

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

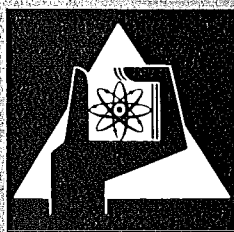
Februar 1977

KFK 2374

Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

**Die Meßstation Rheinhausen zur Untersuchung
des Wärmetransports aus Fließgewässern**

G. Hoffmann, H. Sauter, W. Schikarski



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M
K A R L S R U H E

Laboratorium für Aerosolphysik
und Filtertechnik

Projekt Nukleare Sicherheit

KFK 2374

Die Meßstation Rheinhausen zur Untersuchung
des Wärmetransports aus Fließgewässern

G. Hoffmann
H. Sauter
W. Schikarski

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Abstract

Measuring Station Rheinhausen for Heat Exchange between Atmosphere and Rivers

The aims of this project are clarified and the resulting tasks for the measuring station sited in the river Rhine are listed. A description of the site and of the facilities is given as well as of those technical details being significant to the applied measurement techniques. A survey of instrumentation and data processing, both being strongly affected by the chosen methods of measuring heat exchange phenomena is presented. Best applicable methods are discussed. Typical preliminary data of the station and their further processing are shown. It is reported about data handling, first results and further planned evaluations.

Zusammenfassung

Die Ziele des Vorhabens werden erläutert und die Aufgaben aufgeführt, die sich für die Meßstation im Rheine ergeben. Der Standort und die baulichen Einrichtungen werden beschrieben, ebenso die technische Auslegung derjenigen Einzelheiten, die mit der Meßtechnik in engem Zusammenhang stehen. Es wird eine Übersicht über die Instrumentierung und die Datenerfassung gegeben, die beide von den hier gewählten Meßverfahren stark abhängen; die geeignetsten Meßverfahren werden diskutiert. Typische vorläufige Meßergebnisse dieser Station werden gezeigt und die Art ihrer geplanten weiteren Auswertung erläutert. Die Datenhandhabung, erste Ergebnisse und weiterhin geplante Auswertungen werden vorgestellt.

Zum Druck eingereicht am 14.1.1977

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Ziele des Untersuchungsprogramms	3
3. Auslegung der Meßstation	6
3.1 Standort, Aufbau und technische Auslegung	6
3.2 Instrumentierung	14
3.3 Spezielle Verfahren zur Messung des Wärmeaustausches	21
3.3.1 Diskussion der möglichen Meßverfahren	21
3.3.2 Die Gradientenmethode	22
3.3.3 Die Turbulenzkorrelationsmethode (TKM)	24
3.3.4 Zusammenhang zwischen Meßverfahren und Meßtechnik	24
4. Meßdatenerfassung	27
4.1 Technik der Datenerfassung	27
4.2 Verarbeitung im Prozeßrechner	29
4.3 Prozeßrechner output	32
5. Weiterverarbeitung der Daten	33
5.1 Vorbereitung der Daten für die Auswertung	33
5.1.1 Übertragung auf die Großrechenanlage	33
5.1.2 Identifikationen	36
5.1.3 Ordnung	36
5.1.4 Korrekturen	38
5.2 Geplante Auswertungen	40
6. Typische Meßergebnisse zum Wärmeaustausch	42
6.1 Darstellung ausgewählter Meßergebnisse	42
6.2 Vergleich von Meßergebnissen mit heute verwendeten Formelansätzen	43
7. Bedeutung der Untersuchungsergebnisse für Fragen der Abwärmeeinleitung in Fließgewässer	45
8. Literatur	47

<u>Verzeichnis der Abbildungen</u>	<u>Seite</u>
Abb. 1 Standort der Meßstation und des Kernkraftwerks Philippsburg	8
Abb. 2 Lage und Aufbau der Meßstation am Rhein	9
Abb. 3 Konstruktion des Meßmastes im Rhein	12
Abb. 4 Ansicht der gesamten Anlage	13
Abb. 5 Prinzipielle Funktionsweise des SAT	17
Abb. 6 Änderung der virtuellen Temperatur T_V (Schalltemperatur) als Funktion von Temperatur und Feuchte	19
Abb. 7 Darstellung des zeitlichen Verlaufs typischer Meßgrößen, gemessen in der Zeit vom 7.-13.5.1976	42a
Abb. 8 Tagesgänge des Gesamtwärmefflusses, errechnet aus der Wassertemperaturänderung bzw. der Summe der drei Teilwärmeflüsse auf der Grundlage von Meßdaten vom 15.-20.7.1976	42b

<u>Verzeichnis der Tabellen</u>	<u>Seite</u>
Tab. 1 Zusammenstellung einiger Wärmeeinleitungsbestimmungen für deutsche Flüsse (Stand 1976)	2
Tab. 2 Kühlvermögen der Flüsse und Ästuarien der Bundesrepublik Deutschland	4
Tab. 3 Meßgrößen und Ort ihrer Erfassung	14
Tab. 4 Ergebnisse der direkten Messung der Verdunstung	25
Tab. 5 Drei nach verschiedenen Verfahren berechnete Verdunstungsraten über Wasser sowie die nach der TKM direkt gemessenen zusammen mit den wichtigsten meteorologisch-hydrologischen Daten bei Shionomisaki am 8.9.1964	27
Tab. 6 Datenstruktur auf der Cassette	34
Tab. 7 Protokollaufbau	35

1. Einleitung

Jede Energiewandlung ist mit einem Wirkungsgrad verknüpft. Bei der Wandlung von Primärenergieträgern (Kohle, Öl, Gas, Uran) in Nutzenergie (z.B. Strom) geht der nicht genutzte Anteil in Abwärme über, die primäre oder unmittelbare Abwärme genannt wird. Die bei der Stromerzeugung anfallende Nutzenergie (elektrischer Strom) wird jedoch ebenfalls in der Industrie, in den Haushalten und bei sonstigen Verbrauchern praktisch vollständig in Abwärme verwandelt. Diese Abwärme wird sekundäre oder mittelbare Abwärme genannt. In guter Näherung gilt, daß primäre und sekundäre Abwärme zusammen gleich dem gesamten Primärenergieeinsatz sind.

Nach heutigem Stand der Kenntnis ist der Anteil der primären Abwärme sehr viel kleiner als der der sekundären Abwärme. So werden derzeit nur etwa 10% der Gesamtabwärme in Oberflächengewässer und etwa 10 % der Gesamtabwärme über Naßkühltürme an die Atmosphäre abgeleitet [1]. Trotzdem wurden bezüglich der Einleitung primärer Abwärme in die Umweltmedien Wasser und Atmosphäre erstmals mögliche Grenzen der Belastbarkeit erkannt [2], [3], [4].

Der Hauptteil der primären Abwärme fällt bei der Stromerzeugung an. Diese Abwärme wurde und wird am wirtschaftlichsten in die Oberflächengewässer, insbesondere die Flüsse abgeleitet. Wegen des großen Anstiegs der Stromerzeugung führte diese seit Beginn der Kraftwerkstechnik geübte Praxis in den letzten Jahren zu der Erkenntnis, daß die damit bewirkte Belastung der Gewässer nicht beliebig fortgesetzt werden kann. Neben den Flüssen gilt das auch für die Ästuarien (Flußmündungen mit anschließenden Küstengewässern). Die wichtigsten Gründe für die Begrenzung der thermischen Belastungen der Gewässer sind die Beeinträchtigung der Wassergüte, die Auswirkungen auf den Fischreichtum und die mögliche erhöhte Nebelbildung mit der dadurch hervorgerufenen Behinderung der Schifffahrt.

Die bisher bekannt gewordenen Wärmelastpläne für die deutschen Flüsse geben daher Grenzwerte an (Tabelle 1), die jedoch zunächst nur Richtwertcharakter haben. Wegen der Bedeutung dieser Werte für die Energiewirtschaft sind in den letzten Jahren umfangreiche Untersuchungen zum Einfluß der Gewässertemperatur auf das Fischverhalten und andere biologische Größen durchgeführt worden, die erkennen lassen, daß unter bestimmten Umständen höhere Temperaturbelastungen von Gewässern möglich sind [1].

Tabelle 1: Zusammenstellung einiger Wärmeeinleitungsbestimmungen für deutsche Flüsse (Stand 1976)

	Max. Temperatur T_{\max}	Max. Temperaturerhöhung ΔT_{\max}
<u>Rhein(1971)</u> Oberhalb Basel Unterhalb Lauterburg	25°C 28°C	3 K ¹⁾ 5 K ¹⁾
<u>Neckar(1973)</u>	28°C	---
<u>Isar(1975)</u>	25°C	3 K ¹⁾ 5 K ²⁾
<u>Weser(1974)</u>	---	3 K ³⁾ 5 K ³⁾²⁾
<u>Main(1975)</u>	28°C	3 K ³⁾ (für $T_{gl} > 15^{\circ}\text{C}$) 5 K ³⁾²⁾ (für $T_{gl} < 10^{\circ}\text{C}$)

- 1) bezogen auf natürliche Temperatur
- 2) bei außergewöhnlichen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen
- 3) bezogen auf Gleichgewichtstemperatur T_{gl}

Die sich bei Einhaltung der derzeitigen Grenzwerte ergebenden Werte für das Abwärmeaufnahmevermögen der Flüsse und Ästuarien der Bundesrepublik Deutschland sind in Tabelle 2 dargestellt. Diese Tabelle geht von homothermen Verhältnissen in den Gewässern aus, berücksichtigt die Vorbelastung des Rheins, der Mosel und der Elbe bei Eintritt in die Bundesrepublik und schätzt die Abwärmeabgabe aus dem Gewässer an die Atmosphäre nach heutigem Stand ab. Inwieweit die volle Ausnutzung der Ästuarien für Frischwasserkühlung durchführbar ist, kann heute nicht abschließend gesagt werden. Eher muß angenommen werden, daß aus technischen und ökologischen Gründen nur ein kleiner Teil in Frage kommt. Da wegen der bereits bestehenden Vorbelastung der deutschen Flüsse bei Eintritt in das Gebiet der BRD der mögliche Abtransport von Wärme ins Meer klein ist, verbleibt unter Zugrundelegung der Daten aus Tabelle 2 als Hauptanteil des Kühlvermögens die aus den Oberflächengewässern an die Atmosphäre abgeleitete Abwärme.

2. Ziele des Untersuchungsprogramms

Ziele des Untersuchungsprogramms sind die Messung des Wärmetransports aus dem Rhein in die Atmosphäre, die Ermittlung der Nebelhäufigkeit über der Wasseroberfläche des Rheins und die Gewinnung von Aussagen über die Abhängigkeit dieser Vorgänge von meteorologischen und hydrologischen Parametern. Dadurch sollen einerseits Daten und Modelle für die exakte Berechnung des Kühlvermögens deutscher Oberflächengewässer bereitgestellt, andererseits Aussagen über standortkorrelierte Wärmeableitungsmöglichkeiten in Fließgewässer durch Kraftwerke gemacht werden. Im einzelnen werden folgende Ergebnisse des Untersuchungsprogramms erwartet:

- Ganzjährige Statistiken zum Wärmehaushalt des Rheins mit besonderer Berücksichtigung der Wärme- und Wasserdampfemissionen unter unbelasteten Bedingungen an repräsentativer Stelle des Oberrheintals als Funktion jahreszeitlicher, meteorologischer und hydrologischer Bedingungen.
- Ganzjährige Statistiken zum Wärmehaushalt des Rheins unter belasteten Bedingungen in der durchmischten Zone der Abwärmeeinleitung des Kernkraftwerks Philippsburg.
- Quantitative Aussagen zum zeitlichen Abkühlverhalten des Rheins nach Wärmeeinleitung als Beitrag zu Kühlregie-Modellen und Wärmelastplänen.
- Aussagen zur Nebelhäufigkeit über der Wasseroberfläche des Rheins als Funktion von meteorologischen und hydrologischen Parametern sowie

Tabelle 2: Kühlvermögen der Flüsse und Ästuarien der Bundesrepublik Deutschland

Abfluß	Häufigkeit	Transport über Grenzen und ins Meer	Abgaben aus Flüssen an die Atmosph.	Ästuarien	Summe
2MNQ=2200m ³ /s	1-3MNQ:200-250 Tage/Jahr	28 GW	35 GW	47 GW	110 GW
1MNQ=1100m ³ /s	im Mittel 30 Tage/Jahr, an bis zu 150 Tagen/Jahr unterschritten	14 GW	35 GW	47 GW	96 GW
0,7 MNQ	10-60 Tage/Jahr	10 GW	35 GW	47 GW	92 GW
NQ=640m ³ /s	eine 20-Tage Periode innerhalb von 20 Jahren	8 GW	35 GW	47 GW	90 GW
Engpaß: 1 NQ u. schwachwindiges Wetter		8 GW	28 GW	26 GW	62 GW

Annahmen:

- Wärmeaustausch 25 W/m²K für das Binnenland, für den Süßwasserbereich der Ästuarien 35 W/m²K und für die äußeren Ästuar- und Küstenbereiche 40 W/m²K
- Wärmetransport durch die Flüsse ins Meer bei MNQ und $\Delta T = 3$ K etwa 1,3 GW bzw. über die Grenzen 11,5 GW
- Fläche der hinreichend großen Flußläufe etwa 470 km², der Süßwasserzonen der Ästuarien etwa 140 km²

als Funktion von Abwärmeeinleitungen.

- Beitrag zu den Grundlagen des Wärmeaustausches Wasser - Atmosphäre für schnellfließende Oberflächengewässer.
- Erfassung sonstiger Abwärme-korrelierter Gewässerdaten (wie z.B. Sauerstoffgehalt des Rheins).

Über die Literatur zur Frage des Wärmetransports aus Gewässern in die Atmosphäre sind in [3] ausführliche Angaben enthalten. Über den Stand der Kenntnis kann zusammengefaßt folgendes gesagt werden:

Der Wärmetransport aus Fließgewässern setzt sich aus drei Anteilen, nämlich der Strahlungsbilanz, der Verdunstung (gegebenenfalls Kondensation) und der Konvektion zusammen.

Die Strahlungsbilanz besteht aus der direkten Sonnenstrahlung und diffusen Himmelstrahlung (zusammen auch Globalstrahlung genannt), der atmosphärischen Gegenstrahlung, der Wärmestrahlung des Gewässers und der an der Wasseroberfläche reflektierten Strahlung. Die Zusammenhänge und Abhängigkeiten von den verschiedenen meteorologischen Parametern sind für die Strahlungsbilanzanteile theoretisch gut bekannt [3]. Es fehlen jedoch ganzjährige Strahlungsbilanzmessungen direkt über Fließgewässern. Meßtechnische Probleme bestehen nicht.

Die Konvektion und die Verdunstung sind grundsätzlich bekannte Prozesse des Wärmetransports. In den Gleichungen für konvektiven Wärmeübergang bzw. Verdunstung treten jedoch Übergangszahlen auf (β = Stoffübergangszahl für Verdunstung, α = Wärmeübergangszahl für Konvektion). Beide sind von der Windgeschwindigkeit, Windrichtung im Verhältnis zur Fließrichtung, Temperatur, Länge der vom Wind überstrichenen Wasseroberfläche und anderen Parametern abhängig. Zuverlässige Werte für β und α als Funktion der wesentlichen Einflußparameter fehlen heute, zumindest für schnellfließende Oberflächengewässer. Ganzjährige Messungen direkt über Fließgewässern sind bisher nicht durchgeführt worden. Für die Verdunstung sind eine Reihe von einfachen Beziehungen bekannt, die empirisch ermittelt wurden, jedoch nicht ohne weiteres auf Fließgewässer übertragbar sind. Im Wärmelastplan Rhein [3] wurde die Beziehung nach Trabert [5] zugrundegelegt und dabei entsprechende Unsicherheiten in Kauf genommen. Da die genannten Verdunstungsbeziehungen im Ergebnis um größere Faktoren voneinander abweichen und der Anteil der Verdunstung am Wärmetransport der größte ist, liegen hier die größten Unsicherheiten vor. Die Probleme, die bei

der Messung von Verdunstung und Konvektion bestehen, werden in Abschnitt 3.3.1 behandelt.

Um die Ziele des Untersuchungsprogramms zu erreichen, sind somit nicht nur fehlende Meßdaten der Strahlungsbilanz, der Verdunstung und der Konvektion direkt über Fließgewässern zu beschaffen und ihre Abhängigkeiten von den verschiedenen meteorologischen, hydrologischen, orographischen Einflußgrößen zu ermitteln, sondern auch eine verbesserte Beschreibung der physikalischen Vorgänge beim Wärmetransport aus Fließgewässern in die Atmosphäre und eine Bewertung möglicher Meßmethoden erforderlich.

