

# Wärmebelastung und Wärmeabfuhrvermögen eines Flusses

## 1. Einführung

Die Frischwasserkühlung, bisher kostengünstigstes Verfahren der Abwärmebeseitigung aus Kraftwerken, ist wegen der zunehmenden Zahl und Größe der Kraftwerke weitgehend auf die größeren Flüsse beschränkt. Um zu einer einheitlichen Beurteilung der hier auftretenden Probleme zu gelangen, wurden im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins Grundlagen für die Beurteilung von Wärmeeinleitungen erarbeitet [16]. Zugleich wurde ein Wärmelastplan für den Rhein als dem am stärksten betroffenen Fluß erstellt und 1971 veröffentlicht [2, 17]. Auch für die übrigen großen Flüsse Deutschlands werden Wärmelastpläne erarbeitet.

Der „Wärmelastplan Rhein“ geht von den natürlichen Temperaturverhältnissen des Flußlaufs von der Aare-Mündung bis zur niederländischen Grenze aus, die anhand einer Wärmebilanz aus den Wärmeaustauschvorgängen errechnet werden, und addiert hierzu die Temperaturerhöhungen aus den geplanten Wärmeeinleitungen. Bei lang anhaltenden Niedrigwasser- und Schönwetterperioden zeigt die Berechnung erhebliche Überschreitungen der zulässigen Temperaturgrenzen auf. Deshalb wird bei allen künftigen Kraftwerken am Rhein der Bau von Kühltürmen vorgeschrieben, um in Krisenzeiten die Wärmebelastung verringern zu können.

Die Häufigkeit der dem Rechenverfahren zugrunde gelegten Situationen ist nach dem Wärmelastplan mit maximal einem Tag pro Jahr anzusetzen. Kraftwerksbetreibern und Behörden stellt sich daher die Frage, wie groß Wärmeeinleitungen während eines Jahres oder in bestimmten Zeitabschnitten sein können, wie oft Kühlanlagen in Betrieb genommen werden müssen und wann es etwa unwirtschaftlich wird, die Anlagen gleichzeitig für einen Betrieb mit Frischwasserkühlung und Rückkühlung auszubauen. Daher wird versucht, das tatsächliche „Wärmeabfuhrvermögen“ eines Flusses zu bestimmen. Als Beispiel wird unter Verwendung der im Wärmeleitplan erarbeiteten Grundlagen das Wärmeabfuhrvermögen des Rheins angegeben.

## 2. Temperaturen und Wärmebelastung eines Flusses

Wegen der vereinfachten Rechnung und mangels ausreichender Grundlagen geht man bisher von sofortiger vollständiger Durchmischung von Fluß- und Kühlwasser aus. Die Mischtemperatur  $T_M$  errechnet sich aus

$$T_M = T_0 + \Delta T = T_0 + \frac{Q_K}{Q_F} (T_K - T_0) \quad (1)$$

$Q_K$  = Kühlwassermenge

$Q_F$  = Flußwassermenge

$\Delta T$  = Aufwärmspanne

$T_K$  = Temperatur des erwärmten Kühlwassers

$T_0$  = Temperatur oberhalb der Einleitung

Die Temperatur  $T_0$  entspricht der natürlichen Temperatur  $T_N$ , falls nicht schon stromauf Erwärmungen erfolgten. Zur Vermeidung von Störungen des biologischen Gleichgewichts und zur Gewährleistung einer ausreichenden Wasserqualität muß sowohl die Aufwärmspanne  $\Delta T$  als auch die Maximaltemperatur des Flusses begrenzt werden:

$$\Delta T \leq \Delta T_{\max} \\ T_M = T_N + \Delta T \leq T_{\text{grenz}}$$

Die Gesichtspunkte, die bei der Festlegung dieser Einschränkungen berücksichtigt werden müssen, und die sich ergebenden zulässigen Grenzwerte für die BR Deutschland sind in [16] zusammengestellt. Hieraus ergeben sich für sommerwarme Fließgewässer — die Kategorie, unter die die meisten größeren deutschen Flüsse fallen, so auch der Rhein unterhalb von Maxau — die Grenzwerte

$\Delta T_{\max} = 5$  grad über der natürlichen Temperatur  $T_N$ ;

$\Delta T_{\text{grenz}} = 28$  °C

Weiterhin ist die Temperatur des eingeleiteten Kühlwassers  $T_K$  vor der Durchmischung auf max. 30 °C beschränkt.

Angaben für die natürliche Temperatur  $T_N$  eines Flusses liefern langjährige Meßreihen. Fehlen diese, oder sind bereits Wärmeeinleitungen vorhanden, so muß eine Bezugstemperatur aus Vergleichs- oder Simulationsrechnungen ermittelt werden. Die maximal erlaubte Aufwärmspanne  $\Delta T_{\max}$  kann demnach nur ausgenutzt werden, solange die Ausgangstemperatur  $T_0$  noch um  $\Delta T_{\max}$  unter der Grenztemperatur liegt. Bild 1 zeigt eine Ganglinie der Flußtemperatur für ein Abflußjahr mit den Temperaturgrenzwerten. Danach würde die obere Temperaturgrenze nur kurzzeitig im Juli erreicht, so daß die Einschränkung der zulässigen Aufwärmspanne auf weniger als 5 grad nur während weniger Tage erforderlich wäre.

