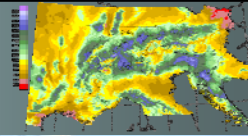


# Atmosphärenphysik III



Marc Wüest (& Huw Davies)

Institut für Atmosphäre und Klima  
IACETH

ETHZ CHN

[www.iac.ethz.ch/people/wueest](http://www.iac.ethz.ch/people/wueest)

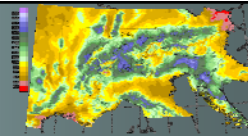
[www.iac.ethz.ch/people/davies](http://www.iac.ethz.ch/people/davies)



Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

# Semesterplan



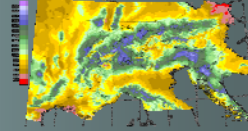
Atmosphärenphysik III Planung

Datum	Semesterwoche	Stunde	Thema	
26.10.2005	1	1	Huw Davies	Einführung
		2	Huw Davies	
02.11.2005	2	3	Marc Wüest	Rückblick Atmosphärenphysik I
		4	Marc Wüest	Einführung, Radargeschichte
09.11.2005	3	5	Marc Wüest	Radarprinzip
		6	Marc Wüest	Radartechnik
16.11.2005	4	7	Marc Wüest	Radarbildtypen
		8	Marc Wüest	Radar- und Fernerkundungs-Probleme
23.11.2005	5	9	Marc Wüest	Streuung und Radargleichung
		10	Marc Wüest	Reflektivität - Niederschlag; Radar in CH
30.11.2005	6	11	Marc Wüest	Operationelle Anwendung von Wetterradar
		12	Marc Wüest	Niederschlagsphysik und Vertikalradar
		13	Marc Wüest	Dopplerprodukte und Faltung
07.12.2005	7	14	Marc Wüest	Wind Retrieval und Modellassimilation
		15	Marc Wüest	Polarimetrie und verwandte Techniken
14.12.2005	8	16	Marc Wüest	Niederschlagsklimatologie (CHO <sub>2</sub> H)
		17	Huw Davies	...
21.12.2005		17-	Huw Davies	...

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

## Überblick heute



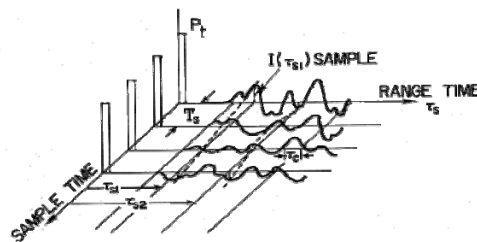
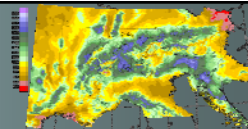
- Radarbildtypen
- Radar- (oder generell Fernerkundungs-) Probleme
- Beginn der Streuung und Radargleichung

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

3

## A-Scope



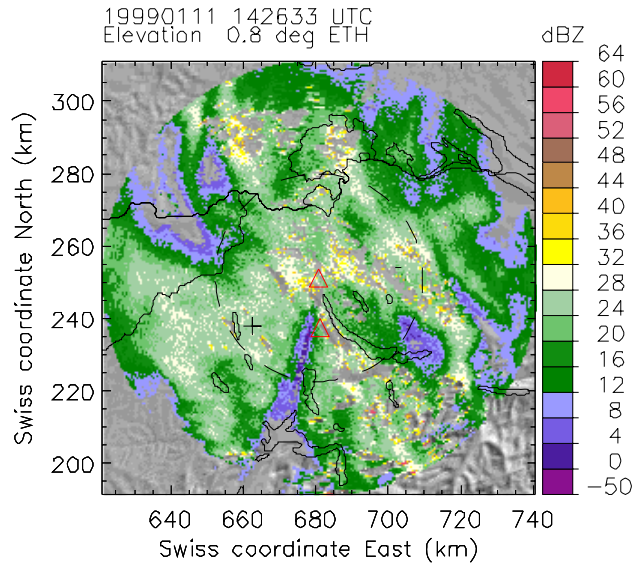
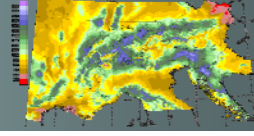
**Fig. 4.1.** Idealized traces for the in-phase component  $I(\tau_s)$ , representing echoes from distributed targets. Each trace represents echoes from a single transmitted microwave pulse  $P_T$ . Instantaneous samples are taken at  $\tau_{s1}$ ,  $\tau_{s2}$ , etc. The dashed line indicates a probable time dependence of the sample at  $\tau_s$  if the sampling rate  $T_s^{-1}$  is increased and there are no ambiguous targets.  $\tau_c$  depicts the signal correlation time along  $\tau_s$  and is related to  $B_0 \tau$ . Samples at fixed  $\tau_s$  taken at  $T_s$  intervals are used to construct the Doppler spectrum for scatterers located about the range  $c\tau_s/2$ .

