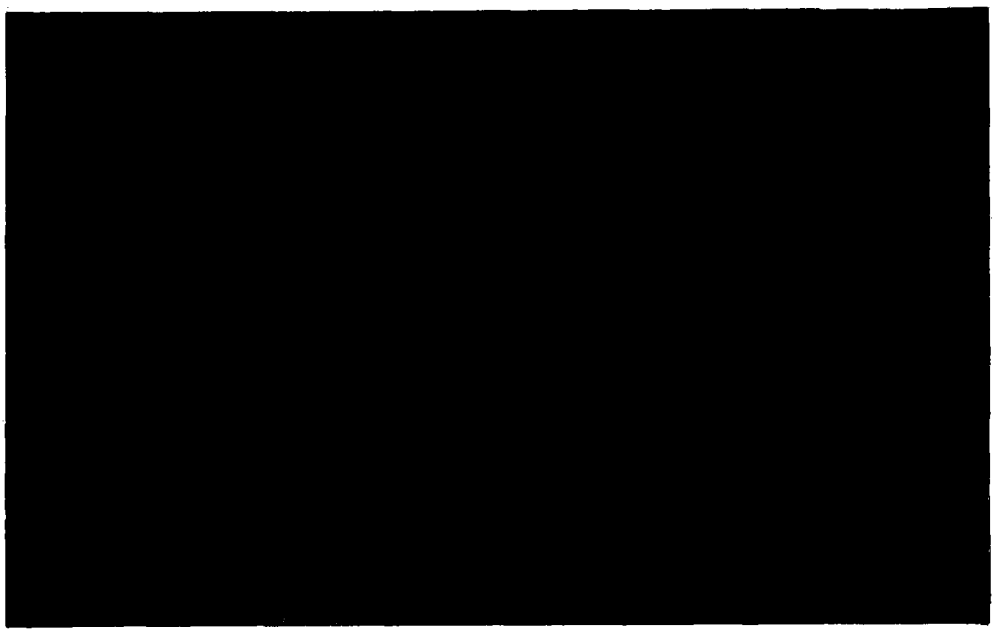

Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute

Zürich

Nr. 79

ERFASSUNG VON WETTERRADARDATEN IN DER SCHWEIZ

von

Jürg Joss, Locarno Monti

April 1978

Instrumente 551.501.81(494)

Zusammenfassung

In der Schweiz wurde im Oktober 1977 die erste der beiden neuen Radarstationen - zur Ablösung der 1961 beschafften Geräte - in Betrieb genommen. Sie liefert alle 10 Minuten ein digitales Radarbild, inklusive beschränkte Information über die vertikale Verteilung des Radarechos. Das Bild wird über Telephonleitungen an verschiedene Benützer vermittelt. Diese haben die Möglichkeit, die Art der Präsentation entsprechend ihren Bedürfnissen auf ihrem Fernsehschirm oder Faksimileschreiber auszuwählen. Gesichtspunkte werden diskutiert, die sich bei der Wahl der Radarparameter, des Auswerteverfahrens, der Uebertragungsart, der Darstellung und insbesondere der gewählten Methode zur Identifikation und Unterdrückung der Bodenechos stellen. Abschliessend zeigen eine kurze Fehlerabschätzung und ein Anwendungsbeispiel die Möglichkeiten und Grenzen der gewählten Wetterradardatenerfassung.

Résumé

Le premier des deux nouveaux radars météorologiques est devenu opérationnel en octobre 1977. Il remplace l'appareil mis en service à la Dôle en 1961. Ce radar fournit, sous forme digitale, une image toutes les 10 minutes. Cette image contient en outre quelques informations sur la structure verticale des précipitations. Elle est transmise aux utilisateurs par le moyen de lignes téléphoniques. Ceux-ci peuvent, dans certaines limites et suivant leurs besoins, faire présenter l'image sur un écran de télévision ou sur un appareil de facsimilé. On discute quelques problèmes que soulèvent le choix des paramètres du radar, les méthodes d'exploitation, la présentation et la transmission des données, en particulier la méthode retenue pour identifier et supprimer les échos fixes dus au relief. Pour terminer, on montre au moyen d'une courte estimation des erreurs et d'un exemple d'image les possibilités et les limites du nouveau radar météorologique choisi pour la Suisse.

Riassunto

Nell'ottobre 1977 é stata messa in funzione la prima di due nuove stazioni svizzere con radar meteorologico, in sostituzione di quella istallata nel 1961. Essa fornisce ogni 10 minuti un'immagine radar digitale, che contiene pure una limitata informazione sulla distribuzione verticale degli echi. Le immagini vengono trasmesse per via telefonica ai diversi utilizzatori. Questi possono adattare entro certi limiti ai loro propri bisogni le immagini ricevute su teleschermo o su facsimile. Il presente articolo presenta taluni aspetti concernenti la scelta dei paremetri radar, il metodo di analisi, la rappresentazione e la trasmissione dei dati e in modo speciale il metodo scelto per l'identificazione e la soppressione degli echi fissi del suolo. Una breve stima degli errori e un esempio d'applicazione mostrano infine le possibilità e i limiti d'informazione del nouvo radar meteorologico scelto.

Summary

In October 1977 the first of two weather radars, planned to replace the ones installed in 1961, became operational. Every 10 minutes a digital radar picture, which includes some information about the vertical structure of the echoes, is generated. These pictures are transmitted by telephone line to various users, who can choose to display the information either on a television screen or facsimile recorder, according to their needs. The choice of the radar parameters, procedures for analysing, presenting, and transmitting the data and the method of identifying and suppressing ground clutter are described. Finally a brief discussion of the errors and a sample picture show the possibilities and limitations of the Swiss Meteorological Service's new weather-radar.

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

		Seite
1.	EINLEITUNG	3
	1.1. Ausgangslage	3
	1.2. Richtlinien für die Beschaffung	3
	1.3. Vorteile der gewählten Datenverarbeitung	4
2.	RADARPARAMETER	5
	2.1. Ziel bei der Auswahl	5
	2.2. Wellenlänge und Antenne	5
	2.3. Antennensteuerung	5
	2.4. Sendeleistung, Impulsdauer, Pulsrepetitionsfrequenz	5
	2.5. Empfänger	6
	2.6. Radargleichung	6
3.	SIGNALVERARBEITUNG	8
	3.1. Informationsgehalt	8
	3.2. DVIP (Digital Video Integrator and Processor)	8
	3.3. Echofluktuationen	9
4.	BODENECHOUNTERDRUECKUNG	9
	4.1. Problem	9
	4.2. Bodenechos aus der Hauptkeule	9
	4.3. Bodenechos aus Seitenkeulen	9
	4.4. Möglichkeiten zur Elimination	10
	4.5. Generierung von Bodenechokarten	11
5.	DATENANALYSE	11
	5.1. Digitale Radardaten	11
	5.2. Inhalt des verarbeiteten Bildes	11
	5.3. Grundauswertung	12
	5.4. Grundriss	13
	5.5. Aufriss, Seitenriss	14
6.	BILDUEBERTRAGUNG UND DARSTELLUNG	14
	6.1. Anforderungen	14
	6.2. Uebertragungsart	14
	6.3. Uebertragungstermin und Format	15
	6.4. Darstellung auf dem Fernsehgerät	15
	6.5. Darstellung auf dem Faksimile-Empfänger	16
7.	FEHLERABSCHAETZUNG	17
	7.1. Bestimmung des Ortes	17
	7.2. Bestimmung der Regenintensität	17
8.	ANWENDUNGSBEISPIEL	18
	LITERATUR	20

1. E I N L E I T U N G

1.1. Ausgangslage

Die MZA beauftragte die Radio Schweiz AG, entsprechend ihren Bedürfnissen und denjenigen des Eidg. Luftamtes, je ein, dem heutigen Stand der Technik entsprechendes, neues Wetter-Radargerät für La Dôle und Albis zu beschaffen. Von drei Firmen in enger Wahl wurde der Auftrag an die amerikanische Firma EEC in Enterprise (Alabama) vergeben, die ihrerseits die Herstellung der notwendigen Software an die "Creative Group Inc." delegiert hat.

