

## Konvektion über Kühltürmen

### Zusammenfassung

Ein Kühlturm stellt eine lokale Energiequelle in der Atmosphäre dar. Die dadurch bewirkte Konvektion wird durch ein einfaches eindimensionales Modell berechnet, das auf der vertikalen Bewegungsgleichung, dem Energie- und dem Massenerhaltungssatz beruht. Vorausgesetzt sind: quasi-hydrostatisches Gleichgewicht, Stationarität und "Top hat"-Profil. Bei vorgegebenem Zustand der Umgebungsluft (Wind, Temperatur, Feuchte) werden aus dem Modell die Zustandsgrößen der aufsteigenden Luft berechnet: Temperatur, Wassergehalt und Vertikalwind, die Flüsse von Masse, sensibler und latenter Wärme sowie die Kondensationsrate. Die Randbedingungen am Kühlturmaustritt ergeben sich aus einem Modell für die Vorgänge im Kühlturm. Das Verhalten der aufsteigenden Luft läßt sich in drei Klassen einteilen: 1) Es bildet sich keine Wolke, 2) eine begrenzte Wolke entsteht und 3) es wird eine nach oben nicht begrenzte Wolke erzeugt. Durch die Modellrechnung wird ermittelt, bei welchen Umgebungsverhältnissen welche der Klassen zu erwarten ist. Die Ergebnisse werden für einen Trocken- und einen Naßkühlturm gleicher Leistung in Feuchte-Stabilitätsdiagrammen bei variierendem Horizontalwind dargestellt.

### Abstract

Cooling towers are local sources of heat and moisture. The convection above such a source is here computed by a simple one-dimensional model based upon the equation of motion in the vertical, the first law of thermodynamics, and the continuity equation. The following assumptions are introduced: quasi-hydrostatic equilibrium, steady state conditions and a top-hat profile. Temperature, vertical velocity, and water content of the ascending air above the cooling tower are calculated for given environmental conditions (wind, temperature, moisture). The net fluxes of sensible and latent heat and the rate of condensation are derived. The processes inside the cooling tower are computed by a separate model to obtain the boundary conditions at the base of the plume (i. e. the top of the cooling tower). The behaviour of the ascending air is classified as follows: 1) No cloud generation, 2) vertically limited cloud generation, and 3) a cloud which rises to an unlimited height. Through computation it is determined which of the above classes can be expected under different environmental conditions. The results are represented by stability-moisture diagrams for a dry and a wet cooling tower of the same heat generating magnitudes

### 1. Funktionsweise eines Kühlturmes

Bei dem Naßkühlturm wird das Kühlwasser im unteren Teil verrieselt, wobei etwa 1.5 Prozent des durchlaufenden Wassers verdunsten und der Luft als latente Wärme zugeführt werden. Durch die Berührung mit dem warmen Kühlwasser wird außerdem die Temperatur der Luft im Kühlturm erhöht, so daß diese einen Auftrieb erhält und feucht-adiabatisch aufsteigt. Am Kühlturmaustritt sieht man einen Flüssigwasserschwaden, der je nach Feuchte der Umgebungsluft eine unterschiedliche Länge erreicht oder in eine Wolke übergeht.

Bei dem Trockenkühlturm wird das Kühlwasser durch ein Rohrsystem geleitet, wobei nur sensible Wärme an die Luft abgegeben wird.

Die Ausmaße eines Naßkühlturmes mit einer Wärmeabgabe von 170 Mcal/s (das entspricht etwa der Abwärme eines Atomkraftwerkes mit 300 MW elektrischer Leistung) sind: Höhe  $\sim$  110 m und Durchmesser im Austritt  $\sim$  50 m. Ein Trockenkühlturm mit gleicher Wärmeabgabe ist größer: Höhe  $\sim$  150 m, Durchmesser  $\sim$  90 m.

\*) Vortragender

### 2. Modell der Konvektion über einer stationären Wärmequelle

Die aus dem Kühlturm strömende erwärmte Luft steigt unter Vermischung mit Umgebungsluft auf, wobei sie mit dem Wind der Umgebung treibt. Wenn die Wärmeabgabe des Kühlturmes und die Umgebungsverhältnisse konstant bleiben, entsteht über dem Kühlturm ein stationärer, vom Umgebungswind geneigter Aufwind-schlauch (Plume), wie er in Abb. 1 skizziert ist.

