Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IP Umweltbeobachtungen

Versuch A

Remote Sensing

27. April 2022

Inhaltsverzeichnis

1 Ziele **1**

2 Fragen zur Vorbereitung aufs Praktikum **1**

3 Theorie **1**
3.1 Einführung 1
3.2 Elektromagnetische Strahlung 2
3.3 Fernerkundungsplattformen 3
3.4 Aktive und passive Systeme 4
3.4.1 SEVIRI Radiometer 4
3.4.2 Radar 6

4 Theorie für Aufgaben **9**
4.1 Entstehung und Entwicklung einer Zyklone 9
4.2 Atmosphärischer Fluss 11

5 Aufgaben **12**
5.1 Aufgabe 1: Kennenlernen von Satelliten- und Radarbildern 13
5.1.1 Interpretation von Satellitenbildern 13
5.1.2 Interpretation von Radarbildern 15
5.2 Aufgabe 2: Durchzug einer Kaltfront 16
5.2.1 Wetterlage 16
5.2.2 Meteorologische Messungen 16
5.2.3 Höhenbestimmung 17
5.2.4 Feuchtigkeitsverteilung 17
5.2.5 Wolkenstruktur und Niederschlag 18
5.3 Aufgabe 3: Atmosphärischer Fluss 20
5.3.1 Wetterlage 20
5.3.2 Feuchtetransport 20
5.3.3 Wolkenstruktur 21
5.3.4 Niederschlag 22

6 Anhang **24**
6.1 Niederschlagsart aus Radarreflektivität 24
6.2 Vertikale Feuchtigkeitsverteilung 25

1 Ziele

- Das Fernerkundungsmessnetz kennen
- Satelliten- und Radarbilder lesen und interpretieren
- Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung aufzeigen
- Atmosphärische Phänomene mithilfe von Fernerkundungsdaten erkennen

2 Fragen zur Vorbereitung aufs Praktikum

- Erkläre kurz das Prinzip der Fernerkundung.
- Welche Geräte werden zur Fernerkundung genutzt?
- Wie werden Fernerkundungsdaten verwendet?

3 Theorie

3.1 Einführung

Der Begriff Fernerkundung (englisch: Remote Sensing) bezeichnet die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche oder andere nicht direkt zugänglicher Objekte durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden oder reflektierten elektromagnetischen Strahlung. Fernerkundung ist also ein berührungsfreies Beobachtungsverfahren, welches keinen direkten Kontakt zum Beobachtungsobjekt erfordert. Durch flugzeug- oder satellitengetragene Sensoren werden heutzutage eine Vielzahl physikalischer Parameter des Erdsystems beobachtet. Je nachdem, welches Objekt (z.B. Vegetationsdecke, Wolkenverteilung, Temperatur der Meeresoberfläche) im Zentrum der Beobachtung steht, werden verschiedene Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums ausgenutzt. So wird zum Beispiel sichtbares Licht häufig zur Analyse des grossräumigen Wettergeschehens verwendet, während Infrarotbilder Informationen zur Temperatur der Erdoberfläche und Wolken liefern.
Das Anwendungsspektrum der Fernerkundung ist sehr breit und umfasst neben der Meteorologie und Klimatologie (z.B. Wettervorhersage, Ozon-Monitoring) unter anderem die Land- und Forstwirtschaft (z.B. Nutzungskartierung, Waldbrand-Monitoring), die Geologie und Bodenkunde (z.B. Gewässernetz, Bodenkartierung) und die Hydrologie und Ozeanographie (z.B. Gletschermonitoring, Gewässerverschmutzung). Fernerkundung hat den Vorteil, dass es eine umfassende und flächendeckende Analyse von diversen Umweltdaten insbesondere aus schwer zugänglichen Gebieten ermöglicht. Im Gegensatz dazu liefern konventionelle Messsysteme wie Wetterstationen oder Ballonsonden vorwiegend punktuelle Messungen von meteorologischen Parametern. Allerdings messen Fernerkundungssysteme die physikalischen Parameter (z.B. Temperatur) oft nicht direkt,

