

30,-- / 24,--

## WESTFÄLISCHE GEOGRAPHISCHE STUDIEN

Herausgegeben von der Geographischen Kommission für Westfalen, Münster, durch Wilhelm Müller-Wille und Elisabeth Bertelsmeier

---

34

JULIUS WERNER

### **Kraftwerksabwärme in der Hydrosphäre**

Physiogeographische Untersuchungen zur Benutzung von Oberflächengewässern der Bundesrepublik Deutschland für Kühlzwecke bei der Erzeugung elektrischer Energie

1977

---

Im Selbstverlag der Geographischen Kommission für Westfalen, Münster

# WESTFÄLISCHE GEOGRAPHISCHE STUDIEN

Herausgegeben von der Geographischen Kommission für Westfalen, Münster, durch Wilhelm Müller-Wille und Elisabeth Bertelsmeier

---

34

JULIUS WERNER

## **Kraftwerksabwärme in der Hydrosphäre**

Physiogeographische Untersuchungen zur Benutzung von Oberflächengewässern der Bundesrepublik Deutschland für Kühlzwecke bei der Erzeugung elektrischer Energie

1977

---

Im Selbstverlag der Geographischen Kommission für Westfalen, Münster

Bezug durch den Selbstverlag, 44 Münster (Westf.), Robert-Koch-Str. 26,  
Geographische Kommission (Institut für Geographie und Länderkunde)  
Schriftleitung: Dr. E. Bertelsmeier

---

Als Habilitationsschrift dem Fachbereich 19 Geowissenschaften der  
Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen  
Wilhelms-Universität zu Münster/Westf. vorgelegt im Dezember 1976

---

Druck und Klischees:  
C. J. Fahle GmbH, 44 Münster (Westf.), Neubrückenstraße 8—11

# Inhalt

	Seite
<b>1. Einleitung</b> . . . . .	1
1.1. Anlaß zur Aufnahme der Fragestellung und Ziele der Untersuchung . .	1
1.2. Energiebedarfsprognosen . . . . .	2
1.3. Zum gegenwärtigen Stand der Forschung . . . . .	3
<b>2. Abwärme als Faktum von Physik und Technik</b> . . . . .	7
2.1. Anmerkungen zur Abfallwärme bei thermischen Kreisprozessen . . . .	7
2.2. Die effektiven thermodynamischen Wirkungsgrade von Kraftwerks- anlagen . . . . .	8
2.3. Gegenwärtig angewandte Kühlverfahren und ihre Merkmale . . . . .	8
2.3.1. Die Frischwasser- oder Durchlaufkühlung . . . . .	8
2.3.2. Die Ablaufkühlung . . . . .	9
2.3.3. Nasse Kreislaufkühlung . . . . .	9
2.3.4. Trockene Kreislaufkühlung . . . . .	10
2.3.5. Naß-/Trockenkühlverfahren . . . . .	11
2.4. Folgerungen für die Eignung verschiedener Kühlverfahren zur Anergie- abgabe . . . . .	11
<b>3. Abwärme in Oberflächengewässern</b> . . . . .	13
3.1. Die Auswirkungen von Wärmeeinleitungen auf den Gewässerzustand . .	13
3.1.1. Biologisch-chemischer Zustand . . . . .	13
3.1.2. Auswirkungen auf Mikroklima, Schifffahrt und Erholungseignung . . . .	14
3.1.3. Folgerungen für die Festlegung von Wassertemperatur-Obergrenzen . .	14
3.2. Die Kühlleistung freier Wasserflächen . . . . .	15
3.2.1. Ein Beitrag zur quantitativen Ermittlung der Wärmeabgabe offener Wasserflächen . . . . .	15
3.2.1.1. Die Bestimmungsgleichungen für den Wärmehaushalt eines Wasser- körpers . . . . .	16
3.2.1.2. Aufbau und Funktion des „Halterner Simulationsmodells“ . . . . .	19
3.2.1.3. Errechnete Wassertemperaturen bei simulierter Abwärmeeinleitung . .	24
3.2.1.4. Die Wärmeabgabekoeffizienten bei Erhöhung der natürlichen Wasser- temperatur um 3 K . . . . .	30
3.2.1.5. Vergleich der zugrundeliegenden Meßreihen mit langjährigen Mittel- werten . . . . .	33
3.2.1.6. Anmerkungen zum spezifischen Wasserverbrauch bei Durchlaufkühlung	36
3.2.1.7. Temperaturgradienten in Gewässern, die zur Anergieabgabe benutzt werden . . . . .	37
3.2.2. Folgerungen für die Beurteilung des Wärmeabgabevermögens von Ober- flächengewässern der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	38
3.3. Die nutzbaren Frischwasser-Kühlkapazitäten der größeren Flüsse der Bundesrepublik Deutschland aufgrund vorliegender Wärmelastrechnun- gen . . . . .	41
3.4. Das Ergebnis . . . . .	46

	Seite
<b>4. Anergieabfuhr durch Naßkühltürme . . . . .</b>	<b>47</b>
4.1. Die Auswirkungen des Betriebes von Naßkühltürmen auf die Umwelt . . . . .	47
4.2. Der Abfluß der Bundesrepublik und die Möglichkeiten seiner Nutzung für nasse Kreislaufkühlung . . . . .	48
4.2.1. Anmerkungen zum spezifischen Wasserverbrauch bei nasser Kreislaufkühlung . . . . .	48
4.2.2. Die kritische Wasserführung der Flüsse als begrenzender Faktor . . . . .	50
4.3. Folgerungen . . . . .	52
<b>5. Der „aktive Kühlteich“ — ein zusätzlicher Lösungsweg? . . . . .</b>	<b>53</b>
5.1. Experimentelle Voruntersuchungen . . . . .	53
5.1.1. Die Grundidee . . . . .	53
5.1.2. Der vorläufige Lösungsweg . . . . .	55
5.1.3. Erste eigene Messungen und deren Ergebnisse . . . . .	55
5.2. Berechnung der möglichen Wärmeabgabe mit dem „Halturner Simulationsmodell“ . . . . .	57
5.3. Anmerkungen zum spezifischen Kühlwasserverbrauch dieser Methode . . . . .	62
<b>6. Schlußfolgerungen . . . . .</b>	<b>63</b>
6.1. Möglichkeiten und Grenzen konventioneller Naßkühlverfahren in der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	63
6.2. Ausblick . . . . .	63
Persönliche Nachbemerungen . . . . .	65
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>Zusammenfassung und Summary . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>Bildanhang</b>	

## TABELLEN/TABLES

### Im Text

1. Kraftwerksstandorte am Rhein mit zugehörigen überschlägig berechneten Frischwasser-Kühlkapazitäten .....	42
Positions of power plants at the Rhine with appertaining roughly calculated fresh water cooling capacities	
2. Kraftwerksstandorte an der Donau mit zugehörigen überschlägig berechneten Frischwasser-Kühlkapazitäten .....	44
Positions of power plants at the Danuve with appertaining roughly calculated fresh water cooling capacities	
3. Kraftwerksstandorte an der Weser mit zugehörigen überschlägig berechneten Frischwasser-Kühlkapazitäten .....	44
Positions of power plants at the Weser with appertaining roughly calculated fresh water cooling capacities	

## ABBILDUNGEN/FIGURES

1. Der erwartete Anstieg des Welt-Energieverbrauchs bis zum Jahr 2000 The expected increase of energy consumption in the world up to the year 2000 .....	3
2. Der erwartete Anstieg des Pro-Kopf-Verbrauchs an elektrischer Energie bis zum Jahr 2000 .....	4
The expected per capita consumption of electric energy up to the year 2000	
3. Der erwartete Anstieg des Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000 .....	5
The expected increase of energy consumption in the FRG up to the year 2000	
4. Die jährliche Anzahl der Einzelbeiträge zum Themenkreis „Kraftwerksabwärme in der Hydrosphäre“ (bis 1975) .....	6
The annual number of treatises on the subject of waste heat release from power plants into the hydrosphere (up to 1975)	
5. Prinzipschema einer Wärmekraftanlage zur Erzeugung elektrischer Energie .....	7
Principle scheme of a thermal power engine for the production of electric energy	
6. Prinzipschema eines Kraftwerks mit reiner Durchlaufkühlung .....	8
Principle scheme of a power plant with run through cooling only	
7. Prinzipschema eines Kraftwerks mit Ablauf-Kühlung .....	9
Principle scheme of a power plant with run off cooling	
8. Prinzipschema der nassen Kreislaufkühlung .....	10
Principle scheme of the wet cooling system	
9. Prinzipschema der trockenen Rückkühlung .....	11
Principle scheme of the dry cooling system	
Die Bestimmungsgleichungen für den Wärmehaushalt von Wasserkörpern The equations for the heat budget of water bodies	
10. Das Flußdiagramm des „Haltern Simulationsmodells“ .....	18
The flow diagram of the „Haltern simulation model“	
11a. Gemessener und (ohne Abwärmeeinleitung) berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre. Mai bis Juli 1973 .....	20
Measured and (without waste heat input) calculated water temperature curve in the upper 150 cm of the Stever dam. May to July, 1973	

11b. Gemessener und (ohne Abwärmeeinleitung) berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre. August bis Oktober 1973 .....	21
Measured and (without waste heat input) calculated water temperature curve in the upper 150 cm of the Stever dam. August to October, 1973	
11c. Gemessener und (ohne Abwärmeeinleitung) berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre. April bis Juli 1974 .....	22
Measured and (without waste heat input) calculated water temperature curve in the upper 150 cm of the Stever dam. April to July, 1974	
11d. Gemessener und (ohne Abwärmeeinleitung) berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre. August bis November 1974 .....	23
Measured and (without waste heat input) calculated water temperature curve in the upper 150 cm of the Stever dam. August to October, 1974	
12a. Gemessener und mit verschiedenen theoretischen Abwärmeraten $W_A$ berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre. Mai bis Juli 1973 .....	25
Measured and with different theoretical waste heat rates $W_A$ calculated water temperature curves in the upper 150 cm of the Stever dam. May to July, 1973	
12b. Gemessener und mit verschiedenen theoretischen Abwärmeraten $W_A$ berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre. August bis Oktober 1973 .....	26
Measured and with different theoretical waste heat rates $W_A$ calculated water temperature curves in the upper 150 cm of the Stever dam. August to October, 1973	
12c. Gemessener und mit verschiedenen theoretischen Abwärmeraten $W_A$ berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre. April bis Juli 1974 .....	27
Measured and with different theoretical waste heat rates $W_A$ calculated water temperature curves in the upper 150 cm of the Stever dam. April to July, 1974	
12d. Gemessener und mit verschiedenen theoretischen Abwärmeraten $W_A$ berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre. August bis November 1974 .....	28
Measured and with different theoretical waste heat rates $W_A$ calculated water temperature curves in the upper 150 cm of the Stever dam. August to November, 1974	
13a. Die Wärmeabgabe der Stever-Talsperre im Sommer 1973 in Abhängigkeit von verschiedenen Wasseroberflächentemperaturen .....	29
Heat release of the Stever dam in the summer of 1973 dependent on different water surface temperatures	
13b. Die Wärmeabgabe der Stever-Talsperre im Sommer 1974 in Abhängigkeit von verschiedenen Wasseroberflächentemperaturen .....	29
Heat release of the Stever dam in the summer of 1974 dependent on different water surface temperatures	
14a. Das berechnete prozentuale Verhältnis der Abkühlungsmechanismen $G-A$ , $W_V$ und $W_L$ zueinander. Hydrolog. Sommer-Halbj. 1973 .....	30
The calculated percentage relation of the cooling mechanisms $G-A$ , $W_V$ and $W_L$ to each other. Hydrological summer term 1973	
14b. Das berechnete prozentuale Verhältnis der Abkühlungsmechanismen $G-A$ , $W_V$ und $W_L$ zueinander. Hydrol. Sommer-Halbj. 1974 .....	31
The calculated percentage relation of the cooling mechanisms $G-A$ , $W_V$ and $W_L$ to each other. Hydrological summer term 1974	
15a. Der Wärmeabgabekoeffizient $k_1$ für die freie Wasseroberfläche der Stever-Talsperre im Sommer 1973 .....	32
The heat release coefficient $k_1$ for the free water surface of the Stever dam in the summer of 1973	

15b. Der Wärmeabgabekoeffizient $k_1$ für die freie Wasseroberfläche der Stever-Talsperre im Sommer 1974 .....	32
The heat release coefficient $k_1$ for the free water surface of the Stever dam in the summer of 1974 .....	
16. Vergleich von Monatssummen der Sonnenscheindauer und Monatsmitteln der Lufttemperatur an der Stever-Talsperre mit langjährigen Mittelwerten .....	34
Comparison of monthly sunshine duration sums and monthly values of air temperature at the Stever dam with longtime averages .....	
17. Vergleich von Monatssummen des Niederschlags an der Stever-Talsperre mit langjährigen Mittelwerten (oben) und Gegenüberstellung der Lysimeter-Sickerwassermengen von 1973 und 74 mit Werten des Trockenjahres 1959 .....	35
Comparison of monthly precipitation sums at the Stever dam with longtime average values and contrasting of lysimeter drainage sums from 1973 and 74 with the values of the dry year 1959 .....	
18. Die vertikale Lufttemperaturschichtung in den wassernächsten 330 cm über dem Steiner See bei Münster-Hiltrup. Sommer 1968 .....	38
The vertical stratification of air temperature in the 330 cm layer closest above the water surface of the Steiner See near Münster (Westf.). Summer 1968 .....	
19. Die Abhängigkeit der Schubspannung $\tau$ von der Windgeschwindigkeit 30 cm oberhalb der Wasseroberfläche .....	39
The dependence of the shear stress $\tau$ on the wind velocity 30 cm above the water surface .....	
20. Der zeitliche Verlauf der Schubspannung $\tau$ an der Wasseroberfläche im Mai 1975 .....	40
The chronological curve of the shear stress $\tau$ at the water surface in May, 1975 .....	
21. In der Stever-Talsperre vom 29. 4. bis zum 27. 5. 1975 gemessene vertikale Temperaturprofile .....	41
Vertical water temperature profiles, taken at the Stever dam in the period from April 29 to May 27, 1975 .....	
22. Das prozentuale Verhältnis von latenter- zu fühlbarer Wärme für einen Naßkühlturm im Vergleich mit einer freien Wasserfläche .....	48
The percentage relation of latent and sensible heat for a wet cooling tower in comparison with a free water surface .....	
23. Zur Abhängigkeit der Wassertemperaturen in einem Naßkühlturm von der Lufttemperatur .....	49
The dependence of the water temperatures in a wet cooling tower on the air temperature .....	
24. Zum spezifischen Wasserverbrauch eines Naßkühlturmes für 1000 MW <sub>e</sub> im Vergleich mit einer freien Wasserfläche. Sommer 1973 .....	50
Comparison between the specific water consumption of a wet cooling tower for 1000 MWe and that of a free water surface. Summer 1973 .....	
25. Zum spezifischen Wasserverbrauch eines Naßkühlturmes für 1000 MW <sub>e</sub> im Vergleich mit einer freien Wasserfläche. Sommer 1974 .....	50
Comparison between the specific water consumption of a wet cooling tower for 1000 MWe and that of a free water surface. Summer 1974 .....	
26. Der Globalstrahlungs-Absorbtionsfaktor $k_g$ der Ikosaeder im Vergleich zur freien Wasseroberfläche .....	54
The global radiation absorbtion factor $k_g$ of the icosaeders in comparison with a free water surface .....	
27. Schematisierter Aufriß eines „verdunstungsaktiven“ Ikosaeders (ca. 1/2 d. nat. Größe) .....	54
Cross-section scheme of an icosaeader activating evaporation (about 1/2 nat. size) .....	

28. Das Verhältnis zwischen der Verdunstung „aktiver“ Ikosaeder $W_V^*$ und der Verdunstung freier Wasserflächen $W_V$ in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit $\bar{u}$ .....	56
The relation between the evaporation of „active“ icosaeders $W_V^*$ and the evaporation of free water surfaces $W_V$ in dependence on the average wind velocity $\bar{u}$	
29a. Ohne Abwärmeeinleitung berechnete Wassertemperatur-Zeitreihen bei angenommener Bedeckung mit „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern. Die gemessenen Temperaturen entsprechen der (nicht durch Abwärme belasteten) offenen Wasserfläche. Mai bis Juli 1973 .....	58
Chronologically arranged diagrams of computed water temperatures (without waste heat induction) with an assumed covering by „active“ icosaeders. The temperatures taken are equivalent to those of the open water surface. May to July, 1973	
29b. Ohne Abwärmeeinleitung berechnete Wassertemperatur-Zeitreihen bei angenommener Bedeckung mit „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern. Die gemessenen Temperaturen entsprechen der (nicht durch Abwärme belasteten) offenen Wasserfläche. August bis Oktober 1973 .....	59
Chronologically arranged diagrams of computed water temperatures (without waste heat induction) with an assumed covering by „active“ icosaeders. The temperatures taken are equivalent to those of the open water surface. August to October, 1973	
30a. Mit konstanten Abwärmeraten $W_A$ berechnete Wassertemperatur-Zeitreihen bei angenommener Bedeckung mit „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern. Die gemessenen Temperaturen entsprechen der (nicht durch Abwärme belasteten) offenen Wasserfläche. Mai bis Juli 1973 .....	60
Water temperature series, computed with constant waste heat rates $W_A$ , with an assumed covering by „active“ icosaeders. The temperatures taken are equivalent to those of the open water surface without waste heat induction. May to July, 1973	
30b. Mit konstanten Abwärmeraten $W_A$ berechnete Wassertemperatur-Zeitreihen bei angenommener Bedeckung mit „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern. Die gemessenen Temperaturen entsprechen der (nicht durch Abwärme belasteten) offenen Wasserfläche. August bis Oktober 1973 .....	61
Water temperature series, computed with constant waste heat rates $W_A$ , with an assumed covering by „active“ icosaeders. The temperatures taken are equivalent to those of the open water surface without waste heat induction. August to October, 1973	

## BILDER/PICTURES

Anhang

1. Ablauf-Kühlanlagen am 250 MW<sub>e</sub>-Kernkraftwerk Lingen/Ems  
Runoff cooling systems at the 250 MW<sub>e</sub> nuclear power plant near Lingen/Ems
2. Das 600 MW<sub>e</sub>-Erdgaskraftwerk bei Meppen/Ems mit zugehörigem Naturzug-Naßkühlturm  
The 600 MW<sub>e</sub> natural gas power plant near Meppen/Ems with its naturally ventilated wet cooling tower
3. Das Steinkohlekraftwerk Ibbenbüren/Westf.. Rechts der Trockenkühlturm für die Erweiterung um 150 MW<sub>e</sub>  
The coal power plant Ibbenbüren/Westf.. To the right the dry cooling tower for the enlargement of 150 MW<sub>e</sub>
4. Das Stütznetz des Trockenkühlturms für das 300 MW<sub>e</sub>-THTR-Kernkraftwerk Schmehausen. Höhe 178 m, Bauzustand vom November 1975  
The supporting net construction of the dry cooling tower for the 300 MW<sub>e</sub> THTR nuclear power plant Schmehausen. Height 178 m, State of construction in November, 1975

5. Sauerstoffanreicherung des Kühlwassers vor Wiedereintritt in den Fluß durch freien Überfall. Kernkraftwerk Lingen/Ems  
Oxygen enrichment of the cooling water by means of free cascades before re-entering into the river. Nuclear power plant Lingen/Ems
6. Angler an der Ems im Bereich der Kühlwasserfahne. Kernkraftwerk Lingen/Ems  
Fishermen at the river Ems, in the area of the cooling water trail. Nuclear power plant Lingen/Ems
7. Flußrauchen über dem Kühlwasser-Rücklaufkanal des Kraftwerks Emden.  
Entfernung vom Austritt ca. 1,5 km. 8. 11. 1975, 12<sup>00</sup>  
River steaming above the cooling water return canal of the power plant Emden.  
Distance from outlet about 1,5 km. November 8, 1975, 12<sup>00</sup> GMT
8. Algenwuchs und Verdunstung mindernde Ikosaeder auf einem Versuchsbecken (10 m  $\varnothing$ ) am Ufer der Stever-Talsperre bei Haltern  
Icosaeders reducing the growth of algae and diminishing evaporation in a test basin on the bank of Stever dam near Haltern
9. Detailansicht der auf dem Versuchsbecken schwimmenden Ikosaeder unmodifizierter Ausführung  
Detailed view of the unmodified icosaeders floating in the test basin
10. Die beiden Arten von Ikosaedern im direkten Vergleich  
The two species of icosaeders, directly compared
11. Der Versuchsaufbau zur Messung der Wärmeabgabe „verdunstungsaktiver“ Ikosaeder im Vergleich mit „normalen“ schwimmenden Zwanzigflächern  
The experimental arrangement for the comparing measurement of heat release by „active“ icosaeders and „normal“ floating „twenty-facers“

# Die wichtigsten in den Berechnungen verwendeten Symbole

Nach Möglichkeit wurden die in den Wärmelastrechnungen für Flüsse der Bundesrepublik Deutschland benutzten Kürzel beibehalten.

- A langwellige Ausstrahlung des Wassers ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- $c_W$  spezifische Wärme des Wassers ( $\text{cal g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
- $e_L$  Wasserdampfdruck in der Luft (Torr)
- $E_W$  Sättigungsdampfdruck zur Temp. des Wassers (Torr)
- $\epsilon$  Emissionsfaktor des Wassers für langwellige Ausstrahlung (dimensionslos)
- G langwellige atmosphärische Gegenstrahlung ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- $\gamma$  Sonnenhöhe (Altgrad)
- H diffuse Himmelsstrahlung ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- I direkte Sonnenstrahlung ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- $k_1$  Wärmeabgabekoeffizient von Wasseroberflächen ( $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  bzw.  $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
- $k_s$  Absorbtionsfaktor des Wassers für Globalstrahlung (dimensionslos)
- $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit ( $\text{cal cm}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
- $Q_s$  Netto-Abwärmemenge ( $MW_A$ )
- $\varphi_W$  Dichte des Wassers ( $\text{g cm}^{-3}$ )
- $T_B, T_L, T_W$  Temperaturen von Boden, Luft, Wasser ( $^{\circ}\text{K}$  absolut bzw.  $\text{K}$  relativ)
- $\Delta T_W$  stündliche Temperaturänderung ( $\text{K}$ )
- $\tau$  tangentielle Schubspannung ( $\text{dyn cm}^{-2}$ )
- u Windgeschwindigkeit ( $\text{m s}^{-1}$ )
- $W_B$  Bodenwärmestrom ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- $W_L$  Vertikalstrom fühlbarer Wärme ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- $W_L'$  Änderung des Vertikalstromes fühlbarer Wärme pro  $\text{K}$  Wassertemperaturänderung ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
- $W_V$  Vertikalstrom latenter Wärme (Verdunstung) ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- $W_V'$  Änderung von  $W_V$  pro  $\text{K}$  Wassertemperaturänderung ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
- $W_V^*$  Vertikalstrom latenter Wärme bei Bedeckung der Wasseroberfläche mit „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- $\Delta W$  stündlicher Wärmesaldo ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )
- $z_B, z_W, z_1, z_2$  Tiefen unter der Oberfläche ( $\text{cm}$ )

# 1. Einleitung\*

## 1.1. Anlaß zur Aufnahme der Fragestellung und Ziele der Untersuchung

Seit etwa 100 Jahren nimmt der anthropogene Einsatz von Primärenergie außerordentlich rasch zu. Dabei wird – unabhängig von der Wahl des Energieträgers und der jeweiligen Umwandlungskette – letztlich der Gesamtbetrag als Wärme an die Geosphäre abgegeben. Auch zwischengeschaltete energiebindende Prozesse wie Stoffgewinnungen im biosphärischen und industriellen Bereich bilden hier keine Ausnahme; mit entsprechender zeitlicher Verschiebung wird dieser Energieanteil ebenfalls als Wärme freigesetzt.

Obwohl der Primärenergieeinsatz gegenwärtig, auf die ganze Erde bezogen, im Vergleich zur empfangenen Sonnenstrahlung nur bei etwa  $0,7\text{‰}$  liegt [1,2], weisen in Verdichtungsräumen menschlicher Siedlung und Wirtschaft anthropogene und solare Energie bereits jetzt die gleiche Größenordnung auf. Eine Zusammenstellung derartiger Energiefreisetzungen nach neuem Zahlenmaterial liefert W. Bach [3]; danach wird z. B. in Manhattan das 5-fache der die Erdoberfläche erreichenden Sonnenenergie verbraucht. H. Schaefer errechnete für das Stadtgebiet von München, daß der jährliche Primärenergieeinsatz rd. 18% der Sonnenstrahlung ausmacht [4,5]; dieser Betrag wird bereits auch im Ruhrgebiet oder in Los Angeles erreicht.

Bisher vorliegende Untersuchungen dieses Sachverhalts lassen ein Überwiegen ungünstiger Auswirkungen auf die Umwelt erkennen; angesichts der zumindest bis zur Jahrtausendwende zu erwartenden weiteren raschen Steigerung des globalen Primärenergieeinsatzes muß ein Anwachsen der daraus resultierenden Umweltbelastungen befürchtet werden. H. Flohn hat schon frühzeitig auf mögliche klimatische Auswirkungen anthropogener Wärmezufuhr hingewiesen [6]; er hält eine Senkung der Primärenergie-Wachstumsraten für erforderlich, da nur so die Risiken eines unkontrollierten Energiewachstums ausgeschaltet oder doch genügend weit hinausgeschoben werden können [7]. Besondere Probleme bestehen bei der Umwandlung von thermischer in elektrische Energie. Obwohl hier bereits weitestgehend optimierte Technologien zur Anwendung gelangen – neue Methoden dürften vor der Jahrtausendwende wohl kaum in großem Umfang einsetzbar sein –, fällt bei dieser Umwandlung, bedingt durch die zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten, auf die im folgenden noch näher eingegangen wird, der größte Teil der aufgewandten Primärenergie als Abwärme an. Dabei sei unter Abwärme derjenige Energieanteil verstanden, der vom Menschen nicht, nicht mehr oder noch nicht genutzt in die Geosphäre entweicht. Außer bei Heizkraftwerken fällt diese Abwärme im Interesse der Erzielung eines höchstmöglichen thermischen bzw. effektiven Wirkungsgrades der Kraftwerke auf einem derart niedrigen Temperaturniveau an, daß eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung großen Umfanges z. Zt. noch erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Darauf deuten auch die Ausführungen von H. Schaefer [8] sowie die zusammenfassende Darstellung der Problematik bei H. Bach, P. Beck und D. Goettling [9] hin. Im Kap. 6 letzterer Arbeit wird geschätzt, daß sich durch Wärme-Kraft-Kopplung mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand rd. 42% des Wärmebedarfs der Bundesrepublik für Raumheizung und Warmwasseraufbereitung aus Heizkraftwerken bereitstellen lassen, während gegenwärtig nur etwa 4% des Bedarfs auf diese Weise gedeckt werden. Für andere Arten der Abwärmenutzung wie Beheizung von Gewächshäusern oder Freiland-Spezialkulturen, Bewässerung durch erwärmtes Wasser, Meerwasserentsalzung usw. werden dagegen in der Bundesrepublik nur sehr begrenzte Möglichkeiten gesehen. Es bleibt abzuwarten, welche Ergebnisse das an verschiedenen Kraftwerksstandorten der Bundesrepublik laufende Forschungsprojekt „agrotherm“ [10] liefern wird, bei dem Abwärme zur Unterflurbeheizung von Freilandkulturen Verwendung findet.

Auch für die nähere Zukunft besteht die Notwendigkeit, große Teile der Kraftwerksabwärme nahe am Erzeugungsort möglichst umweltschonend abzuführen, was angesichts der hohen Abwärmedichte moderner Kraftwerksanlagen mit speziellen Problemen verbunden ist. Lagern noch 1960 die maximalen Blockgrößen bei 500 MW<sub>e</sub>, so bilden heute Einzelblöcke von 1000 MW<sub>e</sub> keine Ausnahmen mehr [9]. Der Trend zum Großblock ist bei Kernkraftwerken besonders stark

\* Zahl in [ ] = Hinweis auf die Literatur am Schluß der Arbeit; Bilder 1–11 im Anhang.

ausgeprägt, da im Unterschied zu fossil-thermischen Anlagen die spezifischen Stromerzeugungskosten eines 1200MW<sub>e</sub>-Blockes im Vergleich zu einem 600 MW<sub>e</sub>-Block um 20% niedriger liegen [11]. H. Krolewski weist darauf hin, daß auf einem Areal von 0,45 km<sup>2</sup> in Zukunft 3000...4000 MW<sub>e</sub> an Kraftwerksleistung untergebracht werden können [12], was – bei einem effektiven Wirkungsgrad der Anlagen von 40% – eine Abwärmedichte von 10 000...13 000 W m<sup>-2</sup> ausmacht. Diese Beträge liegen um zwei Zehnerpotenzen über der natürlichen Sonneneinstrahlungsdichte von rd. 114 W m<sup>-2</sup>; selbst wenn es gelingt, Teile dieser Wärmemengen vor ihrer endgültigen Abgabe einem weiteren Nutzungszyklus zuzuführen, stellt die „umweltschonende Abwärmeverdünnung“ eine der schwierigsten Aufgaben bei der Energieumwandlung dar. Der Abfuhr dieser „Anergie“ gilt das Haupt-Augenmerk der vorliegenden Studie; das Hauptziel ist die Untersuchung des Beitrages zu Abtransport und Verteilung der Kraftwerksabwärme, den die Hydrosphäre der Bundesrepublik Deutschland zu leisten vermag. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Überführung des größten Teiles der Anergie in latente Wärme und deren Abtransport in Form von Wasserdampf ein sehr wirkungsvolles Verfahren der „Abwärmeverdünnung“ darstellt; denn dieser Anergieanteil wird erst in größerer Entfernung vom Ursprungs-ort räumlich weit verteilt in Form troposphärischer Kondensationsvorgänge frei.

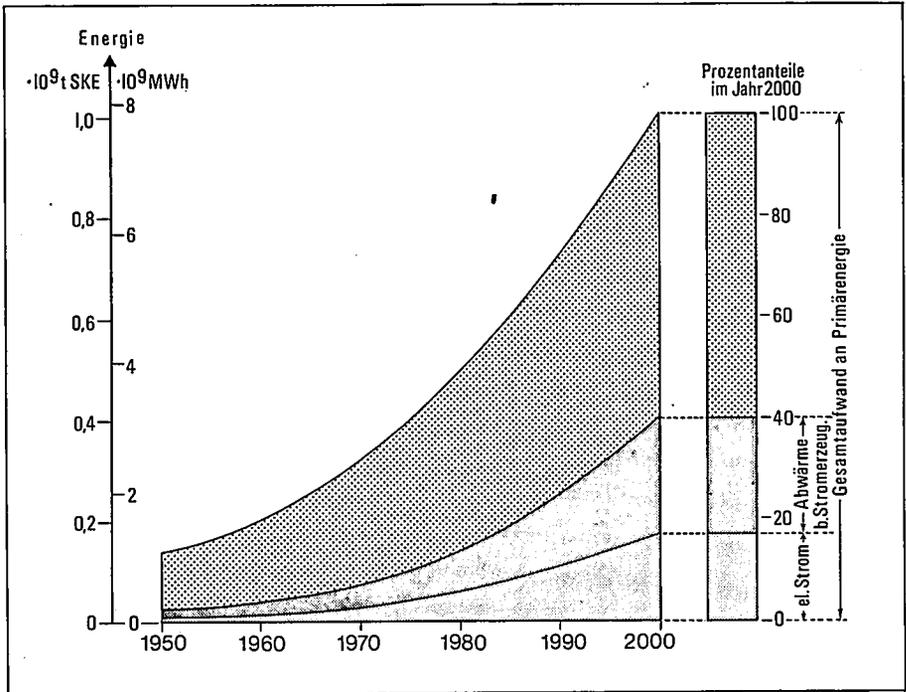
Allen bisher verwendeten Kühlverfahren haften auch Nachteile an. Es ist zu erwarten, daß neben der weiteren Verbesserung der jetzigen Technologien im Hinblick auf eine Verringerung der Umweltbelastung zusätzliche neue Kühlmethoden entwickelt werden können. Auf eigenen Meßreihen basierende Untersuchungen zur Physik der Wärmeabgabe von Oberflächengewässern lassen die Hoffnung zu, daß auf diesem Felde noch technische Innovationen möglich sind, zu denen vielleicht auch die Geowissenschaften Impulse beisteuern können. Hier wird eine weitere Zielsetzung der vorliegenden Studie deutlich.

## 1.2. Energiebedarfsprognosen

Wenn die aus verschiedenen Quellen von Hammond, Metz und Maugh [13] zusammengestellte globale Energiebedarfsprognose zutrifft, nimmt der Welt-Primärenergieverbrauch von rd.  $2,5 \cdot 10^9$  t Steinkohleeinheiten im Jahre 1950 auf etwa  $25 \cdot 10^9$  t SKE zur Jahrtausendwende zu, was einer Verzehnfachung innerhalb eines halben Jahrhunderts entspricht. Dabei spielt die Frage, ob die wirtschaftlichen Schwierigkeiten in der sogen. Ersten Welt den Energiebedarf nicht möglicherweise wesentlich langsamer ansteigen lassen, eine untergeordnete Rolle. Es erscheint aber denkbar, daß dadurch der für das Jahr 2000 erwartete Welt-Primärenergieverbrauch erst einige Jahrzehnte später eintreten könnte, obwohl das gegenwärtige Wirtschaftswachstum der Zweiten und Dritten Welt eher für ein weiter rasches Ansteigen des Energieverbrauchs spricht. Abbildung 1 läßt die Größenordnungen erkennen; zugleich ist der Anteil des elektrischen Stromes am Gesamt-Energieaufkommen dargestellt. Auch im Jahr 2000 dürfte dieser nur ca. 18,5% des Gesamtaufwandes an Primärenergie ausmachen. Für die Errechnung dieses Anteils wurde von der in Abbildung 2 wiedergegebenen Annahme B. Böhnkes [14] ausgegangen, daß sich das Weltmittel des jährlichen Pro-Kopf-Verbrauchs an elektrischer Energie mit 5,4 MWh im Jahre 2000 gegenüber dem Stand von 1975 nahezu verdreifachen wird. Nimmt man mit H. Hambloch [15] für die Jahrtausendwende eine Weltbevölkerung von  $6,66 \cdot 10^9$  Einwohnern an, dann ergibt sich der in Abbildung 1 für das Jahr 2000 eingetragene Stromanteil mit  $36 \cdot 10^9$  MWh. Zugleich wird aus Abbildung 1 die Primärenergie erkennbar, welche bei der Stromerzeugung als Abwärme anfällt. Selbst unter Zugrundelegung eines relativ hohen effektiven Umsetzungswirkungsgrades – auf Einzelheiten dazu wird im Abschnitt 2.2 eingegangen – müssen dennoch große Teile des Gesamtaufwandes an Primärenergie als Abwärme über entsprechende Kühleinrichtungen abgeführt werden.

Die mögliche Entwicklung des Energieverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000 zeigt Abbildung 3. H. Mandel hält ein weiteres durchschnittliches Wachstum des Primärenergieverbrauchs von 3,0...4,5% pro Jahr und des zur Erzeugung elektrischen Stromes verwendeten Primärenergieanteils von 5,0...7,3% pro Jahr für denkbar [16]. Rechnet man mit durchschnittlichen Wachstumsraten von 4% beim Primärenergieverbrauch und 6% beim Elektrizitätsanteil, dann ergeben sich die in Abbildung 3 eingetragenen Kurven, deren Verlauf bis 1975 geglättet wurde. Obwohl der bei Stromerzeugung in der Bundesrepublik anfallende

prozentuale Abwärmeanteil den Globalwerten ähnelt, liegt die hierdurch bedingte „Anergie-dichte“ doch weit über vergleichbaren Flächenmitteln. So ergibt sich im Jahr 2000 für die Bundesrepublik (mit einer Fläche von  $\sim 0,25 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ) eine durch die Stromerzeugung bedingte mittlere Abwärmedichte von  $0,82 \text{ W m}^{-2}$  bei einer Gesamt-Energiedichte von  $3,56 \text{ W m}^{-2}$ , während der entsprechende Anergie-Mittelwert für die Vollökumene nur  $0,09 \text{ W m}^{-2}$  bei einer Gesamt-Energiedichte von  $0,35 \text{ W m}^{-2}$  beträgt. Es würde also in der Bundesrepublik Deutschland die „elektrische“ Abwärmedichte des Jahres 2000 der Primärenergie-Verbrauchsdichte von etwa



**Abb. 1: Der erwartete Anstieg des Welt-Energieverbrauchs bis zum Jahr 2000**  
(Hammond u. a. [13] u. Böhnke [14])

Abb. 1 u. 3 vertauscht!  
Unterschriften bleiben.

1962 entsprechen. Als Ursache für derartig hohe Werte ist sowohl die Bevölkerungsdichte als auch die aus Abbildung 2 ersichtliche Erwartung anzusehen, daß der jährliche Pro-Kopf-Verbrauch an elektrischer Energie auch weiterhin über dem Weltmittel liegen wird.

Diese Zahlen lassen den besonderen Stellenwert erkennen, den „Abwärme-recycling“ im Interesse einer anzustrebenden Drosselung der Primärenergie-Zuwachsraten sowie umweltschonende „Anergie-Verdünnung“ für die Bundesrepublik besitzen.

### 1.3. Zum gegenwärtigen Stand der Forschung

Als erste Arbeit, die sich quantitativ mit dem hier behandelten Problemkreis beschäftigt, wird verschiedentlich (so z. B. bei Flinspach u. Fleig 1973 [17] sowie Berger und Schmitz 1973 [18]) die 1950 veröffentlichte Studie zur Berechnung des sommerlichen Wärmeumsatzes in Flußläufen von O. Eckel und H. Reuter [19] zitiert, die aus Wärmehaushaltsstudien an österreichischen Alpenseen hervorgegangen ist. Dazu muß allerdings angemerkt werden, daß hier die künstliche Flußerwärmung durch Kühlprozesse noch nicht als Problemstellung angesprochen ist.

Erst ab etwa 1961, beginnend mit Anmerkungen von M. D. Engle zur Beeinflussung von Strömen der USA durch Kühlwasser [20] sowie einer Arbeit von A. Becker zur thermischen Belastbarkeit der DDR-Binnengewässer (1965) [21] und einem Gutachten von F. Berger über die thermischen Auswirkungen fließwassergekühlter Kraftwerke auf den Hochrhein (1966) [22] nehmen Anzahl und Umfang der Einzelbeiträge bis 1972 (25 Arbeiten zum Thema) rasch zu. Inzwischen gestat-

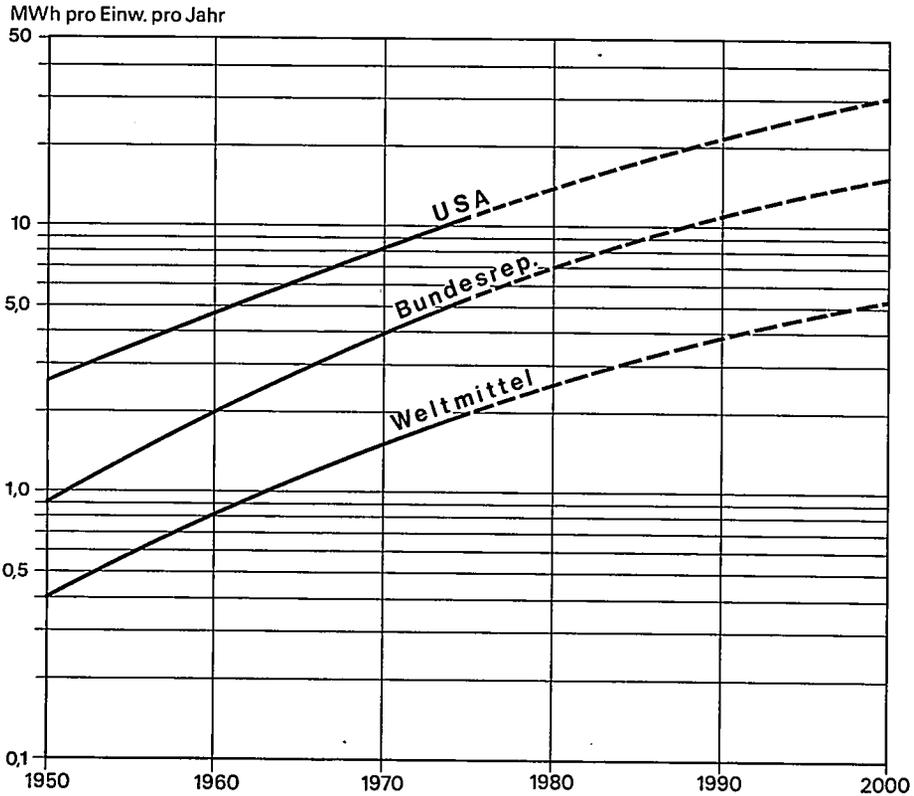


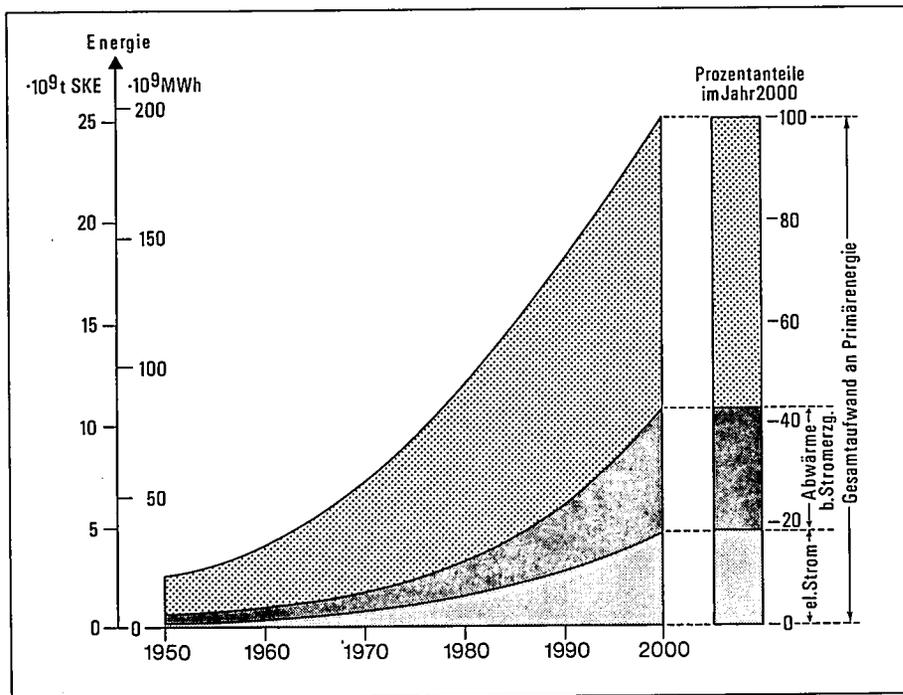
Abb. 2: Der erwartete Anstieg des Pro-Kopf-Verbrauchs an elektrischer Energie bis zum Jahr 2000 (nach Böhnke 1973)

tete der erreichte Kenntnisstand die Herausgabe der lehrbuchartigen „Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern“ durch die Arbeitsgemeinschaft „Wärmebelastung der Gewässer“ innerhalb der bundesdeutschen „Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)“ (1971) [23]. (Die gleichzeitig erschienene Bibliographie zu den hydrobiologischen Auswirkungen von Kühlwassereinleitungen [24] enthält bereits 412 Literaturzitate!)

Von 1971 bis 1974 wurden für die größeren Flüsse der Bundesrepublik Wärmelastpläne erstellt [25, 26, 27, 28, 29, 30], die erstmalig einen genaueren Einblick in die bestehenden und zu erwartenden Abwärmelastungen bei ausschließlicher Frischwasserkühlung zuließen. Weitere Wärmelastrechnungen, wie z. B. für die Lippe, sind z. Zt. in Arbeit und werden demnächst veröffentlicht. – Dieses Material, auf das insbesondere im Kapitel 3 eingegangen wird, bietet die Grundlage für zahlreiche weitere Einzelbeiträge, die sich überwiegend mit der Interferenz zwischen Abwärme- und Schmutzbelastung der Flüsse beschäftigen oder das Problem der

Kraftwerkskühlung vor dem Hintergrund der sehr begrenzten Kühlkapazitäten der Oberflächengewässer meist zugunsten der Trockenkühlung neu diskutieren.

