Gewässergüteprobleme verursachen kann. Deshalb ist die Einleitung von Kühlwasser in stehende Binnengewässer nur bedingt möglich – es sei denn, man nutzt das Gewässer ausschließlich zu Kühlzwecken („Kühlteich“).

Einleitungen in den Untergrund sind für sehr kleine Kühlwassermengen vergleichsweise problemlos. Allerdings bietet der Untergrund kein wesentliches Potential für große Wärmeabfuhrleistungen: einerseits sind durch die Obergrenze der physikalisch möglichen Sickerströmungsgeschwindigkeit dem Schluckvermögen von Infiltrationsbrunnen enge Grenzen gesetzt, und andererseits würde eine starke örtliche Wärmebelastung des Bodens langfristig zu Veränderungen der Bodentemperatur und der Pflanzenökologie führen, deren Auswirkungen derzeit nicht beurteilt werden können.

In Bild 1 ist für die Bundesrepublik Deutschland das Kühlvermögen der natürlichen Gewässer tabellarisch dargestellt. Die dort aufgeführten Zahlenwerte lassen erkennen, daß die Kühlkapazität sehr stark von der Wasserführung, aber auch von den klimatischen Bedingungen abhängt und entsprechend große Schwankungsbreiten aufweist. Im Vergleich zu den heute und zukünftig anfallenden Abwärmeleistungen (ebenfalls Bild 1) ist offensichtlich, daß der zeitweise Einsatz von Rückkühlverfahren bei ungünstigen Witterungs- und Abflußverhältnissen unerlässlich ist.

Bei der „Rückkühlung“ wird das Wasser im Kreislauf umgewälzt und gibt hierbei in einem Ventilator- oder Naturzugkühlturm seine Wärme an die Atmosphäre ab, wobei nasse, trockene oder hybride Rückkühlung angewendet wird. Für große Abwärmemengen bietet heute der Naturzugkühlturm im nassen Betrieb die technisch und wirtschaftlich günstigsten Möglichkeiten. Auch hier besteht ein Kühlwasserbedarf, da dem Kreislauf ständig Zusatzwasser zugeführt werden muß, welches etwa 3% des Kreislaufdurchsatzes ausmacht. Dieses Zusatzwasser muß zum einen die erhöhten Verdunstungsverluste kompensieren und zum anderen ein „Eindicken“ des Kreislaufs (unzulässige hohe Stoffkonzentrationen im Kreislauf) verhindern.

Trockenkühltürme kommen hingegen ohne nennenswerten Wasserbedarf aus. Allerdings sind bis heute weder Trockenkühler noch Hybridkühler (teils Trocken-, teils Naßkühler) technisch so weit ausgereift, daß sie für die heute gebräuchlichen Kraftwerksblockgrößen eingesetzt werden könnten. Zudem ist die Trockenkühlung mit erheblichen Mehrinvesti-

Kühlvermögen der Gewässer der Bundesrepublik Deutschland nach [4]

Abfluß:	Sommer	Winter	Statistische Häufigkeit
2 MNQ	103.0 GW	73.1 GW	Abfluß = 1 ÷ 3 MNQ an 200-250 Tagen/Jahr
0.7 MNQ	69.9 GW	48.8 GW	Abfluß ≤ 0.7 MNQ an 10-60 Tagen/Jahr
NQ schwachwindig	42.5 GW	29.7 GW	Wahrscheinlichkeit: einmal pro 20 Jahre

Jahresmittel der Abwärmeleistungen in der Bundesrepublik Deutschland nach [6]

	1973 [4]	1985 [6]
Kernkraftwerke	3.5 GW	38 GW
Fossil-Kraftwerke	42.1 GW	53 GW
Industrieabwärme in Flüsse	10.0 GW	13.5 GW
Gesamt-Abwärme an Gewässer	55.6 GW	104.5 GW

Der Gesamtanteil des Kühlwassers beträgt 1985 etwa 15% des Primärenergieeinsatzes. Davon werden 9% an die Atmosphäre abgegeben, 6% über die Grenzen und ins Meer exportiert [6].