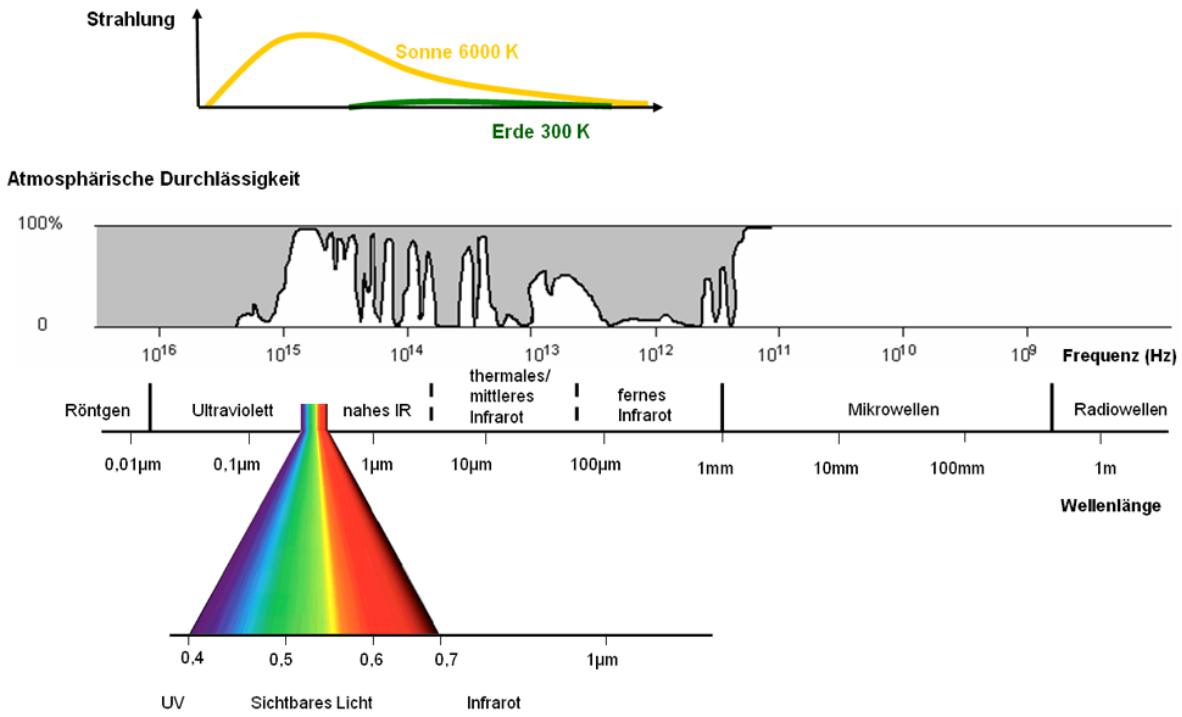

Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum (Quelle: `https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c01-p01.de.html`). Im oberen Bereich sind die Strahlungsenergien von Sonne und Erde dargestellt. Darunter ist die atmosphärische Durchlässigkeit bei wolkenlosem Himmel dargestellt. Für die Fernerkundung sind die Bereiche von nahezu sichtbar bis hin zum mittleren Infrarot und der Bereich der Mikrowellen von Interesse.

sondern übermitteln Informationen zur Amplitude (Intensität) und Phase der elektromagnetischen Strahlung. Um aus diesen Fernerkundungsdaten physikalische Parameter abzuleiten, müssen komplexe und approximative Verfahren angewendet werden. Direkte Messungen von physikalischen Parametern unmittelbar vor Ort - sogenannte in situ Messungen (z.B. Ballonsonden) - können hilfreich sein um Algorithmen zur Ableitung von physikalischen Parametern zu entwickeln. Fernerkundung kann somit die konventionellen Messsysteme nicht ersetzten, ermöglicht aber in Kombination mit in situ Daten wertvolle Einblicke in das Erdsystem und in die atmosphärischen Prozesse.

3.2 Elektromagnetische Strahlung

Die physikalische Grundlage der Fernerkundung bildet die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung mit der Erdoberfläche sowie mit den Gasen und Partikeln in der Atmosphäre. Elektromagnetische Strahlung besteht aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern, welche jeweils senkrecht zu einander stehen. Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ($c_0 = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{m\,s^{-1}}$) aus. Gekennzeichnet wird die elektromagnetische Strahlung durch die Frequenz oder die Wellenlänge. Die Gesamtheit der bei der elektromagnetischen Strahlung vorkommenden

Wellenlängen wird im elektromagnetischen Spektrum dargestellt (siehe Abbildung 1). Das Spektrum kann in verschiedene Bereiche eingeteilt werden: Röntgenstrahlen, Ultraviolett, sichtbares Licht, Infrarotstrahlung, Mikrowellen und Radiowellen, wobei nicht das gesamte Spektrum für die Fernerkundung genutzt werden kann, wie im folgenden Abschnitt dargelegt wird.
Jeder Körper befindet sich durch die elektromagnetische Strahlung in ständiger Wechselwirkung mit seiner Umgebung. Von dort wirkt Strahlung auf ihn ein und er gibt Strahlung an seine Umgebung ab. Die Sonne hat beispielsweise ihr Strahlungsmaximum im visuellen Spektralbereich, die Erde im thermalen Infrarot (siehe Abbildung 1). Auf den objektspezifischen Eigenschaften dieser Wechselwirkung beruht die ganze Fernerkundung. Damit die elektromagnetische Strahlung als Informationsträger dienen kann, muss die elektromagnetische Strahlung den Weg von der Strahlungsquelle zum Objekt (z.B. Erdoberfläche) und vom Objekt zum Empfänger (z.B. Satellit) durch die Atmosphäre durchlaufen. Deshalb können in der Fernerkundung nur diejenigen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums genutzt werden, für welche die Atmosphäre weitgehend durchlässig ist. Diese Wellenlängenbereiche werden als atmosphärische Fenster bezeichnet. Im ultravioletten und fernen IR-Bereich ist die Atmosphäre nahezu undurchlässig, im visuellen, Mikro- und Radiowellenbereich hingegen nahezu durchlässig (siehe Abbildung 1). Für die Fernerkundung können folglich die Bereiche von nahezu sichtbar (VIS, 380 nm bis 720 nm) bis hin zum mittleren Infrarot (IR, 720 nm bis 50 µm) sowie im Mikrowellenbereich (1 mm bis 1 m) genutzt werden.