Die Modellgleichungen für die Berechnung der Zustandsgrößen im Plume erhält man, indem die vertikale Bewegungsgleichung, der Energie- und der Massenerhaltungssatz über eine senkrecht zur Mittelachse  $s$  stehende Querschnittsfläche  $F(s)$  des Plume integriert werden. Zur Vereinfachung ist dabei angenommen: Stationarität, quasi-hydrostatisches Gleichgewicht (Luftdrucke im Plume und außerhalb sind gleich) und das "Top hat"-Profil (alle Größen sind auf der Querschnittsfläche konstant und haben am Rand den zugehörigen Umgebungswert). Die Vertikalbewegung der Umgebungsluft wird vernachlässigt.

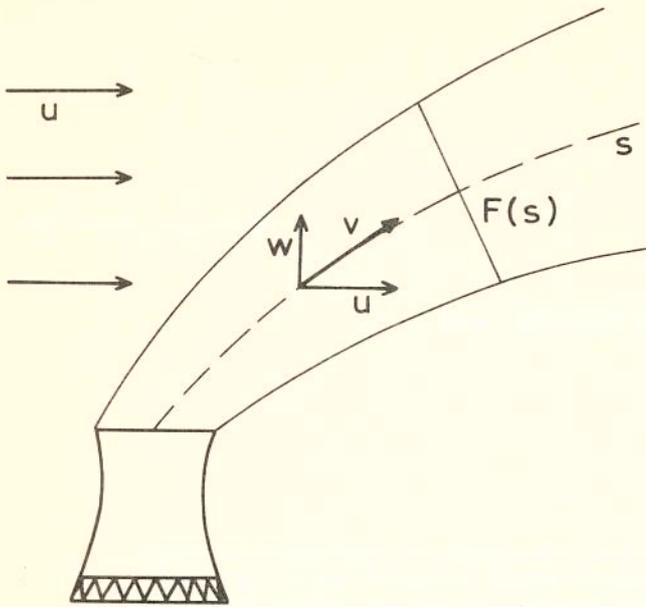


Abb. 1. Lage des Aufwindschlauches (Plume) über einem Kühlturm bei Horizontalwind in der Umgebung.

Die Änderung des Vertikalwindes längs der Plumeachse resultiert aus der Auftriebskraft und der Vermischung mit nur horizontal bewegter Umgebungsluft:

$$v \frac{dw}{ds} = g \left\{ \frac{\theta - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} + 0.604 (q - \bar{q}) - l \right\} - \frac{1}{M} \frac{dM}{ds} v w \quad [1]$$

Gleichung [2] stellt den 1. Hauptsatz der Wärmelehre für feuchte Luft dar. Die potentielle Temperatur ändert sich durch Vermischung und durch das Freiwerden von latenter Wärme bei Kondensation:

$$\frac{d\theta}{ds} = - \frac{1}{M} \frac{dM}{ds} (\theta - \bar{\theta}) + \frac{L}{c_p T} \left\{ \frac{dl}{ds} + \frac{1}{M} \frac{dM}{ds} (l - \bar{l}) \right\} \quad [2]$$

Unter der Annahme, daß kein Wasser ausfällt und daß keine Eisbildung stattfindet, ändert sich der Gesamtwassergehalt  $[q + l]$  nur durch Mischung mit Umgebungsluft:

$$\frac{d[q + l]}{ds} = - \frac{1}{M} \frac{dM}{ds} ([q + l] - [\bar{q} + \bar{l}]) \quad [3]$$

Die Änderung des Massenflusses  $M$ , die die Vermischung mit Umgebungsluft ausdrückt, läßt sich mit Hilfe von zwei Spezialfällen parametrisieren: Bei einem durch die Auftriebskraft bewirkten Plume ohne Horizontalwind gilt der übliche Entrainmentansatz nach TAYLOR (1):

$$\frac{dM}{dz} = 2 \pi R \rho \alpha w$$

d. h. der Massenfluß durch die Querschnittsfläche wird um das Einströmen von Masse durch den seitlichen Rand erhöht, wobei die Einströmgeschwindigkeit proportional dem Aufwind ist. Wenn dagegen Luft, ohne daß sie einer Auftriebskraft unterliegt, in horizontal bewegte Umgebungsluft hineinströmt, so gilt nach BRIGGS (5):

$$\frac{dM}{dx} = 2 \pi R \rho \gamma w$$

Die Werte für die Entrainmentkonstanten werden von mehreren Autoren nach Beobachtungen bzw. Laborversuchen angegeben:  $\alpha \sim 0.1$  nach den Arbeiten (1, 2, 3, 4, 5),  $\gamma \sim 0.5$  nach BRIGGS (5).