Neue, theoretische Ansätze, die der experimentellen Bestätigung bedürfen [6], machen deutlich, daß die Wärmeabgabe aus den Gewässern in die Atmosphäre einen Unsicherheitsfaktor von 2 - 3 enthält, der auf der einen Seite durch fehlende Messungen direkt über der Wasseroberfläche, auf der anderen Seite durch mangelnde Kenntnis der physikalischen Einflußgrößen bedingt ist. Wegen des engen Zusammenhangs zwischen Gesamtwärmeabgabe und Kühlvermögen der deutschen Oberflächengewässer (Tabelle 2) sind die Unsicherheiten für die Abwärmeaufnahmekapazität (Kühlvermögen) der deutschen Fließgewässer entsprechend groß.

3. Auslegung der Meßstation

3.1 Standortwahl, Aufbau und technische Auslegung

Die Auswahl des Standorts der Meßstation erfolgte nach dem Grundsatz, eine möglichst umfassende Meßdatenerfassung unter Vermeidung lokaler Störeinflüsse zu erreichen.

Standortwahl

Beispielsweise können eine zu hohe Uferböschung, Brückenbauwerke oder geringer Abstand zum Ufer für einen weiten Windrichtungsbereich gestörte Windprofile erzeugen, wie sie für den gesamten Flußabschnitt nur für kleine Flächen kennzeichnend sind. Um den Einfluß des Mitführungswindes zu erfassen, der sich über schnellfließenden Oberflächengewässern auch bei Windstille einstellt, sollte ein Standort im Bereich größerer Strömungsgeschwindigkeiten, also im allgemeinen nahe der Strommitte, angestrebt werden. Andererseits war es erwünscht, wenn im Windrichtungsbereich der Station auch Sektoren enthalten sind, aus deren Richtung die Luftmassen bereits eine ausgedehnte Wasseroberfläche bestrichen haben, um mit guter Näherung von bereits eingestellten stationären Wärmeaustauschbedingungen ausgehen zu können. Ebenso sollte die Häufigkeit von Abkühl-situationen, auf die ja die Meßergebnisse Anwendung finden sollen, dadurch vermehrt werden, daß für einen Teil der

der Meßdauer von einer Überhöhung der natürlichen Temperatur durch bekannte Wärmeeinleitungen ausgegangen werden kann. Dabei sollten weder infolge zu kurzer Durchmischungszonen Warmwasserfahnen im Bereich der Meßstation zu lokalen Effekten führen, noch infolge zu großer Abkühlstrecke der Einfluß des Wärmeeintrags nicht mehr meßbar sein.

Ebenso wie aus den Zielen des Vorhabens ergaben sich auch zu dessen Durchführbarkeit Anforderungen an den Standort. Die angestrebte möglichst große Entfernung vom Ufer durfte nicht zur Gefährdung der oder durch die Schifffahrt führen. Einrichtungen am Ufer sollten gute Zufahrt- und Anschlußmöglichkeiten aufweisen können, sie mußten ferner so errichtet werden können, daß Bauauflagen wie ungehinderter Hochwasserabfluß, Erhaltung von Uferbefestigungen und Vermeiden von Treibgutblockagen eingehalten werden konnten.

Nach Auswertung von Kartenmaterial, von Luftaufnahmen der Badenwerk AG, Erkundungen vor Ort und Besprechungen mit dem Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim wurde als der geeignetste Standort der Strom-km 394,36 Nähe Rheinhausen, ermittelt (Abb. 1). Bedingt durch eine schwache S-förmige Biegung im Stromverlauf findet in deren Wendepunkt ein Seitenwechsel im Verlauf der Schifffahrtsrinne statt, dessen Einfluß durch inzwischen errichtete Buhnen noch verstärkt wird. Dadurch wird einerseits die Schifffahrt genötigt, zum rechtsrheinischen Ufer einen relativ großen Abstand einzuhalten, andererseits ist die Strömung bei normalen Wasserständen, wenn die Buhnen überspült sind, bereits unweit des Ufers relativ stark. Bei Niedrigstwasser steigt sie knapp außerhalb des Buhnenbereichs sprunghaft an. Der genehmigte Standort, 60 m von der Uferbaukante entfernt und ca. 12 m außerhalb des Buhnenbereichs, liegt bei allen Wasserständen im Bereich einer gleichmäßigen und kräftigen Strömung und fordert nur bei höchsten Wasserständen ein geringes Abweichen der bergfahrenden Schiffe von ihrer idealen Route (Abb. 2). Eine derartige im Bezug auf das Studium strömungsbedingter Effekte günstige Positionierung war auf geraden Flußabschnitten nicht zu erzielen. Die am Standort auftretende Abweichung der Fließrichtung vom sonstigen Verlauf des Rheins wird in Kauf genommen, da sich deren Effekt bei Auswertung der Meßergebnisse korrektiv berücksichtigen läßt. Das Vorhandensein des 0,7 km² großen Speyrer Altrheins (s. Abb. 1), der sich in einem engen Windrichtungssektor westlich der Meßstation erstreckt, trägt zur Häufigkeit von bereits eingestellten stationären Austauschbedingungen bei. Als Folge

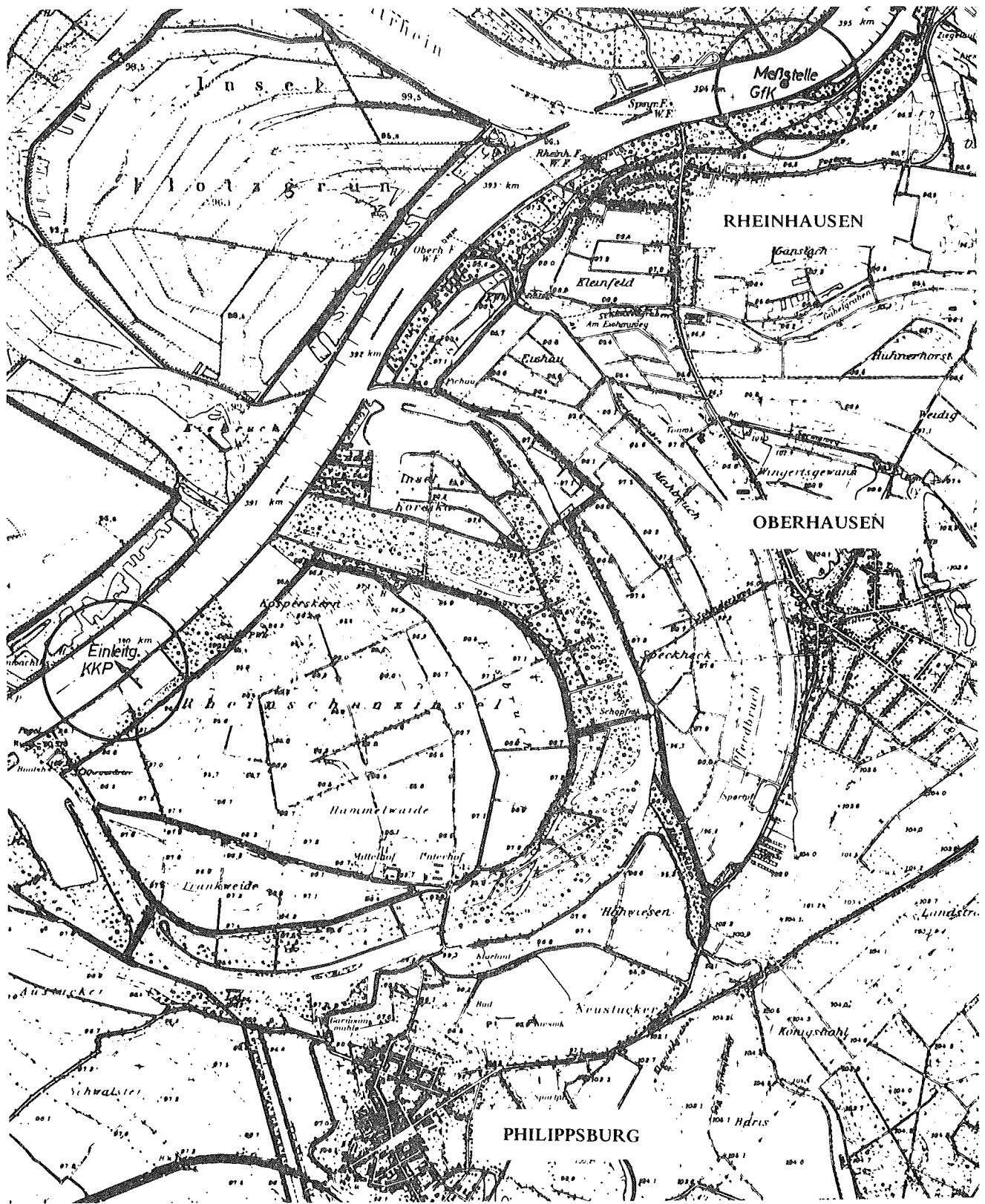


Abb. 1: Standort der Meßstation und des Kernkraftwerks Philippsburg

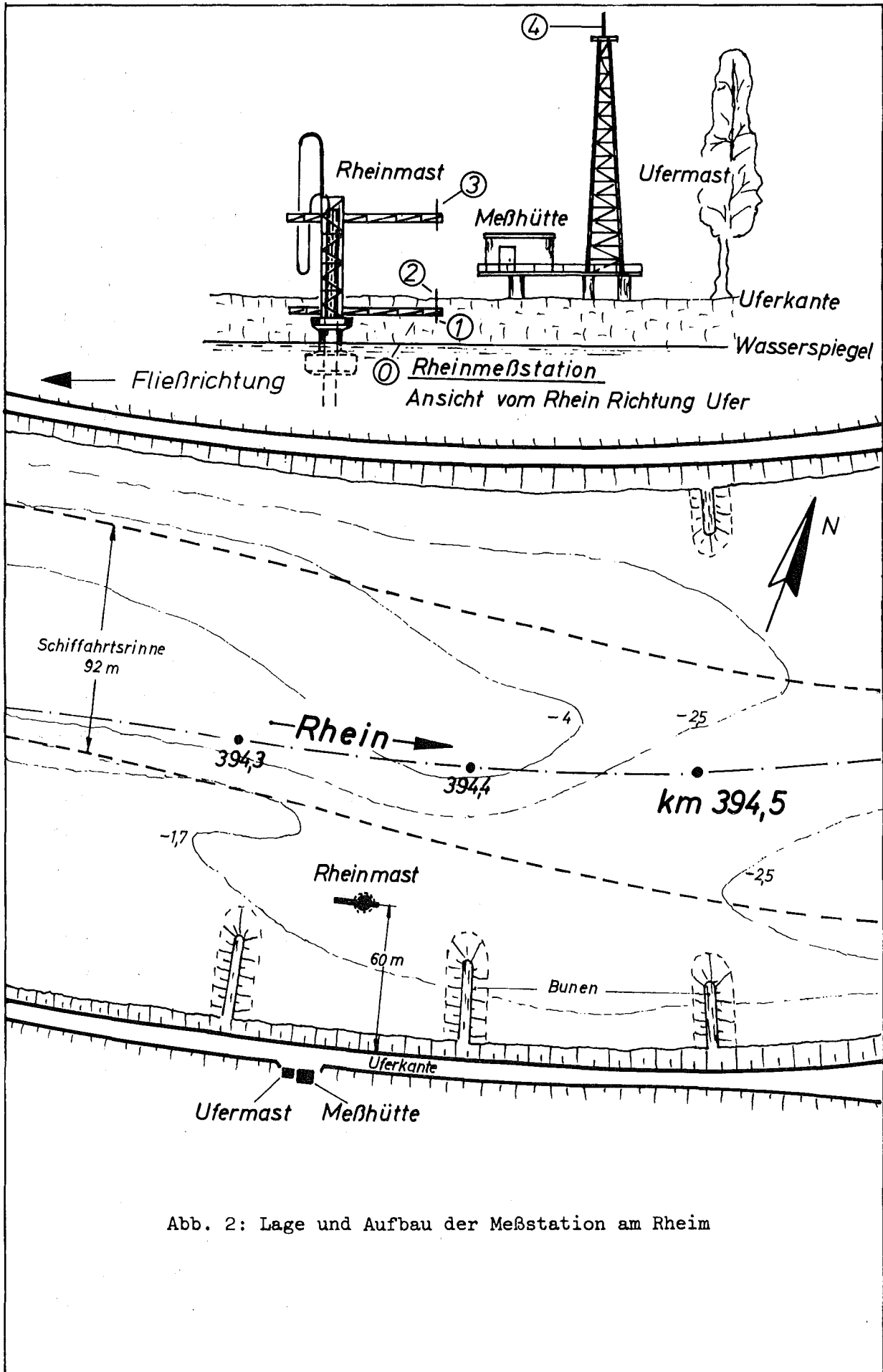


Abb. 2: Lage und Aufbau der Meßstation am Rhein

der leichten Links- und Rechtskrümmungen ist davon auszugehen, daß die Einleitungen des 5 Strom-km oberhalb befindlichen Kernkraftwerks Philippsburg im Bereich der Meßstation genügend durchmischt sein werden. Andere größere Einträge von Abwärme oder Zuflüsse sind auf einer weiten Strecke stromaufwärts nicht vorhanden. Das Landschaftsbild links und rechts des Rheins ist typisch für den Verlauf weiter Teile des Oberrheins: schmale Auwälder von ca. 30 m Höhe mit Unterbewuchs, kleinere Altrheinflächen in der Umgebung, Hochwasserdamm in ca. 300 m Entfernung vom Ufer, dahinter Felder und vorwiegend ländliche Bebauung. Das linksrheinische Speyrer Industriegebiet, ca. 3 km nordwestwärts der Station, erzeugt keine merkbare Lufttrübung durch Immissionen im Bereich der Meßstation. Zufahrt ist auf dem Leinpfad auch für Lkw möglich, Aufwendungen für Strom- und Fernmeldeanschluß hielten sich durch die Ortsnähe von Rheinhausen in vertretbarem Aufwand.

Bauliche Gestaltung der Meßstation

Der Aufbau der Meßstation ist auf das Meßprogramm zugeschnitten. Es schreibt vor, in konstanten Abständen über dem Wasser meteorologische Daten zu erfassen und den Konvektions- und Verdunstungsanteil nach der Turbulenz-Korrelationsmethode (s. 3.3.3) unter Einsatz eines Ultraschallanemometer-Thermometers (SAT) zu erfassen. Ein SAT mißt, wie es die Turbulenz-Korrelationsmethode erfordert, die Windkomponenten streng unabhängig voneinander. Eine exakte räumliche Justierung des SAT ist unerlässlich, insbesondere da die Horizontalkomponente des Windes durchschnittlich etwa um den Faktor 3 größer als die Vertikalkomponenten ist. Im übrigen sollen auch Globalstrahlungs- und Strahlungsbilanzsonden sowie Windfahnen in einer zur Wasseroberfläche parallelen Ebene justiert sein. Diese Forderungen bedingen eine vertikale Führung des Sondenträgers und schließen Bojen- oder Floßkonstruktionen aus, da diese in einem Fluß wie dem Rhein stets dümpeln.

Auch heftige Vertikalbewegungen infolge Wellengangs simulieren Wind (allerdings keinen Wärmefluß) und sollen möglichst unterdrückt werden. Dies kann eine Servosteuerung am vollkommensten lösen; aus Gründen der Betriebssicherheit ist dennoch eine Schwimmkonstruktion eingesetzt, die den Welleneinfluß durch besondere Formgestaltung des Auftriebkörpers dämpft: im Bereich der Wasserlinie erzeugt ein kleinerer Querschnitt einen

geringeren differentiellen Auftrieb als unterhalb und oberhalb. Tatsächlich vollführt diese Konstruktion bei Wellenamplituden um 50 cm Hübe von ca. 15 cm mit Geschwindigkeiten bis zu 3 cm/sec (s. Abb. 3).

Dieser Auftriebskörper liegt ringförmig um einen Dalben aus Spundprofilwänden von ca. 80 cm \emptyset und 19 m Gesamtlänge, etwa hälftig in den Lettengrund gerammt. Er trägt den Gittermastaufbau von 8 m Höhe, der mit festen und gefederten Rollen spielfrei am Dalben geführt wird. In 1,60 und 8 m Höhe sind jeweils Gitterausleger von 5 m und Gegenausleger von 2,50 m Länge nach Oberstrom bzw. Unterstrom angebracht, an denen die Sonden im Wasser, in 0,8 m, 2 m und 8 m Höhe über Wasserspiegel, montiert sind. Die Ausleger sind so ausgeführt, daß keine Vibrationen auftreten, welche sich auf die Sonden übertragen.