3.3 Fernerkundungsplattformen

Eine Vielzahl von Plattformen können in der Fernerkundung verwendet werden, wie zum Beispiel statische Plattformen am Boden, Flugzeugplattformen oder Satellitenplattformen. Die verschiedenen Plattformen unterscheiden sich in der Flughöhe und damit in der daraus resultierenden Bildauflösung und der Grösse des abgedeckten Gebietes. Im Folgenden soll näher auf Satellitenplattformen eingegangen werden und die Charakteristika von Satelliten dargelegt werden.
Damit ein Satellit auf einer stabilen Umlaufbahn die Erde umkreisen kann, muss die auf den Satelliten einwirkende Erdanziehungskraft F_G durch die aus der Kreisbewegung um die Erde resultierende Zentrifugalkraft F_Z genau kompensiert werden:

$$F_Z = m_s \, \omega^2 \, r \tag{1}$$

$$F_G = \frac{G \, m_E \, m_s}{r^2} \tag{2}$$

m_S: Masse Satellit
m_E: Masse Erde ($5.972 \cdot 10^{24}$ kg)
r: Radius (Entfernung Erdmittelpunkt - Satellit)
G: Gravitationskonstante ($6.6743 \cdot 10^{-11}$ $\mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}$)
ω: Winkelgeschwindigkeit

Somit erfordern niedrige Umlaufbahnen, auf welchen die Erdanziehungskraft stärker

einwirkt, eine höhere Bahngeschwindigkeit. Im Allgemeinen können Satelliten in zwei Typen eingeteilt werden - geostationäre und polar umlaufende Satelliten.
Geostationäre Satelliten umkreisen die Erde parallel zum Äquator in einer Höhe von etwa 36'000 Kilometern. In dieser Höhe sind die Umlaufgeschwindigkeit des Satelliten und Rotationsgeschwindigkeit der Erde identisch, so dass der Satellit für einen Beobachter auf der Erde ortsfest, also geostationär, erscheint. Die Umlaufzeit beträgt daher ungefähr 24 Stunden. Geostationäre Satelliten ermöglichen eine kontinuierliche Beobachtung derselben Gebiete (ca. ein Drittel der Erdoberfläche) und werden daher häufig als Wetter- und Telekommunikationssatelliten eingesetzt. Ein Beispiel für einen geostationären Satelliten ist Meteosat mit seinem Hauptinstrument SEVIRI (siehe auch Sektion 3.4.1), welcher sich über dem Äquator auf 0° geografischer Länge befindet und alle 15 Minuten ein Bild aufnimmt. Die Auflösung der Meteosat-Bilder beträgt 3 km im infraroten und 2.5 km im sichtbaren Spektralbereich.
Polumlaufende Satelliten umkreisen in etwa 700 bis 800 km Höhe die Erde mehrmals täglich auf Umlaufbahnen, die über die Polgebiete der Erde hinweg führen. Während des Fluges von Pol zu Pol dreht sich die Erde unter dem Satelliten, so dass stets nur Streifen der Erdoberfläche beobachtet werden. Diese Streifen haben je nach verwendeter Optik eine Breite von 30 bis 3000 km. Die Bahnen liegen sonnensynchron, d.h. die Satelliten überqueren jeden Ort der Erde täglich etwa zur selben Zeit, was gleichbleibende Aufnahmebedingungen (z.B. Beleuchtung) verschafft. Beispiele für polumlaufende Satelliten sind die NASA Satelliten Aqua und Terra mit dem Instrument MODIS, welche sich in 705 km Höhe befinden. MODIS hat eine räumliche Auflösung zwischen 250 m und 1 km (von Kanal abhängig) und umkreist die Erde ungefähr 15 Mal pro Tag.

3.4 Aktive und passive Systeme

Sensoren sind die Schlüsselkomponente eines jeden Fernerkundungssystems. Bei der Fernerkundung unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Sensoren. Aktive Systeme (z.B. Radar) senden selber Strahlung aus und messen, wie viel dieser Strahlung vom untersuchten Objekt zurückgestreut wird. Passive Systeme (z.B. Radiometer) senden keine Strahlung aus und messen die von der Atmosphäre oder Erdoberfläche reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung. Die Sonne oder das Objekt selbst dient dabei als Lichtquelle.
Im Rahmen dieses Praktikums wird vor allem mit Fernerkundungsdaten vom satellitengetragenen SEVIRI Radiometer und von bodengestützten Radargeräten gearbeitet. Diese beiden Instrumente werden im Folgenden genauer beschrieben.

3.4.1 SEVIRI Radiometer

SEVIRI ('Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager') ist das Hauptinstrument auf den Satelliten der METEOSAT Second Generation (MSG). Das SEVIRI-Instrument ist eine multi-spektrale Kamera, welche die Erde sowohl im sichbaren Licht also auch im Infrarotbereich beobachtet. Der SEVIRI Radiometer scannt sein Sichtfeld in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten und einer räumlichen Auflösung von $3\,\text{km} \times 3\,\text{km}$.

