

Ungewöhnliche atmosphärische Strukturen im Radarbild

Ulrich Blahak, Klaus D. Beheng

Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe/
Forschungszentrum Karlsruhe

13. Oktober 2006

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Kurze Analyse der Wetterlage | 2 |
| 3 | Synopsis der Radarbilder | 8 |
| 4 | Verschiedene Hypothesen | 14 |
| 4.1 | Eiswolken und/oder Konvektion in der mittleren Troposphäre | 14 |
| 4.2 | Radarechos durch Turbulenz im Zusammenhang mit einer Böenfront | 15 |
| 4.3 | Bodenechos durch anomale Ausbreitung | 15 |
| 4.4 | Chaff | 16 |
| 5 | Andere Fälle von Chaff, gemessen mit dem Karlsruher C-Band Doppler Radar | 19 |
| 6 | Schlussbetrachtung | 22 |
| 7 | Danksagung | 22 |

1 Einleitung

In diesem Beitrag wird ein Phänomen untersucht, das in einem Artikel von Asmus (2005), erschienen in den DMG-Mitteilungen Nr. 3/4 2005, angesprochen wurde. Hierbei geht es um Radarechos vom 19.7.2005 über Norddeutschland, die offensichtlich nicht in Zusammenhang mit sichtbaren Wolken oder auch messbarem Niederschlag gestanden haben. Asmus hat in Zusammenarbeit mit Kollegen und internationalen Radarexperten bereits eine detaillierte Untersuchung angestellt und ist zu dem Ergebnis gekommen, dass diese Echos nicht natürlichen Ursprungs sind, sondern von so genanntem Chaff herrühren, wie er gelegentlich von militärischen Luftfahrzeugen im Rahmen von Übungen zur Störung von Suchradars ausgebracht wird. Da die Angelegenheit in der Presse und im Internet immer größere Kreise zog und z.T. unqualifizierte Äußerungen hervorrief, wird in diesem Beitrag das Phänomen nochmals analysiert und diskutiert.

Ziel des vorliegenden Artikels ist darüber hinaus eine Versachlichung der Diskussion über „Geisterwolken“, wie sie in der Presse genannt wurden. Es werden nochmals verschiedene Hypothesen über die mögliche Entstehungsursache der Radarechos beleuchtet, aber im Wesentlichen ergibt sich dieselbe Schlussfolgerung über die Genese der ungewöhnlichen Strukturen wie bei Asmus (2005).

Kurz zusammengefasst geht es um folgendes Phänomen: Radardaten zeigten mehrere streifenförmige Strukturen, deren Reflektivitätswerte sich nach anfänglich höheren Werten im Bereich von etwa 7 bis 19 dBZ¹ (Intervall geringster Reflektivitäten nach der Klasseneinteilung des DWD) einpendelten. Die größte Länge eines einzelnen Streifens betrug bis zu etwa 300 km und die Breite etwa 10 – 20 km; die Streifen traten in einem Höhenbereich von etwa 3 bis 9 km AGL auf. Diese Werte sind nur eine Abschätzung, weil die nationalen und internationalen Kompositbilder nur grob aufgelöst sind. Wesentlich besser sind sie in dreidimensionalen Radardaten der einzelnen Standorte Emden und Hannover zu erkennen. Erste Streifen hatten sich, ausgehend von einem Ort über der südlichen Nordsee, innerhalb von etwa 1 h gebildet und bewegten sich nachfolgend über Norddeutschland nach Osten. Der Höhenbereich des ersten Auftretens läßt sich anhand der vorliegenden Daten leider nicht ermitteln. Weitere Streifen kamen später etwas nördlich der zuerst detektierten Strukturen hinzu. Die einzelnen Strukturen konnten jeweils über einen Zeitraum von etwa 7 bis 8 h verfolgt werden. Dieses – in Radarmeteorologenkreisen nicht unbekannt – Phänomen ist typisch für so genannten Chaff.

Chaff wurde und wird auch in der meteorologischen Forschung eingesetzt. In der Literatur finden sich einige gut dokumentierte Fälle von gezielter Freisetzung von Chaff, um speziell Konvektion in der Atmosphäre zu untersuchen (z.B. Rowland, 1976; Martner et al., 1992; Stith et al., 1996; Sauvageot, 1992).

Im Folgenden wird die Wetterlage zunächst kurz dokumentiert und analysiert (Kap. 2). In Kap. 3 werden Kompositradarbilder des DWD sowie Bilder der DWD-Radare Emden und Hannover diskutiert. Anschließend werden verschiedene Hypothesen, die zum angesprochenen Phänomen hätten beitragen können, beleuchtet (Kap. 4, Absch. 4.1 bis Absch. 4.3). In Absch. 4.4 wird ausführlich auf Chaff als Ursache für das Phänomen eingegangen. Kap. 5 widmet sich Messungen mit Karlsruher C-Band Doppler Radar, die eindeutige Signaturen von Chaff zeigen und insbesondere nicht mit dem Auftreten von Niederschlag verbunden sind.

2 Kurze Analyse der Wetterlage

Zunächst folgt eine kurze Analyse der Wetterlage vom 19.7.2005. Hierzu werden die Fax-Karten (Bodenanalyse mit Fronten) des UK Met Office (Abb. 1), die GFS-Analysen 500 hPa/Bodendruck der 00 UTC-Termine vom 19. und 20.7.2005 (Abb. 2) sowie die Berliner Wetterkarte (Bodenanalyse mit Fronten) vom 19.7.2005 12 UTC (Abb. 3) herangezogen. In den Wetterkarten ist jeweils das ungefähre Gebiet rot hinterlegt, in dem ab etwa 10 UTC die fraglichen Radarechos beobachtet wurden.

Die allgemeine Wetterlage in Norddeutschland stellte sich wie folgt dar: In den frühen Morgenstunden des 19.7.2005 griff die Kaltfront eines Tiefs im Seegebiet zwischen Island und Schottland von Westen her auf Deutschland über. Sie zog rasch mit Schauern und Gewittern über Deutschland hinweg ostwärts und lag gegen 12 UTC bereits über Polen. Hinter der Kaltfront gelangte mit einer lebhaften westlichen Strömung kühle Meeresluft nach Deutschland. Bei aufgelockerter Bewölkung, überwiegend Quellwolken, entwickelten sich besonders in Schleswig-Holstein und in Hessen noch einige Schauer, auch Gewitter traten auf. Am Nachmittag kam die Schauertätigkeit von Westen her aber zum Erliegen. Für die Wetterberuhigung sorgte der Keil eines Ostatlantikhochs, der über Frankreich hinweg bis in den Süden und die Mitte Deutschlands vorstieß. Die für Schauer so typischen isolierten Radarechos traten auf den Radarbildern in der Westhälfte des Landes ab 15 UTC nicht mehr auf (s. auch Kap. 3). Die Quellwolken (Cumulus) breiteten sich unter dem stabilisierenden Hochdruckeinfluss zumindest teilweise horizontal aus und gingen in tiefe Schichtwolken (Stratocumulus cumulogenitus) über, wie auf Satellitenbildern (z.B. Abb. 9 in Kap. 3) erkennbar ist.

Die fraglichen Radarechos wurden deutlich rückseitig der nach Osten abziehenden Front in dem Bereich schon stark reduzierter Schauertätigkeit beobachtet.

Als aerologische Information stehen zwei Radiosondenaufstiege zur Verfügung.

Der Radiosondenaufstieg von Emden um 12 UTC (Abb. 4) zeigt eine Absinkinversion mit zugehörigem Abtrocknen der Luftmasse oberhalb von etwa 700 hPa, was für eine Rückseitenwetterlage und ein sich aufbauendes Zwischenhoch typisch ist. Die relative Feuchte liegt in diesen Höhen weit unter 30 % und

¹Die Einheit des Radarreflektivitätsfaktors Z ist $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$. Um handliche Werte zu haben, wird er als logarithmisches Maß in $\text{dBZ} = 10 \log(Z/Z_0)$ mit $Z_0 = 1 \text{ mm}^6 \text{m}^{-3}$ angegeben.

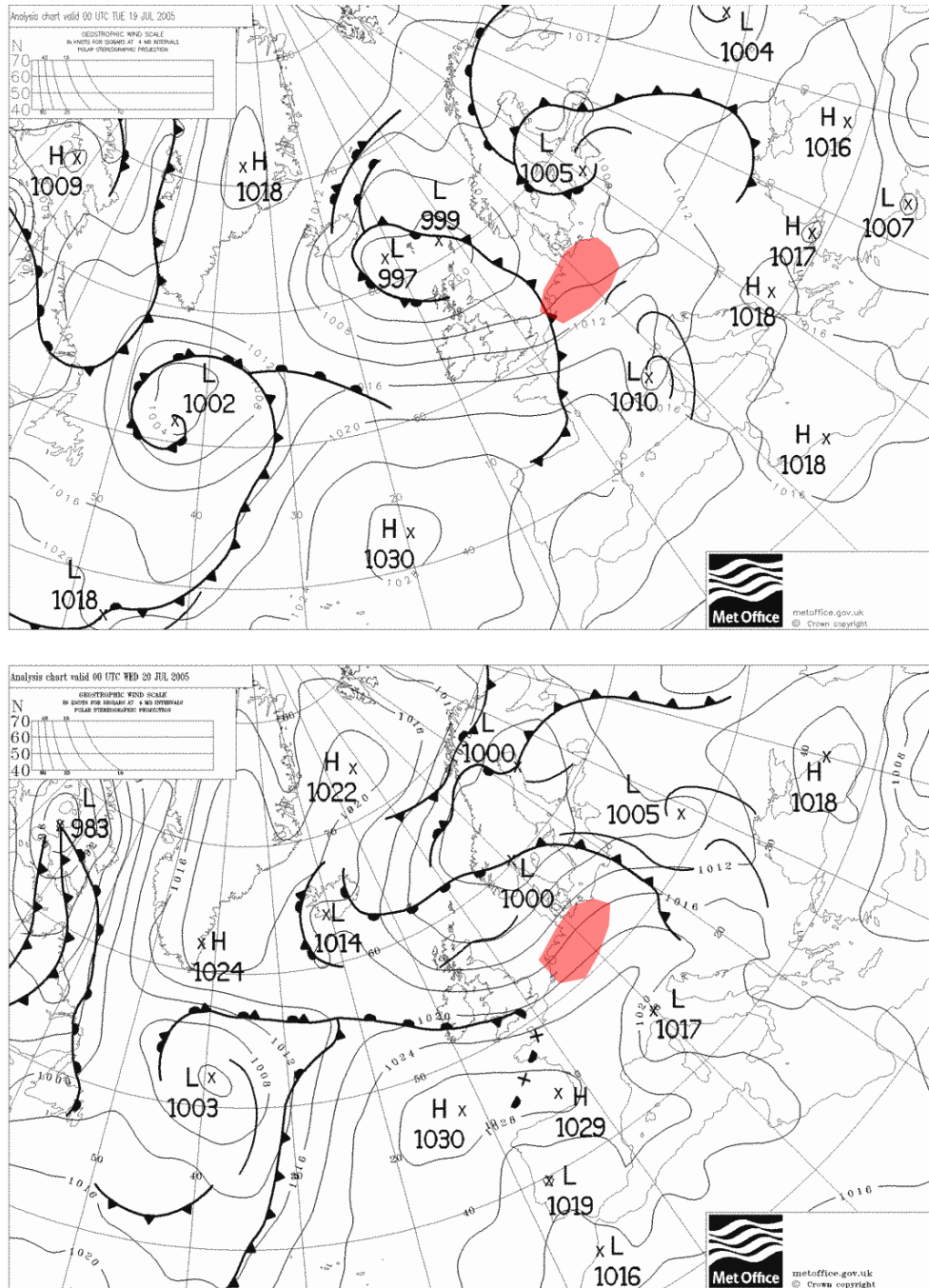
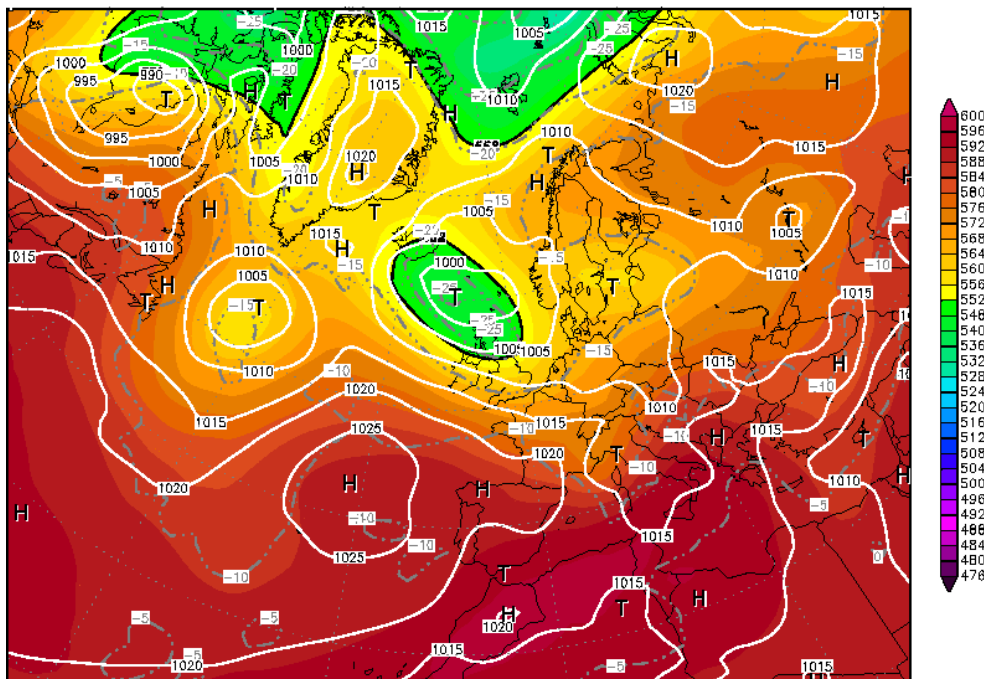