Die Versorgungs- und Meßleitungen von den Ufereinrichtungen zu den Anschlußeinheiten am Ponton laufen in zwei Schutzrohren unter Grund zum Dalben und durch eine nach dem Rammen unterhalb der Sohle angebrachten Geschiebeschutztrompete in das Innere des Dalbens, der so als Steigschacht dient. Der Dalben wird bis zur maximalen Steighöhe der Gittermastoberkante durch einen Kabelgalgen überhöht, über den die Kabel gebündelt, ansonsten frei zu einer Längenausgleichsschleife überhängen, deren Gegenpunkt eine Befestigungsstelle am oberen Gittermastausleger darstellt. Der Tiefgang des Pontons, die Rollenführung, die Kabelgalgenüberhöhung und die Schlaufenlänge sind für Wasserstände ausgelegt, die von 91,3 m über Normal Null (üNN) bis 99,5 m üNN reichen. Die Sohle liegt bei 90 m üNN.

Die durch eine Durchbiegung des Dalbens eintretende Schräglage der Sonden beträgt für den Auslegungsfall (oberster Stand und gleichsinnige Windlast) ca. 21', für den Bezugsfall Hochwasser 1955 14'. Auch bei Hochwasser ist damit die erforderliche vertikale Ausrichtung der Meßgeräte gewährleistet. Weiterhin ist der Dalben gegen Eisdruck und Schiffstoß ausgelegt, nicht jedoch das Ponton selbst. Dieses muß bei Eisgang mit Flaschenzügen am Dalben aus der Wasserlinie gehievt werden. Als Schutz gegen Treibgutstöße ist eine verformbare Ummantelung im Bereich der Wasserlinie um das Ponton gelegt.

Die Einrichtung am benachbarten Ufer, das sind die Meßhütte und ein meteorologischer Stahlgittermast, wurden aus Gründen der Hochwassersicherheit und Nichtbeeinträchtigung des Hochwasserabflusses sowie des

ANSICHT VON LAND

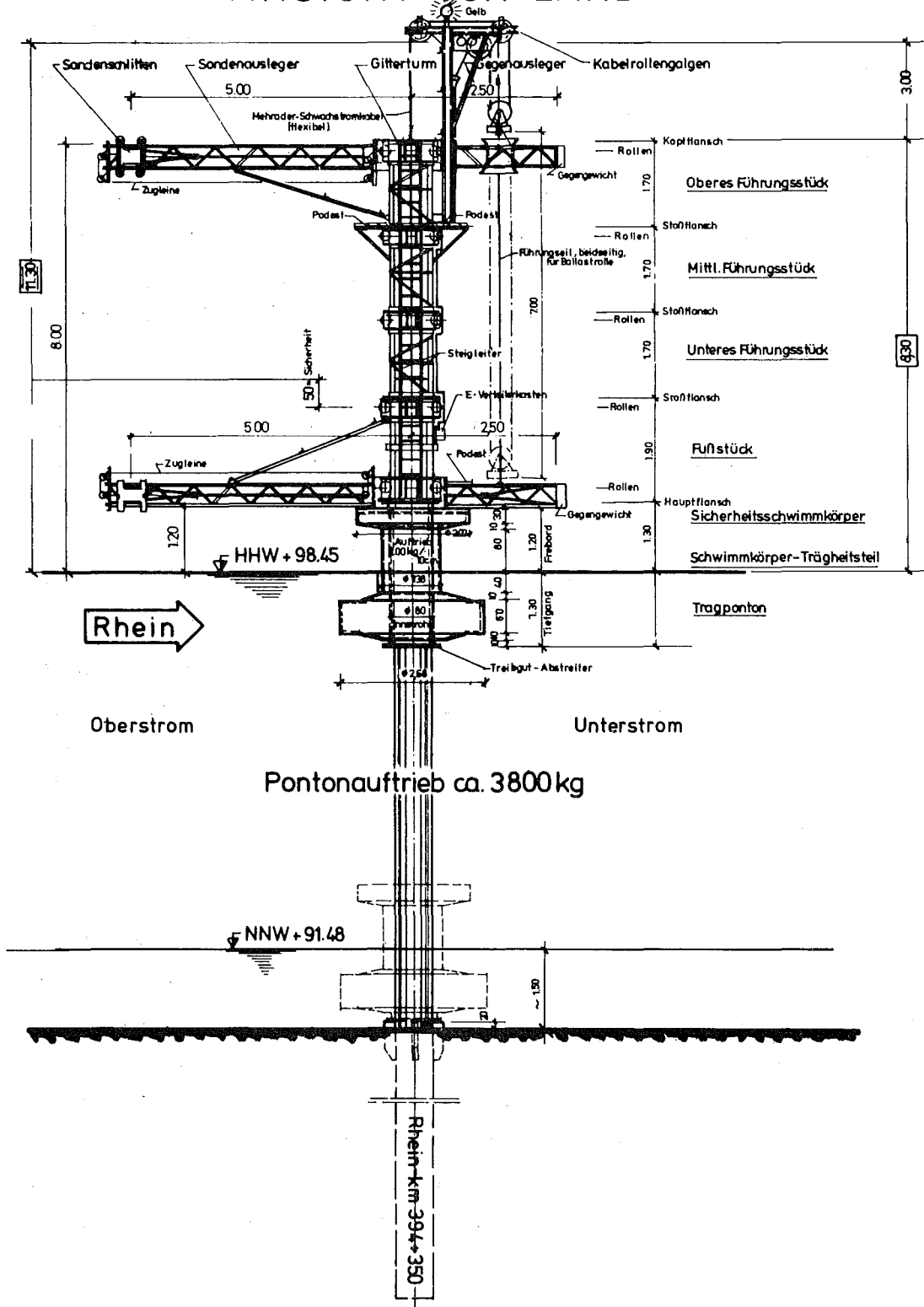


Abb. 3: Konstruktion des Meßmastes im Rhein

erschweren unbefugten Zugangs auf fünf Stahlbetonsäulen von 2,70 m Höhe ohne Abspannungen gegründet. Die Spitze des Auslegers am Ufermast, der die Sonden trägt, läßt sich von der Arbeitsplattform auf eine Höhe von 135,4 m üNN ausfahren; das sind rund 40 m über der Wasseroberfläche und 10 m über den Baumkronen des Auwaldstreifens. Ufermast und Hütte sind mit einem Gitterrost verbunden, der über entfernbare Leitern bestiegen wird. In der Hütte sind auf einer Grundfläche von 3,50 x 3,60 m die Datenerfassung und die technische Versorgung untergebracht. Der Zugang zum Ponton wird durch ein kleines Boot bewältigt, das auch für Meßfahrten und Gerätetransport benutzt wird. Eine Übersicht über die ganze Station vermittelt Abb. 4.



Abb. 4: Ansicht der gesamten Anlage

3.2 Instrumentierung

Entsprechend dem Ziel, neben der Erfassung der Wärmeflüsse bzw. der Austauschkoefizienten deren Abhängigkeiten von beobachteten meteorologisch-hydrologischen Situationen zu erarbeiten, ist es notwendig, die diese beschreibenden Parameter in hinreichender örtlicher und zeitlicher Auflösung zu registrieren. Insgesamt dient dazu die Erfassung der in der Tabelle 3 aufgeführten Größen.

Meßebe Nr.	Lage	Meßgrößen
0	0 ... 0.5 m unter der Wasseroberfläche	Wassertemperatur Sauerstoffkonzentration Oberflächengeschwindigkeit Oberflächenrauigkeit
1	0.8 m oberhalb der Wasseroberfläche	Lufttemperatur Luftfeuchte Windgeschwindigkeit Windrichtung
2	2.0 m oberhalb der Wasseroberfläche	Lufttemperatur ^{+))} Luftfeuchte ^{+))} Windgeschwindigkeit ^{+))} in räumlichen Komponenten Strahlungsbilanz Sichtweite
3	8.0 m oberhalb der Wasseroberfläche	Lufttemperatur Luftfeuchte Windgeschwindigkeit Globalstrahlung
4	40 m über der Uferoberkante	Lufttemperatur Luftfeuchte Windgeschwindigkeit Windrichtung

^{+))} mit hoher zeitlicher Auflösung zur direkten Berechnung von konvektivem und latentem Wärmetransport

Tabelle 3 Meßgrößen und Ort ihrer Erfassung

Von diesen Größen, die als Analogmeßwerte in der Meßhütte vorliegen, sind insbesondere die Meßwerte für die Luftdaten in 2 m Höhe hervorzuheben, die von zeitlich hochauflösenden Geräten in einem in Abschnitt 3.3.3 zu besprechenden Verfahren ermittelt werden und aus denen direkt der Transport von latenter und fühlbarer Wärme sowie der Turbulenzzustand errechnet werden. Neben den Grundgrößen lassen sich die Gradienten von Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und -Feuchte, die Relativgeschwindigkeit des Windes zur Wasseroberfläche, die Temperaturdifferenz Wasser - Luft, die Drehung des Windvektors mit der Höhe, die Varianz der Windgeschwindigkeit und -richtung sowie der Temperatur in 2 m Höhe über Wasser sowie die Flüsse von latentem und fühlbarem Wärmestrom errechnen.

Die Ermittlung der Grundgrößen findet durch Verwendung der im folgenden beschriebenen Sonden statt:

- Windgeschwindigkeit außer in 2 m: 3-Stern Schalenkreuzanemometer mit optischem Geber und Impuls-Stromwandler, Meßbereich 0.2 bis 20 m/sec
- Windrichtung außer in 2 m: Windfahne mit Propeller anstelle einer Heckflosse, der über einem stark untersetzendes Getriebe die Fahne einstellt, mit Potentiometergeber von 0 bis 358° gemessen; Anlaufschwelle zwischen 0.7 und 1.3 m/sec. Die richtige Mittelung vom Winkel zwischen 0° und 358° wird im Rechner bewerkstelligt (s. Abschn. 4.2)
- Luftfeuchte außer in 2 m: LiCl-Feuchtefühler mit Pt 100-Konversions-temperaturmeßwandler (1/3 DIN) in Konvektionsdämpfungshütte nach Prof. Baumbach und mit einem im LAF I entwickelten speziellen Widerstands/Spannungswandler (R/U-Wandler)
- Lufttemperatur außer in 2 m: Pt 100-Widerstandsgeber (1/3 DIN) in Kallottenhütte ohne Fremdbelüftung und mit R/U-Wandler
- Strahlungsbilanz: beidseitig geschwärztes Thermoelementenbündel mit Lupolenhaubenabdeckung beidseitig, erfaßter Wellenlängenbereich 0.3 bis 60 µm und nachgeschaltetem Verstärker
- Globalstrahlung: Moll'sche Thermosäule mit Schirm mit doppeltem Glasdom, erfaßter Wellenlängenbereich 0.3 bis 2.5 µm, und nachgeschalteter Verstärker
- Oberflächengeschwindigkeit: Heißfilmgeber mit integriertem Wandler, Eintauchtiefe 2 bis 30 cm je nach Wellengang

- Oberflächenrauigkeit: Eintauchkondensator mit Schwingkreiswandler eigener Entwicklung⁺). RMS-Wert wird aus sekundlich abgefragter Eintauchtiefe berechnet
- Wassertemperatur: Pt 100-Widerstandsgeber (1/3 DIN) an Schleppestange, Eintauchtiefe je nach Strömungsgeschwindigkeit und Treibgutansatz 10 bis 60 cm, mit R/U-Wandler
- Niederschlagsdauer: Beheizte Leiterbahnplatten, Gesamtfläche 400 cm². Ein einzelner Tropfen auf trockene Sensorfläche bringt das Gerät für ca. 5 sec zum Ansprechen, die regennasse Fläche ist je nach Wind in 3 bis 5 min trockengeheizt. Diese Zeit wurde auf die möglichen Ausfallzeiten der Sondermeßgeräte in 2 m infolge Benetzung mit Regentropfen abgestimmt. Erfasst wird die Zeitdauer der "Naß"-Zustände im 10 min-Meßintervall.
- Sichtweite: Lichtweg von ca. 12 m Länge, doppelt durchlaufen. 10 bis 90 % der Transmission entsprechen 40 bis 400 m Sichtweite
- Sauerstoffgehalt des Wassers: Elektrodensystem Silberanode-KCl-Gel-Goldkathode mit Temperaturkompensation und integriertem Wandler
- Luftdruck: Anaeroidosenbarometer mit elektromagnetischem Winkeltransmitter und Umformer.

Außer den bisher beschriebenen konventionellen Meßgrößen werden erfasst:

- Temperatur, Feuchte, Wind in 2 m Höhe: Zur Anwendung der Turbulenz-Korrelationsmethode ist es aus den in 3.3.3 näher beschriebenen Gründen notwendig, Temperatur, Feuchte und vertikale Windkomponente als Momentanwerte mit einer zeitlichen Auflösung von mindestens 1 Hz am gleichen Ort und zur gleichen Zeit zu erfassen. Ferner muß die vertikale Windkomponente streng separiert werden. Es darf keine Querempfindlichkeit gegen horizontale Komponenten, die zumeist einen Faktor 3 größer ausfallen, bestehen.

⁺) Dieses Gerät wurde von Herrn Kind entwickelt und für das Meßprogramm zur Verfügung gestellt

Bei der Wind- und Temperaturmessung werden diese Forderungen recht gut von Ultraschallmanometer-Thermometern erfüllt: die eigentliche Sonde besteht aus zwei Ultraschall-Sender-Empfängerpaaren mit antiparallelen Laufstrecken von 20 cm Länge und 5 cm Abstand zueinander. Die Abmessungen der Schallköpfe mit Halterungen betragen 1,5 cm \varnothing x 5 cm, das Tragegerüst ist auf minimale Beeinflussung der Luftbewegung ausgelegt. 440 mal pro Sekunde wird eine gedämpfte Ultraschallschwingung emittiert und die Laufzeit des dritten Maximums gemessen. Aus der Summe der Laufzeiten auf antiparallelem Weg ergibt sich die Schallgeschwindigkeit des ruhenden Mediums aufgrund folgender Herleitung (s. Abb. 5):

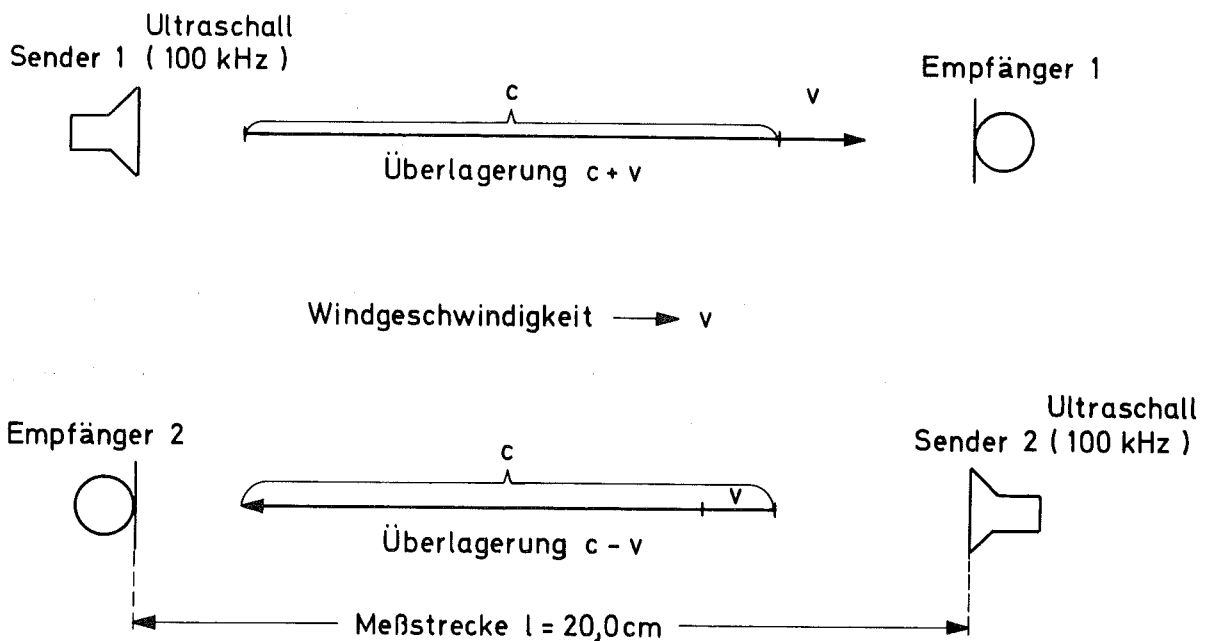


Abb. 5 Prinzipielle Funktionsweise des SAT

Der Übersicht halber ist nur eines von drei Laufstreckenpaaren dargestellt, die alle genau gleich aufgebaut sind. Als vorläufige Vereinfachung wird von der Windgeschwindigkeit angenommen, daß sie keine Querkomponente zum betrachteten Laufstreckenpaar enthält.