Tabelle 1: Hauptanwendungen der SEVIRI-Kanäle und der spektralen Eigenschaften

Kanal	Spektralbereich	Hauptanwendungsbereich
1 VIS006	0.56 - 0.71 µm	Wolkenerkennung, Landoberflächen, Windfelder
2 VIS008	0.74 - 0.88 µm	Wolkenerkennung, Landoberflächen, Windfelder
3 NIR016	1.50 - 1.78 µm	Unterscheidung Eis- und Wasserwolken
4 IR039	3.48 - 4.36 µm	Nebelerkennung, Oberflächentemperatur Nacht
5 WV062	5.35 - 7.15 µm	Wasserdampf obere Troposphäre
6 WV073	6.85 - 7.85 µm	Wasserdampf mittlere Troposphäre
7 IR087	8.30 - 9.10 µm	Zirren, Unterscheidung Eis- und Wasserwolken
8 IR097	9.38 - 9.94 µm	Ozon
9 IR108	9.80 - 11.80 µm	Temperatur von Land, Ozean und Wolken
10 IR120	11.0 - 13.0 µm	Temperatur von Land, Ozean und Wolken
11 IR134	12.40 - 14.40 µm	Höhenerkennung dünner Zirren
12 HRV	0.4 - 1.1 µm	Wolkenerkennung, Landoberflächen

Die zurückgestreute Strahlung wird auf zwölf Spektralbereiche verteilt. Dabei liegen acht Kanäle im Infrarotbereich und vier Kanäle im sichtbaren und nahen-infraroten Bereich. Das Aufteilen des elektromagnetischen Spektrums in unterschiedliche Spektralbereiche hat den Vorteil, dass diese Bereiche unterschiedliche Informationen enthalten und dadurch mehr Informationen als aus einem einzelnen Kanal gewonnen werden können. In den sichtbaren Kanälen ist die Intensität abhängig von der Albedo (Reflektivität) des darunterliegenden Objektes. Stark reflektierende Flächen (z.B. Wolken, Schnee) haben eine hohe Intensität und werden weiss dargestellt. Die Kanäle im sichtbaren Bereich können somit Informationen zur Wolkenstruktur liefern. Auf der anderen Seite geben Infrarot-Kanäle Aufschluss über die Temperatur der abstrahlenden Oberflächen. Die Intensität der emittierten Strahlung hängt dabei von der Temperatur der Strahlungsquelle ab, d.h. je wärmer eine Strahlungsquelle ist, desto höher ist die Intensität der emittierten Strahlung (Stefan-Boltzmann Gesetz für die Strahlung von schwarzen Körpern). IR-Kanäle liefern einen guten Kontrast zwischen hohen und tiefen Wolken. In den Spektralbereichen der sogenannten Wasserdampfkanäle ist der Wasserdampf für eine hohe Absorption der Strahlung verantwortlich. Dabei stammt die Strahlung von der obersten stark feuchten Schicht in der Atmosphäre. Befindet sich feuchte Luft in den oberen Schichten der Troposphäre werden aufgrund der tiefen Temperaturen niedrige Intensitäten gemessen. Ist die obere Troposphäre trocken, so stammt die gemessene Strahlung von der unteren oder mittleren Troposphäre und weist dadurch höhere Intensitäten auf. Wasserdampfkanäle liefern also Informationen zu den Feuchteverhältnissen der Troposphäre. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die spektralen Eigenschaften und den Hauptanwendungsbereichen von den unterschiedlichen SEVIRI-Kanälen.

3.4.2 Radar

Radar ist die Abkürzung für Radio Detection And Ranging und ist damit ein System zur Ortung (detection) und Distanzmessung (ranging). Radargeräte zählen zu den aktiven Fernerkundungssystemen, d.h. sie senden selber elektromagnetische Wellen (meistens Mikrowellen) aus und messen die zurückgestreute Strahlung. Mikrowellen breiten sich unabhängig von Dunkelheit aus und können Nebel oder Wolken fast ungehindert durchdringen. Daher kann ein Radargerät die Position von Flugzeugen, Schiffen oder Hindernissen auch dann bestimmen, wenn diese Objekte aufgrund von schlechtem Wetter oder Dunkelheit mit optischen Methoden nicht sichtbar sind.
Radarsysteme werden in unterschiedlichen Bereichen angewendet. Die Radareigenschaften (z.B. Wellenlänge) unterscheiden sich je nach Einsatzbereich. Einige Beispiele sind:

- Rundsichtradar zur Überwachung von Schiffs- und Flugverkehr
- Wetterradar zur Ortung und Abschätzung von Niederschlag
- Verkehrsradar zur Messung von Fahrzeuggeschwindigkeiten

Die MeteoSchweiz betreibt momentan ein Netz von fünf Wetterradaranlagen, welche den Niederschlag flächendeckend über der Schweiz erfassen. Die Standorte der Wetterradaranlagen sind der Albis in der Nähe von Zürich, Monte Lema im Kanton Tessin, La Dôle in Genf, der Pointe de la Plaine Morte im Kanton Wallis und der Weissfluhgipfel im Kanton Graubünden.

Drei grundlegende physikalische Gesetzmässigkeiten

Das Funktionsprinzip der Radargeräte ist einfach zu verstehen, obwohl die theoretischen Grundlagen komplex sind. Das Arbeitsprinzip von Radargeräten basiert auf drei grundlegenden physikalischen Gesetzmässigkeiten:

(a) *Reflexion und Streuung elektromagnetischer Wellen.*
Treffen elektromagnetische Wellen auf einen elektrisch leitenden Körper, werden sie reflektiert (glatte Körper) oder gestreut (raue Körper; diffuse/ungerichtete Reflexion).

(b) *Konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen.*
Die elektromagnetischen Wellen breiten sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit ($c_0 = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{m\,s^{-1}}$) aus.