Der Zeitanteil, während dessen eine volle Ausnutzung der maximal erlaubten Aufwärmspannen nicht möglich ist, kann

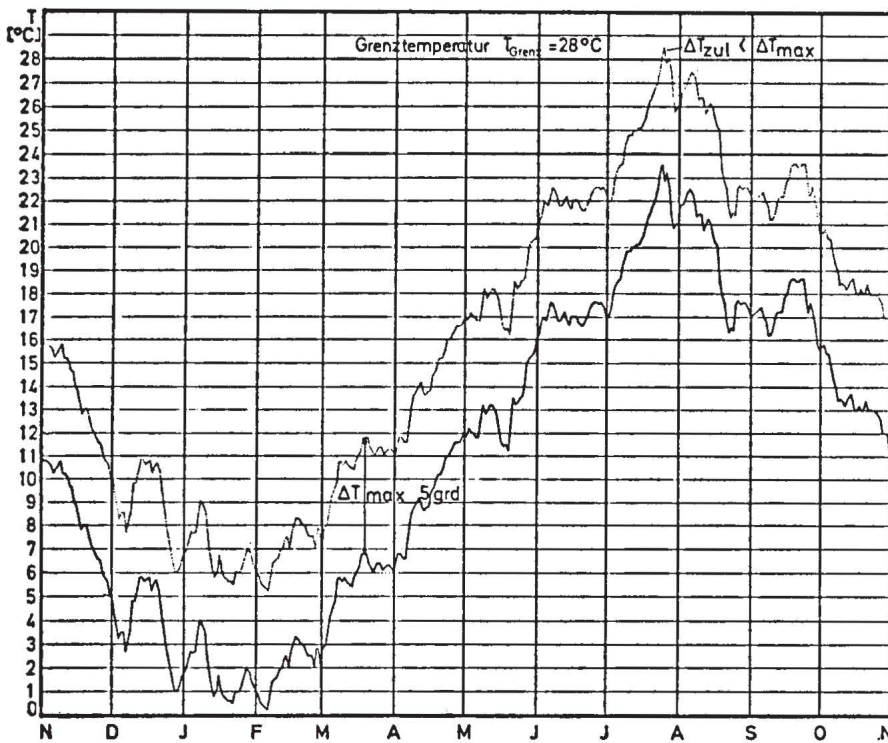


Bild 1: Jahresganglinie der Flußwassertemperatur mit Grenzwerten für eine künstliche Erwärmung (Rhein bei Maxau, 1963)

aus einer Temperaturdauerlinie, Bild 2, entnommen werden.

Vielfach ist es anschaulicher, statt der Temperaturen die Wärmelast  $w$  je Volumeneinheit zu verwenden,

$$w = \rho_w c_w T \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right] \quad (2)$$

$\rho_w$  = Dichte des Wassers ( $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ )

$c_w$  = spezifische Wärme des Wassers ( $\approx 1 \text{ kcal/kg} \cdot \text{grad}$ )

$T$  = Wassertemperatur in  $^{\circ}\text{C}$

Die Wärmelast  $w$  setzt sich zusammen aus der natürlichen Wärme­fracht  $w_N$ , die in Fließgewässern i. a. gleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist, und einer künstlichen Wärmelast  $w_L$  aufgrund einer Temperaturerhöhung  $\Delta T$ :

$$w = w_N + w_L = \rho_w c_w (T_N + \Delta T) \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right] \quad (3)$$

Die künstliche Wärmelast  $w_L$  ist meist ungleichmäßig über den Flußquerschnitt verteilt, da die Ausbreitung des erwärmten Wasser wesentlich abhängt von [9]:

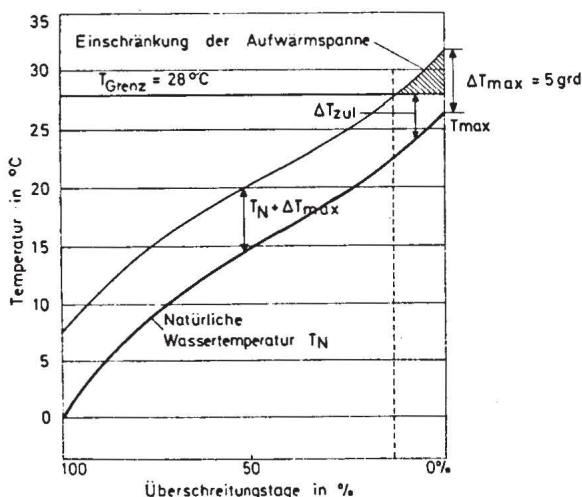


Bild 2: Schematische Darstellung einer Dauerlinie der natürlichen Wassertemperatur

- vom Verhältnis Flußwassermenge  $Q_F$  zu Kühlwassermenge  $Q_K$
- von der Einleitungs- und Fließgeschwindigkeit im Fluß
- von der Temperaturdifferenz
- von Ausbildung und Anordnung des Einleitungsbauwerkes
- von der Topografie des Flußlaufes
- von der Form des Flußquerschnitts.