Bild 1: Globalwerte des Kühlvermögens deutscher Gewässer und der für Frischwasserkühlung geeigneten Abwärmeleistungen für die Bundesrepublik Deutschland

tionen, größeren Bauwerken und einem niedrigeren Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung verbunden und somit derzeit wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig. Allerdings wird die Begrenzung des Wasserdargebots, welche für Frischwasserkühlung bereits erreicht und für nasse Rückkühlung ebenfalls in Sicht ist, in der Zukunft den Einsatz dieser Kühlart unumgänglich machen.

2 Umweltbelastung

Der Abwärmeeinleitung in Gewässer sind dadurch Grenzen gesetzt, daß die Gewässerökologie lokal nur einen bestimmten Wärmeeintrag verkraften kann, und daß durch kumulative Wirkung zahlreicher Einleiter die ökologisch zumutbare Aufwärmung eines Gewässers insgesamt erschöpft werden kann. Für den Einsatz von Kühltürmen gilt entsprechend, daß dem örtlich konzentrierten Abwärmeeintrag in die Atmosphäre Grenzen gesetzt sind, und daß die Gesamtwärmeabgabe an die Atmosphäre zufolge anthropogener Quellen klein bleiben muß im Vergleich zur natürlichen Globalstrahlung. Erreichen die anthropogenen Wärmeeinleitungen die Größenordnung von 1% der Globalstrahlung, dann können Rückwirkungen auf die Temperatur- und Strömungsverhältnisse in der Atmosphäre und damit auf das Klima nicht ausgeschlossen werden. Obwohl diese Grenze für die Bundesrepublik insgesamt noch lange nicht erreicht ist, wird sie dennoch regional schon überschritten [7].

2.1 Frischwasserkühlung

Die Frage der Wärmebelastung von Gewässern muß in engem Zusammenhang mit der Gewässergüte gesehen werden [5, 8]. Da Temperaturerhöhungen in der Regel chemische und biologische Prozesse im Gewässer beschleunigen, werden in verschmutzten Gewässern bei entsprechend erhöhter Sauerstoffzehrung die biochemisch abbaubaren Substanzen rascher abgebaut. Obwohl damit die Selbstreinigung des Flusses erhöht wird, kann dies zu Sauerstoffmangel im Gewässer und damit zu einer Verschlechterung des Gütezustandes führen. Sauerstoffmangel in Gewässern kann zu Fischsterben und schließlich zu anaeroben Verhältnissen („Umkippen“) führen. Mit zunehmender Temperatur steigt in der Regel auch die Toxi-

zität wassergetragener Giftstoffe. Für Fische sind im allgemeinen Wassertemperaturen bis 28° zuträglich, solange die Abweichungen vom Jahresgang der natürlichen Temperatur in tragbaren Grenzen (3 bis 5 K) gehalten werden [5].

Gewässererwärmung führt auch zu erhöhter Verdunstung (rund 0.2 m³/s je eingeleitetem GW Abwärme [4]). Dies kann zu Abflußminderungen bei NW von einigen Prozent führen, was für die Schifffahrt von Bedeutung sein kann. Verbunden hiermit kann auch eine gewisse Erhöhung der Nebelbildung als Belastung der Atmosphäre auftreten.

2.2 Kühlturmbetrieb

Naßkühltürme belasten in erster Linie die Atmosphäre. Sie geben im Mittel 70% ihres Wärmeausstoßes in Form von latenter Wärme, also Wasserdampf, ab und verursachen dabei Verdunstungsverluste, die um rund 60% höher liegen als bei der Frischwasserkühlung (0,35 m³/s je GW Abwärme). Ein Teil des Wasserdampfs kondensiert schon an der Turmmündung und bildet zusammen mit ausgeworfenen Wassertröpfchen einen sichtbaren Nebelschwaden, dessen Länge je nach Art des Kühlturms, Windverhältnissen, Lufttemperatur und -feuchtigkeit von 10 m bis 30 km betragen kann. Der Nebelschwaden bewirkt eine Beschattung des Erdbodens im Nahbereich (1 km Umkreis) des Kühlturms, welche im Jahresmittel 3-10 Minuten pro Tag ausmacht. Bei Bodenberührung des sichtbaren Schwadens, die allerdings nur bei niedrigen Zellenkühlern auftritt, kann Sichtbehinderung und Glatteis bei Frost auftreten. Die mittleren Veränderungen liegen für einen Naturzugkühler von 2000 MWth für die Lufttemperatur bei 0,1 K, für die relative Luftfeuchte in Bodennähe bei 1%, und für die Erhöhung des Niederschlags in der Umgebung des Kühlturms bei 1% im Jahresmittel [6]. Diese Auswirkungen sind im allgemeinen auf einen Umkreis von 5 km Radius beschränkt. Bei Gebäudehöhen von rund 150 m und einzelnen Standorten in der Ebene können sie keine meßbare Klimaveränderung bewirken, im Gegensatz zu örtlichen Konzentrationen in Kraftwerk-Parks [7].