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

4

## PPI (plan position indicator)

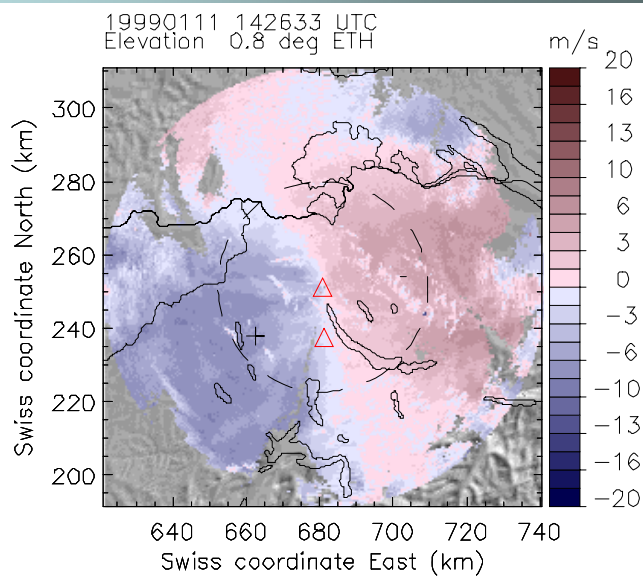
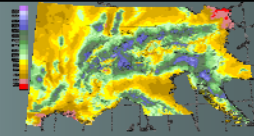


Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

5

## PPI der Dopplergeschwindigkeit

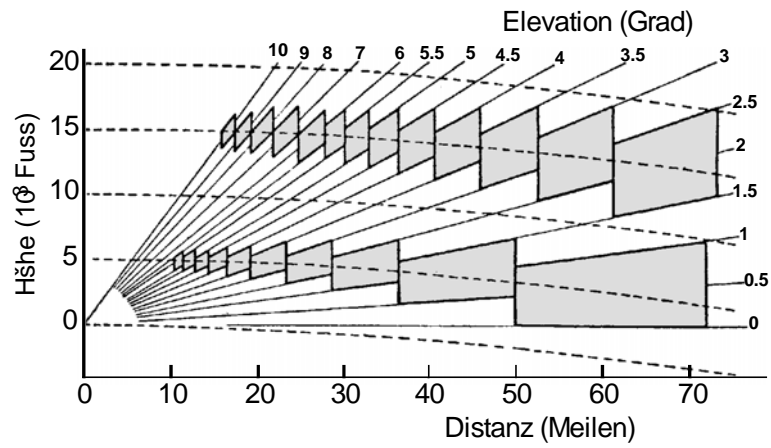
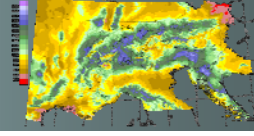


Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

6

## CAPPI (constant altitude PPI)

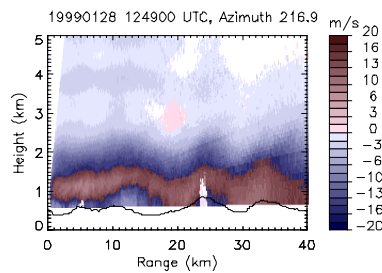
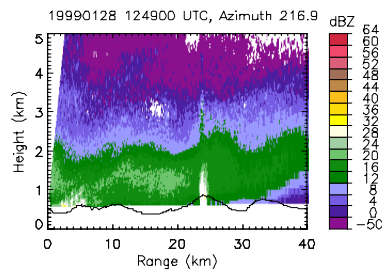
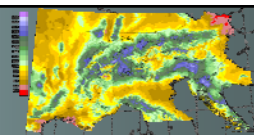


Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

7

## RHI (range height indicator)

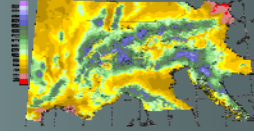


Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

8

## Aufgabe



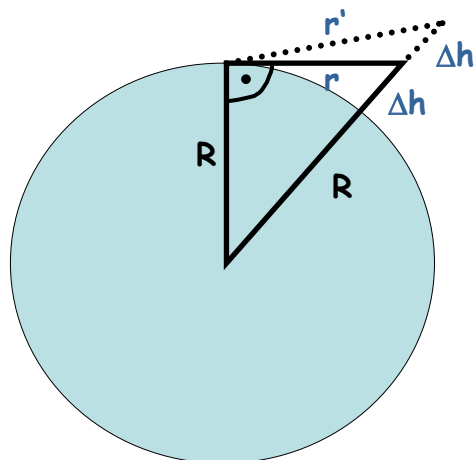
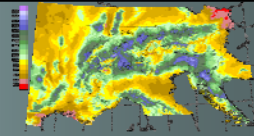
- Welchen Effekt auf die Höhe über Grund hat die Erdkrümmung auf einen Radarstrahl, der ‚horizontal‘ die Antenne verlässt, in 100 km Distanz?
- Was ist der Effekt der Atmosphäre?

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

9

## Effekte der Erdkrümmung? Gekippter Strahl



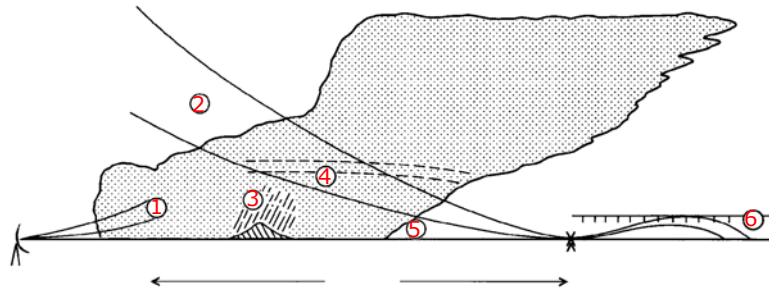
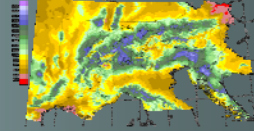
Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

Gegeneffekt: Anormale Propagation

10

## Typische Radarprobleme

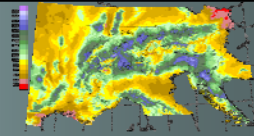


Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

11

## Streuung



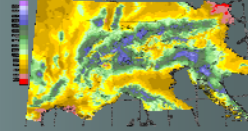
- Streuung und Radargleichung

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

12

## Rückstreuquerschnitt



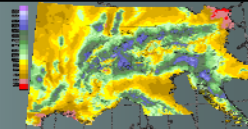
- Rückstreuquerschnitt: 
$$\sigma = \frac{4\pi r^2 S_r}{S_t}$$
- $S$ : [W/m<sup>2</sup>]
- $\sigma$ : scheinbare Fläche [m<sup>2</sup>], Mass für Rückstrefähigkeit
- Total wieder ausgesandte Leistung:  $4\pi r^2 S_r$  mit Leistungsfluss  $S_r$  wieder an Antenne

