

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

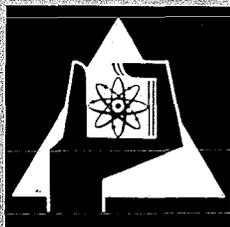
Dezember 1971

KFK 1511

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Beitrag zur Analyse der zulässigen Kraftwerksbelegung des Rheins
im Hinblick auf die thermische Belastung

P. Jansen, W. Schikarski, H. Stehfest



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**

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Dezember 1971

KFK 1511

Institut für Angewandte Reaktorphysik

BEITRAG ZUR ANALYSE DER ZULÄSSIGEN KRAFTWERKSBELEGUNG
DES RHEINS IM HINBLICK AUF DIE THERMISCHE BELASTUNG

von

P. Jansen
W. Schikarski
H. Stehfest

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Es wird die Kraftwerksbelegung des Rheins in Abhängigkeit von den wichtigsten Parametern untersucht. Diese Parameter sind: Die maximal zulässige Wassertemperatur T_{\max} , die maximal zulässige Aufwärmspanne ΔT_{\max} gegenüber der natürlichen Wassertemperatur, die gewünschte mittlere Auslastbarkeit der Kraftwerke, der Wirkungsgrad der Kraftwerke sowie die meteorologischen Daten, die für die natürliche Abkühlung des Flusses von Bedeutung sind. Es ergab sich, daß bei realistischen Werten von ΔT_{\max} sich T_{\max} kaum auf die installierbare Leistung auswirkt, solange $T_{\max} > 20^{\circ}\text{C}$ ist. Ferner zeigte sich, daß die natürliche Abkühlung des erwärmten Flußwassers sehr unsicher ist; ihre Berücksichtigung erhöht die installierbare Leistung bei akzeptabler Auslastbarkeit nicht entscheidend. Bei einer Aufwärmspanne zwischen 3°C und 5°C , einer Auslastbarkeit von ca. 80 % und einem Wirkungsgrad von 32 % ergaben sich für die installierbaren elektrischen Leistungen Werte zwischen 12 GWe und 21 GWe.

Abstract

The population of the Rhine with power stations is examined in light of the most important parameters. These are: The maximum permissible water temperature, T_{\max} ; the maximum permissible increase in temperature, ΔT_{\max} , relative to the natural water temperature; the desired average power yield of the power stations; their efficiency; the meteorological data of consequence for the natural cooling of the river. The results show that for realistic values of ΔT_{\max} T_{\max} for $T_{\max} > 20^{\circ}\text{C}$ has little effect on the permissible level of power production along the Rhine. They show further that natural cooling effects, while uncertain in magnitude, have little effect on this level. For a temperature increase of 3°C , a power yield of approximately 80 % and a thermal efficiency of 32 % the permissible level of electric power production along the Rhine is found to be 12 GWe. For an increase of 5°C the respective value is 21 GWe.

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	- 1 -
2. Ziel der Studie	- 1 -
3. Methoden und Ausgangsdaten	- 3 -
3.1. Wärmeaufnahmekapazität des Rheins ohne Berücksichtigung der Abkühlung	- 4 -
3.2. Durch den Abkühlungseffekt zusätzlich installierbare elektrische Leistung	- 9 -
4. Ergebnisse	
4.1. Einfluß der Temperaturbegrenzung	- 11 -
4.2. Einfluß der Nebenflüsse	- 13 -
4.3. Einfluß der mittleren Auslastbarkeit	- 15 -
4.4. Einfluß des Wirkungsgrades	- 19 -
4.5. Einfluß der Abkühlung	- 20 -
5. Diskussion und Schlußfolgerungen	- 25 -
6. Literatur	- 27 -

1. Einleitung

Das in den größeren Flüssen vorhandene Wasser ist ein wichtiger Rohstoff, dessen optimale Ausnutzung von volkswirtschaftlicher Bedeutung ist. In letzter Zeit ist besonders die Aufnahmemöglichkeit von Abwärme aus Kraftwerken in den Vordergrund gerückt, da abzusehen ist, daß die Aufnahmekapazität der deutschen Flüsse für Abwärme aus Kraftwerken in näherer Zukunft erschöpft sein wird. Die bisher bekannt gewordenen Studien und Überlegungen führen allerdings auf unterschiedliche Angaben über eine zulässige Kraftwerksbelegung, die aufgrund unterschiedlicher Ausgangs- und Randbedingungen entstanden sind. So führen Überlegungen, die von der Kraftwerks-Union [1] durchgeführt wurden, auf eine gesamte Kraftwerksbelegung (Zubau) aller deutschen Flüsse von 62 000 MW, während andere Berechnungen [2] eine mögliche Kraftwerksbelegung von 32 500 MW ergeben. Der von der Arbeitsgemeinschaft deutscher Länder entwickelte Wärmelastplan für den Rhein führt allein für den Rhein auf eine Kraftwerksbelegung von 16 000 MW [3], während in [1] für den Rhein 43 000 MW angegeben werden.

Im Hinblick auf die Unübersichtlichkeit dieser Aussagen, die teilweise im Widerspruch stehen, und die Bedeutung dieser Zahlen für das "ökologische System Rhein", soll in dieser Studie die Abhängigkeit der zulässigen Kraftwerksbelegung des Rheins als Funktion der relevanten Parameter untersucht und die Bedeutung der Parameter für die Kraftwerksbelegung des Rheins dargestellt werden.

2. Ziel der Studie

Um eine Analyse der Parameterabhängigkeiten und der Einflußgewichte der Parameter durchzuführen, sind zunächst die Gesamtzusammenhänge aufzuzeigen. Es sei daher kurz auf die wichtigsten Auswirkungen einer Flußwassererwärmung hingewiesen:

- Die Erwärmung des Flußwassers führt zu einer Reduzierung des Sättigungsgehalts an Sauerstoff und damit zu einer Verminderung der physikalischen Belüftungsrate bei bestehendem Sauerstoff-Defizit.
- Die Erwärmung beschleunigt den biologischen Abbau der Verunreinigungen

und führt dadurch zu einer weiteren Verminderung des O_2 -Gehalts. Verunreinigung und Abwärme wirken sich also synergistisch auf den O_2 -Gehalt des Flusses aus. Andererseits ist der O_2 -Gehalt ein wichtiger Faktor für das biologische Leben im Fluß.

- Die Toxizität der meisten Gifte erhöht sich mit der Temperatur.
- Die Erwärmung beeinflusst auch direkt das biologische Leben im Fluß.
- Die Erwärmung hat Bedeutung für die Schifffahrt wegen der zu erwartenden erhöhten Nebelbildung und wegen der verminderten Eisbildung.
- Die Erwärmung hat Einfluß auf die Wasserführung.

Bei diesen komplexen Zusammenhängen ist es heute schwierig, eine Empfehlung für die zulässige Kraftwerksbelegung des Rheins zu geben. Die vorliegende Studie will daher das Problem der Wärmebelastbarkeit nicht optimieren, sondern zunächst nur die wichtigen Problemparameter identifizieren und deren Einflüsse untersuchen, um die Diskussion möglicher Alternativen zu erleichtern. Dabei müssen beim gegenwärtigen Stand der Kenntnis folgende Beschränkungen in Kauf genommen werden:

- Es wird nur die Temperaturbelastung des Rheins studiert und jeder synergistische Effekt durch andere Schadstoffe im Rhein vernachlässigt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist dies zu berücksichtigen, indem man sich beispielsweise jeweils auf die sichere Seite verlegt.
- Es werden keine Untersuchungen angestellt, welche Auswirkungen Temperaturerhöhungen auf die Ökologie des Rheins haben. Der Grund liegt vor allem in der ungenügenden Kenntnis der Zusammenhänge mit den hierbei wichtigen sonstigen Schadstoffarten des Wassers. Bei der Diskussion der allein auf den Temperatureffekt durch die am Rhein erzeugte Energie bezogenen Ergebnisse muß diesen Zusammenhängen weitere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Der Umfang der Studie erstreckt sich also auf

1. Die Untersuchung der Wärmekapazität des Rheins als Funktion der Parameter

- maximal zulässige Temperatur (T_{\max})
- maximal zulässige Temperaturdifferenz (ΔT_{\max})

2. Die Untersuchung der bei einer bestimmten Kraftwerks-Abwärme auftretenden Überschreitungshäufigkeit der Grenzwerte T_{\max} und ΔT_{\max} und der daraus resultierenden notwendigen Kühlturmkapazität.

3. Die Untersuchung des Einflusses des Wärmeaustauschs Wasser-Atmosphäre auf die Kraftwerksbelegung.

3. Methoden und Ausgangsdaten

Die Wärmeaufnahmekapazität des Rheins hängt ab von der maximal zulässigen Grenztemperatur T_{\max} und der durch eine Wärmeeinleitung nach vollständiger Durchmischung akzeptierbaren maximalen Temperaturerhöhung ΔT_{\max} gegenüber der Rheintemperatur, die sich im thermisch unbelasteten Zustand auf natürliche Weise einstellt. Die Wärmeaufnahmekapazität hängt ferner ab von der jeweiligen Wasserführung des Rheins sowie vom Wärmeaustausch des Rheins mit der natürlichen Umgebung.

Um der methodischen Übersichtlichkeit willen und weil die zusätzliche Wärmeaufnahmekapazität aufgrund der natürlichen Abkühlung keine dominierende Stellung einnimmt, werden in zwei gesonderten Ansätzen einmal die Wärmebelastbarkeit ohne Berücksichtigung des Wärmeaustausches Rhein/Umgebung und einmal ausschließlich bezüglich der Effekte dieses Wärmeaustausches untersucht. Die Ergebnisse der beiden Teilbetrachtungen lassen sich addieren, weil bei den Rechnungen davon ausgegangen wird, daß am gesamten Rhein die Kraftwerke so verteilt sind, daß die Temperaturgrenzwerte T_{\max} und ΔT_{\max} immer erreicht werden.