Die Laufzeiten der Ultraschallimpulse t_1 von Sender 1 zu Empfänger 1 bzw. t_2 in umgekehrter Richtung betragen:

$$t_1 = \frac{l}{c+v} \quad c = \text{Schallgeschwindigkeit}$$

$$t_2 = \frac{l}{c-v} \quad v = \text{Windgeschwindigkeit}$$

Für die Summe erhält man:

$$t_1 + t_2 = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v}$$
$$= \frac{2lc}{c^2 - v^2}$$

In trockener Luft ist die Schallgeschwindigkeit proportional zur Wurzel aus der absoluten Temperatur, die hiermit errechenbar wird. Zugleich wird die Schallgeschwindigkeit durch den Wasserdampfgehalt erhöht, so daß die zunächst errechnete virtuelle Temperatur T_v (sogenannte Schalltemperatur) noch durch einen Faktor dividiert werden muß:

$$T = T_v / (1 + 0.608 \cdot s)$$

$$\text{mit } s = \text{spez. Feuchte} = \frac{\text{Wasserdampfdichte}}{\text{Dichte der feuchten Luft}}$$

$$\text{oder } T = T_v - \Delta T_v(s, T)$$

Abb. 7 zeigt ΔT_v als Funktion der Temperatur und der relativen Feuchte.

Die Windgeschwindigkeit parallel zur Sensorstrecke folgt aus der Messung der Differenzen der Laufzeiten:

$$t_2 - t_1 = \frac{2lv}{c^2 - v^2}$$

Wieder wird v^2 gegen c^2 vernachlässigt, so daß folgt:

$$v \approx \frac{c^2}{2l} (t_2 - t_1) = \text{const.} \cdot (t_2 - t_1)$$

Während die Fehler bei der Ermittlung der Windgeschwindigkeit durch Konstantsetzen von c und Vernachlässigen von v^2 innerhalb der erreichbaren Fehlergrenze von $\pm 3\%$ bleiben, bedarf die Temperaturmessung einer Korrektur, die im Rechner vorgenommen wird.

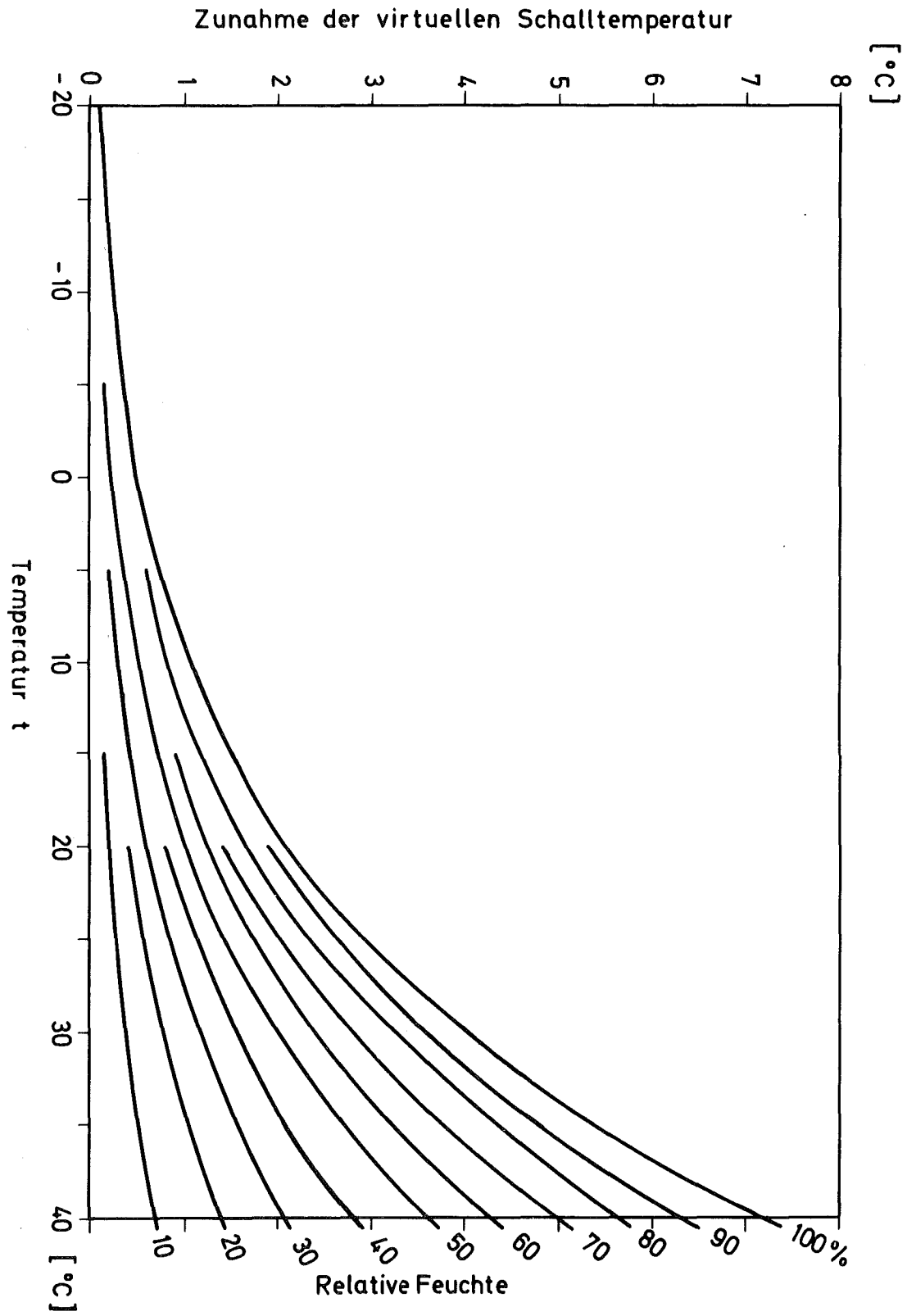


Abb. 6: Änderung der virtuellen Temperatur T_v (Schalltemperatur) als Funktion von Temperatur und Feuchte

Neben der vertikalen Windgeschwindigkeit werden in 2 m Höhe auch die horizontalen Komponenten mit 2 antiparallelen Schallstreckenpaaren unter 120° gemessen und im Rechner in Betrag und Richtung umgewandelt.

Ebenso wie aus Temperatur und vertikaler Komponente werden überdies die Varianzen dieser Größen bestimmt, so daß ein Maß für den vorliegenden Turbulenzzustand der Luft ermittelt wird. Überdies hängen die Windwerte aus den Schallmessungen nicht von Anlaufschwellen und trägheitsbedingtem Nachlaufen ab, wie sie dem Schalenstern und der Windfahne eigen sind; sie können andererseits nicht in die Gradientenreihe einbezogen werden und neigen besonders bei Regen infolge von Störung der Ultraschallempfänger durch Wassertropfen zu Ausfällen in der Messung. Die sowohl zur Berechnung des Flusses der latenten Wärme wie auch zur Momentanwertkorrektur der Schalltemperatur notwendige Feuchtemessung (Temperatur- und Feuchteschwankungen werden, da von der gleichen Turbulenz ausgelöst, im allgemeinen korreliert sein) wird durch ein Miniaturpsychrometer vorgenommen, wie es der Deutsche Wetterdienst für Raketenanstiegssonden entwickelt hat. Bei diesem wird die Feucht- bzw. Trockentemperatur durch ein Perltormistorpaar bestimmt, das auf einem Plexiglastragarm montiert ist. Mittels einer Einfräsung dient dieser gleichzeitig für den Befeuchtungsstrumpf als Wasserreservoir, dimensioniert für die Dauer einer Aufstiegs-sondenmessung von wenigen Minuten. Daher wurde eine Nachspeisung des Reservoirs durch einen entfernten Behälter vorgesehen, so daß der Miniatraufbau am Meßort, wenige cm von der vertikalen Schallstrecke entfernt, gewahrt wurde. Naturgemäß muß bei einer solchen Messung, in die das korrelierte Verhalten von Wind und Feuchteschwankung eingeht, auf künstliche Belüftung verzichtet werden. Ebenso kann auch kein Schutz gegen Einstrahlung angebracht werden, da dies der natürlichen, turbulenten Luftbewegung den Zutritt zum Fühler unzulässig verlegen würde. Andererseits wird durch die extrem kleine Bauform des Fühlers erreicht, daß bereits bei Windgeschwindigkeiten von 1 m/sec der Gleichgewichtszustand mit der umgebenden Luft sich einstellt, d.h. der trockene Fühler nimmt Lufttemperatur an, der feuchte die maximale psychrometrische Differenz. Die Ansprechzeiten von feuchtem und trockenem Thermistor werden durch Überziehen des trockenen Fühlers mit Kunstharz etwa gleich eingestellt und betragen ca. 1.2 sec.

Der nachgeschaltete Verstärker wurde so ausgelegt, daß die stark gekrümmte Kennlinie der Thermistoren bereits etwas begradigt wird. Dadurch

wird erreicht, daß im Rechner zu große Ungenauigkeiten bei der Digitalisierung vermieden werden.

3.3 Spezielle Verfahren zur Messung des Wärmeaustausches

3.3.1 Diskussion der möglichen Verfahren

Einer der Schwerpunkte des Vorhabens ist die Erfassung der Hauptkomponenten des Wärmeaustausches zwischen fließenden Oberflächengewässern und Atmosphäre. Dabei ist speziell die Messung der Verdunstung und der Konvektion von Interesse, die im allgemeinen nur durch Verknüpfung mehrerer Größen nach verschiedenen Verfahren bestimmt werden können. Die Möglichkeit der direkten Messung besteht an geeignet isolierten Bodenproben bei Untersuchungen über Festland oder gut bilanzierbaren Kleingewässern; bei größeren Gewässern werden häufig die Störeinflüsse zu groß bzw. die Meßeffekte zu klein, um die Komponenten des Wärmeflusses getrennt erfassen und meteorologischen Einzelsituationen zuordnen zu können. So wurde eine Vielzahl von Verdunstungspfannen entwickelt, um ein gut meßbares Probevolumen den gleichen Umgebungsbedingungen auszusetzen, wie sie auf das zu untersuchende System einwirken. Die mangelnde Realisierbarkeit dieser "Gleichheit" in entscheidenden Einzelheiten wie Durchmischung gegenüber Schichtung, Wärmeaustausch mit der Umgebung, Störung des Windprofils durch den unvermeidlich überstehenden Rand führt dazu, daß jeweils "Pfannenfaktoren" mit entsprechender Unsicherheit ermittelt werden müssen; deren Abhängigkeiten sind ebenfalls keineswegs klar. Muß außerdem mit Spritzwasser und Wellengang gerechnet werden, oder liegt eine nicht vernachlässigbare Oberflächengeschwindigkeit vor, so ist dieses Verfahren schon technisch nicht anwendbar oder es liefert bei Anbringung der Pfanne außerhalb der Wasseroberfläche nur teilweise korrelierte, aber nicht die tatsächlichen Werte.

Von Spezialfällen abgesehen, bei denen Verdunstung und Konvektion indirekt oder durch Bilanzierung des Haushalts von Proben bestimmt werden können (im allgemeinen nur möglich bei begrenzten Gewässersystemen), stehen zwei Verfahren zur Ermittlung der Wärme Flüsse aus meteorologischen und hydrologischen Parametern zur Verfügung, die von Modellvorstellungen für die Transportvorgänge ausgehen. Es sind dies die Gradienten- und die Turbulenz-Korrelationsmethode, die im folgenden dargestellt werden.

3.3.2 Die Gradientenmethode

Bei diesem Verfahren zur Berechnung der vertikalen Wärmeflüsse von Verdunstung und Konvektion geht man von der allgemeinen Erfahrung aus, daß jeder Transport gegen die Richtung eines Gradienten erfolgt und diesem proportional ist. Im Falle von bereits eingestellten stationären Wärmeaustauschbedingungen, also homogener horizontaler Durchmischung, wird dieser Gradient vertikal sein und man kann ansetzen:

$$\phi_L = -\lambda \rho K_E \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \quad \text{bzw.}$$

$$\phi_F = -c_p \rho K_H \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}$$

Hier bedeuten:

Gemessen in:

ϕ_L	Fluß der latenten Wärme	W/m^2
ϕ_F	Fluß der fühlbaren Wärme	W/m^2
ρ	Dichte der Atmosphäre	$kg \text{ Luft}/m^3$
\bar{q}	zeitliches Mittel der spez. Feuchte	$g \text{ H}_2\text{O}/g \text{ Luft}$, dimensionslos
$\bar{\theta}$	zeitliches Mittel der potentiellen Temperatur	K
c_p	spez. Wärme der Luft	Ws/kg
K_E	Scheindiffusionskoeffizient (Feuchtetransportkoeffizient)	m^2/s
K_H	Schein-Wärmeleitfähigkeit (Wärmetransportkoeffizient)	m^2/s
z	Höhe über der Grenzschicht	m
λ	Verdunstungswärme des Wassers	Ws/kg

Auf den eigentlichen Mechanismus einer vertikalen atmosphärischen Ausbreitung ist in einem solchen Ansatz zunächst noch kein Bezug genommen. Die bestimmenden Eigenschaften des atmosphärischen Zustands wie Dichteschichtung und Turbulenzgrad sind implizit in den Koeffizienten K_H und K_E enthalten. Von verschiedenen Autoren werden diese Koeffizienten daher in Faktoren aufgespalten, die unterschiedlichen Einflußgrößen zugeordnet werden. Die Ansätze hierzu werden teils aus Analogiebetrachtungen abgeleitet, teils sind sie empirisch gefunden. So werden als Hilfsgrößen eingeführt die Reibungsgeschwindigkeit nach dem Prandtl'schen Mischungswegansatz [8], die von Karmannsche Konstante [9], die Richardson'sche Zahl (ein Stabilitätsparameter), verallgemeinerte Karmann-Parameter nach Monin und Obuchow [10] und die Oberflächenrauigkeit. Andere Ansätze verzichten auf solche Hilfsgrößen weitgehend und vereinfachen, wie die

Berechnungsverfahren nach Thorthwaite-Holzman [11], Montgomery [12] und Bowen [13].

Statt die Ausbreitung von Feuchtigkeit oder Wärme im Transportmedium selbst zu betrachten, wird auch der Übergang an einer angenommenen Grenzschicht zur Aufstellung eines mathematischen Modells verwendet. Man betrachtet dabei den fiktiven Gradienten in der Grenzschicht als treibende Kraft des Austausches, dessen Geschwindigkeit von der Dicke einer behindernden Grenzschicht bestimmt wird. Diese Dicke ist es dann wiederum, die vom atmosphärischen Zustand abhängt. Man schreibt:

$$\phi_L = -\lambda \rho \beta (q_L - q_S) \quad \text{bzw.}$$

$$\phi_F = -\alpha (\theta_L - \theta_W)$$

wobei

- q_L die spez. Feuchte der Luft über der Grenzschicht, dimensionslos
- q_S die spez. Feuchte von gesättigter Luft der Temperatur des Wassers an der Phasengrenze, dimensionslos,
- β Stoffübergangszahl = m/s (Austauschgeschwindigkeit)
- θ_L Temperatur der Luft
- θ_W Temperatur des Wassers an der Phasengrenze
- α Wärmeübergangszahl $W/m^2 K$

Diese Art des Ansatzes geht von der Existenz einer Schicht an der Phasengrenze aus, die durch ein laminares Windgeschwindigkeitsprofil gekennzeichnet ist. Wasserdampf- und Wärmetransport können durch diese Schicht nur aufgrund molekularer Diffusion erfolgen. Die Stoffübergangszahl β erhält man durch Division des molekularen Diffusionskoeffizienten durch die Dicke der Grenzschicht. Durch ähnliche Überlegungen gelangt man zur Wärmeübergangszahl α . Die Abhängigkeiten der Austauschgeschwindigkeiten von meteorologischen Gegebenheiten wird durch die Abhängigkeit der Grenzschichtdicken von diesen Gegebenheiten implizit berücksichtigt [21].