(c) *Geradlinige Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen.*
Bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich der Radargeräte kann man von einer geradlinigen Ausbreitung ausgehen.

Durch die konsequente Nutzung aller drei Gesetzmässigkeiten können mithilfe von Radargeräten Rückschlüsse auf die Objekteigenschaften (z.B. Grösse), Entfernung und Richtung gezogen werden.

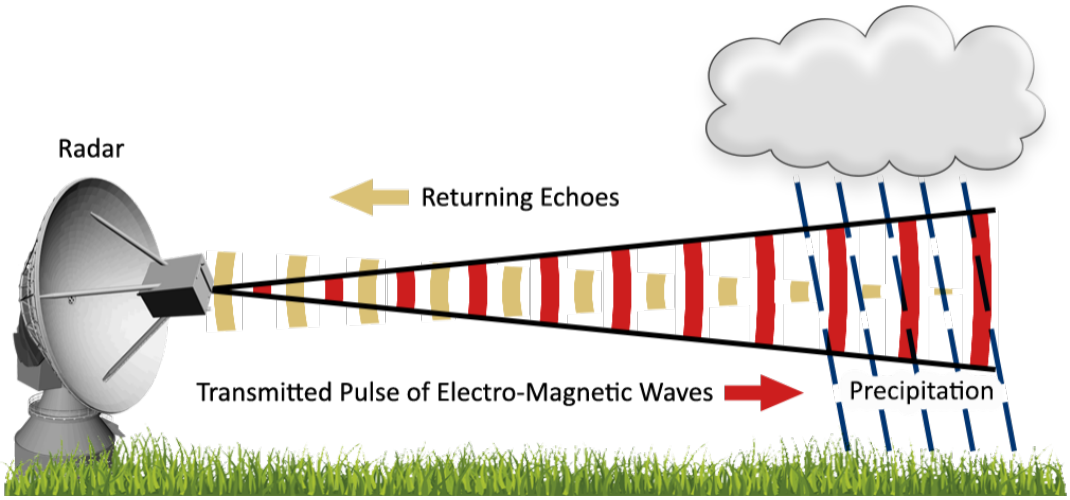

Abbildung 2: Funktionsprinzip eines Wetterradars (Quelle: Environment Canada).

Funktionsprinzip von Radargeräten

Im Folgenden wird die Arbeitsweise eines Radars am Beispiel eines Wetterradars näher erläutert (siehe Abbildung 2). Ein Radar sendet über eine Antenne elektromagnetische Signale aus. Trifft das Signal auf ein Objekt, so wird ein Teil des Signals in Richtung der Antenne zurückgestreut. Die Antenne empfängt das Signal und leitet es an das elektronische System weiter, wo es informationstechnisch verarbeitet wird. Aus der Antennenposition und der Laufzeit der elektromagnetischen Welle (Zeit zwischen Aussenden und Empfangen eines elektromagnetischen Pulses) lassen sich die Position und die Entfernung der Objekte ableiten. In der Meteorologie sind die betrachteten Objekte Wolkenpartikel (z.B. Wolkentröpfchen, Eiskristalle) und Hydrometeore (z.B. Regentropfen, Schneekristalle, Hagelkörner). Die Wahl der verwendeten Frequenz bzw. Wellenlänge hängt dabei von der Art der Anwendung und von den zu beobachtenden Zielobjekten ab. Je kleiner ein Objekt, desto kleinere Wellenlängen sind notwendig um es zu detektieren.

Informationen aus Radarsignal

Über die Intensität des zurückgestreuten Signal kann auf die Eigenschaften des reflektierenden Objektes geschlossen werden. Aus der Radargleichung lässt sich beispielsweise der Reflektivitätsfaktor ermitteln, welcher ein Mass für die Anzahl und Grösse der streuenden Wolkenpartikeln darstellt. Die Radargleichung lässt sich vereinfacht in folgender Form darstellen:

$$P_E = C\, Z\, \frac{|k|^2}{r^2} \tag{3}$$

C: Radarkonstante
Z: Reflektivitätsfaktor
P_E: Empfangsleistung
r: Entfernung
k: vom Aggregatzustand abhängiger Faktor (0.93 für Wasser, 0.21 für Schnee).

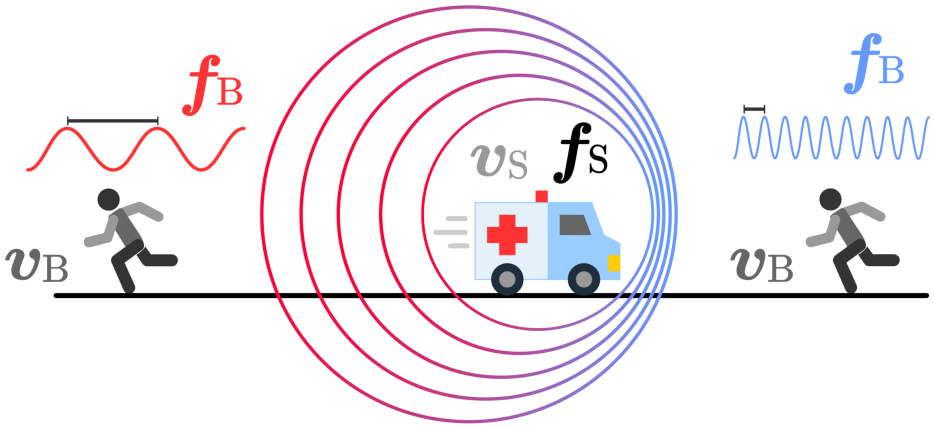

Abbildung 3: Doppler-Effekt: Schallausbreitung einer sich bewegenden Schallquelle (`https://de.universaldenker.org/formeln/833`). Die Frequenz des Tones ist höher (tiefer), wenn das Fahrzeug auf den Beobachter zufährt (wegfährt).