Ein erstes Gerät wurde für La Dôle zum Preise von Fr. 900'000.- inklusive drei Fernseh- und zwei Faxinterfaces beschafft und die Installation im wesentlichen anfangs Oktober 1977 abgeschlossen. Erste Versuche sind positiv verlaufen und es ist zu erwarten, dass alle formulierten Bedürfnisse erfüllt und sogar teilweise übertroffen werden. Dies ist wohl vorwiegend auf die gute Zusammenarbeit mit der Lieferfirma zurückzuführen, die es erlaubte, neuere radarmeteorologische Erkenntnisse dank der rasch fortschreitenden Technik in Wirklichkeit umzusetzen.

1.2. Richtlinien für die Beschaffung

Die für die Beschaffung massgebenden Richtlinien seien hier kurz zusammengefasst:

1. Uebersichtliches Radarbild im Bereiche von 400x400 Kilometern. Das Bild soll stehend und wenn möglich im hellen Raum auswertbar sein.
2. Erneuerung der Bilder in kurzen Zeitabständen. Für die Kurzfristprognose wurde ein neues Bild alle 10 Minuten gewünscht.
3. Information über die Höhe starker Echos erwünscht.
4. Einfache Interpretierbarkeit der Radarbilder:
   - Bodenechos klar als solche identifizierbar
   - Korrektur der Echoabschwächung infolge Divergenz des Radarstrahles
   - Abschwächung durch Niederschläge vernachlässigbar
   - Echointensitätsstufen mit entsprechend zugeordneten Regenintensitäten, soweit dies möglich ist.
5. Von jedem Benützer individuell wählbare Darstellung: Anzahl und Farbzuordnung der darzustellenden Intensitätsstufen, Art der Darstellung der Bodenechos sowie fester Referenzpunkte.
6. Uebertragbarkeit digitaler Bilder über Telephonleitung an alle Benützer gleichzeitig.
7. Darstellung der Bilder auf Fax oder Fernsehschirm.
8. Hohe Zuverlässigkeit und geringer Wartungsaufwand.

1.3. Vorteile der gewählten Datenverarbeitung

Die gewählte Datenanalyse besitzt folgende vier Hauptmerkmale:

a) Ein Raum von 400x400x12 km wird in Quader von 2x2x1 km zerlegt.

b) Der Maximalwert der Teilelemente wird gebildet (nicht Mittelwert).

c) Eine beschränkte Höheninformation über die Niederschläge wird durch Berechnung von Auf- und Seitenriss erhalten.

d) Bodenechos werden mit einem speziellen Algorithmus behandelt.

a) Zerlegung in Raumelemente:

Durch den Rechner erfolgt als erstes eine Transformation von Polarkoordinaten in kartesische Koordinaten. Dies ergibt eine homogene Auflösung im erfassten Raum und erleichtert damit die Berechnung von Grund-, Auf- und Seitenriss. Ebenso bringt uns diese Umwandlung einer Weiterverarbeitung der Radardaten im Computer und deren Ueberlagerung mit andern Datenquellen (Satelliten- und ANETZ-Daten) einen grossen Schritt näher.

b) Maximalwert:

Durch die Darstellung des Maximalwertes wird den grossen Niederschlagsintensitäten, die vor allem erfasst werden sollen, ein besonderes Gewicht beigemessen. Sie besitzen oft eine geringe Ausdehnung, würden somit durch eine Mittelung verwischt. Der durch die Verwendung der Maximalwerte eingeführte Fehler ist geringfügig und kann bei der Eichung weitgehend kompensiert werden. Durch dieses Verfahren kann zudem Speicherplatz und viel Rechenzeit gespart werden.

c) Höheninformation:

Aus Aufriss und Seitenriss lassen sich, erleichtert durch die oben erwähnte Maximalwertbildung, Höhenausdehnungen von starken Niederschlägen lokalisieren (durch Rückwärtseinschneiden). Die wesentliche Information ist auf einem einzigen Bild übersichtlich dargestellt und der RHI (Range Height Indicator) erübrigt sich für die meisten Anwendungen.

d) Bodenechos:

Sie können eindeutig erfasst und bei Bedarf als solche dargestellt werden. Die zwischen einzelnen Bodenechos liegende Information wird optimal genützt, was in einem gebirgigen Land wie der Schweiz besonders wichtig ist. Beim Uebergang vom konventionellen analogen Radarschirm auf eine digitale Darstellung ist eine klare Erfassung und Darstellung der Bodenechos besonders wichtig, da man gegenüber den alten, analogen Bildern die Möglichkeit verloren hat, Wetterechos anhand ihrer diffusen Ränder von Bodenechos zu unterscheiden.

2. RADARPARAMETER

2.1. Ziel bei der Auswahl

Das Ziel bei der Auswahl der Radarparameter bestand darin, die meteorologisch relevanten Regenintensitäten (zwischen 0.3 und 100 mm/h) im ganzen überstrichenen Gebiet möglichst zuverlässig erfassen zu können. Höchste Empfindlichkeit zur Erfassung schwächster Echos ist somit nicht erwünscht, denn dadurch würden zusätzliche Bodenechos erscheinen und zudem vermehrt kompliziertere und störanfällige Teile erforderlich. Zudem würde die Gefahr bestehen, dass starke, nahe gelegene Niederschläge den Empfänger sättigen könnten, womit die wahre Intensität nicht mehr erfasst würde.

2.2. Wellenlänge und Antenne

Ein wichtiger Kompromiss ist dabei auch die Wahl der Wellenlänge. Kurze Wellen (3 cm) benötigen bei gleicher Bündelung des Radarstrahles (örtliche Auflösung) kleinere (3 mal) und billigere Antennen als längere Wellen (10 cm). Niederschlagsechos sind im Verhältnis zu den Bodenechos bei 3 cm Wellen hundertmal stärker als bei 10 cm Wellen, also günstiger. Kurze Wellen werden jedoch von starken Niederschlägen abgeschwächt, so dass die wahre Niederschlagsintensität nicht bestimmt werden kann und zudem die Echointensität von dahinter liegenden Niederschlagszellen verfälscht wird.

Für unsere Anwendungen sind 5 cm-Wellen am besten geeignet. Sie sind kurz genug, um mit einer erschwinglichen Antenne (Durchmesser 3.6 m) akzeptable Auflösung (1.1 Grad) zu erhalten und lang genug, damit die Abschwächung im allgemeinen vernachlässigt werden kann (5dB/km bei 100 mm/h Regenintensität). Der Antennengewinn beträgt in der Hauptkeule 43dB, die Seitenkeulen der Antenne sind mindestens 23dB schwächer. Dieser Wert wird durch das Radom auf ca. 20dB verschlechtert.

2.3. Antennensteuerung

Die Antenne dreht kontinuierlich mit 3 Umdrehungen pro Minute, wobei ihre Elevation, vom Rechner gesteuert, nach einer fest programmierten Tabelle 20 Werte annimmt. Diese Höhenstufen werden von unten nach oben durchlaufen. Der Rechner wartet bei jeder Umdrehung mit der Datenaufnahme, bis die neue Elevation erreicht ist.

2.4. Sendeleistung, Impulsdauer, Pulsrepetitionsfrequenz

Die Sendeleistung von mindestens 250 kW ergibt bei einer Impulsdauer von 2µs und einer Pulsrepetitionsfrequenz (PRF) von 259 Hz eine mittlere Leistung von 130 Watt. Diese Daten erlauben mit einem handelsüblichen Empfänger, die gewünschte Empfindlichkeit in der grössten Entfernung (230 km) ohne Schwierigkeiten zu erreichen. Die Impulsdauer von 2µs entspricht einer Distanzauflösung von 300 m und lässt bei der gewünschten Auflösung von 1 km eine Mittelung von drei unabhängigen Messpunkten durch einen besonderen Geräteteil zu (siehe Abschnitt 3.2.).

2.5. Empfänger

Die Bandbreite des Empfängers beträgt 700 kHz, die auf den Antennenflansch bezogene Rauschleistung von Empfänger und Mischstufe -113 dBm. Der Zwischenfrequenzverstärker besitzt eine logarithmische Kennlinie, so dass ohne Umschalten ein Signalbereich von 10^8 (80 dB) vermessen werden kann. Dieser Bereich ist für die Darstellung der gewünschten Regenintensitäten im gewählten Distanzbereich notwendig.