Die künstliche Wärmelast  $w_L$  wird vor allem dann ungleichmäßig verteilt sein, wenn das Entnahmeverhältnis  $Q_K/Q_F$  sehr viel kleiner als Eins ist. Bei großen und breiten Flüssen wäre es z. B. sinnvoll, die (jeweils über die Wassertiefe integrierte) Wärmelast je Breitereinheit zu betrachten, um hieraus eine bessere Definition und Abgrenzung für sogenannte „Opferstrecken“ [16] entlang der Uferzone zu erreichen.

### 3. Das Wärmeabfuhrvermögen eines Flusses

Mit der Angabe von Grenzen für Temperaturerhöhungen oder von künstlichen Wärmelasten ist vom wasserwirtschaftlichen Standpunkt die mögliche Belastung eines Flusses durch Abwärme zu jedem Zeitpunkt festgelegt. Das jeweils zulässige Aufnahmevermögen von Abwärme, das den Kraftwerksbetreiber interessiert, ergibt sich hieraus jedoch erst durch Berücksichtigung der Abflußmenge  $Q$  je Zeiteinheit. Aus Gl. (3) ergibt sich (bei gleichmäßiger Verteilung über den Flußquerschnitt) die Beziehung

$$W = W_N + W_A = \rho_w c_w T_0 Q + \rho_w c_w \Delta T Q \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{sec}} \right] \quad (4)$$

Das so definierte Wärmeabfuhrvermögen  $W_A$  eines Fließgewässers gibt die Wärmemenge je Zeiteinheit an, die der Fluß über die vorhandene Wärme­fracht  $W_N$  hinaus zusätzlich aufnehmen kann. Somit ist das Wärmeabfuhrvermögen  $W_A$  nicht nur durch die zulässige Aufwärmspanne  $\Delta T$  begrenzt, sondern auch durch die jeweils verfügbare Wassermenge  $Q$  je Zeiteinheit. Für Anlagen mit ausschließlicher Frischwasserkühlung kann demnach nur ein Wärmeabfuhrvermögen angesetzt werden, dem die kleinste ständig verfügbare Wassermenge zugrunde gelegt wird, d. h. ein Niedrigwasser:

$$W_{A \text{ 100 Prozent}} = \rho_w c_w \Delta T_{zul} Q_{100 \text{ Prozent}} \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{sec}} \right] \quad (4a)$$

Geht die laufend erzeugte Abwärme über dieses Wärmeabfuhrvermögen hinaus, so müssen Kühleinrichtungen in Betrieb genommen werden, wie dies an kleineren Flüssen bereits geschieht.

Für eine Einleitungsstelle an einem Fluß kann somit aus der Abflußdauerlinie sowohl das minimale Wärmeabfuhrvermögen für ausschließliche Frischwasserkühlung als auch das Wärmeabfuhrvermögen, das nur während begrenzter Zeit zur Verfügung steht, direkt bestimmt werden. So beträgt das Wärmeabfuhrvermögen in Bild 3 bei Niedrigwasser für eine Aufwärmspanne von  $\Delta T = 5 \text{ grad} \sim 1500 \text{ Mcal/s}$ , während über die Hälfte der Zeit eine Wärmeabfuhr von  $\sim 6500 \text{ Mcal/s}$  möglich wäre. Für ein Kraftwerk mit Abwärmemengen von  $6500 \text{ Mcal/s}$  würde dies Kühlbetrieb für Abwärmemengen bis zu  $5000 \text{ Mcal/s}$  während eines halben Jahres bedeuten. Die Zusammenfassung entsprechender Dauerlinien entlang eines Flusses führt zu einem Plan nach Bild 4.

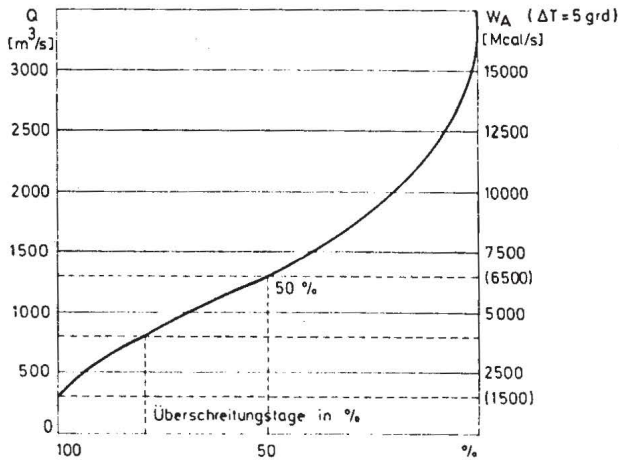


Bild 3: Beispiel einer Dauerlinie des Abflusses und des Wärmeabfuhrvermögens für eine Aufwärmspanne von  $\Delta T = 5$  grd. ohne Einschränkung durch Temperaturobergrenze