Wetterradare operieren fast immer im Rayleigh-Bereich, d.h. der Partikeldurchmesser ist sehr viel kleiner als die Wellenlänge. Die Radarreflektivität kann unter der Annahme der Rayleigh-Approximation wie folgt aus dem Grössenspektrum berechnet werden:

$$Z = \int_0^\infty n(D) D^6 dD = \sum_i N_i D_i^6 \tag{4}$$

Z: Radarreflektivität ($\mathrm{mm}^6\ \mathrm{m}^{-3}$)
$n(D)$: Grössenverteilung
D: Durchmesser

Die Radarreflektivität ist somit ein Mass für die Anzahl und Grösse der Objekte in der Atmosphäre. Dabei wird das zurückgestreute Signal aufgrund der Proportionalität von Z zur sechsten Potenz des Durchmessers von grossen Partikeln dominiert. Die Radarreflektivität wird deshalb häufig in einer logarithmischen Grösse in der Einheit Dezibel ausgedrückt:

$$\mathrm{dBZ} = Z[\mathrm{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{Z}{\mathrm{mm}^6\ \mathrm{m}^{-3}} \right) \tag{5}$$

Neben der empfangenen Leistung und der daraus folgenden Reflektivität, kann mit Doppler-Radaren heutzutage auch die Geschwindigkeit von den streuenden Partikeln bestimmt werden. Das Prinzip des Doppler-Effekts kann am einfachsten mit einem Beispiel aus dem Alltag erklärt werden. Das bekannteste Beispiel ist das Martinshorn eines Rettungsfahrzeuges, das höher klingt (höhere Frequenz), wenn sich das Fahrzeug dem Beobachter nähert und tiefer klingt (tiefere Frequenz), wenn sich das Fahrzeug vom Beobachter entfernt (siehe Abbildung 3). In gleicher Weise verhalten sich elektromagnetische Wellen, die auf ein bewegtes Ziel treffen. Auch sie erfahren eine Frequenzverschiebung. Die Geschwindigkeitsbestimmung bei Doppler-Radaren erfolgt somit über

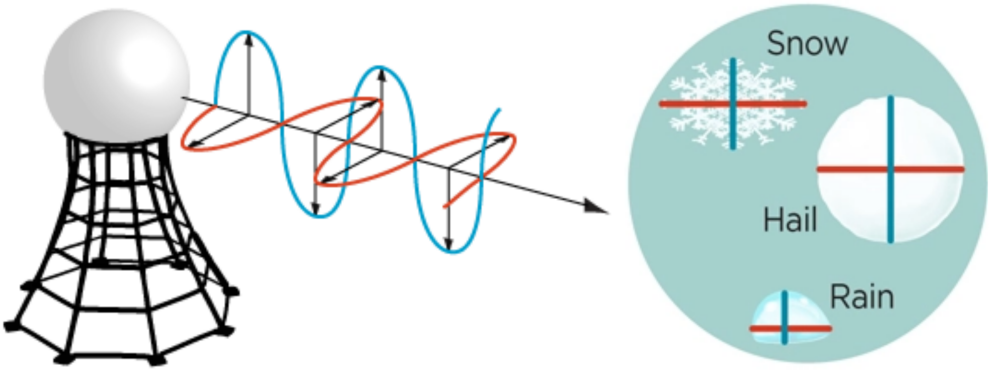

Abbildung 4: Polarimetrische Radare können horizontal und vertikal polarisierte elektromagnetische Wellen aussenden und empfangen. Dies liefert wertvolle Informationen über Grösse, Form und Fallverhalten der Niederschlagspartikel (Quelle: U.S. National Weather Service Forecast Office).

die Differenz der Phasenänderung zwischen dem gesendeten und empfangenen Puls. Die Radialkomponente der Geschwindigkeit der Objekte setzt sich dabei aus der dreidimensionalen Windgeschwindigkeit und der Fallgeschwindigkeit der Partikel zusammen.
Neben den bisher gängigen Doppler-Radargeräten kommen mittlerweile sogenannte Dual-Polarisations-Radare zum Einsatz. Diese Radargeräte können sowohl horizontal als auch vertikal polarisierte Wellen senden und empfangen (siehe Abbildung 4). Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die Teilchenform (z.B. rund, asphärisch), die Grösse, das Fallverhalten und den Aggregatzustand (z.B. flüssig, eisförmig, schmelzend) der Partikel.