Kühltürme belasten auch die Gewässer sowohl durch ihren zusätzlichen Wasserverbrauch zufolge erhöhter Verdunstung, als auch durch die Einleitung des Abschlämmwassers, welches

bei einer erhöhten Temperatur anfällt und meist stark mit Chemikalien angereichert ist, welche dem Kreislauf zur Bekämpfung von Organismenwachstum zugegeben werden müssen.

2.3 Einleitungskriterien

Aufgrund biologischer und ökologischer Aspekte wurden für die Einleitung von erwärmtem Wasser in Fließgewässer folgende Richtwerte entwickelt [6]:

- Die Aufwärmung darf im Querschnittsmittelwert die natürliche Temperatur T_N in sommerwarmen Gewässern höchstens um 5 K, in sommerkühlen Gewässern höchstens um 3 K überschreiten. Für stark verschmutzte Gewässer sind die Werte entsprechend zu reduzieren. Hierbei ist T_N die „natürliche“ Temperatur, die das Gewässer am betrachteten Ort bei Fehlen jeglicher anthropogenen Wärmeinleitung hätte.
- Die Flußtemperatur darf im Querschnittsmittelwert für sommerwarme Gewässer eine Obergrenze von 28 °C nicht überschreiten (sommerekühlte Gewässer 25 °C; Salmonidengewässer 18 °C).
- Die Temperaturspanne zwischen eingeleitetem und Flußwasser darf höchstens 10 K (Ausnahme: 15 K) betragen.
- Die Einleitungstemperatur darf eine Obergrenze von 30 °C (Ausnahme 33 °C) nicht überschreiten. Bei Ablaufkühlung beträgt diese Grenze 33 °C, bei Kreislaufkühlung 35 °C.
- Der Sauerstoffgehalt des Gewässers sollte 4 mg/l nicht unterschreiten.

Als kritische Anmerkung sei hier angefügt, daß es den realen Belangen eher entspreche, wenn die Grenzwerte nicht als Absolutwerte festgelegt, sondern mit einer gewissen zulässigen Überschreitungshäufigkeit versehen würden (siehe Kap. 6). Auch erscheinen die Obergrenzen der Einleitungstemperatur insofern zu starr, als durch strömungstechnische Maßnahmen am Einleitungsbauwerk eine direkte Durchmischung und damit sofortige Abkühlung auf die geforderten Grenzwerte realisiert werden könnte.

Für Abwärmeemissionen in die Atmosphäre existieren bisher keine vergleichbaren Bestimmungen.

3 Erzeugte Nettogleistung bei verschiedenen Kühlverfahren

Ein beträchtlicher Teil der in Wärmekraftwerken eingesetzten Primärenergie muß aus thermodynamischen Gründen bei der Wandlung in mechanische Energie als Abwärme ungenutzt bleiben. Für den thermischen Wirkungsgrad gilt im Idealfall (Carnot'scher Kreisprozeß)

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_u + 273}{T_o + 273} \quad (T_o, T_u \text{ in } ^\circ\text{C})$$

wobei T_o und T_u die obere bzw. untere Prozeßtemperatur ist. Es ist ersichtlich, daß der Wirkungsgrad um so besser wird, je niedriger die untere Temperatur T_u liegt.