Dieser Plan setzt zunächst voraus, daß keine Verminderung des Wärmeabfuhrvermögens durch Erreichen von  $T_{\text{Grenz}}$  entsprechend Bild 1 und 2 vorhanden ist, oder daß diese vernachlässigbar klein ist. Müssen solche Einschränkungen in die Berechnung mit einbezogen werden, so ist ein direkter Vergleich der Ganglinien von Abfluß und Temperatur erforderlich, da die Dauerlinien keine Auskunft über die gegenseitige Zuordnung der jeweiligen Werte geben. In Bild 5 ist dieser Zusammenhang an einem Beispiel veranschaulicht; hieraus wird deutlich, daß z. B. für die willkürlich gewählten Grenzbedingungen  $\Delta T = 3$  grd und  $T_{\text{Grenz}} = 25$  °C die Einschränkungen der zulässigen Aufwärmspanne  $\Delta T$  im allgemeinen nicht bei Niedrigwasser auftreten und deshalb auch meist nicht für das Mindestwärmeabfuhrvermögen maßgebend sind — es sei denn, die zulässige Höchsttemperatur  $T_{\text{Grenz}}$  wird erreicht: in diesem Fall muß natürlich das Wärmeabfuhrvermögen gleich Null werden (siehe Bild 5). Die Auswirkungen einer Einschränkung des Wärmeabfuhrvermögens durch die Temperaturobergrenze sind ebenfalls in Bild 4 angedeutet.

#### 4. Verminderung der Wärmelast durch Abkühlung

Im allgemeinen wird durch die Einleitung von Abwärme in einen Fluß das Wärmeabfuhrvermögen  $W_A$  nur teilweise ausgenutzt. Man kann deshalb eine noch verfügbare Restkapazität  $W_C$  definieren als Differenz zwischen dem Abfuhrvermögen  $W_A$  des Flusses und der tatsächlichen Wärmebelastung  $W_L$ :

$$W_C = W_A - W_L \quad (5)$$

Die Wärmelast  $W_L$  wird unter entsprechenden Witterungsbedingungen durch einen Wärmeaustausch mit der Atmo-

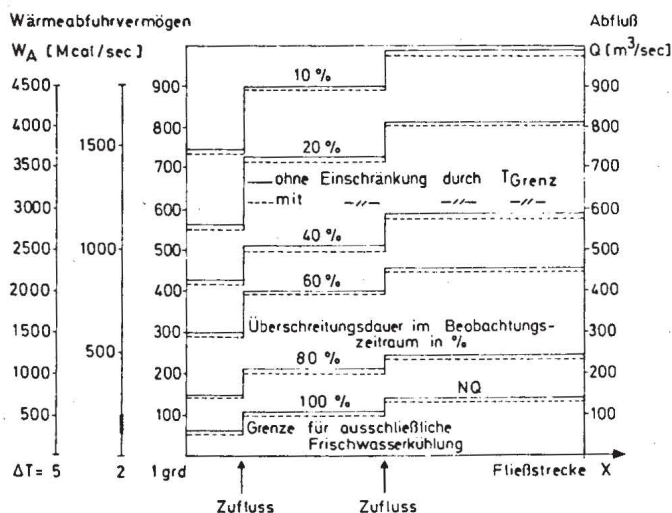


Bild 4: Das Wärmeabfuhrvermögen eines Flusses für Aufwärmspannen von  $\Delta T = 5, 2, 1$  grd.

sphäre im Lauf der Zeit oder mit zunehmendem Abstand von einer Einleitungsstelle abnehmen. Diese Abkühlung kann über eine Wärmebilanz für einen Wasserkörper berechnet werden, die die einzelnen Komponenten des Wärmeaustausches, wie Verdunstung, Wärmeleitung, Strahlung usw. berücksichtigt [1, 2]. Eine vereinfachte Methode ist die Anwendung eines exponentiellen Abkühlgesetzes [16] der Form

$$T(x) - T_G = (T_M - T_G) \cdot e^{-\frac{Kt}{2w c_w Y}} \quad [\text{grd}] \quad (6)$$

$T(x)$  = Temperatur an einer Stelle  $x$  unterhalb der Kühlwassereinleitung [°C]

$T_G$  = Gleichgewichtstemperatur [°C]

$t$  = Zeit [h]

$y$  = Wassertiefe [m]

$K$  = Wärmeaustauschkoeffizient  $\left[ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{grd}} \right]$