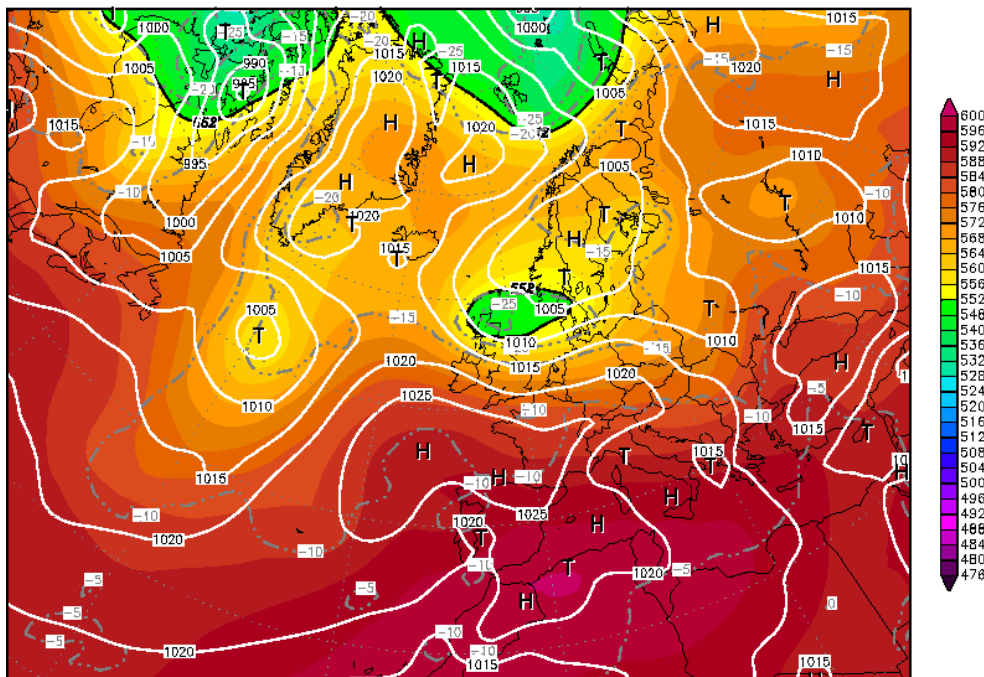
Abb. 1: Bodendruck-Analysekarten mit Fronten vom 19.7.2005 00 UTC (oben) und 20.7.2005 00 UTC (unten), UK Met Office. Rot eingefärbte Bereiche markieren das ungefähre Gebiet, innerhalb dessen die fraglichen Radarechos am 19.7. 2005 ab etwa 10 UTC beobachtet wurden.

Init : Tue,19JUL2005 00Z Valid: Tue,19JUL2005 00Z
 500 hPa Geopot.(gpm), T (C) und Bodendr. (hPa)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

Init : Wed,20JUL2005 00Z Valid: Wed,20JUL2005 00Z
 500 hPa Geopot.(gpm), T (C) und Bodendr. (hPa)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

Abb. 2: Analyse 500 hPa/Bodendruck vom 19.7.2005 00 UTC (oben) und 20.7.2005 00 UTC (unten), GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes NOAA.

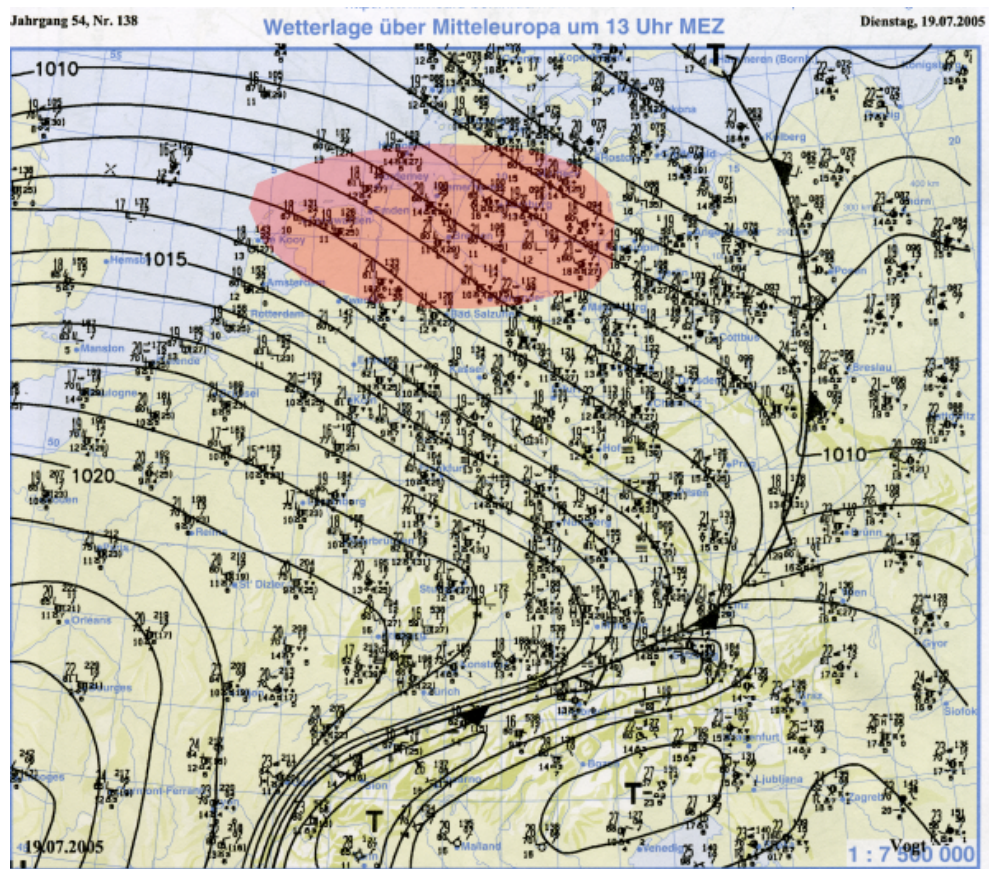


Abb. 3: Bodendruck-Analysekarte mit Fronten vom 19.7.2005 12 UTC, Berliner Wetterkarte. Der rot eingefärbte Bereich markiert das ungefähre Gebiet, innerhalb dessen die fraglichen Radarechos ab etwa 10 UTC beobachtet wurden.

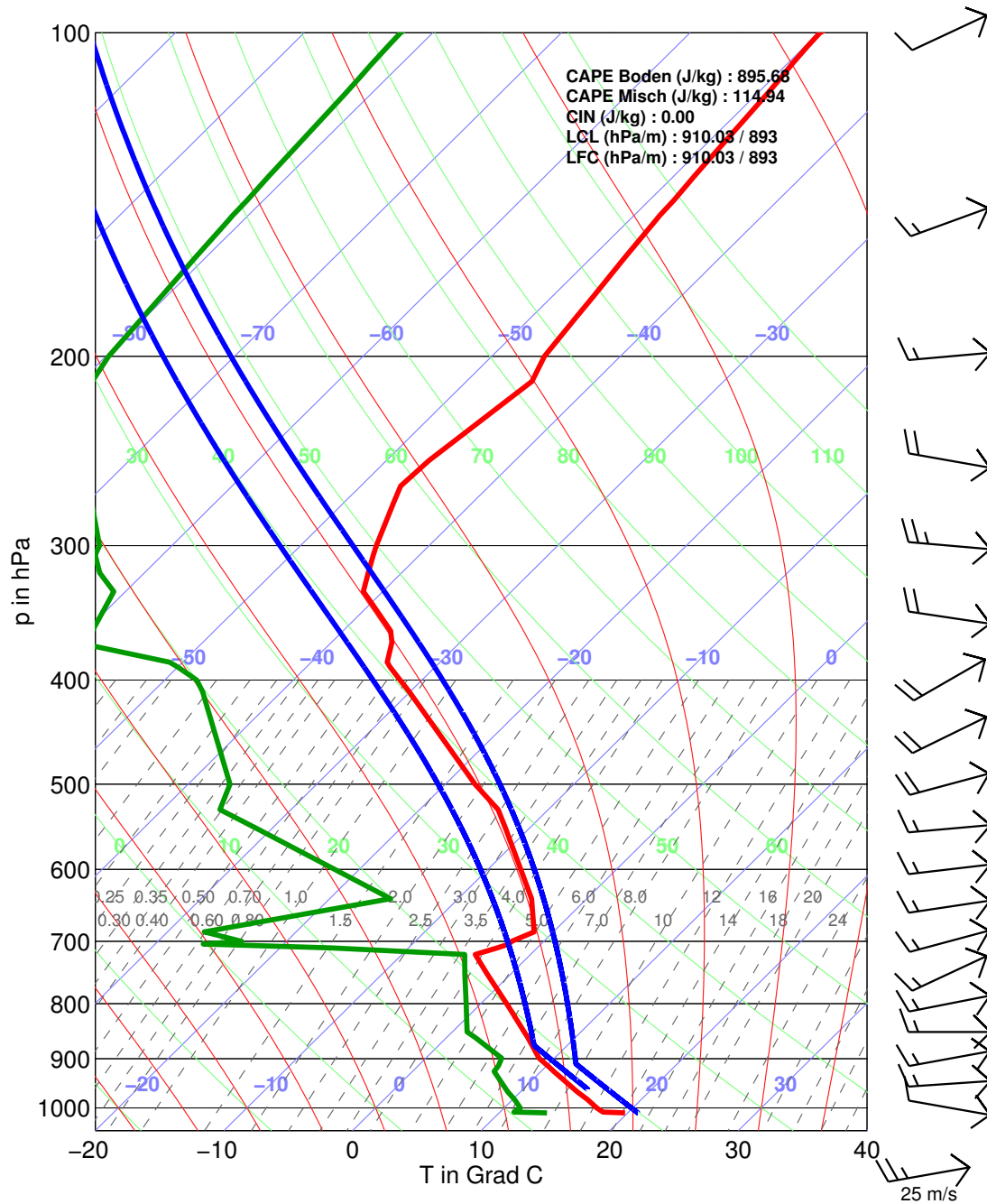


Abb. 4: SkewT/log p-Diagramm des Radiosondenaufstiegs Emden vom 19.7.2005 12 UTC. Rote Linie: Temperatur, grüne Linie: Taupunkttemperatur, blaue Kurven: Hebung eines Luftpaketes vom Boden aus mit Übertemperatur 1 K (rechte Kurve) und Hebung von über eine bodennahe Schicht gemittelter Luft (unterste 100 hPa, linke Kurve).