Parallel zu diesen Studien oder auch in Verbindung mit ihnen wurden Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von natürlichen oder künstlichen Seen für Kühlzwecke durchgeführt. Hier sind die Arbeiten von D. O. Lima (1936) [31], R. F. Throne (1951) [32], J. W. Langhaar (1953) [33] sowie R. T. Jaske und H. R. Drew (1972) [34] für den US-amerikanischen Bereich zu nennen; über mehrjährige neuere Untersuchungen am Lake Trasfynydd in Nord-Wales berichten J. M. Burnett et al. (1974) [35]. Für die Bundesrepublik, wo in Ermangelung geeigneter hinreichend



**Abb. 3: Der erwartete Anstieg des Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000 (nach Mandel 1973)**

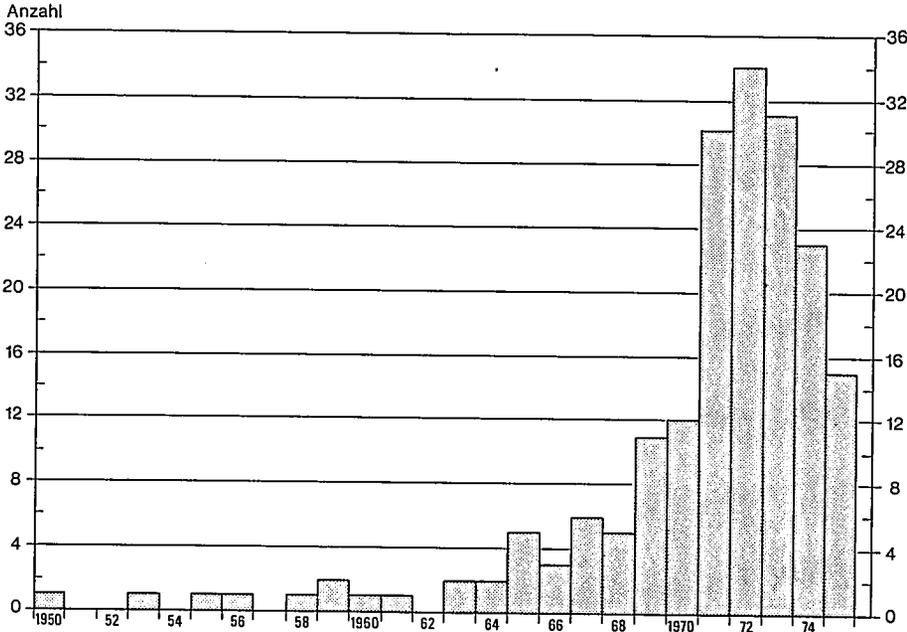
Abb. 1 u. 3 vertauscht!  
Unterschriften bleiben.

großer Binnenwasserflächen die Kühlteichfrage nur am Rande diskutiert wird, beschäftigen sich u. a. K. Spangemacher (1956) [36], F. Günneberg (1973) [37] und K. R. Schmidt (1973) [38] mit dem Problem. Auch hier gilt für den jetzigen Stand der Forschung die von der LAWA [23, S. 15] getroffene Feststellung, daß „die Vorgänge des Wärmetausches zwischen Gewässer und Umgebung (vor allem der Atmosphäre) zwar qualitativ bekannt, jedoch quantitativ wenig erforscht“ seien, da es noch an der Kenntnis exakter Beiwerte fehle. So bestehen z. Zt. noch recht unterschiedliche Auffassungen vom Wärmeabgabevermögen offener Wasserflächen in verschiedenen klimatischen Situationen, die dringend einer Klärung durch Messungen bedürfen.

Neben allen bisher erwähnten Untersuchungen, die sich vorwiegend mit der Frischwasserkühlung beschäftigen, ist auf Arbeiten zu verweisen, die den Betrieb von Kühltürmen zum Gegenstand haben. Hier dominiert zahlenmäßig das Studium der Auswirkungen von Naßkühlturm-Schwaden auf die Umwelt. Allein aus den USA liegen etwa 65 Beiträge zu dieser Thematik vor. Für den bundesdeutschen Bereich haben u. a. der „Schweizer Kühlturmbericht“ (1972) [39]

sowie verschiedene Einzelbeiträge [40, 41] besondere Bedeutung erlangt; ferner ist auf die 1973 durchgeführte Untersuchung an einem Naturzug-Naßkühlturm des Kraftwerks Neurath [42] sowie auf entsprechende Messungen von W. Bung [43] hinzuweisen.

Bei Betrachtung von Arbeiten, die für den augenblicklichen Kenntnisstand zum Thema „Kraftwerksabwärme in der Hydrosphäre“ besondere Relevanz besitzen, fällt auf, daß deren jährliche Anzahl seit 1973 zurückgeht (siehe Abb. 4). Darin ist jedoch kaum ein Nachlassen des Interesses an der Fragestellung zu erkennen; so sind seit 1969 im Bundes- oder Länderauftrag zunehmend umfassende Monographien zum Thema Abwärme erschienen, deren Ziele vorwiegend in Hilfestellungen bei umweltpolitischen Entscheidungen liegen [44, 45, 23, 46, 47, 9, 5, 48]. Diesem



**Abb. 4: Die jährliche Anzahl der Einzelbeiträge zum Themenkreis „Kraftwerksabwärme in der Hydrosphäre“**

Zweck dient auch der z. Zt. im Auftrag der Abwärmekommission beim Umwelt-Bundesamt Berlin erstellte Forschungsbericht zum Problemkreis „Wärmebelastung von Gewässern“ [49], der offene Probleme aufzeigen soll, die es kurz- oder langfristig zu untersuchen gelte.

Beim gegenwärtigen Stand der Forschung dürfte eines dieser Probleme in der Klärung der kaum andiskutierten Frage bestehen, wieviel Prozent des natürlichen Wasserdargebots der Bundesrepublik Deutschland auf der Grundlage der Untersuchungen von R. Keller [50,51, 52] angesichts der miteinander konkurrierenden Wassernutzungsarten überhaupt für Kühlzwecke aufgewendet werden können.

## • 2. Abwärme als Faktum von Physik und Technik

### 2.1. Anmerkungen zur Abfallwärme bei thermischen Kreisprozessen

Auch bei modernsten thermischen Kraftwerken fällt immer noch mehr als die Hälfte der aufgewandten Primärenergie als Abwärme an. Dieser prinzipielle – kaum durch unvollkommene Technik bedingte – Mangel hat seine Ursache vorwiegend in den physikalischen Gesetzen, nach denen derartige Wärmekraftmaschinen funktionieren. Seit den „Maximen“ von N. S. Carnot (1824) ist bekannt, daß eine bestmögliche Ausnutzung der Wärme deren Zufuhr bei konstanter höchstmöglicher Temperatur verlangt und daß im Interesse eines optimalen Wirkungsgrades die Wärmeabfuhr bei konstanter niedrigstmöglicher Temperatur zu erfolgen hat. Ein Prinzipschema, in Abb. 5 dargestellt, möge die Zusammenhänge verdeutlichen.

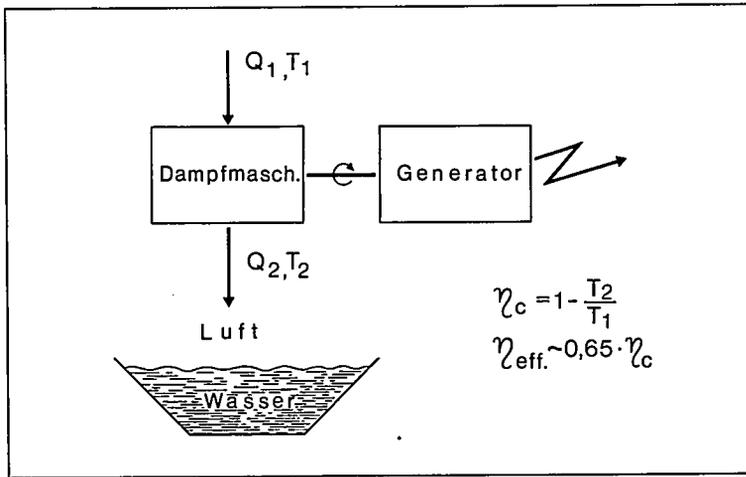


Abb. 5: Prinzipschema einer Wärmekraftanlage zur Erzeugung elektrischer Energie

Bei der Eingangs-Absoluttemperatur  $T_1$  des Dampfes als Arbeitsmedium wird der Maschine die Wärmemenge  $Q_1$  zugeführt und nach Leistung von Arbeit zur Stromerzeugung bei der tieferen Absoluttemperatur  $T_2$  als Energie  $Q_2$  an das Kühlmedium (Luft, Wasser) abgegeben. Nach dem Energiesatz ist die geleistete Arbeit gegeben durch

$$E = Q_1 - Q_2 \quad (1)$$

R. Clausius hat gezeigt, daß die Wärmemengen  $Q_1$  und  $Q_2$  linear proportional zu den absoluten Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  sind, sodaß gilt:

$$Q_1 = kQ \cdot T_1 \quad (2)$$

$$Q_2 = kQ \cdot T_2 \quad (3)$$

Daraus folgt:

$$E = kQ \cdot (T_1 - T_2) \quad (4)$$

und der Carnot-Clausiusche Wirkungsgrad thermischer Kreisprozesse

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (5)$$

Man sieht, daß selbst die hier betrachteten idealen Maschinen einen Wirkungsgrad  $< 1$  besitzen, insbesondere weil für das „kalte Ende“ des Kreisprozesses die auf der Erde anzutreffenden Temperaturen von Luft und Wasser mit ca.  $300^\circ\text{K} \pm 20\%$  vorgegeben sind.

## 2.2. Die effektiven thermodynamischen Wirkungsgrade von Kraftwerksanlagen

Technische Notwendigkeiten bringen es mit sich, daß beim Betrieb von Wärmekraftanlagen Verluste durch Reibung, parasitäre Wärmeflüsse, Hilfsmaschinen usw. auftreten. Dadurch wird die abzuführende Wärme größer und der Wirkungsgrad kleiner als bei idealen Maschinen. Der sich somit ergebende „effektive Wirkungsgrad“ läßt sich ausdrücken durch

$$\eta_{\text{eff}} = g \cdot \eta_c \quad (6),$$

wobei  $g$  einen Gütebeiwert ( $< 1$ ) darstellt, der die Annäherung an den Wirkungsgrad der idealen Maschine angibt. Im Mittel darf für die heute arbeitenden thermischen Kraftwerke  $g$  mit 0,65 angesetzt werden. Geht man einmal davon aus, daß 800 und 300°K typische Kraftwerks- Betriebswerte für  $T_1$  und  $T_2$  wären, dann ergibt sich gemäß Gleichung (5) und (6) ein effektiver Wirkungsgrad von 40% – eine Größe, die vom Gros der Betreiber fossilthermischer Kraftwerke als zutreffend angesehen wird.

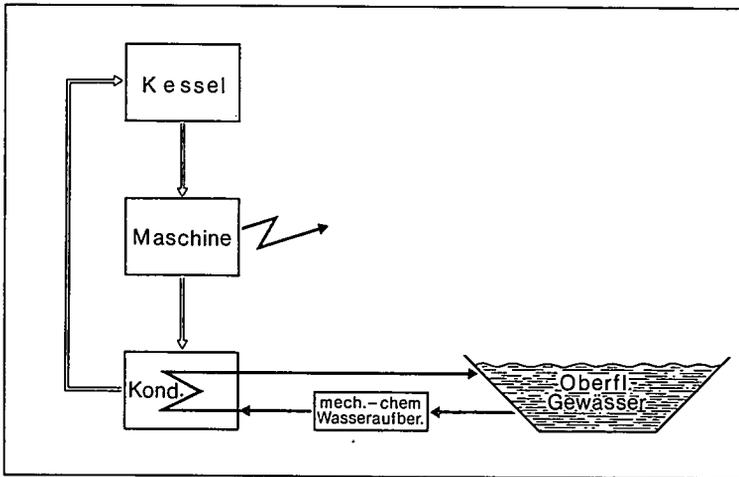


Abb. 6: Prinzipschema eines Kraftwerks mit reiner Durchlaufkühlung

Eine Zusammenstellung von effektiven Wirkungsgraden verschiedener thermischer 1000MW<sub>e</sub>-Kraftwerkstypen findet sich bei W. Bach [53]. Hier wird bei Verwendung fossiler Brennstoffe von 40%, für konventionelle Kernkraftanlagen von 32,6% und für Brüter von 41,9% ausgegangen.

Extrapoliert man die Entwicklung der Effektiv-Wirkungsgrade während der letzten 3 Jahrzehnte in die Zukunft hinein, dann ergeben sich um das Jahr 2000 Werte nahe 43%. In bezug auf die anfallenden Abwärmemengen dürften sich die Kernkraftwerke der Jahrtausendwende kaum von fossilthermischen Anlagen unterscheiden.

## 2.3. Gegenwärtig angewandte Kühlverfahren und ihre Merkmale

### 2.3.1. Die Frischwasser- oder Durchlaufkühlung

Die älteste und zugleich preisgünstigste Methode der Energieabfuhr bei thermischen Kraftwerken stellt die Frischwasser- oder Durchlaufkühlung dar. Wie das Prinzipschema in Abbildung 6 erkennen läßt, gelangt hier die gesamte im Kondensator anfallende Abwärme in das Wasser von Flüssen oder Seen. Je nach der Beschaffenheit des Rohwassers muß dieses vor Eintritt in das Kühlsystem einer mehr oder weniger aufwendigen mechanischen und chemischen Aufbereitung unterzogen werden, was insgesamt einer Reinigung des Vorfluters gleichkommt.

Angesichts der bereits gegenwärtig starken Aus- bzw. Überlastung der Frischwasser-Kühlkapazität binnenländischer Flußabschnitte – auf Einzelheiten wird im Abschnitt 3.3 einzugehen sein – hat in den letzten Jahren das Interesse an neuen Kraftwerksstandorten mit Eignung zur reinen Frischwasserkühlung an den Ästuaren und Küsten der Bundesrepublik stark zugenommen, zumal da nach anfänglichen Schwierigkeiten inzwischen Möglichkeiten des chemischen und physikalischen Schutzes von Kühloberflächen gegen die Aggressivität des Seewassers erprobt und bewährt sind [54].

Gegenwärtig wird rund die Hälfte aller thermischen Kraftwerke der Bundesrepublik mit Frischwasserkühlung betrieben [55]; wie im folgenden gezeigt wird, erscheinen Kraftwerks-Neubauten mit diesem Kühlverfahren im Landesinnern wegen der bekannten gewässerbiologisch-chemischen Sachzwänge jedoch in Zukunft kaum noch möglich. Die Wärmelastrechnungen für bundesdeutsche Flüsse lassen zumindest für einzelne Anlagen bereits jetzt die Notwendigkeit erkennen, einen Teil der Kraftwerksabwärme über nachträglich einzubauende Ablauf-Kühltürme vom Vorfluter fernzuhalten oder gar auf Kreislaufkühlung umzurüsten.

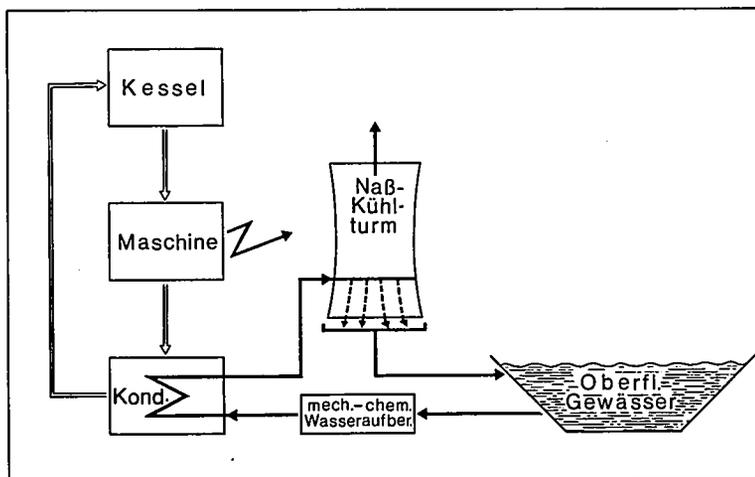


Abb. 7: Prinzipschema eines Kraftwerks mit Ablauf-Kühlung

### 2.3.2. Die Ablaufkühlung

Kraftwerke, die an Flüssen liegen, deren Wasserführung zumindest zeitweise für reine Durchlaufkühlung nicht ausreicht bzw. deren (vorübergehend natürliches oder künstlich erhöhtes) Temperaturniveau die Aufnahme zusätzlicher Wärmemengen nicht zuläßt, müssen mit Ablauf-Kühlern versehen werden. Diese können, wie im Prinzipschema (Abb. 7) angedeutet, als Naturzug-Naßkühltürme ausgebildet sein oder, wie im Bild 1 für das alte 250 MW<sub>e</sub>-Kernkraftwerk Lingen erkennbar, die Gestalt mehrerer meist recht unauffälliger künstlich ventilierter Kühlerbatterien besitzen. – Die Ablaufkühlung stellt eine den Vorfluter in kritischen Phasen schonende Variante der Frischwasser- oder Durchlaufkühlung dar, bei der jedoch im Jahresmittel der weitaus größte Teil der Abwärme dem Gewässer zugeführt wird.

### 2.3.3. Nasse Kreislaufkühlung

Dort, wo zwar ein ausreichendes Kühlwasserdargebot vorhanden ist, der Vorfluter jedoch nur unbedeutende Abwärmemengen aufnehmen kann (z. B. über die sogen. Abschlämzung oder kleine Neben-Kühlkreise), werden Kraftwerke mit nasser Kreislaufkühlung ausgerüstet. Äußerliches Kennzeichen sind die bekannten großen Naßkühltürme, die bei Neubauten meist



### 2.3.5. Naß/Trockenkühlverfahren

Gegenwärtig wird für solche Kraftwerksstandorte, an denen aus Gründen des Umweltschutzes oder der Flugsicherheit die Entstehung von Kühlturmschwaden zumindest zeitweise unterbunden werden muß oder an denen vorübergehend Kühlwasserknappheit herrscht, die Errichtung von kombinierten Naß/Trocken-Kühltürmen diskutiert. Bei niedrigen Lufttemperaturen und

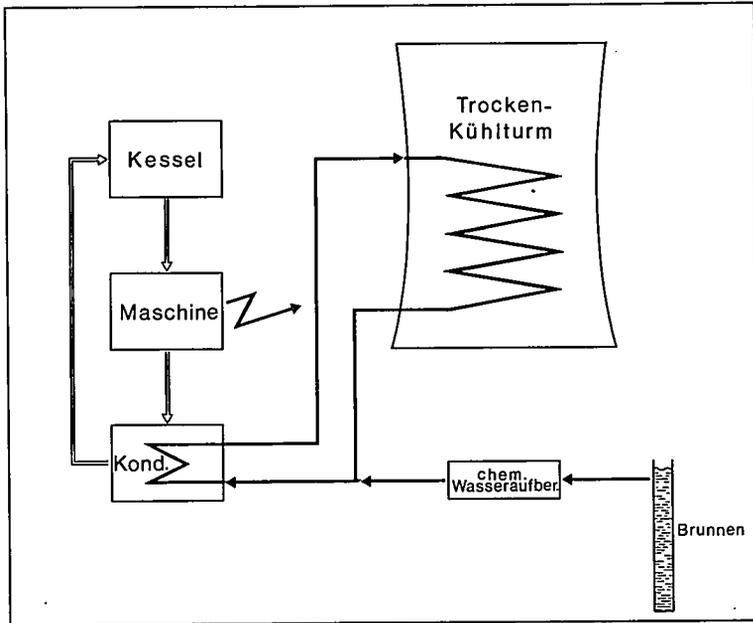


Abb. 9: Prinzipschema der trockenen Rückkühlung

Teillastbetrieb soll vorwiegend trocken rückgekühlt und dabei Wasser gespart werden, während bei Vollast insbesondere in sommerlichen Mittagsstunden die Zuhilfenahme der Naßkühlung bessere Effektivwirkungsgrade als bei reiner Trockenkühlung verspricht. Über entsprechende Versuche in den USA wird von Li und anderen 1972 bis 1975 [64, 65, 66, 67] berichtet. Für die Bundesrepublik haben K. Spangemacher [68] und G. Christmann [69] die mit der Errichtung derartiger kombinierter Kühltürme möglicherweise verbundenen Vorteile angesprochen.

### 2.4. Folgerungen für die Eignung verschiedener Kühlverfahren zur Anergieabgabe

Soll unter vorwiegend hydrogeographischen Gesichtspunkten die Eignung verschiedener Kraftwerks-Kühlverfahren bewertet werden, so sind Prioritäten zu setzen. Diese könnten etwa lauten: Spezifischer Kühlwasserverbrauch – Umweltbeeinträchtigung durch Wasserdampf und fühlbare Wärme – Kosten elektrischer Energieerzeugung – Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch Kühlturm-Kolossalbauten.

Würde man die Kühlverfahren allein vom spezifischen Wasserverbrauch her beurteilen, dann wären Trockenkühltürme zu favorisieren. Diese verleihen den Anlagen jedoch geringere effektive Wirkungsgrade als alle Naßkühlverfahren, was den Abwärmefall vergrößert; außerdem müssen Trockenkühlanlagen wegen der Physik „trockener“ Anergieabgabe im Vergleich mit Naßkühltürmen derselben Leistung etwa dreimal so groß oder in dreifacher Anzahl errichtet werden, was die Energie-Erzeugungskosten erhöht und das Landschaftsbild noch stärker beeinträchtigt.

Bild 4 zeigt den 178 m hohen Trockenkühlturm des 300 MW<sub>e</sub> - THTR-Kernkraftwerks Schmehausen im Bauzustand vom November 1975. Er verursacht voraussichtlich Baukosten in Höhe von ca. 35 Mio DM, während - bei Vorhandensein ausreichender Kühlwassermengen - ein Naßkühlturm gleicher Leistung aber geringerer Ausmaße für ca. 7 Mio DM zu errichten wäre.

B. Geiger et al. [4] führen aus, daß in der Bundesrepublik nasse Kreislaufkühlung gegenüber Frischwasserkühlung bei der Stromerzeugung mit konventionellthermischen Kraftwerken Mehrkosten von ca. 4% verursacht, während bei Trockenkühlung etwa 8,5% Mehrkosten entstehen. Für Kernkraftwerke werden 7% bzw. 20% Mehrkosten gegenüber Frischwasserkühlung angegeben. Nach neuesten Berechnungen von G. Ortner und K. Ritter [113] erhöhen sich die Stromerzeugungskosten bei Übergang von der Durchlaufkühlung auf die nasse Kreislaufkühlung je nach erforderlichem Aufwand für die Wasseraufbereitung um 5...8% und bei Ausweichen auf die Trockenkühlung um 15...21%.

Nach sorgfältiger Abwägung aller obengenannten Prioritätsgesichtspunkte gegeneinander wird man E. Gerking [70] zustimmen müssen, wenn dieser die Kühlleistung der Oberflächengewässer als ein großes volkswirtschaftliches Vermögen kennzeichnet und vor der „Fehlinvestition“ eines allzu frühen Überganges auf Trockenkühlverfahren warnt.

Die Grenzen der Frischwasser-Kühlkapazität bundesdeutscher Flüsse dürfen seit Vorliegen der Wärmelastrechnungen als zumindest in Umrissen bekannt gelten; auf Einzelheiten wird im Kapitel 3 einzugehen sein. Über die nur auf die verfügbaren Wassermengen bezogenen Anwendungsgrenzen nasser Kreislaufkühlung sind jedoch für die Bundesrepublik Deutschland bisher noch keine Zahlenwerte bekannt geworden; Überlegungen hierzu werden im Kapitel 4 angestellt.

## 3. Abwärme in Oberflächengewässern

### 3.1. Die Auswirkungen von Wärmeeinleitungen auf den Gewässerzustand

Bei Diskussion der künstlichen Gewässererwärmung – hier werden für die Bundesrepublik fast ausschließlich die Fließgewässer angesprochen – herrscht vielfach die Meinung vor, daß thermische Kraftwerke die alleinigen Abwärmeeerzeuger darstellten. Eine Studie der thermischen Direktbelastung des Rheins (ohne Vorbelastung aus dem Oberlauf und den Nebenflüssen) zwischen Rheinfelden und Bonn im Herbst, über die von Schaefer [4] berichtet wird, ergibt dagegen, daß nur rd. 46% auf Kraftwerke entfallen, während die übrigen 54% von industriellem Ab- und Kühlwasser, der Schifffahrt sowie biologischen Vorgängen (2%) herrühren. Dieser Umstand wird in den Wärmelastplänen berücksichtigt, indem größere Einleitungen warmer Industrieabwässer in die Berechnung der Temperaturentwicklung eingehen. Die folgenden Anmerkungen beziehen sich deshalb auf alle Verursacher von Gewässererwärmungen und keineswegs nur auf die Betreiber frischwassergekühlter Kraftwerke.

#### 3.1.1. Biologisch-chemischer Zustand

Jede Änderung des physikalischen Gewässerzustandes löst chemische und biologische Folgeerscheinungen aus, wobei chemische und biologische Veränderungen zueinander in einem Rückkopplungsverhältnis stehen und kaum getrennt betrachtet werden können. Die Kenntnisse über die vielfältigen Auswirkungen und Verknüpfungen sind zwar in rascher Zunahme begriffen – man vergleiche die Ausführungen M. Kämpfers (1971) [24] mit entsprechenden Einzelbeiträgen im IAEA-Sammelband [71] –, jedoch lassen sich gegenwärtig noch keineswegs in allen Fällen sichere Grenzwerte für Abwärmelastungen zur Vermeidung irreparabler Schäden festlegen.

Bekanntlich sinkt mit steigender Temperatur das Lösungsvermögen von Wasser für gasförmige Stoffe (im Gegensatz zur Lösbarkeit von festen Stoffen wie Salzen und Mineralien) rasch ab, was insbesondere über das Sauerstoff-Bindungsvermögen des Wassers die Biologie stark beeinflusst [23]. Zwar steigt mit zunehmender Temperatur die Sauerstoff-Aufnahmegeschwindigkeit des Wassers; in der Regel überwiegt jedoch der Sauerstoffverlust, der durch die bei erhöhter Wassertemperatur beschleunigt ablaufenden sauerstoffzehrenden biologischen und chemischen Abbaureaktionen noch verstärkt wird. Der biochemische Sauerstoffbedarf (BSB) steigt also mit zunehmender Wassertemperatur und verschärft somit das Sauerstoffdefizit [9]. In extremen Fällen (z. B. Herbstmonaten mit Sauerstoffgehalten von  $1 \dots 3 \text{ mg l}^{-1}$ ) kann es daher zum Auftreten anaerober Prozesse kommen, was Geruch und Geschmack des Wassers äußerst unangenehm verändert. Dadurch wird nicht nur die Trinkwassergewinnung z. B. durch Uferfiltrat erschwert, sondern auch die Erholungseignung derartiger Gewässer schwer beeinträchtigt [72], von der Schädigung der Mikroorganismen, Wasserpflanzen und Fische einmal abgesehen. H. Knappe [56], P. Wolf [73], E. Gerking [70] und Andere haben den Sauerstoffhaushalt von Fließgewässern der Bundesrepublik untersucht; für die wasserwirtschaftliche Praxis besondere Bedeutung besitzen die Arbeiten von B. Böhnke [14, 74] sowie von B. Böhnke und R. Schulze-Rettmer [75] über den Sauerstoffhaushalt des Rheins. Hier werden Möglichkeiten aufgezeigt, ungünstige Folgewirkungen der Wärmebelastung durch Sauerstoffeintrag in die Gewässer wenn nicht aufzuheben, so doch stark herabzumindern. Über praktische Erfahrungen bei der Sauerstoffanreicherung von Kraftwerkskühlwasser berichten u. a. H. Krolewski [76], G. Forstner [77] und E. Gerking [70]; über Leistung und Kosten verschiedener Belüftungssysteme gibt K. R. Imhoff in einer neuen Arbeit [78] einen umfassenden Überblick. Mit dem Sauerstoffeintrag an sogen. freien Überfällen beschäftigt sich eine Studie von D. Londong [79]; Bild 5 zeigt eine derartige Anlage zur Sauerstoffanreicherung der Ems am Kernkraftwerk Lingen. Hier wird das um etwa 10 K erwärmte Kühlwasser (ca.  $12,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) belüftet und in die Ems zurückgeleitet.

Es darf vielleicht beiläufig auf die an diesem Standort, aber auch anderswo gemachte Beobachtung hingewiesen werden, daß gerade in der Mischungszone zwischen erwärmtem, gut belüftetem Kühlwasser und dem übrigen Flußwasser besonders günstige Lebensbedingungen für ver-

schiedene Fischarten zu herrschen scheinen. Die hier tätigen Angler (siehe Bild 6) glauben zwar den Kraftwerken große Schadenswirkungen auf den Fischbestand anlasten zu müssen, erzielen aber im Bereich der Kühlwasserfahnen erstaunliche Fangergebnisse.

Die neuen Veröffentlichungen über biologische Effekte künstlicher Gewässererwärmungen lassen jedoch ein Überwiegen negativer Auswirkungen erkennen. Hier wird neben einer grundlegenden Veränderung der angestammten Fischgesellschaften vor allem auf ein massenhaftes Wachstum von Süßwasserschwämmen, Muscheln und Schnecken sowie auf eine Umstellung der Planktonpopulationen von Kieselalgen zugunsten von Grün- und Blaualgen hingewiesen, deren Stoffwechselprodukte auf Warmblüter toxisch wirken können [23, 24, 48, 71, 72]. Auch das verstärkte Auftreten von Strahlenpilzen und die Vermehrung pathogener Keime gehören zu den Folgewirkungen, die eine enge Begrenzung der zulässigen Aufwärmspannen bei Oberflächengewässern notwendig machen.

### 3.1.2. Auswirkungen auf Mikroklima, Schifffahrt und Erholungseignung

Bei den mikroklimatischen Auswirkungen erwärmter Flüsse und Seen steht die verstärkte Nebelbildung im Vordergrund. Entsprechende Gutachten von J. W. Caspar lassen den Schluß zu, daß zwar bei bestimmten Wetterlagen vorwiegend in den Übergangsjahreszeiten ein verstärktes Fluß- oder Seerauchen auftreten kann, daß aber die Mächtigkeit dieser Dampfnebelsschicht meist nicht mehr als 2 m beträgt und nur selten 10 m erreicht. Dabei seien Sichtweiten < 100 m seltene Erscheinungen und nur auf wenige Stunden des Jahres beschränkt [80, 81]. Das Gutachten von H. R. Scultetus über die Veränderung der Nebelhäufigkeit über der Unterweser durch Einleiten von Kühlwasser kommt zu ähnlichen Ergebnissen [82]. Beobachtungen am Kühlteich Wölferheim und im Bereich des Kraftwerks „Robert Frank“ an der Mittelweser, über die E. Gerking berichtet [70], scheinen die für US-amerikanische Kühlseen getroffene Feststellung [83] zu bestätigen, daß es zwar über den Seen gelegentlich zu verstärkter Dunstbildung komme, diese jedoch niemals zu Gebietsvernebelungen im Binnenland führe.

Bild 7 zeigt das Flußrauchen über dem Kühlwasser-Rücklaufkanal des Kraftwerks Emden in ca. 1,5 km Entfernung vom Austritt am 8. 11. 1975 um 12°. Die Temperatur des nicht erwärmten Hafengewässers betrug 12°C gegenüber 25°C an der im Bild 7 sichtbaren Stelle des Kanals. Als Lufttemperatur am Ufer in 2 m Höhe über der Wasseroberfläche wurde 10°C gemessen; die relative Feuchte lag bei 85%. Es herrschte eine Windgeschwindigkeit von ca. 0,7 m s<sup>-1</sup>.

Die Tendenz zu verstärkter Nebelbildung erwärmter Gewässer muß für die Schifffahrt als negative Auswirkung angesehen werden, ebenso Querströmungen an den Kühlwasserentnahme- und Rückleitungsstellen. Letztere Beeinträchtigung konnte jedoch in den letzten Jahren durch entsprechende Gestaltung der Bauwerke weitgehend ausgeschaltet werden. – Vor allem in Zukunft ist nicht auszuschließen, daß die zu erwartenden großen Wasserentnahmen insbesondere für nasse Kreislaufkühlung (worauf im Kapitel 4 eingegangen wird) die Niedrigwasserführung der Flüsse empfindlich verschärfen und damit eine zusätzliche Verringerung der Tauchtiefen verursachen.

Die Erholung an binnenländischen Fließgewässern der Bundesrepublik hat in den letzten 20 Jahren bedeutende Veränderungen erfahren. So ist vor allem durch die Konkurrenz „sauberer“ beheizter Freibäder der Reiz des Badens in Flüssen stark zurückgegangen. Dafür haben der Wassersport und die Erholungsaufenthalte im Uferbereich zugenommen. Starke Wassertrübungen, Uferverschmutzungen und vor allem Fäulnisgerüche müssen als hauptsächliche Beeinträchtigungen der Erholungseignung angesehen werden. Einzelheiten sind kürzlich u. a. von K. Reimann [72] und K. R. Imhoff [78] diskutiert worden.

### 3.1.3. Folgerungen für die Festlegung von Wassertemperatur-Obergrenzen

Die bisherigen Erkenntnisse über die Auswirkungen künstlicher Gewässererwärmungen haben in „Richtwerten“ für Maximalgrenzen ihren Niederschlag gefunden, die gegenwärtig in der Bundesrepublik zwar noch keine Gesetzeskraft besitzen, dennoch aber bei Kraftwerks-Baugenehmigungsverfahren bereits jetzt als Grundlage dienen [9]. Als maximale Aufwärmspanne für Binnenwasser der Bundesrepublik Deutschland gelten nach totaler Durchmischung des eingeleiteten

Warmwassers mit dem Flußwasser z. Zt. 3 K und bei besonders günstigen Voraussetzungen (mäßige Verschmutzung und stets ausreichender Sauerstoffgehalt) 5 K; als zulässige Maximaltemperaturen werden für zur Frischwasserkühlung geeignete sommerwarme Gewässer generell 28°C und für sommerkühle Gewässer 25°C angesehen [23]. Im Gezeitenbereich der Flußmündungen werden bei Wärmelastrechnungen niedrigere Werte sowohl für die Aufwärmspannen als auch für die Maximaltemperaturen zugrundegelegt [27, 28]. Die Höchsttemperatur des erwärmten Kühlwassers bei Wiedereinleitung in den Fluß ist auf 30°C festgesetzt; bei sommerlichen Vorlauftemperaturen des Flußwassers von z. B. 26°C darf das Wasser im Kondensator bei Durchlaufkühlung dann nicht wie üblich um rd. 10 K, sondern nur um 4 K aufgewärmt werden, was eine drastische Leistungsreduktion des Kraftwerks oder den Übergang auf andere Kühlverfahren erfordert.

Die gegenwärtig geltenden Wassertemperatur-Grenzwerte verschiedener Länder der Erde wurden erstmals 1974 [48] tabellarisch zusammengestellt. Danach gelten z. B. in den USA bei Flüssen 2,8 K und bei Binnenseen 1,7 K als höchstzulässige Aufwärmspannen nach völliger Durchmischung, während in der USSR für Flüsse und Binnenseen generell 3,0 K (Sommer) bzw. 5,0 K (Winter) zugelassen werden.

Derartige Temperatur-Obergrenzen limitieren zugleich das für Kühlzwecke nutzbare Wärmeabgabevermögen der Binnengewässer; über die für Planungsfragen „nasser“ Energieabfuhr so wichtigen Zahlenwerte der Kühlleistung freier Wasseroberflächen liegen z. Zt. nur wenige grobe und einander teilweise widersprechende Angaben vor.

### 3.2. Die Kühlleistung freier Wasserflächen

Vorwiegend unter Rückgriff auf Untersuchungen, die den Abkühlungsvorgang bei künstlich aufgeheizten Wasserkörpern mit Hilfe einer Exponentialfunktion quantitativ beschreiben [86, 87, 88], hat F. Günneberg (1973) [37] den Rahmen abgesteckt, innerhalb dessen sich der Wärmeübergang von freien Wasserflächen der Bundesrepublik in die Atmosphäre vollzieht. Für Süddeutschland (mittlere Windgeschwindigkeit rd.  $2 \text{ m s}^{-1}$ ) werden im Sommer  $15 \dots 35 \text{ W m}^{-2} \text{ pro K}$  Übertemperatur und für die Küste ( $u \sim 4 \text{ m s}^{-1}$ )  $25 \dots 50 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  genannt; im Winter seien diese Werte etwa zu halbieren. Der breite Spielraum, den diese Angaben aufweisen, rührt daher, daß die Wirksamkeit der die Abkühlung steuernden meteorologischen Parameter in der Deutschen Bundesrepublik starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegt, wodurch die gegenwärtig verfügbaren quantitativen Vorgaben für geplante Energieabfuhr durch Oberflächengewässer mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. – Es soll deshalb im folgenden der Versuch vorgeführt werden, aus mehrjährigen eigenen Messungen an einem nicht durch Abwärme belasteten stehenden Binnengewässer Nordwestdeutschlands derartige Zahlenwerte zu gewinnen.

#### 3.2.1. Ein Beitrag zur quantitativen Ermittlung der Wärmeabgabe offener Wasserflächen

Ausgehend von DFG-unterstützten vergleichenden Untersuchungen zur Verdunstungsbestimmung an freien Wasseroberflächen 1967/68 auf dem Steiner See nahe Münster, über deren Ergebnisse 1970 und 1971 [89, 90] berichtet wurde, konnten diese Arbeiten in Kooperation mit dem Staatlichen Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft Münster ab 1972 auf dem ca. 50 ha großen Südbecken der Stever-Talsperre bei Haltern (NRW) fortgesetzt werden. Der dabei ebenfalls mit DFG-Mitteln entwickelte „integrierende kinetische Verdunstungsmesser“ wurde bereits an anderen Stellen beschrieben [91, 92].

Während der Sommermonate 1973 und 74 wurden alle diejenigen Parameter kontinuierlich elektrisch registriert und automatisch auf Lochstreifen erfaßt, die zur vollständigen Beschreibung des Wärmehaushalts eines stehenden Oberflächengewässers notwendig sind. Dadurch ergab sich hier im Unterschied zu den bisher vorliegenden Wärmelastplänen für bundesdeutsche Flüsse die Möglichkeit, unter Rückgriff auf die in situ gemessenen meteorologischen Zeitreihen und Wassertemperaturen mit einem deterministischen Simulationsmodell die natürliche Temperaturentwicklung der Talsperre zu berechnen und mit den direkt gemessenen Werten zu vergleichen. Es besteht somit die Gelegenheit, die dem Modell wie auch den Wärmelastplänen zugrundeliegenden Bestimmungsgleichungen auf ihre Leistungsfähigkeit hin zu untersuchen und gegebenen-

falls zu optimieren. Ferner läßt das Modell die Berechnung der Wassertemperaturen bei verschiedenen (theoretischen) Abwärmefrachten zu, falls der See (unter den meteorologischen Bedingungen der Jahre 1973 und 74) als Kühlteich benutzt würde, was glücklicherweise nicht zu erwarten ist. Dabei werden die für eine angenommene Temperaturerhöhung des Wasserkörpers von 3 K zu erwartenden mittleren Wärmeabgabekoeffizienten ebenfalls berechnet. Das vorliegende Meßdatenmaterial wurde auf Stundenmittel- bzw. Stundensummenbasis zu kontinuierlichen Zeitreihen von 3...30 Tagen Länge verrechnet; die Zäsuren erklären sich durch Wartungs- und Reparaturarbeiten an der Station, Ausfälle der Lochstreifenstanze oder durch ein Vorherrschen „unergebiger“ Wetterlagen.

### 3.2.1.1. Die Bestimmungsgleichungen für den Wärmehaushalt eines Wasserkörpers

Nach O. Eckel und H. Reuter (1950) [19] haben für den mitteleuropäischen Bereich D. Flinspach und H. Fleig (1972) [17] und daran anknüpfend 1973 F. Berger und W. Schmitz [18] sowie K. R. Schmidt [38] das System möglicher Bestimmungsgleichungen für den Wärmehaushalt von Wasserkörpern eingehend diskutiert. Wie bei den Wärmelastrechnungen für bundesdeutsche Flüsse, so wird auch bei dem hier vorgestellten Kühlteichmodell ein Ensemble einfacher Bestimmungsgleichungen benutzt, das in einer Übersicht zusammengestellt ist.

Der stündliche Wärmesaldo (Gleichung 7) setzt sich zusammen aus dem erwärmungswirksamen Globalstrahlungsanteil  $k_s \cdot (I + H)$ , der langwelligen Strahlungsbilanz oder „effektiven Ausstrahlung“  $(G - A)$ , den Vertikalströmen latenter Wärme  $W_V$  und fühlbarer Wärme  $W_L$  sowie dem Bodenwärmestrom  $W_B$ . Laterale Wärmetransporte seien dabei unberücksichtigt gelassen. – Der Reflektionsanteil der Globalstrahlung an der Wasseroberfläche ist in den bisher vorliegenden Wärmelastrechnungen dadurch berücksichtigt, daß der Vorfaktor  $k_s$  mit 0,85 konstant gesetzt wird [17,23]. Angesichts der starken Abhängigkeit der Globalstrahlungs-Albedo freier Wasserflächen von der jeweiligen Sonnenhöhe  $\gamma$  müssen gegen ein derart vereinfachtes Verfahren jedoch Bedenken angemeldet werden. K. Y. Kondratyev [93] teilt eine Kurve mit, deren Verlauf durch eigene Untersuchungen mit einem elektrischen Globalstrahlungsmesser (Solarmeter Type CM5 der Fa. Kipp & Zonen) zumindest für die energetisch so wichtigen Sonnenhöhen  $> 20^\circ$  bei wolkenlosem Wetter vollauf bestätigt werden kann. So liegen über  $50^\circ$  Sonnenhöhe die  $k_s$ -Werte zwischen 0,95 und 0,98, was bedeutet, daß dann fast die gesamte Globalstrahlung vom Wasser aufgenommen wird. Bei völliger Himmelsbedeckung (Nimbostratus) verschwindet die Abhängigkeit der Albedo von der Sonnenhöhe erwartungsgemäß weitgehend;  $k_s$  weist dann Werte um 0,86 auf. (Die an der Stever-Talsperre gewonnenen Kurven für  $k_s$  der offenen Wasserfläche sind in Abb. 26 innerhalb des Abschnitts 5.1.1 dargestellt und diskutiert.) Beide Kurven wurden im Modell durch Polynome 3. Grades approximiert. In Ermangelung von auf Datenträgern verfügbaren Stundenwerten der Bewölkung wurde durchgehend der Kurvenverlauf für unbedecktes Wetter zugrundegelegt. Rechnerisch erhält das Gewässer dadurch bei Bewölkung eine zu hohe Wärmeeinnahme aus der Globalstrahlung; angesichts der insbesondere bei starker Bewölkung sehr geringen Absolutbeträge von  $(I + H)$  ist der Fehler jedoch vernachlässigbar klein. Da ohnehin eine Rechenanlage (IBM 360/50 im Rechenzentrum der Universität Münster) benutzt wird, bereitet die Anwendung von Formeln zur Bestimmung der Sonnenhöhe für jede Stunde des Jahres, wie sie z. B. in den Smithsonian Meteorological Tables [49] oder im Meteorologischen Taschenbuch [95] enthalten sind, keine Schwierigkeiten. Im Sinne eines möglichst vollständigen deterministischen Modellansatzes wird deshalb  $k_s$  für jede Stunde einzeln bestimmt; insbesondere um zu vermeiden, daß in den für die Abwärmelastbarkeit entscheidenden Zeiten großer Energieeinnahmen durch Globalstrahlung systematisch zu geringe Werte in die Rechnung eingehen.

Die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung  $G$  wurde nach der Ångström-Formel berechnet, wobei in Ermangelung anderer Werte für den Wasserdampfdruck der Luft  $e_L$  die Registrierung des 30cm über der Wasserfläche in 40m Uferabstand angebrachten elektrischen Aspirations-Psychrometers nach Frankenberger benutzt werden mußte. Vergleichsrechnungen mit Gegenstrahlungsformeln, wie sie bei W. Bach [96] sowie M. L. Heitmann, D. Richter und D. Schumann [97] verwendet werden, ergaben zumindest in Zeitreihen von Monatslänge keine signifikanten

Unterschiede gegenüber Gleichung 8, deren Konstanten sich nur geringfügig von denen der Wärmelastrechnungen unterscheiden.

Die langwellige Wärmestrahlung A der Wasseroberfläche wurde in üblicher Weise nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz berechnet. Für den Emissionsfaktor  $\epsilon$  der Wasseroberfläche wurde dagegen mit 0,96 ein etwas geringerer Wert zugrundegelegt als in den Wärmelastrechnungen nach Flinspach-Fleig [17] und [23]. Die Diskussion von  $\epsilon$  sowohl im Lake Hefner Report [98] als auch bei Heilmann-Richter-Schumann [97] lassen einen Wert von  $\epsilon = 0,96$  als am ehesten zutreffend erscheinen.