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

13

## Rayleigh Streuung



statischer Dipol

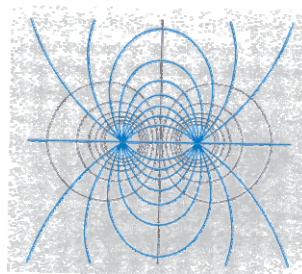
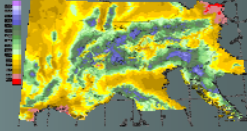


Abb. 6.34. Feldlinien und Potentialflächen zweier entgegengesetzter Ladungen. In großem Abstand von diesen Ladungen herrscht ein Dipolfeld

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

14

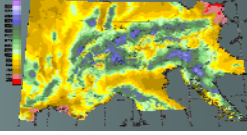


Atmosphären-Physik III

Marc Wüest  
IACETH

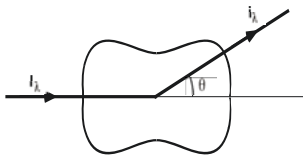
16

## Streuung

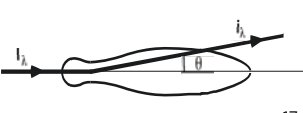


Wirkungsquerschnitt  
elektromagnetischer Streuung in  
Abhängigkeit von der Grösse des  
Streuers

Rayleigh



Mie



17

$\sigma_{\text{eff}} / (\pi a^2)$

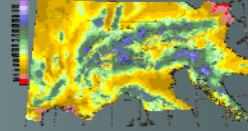
Form-Parameter  $x$   
 $x = 2\pi a / \lambda$

Rayleigh-Region    Mie- oder Resonanz-Region    Optische Region

Atmosphären-Physik III

Marc Wüest  
IACETH

## Rückstreuquerschnitt der Rayleigh Streuung



(für ein sphärisches Teilchen)

Rayleigh Bedingung für ein Teilchen mit Durchmesser  $D$

$$D < \lambda/16$$

dann ist der Rückstreuquerschnitt

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D^6 \quad \text{mit } K = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}$$
$$\sqrt{\varepsilon} = m = n - ik$$

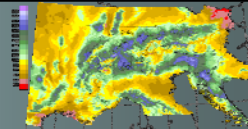
Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

$|K|^2$  ist ca. 0.93 für Wasser  
ca. 0.18 für Eis der Dichte  $0.917 \text{ gm}^{-3}$

20

## „Radargleichung“



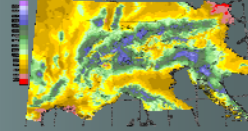
Die **Radargleichung** ist die Verbindung empfangene Leistung zu meteorologisch wichtigen Grössen

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

23

## Theorie: die Radargleichung für einen Einzelstreuer



Gain einer Antenne  
„Bündelungsfähigkeit“:

$$g(\theta, \phi) = \frac{S_t(\theta, \phi)}{P_t / (4\pi r^2)}$$

Rück-Streuquerschnitt  
Anteil, der wieder zur  
Antenne gestreut wird:

$$\sigma = \frac{4\pi r^2 \cdot S_r}{S_t}$$

Theoretische Herleitung:  
(Effektive Antennenfläche  
Leistung/Energiefluss)

$$g = \frac{4\pi \cdot A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi \cdot P_r}{\lambda^2 \cdot S_r}$$

Radargleichung für einen  
Einzelstreuer:

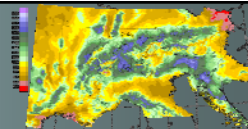
$$P_r = \frac{P_t g^2 \lambda^2 \sigma}{64\pi^3 r^4}$$

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

24

## Zahlenbeispiel aus Skript



$$P_t = 10^6 \text{ W,}$$

$$G = 40 \text{ dB}$$

$$\lambda = 0.1 \text{ m}$$

$$\sigma = 10 \text{ m}^2$$

$$r = 10 \text{ km}$$

Einzelstreuer!!!