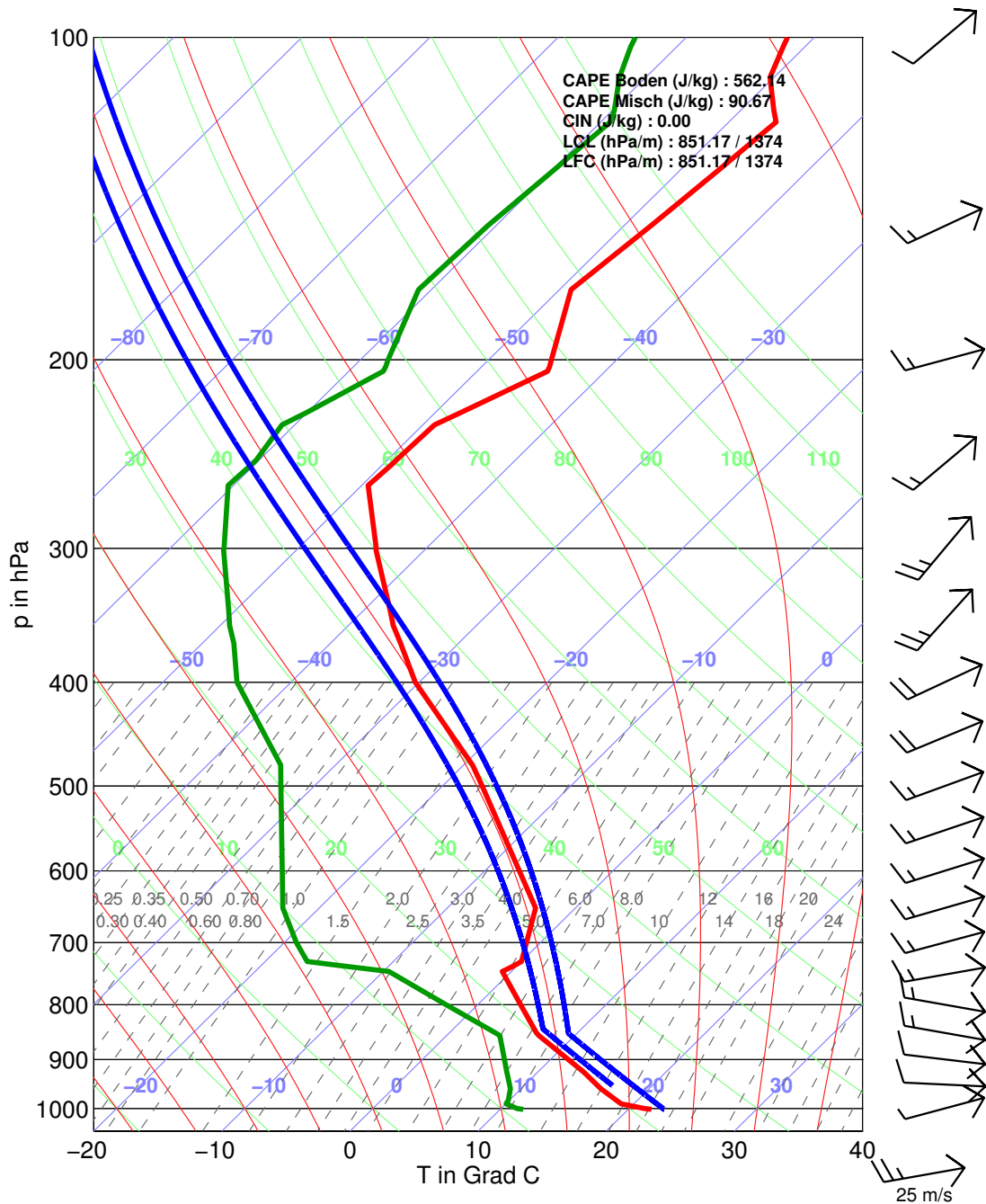


Abb. 5: SkewT/log p-Diagramm des Radiosondenaufstiegs Bergen vom 19.7.2005 12 UTC. Linien und Kurven wie in Abb. 4

das Mischungsverhältnis ist geringer als 1 g kg^{-1} . Diejenige Luftmasse, die um etwa 12 UTC in Emden war, könnte um 10 UTC am vermuteten Entstehungsort der fraglichen Radarechos gewesen sein.

Die Station Bergen (nordöstlich von Hannover) befindet sich etwa 200 km weiter östlich von Emden, also näher zur abziehenden Front, und repräsentiert die Luftmasse etwas stromabwärts der Radarechos (Aufstieg von 12 UTC in Abb. 5). Man erkennt auch hier eine markante Absinkinversion und das Abtrocknen in der Höhe, wobei die Feuchte in der Höhe noch geringfügig größer ist als in Emden.

Typisch für diese Wetterlage ist auch das Wolken- und Niederschlagsbild (s. Abb. 2 des Artikels von Asmus oder Abb. 9). Kaltfront-rückseitig ist keine stratiforme Bewölkung zu sehen, sondern man erkennt einige einzelne konvektive Zellen, die sich trotz der allmählichen Stabilisierung nahe der Rückseite der abziehenden Kaltfront noch bilden konnten. Die Aufstiege belegen, dass bei geringer weiterer Erwärmung der Grenzschicht noch genügend Instabilität (aus den Radiosondendaten lassen sich CAPE-Werte von etwa 100 bis 900 J/kg ableiten) vorhanden gewesen ist, um die Entwicklung einzelner konvektiver Zellen zuzulassen. Solche Zellen wurden vom Satelliten und auch mittels Radar beobachtet.

3 Synopsis der Radarbilder

Die in der Einleitung beschriebenen fraglichen Radarechos waren am 19.7.2005 über der südlichen Nordsee und Norddeutschland aufgetreten, und zwar zum ersten Mal etwa um 10 UTC vor der holländischen Nordküste. Im internationalen DWD-Radar-Komposit (PI-Komposit, $4 \times 4 \text{ km}^2$ Auflösung, je Gitterzelle jeweils das Maximum aller verfügbaren bodennächsten Reflektivitätswerte von ggf. mehreren Radargeräten) ist das Phänomen um 10:15 UTC (Abb. 6 oben links) eindeutig sichtbar. In der halbstündigen weiteren Abfolge erkennt man, vom Ort des ersten Auftretens ausgehend, die Ausbildung von zwei charakteristischen Streifen, die sich rasch nach Südosten ausbreiten und sich in der weiteren Folge mit der Strömung nach Ost-südost verlagern. Man beachte, dass durch die grobe Auflösung in Verbindung mit der Art der Kompositbildung Reflektivitätsstrukturen u.U. räumlich stark verbreitert und mit im Flächenmittel zu großer Reflektivität dargestellt werden. Quantitative Betrachtungen sind hier nur mit äußerster Vorsicht möglich.

Die Anfangsphase des Phänomens kann besser mit Hilfe von dreidimensionalen Daten des DWD-Radars Emden verfolgt werden. Für die folgenden Auswertungen werden jeweils dreidimensionale, kartesisch interpolierte Radardaten mit einer Auflösung von $2 \times 2 \times 1 \text{ km}^3$ verwendet. Etwaige linienhafte Reflektivitätsstrukturen werden hier wesentlich schwächer räumlich verschmiert. Die Abbildungen sind so genannte Max-CAPPI-Darstellungen (Projektion der Reflektivitätsmaxima auf die Seitenwände und den Boden des Messvolumens).

Der vermutliche Ort des ersten Auftretens (siehe PI-Komposits in Abb. 6) liegt gerade noch außerhalb des Messbereichs des Radars Emden, aber die fraglichen Streifenstrukturen sind bereits um 10:25 UTC am westlichen Bildrand in einer Höhe von 3 bis 8 km zu erkennen (Abb. 7, oben links). Sie breiten sich rasch noch etwas nach Südosten aus, bevor sie mit der allgemeinen Strömung in Richtung Osten transportiert werden. Leider wurde das Radar Emden von 11:13 UTC bis kurz nach 15:00 UTC wegen Wartungsarbeiten abgeschaltet, so dass der weitere Transport der Streifen mit dem Radar Emden nicht verfolgt werden konnte. Nach der Wiederinbetriebnahme um 15:25 UTC erkennt man jedoch im nordöstlichen Radargebiet mehrere neue, offensichtlich nicht mit den vorigen Streifen in Zusammenhang stehende Strukturen, die in verschiedenen Höhen zu beobachten sind.

Für den Zeitraum während der Abschaltung des Radars Emden können die Radardaten des weiter südöstlich gelegenen Standorts Hannover herangezogen werden.

Die Abfolge der Max-CAPPI-Darstellungen der Daten des DWD-Radars Hannover in der Abb. 8 zeigt um 12:25 UTC die fraglichen Radarechos am äußersten westlichen Rand des Messgebiets mit Reflektivitätswerten von 7 bis 19 dBZ in Höhen zwischen etwa 4 und 10 km. Die eindeutige Identifikation wird etwas erschwert durch einzelne Signaturen mit deutlich erhöhten dBZ-Werten ($\geq 46 \text{ dBZ}$) im gesamten Gebiet östlich der Bandstruktur, die in ihrer Ausprägung auf konvektive Zellen hinweisen und die in den seitlichen Projektionsaufzissen überlagert dargestellt werden. Ob das etwa 100 km östlich der Bandstruktur zwischen Ems und Weser befindliche kürzere, nord-südlich orientierte Bandmuster ebenfalls zu den „Geisterwolken“ gehört oder ob es sich hier um eine tatsächliche bandartige Niederschlagsstruktur handelt, läßt sich wegen der Überlagerung in den Seitenrissen nicht eindeutig feststellen.

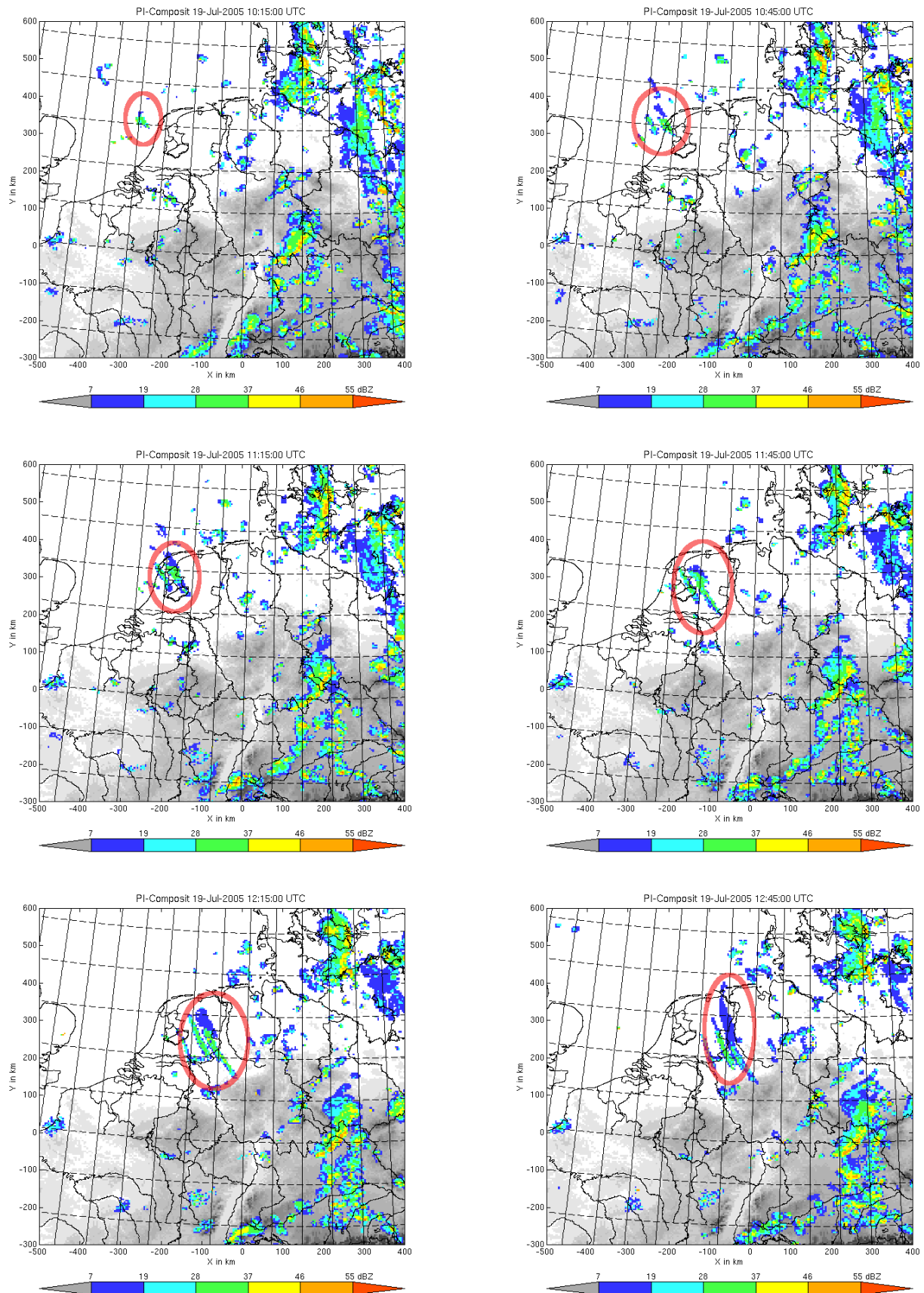


Abb. 6: Internationales Komposit (PI) der Reflektivitätsdaten am 19.7.2005, 10:15 UTC (oben links), 10:45 UTC (oben rechts), 11:15 UTC (mitte links), 11:45 UTC (mitte rechts), 12:15 UTC (unten links) und 12:45 UTC (unten rechts). Die fraglichen Radarechos sind rot umrandet. **Man beachte: etwaige linienhafte Reflektivitätsstrukturen erscheinen aufgrund der Art der Kompositbildung u.U. stark verbreitert und mit im Mittel zu hoher Reflektivität (siehe Text).** Daten zur Verfügung gestellt vom Deutschen Wetterdienst.