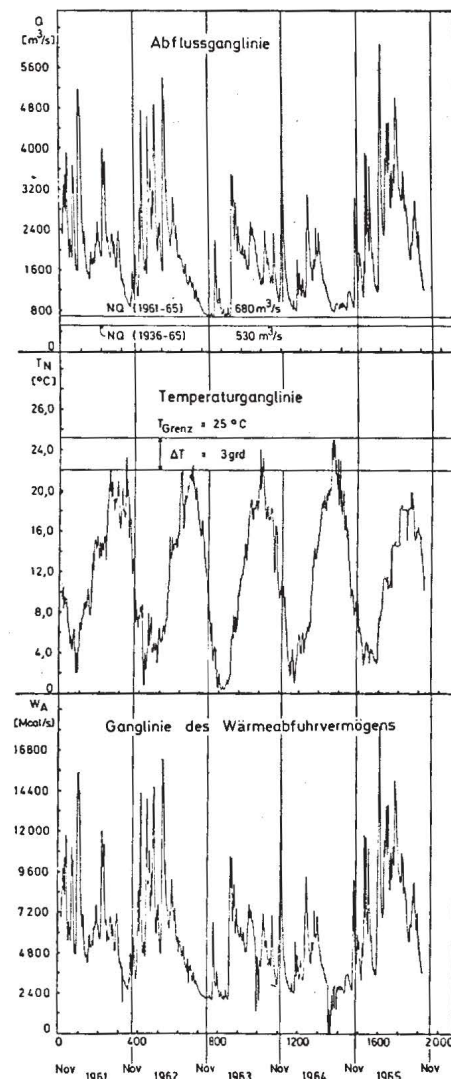


Bild 5: Ganglinien des Abflusses, der Temperatur und des Wärmeabfuhrvermögens für einen Zeitraum von 5 Jahren (Rhein bei Köln 1961—1965)

Der Wärmeaustauschkoeffizient  $K$  erfaßt global die Einflüsse von Strahlung, Konvektion und Verdunstung und ist wesentlich von Windgeschwindigkeit, Dampfdruckdifferenz und Wassertemperatur abhängig.

Dem exponentiellen Abkühlgesetz liegt eine lineare Abhängigkeit des Wärmeaustausches von der Differenz zwischen der gemessenen Temperatur und der Gleichgewichtstemperatur zugrunde, die strenggenommen nur bei geringen Differenzen zutrifft, für Abschätzungen jedoch ausreichend genau ist. Wie Gl. (6) zeigt, ist die Kenntnis der Gleichgewichtstemperatur  $T_G$  des Gewässers von entscheidender



Die Streuung der K-Werte für einzelne Gewässer und die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gewässern verdeutlichen die Problematik der Bestimmung des Austauschkoefizienten vor allem hinsichtlich der Übertragbarkeit auf Gewässer anderer Regionen. Für die Wärmebelastung und die nutzbare Restkapazität eines Flusses ist die genaue Kenntnis der Austauschvorgänge von Bedeutung. Schließlich liegt der vereinfachten Betrachtung der Abkühlung mit Hilfe eines Exponentialgesetzes eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Fluß zugrunde, die selten gegeben ist: tatsächliche, ungleichmäßige Temperaturverteilungen mit örtlich höheren Oberflächentemperaturen würden zu einem beschleunigten Wärmeaustausch führen und machen daher die hier dargestellte Überschlagsrechnung konservativ.

Um zu demonstrieren, welche Auswirkungen die Annahmen für den Wärmeaustauschkoefizienten auf die Wärmelast haben, wurden für den in Tabelle 1 angegebenen Bereich die jeweiligen Halbwertstrecken  $h_{\Delta T/2}$  errechnet. Ausgehend (für das Beispiel des Rheins) von einer mittleren Wassertiefe von 2,50 m und einer Fließgeschwindigkeit von 1,50 m/s ergaben sich hieraus je nach Größe des Wärmeaustauschkoefizienten Abkühlstrecken zwischen 25 und 250 km. Die Auswirkungen dieser unterschiedlich großen Abkühlstrecken

Tabelle 2: Abflüsse der Jahresreihe 1961—65 an den Pegeln Köln und Maxau, für die eine Aufwärmspanne von  $\Delta T = 5$  grad. nicht möglich ist, und tatsächliches Wärmeabfuhrvermögen

Pegel Köln	Abfluß Q	$\Delta T_{\text{möglich}}$	$W_A$	
	m <sup>3</sup> /s	grad.	10 <sup>3</sup> Mcal/s	
Niedrigstwasser (1936/65) = 680 m <sup>3</sup> /s	1 630	4,6	7,50	
	1 320	4,9	6,47	
	1 330	4,8	6,38	
	1 530	4,1	6,27	
	1 560	4,0	6,24	
	1 240	4,8	5,95	
	960	4,8	4,61	
	Q (100 % — 1961/65) = 830 m <sup>3</sup> /s	860	4,8	4,13
		840	4,6	3,86
		980	3,8	3,72
$W_A$ (100 % — 1961/65) = 2 520 Mcal/s tritt auf bei Q = 840 m <sup>3</sup> /s	910	4,0	3,64	
	950	3,8	3,61	
	850	4,2	3,57	
	880	3,9	3,43	
	900	3,6	3,24	
	820	3,8	3,12	
	840	3,7	3,11	
	830	3,5	2,90	
	830	3,3	2,74	
	910	3,0	2,73	
Einschränkung von $W_A$ während 22 Tagen = 1,2 %	830	3,2	2,66	
	840	3,0	2,52	
<hr/>				
Pegel Maxau	1 330	4,8	6,38	
	1 230	4,8	5,90	
Niedrigstwasser (1936/65) = 388 m <sup>3</sup> /s	1 210	4,5	5,44	
	745	4,6	4,43	
	685	4,7	3,22	
	650	4,9	3,19	
	650	4,8	3,12	
	660	4,7	3,10	
	Q (100 % — 1961/65) = 391 m <sup>3</sup> /s	660	4,7	3,10
		670	4,6	3,08
		723	4,2	3,04
		690	4,4	3,04
$W_A$ (100 % — 1961/65) = 1 955 Mcal/s tritt auf bei Q = 391 m <sup>3</sup> /s	690	4,4	3,04	
	680	4,4	2,99	
	723	4,1	2,97	
	685	4,2	2,88	
	690	3,7	2,56	
	670	3,8	2,55	
	675	3,7	2,50	
	Einschränkung von $W_A$ während 21 Tagen = 1,2 %	690	3,6	2,49
		685	3,3	2,26