4 Theorie für Aufgaben

4.1 Entstehung und Entwicklung einer Zyklone

Das Wetter in den mittleren Breiten wird massgeblich von Tiefdruckgebieten, sogenannten extratropischen Zyklonen, beeinflusst. Zur Entstehung und Entwicklung einer extratropischen Zyklone gibt es mehrere Theorien. Im Rahmen dieses Praktikums wird die älteste und weit verbreitetste Theorie vorgestellt, welche in Bergen, Norwegen, entwickelt wurde.
Der Lebenszyklus einer extratropischen Zyklone ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Extratropische Zyklonen entstehen vorwiegend entlang der Polarfront, welche die warme tropischen Luftmassen von der kalten Polarluft trennt. Die Polarfront liegt meist über Nordeuropa. Findet an der Polarfront eine Störung statt, kommt es zu einer Deformation und zur Verwirbelung der kalten und warmen Luftmassen. Dadurch dringen auf der Rückseite der Störung kalte Luftmassen aus dem Norden nach Süden, während auf der Vorderseite warme Luft aus dem Süden nach Norden strömt. Es bildet sich eine Kaltfront (blau) und eine Warmfront (rot), welche durch einen Warmsektor getrennt sind (siehe Abbildung 6).

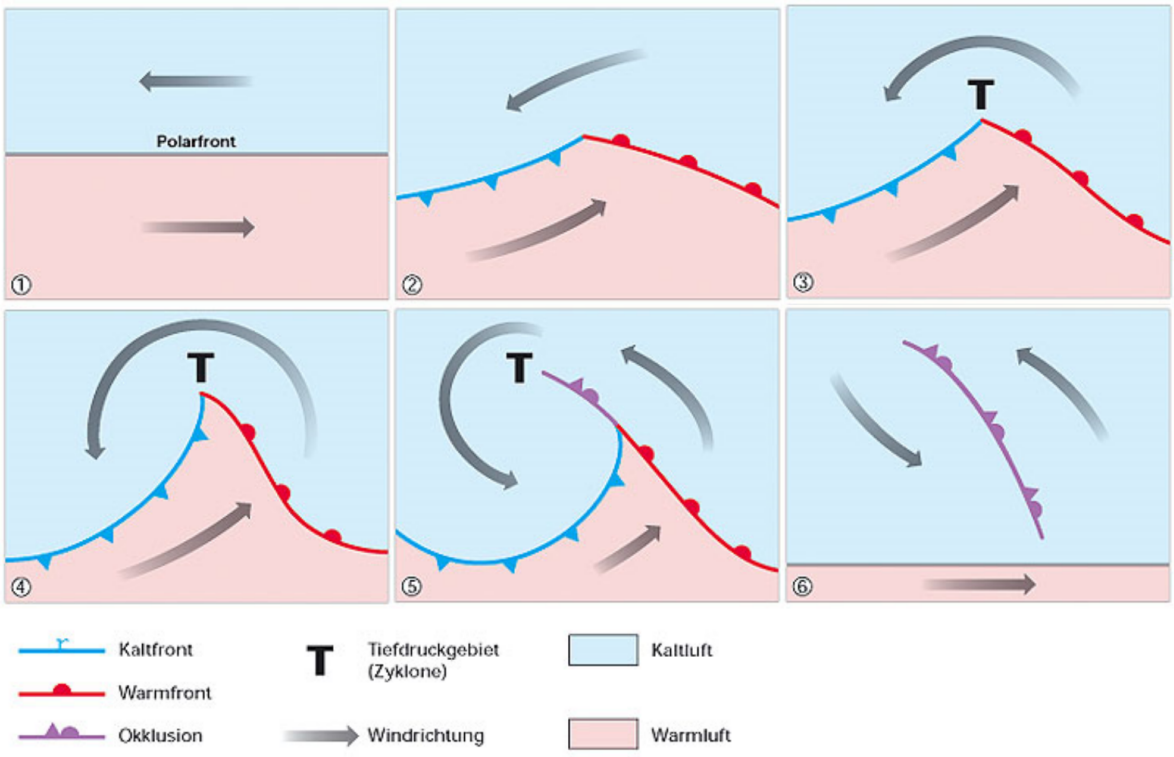

Abbildung 5: Entstehung und Entwicklung einer extratropischen Zyklone (Quelle: `https://www2.klett.de/sixcms/media.php/76/zyklone.jpg`).

An der Warmfront gleitet die subtropische Warmluft aufgrund ihrer geringeren Dichte auf der polaren Kaltluftmassen langsam auf, was zur Bildung von Schichtwolken führt. Auf der anderen Seite schiebt sich an der Kaltfront die Kaltluft wie ein Keil unter die warmen Luftmassen, wodurch diese rapide vom Boden angehoben werden und Konvektionswolken entstehen. Die Warmfront kommt aufgrund des Aufgleiten der Warmluft auf die davor liegende Kaltluft langsamer voran als die Kaltfront, wodurch der Warmsektor zwischen den beiden Fronten stets verkleinert wird. Schliesslich holt die Kaltfront die Warmfront ein. Dies passiert zuerst im Kern des Tiefdruckgebietes und wird als Okklusion bezeichnet wird. Dabei wird die Warmluft vollständig vom Boden gehoben und kühlt sich in der Höhe ab. Im weiteren Verlauf holt die Kaltfront die Warmfront auch in grösserer Entfernung vom Tief ein, bis schliesslich das ganze Tief nur noch aus der Okklusionsfront (violett) besteht. Im Endstadium einer Zyklone, ist das ehemalige Tiefdruckgebiet am Boden im wesentlichen mit Kaltluft angefüllt.
Beim Durchgang einer extratropischen Zyklone ist ein charakteristischer Wetterablauf zu beobachten, welcher im Rahmen von Aufgabe 2 genauer untersucht wird.