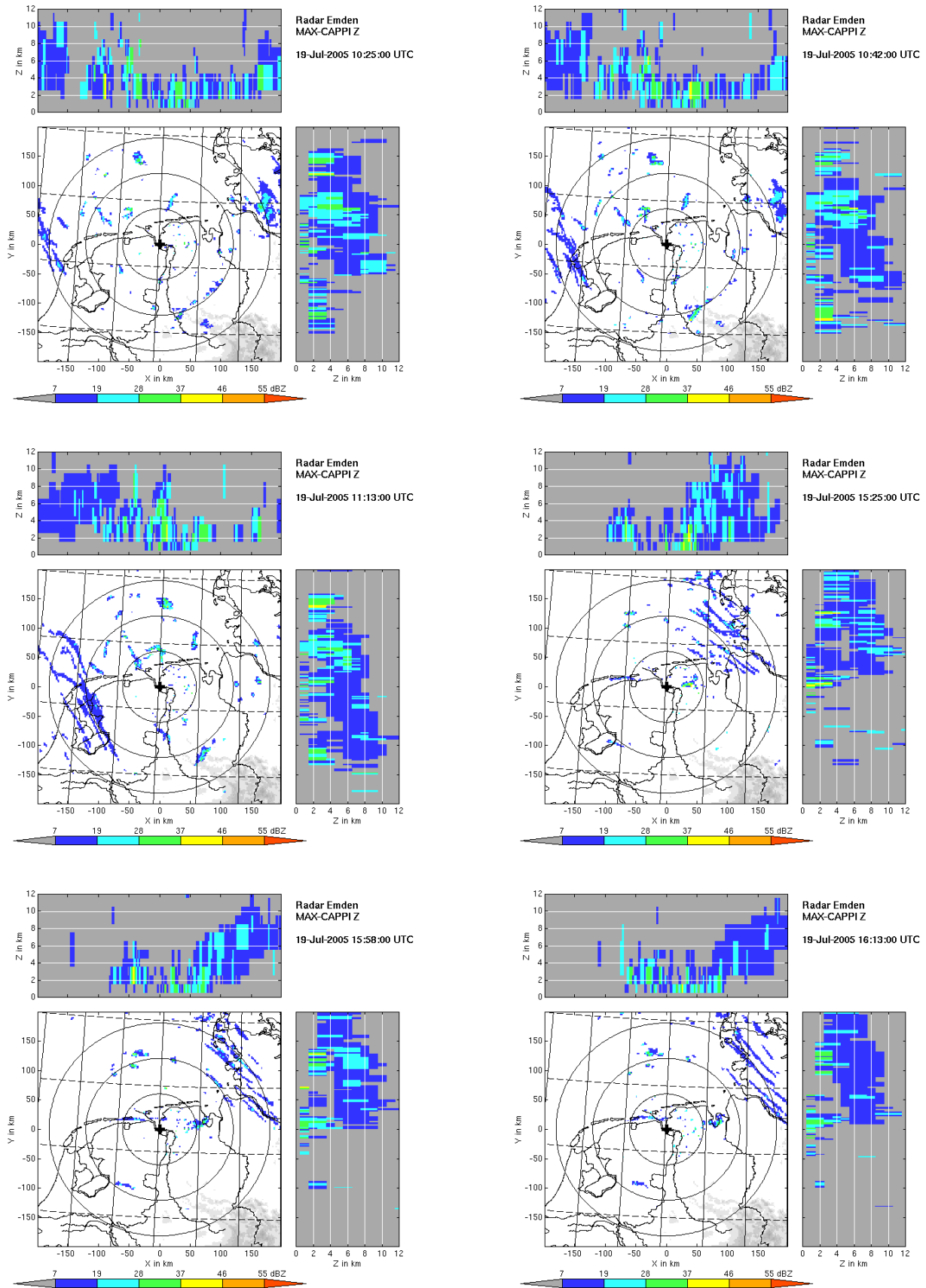


Abb. 7: MAX-CAPPI-Darstellung der Reflektivitätsdaten des Radars Emden am 19.7.2005. Erste Periode von Streifenstrukturen: 10:25 UTC (oben links), 10:42 UTC (oben rechts), 11:13 UTC (mitte links), danach Radarwartung. Zweite Periode: 15:25 UTC (mitte rechts), 15:58 UTC (unten links) und 16:13 UTC (unten rechts). Daten zur Verfügung gestellt vom Deutschen Wetterdienst.

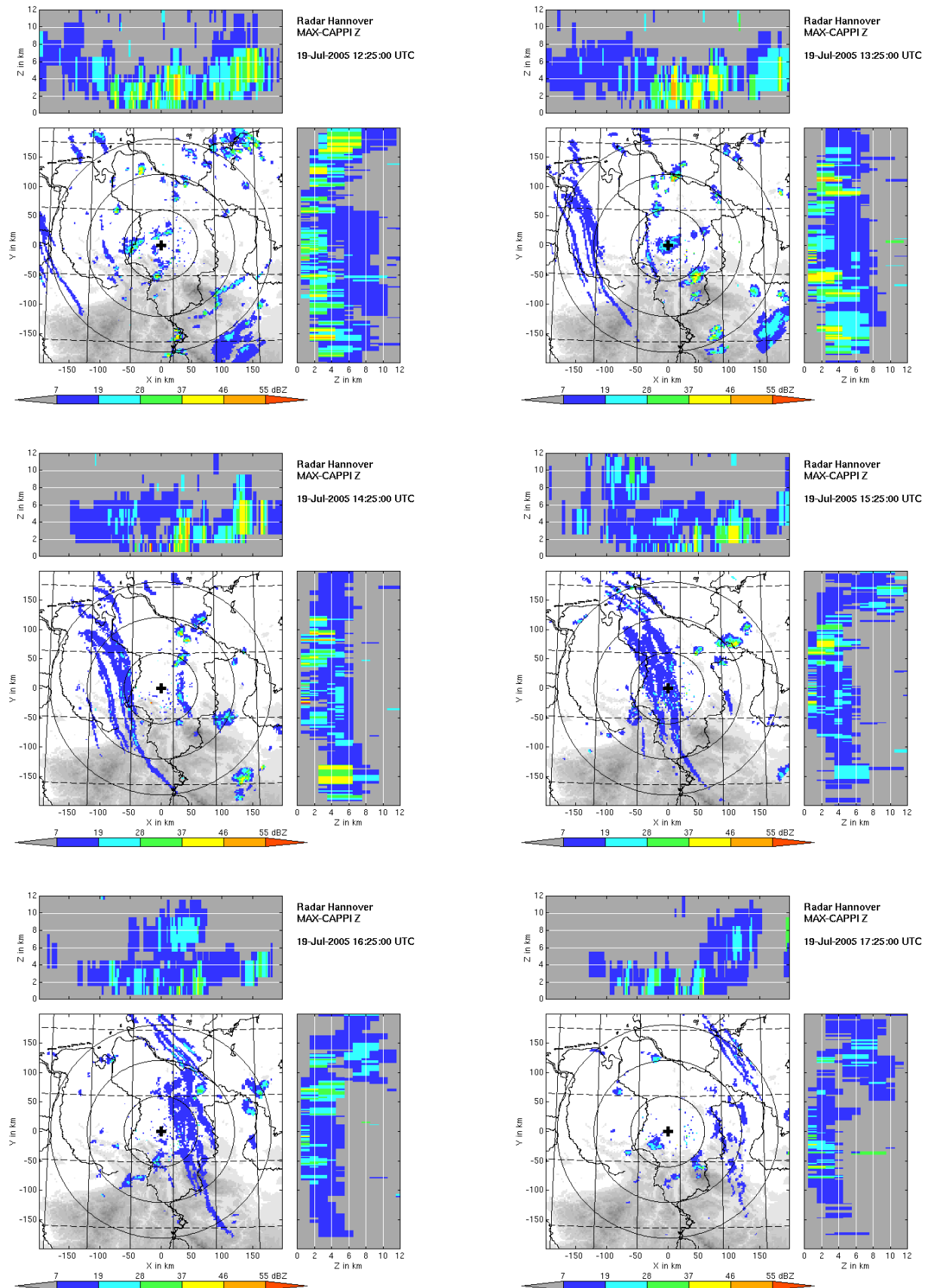


Abb. 8: MAX-CAPPI-Darstellung der Reflektivitätsdaten des Radars Hannover am 19.7.2005, 12:25 UTC (oben links), 13:25 UTC (oben rechts), 14:25 UTC (mitte links), 15:25 UTC (mitte rechts), 16:25 UTC (unten links) und 17:25 UTC (unten rechts). Daten zur Verfügung gestellt vom Deutschen Wetterdienst.

Eine Stunde später, um 13:25 UTC, sind die charakteristischen Linienstrukturen schon deutlich über der Ems im Radarbild sichtbar. Im nördlichen Aufriß sind Reflektivitäten von 7 bis 19 dBZ in Höhen zwischen 2 und 9 km erkennbar. Östlich davon sind wiederum einzelne konvektive Zellen mit deutlich erhöhten dBZ-Werten (≥ 46 dBZ) zu sehen. Wiederum zwei Stunden später (15:25 UTC) überdeckt das Streifenmuster das Zentrum des Radargebiets mit Reflektivitäten, die nicht wesentlich stärker sind als im vorigen Bild. Man sieht deutlich, dass im nördlichen Bereich Reflektivitäten in 8 – 10 km Höhe mit Werten ≥ 28 dBZ erscheinen. Um 16:25 UTC hat das streifenförmige Reflektivitätsmuster das Radar Hannover überquert: Im südlichen Bereich der Streifen liegen die Reflektivitäten zwischen 7 und 19 dBZ, sie streuen jetzt über einen Höhenbereich von 1,5 – 6 km. Im nördlichen Bereich liegt das Reflektivitätsmaximum bei Werten ≥ 19 dBZ mit einer Häufung in etwa 8 km Höhe. Wiederum eine Stunde später (17:25 UTC) zerfasert der mittlere und südliche Teil der Streifen, während im nördlichen Teil noch ein markantes Streifenmuster existiert; seine Vertikalausdehnung ist etwa von 2,5 bis 10 km mit dBZ-Maximalwerten in etwa 7 km Höhe.

Man beachte auch, dass mit zunehmender Entfernung die unterste Radarelevation wegen der Erdkrümmung immer höher liegt und dadurch die konvektiven Zellen nicht mehr bis zum Boden herunter vermessen werden können. Dies macht sich in den Seitenrissen als nach oben gekrümmter Messbereichsunterrand bemerkbar.

Es soll noch darauf hingewiesen werden, dass vom Radar Emden nach Wiederinbetriebnahme um 15:25 UTC in östlicher Richtung, speziell im Überlappungsbereich mit dem Radar Hannover, keine Reflektivitäten registriert wurden. Da auf der Verbindungslinie der beiden Radare keine Hindernisse liegen, die zu Abschattungseffekten hätten führen können, kann als mögliche Ursache vermutet werden, dass die Radare Emden und Hannover nicht identisch kalibriert waren. Demzufolge wäre es möglich, dass das Emdener Radar weniger sensitiv war und Reflektivitäten (eventuell nur wenig) unterhalb der unteren Intervallgrenze von 7 dBZ gemessen hat, die in der graphischen Darstellung dann nicht angezeigt werden. Diese Interpretation wird dadurch gestützt, dass die Daten des Hamburger Radars (hier nicht gezeigt) in der fraglichen Zeit und in diesem Bereich eine sehr inhomogene Struktur zeigen. Eine Bestätigung dieser Vermutung ließe sich letztendlich nur durch eine Analyse der originären polaren Reflektivitätsdaten der Radare ableiten. Diese werden vom DWD aber (noch) nicht routinemäßig gespeichert.

Nach der obigen Analyse können zwei Regime des Reflektivitätsstreifenphänomens unterschieden werden: Das erste bildet das sehr langgestreckte gebänderte Muster, das ab 13:25 UTC in Höhen von etwa 3 – 7 km besonders ausgeprägt ist. Das zweite Regime in größeren Höhen wird erst gegen 14:40 UTC (Abb. nicht gezeigt) nördlich der nordfriesischen Inseln sichtbar.

Unterstellt man, dass die die Bandstruktur hervorrufenden Streuteilchen unter leichtem Absinken im wesentlichen horizontal transportiert werden, was durch die bei Asmus (2005) dargestellten Trajektorienrechnungen gestützt wird, kann man anhand der Höhenänderung einzelner markanter Punkte der Bandstruktur (Fallstrecke von etwa 1,5 bis 2,5 km in 2 Stunden) eine Sinkgeschwindigkeit von grob etwa 0,2 bis 0,3 m s^{-1} ableiten.

An dieser Stelle noch eine Bemerkung zu Niederschlagsmessungen am Boden: An einigen Messstationen wurde infolge der vom Radar beobachteten konvektiven Zellen Niederschlag registriert. Dies war aber nur vereinzelt der Fall und kann in der räumlichen Verteilung offenbar nicht den fraglichen bandartigen Radarechos zugeordnet werden. Dabei muss man bedenken, dass viele Niederschlagsmessstationen nur Tages- oder Stundensummen registrieren, was eine genaue zeitliche Zuordnung des Bodenniederschlags zu den Radardaten im vorliegenden Fall unmöglich macht. Dies wäre aber nötig, um etwaigen Niederschlag aus den fraglichen Radarechos eindeutig von den östlich davon auftretenden lokalen konvektiven Niederschlägen unterscheiden zu können. Eine genauere Analyse anhand solcher Daten ist daher nicht möglich.