### Übersicht der Bestimmungsgleichungen für den Wärmehaushalt von Wasserkörpern

Bestimmungsgleichungen für die Wärmehaushaltsgrößen Stever-Talsperre 1973/74	
Stündlicher Wärmesaldo: $\Delta W = k_s (I+H) + (G-A) + W_v + W_L + W_B$ (cal cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	(7)
Wirksamer Globalstrahlungsanteil: $k_s (I+H); k_s = f(\gamma^{\circ}); \gamma^{\circ} = \text{Sonnenhöhe}$	
Atmosphärische Gegenstrahlung: $G = 4,92 \cdot 10^{-9} (0,83 - 0,25 \cdot 10^{-0,10 \epsilon_L}) (T_L + 273)^4$	(8)
Wärmestrahlung des Wassers: $A = 4,92 \cdot 10^{-9} \cdot \epsilon \cdot (T_w + 273)^4$ (cal cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	(9)
Emissionsfaktor des Wassers $\epsilon \sim 0,96$	
Vertikalstrom latenter Wärme (Verdunstung, Tau): $W_v = -2\alpha_L (E_w - e_L)$ (cal cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	(10)
Wärmeübergangszahl $\alpha_L = 0,49 u^{0,65}$ (cal cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) bei $u$ (m s <sup>-1</sup> )	
Vertikalstrom fühlbarer Wärme (Konvektion): $W_L = -\alpha_L (T_w - T_L)$ (cal cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	(11)
Bodenwärmestrom: $W_B = -\lambda \frac{T_w - T_B}{z_B - z_w}$ (cal cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	(12)
Wärmeleitfähigkeit des Seegrundes: $\lambda = 21,6$ (cal cm <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	
Stündliche Wassertemperaturänderung: $\Delta T_w = \frac{\Delta W}{c_w \cdot \rho_w \cdot z_w}$ (K h <sup>-1</sup> )	(13)
$c_w = 1,0$ (cal g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	
$\rho_w = 1,0$ (g cm <sup>-3</sup> )	
$z_w$ (cm)	

Die Bestimmungsgleichungen für die Vertikalströme fühlbarer und latenter Wärme wurden von mir bereits 1974 [91] und 1976 [92] eingehend erläutert. Insbesondere die Koeffizienten in Gleichung 10 („Dalton-Formel“) dürften wegen des in allen Jahreszeiten außer dem Hochwinter gewonnenen umfangreichen Datenmaterials auf Stundenwertbasis als sehr zuverlässig gelten. Unter Rückgriff auf Referenzwerte der Verdunstung, die mit den 1970 [89] beschriebenen schwimmenden Kessel-Registrieranlagen gemessen wurden, ergaben sich sowohl auf dem Steiner See als auch auf der Stever-Talsperre Exponenten der Windgeschwindigkeit von 0,65...0,70. Es muß deshalb angenommen werden, daß in den zahlreichen gegenwärtig diskutierten [23, 17, 38] Verdunstungsformeln für freie Wasserflächen weder der Windgeschwindigkeits-Exponent 0,5, noch der Wert 1,0 den Verdunstungsvorgang optimal beschreiben, sondern daß zumindest für Messungen in den untersten 2 m über der Wasseroberfläche und ausreichendem

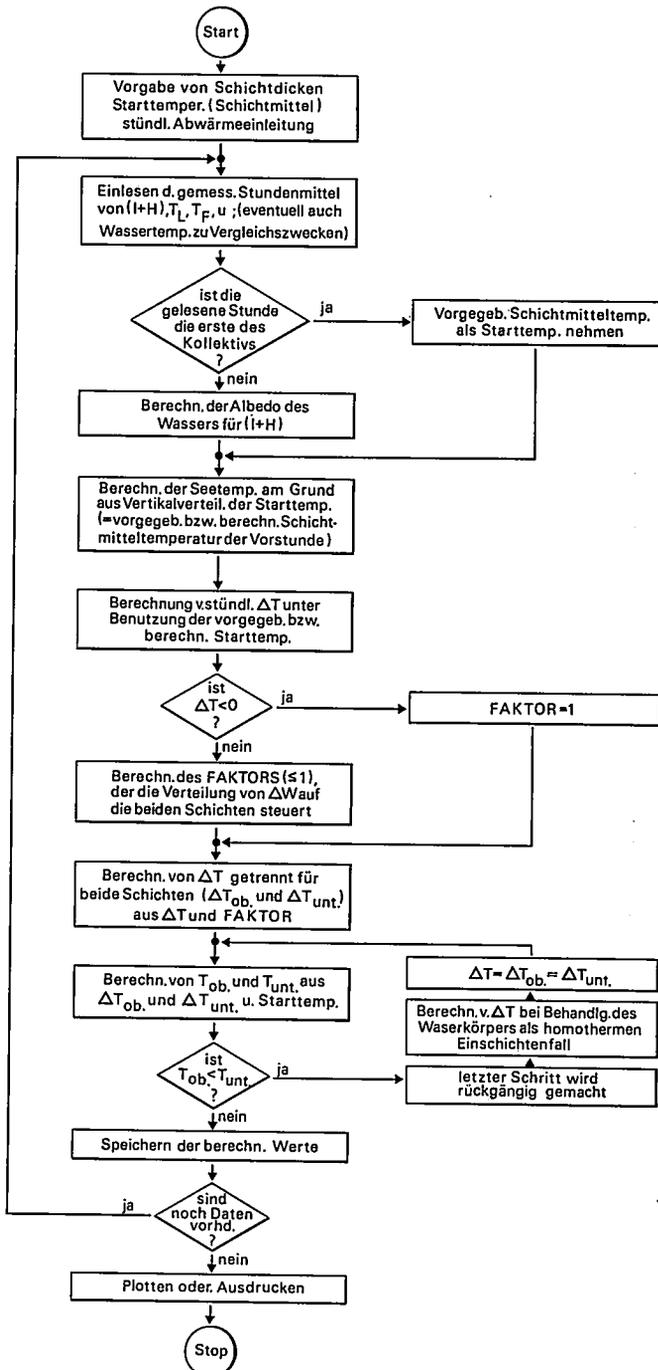


Abb. 10: Das Flußdiagramm des „Halterner Simulationsmodells“

Uferabstand (mindestens 40 m) die Verwendung des Ausdrucks „Wind hoch zwei Drittel“ empfehlenswert erscheint.

Für  $W_L$  kann bekanntlich dieselbe Wärmeübergangszahl benutzt werden wie für  $W_V$ , so daß damit Gleichung 11 als vollständig bestimmt gelten darf.

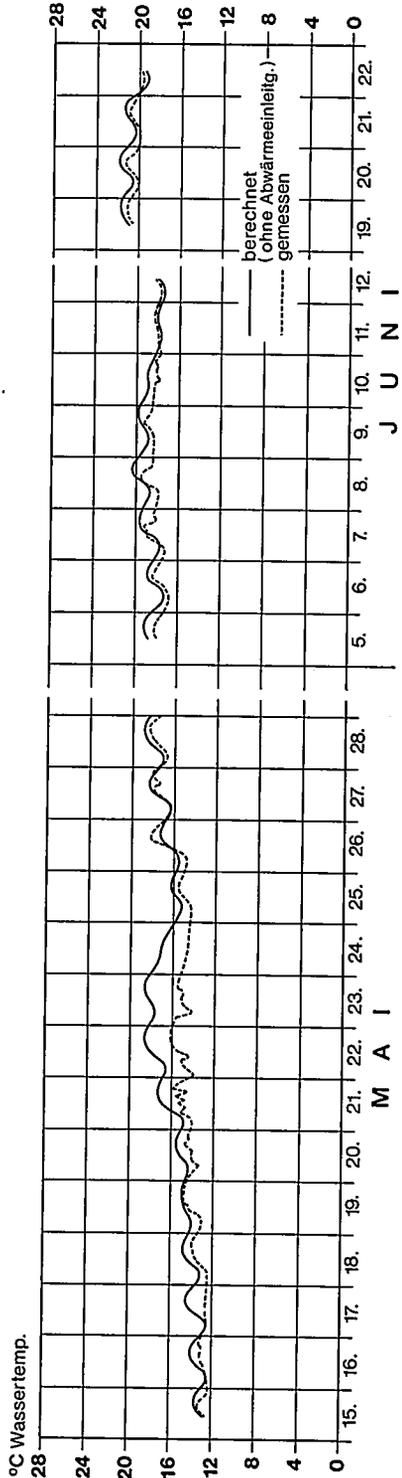
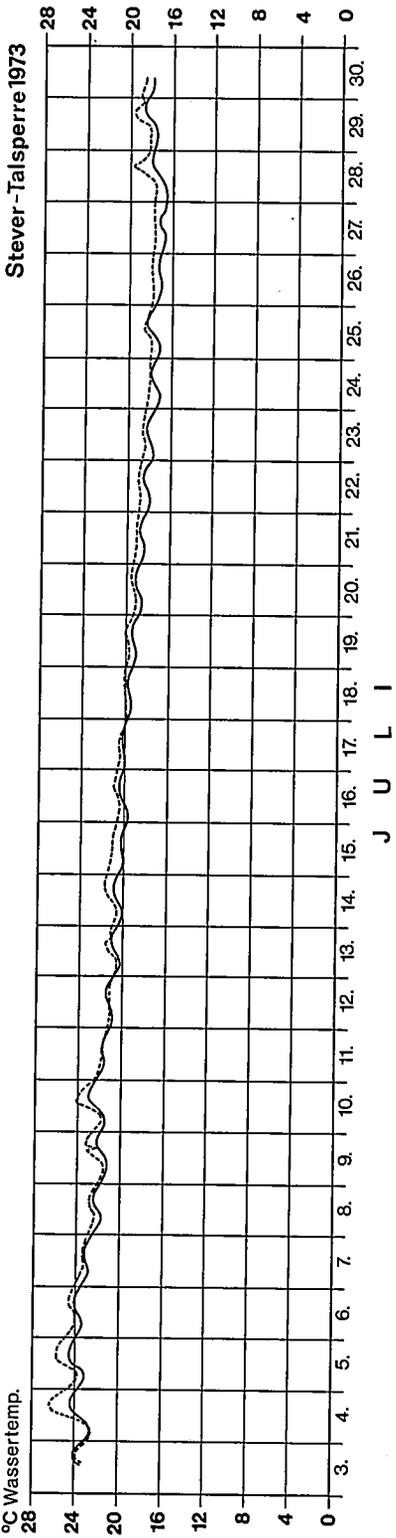
Im Unterschied zu den Wärmelastrechnungen für bundesdeutsche Fließgewässer wird in das hier vorgestellte Kühlteichmodell der Vollständigkeit halber auch der Bodenwärmestrom  $W_B$  mit einbezogen. Dazu kann in Anlehnung an R. Geiger [99] und D. Berényi [100] ein einfacher formaler Ansatz gemäß Gleichung 12 Verwendung finden. Die zu erwartende Größenordnung von  $W_B$  läßt sich – bei der von R. Geiger [99] angegebenen Wärmeleitfähigkeit für nassen Sand von  $\lambda = 21,6 \text{ cal cm}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$  – bereits durch einfache Überschlagsrechnung abschätzen: Bei einer von 1972–76 am Grund der Talsperre ( $z_W = 700 \text{ cm}$ ) gemessenen Maximaltemperatur von  $T_W = 22^\circ\text{C}$  und einer Grundwassertemperatur von  $10^\circ\text{C}$  in  $z_B = 1200 \text{ cm}$  Tiefe ergibt sich der Differenzenquotient zu  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ K cm}^{-1}$  und damit  $W_B$  zu  $-0,52 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Vergleicht man diesen Maximalwert z. B. mit zugehörigen Verdunstungsbeträgen von  $10 \dots 30 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  oder gar mit dem wirksamen mittäglichen Globalstrahlungsanteil von  $40 \dots 80 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , dann ergibt sich die relative Geringfügigkeit dieses Terms und damit die Rechtfertigung für die in den Wärmelastrechnungen durchgehend praktizierte Vernachlässigung von  $W_B$ .

Mit Gleichung 13 kann der stündliche Wärmesaldo einer (homothermen) Wassersäule von der Einheitsfläche und der Länge  $z_W$  in die zugehörige Temperaturänderung umgerechnet werden.

### 3.2.1.2. Aufbau und Funktion des „Halterner Simulationmodells“

Das hier in seinen Grundzügen vorgestellte Kühlteichmodell ähnelt zwar in erster Näherung den für Fließgewässer beschriebenen deterministischen Ansätzen [17, 18, 23], weist aber wegen des unterschiedlichen Temperaturverhaltens stehender Gewässer dennoch verschiedene Merkmale auf. So muß die in den vorliegenden Wärmelastrechnungen mit Recht angenommene vertikale Homothermie der gesamten Wassersäule beim Kühlteich als Ausnahmefall gelten; dagegen fallen hier die Probleme wechselnder Wasserführung, Fließgeschwindigkeiten und Flußquerschnitte weitgehend fort.

In Abbildung 10 ist der Rechnungsablauf als Flußdiagramm schematisch dargestellt. Nach Vorgabe der Schichtdicken, der gemessenen Starttemperatur und der angenommenen Abwärmehöhen für den als Zweischichtenfall behandelten hypothetischen Kühlteich werden die Stundensmittel der zur Wassertemperaturberechnung notwendigen meteorologischen Parameter eingelesen. Sofern diese Werte nicht der ersten Stunde des Kollektivs angehören, werden in Unterprogrammen zunächst die sonnenhöhenabhängige Albedo des Wassers für  $(I + H)$  und für die Berechnung von  $W_B$  die Seetemperatur am Grund bestimmt. Es folgt die Berechnung der stündlichen Temperaturänderung  $\Delta T$  für die normalerweise als 150 cm dick angenommene obere Schicht gemäß Gleichung 13 unter Rückgriff auf die Gl. (7) bis (12). Die Schichtdicke von 150 cm wurde aufgrund von Vergleichen gemessener mit berechneten vertikalen Temperaturprofilen gewählt; es ergab sich, daß bei der vorliegenden Wassertrübung die Absorption der Globalstrahlung in dieser Tiefe bereits fast vollständig erfolgt und daß zumindest bei Vorliegen stabiler Temperaturprofile des Wasserkörpers Wärmehöhen nur diese obere Schicht betreffen. Eine sich in diesem Schichtungsfall rechnerisch ergebende stündliche Temperaturabnahme ( $\Delta T < 0$ ) wird deshalb als nur die obersten 150 cm betreffend behandelt; hier wird der „Faktor“, welcher die Verteilung des stündlichen Wärmesaldos auf die beiden Schichten steuert, = 1 gesetzt. Ergibt die Berechnung gemäß Gleichung 13 für das obere Kompartiment hingegen eine stündliche Temperaturerhöhung ( $\Delta T > 0$ ), dann setzt sich diese meist mit zeitlicher Verzögerung in abgeschwächter Form bis in die untere Schicht durch, wobei trotz stabiler Wassertemperaturschichtung der Wind vertikale Durchmischungsvorgänge erzwingen kann. (Auf Einzelheiten dazu wird im Abschnitt 3.2.1.7 eingegangen.) – Um dem Anstieg der Mitteltemperatur des je nach Füllungsgrad der Talsperre 300...550 cm dicken unteren Kompartiments während der ersten Jahreshälfte Rechnung zu tragen, werden berechnete Wassertemperaturerhöhungen über den „Faktor“ auf die beiden Schichten verteilt. Je nach den vertikalen Wassertemperaturgradienten und der Windgeschwindigkeit kann der „Faktor“ dabei gemäß einem stochastisch bestimmten Kurven-



**Abb. 11a: Gemessener und (ohne Abwärmeeinleitung) berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre (Mai bis Juli 1973)**

# Stevertalsperre 1973

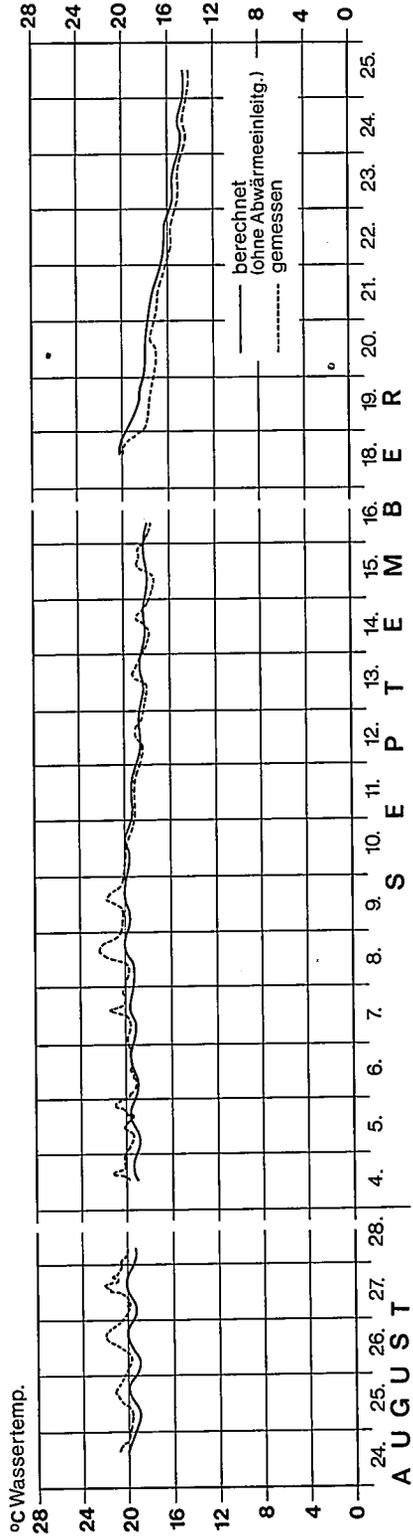
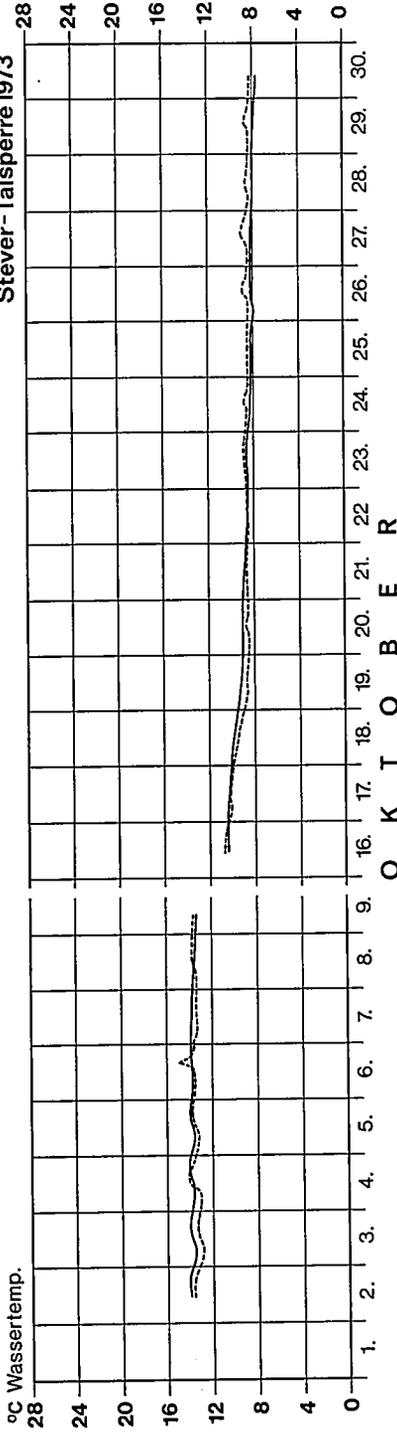
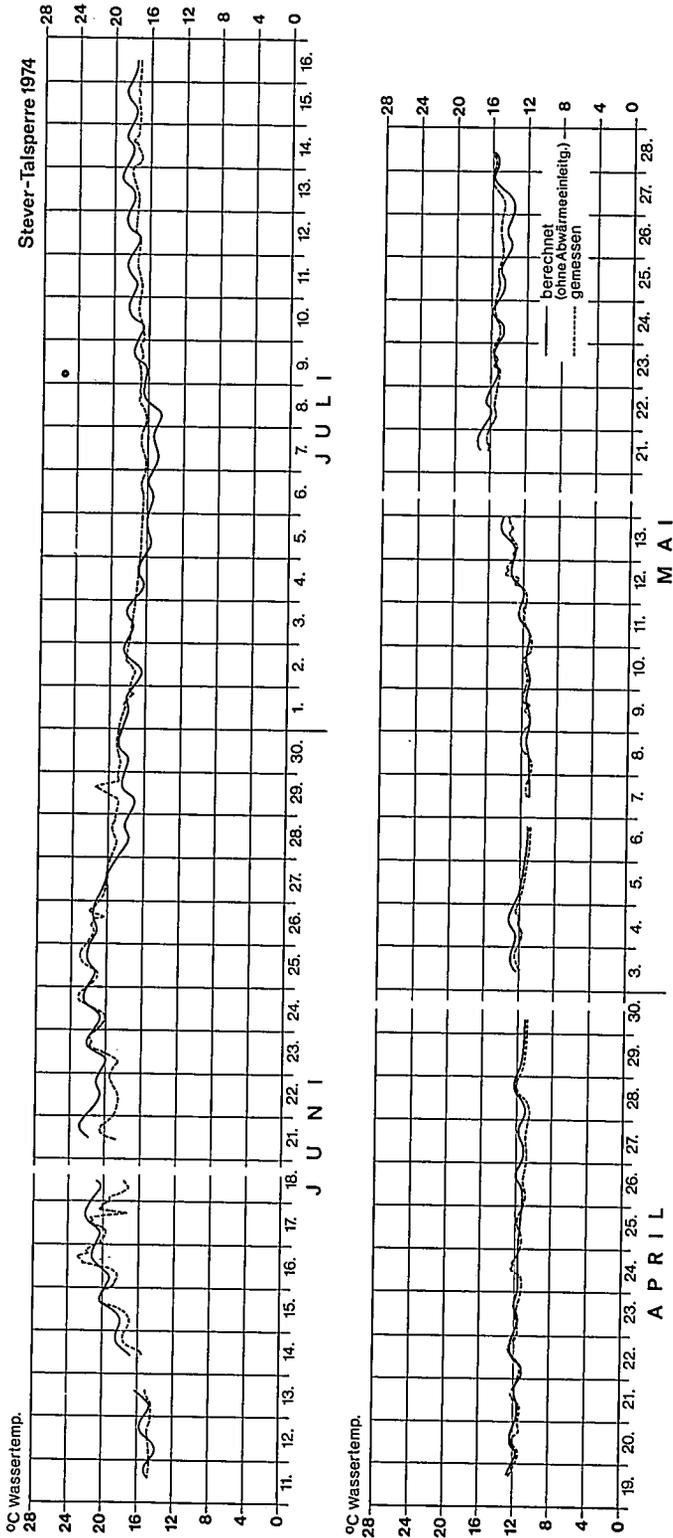


Abb. 11b: Gemessener und (ohne Abwärmeinleitung) berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stevertalsperre (August bis Oktober 1973)



**Abb. 11.c: Gemessener und (ohne Abwärmeeinleitung) berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Steyer-Talsperre (April bis Juli 1974)**

Steuer-Talsperre 1974

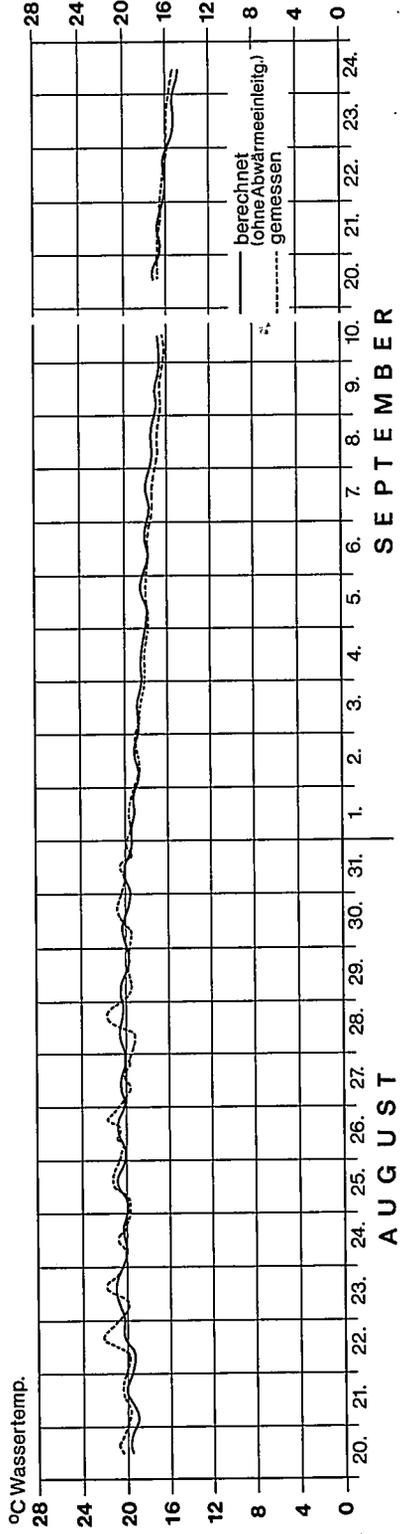
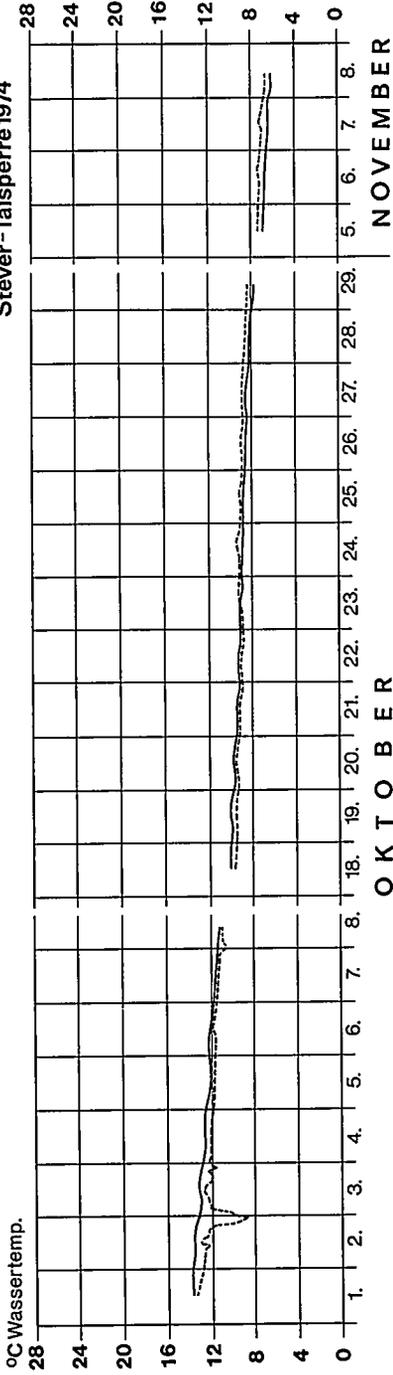


Abb. 11 d: Gemessener und (ohne Abwärmeeinleitung) berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Steuer-Talsperre (August bis November 1974)

verlauf Werte von 0,30...0,95 annehmen, d. h. 30...95% des für das obere Kompartiment berechneten positiven stündlichen Wärmesaldos kommen der Temperaturerhöhung in den obersten 150 cm zugute; der Rest läßt gemäß Gleichung 13 die Mitteltemperatur der unteren Schicht ansteigen.

Dieses Verfahren führt bei der Stever-Talsperre jedoch noch nicht in allen Fällen zu befriedigenden Ergebnissen.

So bedingen z. B. bei ausgeprägt antizyklonalen Wetterlagen langanhaltende starke E-Winde in der ersten Jahreshälfte trotz stabiler Wassertemperaturschichtung rasch ablaufende Durchmischungsvorgänge im See, die bis zum Grunde reichen und durch den Auftrieb kalten Wassers die gemäß Gleichung 13 berechnete Temperaturerhöhung des oberen Kompartiments verhindern. Beispiele hierfür finden sich in den Abbildungen 11 a (21. bis 24. 5. 73) und 11 c (17. und 18. 6. 74).

Sofern bei Berechnung der Schichtmitteltemperaturen im Modell Labilität, d. h.  $T_{ob} < T_{unt}$ , eintritt, wird der Wasserkörper als homothermer Einschichtenfall behandelt. Dadurch soll den bei derartig flachen Gewässern in der 2. Jahreshälfte zu beobachtenden Vollzirkulationen des Wassers Rechnung getragen werden, bei denen sich die dominierende Abkühlung der Wasseroberfläche als Labilisierung bis zum Grunde hin auswirkt, indem sie jegliche vertikalen Temperaturgradienten in der Talsperre zum Verschwinden bringt. Jedoch werden auch in der Abkühlungsphase negative „Temperatursprünge“ innerhalb der Oberschicht beobachtet, denen das Modell nicht gewachsen ist. Als Beispiel für eine solche Situation mag die in Abbildung 11 d enthaltene windintensive Nacht vom 2. zum 3. Oktober 1974 gelten. Zur Erklärung derartiger Diskontinuitäten im Wassertemperaturverlauf muß u. a. auf horizontale Temperaturunterschiede des Sees hingewiesen werden, die bei dem benutzten eindimensionalen Modell nicht berücksichtigt werden konnten. Die Existenz derartiger horizontaler Wassertemperaturdifferenzen wurde durch über 200 vom Boot aus an verschiedenen Stellen der Talsperre aufgenommene Temperaturprofile nachgewiesen; Unterschiede von 2 K in 0,75 m Tiefe und 1 K am Grund bilden auf dem Südbecken keine Ausnahme.

Die Plots, deren Beschriftung nachträglich von Hand vervollständigt wurde (Abb. 11 a - d), gestatteten eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Modells zur rechnerischen Simulation der Wärmeaustauschvorgänge in der Stever-Talsperre - eine Kontrolle, die bei den bisher vorliegenden Wärmelastrechnungen für bundesdeutsche Fließgewässer nur sehr beschränkt möglich ist.

Trotz mancher noch bestehender Unzulänglichkeiten scheint der gegenwärtig erreichte Entwicklungsstand des Modells den Versuch zu rechtfertigen, die Einleitung von Abwärme zu simulieren und deren Auswirkung auf die Temperatur der obersten 1,5 m zu berechnen. Dabei wird hier, wie auch in den vorliegenden Wärmelastplänen, von bereits erfolgter totaler Durchmischung des eingeleiteten Warmwassers mit dem Wasser des oberen Kompartiments ausgegangen. (Einzelheiten des Durchmischungsvorganges sind im Abschnitt 3.2.1.7 angesprochen.)

### 3.2.1.3. Errechnete Wassertemperaturen bei simulierter Abwärmeeinleitung

Unter Zugrundelegung angenommener konstanter Abwärmerraten  $W_A$  von 5, 10 und 15  $\text{cal cm}^{-2} \text{h}^{-1}$  wurde die mutmaßliche Temperaturentwicklung in der 150 cm dicken Oberschicht der Stever-Talsperre berechnet. Die in den Abbildungen 12 a bis d dargestellten Ergebnis-Plots zeigen einerseits, welche Aufwärmspannen unter dem Einfluß der gemessenen meteorologischen Parameter zu erwarten sind; andererseits lassen sie erkennen, wann und bei welcher Abwärmelast die als kritische Obergrenze geltende Wassertemperatur von 28°C erreicht bzw. überschritten würde. So träte Anfang Juli 1973 (Abb. 12 a) die Überschreitung der zulässigen Maximaltemperatur bereits bei einer Abwärmerrate von ca. 7  $\text{cal cm}^{-2} \text{h}^{-1}$  ein, während im Juni 1974 (Abb. 12 c) die kritische Obergrenze erst bei 15  $\text{cal cm}^{-2} \text{h}^{-1}$  erreicht würde. Für beide zugrundegelegten Jahre ergibt sich jedoch, daß - von kurzzeitigen Ausnahmen abgesehen - nur etwa 4..7  $\text{cal cm}^{-2} \text{h}^{-1}$  eingetragen werden können, sofern die als zulässig geltende Aufwärmspanne von 3 K nicht überschritten werden soll.



Steier - Talsperre 1973

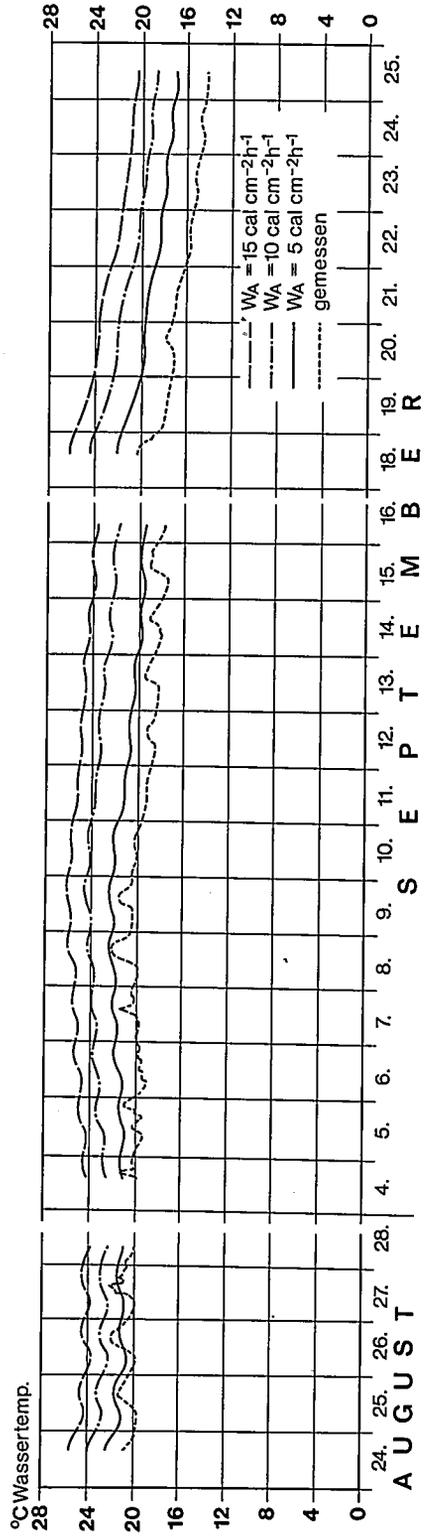
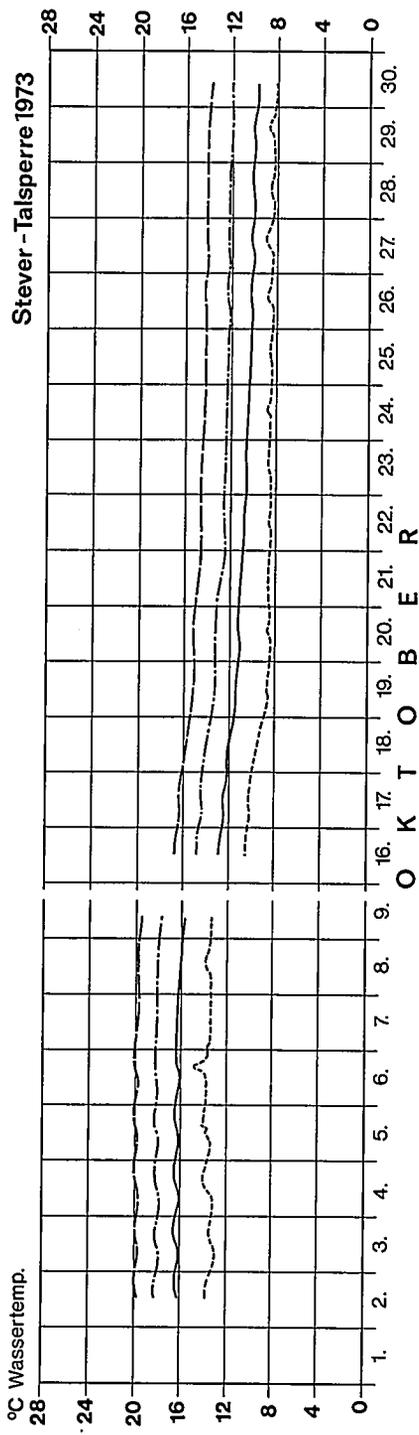


Abb. 12b: Gemessener und mit verschiedenen theoretischen Abwärmraten  $W_A$  berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Steier-Talsperre (August bis Oktober 1973)

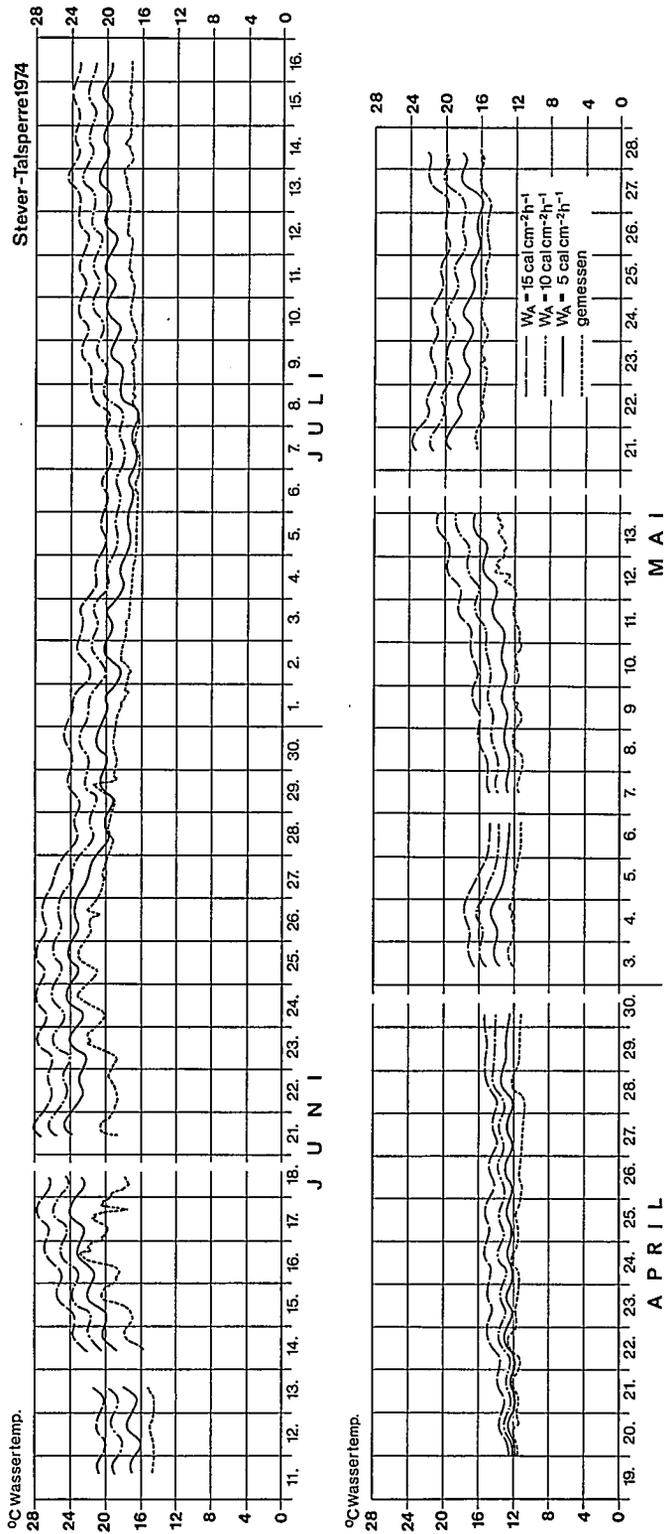


Abb. 12c: Gemessener und mit verschiedenen theoretischen Abwärmeraten  $W_A$  berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Stever-Talsperre (April bis Juli 1974)

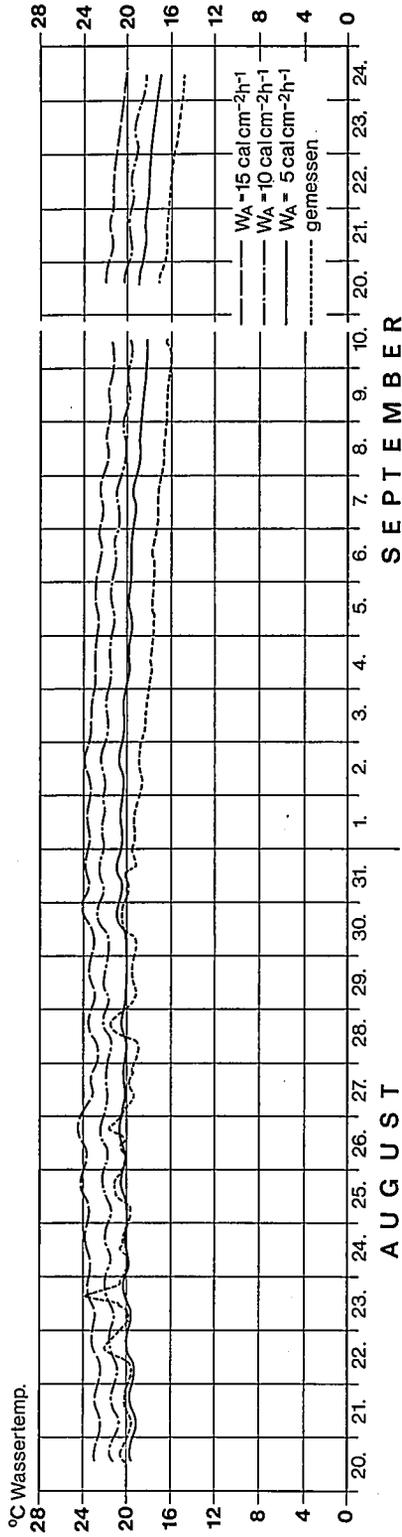
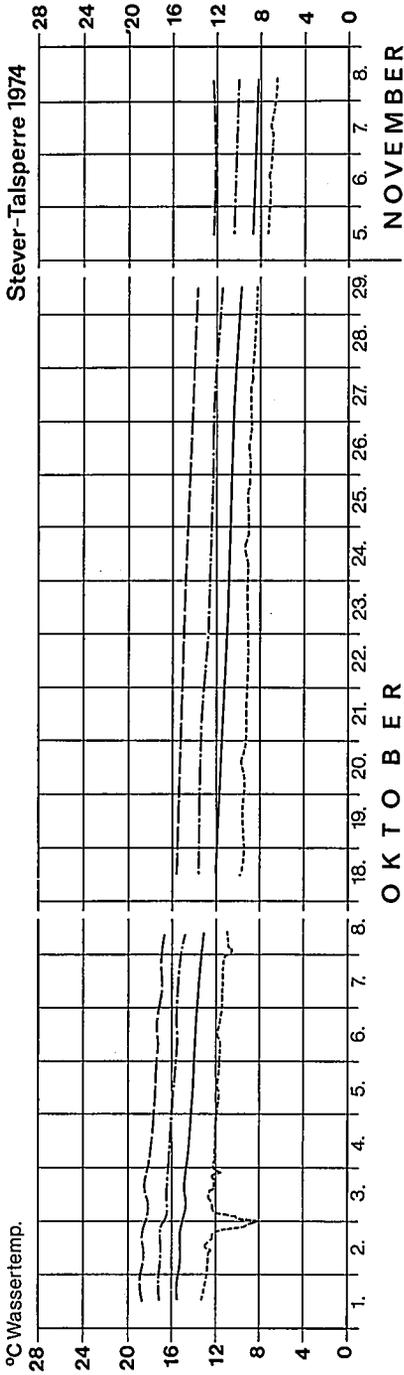
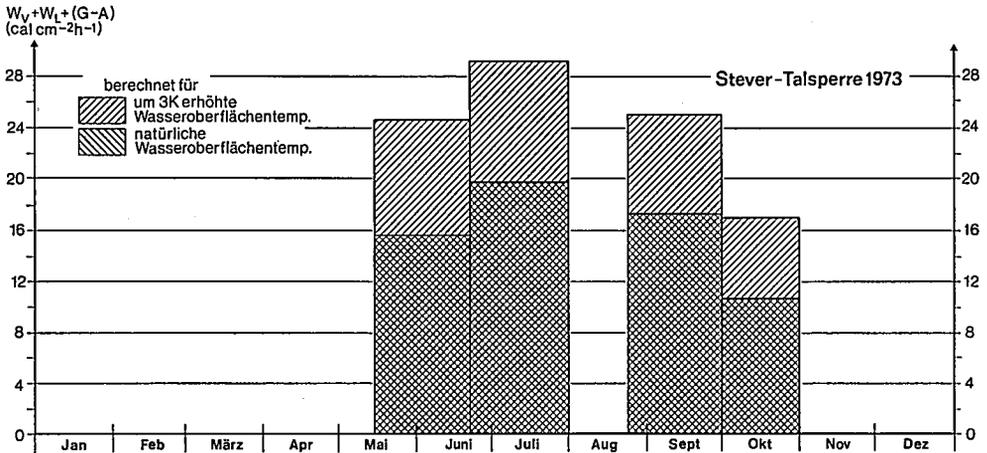
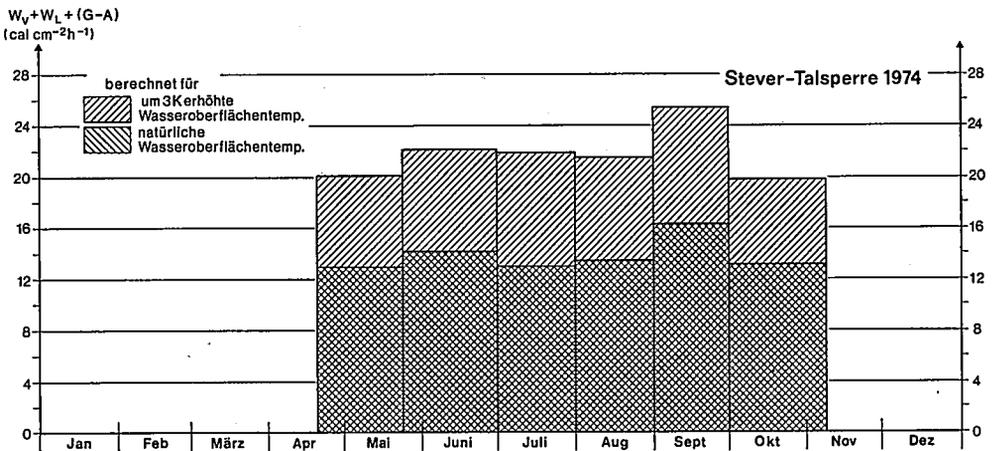


Abb. 12d: Gemessener und mit verschiedenen theoretischen Abwärmraten  $W_A$  berechneter Wassertemperaturverlauf in den obersten 150 cm der Steuer-Talsperre (August bis November 1974)

Für die quantitative Bestimmung zulässiger Abwärmerraten wichtiger als die hier und in den Wärmelastrechnungen für bundesdeutsche Flüsse vorgelegten Zeitreihenberechnungen erscheint die genaue Kenntnis der Wärmeabgabekoeffizienten von Oberflächengewässern. Diese



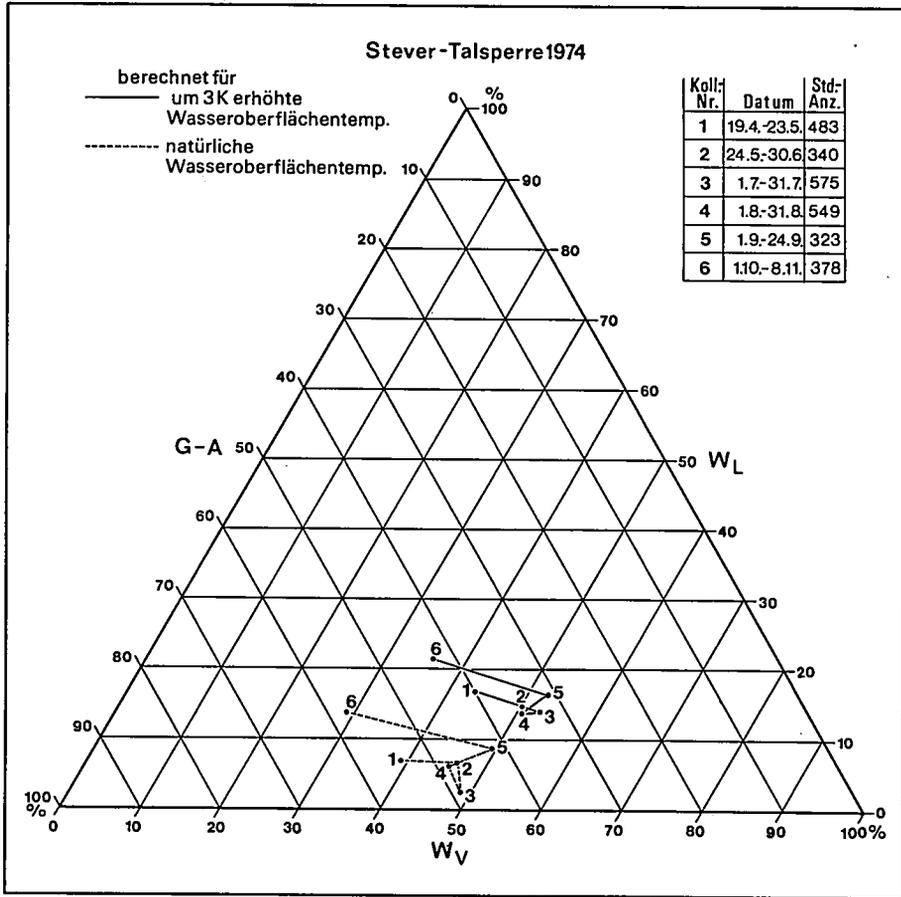
**Abb. 13a: Die Wärmeabgabe der Stever-Talsperre im Sommer 1973 in Abhängigkeit von verschiedenen Wasseroberflächentemperaturen**



**Abb. 13b: Die Wärmeabgabe der Stever-Talsperre im Sommer 1974 in Abhängigkeit von verschiedenen Wasseroberflächentemperaturen**

bilden den Kern der z. B. bei W. Kuhn [88] und F. Günneberg [37] vorgeführten Rechengänge zur Ermittlung maximal vertretbarer Abwärmefrachten in Kraftwerks-Planungsbeispielen. So basieren für den Tidebereich der Flüsse und für Küstenstandorte die hier anzuwendenden Rechenverfahren ausschließlich auf den (als bekannt angenommenen) eingesetzten Zahlenwerten für die Wärmeabgabekoeffizienten.

