

## **Die praktische Auswertung der Bildsendungen der Wettersatelliten**

Von Dr. Leopold K l e t t e r, Wien

Vortrag, gehalten am 5. November 1969

Die Verbesserung der Wettervorhersage durch Satellitenphotos beruht hauptsächlich darauf, daß diese Bilder die räumlich lückenlose Beobachtung des Wetters eines großen Gebietes, bis zum vollständigen globalen Überblick, ermöglichen. Sie erlauben die Beobachtung großräumiger zusammenhängender Wolkenstrukturen, was von einem Standort an der Erdoberfläche nicht möglich ist. Der Einblick in solche Strukturen führt zu einem besseren und tieferen Verständnis atmosphärischer Prozesse. Es ist ein großer Unterschied, ob die Bewölkung von einem Punkt der Erdoberfläche oder von einem kosmischen Standort beobachtet wird. Der Gesichtskreis des irdischen Beobachters ist klein, die Beschreibung der Bewölkung ist kleinräumig, kann aber sehr ins Detail gehen. Vom Standort des Wettersatelliten können dagegen große Räume lückenlos überblickt werden, der

Weltraumperspektive fallen aber die Details der Bewölkung zum Opfer. Mit der Optik der jetzigen Satellitenkameras können nur Wolkenelemente wahrgenommen werden, die eine Fläche von mindestens 25 km<sup>2</sup> haben. Die Wolkenklassifikation nach dem Prinzip des Internationalen Wolkenatlas, der für den Bodenbeobachter konzipiert ist, kann daher auf die Wolkenphotos der Wettersatelliten nicht angewendet werden. Von den im Wolkenatlas beschriebenen 30 Kleinwolkentypen sind viele in den Satellitenbildern unmöglich aufzufinden. Es muß daher für die Zwecke der Satellitenbeobachtungen zu einem anderen Einteilungsprinzip übergegangen werden, zu einem Prinzip, das Großwolkentypen festlegt. Nach den bisherigen Erfahrungen kann man in den Satellitenbildern am deutlichsten sieben Großwolkentypen unterscheiden. Die bisher festgelegten Wolkenkategorien sind: Cumuliforme, stratiforme und cirroforme Bewölkung, ferner Wolkenwellen, Wolkenzellen, Driftwolken und Wolkenwirbel.

### 1. Cumuliforme Bewölkung

Dieser Wolkentyp erscheint in den Satellitenbildern meist in Gruppen oder Haufen von unregelmäßig geformten Wolkenelementen der verschiedensten Größenordnungen. Diese Gruppen oder

Haufen können sich horizontal zu verschiedenen Wolkenmustern „organisieren“; sie können reihenweise in Bändern angeordnet sein, sie können sich zu Polygonen zusammenschließen oder auch völlig unregelmäßig verteilt sein. Was ihre Vertikalstruktur betrifft, können sie im tiefen, mittleren oder hohen Wolkenniveau vorkommen, oder auch alle Wolkenstockwerke durchsetzen. Dann gehören sie zu den hellsten Wolkentypen. Ein ausgereifter Cumulonimbus ist meist groß genug, um im Satellitenbild als Einzelindividuum wahrgenommen zu werden. Der mittlere Durchmesser dieser Gewittertürme beträgt 8 bis 16 km. Häufig kommen sie aber in Gruppen vor, deren Ausdehnung dann bedeutend größer ist. Die auffallend große Helligkeit, der Schatten, der nicht selten auf tieferliegende Wolkenschichten geworfen wird und die cirroforme Bewölkung, die an ihrem Gipfel durch den Amboß erzeugt wird, sind charakteristische Merkmale dieses Wolkentypus. Manchmal ist in einer der serienweise auftretenden Cumulonimbusgruppe auf der einen Seite ein scharfer Rand dieser Bewölkung zu erkennen, auf der Gegenseite ist der Rand jedoch sehr unscharf, zerrissen und faserig. Dieser Effekt ist durch die Cirren des Amboß, die von einer starken Höhenströmung weggetragen werden, verursacht. Ein solches Satellitenbild gibt daher auch einen deutlichen Hinweis auf die Richtung des herrschenden Höhenwindes. In

anderen Satellitenbildern, die Gruppen von Cumulonimben zeigen, treten deutlich Glanzlichter und Schatten auf. Diese Licht- und Schattenverteilung ermöglicht eine klare Trennung zwischen der Bewölkung, die sich vertikal nach oben entwickelt, und einer sich horizontal ausbreitenden stratiformen Schicht.