Hilfreich dagegen ist ein Vergleich mit Satellitendaten. Abb. 9 zeigt links einen Ausschnitt (Norddeutschland) eines Satellitenbildes von NOAA im sichtbaren Kanal von 12:43 UTC. Man erkennt deutlich die frontrückseitige typisch zellartige flache bis mittelhohe Konvektion, die westlich von Weser und Ems mit zunehmendem Frontabstand schwächer ausgeprägt ist. Im rechten Bild ist zusätzlich die senkrechte Projektion des MAX-CAPPIs von 12:43 UTC des Radars Hannover in halbtransparenter Weise demselben Satellitenbild überlagert. Aufgrund unterschiedlicher Kartenprojektionen ist die räumliche Übereinstimmung nicht ganz korrekt, aber hinreichend genau. Man erkennt deutlich, dass am Ort der fraglichen streifenförmigen Radarechos am Westrand des Radarausschnittes keine entsprechend streifenförmigen

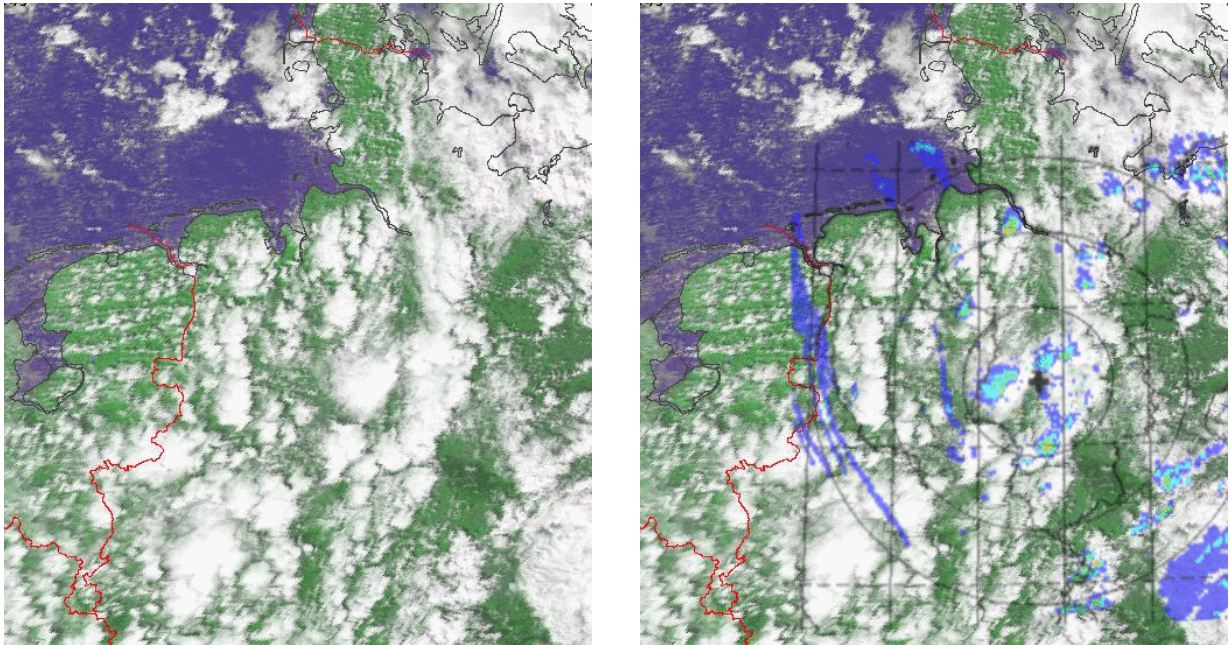


Abb. 9: **Links:** Ausschnitt (Norddeutschland) eines Satellitenbilds von NOAA im sichtbaren Kanal vom 19.7.2005, 12:43 UTC. **Rechts:** Dasselbe Satellitenbild mit überlagerter halbdurchscheinender MAX-CAPPI-Darstellung (nur Draufsicht) der Radardaten des Standortes Hannover vom gleichen Termin, 12:43 UTC. Das Radargebiet endet im Westen etwa an der holländischen Grenze, dort wo das Gradnetz und die Radardaten „abgeschnitten“ sind.

Wolken im Satellitenbild erkennbar sind, lediglich davon entkoppelt erscheinende flache Konvektion. Dagegen können einige weiter östlich davon gelegene, stärkere konvektive Zellen sowohl im Radarbild als auch vom Satelliten aus identifiziert werden.

Man beachte, dass C-Band Radare, wie sie der DWD betreibt, nur Niederschlagspartikel und keine Wolkenpartikel erkennen können, da der Rückstreuquerschnitt von Wolkenpartikeln von der 6. Potenz der Partikelgröße abhängt (Rayleigh-Näherung²), so dass deren Reflexion viel zu gering ausfällt. Aufschlussreich ist daher die Tatsache, dass viele vom Satelliten aus sichtbare konvektive Wolken vom Radar nicht detektiert werden konnten, was im Umkehrschluss bedeutet, dass etwaige Wolken mit einer derart hohen Reflektivität, wie sie bei den Streifenstrukturen der Radardaten beobachtet wurden, auf jeden Fall im Satellitenbild hätten erscheinen müssen (siehe hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 4.1).

²Die Rayleigh-Näherung ist für (kleine) Wolkenpartikel sehr gut, weil die Wellenlänge eines C-Band Radars mit ≈ 5 cm groß genug gegenüber der Größe solcher Teilchen ist.

4 Verschiedene Hypothesen

Bei Asmus (2005) wurden schon verschiedene Hypothesen über die Ursache der fraglichen Reflektivitäts-Bandstrukturen formuliert und beleuchtet mit dem Ergebnis, dass Chaff als wahrscheinlichste Ursache in Frage kommt. Nachfolgend wird die Liste an möglichen und unmöglichen Ursachen noch um einige Hypothesen erweitert, bevor in Abschnitt 4.4 weitere Indizien für Chaff als Ursache präsentiert werden.

4.1 Eiswolken und/oder Konvektion in der mittleren Troposphäre

Sollten die fraglichen Radarechos von Wolken- und Niederschlagsteilchen verursacht sein, so müssten diese aus trockenen Wolkeneispartikeln bestehen, da sie aufgrund der Radarechos in Höhen oberhalb der 0°C-Grenze in ≈ 760 hPa (etwa 2,3 km Höhe, s. Abb. 4) entstanden und auch nachfolgend in diesem Höhenbereich verblieben sind.

Abb. 10 zeigt die theoretisch (mit der Rayleigh-Approximation zur Berechnung des Streuquerschnitts) berechnete Reflektivität, die ein C-Band Radargerät, wie vom DWD betrieben, bei Vorhandensein einer typischen Eiswolke detektieren müsste, als Funktion des mittleren Partikeldurchmessers in mm und des Eisgehaltes in g m^{-3} . Reflektivitäten von trockenen Wolkeneisteilchen sind nur dann > 7 dBZ, wenn der Eisgehalt sehr hoch ist und/oder die Partikel sehr groß sind. Um die beobachteten 7 bis 19 dBZ erklären zu können, müsste beispielsweise der Eisgehalt bei einer mittleren Partikelgröße von 0,5 mm größer sein als etwa 1 g m^{-3} , oder aber bei einem Eisgehalt von $0,1 \text{ g m}^{-3}$ müssten die Partikel im Mittel größer sein als etwa 1 mm.

Beides ist für die fraglichen Radarechos unwahrscheinlich: Aus den Radiosondenaufstiegen (Abbn. 4 und 5) geht hervor, dass das Mischungsverhältnis in der Höhe der fraglichen Radarechos deutlich unterhalb von 1 g kg^{-1} liegt. Die absolute Feuchte erhält man angenähert durch Multiplikation mit der Luftdichte, so dass diese deutlich kleiner als $0,7 \text{ g m}^{-3}$ ausfällt. Bei den recht schwachen Hebungsprozessen, die für die Bildung von Eiswolken anzusetzen wären und deren Struktur den fraglichen Radarechos entspräche, würde vom absolut vorhandenen Wasserdampf wiederum nur ein kleiner Teil in Eis übergehen, so dass von Eisgehalten deutlich unter $0,1 \text{ g m}^{-3}$ auszugehen wäre (der Eisgehalt in Eiswolken in der

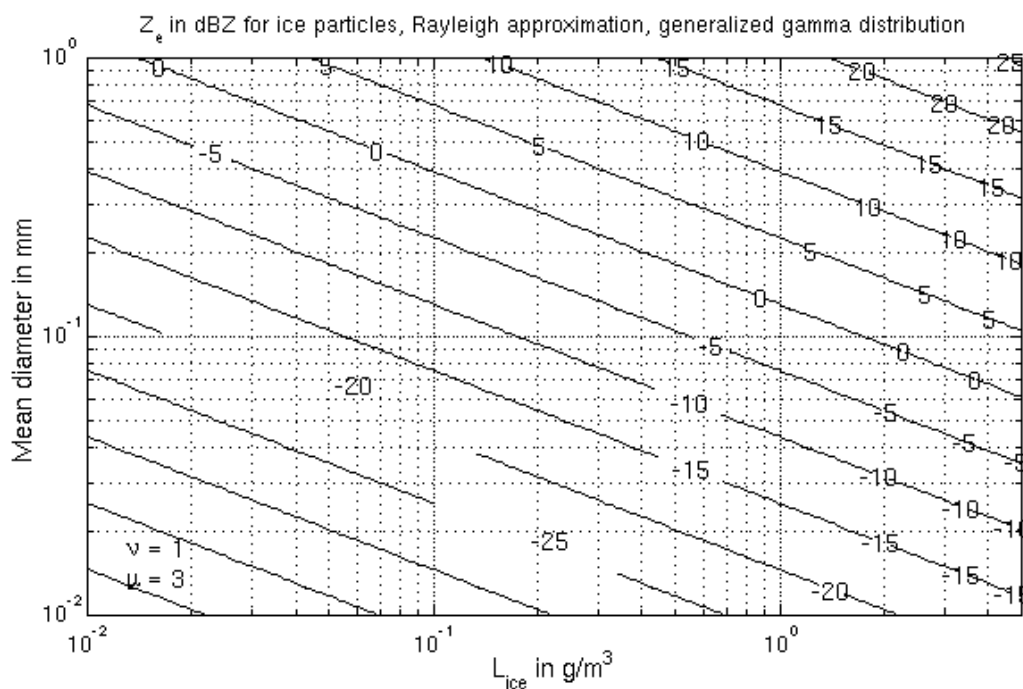


Abb. 10: Isolinien der theoretisch berechneten Reflektivität von trockenen Wolkeneispartikeln in dBZ als Funktion des Eisgehaltes in g m^{-3} und des mittleren Durchmessers der Größenverteilungsfunktion unter Annahme von für Eiswolken typischen Verhältnissen.

mittleren und oberen Troposphäre beträgt selbst bei die Wolkenbildung begünstigenden feuchteren Umgebungsbedingungen typischerweise nicht mehr als etwa $0,1$ bis $0,5 \text{ g m}^{-3}$, siehe Pruppacher und Klett, 1997, Seite 55 ff.). Nach dem oben Gesagten müssten die Teilchen dann aber im Mittel größer als 1 mm sein, was wiederum eine Sinkgeschwindigkeit von $0,5 \text{ m s}^{-1}$ und mehr (in ruhender Luft!) nach sich zöge (z.B. Heymsfield und Kajikawa, 1987). Beobachtet wurden aber im Mittel nur etwa $0,2$ bis $0,3 \text{ m s}^{-1}$ (siehe Abschnitte 3 und 4.4).

Andererseits müssten Eiswolken der beobachteten Reflektivität mit kleineren Eispartikeln (entsprechend der beobachteten geringen Sedimentationsgeschwindigkeit) einen so großen Eisgehalt besitzen, dass sie mit Sicherheit vom Satelliten aus hätten beobachtet werden müssen (zumindest im sichtbaren Kanal, vgl. Abb. 9).

Und schließlich, hätten sich allen Umständen zum Trotz dennoch Eiswolken gebildet, hätten sie sich in der trockenen Luft bei der vermutlich vorherrschenden (schwachen) synoptischen Absinkbewegung relativ rasch aufgelöst und wären keinesfalls über einen Zeitraum von mehreren Stunden zu beobachten gewesen. Ein ständiger Hebungsantrieb in Form eines stationär „mitdriftenden“ Wellensystems, bei dem sich lenticulare Eiswolken immer wieder nachbilden würden, kann mangels denkbarer ursächlicher Mechanismen (Orographie) ebenfalls ausgeschlossen werden, zumal die Wellenamplitude dazu bei der vorherrschenden Trockenheit hätte extrem groß sein müssen.

Auch linienhafte Konvektion, ausgelöst in der mittleren Troposphäre, kann ausgeschlossen werden. Dazu war die Luft in der mittleren Troposphäre viel zu trocken. Die Luftfeuchte liegt z.T. weit unter 30% oberhalb 700 hPa .