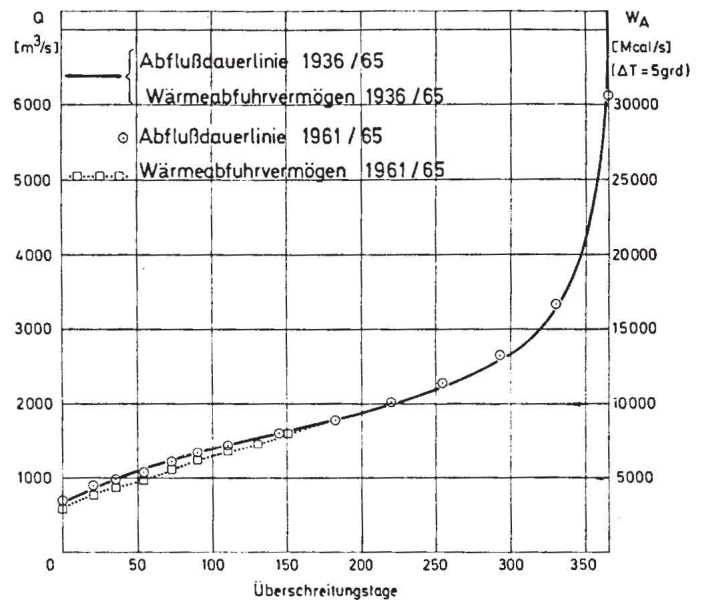


Bild 8: Abflußdauerlinien und Wärmeabfuhrvermögen der Jahresreihen 1936—1965 und 1961—1965 am Pegel Köln

auf die Wärmelast des Rheins für die Kraftwerksplanungen bis zum Jahr 1985 [17] sind — unter Vernachlässigung der Auswirkungen von Nebenflüssen — in Bild 7 dargestellt: hieraus zeigt sich, daß die Auswahl des Wärmeaustauschkoefizienten für die Berechnung der Wärmebelastung entscheidend ist.

### 5. Das Wärmeabfuhrvermögen des Rheins

Für diesen Fluß liegt weitgehend vollständiges Zahlenmaterial über die Wasserführung und die Temperaturverhältnisse vor [13]; die vorhandenen und geplanten Kraftwerke können aus dem Wärmelastplan Rhein [17] entnommen werden.

Zunächst wurde überprüft, mit welcher Häufigkeit eine erlaubte Aufwärmspanne  $\Delta T$  bei gleichzeitig vorhandener oberer Temperaturgrenze wegen zu hoher natürlicher Temperaturen nicht ausgenutzt werden kann.

Hierzu wurden die Temperaturganglinien der Pegel Maxau und Köln der 5-Jahresreihe 1961—65 für die maximal zulässige Aufwärmung auf  $T_{\text{grenz}} = 28$  °C und die Aufwärmspanne  $\Delta T = 5$  grad ausgewertet [3]. Diese Jahresreihe wurde gewählt, da erst ab 1961 vollständige Temperaturmessungen vorliegen [13, 14] und zudem die künstliche Wärmebelastung für diesen Zeitraum noch vernachlässigt werden kann. Die Ergebnisse nennt Tabelle 2. An beiden Pegeln ist nur während 1,2 % eines Jahres keine volle Ausnutzung der erlaubten Aufwärmspanne möglich. Es zeigt sich zudem, daß am Pegel Köln das Minimum des Wärmeabfuhrvermögens wegen der Temperaturobergrenze nicht mit dem Minimum des Abflusses (830 m<sup>3</sup>/s) zusammenfällt, sondern im Beobachtungszeitraum bei einem Abfluß von 840 m<sup>3</sup>/s auftritt.

Aus Bild 8 wird deutlich, daß das Wärmeabfuhrvermögen durch die Temperaturobergrenze nur unwesentlich eingeschränkt wird. Somit kann für die Abschätzung des Wärmeabfuhrvermögens des Rheins die einschränkende Bedingung einer Temperaturobergrenze vernachlässigt, und die Abflußdauerlinie des größeren Zeitraumes von 30 Jahren verwendet werden.

Die Auswertung der Abflußdauerlinien 1936—65 aller Pegel entlang des Rheins von der Aaremündung bis zur niederländischen Grenze für eine Aufwärmspanne von 3 bis 5 grad oberhalb von Lauterburg und 5 grad unterhalb, ergibt das Wärmeabfuhrvermögen nach Bild 9.