Je nachdem, ob der Gradient in der unmittelbaren Grenzschicht oder in höheren Luftschichten betrachtet wird, ist in der Gradientenformel K_E bzw. K_H oder β bzw. α diejenige Größe, deren Abhängigkeit von meteorologischen Größen nicht gut bekannt ist. Alle übrigen Größen sind im wesentlichen meßtechnisch zugänglich.

3.3.3 Die Turbulenz-Korrelations-Methode (TKM)

Bei dieser Methode geht man von der anschaulichen Vorstellung aus, daß jeder Transport von statistisch schwankenden vertikalen Winden getragen wird. Dabei sind je nach Richtung des Wärmeflusses die nach oben gerichteten Wirbel systematisch wärmer bzw. feuchter als die nach unten gerichteten, oder umgekehrt.

Daher verlangt die Turbulenz-Korrelations-Methode [15] lediglich die "schnelle" Messung der vertikalen Komponente der Windgeschwindigkeit, der Temperatur und der Feuchte. Die Flüsse berechnen sich dann unter der alleinigen Annahme, daß eine Querkomponente des Transports nicht vorliegt, zu

$$\phi_L = \rho \cdot \lambda \cdot \overline{v_z \cdot q'}$$
$$\phi_F = \rho \cdot c_p \cdot \overline{v_z \cdot \theta'}$$

v_z = Vertikalkomponente der Windgeschwindigkeit in m/s

q' = $q(t) - \bar{q}$ Abweichung des Momentanwertes der Feuchte vom Mittel

θ' = $\theta(t) - \bar{\theta}$ " " " " Temperatur " "

Unter "schneller" Messung ist eine zeitliche Auflösung der Fluktuationen bis ca. 10 Hz zu verstehen, da die spektrale Dichte nach "hohen" Frequenzen (ab etwa 0,1 Hz) nach einem 5/3-Exponentialgesetz abfällt und bei 10 Hz etwa 1 % des Maximums annimmt. Dieser Abfall wurde von Elagina (1963) [16] auch für Feuchteschwankungen beobachtet, und seitdem durch zahlreiche Messungen bestätigt [17]. Aus der Tabelle 4 läßt sich entnehmen, daß die Grenzfrequenzen, die einbezogen werden müssen, um 95 % des latenten Wärmeflusses zu erfassen, in diesem Beispiel zwischen 0,08 und 0,75 Hz schwanken können. Dabei wurde in dem zitierten Experiment nicht speziell nach extremen Werten gesucht.

3.3.4 Zusammenhang zwischen Meßverfahren und Meßtechnik

Jede der beiden in 3.3.2 und 3.3.3 geschilderten Methoden stellt ihre speziellen Anforderungen an die Meßtechnik, die im konkreten Anwendungsfall zu Einschränkungen führen. So ist bei der Gradientenmethode von unterschiedlichen Eichkurven der in verschiedenen Höhen einzusetzenden Meßfühler und deren unterschiedlichen Langzeitverhalten auszugehen, woraus bei kleinen Gradienten große Unsicherheiten erwachsen. Speziell bei Messungen über einem als Schiffsstraße genutzten Fluß wie dem Rhein ist es dabei wegen des Wellengangs unmöglich, näher als ca. 80 cm

Meß- beginn	Meß- dauer	Mittlere Windgeschw.	Luft- Temp.	Dampf- druck	Ver- dunstung	Mindest- auflösung ^{+))}
	min	m/sec	°C	mb	mm/h	Hz
10h 00m	10	3.8	12.8	7.8	0.13	0.47
12h 00m	5	5.3	14.2	8.0	0.10	0.25
14h 00m	6	5.1	14.4	7.5	0.06	0.75
16h 00m	8	4.2	12.9	7.6	0.18	0.40
18h 00m	2	6.5	11.0	7.3	0.08	0.38
23h 00m	3	5.4	8.9	7.1	-0.04	0.08

^{+))} zur Erfassung von 95 % der Verdunstung erforderlich

Tabelle 4 Ergebnisse der direkten Messung der Verdunstung (angegeben in mm/h mit Ultraschallanemometer und Infrarot-Hygrometer bei Shionomisaki am 24.12.66, alle Meßwerte in 1,5 m Höhe über dem Boden)

an der Grenzschicht zu messen, so daß der Bereich des größten Gradienten nicht gut zugänglich ist.

Andererseits erfordert die Turbulenz-Korrelations-Methode eine streng separierte Erfassung der vertikalen von der zumeist mehr als dreifach stärkeren horizontalen Windkomponente; dies erfordert neben einem dafür geeigneten Gerät (s. 3.2) auch eine exakte Justierung, die auch dann eingehalten werden muß, wenn z.B. die Haltevorrichtung dem Wasserstand folgt oder unterschiedlichen Strömungsbedingungen ausgesetzt wird. Ebenfalls muß am gleichen Ort (innerhalb der noch relevanten Turbulenzmaße) die Temperatur- und Feuchtemessung vorgenommen werden. Dabei ist wesentlich, daß durch keine der Meß- oder Haltevorrichtungen die an diesem Ort sonst stattfindende turbulente Bewegung systematisch beeinträchtigt wird; insbesondere verbieten sich damit ansaugende oder sonstwie künstlich belüftete Geräte oder großvolumige Aufbauten wie z.B. Strahlungsschutzhütten. Es muß also in Kauf genommen werden, daß bei bestimmten Wittersituationen Meßwerte unbrauchbar sind (Regen, Windstille und Strahlung, starke Strahlungsänderung). Andererseits können Resultate auch akzeptiert werden, wenn die Absolutmeßwerte lediglich konstant verfälscht sind, da nur deren Änderung in die Ermittlung der Wärmeflüsse eingehen.

Geht man davon aus, daß zur "schnellen" Erfassung der Windgeschwindigkeit und Temperatur Ultraschallmeßgeräte verwendet werden (mit der Folge, daß Messungen bei Niederschlag nicht möglich sind und eine Feuchtekorrektur der Lufttemperatur dann, wenn Luftfeuchte und -Temperatur gleichzeitig hohe Werte annehmen, notwendig ist), so verbleibt die Notwendigkeit der "schnellen" Feuchtemessung unter den o.g. Bedingungen. Das in diesem Programm verwendete Miniaturpsychrometer wurde bereits in 3.1 beschrieben; an dieser Stelle wird deutlich, daß von anderen bekannten Meßgeräten oder -prinzipien außer für wartungsintensive Kurzzeituntersuchungen von wenigen Stunden Dauer kaum eines für den hier nötigen Zweck Verwendung finden kann.

So sind Sonden, welche die Dielektrizitätskonstante der Luft als Maß für die Feuchtigkeit nehmen, zu instabil, Sonden, die die Absorption der Lyman- α -Linien als Meßprinzip verwenden, in der Lebensdauer der Spektrallampen zu begrenzt und zu verschmutzungsempfindlich bei ungeschützter Montage und alle anderen bekannten Verfahren zu träge.

Ein wirklich durchgängiger Vergleich der nach der Gradientenmethode und der Turbulenz-Korrelations-Methode zu erwartenden Meßgenauigkeit scheint heute noch nicht möglich, da keine standardisierten Eichverfahren bezüglich der Gesamtergebnisse bekannt sind. Eine Fehlerabschätzung aufgrund der Meßgenauigkeit der Fühler kann nur anhand ausgewählter, typischer Situationen durchgeführt werden, liefert aber lediglich ein Maß für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, da allein die Unsicherheit in der Wahl der Transportkoeffizienten bei der Gradientenmethode zu Abweichungen um 30 ... 40 % führt.

Wohl liegen vergleichende Messungen und Auswertungen von japanisch-amerikanischen Autoren vor, die aber auch nur aussagen können, daß von 4 untersuchten Methoden zwei etwas besser miteinander korrelieren als die übrigen; außerdem wird in den Abweichungen der Ergebnisse, die aus den gleichen Profilen gewonnen werden, die Unsicherheiten in den Formelansätzen deutlich.

Der Vergleich der 4 verschiedenen Flußberechnungen ergibt beträchtliche Unterschiede im Einzelfall, die durch Mittelung reduziert werden; der Grund dafür liegt wohl darin, daß die empirischen Formeln an Hand längerer Beobachtungszeiten aufgestellt werden. Es ist nicht klar, ob bei systematischer Beeinflussung durch Abwärmeeinleitungen die empirisch vorge-

nommene Anpassung ihre Gültigkeit behält. Deshalb wurde sowohl die Meßtechnik als auch die Datenerfassung in der Meßstation Rheinhausen so ausgelegt, daß Wärme-flüsse nach beiden hier aufgeführten Methoden berechnet werden können, so daß Vergleiche von Einzelfällen wie von längerfristigen Bilanzen möglich sind.

Meßgrößen					Errechnete Größen			
Meß- beginn	Wind- geschw.	Luft- temp.	Dampf- druck	Wasser- temp.	Verdunstungsraten			
	cm/s	°C	mmHg	°C	TKM	TH	Mo	WB
					10 ⁻² mm/(5 min)			
12 ^h 55 ^m	85	31.9	47.28	30.4	1.81	1.58	1.25	0.57
13 10	74	33.0	50.31	30.9	1.82	1.86	1.30	2.34
13 25	93	33.5	51.74	31.3	1.41	1.58	1.44	2.69
13 40	138	33.5	51.74	32.0	1.66	1.16	2.05	5.43
13 55	112	32.8	49.75	31.4	0.73	0.45	1.67	2.74
14 10	120	33.0	50.31	31.3	1.26	1.15	2.02	2.41
14 25	131	33.0	50.31	31.3	1.30	1.88	2.21	2.44
14 40	108	32.9	50.03	31.5	1.37	0.72	1.65	1.77
14 55	146	32.9	50.03	31.7	0.65	1.62	2.17	2.48
15 40	129	32.7	49.47	31.4	0.70	0.49	1.80	1.35
Mittelwerte:					1.27	1.25	1.76	2.42

Tab. 5 Drei nach verschiedenen Verfahren berechnete Verdunstungsraten über Wasser sowie die nach der TKM direkt gemessenen zusammen mit den wichtigsten meteorologisch-hydrologischen Daten bei Shionomisaki am 8.9.1964

Th: Verdunstungsrate nach der Formel von Thorthwaite-Holzmann

Mo: Verdunstungsrate nach der Formel von Montgomery

WB: Verdunstungsrate, berechnet aus der Gesamtwärmebilanz des Wasserkörpers

4. Meßdatenerfassung

4.1 Technik der Datenerfassung

Eine Prüfung der Möglichkeiten der Meßwertübertragung vom Mast im Rhein zur Meßhütte ergab, daß bei der Vielzahl und Vielfalt der Sonden sowie dem Versorgungsbedarf auch der Hilfseinrichtungen (Beleuchtung der Schiffsfahrtszeichen) von den Fernübertragungsverfahren nur eine Kabelübertragung sinnvoll war. Dem höheren baulichen Aufwand für Uferböschungsdurchführung, Unterwasserverlegung, geschiebesicherer Dalben-einführung und Wasserstandsausgleich zum Gittermast steht eine höhere Störanfälligkeit und größerer Wartungsaufwand bei drahtlosen, selbst-

versorgten Meß- und Übertragungssystemen gegenüber.

Bei der Kabelübertragung wurde aus ähnlichen Gründen von einer mastseitigen Meßstellenumschaltung Abstand genommen und jeder Meßwert über separate Adern geleitet. Die Kabelstrecke zum Rheinmast beträgt 80 m, diejenige zu den Sonden am Ufermast 45 m. Je nach Sondentyp fallen die Signale als Spannungen ± 10 V, ± 1 V oder als Ströme von 0 ... 20 mA an, im Falle des Ultraschall-Anemometer-Thermometers als Impulse (Steuerung) und Impulsgruppen (Empfangssignal), so daß abgeschirmte Leitungen gewählt wurden. Kabelbedingte Störungen von Meßsignalen ergaben sich lediglich bei einigen kommerziellen Geräten durch unzureichende Schwingsicherheit der Verstärkerausgänge infolge Kabelimpedanz bei Anwahl der entsprechenden Leitung durch Meßstellenumschalter in der Hütte, konnten aber jeweils durch kleinere Maßnahmen beseitigt werden.

Diese Anwahl erfolgt einerseits bei einer Auswahl der Signale in einem festen Takt von zwei Zwölfkanal-Punktdruckern, deren Registrierung zur Früherkennung von Fehlern, Einschätzung der allgemeinen Wettersituation und hilfsweisen Sicherung der Daten bei Rechnerausfall dient. Dabei werden die Signale zunächst zwecks Rückwirkungsämpfung abgeschwächt, gegebenenfalls mit einer Zeitkonstanten geglättet (Windgeschwindigkeiten) oder witterungsabhängig gewählten Spreizungen unterzogen.

Andererseits werden alle Signale (die des Ultraschall-Anemometer-Thermometers erst nach Aufbereitung im Grundgerät, das wegen seiner Wartungsbürftigkeit in der Hütte installiert ist) z.T. nach Umwandlung in kalibrierte Spannungen durch Spannungsteiler oder Bürden den Meßstellenumschaltern der Camac-Peripherie des Prozeßrechners zugeführt.

Die Hardwareausstattung des Prozeßrechners (PDP 11) umfaßt: Memory 16 k, Teletype, schneller Lochstreifenleser/Stanzer, Kassettenunit mit 2 Drives sowie eine Camac-Peripherie, bestehend aus:

- Clock, batteriegepuffert
- Stepmotor-Driver
- 2 Multiplexer à 15 Kanäle, 1 Analog-Digitalwandler im Direct Access Mode
- 2 Paar Multiplexer/Analog-Digitalwandler im Recycling Mode
- Camac-Dataway-Display
- Camac-PDP 11 Interface (Crate Controller)

4.2 Verarbeitung im Prozeßrechner

Alle Funktionen des Hardwaresystems werden softwaregesteuert, d.h. es wurde keine festverdrahtete Programmierung eingeführt. Die gesamte Software bildet ein Programmsystem mit folgenden Aufgaben:

A) Meßwertverarbeitung:

- Anwählen von Meßwerten und Setzen der Meßbereiche jeweils in Takten von 0.5 s, 1 s, 10 s und 60 s
- Anstoßen der im Recycling Mode arbeitenden Paare Multiplexer/ Analog-Digitalwandler (hier geben sich unabhängig vom Rechner die Module gegenseitig die Signale zum Fortschalten/Konvertieren. Somit wird die schnellstmögliche Abfragerate erzielt).
- Bedienung der nach Konversion erzeugten LAM's (PDP: Interrupts) und Übernehmen der entsprechenden Konversionsbitmuster
- Umwandlung der Bitmuster in DEC-Konvention
- Anwendung von Eichfaktoren oder -kurven
- In einigen Fällen: Zwischenrechnungen, Bereichsprüfungen, Korrekturen
- Aufsummieren der Werte und Erhöhen der Abfragezähler
- Berechnung der Flüsse und Varianzen, sonstige Rechnungen
- Mittelwertbildung (Intervall nach Wahl 10 min oder 60 min)
- Ausgabevorbereitung (Umwandlung je nach Ausgabemedium in ASCII oder Integer)
- Bilanzierung der Flüsse und des Strahlungsaustausches
- Ausgabe der Meßdaten in Protokollform auf dem gewünschten Ausgabegerät.

B) Sonstiges:

- Führung von Datum und Uhrzeit
- Netzausfall/Wiederstartbedienung mit Angabe der Zeiten Ausfall/Wiederstart, Richtigstellung der Softwarezeit
- Einlesen und Ausführen von Eingaben über Teletype für Meßbereiche, Ausgabemedium, Mittelwertbildungsintervall, Datum und Uhrzeit
- Verstellen von Gerätejustierungen durch Schrittmotor

- Neuinitialisierung des Systems bei mathematischen Fehlern (z.B. Overflow nach Behandlung eines infolge Sondendefektes unsinnigen Meßwertes)
- Wechsel des gewählten Ausgabegerätes bei Störungen oder Eintreten einer End-of-Medium-Bedingung
- Anzeige des Inhalts jeder gewünschten existierenden Adresse als Bitmuster während des Laufs (synchron mit dem 0.5 sec-Takt) und Speichern nach einem Halt.

Das Programmsystem (in PAL 11 Sprache) ist modular aufgebaut und besteht aus dem von der Firma Borer entwickelten Monitor KUMO, von diesem gesteuerten Programmen mit Unterprogrammen, einer zentralen Datei, einigen Drivers sowie den DEC-Softwarepaketen FPMP 11 zur mathematischen Behandlung und IOX bzw. RESMON (das entsprechende Ein/Ausgabeprogramm für Kassettenbetrieb).