3.1. Wärmeaufnahmekapazität des Rheins ohne Berücksichtigung der Abkühlung

Ausgangspunkt der Berechnungen sind die Tageswerte für die Wassertemperatur und die Wasserführung über einen Zeitraum von 11 Jahren (1957 bis 1967) gemäß dem Gewässerkundlichen Jahrbuch [4]. Hieraus lassen sich über die zulässigen T_{\max} und ΔT_{\max} die Tages-Wärmekapazitäten des Rheins errechnen. Ausgehend von den verschiedenen äußeren Wärmebelastungen des Rheins läßt sich errechnen, welcher Anteil der jeweils vorgesehenen Wärmebelastung zu einer Überschreitung der zulässigen Wärmekapazität führt. Hierdurch bestimmt sich eine einer Wärmebelastung zugeordnete Auslastbarkeit der diese Wärmebelastung erzeugenden Kraftwerke. Bei einer vorgegebenen akzeptierbaren Auslastbarkeit und der Vorgabe eines Bruttowirkungsgrades der Kraftwerke läßt sich damit die installierbare Kraftwerksleistung errechnen. Über die Streuung der installierbaren Kraftwerksleistung aufgrund der unterschiedlichen Wärmeaufnahmekapazitäten in den 11 verschiedenen Jahren läßt sich auch angeben, welche Kraftwerksleistung mit der ausgewählten Auslastbarkeit auch in ungünstigen Jahren genutzt werden kann. Die sich so ergebenden installierbaren Kraftwerksleistungen wurden den Überlegungen dieser Studie zugrundegelegt.

Die Präsentation aller Ausgangswerte im einzelnen würde den äußeren Rahmen dieser Studie sprengen. Um jedoch einen Eindruck von den Ausgangsdaten zu vermitteln, werden im folgenden Monatsmittelwerte graphisch dargestellt. Abbildung 1 zeigt die Temperaturmittelwerte über 11 Jahre für die einzelnen Monate sowie die höchsten und niedrigsten Temperaturen in diesem Zeitraum, gemessen in Maxau. Die Werte wurden dem Gewässerkundlichen Jahrbuch [4] entnommen.

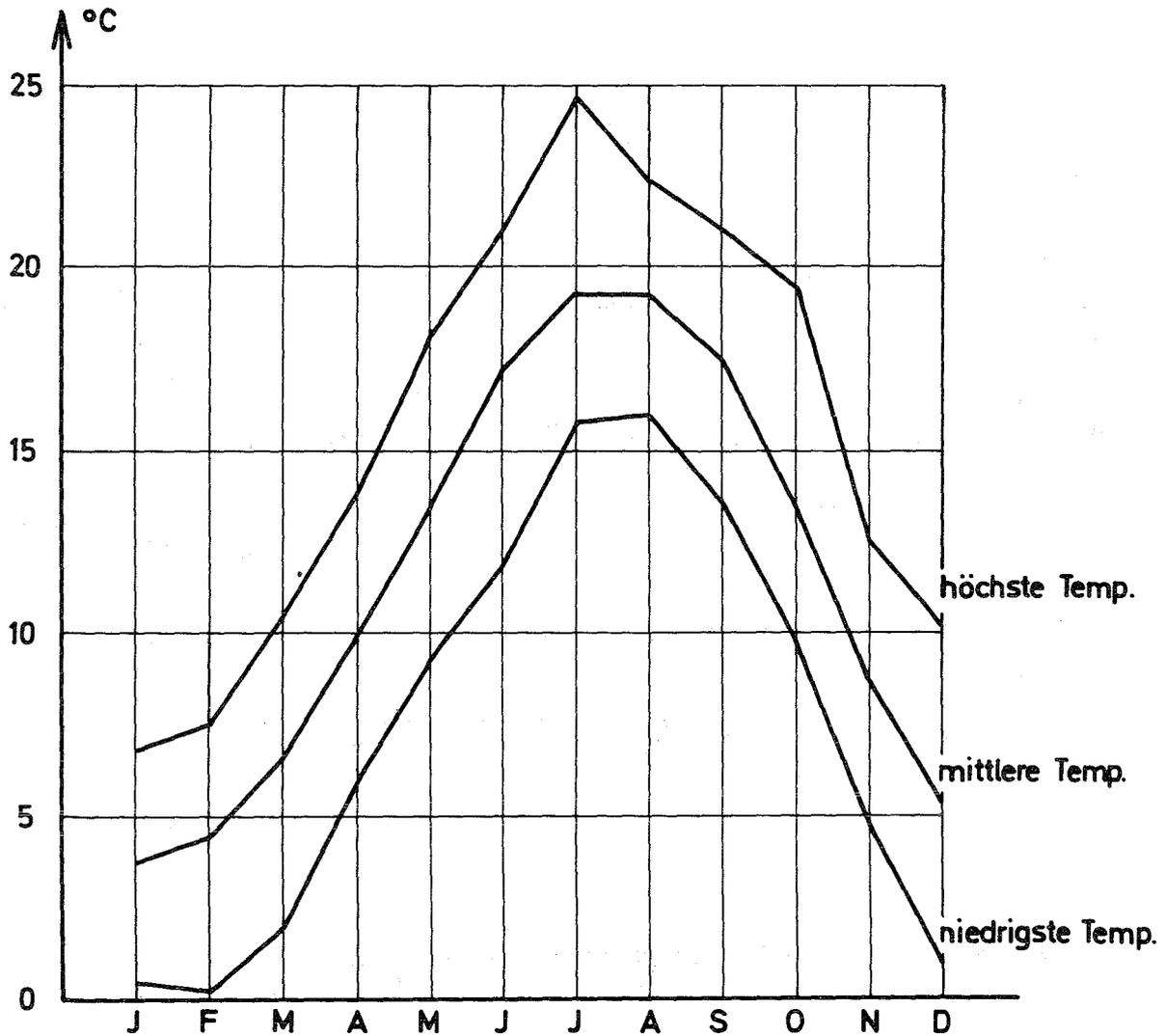


Abb. 1 Monatsmittelwert-Temperaturen des Rheins bei Maxau

Die Niedrigst- und Höchstwasserstände schwanken in Maxau von ca. 400 bis über 4000 m³/sec ohne eine für diese Untersuchungen relevante Abhängigkeit von der Jahreszeit (Monat). Die Mittelwerte gibt die Abbildung 2 wieder.

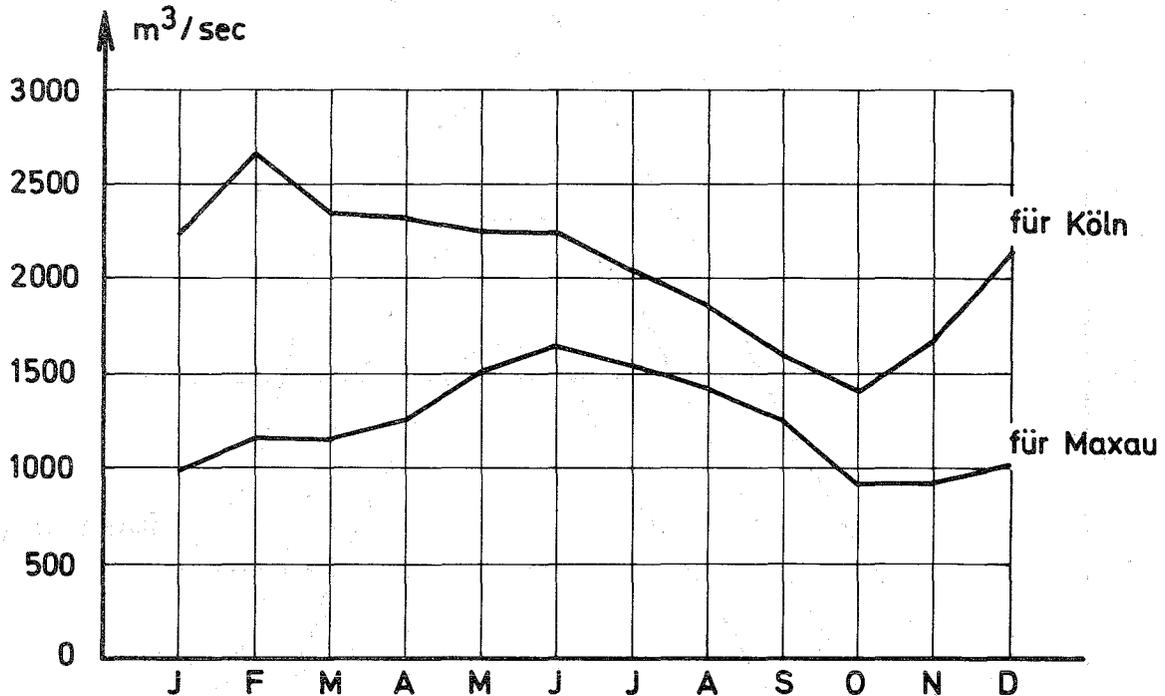


Abb. 2 Wasserführung des Rheins gemittelt über die Jahre 1957 - 1966

Betrachtet man als bedeutsame Restriktion die Einhaltung einer maximalen Temperaturdifferenz des mit Kraftwerken belasteten Rheins gegenüber dem thermisch unbelasteten Zustand, dann gibt die Kurve der Wassermengen näherungsweise die Kühlkapazität des Rheines wieder. Als sehr ungünstige Monate erweisen sich hiernach die Monate September bis Dezember.