2.6. Radargleichung

Die Radargleichung lässt berechnen, welche Leistung ein gegebenes Radargerät von einem bestimmten Ziel (Flugzeug, Regen) in Abhängigkeit von der Entfernung empfängt. In diesem Abschnitt seien kurz die wichtigsten Formeln zusammengestellt, deren Herleitung in der Fachliteratur ausführlich diskutiert wird.

VERWENDETE SYMBOLE

Symbol	Parameter	Einheit	Typ.Wert	Bemerkungen
σ	Streuquerschnitt	m^2	$1\ m^2$	Jagdflugzeug
V	Impulsvolumen	m^3	$\sim 10^9\ m^3$	bei r = 100 km
Z	Reflektivitätsfaktor	mm^6/m^3	$300\ mm^6/m^3$	bei R = 1 mm/h unabhängig von λ
R	Regenintensität	mm/h	1 mm/h	schwacher Regen
f	Frequenz	Hertz	5600 MHz	Sendefrequenz
λ	Wellenlänge	Meter	5,4 cm	$\lambda = c/f$
τ	Impulsdauer	Sekunde	2 µs	Sendezeit
ℓ	Länge Impulsvolumen	Meter	300 m	$\ell = \tau \cdot c/2$
F	Pulsrepetitionsfrequenz	Hertz	259 Hz	Anzahl Sendeimpulse pro Sekunde
Pt	Sendeleistung	Watt	250 kW	250 kW = +84 dBm
E	Impulsenergie	Joule	0,5 Ws	$E = Pt \cdot \tau$
Pav	Mittlere Leistung	Watt	130 W	$Pav = E \cdot F = Pt \cdot \tau \cdot F$
P	Empfangsleistung	Watt	10^{-11}W	10^{-11}W = 10^{-8} mW ≙ -80 dBm
r	Distanz zum Objekt	Meter	100 km	
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s	$3 \cdot 10^8$ m/s	
Δt	Echoverzögerung	Sekunde	666 µs	$\Delta t = 2 \cdot r/c$
Θ	Strahlöffnungswinkel	Grad	1.1^0	$70\lambda/d$
G	Antennengewinn	---	43 dB	$2 \cdot \pi \cdot A / \lambda^2 \sim 40'000 / \theta^2$
d	Durchmesser der Antenne	Meter	3.6 m	
Pn	Rauschleistung	Watt	-102 dBm	effektive d.h. inkl. Verluste(z.B. Radom)
dB	Log (Verhältnis)	---	---	$10 \cdot \text{Log}\ (X/X_0)$
dBm	Log (Leistungsverhältnis)	---	---	$10 \cdot \text{Log}\ (X/1\ mW)$
D	Tropfendurchmesser	mm	1 mm	

Ein Flugzeug ist im allgemeinen viel kleiner als das vom Radargerät gleichzeitig ausgeleuchtete Impulsvolumen. Für diesen Fall kann man die für ein Punktziel geltende Radargleichung (siehe auch z.B. SKOLNIK [1]) ableiten, wobei die relevanten Ziel- und Radargeräteeigenschaften in der Symboltabelle enthalten sind:

$$P = (1/64\ \pi^3) \cdot (Pt\ G^2\lambda^2) \cdot (\sigma/r^4) \qquad (1)$$

Im Gegensatz zu Flugzeugechos ist die Ausdehnung von Niederschlagsechos viel grösser. Dadurch ist vielfach die für die Messung der Niederschlagsintensität notwendige Annahme erfüllt, dass der zu vermessende Niederschlag das Impulsvolumen V voll ausfüllt. V lässt sich mit Formel (2) abschätzen, wobei der Faktor 0.66 den Wirkungsgrad der Antenne berücksichtigt. Dieser ist für ein gegebenes Radargerät eine Konstante, die durch Eichung bestimmt werden muss.

$$V = 0.66 \cdot 4\pi r^2 \cdot \ell/G \qquad (2)$$

V nimmt quadratisch mit der Distanz zu. Wird es grösser als die Niederschlagszelle, so können zusätzlich zum Ort der Zelle nur noch qualitative Angaben über die Intensität gemacht werden.

Da einzelne Niederschlagstropfen viel kleiner als die Wellenlänge sind, kann die sogenannte Rayleighapproximation (siehe auch BATTAN [2] "Radarobservation of the Atmosphere") benützt werden. Dabei ist $|K|^2$ eine von der Dielektrizitätskonstante des Teilchens abhängige Grösse und beträgt für Wasser $|K|^2 = 0.93$, und D der Tropfendurchmesser:

$$D<\lambda/3 \rightarrow \sigma = \pi^5|K|^2D^6/\lambda^4 \qquad (3)$$

Da der Niederschlag nicht nur Tropfen einer Grösse enthält, sondern eine variable Tropfengrössenverteilung aufweist, berechnet man den für das Radarecho massgebenden Reflektivitätsfaktor $Z = \Sigma D^6$. Für eine gegebene Tropfenverteilung ist Z bestimmt, ebenso die Regenintensität R. Empirisch findet man aus Messungen von Tropfenspektren die vom Niederschlagstyp abhängige Z-R-Beziehung, deren Variationen bereits in vielen Arbeiten untersucht wurden (siehe z.B. JOSS et.al.[3] "On the Quantitative Determination of Precipitation by Radar"). Im Mittel kann für Regen in guter Näherung folgende Formel verwendet werden:

$$Z = 300\ R^{1,5} \qquad (4)$$

Aus den Formeln(2), (3) und (4) können wir den im Impulsvolumen wirksamen Streuquerschnitt berechnen. Da die einzelnen Niederschlagsteilchen, deren Echos in der Antenne vektoriell addiert werden, im Wind sich relativ zueinander bewegen, variiert die empfangene Echosumme (siehe auch Kapitel 3.3.). Die logarithmische Charakteristik des Radarempfängers und der anschliessend im DVIP (vergleiche Kapitel 3.2.) vom Logarithmus gebildete Mittelwert führen zu einer Unterbewertung des mittleren Streuquerschnittes, welche mit dem Faktor 0.56 in Formel (5) korrigiert wird:

$$\sigma = 0.56 \cdot V \cdot 300 \cdot R^{1,5} \cdot 10^{-18} \cdot \pi^5|K|^2/\lambda^4 \qquad (5)$$

Formel (5) in (1) eingesetzt ergibt schliesslich die für das Wetterradar massgebende Radargleichung:

$$P = 2\ 10^{-16} \cdot (Pt \cdot \ell \cdot G/\lambda^2) \cdot (R^{1,5}/r^2) \qquad (6)$$

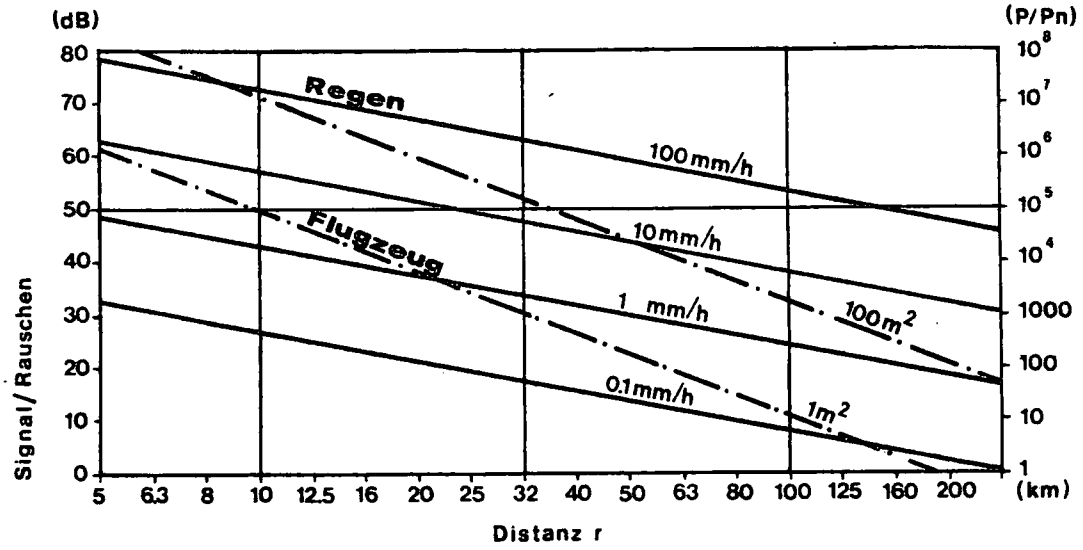

Abb.1 Verhältnis Signal-gegenüber-Rauschen P/Pn für Flugzeug- und Wetterechos in Abhängigkeit von der Distanz mit den für das Radargerät in der Symboltabelle angegebenen Werten.