Die bei einer maximalen Aufwärmspanne von 3 K ohne Überschreitung des Temperaturgrenzwertes von 28°C bei sommerwarmen Gewässern der Bundesrepublik anzusetzenden Abwärmraten sollen im folgenden diskutiert werden. Dazu seien die von F. Günneberg [37] genannten



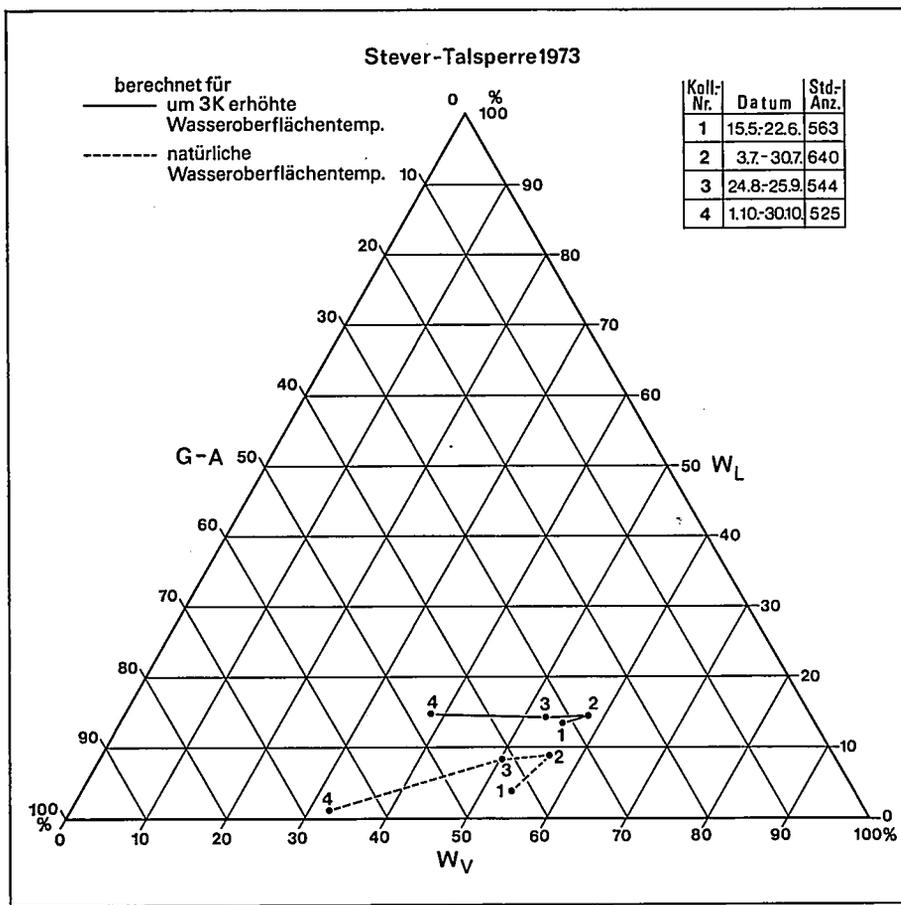
**Abb. 14a:** Das berechnete prozentuale Verhältnis der Abkühlungsmechanismen G-A,  $W_v$  und  $W_l$  zueinander (Hydrolog. Sommer-Halbjaar 1973)

Zahlenwerte mit derjenigen Wärmeabgabe verglichen, die sich 1973 und 74 an der Stever-Talsperre als zutreffend erwiesen hat.

#### 3.2.1.4. Die Wärmeabgabekoeffizienten bei Erhöhung der natürlichen Wassertemperatur um 3 K

Bekanntlich kann eine offene Wasserfläche über Verdunstung, Strahlung und direkte Lufterwärmung thermische Energie an die Atmosphäre abführen. Daß dabei neben den meteorologischen Größen in der wassernahen Luftschicht auch die Wassertemperatur großen Einfluß besitzt, wird u. a. in den Gleichungen 9 bis 11 deutlich. Für die Stever-Talsperre ist die Wärmeabgabe berechnet und dargestellt worden (siehe Abb. 13 a und b). Dabei wurden die Kollektive so zusammengestellt, daß bei Umfängen von je 500...700 Stundenwerten möglichst Monatsgrenzen oder längere Meßlücken die Zäsuren bilden. Während bei klar erkennbarem Jahresgang für das

hydrologische Sommerhalbjahr 1973 ohne Wärmelast Beträge von ca. 11...20 cal cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> auftreten, weist der entsprechende Zeitabschnitt 1974 Monatsmittel von 13...16 cal cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> für die Wärmeabgabe der Wasseroberfläche auf. Steuert man die (hypothetische) Abwärmelastung



**Abb. 14b:** Das berechnete prozentuale Verhältnis der Abkühlungsmechanismen G-A, Wv und Wl zueinander (Hydrol. Sommer-Halbjahr 1974)

rechnerisch so, daß stets die zulässige Aufwärmespanne von 3 K ausgeschöpft wird, ohne dabei die maximale Wassertemperatur von 28°C im obersten Kompartiment zu überschreiten, dann wächst, wie Abb. 13 a und b zeigen, die oberflächliche Wärmeabgabe 1973 in den Monatsmitteln um 6,5...9,5 cal cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> und 1974 um 6,5...9,0 cal cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> an. Einschränkung ist dazu allerdings anzumerken, daß wegen der unterschiedlich umfangreichen Datenkollektive sowie der verschiedenen zeitlichen Lage der Zäsuren in den Meßreihen die Jahre 1973 und 74 nicht exakt miteinander verglichen werden können.

Für eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit verschiedener Naßkühlverfahren erscheinen Kenntnisse darüber unerlässlich, wie sich die Wärmeabgabe von Wasseroberflächen auf die 3 Komponenten effektive Ausstrahlung G-A, Verdunstung Wv und fühlbaren Wärmestrom Wl verteilt. Für die Steuer-Talsperre wurden die Prozentanteile berechnet und in Abbildung 14 dargestellt.

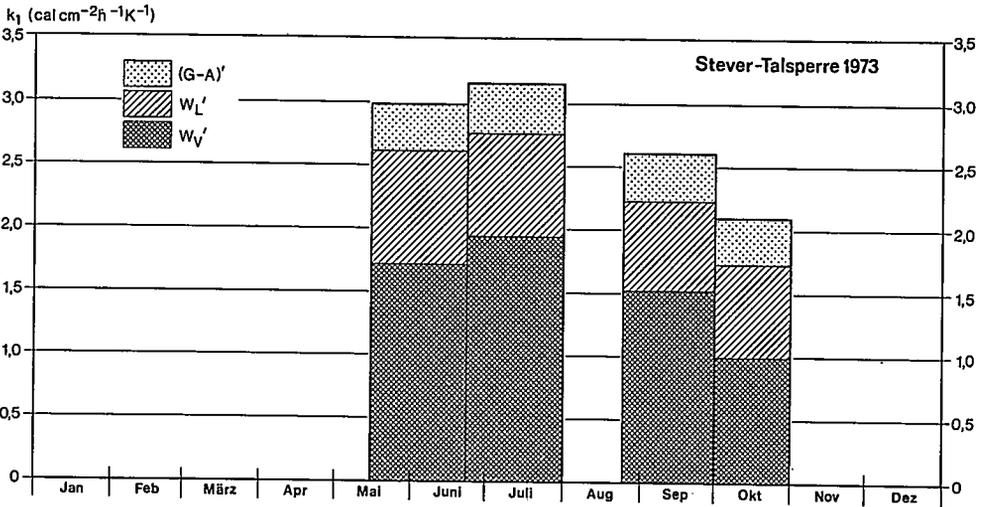


Abb. 15a: Der Wärmeabgabekoeffizient  $k_1$  für die freie Wasseroberfläche der Stever-Talsperre im Sommer 1973

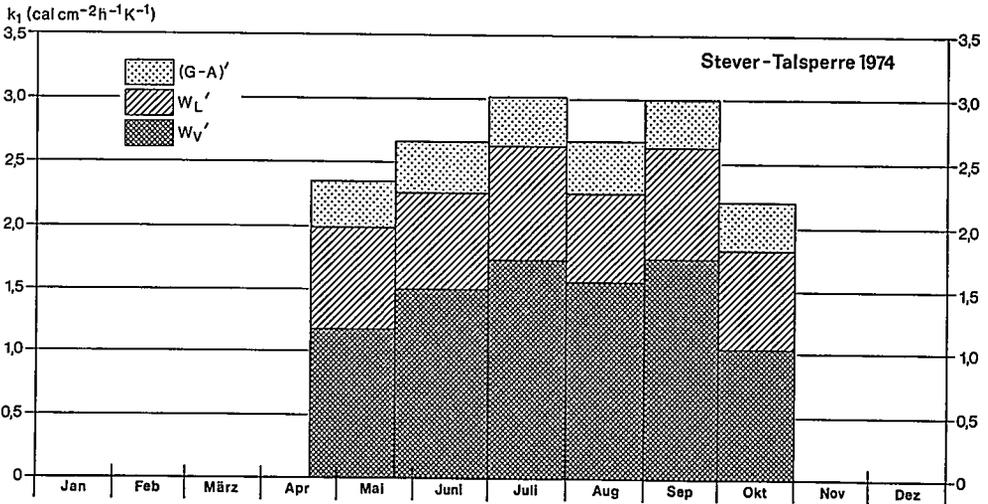


Abb. 15b: Der Wärmeabgabekoeffizient  $k_1$  für die freie Wasseroberfläche der Stever-Talsperre im Sommer 1974

In beiden Beobachtungsjahren ist bei Erwärmung der oberen Wasserschicht um 3 K eine relative Abnahme des Anteils der effektiven Ausstrahlung an der Wärmeabgabe zugunsten von  $W_v$  und  $W_L$  festzustellen. Der scheinbare Widerspruch eines Rückganges der langwelligigen Ausstrahlung  $A$  des Wassers trotz steigender Oberflächentemperatur findet seine Erklärung darin, daß  $A$  und damit  $G-A$  zwar mit der Wassertemperatur ansteigt, jedoch langsamer als  $W_v$  und  $W_L$ , wodurch die in Abbildung 14 erkennbare prozentuale Verschiebung der 3 Komponenten gegeneinander hervorgerufen wird.

In den Abbildungen 15 a und b sind die Absolutbeträge der Steigerung des Wärmeabgabevermögens dargestellt, wie sie sich für die Stever-Talsperre pro K abwärmebedingter Temperaturerhöhung als Monatsmittel ergeben. Dabei setzen sich die Säulenlängen additiv aus den 3 Komponenten zusammen. (Der Strich-Index soll andeuten, daß es sich hier nicht um die sonst verordneten Gesamtbeträge handelt, sondern nur um deren Anstieg pro K Temperaturerhöhung. Die Größe  $k_1$  stellt den bei W. Kuhn [88] und F. Günneberg [37] mit A bezeichneten Wärmeabgabekoeffizienten dar; um Verwechslungen mit der in allen Wärmelastrechnungen als A geschriebenen langwelligen Ausstrahlung des Wassers, der  $v$ -Kármán-Konstanten  $k$  oder dem Globalstrahlungs-Anteilsfaktor  $k_s$  in Gleichung 7 zu vermeiden, wurde der Wärmeabgabekoeffizient hier  $k_1$  genannt.)

Die in der Abbildung 15 dargestellten Kollektivmittel des Wärmeabgabekoeffizienten schwanken im Sommerhalbjahr 1973 zwischen 2,1 und 3,2  $\text{ly h}^{-1} \text{K}^{-1}$ , während sich 1974 Beträge von 2,2...3,0  $\text{ly h}^{-1} \text{K}^{-1}$  ergeben.

Die auch hier wiederum auftretenden Unterschiede in den Zahlenwerten von 1973 und 74 unterstreichen den Einfluß des jeweiligen Witterungsverlaufs auf die erhaltenen Ergebnisse. Da außer Extremwerten gerade die häufigsten Werte (die nicht mit den arithmetischen Mitteln identisch zu sein brauchen) für den hier angesprochenen Problembereich Bedeutung besitzen, erscheint ein Vergleich der zugrundeliegenden Jahre mit „langjährigen Mittelwerten“ geboten.

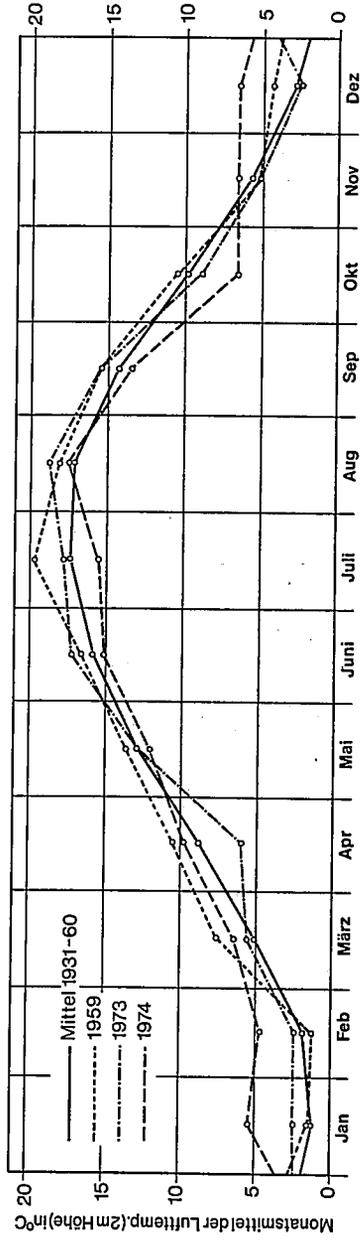
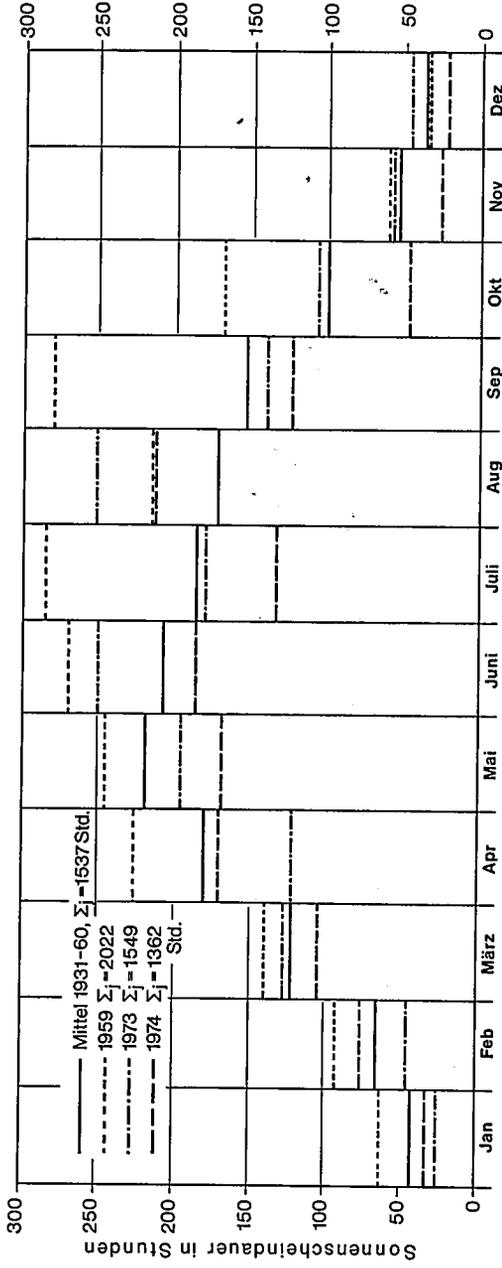
### 3.2.1.5. Vergleich der zugrundeliegenden Meßreihen mit langjährigen Mittelwerten

Da die Registrierung von Klimawerten an der Stever-Talsperre erst 1967 vom Staatlichen Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft Münster begonnen wurde, mußte für einen Vergleich der Jahre 1973 und 74 mit den Mittelwerten des Lustrums 1931-60 auf die Stationen Essen und Münster zurückgegriffen werden. Dabei erschien eine arithmetische Mittelung der Monatswerte von Essen und Münster, wie sie in den Monatlichen Witterungsberichten des Deutschen Wetterdienstes [101] bzw. von den Stationen selbst angegeben werden, als der am ehesten gangbare Weg. Die Größenordnung der dabei auftretenden Fehler läßt sich dadurch erkennen, daß man die so erhaltenen „hypothetischen“ Monatsmittel für 1973 und 74 den an der Stever-Talsperre „direkt“ bestimmten Werten gegenüberstellt. Bei der Sonnenscheindauer ergab sich in den Monatssummen eine maximale Abweichung von 23 Std. entsprechend 15,33% des Monatsmittels (April 1974); bei den Monatswerten der Lufttemperatur war die größte Differenz 0,4 K. Beim Niederschlag traten erwartungsgemäß die größten Abweichungen in den Monatssummen auf. Je nach den Absolutbeträgen entsprachen die Differenzen von 5...25 mm relativen Abweichungen zwischen 2 und 37% der Monatssummen.

Betrachtet man die in Abb. 16 oben aufgetragenen Monatssummen der Sonnenscheindauer, dann fällt auf, daß nicht nur das ebenfalls zum Vergleich herangezogene thermische und hygrische Extremjahr 1959, sondern auch das Beobachtungsjahr 1973 während der Meßperiode zumindest im Juni, August und Oktober überdurchschnittliche Werte aufwies. Dabei wurde das langjährige Mittel sogar im August 1973 um 80 Std., d. h. 47%, übertroffen, während die Jahre 1959 und 1974 nur um rd. 26% über dem Langjahres-Augustmittel lagen.

Bei den in Abb. 16 unten dargestellten Lufttemperaturen in der Wetterhütte liegen 1973 die Juni- und Augustmittel ebenfalls über den Werten von 1959 und damit z. T. erheblich über den langjährigen Mitteln; dagegen erweist sich nicht nur in der Sonnenscheindauer, sondern auch in den Monatsmitteltemperaturen das hydrologische Sommerhalbjahr als zu kühl und – wie Abb. 17 oben zeigt –, zumindest in den Monaten Mai, Juni, September und Oktober das Jahr 1974 als zu feucht. Die zu hohe Feuchte wird auch in Abbildung 17 unten deutlich, wo zum Vergleich monatliche Sickerraten der sandgefüllten und grasbestandenen Lysimeteranlage Senne [102, 103] aufgetragen sind. Obwohl die Anlage rd. 100 km von Haltern entfernt steht, braucht auf die Aussagekraft dieser Verdunstungsmeßreihe doch nicht ganz verzichtet zu werden. Sie unterstreicht, daß zumindest die Monate August und September 1973 mittelwertklimatologisch einen Vergleich mit dem Extremjahr 1959 durchaus zulassen.

Zwar stehen für die angestrebte Gegenüberstellung der Meßjahre 1973 und 74 mit Durchschnittswerten günstigstenfalls einige wichtige verdunstungswirksame Klimagrößen zur Ver-



**Abb. 16: Vergleich von Monatssummen der Sonnenscheindauer und Monatsmitteln der Lufttemperatur an der Steuer-Talsperre mit langjährigen Mittelwerten**

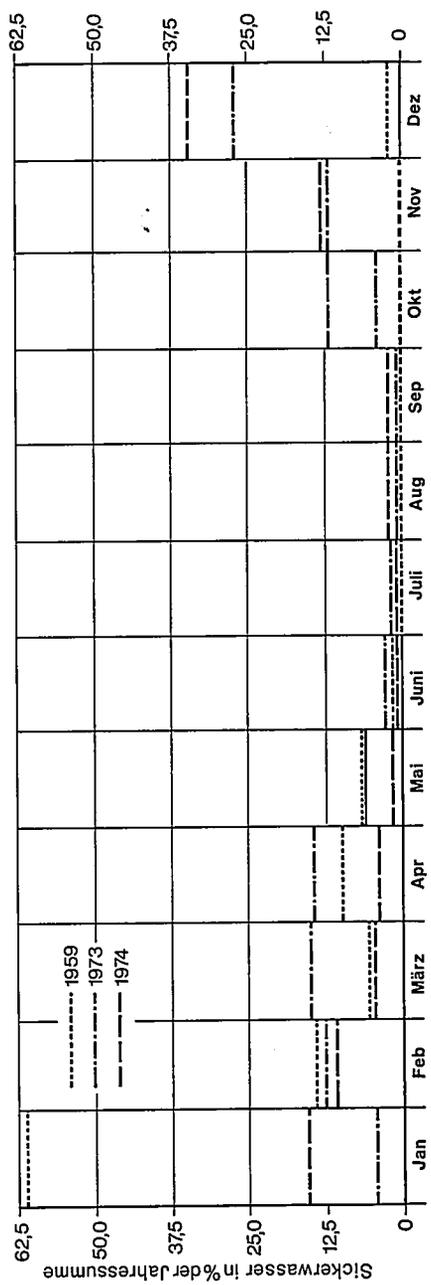
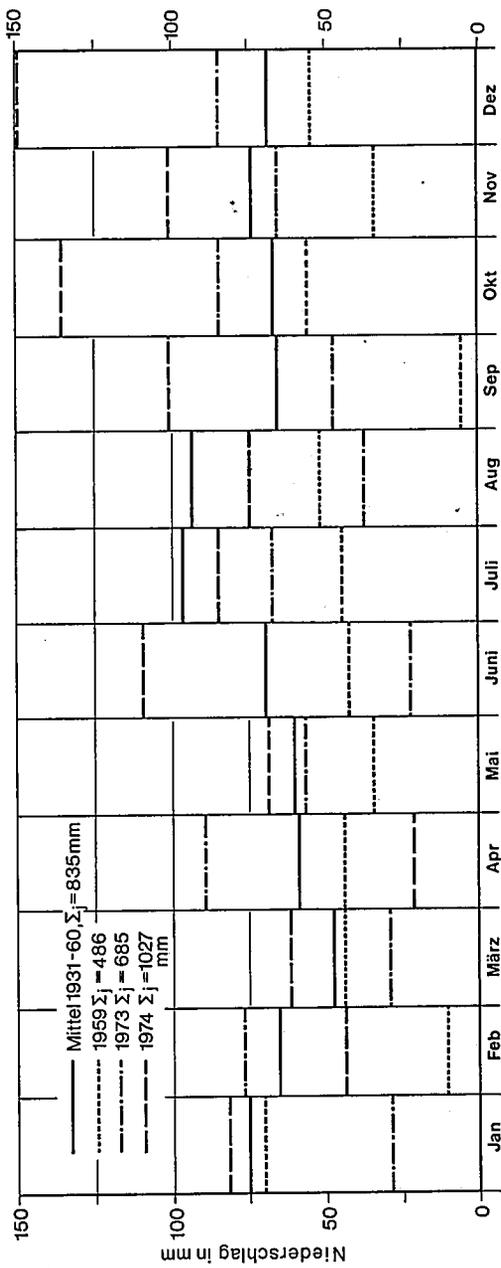


Abb. 17: Vergleich von Monatssummen des Niederschlags an der Steyer-Talsperre mit langjährigen Mittelwerten (oben) und Gegenüberstellung der Lysimeter-Sickerwassermengen von 1973 und 74 mit Werten des Trockenjahres 1959

fügung; eine exakte Berechnung von Langjahresmitteln z. B. des Wärmeabgabekoeffizienten für die Wasseroberfläche der Stever-Talsperre erscheint daraus aber kaum möglich. Dennoch darf vielleicht die Vermutung gewagt werden, daß die mit dem „Haltners Simulationsmodell“ berechneten Monatsmittel je nach Witterungsverlauf im Hochsommer Maximalwerte von  $2,5 \dots 3,3 \text{ ly h}^{-1} \text{ K}^{-1}$  annehmen werden, während im langjährigen Mittel Sommerwerte bis zu  $2,9 \text{ ly h}^{-1} \text{ K}^{-1}$  auftreten werden. Zu gewagt erscheint allerdings die exakte Extrapolation der erkennbaren Jahresgänge auf die Wintermonate; die Abbildungen 15 a und b lassen jedoch die Annahme etwa halber Hochsommerwerte für  $k_1$  bei offenen Wasseroberflächen im Winter als nicht abwegig erscheinen. Rechnet man die mutmaßlichen Mittel von  $k_1 = 2,9$  bzw.  $1,45 \text{ ly h}^{-1} \text{ K}^{-1}$  entsprechend um, dann ergeben sich mit  $33,8$  bzw.  $16,9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  Beträge, die recht gut in den von F. Günneberg [37] grob abgesteckten Rahmen (Sommerwerte zwischen  $15 \dots 35 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  für Süddeutschland und  $25 \dots 50 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  an der Küste; im Winter die Hälfte) hineinpassen.

### 3.2.1.6. Anmerkungen zum spezifischen Wasserverbrauch bei Durchlaufkühlung

Anhand der Kenntnisse von Zahlenwerten des Wärmeabgabekoeffizienten freier Wasseroberflächen sowie von dessen anteiliger Zusammensetzung aus  $G_A$ ,  $W_y$  und  $W_L$  läßt sich der spezifische Wasserverbrauch bei Durchlaufkühlung ableiten. Dazu sei ein frischwassergekühltes thermisches Kraftwerk von  $1000 \text{ MW}_e$  bei  $\eta_{\text{eff}} = 40\%$ , d. h.  $1500 \text{ MW}_A$ , betrachtet. Geht man mit H. Werkmeister [55] davon aus, daß rd.  $10\%$  der Abwärme nicht durch Frischwasserkühlung abgeführt werden müssen, da sie auf andere Weise abgehen, dann verbleibt für die reine Durchlaufkühlung eine Netto-Abwärmemenge  $Q_3 = 1350 \text{ MW}_A$  zur Abfuhr in einen Fluß oder See. Wird dabei nach völliger Durchmischung des erwärmten Kühlwassers eine Temperaturerhöhung um  $3 \text{ K}$  bewirkt, dann dürfte der in exponentieller Zeitfunktion verlaufende Abkühlungsvorgang sich gemäß Abb. 14 a und b im Sommer zu etwa  $35\%$  auf  $G_A$ ,  $55\%$  auf  $W_y$  und  $10\%$  auf  $W_L$  verteilen. „Strahlungskühlung“  $G_A$  und Abfuhr fühlbarer Wärme  $W_L$  verlaufen „trocken“, so daß nur für  $W_y$  Wasser verbraucht wird, und zwar im Mittel  $585 \text{ cal g}^{-1}$ . Von der anfallenden Netto-Abwärme werden also  $55\% = 0,64 \cdot 10^{12} \text{ cal h}^{-1}$  „naß“ abgeführt, wofür  $1094 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  Wasser notwendig sind. Dieser Wert entspricht ungefähr der Angabe  $0,35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  im Wärmelastplan Weser [28] für ein frischwassergekühltes konventionelles Wärmekraftwerk; über die zugrundeliegenden Daten und die Berechnungsmethode finden sich keine Hinweise, so daß ein weitergehender Vergleich kaum möglich ist. (Die Monatsmittel der Verdunstungsverluste, wie sie bei  $\Delta T = 3 \text{ K}$  für Frischwasserkühlung von  $1000 \text{ MW}_e$  an der Stever-Talsperre 1973 und 74 theoretisch aufgetreten wären, sind in den Abb. 24 und 25 eingezeichnet und im Abschnitt 4.2.1 dem Wasserverlust bei nasser Turmkühlung gegenübergestellt.)

### 3.2.1.7. Temperaturgradienten in Gewässern, die zur Energieabgabe genutzt werden

In den bisher vorliegenden Wärmelastrechnungen werden die durch Einleitung warmen Wassers zunächst auftretenden horizontalen und vertikalen Temperaturgradienten im Wasserkörper zugunsten einer angenommenen totalen Durchmischung vernachlässigt. Wie eine Reihe von Detailstudien zeigt, treten insbesondere bei punkthafter Einbringung großer Warmwassermengen in Flüsse Probleme auf, die mit dem Stichwort „Warmwasserfahne“ gekennzeichnet werden können. Die Durchmischung erfolgt zuweilen nur zögernd, so daß kilometerweit stromabwärts horizontale und vertikale Temperaturgradienten erhalten bleiben, die für Gewässerbiologie und -chemie nicht selten Beeinträchtigungen darstellen [23]. Über Untersuchungen dieses Problems bis 1973 berichtet K. R. Schmidt [38]; der Forschungsstand bis 1975 kann aus den Referaten ersehen werden, die im Rahmen eines Kurzlehrganges zu „Ausbreitung und Transportvorgänge in Strömungen“ (SFB 80 Karlsruhe) gehalten wurden und von C. Zimmermann, H. Kobus und P. Geldner veröffentlicht sind [104].

Wie bei Flüssen, so breitet sich auch in Seen eingeleitetes Warmwasser zunächst vorwiegend horizontal an der Oberfläche aus, gerät dann aber in den Wirkungsbereich von Vertikalzirkulationen, wobei hier grundsätzlich zwischen „tiefen“ und „flachen“ Gewässern unterschieden werden muß. Bekanntlich wird ein „tiefer“ See dadurch gekennzeichnet, daß sich im Jahresablauf außer der meist gut durchmischten oberen Wasserschicht (Epilimnion) – getrennt durch eine Sprungschicht – das Hypolimnion als Tiefenschicht ausbildet. Folgt man den Ausführungen R.

Kellers im Lehrbuch [105], dann sind Seen bis zu 10...20 m Tiefe als „flache“ Gewässer anzusehen, bei denen sich nur vorübergehend Temperaturschichtungen einstellen. Als Kühlteiche sind also „tiefe“ Seen zu bevorzugen, bei denen im Sommerhalbjahr aus dem Hypolimnion Kühlwasser entnommen werden kann, ohne daß ein „Temperatur-Kurzschluß“ zwischen kaltem Vorlauf und warmem Rücklauf befürchtet werden muß.

Da für Kühlzwecke geeignete „tiefe“ Seen ausreichender Flächengröße in der Bundesrepublik kaum zur Verfügung stehen, kommen in Einzelfällen vorwiegend „flache“ Seen als Kühlteiche in Betracht, bei denen in erster Linie horizontale Temperaturgradienten für Kühlzwecke ausgenutzt werden könnten.

Gelegentlich wird die Auffassung vertreten, daß für alle Typen stehender Oberflächengewässer vom Vorhandensein einer ausgeprägten vertikalen Temperaturschichtung ausgegangen werden könne. So nimmt K. R. Schmidt [38] an, eingeleitetes erwärmtes Kühlwasser mische sich nicht mit der Hauptwassermasse, so daß Fische, Algen und Bakterien unterhalb der Deckschicht nicht beeinflußt würden – eine Auffassung, die zeitweilig auch von der US-amerikanischen Elektrizitätswirtschaft zu Unrecht vertreten wurde [106].

Daß zumindest bei flachen Seen selbst ausgeprägt stabile Wassertemperaturschichtungen durch Windeinfluß rasch bis zur Homothermie abgebaut werden, sei im folgenden an Beispielen der Stever-Talsperre gezeigt.

Wie von mir bereits an anderer Stelle für die windbedingte Verschiebung von Meereis ausgeführt [107], kann als Maß für die Durchmischungswirksamkeit des Windes die tangentielle Schubspannung  $\tau$  angesehen werden. Schreibt man in üblicher Weise

$$\tau = \varphi_L \cdot u_*^2 \quad (\text{dyn cm}^{-2}) \quad (14),$$

dann ist (mit der Luftdichte  $\varphi_L \sim 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ ) für die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  der Ausdruck einzusetzen

$$u_* = \frac{k \cdot (u_2 - u_1)}{\ln \left( \frac{z_2}{z_1} \right)} \quad (\text{cm s}^{-1}) \quad (15).$$

Die  $\nu$ -Kármán-Konstante  $k$  hat einen Wert nahe 0,4, so daß sich damit bei Vorliegen von Windgeschwindigkeitsmessungen  $u_1$  und  $u_2$  in zwei Höhen  $z_1$  und  $z_2$  unter Annahme eines logarithmischen Windprofils die Schubspannung  $\tau$  in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bestimmen läßt. Da auf der Stever-Talsperre jedoch keine Windgradienten-Meßanlage eingesetzt war, mußte auf die eigenen Windprofilregistrierungen vom Steiner See bei Münster-Hiltrup aus den Jahren 1967 und 68 zurückgegriffen werden. (Hier war 100 m vom Westufer entfernt die Windgeschwindigkeit in 17, 100 und 330 cm Höhe über der Wasserfläche kontinuierlich registriert und auf Lochstreifen festgehalten worden [90]. Da sich in allen Fällen vertikaler Luftschichtung über dem See logarithmische Windprofile ergaben [108] – das tageszeitliche Auftreten der Schichtungsfälle im Sommer 1968 zeigt Abbildung 18 –, bot sich die Möglichkeit, die Abhängigkeit der Schubspannung von der Windgeschwindigkeit (z. B. in 30 cm Höhe,  $u_{30}$ ) durch eine einzige Kurve zu beschreiben. Den Versuch der nur näherungsweise möglichen Übertragung auf die Stever-Talsperre bei Haltern zeigt Abbildung 19. Durch einige Rechnung lassen sich auch die Werte vom Lake Hefner und vom Neusiedler See [109] zum Vergleich heranziehen. Während die Kurve vom Neusiedler See der eigenen sehr ähnelt, treten am Lake Hefner vergleichbare Schubspannungen schon bei etwa halb so großen Windgeschwindigkeiten auf. Der Versuch einer Erklärung muß in Spekulationen stecken bleiben, da die mitgeteilten spärlichen Angaben über den Reliefeinfluß der Uferregion, die Bauart der Gradienten-Meßanlage usw. [98] eine schlüssige Deutung kaum zulassen.

Die stärksten windinduzierten Änderungen der vertikalen Wassertemperaturprofile innerhalb weniger Wochen wurden an der Stever-Talsperre im Frühjahr 1975, also außerhalb der eigentlichen Untersuchungsperiode 1973/74, beobachtet. Abbildung 20 läßt den zeitlichen Verlauf der über die Windgeschwindigkeit in 30 cm oberhalb der Wasserfläche bei 40 m Uferabstand aus

Abbildung 19 ermittelten Schubspannungen  $\tau$  erkennen. Dabei wird die starke Dynamik von  $\tau$  in der Zeit vom 29. 4. bis zum 7. 5. sowie vom 25. 5. bis zum 27. 5. 1975 deutlich. Die als Zeitmarken eingetragenen gemessenen Temperaturprofile sind in Abbildung 21 dargestellt. War um die Mittagszeit des 29. 4. (Profil 1) noch eine ausgeprägte vertikale Temperaturschichtung mit einer maximalen Differenz von 5 K zu beobachten, so ist diese am 6. 5. (Profil 2) durch die windbedingte vertikale Durchmischung des gesamten Wasserkörpers völlig verschwunden. Vom 6. 5.

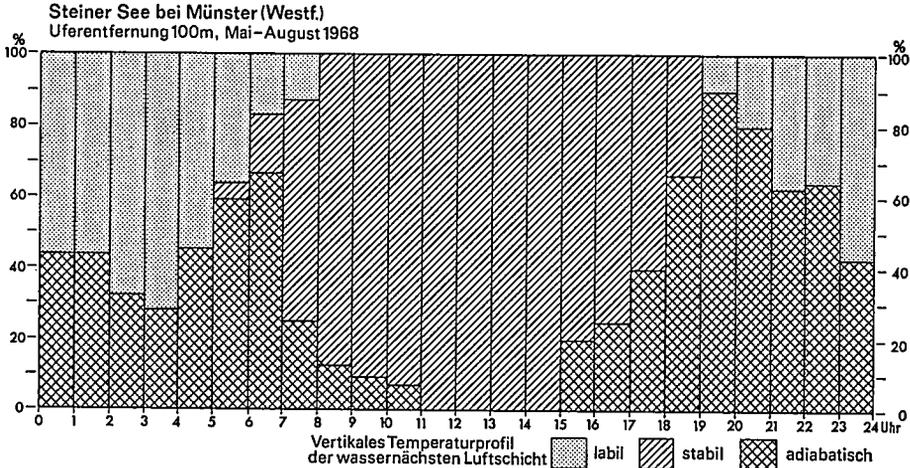


Abb. 18: Die vertikale Lufttemperaturschichtung in den wassernächsten 330 cm über dem Steiner See bei Münster-Hiltrup, Sommer 1968

über den 13. 5. bis zum 20. 5. (Profil 4) baute sich neuerlich ein ausgeprägtes Wassertemperaturprofil auf. Dabei wird deutlich, welche Vergrößerung des Wärmeinhalts hohe tägliche Globalstrahlungssummen in Verbindung mit geringen Windgeschwindigkeiten und daher auch niedrigen Verdunstungsverlusten zu bewirken vermögen. Die vom 25. 5. an auftretenden hohen Schubspannungswerte bauen bis zum Vormittag des 27. 5. (Profil 5) die bestehende Temperaturschichtung bis zur völligen Homothermie ab, wobei der Wärmeinhalt fast unverändert bleibt.

Die in diesem Abschnitt etwas ausführlicher dargestellten Windeinflüsse auf die vertikale Temperaturverteilung innerhalb flacher Seen bestätigen voll die knappen Ausführungen in R. Kellers Lehrbuch [105, S. 197], wonach z. B. der Westwind ein Absteigen von Oberflächenwasser in tiefere Lagen erzwingt, während am Westufer kühles Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt. – Gleichzeitig wird deutlich, daß Annahmen über das Bestehenbleiben vertikaler Temperaturschichtungen während längerer Zeitabschnitte günstigstenfalls für tiefe Seen haltbar sind, bei flachen Seen jedoch mit Sicherheit zu Trugschlüssen führen. Auch eine Verstärkung der vertikalen Wassertemperaturgradienten durch Ausbreitung des eingeleiteten Warmwassers an der Oberfläche dürfte windbedingte Durchmischungsvorgänge kaum unterdrücken.

Es scheint also ratsam, Kühlteiche bis zu mindestens 20 m Tiefe bei Berechnung ihrer nötigen Ausdehnung sicherheitshalber als homotherne Wasserkörper zu betrachten und für Kühlzwecke nutzbare Temperaturgradienten nur in horizontaler Richtung zu erwarten.