Abbildung 3 gibt die Häufigkeitsverteilung (Ordinate: relative Häufigkeit) der Wärmekapazität des Rheins (im Zeitraum 1957 bis 1967) (Abszisse: GW abgegebener Leistung) für das Beispiel: $T_{\max} = 28^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$ wieder. Aus dieser Verteilung läßt sich die Auslastbarkeit einer vorgegebenen Wärmebelastung errechnen.

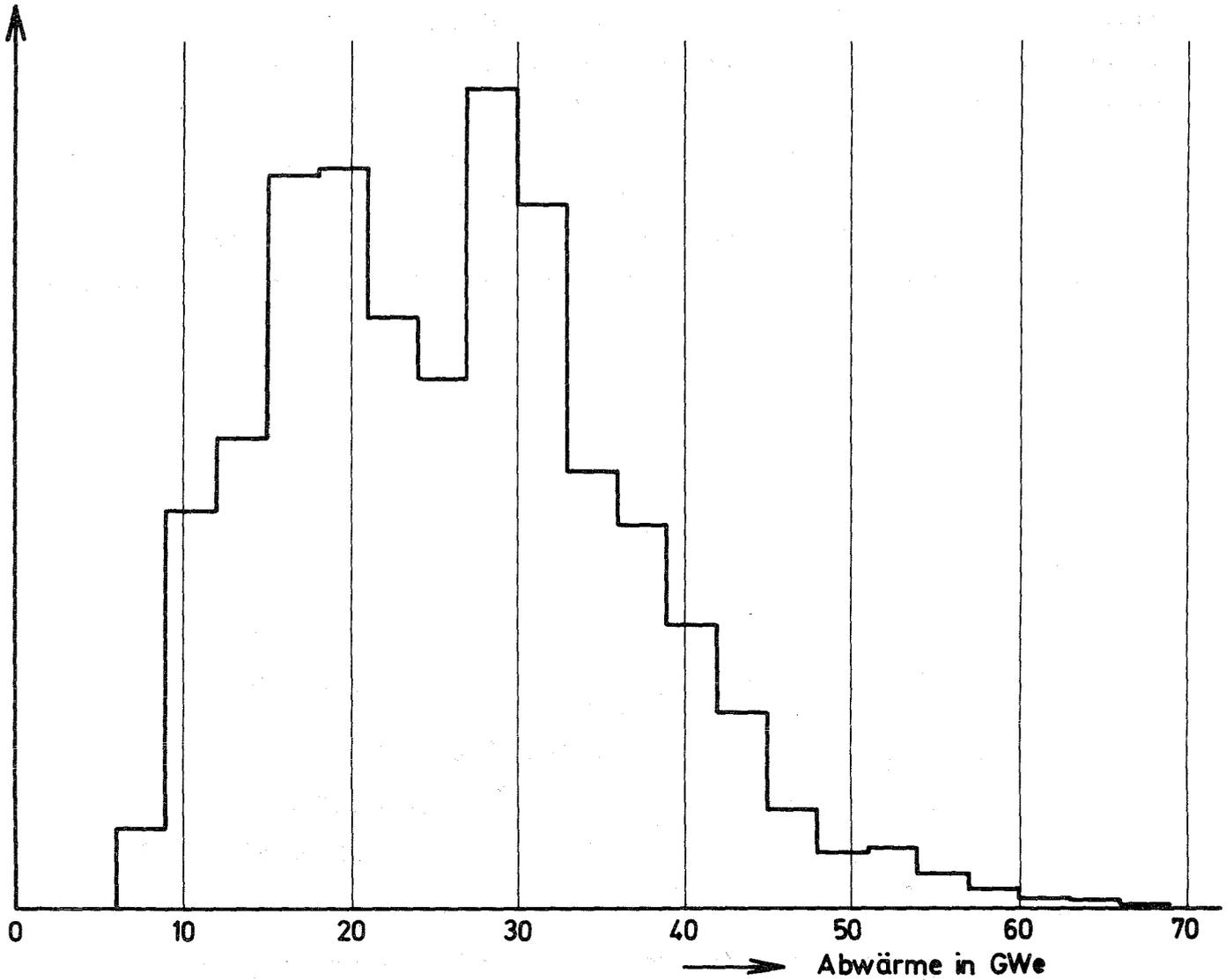


Abb. 3 Häufigkeitsverteilung der Wärmekapazität des Rheins bezogen auf Maxau

Die Zugrundelegung der Meßwerte von Maxau führt zu Ergebnissen, die so interpretiert werden können, als ob die Nebenflüsse bzw. ihre Wassertemperatur und Wasserführung die Kraftwerksbelegung des Rheins nicht mehr erhöhen können, weil sie selbst schon bis an die Grenze belastet sind. Die wahlweise Verwendung der Meßwerte von Köln ermöglicht eine Aussage der zulässigen Kraftwerksinstallationen am Rhein samt seiner Nebenflüsse (oberhalb Köln).

Eine interessante Überlegung ist die Frage, inwieweit die Zugrundelegung der Werte von 1957 bis 1967 einen im wesentlichen mit Kraftwerken unbelasteten Zustand wiedergibt. Man findet, daß 1970 nur 6 GWe an Kraftwerken (einschließlich Industrieabwärme) am Rhein installiert waren. Im gesamten Einzugsgebiet des Rheins waren es 1965 ca. 7 GWe. Die gemessenen Temperaturdifferenz-Mittelwerte $T_{\text{Köln}} - T_{\text{Maxau}}$ ergeben allerdings im Sommer und Herbst eine stärkere Erwärmung von Maxau nach Köln in den Jahren 1957 - 1966 als in den Jahren 1951 - 1957 (Abbildung 4).

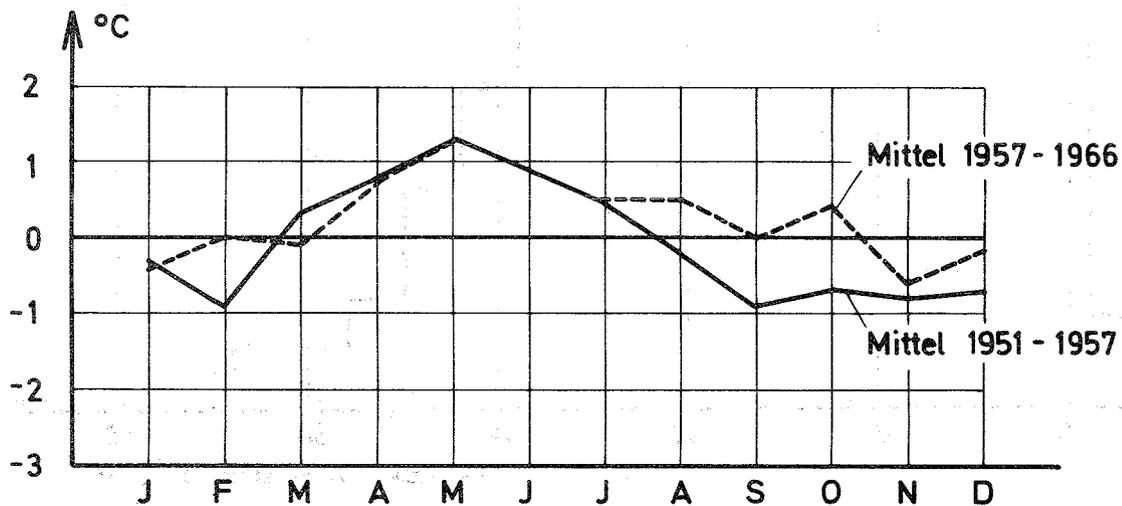


Abb. 4 Temperaturdifferenz des Rheins zwischen Meßstelle Maxau und Köln als Funktion der Jahreszeit

Für die Überlegungen dieser Studie ist es unseres Erachtens hinreichend, die Meßwerte von 1957 - 1967 als Ausgangsbasis zu verwenden. Es bleibt aber doch interessant, ob sich die Auswirkungen der wenigen in diesem Zeitraum installierten GWe schon in einer signifikanten Temperaturerhöhung niedergeschlagen haben.

Der Temperatur-Mittelwert über den Zeitraum 1957 bis 1966 beträgt bei Köln 11.9°C . Demgegenüber beträgt er für den Zeitraum 1951 bis 1957 11.1°C . Unter Zugrundelegung des vorliegenden statistischen Materials läßt sich hieraus die Aussage machen, daß sich der Rhein mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 99 % über die beiden Zeiträume erwärmt hat, wobei die mittlere Erwärmung 0.8°C beträgt. Zwar kann die mittlere jährliche Temperaturerhöhung des Rheins nicht schlüssig den wenigen in Betrieb befindlichen Kraftwerken zugeordnet werden, jedoch ist es bemerkenswert, daß für die betrachtete Zeit kein entsprechender Trend der Lufttemperatur vorlag. Die Frage, ob dieses Ansteigen der Wassertemperaturen auf die bereits bestehenden Warmwasser-einleitungen zurückzuführen ist, muß daher heute noch unbeantwortet bleiben.