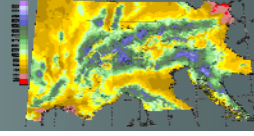
$$P_r = \frac{1}{64\pi^3} \underbrace{(P_t \cdot g^2 \cdot \lambda^2)}_{\text{Radar}} \underbrace{\left(\frac{\sigma}{r^4}\right)}_{\text{Streuer}}$$

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

25

## Viele Streuer (Pulsvolumen)



(Puls-)Volumen des Strahls:

Volumen aus der  
Antennengeometrie:

$$V_{\text{res}}(r) = \pi \Theta \Phi \left(\frac{r}{2}\right)^2 \frac{c \tau_p}{2}$$

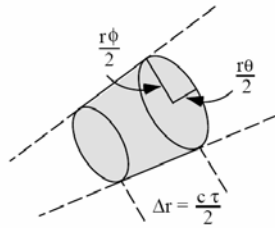


Abbildung 1.13: Pulsvolumen

Atmosphären-  
Physik III

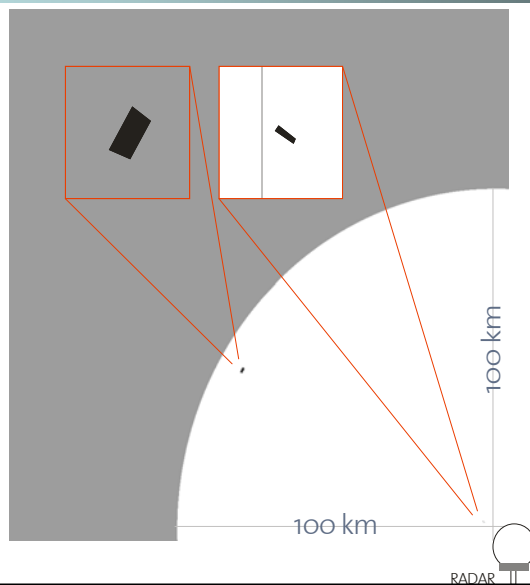
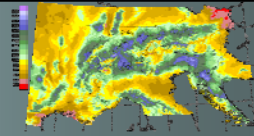
Marc Wüest  
IACETH

Für viele Streuer: Reflektivität" ist Summe  
der einzelnen Streuquerschnitt (pro Volumen):

$$\eta = \sum_{V_{\text{res}}} \sigma$$

26

## Pulsvolumen desselben Pulses in verschiedener Position



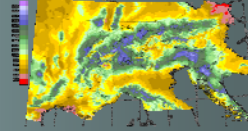
Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

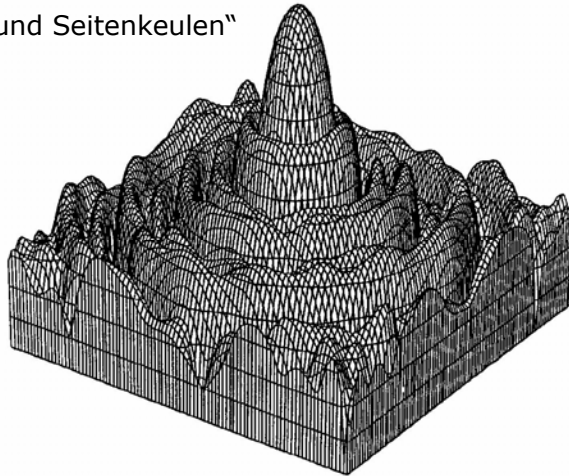
RADAR II

27

## Reale Antenne



„Haupt- und Seitenkeulen“

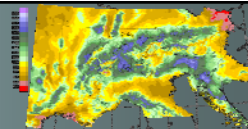


Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

28

## Radargleichung für viele Streuer



- Rückstreuquerschnitt durch **Reflektivität** ersetzt

$$\eta = \frac{\sum \sigma_i}{V} \quad [\eta] = \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

Summe Streuquerschnitt pro Volumen

*Gain* bisher war nur in Maximalrichtung.  
Über Strahl berechnet kleiner:

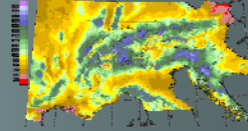
$$g = \sqrt{\frac{1}{2 \ln 2}} \cdot g_0$$

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

29

## Theorie: Radargleichung für viele Streuer



Aus Einzelstreuergleichung: 
$$P_r = \frac{1}{64\pi^3} \underbrace{(P_t \cdot g^2 \cdot \lambda^2)}_{\text{Radar}} \underbrace{\left(\frac{\sigma}{r^4}\right)}_{\text{Streuer}}$$

Mit: 
$$\eta = \frac{\sum \sigma_i}{V} \quad [\eta] = \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

$$V_{\text{res}}(r) = \pi \Theta \Phi \left(\frac{r}{2}\right)^2 \frac{c \tau_p}{2}$$

$$g = \sqrt{\frac{1}{2 \ln 2}} \cdot g_0$$

Atmosphären-  
Physik III

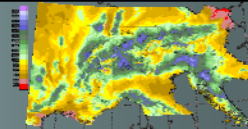
Marc Wüest  
IACETH

folgt Radargleichung  
für viele Streuer:

$$P_r = \frac{c}{1024\pi^2 \ln 2} P_t g_0^2 \lambda^2 \tau \phi \theta \frac{\eta}{r^2}$$

30

## Theorie: Radargleichung für viele Streuer



$$P_r = \frac{c}{1024\pi^2 \ln 2} P_t g_0^2 \lambda^2 \tau \phi \theta \frac{\eta}{r^2} \quad \sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D^6$$

Übergang zu meteorologisch relevanten Grössen:  
Durchmesser → Regenrate, Wassergehalt für idealisierte Wasser-  
kugeln als Momente angenommener Grössenverteilung berechenbar

Definition **Reflektivitätsfaktor Z**  
(dieser wird meist geplottet)

$$Z = \frac{1}{V} \sum D^6 = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD$$

Die **Reflektivität η** ist

$$\eta = \frac{\sum_j \sigma_j}{V} = \frac{\pi^5 |K|^2 Z}{\lambda^4}$$

Handlicher sind logarithmische  
Einheiten:

$$dBZ = Z[dB] = 10 \log \frac{Z}{1 \frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3}}$$

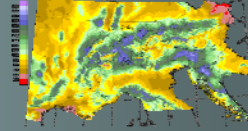
Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

Radargleichung gibt Beziehung  $P_r$  zu Reflektivitätsfaktor  
(oft kurz Reflektivität) ... und im Schnee? äquivalent

31

## Einheiten von Z



$$Z = \frac{1}{V} \sum D^6 = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD$$

Man würde denken, die Standardeinheiten von Z wären

$$\text{m}^6/\text{m}^3 = \text{m}^3$$

Aber nein .. die **Standardeinheiten von Z** sind

$$\text{mm}^6 / \text{m}^3$$

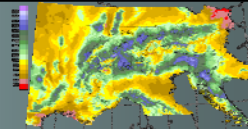
Wenn man das missachtete, läge man einen Faktor  $10^{-18}$  daneben.

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

32

## Rewiew on the assumptions for the radar equation



$$P_r = \frac{c}{1024\pi^2 \ln 2} P_t g_0^2 \lambda^2 \tau \phi \theta \frac{\eta}{r^2}$$

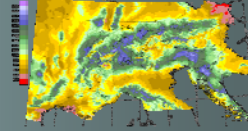
1. The precipitation particles are homogeneous dielectric spheres with diameters small compared to the radar wavelength
2. The particles are spread throughout the contributing region. If not then the equation gives an average reflectivity factor for the contributing region.
3. The reflectivity factor Z is uniform throughout the contributing region and constant over the period of time needed to obtain the average value of the received power.