### 3.2.2. Folgerungen für die Beurteilung des Wärmeabgabevermögens von Oberflächengewässern der Bundesrepublik Deutschland

Der Kühlteich spielt in der Deutschen Bundesrepublik gegenwärtig nur eine untergeordnete Rolle. Kühlleistungen werden also überwiegend von den binnenländischen Fließgewässern, den Ästuaren und – in Zukunft wahrscheinlich verstärkt – von den Meeren im Küstenbereich

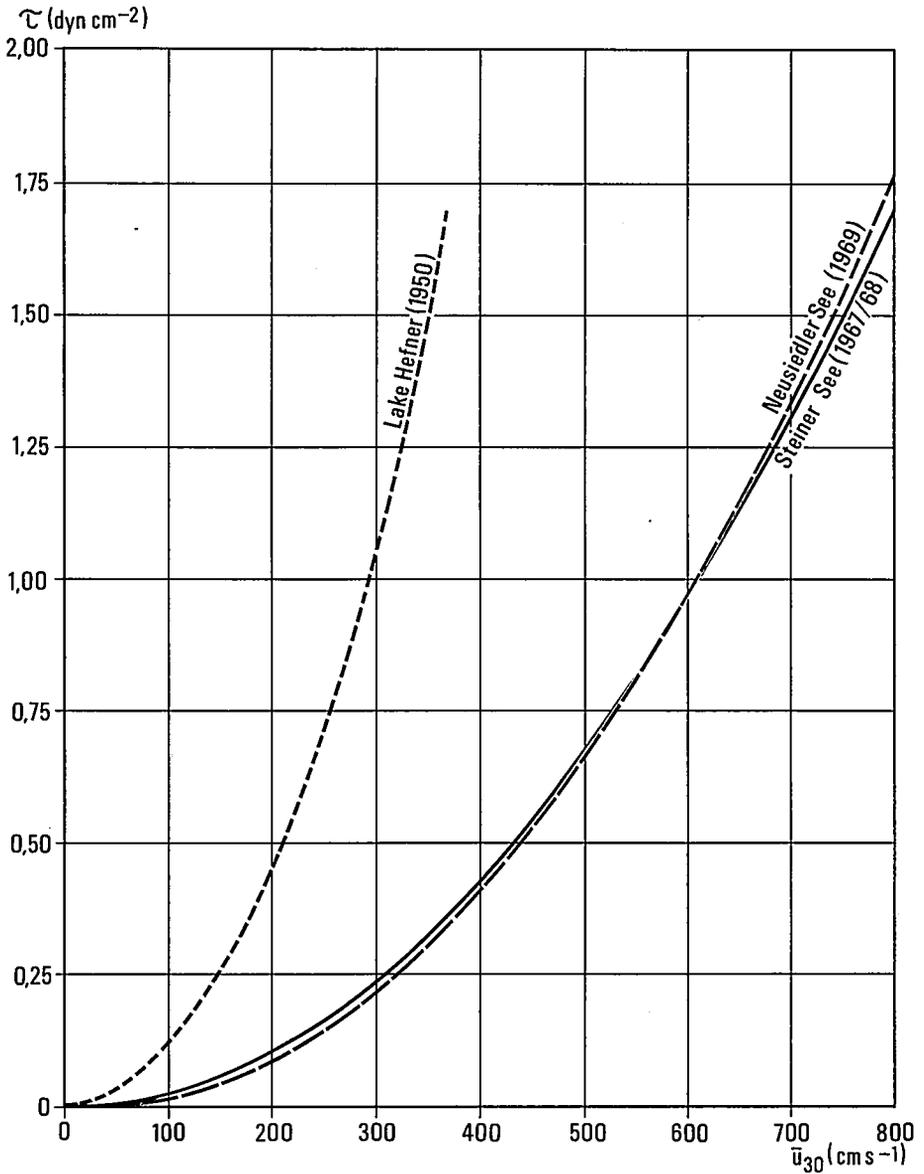


Abb. 19: Die Abhängigkeit der Schubspannung  $\tau$  von der Windgeschwindigkeit 30 cm oberhalb der Wasseroberfläche

erbracht. Die Wärmeabgabekoeffizienten werden letztlich nicht von der Physik auf rd.  $3 \text{ ly h}^{-1} \text{ K}^{-1}$  im Sommer und  $1,5 \text{ ly h}^{-1} \text{ K}^{-1}$  im Winter festgeschrieben, sondern durch biologisch-chemische Sachzwänge, die eine scharfe Begrenzung aller künstlichen Gewässererwärmungen verlangen. Gegenwärtig sind die zeitlichen und räumlichen Differenzen des nutzbaren Wärmeabgabevermögens von Wasseroberflächen zwar noch kaum erforscht; dennoch kann bereits jetzt der enge

# Steuer-Talsperre 1975

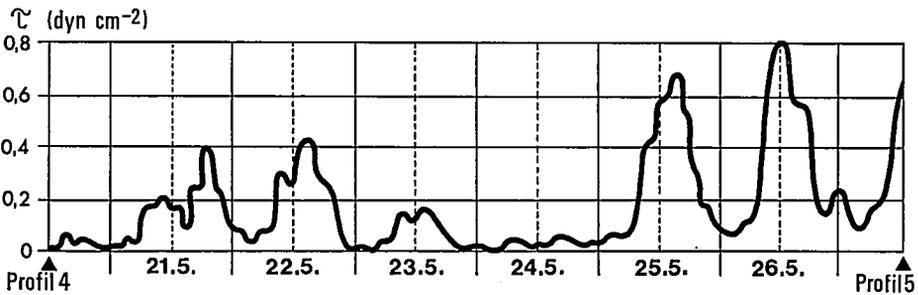
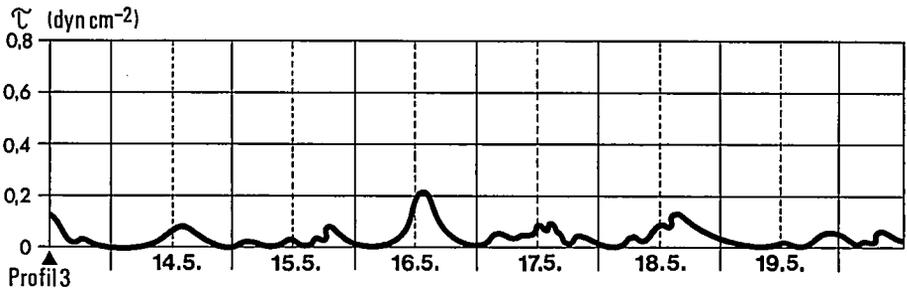
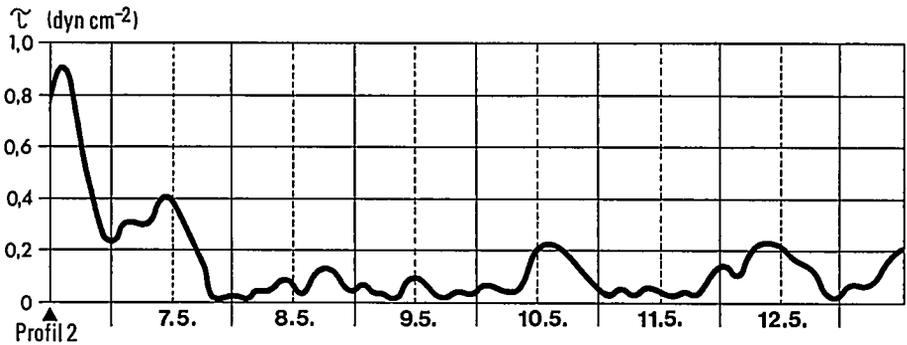
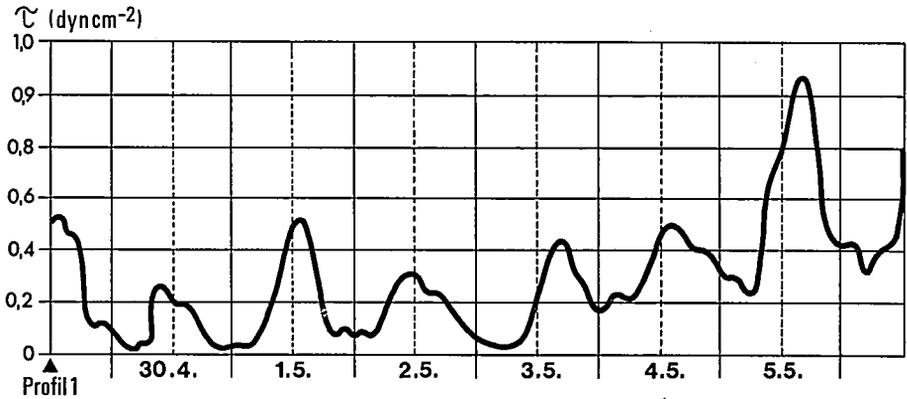
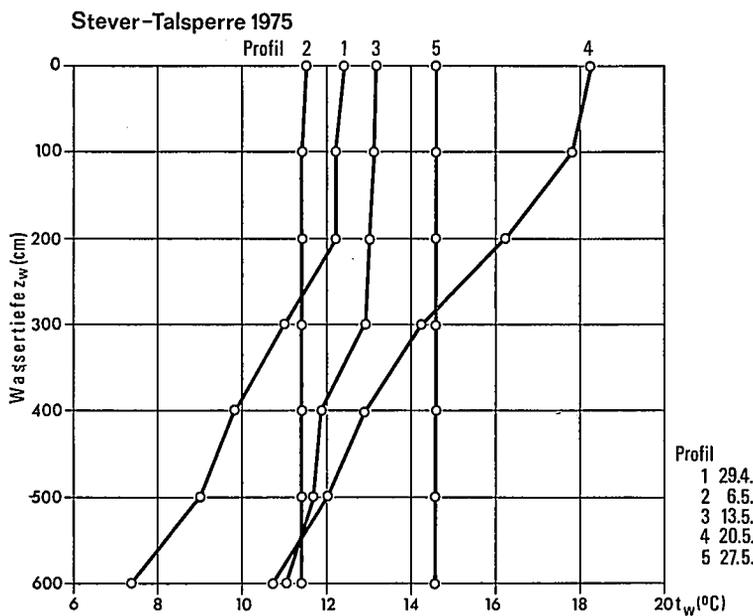


Abb. 20: Der zeitliche Verlauf der Schubspannung  $\tau$  an der Wasseroberfläche im Mai 1975

Rahmen als abgesteckt gelten, innerhalb dessen sich alle Berechnungen von Frischwasser- und Ablaufkühlkapazität bundesdeutscher Oberflächengewässer zu bewegen haben.



**Abb. 21:** In der Stever-Talsperre vom 29. 4. bis zum 27. 5. 1975 gemessene vertikale Temperaturprofile

### 3.3. Die nutzbaren Frischwasser-Kühlkapazitäten der größeren Flüsse in der Bundesrepublik Deutschland aufgrund vorliegender Wärmelastrechnungen

Die unbestreitbare Stärke und der Reiz des für die Flüsse gewählten Berechnungsverfahrens, wie es bei Flinspach [17], Berger [18] und der LAWA [23] beschrieben ist und woran auch die neueren Modellansätze z. B. von U. Täubert [110] sowie N. Witte und N. Beier [111] anknüpfen, liegt in der Wahl eines befriedigenden die Wärmeumsätze nahezu vollständig beschreibenden deterministischen Simulationsmodells. Als Schwäche muß der Bedarf derartiger Modelle an zuverlässigen Zeitreihen meteorologischer und hydrologischer Parameter gelten. Das in Ermangelung geeigneter Meßreihen in situ bisher angewandte Verfahren, auf schematisierte Tagesgänge von Globalstrahlung und Lufttemperatur z. T. weit entfernter Stationen zurückzugreifen – Windgeschwindigkeit und Wasserdampfdruck werden dabei meist als „Konstanten“ behandelt –, ist als ein schlechter Notbehelf anzusehen und wird in den Wärmelastrechnungen auch als ein solcher verstanden. Eine weitere Schwäche liegt darin, daß die Rechenergebnisse zwar die mutmaßliche Wassertemperaturentwicklung durch die als feste Größen in den Rechenvorgang eingehenden Abwärmeraten erkennen lassen, daß aber die bei optimaler Standortwahl der Verursacher mögliche thermische Gesamtbelastbarkeit der Flüsse nicht direkt abgelesen werden kann. Es fehlen also Aussagen darüber, welche maximalen Abwärmemengen von den Flüssen an den jetzigen oder zukünftigen Verursacher-Standorten aufgenommen werden können, wenn von den Oberliegern die vorhandene Flußkapazität voll ausgeschöpft wird.

Eine Initiative zur Behebung des Mangels an zuverlässigen Eingangsdaten für meteorologische und hydrologische Größen wurde im Juni 1976 von der Abwärmekommission beim Umweltbundesamt Berlin ergriffen, indem ein detailliertes Konzept zur Errichtung eines einheitlichen instrumentellen Beobachtungsnetzes zur mehrjährigen Erfassung der Wärmeaustauschvorgänge

an den Wasserflächen der Bundesrepublik Deutschland vorgestellt wird. So begrüßenswert eine derartige Initiative auch ist – es wäre gewiß verfehlt, von neuerlichen mit besseren Eingangsdaten durchgeführten Wärmelastrechnungen im Ergebnis wesentlich größere Frischwasser- und Ab-  
laufkühlkapazitäten als bisher erkennbar zu erwarten. Dagegen könnten Neuberechnungen zu-  
mindest in Teilabschnitten bundesdeutscher Flüsse noch kritischere Wassertemperaturentwick-  
lungen als bisher angenommen zum Ergebnis haben.

**Tabelle 1** Kraftwerksstandorte am Rhein  
mit zugehörigen überschlägig berechneten Frischwasser Kühlkapazitäten

Sp. 1	2	3	4	5	6
Typ	Name des KW- Standortes	$\Delta$ km	im W.-Lastpl. <sup>1</sup>	wahrsch.	<u>Sp. 5</u> Sp. 4
			vorgesehene Ges.-Leistg. 1985 MW <sub>e</sub>	Frishw. Kühlkap. Standort MW <sub>e</sub>	
K	Schwoerstadt	146	850	850	1,00
K	Kaiseraugst	155	850	850	1,00
K	Fessenheim	210	2 100	1 000	0,48
K	Breisach	230	2 400	300	0,13
D	Straßburg	295	250	300	1,20
K	Gambsheim	312	3 600	1 200	0,33
D	Karlsruhe	364	1 180	500	0,42
K	Woerth	368	1 300	500	0,38
K	Leopoldshaf.	373	60	50	0,83
K	Philippsburg	394	2 610	200	0,08
D	Mannheim	418	1 500	500	0,33
K	BASF	432	1 300	600	0,46
K	Biblis	459	3 600	600	0,17
D	Mainz-Wiesb.	505	300	900	3,00
?	N.N.	555	—	1 000	—
K	Müllh.-Kärl.	605	1 300	900	0,69
K	Bad Breisig	633	1 300	600	0,46
K	(RWE)	665	2 400	500	0,21
D	Wesseling	673	1 200	0	0,00
K	Köln	696	350	350	1,00
K	Leverkusen	702	600	0	0,00
D	D'df.-Reish.	728	3 000	500	0,17
D	D'df.-Stadtw.	740	1 800	300	0,17
D	Dbg.-Ehg. (RWE)	770	700	400	0,57
D	Dbg. Gesamt	778	640	0	0,00
D	Dbg. Thyssen	764	410	0	0,00
D	Voerde	803	1 400	0	0,00
D	(RWE)	809	2 400	0	0,00
D	Walsum	811	475	0	0,00
K	Kalkar	845	300	600	2,00

Wahrsch. Brutto-Frischwasser-Kühlkapazität des Rheins (ohne Nebenfl.) 13 500

Im folgenden soll anhand der vorliegenden Wärmelastrechnungen und der darin zugrundege-  
legten Niedrigwasserführungen versucht werden, die binnenländischen Frischwasser-Kühlkapa-  
zitäten der Bundesrepublik Deutschland zumindest größenordnungsmäßig abzuschätzen. Der-  
artige Überschlagsrechnungen lagen bei Niederschrift dieses Abschnitts nur für den Rhein zwischen

Konstanz und Emmerich vor (vgl. die Arbeiten von B. Böhnke [14, 74], in denen auf weitere Berechnungen bezuggenommen wird); in Anbetracht der Wichtigkeit dieser Frage werden neue Beiträge zur Bestimmung der Gesamt-Frischwasserkühlkapazität der Bundesrepublik inzwischen erschienen sein oder in Kürze bekannt werden. Da die Behandlung dieses Problems nicht zu den gesetzten Schwerpunkten vorliegender Arbeit gehört, sondern nur einen Teilaspekt der Kraftwerksabwärme in der Hydrosphäre betrifft, reicht vielleicht die hier vorgenommene Überschlagsrechnung aus, um die Enge des Rahmens zu verdeutlichen, innerhalb dessen sich die fluviale Frischwasserkühlkapazität der Bundesrepublik bewegen kann.

Diejenigen Temperatur-Längsprofile der Wärmelastpläne wurden benutzt, in denen entsprechend den angenommenen meteorologischen Bedingungen und Mindestwasserführungen die höchsten Überschreitungen der zulässigen Flußtemperaturen auftraten. Dabei wurde davon ausgegangen, daß sich die berechneten Temperaturerhöhungen bei vorgegebener Wasserführung linear proportional zu den eingebrachten Abwärmemengen verhalten und damit – bei konstantem Effektivwirkungsgrad der Anlagen – geradlinig entsprechend der elektrischen Leistung der Kraftwerke steigen. Ein Vergleich der berechneten abwärmebedingten Flußtemperaturanstiege an Kraftwerken bei verschiedenen Ausbauzuständen (z. B. Kernkraftwerke Fessenheim und Biblis 1975 und 1985) zeigt, daß diese Annahme zutrifft. Es erscheint also zumindest angenähert möglich, die mit Frischwasser kühlbaren elektrischen Leistungen eines jeden in den Wärmelastplänen berücksichtigten Kraftwerkes rechnerisch so zu bestimmen, daß dadurch die zulässige Wassertemperatur des Flusses nicht überschritten wird. Der Temperatur-Kurvenverlauf für das Abklingen der künstlichen Aufwärmungen läßt sich durch Interpolation zwischen den aus den Wärmelastplänen ersichtlichen Temperaturkurven hinreichend bestimmen.

Mit diesen Annahmen wurden in die vorliegenden Flußtemperatur-Längsschnitte für den Sommer bzw. Herbst je eine neue Temperaturkurve eingezeichnet. Unter Beibehaltung der aus den Wärmelastplänen ersichtlichen Kraftwerksstandorte schöpfen die auf diese Weise überschlägig bestimmten Maximalleistungen den zugelassenen Spielraum für Wassertemperatur-Erhöhungen überall voll aus, wobei in einzelnen Flußabschnitten, so z. B. am Rhein zwischen Mainz-Wiesbaden und der Moselmündung, zusätzliche Zahlenwerte für noch nicht in Anspruch genommene Frischwasser-Kühlkapazitäten eingesetzt wurden. Die industriellen, kommunalen und durch mündende Flüsse bedingten Abwärmeraten wurden aus den Wärmelastplänen unverändert übernommen. – Es ist ferner anzumerken, daß die hier vorgenommene Zuordnung von Frischwasser-Kühlkapazitäten zu bestimmten Kraftwerksstandorten meist mehrere Möglichkeiten offen läßt. So hängen die Kühlmöglichkeiten der Unterlieger direkt von deren Ausnutzung durch die benachbarten Oberlieger ab; vgl. z. B. die „Konkurrenz“ der Kernkraftwerke Fessenheim und Breisach, wie sie aus den Temperaturlängsschnitten im Wärmelastplan Rhein [25] ersichtlich ist.

Für den Rhein zwischen Aare-Mündung und der deutsch-niederländischen Grenze ergab sich durch Interpolation zwischen den Herbst-Lastfällen 1975 und 1985 für die im Wärmelastplan berücksichtigten Kraftwerksstandorte eine wahrscheinliche Frischwasser-Kühlkapazität von insgesamt 13 500 MW<sub>e</sub>, deren mögliche Zusammensetzung aus Tabelle 1 zu ersehen ist. Die in Sp. 6 aufgeführten Quotienten machen deutlich, um wieviel die für 1985 am Rhein geplante Kraftwerks-Gesamtleistung über der verfügbaren Frischwasser-Kühlkapazität liegt. Während bei Werten > 0,5 Ablaufkühlanlagen den über das Aufnahmevermögen des Rheines hinausgehenden Abwärmecanteil austragen könnten, kommen bei Quotientenwerten < 0,5 nur andere Kühlverfahren in Frage.

Bei Betrachtung der Temperatur-Längsprofile im Wärmelastplan Rhein [25] fällt auf, daß etwa zwischen den Fluß-km 500 und 600 Kühlkapazitäten für rd. 1000 MW<sub>e</sub> gegenwärtig und auch in Zukunft nicht ausgeschöpft zu sein scheinen. Die Ursache dürfte darin zu suchen sein, daß in diesem Bereich durch die Enge des Rheintales besonders ungünstige räumliche sowie geländeklimatische Voraussetzungen für die Errichtung von Großkraftwerken bestehen – von den gerade in diesem Flußabschnitt besonders wesentlichen ästhetischen Gesichtspunkten einmal abgesehen. Der Vollständigkeit halber wurden diese 1000 MW<sub>e</sub> dennoch in Tabelle 1 mit aufgeführt.

Soweit möglich, wurden auf gleiche Art auch die Frischwasser-Kühlkapazitäten der Rhein-Nebenflüsse bestimmt. Da bisher nur für Main und Neckar Wärmelastrechnungen veröffentlicht

Tabelle 2

**Kraftwerksstandorte an der Donau  
mit zugehörigen überschlägig berechneten Frischwasser-Kühlkapazitäten**

Sp. 1	2	3	4	5	6
Typ	Name des KW- Standortes	$\Delta$ km	im W.-Lastpl. berücksicht. Leistg. 1975 MW <sub>e</sub>	wahrsch. Frischwasser- Kühlkap. am Stando. MW <sub>e</sub>	$\frac{\text{Sp. 5}}{\text{Sp. 4}}$
?	Ulm	0	—	100	—
K	Grundremming.	39	237	300	1,27
?	?	100	—	700	—
D	Großmehring	137	1 100	800	0,41
D	Irsching	142	850		
?	?	210	—	1 500	—
D	Pleinting	333	1 500	1 000	0,67
?	?	370	—	2 500	—

Wahrsch. Brutto-Frischwasser-Kühlkapazität der Donau (ohne Nebenflüsse) 6 900

Tabelle 3

**Kraftwerksstandorte an der Weser  
mit zugehörigen überschlägig berechneten Frischwasser-Kühlkapazitäten**

Sp. 1	2	3	4	5	6
Typ	Name des KW- Standortes	$\Delta$ km	im W.-Lastpl. berücksicht. Ges.-Leistg. 1985 MW <sub>e</sub>	wahrschl. Frischwasser- Kühlkap. am Standort MW <sub>e</sub>	$\frac{\text{Sp. 5}}{\text{Sp. 4}}$
K	Würgassen	49	1 300	300	0,23
K	Grohnde	125	1 300	300	0,23
D	Veltheim	178	800	150	0,19
D	Heyden	214	850	100	0,12
D	Robert Fra.	249	2 255	100	0,04
?	N.N.	300	—	200	—
D	Hastedt	362	470	800	0,27
D	Niederviel.	374	700		
D	Ind.-Hafen	375	415		
D	Klökner	378	600		
D	Mittelsb.	378	750	200	0,37
D	Farge	392	538		
K	Esensham	419	1 300	?	?

Wahrsch. Brutto-Frischwasser-Kühlkapazität der Weser 2 150

sind [29, 30] – der Wärmelastplan Lippe wird in Kürze vorliegen –, mußten die fehlenden Werte einstweilen über Flußlängen und Abflußmengen geschätzt werden. Zu den sich für Main und Neckar insgesamt ergebenden 2400 MW<sub>e</sub> dürften durch die übrigen Nebenflüsse etwa weitere 1000 MW<sub>e</sub> hinzukommen, so daß sich damit für das gesamte bundesdeutsche Rheingebiet eine Brutto-Frischwasserkühlkapazität von 16 900 MW<sub>e</sub> ergibt. Dabei ist zu beachten, daß hier von einer vollständigen Ausnutzung der Kühlkapazität ausgegangen wurde. B. Böhnke [14] rechnet jedoch nur mit einer möglichen Maximalausnutzung von 60 bis höchstens 70%, so daß die

16 900 MW<sub>e</sub> um etwa ein Drittel zu reduzieren sind. Die somit verbleibende Netto-Frischwasserkühlkapazität des deutschen Rheineinzugsgebiets in Gesamthöhe von 11 300 MW<sub>e</sub> paßt recht gut zu den von P. Jansen, W. Schikarski und H. Stehfest [112] ermittelten 12 000 MW<sub>e</sub> sowie zu der nach einer anderen Methode durchgeführten Berechnung B. Böhnkes (11 000...12 500 MW<sub>e</sub>) [14]. Man erkennt, daß nur rd. 13 % der im Jahre 2000 für den Rhein erwarteten Gesamtkapazität von 90 000 MW<sub>e</sub> mit Frischwasserkühlung betrieben werden können.

Gemäß den Angaben über Abwärmeeinleitungen von Großkraftwerken und zugelassene Maximaltemperaturen in den Wärmelastrechnungen Donau [26] wurde in gleicher Weise für die Lastfälle Herbst die Frischwasserkühlkapazität zu bestimmen versucht. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 zusammengestellt. Dabei wurde angestrebt, ausgehend von vorhandenen oder vorgesehenen Standorten, die thermischen Kraftwerke in möglichst gleichen Abständen am Fluß zu placieren und dabei Kaltwassereinleitungen durch Nebenflüsse auszunutzen. Falls bei Ulm die Abwärme von 100 MW<sub>e</sub> eingebracht würde, wären bereits am Kernkraftwerk Gundremmingen weitere 300 MW<sub>e</sub> Frischwasserkühlkapazität verfügbar. Etwa bei Fluß-km 100 stünden nach Einmündung des Lech wiederum 700 MW<sub>e</sub> bereit, wodurch allerdings für die beiden Dampfkraftwerke Großmehring und Irsching zusammen nur etwa 800 MW<sub>e</sub> verblieben. Nach Aufnahme des Regen könnten ab km 215 weitere durchlaufgekühlte 1500 MW<sub>e</sub> angeschlossen werden; in diesem Falle wären vom Dampfkraftwerk Pleinting nur etwa 1000 MW<sub>e</sub> im Durchlauf an die Donau abzugeben. Nach Einmündung des Inn ließen sich ca. ab Fluß-km 370 weitere 2500 MW<sub>e</sub> durch Frischwasser kühlen, wobei es aber vermutlich einer staatsvertraglichen Vereinbarung mit dem Unterlieger Österreich bedürfte. – Insgesamt gesehen scheint der bundesdeutsche Donau-Abschnitt über eine theoretische Brutto-Frischwasserkühlkapazität von 6 900 MW<sub>e</sub> bzw. netto (nach Abzug eines Drittels für aus anderen Gründen nicht nutzbare Standorte) rd. 4 600 MW<sub>e</sub> zu verfügen, von denen 1975 unter der rechnerischen Annahme reiner Durchlaufkühlung 3 687 MW<sub>e</sub> = 80% installiert oder verplant waren. Wie die Wärmelastrechnungen Donau erkennen lassen, gestattete bereits 1975 die vorgesehene oder tatsächliche Anordnung der Kraftwerke nicht mehr in allen Fällen den uneingeschränkten Rückgriff auf die Frischwasserkühlung, wie die berechneten Wassertemperaturanstiege im Bereich der beiden Dampfkraftwerke Großmehring und Irsching deutlich zeigen. Die über den Stand von 1975 hinausgehenden weiteren 1 000 MW<sub>e</sub> möglicher Frischwasser-Kühlkapazität lassen sich also nur bei „kühlungsorientierter“ Standortwahl nutzen – ein angesichts des für die Bundesrepublik Deutschland erwarteten weiteren hohen Zuwachses an Kraftwerkskapazität bescheidenes Ergebnis.

Der Wärmelastplan für die Elbe [27] läßt nur eine äußerst grobe Abschätzung der Frischwasser-Kühlkapazität zu. Als einzige Anhaltspunkte müssen die beiden in der Rechnung berücksichtigten Kernkraftwerks-Neubauten Krümmel und Brunsbüttel dienen. Eine Extrapolation bis zur sommerlichen Wassertemperatur-Obergrenze von 28°C (Schnackenburg bis Wedel) bzw. 23°C (Brackwasserbereich zwischen Wedel und Cuxhaven) muß für die Unterelbe als breiten Tidefluß bereits daran scheitern, daß die allen Wärmelastrechnungen zugrundeliegende Prämisse des homothermen Wasserkörpers hier am allerwenigsten zutrifft. So darf die durch das Kernkraftwerk Brunsbüttel (theoretisch) hervorgerufene Temperaturerhöhung um ca. 0,3 K nicht über die wesentlich größeren horizontalen Temperaturgradienten im Bereich des Einleitungsbauwerks hinwegtäuschen.

Ferner ist zu berücksichtigen, mit welcher jetzigen und zukünftigen thermischen Vorlast die Elbe in das Territorium der Bundesrepublik Deutschland eintritt, nachdem sie (zwischen Schnackenburg und Lauenburg die Landesgrenze bildend) möglicherweise auf diesem Teilstück von beiden Anrainern zu gleichen Teilen für Frischwasser-Kühlzwecke genutzt wurde.

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte sowie aller Wärmeeinleitungen, die nicht mit der Elektrizitätserzeugung zusammenhängen, könnten bundesdeutsche thermische Kraftwerke zwischen Schnackenburg und Brunsbüttel mit einer Gesamtleistung von etwa 12 000 ± 5 000 MW<sub>e</sub> frischwassergekühlt betrieben werden. In dieser Abschätzung sind alle Umweltprobleme unberücksichtigt geblieben, die sich bei der Installation derartig großer Kraftwerksleistungen im Nahbereich von Ballungsräumen zwangsläufig ergeben.

Im Unterschied zur Elbe läßt der Wärmelastplan Weser [28] wegen der in die Berechnung eingegangenen dichten Kraftwerksbelegung ein vergleichsweise genaues Bild der Frischwasser-Kühlkapazität erkennen. Dazu wurden auch hier die Jahreszeiten mit besonders geringer Wasserführung benutzt. Es ergab sich, daß sowohl der Herbst-Lastfall ( $Q_0$  am Pegel Intschede =  $66,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $k_1 = 50 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} = 4,3 \text{ ly h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) als auch der Winter-Lastfall ( $Q_0 = 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $k_1 = 25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} = 2,15 \text{ ly h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) zu einer Durchlauf-Kühlkapazität von brutto  $2 \text{ 150 MW}_e$  hinführen, wenn die zwischen Hann.Münden und Bremerhaven zugelassenen maximalen Wassertemperaturen nicht überschritten werden sollen. Der geringere Wärmeabgabekoeffizient des Winters wird also durch die größere Wasserführung gerade ausgeglichen. Vor dem Hintergrund möglicher Zahlenwerte für  $k_1$ , wie sie im Abschnitt 3.2.1.4 diskutiert wurden, erscheinen die dem Wärmelastplan Weser zugrundeliegenden Wärmeabgabekoeffizienten als zu hoch.

Reduziert man die sich insgesamt ergebenden  $2 \text{ 150 MW}_e$  sicherheitshalber um  $33\%$ , dann verbleibt ein nutzbarer Nettowert von rd.  $1 \text{ 450 MW}_e$ . Dem steht für 1985 die vorgesehene Gesamtausbauleistung von  $11 \text{ 278 MW}_e$  gegenüber (vgl. Tabelle 3); die in Sp. 6 aufgeführten Quotienten machen deutlich, daß keines der vorhandenen oder geplanten Großkraftwerke mit reiner Frischwasserkühlung betrieben werden kann, so daß in allen Fällen zusätzlich oder ausschließlich andere Kühlverfahren zu wählen sind.

Die Ursache dafür, daß von der bis 1985 geplanten Ausbauleistung an der Weser nur etwa  $13\%$  durch Frischwasser gekühlt werden können, liegt nicht etwa darin, daß die den Berechnungen zugrundeliegenden Mindestwasserführungen zu niedrig gewählt worden wären. Die Beanspruchung des Weser-Biotops während des Trockensommers 1976 hat vielmehr gezeigt, daß die als maßgebliche Bezugswasserführung benutzten Niedrigwasserperioden von 20 aufeinanderfolgenden Tagen (NQ 20) der Jahresreihe 1946 - 1971 durchaus als brauchbare Basiswerte anzusehen sind, selbst wenn hieran gerade von Seiten der Kraftwerkswirtschaft gelegentliche Zweifel laut werden [113]. Insbesondere bei der Weser schränken organische und anorganische Vorbelastungen, die kurzfristig wohl kaum reduziert werden können (vor allem die zu  $90\%$  aus der DDR stammenden Chloridfrachten) die thermische Belastbarkeit stark ein.

### 3.4. Das Ergebnis

Die im vorhergehenden Abschnitt versuchte Abschätzung der Frischwasser-Kühlkapazität der größeren bundesdeutschen Flußsysteme macht trotz ihrer methodischen Unvollkommenheit deutlich, daß hier zumindest an binnenländischen Flußabschnitten kaum noch Reserven anzutreffen sind. Manches Großkraftwerk, das heute noch mit Durchlaufkühlung arbeitet oder für diese konzipiert ist, wird mit anderen Kühlverfahren ausgerüstet werden müssen, sofern nicht eine vorübergehende Leistungsdrosselung bei kritischer Wasserführung akzeptabel erscheint.

Die Addition aller bisher ermittelten Netto-Beträge ergibt  $31650 \text{ MW}_e$ , also nur einen Bruchteil dessen, was z. B. um das Jahr 2000 in der deutschen Bundesrepublik an Ausbauleistung erforderlich sein könnte. Die Frischwasser-Kühlkapazität kleinerer bisher nicht erfaßter Flüsse dürfte insgesamt kaum mehr als ca.  $1 \text{ 300 MW}_e$  ausmachen; der größte Teil davon wird auf die Ems entfallen, deren Netto-Frischwasserkühlkapazität ich aufgrund eigener episodischer Messungen der Wärmeabgabe an verschiedenen Standorten zwischen Rheine und Emden auf  $950 \text{ MW}_e$  schätze. - Damit wäre von insgesamt knapp  $33 \text{ 000 MW}_e$  im binnenländischen Bereich der Bundesrepublik Deutschland auszugehen, wobei auf die Unsicherheiten der Abschätzung insbesondere für die Elbe und auf das Fehlen von Angaben über zusätzliche Reserven an Küsten und Ästuaren nochmals hingewiesen werden muß.

## 4. Anergieabfuhr durch Naßkühltürme

### 4.1. Die Auswirkungen des Betriebes von Naßkühltürmen auf die Umwelt

Die bestehenden Engpässe bei der Frischwasserkühlung von Großkraftwerken erfordern ein Ausweichen auf andere Verfahren der Anergieabfuhr, wobei sich sowohl für die Ablaufkühlung, als auch für die nasse Kreislaufkühlung der Naturzug-Naßkühlturm wegen seiner relativ geringen Kosten weitgehend durchgesetzt hat. Gegenüber der Durchlaufkühlung sind allerdings Wirkungsgrad-Einbußen hinzunehmen, da zumal bei feuchtwarmem Wetter die Endtemperatur des Kreisprozesses höher liegt als bei der Frischwasserkühlung, so daß infolge der Wirkungsgradverschlechterung der spezifische Abwärmefall zunimmt. (Auf Einzelheiten wurde bereits im Kapitel 2 eingegangen.) – Abgesehen von allen anderen Auswirkungen beeinträchtigen Naßkühltürme die Umwelt also bereits dadurch, daß bei ihrem Einsatz der Atmosphäre bei gleicher elektrischer Leistung größere Abwärmemengen zugeführt werden als unter Verwendung der Frischwasserkühlung.

Bis vor etwa 7 Jahren galt der Wassertröpfchenauswurf von Naßkühltürmen, das sog. Spucken, als die stärkste Umweltbeeinträchtigung. Dieses Übel, das u. a. zu winterlicher Straßenglätte führen konnte, darf inzwischen als weitgehend behoben angesehen werden [58, 59, 60, 120]. Wie die neuere Literatur erkennen läßt, stehen gegenwärtig Studien der Wasserdampfausbreitung bzw. der Schwadenbildung und -auflösung in Abhängigkeit von den jeweiligen meteorologischen Bedingungen im Vordergrund [114, 39, 115, 66, 116, 117, 118, 42, 119, 121]. Mit geländeklimatischen und thermischen Auswirkungen von Kühlturmschwaden an Beispielen der Bundesrepublik Deutschland beschäftigen sich u. a. W. Hübschmann und K. Nester [122], J. W. Caspar [80], H. Gossmann [123] sowie E. Baer et al. [124]. Soweit bisher bekannt, bewirkt der Betrieb von Naßkühltürmen geringere Klimaveränderungen, als von der Bevölkerung gemeinhin erwartet werden. Insbesondere die Niederschlagszunahme im Nahbereich der Punktquellen weist im Normalfall Werte  $< 2\%$  auf – Beträge, die in kurzen Meßreihen statistisch kaum gesichert werden können. Geht man davon aus, daß ein Wasserdampf-molekül durchschnittlich 9 Tage in der Troposphäre verbleibt, ehe es wieder ausregnet, dann erkennt man, daß derartige lokale Eingriffe in den Wasserhaushalt im gleichen Raum wegen der in dieser Zeit zurückgelegten weiten Verfrachungswege des Moleküls kaum wirksame Effekte hervorrufen können.

Die Verringerung der direkten Sonnenstrahlung am Boden durch die abschattende Wirkung der Kühlturmfabriken kann in Wein- und Gemüseanbaugebieten jedoch eine nicht zu vernachlässigende Beeinträchtigung darstellen; hinzu kommt eine deutlich nachweisbare Zunahme der relativen Luftfeuchte, die zu vermehrtem Schädlingsbefall führen kann. – Signifikante Änderungen des Lufttemperatur-Regimes im Nahbereich hoher Naßkühltürme sind bisher nicht beschrieben worden. Zwar wird der Wärmehaushalt der Kühlturmumgebung durch eine Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung negativ beeinflusst; dem steht jedoch zumindest theoretisch ein Wärmegewinn durch Verringerung der langwelligen effektiven Ausstrahlung gegenüber.

Die vorliegenden Untersuchungen der Einflüsse des Betriebes von Naßkühltürmen auf die Umwelt lassen ferner erkennen, daß Kühltürme für Gebiete mit ausgeprägtem Relief infolge der Neigung zu bodennahen Temperaturinversionen und schlechter Durchlüftung klimatische Beeinträchtigungen bedeuten können. Wenn z. B. in einem kaltluftgefüllten Rheintalabschnitt der Kühlturmschwaden nicht die Inversions-Obergrenze zu durchbrechen vermag, breitet er sich an dieser Grenze schirmförmig aus und trägt zu einer Verdichtung des Nebels im Kaltluftsee bei.

Neben diesen vorwiegend „physikalischen“ Einflüssen großer Naßkühltürme auf die Umwelt besitzt das Kühlturmproblem auch eine „ästhetische“ oder „emotionale“ Seite, auf die J. W. Caspar [80] mit Recht hinweist. So wird nicht nur von Landschaftsplanern die Errichtung bis zu 250m hoher „weißgekrönter“ Kolossalbauten von 100...150m Durchmesser als schwerwiegende Beeinträchtigung des Landschaftsbildes angesehen und bekämpft. Selbst nüchterne Wasserfachleute bekundeten auf einer hydrologischen Fortbildungstagung zum Thema

„Einflüsse von Kraftwerken auf Wasserwirtschaft und Landschaft“ (19. bis 21. Mai 1976 in Hamm) ein „Unbehagen“ beim Anblick weithin sichtbarer Kühlturmreihen wegen ihres „monströsen“, die Physiognomie der Landschaft „entstellenden“, Charakters.

Für die Zukunft ist zu vermuten, daß derartige „emotionale“ Widerstände gegen die Errichtung neuer Kühlturm-Großbauten aller Art zunehmen werden, selbst wenn im Einzelfall die „physikalische“ Unbedenklichkeit des Projekts zuvor von kompetenter Seite nachgewiesen worden sein sollte. – Unbeschadet dieser Einschränkungen soll im folgenden der Versuch unternommen werden, den mittleren Abfluß der Bundesrepublik Deutschland auf seine Verwendbarkeit für Zwecke nasser Kreislaufkühlung hin zu diskutieren.

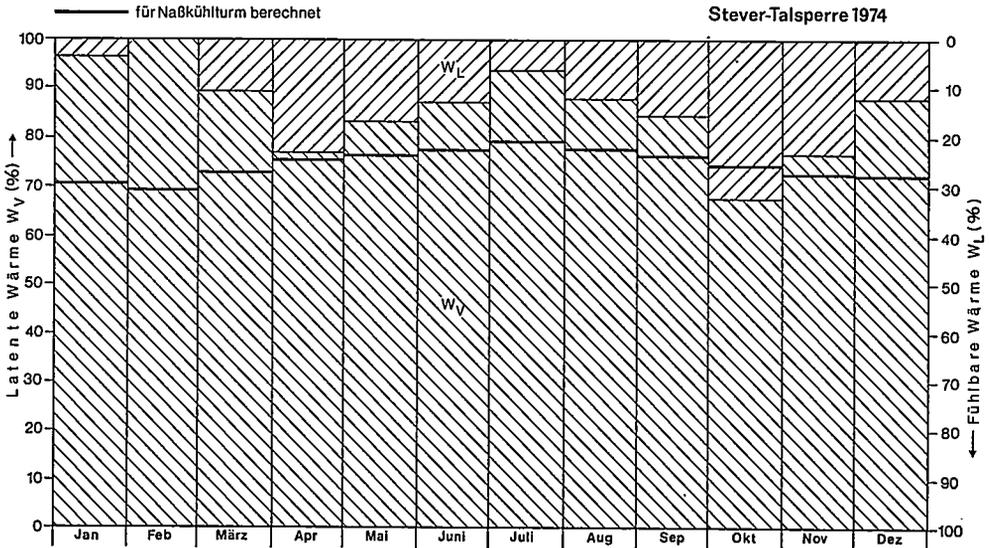


Abb. 22: Das prozentuale Verhältnis von latenter zu fühlbarer Wärme für einen Naßkühlturm im Vergleich mit einer freien Wasserfläche

#### 4.2. Der Abfluß der Bundesrepublik Deutschland und die Möglichkeiten seiner Nutzung für nasse Kreislaufkühlung

##### 4.2.1. Anmerkungen zum spezifischen Wasserverbrauch bei nasser Kreislaufkühlung

Im Abschnitt 3.2.1.6 wurde gezeigt, daß sich bei freien Wasserflächen deren Kühlleistung im Sommer zu etwa 35% aus dem Strahlungsterm, zu 55% aus Verdunstung und zu 10% aus dem Vertikalstrom fühlbarer Wärme zusammensetzt (vgl. Abb. 14a u. b). Da bei Verwendung von Kühltürmen der „trockene“ Strahlungsterm des Wassers wegfällt, kann die Energieabfuhr nur über  $W_V$  und  $W_L$  erfolgen. Das Verhältnis von  $W_V$  zu  $W_L$ , das gemäß Gleichungen 10 und 11 formal durch die wassernahen Vertikalgradienten von Lufttemperatur und Feuchte bestimmt wird (Bowen'scher Quotient), konnte aus den Messungen an der Stever-Talsperre 1973 und 74 direkt bestimmt werden. Zumindest für 1974 gestattete die zeitliche Lage der Datenkollektivgrenzen eine Umrechnung auf Monatswerte; für die Wintermonate konnten durch Auswertung mechanischer Analogregistrierungen Mittelwerte geringerer Genauigkeit gewonnen werden. Die Abbildung 22 zeigt das Ergebnis. Außer der bekannten Dominanz von  $W_V$  gegenüber  $W_L$  erkennt man eine Zweigipfligkeit der Treppenkurve für freie Wasserflächen, die vom Jahresgang der Wassertemperatur und der meteorologischen Parameter herrührt. So ist z. B. im Februar

1974  $W_L$  im Mittel = 0, da die Differenz  $t_W - t_L$  recht klein ist und darüber hinaus das Vorzeichen im Tagesrythmus häufig wechselt. Dagegen weist der Anteil von  $W_L$  an der Gesamt-Wärmeabgabe eines natürlich temperierten Oberflächengewässers im Herbst (z. B. im Oktober 1974) maximale Werte auf, da dann wegen des großen Wärmehalts der Wasserkörper der Fall  $t_W > t_L$  in besonders langen Zeitabschnitten auftritt.

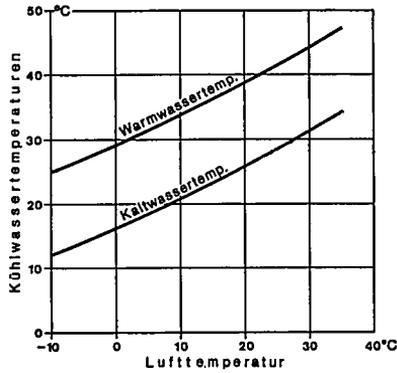


Abb. 23: Zur Abhängigkeit der Wassertemperaturen in einem Naßkühlturm von der Lufttemperatur (nach J. Buxmann [62], 1973)

In Abbildung 22 ist zusätzlich das prozentuale Verhältnis von  $W_L$  zu  $W_V$  für einen (an der Stever-Talsperre nur theoretisch existierenden) Naßkühlturm eingezeichnet. Die angenäherten Zahlenwerte der Monatsmittel erhält man, indem man in Gleichung 11 die Seeoberflächentemperatur  $t_W$  durch die gemäß Abbildung 23 [62] von der Lufttemperatur abhängende Warmwassertemperatur des Kühlturms ersetzt. In Gleichung 10 muß dann auch  $E_W$  auf diese Temperatur bezogen werden. – Das in Abbildung 22 dargestellte Ergebnis, wonach mit schwachem Jahresgang rd. 76% der Abwärme über  $W_V$  und 24% über  $W_L$  abgehen, stimmt mit Literaturangaben und praktischen Erfahrungen der Kraftwerksbetreiber gut überein.

Es ist somit die Möglichkeit gegeben, den spezifischen Kühlwasserverbrauch bei nasser Turmkühlung direkt zu berechnen. Greift man dazu das im Abschnitt 3.2.1.6 benutzte Beispiel eines thermischen Kraftwerks von  $1000 \text{ MW}_e \triangleq Q_3 = 1350 \text{ MW}_A$  (netto) noch einmal auf, dann ergibt sich unter Zugrundelegung der Verdunstungswärme des Wassers  $r_W = 580 \text{ cal g}^{-1}$  durch den Kühlturm ein Verdunstungsverlust von  $1520 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  oder  $422 \text{ l s}^{-1}$ . Die in der neueren Literatur anzutreffenden Zahlenwerte für den Kühlwasserverbrauch konventionell-thermischer Kraftwerke liegen zwischen  $350$  [126] und  $550 \text{ l s}^{-1}$  [28] für  $1000 \text{ MW}_e$ . Vergleiche werden dadurch erschwert, daß Angaben darüber, welcher Effektivwirkungsgrad zugrundegelegt wurde, wieviel Prozent der Abwärme außerhalb des Kühlturmes abgehen und wie die Abschlämmlung berücksichtigt wurde, oftmals unvollständig sind oder gänzlich fehlen.