3.2. Durch den Abkühlungseffekt zusätzlich installierbare elektrische Leistung

Die Berechnung des Wärmeaustausches Rhein/Atmosphäre erfolgte nach den in [3] angegebenen Formeln, wobei die bekannten Unsicherheiten für den Anwendbarkeitsbereich der einzelnen Gleichungen außer acht gelassen wurden. Die Wärmeabgabe setzt sich zusammen aus der Wärmestrahlung des Wassers (abhängig von der Wassertemperatur), aus der Verdunstung (abhängig vom Dampfdruck, von der Luftfeuchte und der Windgeschwindigkeit) und aus der Konvektion (abhängig von Wassertemperatur, Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit). Die Wärmeaufnahme durch Strahlung errechnet sich aus der Globalstrahlung (Sonnenstrahlung und diffuse Himmelsstrahlung) vermindert um die Reflektion an der Wasseroberfläche sowie aus der Temperaturstrahlung der Atmosphäre.

Die folgende Tabelle 1 vermittelt einen Eindruck über die einzelnen Anteile des Wärmeflusses für die Referenzwerte im Sommer, Herbst und Winter.

Tabelle 1

	Sommer	Herbst	Winter
Wassertemperatur $^{\circ}\text{C}$	23	18	8
Lufttemperatur $^{\circ}\text{C}$	20	10	0
Luftfeuchte mm Hg	12.5	7.5	5.5
Globalstrahlung $\text{cal}/\text{cm}^2 \text{d}$	600	225	75

	Sommer	Herbst	Winter
Windgeschwindigkeit m/sec	2	2	2
Dampfdruck des Wassers mm Hg	21.1	15.5	8.1
Wärmestrahlung der Luft cal/cm ² d	678	560	467
" des Wassers "	895	836	727
Verdunstung "	293	270	87
Konvektion "	51	136	136
Gesamtwärmeaufnahme "	1188	751	531
Gesamtwärmeabgabe "	1238	1242	950
Gesamtwärmebilanz "	- 50	- 491	- 419

In Kapitel 4.5. wird der Einfluß und die Bedeutung der einzelnen Werte im einzelnen diskutiert und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Ausgangsannahmen und ihrer Fortpflanzung durch die Differenzenbildungen näher untersucht. Die daraus folgende begrenzte Aussagekraft bei den Abkühlungseffekten und der sich ergebende geringe Beitrag der Abkühlung zur möglichen Kraftwerksinstallation (siehe 4.5.) rechtfertigt die getrennte Behandlung der Abkühlungseffekte von den anderen in 3.1. angesprochenen Untersuchungen.

Bei der Berechnung der Tabelle 1 wurde für Globalstrahlung, Lufttemperatur und Luftfeuchte nicht der Tagesgang berücksichtigt, sondern Tages-Mittelwerte benutzt. Für eine mittlere Rheintiefe von 360 cm würden bei genauer Berücksichtigung der Tagesgänge Änderungen in der Wassertemperatur von $- 0.14^{\circ}\text{C}$ (Sommer), $- 1.36^{\circ}\text{C}$ (Herbst) und $- 1.16^{\circ}\text{C}$ (Winter) auftreten, die eine stundenweise iterative Berechnung der Wärmebilanz nicht erforderlich erscheinen lassen. Dies bestätigt auch die folgende Tabelle, in der die tatsächlichen Tagesschwankungen nach $\sqrt{3}$ durch Sinusfunktionen angenähert wurden und sich keine wesentlichen Änderungen der Ergebnisse zeigten. Bei einer konstant gehaltenen mittleren Rheinbreite von 250 m ergeben sich nämlich als zusätzlich installierbare elektrische Leistung die Werte der Tabelle 2.

Tabelle 2

	Sommer	Herbst	Winter
bei Mittelwert-Rechnung	2.2 GWe	21 GWe	18 GWe
bei Sinus-Rechnung	2.7 GWe	20 GWe	17 GWe

Da zudem die in $\overline{[3]}$ angenommenen Tagesgangkurven nicht wirklich repräsentativ sind, wurde in Abschnitt 4.5. mit Mittelwerten gerechnet. Ebenso wurde die Rheinbreite nur mit einem konstanten Mittelwert berücksichtigt, da sie direkt proportional in die Endergebnisse eingeht und damit ihr Einfluß im Rahmen einer Parameterstudie ausreichend überschaubar ist. In diesem Sinne war es auch ausreichend, mit einer Mittelung über die Länge zu arbeiten und nicht eine Differenzierung der Stromabschnitte zu verwenden. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Unsicherheiten in den Rechnungen und Daten führten die im folgenden aufgeführten Untersuchungen dennoch zu ausreichend aussagekräftigen Ergebnissen.

4. Ergebnisse

4.1. Einfluß der Temperaturbegrenzung

Bei der Berechnung des Einflusses der Temperaturbegrenzung wurden folgende Parameter festgehalten bzw. festgelegt:

- Als Brutto-Kraftwerkswirkungsgrad wurde 32 % zugrundegelegt. Zwar haben konventionelle Kraftwerke (Kohle, Öl) einen Wirkungsgrad bis zu 42 %, jedoch werden in naher Zukunft in erster Linie Leichtwasser-Kernkraftwerke an den Flüssen gebaut werden, deren Wirkungsgrad bei 32 % liegt. Die Kernkraftwerke mit einem besseren Wirkungsgrad von etwa 40 % (Natriumgekühlte Brutreaktoren und Thorium-Hochtemperatur-Reaktoren) werden erst ab 1980 in der Energieversorgung eine Rolle spielen.
- Die mit den Temperaturbegrenzungen noch mögliche mittlere Auslastbarkeit der Kraftwerke wurde zu 80 % angenommen. Diese Zahl sollte nicht mit dem Lastfaktor verwechselt werden. Die mittlere Auslastbarkeit drückt aus, daß Kraftwerke aufgrund hydrologischer Bedingungen vorübergehend nur mit Teillast betrieben werden können. Ein Ausgleich ist über Lastverschiebung im Verbundnetz möglich.
- Zur Untersuchung wurden die Tageswerte der Temperaturmessungen über 11 Jahre (1957 - 1967) gemessen in Maxau herangezogen (vergleiche Abschnitt 3).
- Die in Abbildung 5 angegebene Streuung der installierbaren Leistung gibt

gesamte Einzugsgebiet des Rheins oberhalb Köln. Das Ergebnis zeigt Abbildung 6:

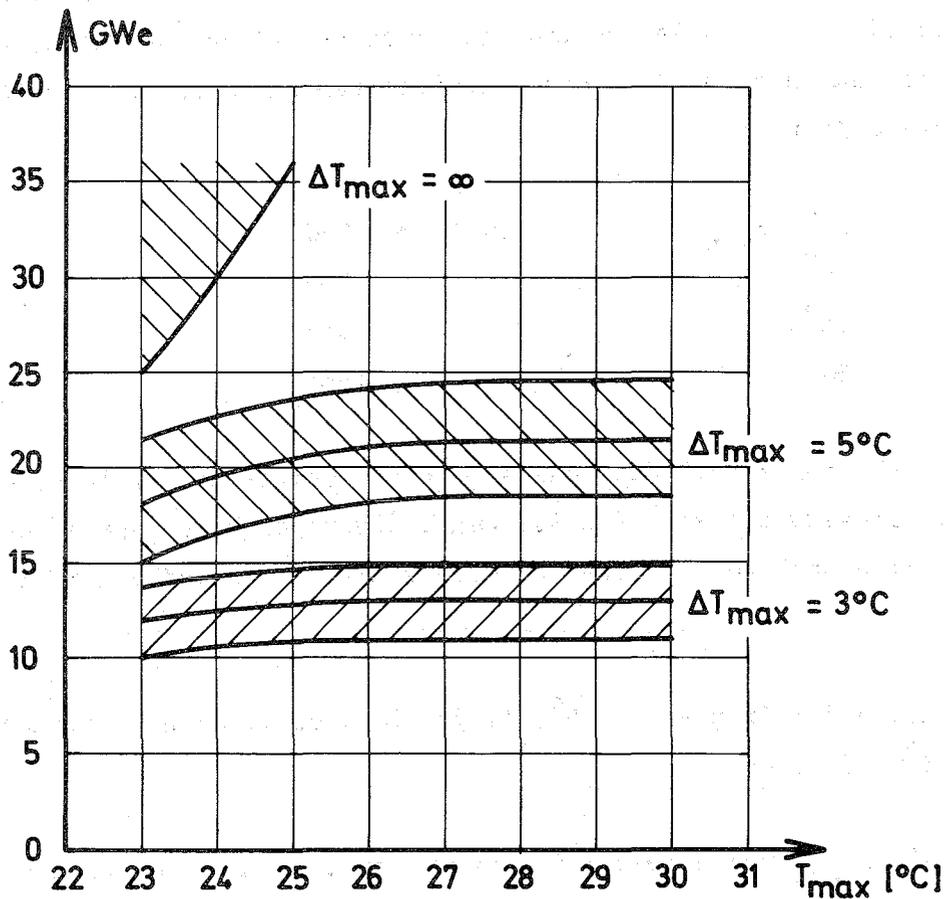


Abb. 6 Installierbare Leistung als Funktion der Temperaturbegrenzungen bezogen auf die Meßwerte in Köln (ohne Abkühlung)

Wenn man wieder an den unteren Grenzen der Streubreite abliest, zeigt sich, daß sich gegenüber der Berechnung für Maxau eine Erhöhung der installierbaren Leistung ergibt. Z.B. folgt für $T_{\max} = 25^{\circ}\text{C}$

bei $\Delta T_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$	→	11 GWe	statt	7
$\Delta T_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$	→	17 GWe	statt	12
$\Delta T_{\max} = \infty$	→	36 GWe	statt	25

Hierdurch ist kein qualitativ neues Bild gegeben. Die Grenzen der mit Wasserkühlung installierbaren elektrischen Leistungen werden zeitlich kaum später liegen, da auch der Raum, in dem die elektrische Energie gebraucht wird, dabei größer geworden ist.