Der Monitor KUMO setzt zur Anwendung eine Line Clock voraus, deren 20 msec-Interrupts den Grundtakt für die Abarbeitung zyklischer Programmlisten zu 0.02 min, 0.1 min, 1 min, 60 min, 1 h und 1 d ebenso liefert wie zur Behandlung von Delays mit Vielfachen von 0.1 sec und zur Datum-Uhrzeitführung. Er verfügt über verschiedene in einem getrennten Programmabschnitt zusammengefaßten Listen, in die zu steuernde Programme eingetragen werden, um gemäß den Bedingungen Priorität, Zyklus, Tageszeit, Delay, Wait, Suspend aufgerufen und abgearbeitet zu werden. Zusätzlich können als weiterer Programmabschnitt noch bis zu 8 verschiedene programmspezifische Testroutinen eingeschaltet werden, um über den Start eines Programmes zu entscheiden. Die Verbindung zu und von den Programmen wird über einen Programmkopf von 12 Worten hergestellt, der die Register, den Programm-Stack-Pointer, das Statuswort, ein Monitorstatuswort, die Entry-Adresse und zwei Parameter enthält. Für jedes Programm wird ein eigener Stack benötigt. Über Monitorkaufrufe können die Programme auf recht einfache Weise untereinander verkehren und Parameter austauschen, so daß ein hoher Grad an Flexibilität bei der Behandlung z.B. verschiedenartiger Meßwerte erzielt werden kann. Dabei steht allerdings dem Vorteil der einfachen Verfolgbarkeit von Programmabschnitten auf dem Papier der Nachteil gegenüber, daß die Zurückverfolgung von Aufrufen im Rechner nach einem Rechnerhalt, z.B. anlässlich eines mathematischen Fehlers äußerst umständlich wird.

So hat es sich als zeitsparender erwiesen, Meßwerte, die verdächtigt werden, zu Over- oder Underflow zu führen, über ein Camac-Display darzustellen und über den Prozeß bzw. die Zeit hinweg zu beobachten. Dabei ist wesentlich daß dies während des Laufs geschehen kann, da die Peripherie im Single-Step andere Werte liefern kann (z.B. verschiebt sich der Nullpunkt der Analog-Digitalwandler um bis zu drei Digits; meßtechnisch ist dies unbedeutend, kann aber bei Division zu unvorhergesehenen Effekten führen) oder äußerst selten zufällig erzeugte Werte liefert, die bei Einzelprüfung entsprechend unwahrscheinlich anzutreffen wären, aber nach einem Rechnerhalt im Camac-Display-Register gespeichert sind.

Entsprechend der Eignung des Monitors KUMO, den Zugriff der Programme zu den jeweils benötigten Dateien einheitlich abzuwickeln, sind alle Parameter, Eichkonstanten und -kurven, Rechenlisten und Softwareflaggen in einem zentralen Datensatz zusammengefaßt. Dabei sind Eichkurven und -konstanten doppelt vorhanden; sie werden in Integerform eingegeben (beim Generieren oder über das Switch-Register) und beim Starten des Systems durch eine Initialisierungsroutine in die benötigte Floating-Point-Darstellung umgewandelt. Somit beschränkt sich der Aufwand bei Umeichung infolge Sondenwechsels auf Ausrechnen der Stützpunkttabellen in Integerform und Eingabe dieser Werte; die jeweils laufende Version kann in Integerdarstellung kontrolliert werden.

Die gleiche Routine stößt auch die beiden im Recycling Mode arbeitenden Paare Multiplexer-/Analog-Digitalwandler an, deren Meßwerte von einem eigenen Programm bearbeitet werden.

Die Bearbeitung aller übrigen Meßwerte erfolgt durch zyklische Programme, die vom Monitor gestartet werden. Im einzelnen wird dadurch bearbeitet:

- Einlesen von Meßdaten
- Konversion in Floating-Point-Darstellung
- Aufruf von Umrechnungsfaktoren bzw. Eichkurven
- Umrechnung gemäß Faktoren bzw. Eich Tabelle
- Registrierung von Meßbereichsüberschreitungen
- Anwendung der Sprungschens Formel zur Berechnung der absoluten Feuchte
- Korrektur der SAT-Werte auf Temperatur- und Feuchteeinfluß

- Umrechnung der zwei horizontalen Windrichtungskonstanten (120°) in Polarkoordinaten (SAT)
- Berechnung des latenten und fühlbaren Wärmeflusses (TKM)
- Varianzberechnungen für die Windgeschwindigkeitskomponenten in horizontaler und vertikaler Richtung, die Windrichtungen und die mit dem Betrag der Windgeschwindigkeit gewichteten Windrichtungen (SAT)
- Ermittlung der wahrscheinlichsten Drehrichtung des Windes zwischen zwei Abfragen (Windfahnen)
- Varianzberechnung der Pegelschwankungen (ergibt Oberflächenrauigkeit)
- Aufsummierung für spätere Mittelwertbildung
- Mittelwertbildung
- Umwandlung aller Protokollwerte in Integer (für Lochstreifen/Cassette) bzw. ASCII (Teletype).

4.3 Prozeßrechner output

Die Ausgabe der Daten erfolgt in 10 min-Protokollen, die je nach Wahl der Betriebsart als lesbarer Teletypeausdruck oder auf Lochstreifen oder auf einem der beiden Kassettendrives erfolgen. Aus Betriebssicherheitsgründen werden die Protokolle (unabhängig von Teletypeausdrucken) im Kernspeicher zu einem 4h-Block angesammelt. Bei Kassettenaufzeichnung werden nur solche 24 Protokolle umfassenden Blöcke angegeben. Dies spart Band, da die bei jeder Ausgabe notwendigen Filegaps und -labels seltener verwendet werden müssen.

Als Standardausgabemittel wurde die Kassette gewählt, da sie sowohl die längste Aufzeichnungsdauer (4 Tage je Kassette) als auch die beste Störfreiheit und die beste Hardware/Softwareüberwachung aufweist. An die Schnittstellen der Überwachungsmodule von RESMON knüpft sich ein Auswahlprogramm, das je nach Fehlermeldung und Verbrauchszustand der zur Verfügung stehenden Medien die Betriebsart unabhängig von der Wahl so ändert, daß eine Aufzeichnung weiterhin erfolgt.

Die Aufzeichnungen werden gegebenenfalls in einem off-line Arbeitsgang ebenfalls auf Cassetten umgespeichert, da von diesem Medium auf den Anlagen der ADI (Abteilung Datenverarbeitung und Instrumentierung) einwandfrei auf die Großrechenanlage eingelesen werden kann.

5. Weiterverarbeitung der Daten

5.1 Vorbereitung der Daten für die Auswertung

5.1.1 Übertragung auf die Großrechenanlage

Die auf Deccassetten befindlichen Daten entsprechen bezüglich Spurlage und Formatierung der PDP- und Caps-11-Norm. Im Rechenzentrum der GfK befindet sich ebenfalls ein PDP-11-Rechner mit Cassetteneinheit, auf der die Daten gelesen werden können. Diese PDP-11 ist durch Datenleitung mit dem Großrechner IBM-370 on-line verbunden. Seitens der ADI wurde die zur Anpassung und Steuerung des Datentransfers notwendige Software erstellt. Durch Aufrufen eines Cassetten-file-name kann der zugehörige (darunter gespeicherte) Originaldatensatz über die PDP-11 in die IBM eingelesen werden. Das dafür notwendige Programm wurde von Frau Sack erstellt. Von der IBM aus besteht die Ausgabemöglichkeit auf alle gängigen Medien, wovon besonders Magnetband, Platte und Lochkarten in Frage kommen. Über die Wahl des jeweils zweckmäßigsten Mediums entscheiden Art und Umfang der geplanten Datenmanipulation. Die Speicherung großer Datenmengen eines längeren Zeitraums (Tage bis Jahre, z.B. sämtliche Originaldaten) erfolgt auf Magnetband. Vorteile: geringe Gefahr durch Zerstörung, Preiswürdigkeit, geringer Platzbedarf. 1 Magnetband faßt die gesamten Meßdaten eines Jahres. Nachteile: lange Zugriffszeiten. Gespeicherte Daten können nicht geändert werden.

Für die Handhabung mittlerer und großer Datenmengen (einige 100 k, das sind z.B. die Meßwerte eines Monats) eignet sich gut die Platte. Vorteile: schneller Zugriff, Daten einzeln änderbar. Nachteile: Plattenspeicher ist begrenzt, kann durch Maschinenfehler gelöscht werden.

Kleine Datenmengen, das sind einer oder mehrere der Meßwerte über einige Tage oder einzelne Meßgrößen während eines Monats, können zur Weiterverwendung auf Lochkarten gestanzt werden. Vorteile: Übersichtlichkeit, Änderung, Weglassen, Hinzunahme von Daten einfach. Nachteil: hoher Platzbedarf: Reihenfolge der Karten könnte durcheinander geraten. Der 2. Nachteil wiegt dann besonders schwer, wenn zu den gespeicherten Daten aus Platzgründen keine Identifizierung mitgespeichert werden kann. Um von diesem Nachteil frei zu werden, wurde folgende Konvention getroffen: jede Karte beginnt mit einer Kennzahl folgenden Aussehens: mmdd.hhm_zkk. Dabei bedeuten: mm Zahl des Monats (Januar 1975 = 1, Februar 1975 = 2, ... Januar 1976 = 13, ...); dd Tag im Monat; hh Stunde; m_z Zehnerziffer der Minuten der Protokollausgabe des ersten der folgenden Meßwerte;

kk Nummer des Meßwertes im Protokoll ($1 \leq kk \leq 50$). Anschließend folgen 14 bis 17 Werte des betreffenden Meßwertes je nach der Zahl der benötigten Stellen.

Der beschriebene Aufbau der Kennzahl gewährleistet, daß zur chronologischen Ordnung steigende Kennzahlen gehören und im Klartext lesbar bleiben. Entsprechend einfach konnte damit ein Sortierprogramm geschrieben werden, das aus einem beliebigen Kartenstapel den oder die gewünschten Meßgrößen in chronologischer Reihenfolge in den Kernspeicher einsortiert.

Die Cassetten enthalten ein oder mehrere Datenfiles, von denen jeder aus 10-500, häufig 24, Protokollen besteht. Jedes Protokoll umfaßt 50 Worte zu 2 Bytes à 8 bit. Dazwischen befinden sich in regelmäßigen Abständen Prüfnummern, entsprechend der Dec-Konvention, die während des Auslesens zur Entdeckung eventueller Lesefehler verwendet, aber nicht übertragen werden.

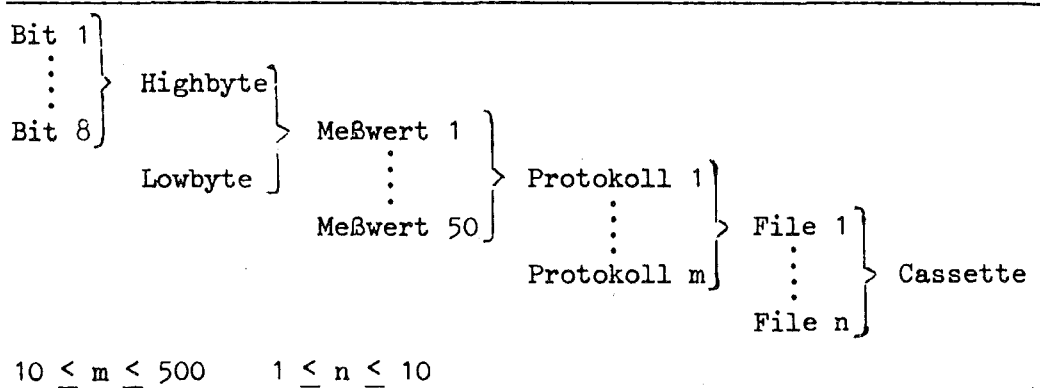
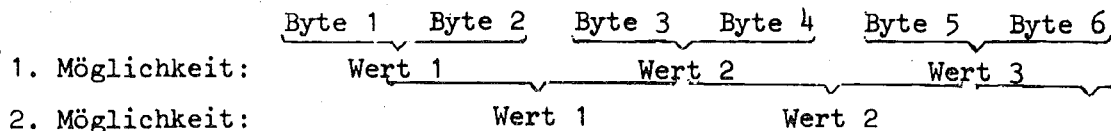


Tabelle 6 Datenstruktur auf der Cassette

Bei der Übertragung werden alle bits bereits in richtiger Weise zu Bytes zusammengefaßt. Jedoch ist noch unbekannt, welche der beiden Möglichkeiten von Bytekombinationen als Meßwerte zu interpretieren sind.



Durch die Art der Speicherung an der Meßstelle ist ein einheitliches Muster nicht möglich. Ferner kann nicht davon ausgegangen werden, daß das Muster vollkommen einheitlich innerhalb des gesamten files durchgehalten wird. Zusätzlich ist damit zu rechnen, daß Protokolle teilweise bruchstückhaft existieren aus Gründen, die mit der Bandlängenausnutzung der Cassette zusammenhängen.

Bytes	Wort	Bedeutung	Abkürzung	Einheit	Faktor
1, 2	1	Tag			
3, 4	2	Monat			
5, 6	3	Jahr			
7, 8	4	Stunde			
9, 10	5	Minute			
11, 12	6	Sekunde			
13, 14	7	Sichtweite	SW	m	0,1
15, 16	8	Luftdruck	LD	Torr	10
17, 18	9	Starkregen, Anzahl der Minuten	SR		1
19, 20	10	Windrichtung in 0,8m, Zeitmittel	WR1T	Grad	10
21, 22	11	Windrichtung in 0,8m, Vektormittel	WR1V	Grad	10
23, 24	12	Windrichtung in 40 m, Zeitmittel	WR2T	Grad	10
25, 26	13	Windrichtung in 40 m, Vektormittel	WR2V	Grad	10
27, 28	14	Windrichtung in 2 m, SAT, Zeitmittel	WHT	Grad	10
29, 30	15	Windrichtung in 2 m, SAT, Vektormittel	WHV	Grad	10
31, 32	16	Windrichtung in 2 m, SAT, Varianz		Grad	1
33, 34	17	Windgeschwindigkeit in 0,8m	WG1	m/s	100
35, 36	18	Windgeschwindigkeit in 8 m	WG2	m/s	100
36, 38	19	Windgeschwindigkeit in 40 m	WG3	m/s	100
39, 40	20	Windgeschwindigkeit in 2 m, SAT	WH	m/s	100
41, 42	21	Windgeschwindigkeit in 2 m, SAT, Varianz		m/s	100
43, 44	22	Windgeschwindigkeit in 2m,SAT,Zahl der Vollausschläge			1
45, 46	23	Lufttemperatur in 0,8m	TL1	Grad	100
47, 48	24	Lufttemperatur in 8 m	TL2	Grad	100
49, 50	25	Lufttemperatur in 40 m	TL3	Grad	100
51, 52	26	Lufttemperatur in 2m, trockener Thermistor	TT	Grad	100
53, 54	27	Lufttemperatur in 2m, SAT	TS	Grad	100
55, 56	28	Lufttemperatur in 2m, SAT, Varianz		Grad	100
57, 58	29	Lufttemperatur in 2m, SAT, Zahl der Vollausschläge			1
59, 60	30	Luftfeuchte in 0,8m	FL1	Torr	100
61, 62	31	Luftfeuchte in 8 m	FL2	Torr	100
63, 64	32	Luftfeuchte in 40 m	FL3	Torr	100
65, 66	33	Luftfeuchte in 2 m	FS	Torr	100
67, 68	34	Windgeschwindigkeit vertikal in 2m	WV	m/s	100
69, 70	35	Windgeschwindigkeit vertikal in 2m, Varianz		m/s	100
71, 72	36	Windgeschwindigkeit vertikal in 2m,Zahl d. Vollausschl.			1
73, 74	37	Wassertemperatur	WT1	Grad	100
75, 76	38	Wassertemperatur	WT2	Grad	100
77, 78	39	Wassertemperatur	WT3	Grad	100
79, 80	40	Wassertemperatur	WT4	Grad	100
81, 82	41	Pegelstand	PS	m	100
83, 84	42	Oberflächenströmung	OS	m/s	100
85, 86	43	Durchsatz	DS	m ³ /s	1
87, 88	44	Latenter Wärmeaustausch	VERD	Watt/m ²	1000
89, 90	45	Fühlbarer Wärmeaustausch	KONV	Watt/m ²	1000
91, 92	46	Strahlungsbilanz	SB	Watt/m ²	1000
93, 94	47	Globalstrahlung	GS	Watt/m ²	1000
95, 96	48	Gelöster Sauerstoff	O2W	mg/l	100
97, 98	49	Oberflächenrauigkeit	OR=PS	m	1000
99,100	50	Feuchter Thermistor in 2m	TF	Grad	1000

Tab. 7 Protokollaufbau

5.1.2. Identifikationen

Zuerst müssen die Bytes richtig zu Wörtern zusammengefaßt werden, dann die Wörter zu Protokollen. Beides zugleich wird durch die Erkennung des Datums bewerkstelligt. Bevor dieses Programm erläutert wird, soll der Protokollaufbau erklärt werden (siehe Tabelle 7).