In den Abbildungen 24 und 25 wird der Versuch gezeigt, ausgehend von den Datenkollektiven der Jahre 1973 und 74 die spezifischen Verdunstungsverluste in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf an der Stever-Talsperre zu bestimmen. Dabei wird vor allem die bereits im Abschnitt 2.3.3 angedeutete Tatsache augenfällig, daß die durch Naßkühltürme bedingten Verdunstungsverluste weit über denen der Frischwasserkühlung liegen. In beiden Abbildungen bewegen sich die Kollektivmittel dieser systembedingten Mehrverdunstung zwischen 50 und 125% gegenüber der Durchlaufkühlung. Für alle weiteren Überlegungen erscheint es deshalb angebracht, die Feststellung von H. Knöpp [56] zugrunde zu legen, wonach die Frischwasserkühlung gegenüber nasser Turmkühlung an Zusatzwasser nur „etwa den halben Wert“ erfordert.

In einer modernen Anlage wie dem mit einem Naturzug-Naßkühlturm ausgestatteten Erdgaskraftwerk Meppen (vergl. Bild 2) werden in den Sommermonaten bei Vollast nach Angaben der Betriebsleitung rd.  $1000 \text{ t h}^{-1}$  an Kühlwasser verdampft. Dieser Betrag entspricht – umgerechnet auf die als Beispiel gewählten  $1000 \text{ MW}_e$  – einem Mittelwert von  $463 \text{ l s}^{-1}$  und paßt damit recht gut zu den in Abb. 24 und 25 dargestellten Ergebnissen.

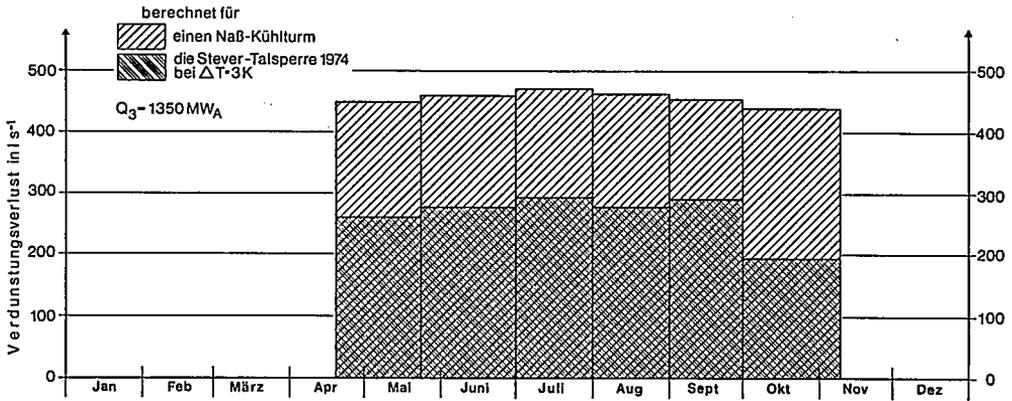


Abb. 24: Zum spezifischen Wasserverbrauch eines Naßkühlturmes für  $1000 \text{ MW}_e$  im Vergleich mit einer freien Wasserfläche, Sommer 1973

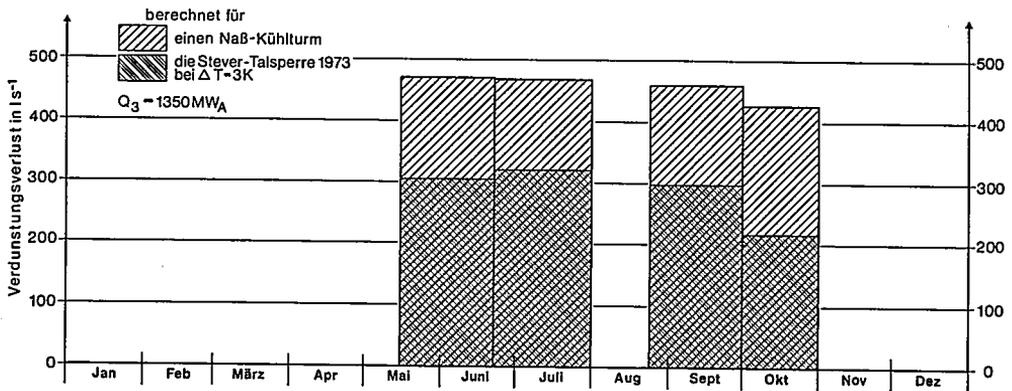


Abb. 25: Zum spezifischen Wasserverbrauch eines Naßkühlturmes für  $1000 \text{ MW}_e$  im Vergleich mit einer freien Wasserfläche, Sommer 1974

Im folgenden wird davon ausgegangen, daß unter Einschluß der je nach den örtlichen Gegebenheiten schwankenden Abflutungsverluste im Mittel für die Bundesrepublik  $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pro  $1000 \text{ MW}_e$  als nicht mehr rückgewinnbar bereitgestellt werden müssen. Dieser Wert möge als Abschätzungsgrundlage für die nächsten Jahrzehnte dienen; der z. T. wesentlich höhere spezifische Kühlwasserverbrauch insbesondere älterer Kernkraftwerke wird dabei nicht gesondert betrachtet.

#### 4.2.2. Die Kritische Wasserführung der Flüsse als begrenzender Faktor

In Anlehnung an die bei den bisherigen Wärmelastrechnungen geübte Praxis wird unter der Kritischen Wasserführung  $Q_{\text{krit}}$  der mittlere Abflußwert 20 aufeinanderfolgender Tage einer niedrigsten Niedrigwasserperiode aus ca. 30 Jahren verstanden.  $Q_{\text{krit}}$  liegt über dem gemessenen

nen niedrigsten Abfluß NQ einer Meßperiode und meist auch oberhalb des überhaupt bekannten Niedrigabflusses. So betrug z. B. an der Weser bei Intschede der bisher aufgetretene niedrigste Abfluß  $51,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , während das NQ der Reihe von 1941 bis 1970 bei  $59,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  lag [127]. Die im Wärmelastplan Weser als kritisch angesehene Wasserführung  $\text{NQ}_{20}$  (12.9. bis 1.10.1959) ergab sich zu  $66,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  und wurde den Rechnungen als Kritische Wasserführung zugrundegelegt [28]. Als grobe Faustregel kann gelten, daß  $Q_{\text{krit}}$  etwa den halben Wert des Mittleren Niedrigabflusses MNQ ausmacht; bei den Wärmelastrechnungen Main [29] wird von dieser Beziehung Gebrauch gemacht.

Wie für die Frischwasserkühlung, so kann  $Q_{\text{krit}}$  auch für die nasse Kreislaufkühlung zum begrenzenden Faktor werden. In ihrer jüngst erschienenen Studie [11] haben G. Ortner und K. Ritter schlüssig nachgewiesen, daß insbesondere bei kleineren Vorflutern die durch Wasserentzug für nasse Kreislaufkühlung bedingte Abflußverminderung eher zum begrenzenden Faktor für weitere Kraftwerksinstallationen werden kann als die Aufwärmung der Flüsse. Aufgrund überschlägiger Kostenrechnungen empfehlen die Verfasser, die Zufuhr von Zuschußwasser aus speziell für diesen Zweck zu errichtenden Talsperren oder die Herbeileitung aus anderen abflußreichen Gebieten zu erwägen, bevor auf die volkswirtschaftlich ungünstigere Trockenkühlung ausgewichen werde. Unter Zugrundelegung einer im Jahre 2000 zu installierenden Kraftwerks-Gesamtleistung thermischer Kraftwerke von  $186 \text{ GWe}$  wird dabei von  $89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  als Gesamt-Kühlwasserverlust ausgegangen. Gemäß den im Abschnitt 3.4 dargestellten Ergebnissen erscheint ein Ausbau der Frischwasserkühlung über rd.  $33 \text{ GWe}$  hinaus im binnenländischen Bereich bundesdeutscher Flüsse kaum möglich. Damit läge entsprechend den im Abschnitt 3.2.1.6 ermittelten Kühlwasser-Verbrauchswerten der Durchlaufkühlanteil mit insgesamt knapp  $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  bereits fest. Nach den Zahlenangaben bei G. Ortner und K. Ritter werden also  $79 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  zur Ergänzung der Verdunstungsverluste der verbleibenden (ausschließlich mit nasser Turmkühlung ausgestattet gedachten)  $153 \text{ GWe}$  erforderlich. (Der sich daraus ergebende mittlere spezifische Kühlwasserverbrauch von  $0,52 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  deckt sich hinreichend gut mit dem im vorigen Abschnitt zugrundegelegten eigenen Wert von  $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pro  $1000 \text{ MWe}$  bei Verwendung von Naßkühltürmen.) – Aus den Modellrechnungen der Verfasser läßt sich interpolieren, daß zur Bereitstellung der  $79 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  über 100 Tage pro Jahr ein Speichervolumen von  $0,68 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ , also zusätzlich noch einmal die Hälfte des gegenwärtig in der Bundesrepublik vorhandenen Wasserspeicherraumes, erforderlich wäre.

Die Diskussion eines derartigen auf den ersten Blick recht utopisch anmutenden Ergebnisses setzt die Klärung der Frage voraus, wieviel Prozent des niedrigsten Abflusses der Bundesrepublik Deutschland zur Deckung der kühlungsbedingten Verdunstungsverluste aufgewendet werden kann. Wie bereits im Abschnitt 1.3 auf S. 6 erwähnt, ist diese Frage gegenwärtig für einzelne Flußabschnitte gerade erst andiskutiert. Geht man gemäß Umweltbrief Nr.9 des Bundesministeriums des Innern [128] mit G. Ortner und K. Ritter von einem niedrigsten Gebietsabfluß der letzten 30 Jahre in Höhe von  $640 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  aus, dann würden ohne zusätzlichen Speicherraum die  $79 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$   $12,3\%$  dieses Niedrigabflusses ausmachen. Zwar werden sich für jeden Flußabschnitt wegen der unterschiedlichen Wassergüte, erforderlichen Schiffahrtstiefe usw. andere als verkraftbar anzusehene Prozentanteile ergeben;  $12,3\%$  dürften aber weit oberhalb akzeptabler Werte liegen. So hält H. Knöpp kühlungsbedingte Verdunstungsverluste  $> 3\%$  von NNQ am Rhein im Bereich des Binger Loches für bedenklich [56]; B. Böhne [14] geht von  $5\%$  der Kritischen Wasserführung „zumutbarem Verdunstungsverlust“ des Rheines bei Emmerich aus. Der Hinweis auf gar  $7\%$  von MNQ (!) für den bayrischen Main läßt die Anregung G. Ortners und K. Ritters zur Aufstellung von „Verdunstungs-Lastplänen“ als durchaus sinnvoll erscheinen.

Würde man also  $3\%$  von  $640 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , d. h.  $19,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  als tragbaren Verdunstungsverlust durch Kraftwerkskühlung ansehen, dann verbliebe unter Einbeziehung der Frischwasserkühlung im Jahre 2000 ein Fehlbedarf von rd.  $70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Dieser müßte überwiegend durch Speicherung bereitgestellt werden, sofern der hauptsächlich aus Kostengründen von der Kraftwerkswirtschaft favorisierte Plan einer möglichst weitgehenden Ausstattung aller Neuanlagen mit Naßkühltürmen im geschlossenen Kreislauf zur Ausführung käme. Selbst auf den langjährigen mittleren Abfluß der Bundesrepublik (ohne Zuflüsse von den Oberliegern) nach R. Keller [51] bezogen würde ein

Gesamt-Kühlwasserverbrauch von  $89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  bereits 3,8% ausmachen; unter Einbezug der Oberlieger-Zuflüsse ergeben sich 1,7%. Obwohl diese auf den mittleren Jahresabfluß bezogenen Prozentwerte recht niedrig erscheinen, dürfte es in trockenen Monaten wie z. B. während der Sommer 1959 und 1976 kaum möglich sein, ohne vorherige Speicherung den Vorflutern derartig große Verdunstungswassermengen zu entziehen.

### 4.3. Folgerungen

Beim gegenwärtigen Forschungsstand müssen die Auswirkungen des Betriebes großer Naßkühltürme auf die Umwelt als nur in Umrissen bekannt gelten. (Nicht zuletzt deshalb strebt W. Bach, Münster, ein Projekt zum Studium der „Auswirkungen von Abwärme und Wasserdampf aus Kraftwerken und Ballungsgebieten auf das regionale Klima“ an [129].) Die im vorigen Abschnitt dargestellten Entwicklungsperspektiven nasser Turmkühlung in der Deutschen Bundesrepublik bis zum Jahr 2000 lassen insbesondere angesichts des Trends zur Konzentration der Kühlanlagen in „Kraftwerkspark“ ein starkes Anwachsen sowohl der atmosphärischen als auch der hydrosphärischen Belastungen befürchten. Für die bei den bisherigen Überschlagsrechnungen zu Tage getretenen Engpässe im Wasserdargebot kommen hauptsächlich drei Ursachen in Betracht:

- Die von der Kraftwerkswirtschaft für notwendig gehaltene weitere starke Ausweitung der Kraftwerkskapazität
- Der vergleichsweise hohe spezifische Zusatzwasserverbrauch bei nasser Turmkühlung im geschlossenen Kreislauf
- Die bisher dominierende „on line“-Wasserentnahme für Kühlzwecke, die nicht den mittleren Abfluß der Deutschen Bundesrepublik, sondern den jeweiligen Niedrigstabfluß der Vorfluter zum begrenzenden Faktor macht.

Selbst wenn durch die Anlage zusätzlicher Wasserspeicher eine „Entkopplung“ zahlreicher Naßkühltürme von der Niedrigwasserführung der zugehörigen Vorfluter möglich sein sollte, so kann der Trend zur massierten Errichtung weiterer Naßkühltürme wegen der gegenwärtig noch bestehenden Unsicherheiten in bezug auf die Auswirkungen derartig großer Anergie-„Punktquellen“ auf die Umwelt abgesehen von ästhetischen Vorbehalten nicht gutgeheißen werden. Wie von mir bereits an anderer Stelle dargelegt [130], scheinen allerdings in einigen hinreichend gut bewideten und an Oberflächenwasser reichen dünn besiedelten landwirtschaftlichen Problemgebieten des Norddeutschen Tieflandes vergleichsweise günstige Voraussetzungen zur Schaffung größerer Binnenseen zu bestehen; diese könnten sowohl als Kühlteiche, als auch zur Wasserspeicherung für den Naßkühlturnbetrieb und nicht zuletzt für Erholungszwecke genutzt werden.

In Anbetracht der noch fast völlig unbekanntem klimatischen Auswirkungen großer Trockenkühlanlagen, des größeren spezifischen Abwärmeanfalles und – dadurch bedingt – der höheren Stromerzeugungskosten sollte der Übergang auf trockene Rückkühlung als letzter Ausweg gelten; die gegenwärtig in der Öffentlichkeit festzustellende Favorisierung dieses Verfahrens aus vermeintlichen Umweltschutzgründen entbehrt einseitigen der sachlichen Grundlage. Dagegen scheint es geboten, vor Anwendung der Trockenkühlung die Verbesserung bekannter Naßkühlsysteme anzustreben oder den Versuch der Entwicklung neuer Technologien der Rückkühlung zu unternehmen.

Eine eigene Konzeption, durch „Aktivierung“ des Wärmeabgabevermögens freier Wasseroberflächen die Kühlleistung von Wasserkörpern zu erhöhen und damit von Wasserdampf-„Punktquellen“ auf „Flächenquellen“ auszuweichen, soll im folgenden vorgestellt werden.

## 5. Der „aktive Kühlteich“ — ein zusätzlicher Lösungsweg?

### 5.1 Experimentelle Voruntersuchungen

#### 5.1.1 Die Grundidee

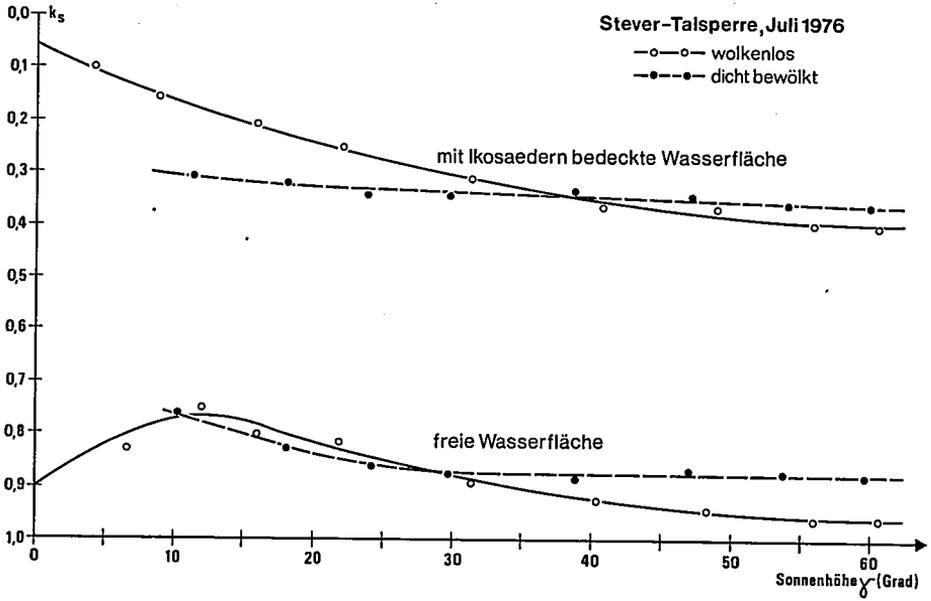
Im Abschnitt 3.2.1.4 ist gezeigt worden, welche Wärmemengen freie Wasseroberflächen bei natürlicher oder um 3 K erhöhter Gleichgewichtstemperatur an die Atmosphäre abgeben. Gemäß Gleichung 7 stehen diesen Wärmeverlusten ohne Temperaturänderung des Wassers Gewinne in gleicher Höhe gegenüber, die größtenteils durch den erwärmungswirksamen Globalstrahlungsanteil erbracht werden. Es liegt also der Gedanke nahe, durch Abschattung der Wasseroberfläche diesen Anteil zu verringern und die so erzielte Reduktion der natürlichen Wärmeeinnahme durch erhöhte Abwärmefuhr auszugleichen. Überschlägig würde das bedeuten, daß bei angenommener Verringerung eines Globalstrahlungs-Tagesmittels von  $20 \text{ ly h}^{-1}$  um 50% für eine Temperaturerhöhung des Wasserkörpers um 3 K nicht, wie aus den Abbildungen 12 a bis d ersichtlich, ca.  $5 \text{ ly h}^{-1}$ , sondern  $15 \text{ ly h}^{-1}$  an Abwärme eingebracht werden könnten, sofern die Wärmeabgabe der Wasserfläche durch eine derartige Abschattungsmaßnahme nicht verringert würde.

Der hier umrissene Grundgedanke findet sich bereits andeutungsweise 1972 bei C. A. Macaluso [131]. Dort wird von Untersuchungen einer nicht näher gekennzeichneten US-amerikanischen Forschergruppe berichtet, welche das Ziel verfolgen, die Globalstrahlungs-Albedo freier Wasserflächen unter Beibehaltung einer hohen Emissivität für die langwellige Ausstrahlung zu erhöhen, um so die notwendige Kühlteichfläche zu verkleinern. In Feldversuchen sei eine signifikante Verringerung der Verdunstungsverluste durch Abdecken mit granularen oder filmartigen Materialien festgestellt worden.

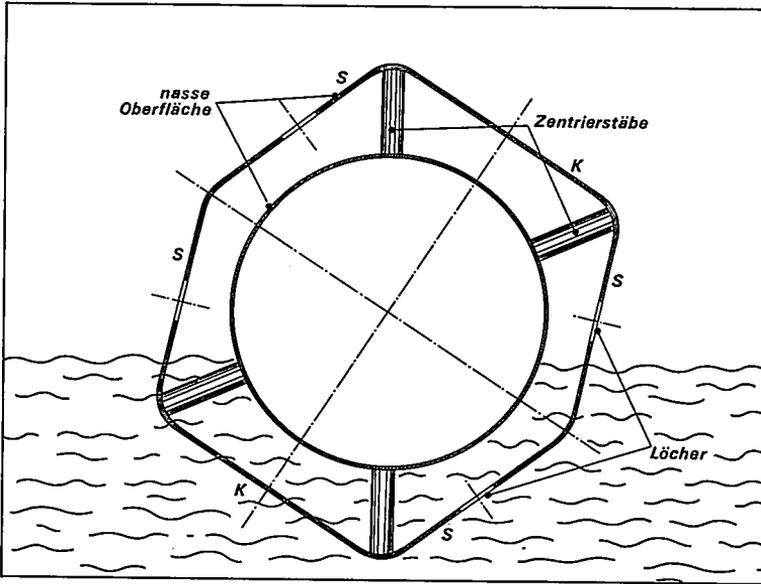
Jede Verdunstungsminderung schränkt die Wärmeabgabe freier Wasseroberflächen ein; denn wie aus den Abbildungen 14 bis 16 eindeutig hervorgeht, stellt die Verdunstung neben der effektiven Ausstrahlung einen hochwirksamen Wärmeabfuhrmechanismus dar. Umso erstaunlicher erscheint deshalb der abschließende Hinweis Macalusos auf ein mathematisches Modell, das – offenbar trotz signifikant verringerter Verdunstungsverluste – eine Reduktion des spezifischen Kühlteichflächenbedarfs durch eine derartige Bedeckung erwarten lasse. – An keiner anderen Stelle finden sich genauere Hinweise auf diesen methodisch sehr interessanten Neuansatz zur flächeneffizienten Energieabgabe; auch briefliche Nachforschungen blieben bisher ergebnislos. So ist nicht auszuschließen, daß die Versuche gerade wegen der durch die Bedeckung verursachte Verdunstungsreduktion inzwischen als unergiebig eingestellt wurden.

Über einen eigenen Versuch, die Kühlleistung freier Wasseroberflächen zu verbessern und damit die erforderliche Kühlteichfläche zu verringern, soll im folgenden berichtet werden.

Ausgehend von Untersuchungen zur Verringerung von Algenwuchs und Verdunstung in Oberflächengewässern, die zur Trinkwassergewinnung herangezogen werden, habe ich die von mir dafür entwickelten schwimmenden weißen 20-Flächner (Ikosaeder) so modifiziert, daß die Verdunstung der damit bedeckten Wasserfläche möglichst groß bleibt. Bild 7 zeigt die (nicht modifizierten) Kunststoffkörper, deren Auswirkungen auf den Wärmehaushalt und die Ökologie eines 1 m tiefen Wasserkörpers (Schwimmbecken von 10 m Durchmesser am Ufer der Stevertalsperre) im Sommer und Herbst 1976 untersucht wurden. Die regelmäßige Konfiguration, die sich auf der Wasserfläche selbständig einstellt, ist im Bild 8 zu erkennen. Statt der für ähnliche Zwecke bisher gebräuchlichen Kugeln wurde auf Ikosaeder von je ca. 10 cm Durchmesser zurückgegriffen, weil diese horizontale windbedingte Schubspannungen ohne Überschiebungen besser aufzufangen imstande sind als Kugeln. Außerdem unterbleiben unerwünschte Verdrehungen der Körper, wodurch die algenbewachsenen Unterseiten eine Reduktion der Globalstrahlungs-Albedo hervorrufen könnten, im Flächenverband weitgehend. – Im Mittel der Monate Juni bis August 1976 lagen die Wassertemperaturen in dem so bedeckten Versuchsbecken um  $0,5 \dots 2,5 \text{ K}$  unter den Vergleichstemperaturen eines benachbarten unbedeckten Beckens, obwohl mit der Ikosaeder-



**Abb. 26: Der Globalstrahlungs-Absorbtiionsfaktor  $k_s$  der Ikosaeder im Vergleich zur freien Wasseroberfläche**



**Abb. 27: Schematisierter Aufriß eines „verdunstungsaktiven“ Ikosaeders (ca.  $\frac{1}{2}$  d. nat. Größe)**

Decke nur 11...20% der Verdunstung einer freien Wasseroberfläche registriert wurden. Darin mag ein erstes Anzeichen dafür gesehen werden, daß die Reduktion des wirksamen Globalstrahlungsanteils die Verdunstungsverringerung überkompensiert, so daß sich im bedeckten Wasserkörper niedrigere Gleichgewichtstemperaturen einstellen. Vergleichende Globalstrahlungs- und Strahlungsbilanzregistrierungen über beiden Becken zeigten, daß die effektive Ausstrahlung der Wasseroberfläche bei Bedeckung im Mittel um 23% reduziert wird, während für die Globalstrahlung wegen des Einflusses unterschiedlicher Sonnenhöhe und Himmelsbedeckung ein solcher Mittelwert nicht angegeben werden kann. Die sich hier ergebenden Unterschiede sind in Abbildung 26 dargestellt; man erkennt insbesondere, daß die Ikosaeder gerade bei hohen Sonnenständen einer Wassererwärmung entgegenwirken, da dann statt 96% im wolkenlosen Falle nur etwa 38% der Globalstrahlung in das Wasser eindringen können. Trotz eines erheblichen Flugascheanfalls von dem 200 m westlich gelegenen werkseigenen Kohle-/Ölkraftwerk wurde die Albedo der Zwanzigflächner nur um maximal 2% reduziert; die spärlichen Niederschläge des Sommers 1976 reichten aus, um eine stärkere Verringerung des Globalstrahlungsreflektionsvermögens durch gelegentliches Abwaschen zu unterbinden.

In der Analogie zu den im Abschnitt 3.2.1 vorgeführten Berechnungen wurden auch für die beiden Versuchsbecken Zeitreihen der Wassertemperatur simuliert und mit den Direktregistrierungen verglichen. Die Ergebnisse, die zu einem späteren Zeitpunkt an anderer Stelle mitgeteilt werden müssen, sind in bezug auf die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen mit den für die Talsperre erhaltenen und in Abb. 11 a - d dargestellten Zeitreihen vergleichbar. Damit darf angenommen werden, daß die direkt gemessenen Werte des Verdunstungs-Wärmestromes (und auch der fühlbaren Wärme) sowie die wirksamen Strahlungsgrößen richtig erfaßt sind.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde versucht, die Ikosaeder so zu modifizieren, daß unter weitgehender Erhaltung der erwünschten Strahlungseigenschaften die Verdunstung einer unbedeckten Wasseroberfläche wieder erreicht oder möglichst noch übertroffen wird.

#### 5.1.2. Der vorläufige Lösungsweg

Für einen ersten Kleinversuch wurden 14 der insgesamt vorhandenen 9000 Ikosaeder mit je 20 „Atmungslöchern“ versehen und auf der Innenseite benetzbar gemacht. Der dadurch entfallende Auftrieb mußte durch eine ebenfalls benetzbare Hohlkugel im Inneren jedes Zwanzigflächners ersetzt werden. Abbildung 27 zeigt einen solchen Körper schematisch im Aufriß. Auch die durchschnittliche Eintauchtiefe ist angedeutet. Das Äußere eines derartigen „verdunstungsaktiven“ Ikosaeders im Vergleich mit dem allseitig geschlossenen Zwanzigflächner ist im Bild 9 erkennbar. Vorwiegend aufgrund geometrischer Überlegungen muß angenommen werden, daß die Globalstrahlungs-Albedo eines so modifizierten Körpers um rd. 6% geringere Werte aufweist als der geschlossene Zwanzigflächner. Direkte Messungen sind jedoch erst dann möglich, wenn auch von den modifizierten Ikosaedern eine so große Anzahl zur Verfügung steht, daß damit eine Wasseroberfläche von mindestens 10 m Durchmesser bedeckt werden kann. Erst dann werden die Meßfehler durch die Ränder der Versuchsfläche hinreichend klein. - Für die effektive Ausstrahlung G-A ist durch die Löcher eine geringfügige Zunahme zu erwarten; als Zahlenwert wird einstweilen in Ermangelung direkter Messungen + 2% gegenüber dem geschlossenen Körper angesetzt.

#### 5.1.3. Erste eigene Messungen und deren Ergebnisse

Auf dem 12 m hohen Flachdach des Instituts für Geographie der Universität Münster wurden vom 15. 6. bis 12. 7. 1976 vorwiegend während ungestörter antizyklonaler Wetterlagen erste Vergleichsmessungen zwischen den „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern und freien Wasserflächen bzw. geschlossenen Zwanzigflächnern durchgeführt. Die beiden verfügbaren Plexiglas-Wannen von je 44 cm Durchmesser und 40 cm Tiefe erhielten außen und am Boden eine Styropor-Isolierung, um laterale Wärmeflüsse möglichst auszuschließen. Wegen der geringen Wannen-durchmesser ließen sich die Kunststoffkörper nur schwer zu einer geschlossenen Konfiguration ausbreiten. Während auf dem Schwimmbecken an der Stever-Talsperre rd. 85% der freien Was-

serfläche abgedeckt sind, konnte auf den Plexiglas-Wannen nur ein Bedeckungsgrad von ca. 65% erreicht werden, was die Meßergebnisse beeinträchtigt. Bild 10 zeigt den Versuchsaufbau. Man erkennt die durch Isolierung doppelwandigen Wannen, von denen die im Bild hintere mit 12 „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern bedeckt ist. Diese Wanne kann von einem Thermostaten mit „Abwärme“ beschickt werden. Eine Regelelektronik gestattete, die Wassertemperatur dieses Kessels auf  $\pm 0,05$  K genau der jeweiligen Referenz-Kesseltemperatur anzugleichen bzw. um

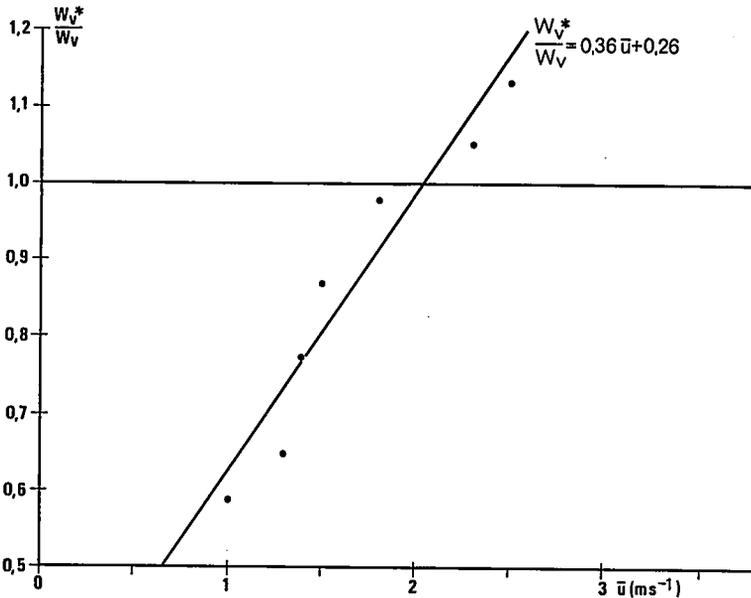


Abb. 28: Das Verhältnis zwischen der Verdunstung „aktiver“ Ikosaeder  $W_v^*$  und der Verdunstung freier Wasserflächen  $W_v$  in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$

vorgegebene konstante Beträge darüber zu halten. Bereits die Umlaufpumpe des Thermostaten trug die konstante Wärmemenge von  $26.250 \text{ cal h}^{-1}$  ein, was auf die Kesseloberfläche von  $1500 \text{ cm}^2$  bezogen eine zusätzlichen Wärmeabgabe von  $17,5 \text{ ly h}^{-1}$  entspricht. Bei gleicher Temperatur beider Wannen muß diese Wärmemenge zusätzlich von den „verdunstungsaktiven“ Kunststoffkörpern abgegeben werden. Insbesondere bei geringen Windgeschwindigkeiten – der Wind in Höhe der Kesseloberfläche wurde mit dem im Bild 10 links sichtbaren mechanischen Windschreiber nach Woelfle registriert – schaltete sich die Thermostat-Heizung (500 W) nur selten ein, da dann ohne Überschreitung der Referenztemperatur kaum noch zusätzliche Wärmemengen aufgenommen werden konnten. Die Einschaltzeiten der Thermostatheizung wurden auf dem neben dem Thermostaten rechts im Bild 10 sichtbaren Schreiber registriert; die Verdunstung beider Kessel konnte auf  $\pm 0,02 \text{ mm}$  Wasserhöhe genau über die bereits früher in [89] beschriebenen elektronischen Mikro-Pegel erfaßt werden. Die Wetterhütte im Bildvordergrund rechts diente zur Aufnahme von Stromversorgungs- und weiteren Meßeinrichtungen.

In Abbildung 28 ist das Verhältnis zwischen der Verdunstung „aktiver“ Zwanzigflächner  $W_v^*$  und der freien Wasserfläche  $W_v$  bei gleicher Temperatur beider Wannen in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  dargestellt. Man erkennt, daß bei  $\bar{u}$ -Werten etwa ab  $2 \text{ m s}^{-1}$  die Verdunstung der durchlöcherten Ikosaeder größer wird als bei offenen Wasseroberflächen.

Falls die in den Wärmelastplänen getroffene Annahme von  $\bar{u} = 2 \text{ m s}^{-1}$  zutrifft, darf davon ausgegangen werden, daß die „aktiven“ Ikosaeder im Mittel etwa gleich viel verdunsten wie freie Wasserflächen.

Für die im nächsten Abschnitt dargestellten Zeitreihen der Wärmeabgabe von Wasseroberflächen, die mit den hier vorgestellten „verdunstungsaktiven“ Zwanzigflächern bedeckt sind, wurde die in Abbildung 28 eingezeichnete Regressionsgerade benutzt. Der (Produktmoment-) Korrelationskoeffizient  $r = 0,961$  ergibt bei 7 Wertepaaren eine Sicherung des Befundes auf dem 0,1%-Niveau, so daß die Geradengleichung einstweilen als ausreichende Arbeitsgrundlage gelten darf.

Bei den Vergleichsmessungen in den beiden Plexiglas-Wannen hat sich gezeigt, daß die Bedeckung das Wärmeabgabevermögen der Oberfläche nicht in dem erwarteten Maße zu steigern vermochte, obwohl die gleichen Wassermengen verdunsteten wie bei der unbedeckten Oberfläche. Die Ursache wurde darin erkannt, daß nur ca. 22% der in den Ikosaedern zur Verdunstung verbrauchten Wärme dem Wasser in der Wanne entzogen wurde, während rd. 78% aus der über das Becken hinwegstreichenden Luft stammten. Da alle in Abbildung 27 geschnittenen Teile die Wärme schlecht leiten, wohl aber durch ihre Dochtwirkung das Wasser um etwa 6 cm anzuheben vermögen, reißt während der Verdunstung der thermische Kontakt nach unten ab, da sowohl Leitung als auch Thermokonvektion als Wärmetransportmechanismen weitgehend fehlen. Hier könnten z. B. eine Metallbedampfung unter den nassen Oberflächen oder die Verwendung von Drahtgaze als Dochtmedium einige Abhilfe schaffen.

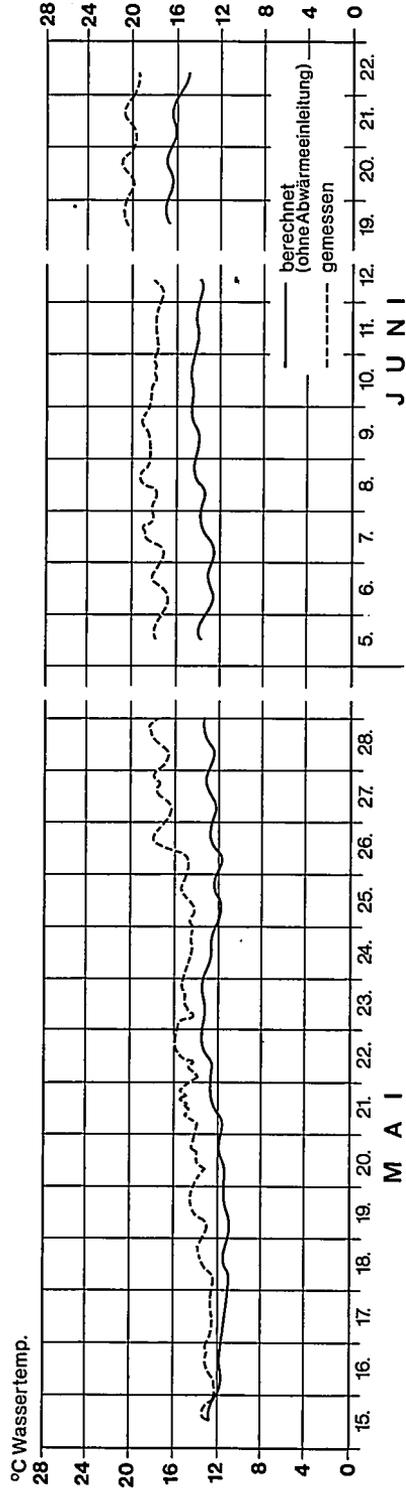
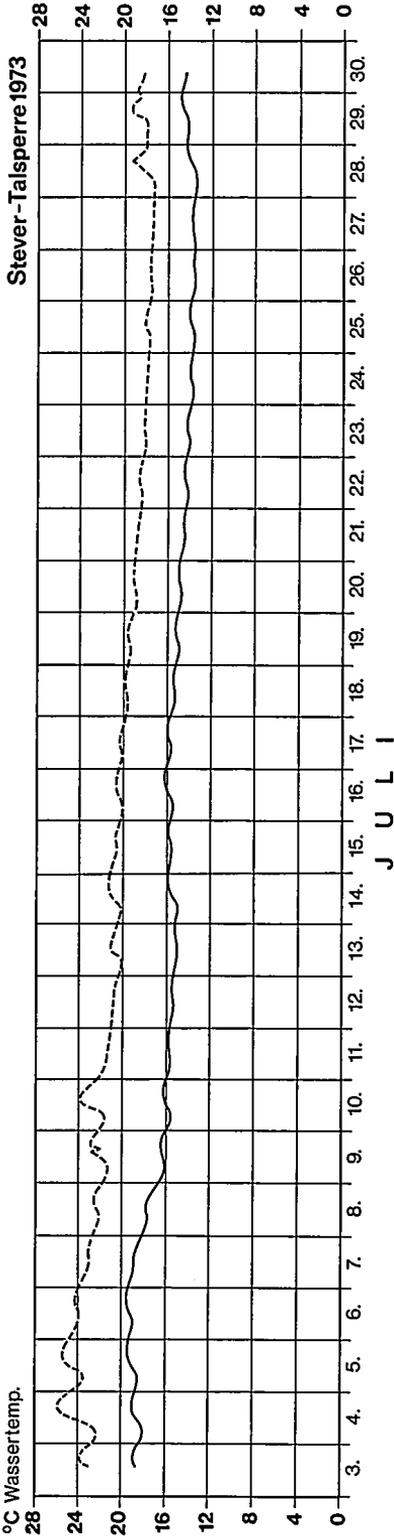
Erachtet man einmal auch dieses Problem als technisch lösbar, dann kann zumindest theoretisch das Wärmeabgabevermögen einer derart bedeckten Wasserfläche berechnet werden. Erst wenn derartige Rechenergebnisse vorliegen, lassen sich die Kosten einer solchen Bedeckungsmaßnahme (die gegenwärtig noch nicht annähernd abgeschätzt werden können) dem zu erwartenden Nutzen gegenüberstellen.

## 5.2. Berechnung der möglichen Wärmeabgabe mit dem „Halterner Simulationsmodell“

In Analogie zu den im Abschnitt 3.2 dargestellten Rechenergebnissen zur Kühlleistung freier Wasserflächen wurde die mögliche Wärmeabgabe einer „verdunstungsaktiven“ theoretischen Ikosaeder-Oberfläche auf der Stever-Talsperre in Form von Zeitreihen berechnet. Als Grundlage dienten die bereits in den Abbildungen 11 und 12 dargestellten Datenkollektive des Sommerhalbjahres 1973. Die Berechnungen basieren auf den bereits erwähnten Annahmen, daß die Globalstrahlungs-Albedo gegenüber geschlossenen Kunststoffkörpern um 6% geringere Werte aufweist, daß G-A um 2% höher anzusetzen ist, und daß die Verdunstung  $W_V^*$  gemäß Abbildung 28 über  $W_V^* = W_V(0,36 \bar{u} + 0,26)$  (16) von der Verdunstung freier Wasserflächen  $W_V$  abhängt. (Der gegenüber dem Kleinversuch um ca. 20% bessere Bedeckungsgrad der Talsperrenoberfläche und die dadurch wahrscheinlich bedingte größere Steigung der Ausgleichsgeraden ist jedoch nicht berücksichtigt.) – Ferner wurde angenommen, daß das Bowen-Verhältnis auch zwischen  $W_V^*$  und  $W_L^*$  unverändert erhalten bleibt, so daß in Analogie zu Gleichung 16 gilt:  $W_L^* = W_L(0,36 \bar{u} + 0,26)$  (17).

Die zur Verdunstung verbrauchte Wärme wird als ausschließlich dem bedeckten Wasserkörper entzogen betrachtet. Sonstige Bestimmungsgleichungen und Zahlenwerte des Modells sind unverändert beibehalten.