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

33

## Review on the assumptions for the radar equation



$$P_r = \frac{c}{1024\pi^2 \ln 2} P_t g_0^2 \lambda^2 \tau \phi \theta \frac{\eta}{r^2}$$

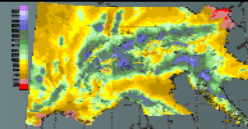
4. All of the particles have the same dielectric factor; that is, they are all either water droplets or ice particles.
5. The main lobe of the antenna is adequately described by a Gaussian function.
6. Microwave attenuation over the distance between the radar and the target is negligible.
7. Multiple scattering is negligible. Multiple scattering and attenuation are related so if one is true the other is too.
8. The incident and back-scattered waves are linearly polarized.

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

34

## Aufgabe zur Regenrate



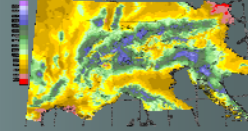
- Gegeben sei eine Regentropfenverteilung  
 $N(D)$   
und die dazu passenden Fallgeschwindigkeiten  
 $v(D)$
- Wie rechnet sich daraus die Regenrate?

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

35

## Typische Werte



Wolken	-30 bis -20 dBZ
Nieselregen	-10 bis 0 dBZ
Regen	10 bis 30 dBZ
Starker Regen	30 bis 45 dBZ
Gewitter	> 45 dBZ
Hagel	> 55 dBZ

$$R = \frac{\pi \rho_l}{6} \int_0^{\infty} v(D) D^3 N(D) dD$$

Beispiel:  
1 Tropfen  $d=5$  mm  
hat  $Z$  wie  
15 625 Tropfen  
mit  $d=1$  mm

Masse:  
65 mg zu insg. 8180 mg

Aber: Regenrate aus  $Z$  zu gewinnen schwierig  
(wenige grosse oder viele kleine?)

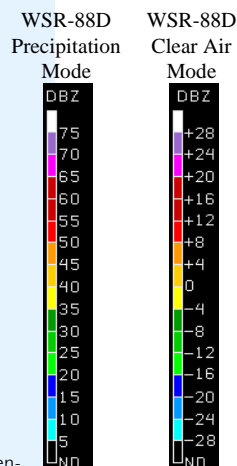
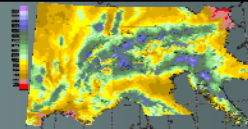
Ansatz:  $z = a * R^b$   
(mit empirischen Werten je nach Typ des Regens)

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

36

## Range of radar reflectivity factor in weather echoes



$$dBZ = 10 \log \left( \frac{Z}{1 \text{ mm}^6 / \text{m}^3} \right)$$

75 dbZ = giant hail  $\log(Z) = 7.5$   
 $Z = 10^{7.5} = 31,622,777$

45-50 dbZ = heavy rain  
 $\log(Z) = 5$   
 $Z = 10^5 = 100,000$

25 dbZ = snow  
 $\log(Z) = 2.5$   
 $Z = 10^{2.5} = 316$

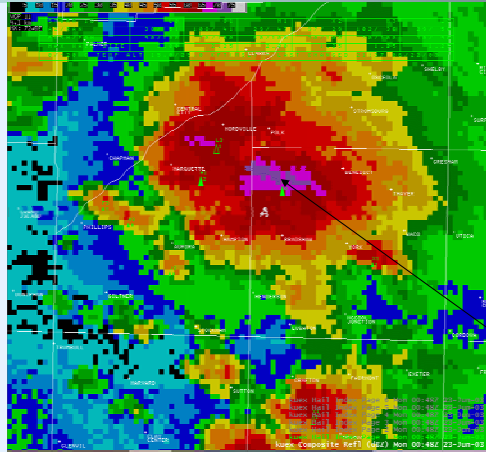
-28 dbZ = haze droplets  
 $\log(Z) = -2.8$   
 $Z = 10^{-2.8} = 0.001585$