## 2. Stratiforme Bewölkung

Es liegt in der Natur dieses sehr einförmig aussehenden, meist über eine größere Fläche sich erstreckenden Wolkentyps, daß er weder eine besondere Musterung, noch eine stärkere Rauigkeit an seiner Oberfläche aufweist. Diese Bewölkung kommt in allen Wolkenstockwerken vor; in dem untersten als Nebel, als tiefliegende Stratusdecke, im mittleren als dicker Altostratus und im obersten als dichter Cirrostratus, letzterer im allgemeinen zusammen mit tieferen Wolken-schichten. Dann erscheint er im Satellitenbild mit ziemlicher Helligkeit. Es ist oft schwierig, tiefe, mittlere und hohe stratiforme Wolken-schichten voneinander zu unterscheiden. Sehr gut gelingt es diese Aufgabe zu lösen, wenn Infrarot-Strahlungsmessungen vorliegen, weil es mit Hilfe dieser Strahlungswerte möglich ist, die Obergrenze der geschlossenen Wolken-schichten zu bestimmen. Wenn nur Bilder vorliegen, kann man bei günstigem Sonnenstand die

Licht- und Schattenverteilung der Bewölkung zur Interpretation der Wolkenstruktur heranziehen.

### 3. Cirroforme Bewölkung

Dieser Wolkentypus erscheint von oben gesehen faserig oder federförmig. Häufig ist die cirroforme Bewölkung transparent, so daß man das Gelände (z. B. Küstenlinien) oder tiefere Bewölkung erkennen kann. Sehr häufig tritt cirroforme Bewölkung zusammen mit anderen Wolkentypen auf, zum Beispiel mit Cumulonimben. Wenn unter der Cirrostratusschicht tiefere Bewölkung vorhanden ist, dann treten dort helle Flecke auf; wo keine tiefere Bewölkung vorhanden ist, erscheint die Cirrostratusschicht grau. Der Rand einer tieferen Wolkenschicht erscheint diffus, wenn er durch dünne, höhere Bewölkung beobachtet wird.

### 4. Wolkenwellen

In den Satellitenbildern werden häufig Wolken beobachtet, die eine deutliche Wellenstruktur aufweisen. Sie werden mitunter von starken Winden erzeugt, die über einem Gebirge wehen. Es handelt sich dabei um Wellen im Luftmeer auf der Lee-seite von Gebirgen, um „Leewellen“, die durch Wolken sichtbar geworden sind. Diese Bewölkung entsteht unter folgenden Bedingungen: a) Die Windrichtung muß nahezu senkrecht zum Gebirge

sein und in einer tieferen Schicht der Troposphäre vorkommen, b) Die Windgeschwindigkeit muß über den Berggipfeln mindestens 10 m/sec betragen, d) Die Atmosphäre muß stabil geschichtet sein. Das Auftreten von Wolkenwellen, die durch Gebirgsbarrieren erzeugt werden, läßt ziemlich gute Schlüsse auf Windrichtung und Windgeschwindigkeit zu, die besonders in Gebieten mit spärlichen aerologischen Meßdaten sehr wertvoll sind.

Wolkenwellen über lange Strecken können auch in starken Strömungen der Atmosphäre, vor allem im Jetstream auftreten. Durch die Jetströmung wird ein Cirrusschirm erzeugt, an dessen Rand das Windmaximum auftritt. Senkrecht zur Richtung dieser Maximalen Strömung treten häufig Transversalwellen auf.

## 5. Wolkenzellen

Durch Satellitenphotos wurde ein neuer Wolkenentyp entdeckt, der von einem Beobachter an der Erdoberfläche nicht gesehen werden kann. Es sind dies in größeren Verbänden auftretende Wolkenzellen, die eine Struktur etwa wie eine Bienenwabe aufweisen. Der Rand dieser Zellen besteht aus Wolken, die Mitte aus einem wolkenfreien Gebiet. Der Durchmesser eines dieser Wolkenpolygone schwankt zwischen 50 und 80 km, es hat demnach Dimensionen, die für eine Beobach-

tung von der Erdoberfläche nicht überblickbar sind. Untersuchungen dieses Wolkentypus haben ergeben, daß es zu einer solchen Wolkenbildung häufig dann kommt, wenn sich ein kalter, polarer Luftstrom über einer wärmeren Meeresoberfläche südwärts ausbreitet. In der instabilen Polarluft, die unten von der wärmeren Meeresoberfläche erwärmt wird, bildet sich durch Konvektion Cumulus- und Cumulonimbusbewölkung, die sich zu Polygonen gruppiert, woraus sich diese sehr charakteristische Wolkenstruktur ergibt. Die hohe Feuchtigkeit in der Nähe der Meeresoberfläche ist eine wichtige Voraussetzung für die oft massenhafte Produktion dieser Konvektionsbewölkung. Diese Wolkentype ist charakteristisch für instabiles Wetter über dem Meer.