In den Abbildungen 29 a und b ist veranschaulicht, welche Mitteltemperaturen sich in der oberen 1,5 m dicken Wasserschicht während der Sommermonate 1973 eingestellt hätten, falls die freie Talsperrenoberfläche unter den angenommenen Bedingungen mit „verdunstungsaktiven“ Zwanzigflächern bedeckt gewesen wäre. Entsprechend den Abbildungen 12 a und b wurde auch versucht, die mögliche Anergiebelastung dadurch zu ermitteln, daß rechnerisch verschiedene konstante Abwärmeraten eingebracht und die resultierenden Wassertemperaturerhöhungen mit den als zulässig angesehenen Grenzwerten verglichen wurden. Die Rechenergebnisse sind in den Abbildungen 30 a und b als simulierte Zeitreihen dargestellt. Man erkennt, daß von Mitte Mai bis Mitte September 1973 eine konstante Abwärmerate von etwa  $15 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  hätte einge-



**Abb. 29a: Ohne Abwärmeeinleitung berechnete Wassertemperatur-Zeitreihen bei angenommener Bedeckung mit „verdunstungsaktiven“ Iksaedern.  
 Die gemessenen Temperaturen entsprechen der (nicht durch Abwärme belasteten) offenen Wasserfläche. Mai – Juli 1973**

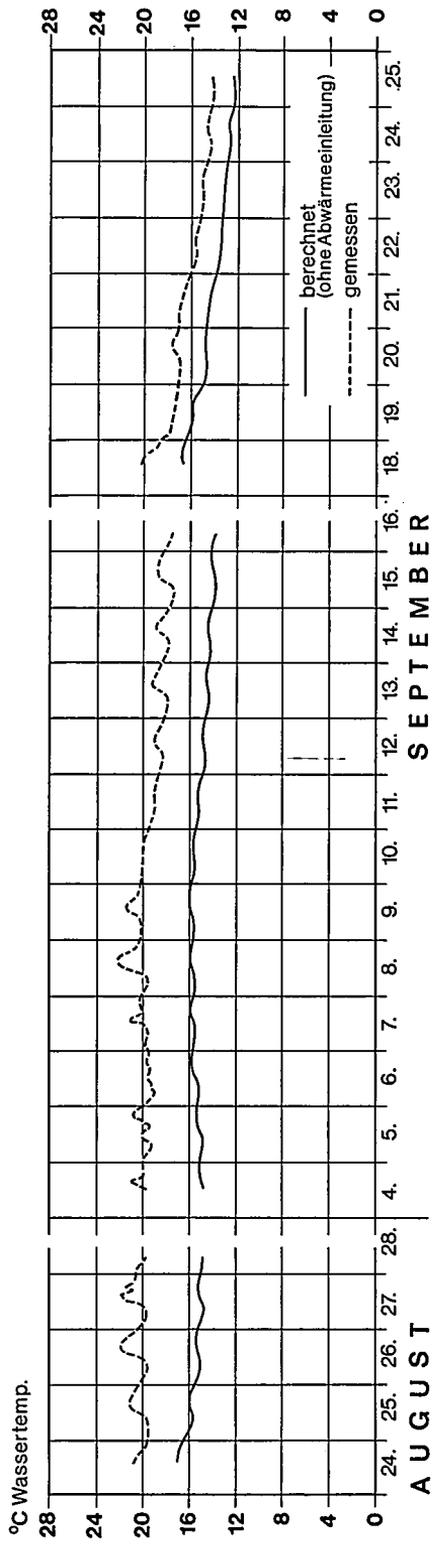
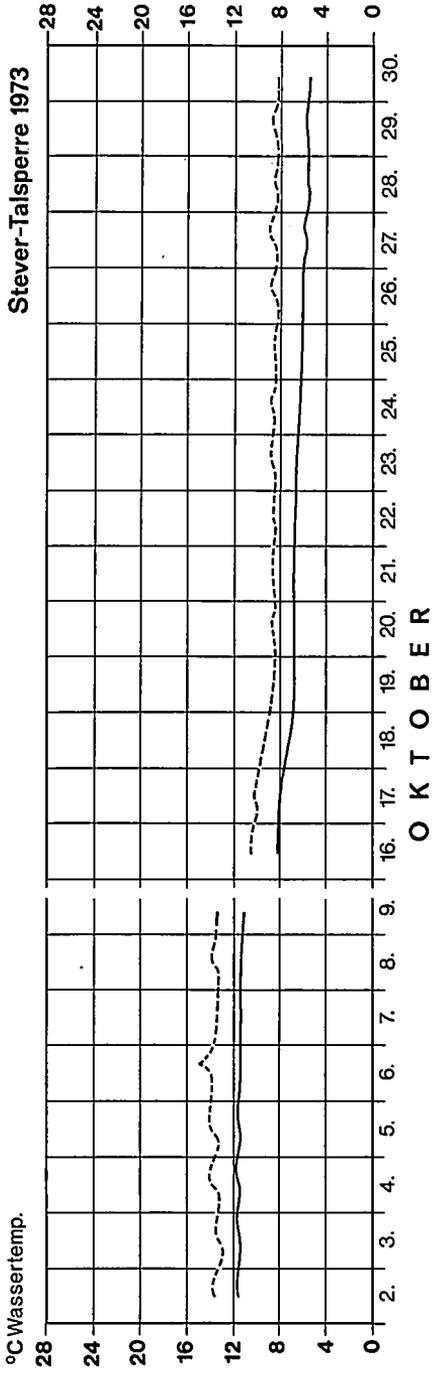
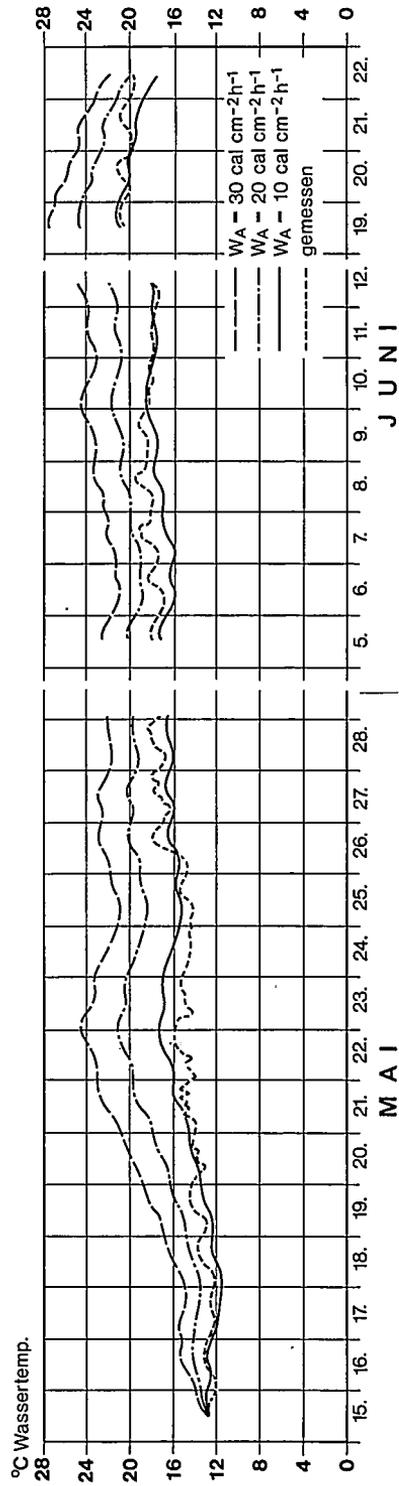
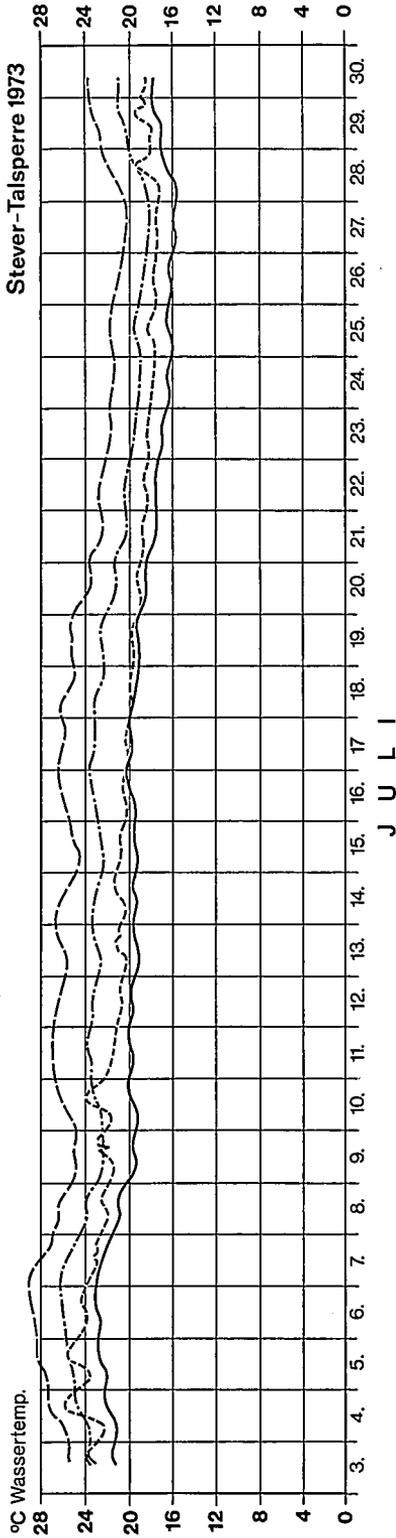
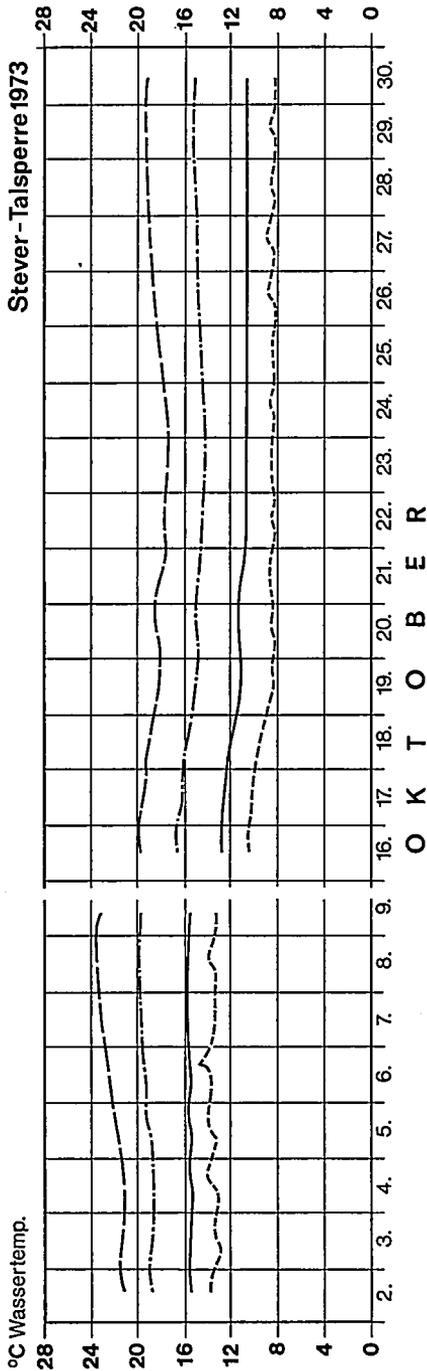


Abb. 29b: Ohne Abwärmeeinleitung berechnete Wassertemperatur-Zeitreihen bei angenommener Bedeckung mit „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern. Die gemessenen Temperaturen entsprechen der (nicht durch Abwärme belasteten) offenen Wasserfläche. August – Oktober 1973

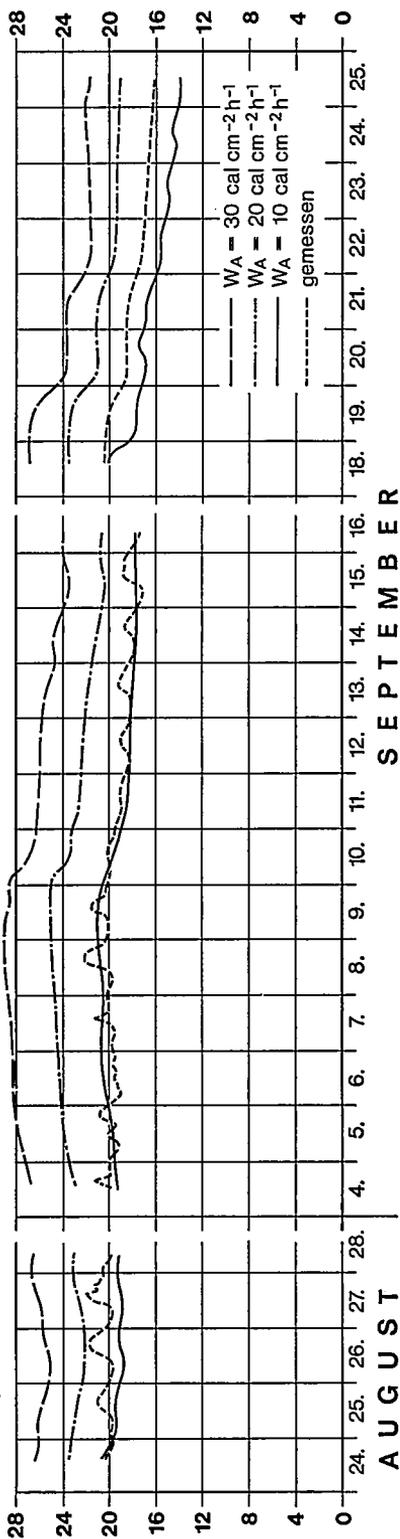


**Abb. 30a:** Mit konstanten Abwärmraten  $W_A$  berechnete Wassertemperatur-Zeitreihen bei angenommener Bedeckung mit „verdunstungsaktiven“ Ikosaedern  
 Die gemessenen Temperaturen entsprechen der (nicht durch Abwärme belasteten) offenen Wasserfläche. Mai – Juli 1973

Steier-Talsperre 1973



°C Wassertemp.



AUGUST

SEPTEMBER

Abb. 30b: Mit konstanten Abwärmerraten  $W_A$  berechnete Wassertemperatur-Zeitreihen bei angenommener Bedeckung mit „verdunstungsaktiven“ Eissedern. Die gemessenen Temperaturen entsprechen der (nicht durch Abwärme belasteten) offenen Wasserfläche. August – Oktober 1973

tragen werden können, ohne daß eine Maximal-Aufwärmung um 3 K wesentlich überschritten worden wäre. Bei einer als zugelassen gedachten maximalen Temperatur-Erhöhung um 5 K hätten – ohne Diskussion des Mischungsproblems verschieden temperierter Wässer – in diesem Zeitabschnitt sogar  $21 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  als Abwärmelast aufgenommen werden können. Diese Beträge liegen um den Faktor 3 über den bei gleichen Aufwärmespannen ausnutzbaren Werten für freie Wasserflächen. Als Folgerung ergibt sich somit, daß ein „aktiver Kühlteich“ gemäß der hier vorgestellten Konzeption im Sommer nur ein Drittel der Fläche eines herkömmlichen Kühlsees benötigt, wodurch die Diskussion der nassen Teichkühlung neue Aspekte erhält. Gleichwohl zeigen die Abbildungen 30 sehr deutlich, daß die Kühlleistung der hier vorgeschlagenen Technologie etwa ab Mitte September stark abnimmt, so daß bei  $\Delta T = 5 \text{ K}$  im Oktober 1973 nur etwa  $15 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  hätten abgeführt werden können. Im Winter würde sich also wie bei der Anergieabfuhr durch freie Wasseroberflächen wahrscheinlich etwa die doppelte Kühlteichfläche als notwendig erweisen. Hier könnte sich für die Trockenkühlung ein vergleichsweise günstiger Anwendungsbereich ergeben, indem diejenigen Abwärmemengen, die im Winterhalbjahr nicht über den „aktiven Kühlteich“ abführbar sind, dann „trocken“ ausgetragen werden. Einerseits führt die trockene Rückkühlung wegen der niedrigen Lufttemperatur im Winter zu höheren Prozeßwirkungsgraden als im Sommer; andererseits kann während der kalten Jahreszeit, in der z. B. durch nasse Turmkühlung die stärksten Umweltbeeinträchtigungen verursacht werden, die Thermokonvektion von Trockenkühltürmen manche bodennahe Lufttemperaturinversion auflockern helfen.

### 5.3. Anmerkungen zum spezifischen Kühlwasserverbrauch dieser Methode

Abschließend sei der spezifische Wasserverbrauch auch dieser Methode betrachtet und mit den Werten der anderen Naßkühlverfahren verglichen. Während sich im Sommer bei  $1000 \text{ MW}_e \cong 1350 \text{ MW}_A$  und  $\Delta T = 3 \text{ K}$  für offene Teichkühlung rd.  $0,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  und für nasse Turmkühlung ca.  $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  als Richtwerte ergeben, führt die Rechnung beim „aktiven Kühlteich“ für 1973 mit  $\Delta T = 3 \text{ K}$  auf  $0,37 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Dieser Betrag liegt zwar deutlich über dem niedrigen spezifischen Kühlwasserverbrauch bei offener Teich- oder Flußkühlung; gegenüber der nassen Turmkühlung bedeutet er dennoch eine Wasserersparnis um 26%.

Würde man wiederum mit G. Ortner und K. Ritter [113] davon ausgehen, daß in der Bundesrepublik Deutschland um das Jahr 2000 eine Gesamtleistung thermischer Kraftwerke von  $186 \text{ GW}_e$  installiert sein könnte, wobei  $33 \text{ GW}_e$  über Frischwasser-Flußkühlung zu betreiben wären, so ergäbe sich für  $153 \text{ GW}_e$  bei (theoretisch) ausschließlicher „aktiver Teichkühlung“ ein Wasserbedarf von  $56,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Dieser Betrag macht nur 2,4% und nicht wie bei der nassen Turmkühlung 3,4% vom mittleren Netto-Abfluß der Bundesrepublik nach R. Keller [51] in Höhe von  $2346 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  aus.

Als Vorteile des hier konzipierten Kühlverfahrens würden sich zwar die Möglichkeit eines zumindest partiellen Verzichts auf Kühltürme sowie ein geringerer spezifischer Wasserbedarf als bei ausschließlicher nasser Turmkühlung ergeben; als Nachteile müßten der gigantische Flächenbedarf sowie der Umstand gelten, daß wegen des im Winter nur etwa halb so großen Wärmeabgabevermögens freier wie auch durch geeignete Bedeckung „aktivierter“ Wasserflächen dennoch die Hälfte der Abfallwärme auf andere Weise abgeführt werden müßte. Selbst wenn es gelingt, das Wärmeabgabevermögen von Wasserkörpern durch Technologien der hier vorgeschlagenen Art weiter zu steigern, käme dieses Kühlverfahren in der Bundesrepublik Deutschland wohl kaum für große Teile der zusätzlich zu errichtenden Kraftwerkskapazität in Betracht. Gleichwohl wäre zu prüfen, ob derartige Flächenkühlverfahren z. B. an geeigneten Standorten des Norddeutschen Tieflandes oder wassergefüllten ehemaligen Braunkohle-Tagebauen in Verbindung mit anderen Kühlmethoden nicht dennoch Vorteile bringen können.

## 6. Schlußfolgerungen

### 6.1. Möglichkeiten und Grenzen konventioneller Naßkühlverfahren in der Bundesrepublik Deutschland

Unter teilweise notgedrungen spekulativen Annahmen wurde in der vorliegenden Studie versucht, das Wasserdargebot der Bundesrepublik Deutschland auf seine Verwendbarkeit für nasse Kraftwerkskühlung hin mit Ausblick auf die Jahrtausendwende zu bewerten. Für die Frischwasserkühlung an binnenländischen Flußabschnitten ergaben die Berechnungen, daß knapp 33 GW<sub>e</sub> als Obergrenze anzusehen sind. Quantitative Aussagen über weitere Frischwasser-Kühlkapazitäten an Ästuaren und Küsten erschienen nicht möglich.

Für die nasse Turmkühlung als gegenwärtig bedeutendstes Kraftwerks-Naßkühlverfahren konnte eine (theoretische) Obergrenze der Anwendbarkeit sowohl aus Gründen des Umweltschutzes als auch wegen des z. Zt. noch herrschenden Mangels an begründeten Aussagen über verkraftbare Verdunstungsverluste nicht bestimmt werden. Gleichwohl wurde aufgezeigt, daß aufgrund eigener Verbrauchsberechnungen für alle konventionellen Kraftwerks-Naßkühlverfahren zusammen im Jahr 2000 3,8% des Mittleren Netto-Abflusses aufgewendet werden müßten, falls die gesamte von der Kraftwerkswirtschaft um die Jahrtausendwende erwartete Kapazität thermischer Kraftwerke in Höhe von 186 GW<sub>e</sub> auf konventionelle Weise naß gekühlt werden sollte. Wegen der jahreszeitlich stark wechselnden Wasserführung bundesdeutscher Flüsse wäre die von den Kraftwerksbetreibern vorwiegend aus Kostengründen angestrebte Beibehaltung nasser Turmkühlung bei möglichst vielen Neubauten – wenn überhaupt – nur durch Anlage von Kühlwasserspeichern realisierbar, für die ein Gesamtvolumen von knapp  $0,7 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>, also etwa der Hälfte des gegenwärtigen Speicherraumes der Bundesrepublik, als Anhaltswert gelten kann. Daß dadurch die wirtschaftliche Attraktivität nasser Turmkühlung empfindliche Einbußen erleidet, sei nur am Rande angemerkt. – Obwohl, wie einleitend erwähnt, die Frage nach den zumutbaren Kühlwasserverlusten angesichts der miteinander konkurrierenden Wassernutzungsarten in der Bundesrepublik Deutschland gerade erst andiskutiert ist, wird bereits jetzt deutlich, daß einem weiteren Ausbau der „on line“ auf die jeweilige Flußwasserführung bezogenen nassen Turmkühlung enge Grenzen gesetzt sind.

### 6.2. Ausblick

Angesichts des Gebotes, den Ausnutzungsgrad aller Energieformen zu verbessern und dadurch die Primärenergie-Zuwachsraten zu drosseln, müssen alle Möglichkeiten ausgenutzt werden, die bei thermischen Kreisprozessen unvermeidlichen Energiemengen zu minimieren und diese Abfallwärme vor ihrer endgültigen Abgabe an Hydrosphäre und Atmosphäre weitestgehend zu verwerten. Für den Betrieb thermischer Kraftwerke erfüllen Naßkühlverfahren diese Forderung besser als alle Methoden trockener Rückkühlung in ausschließlicher Anwendung. Für ein Land, das derartig hohe Abwärmedichten aufweist wie die Bundesrepublik, spielt außerdem die „umweltschonende Energieabfuhr“ eine bisher kaum gewürdigte Rolle. Da bei allen Naßkühlverfahren der größte Teil der Abwärme zunächst latent verfrachtet wird, ehe er durch oberflächenferne Kondensationsvorgänge freigesetzt wird, sollten auch unter diesem Gesichtspunkt die vorhandenen Naßkühlverfahren weiterentwickelt und die Schaffung neuer Naßkühltechnologien angestrebt werden. Wie der vom Umweltbundesamt Berlin jüngst herausgegebene Umweltforschungskatalog „UFOKAT’75“ [132] der Bundesrepublik zeigt, werden derartige Anstrengungen z. Zt. an verschiedenen Stellen unternommen.

Beim gegenwärtigen Kenntnisstand scheint die Beeinträchtigung der atmosphärischen Umwelt durch Wasserdampf-„Flächenquellen“ geringere Ausmaße zu besitzen als durch Wasserdampf-„Punktquellen“ in Form von Naßkühltürmen. Da außerdem, wie eingehend gezeigt wurde, bei der flächenhaften Energieabgabe von Gewässern wegen des wirksamen Anteils der effektiven Ausstrahlung der spezifische Kühlwasserverbrauch um 30...50% geringere Werte aufweist als bei nasser Turmkühlung, sollte auch der Weiterentwicklung nasser Flächenkühlverfahren besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die in der vorliegenden Untersuchung dargestellte

Konzeption des „aktiven Kühlteichs“ möge als ein derartiger Denkanstoß von geowissenschaftlicher Seite verstanden werden. Die dabei einstweilen benutzte Methode der „Aktivierung“ freier Wasseroberflächen durch verdunstungswirksame, die Globalstrahlung weitgehend reflektierende schwimmende Kunststoffkörper stellt sicher noch kein Optimum dar; möglicherweise können durch einfachere Technologien im molekularen Bereich billigere und dabei wirkungsvollere Teillösungen des Kühlproblems erzielt werden.

Je mehr Alternativen der Anwendung verschiedener Rückkühlmethoden zur Verfügung stehen, umso größer wird im Einzelfall die Chance, Kraftwerke zu errichten, welche die natürliche Ausstattung ihres Standortes bei Minimierung der Umweltbelastungen voll ausnutzen und dabei preisgünstig arbeiten. Mehr als bisher wird insbesondere von hydrogeographischer Seite zu prüfen sein, ob sich z. B. durch Kombination verschiedener Kühlverfahren miteinander (Hybridkühlung) die zuvor aufgezeigten Grenzen nasser Rückkühlung ausweiten oder die zu erwartende Belastung der Umwelt verringern lassen. Die Entwicklung von Naß/Trockenkühltürmen darf trotz des hohen Anlagekostenanteils als ein Schritt in die richtige Richtung angesehen werden. Auch wäre zu diskutieren, ob der in dieser Arbeit wegen seiner reduzierten Bedeutung unerwähnt gebliebene alte Sprühteich in einer Zeit zunehmender „ästhetischer“ Kritik an Kühlturm-Kolossalbauten nicht dennoch im Spektrum der Hybridkühlverfahren erhalten bleiben könnte.

Dagegen scheint es z. Zt. wenig sinnvoll, in den Chor derjenigen einzustimmen, welche die Errichtung von Trockenkühlanlagen unter Verzicht auf jede Form der nassen Rückkühlung bei allen Großkraftwerks-Neubauten als Optimallösung ansehen. Ein zumindest zeitweilig schlechterer Prozeßwirkungsgrad und damit erhöhte Energieabgabe, höhere Investitions- und Betriebskosten sowie landschaftsästhetische Vorbehalte stellen Argumente gegen die ausschließliche trockene Rückkühlung dar, die erst noch entkräftet werden müssen.

Zwar besteht gegenwärtig und in Zukunft mehr denn je zuvor die Notwendigkeit, mit dem Wasserschatz der Bundesrepublik sparsam umzugehen; bei besonnener Ausnutzung aller Möglichkeiten von Technologie und natürlicher Standortausstattung wird wahrscheinlich auch noch weiterhin mancher unumgänglich notwendige Kraftwerks-Neubau zumindest teilweise mit der volkswirtschaftlich vorteilhafteren nassen Rückkühlung ausgestattet werden können. Trotzdem ist zu hoffen, daß die Vergrößerung der bundesdeutschen Kraftwerkskapazität langsamer und damit weniger hektisch verlaufen wird als z. B. noch in der Neuberechnung des erwarteten Wasserbedarfs in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000 (Zeitstandsbericht vom Juni 1976) durch das Battelle-Institut [133] prognostiziert. Zwar werden die noch bestehenden Unterschiede in effektivem Wirkungsgrad und spezifischem Kühlwasserverbrauch zwischen Kernkraftanlagen und fossilthermischen Kraftwerken zukünftig verschwinden; dennoch erscheint eine neuerliche Prüfung der Frage erforderlich, ob angesichts der noch offenen Probleme von Reaktorsicherheit, Kernbrennstoff-Wiederaufbereitung und Endlagerung der Abfälle, um deren Bewältigung gegenwärtig in der Bundesrepublik hart gerungen wird, die Errichtung weiterer großer Kernkraftwerkskapazitäten tatsächlich unumgänglich ist. Da die Betreiber von Kernkraftwerken per Gesetz nach dem Verursacherprinzip alle entstehenden Kosten der Ver- und Entsorgung selbst tragen müssen, werden sich diese Belastungen in steigendem Maße auf den Strompreis auswirken. Können noch bis Ende der Siebziger Jahre Kernbrennstoff-Wiederaufbereitungsanlagen des westlichen Auslandes zu relativ günstigen Bedingungen mitbenutzt werden und war bisher eine Zwischenlagerung der Abfälle notfalls noch gerade vertretbar, so verlangen diese Probleme spätestens ab 1980 eine (gegenüber dem jetzigen Zustand hohe Mehrkosten erfordernde) Lösung. Hinzu kommt, daß angesichts der Schwierigkeiten bei der Standortfindung für neue Kernkraftwerke in Zukunft auch solche Örtlichkeiten akzeptiert werden müßten, an denen die Kühlprobleme nicht optimal lösbar sind, so daß die geosphärisch notwendige Minimierung des spezifischen Abwärmefalles hier nur unvollkommen erreicht würde.

Die zu erwartenden Umweltbelastungen, welche durch die vorgesehene Ausweitung der bundesdeutschen Kraftwerkskapazitäten hervorgerufen werden, sollten insbesondere Politiker, die Kraftwerkswirtschaft und Fachwissenschaftler als Entscheidungsträger deutlicher als bisher an ihre Verantwortung für die „Lebensqualität von morgen“ erinnern.

## PERSÖNLICHE NACHBEMERKUNGEN

Abschließend dürfen die meist förderlichen Einflüsse von Personen und Institutionen auf den Werdegang der vorliegenden Studie nicht unerwähnt bleiben, wobei zunächst die Kraftwerkswirtschaft zu nennen ist. Über schriftliche Verlautbarungen hinaus wurden mir bereitwillig Auskünfte erteilt und „vor Ort“ Sachverhalte gezeigt, die wertvolle ergänzende Informationen darstellen. Herrn Prof. Dr. H. Rögner, Lehrstuhl A und Institut für Thermodynamik der T. U. Hannover, danke ich für zusätzliche Angaben über die an den Kraftwerksstandorten angewandten bzw. vorgesehenen Kühlverfahren.

Im Institut für Geographie der Universität Münster habe ich stets Unterstützung durch den „Aldirektor“, Herrn Prof. Dr. W. Müller-Wille, sowie die Geschäftsführenden Direktoren, die Herren Professoren Dr. P. Weber und Dr. K. F. Schreiber, erfahren; so wurde durch Schaffung und Erhaltung hinreichender Arbeitsmöglichkeiten das Zustandekommen der Studie sehr gefördert. Dieser Tatbestand verdient umso mehr Beachtung, als die gegenwärtig im Land Nordrhein-Westfalen angewandten Rechtsverhältnisse für akademische Räte/Oberräte selbstständige Forschungsarbeiten während der Dienstzeit praktisch ausschließen, worüber ich von dem Kanzler der Westfälischen Wilhelms-Universität, Herrn Dr. K. Triebold, und seinem Stellvertreter, Herrn Ltd. Reg.-Dir. W. Roland, nachdrücklich belehrt wurde.

Mit besonderem Dank möchte ich auch das ständige Gastrecht im Institut für Geophysik der Universität Münster erwähnen, das mir von dessen Direktor, Herrn Prof. Dr. J. Untiedt, in großzügiger Weise gewährt wurde, und ohne das zumindest der experimentelle Teil der Untersuchung kaum hätte zustandekommen können. Dieses Gastrecht setzt die Tradition besonderer Förderung durch die münsterische Geophysik fort, die von dem 1968 leider zu früh verstorbenen Institutsleiter, Herrn Prof. Dr. B. Brockamp, begonnen wurde, indem dieser mich als wissenschaftlichen Mitarbeiter seit 1965 zur Verdunstungsforschung hinführte.

Wertvolle sachliche Anregungen und Hinweise, nicht zuletzt wichtige Einblicke in sonst kaum zugängliche anglo-amerikanische Fachliteratur, verdanke ich Herrn Prof. Dr. W. Bach im Institut für Geographie der Universität Münster, der sich im Rahmen seiner Forschungen zu klimatologischen Umweltproblemen auch mit Abwärmefragen beschäftigt. — Des weiten Kreises von bisher noch nicht namentlich genannten Professoren und Kollegen sowie „außeruniversitärer“ Fachleute, die in Gesprächen manche Frage haben klären helfen, kann hier nur in cumulo dankend gedacht werden.

Die Aufzählung bliebe unvollständig, wenn nicht auf die umfangreichen Finanzmittel hingewiesen würde, die mir im Rahmen zweier Forschungsprojekte bereitgestellt wurden und ohne die derartige Meßreihen nicht hätten gewonnen werden können. So stellte die Deutsche Forschungsgemeinschaft von 1971 bis 1974 im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade der UNESCO Personal- und Sachmittel zur Entwicklung eines neuen Verdunstungsmeßgerätes für freie Wasserflächen bereit, das inzwischen serienmäßig hergestellt wird. Seit 1975 ermöglicht das Bundesinnenministerium für Forschung und Technologie Bonn die Durchführung einer dreijährigen Untersuchungsreihe zur Verringerung von Algenwuchs und Verdunstung an Oberflächengewässern mittels schwimmender Kunststoffkörper.

Den in beiden Forschungsprojekten früher oder jetzt beschäftigten wissenschaftlichen Mitarbeitern J. Schweter und G. Braun schulde ich großen Dank für die tatkräftige Unterstützung beim Messen und Rechnen; nur mit dieser Hilfe konnten die wichtigsten Ergebnisse fünfjähriger Untersuchungen an der Stever-Talsperre bei Haltern in der vorliegenden Form dargeboten werden.

Die in der Arbeit enthaltenen Bilder sind Eigenaufnahmen aus den Jahren 1973 bis 1976.



## LITERATUR

- 1 Beck, P. und D. Goetting: Umwelteinflüsse der Energieerzeugung. In: Beitr. z. Umweltgestaltung B 2, Berlin 1971.
- 2 Wilson, L. [Hrsg.]: Inadvertent Climate Modification: Report of the Study of Man's Impact on Climate (SMIC-Report), MIT-Press, Mass. 1971.
- 3 Bach, W.: Global Air Pollution and Climatic Change. In: Rev. of Geophys. and Space Phys., Vol. 14, No. 3, 1976, S. 429—474.
- 4 Schaefer, H.: Die thermische Belastung der Umwelt durch Wärmeprozesse. In: Elektrizitätswirtsch. 72, H. 5, 1973, S. 116—117.
- 5 Forschungsstelle für Energiewirtschaft München [Hrsg.]: Energiewirtschaft und Umweltbeeinflussung in der Bundesrepublik Deutschland. München <sup>2</sup>1974, 63 S.
- 6 Flohn, H.: Produzieren wir unser eigenes Klima? In: Meteorol. Rdsch. 23, Nr. 6, 1970, S. 161—164.
- 7 Flohn, H.: Energie und Klima im 21. Jahrhundert. In: Bild d. Wiss. 11, 1975, S. 82—88.
- 8 Schaefer, H.: Möglichkeiten und Grenzen der Abwärmeverwertung. Vortr. b. d. Tag. „Abwärme“ anläßl. d. „Umwelt 72“ am 7. 7. 72 in Stuttg. In: „Umwelt Aktuell“ Bd. 6 (Abwärme), Karlsruhe 1973, S. 69—75.
- 9 Bach, H., P. Beck und D. Goetting [Hrsg.]: Energie und Abwärme. Ursachen — Auswirkungen — Empfehlungen, Studie im Auftr. der Interparlam. Arb.-Gemeinsch. (= H. 8 d. „Beitr. z. Umweltgestaltung“), Berlin, 1973, 589 S.
- 10 Luckow, H.: Agrotherm. In: Wasserwirtsch. 66, 3, 1976, S. 95—96.
- 11 Deutsche Verbundgesellschaft [Hrsg.]: Bericht 1973, Heidelberg 1974, 22 S.
- 12 Krolewski, H.: Die gegenwärtige Kühlwassersituation in der Bundesrepublik. In: Techn. Mitt. 65, 1972, S. 5—8.
- 13 Hammond, A. L., W. D. Metz und T. H. Maugh II: Energie für die Zukunft — Wege aus dem Engpaß. (Dt. Üb.), Umschau-Verl., Ffm. 1974, 202 S.
- 14 Böhnke, B.: Minderung der Folgen der Wärmebelastung durch Sauerstoffeintrag. In: VDI-Bericht Nr. 204, 1973, S. 25—42.
- 15 Hambloch, H., Allgemeine Anthropogeographie. Wiesbaden 1972, 192 S.
- 16 Mandel, H.: Strukturen der nuklearen Stromerzeugung in den 70er und 80er Jahren. In: DATF — Sonderdr. S—7, Jan. 1973, S. 1—7.
- 17 Flinspach, D. und H. Fleig: Die Aufstellung von Wärmelastplänen durch rechnerische Simulation der Wärmeaustauschvorgänge — dargestellt am Beispiel des „Wärmelastplanes Rhein“. In: Wasserwirtsch. 62, 1972, 5, S. 127—133.
- 18 Berger, F. und W. Schmitz: Voraussage der Temperatur in Flüssen unter Benutzung eines deterministischen Modells und elektronischer Datenverarbeitung. In: gwf — wasser/abwasser 114, 1973, H. 1, S. 19—22.
- 19 Eckel, O. und H. Reuter: Zur Berechnung des sommerlichen Wärmeumsatzes in Flußläufen. In: Geografiska Annaler H. 3/4, 1950, S. 188—209.
- 20 Engle, M. D.: Condensing Water — How it does affect the River. In: Mech. Eng., Jan. 1961, S. 34—38.
- 21 Becker, A.: Die thermische Belastbarkeit der Binnengewässer und die bei der Durchflußkühlung eintretenden Nutzungsverluste. Bes. Mitt. z. Gewässerkundl. Jb. d. DDR, 2, 1965.
- 22 Berger, F.: Gutachten über die thermischen Auswirkungen flußwassergekühlter Kraftwerke auf den Hochrhein. Angefertigt im Auftrag der Rhein.-Westf. Elektrizitätswerk AG Essen, 1966.
- 23 Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) [Hrsg.]: Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastung von Gewässern. Als Anhang: Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins [Hrsg.]: Wärmelastplan Rhein, Wiesbaden <sup>2</sup>1971.
- 24 Kämpfer, M.: Abwärme. Hydrobiologische Auswirkungen der Temperaturerhöhung durch die Einleitung von Kühlwasser. Bonn-Bad Godesberg (Bundesanstalt für Veget.-Kunde, Nat.-Schutz u. Landsch.-Pflege, Bibliogr. Nr. 24) 1971.
- 25 Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins [Hrsg.]: Wärmelastplan Rhein — Aaremündung bis holländische Grenze. Wiesbaden, Mai 1971.
- 26 Bayer. Landesamt f. Wasserversorg. u. Gewässerschutz [Hrsg.]: Wärmelastrechnungen Donau. München 1973.
- 27 Arbeitsgemeinsch. für die Reinhalt. der Elbe [Hrsg.]: Wärmelastplan für die Elbe von Schnackenburg bis Cuxhaven. Hamburg 1973.
- 28 Arbeitsgemeinsch. der Länder zur Reinhaltung der Weser [Hrsg.]: Wärmelastplan Weser, Bremen 1974.

- 29 Bayer. Landesamt f. Wasserversorg. u. Gewässerschutz [Hrsg.]: Wärmelastrechnungen Main. München 1972.
- 30 Ministerium f. Ernähr., Landwirtsch. u. Umwelt Baden-Württemb. — Wasserwirtsch.-Verwalt. [Hrsg.]: Wärmelastplan Neckar, Plochingen bis Mannheim. Stuttgart 1973.
- 31 Lima, D. O., Pond Cooling by Surface Evaporation. In: Power, März 1936, S. 142—144.
- 32 Throne, R. F.: How to predict Lake Cooling Action. In: Power, Sept. 1951, S. 86—89.
- 33 Langhaar, J. W.: Cooling Pond may answer your Water Cooling Problem. In: Chem. Eng., Aug. 1953, S. 194—199.
- 34 Jaske, R. T. und H. R. Drew: Simulation of Evaporation from Cooling Lake with a Comparison to a Real Case and the Alternative Use of Cooling Towers. In: Cooling Towers, Am. Inst. Chem. Eng., New Y. 1972, S. 131—137.
- 35 Burnett, J. M. et al.: The Cooling Power Stations. Ninth World Energy Conference, Vol. III, Detroit 1974, S. 333—355.
- 36 Spangemacher, K.: Berechnung eines Kühlteiches. In: Mitt. VGB, H. 42, 1956, S. 150—155.
- 37 Günneberg, F.: Abwärme im Gewässer. In: Dt. Gewässerkundl. Mitt. 17, H. 1, 1973, S. 14—21.
- 38 Schmidt, K. R.: Zur Frischwasserkühlung bei Wärmekraftwerken. In: VGB Kraftwerkstechnik 53, H. 1, 1973, S. 9—25.
- 39 Arbeitsgruppe über die met. Auswirkungen der Kühltürme [Hrsg.]: Schweizer Kühlturmbericht. Manusk. des Dienstes für Luftreinhalte. der Schweiz. Met. Zentralanst., Payerne 1972.
- 40 Anonym: Probleme des industriellen Kühlwassers. Vortragsveröff. Haus d. Technik Essen, Essen 1972.
- 41 Anonym: Wärmebelastung der Gewässer und der Atmosphäre. VDI-Ber. Nr. 204, Düsseldorf 1973.
- 42 Anonym: Untersuchungen an einem Naturzug-Naßkühlturm. In: Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 15, Nr. 5, Düsseldorf, Juli 1974.
- 43 Bung, W.: Ergebnisse der Tropfenauswurfmessung an einem 130 m hohen Naturzugkühlturm. In: Tech. Überwachung 15, Nr. 3, 1974, S. 83—87.
- 44 Innenministerium Baden-Württemberg [Hrsg.]: Studie über die thermische Belastbarkeit der fließenden Oberflächengewässer. Stuttgart, Sept. 1969.
- 45 Bundesanstalt für Gewässerkunde [Hrsg.]: Auswirkungen der Einleitung von Warmwasser auf die Gewässer. Koblenz, April 1969.
- 46 Bundesministerium des Innern [Hrsg.]: Wasserbedarfsentwicklung in Industrie, Haushalten, Gewerbe, öffentlichen Einrichtungen und Landwirtschaft. Prognose des Wasserbedarfs in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000. (= Bericht des Battelle-Inst. e. V. Frankfurt/M. für das BMI), Bonn 1972.
- 47 Bundesministerium des Innern [Hrsg.]: Materialienband zum Umweltprogramm der Bundesregierung (zu Drucks. IV/2710 des Dt. Bundestages, 6. Wahlper.), Bonn 1971.
- 48 Internat. Atomic Energy Agency [Hrsg.]: Thermal Discharges at Nuclear Power Stations. In: IAEA Techn. Reports, Ser. Nr. 155, Wien 1974.
- 49 Umwelt-Bundesamt Berlin — Geschäftsstelle der Abwärmekommission: Persönl. Schreiben an den Verf. vom 1. März 1976 betr. Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Wärmebelastung der Gewässer.
- 50 Keller, R.: Das Schema des Wasserkreislaufes, berechnet für das Deutsche Bundesgebiet. In: Geograph. Taschenb. 1951/52, Stuttgart 1951, S. 203—205.
- 51 Keller, R.: Wasserbilanz der Bundesrepublik Deutschland. In: Umschau in Wiss. u. Techn. H. 3, 1971, S. 73—78.
- 52 Keller, R.: Der Einfluß des Menschen auf die Wasserbilanz. In: Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellonskiego CCLXXXI, 1971, S. 121—131.
- 53 Bach, W.: Environmental Impact of Energy Use. Paper, presented at the Fourth National Conference on Energy and the Environment, Cincinnati, OH., Oct. 4—7, 1976.
- 54 Aldrian, W.: Kühlwasserbeschaffung und Kühlwasserableitung. In: Haus d. Technik, Vortr.-Veröff. Nr. 259, VIK-Ber. Nr. 183, Essen 1970, S. 6—17.
- 55 Werkmeister, H.: Kühlwasser für Kondensationskraftwerke. In: Elektrizitätswirtschaft 70, 1971, 4, S. 73—82.
- 56 Knöpp, H.: Biologisch-chemische Probleme der Abwärmelastung unserer Gewässer. In: VDI-Ber. Nr. 204, 1973, S. 17—23.
- 57 Anonym: Reviewing Environmental Impact Statements — Power Plant Cooling Systems, Engineering Aspects. US Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon, 1973, 93 S.
- 58 Rögner, H.: Wärmeabgabe durch Naßkühltürme. In: Umwelt Aktuell, Bd 6 (Abwärme), Karlsruhe 1973, S. 35—44.

- 59 **Rögener, H.**: Physik der Rückkühlung. In: VDI-Ber. Nr. 204, 1973, S. 43—46.
- 60 **Spangemacher, K.**: Naßkühltürme. In: VDI-Ber. Nr. 204, 1973, S. 47—54.
- 61 **Anonym**: Trockene Rückkühlung. Stand der Technik, der Verfahren sowie der wirtschaftlichen Aussichten. In: wasser luft und betrieb 16, Nr. 6, 1972, S. 180—183.
- 62 **Buxmann, J.**: Trockenkühlung. In: VDI-Ber. Nr. 204, 1973, S. 55—60.
- 63 **Hirschfelder, G.**: Trockenkühlung für das 300 MW-THTR Kernkraftwerk Schmehausen. VGB-Konferenz „Kraftwerk und Umwelt 1973“, Essen 1973, S. 87—94.
- 64 **Li, Kow W.**: Combined Cooling Systems for Power Plants Northern States Power Company, Minneapolis, Minnesota, 1973.
- 65 **Olds, F. C.**: Cooling Towers. In: Power Engineering 76, Nr. 12, 1972, S. 30—37.
- 66 **Webb, R. L. and R. E. Barry** [Hrsg.]: Dry and dry/wet cooling towers for power plants. Am. Soc. Mech. Eng., New York 1973
- 67 **Fritzsche, P.**: Betriebserfahrungen mit kombinierten Naß-/Trockenkühltürmen. In: VGB Kraftwerkstechnik 55, H. 4, Apr. 1975, S. 225—229.
- 68 **Spangemacher, K.**: Kombination von Trocken- und Naßkühltürmen. In: VIK-Ber. Nr. 183, Essen 1970.
- 69 **Christmann, G.**: Der Naß-/Trockenkühlturm. In: VGB Kraftwerkstechnik 55, H. 4, Apr. 1975, S. 218—225.
- 70 **Gerking, E.**: Zusammenhang zwischen Nutzung der Gewässer für Kühlzwecke und Wassergüte. VGB-Konferenz „Kraftwerk und Umwelt 1973“, Essen 1973, S. 128—142.
- 71 **Internat. Atomic Energy Agency (IAEA)** [Hrsg.]: Environmental Effects of Cooling Systems at Nuclear Power Plants. Wien 1975, 830 S.
- 72 **Reimann, K.**: Gewässererwärmung durch Kühlwasser aus Energiekraftwerken — biologische und chemische Folgen. In: Wasser für die Erholungslandschaft (= Münchener Beitr. z. Abwasser-, Fischerei- u. Flußbiologie Bd. 26), München 1975, S. 49—58.
- 73 **Wolf, P.**: Die Berücksichtigung neuer Erkenntnisse in Sauerstoffhaushaltsberechnungen für Fließgewässer. In: gwf — wasser/abwasser H. 4 u. 5, 1971.
- 74 **Böhnke, B.**: Beeinflussung der Wasserläufe durch Erwärmung und Wasserentzug. In: Wasserwirtsch. 63, H. 11/12, 1973, S. 372—383.
- 75 **Böhnke, B. und R. Schulze-Rettmer**: Beiträge zum Sauerstoffhaushalt des Rheins. In: VOM WASSER, Jb. f. Wasserchemie u. Wasserreinig.-Technik Bd. 40, 1973.
- 76 **Krolewski, H.**: Die Flußbelüftung der VEW in der Lippe. In: Energie und Technik 18, 1966, S. 247.
- 77 **Forstner, G.**: Sauerstoffanreicherung bei Kühlwassernutzung. VGB-Konferenz „Kraftwerk und Umwelt 1973“, Essen 1973, S. 142—146.
- 78 **Imhoff, K. R.**: Wasser für die Erholungslandschaft — Erfahrungen mit der Belüftung von Seen und Fließgewässern. In: Wasser für die Erholungslandschaft (= Münchener Beitr. z. Abwasser-, Fischerei- u. Flußbiologie Bd. 26), München 1975, S. 309—324.
- 79 **Londong, D.**: Sauerstoffeintrag an freien Überfällen. In: GWA Aachen, Bd. 12, 1974.
- 80 **Caspar, J. W.**: Meteorologische Auswirkungen von Kühlvorgängen. In: VDI-Ber. 204, 1973, S. 61—68.
- 81 **Caspar, J. W.**: Zur Frage von Klimaveränderungen durch den Betrieb von Kraftwerken. Manusk. z. Vortr. am 23. 4. 1975 anläßl. e. Fachtag im US-Handelszentrum Frankfurt/M.
- 82 **Scultetus, H. R.**: Gutachten über die Veränderung der Nebelhäufigkeit über der Unterweser durch Einleiten von Kühlwasser aus einem Kraftwerk bei km 52 der Unterweser. Bremen (WSD) 1972.
- 83 **Hanna, S. R. und J. Pell** [Hrsg.]: Cooling Tower Environment — 1974. Proceedings of a Symp. held at the Univ. of Maryland Adult Educ. Center, March 4—6, 1974. In: ERDA Sympos. Series, Conf. 740302, Springfield, Virg, 1975.
- 84 **Mandel, H.**: Einfluß der Elektrizitätswirtschaft auf die Gewässer. In: ZfBinnenschifffahrt u. Wasserstraßen Nr. 3, 1972, S. 88—95.
- 85 **Deutscher Bundestag, 6. Wahlperiode, Drucks. VI/3052 betr.**: Thermische Belastbarkeit von Gewässern durch Kernkraftwerke. Bonn, den 20. Jan. 1972.
- 86 **v. Ammon, F. und P. Wolf**: Der Kühlwasserbedarf bei der Stromerzeugung — ein wasserwirtschaftliches und wassergütwirtschaftliches Problem. In: Wasserwirtsch. 8, 1966, S. 256—259.
- 87 **Wemselfelder, P. J.**: Wordt warmtelozing door centrales in de toekomst een probleem? In: De Ingenieur 80, Nr. 51, Den Haag, Dez. 1968.
- 88 **Kuhn, W.**: Physikalisch-meteorologische Überlegungen zur Nutzung der Gewässer für Kühlzwecke. In: Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A, 21, 1972, S. 95—122.