3. S I G N A L V E R A R B E I T U N G

3.1. Informationsgehalt

Pro Sekunde werden 259 Impulse ausgesendet. Bei drei Antennenumdrehungen pro Minute ergibt dies 14.4 Impulse pro Grad (~16 Impulse pro Antennenstrahlbreite). Die Echointensität wird alle 1.65µs (4 mal pro Kilometer) in ein digitales 8-Bit-Wort gewandelt und in den DVIP (vgl. 3.2.) eingelesen. Da in radialer Richtung bis zur Distanz von 256 km ausgewertet wird, ergibt dies 1024 Worte pro ausgesendeten Impuls. Dies entspricht ca. 15'000 Worten pro Grad, oder 5 Millionen Worten pro Umdrehung und 100 Millionen Worten pro Erfassungszyklus (20 Elevationen), d.h. ca. $8 \cdot 10^8$ Bit, die der DVIP vom Radargerät für ein Bild erhält. Die Bildgewinnung wird alle 10 Minuten zu vorgegebenen Zeiten gestartet.

3.2. DVIP (Digital Video Integrator and Processor)

Der DVIP ist ein rascher Hardwarecomputer, der die von den Radargeräten anfallenden Daten aufnimmt und konzentriert an den Verarbeitungsrechner weitergibt.

Um die im Rechner benötigte Auflösung von 1 km in radialer Richtung zu erreichen, bildet der DVIP als erstes ein Mittel aus je vier Distanzelementen. Dann berechnet er für jedes 1 km-Inkrement (total 256) einzeln ein gleitendes Mittel mit exponentiell abfallender Gewichtung in Azimutrichtung. Sowohl die Mittelung in radialer, wie auch diejenige in Azimutrichtung ergeben, wie gewünscht, ein statistisch besser definiertes Signal

(kleinere Echofluktuationen). Durch die spezielle Art der Mittelbildung im Azimut resultiert jedoch ein unerwünschtes leichtes, einseitiges "Verschmieren" des Bildes (Gedächtniseffekt in Drehrichtung (Uhrzeigersinn) der Antenne).

Als Schlussresultat gibt der DVIP die in Kapitel 5.1. beschriebene Information, deren Umfang gegenüber der Radar-Rohinformation um ca. einen Faktor 60 reduziert worden ist, an den Rechner weiter.

3.3. Echofluktuationen

Bedingt durch die ständige Bewegung der Niederschlagsteilchen im Impulsvolumen ist das von einem bestimmten Regengebiet empfangene Echo nicht konstant, sondern führt rasche Fluktuationen aus. Die Standardabweichung der Logarithmen der Einzelwerte beträgt dabei einen Faktor 3.5 (±5.6 dB). Da der DVIP ca 50[1)] unabhängige Stichproben mittelt, wird diese Streubreite s im logarithmischen Signalbereich um $s/\sqrt{50}$ reduziert. Es bleibt somit eine Variationsbreite von ±20% (±0.8 dB). Entsprechend dem Exponenten der Z-R-Beziehung (siehe 2.6.) wird diese Unsicherheit für die Bestimmung der Regenintensität zusätzlich auf ±13% (±0.53 dB) verkleinert.

4. B O D E N E C H O U N T E R D R U E C K U N G

4.1. Problem

Im Nahbereich (Distanzen kleiner als 100 km vom Radargerät) belegen Bodenechos bei tiefen Antennenelevationen mehr als 50% der Radarbildfläche. Bodenechos sind Festziele, deren Echointensität an der betreffenden Stelle einer Regenintensität von mehr als 0.3 mm/h entsprechen. Da ihre Intensität viel grösser als diejenige der Niederschlagsechos sein kann, erschweren sie die Interpretation der digitalen Bilder gewaltig.

4.2. Bodenechos aus der Hauptkeule

Bodenechos können entstehen, indem die Hauptkeule des Radarstrahles von einem Berg reflektiert wird. In diesem Falle sind die Reflexionen stärker als alle möglichen Niederschlagsechos: Weil der Berg kompakt und gross ist, reflektiert er praktisch alle Energie, im Gegensatz zu den stärksten Regenechos, deren Tropfen nur den millionsten Teil des Luftvolumen ausfüllen. Die Tropfen sind zudem kleiner als die Wellenlänge und streuen somit nur einen kleinen Bruchteil der auf sie einfallenden Energie weg.

4.3. Bodenechos aus Seitenkeulen

Bodenechos können aber auch durch die Seitenkeule der Radarantenne empfangen werden. Seitenkeulen besitzt die Antenne in allen Richtungen, also auch senkrecht zur Richtung der Hauptkeule und sogar in der Gegenrichtung: also hinten. Diese Seitenkeulen sind auf die Unidealitäten der Antenne und des Radoms zurückzuführen. Die durch sie empfangenen Signale sind

1) Anmerkung: Die Berechnung der unabhängigen Anzahl Stichproben setzt, abgesehen von den Radareigenschaften, Kenntnisse über Turbulenz und Windscherung voraus und ist für den Einzelfall recht kompliziert, hier aber von sekundärer Bedeutung.

mindestens 10'000 mal schwächer als das Hauptkeulensignal des gleichen Objektes. Weil aber Bodenechoziele millionenmal besser reflektieren als atmosphärische, können Bodenechos aus der Seitenkeule durchaus die Intensität der Wetterechos aus der Hauptkeule erreichen. Dies gilt auch für Azimut- und Elevationsrichtungen der auf den freien Himmel gerichteten Hauptkeule. So ist es beispielsweise erklärbar, dass Bodenechos aus dem Gebiete des Genfersees auf La Dôle empfangen werden. Sie stammen von Bergen mit gleicher Entfernung wie der Genfersee, aber aus beliebiger Richtung, und sind eine phasengetreue Summierung aller Reflexionen, empfangen aus allen Seitenkeulen. Dementsprechend ist die resultierende Bodenechointensität auch in höchstem Masse variabel. Bei gegebenem Gelände und Radarstandort hängt sie von folgenden Parametern ab: Azimut, Elevation, Distanz, Antennentemperatur, Radombenetzung, Wellenlänge und Ausbreitungsbedingungen in der Atmosphäre (z.B. Inversionen).

4.4. Möglichkeiten zur Elimination

Bei einer Elimination von Bodenechos vom Radarschirm versteht sich von selbst, dass man die verlorene Wetterinformation an den durch Bodenechos belegten Stellen damit nicht wiedergewinnen kann. Man kann jedoch für die Beurteilung der Wettersituation die störende Wirkung der Bodenechos mildern und die dazwischen liegende Wetterinformation optimal nützen. Dafür gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Beiden Möglichkeiten ist gemeinsam, dass man Radarbilder an Tagen ohne Niederschläge abspeichert, um sie an Tagen mit Niederschlägen als Referenz zu verwenden. Bei der ersten Art erfolgt die Elimination des Bodenechos, indem man den Schönwetterwert Zelle für Zelle vom aktuellen Wert (Niederschlag und Bodenecho) abzieht. Pro Zelle muss dabei ein Wort Bodenechointensität abgespeichert werden, was in Anbetracht der oben erwähnten Variabilität der Bodenechointensität den Speicherplatz nicht optimal ausnützt. Zudem besitzt diese Methode der Subtraktion den Nachteil, dass das Resultat nur noch qualitativen Wert besitzt, indem man den wahren Wert der zu subtrahierenden momentanen Bodenechointensität nicht kennt. Besser in diesen Hinsichten ist die zweite Möglichkeit. Hierbei speichert man lediglich ein Markierungsbit pro Zelle ab (Bodenecho ja-nein) und kann bei gleicher Speichergrösse dafür eine grössere Zellendichte wählen. Diese zweite Möglichkeit nützt die spezifischen Eigenschaften der Bodenechos aus:

- Bodenechos sind stark verstreut, aufgeteilt in kleinen Flecken.
- Der Ort ihres Auftreten ist besser definiert als ihre Intensität.