Danach liegen die ausschließlich über Frischwasserkühlung abführbaren Abwärmemengen zwischen rund 950 Mcal/s oberhalb Schwörstadt und etwa 3 400 Mcal/s am Nieder-

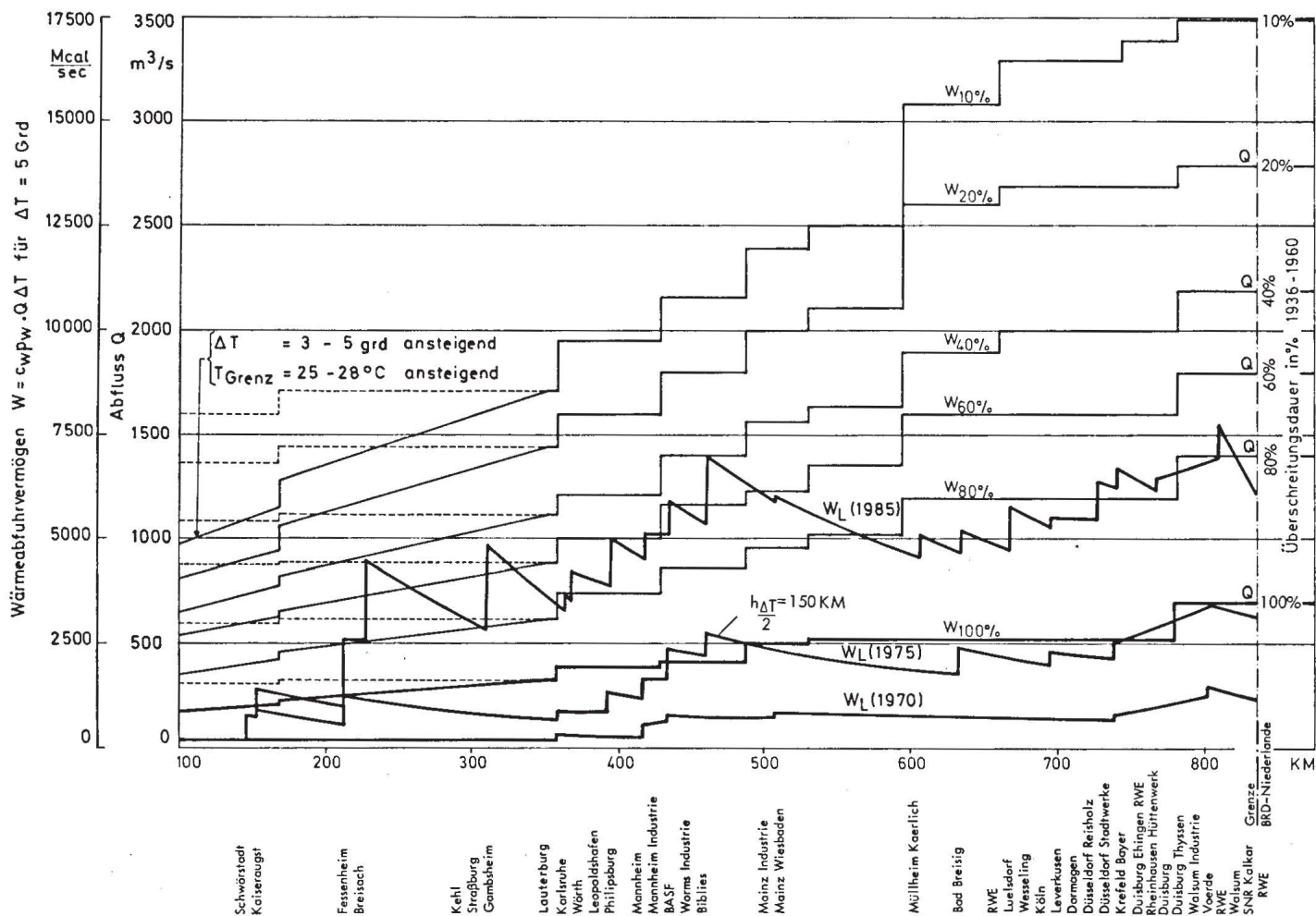


Bild 9: Das Wärmeabfuhrvermögen des Rheins bei einer Aufwärmspanne von 5 Grd. und dessen Ausnutzung durch vorhandene und geplante Kraftwerke

rhein. Unter Zugrundelegung einer als konstant angenommenen Halbwertstrecke  $h_{\Delta T/2}$  von 150 km, wie sie sich aus den Wärmeaustauschkoeffizienten des Wärmelastplans Rhein ergibt, erscheint demnach möglich, die Wärmemengen der bis 1975 vorhandenen Kraftwerke ausschließlich mit Frischwasser zu kühlen. Dies würde bedeuten, daß die bei allen Neubauten vorgeschriebenen Rückkühlanlagen nicht in Betrieb genommen werden müssen. Ausnahmen liegen lediglich im Raum Mannheim—Biblis vor. Als Folge extremer Abwasserbelastung können andererseits auch Situationen auftreten, in denen die üblicherweise zugelassenen Höchsttemperaturen zu untragbaren Sauerstoffverhältnissen im Fluß führen und deshalb mit Rücksicht auf die Wasserqualität die Wärmeinleitungen reduziert werden müssen, wie sich im Jahr 1972 gezeigt hat.