- 89 **Brockamp †, B. und J. Werner:** Ein weiterentwickeltes Verdunstungsmeßgerät für Kleingewässer (als Beitrag zur Hydrologischen Dekade der UNESCO). In: Meteorol. Rdsch. 23, S. 53—56.
- 90 **Werner, J.:** Ein Versuch zur numerischen Bestimmung des vertikalen Austauschkoefizienten für Wasserdampf in der wassernächsten Luftschicht. In: Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A, 20, 1971, S. 159—174.
- 91 **Werner, J.:** Läßt sich die Verdunstung freier Wasserflächen noch mit anderem als dem bisher üblichen Instrumentarium messen? In: Dt. Gewässerkundl. Mitt. 18, H. 3, Juni 1974, S. 53—63.
- 92 **Werner, J., J. Schweter und G. Braun:** Ein integrierender kinetischer Verdunstungsmesser für Binnengewässer. In: Beitr. z. Hydrol. H. 4, 1976, S. 1—28.
- 93 **Kondratyev, K. Y.:** Radiation in the Atmosphere. New York/London 1969 (= Internat. Geophysics Series Vol. 12), S. 439.
- 94 **Smithsonian Meteorological Tables**, Washington 1958<sup>8</sup>, S. 497.
- 95 **Linke, F. / F. Baur [Hrsg.]:** Meteorologisches Taschenbuch, neue Ausgabe, Bd. II, <sup>2</sup> 1970, S. 386.
- 96 **Bach, W.:** A chart for calculating long-wave radiation. In: Climatol. Bulletin No. 2, Mc Gill Univ. Montreal, July 1967, S. 45—50.
- 97 **Heitmann, M. L., D. Richter und D. Schumann:** Der Wärme- und Wasserhaushalt des Stechlin- und Nehmitzsees. In: Abh. des Met. Dienstes der DDR Nr. 96, Bd. XII, Berlin 1969.
- 98 **Water Loss Investigations: Volume 1-Lake Hefner Studies — Technical Report.** Geological Survey Circular 229, Washington D. C. 1952, 162 S.
- 99 **Geiger, R.:** Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig <sup>4</sup> 1961, S. 30—33.
- 100 **Berényi, D.:** Mikroklimatologie. Stuttgart 1967, S. 71.
- 101 **Deutscher Wetterdienst [Hrsg.]:** Monatlicher Witterungsbericht für die Bundesrepublik Deutschland. Offenbach/M. 1973, 1974.
- 102 **Schroeder, M.:** Die wägbare Lysimeteranlage Senne. In: Schriftenr. d. Landesanst. f. Gewässerkunde u. Gewässerschutz des Landes NRW, H. 34, 1973.
- 103 **Braun, G.:** Entwicklung eines physikalischen Wasserhaushaltsmodells für Lysimeter. In: Mitt. des Leichtweiss-Inst. f. Wasserbau d. T. U. Braunschweig H. 49, 1975, S. 1—39.
- 104 **Zimmermann, C., H. Kobus und P. Geldner:** Wärmeeinleitung in Strömungen. Gräffeling b. München 1975, 422 S.
- 105 **Keller, R.:** Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes. Leipzig 1962.
- 106 **Platt, R.:** Wasser — Die Substanz des Lebens [= Übers. aus d. Amerik.]. Tübingen/Stuttgart 1971, S. 289—311.
- 107 **Werner, J.:** Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Windprofil und Meereisdecke in der kanadischen Arktis bei Pond Inlet, N. W. T. In: Polarforschung 43, Nr. 1/2, 1973, S. 23—31.
- 108 **Werner, J.:** Zur Bestimmung der Transportkoeffizienten für Wasserdampf in der wassernächsten Luftschicht. Diss. (masch.) Münster 1969.
- 109 **Dobesch, H.:** Die numerische Bestimmung der Transporte fühlbarer und latenter Wärme mittels verschiedener Methoden über einer freien Wasserfläche. In: Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A, 23, 1974, S. 263—284.
- 110 **Täubert, U.:** Der Wärmehaushalt von Flüssen als stochastisches Problem. In: Wasserwirtsch. 65, 12, 1975, S. 329—335.
- 111 **Witte, N. und N. Beier:** Ein Energiemodell zur Berechnung von Flußtemperaturen. In: Met. Rdsch. 29, Juni 1976, S. 88—93.
- 112 **Jansen, P., W. Schikarski und H. Stehfest:** Beitrag zur Analyse der zulässigen Kraftwerksbelegung des Rheins im Hinblick auf die thermische Belastung. Kernforsch.-Zentrum Karlsruhe, Veröff. Nr. 1511, 1971.
- 113 **Ortner, G. und K. Ritter:** Die Verdunstungsverluste als begrenzender Faktor für Standorte thermischer Kraftwerke an mittleren Flüssen. In: Energie 28, Nr. 8, Aug. 1976, S. 224—230.
- 114 **Henning, H. und S. Kliemann:** Niederschlags- und Nebelbildung durch Kühltürme. In: Energie u. Technik 23, H. 3 u. 4, 1971, S. 87—89 u. 112—115.
- 115 **England, W. G., L. H. Teuscher und J. R. Taft:** Cooling Tower Plumes — defined and traced by Means of Computer Simulation Models. In: Annual Meeting, Cooling Tower Institute, Houston, Texas 1973, S. 1—42.
- 116 **Berliner, P.:** Fog formation and fog elimination. In: Environmental Effects of Cooling Systems at Nuclear Power Plants, hrsg. v. d. Internat. Atomic Energy Agency, Wien 1975, S. 75—84.
- 117 **Fortak, H.:** Messungen an Kühlturmfahnen. In: KFA Jülich 1975.

- 118 **Trepp, J. P.:** A two-dimensional hydrodynamic model for cooling-tower plumes. In: Environmental Effect of Cooling Systems at Nuclear Power Plants, hrsg. v. d. Internat. Atomic Energy Agency, Wien 1975, S. 37—44.
- 119 **Brennan, P. T., D. E. Seymour, M. J. Butler, M. L. Kramer, M. E. Smith and T. T. Frankenberg:** The observed rise of visible plumes from hyperbolic natural draft cooling towers In: Atmosph. Environment 10, 1976, S. 425—431.
- 120 **Cambell, J. C.:** The preventing of fog from cooling towers. In: Annual Meeting, Cooling Tower Institute, Houston, Texas 1973, S. 1—25.
- 121 **Kreitzberg, C. W. and D. J. Perkey:** Release of potential instability: Part 1. A sequential plume model within a hydrostatic primitive equation model. In: Journal of the Atmospheric Sciences 33, 1976, S. 456—475.
- 122 **Hübschmann, W. und K. Nester:** Meteorologische Auswirkungen der Abwärme aus Kühltürmen. In: DATF-Sonderdr. S-11, Nov. 1973.
- 123 **Gossmann, H.:** Umweltgefahren durch Kernkraftwerke. In: Geogr. Rdsch. 3, März 1974, S. 81—92.
- 124 **Baer, E., H. Ditttrich, G. Ernst, W. Roller und D. Wurz:** Wechselwirkung zwischen Naturzug-Naßkühltürmen und Atmosphäre. In: VGB-Konferenz „Kraftwerk und Umwelt 1975“, Essen 1975, S. 109—111.
- 125 **Flohn, H.:** Der Wasserhaushalt der Erde. Schwankungen und Eingriffe. In: Naturwiss. 60, 1973, S. 340—348.
- 126 **Andres, O., G. Ortner und A. Schiffers:** Zusatzwasser für nasse Kühltürme (1970—1985). In: Energie 26, H. 7/8 1974, S. 235—243.
- 127 **Anonym:** Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Teilbd. Weser/Ems. Koblenz 1975.
- 128 **Bundesministerium des Innern [Hrsg.]:** Umwelt und Energie. Umweltbrief Nr. 9, Bonn, den 15. 11. 1974.
- 129 **Bach, W.:** „Auswirkung von Abwärme und Wasserdampf aus Kraftwerken und Ballungsgebieten auf das regionale Klima: Eine vergleichende Untersuchung.“ (= Antrag auf Bereitstellung von Forschungsmitteln an die KFA Jülich als Projektträger für das Energieforschungsprogramm des BMFT v. Aug. 1976).
- 130 **Werner, J.:** Der künstliche Binnensee im Niedersächsischen Tiefland. In: Spieker 25 (40 Jahre Geogr. Kommission für Westf.), Münster 1977, S. 5—21.
- 131 **Macaluso, C. A.:** Ecological Aspects of Cooling Systems. In: Cooling Towers, hrsg. v. Amer. Inst. Chem. Engen., New York 1972, S. 111—114.
- 132 **Umweltbundesamt [Hrsg.]:** Umweltforschungs-Katalog '75 (UFOKAT '75, UMPLIS-Informations- u. Dokumentationssystem zur Umweltplanung), Berlin 1976.
- 133 **Battelle-Institut e. V. Frankfurt/M. [Hrsg.]:** Prognose des Wasserbedarfs in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000 — Zeitstandsbericht —. (Bericht für das Bundesministerium des Innern Bonn), Frankfurt/M., Juni 1976.

## Zusammenfassung

Ausgehend von der Tatsache, daß Abwärme ein zumindest einstweilen unvermeidliches Nebenprodukt bei der großtechnischen Erzeugung elektrischer Energie darstellt, werden zunächst die gebräuchlichen Kraftwerks-Kühlverfahren im Überblick dargestellt. In der Bundesrepublik Deutschland werden z. Zt. etwa 43% der Kraftwerksabwärme an Oberflächengewässer abgegeben; für die Kühlleistung der binnenländischen freien Wasserflächen liegen aber noch keine genauen Zahlenwerte vor. Deshalb ist in Kap. 3 der Versuch vorgeführt, unter Zugrundelegung der gegenwärtig als verbindlich angesehenen biologisch-chemischen Grenzwerte thermischer Belastbarkeit Zeitreihen der Wassertemperatur und des Wärmeabgabekoeffizienten aufgrund eigener Messungen an der Stever-Talsperre bei Haltern (NRW) für die hydrologischen Sommerhalbjahre 1973 und 74 zu berechnen. Dazu wurde ein deterministisches Abwärme-Simulationsmodell für Kühlteiche entwickelt, dessen Ergebnisse zumindest für den Wärmelastfall 0 mit den direkt gemessenen Wassertemperaturen verglichen werden konnten. Wie die Abb. 11 a...d erkennen lassen, darf das Modell als brauchbar angesehen werden, so daß eine Extrapolation auf verschiedene angenommene Abwärmeraten möglich erschien (Abb. 12 a...d).

Mittels der so ohne Überschreitung zulässiger Wassertemperatur-Grenzwerte erhaltenen Wärmeabgabekoeffizienten wurde eine überschlägige Berechnung der maximal möglichen Kühlleistung bundesdeutscher Binnengewässer durchgeführt, die – bei ausschließlicher Anwendung der Durchlaufkühlung – einen Gesamtbetrag von 33 GWe ergab.

Vorwiegend aufgrund eigener Berechnungen des spezifischen Netto-Wasserverbrauchs verschiedener Naßkühlverfahren (wobei der Naßkühlturm gegenüber reiner Durchlaufkühlung um 50...100% mehr Wasser verbraucht) werden Vorversuche dargestellt, das Wärmeabgabevermögen von Wasseroberflächen durch Bedeckung mit schwimmenden Kunststoffkörpern zu „aktivieren“, um so zumindest einen Teil der Abwärme nicht über Flüsse oder Naßkühltürme austragen zu müssen. Die Abdeckung dient einerseits dazu, den größten Teil der das Gewässer erreichenden Globalstrahlung zu reflektieren und damit der natürlichen Aufwärmung entgegenzuwirken; andererseits wird die Wärmeabgabe durch Vergrößerung der verdunstungswirksamen Wasseroberfläche erhöht.

Gegen den ausschließlichen Einsatz von Trockenkühlanlagen bei Kraftwerksneubauten werden in erster Linie energiewirtschaftliche, lokalklimatische und landschaftsästhetische Bedenken angemeldet. Statt dessen wird angeregt, durch Kombination verschiedener Kühlmethoden die an den Standorten vorhandenen Möglichkeiten flexibler als bisher auszunutzen, wobei auch in Zukunft die Naßkühlverfahren sowohl in bezug auf ihre volkswirtschaftlichen Kostenvorteile als auch auf die Umweltbelastungen eine dominierende Stellung behalten sollten.

## Summary

Considering the fact that at present waste heat is an inevitable byproduct of large scale technical production of electric energy, the starting point of this treatise is the description of the mostly used cooling techniques at power plants. At present almost 43 per cent of the waste heat of power plants in the FRG are emitted into open water bodies, but up to now there are no exact data available for the cooling output of the inland free water surfaces. Therefore chapter 3 deals with the experiment made to provide a time series diagram of the water temperature and the heat release coefficient based on own measurements at the Stever Dam near Haltern (Westfalia) in the hydrological summer terms of 1973 and 74. This diagram is based on the at present generally accepted biological and chemical limiting values of thermal power rating. In order to get these data a deterministical waste heat simulation model for cooling ponds was developed, the results of which could at least in the case of the heat capacity being zero, be compared with the directly taken water temperatures. According to figures 11 a to d, the model can be considered as applicable, so that an extrapolation to different assumed waste heat rates seemed possible (figures 12 a to d).

A rough calculation of the maximal cooling capacity of the inland waters of the FRG was made by means of the heat release coefficients. Thus the water temperature did not go beyond the tolerance of the limiting values. The result of this calculations amounted to a total of 33 GWe - by exclusively applying the cooling once through system.

Mainly based on own calculations of the specific net water consumption of various wet cooling methods - the wet cooling tower using 50 to 100 per cent more water than the cooling once through system - preliminary tests are presented being concerned with the effectivity of the heat release on Water surfaces by covering them with swimming polyedershaped plastic materials. Thus it seems to be possible to have at least a part of the waste heat not taken up by rivers or wet cooling towers. On the one hand this covering serves the purpose of reflecting the major part of the global radiation reaching the water and thus diminishing the natural warming up; on the other hand the heat release increases by enlarging the evaporation surface of the water.

Objections against the exclusive use of dry cooling systems for the newbuilding of power plants are mainly based on energy and economy aspects, the regional climate and the scenery of the landscape. Instead of this method it is suggested to take advantage of the existing possibilities of the local situation by using various cooling methods. This suggestion includes a dominating role of wet cooling techniques for the future, both with regard to their financial advantages, for the political economics and with regard to the impact on the environment.



- 118 **Trepp, J. P.:** A two-dimensional hydrodynamic model for cooling-tower plumes. In: Environmental Effect of Cooling Systems at Nuclear Power Plants, hrsg. v. d. Internat. Atomic Energy Agency, Wien 1975, S. 37—44.
- 119 **Brennan, P. T., D. E. Seymour, M. J. Butler, M. L. Kramer, M. E. Smith and T. T. Frankenberg:** The observed rise of visible plumes from hyperbolic natural draft cooling towers In: Atmosph. Environment 10, 1976, S. 425—431.
- 120 **Cambell, J. C.:** The preventing of fog from cooling towers. In: Annual Meeting, Cooling Tower Institute, Houston, Texas 1973, S. 1—25.
- 121 **Kreitzberg, C. W. and D. J. Perkey:** Release of potential instability: Part 1. A sequential plume model within a hydrostatic primitive equation model. In: Journal of the Atmospheric Sciences 33, 1976, S. 456—475.
- 122 **Hübschmann, W. und K. Nester:** Meteorologische Auswirkungen der Abwärme aus Kühltürmen. In: DAtF-Sonderdr. S-11, Nov. 1973.
- 123 **Gossmann, H.:** Umweltgefahren durch Kernkraftwerke. In: Geogr. Rdsch. 3, März 1974, S. 81—92.
- 124 **Baer, E., H. Ditttrich, G. Ernst, W. Roller und D. Würz:** Wechselwirkung zwischen Naturzug-Naßkühltürmen und Atmosphäre. In: VGB-Konferenz „Kraftwerk und Umwelt 1975“, Essen 1975, S. 109—111.
- 125 **Flohn, H.:** Der Wasserhaushalt der Erde. Schwankungen und Eingriffe. In: Naturwiss. 60, 1973, S. 340—348.
- 126 **Andres, O., G. Ortner und A. Schiffers:** Zusatzwasser für nasse Kühltürme (1970—1985). In: Energie 26, H. 7/8 1974, S. 235—243.
- 127 **Anonym:** Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Teilbd. Weser/Ems. Koblenz 1975.
- 128 **Bundesministerium des Innern [Hrsg.]:** Umwelt und Energie. Umweltbrief Nr. 9, Bonn, den 15. 11. 1974.
- 129 **Bach, W.:** „Auswirkung von Abwärme und Wasserdampf aus Kraftwerken und Ballungsgebieten auf das regionale Klima: Eine vergleichende Untersuchung.“ (= Antrag auf Bereitstellung von Forschungsmitteln an die KFA Jülich als Projektträger für das Energieforschungsprogramm des BMFT v. Aug. 1976).
- 130 **Werner, J.:** Der künstliche Binnensee im Niedersächsischen Tiefland. In: Spieker 25 (40 Jahre Geogr. Kommission für Westf.), Münster 1977, S. 5—21.
- 131 **Macaluso, C. A.:** Ecological Aspects of Cooling Systems. In: Cooling Towers, hrsg. v. Amer. Inst. Chem. Engen., New York 1972, S. 111—114.
- 132 **Umweltbundesamt [Hrsg.]:** Umweltforschungs-Katalog '75 (UFOKAT '75, U MPLIS- Informations- u. Dokumentationssystem zur Umweltplanung), Berlin 1976.
- 133 **Battelle-Institut e. V. Frankfurt/M. [Hrsg.]:** Prognose des Wasserbedarfs in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000 — Zeitstandsbericht —. (Bericht für das Bundesministerium des Innern Bonn), Frankfurt/M., Juni 1976.

## Zusammenfassung

Ausgehend von der Tatsache, daß Abwärme ein zumindest einseitigen unvermeidliches Nebenprodukt bei der großtechnischen Erzeugung elektrischer Energie darstellt, werden zunächst die gebräuchlichen Kraftwerks-Kühlverfahren im Überblick dargestellt. In der Bundesrepublik Deutschland werden z. Zt. etwa 43% der Kraftwerksabwärme an Oberflächengewässer abgegeben; für die Kühlleistung der binnenländischen freien Wasserflächen liegen aber noch keine genauen Zahlenwerte vor. Deshalb ist in Kap. 3 der Versuch vorgeführt, unter Zugrundelegung der gegenwärtig als verbindlich angesehenen biologisch-chemischen Grenzwerte thermischer Belastbarkeit Zeitreihen der Wassertemperatur und des Wärmeabgabekoeffizienten aufgrund eigener Messungen an der Stever-Talsperre bei Haltern (NRW) für die hydrologischen Sommerhalbjahre 1973 und 74 zu berechnen. Dazu wurde ein deterministisches Abwärme-Simulationsmodell für Kühlteiche entwickelt, dessen Ergebnisse zumindest für den Wärmelastfall 0 mit den direkt gemessenen Wassertemperaturen verglichen werden konnten. Wie die Abb. 11 a... d erkennen lassen, darf das Modell als brauchbar angesehen werden, so daß eine Extrapolation auf verschiedene angenommene Abwärmeraten möglich erschien (Abb. 12 a... d).

Mittels der so ohne Überschreitung zulässiger Wassertemperatur-Grenzwerte erhaltenen Wärmeabgabekoeffizienten wurde eine überschlägige Berechnung der maximal möglichen Kühlleistung bundesdeutscher Binnengewässer durchgeführt, die – bei ausschließlicher Anwendung der Durchlaufkühlung – einen Gesamtbetrag von 33 GW<sub>e</sub> ergab.

Vorwiegend aufgrund eigener Berechnungen des spezifischen Netto-Wasserverbrauchs verschiedener Naßkühlverfahren (wobei der Naßkühlturm gegenüber reiner Durchlaufkühlung um 50...100% mehr Wasser verbraucht) werden Vorversuche dargestellt, das Wärmeabgabevermögen von Wasseroberflächen durch Bedeckung mit schwimmenden Kunststoffkörpern zu „aktivieren“, um so zumindest einen Teil der Abwärme nicht über Flüsse oder Naßkühltürme austragen zu müssen. Die Abdeckung dient einerseits dazu, den größten Teil der das Gewässer erreichenden Globalstrahlung zu reflektieren und damit der natürlichen Aufwärmung entgegenzuwirken; andererseits wird die Wärmeabgabe durch Vergrößerung der verdunstungswirksamen Wasseroberfläche erhöht.

Gegen den ausschließlichen Einsatz von Trockenkühlanlagen bei Kraftwerksneubauten werden in erster Linie energiewirtschaftliche, lokalklimatische und landschaftsästhetische Bedenken angemeldet. Statt dessen wird angeregt, durch Kombination verschiedener Kühlmethoden die an den Standorten vorhandenen Möglichkeiten flexibler als bisher auszunutzen, wobei auch in Zukunft die Naßkühlverfahren sowohl in bezug auf ihre volkswirtschaftlichen Kostenvorteile als auch auf die Umweltbelastungen eine dominierende Stellung behalten sollten.

## Summary

Considering the fact that at present waste heat is an inevitable byproduct of large scale technical production of electric energy, the starting point of this treatise is the description of the mostly used cooling techniques at power plants. At present almost 43 per cent of the waste heat of power plants in the FRG are emitted into open water bodies, but up to now there are no exact data available for the cooling output of the inland free water surfaces. Therefore chapter 3 deals with the experiment made to provide a time series diagram of the water temperature and the heat release coefficient based on own measurements at the Stever Dam near Haltern (Westfalia) in the hydrological summer terms of 1973 and 74. This diagram is based on the at present generally accepted biological and chemical limiting values of thermal power rating. In order to get these data a deterministical waste heat simulation model for cooling ponds was developed, the results of which could at least in the case of the heat capacity being zero, be compared with the directly taken water temperatures. According to figures 11a to d, the model can be considered as applicable, so that an extrapolation to different assumed waste heat rates seemed possible (figures 12a to d).

A rough calculation of the maximal cooling capacity of the inland waters of the FRG was made by means of the heat release coefficients. Thus the water temperature did not go beyond the tolerance of the limiting values. The result of this calculations amounted to a total of 33 GWe – by exclusively applying the cooling once through system.

Mainly based on own calculations of the specific net water consumption of various wet cooling methods – the wet cooling tower using 50 to 100 per cent more water than the cooling once through system – preliminary tests are presented being concerned with the effectivity of the heat release on Water surfaces by covering them with swimming polyedershaped plastic materials. Thus it seems to be possible to have at least a part of the waste heat not taken up by rivers or wet cooling towers. On the one hand this covering serves the purpose of reflecting the major part of the global radiation reaching the water and thus diminishing the natural warming up; on the other hand the heat release increases by enlarging the evaporation surface of the water.

Objections against the exclusive use of dry cooling systems for the newbuilding of power plants are mainly based on energy and economy aspects, the regional climate and the scenery of the landscape. Instead of this method it is suggested to take advantage of the existing possibilities of the local situation by using various cooling methods. This suggestion includes a dominating role of wet cooling techniques for the future, both with regard to their financial advantages, for the political economics and with regard to the impact on the environment.

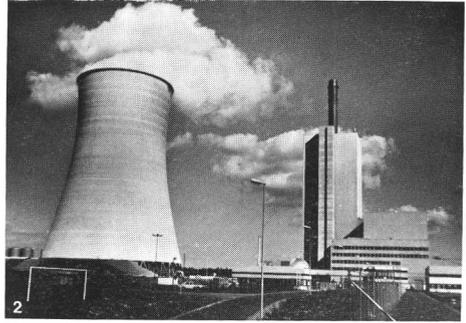
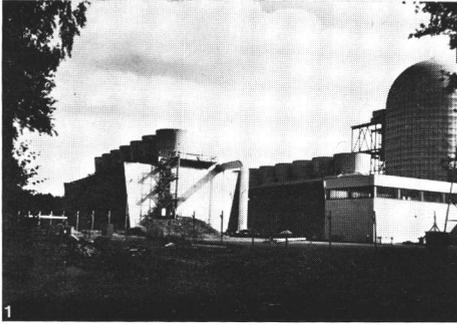
The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This ensures transparency and allows for easy verification of the data. The text also mentions that regular audits are necessary to identify any discrepancies or errors in the accounting process.

In addition, the document highlights the need for a clear and concise reporting structure. Management should be provided with timely and accurate financial statements to facilitate decision-making. It is also noted that the accounting system should be flexible enough to accommodate changes in business operations and regulations. The text concludes by stating that a robust accounting system is essential for the long-term success and stability of any organization.

The final section of the document provides a summary of the key points discussed. It reiterates the importance of accuracy, transparency, and regular audits in the accounting process. The text also offers some practical advice on how to implement these principles effectively. Overall, the document serves as a comprehensive guide for anyone involved in the financial management of a business.

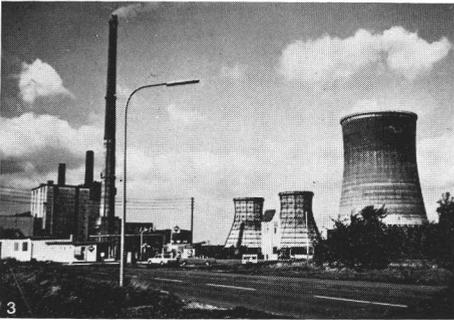
## Bildanhang

Eigene Aufnahmen 1973 — 1976



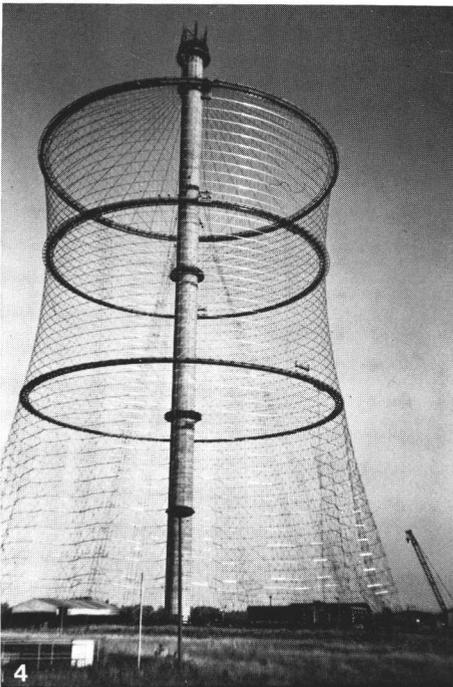
**Bild 1:** Ablauf-Kühlanlagen am 250 MW<sub>e</sub>-Kernkraftwerk Lingen/Ems

**Bild 2:** Das 600 MW<sub>e</sub> – Erdgaskraftwerk bei Meppen/Ems mit zugehörigem Naturzug-Naßkühlturm

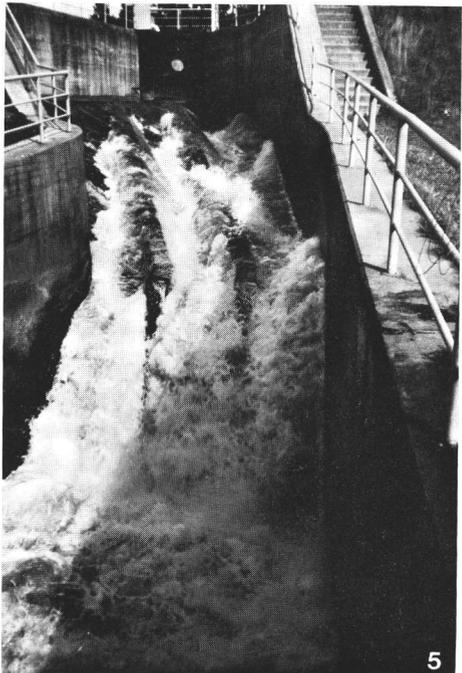


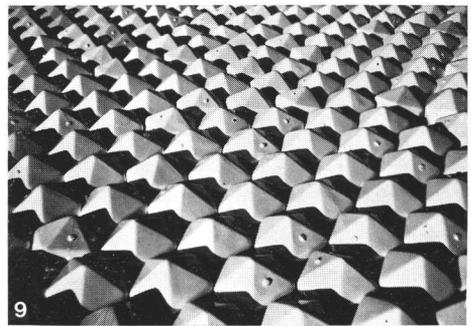
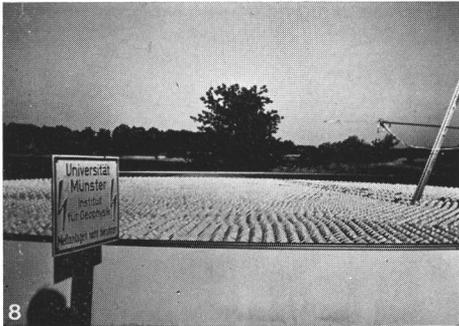
**Bild 3:** Das Steinkohlekraftwerk Ibbenbüren/W. Rechts der Trockenkühlturm für die Erweiterung um 150 MW<sub>e</sub>

**Bild 4:** Das Stütznetz des Trockenkühlturms für das 300 MW<sub>e</sub> – THTR-Kernkraftwerk Schmehausen (Höhe 178 m, Bauzustand vom November 1975)



**Bild 5:** Sauerstoffanreicherung des Kühlwassers vor Wiedereintritt in den Fluß durch freien Überfall. Kernkraftw. Lingen/Ems





**Bild 6:** Angler an der Ems im Bereich der Kühlwasserfahne. Kernkraftwerk Lingen/Ems

**Bild 7:** Flußbrauchen über dem Kühlwasser-Rücklaufkanal des Kraftwerks Emden. Entfernung vom Austritt ca. 1,5 km. 8. 11. 1975, 12°

**Bild 8:** Algenwuchs und Verdunstung mindernde Icosaeder auf einem Versuchsbecken (10 m<sup>2</sup>) am Ufer der Stever-Talsperre bei Haltern

**Bild 9:** Detailansicht der auf dem Versuchsbecken schwimmenden Icosaedern unmodifizierter Ausführung

**Bild 10:** Die beiden Arten von Icosaedern im direkten Vergleich

**Bild 11:** Der Versuchsaufbau zur Messung der Wärmeabgabe „verdunstungsaktiver“ Icosaedern im Vergleich mit „normalen“ schwimmenden Zwanzigflächern

# VERÖFFENTLICHUNGEN

der Geographischen Kommission für Westfalen und des Instituts für Geographie und Länderkunde der Universität Münster, I—IV Selbstverlag

## I. Arbeiten der Geographischen Kommission

1. Riepenhausen, H.: Die bäuerliche Siedlung des Ravensberger Landes bis 1770. 1938. vergr.
2. Krakhecken, M.: Die Lippe. 1939. vergr.
3. Ringleb, F.: Klimaschwankungen in Nordwestdeutschland (seit 1835). vergr.
4. Lucas, O.: Das Olper Land. 1941. vergr.
5. Uekötter, H.: Die Bevölkerungsbewegung in Westfalen und Lippe 1918 bis 1933. 1941. vergr.
6. Heese, M.: Der Landschaftswandel im mittleren Ruhr-Industriegebiet seit 1820. 1941. DM 6,00
7. Bertelsmeier, E.: Bäuerliche Siedlung und Wirtschaft im Delbrücker Land. 1942. vergr.

## II. Westfälische Geographische Studien

1. Müller-Wille, W.: Schriften und Karten zur Landeskunde Nordwestdeutschlands 1939—1945. 1949. vergr.
2. Müller-Temme, E.: Jahrgang der Niederschlagsmenge in Mitteleuropa. 1949. DM 2,00
3. Müller, H.: Die Halterner Talung. 1950. vergr.
4. Herbort, W.: Die ländlichen Siedlungslandschaften des Kreises Wiedenbrück um 1820. 1950. vergr.
5. Fraling, H.: Die Physiotope der Lahntalung bei Laasphe. 1950. DM 2,50
6. Schuknecht, F.: Ort und Flur in der Herrlichkeit Lembeck. 1952. vergr.
7. Niemeier, G.: Die Ortsnamen des Münsterlandes. Ein kulturgeographischer Beitrag zur Methodik der Ortsnamenforschung. 1953. vergr.
8. Eversberg, H.: Die Entstehung der Schwerindustrie um Hattingen 1847—1857. Ein Beitrag zur Grundlegung der schwerindustriellen Landschaft an der Ruhr. 1955. vergr.
9. Pape, H.: Die Kulturlandschaft des Stadtkreises Münster um 1828 auf Grund der Katasterunterlagen. 1956. vergr.
10. Heßberger, H.: Die Industrielandschaft des Beckumer Zementreviers DM 6,40
11. Pfaff, W.: Die Gemarkung Ohrsen in Lippe. Münster/Ohrsen 1957. vergr.
12. Denecke, K.: Flüsse und Wasserwirtschaft, Wasserbiologie und Wasserkrankheiten in Mesopotamien. 1958. DM 3,80
13. Timmermann, O., L. Hempel und H. Hambloch: Zur Kulturgeographie der Ötztaler Alpen. 1958. DM 5,60

14. Heising, P. Heldemar: Missionierung und Diözesanbildung in **Kalifornien**. 1962. vergr.
15. **Entwicklungshilfe und Entwicklungsland**. Begriff, Probleme und Möglichkeiten. A. Antweiler, W. Manshard, R. Mohr, G. Pfeifer, E. Sarkisyans, A. Sievers, O. Timmermann. 1962. DM 14,80
16. Dege, W.: Zur Kulturgeographie des **Nördlichen Gudbrandsdals**. 1963. DM 14,80
17. Fröhling, M.: Die Bewässerungslandschaften an der **spanischen Mittelmeerküste**. 1965. DM 12,40
18. Hambloch, H.: Der Höhengrenzsäum der **Ökumene**. 1966. DM 19,20
19. Bronny, H. M.: Studien zur Entwicklung und Struktur der Wirtschaft in der Provinz **Finnisch-Lapland**. 1966. DM 14,40
20. Giese, E.: Die untere **Haseniederung**, eine ländlich-bäuerliche Landschaft im nord-westdeutschen Tiefland. 1968. DM 20,00
21. Beyer, L.: Der Siedlungsbereich von Jerzens im **Pitztal/Nordtirol**. 1969. DM 18,00
22. Mayhew, Alan: Zur strukturellen Reform der Landwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland, erläutert an der **Flurbereinigung** in der **Gemeinde Moorriem/Wesermarsch**. 1970. DM 15,00
23. Stonjek, D.: Sozialökonomische Wandlung und Siedlungslandschaft eines **Alpentales/(Deferegg)**. 1971. DM 15,00
24. Döhrmann, W.: Bonitierung und Tragfähigkeit eines **Alpentales (Deferegg)**. 1972. DM 17,50
25. **Oldenburg** und der **Nordwesten**. Deutscher Schulgeographentag 1970. Vorträge, Exkursionen und Berichte. 1971. DM 30,00
26. Bahrenberg, G.: Auftreten und Zugrichtung von **Tiefdruckgebieten** in **Mittel-europa**. 1973. DM 25,00
27. Giese, E.: Sovchoz, Kolchoz und persönliche Nebenerwerbswirtschaft in **Sowjet-Mittelasien**. 1973. DM 40,00
28. Sedlaček, P.: Zum Problem **intraurbaner Zentralorte**, dargestellt am Beispiel der Stadt Münster. 1973. vergr.
29. Treude, E.: **Nordlabrador**. Entwicklung und Struktur von Siedlung und Wirtschaft in einem polaren Grenzsäum der Ökumene. 1974. DM 25,00
30. Müller-Wille, Ludg.: Lappen und Finnen in **Utsjoki, Finnland**. Eine Studie zur Identität ethnischer Gruppen im Kulturkontakt. 1974. DM 25,00
31. Thannheiser, D.: Vegetationsgeographische Untersuchungen auf der **Finnmarksvidda** im Gebiet von Masi/Norwegen. 1975. DM 20,00
32. Rinschede, G.: Die Transhumance in den französischen **Westalpen** und in den **Pyrenäen**. (in Druckvorbereitung)
33. **Festschrift für Wilhelm Müller-Wille: Mensch und Erde**. 1976. DM 50,00

### III. Spieker

1. Bertelsmeier, E. u. W. Müller-Wille: **Landeskundlich-statistische Kreisbeschreibung in Westfalen**. Anleitung für Kreisbeschreiber. 1950. DM 2,20
2. Wehdeking, R.: Die **Viehhaltung in Westfalen 1818—1948**. 1. Folge: **West- und Ostmünsterland**. Müller-Wille, W.: Der Viehstapel in Westfalen. 1950. DM 2,50
3. Schneider, P.: **Natur und Besiedlung der Senne**. 1952. vergr.
4. Wehdeking, R.: Die **Viehhaltung in Westfalen 1818—1948**. 2. Folge: **Kermünsterland und Hellwegbörden**. Müller-Wille, W.: Die Schweinehaltung in Westfalen. 1953. DM 4,20

5. Gorki, H. F.: Die Grundrisse der städtischen Siedlungen in **Westfalen**. Timmermann, O.: Grundriß und Altersschichten der Hansestadt **Soest**. Steiner, G.: Funktionales Gefüge der Großstadt **Gelsenkirchen**. Müller, H.: Der Untergrund von **Münster**. 1954. vergr.
6. Taschenmacher, W.: Die **Böden des Südergebirges**. 1955. DM 6,00
7. Lucas, O.: Die **Sauerland-Höhenstraße** Hagen—Siegen—Gießen. Sommer, R.: Die Industrie im mittleren **Lenneal**. 1956. DM 3,20
8. Hoffmann, G.: Funktionale Bereichsbildung im Raume **Emsland-Südoldenburg**. Müller-Wille, W.: Erreichbarkeit und **Einkaufsmöglichkeit**. 1957. DM 6,40
9. Stork, Th.: Das Flußtal der **Hönne**. Hambloch, H.: Naturräume der **Emssandebene**. Ringleb, F.: Das **phänologische Jahr** in Westfalen. 1958. DM 9,60
10. Böttcher, G.: Die **agrargeographische Struktur Westfalens 1818—1950**, erl. an der pflanzlichen Produktion. 1959. DM 12,00
11. Feige, W.: Talentwicklung und Verkarstung im Kreidegebiet der **Alme**. Kleinn, H.: Die **Schledden** auf der **Haarfläche**. 1961. DM 11,60
12. Hempel, L.: Das Großrelief am **Südrand** der **Westfälischen Bucht** und im **Nord-sauerland**. Seraphim, E. Th.: Glaziale Halte im südlichen unteren **Weserbergland**. Wölcken, K.: Regenwetterlagen in **Argentinien**. 1962. vergr.
13. Schäfer, P.: Die wirtschaftsgeographische Struktur des **Sintfeldes**. Engelhardt, G. S.: Die **Hecke** im nordwestlichen **Südergebirge**. 1964. DM 13,20
14. Müller-Wille, W.: Bodenplastik und **Naturräume Westfalens**. Textband und Kartenband. 1966. DM 28,00
15. Rack, E.: Besiedlung und Siedlung des **Altkreises Norden**. 1967. DM 9,60
16. Kluczka, G.: Zum Problem der **zentralen Orte** und ihrer Bereiche — Wissenschaftsgeschichtliche Entwicklung in Deutschland und Forschungsstand in **Westfalen**. 1967. vergr.
17. Poeschel, H.-Cl.: Alte **Fernstraßen** in der mittleren **Westf. Bucht**. 1968. DM 16,00
18. Ludwig, K.-H.: Die **Hellwegsiedlungen** am Ostrande Dortmunds. 1970. DM 12,50
19. Windhorst, H. W.: **Der Stewweder Berg** — eine forstgeographische Untersuchung. 1971. Untersu- DM 12,50
20. Franke, G.: Bewegung, Schichtung und Gefüge der **Bevölkerung** im **Landkreis Minden**. 1972. DM 15,00
21. Hofmann, M.: **Ökotope** und ihre Stellung in der Agrarlandschaft. Werner/Schweter: **Hydrogeographische Untersuchungen** im Einzugsgebiet der **Steuer/Kernmünsterland**. 1973. DM 25,00
22. Hüls, H.: **Heiden** in Lippe. Zur Genese und Struktur eines dörflichen Lebensraumes. 1974. DM 30,00
23. Ittermann, R.: Ländliche Versorgungsbereiche und zentrale Orte im **hessisch-westfälischen Grenzgebiet**. 1975. DM 20,00
24. Ballmann, W.: Der **Hafen Oldenburg** — Entwicklung und Struktur, Bedeutung und Verflechtung. Temnitz, Kl.: Gestaltanalyse der **Stadt Gronau/Westf.** 1976. DM 25,00
25. 40 Jahre Geographische Kommission für Westfalen: **Westfalen und Niederdeutschland**. Beiträge zur speziellen und zur allgemeinen Landesforschung. 2 Bde. 1977.

#### IV. Landeskundliche Karten und Hefte

##### Bodenplastik und Naturräume Westfalens 1:100 000 in Fünffarbendruck

1. Blatt Kreis Paderborn (1953), 2. Blatt Kreis Münster (1955), 3. Blatt Kreis Brilon (1957),
4. Blatt Kreis Altena (1962), 5. Blatt Kreis Wiedenbrück (1968).

##### Siedlung und Landschaft in Westfalen

1. Müller-Wille, W. und E. Bertelsmeier: Der Stadtkreis Münster 1820 bis 1955. Erl. zur Karte 1:10 000. 1955. vergr.
2. Wöhlke, W.: Die Kulturlandschaft des Hardehausener und Dalheimer Waldes. 1957. DM 7,00
3. Platt, R. S.: A Geographical Study of the Dutch-German Border. Deutsch von E. Bertelsmeier. 1958. DM 9,60
4. Ringleb, A. und Hambloch, H.: Studien zur Genese agrarbäuerlicher Siedlungen. 1961. DM 11,60
5. Müller-Wille, Mich.: Die eisenzeitlichen Fluren in den festländischen Nordseegebieten. 1965. DM 26,40
6. Brand, Fr.: Zur Genese der ländlich-agraren Siedlungen im lippischen Osning-Vorland. 1967. DM 21,60
7. Sönnecken, M.: Die mittelalterliche Rennfeuerterrichtung im märkischen Sauerland. 1971. DM 35,00
8. Burrichter, E.: Die potentielle natürliche Vegetation in der Westf. Bucht. Erl. zur Übersichtskarte 1:200 000. 1973. DM 35,00
9. Temnitz, K.: Aaseestadt und Neu-Coerde, Bildstrukturen neuer Wohnsiedlungen in Münster und ihre Bewertung. 1975. DM 25,00
10. Lievenbrück, Br.: Die Siedlungsentwicklung im Nordhümmling (im Druck)

#### V. Die Landkreise in Westfalen

Böhlau-Verlag, Köln

1. Der Landkreis Paderborn. Bearbeitet in der Geographischen Kommission von G. von Geldern-Crispendorf. Münster 1953. DM 22,00
2. Der Landkreis Münster. Bearb. in der Geogr. Kommission u. dem Geogr. Institut der Universität Münster von W. Müller-Wille, E. Bertelsmeier, H. F. Gorki, H. Müller, Münster 1955. DM 28,00
3. Der Landkreis Brilon. Bearbeitet in der Geographischen Kommission von A. Ringleb geb. Vogedes. Münster 1957. DM 28,00
4. Der Landkreis Altena. Bearbeitet in der Geographischen Kommission von E. Wagner. Münster 1962. DM 28,00
5. Der Landkreis Wiedenbrück. Bearbeitet in der Geographischen Kommission von W. Herbort, W. Lenz, I. Heiland und G. Willner. Münster 1969. DM 34,00