Je kleiner die Einzelzelle, umso besser kann die vorhandene Niederschlagsinformation ausgenützt werden. Beschränkt durch Speicherplatz und Uebertragungszeit haben wir für unsere Anwendung eine Auflösung von 400x400x12 Zellen von je einem km^3 gewählt. Dies entspricht einem Informationsgehalt von $1.92 \cdot 10^6$ Bit für die Bodenechomarkierung des ganzen Radarbildes. Das Bodenechobit wird während der ganzen nachfolgenden Datenanalyse und Uebermittlung mitverarbeitet und beibehalten, was dem Benützer ermöglicht, wahlweise nur Zellen mit Niederschlag, nur mit Bodenechos oder beides zusammen darzustellen.

4.5. Generierung von Bodenechokarten

Bodenechokarten können mit Unterhaltsprogrammen bei niederschlagsfreien Situationen generiert und aufdatiert werden. Dabei ist es sinnvoll, bereits bestehende Bodenechokarten mit der neuaufgenommenen so zu kombinieren, dass eine Zelle als bodenechobehaftet notiert wird, wenn sie dies bereits war oder wenn sie erst bei der neuen Aufnahme das Intensitätskriterium überschritten hat. Das Kriterium ist wählbar und beispielsweise erfüllt, wenn die bei schönem Wetter gemessene Echointensität 0.2 mm/h überschreitet. Um eine sichere Elimination von Bodenechos in verschiedenen Wellenausbreitungsverhältnissen zu erhalten, muss die Bodenechokarte an mehreren niederschlagsfreien Tagen aufdatiert werden. Damit wird den in Abschnitt 4.3. erwähnten Einflüssen Rechnung getragen.

5. D A T E N A N A L Y S E

5.1. Digitale Rohdaten

Der Nova-Rechner übernimmt die Echointensitäten während ca. 7 min vom DVIP mit einer Radialauflösung von 1 km (256 Elemente pro Strahl), mit einer Azimutauflösung von 1^{o} (360^{o} pro Umdrehung) und rund 20 Umdrehungen mit Elevationen zwischen -0.3^{o} und 39^{o} Um eine homogene Informationsdichte im gesamten abgetasteten Volumen zu erhalten, wurden die einzelnen Elevationsschritte unterschiedlich gewählt, nach oben zunehmend. Da pro Bildpunkt 8 Bit Intensitätsinformation dem Rechner übermittelt werden, enthält die gesamte Bildinformation $1.5 \cdot 10^{7}$ Bit. Sie fällt in Polarkoordinaten an und muss (bis zur Aufnahme des nächsten Bildes) innerhalb 10 Minuten verarbeitet werden.

5.2. Inhalt des verarbeiteten Bildes

Das verarbeitete Bild mit den für den Meteorologen nützlichen Informationen soll innerhalb weniger Minuten über eine normale Telephonleitung übertragen werden können. Dies bedingt eine weitere Datenreduktion um ca. einen Faktor 50. Gewählt wurde eine rechtwinklige Darstellung mit Grund-, Auf- und Seitenriss. Der Grundriss weist 200 Zeilen mit je 200 Elementen entsprechend 400x400 km auf. Auf- und Seitenriss enthalten je 12 Zeilen entsprechend 12 km Höhe mit je 200 Elementen entsprechend 400 km Ost-West (Aufriss) resp. 400 km Nord-Süd-Erstreckung (Seitenriss). Jedes Element enthält 4 Bit Information: 3 Bit enthalten die Echointensität und 1 Bit gibt an, ob der betreffende Punkt bodenechofrei ist. Dies entspricht einer Raum-Auflösung in Quader zu 2x2x1 km. Das Auswerteprogramm wurde so geschrieben, dass beim Laden des Programmes anstelle des Gesamtbereiches von 400x400 km ein beliebiges Ausschnittquadrat von 200 km Seitenlänge innerhalb dem Bereich von 400x400 km ausgewählt werden kann, wobei in diesem Falle die Auflösung 1 km beträgt. Dabei geht aber die Uebersicht über das ganze Gebiet verloren und weil Schritt 5.3.5.(vergleiche folgenden Abschnitt) nicht mehr ausgeführt werden kann, wird der Gewinn an Informationsdichte gegenüber der gröberen 2 km Auflösung reduziert. Von MZA-Benützern wurde diese Möglichkeit nicht verlangt und sie würde erst richtig sinnvoll, wenn man die Grunddaten mit 500 m Auflösung erfassen würde.

5.3. Grundauswertung

Um zur in Abschnitt 5.2. erwähnten Darstellung zu gelangen, müssen folgende Auswertungsschritte durchgeführt werden:

5.3.1. STC (Sensitivity Time Control): Korrektur der durch die Divergenz des Radarstrahles bedingten entfernungsabhängigen Dämpfung, angewendet im Bereiche zwischen 5 und 230 km.

5.3.2. Berechnung der wahren Höhe, unter Berücksichtigung der Erdkrümmung. Die vertikale Aenderung des Berechnungsindexes in der Atmosphäre verursacht eine Krümmung des Radarstrahles. Diese wird berücksichtigt, indem man für den Erdradius 8000 km anstatt 6370 km einsetzt.

5.3.3. Wandlung der Daten von Polar- in kartesische Koordinaten. Dies bedingt Weglassen von überflüssiger Information im Zentrum und Einfügen von fehlender Information vom benachbarten Strahl bei grossen Entfernungen.

5.3.4. Reduktion der Intensitätsauflösung auf sieben Intensitätsbereiche durch Vergleich mit der eingegebenen Tabelle.

5.3.5. Reduktion der örtlichen Auflösung von 1 km in 2 km Auflösung, unter Berücksichtigung der Bodenechoinformation.

Bei diesem Punkt stellt sich die Frage, warum man zuerst die Daten mit der aufwendigeren feinen Auflösung auswertet, die feine Auflösung anschliessend aber doch nicht benützt. Durch dieses Vorgehen gewinnen wir zwei Vorteile: Einmal ist das gewonnene Resultat nach diesem Verfahren statistisch besser gesichert, und zudem können wir, was wichtiger ist, die Information von bodenechofreien Gebieten besser ausnützen. Denn in gebirgigen Gebieten kommt es oft vor, dass im Tal zwischen zwei Bergketten einzelne Flächen von einem Quadratkilometer bodenechofrei sind. Diese wertvolle Information kann durch folgenden Algorithmus, angewendet auf je vier Teilzellen, benützt werden:

5.3.6. Falls mindestens eine der Teilzellen bodenechofrei ist, wird der maximale Wert der bodenechofreien Teilzellen als Intensitätswert behalten und das Bodenechobit Null gesetzt. Falls keine der Teilzellen bodenechofrei ist, wird der minimale Intensitätswert behalten und das Bodenechobit Eins gesetzt.

Mit diesem Algorithmus wird erreicht, dass bereits bei einer einzigen bodenechofreien Teilzelle deren Echo zum Echointensitätswert der Gesamtzelle erkoren wird. Dabei setzt man kleinräumige Kontinuität der Niederschlagsintensität voraus und extrapoliert den Wert der drei abgrenzenden bodenechobehafteten Zellen. Bei mehreren freien Zellen wird die Zelle mit maximaler Intensität übernommen, weil diese die Stärke des Niederschlagsprozesses am besten wiedergibt, z.B. zum Auffinden von Hagelzonen oder Turbulenzgebieten. Falls keine Teilzelle bodenechofrei ist, möchte man die Störung des Bodenechos auf dem Radarschirm oder den Fehler bei der Bestimmung der Regenmenge (beispielsweise im ganzen Einzugsgebiet eines Flusses) minimalisieren . Dies erreicht man, indem die Intensität der das kleinste Echo liefernden Teilzelle auf die Gesamtzelle übertragen und weiterverwendet wird.