Da über einem Kühlturm im allgemeinen beide Prozesse auftreten, betrachtet man diese als Komponenten der Gesamtvermischung und faßt die Ansätze vektoriell zusammen:

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{ds} = \frac{2 \beta}{R} \quad \text{mit} \quad \beta = \left\{ \frac{\alpha^2 w^2 + \gamma^2 u^2}{w^2 + u^2} \right\}^{1/2} \cdot \frac{w}{v} \quad [4]$$

Der Radius  $R$  der Querschnittsfläche ergibt sich aus dem Massenfluß und dem Wind  $v$  längs der Plumeachse; die Entrainmentzahl  $\beta$  besteht aus dem windgewichteten Mittel der Entrainmentkonstanten  $\alpha$  und  $\gamma$ , multipliziert mit einem Faktor, der die Neigung des Plumes darstellt.

Die Gleichungen [1] bis [4] beschreiben das Verhalten von  $w$ ,  $\theta$ ,  $[q + l]$  und  $M$ . Bei Sättigung wird die spezifische Feuchte  $q$  als Funktion von  $p$  und  $\theta$  aus der CLAUSSIUS-CLAPEYRONschen Gleichung ermittelt, so daß sich der Flüssigwassergehalt  $l$  als Differenz aus Gesamtwassergehalt und Sättigungsfeuchte ergibt. Ist der Gesamtwassergehalt kleiner als die Sättigungsfeuchte, so ist kein Flüssigkeitswasser vorhanden ( $l = 0$ ).

Zur Lösung des Gleichungssystems benötigt man die Umgebungswerte (Querbalken) und die Randbedingungen am Kühlturmaustritt.

### 3. Randwerte

Die Randwerte werden durch ein Kühlturmmodell berechnet. Im Kühlturm wird die Luft durch die Auftriebskraft  $b$  von  $w = 0$  auf  $w = w_0$  im Austritt beschleunigt. Es gilt:

$$w_0^2 = \frac{2b}{K} H, \quad \text{mit} \quad b = g \left\{ \frac{T - \bar{T}}{T} + 0.604 (q - \bar{q}) - l \right\} \quad [5]$$

Hierbei ist  $H$  die Höhe des Kühlturmes von der Mitte der Lufteintrittsöffnung bis zum Austritt.  $K$  stellt einen empirisch zu bestimmenden Widerstandsbeiwert des Kühlturmes dar und ist laut (6) nahezu konstant. Hier ist  $K = 12$  angesetzt worden.

Die Enthalpiezunahme der Luft im Kühlturm ergibt sich aus der Wärmeabgabe  $Q$  und dem Massenfluß  $M_0$  durch seinen Austritt:

$$\frac{Q}{M_0} = c_p T - \bar{c}_p \bar{T} + L q - \bar{L} \bar{q} \quad [6]$$

Die Gleichungen [5] und [6] werden iterativ nach  $w$ ,  $T$  und  $q$  in Abhängigkeit von den Umgebungswerten aufgelöst, wobei unter Beachtung des feucht-adiabatischen Aufstiegens im Kühlturm eine mittlere Auftriebskraft angenommen wird. Im Naßkühlturm ist  $q$  die Sättigungsfeuchte und durch  $T$  und  $p$  (CLAUSIUS-CLAPEYRON) gegeben; im Trockenkühlturm gilt  $q = \bar{q}$ . Der Flüssigwassergehalt entsteht durch die Kondensation beim Aufsteigen, da vorausgesetzt wird, daß die Luft oberhalb der Verrieselungsanlage gerade gesättigt ist.

### 4. Lösungen des Modells

Abb. 2 zeigt die Lösungen des Modells [1] bis [6] für den Plume über einem Naßkühlturm mit einer Wärmeabgabe von 170 Mcal/s bei einer vorgegebenen Umgebung. Die Wolke, die sich ab 920 m Höhe bildet, enthält 14 000 kg Flüssigwasser in einem Volumen von rund  $3 \times 10^3 \text{ m}^3$ , die Kondensationsrate beträgt 102 kg/s.