## 6. D r i f t w o l k e n

Die Wolken zeigen häufig eine Vorliebe, sich in Reihen, Linien oder Bändern anzuordnen. Die Ursache dieser Organisationsform der Bewölkung ist die Strömung, die atmosphärische Drift. Wenn z. B. der Wind mit der Höhe zunimmt und dabei seine Richtung beibehält, dann sind die Wolkenbänder in Richtung des Windes ausgerichtet. In solchen Fällen kann aus dem Wolkenbild direkt die Richtung der Strömung in den unteren Schichten der Atmosphäre bestimmt werden. Wenn aber die

Bänder nicht gleichmäßig schmal bleiben, sondern sich stärker verdicken und dabei ungleichmäßig werden, dann zeigen sie eine Drehung des Windes mit der Höhe an. Vielfach ändern bei einer solchen Strömungslage die Bänder auch ihre Streichrichtung, wobei sie sich mehr und mehr parallel zur Front einstellen. In einem solchen Fall richten sich die Wolkenbänder mehr und mehr parallel zum sogenannten „Shearwind“ aus.

## 7. Wirbelwolken

In den Satellitenbildern treten häufig sehr auffallende Wolkenformen auf, die eine mehr oder weniger ausgeprägte Spiralstruktur zeigen. Sie gehören zu den interessantesten Wolkentypen, die sehr lebhafte Prozesse in der Atmosphäre widerspiegeln. Diese Prozesse werden durch zyklonale Strömungen verursacht, die auf Vorticity-Maxima zurückgeführt werden können. Vorticity-Maxima können in der Nähe der Erdoberfläche oder auch in der höheren Troposphäre konzentriert sein. Sie wandern mit der atmosphärischen Grundströmung, wobei sie sich verstärken oder abschwächen können. Ein schwächeres Vorticity-Maximum tritt in den Satellitenphotos oft nur als verdickte Cumulusbewölkung auf, die ein „Komma“ formiert. Man kann dann in solchen Bildern erkennen, wie sich die Bewölkung, die sich vorwiegend



aus konvektiven Wolkenzellen zusammensetzt, deutlich um ein Rotationszentrum gruppiert. Wenn die Störung rasch wächst, dann werden die Cumulus-Köpfe mehr und mehr durch die Höhenströmung verwischt und verschmelzen zu einem kontinuierlichen Altostratusband in mittelhohen oder hohen Schichten. Diese Wolken bilden dann das „Komma“. Über dem Land ist eine solche Entwicklung wesentlich schwächer, weil der Wasserdampfgehalt der Luft viel geringer ist. Oft erzeugt ein vorhandenes Vorticity-Maximum über dem Land auch keine Bewölkung. Bei fortschreitender Entwicklung geht die Komma-Bewölkung in eine ausgeprägte Spiralwolke über. Ein Sturmtief entwickelt eine Wolkenspirale mit mehreren Windungen, gelegentlich kann im Zentrum einer solchen Bewölkung sogar ein „Auge“ wie in einem tropischen Wirbelsturm auftreten.

### **Satellitenbilder als Hilfsmittel für die Wetteranalyse und Prognose**

Die Satellitenphotos können in den meisten Fällen zu Interpretation der synoptischen Lage benutzt werden. Synoptische Systeme, wie Fronten, der Jetstream, Zyklonen und Antizyklonen, aber auch Höhenträge und -rücken können mit großer Genauigkeit festgestellt und lokalisiert werden. In vielen Fällen kann aber nicht nur die Existenz

eines bestimmten synoptischen Systems identifiziert werden, sondern auch sein Entwicklungsstadium. Dadurch liefern die Satellitenbilder auch direkte prognostische Hinweise.

### 1. Die Kaltfront

Die aktive Kaltfront erscheint in den Satellitenphotos als ein Wolkenband, dessen Breite im Verhältnis zu seiner Länge schmal ist. Der vordere Rand der Kaltfrontbewölkung ist meist diffus (Cirrostratusbewölkung), der hintere Rand ist dagegen scharf begrenzt, wie eine Schnittlinie; an dieser Scheidelinie wechseln sowohl Wolkenmenge und Wolkentyp unvermittelt. Aktive Kaltfronten der beschriebenen Art, in deren Bereich die Luft in aufsteigender Bewegung begriffen ist, werden meist an der Vorderseite von Höhentroggen gefunden. Beim Übergang von der Trogvorderseite zur Trogrückseite wird die Kaltfrontbewölkung diffus. Der Wechsel in der Wolkenstruktur tritt an jener Stelle ein, wo die Troglinie der 500 mb — Fläche die Kaltfront schneidet. Nach diesem Schnittpunkt tritt häufig eine Aufsplitterung des frontalen Wolkenbandes in zwei Teilbänder ein. Der Teil der Front, der vor der Troglinie liegt, ist gut ausgeprägt, sehr hell und zeigt keine Durchbrechungen. In diesem Teil des Höhentrogges erreicht die Vertikalbewegung nach aufwärts ihr Maximum.