4.2 Radarechos durch Turbulenz im Zusammenhang mit einer Böenfront

C-Band Radargeräte registrieren – aus Gründen der sehr geringen Reflexion an Turbulenzstrukturen in Verbindung mit nicht ausreichender Empfängerdynamik – nur bei besonders starken Böenfronten ein messbares Signal, wenn zudem bodennah noch streuende Teilchen (Staub, Laub o.ä.) aufgewirbelt werden. Die Reflektivitäten überschreiten dabei selten 5 dBZ , und dann auch nur kurzzeitig. Reflektivitätswerte zwischen 7 und 19 dBZ über mehrere Stunden in der mittleren Troposphäre können dadurch keinesfalls erklärt werden. Außerdem sind Böenfronten nicht so hochreichend, dass sie bis in das Niveau der beobachteten Radarechos reichen. Zudem würde eine Böenfront nur dann eine gut detektierbare Turbulenz erzeugen können, wenn sie sich relativ zum Grundstrom schnell mit einhergehenden sehr starken turbulenten Strukturen ausbreitet. Die fraglichen Radarechos sind aber mehr oder weniger wie passive Tracer mit der Strömung transportiert worden (belegt durch Trajektorienrechnungen, siehe Artikel von Asmus).

4.3 Bodenechos durch anomale Ausbreitung

So genannte Bodenechos durch anomale Ausbreitung (engl. anaprop) können bei Radarmessungen dann auftreten, wenn der Radarstrahl durch starke vertikale Abnahme des Brechungsindex der Luft stark nach unten (zu optisch dichteren Schichten hin) gekrümmt wird. Der Brechungsindex ist primär eine Funktion von Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte und nimmt im Mittel immer mit der Höhe ab. Dies wird bei der Radarmessung standardmäßig berücksichtigt und ist sogar erwünscht, weil man dadurch auch „unterhalb des sichtbaren Horizonts“ messen kann.

Liegt aber z.B. eine Inversion und/oder eine starke Abnahme der Luftfeuchte mit der Höhe vor, so nimmt in dieser Schicht der Brechungsindex stärker mit der Höhe ab. Dann erfolgt die Strahlkrümmung stärker „als normal“ und ein Radarstrahl kann u.U. dort auf den Erdboden treffen, wo es normalerweise nicht der Fall wäre. Dann werden Radarechos des Bodens (engl. ground clutter) beobachtet und könnten fälschlicherweise als Niederschlag interpretiert werden — wenn diese nicht durch geeignete Maßnahmen unterdrückt werden, wie z.B. mit einem Dopplerfilter, wie es beim DWD gemacht wird, um auch die „regulär“ auftretenden Bodenechos (z.B. an Hindernissen wie Gebirgen) herauszufiltern.

Allerdings geschieht diese sog. Superrefraktion bei atmosphärischen Verhältnissen nur dann, wenn der Radarstrahl nahezu horizontal abgestrahlt wird und nahezu streifend auf die Inversionsschicht trifft (nach eigenen Rechnungen bei einem Winkel zwischen Inversionsebene und Radarstrahl kleiner als etwa 1° , s. auch Doviak und Zrnić, 1993). Daraus folgt, dass sich eine solche Inversion möglichst in der Höhe der (rein horizontal) abstrahlenden Radarantenne befinden muss.

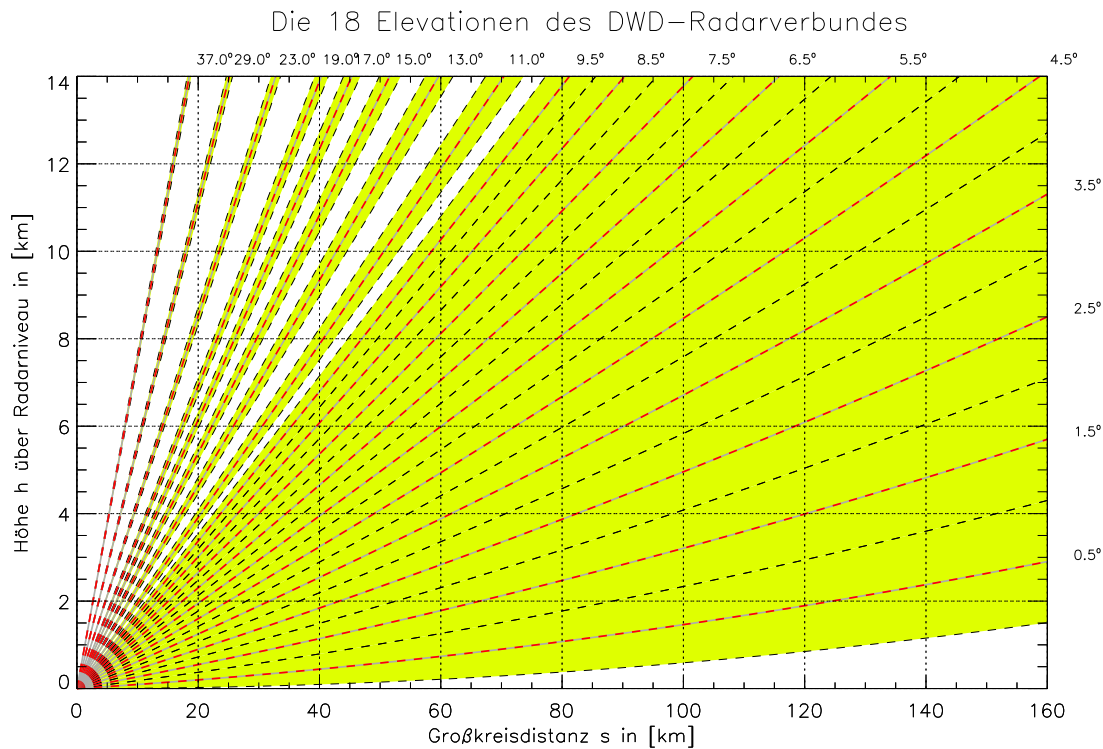


Abb. 11: Scan-Strategie (Elevationsabfolge der azimuthalen Kegelmantelscans) der DWD-Radargeräte für einen Volumenscan. Für jede Elevation (grüner Streifen) ist die Höhe über Radarniveau als Funktion der Bogenlängentfernung auf der Erdkugel angegeben, und zwar für die Strahlmitte (rot gestrichelt) und die Grenzen der Radarkeule mit 1° Öffnungswinkel (schwarz gestrichelt).

Durch Anaprop hervorgerufene Echos sind in der Regel ortsfest. Eine Verlagerung oder Intensitätsänderung tritt nur insoweit auf, wie sich eine Änderung der Inversionsschicht (Hebung/Absinken) auf die Strahlausbreitung auswirkt.

Wie eigene detaillierte Strahlausbreitungsrechnungen zeigen, kann, sobald der Radarstrahl mit einem Elevationswinkel größer als etwa 1° ausgesendet wird, keine auch noch so starke Inversionsschicht (innerhalb der in der Atmosphäre vorkommenden Grenzen) eine Strahlkrümmung zurück zum Erdboden verursachen (Superrefraktion). Zudem wird die Ausbreitung eines Radarstrahls bei steigender Elevation immer besser durch das Standard-Strahlausbreitungsmodell (sog. „4/3-Erde“-Modell) beschrieben, mit dessen Hilfe man normalerweise die Höhe des Radarstrahls über dem Erdboden berechnet. Die Fehler in der Höhenzuordnung werden hier bei Elevationswinkeln von größer 1° schnell unbedeutend.

Eine Inspektion der Bilder des Radars Hannover (Kap. 3) belegt, dass bei den gegebenen Entfernungen und Höhen der Radarechos, gemessen vom Radarstandort aus, diese unter Elevationswinkeln von in der Regel mehreren Grad bis zu etwa 10° beobachtet worden sind. Abb. 11 zeigt die in der DWD-Radarsoftware berücksichtigte Höhenzuordnung der einzelnen Elevationen als Funktion der Entfernung zum Radarstandort. Bei den genannten großen Abstrahlwinkeln können keine Bodenechos durch anomale Ausbreitung auftreten, zumal außerdem auch keine ausgeprägte bodennahe Inversion beobachtet wurde. Darüber hinaus wäre eine Verlagerung von Anaprop-Echos in der beobachteten Art ausgeschlossen.

4.4 Chaff

Nun soll die Hypothese beleuchtet werden, bei den „Geisterwolken“ handle es sich um so genannten Chaff. Chaff, zu deutsch „Düppel“ (nach dem Ort der ersten Erprobung auf dem Gut Düppel bei Berlin), wird gelegentlich bei Manövern von militärischen Luftfahrzeugen freigesetzt.

Als Chaff (engl. für Spreu) bezeichnet man künstlich hergestellte Teilchen mit einem sehr großen Reflexionsvermögen für Radarstrahlung. Man setzt Chaff für militärische Zwecke zur Störung von gegnerischen

Radargeräten ein, indem durch flächenhaftes Ausbringen Scheinziele oder ganze Bereiche mit starken Radarechos erzeugt werden, hinter denen Flugzeuge oder Schiffe nicht mehr entdeckt werden können/sollen (das Rückstreuersignal der zu tarnenden Objekte geht in starkem Hintergrundrauschen unter). Mit einem einzigen Flugzeug kann beispielsweise durch fortwährendes Ausbringen von Chaff ein „sicherer“ Korridor, der sich als streifenförmige Struktur im Radarbild bemerkbar macht, für nachfolgende Maschinen geschaffen werden. Die Bedeutung und der Einsatz von Chaff wird in einschlägigen Büchern beschrieben (Nathanson et al., 1999; Vakin et al., 2001; Neri, 2001). Skolnik (1990) kann entnommen werden, dass zur Durchdringung von Chaff-Wolken und Identifikation von Luftfahrzeugen ein auch nach aktuellem technischem Stand hoher Aufwand getrieben werden muss, so dass der Einsatz von Chaff auch heute noch üblich ist (z.B. während „Desert Storm“ im Golfkrieg).

Chaff bestand früher aus Stanniolstreifen, heute hingegen benutzt man metallummantelte, einige Zentimeter lange Kunstfaserstückchen von der Dicke eines menschlichen Haares (siehe z.B. Neri, 2001; Arnott et al., 2004). Bei gegebener Radarwellenlänge sind jeweils solche Chaff-Fasern (Dipole) am effektivsten, deren Länge der halben Radarwellenlänge entspricht. Da militärische Radargeräte in ähnlichen Wellenlängenbereichen arbeiten wie meteorologische Radare (etwa 1 cm bis 20 cm), ist es nicht verwunderlich, wenn auch letztere gelegentlich durch Chaff gestört werden. Meist werden nämlich gleichzeitig Chaff-Fasern verschiedener Länge freigesetzt, so dass möglichst der gesamte Wellenlängenbereich militärischer Radargeräte gestört werden kann.

Aber wie könnte man das Freisetzen von Chaff als Ursache der fraglichen Radarechos nachweisen? Offizielle Bestätigungen seitens des Militärs darf man wohl nicht erwarten. Da man etwaige ausgebrachte Chaff-Fasern aufgrund ihrer geringen Größe auch nur schwer am Boden auffinden kann, erscheint ein direkter Beweis für das Ausbringen unmöglich. Man muss sich daher auf Indizien stützen und Plausibilitätsbetrachtungen anstellen.

Als erstes Indiz, dass es sich bei den beobachteten Reflektivitätsmustern nicht um Echos meteorologischen Ursprungs handelt, ist festzustellen, dass in den entsprechenden Satellitenbildern außer den tatsächlich vorhandenen konvektiven Zellen keine streifenförmigen Wolkenstrukturen am Ort der Radarechos zu sehen sind. Die gemessenen Reflektivitäten der fraglichen Radarechos sind aber, wie schon früher bemerkt, in einer Größenordnung, bei der Wolken vom Satelliten aus sichtbar sein müssten.

Des weiteren verlagerten sich die Radarechos – konsistent zur vorherrschenden Strömung – unter langsamem Absinken horizontal, was durch die von Asmus (2005) beschriebenen Trajektorienrechnungen belegt ist.

Welche Menge an Chaff wäre nötig, um das beobachtete fragliche Echo hervorzurufen? Zunächst ist es so, dass das Rückstreuerverhalten von Chaff-Fasern stark vom Verhältnis der Faserlänge zur Radarwellenlänge abhängt und, wie weiter oben schon erwähnt, bei einem Verhältnis von 0,5 ein Maximum annimmt (Resonanz). Die folgende Abschätzung stützt sich auf Angaben über Material und Faserquerschnitt einer Sorte von heute „üblichem“ Chaff, die der Arbeit von Arnott et al. (2004) entnommen ist. Für eine „optimal“ auf C-Band abgestimmte Chaff-Faser gilt demnach:

- mittlere Länge $\bar{L}_c \approx 2,5$ cm ($\hat{=}$ halbe Wellenlänge eines C-Band Radars des DWD)
- mittlerer Durchmesser $\bar{D}_c \approx 25$ μ m
- mittlere Materialdichte $\bar{\rho}_c \approx 2,5$ g cm⁻³
- \implies mittlere Masse einer Chaff-Faser:

$$\bar{m}_c \approx \bar{\rho}_c \frac{\pi}{4} \bar{D}_c^2 \bar{L}_c = 3 \times 10^{-8} \text{ kg} \quad (1)$$

Für diese Art von Chaff läßt sich nach Arnott et al. (2004) die folgende Zahlenwertgleichung zwischen der Anzahl von Chaff-Partikeln N_c (in km⁻³) und der effektiven Radarreflektivität Z_e (in mm⁶ m⁻³) ableiten, die für eine Wellenlänge von 5 cm gültig ist:

$$N_c \approx 100 Z_e \quad (2)$$

Hierbei wird eine statistisch zufällige Orientierung der Faserausrichtung im Raum angenommen. Diese Gleichung ist konsistent mit einer Formulierung, bei der für den Rückstreuquerschnitt von Chaff-Fasern

eine Beziehung nach Sauvageot (1992) verwendet wird, die ebenfalls eine statistisch zufällige Faserausrichtung berücksichtigt.