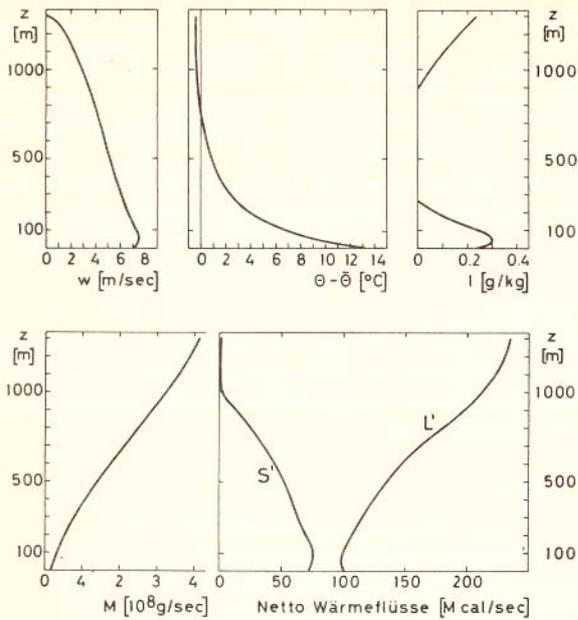


Abb. 2. Lösungen bei den Umgebungswerten Stabilität  $\partial\theta/\partial z = 2.5 \text{ K/km}$ , rel. Feuchte  $RF = 70\%$  und Wind  $u = 0 \text{ m/s}$ .

Aus den Ergebnissen können weitere Größen kombiniert werden. Die vertikalen Nettoflüsse sensibler Wärme  $S'$  und latenter Wärme  $L'$  sind

$$S' = (c_p T - \bar{c}_p \bar{T}) M$$

$$L' = (L q - \bar{L} \bar{q}) M$$

Hierbei ist angenommen, daß die gleiche Luftmenge, die im Plume vertikal transportiert wird, in der Umgebung absinkt.

Wie die Lösungen von den Umgebungswerten abhängen, ist aus Abb. 3 ersichtlich. Dort ist der Vertikalwind im Aufwindschlauch gegen die Höhe über dem Austritt

für verschiedene Feuchten, Stabilitäten und Windgeschwindigkeiten der Umgebung aufgetragen. Dabei bleiben jeweils zwei dieser Eigenschaften unverändert.

Je größer die Feuchte und je schwächer Stabilität und Wind sind, desto höher reicht der Plume. Als ein besonders charakteristischer Parameter erscheint das Kondensationsniveau (durch einen Pfeil gekennzeichnet): Wird es genügend weit überschritten, so bildet sich bei feucht-labiler Schichtung eine nach oben unbegrenzte Wolke, während bei stabiler Schichtung die Luft nicht beliebig aufsteigen kann. Da der Umgebungswind großen Einfluß auf die Vermischung hat (siehe Gleichung [4]), kann er selbst bei hoher Umgebungsfeuchte verhindern, daß das Kondensationsniveau erreicht wird.

### 5. Klassifizierung der erzeugten Wolken

Es können drei Verhaltensweisen der aufsteigenden Luft eindeutig unterschieden werden. Deshalb werden folgende Klassen festgelegt:

- 1) Bei trockener, stabiler Umgebung wird das Kondensationsniveau nicht erreicht; der aus dem Kühlturm tretende Schwaden löst sich in kurzer Entfernung auf.
- 2) Bei feuchter, stabiler Umgebung überschreitet die Luft das Kondensationsniveau und die Gleichgewichtshöhe, oberhalb deren sie kälter als die Umgebungsluft ist und dadurch gebremst wird; es bildet sich eine begrenzte Wolke.
- 3) Bei feuchter, feucht-labiler Umgebung überschreitet die Luft das Kondensationsniveau, ohne die Gleichgewichtshöhe zu erreichen, so daß eine konvektive Wolke erzeugt wird, die nach oben nicht begrenzt ist.