5.4. Grundriss

Es bestehen zwei Möglichkeiten, den Grundriss darzustellen: Die Column-Darstellung (Säulendarstellung) und die CAPPI-Darstellung. Beim Laden des Programmes müssen sich alle Benützer gemeinsam auf eine der beiden Grundriss-Darstellungsarten einigen:

Für die Column-Darstellung wird Regel 5.3.6. in vertikaler Richtung für jeden Punkt im Grundriss über die 12 Höhenschichten angewendet. Da gesamthaft gesehen niederschlagsfreie Zellen ohne Bodenechos weitaus am häufigsten auftreten, muss vermieden werden, dass solche Zellen ein gesetztes Bodenechobit bei der Berechnung eines bestimmten Punktes löschen. Die Regel 5.3.6. wird daher durch folgenden Zusatz leicht modifiziert: "Ein gesetztes Bodenechobit kann nur durch Zellen mit Niederschlag gelöscht werden". Ohne diesen Zusatz könnte folgende Situation zu einer Fehlinterpretation führen: Nehmen wir an, in tiefen Schichten gibt es Niederschlag und Bodenechos. Dann wird dort das Bodenechobit gesetzt und der Niederschlag gelangt nicht oder als Bodenecho zur Anzeige. Wenn es nun in höheren Elevationen keinen Niederschlag und auch kein Bodenecho gibt, würde im entsprechenden Grundrisselement kein Niederschlag angezeigt, weil gemäss Punkt 5.3.6. die maximale Intensität der bodenechofreien Zelle angezeigt wird, die Null ist. Da das Bodenechobit zudem durch die bodenechofreien Höhenelemente gelöscht wurde, besitzt der Beobachter keine Möglichkeit mehr, zu realisieren, dass er über die Niederschlagsfreiheit der tieferen Elemente keine gültige Information besitzt.

In der CAPPI-Darstellung (Constant Altitude Plan Position Indicator) werden Elemente im Grundriss dargestellt, wie sie der auf dem Bilde angegebenen Höhe entsprechen (Höhe beim Laden des Programmes wählbar). Dies gilt nur für CAPPI-Höhen oberhalb 5 km. Da sich das Zentrum des Radarstrahls in der tiefsten Antennenelevation (0.5°) in 200 km Entfernung vom Standort La Dôle (Höhe über Meer 1700 m) bereits auf ca. 6 km Höhe befindet, besitzen wir darunter keine Information und müssen dafür diejenige der untersten Elevation benützen. In dieser Entfernung ist jedoch die Höhen- und Azimutauflösung des Radarstrahls mit ca. 4 km ohnehin schlecht. Die 3 km CAPPI-Darstellung ist somit beispielsweise nur echt (konstante Höhe) bis 100 km Entfernung und steigt für grössere Distanzen mit 0.5° Elevation an.

Vergleicht man die beiden Darstellungen miteinander, besitzt die Column-Darstellung in der Schweiz gegenüber der CAPPI-Darstellung folgende Vorteile:

Das ganze Wettervolumen wird gemeinsam dargestellt; die Gefahr, wegen einer ungünstigen CAPPI-Höhe einen wesentlichen Teil zu übersehen, ist minimalisiert, oder anders gesagt: Alle vorhandene Information wird verwendet, im Gegensatz zur CAPPI-Darstellung, wo tiefe, nahe Niederschläge "übersehen" werden können.

Darum wurde trotz des wesentlich grösseren Rechenaufwandes der Column-Darstellung Priorität gegeben.

5.5. Aufriss, Seitenriss

Ein Beispiel, wie das Bild dem Beobachter präsentiert wird, ist in Kapitel 8 dargestellt. Zur Berechnung der im Aufriss und Seitenriss dargestellten Intensitäten wird wiederum der Algorithmus gemäss Regel 5.3.6. mit dem in Kapitel 5.4. erwähnten Zusatz angewendet. Dadurch erhält man je eine Projektion der Niederschläge auf zwei vertikale Ebenen, wobei immer die Zelle maximaler Intensität übernommen wird. Für ein einziges Element im Aufriss geschieht dies 200 mal, nämlich für alle 200 Punkte in Nordsüdrichtung, die die richtige Höhe und die richtige Ostwestkoordinate für den entsprechenden Punkt im Aufriss besitzen. Der Seitenriss wird analog berechnet, ausser dass Nord-Süd mit Ost-West vertauscht wird.

6. B I L D U E B E R T R A G U N G U N D D A R S T E L L U N G

6.1. Anforderungen

Drei Hauptanforderungen muss das zu beschaffende Bildübertragungs- und Darstellungssystem erfüllen:

a) Uebertragung über Telephonleitung

b) Darstellung auf Fax und Fernsehschirm und

c) Kompatibilität mit handelsüblichen Rechnerschnittstellen

a) Uebertragung über Telephonleitung wurde verlangt, damit möglichst viele Benützer bedient werden können. Wegen der beschränkten Kapazität von Rechner und Telephonleitung muss dabei an alle das gleiche Bild übermittelt werden.

b) Entsprechend den Bedürfnissen der verschiedenen Benützer wurden Fax und Fernsehschirm gefordert, wobei der Faksimileempfänger mit seiner Echtzeitanforderung strengere Anforderungen stellt (Synchronisation bei Uebertragungsbeginn, dann freilaufende, genaue Quarzuhren mit Gleichlaufabweichung von weniger als 4 ms in 240 Sekunden).

c) Die Kompatibilität mit handelsüblichen Rechnerschnittstellen erlaubt uns, die vom Radar anfallende Information ohne allzugrossen Aufwand in bestehende Rechenanlagen einzuspeisen und mit weitern Informationen zusammen darzustellen. Geplant ist dies für Daten von automatischen Wetterstationen (ANETZ) oder für Daten von Wettersatelliten.

6.2. Uebertragungsart

Grundsätzlich musste entschieden werden, ob man die Daten synchron oder asynchron übertragen solle. Faksimilegeräte müssen zu Beginn eines Bildes synchronisiert und alle folgenden Zeilen und Punkte müssen bis zum Schluss des Bildes im richtigen Takt empfangen werden (Echtzeitanforderung). Es ist also nicht möglich, einen verstümmelten Datenblock zu wiederholen, ohne das ganze Bild neu zu beginnen. Es ist aber auch nicht so schlimm, wenn einzelne Bildpunkte Fehler aufweisen. Darum entschieden wir uns für die asynchrone Uebertragung. Hierbei beträgt die Uebertragungseinheit 8 Informationsbit (2 Bildpunkte), begleitet von einem Startbit und 2 Stopbit.

Damit können wir gleiche Schnittstellen wie für einen gebräuchlichen 8 Bit-Code (ASCII) benützen und der Empfangstakt wird nach jedem Zeichen neu synchronisiert.

Bei der gewählten Uebertragungsgeschwindigkeit von 2400 Bit/sec benötigt die Uebermittlung für ein Bild ca. 4 Minuten und Modem und Telephonleitung stellen keine überdurchschnittlichen Anforderungen.

6.3. Uebertragungstermin und Format

Zu Beginn jeder Uebertragung alle 10 Minuten, auf La Dôle begonnen zur ganzen Stunde, wird ein Identifikationssignal zur Erkennung des Radarstandortes, dann die eigentliche Bildinformation (256 Zeilen inklusive Aufriss) und schliesslich das Stoppsignal für den Fax ausgesendet.

Das Faksimilegerät verlangt genau alle 750 ms eine neue Bildzelle. Zu Beginn jeder Zeile werden zwei Zeilenadressen (8 Bit), 320 Punkte à je 4 Bit und 7.5 ms Pause (alle Bit tief = Stop) übertragen. Die Punkte 257 bis 320 enthalten Zusatzinformationen wie Radarstandort, Zeit und Eichinformation. Auf Albis wird die Bildgewinnung und die nachfolgende Uebertragung des Bildes um 5 Minuten gegenüber La Dôle verschoben. Dadurch können beide Radarbilder über eine einzige Telephonleitung an Benützer vermittelt werden.