Nach dem Schnittpunkt der Front mit der Höhentroglinie wird das Wolkenband der Front sofort diffuser und durchbrochen. Die an der Trogrückseite eintretende Degenerierung der Front hängt mit den Absinkvorgängen zusammen, die hier auftreten. Aus den Satellitenbildern geht eindrucksvoll hervor, daß an der Höhentroglinie ein abrupter Wechsel des Wetters stattfindet.

## 2. Die Warmfront

Die Warmfront erzeugt ein breites strato- und cirroformes Wolkenband, das nach Süden zu plötzlich abreißt und sich in Linien cumuliformer Wolken auflöst. Die Warmfront tritt häufig nur als „Wolkenstumpf“ in Erscheinung. Die „amputierte“ Stelle liegt meist dort, wo im 500 mb-Niveau die Strömung im Warmluftsektor antizyklonal wird. An dieser Stelle wird die Warmfront inaktiv. Diese Warmluftstümpfe sind eine der Hauptursachen dafür, daß in Österreich Warmfronten selten aktiv wirksam sind. Die Warmfront wird meist schon nördlich der Alpen aufgelöst. Zur Auflösung der Warmfront hilft auch der im Warmsektor auftretende Südföhn am Alpennordrand noch kräftig mit. Nur wenn die Warmfront mit einer kräftigen Nordwestströmung, die über die Alpen hinwegführt, herangebracht wird, tritt in Österreich Bewölkung und Niederschlag auf. Am wetteraktiv-

sten werden aber in Österreich Warmfronten, die sich im Zusammenhang mit einem Mittelmeertief bilden. In diesem Fall bringt zwar die Warmluftbewölkung in Österreich sehr schlechtes Wetter und ergiebige Niederschläge, die Bodenwarmfront selbst bleibt aber südlich der Alpen.

### 3. T i e f d r u c k g e b i e t e

Tiefdruckgebiete atlantischen oder mittelmeeerischen Ursprungs produzieren in Europa Wolkensysteme mit mehr oder weniger gut erkennbarer Struktur. Der Grad der strukturellen Durchbildung der zyklonalen Wolkensysteme hängt mit dem Entwicklungsstadium des Tiefs eng zusammen. Flächenhaft ausgebreitete Wolkenschichten ohne besondere Struktur sind mit ausgedehnten aber flachen, gradientschwachen Tiefdruckgebieten verknüpft. Deutliche „Komma“ — Formen werden entweder von Zyklonen gebildet, die in Entwicklung begriffen sind aber vertikal noch nicht hoch in die Atmosphäre reichen, oder von passiv sich verhaltenden Zyklonen, die zwar hochreichend sind, aber keine kräftigen Wirbelbewegungen aufweisen. Gestreckte asymmetrische Wolkenspiralen mit scharfen Rändern werden von Tiefdruckgebieten erzeugt, die in stürmischer Entwicklung begriffen sind, also von „jungen“, aktiv sich verhaltenden Zyklonen. Wenn das Tief „reifer“ wird

und in den quasi-stationären Zustand übergeht, wird die Wolkenspirale immer runder und symmetrischer. Schließlich bilden sich um den Mittelpunkt des Tiefs konzentrische Wolkenringe, die durch verhältnismäßig schmale, wolkenfreie Streifen voneinander getrennt sind.

Aus den mit Satelliten beobachteten Wolkenstrukturen erhält man auch Hinweise über den Trend eines zyklonalen Systems. Aus bestimmten Merkmalen der Bewölkung kann die Änderung eines synoptischen Zustandes oft früher erkannt werden als aus den konventionellen Unterlagen. Die synoptischen Boden- und Höhenwetterkarten hinken oft der meteorologischen Entwicklung, besonders bei raschen Umstellungen nach, die Wolkenstrukturen widerspiegeln hingegen sofort die geänderten atmosphärischen Bedingungen. Andererseits kann in vielen Fällen erkannt werden, daß ein Stillstand bzw. Auflösung eines zyklonalen Systems zu erwarten ist. Die Satellitenbilder können daher in den meisten Fällen nicht nur zur vollständigeren Beschreibung einer gegebenen Wetersituation, sondern auch als direktes prognostisches Hilfsmittel verwendet werden.