Die Klassen 2) und 3) lassen sich noch unterteilen. a) der Austrittsschwaden löst sich auf; b) der Austrittsschwaden geht direkt in die Wolke über. Bei einem Trockenkühlturm entsteht kein Schwaden, womit diese Unterteilung entfällt. Abb. 4 gibt die Klassen anschaulich wieder. Durch die Berechnung von rund 500 Beispielen wurden die genauen Grenzen der Klassen in Abhängigkeit von Feuchte und Stabilität bei verschiedenen Winden bestimmt. In Abb. 5 sind diese für einen Naß- und

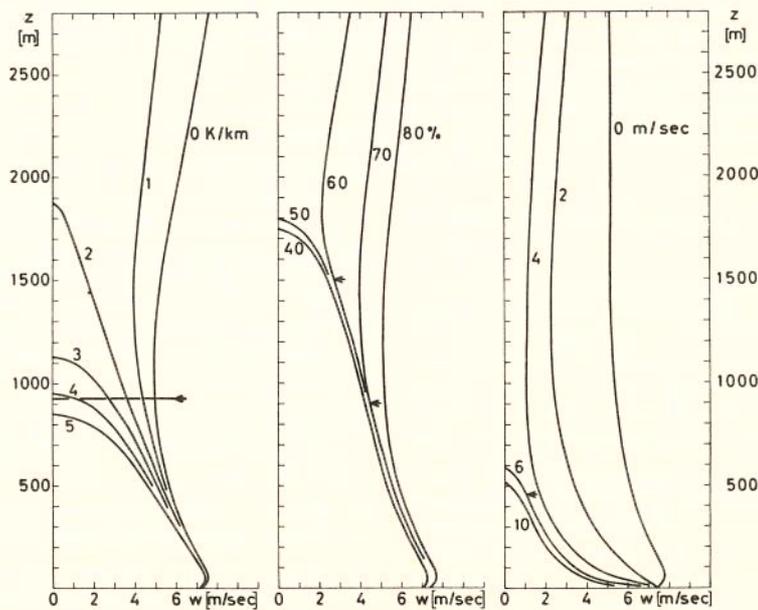


Abb. 3. Vertikalwind bei verschiedenen Umgebungswerten.  
 a)  $RF = 70\%$ ,  $u = 0 \text{ m/s}$   
 b)  $\partial\theta/\partial z = 1 \text{ K/km}$ ,  $u = 0 \text{ m/s}$   
 c)  $\partial\theta/\partial z = 2 \text{ K/km}$ ,  $RF = 90\%$   
 ← = Kondensationsniveau

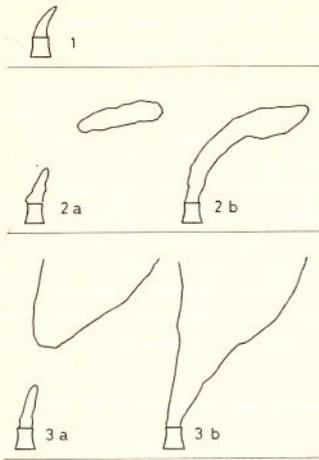


Abb. 4. Wolken-Klassen über einem Naßkühlturm.

einen Trockenkühlturm mit der Wärmeabgabe von jeweils 170 Mcal/s dargestellt.

Diese Diagramme gelten nur für Kühltürme mit den o. a. Auslegungsdaten. So nimmt z. B. bei einer größeren Wärmeabgabe der konvektive Bereich 3) zu. Um die Wolkenenerzeugung eines speziellen Kühlturmes zu untersuchen, müssen dessen Auslegungsdaten der Berechnung zugrunde liegen.

**6. Ausblick**

Es steht noch aus, das Modell zu überprüfen und die Entrainmentkonstanten exakter festzulegen. Dazu bestehen zwei Möglichkeiten: Die Zustandsgrößen in Plume und Umgebung werden höhenabhängig in einem einmaligen und aufwendigen Experiment genau gemessen und mit der Berechnung verglichen. Oder man kann einen Kühlturm nahe einer aerologischen Station über einen längeren Zeitraum beobachten, um eine statistische Klassifizierung der konvektiven Prozesse zu erhalten. Daraus werden Diagramme wie in Abb. 5 erstellt und mit den berechneten verglichen.