6.4. Darstellung auf Fernsehschirm

Das Empfangsgerät zur Darstellung eines Radarbildes auf einem Fernsehschirm verwendet ein Gedächtnis zur Abspeicherung zweier Bilder. Wird ein neues Bild übertragen, so überschreibt dieses das ältere Bild. Der Beobachter kann diesen Vorgang auf dem Bildschirm verfolgen, falls er mittels eines Schalters den entsprechenden Teil des Gedächtnisses zur Darstellung wählt. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, stehen dem Beobachter zwei vollständige Bilder zur Verfügung, die er durch Umschalten direkt miteinander vergleichen und so die Entwicklung beurteilen kann. Nach Abschluss der Uebertragung sind die ältesten Daten des neuen Bildes 14 Minuten, diejenigen des früheren bei kontinuierlichem Empfang 24 Minuten alt. Der Beginn der Datenaufnahme am Radarstandort ist auf dem Bild vermerkt, zusammen mit dem Radarstandort und der Eichinformation. Mit einem weiteren Schalter kann der Beobachter wählen, ob er La Dôle, Albis, beide oder kein Bild empfangen will. Tabelle 1 gibt eine Uebersicht über die dem Benützer zur Verfügung stehenden 6 Bereiche der Radarreflektivitätsfaktoren und der zugehörigen Regenintensitäten. Mit Hilfe von 6 Codierschaltern mit je 7 Positionen kann für jede Niederschlagsart die gewünschte Darstellungsart (6 Farb- und eine Dunkelstellung) auf dem Bildschirm gewählt werden.

Schalter (Code)	Radarreflektivitätsfaktor [mm^6/m^3]	Regenintensität [mm/h]
6	$>3.2 \cdot 10^5$	>100
5	$>6 \cdot 10^4$ bis $3.2 \cdot 10^5$	> 32 bis 100
4	$>10^4$ bis $6 \cdot 10^4$	> 10 bis 32
3	>1800 bis 10^4	> 3.2 bis 10
2	>320 bis 1800	> 1 bis 3.2
1	>60 bis 320	> 0.3 bis 1

Tabelle 1 Radarreflektivitätsfaktoren und zugehörige Regenintensitätsklassen für die Darstellung auf Fernsehschirm und Faksimilegerät.

Beim Laden des Programmes am Radarstandort können beliebige Zellen des Bildes mit einem Overlay beschrieben werden, z.B. für geographische Grenzen, Ortsbezeichnungen usw. Bei einer solchen Zuordnung von Zellen ist allerdings zu beachten, dass an diesen Stellen die Wetterinformation nicht ebenfalls übermittelt und dargestellt werden kann. Durch einen speziellen Schalter am Fernsehgerät kann der Beobachter jedoch je nach Bedürfnis den Overlay weiss aufleuchten lassen oder dunkel steuern. In den für den Overlay reservierten Zellen kann keine Niederschlagsintensität angezeigt werden.

Zellen mit Bodenecho (Bodenechobit = 1) können wahlweise mit 2 Schaltern auf drei verschiedene Arten dargestellt werden: Als Farbe wie bei Niederschlag (Bodenechobit wird ignoriert), weiss zur Identifikation der Gebiete mit Bodenecho oder dunkel wie der echofreie Hintergrund. Da das Resultat aller dieser Funktionen sofort auf dem Bildschirm sichtbar ist, kann der Beobachter die günstigste Darstellung bestimmen, entsprechend der gegebenen Fragestellung bei einer bestimmten Wetter- und Bodenechosituation, d.h. er wählt die ihn interessierenden Niederschlagsintensitäten mit oder ohne Bodenechos.

6.5. Darstellung auf Faksimilegerät

Die Faxdarstellung ist grundsätzlich identisch mit der Fernsehdarstellung, abgesehen von folgenden Punkten:

- An Stelle der 6 Farben können 6 Grautöne gewählt werden.
- Während der Uebertragung einer Zelle (750 ms) schreibt der Fax aus seinem eigenen Zweizeilengedächtnis die gleiche Zeile dreimal (240 U/min).
- Die Wahl der Präsentation muss vor Beginn des Bildes bestimmt sein:

  Die zur Darstellung ausgewählten Intensitäten und die dazugehörigen Grautöne, ob mit oder ohne Overlay, und die Art der Bodenechodarstellung.

7. F E H L E R A B S C H A E T Z U N G

7.1. Bestimmung des Ortes (geographische Lage und Höhe)

Zwei Fehlerquellen üben einen Einfluss auf die Genauigkeit bei der Bestimmung des Ortes eines Niederschlages aus:

a) Genauigkeit der Radarparameter: Messfehler von Azimut und Elevationswinkel sollten bei gut gewartetem Gerät ±0.5° nicht übersteigen, was einer horizontalen beziehungsweise vertikalen Verschiebung von ±0.8 km in 100 km Entfernung entspricht.

   Die Zeitmessung sollte auf jeden Fall genauer als ±1% sein, was einem Fehler in radialer Richtung von ±1 km in 100 km Entfernung entspricht.

b) Fehler, bedingt durch die Antennencharakteristik: Die Grösse dieser Fehlerart hängt von der Stärke des Echogradienten ab. Er wirkt sich vor allem in einer Ueberschätzung der maximalen Höhe von Niederschlägen aus. Weil die Antenne die Energie nicht ideal bündelt, scheinen starke Niederschläge auf dem Bildschirm höher als sie in Wirklichkeit sind. Dieser Fehler kann ohne weiteres 2 km in 100 km Entfernung betragen.

7.2. Bestimmung der Intensität

Grundsätzlich ist zu beachten, dass das Radargerät den mittleren Reflektivitätsfaktor im Impulsvolumen (in der Höhe des Radarstrahles) bestimmt und nicht die Regenintensität am Ort des Regenmessers. Die nachfolgenden Dezibel-Fehler (dB) beziehen sich somit auf diesen Reflektivitätsfaktor, der anhand der Tabelle 1 (vgl. Kapitel 6.4.) in Regenintensitäten übertragen werden kann. Die in dieser Tabelle wiedergegebene mittlere Beziehung zwischen Radarreflektivität und Niederschlagsintensität ist in Wirklichkeit abhängig von Art und Grössenverteilung des Niederschlages. Ihre Unsicherheit bewirkt die im nachfolgenden Punkt a) aufgeführten Fehler.

Um aus den aufgeführten Dezibel-Fehlern die Unsicherheit bei der Bestimmung der Regenintensität abzuschätzen, muss man beachten, dass 1 dB (26%) Echointensitäts-Aenderung im Mittel einer Niederschlagsintensitätsänderung von 2/3 dB (17%) entspricht.

Folgende vier Arten von Messfehlern beschränken die Messgenauigkeit:

a) Einfluss der Art der Niederschlagssituation (Z-R-Beziehung). Es können zwei Gruppen unterschieden werden:

   Die erste betrifft die Höhe des Messortes in Bezug auf die Nullgradgrenze: Messungen unterhalb der Nullgradgrenze (im Regen ±2 dB) weisen kleinere Messfehler auf als Messungen in oder oberhalb der Nullgradgrenze (im Schnee ±5 dB).

   Die zweite betrifft die Problematik des Vergleiches von Radarmessungen in der Höhe mit Niederschlagsmessungen am Boden. Hier muss man beachten, dass mit zunehmender Distanz zwischen den zwei Orten auch der Fehler bei der Abschätzung der einen Grösse aus der andern zunimmt. In diese Kategorie Fehler gehört beispielsweise der extreme

Fall, wo in grosser Entfernung ein Niederschlag aus einem Stratus nicht entdeckt wird, weil sein Wachstum vollständig unterhalb des vom Radar erfassten Volumens geschieht.

b) Genauigkeit der Radarparameter. Bei gut gewartetem Gerät betragen diese Fehler weniger als ±3 dB, im besten Falle ±1 dB.

c) Abschwächung durch Niederschläge und durch Benetzung des Radoms. Dieser Fehler bewirkt immer eine Unterbewertung der Intensität und wird äusserst selten -5dB übersteigen.

d) Echofluktuationen bewirken eine Streuung, wobei 90% der Werte innerhalb ±1.6 dB liegen.

Die angegebenen Fehler sind grobe Schätzungen. Bessere Angaben wird die systematische Gegenüberstellung der Radarbilder mit ANETZ-Daten ergeben. Um die unter a) angeschnittenen Probleme zu reduzieren, wird man durch Integration von je 6 Radarbildern stündliche Niederschlagsmengen bestimmen und diese mit den im ANETZ gemessenen stündlichen Niederschlagsmengen vergleichen.