Zur Aufrechterhaltung des Temperaturgefälles muß die Abwärme kontinuierlich aus dem Kondensator abgeführt werden. Hierzu dient das Kühlwasser. Bei Durchlaufbetrieb wird T_u von der Gewässertemperatur bestimmt. Diese kann erreicht werden bis auf eine Differenz, welche sich aus der Aufwärmspanne im Kondensator (üblicherweise 10 K) und der „Grädigkeit“ des Kondensators zusammensetzt.

Weniger günstig liegen die Verhältnisse bei den Rückkühlverfahren, bei denen der Kühltemperatur durch die atmosphärischen Bedingungen (Feuchtkugeltemperatur bei nassem bzw. Lufttemperatur bei trockenem Kühlturm) eine untere Schranke gesetzt ist, welche bis auf einen „Kühlgrenzabstand“ erreicht werden kann. Hieraus resultieren untere Prozeßtemperaturen T_u , welche stets höher liegen als die entsprechenden Werte bei Frischwasserkühlung, was zwangsläufig zu einer Verminderung des thermischen Wirkungsgrades führt [1].

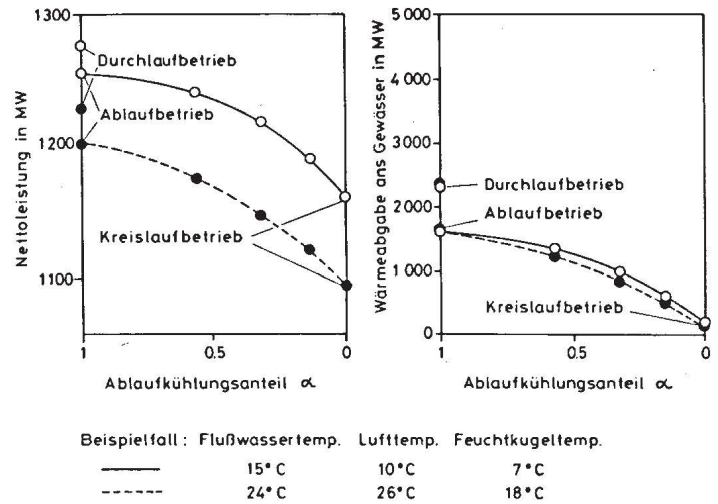


Bild 2: Elektrische Nettogleistung und Wärmeabgabe ans Gewässer im Fall eines 1300 MW-LWR-Kernkraftwerks mit Naturzugkühlturm in Abhängigkeit von der Kühlart nach Kinzelbach [1]

Hieraus ist offensichtlich, daß die Wahl des Kühlsystems einen signifikanten Einfluß auf den Wirkungsgrad der Stromerzeugung ausübt. Die Einbuße an elektrischer Leistung gegenüber Frischwasserkühlung (einschließlich des Eigenverbrauchs für Kühlturmpumpen etc.) liegt bei nasser Rückkühlung im Bereich von 4–6% und bei trockener Rückkühlung im Bereich von 8–10%. Bild 2 zeigt am Beispiel eines 1300 MW LWR-Kernkraftwerks mit Naturzugkühlturm bei fest vorgegebenen Bedingungen, welche Änderungen der erzeugten Nettogleistung bzw. der an das Gewässer abgegebenen Abwärme durch die verschiedenen Betriebsarten des Kühlsystems verursacht werden. Man beobachtet einen Leistungsrückgang beim Übergang von Frischwasser- auf Ablaufkühlung sowie einen weiteren Rückgang bei Mischbetrieb (teils Ablauf-, teils Kreislaufbetrieb) mit abnehmendem Ablaufanteil, bis schließlich beim reinen Kreislaufbetrieb die geringste Nettogleistung (mit gleichzeitig der geringsten Gewässerbelastung) erreicht wird.