Die 16 bits $b_1 \dots b_{16}$ eines Wortes bedeuten folgende ganze, positive oder negative Zahl:

$$\text{Zahlenwert} = \sum_{i=1}^{15} b_i \cdot 2^{i-1} - b_{16} \cdot 2^{16} \quad (\text{Darstellung negativer Dualzahlen im "Zweierkomplement"})$$

Die aus der Tabelle 7 ersichtlichen Faktoren dienen dazu, den Wertevorrat der jeweiligen Meßgröße auf den Bereich ± 32767 eines Wortes ohne Verlust an Genauigkeit abzubilden. Werte ≤ 255 benötigen max. 8 bits, d.h. das Highbyte ist Null. Die ersten 6 Bytes eines Protokolls haben also folgendes Aussehen:

	Tag		Monat		Jahr (2 Endziffern)	Stunden	
$b_1=0$	$1 \leq b_2 \leq 31$	$b_3=0$	$1 \leq b_4 \leq 12$	$b_5=0$	$b_6=75$ bzw. 76	$b_7=0$	$0 \leq b_8 < 23$

Ein Suchprogramm findet innerhalb des in den Kernspeicher eingelesenen Datensatzes sämtliche Konstellationen von Bytes, die obigen 6 Bedingungen genügen. Zu jedem Satz solcher 6 Werte werden die folgenden 94 hinzugenommen und als 1 Protokoll interpretiert. Solche Protokolle würden zusätzlich zu den richtigen erzeugt, so daß sie zusätzlich auftreten und anhand anderer Kriterien wieder aussortiert werden können. In der Praxis trat dieser Fall jedoch nur einmal je 10.000 Protokolle auf, so daß obige einfache Kriterien als hinreichend gut zu bezeichnen sind. Würde man noch b_7 und b_8 (in Klammern gezeichnet, Stunde) in die Prüfung hineinbeziehen, so wäre seit Beginn der regelmäßigen Datenaufzeichnung (seit November 1975) kein Protokoll aus falschen Bytes zusammengestellt worden.

5.1.3 Ordnung

Für die spätere Auswertung der Daten ist es am einfachsten, wenn die Daten sich in chronologischer Reihenfolge befinden. Jeder einzelne Cassettenfile hat in sich schon etwa diese Ordnung. Sein Name gibt über die Zeit des ersten enthaltenen Protokolls Auskunft. Somit wird schon eine weitgehende Ordnung auf Magnetband dadurch erzielt, daß die Cassettenfiles in richtiger Reihenfolge ausgewählt und überspielt werden. Diese von Hand vorzunehmende Auswahl ist nicht zu mühsam, da es nur etwa 9

Files pro Monat gibt. Ca. 400 Protokolle (etwa 1 Monatszeitraum) werden zu einem Bandfile vereinigt, dessen Name aus der Uhrzeit des 1. Protokolls gebildet ist. Die Ordnung ist noch gestört, weil z.B. mehrere Protokolle auf dieselbe Uhrzeit lauten oder Rechnerstillstand eintrat usw. Die Gründe für die Störungen können vielfach sein, entsprechend sollten die Sortierungen hier nicht automatisch getroffen werden (durch Programm), sondern durch Eingriff unter Berücksichtigung des Stationsbuches.

Als Entscheidungshilfe wurde ein Programm erstellt, daß die Uhrzeiten aller Protokolle ausdrückt. Der Ausdruck erfolgt in einem festem Schema, indem jeweils 24 Uhrzeiten eine Zeile, 6 Zeilen einen Tag bilden. Die 1. Zeile läuft also von 0⁰⁰ bis 3⁵⁰, die zweite von 4⁰⁰ bis 7⁵⁰ usw. Jede aufgefundene Uhrzeit wird vom Programm an den ihr zukommenden Platz einer Zeile gedruckt. Ist die Uhrzeit nicht der reguläre Nachfolger der vorausgegangenen, wird zum Ausdruck eine neue Zeile eröffnet.

Dieses Programm erzeugt also eine regelmäßige Uhrzeitmatrix, wenn die zugrundeliegende Protokollsammlung lückenlos und chronologisch geordnet war. Bei jeder Abweichung tritt ein Zeilenversatz sowie eine Verschiebung auf. So können sehr augenfällig und rasch Anfang, Ende, Vollständigkeit und Reihenfolge einer gespeicherten Protokollsammlung überblickt werden.

Ein weiteres Sortierprogramm wurde geschrieben, das eine oder mehrere Meßgrößen aus einem Zeitraum chronologisch im Kernspeicher als Vektoren anordnet und diese gleichzeitig mit Korrekturen versehen kann (Eichfaktoren, Umwandlungen). Die mit diesem Programm zur Verfügung gestellten Daten dienen zur Auswertung bzw. Speicherung auf ein gewünschtes Medium. Unstimmigkeiten von Datum und Uhrzeit, die vorher aus der Matrix schon ersichtlich waren, müssen durch individuelle Korrekturen, die in das Sortierprogramm eingefügt werden, beseitigt werden. Es ist natürlich sinnvoll, eine bestimmte sortierte Datenmenge erneut wieder auf Band zu speichern. Wegen des damit verbundenen technischen Aufwands geschieht dies i.a. erst, wenn auch alle bekannten Korrekturen erfolgt sind.

5.1.4 Korrekturen

Fehlerhafte Werte gliedern sich in zwei Sorten: von vornherein bekannte Fehler, meist durch Meßwerterfassung bedingt, bzw. bei der Datenerfassung verfälschte.

Systematische Fehler

Diese Fehler sind im allgemeinen schon bei der Erfassung bekannt und sind im Stationsbuch verzeichnet. Ein typisches Beispiel stellt die Temperaturmessung (Wasser, Luft) mit Hilfe von Pt-100-Fühlern dar. Die Temperatur-Widerstandskennlinie wird wegen Herstellungstoleranzen bestenfalls auf 1/3 K eingehalten. Die Vorauswertung beruht auf der exakten Kennlinie, nach der auch die Verstärker geeicht werden. Ein direkter Vergleich des Wertes mit dem eines Präzisionsquecksilberthermometers führt zu einer additiven Konstante k ($|k| < 1/3 \text{ K}$), deren Berücksichtigung die absolute Temperaturmessung auf 1/50 K präzisiert. Solche Art Korrekturen wird in das Sortierprogramm eingebaut. Anzahl und Kompliziertheit sind keinen Beschränkungen unterworfen.

Sonstige Fehler

Unerwartete, erst aus den Protokollen ersichtliche Fehler können z.B. durch Sondenversagen (allmähliches oder sprunghaftes) oder Camacversagen hervorgerufen worden sein. Der Nachweis erfolgt mit Plausibilitätsbetrachtungen, der meist nicht völlig eindeutig ausfällt. Durch Programme kann somit wiederum nur eine Entscheidungshilfe gegeben werden, die Entscheidung selbst muß individuell erfolgen.

Als Hilfe werden erstellt:

- Gesamtausdruck aller Protokolle, Werte mit richtig gesetzten Kommas.
- Graphische Darstellung von max. 6 verschiedenen Meßgrößen während eines Monats. Die Kurven werden geeignet gegeneinander verschoben, um besonders bei sehr ähnlich verlaufenden Kurven deren Trennung zu ermöglichen. Aus den diskreten Punkten wird eine geschlossene Linie erzeugt, indem in der Umgebung jedes Meßpunktes ein Stück der Parabel gezeichnet wird, die durch ihn selbst sowie seine beiden Nachbarn gegeben ist. Dieses Verfahren bietet gegenüber Einzelpunkt Darstellungen den Vorteil, daß weitabliegende einzelne Werte und der Gesamtverlauf besser beurteilt werden können.

- Nochmaliger Ausdruck von Meßwerten, die anhand bestimmter Kriterien auf Glaubwürdigkeit geprüft werden können, in ähnlicher Form wie der Gesamtausdruck. Bei Vermutung auf Fehler werden sie durch Sternchen gekennzeichnet. Die folgenden Größen und Kriterien, die sich aus meteorologischen und hydrologischen Erfahrungen ableiten, sind:

LD: Sprung $> 0,2$ Torr/10 min. Zugleich Hinweis auf Hardware-Fehler aller anderen vom gleichen System erfaßten Werte.

WR: Identischer Wert in drei aufeinanderfolgenden Protokollen.

WG: $WG_{40m} + 2 \text{ m/s} < WG_{8m}$

$WG_{8m} + 2 \text{ m/s} < WG_{0,8 m}$

$WG_{0,8/8/40m} < 0,5 \text{ m/s}$ in drei aufeinanderfolgenden Protokollen

TL: $|\Delta TL_{ij}| \geq 2K$

$|\Delta TL/\Delta t| \geq 0,5 \text{ K/10 min}$

FL: $|\Delta FL_{ij}/FL1| \geq 15 \%$

$|\Delta FL/\Delta t| \geq 0,5 \text{ Torr/10 min}$

WT: $|\Delta WT/\Delta t| \geq 0,03 \text{ K/10 min}$

$|\Delta WT_{ij}| \geq 1 \text{ K}$

Psychrometer: $TT - TF < 0,3 \text{ K}$

$TT - TF > 8 \text{ K}$

Alle drei Hilfen dienen zur Aufstellung eines bereinigten Datensatzes. Er enthält die Protokolle streng chronologisch und genau 50 Werte je Protokoll wie auch die ursprünglichen. Alle Werte werden zunächst als vertrauenswürdige Werte angesehen, außer wenn sie aus 9999 bestehen. Dieser Wert, der regulär von keinem Meßwert angenommen werden kann, wird bei Auswertungen automatisch ignoriert. Der bereinigte Datensatz kann immer noch fehlerhafte Werte enthalten, die von keinem der aufgeführten Kriterien erfaßt werden. Ein Sondenversagen, das zu allmählich wachsenden Fehlern führt, kann z.B. längere Zeit unentdeckt bleiben. Eine Sichtkontrolle ist in jedem Falle notwendig. Es gibt prinzipiell kein Verfahren, jeden falschen Wert automatisch zu finden. Eine Verschärfung der Kriterien führt zwar zur Entdeckung weiterer falscher Werte, jedoch steigt auch die Zahl irrtümlich für falsch gehaltenen Werte. Die aufgeführten Kriterien stellen einen Kompromiß dar.

5.2 Geplante Auswertungen

Der zeitliche Verlauf jeder Meßgröße kommt durch die Überlagerung verschiedener Effekte zustande, die einzeln herausgearbeitet werden sollen. Deswegen ist jede Meßgröße kurzfristigen (min-Bereich), mittelfristigen (h-Bereich), Tages- und Langzeitschwankungen ausgesetzt. Jeder Effekt hat bei den verschiedenen Meßgrößen verschiedene Bedeutung, die im Einzelfall interpretiert werden muß. Die Effekte sind in der Reihenfolge ihrer Schnelligkeit:

- Statistische Fluktuationen, beschrieben z.B. durch die Standardabweichung von einer geeignet zu wählenden "glatten" Funktion. Ein gewisser Bruchteil ist dabei auf Streuungen bei der Meßwertaufnahme zurückzuführen, der Rest auf die Meßgröße selbst. Bei der Wassertemperatur werden diese Fluktuationen z.B. als Maß für die Inhomogenität der örtlichen Temperaturverteilung im Rhein aufgefaßt. Daraus ergibt sich dann ein Anhaltspunkt für die Repräsentanz der Stationswerte.
- Kurzfristige Trends (einige h): Nach Abtrennung der Fluktuationen und längerfristiger Trends durch je nach Meßgröße zu optimierende mathematische Methoden soll eine möglichst hohe zeitliche Auflösung desjenigen Verlaufes gewonnen werden, der etwa durch Mittelung der Werte mehrerer benachbarter Stationen entsteht. Der zeitliche Verlauf dieser Trends der Wassertemperatur entsprechen z.B. unmittelbar die vorangegangenen, durch Einleitungen oder meteorologische Verhältnisse verursachten Wärme Flüsse.
- Tagesgänge. Die geeignete Methode zur Heraushebung von Tagesgängen muß für jeden Meßwert gesondert ermittelt werden, indem die schon aufgeführten schnelleren Schwankungen sowie auch die langsameren subtrahiert werden. Zwischen den Tagesgängen verschiedener, den Wärmetransport beeinflussender Größen und denen der Wärme Flüsse sollen die Korrelationen untersucht werden. Als Ergebnis wird der formelmäßige Zusammenhang zwischen diesen Größen in Abhängigkeit von der Tageszeit erwartet und damit Hinweise dafür, welche Größen einen großen Einfluß haben und daher auch bei einfacheren Stationen gemessen werden sollen, um den Wärmetransport zu bestimmen.
- Langfristige Trends (Tage bis Monate). Die Herausarbeitung langfristiger Trends läßt die den Tagesgängen überlagerten Tendenzen erkennen. Während

zeitlich konstanter Wetterlagen lassen sich die aufgestellten Austauschformeln auf langfristige Genauigkeit in Bezug auf Temperaturprognosen überprüfen.

Auf der Grundlage der besprochenen Einzeleffekte sollen die Wärmeflüsse und die sie bestimmenden Größen für jedes 10 min-Protokoll als Punkt im n-dimensionalen Raum dargestellt werden. Daraus resultieren:

- Statistische Aussagen über die Häufigkeit verschiedener Wetterklassen und ihres Einflusses auf Wärmeaustausch und Sichtweite.
- Auffinden funktionaler Zusammenhänge innerhalb bestimmter Wetterklassen.
- Ermittlung der minimal erforderlichen Sätze von Eingangsdaten zur Erzielung vorgegebener Genauigkeitsgrenzen.
- Ermittlung der erforderlichen Eingangsdaten zur Berechnung der Wärme flüsse größerer Flußabschnitte.
- Ermittlung der bestgeeigneten Bezugstemperatur, d.h. Bestimmung der Gleichgewichtstemperatur bzw. Herleitung einer sinnvollen "natürlichen Temperatur" für den Bereich der Meßstelle.

In Abhängigkeit von den Ergebnissen werden weitere Untersuchungen durchgeführt, wobei auch an anderen Stellen des Oberrheintales gemessene Daten miteinbezogen werden.

6. Typische Meßergebnisse zum Wärmeaustausch

6.1 Darstellung ausgewählter Meßergebnisse

Die baulichen Einrichtungen der Meßstation Rheinhausen waren im Juni 1974 erstellt. Die Installation des Meßwertgeber- und Erfassungssystems war im April 1975 im wesentlichen abgeschlossen. Softwareerstellung und Probebetrieb der Station, verbunden mit einigen Nachbesserungen, dauerten bis November 1975. Ab dieser Zeit wurden die Meßdaten im Rahmen der technischen Zuverlässigkeit kontinuierlich aufgezeichnet.