Unter den gleichen Annahmen ließe sich die Abwärme aus den vorhandenen und geplanten Kraftwerken des Jahres 1985 unterhalb Mainz während 80 % eines Jahres über Frischwasser beseitigen und stromauf etwa bis zur Hälfte eines Jahres, was umgekehrt die Notwendigkeit der Inbetriebnahme von Rückkühlanlagen während 20 % bis 50 % eines Jahres bedeutet.

### 6. Schlußbemerkung

Die Entscheidung, ob eine ausschließliche Frischwasserkühlung für ein Kraftwerk möglich ist, erfordert eine genauere Untersuchung des Verlaufs der Flußtemperaturen, der Abflüsse und der Extremwerte beider Ganglinien über längere Zeiträume. Die Verhältnisse der vergangenen Jahre an den deutschen Flüssen scheinen jedoch die sehr ungünstige Annahme des Zusammentreffens hoher Temperaturen mit extremen Niedrigwasserperioden zu rechtfertigen. Zudem läßt die abnehmende Flußwasserqualität eine Entscheidung für Kühltürme, die vorübergehend den Sauerstoffhaushalt

im Fluß stützen können, in Zweifelsfällen immer geraten erscheinen. Anhand eines Wärmeabfuhrplanes kann dann entschieden werden, wann es für ein Kraftwerk unwirtschaftlich wird, gleichzeitig Anlagen für Frischwasserkühlung und Rückkühlbetrieb vorzusehen.

Die Voraussagen der Einsatzdauer der Frischwasserkühlung und des Verlaufs der Wärmebelastung entlang eines Flusses hängen entscheidend von den Kenntnissen über die Wärmeaustauschvorgänge an Wasseroberflächen und das hydraulische Verhalten eingeleiteten Kühlwassers ab, die bis heute noch sehr lückenhaft sind.

### Schrifttum

- [1] Becker, A.: Die thermische Belastbarkeit der Binnengewässer und die bei Durchflußkühlung eintretenden Nutzungsverluste. Bes. Mitt. z. Gewässerkundlichen Jahrbuch der DDR, Berlin 1964.
- [2] Flinspach, D.; Fleig, H.: Die Aufstellung von Wärmelastplänen durch rechnerische Simulation der Wärmetauschvorgänge. Die Wasserwirtschaft Nr. 5, 1972.
- [3] Geldner, P.: Die Problematik der Abwärbeseitigung bei steigender Energieerzeugung im Hinblick auf das begrenzte natürliche Wasserangebot in der BRD. Vertiefungsarbeit am Institut für Hydro-mechanik, Universität Karlsruhe, 1973 (unveröffentlicht).
- [4] Günneberg, F.: Abwärme in Gewässern. Deutsche Gewässerkundl. Mitteilung, Jg. 17, 1972, H. 1.
- [5] Krolewski, H.; Blanck, D.; Höft, H.: Rückkühlung bei konventionellen und nuklearen Kraftwerken. Atomwirtschaft, August 1972.
- [6] Kuhn, W.: Physikalisch-meteorologische Überlegungen zur Nutzung von Gewässern für Kühlzwecke. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 95—122, 1972.
- [7] Lucht, F.; Niss, J.: Untersuchungen über die Temperaturverteilung in einem Tidefluß nach dem Einleiten von warmem Kühlwasser. BWK Nr. 12, 1971.
- [8] Morse, W. L.: Stream Temperature Prediction under reduced Flow. Journal of the Hydraulics Division Proc. ASCE, June 1972 (HYG)
- [9] Naudascher, E.; Zimmermann, C.: Modellversuche über die Wärmebelastung eines Flusses durch ein Kernkraftwerk. ENERGIE, 1972, Nr. 1.

- [10] Parker, F. L.; Krenkel, P. A.: Thermal Pollution: Status of the Art. Department of Env. and Water Resources Eng., Vanderbilt University, Report No. 3, 1969.
- [11] Parker, F. L.; Krenkel, P. A.: Engineering Aspects of Thermal Pollution. Proceedings of the National Symposium on Therm. Pollution, Vanderbilt University Press, 1969.
- [12] Vischer, D.: Kühlwasserversorgung von Wärmekraftwerken (Grenzen der Durchlaufkühlung mit Flußwasser). Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, Nr. 5, 1972.
- [13] Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch — Rheingebiet —, Abflußjahre 1961 bis 1965. Landesamt f. Gewässerkunde Rheinland-Pfalz, Mainz.
- [14] Internationale Hydrologische Dekade, Jahrbuch. Bundesrepublik Deutschland 1965—1968. Bundesanstalt für Gewässerkunde und Deutsche Forschungsgemeinschaft, Koblenz.
- [15] Industrial Waste Guide on Thermal Pollution. US Department of the Interior, Sept. 1968.
- [16] Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastung von Gewässern. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Mainz 1971.
- [17] Wärmelastplan Rhein. Arge. der Länder zur Reinhaltung des Rheins, Wiesbaden 1971.
- [18] Environmental Aspects of Nuclear Power Stations. International Atomic Energy Agency, Proceedings of a Symposium, Wien 1971.
- [19] Probleme des industriellen Kühlwassers. Techn. Mitt. Nr. 5, Essen 1972.