Bei dieser Art von Chaff wären die von den DWD-Radargeräten bei gegebener Chaff-Konzentration gemessenen Reflektivitäten vermutlich noch etwas höher, da das \vec{E} -Feld mit horizontaler Polarisationsrichtung ausgestrahlt wird und die Chaff-Fasern in ruhiger Luft bevorzugt mit horizontaler Faserausrichtung fallen (Arnott et al., 2004). Somit stellt die Gl. (2) eine untere Schranke für die Reflektivität von „optimalem“ Chaff bei gegebener Chaff-Konzentration oder umgekehrt eine obere Schranke für die Chaff-Konzentration bei gegebener Reflektivität dar.

Für die Chaff-Masse M_c (in kg km^{-3}) gilt nach Gl. (2)

$$M_c = N_c \bar{m}_c \approx 100 Z_e \bar{m}_c \quad (3)$$

Daraus folgt beispielsweise:

- $Z_e = 15 \text{ dBZ} (\hat{=} 31,6 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}) \implies M_c \approx 9,5 \times 10^{-5} \text{ kg km}^{-3} = 0,095 \text{ g km}^{-3}$
- $Z_e = 20 \text{ dBZ} (\hat{=} 100 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}) \implies M_c \approx 3 \times 10^{-4} \text{ kg km}^{-3} = 0,3 \text{ g km}^{-3}$

Bei den fraglichen Radarechos ($\leq 20 \text{ dBZ}$) bedeutet das eine Chaffkonzentration von maximal ca. $3 \times 10^{-10} \text{ g}$ in einem Volumen von 1 m^3 oder 1 Chaff-Faser pro $100\,000 \text{ m}^3$ ($46 \times 46 \times 46 \text{ m}^3$). Im selben Volumen bräuchte man 10 Millionen Regentropfen von 1 mm Durchmesser, um dieselbe Reflektivität zu erhalten. Sauvageot (1992) gibt an, dass bei optimalen Bedingungen eine einzelne Chaff-Faser noch in 10 km Entfernung detektiert werden kann.

Mit diesen Informationen kann zunächst die benötigte Chaff-Masse bei optimaler Faserlänge innerhalb des Gebietes (Streifens) der fraglichen Radarechos um 14:25 UTC abgeschätzt werden. Legt man ein Streifenvolumen von $300 \text{ km} \times 10 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ (Länge \times Breite \times Höhe – s. entsprechendes Radarbild von Hannover in Kap. 3) zugrunde und eine mittlere Reflektivität von $Z_e = 15 \text{ dBZ}$ (die Messwerte lagen im Intervall 7 bis 19 dBZ), ergibt sich eine Chaff-Gesamtmasse von etwa 0,9 kg. Legt man $Z_e = 20 \text{ dBZ}$ zugrunde, dann ergeben sich etwa 2,7 kg.

Entspricht die Länge der Fasern nicht genau der halben Wellenlänge³, dann kann jedoch wesentlich mehr Masse nötig sein. Beispielsweise gilt für Fasern der Länge $\bar{L}_c \approx 1,7 \text{ cm}$ ($\bar{m}_c \approx 2 \times 10^{-8} \text{ kg}$) im Gegensatz zu Gl. (2) die Zahlenwertgleichung

$$N_c \approx 10000 Z_e \quad (4)$$

Um dieselbe Reflektivität wie mit „optimalem“ Chaff zu erhalten, sind also pro Volumeneinheit 100 mal mehr Chaff-Fasern vonnöten. Für die obige Gesamtmasse würde sich dann ein Wert von 90 kg bei 15 dBZ bzw. 270 kg bei 20 dBZ ergeben.

Längere Fasern als 2,5 cm können ebenfalls etwas mehr Masse erfordern. Bei $\bar{L}_c = 3,5 \text{ cm}$ (lokales Minimum des Rückstreuvermögens) ergibt sich ein Wert von etwa 10 kg bei 15 dBZ bzw. 40 kg bei 20 dBZ. Bei noch längeren Fasern sinkt die benötigte Masse wiederum ab, weil das Rückstreuvermögen wieder zunimmt.

Man beachte, dass die beobachteten Reflektivitäten der Streifenstrukturen im Mittel geringer als 20 dBZ sind. Der Wert 270 kg kann daher als obere Schranke angenommen werden.

Nach Angaben des United States General Accounting Office (1998) wird Chaff, meist von Flugzeugen aus, in Bündeln mit Massen zwischen einigen 100 g bis zu 9 kg oder – von Rollen geschnitten – mit einer minütlichen Rate von bis zu 11 kg freigesetzt. Umgerechnet ergäbe dies bei 9 kg-Bündeln und einer Gesamtmasse von 270 kg ca. 30 Bündel bzw. eine ca. 25-minütige Freisetzung.

Als Ergebnis und Indiz erhält man (bei allen Unsicherheiten der obigen Abschätzung) eine Größenordnung an Chaff-Masse, die selbst bei nicht auf die C-Band-Wellenlänge abgestimmtem Chaff ohne Probleme von einigen wenigen Flugzeugen hätte freigesetzt werden können.

Des weiteren geben Neri (2001) und Arnott et al. (2004) die mittlere Sinkgeschwindigkeit der Chaff-Fasern in ruhender Luft zu etwa 0,2 bis 0,3 m s^{-1} an. Wie schon in Kap. 3 angesprochen, ergibt ein aus den Radardaten für den 19.7.2005 grob abgeleiteter Schätzwert eine Fallgeschwindigkeit von etwa 0,2 bis 0,3 m s^{-1} , was gut zusammenpasst.

Diese Fallgeschwindigkeit deutet ausserdem darauf hin, dass in den betrachteten Höhen (etwa zwischen 3 und 8 km) keine merklichen Vertikalbewegungen vorlagen (bis auf einige räumlich eng begrenzte konvektive Umlagerungen).

³Bei einschlägigen Chaff-Produkten variiert die Faserlänge zwischen 0,8 cm und 7,5 cm. Damit wird ein Frequenzband von 2 GHz bis 18 GHz abgedeckt, also auch C-Band mit 5,6 GHz.

5 Andere Fälle von Chaff, gemessen mit dem Karlsruher C-Band Doppler Radar

Chaff wurde und wird auch vom Karlsruher Niederschlagsradar mehrmals im Jahr registriert. Die folgenden Beispiele zeigen sehr ähnliche Signaturen, wie sie am 19.7.2005 über Norddeutschland detektiert wurden, hier nun für den Bereich des südlichen Oberrheingrabens. Da zu diesen Terminen fast keine Wolken auftraten, sind sie besonders eindruckliche Beispiele von Chaff-Ereignissen.

Vorangestellt sei bemerkt, dass das Karlsruher C-Band Radar baugleich mit den DWD-Radargeräten ist, aber nur für Forschungszwecke eingesetzt wird. Im Gegensatz zu der Reflektivitätsskala des DWD, die Reflektivitätswerte nur grob in wenige Intervalle unterteilt, sind diejenigen des Karlsruher Radars sehr viel feiner abgestuft (im Prinzip liegen die Daten sogar kontinuierlich vor und können je nach Anforderung aus den seit 1995 archivierten Volumendatensätzen speziell nachprozessiert werden).

18.6.2003

Am 18.6.2003 tritt ein erstes Chaff-Signal um 14:04 MESZ über Mainz in einer Höhe von 6 bis 10 km auf (s. Abb. 12 links oben). Bis 17:24 MESZ (rechtes unteres Bild) dehnt sich das Reflektivitätsband weit nach Süden aus, wobei die mittlere Höhe des Reflektivitätsmaximums kontinuierlich bis auf eine Höhe von ca. 3 bis 6 km absinkt.

Die im rechten Aufriß zu sehenden elliptischen Strukturen Muster sind Artefakte, die durch den Scan-Modus und die keulenförmige Verbreiterung des Radarstrahls (1° Öffnungswinkel) des IMK Radars entsteht und das nicht zu der Interpretation verleiten darf, es handele sich um hintereinander ausgestoßene Chaff-Wolken. Jede elliptische Struktur kennzeichnet den Durchgang einer Elevationsmessung durch das Chaff-Band, wobei die Messwerte jeweils der Strahlmitte zugeordnet werden, obwohl ggf. nur der obere oder untere Randbereich der Strahl-Hauptkeule mit Streuteilchen erfüllt gewesen ist. Dadurch ergibt sich eine sägezahnförmige Verzerrung des Chaff-Bandes, das durch nachfolgende räumliche Dateninterpolation weiter zu dieser elliptischen Struktur verschmiert wird. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Entfernung des Chaff-Streifens vom Radarstandort ab, da immer weniger verschiedene Elevationen an der Messung beteiligt sind.

Wie im Fall vom 19.7.2005 ist das singuläre Reflektivitätsmaximum streifenförmig und lang ausgedehnt (mindestens 150 km). Die Sinkgeschwindigkeit läßt sich für das Zeitintervall von 15:04 bis 17:24 MESZ zu etwa $0,3 \text{ m s}^{-1}$ abschätzen. Die Verlagerung des Streifens erfolgt mit der in diesem Zeitraum vorherrschenden west- bis nordwestlichen Höhenströmung. Man beachte auch, dass um 14:30 MESZ vermutlich ein Teil des Streifens in der näheren Umgebung des IMK Radars nicht beobachtet werden konnte, da er sich ausserhalb des abgescannten Messbereichs des Radars (Elevation $\geq 30^\circ$) befand.

Im Unterschied zu der Chaff-Signatur sind die in dieser Zeit auch aufgetretenen konvektiven Zellen bei Darmstadt deutlich an ihren hohen und isoliert auftretenden Reflektivitäten zu erkennen.

6.12.2001

Während im Fall vom 18.6.2003 nur ein einzelnes streifenförmiges Reflektivitätsmaximum auftrat, wurde am 6.12.2001 eine Struktur mit vielen Streifen detektiert (s. Abb. 13). Dabei sind zwei Stadien identifizierbar: einer ersten Welle, die um 16:40 MEZ über Würzburg sichtbar wurde, folgte eine zweite, die etwa 15 Minuten später ins Radargebiet eintrat. Diese streifenförmige Struktur ist sehr ähnlich zu der vom 19.7.2005. Gut zu sehen ist auch hier das allmähliche Absinken des Reflektivitätsmaximums, was typisch für Chaff ist. Während dieser winterlichen Situation gab es im betrachteten Zeitraum im Radargebiet, außer in der Nähe von Freiburg, keine Wolken.