8. A N W E N D U N G S B E I S P I E L

An dieser Stelle sollte je eine Photographie des Radarbildes einer Wettersituation auf dem Fernsehschirm und dem Faksimile diskutiert werden. Da diese noch nicht erhältlich sind, müssen wir uns mit einem massstäblichen Modell begnügen. In diesem Bild (vgl. Abb. 2) wurden drei verschiedene Regenintensitätsklassen zur Anzeige gebracht: 0.3÷10 mm/h, 10÷100 mm/h und >100 mm/h. Bodenechos (CL-Feld) sind als ausgeschaltet gedacht und der Overlay (geographische Grenzen) fehlt. Man beachte, dass die maximalen Ausdehnungen (maximale Höhe) und die maximale Intensität in jedem Riss bestimmt werden kann.

Die heute auf La Dôle verwendete Software lässt die Antenne auf 20 verschiedenen Elevationen zwischen -0.3° und 39° (heute noch 0.5° bis 44°) je eine ganze Umdrehung ausführen, wodurch das Wettergeschehen innerhalb dieser Grenzen erfasst (siehe Auf- und Seitenriss) werden kann. Ausserhalb dieser Grenzen besitzen wir keine Information. Senkrecht über der Radarstation ergibt sich daraus ein "toter Raum" in Form eines Kegels mit einem Oeffnungswinkel von 90° - 39° = 51°. Unterhalb -0.3° Elevation bis auf den Erdboden fehlt die Information ebenfalls. Bedingt durch grosse Entfernungen und die Erdkrümmung fällt der Verlust bei tiefen Elevationen wesentlich stärker ins Gewicht als über der Station. Zur Verkleinerung des gesamten toten Raumes wurde darum eine Modifikation von 0.5° auf -0.3° verlangt, die beim Albis bereits bei der Lieferung, bei La Dôle baldmöglichst berücksichtigt werden soll. Dabei verzichtet man auf die höchste Elevation von 44° zugunsten einer Absenkung der tiefsten Elevation auf -0.3°, wodurch nun die Antenne das Gebiet zwischen -0.3° und 39° abtastet. Möglicherweise muss die oberste Elevation wegen beschränkter Rechenzeit noch auf 34° abgesenkt werden, womit der tote Kegel über der Station einen Oeffnungswinkel von 90° - 34° = 56° aufweisen würde.

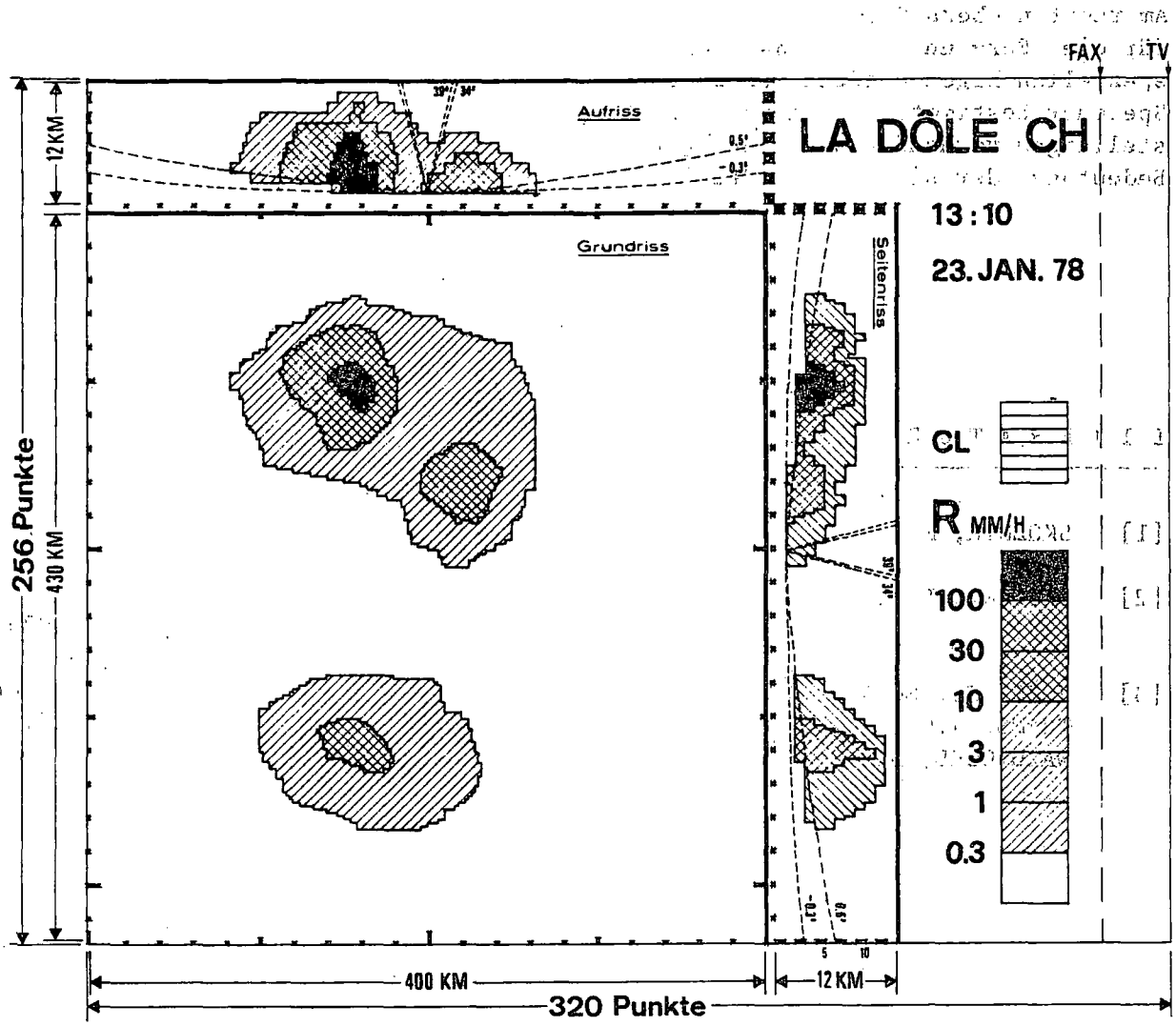

Abb. 2 Radarbild der 1978 von der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt auf La Dôle in Betrieb genommenen 5 cm-Wetterradaranlage der Firma EEC (Alabama USA) mit digitaler Verarbeitung.

Das Bild zeigt die jeweiligen Maximalechos im Grund-, Auf- und Seitenriss. Zur Berechnung der Risse tastet der Antennenstrahl während 20 Umdrehungen auf 20 Elevationen zwischen -0,3° und 39° im Umkreis von 256 km das Wettergeschehen ab. Mit Hilfe von 6 Codierschaltern mit je 7 Positionen (6 Farben oder Grautöne und eine Dunkelstellung) kann der Benützer auf dem Bildschirm der jeweiligen Niederschlagsart entsprechend die günstigste Darstellung wählen. Im vorliegenden Beispiel wurden drei Intensitätsbereiche zur Anzeige gebracht: 0,3 bis 10 mm/h, 10 bis 100 mm/h und mehr als 100 mm/h. Bodenechos (Clutter (CL)-Feld) sind in dieser Darstellung als ausgeschaltet gedacht und die geographischen Grenzen (Overlay) fehlen.

Am rechten obern Rand der Abbildung zeigt je ein Pfeil die Bildgrenzen für die Fax- und Fernsehdarstellung an. Diese Grenzen werden durch die speziellen Eigenschaften der betreffenden Geräte und der verwendeten Speicher bestimmt. Da die wesentlichen Teile des Bildes in beiden Darstellungen vorhanden sind, besitzen diese Grenzen nur für denjenigen Bedeutung, der sich um die Details der Datenverarbeitung kümmern muss.

L I T E R A T U R

[1] SKOLNIK, M.I. Radar Handbook. Mc Graw-Hill Book Company, 1970.

[2] BATTAN, L.J. Radar Observation on the Atmosphere. The University of Chicago Press, Chicago and London 1973.

[3] JOSS, J., SCHRAM, K., THAMS, J.C., WALDVOGEL, A. On the Quantitative Determination of Precipitation by Radar. Zürich ETH. City-Druck AG., Zürich 1970.

Adresse des Verfassers:

Dr. Jürg Joss
Osservatorio Ticinese della Centrale Meteorologica Svizzera
Via ai Monti 146

6605 Locarno 5