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

37

## Nebraska record hailstorm 2003 75 dBZ



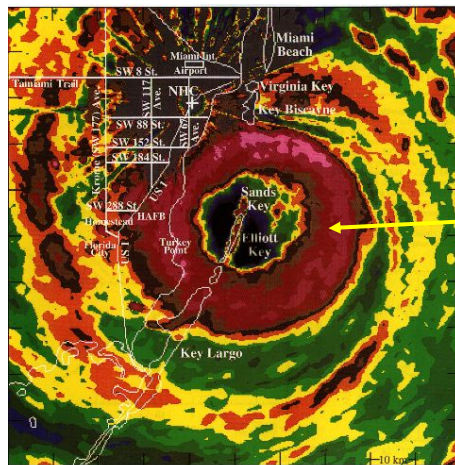
National Weather Service  
Hastings Nebraska

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

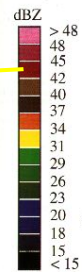
38

## Heavy rain in Hurricane Andrew's Eyewall 45 dBZ



### HURRICANE ANDREW

NWS MIAMI RADAR  
August 24, 1992  
08:35 UTC 04:35 EDT



Hurricane  
Research  
Division



NOAA/AOML  
Miami, FL

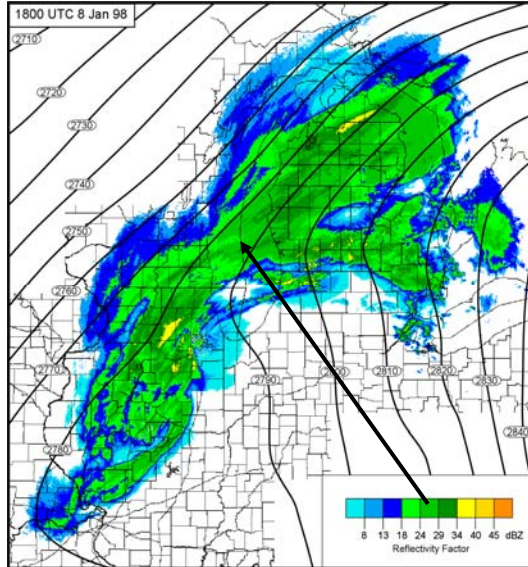
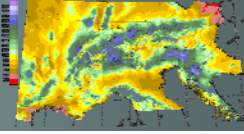
Domain: 100 x 100 km

Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

39

## Snowstorm over Great Lakes ~ 25-30 dBZ

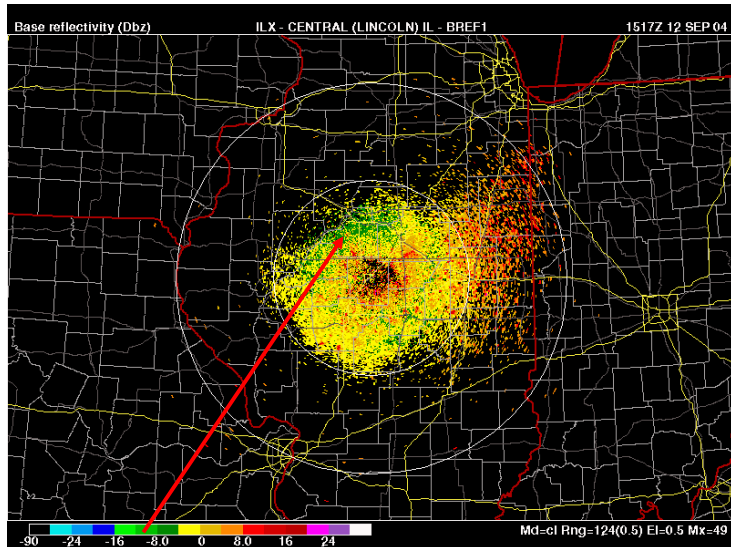
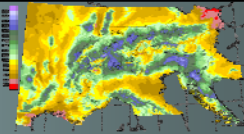


Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

40

## Clear air echoes (few small insects) -12 dBZ



Atmosphären-  
Physik III

Marc Wüest  
IACETH

41