4 Grundgedanke der Kühlregie

Die Zielsetzung einer wirtschaftlichen Stromerzeugung bedingt nach den obigen Ausführungen, daß Wärmekraftwerke mit variablem Kühlsystem so lange wie möglich im Frischwasserbetrieb fahren sollten, da hierbei die erzeugte Nutzleistung bei vorgegebenem Primärenergieeinsatz am größten wird. Der Einsatz von Frischwasserkühlung wird jedoch durch die Einleitungsbestimmungen beschränkt, welche das Wärmeabfuhrvermögen eines Flusses bestimmen und somit die zulässige Einleitungswärmemenge festlegen (Bild 3). Diese hängt jedoch nicht nur von Abfluß und Wetterbedingungen ab, sondern auch von der bereits vorhandenen Wärmefracht, also von der thermischen Vorbelastung durch Oberlieger (Bild 3). Insofern ist die Betriebsweise des Kraftwerks direkt mit abhängig von der Betriebsweise der Oberlieger. Bilden mehrere Abwärmeeinleiter mit variablen Kühlsystemen an einem Fluß eine „Kraftwerkskette“, dann kann die jeweilige Be-

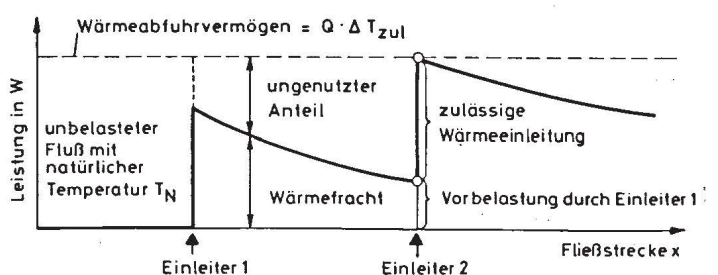


Bild 3: Zur Definition von Wärmeabfuhrvermögen und Wärmefracht

triebsweise gegenseitig so abgestimmt werden, daß das gesamte System hinsichtlich einer vorzugebenden Zielfunktion optimiert wird.

Eine denkbare Zielfunktion wäre beispielsweise die maximale Ausnutzung des Wärmeabfuhrvermögens des Vorfluters. Sinnvoller erscheint es jedoch, die gesamte Nettoleistung der Kraftwerkskette zu maximieren. Bei konstantem Primärenergieeinsatz bedeutet dies, daß die anfallende Abwärme minimiert wird – sie nimmt um den Betrag ab, um den die Nettoleistung wächst. Weiterhin wird mit dieser Zielfunktion die Einsatzzeit des vollen Kreislaufbetriebs mit ihren zusätzlichen Nachteilen wie Eintrag von Kühlwasserzusatzstoffen über das Abschlämmwasser oder erhöhter Verdunstung minimal gehalten.

Auch verschiedene Bewertungen der Auswirkungen des Kühlturbetriebs an verschiedenen Standorten können, soweit sie quantifizierbar sind, mit in die Zielfunktion aufgenommen werden. So könnte beispielsweise für Standorte in Weinbaugebieten der Kühlturbetrieb in bestimmten Jahreszeiten mit einem entsprechenden Malus versehen werden. In ähnlicher Weise ließen sich Gesichtspunkte der Gewässergüte (beispielsweise Sauerstoffhaushalt) oder der Betriebswirtschaft (Kostenstruktur der Regieteilnehmer) in der Zielfunktion mit berücksichtigen.

5 Numerisches Entscheidungsmodell

Entscheidungsmodelle zur Ermittlung der optimalen Kühlstrategie für eine Kraftwerkskette basieren auf den oben genannten Überlegungen. Für die Zielfunktion einer maximalen Nettoleistung hat Kinzelbach [1] ein solches Modell entwickelt. Es enthält folgende Komponenten:

- Eingangsdaten: Wetter, Abfluß, natürliche Wassertemperatur (insgesamt 12 Tagesmittelwerte).
- Eindimensionales Flußmodell zur Bestimmung des Verlaufs der natürlichen Temperatur T_N und der Aufwärmung ΔT . Hierbei werden Fahlenbildung, Totwasserzonen und Längsdispersion vernachlässigt ("plug flow"). Die Zulässigkeit dieser Vereinfachungen für das vorliegende Problem wurde nachgewiesen.
- Modelle von Kraftwerken und Kühlsystemen zur Berechnung der elektrischen Nettoleistung und der Wärmeabgabe

an das Gewässer für jeden Standort und alle Kühlvarianten.