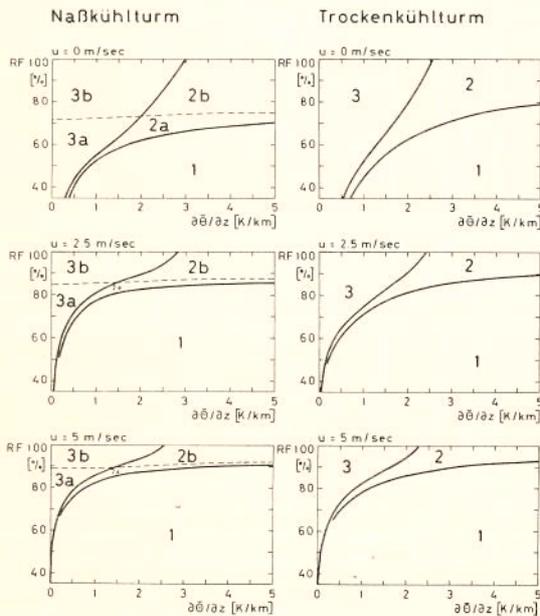


Abb. 5. Verteilung der Wolken-Klassen in Abhängigkeit von Stabilität und Feuchte der Umgebungsluft bei verschiedenen Horizontalwinden für einen Naß- und einen Trockenkühlturm (Wärmeabgabe 170 Mcal/s).

Weiterhin sollen in die Modellrechnung mit einbezogen werden: die diffusive Ausbreitung von Wärme und Feuchte, die Auswirkung der vertikalen Energieflüsse auf die Schichtung der Umgebung (besonders bedeutsam bei Klasse 3) und die Mikrophysik der Wolke (Tropfenspektrum, Niederschlag).

Die Rechnungen wurden auf einer IBM 370-168 der Universität Bonn durchgeführt. Die Rechenzeit für ein Beispiel beträgt bei 1-m-Schritten durchschnittlich 5 s

**Danksagung**

Dank der Unterstützung der Herren Dr. KROLEWSKI, SCHMITT-WITTRÖCK und P. FRAEDRICH (VEW) konnte der Widerstandsbeiwert eines Kühlturmes des Gersteinwerkes bestimmt werden.

**Symbolliste**

$c_p$	spez. Wärme feuchter Luft
$g$	Schwerebeschleunigung
$l$	spez. Flüssigwassergehalt
$q$	spez. Feuchte
$M =$	$Fqv$ Massenfluß längs der Plume-Achse
$L(T)$	Kondensationswärme
$Q$	Wärmeabgabe des Kühlturmes
$R$	Radius der Querschnittsfläche
$F =$	$\pi R^2$
$T$	Temperatur
$\alpha, \beta, \gamma$	Entrainmentfaktoren
$s(x, z)$	Achsenlänge
$u$	Horizontalwind der Umgebung
$w$	Vertikalwind im Plume
$v =$	$(u^2 + w^2)^{1/2}$ Wind längs der Plume-Achse
$x$	Koordinate in Richtung $u$
$z$	Vertikalkoordinate
$\rho$	Dichte
$\Theta$	potentielle Temperatur
$L'$	Nettofluß latenter Wärme
$S'$	Nettofluß fühlbarer Wärme
$RF$	relative Feuchte

Umgebungswerte haben einen Querbalken, die Größen am Kühlturmaustritt sind mit 0 indiziert.

**Literatur**

- (1) MORTON, B. R.; G. TAYLOR; J. S. TURNER: Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. Proc. Roy. Soc. A, 234 (1956) S. 1-23.
- (2) MORTON, B. R.: Forced Plumes. J. Fluid Mech. 5 (1959) S. 151-163.
- (3) WARNER, J.: On steady-state one-dimensional models of cumulus convection. J. atmosph. Sci., 27 (1970) S. 1035-1040.
- (4) SIMPSON, J.: On cumulus entrainment and one-dimensional models. J. atmosph. Sci. 28 (1971) S. 449-455.
- (5) BRIGGS, G. A.: Plume rise. A.E.C. Crit. Rec. Ser. Oak Ridge, Tenn.: Div. Techn. Inf. 1969.
- (6) Eidgenössische Kühlturmkommission, Bericht der Arbeitsgruppe über die meteorologischen Auswirkungen der Kühltürme. Payerne: 1972. S. A1-A7.

Anschrift: Dr. K. FRAEDRICH; Dipl.-Met. B. RUDOLF, Meteorologisches Institut der Universität 5300 Bonn, Auf dem Hügel 20.