Als typisches Beispiel einer graphischen Darstellung der auf Band gespeicherten Protokolldaten mit Hilfe der Großrechenanlage sei Abb. 7 hier wiedergegeben. Ausgewählt wurde die Zeit vom 7.- 13.5.1976, enthaltend einen unkontrollierten Fehlerhalt des Prozeßrechners von ca. 11 h Dauer und eine kurze Testphase von ca. 1 h, während der z.T. simulierte Meßwerte eingespielt wurden. Dargestellt wurden jeweils eine

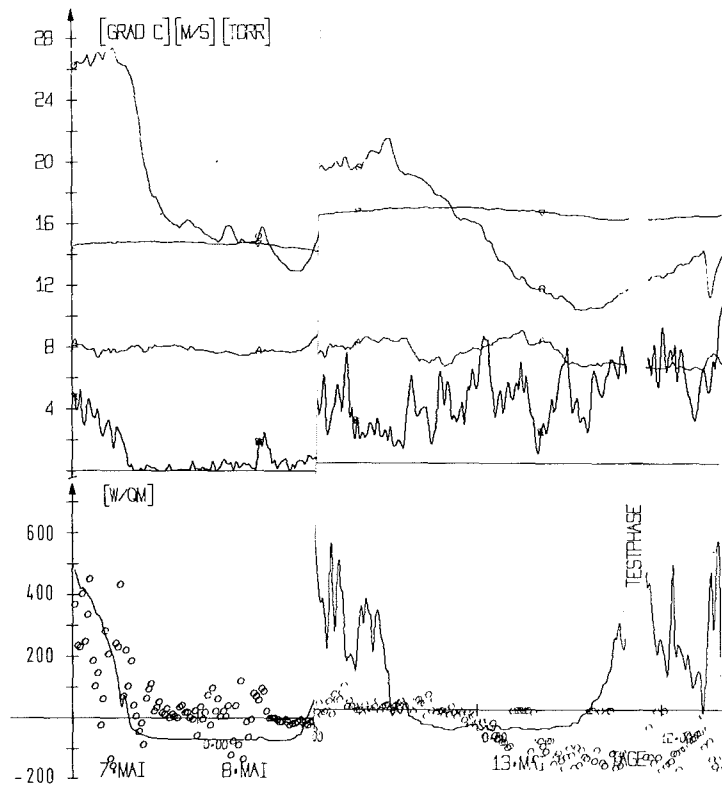


Abb. 7:

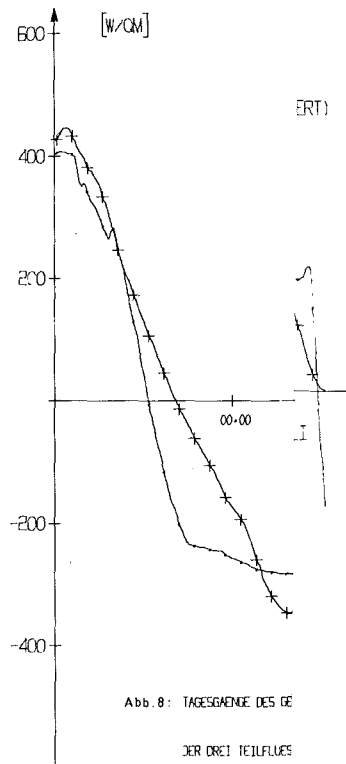


Abb. 8: TAGESGENEHE DES GE
DER OREI REIFLUES

Abb.

Wasser-, Lufttemperatur, -feuchte, Windgeschwindigkeit, Strahlungsbilanz und on-line berechnete Konvektion nach der Turbulenz-Korrelations-Methode. Deutlich erkennbar sind hier Fehlmessungen infolge Niederschlags in der Zeit vom 7. - 9.5.1976.

6.2 Vergleich von Meßergebnissen mit heute verwendeten Formelansätzen

Zu einer eingehenden Untersuchung wurde das Zeitintervall vom 15.-20.7.76 ausgewählt. In dieser Spanne herrschte eine räumlich und zeitlich sehr homogene Schönwetterlage mit besonders hohen Wärmeflüssen. Diese Situation erlaubte es, Einflüsse auf die Wassertemperatur wie Temperaturschwankungen am Oberlauf und geringfügig wechselnde thermische Einleitungen gegenüber den drei Komponenten des atmosphärischen Austausches zu vernachlässigen. Den gemessenen Schwankungen der Wassertemperatur entspricht ein Wärmeaustausch aufgrund der Wärmekapazität des Wassers. Unter der Voraussetzung, daß der zeitliche Verlauf der Wassertemperatur allein durch die drei Austauschmechanismen Strahlungsbilanz, Verdunstung und Konvektion erfolgt, kann der damit verbundene Wärmefluß Q je Flächen- und Zeiteinheit ausgedrückt werden:

$$Q = \frac{\Delta T}{\Delta t} \rho_w \cdot c_w \cdot f = SB + \phi_L + \phi_F$$

ρ_w = Dichte des Wassers

c_w = spez. Wärme des Wassers

f = mittlere Wassertiefe des Rheins oberhalb der Meßstelle

In einem ersten Ansatz soll versucht werden, jede der beiden Gleichungsseiten graphisch als Funktion der Zeit darzustellen. Dabei gehen SB und $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ als Meßgrößen ein, f wird aus Unterlagen des Wasser- und Schiffsamtes abgeschätzt. Bezüglich Verdunstung und Konvektion wird, wie in der Literatur allgemein üblich, die Gültigkeit des Bowen-Verhältnisses angenommen. D.h. die beiden Flüsse sind durch die Ansätze zu beschreiben:

$$\phi_L = A \cdot (q_L - q_S) \cdot u(v)$$

$$\phi_F = B (\Theta_L - \Theta_w) \cdot u(v)$$

A, B Stoffkonstanten

v = Windgeschwindigkeit

$u(v)$ = Windabhängigkeit des Austausches

Für v wurde der Betrag der Relativgeschwindigkeit zwischen mittlerer Oberflächenströmung und der Windgeschwindigkeit in 0,8 m Höhe eingesetzt.

$u(v)$ wurde dem Trabertschen Ansatz entnommen, d.h. $u(v) = C \cdot \sqrt{v}$. q_L , Θ_L und Θ_W sind Meßwerte, q_S wurde aus Θ_W berechnet. $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ kann nicht direkt aus Temperaturdifferenzen zweier aufeinanderfolgender Protokolle berechnet werden. T ändert sich während eines Protokolls im allgemeinen weniger als dem Digitalisierungsfehler der Temperatur (0,01 K) entspricht. Daher wurde eine geeignete Glättung von 4 h effektiver Mittelungsdauer gewählt.

Ziel dieser Darstellung war es festzustellen, wie detailliert die ausgeprägten und verschiedenen Tagesgänge der Wassertemperatur durch die eingetragenen Wärmeflüsse wiedergegeben werden können. Der Vergleich ergab klare Ähnlichkeiten bezüglich Frequenz, Grobstruktur und Flankensteilheiten. Jedoch wies die aus der Wassertemperaturänderung berechnete Kurve eine systematische Nacheilung von 6 Protokollen $\hat{=}$ 1 h während der 5 Tage auf. Diese Nacheilung wurde in der Abb. 8 durch Verschiebung der Kurve ausgeglichen, so daß zusammengehörige Strukturen genauer übereinanderliegen.

In der Abb. 8 (a und b) ist die Summe der drei Wärmeflüsse, wie sie gemessen bzw. aus Meßwerten berechnet werden, in ihrem zeitlichen Ablauf durch die Kurve mit der \cdots -Kennzeichnung dargestellt, der aus der Wassertemperatur berechnete und um 1 h vorverlegte Wärmefluß durch die Kurve mit der $+---+$ -Kennzeichnung.

Der Gesamtverlauf beider Kurven zeigt gute Übereinstimmung unabhängig von Tageszeit und allgemeinem Trend. Zeitweise bleiben jedoch auch Abweichungen größeren Betrags bestehen, die die Unvollständigkeit des gewählten Ansatzes zeigen. Die Analyse der Abweichungen wird in genaueren Untersuchungen zur Klärung, welche Formeln für die Wärmeaustausch richtig sind, beitragen.

7. Bedeutung der erwarteten Untersuchungsergebnisse für Fragen der Abwärme- einleitung in Fließgewässer

In Abschnitt 1 und 2 wurden die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Abwärmeanfall und Abwärmeableitung angesprochen. Diese Zusammenhänge führen fast zwangsläufig auf das Problem der thermischen Grenzbelastung der Gewässer mit ihren Konsequenzen für Wasserqualität und Nebelbildung. Weniger diskutiert wird heute dagegen der wirtschaftliche Aspekt der Nutzung von Oberflächengewässern für Kühlzwecke. Wenn durch eine klare und eindeutige Begründung vorwiegend auf der Basis biologisch/ökologischer Argumente festliegt, welche Wärmemengen einem Fluß oder sonstigem Bereich von Oberflächengewässern zugemutet werden kann, so bleibt die Frage bestehen, wie diese für einen Fluß oder ein Flußsystem integral festgelegte, aus der begrenzten Temperaturerhöhung sich errechnende Wärmemenge optimal eingeleitet werden kann. Diese Optimierung wird insbesondere dann komplex, wenn mehrere große Wärmeeinleiter (Kraftwerke) am gleichen Fluß existieren. Sie wird Kühlregie genannt.

In [18] wurden erste einfache Überlegungen für den Oberrhein vorgestellt. Hier wurde als Optimierungskriterium der Kühlregie die Maximierung der Nettoleistung einer Kraftwerkskette vorgeschlagen, wobei in Abhängigkeit des jeweiligen Rückkühlbetriebes unterschiedlich hohe Gesamtnettotoleistungen der gesamten Kraftwerkskette erreicht werden können, ohne daß die festgelegten Temperaturgrenzwerte im Gewässer überschritten werden [18]. Neben der Überlegung, daß durch eine dynamische Kühlregie grundsätzlich Energieeinsparungen möglich sind, ergibt sich hier aber auch der enge Zusammenhang zum Wärmeaufnahmevermögen des Gewässers, das von meteorologisch-hydrologischen Faktoren abhängig ist. Das bedeutet, daß eine Kühlregie erst dann ihre Wirksamkeit für die Reduktion des Abwärmeanfalls und/oder für die Reduktion der Stromerzeugungskosten erreichen kann, wenn der Wärmeaustausch Gewässer-Atmosphäre (als maßgeblicher Faktor bei der Bestimmung des Wärmeaufnahmevermögens des Gewässers) als Funktion jahreszeitlicher hydrologischer und meteorologischer Bedingungen bekannt ist. Dies gilt auch dann, wenn eine "statische" Kühlregie, d.h. die konstante Aufteilung der zur Verfügung stehenden Temperaturspanne auf mehrere Einleiter, angewendet wird.

Weiterhin ist die Frage bedeutsam, wie sich warmes Wasser nach seiner Einleitung im Fluß verteilt. Da im Regelfall davon ausgegangen werden muß, daß sogenannte Warmwasserfahnen auftreten, ist die Frage zu beantworten, welche Temperaturen im Unterlauf der Einleitung wirklich auftreten. Bisher wird in Wärmelastplänen und Kühlregiemodellen von der homothermen Durchmischung unterhalb einer kurzen Durchmischungszone nahe dem Einleitungsort ausgegangen. Warmwasserfahnen (mit relativ höherer Temperatur als die umgebenden Zonen) dürfen jedoch Bereiche höheren Wärmeaustauschs Gewässer-Atmosphäre darstellen, d.h. Bereiche darstellen, die einem höheren Wärmeaufnahmevermögen entsprechen. Andererseits sind die relativ weniger erwärmten Zonen außerhalb der Warmwasserfahnen Bereiche, die diesen Vorteil entsprechend reduzieren. Das Meßprogramm in Rheinhausen wird hier ebenfalls Klärung bringen, zu welchen Fehlern die bisherige Annahme der homothermen Durchmischung, d.h. der Vernachlässigung von Warmwasserfahnen für Wärmelastpläne etc., führt.

Neben dem in der Einleitung schon erwähnten Beitrag zu den Grundlagen des Wärmeaustauschs zwischen Fließgewässern und Atmosphäre wird das Meßprogramm in Rheinhausen insbesondere zur Frage der Nebelbildung über dem Rhein Meßdaten liefern. Bisher existieren nur eine begrenzte Zahl von Augenbeobachtungen, die meist älteren Datums sind [19]. Ganzjährige Messungen direkt über der Wasseroberfläche sowohl im unbelasteten als auch im thermisch belasteten Zustand werden hier also erstmals zur Verfügung stehen.

Schließlich ist zu erwähnen, daß im Meßprogramm auch der O_2 -Gehalt des Wassers laufend gemessen wird. Zusammen mit den laufenden Wassertemperaturmessungen wird sich hierdurch die Möglichkeit ergeben, Modelle zum O_2 -Verhalten im Rhein [20] als Funktion der biochemischen Prozesse sowie der Wassertemperatur anhand von Meßdaten zu überprüfen.

Insgesamt ist davon auszugehen, daß das mit der Meßstation in Rheinhausen durchgeführte Untersuchungsprogramm eine Reihe von Daten und Informationen liefern wird, die zur Klärung noch offener Fragen im Bereich der Auswirkungen von Abwärme auf die Umwelt beitragen.

8. Literatur

- [1] W. Schikarski, "Abwärme und ihre Auswirkungen, Bericht über ein Seminar an der Universität Stuttgart", El.-Wirtschaft Jg. 75 (1976), Heft 25, S. 970-972
- [2] P. Jansen, W. Schikarski, H. Stehfest, "Beitrag zur Analyse der zulässigen Kraftwerksbelegung des Rheins im Hinblick auf die thermische Belastung", KFK-1511 (1974)
- [3] Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern (Wärmelastplan Rhein), Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. Karlsruhe: Landesstelle für Gewässerkunde 1971
- [4] W. Schikarski, "Die voraussichtlichen Auswirkungen des Energieverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland auf die Umwelt", El.-Wirtschaft Jg. 73 (1974), Heft 19, S. 535
- [5] R. Trabert, "Neuere Beobachtungen über Verdampfungsgeschwindigkeit", Meteorologische Zeitschrift 13, S. 261 (1896)
- [6] F. Günneberg, "The Total Heat-Exchange Coefficient of Surface Waters", IAEA-Symp. Env. Effects on Cooling Systems at Nuclear Power Plants, Oslo Aug. 26-30 (1974), Wien: IAEA 1975
- [7] C. Zimmermann, H. Kobus, P. Geldner (Herausgeber), "Wärmeeinleitung in Strömungen", Verlag Resch, Gräfelfing (1975)
- [8] L. Prandtl, "Meteorologische Anwendung der Strömungslehre", Beitr. Phys. fr. Atmos. 19, 188-202 (1932)
- [9] A.S. Monin, A.M. Obuchow, "Fundamentale Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Vermischung in der bodennahen Schicht der Atmosphäre. Übers. aus d. Russ. in H. Goering (Hrsg.) Sammelband zur statist. Theorie der Turbulenz, Berlin, 1958, 199-226 (1954)
- [10] J.L. Umley, H.A. Panofsky, "The Structure of Atmospheric Turbulence", Interscience, New York, S. 239 (1964)
- [11] C.W. Thornthwaite, B. Holzmann, "The Determination of Evaporation from Land and Water Surface", Mon. Wea. Rev. 67, 4 (1939)

- [12] R.B. Montgomery, "Observation of Vertical Humidity Distribution above the Ocean Surface and their Relation to Evaporation", Pap. Phys. Ocean, Met. Mass. Inst. Techn. Woods Hole Ocean Inst. 7, No. 4 (1940)
- [13] I.S. Bowen, "The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface", Phys. Rev. 27, 779 (1926)
- [14] W.K. Lewis, W.C. Whitman, "Principles of Gas Absorption", Industrial and Engineering Chemistry, Jg. 17, 1215 (1924)
- [15] R.B. Montgomery, "Vertical Eddy Flux of Heat in the Atmosphere", J. Meteor. 5, 265-274 (1948)
- [16] L.G. Elagina, "Measurement of the Frequency Spectra of Pulsations in Absolute Humidity in the near Ground Layer of the Atmosphere", Izv. Akad. Nauk SSR, Ser. Geogr. Geofiz., No. 12, 1859 (1963)
- [17] J.C. Kaimal, J.A. Buzinger, "Preliminary Results Obtained with a Sonic Anemometer-Thermometer", Cont. No. 74, Dep. of Atm. Sci. Univ. of Wash., Seattle (1962)
- [18] W. Kinzelbach, "Kühlregie am Oberrhein", Brennstoff-Wärme-Kraft 28, 393 (1976)
- [19] "Allgemeine Abwärmeprobleme bei Wärmekraftwerken", Abwärmekommission Bericht 76-1, Berlin: Geschäftsstelle der Abwärmekommission im Umweltbundesamt 1976
- [20] H. Stehfest, "Modelltheoretische Untersuchungen zur Selbstreinigung von Fließgewässern", KFK-1654 UF (1973)
- [21] H.L. Toor, J.M. Marchello, "Filmpenetration Model for Mass and Heat Transfer", AIChE Journal, 4, 365 (1958)

Die Autoren danken dem Badenwerk und der Energieversorgung Schwaben für ihre großzügige Hilfe bei dem Aufbau der Meßstation und Beratung bei der Durchführung des Programms.

Ferner sei Herrn Ing. Wolfgang Lindner für seine Mitarbeit bei der Konstruktion und Ausrüstung der Meßstation und Frau Christine Sack für Programmierarbeiten gedankt.