4.3. Einfluß der mittleren Auslastbarkeit

Die bisherigen Überlegungen wurden unter der Annahme gemacht, daß eine mittlere Auslastbarkeit von 80 % von seiten der Kühlbedingungen gegeben sein muß. Die Abbildung 7 gibt die installierbare Leistung wieder, wenn diese mittlere Auslastbarkeit variiert wird.

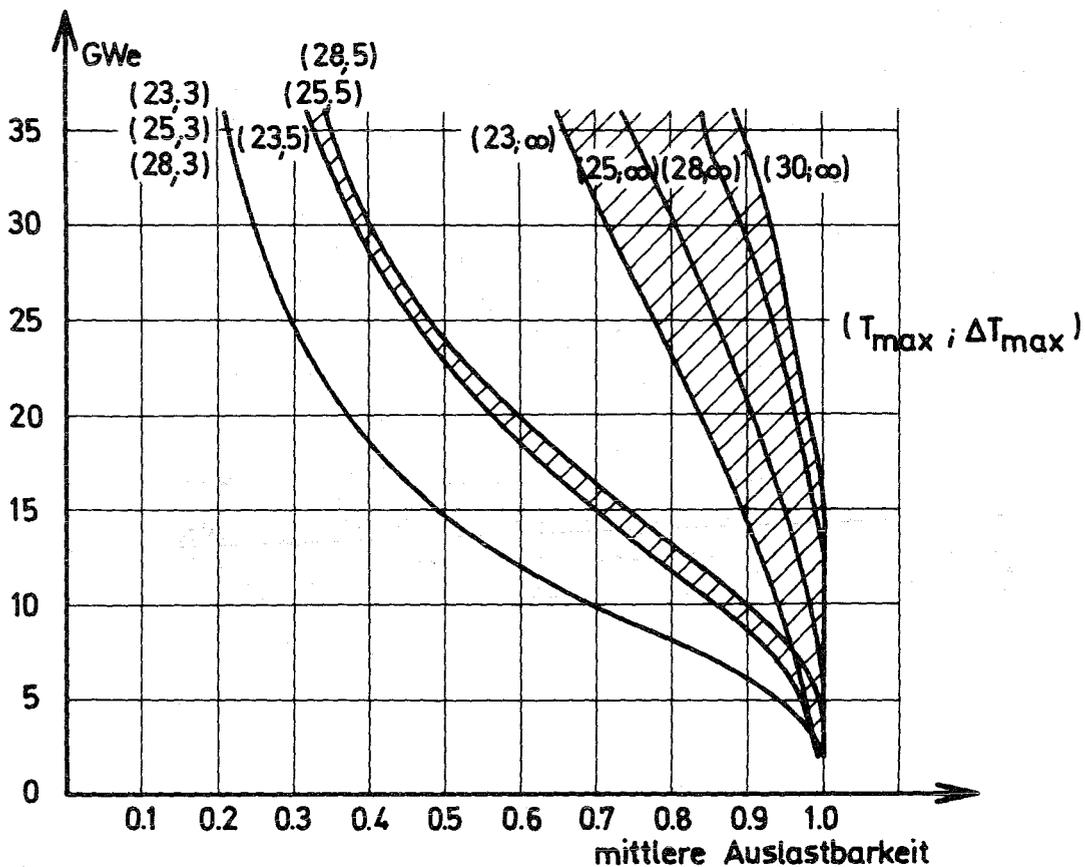


Abb. 7 Installierbare Leistung als Funktion der Auslastbarkeit
(Parameter T_{\max} und ΔT_{\max})

Im Bereich vernünftiger mittlerer Auslastbarkeitswerte ergibt Abbildung 7 wiederum kein wesentlich verändertes Bild.

Wenn die Auslastbarkeit bei 100 % liegen soll, so ergibt sich die Abbildung 8. Es zeigt sich, daß die installierbare Leistung bei voller Auslastbarkeit deutlich absinkt. Die installierbare Leistung erhöht sich naturgemäß entsprechend dem Anteil, der durch Kühltürme abgedeckt wird. Will man einschließlich Kühlturmkapazität in GWe-Äquivalent nur eine bestimmte mittlere Lastgarantie haben, so ergeben sich für $T_{\max} = 25^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$ die in den Abbildungen 9 und 10 dargestellten Zusammenhänge.

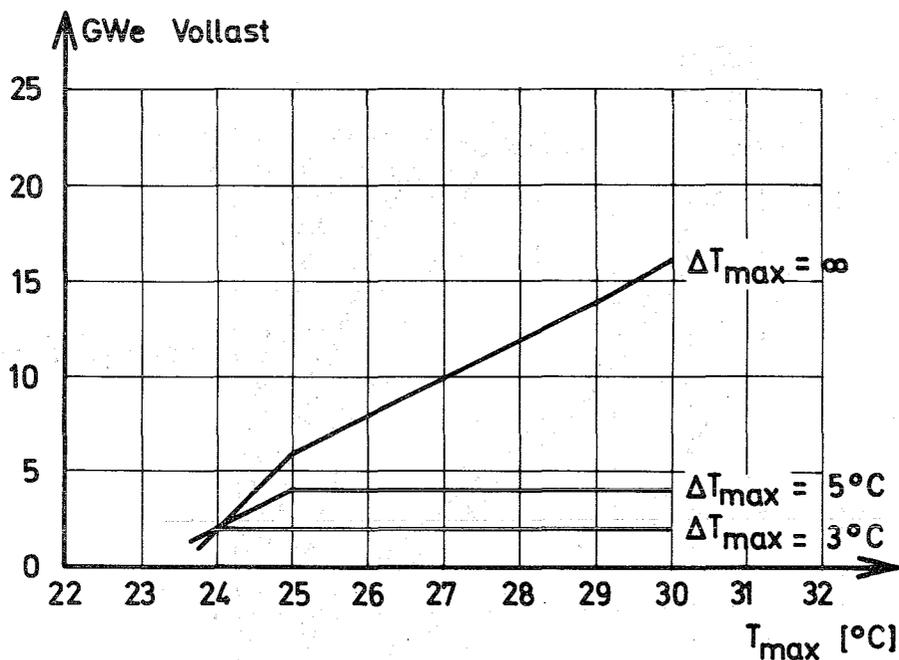


Abb. 8 Installierbare Leistung bei voller Auslastbarkeit als Funktion von T_{\max} (Parameter ΔT_{\max})

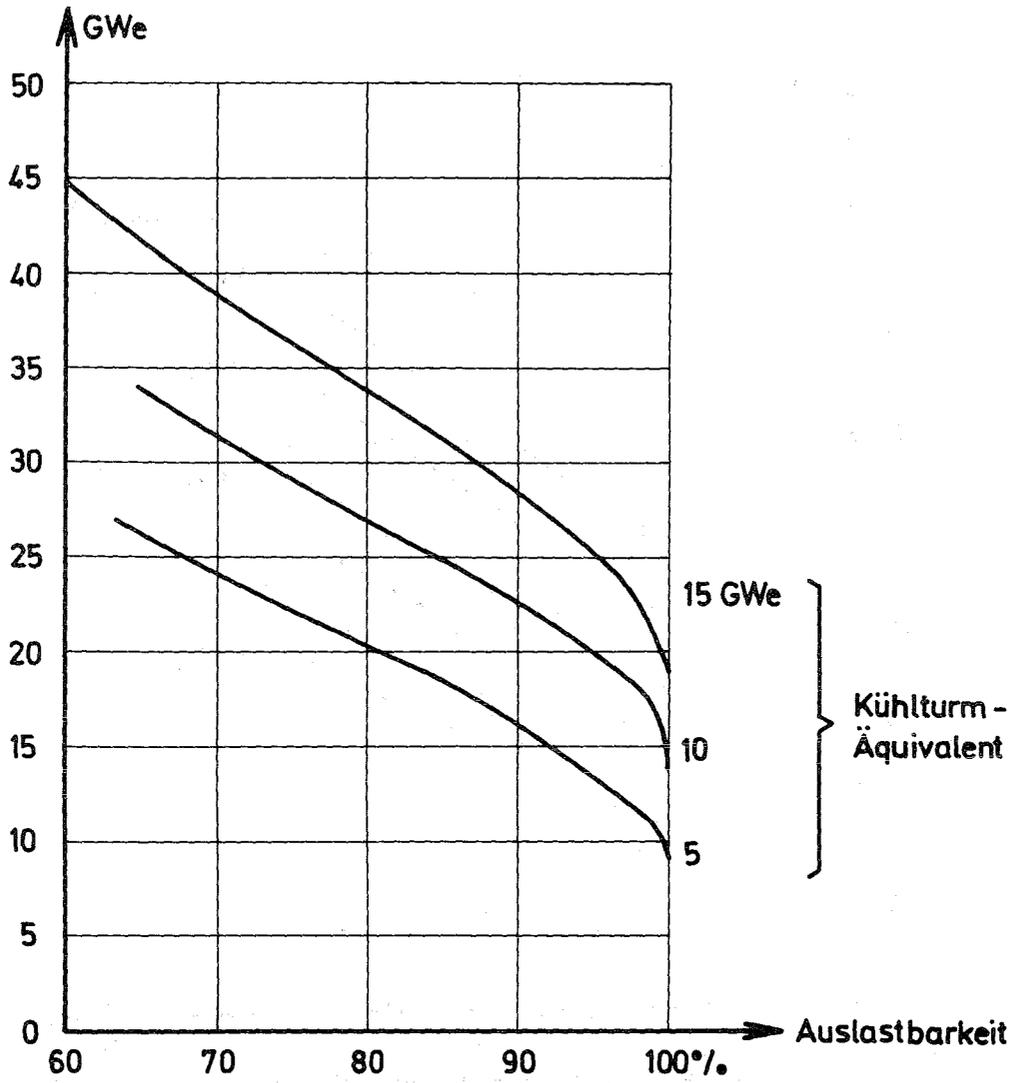


Abb. 9 Installierbare Leistung als Funktion der Auslastbarkeit bei entsprechender Kühlturmkapazität