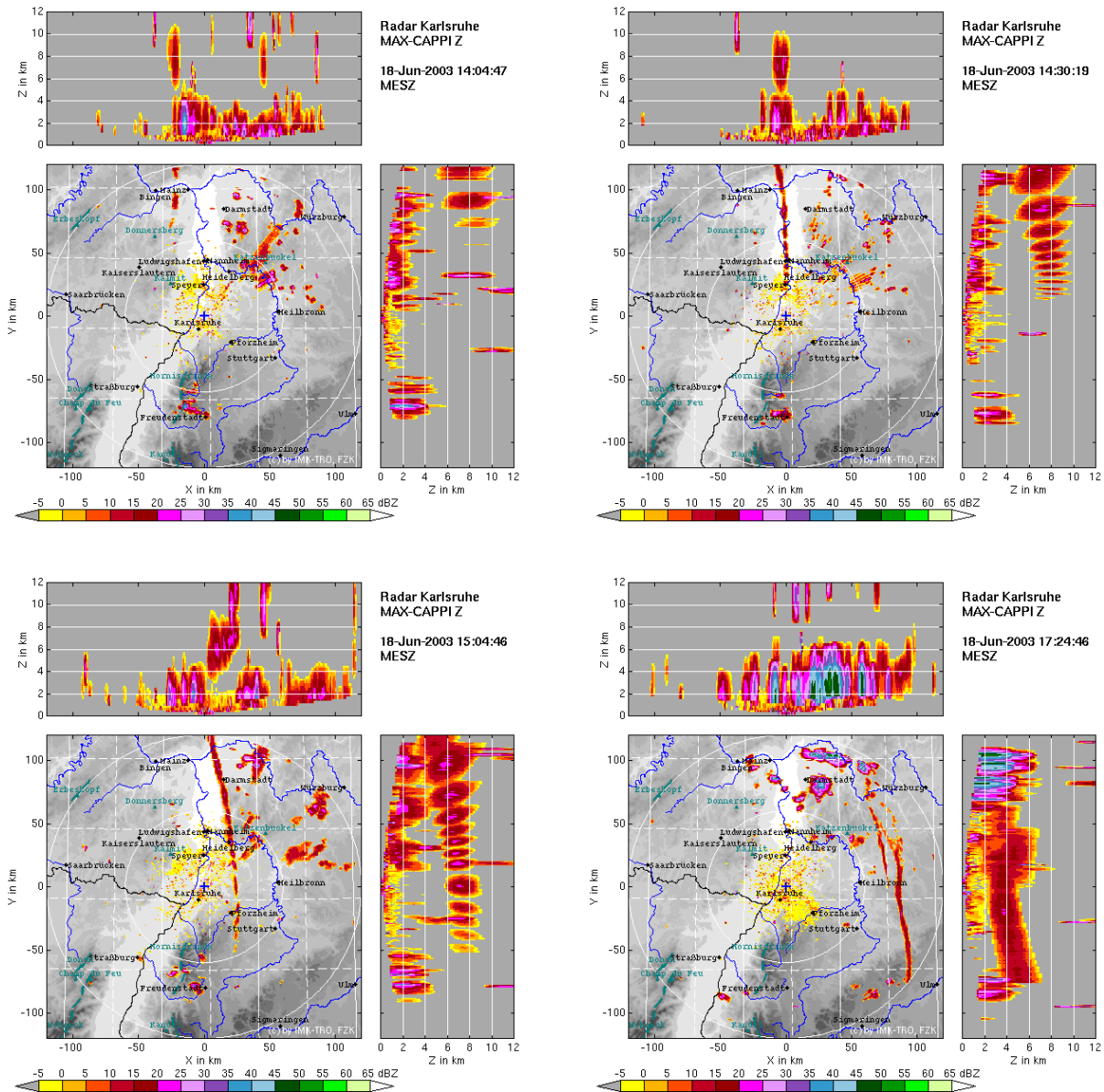


Abb. 12: MAX-CAPPI-Darstellung von Chaff- Echos, gemessen mit dem Karlsruher Radar am 18.6.2003. Erste Registrierung um 14:04 MESZ (oben links), 14:30 MESZ (oben rechts), 15:04 MESZ (unten links) und 17:24 MESZ (unten rechts).

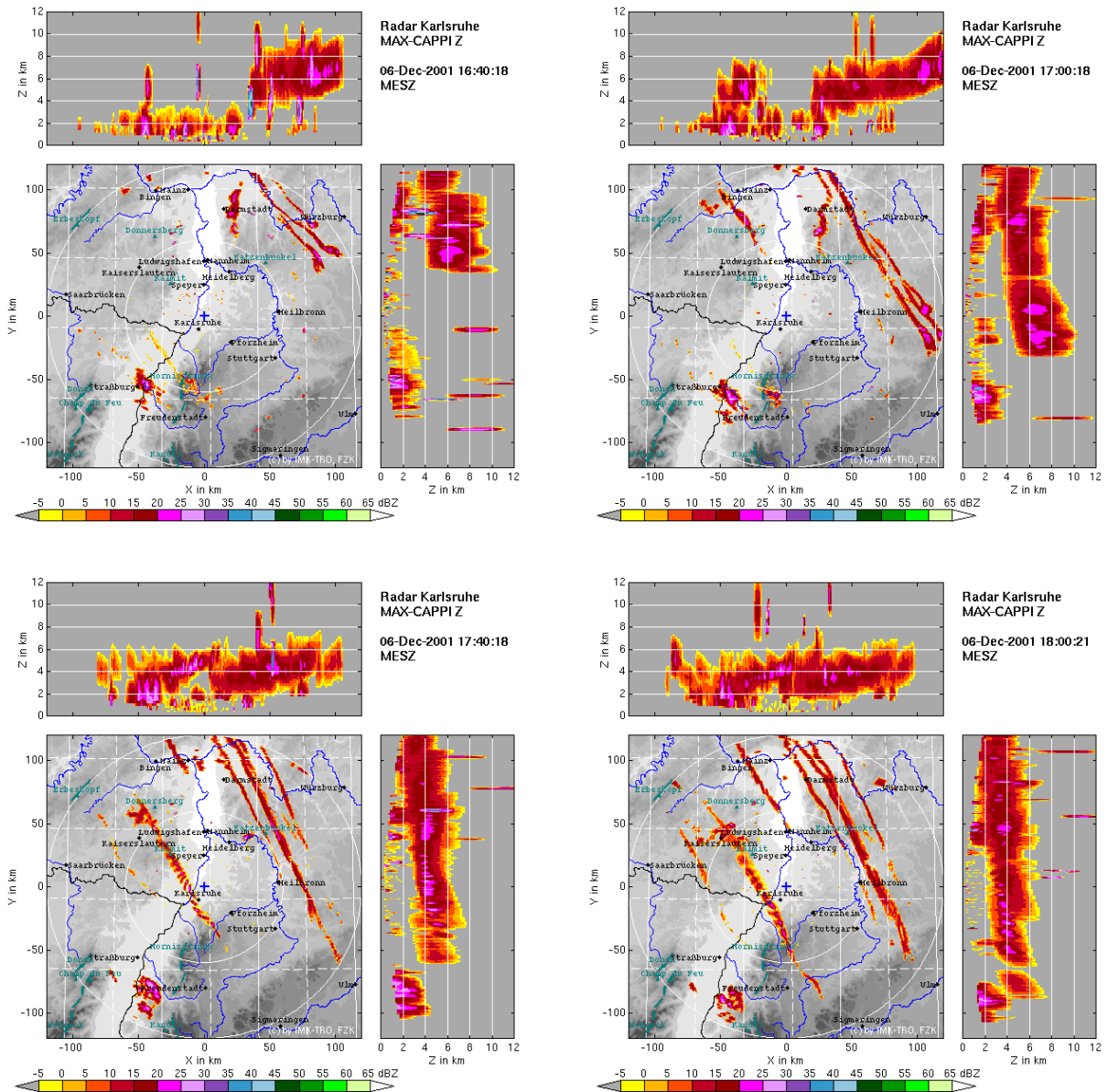


Abb. 13: MAX-CAPPI-Darstellung von Chaff- Echos, gemessen mit dem Karlsruher Radar am 6.12.2001. Erste Registrierung um 16:40 MEZ (oben links), 17:00 MEZ (oben rechts), 17:40 MEZ (unten links) und 18:00 MEZ (unten rechts).

6 Schlussbetrachtung

Die im Artikel von Asmus (2005) und im vorliegenden Beitrag dargestellten Indizien führen zu dem Schluß, dass Chaff als plausibelste Möglichkeit anzusehen ist, mit der die beobachteten Charakteristika der Radarechos vom 19.7.2005 über Norddeutschland erklärt werden können. Ähnliche Messungen von Chaff mit Niederschlagsradargeräten sind in der Fachliteratur beschrieben, so dass dieses Phänomen keinesfalls neu ist (z.B. Maddox et al., 1997; Scharfenberg et al., 2005). Auch mit dem Karlsruher Niederschlagsradar wurden in der Vergangenheit des öfteren Chaff-Signaturen gemessen (s. Kap. 5).

Entgegen anderslautender Zahlen, die durch die Presse oder diverse Internetforen geisterten, kann die beobachtete Radarsignatur durch eine Chaff-Masse von maximal wenigen 100 kg erklärt werden, welche problemlos von einem oder wenigen Flugzeugen ausgebracht hätte werden können. Man muss hier beachten, dass Chaff die Radarstrahlung um viele Größenordnungen besser reflektiert als Niederschlag und dass deshalb schon ganz geringe Mengen ausreichen, um die beobachtete Radarreflektivität zu erzeugen.

Als „Verursacher“ der fraglichen Radarechos kommen eigentlich nur militärische Luftfahrzeuge in Betracht, die vermutlich den Umgang mit Chaff zur Störung feindlicher Luftüberwachungsradare geübt oder aber Chaff als Ziele für Raketenabwehrsysteme freigesetzt haben. Abschließend klären läßt sich das allerdings nicht, da aus diversen Gründen keine offiziellen Statements seitens der Verantwortlichen erwartet werden dürfen.

Auf jeden Fall wurde der Chaff nicht gezielt mit der Absicht ausgebracht, die meteorologische Niederschlagsmessung zu stören. Niederschlagsradare arbeiten nun einmal im selben Wellenlängenbereich wie militärische Geräte und werden demzufolge genauso, aber eben unabsichtlich, gestört. Man darf nicht hoffen, dass derartige Chaff-Übungen seitens des Militärs im Vorfeld öffentlich so detailliert angekündigt werden, dass Fehlinterpretationen bei der Auswertung von gleichzeitigen Messungen mit meteorologischen Radargeräten vermieden werden können. Auch ist fraglich, ob durch automatische Verfahren bei der Auswertung von Daten konventioneller Wetterradargeräte, z.B. durch Strukturanalysen, Chaff-Echos erkannt und zuverlässig gefiltert werden können, ohne zugleich relevante Niederschlagsechos zu entfernen. Zrníc und Ryzhkov (2004) weisen allerdings darauf hin, dass Chaff mittels polarimetrischer Radarmessungen möglicherweise von Niederschlag unterschieden werden kann. Ob dies auch dann noch der Fall ist, wenn sich Chaff-Wolken mit natürlichen Wolken mischen, darf aber bezweifelt werden. Daher müssen günstige Umstände vorliegen, um Chaff-Signaturen von solchen natürlichen Ursprungs mittels automatischer Verfahren abgrenzen zu können.

7 Danksagung

Die Radardaten der Standorte Emden und Hannover wurden vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt. Herrn Dipl.–Met. J. Asmus danken wir für Hinweise und Erläuterungen bezüglich seiner eigenen Auswertungen der Chaff-Signaturen. Herr Dipl.–Met. B. Mühr lieferte dankenswerterweise die Analyse der synoptischen Situation.

Literatur

- Arnott, W. P., A. Huggins, J. Gilles, D. Kingsmill und J. Walker, 2004: *Determination of Radar Chaff Diameter Distribution Function, Fall Speed, and Concentration in the Atmosphere by Use of the NEXRAD Radar*, Desert Research Institute, Reno, USA. Online verfügbar: <http://www.patarnott.com/pdf/ChaffRadarandFallSpeed.pdf>.
- Asmus, J., 2005: Unbekannte Flugobjekte im RADAR-Bild ?, *Mitteilungen DMG*, 03/04, 4–7.
- Doviak, R. J. und D. S. Zrníc, *Doppler Radar and Weather Observations*, Academic Press, San Diego, 2. Auflage, 1993.
- Heymsfield, A. J. und M. Kajikawa, 1987: An Improved Approach to Calculating Terminal Velocities of Plate-like Crystals and Graupel, *J. Atmos. Sci.*, 44, 1088–1099.
- Maddox, R. A., K. W. Howard und C. L. Dempsey, 1997: Intense Convective Storms with Little or No Lightning over Central Arizona: A Case of Inadvertant Weather Modification?, *J. Appl. Meteor.*, 36, 302–314.

- Martner, B. E., J. D. Marwitz und R. A. Kropfli, 1992: Radar Observations of Transport and Diffusion in Clouds and Precipitation Using TRACIR, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 9, 226–241.
- Nathanson, F. E., J. P. Reilly und M. N. Cohen, *Radar Design Principles*, SciTech Publishing, 1999.
- Neri, F., *Introduction to Electronic Defense Systems*, Artech House, Boston, 2001.
- Pruppacher, H. R. und J. D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2. Auflage, 1997.
- Rowland, J. R., 1976: Clear Air Convective Behavior Revealed by Radar Chaff, *J. Appl. Meteor.*, 15, 521–526.
- Sauvageot, H., *Radar Meteorology*, Artech House, Boston, 1992.
- Scharfenberg, K. A., D. J. Miller, T. J. Schuur, P. T. Schlatter, S. E. Giangrande, V. M. Melnikov, D. W. Burgess, D. L. Andra, M. P. Foster und J. M. Krause, 2005: The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Radar in Forecasting and Warning Decision Making, *Wea. Forecasting*, 20, 775–788.
- Skolnik, M. I. (Hrsg.), *Radar Handbook*, Kapitel 9: A. Farina, Electronic Counter-Countermeasures, McGraw-Hill, New York, 2. Auflage, 9.1–9.35, 1990.
- Stith, J. L., J. Scala, R. Reinking und B. Martner, 1996: Combined Use of Three Techniques for Studying Transport and Dispersion in Cumuli, *J. Appl. Meteor.*, 35, 1387–1401.
- United States General Accounting Office, 1998: *DOD Management Issues Related to Chaff*, United States General Accounting Office, GAO/NSIAD-98-219.
- Vakin, S. A., L. N. Shustov und R. H. Dunwell, *Fundamentals of Electronic Warfare*, Artech House, Boston, 2001.
- Zrnica, D. S. und A. V. Ryzhkov, 2004: Polarimetric Properties of Chaff, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21, 1017–1024.