- Optimierungsverfahren nach dem Prinzip der dynamischen Optimierung zur stufenweisen Entscheidungsfindung der jeweiligen Kühlbetriebsweise an den einzelnen Standorten.

Dem Modell liegt folgende Vorstellung zugrunde: Täglich startet ein Wasserpaket von 24 Stunden Fließdauer an der oberstromseitigen Modellbegrenzung und bewegt sich unter Beibehaltung seiner prismatischen Form zu Tal. Es ist charakterisiert durch den mittleren Abfluß für diesen Tag. Seitliche Zuflüsse entlang des betrachteten Flußabschnitts bewirken eine entsprechende Vergrößerung des Wasserpakets.

Das Wasserpaket startet mit einer natürlichen Temperatur am Modellanfang und würde bei Abschaltung aller Wärmeeinleiter mit einer um ein bestimmtes Maß veränderten natürlichen Temperatur am Modellende ankommen. Der Verlauf dieser hypothetischen natürlichen Wassertemperatur wird als linear entlang des Flußlaufs angenommen.

Jeder feste Wärmeeinleiter versieht das Wasserpaket mit einer thermischen Vorbelastung, die sich in Fließrichtung zufolge der Wärmeabgabe an der Oberfläche nach den Gesetzmäßigkeiten des Modells für die Aufwärmespanne verringert. Für die Nebenflüsse kann je nach örtlichen Gegebenheiten eine thermische Vorbelastung zufolge der Temperaturdifferenz zwischen Zufluß und Hauptfluß angesetzt werden.

Für die Einleiter mit variablem Kühlsystem wird jeweils für das 24-Stunden-Intervall, in dem das Wasserpaket passiert, unter Verwendung der dann herrschenden Luftbedingungen und Wassertemperatur für jede Kühlbetriebsart die elektrische Nettoleistung sowie die Wärmeabgabe an das Wasser bestimmt. Aus allen möglichen Einleitungskombinationen wird nun unter Berücksichtigung der Temperaturkriterien mittels dynamischer Optimierung die optimale Kühlstrategie gesucht. Die Entwicklung der durch die variablen Einleiter verursachten Aufwärmespanne wird wiederum mit Hilfe des Flußmodells berechnet.

Die Entscheidung wird alle 24 Stunden für ein neues Wasserpaket getroffen. Da die Kühlsysteme aus betriebstechnischen Gründen höchstens einmal pro Tag umgeschaltet werden können, stellt diese Folge die größtmögliche zeitliche Auflösung dar.

Kühlvariante	ΔT_{\max} in K	Jahresnettostramerzeugung			Häufigkeit der Überschreitung von ΔT_{\max} in %
		[MWh]	bezogen auf 100% Durchlaufkühlung %	Δ %	
100% Durchlaufkühlung	3	2.571.271	100	0	78
100% Rückkühlung (Biblis A Ablaufkühlung)	3	2.359.990	91.8	-8.2	5
Regie 1: Maximale Gesamtnettoleistung	3	2.515.009	97.8	-2.2	5
Regie 2: Max. Ausnutzung des Wärmeabfuhrvermögens	3	2.507.712	97.5	-2.5	5
Konservative Abfluß-Entscheidungsregel	3	2.444.814	95.1	-4.9	5
Realistische Abfluß-Entscheidungsregel	3	2.504.796	97.4	-2.6	14
Regie 1 mit $\Delta T_{\max} = 4$ K	4	2.557.934	99.5	-0.5	0
Regie 1 mit $\Delta T_{\max} = 5$ K	5	2.568.594	99.9	-0.1	0

Bild 4: Vergleich verschiedener Kühlregien für den Oberrhein zwischen Aaremündung und Mainz. Modellrechnungen von Kinzelbach [1] mit den Abfluß- und Wetterdaten des Jahres 1967