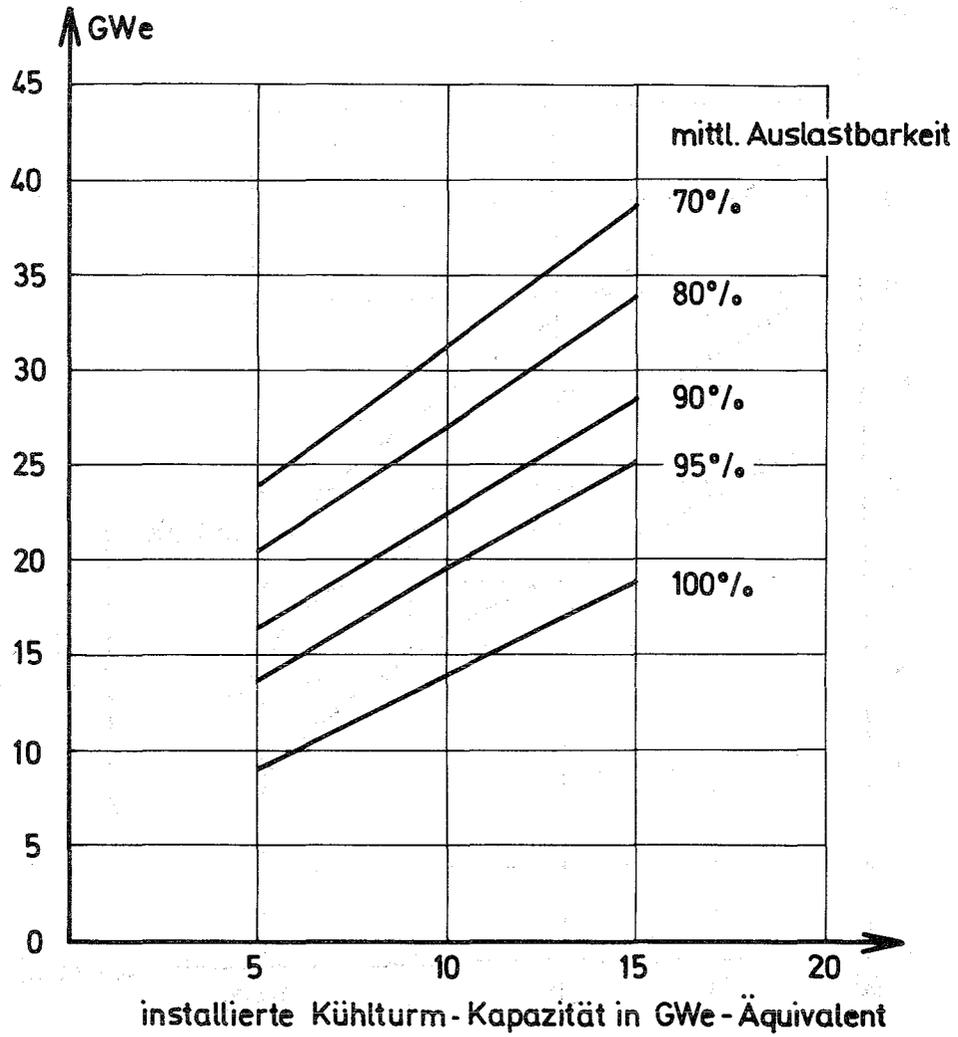


Abb. 10 Installierbare Leistung als Funktion der Kühlturmkapazität bei entsprechender mittlerer Auslastbarkeit

Aus den Abbildungen erkennt man, daß z.B. mit 30 GWe ohne Kühlturmkapazität nur eine Auslastbarkeit von ca. 0.45 erreicht werden kann. Auf der anderen Seite steigt mit einer Kühlturmkapazität von ca. 12 GWe-Äquivalent die mittlere Auslastbarkeit auf 80 % und mit 16 GWe-Äquivalent auf 90 %.

4.4. Einfluß des Wirkungsgrades

Eine Erhöhung des thermodynamischen Brutto-Wirkungsgrades η bringt eine Erhöhung der innerhalb gegebener Temperaturrestriktionen installierbaren GWe mit sich. Dies erkennt man aus Abbildung 11.

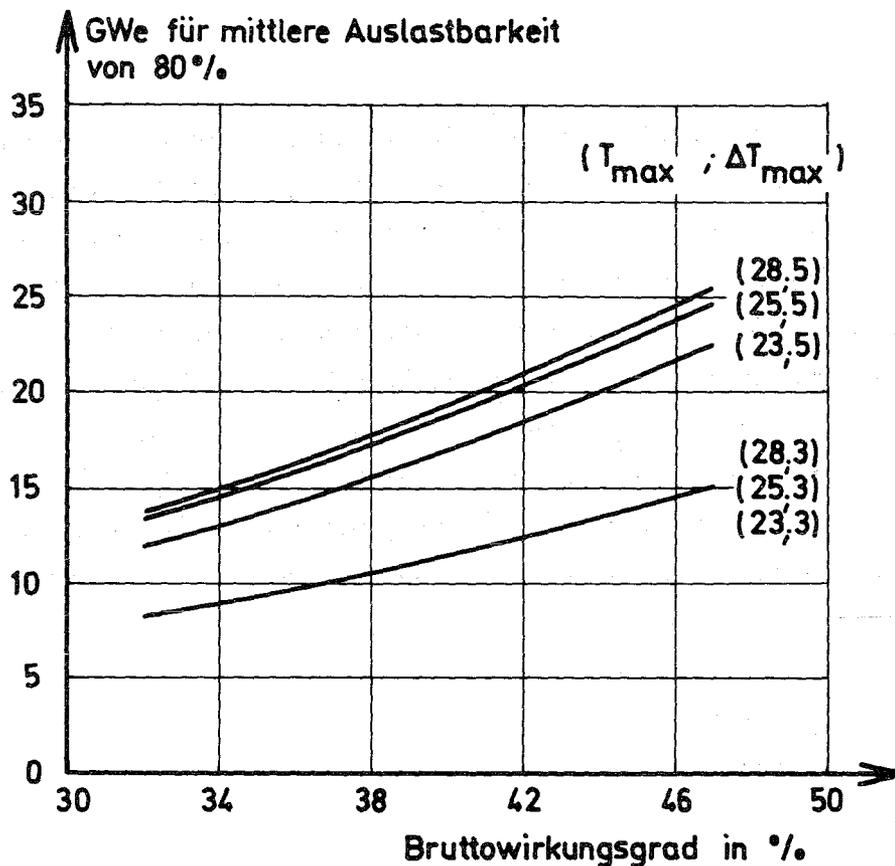


Abb. 11 Installierbare Leistung als Funktion des Kraftwerk-Wirkungsgrades für eine mittlere Auslastbarkeit von 80 %
(Parameter T_{max} , ΔT_{max})

Beispielsweise ergibt sich für $T_{\max} = 25^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$ eine Erhöhung der installierbaren Leistung von 5 GWe, wenn der Wirkungsgrad von 32 % auf 40 % steigt. Dieser Vorteil ist offensichtlich von geringer Bedeutung, da die sich aus den Energiebedarfsprognosen ableitende Kraftwerkszubaurate heute bereits bei 5 GWe/Jahr liegt.

4.5. Einfluß der Abkühlung

In Abschnitt 3.2. wurden die wesentlichen Zusammenhänge der Abkühlungseffekte dargestellt. Im folgenden sollen nun der Einfluß der Abkühlung auf die installierbare Leistung und damit zusammenhängende Fragen untersucht werden. In den Abschnitten 4.1. bis 4.4. war zunächst im Sinne einer Parameter-Studie nur die jeweilige Einflußgröße betrachtet worden, ohne die natürlich überlagerte Abkühlung zu berücksichtigen.

Für die Berechnung der Abkühlung wurden die bekannten Gleichungen angesetzt, wie sie auch in [3] wiedergegeben sind. Eine Untersuchung der Unsicherheiten, wie sie durch den Formelansatz bedingt sind, wurde nicht vorgenommen. Es wurde jedoch auf die Untersuchung des Einflusses der Unsicherheiten bei den Eingangsdaten Wert gelegt. Im Hinblick auf die bekannten Belastungen des Rheins durch Schadstoffe, die zusammen mit der Temperaturerhöhung synergistisch wirken können, wurde von relativ niedrigen Referenzwerten für T_{\max} und ΔT_{\max} ausgegangen, nämlich $T_{\max} = 23^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$, was nach Abb. 5 einer zusätzlich installierbaren Leistung (ohne Berücksichtigung der Abkühlung) von 7 GWe bei einer Auslastbarkeit von 80 % entspricht. Die folgenden Abbildungen 12, 13 und 14 geben die Zusammenhänge wieder für die Parameter

TW = Wassertemperatur

TL = Lufttemperatur

EL = Luftfeuchte

IH = Globalstrahlung

V = Wind

und für die Jahreszeiten Sommer, Herbst und Winter. Für jede Jahreszeit wurde von einem Durchschnittswert der Parameter ausgegangen und für jeden Parameter getrennt

eine Variation vorgenommen, die einen Bereich überdeckt, dessen Werte in der Realität auch beobachtet werden. Bei der Wassertemperatur wurden die entsprechenden Werte um ΔT_{\max} höher angesetzt, da dann die Abkühlung stärker ist und dies dem Fall entspricht, bei dem der Rhein durch Kraftwerksinstallationen ausgenutzt ist. Für die Abbildungen 12 bis 14 ist $\Delta T_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$. Die angegebene Leistung ist als zusätzlich durch Abkühlungseffekt installierbare Kraftwerksleistung zu verstehen.

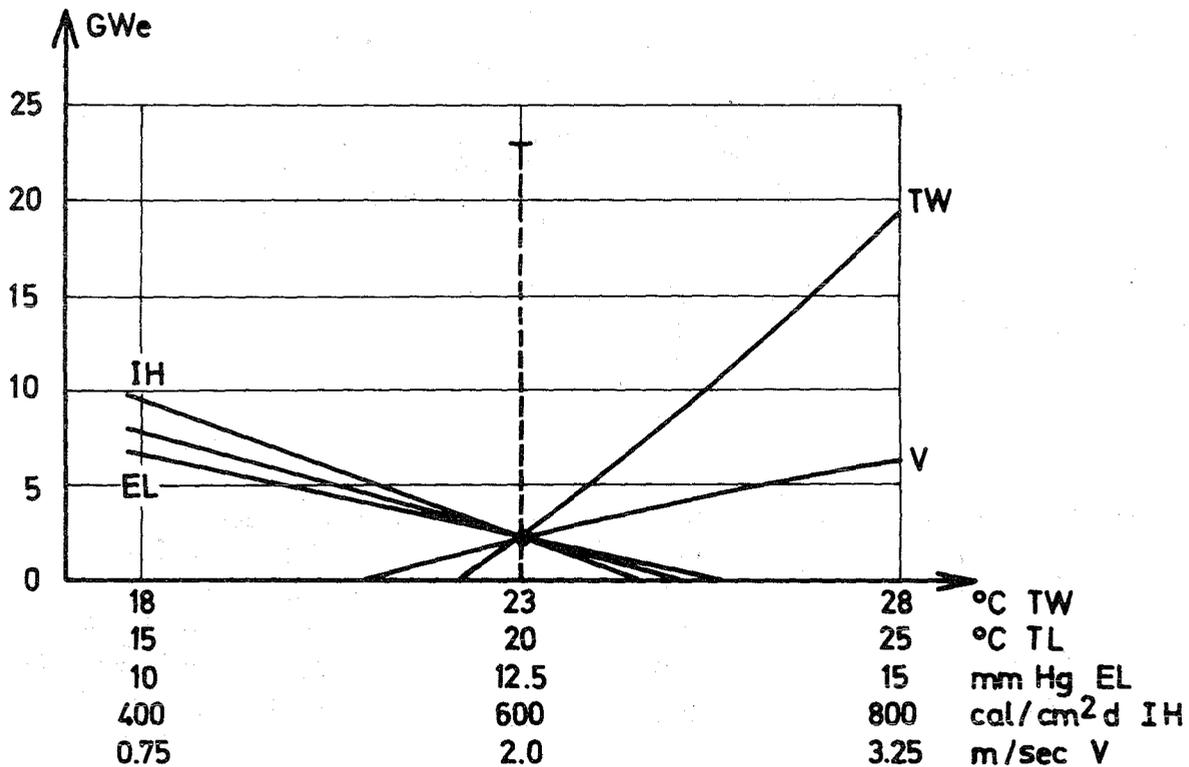


Abb. 12 Zusätzlich durch Abkühlungseffekt installierbare Leistung als Funktion der genannten Parameter für den Referenzfall Sommer

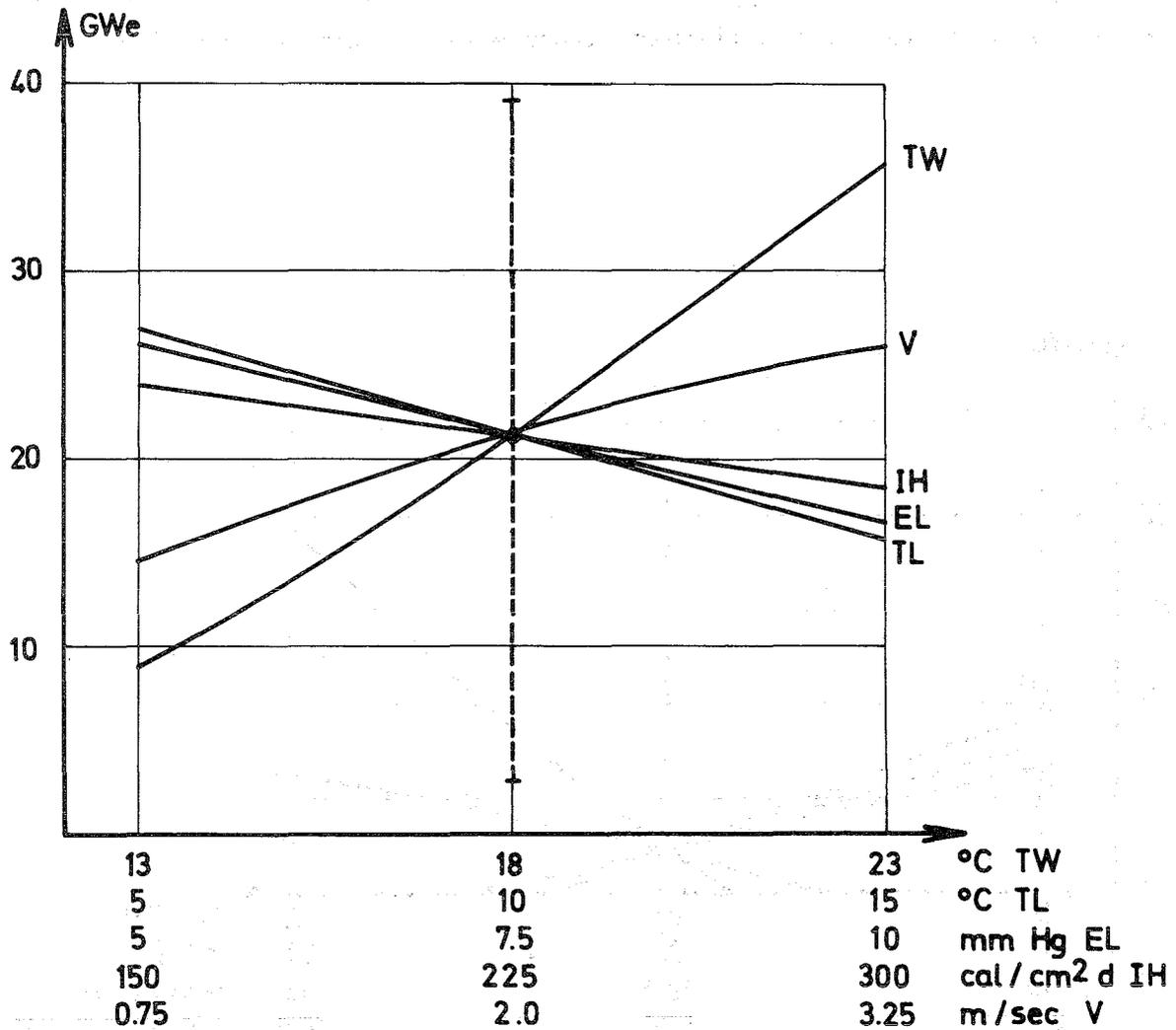


Abb. 13 Zusätzlich durch Abkühlungseffekt installierbare Leistung als Funktion der genannten Parameter für den Referenzfall Herbst