6 Anwendung auf das Beispiel Oberrhein

Kinzelbach [1] hat das von ihm entwickelte Modell auf den Oberrhein zwischen Aaremündung und Mainz angewendet, um dort die Möglichkeiten einer Kühlstrategie für die drei geplanten bzw. existierenden Großeinleiter Kernkraftwerk Süd (Wyhl), Philippsburg und Biblis auszutesten, die alle mit variablen Kühlsystemen und getrennt schaltbaren Blöcken versehen sind. Für die Simulationsrechnungen wurden historische Abfluß- und Wetterdaten des Jahres 1967 zugrunde gelegt, für Kontrollzwecke wurden Daten des Jahres 1963 verwendet. Die Ergebnisse sind tabellarisch in *Bild 4* zusammengestellt. Hieraus wird ersichtlich, daß bei ausschließlicher Rückkühlung eine Leistungseinbuße von 8,2% in Kauf genommen werden müßte, wobei immer noch an 5% der Zeit die vorgegebenen Temperaturkriterien (durch die anderen, nicht variablen Einleiter) verletzt würden. Mit Hilfe der Kühlregie kann die Leistungseinbuße auf 2,2% reduziert werden, ohne dadurch die Überschreitungshäufigkeit zu steigern. Bei einer Anhebung der zulässigen Aufwärmspanne beispielsweise auf 4 K würde die Leistungseinbuße auf 0,5% ohne Temperaturüberschreitungen reduziert.

Die Durchführung einer Kühlregie in Echtzeit würde die Kenntnis der Eingabeparameter über eine Zeitspanne von 2 bis 4 Tagen im voraus sowie eine zentrale Steuerung voraussetzen. Angestrebt wird jedoch ein möglichst einfaches, praktisches Kühlreglement für alle Einleiter. Für dieses Ziel liefert das komplexe Kühlregiemodell das theoretische Optimum, an dem sich dann praktische Einleitungsvorschriften hinsichtlich Nettostromerzeugung und Häufigkeit der Überschreitung der Temperaturkriterien messen müssen.

Eine zufriedenstellende Einleitungsvorschrift läßt sich in Abhängigkeit vom Abfluß am jeweiligen Standort herleiten [1]. Derartige sehr einfache Entscheidungsregeln wurden (a) konservativ und (b) realistisch an die durch die optimale Kühlstrategie vorgegebenen Daten angepaßt. Während im konser-

vativen Fall eine Leistungseinbuße von 2,7% gegenüber der optimalen Strategie ohne Steigerung der Überschreitungshäufigkeit des Temperaturkriteriums auftritt, kann mit der realistischen Entscheidungsregel die Leistungseinbuße auf 0,4% reduziert werden. Dies wird allerdings mit einer Steigerung der Überschreitungshäufigkeit von 5 auf 14% der Zeit erkauft, wobei jedoch die zusätzlich auftretenden Überschreitungen der Temperaturkriterien maximal 0,25 K betragen.

Schrifttum

- [1] Kinzelbach, W.: Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein, Heft 44, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, 1978.
- [2] Zimmermann, C., H. Kobus: Wärmebelastung und Wärmeabfuhrvermögen eines Flusses, *Energie* 7/8, 1973.
- [3] Zimmermann, C., H. Kobus, P. Geldner: Wärmeeinleitung in Strömungen, Technischer Verlag Resch KG, Gräfelfing bei München, 1975.
- [4] Bundesanstalt für Gewässerkunde: Untersuchungen über den Einfluß von Warmwassereinleitungen auf die Gewässer, T2/011 – Wasser 8/69/6917, 1976.
- [5] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastung von Gewässern, 2. verbesserte Auflage, 1977.
- [6] Kernforschungszentrum Karlsruhe: Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland. Teil IV: Umweltauswirkungen von Kernkraftwerken und Anlagen des kerntechnischen Brennstoffkreislaufs, KfK 2704, Oktober 1978.
- [7] Fortak, H.: Über die thermische Belastung der Atmosphäre insbesondere durch Kraftwerk-Parks, in: Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Ableitung von Kühlturmwärme aus Kraftwerken, Düsseldorf 1977.
- [8] Deutsche Forschungsgemeinschaft: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Harald Bold Verlag, Boppard, 1979.

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. H. Kobus, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaidring 61, 7000 Stuttgart 80