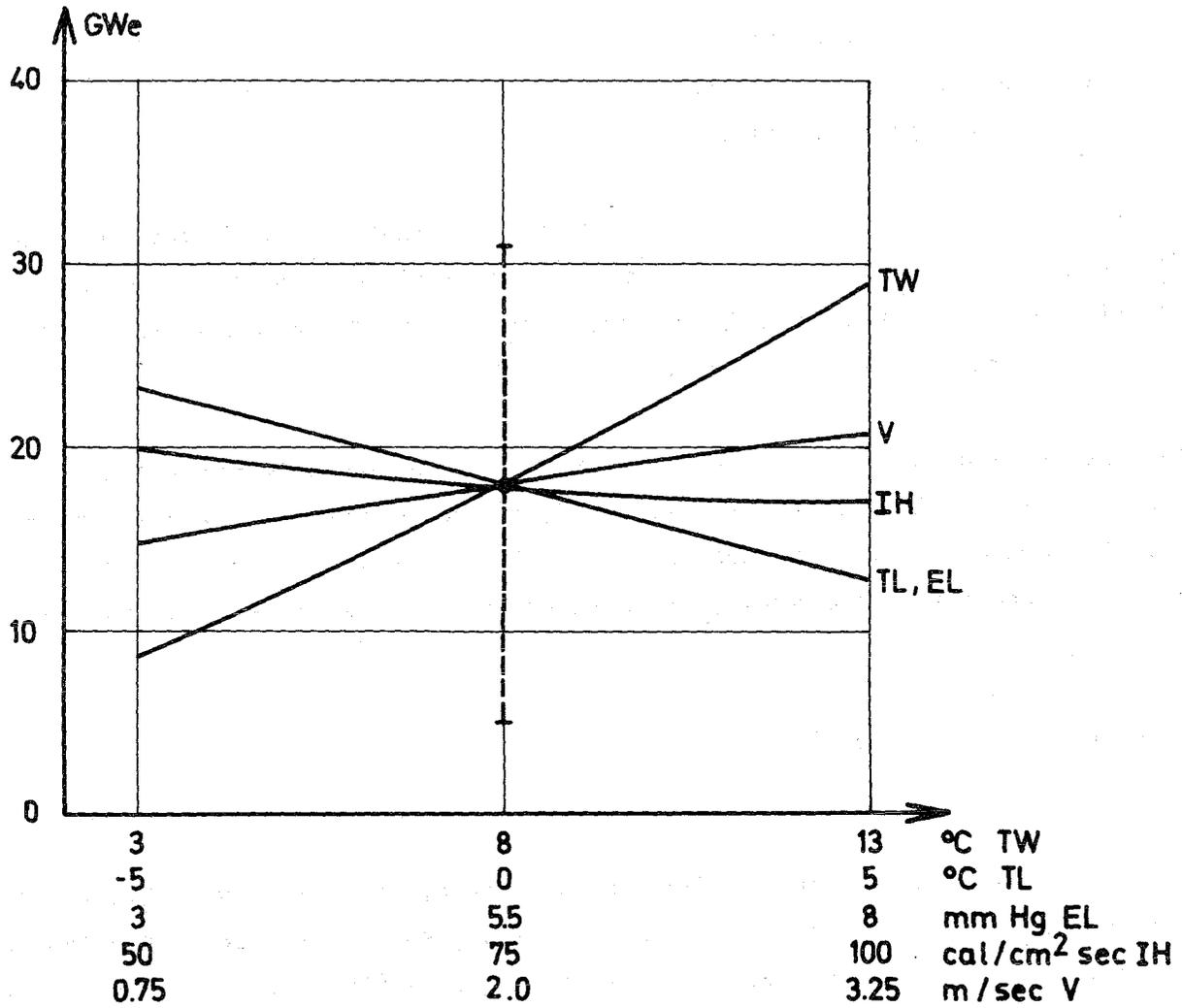


Abb. 14 Zusätzlich durch Abkühlungseffekt installierbare Leistung als Funktion der genannten Parameter für den Referenzfall Winter

Aus Abb. 12 ist ersichtlich, daß im Sommer bei

- 23°C Wassertemperatur
- 20°C Lufttemperatur
- 12,5 mm Hg Luftfeuchte
- 600 cal/cm²d Globalstrahlung
- 2 km/h Windgeschwindigkeit

zusätzlich 2 GWe aufgrund von Abkühlungseffekten installierbar sind, d.h., daß bei $T_{\max} = 23^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$ insgesamt 9 GWe am Rhein errichtet werden können. Diese Addition der installierbaren Leistungen ohne und mit Abkühlungseffekt läßt allerdings den Parameter Auslastbarkeit außer acht.

In allen Fällen, Sommer, Herbst und Winter, hat die Wassertemperatur den Haupteinfluß und läßt, z.B. für den Fall von 28°C, die durch Abkühlung installierbaren GWe deutlich ansteigen. Alle übrigen Parameter haben einen deutlich geringeren Einfluß. Die der Variation zugrundegelegten Mittelwerte führen zu folgenden additiven GWe

- im Sommer 2 GWe
- im Herbst 21 GWe
- im Winter 18 GWe

Überlagert man diese Werte mit den Unsicherheiten, wie sie in den Abbildungen als Bereiche der einzelnen Parameter angegeben sind, so ergeben sich als Streubreiten näherungsweise die gestrichelten Bereiche in den Abbildungen. Als pessimistische Werte ergeben sich dann für die additiven GWe

- im Sommer 0 GWe
- im Herbst 3 GWe
- im Winter 5 GWe.

Es kann davon ausgegangen werden, daß 5 GWe (Winter) zu einer akzeptablen Auslastbarkeit der zusätzlich installierbaren GWe führen. Diese Werte lassen sich dann in guter Näherung zu den in Abschnitt 4.1. für $T_{\max} = 23^{\circ}\text{C}$ und $\Delta T_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$ errechneten 7 GWe für 80 % Auslastbarkeit addieren. Wenn man davon ausgeht, daß Herbst und Winter aufgrund des gerade dort nötigen großen Energiebedarfs als Referenzpunkte ak-

zeptiert werden, so könnte man also für den Rhein insgesamt 12 GWe akzeptieren.

Würde man trotzdem ein erhöhtes Risiko einzugehen bereit sein und T_{\max} mit 25°C und ΔT_{\max} mit 5°C festlegen, würden sich etwa 21 GWe als maximal installierbare Leistung ergeben, die etwa bis zum Jahre 1982 Kraftwerksinstallationen mit Durchflußkühlung gestatten würden. Dabei wurden eine Auslastbarkeit von ca. 80 %, die oben erläuterten Schwankungsbreiten der meteorologischen Parameter und mittlere Annahmen über die Flußbreite zugrundegelegt.

5. Diskussion und Schlußfolgerungen

Vor dem Hintergrund des aufgezeigten Materials, das mit den genannten Unsicherheiten in den Annahmen über das Verhalten der Ökologie des Rheins sowie seiner natürlichen Abkühlung zu sehen ist, können eine Reihe von Schlußfolgerungen gezogen werden. Dabei muß betont werden, daß der Zweck der vorliegenden Studie nicht darin lag, durch exakte Rechnungen, wie es beim Wärmelastplan [3] der Fall war, die installierbaren Kraftwerksleistungen am Rhein zu ermitteln. Es war vielmehr das Bestreben der Autoren, Abhängigkeiten und Möglichkeiten aufzuzeigen, um die laufende Diskussion über die Temperatur-Restriktionen auf eine sachliche Basis zu stellen. Insbesondere die folgenden Punkte ergaben sich aus den Untersuchungen:

1. Bei voller Ausnutzung der Belastbarkeitsgrenzen des Wassers lassen sich die Kühlprobleme der Kraftwerke durch Flußwasserkühlung nur auf eine sehr begrenzte Zeit in der Größenordnung einiger Jahre lösen. Es erscheint nicht sinnvoll, wegen dieser begrenzten Zeitspanne sich in die Gefahr einer Überlastung des Rheins zu begeben. Es erscheint vernünftig, sich nur mit wenigen Kraftwerksinstallationen, die das Rheinwasser zur Kühlung verwenden, zu begnügen.
2. Die begrenzende Größe bei den Temperaturrestriktionen ist weniger T_{\max} als ΔT_{\max} . Wenn man z.B. bereit ist, ein ΔT_{\max} von 3°C zu akzeptieren, so bedeutet die Festlegung eines niedrigen T_{\max} keine wesentliche Einschränkung der Expansion der Energiewirtschaft.
3. Auch die Erhöhung der Wirkungsgrade, wie sie die nächste Generation der

Kernkraftwerke (Brüter, THTR) aufweisen wird, und die Herabsetzung der Auslastbarkeit der Kraftwerke verlängern die Zeitspanne, in der neue Kraftwerke mit Durchflußkühlung akzeptabel bleiben, nur geringfügig.

4. Langfristige Lösungen, die schon in der allernächsten Zukunft ins Auge gefaßt werden müssen, liegen in anderen Kühlarten, z.B. in Kühltürmen. Der Kostenvorteil, der mit der Einführung der Kernenergie verbunden ist, könnte zum Teil dazu verwendet werden, diese teurere Alternative zur Frischwasserkühlung zu verwirklichen.

Man kann darüber diskutieren, ob man diese Kosten aufbringen will oder statt dessen den Rhein nur unter dem Gesichtspunkt des Kühlwassers betrachten soll. Wenn man sich jedoch darin einig weiß, daß eine gesunde Ökologie im Rhein erhalten bleiben soll, dann ist jede Anstrengung, die Belastungsgrenze des Rheins möglichst hoch zu legen, uneffektiv, da sie erstens große Risiken für die Ökologie bringt und zweitens nicht verhindert, daß man in absehbarer Zeit andere Lösungen zur Abführung der Rückkühlwärme finden muß.

5. Für ΔT_{\max} -Werte von 3 und 5°C und bei einer Auslastbarkeit von ca. 80 % werden am Rhein Kraftwerksinstallationen von 12 bzw. 21 GWe für akzeptierbar gehalten.
6. Bei der ganzen Diskussion um das Rheinproblem zeigt sich, daß man statt marginale Verbesserungen durch Optimierung der relevanten Parameter zu erreichen, eher auf langfristige Lösungen hinarbeiten sollte. Hierzu wäre es notwendig, die großtechnische Entwicklung von luftgekühlten Kühltürmen in Angriff zu nehmen und die ökologischen Folgen solcher Kühltürme (einschließlich einer möglichen Lärmbelästigung) sowie die Kosten zu untersuchen. Für den Rhein selbst bleibt genug zu tun, um die sonstigen Schadstoffbelastungen zu reduzieren, die allein bereits den Rhein in Gefahr bringen. Forschung und Entwicklung auf beiden Gebieten sollten so schnell wie möglich beginnen.

6. Literatur

- [1] H. Frewer, "Energieverbund zwischen nuklearen und konventionellen Kraftwerken"
Atomwirtschaft XVI/7, Seite 345 (1971)
- [2] H. Krolewski, "Wasserwirtschaftliche Anforderungen zur Kühlwasserversorgung"
VGB-Bautagung 1970, Seite 11-21
- [3] "Wärmelastplan Rhein", hrsg. von der Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins, bearbeitet von der Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung, Karlsruhe (Mai 1971)
- [4] "Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch: Abflußgebiet Rhein",
hrsg. von der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