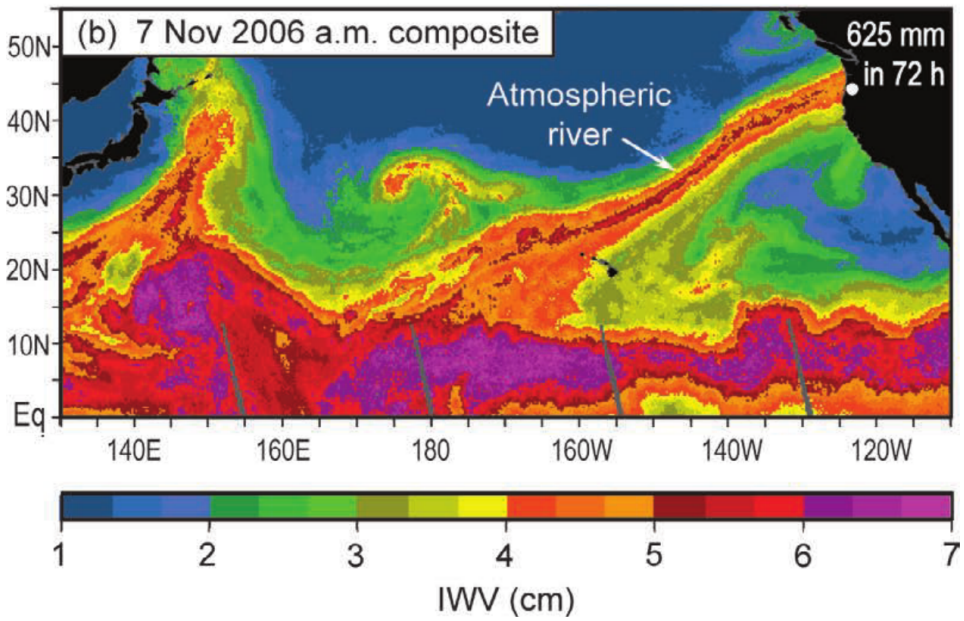

Abbildung 6: Beispiel eines atmosphärischen Flusses (Quelle: Ralph et al. 2011).

4.2 Atmosphärischer Fluss

Atmosphärische Flüsse (englisch: atmospheric river) sind lange, schmale Feuchtigkeitsbänder in der Atmosphäre, die sich von den Tropen bis in höhere Breiten erstrecken. Sie sind durch einen hohen integrierten Wasserdampf (IWV) und einen hohen integrierten horizontalen Wasserdampftransport (IVT) gekennzeichnet:

$$IWV = \frac{1}{g}\int_{p_{surface}}^{p_{top}} q\,dp \qquad\qquad IVT = \frac{1}{g}\int_{p_{surface}}^{p_{top}} q\,v\,dp \tag{6}$$

q: spezifische Feuchte
p: Druck
v: Geschwindigkeit
g: Erdbeschleunigung

Atmosphärische Flüsse sind für einen Grossteil des Feuchtigkeitstransports in der Atmosphäre verantwortlich und können bis zu 15-mal so viel flüssiges Wasser wie die Flussmündung des Mississippi führen. Der bekannteste atmosphärische Fluss ist der 'Pineapple-Express', der feuchte Luft von Hawaii zur Westküste der USA transportiert. Er ist für ca. 30 % bis 50 % des Niederschlages an der Westküste verantwortlich.
Atmosphärische Flüsse treten häufig in Verbindung mit extratropischen Zyklonen auf, insbesondere in deren Warmsektor kurz vor der Kaltfront. Trifft nun eine atmosphärischer Fluss auf Landmassen, kann dies zu ergiebigen Niederschläge führen. Je nach Wetterlage bewegt sich der atmosphärische Fluss nur langsam fort, wodurch die Niederschläge auch über mehrere Tage andauern können und dadurch das Überschwemmungsrisiko erhöht.

5 Aufgaben

In diesem Praktikum beschäftigen wir uns mit der Analyse und Interpretation von Fernerkundungsdaten. Die Aufgaben sollen euch aufzeigen wie Fernerkundungsdaten zur Untersuchung von verschiedenen atmosphärischen Phänomenen und Prozessen genutzt werden können.
Im Theorieteil findet ihr wichtige Informationen, welche euch bei der Bearbeitung der Aufgaben helfen. Die für die Aufgaben benötigten Links und Daten sind auf folgender Website abgelegt: `http://iacweb.ethz.ch/igp3/index.html`.

Aufgabe 1 wird zuvor in Kleingruppen bearbeitet und danach im Plenum besprochen. Aufgaben 2 und 3 werden selbständig in Zweier- oder Dreiergruppen bearbeitet. Am Ende des Tages stellt jede Gruppe anhand einer Präsentation ihre Aufgabe in ca. 10-15 Minuten den anderen Gruppen vor.

Vorbereitung für die Aufgaben 2 und 3

In Aufgabe 2 und Aufgabe 3 werdet ihr einige Teilaufgaben mit Hilfe von Jupyter Notebooks bearbeiten. Um diese auszuführen, benutzen wir einen JupyterHub Server am IAC. Folgt dafür der folgenden Anleitung:

1. **Starte JupyterHub Server**: Klickt auf folgenden Link `https://hub.iac.ethz.ch/` und meldet euch mit eurem ETH-Kürzel und Passwort an. (Hierfür müsst ihr im ETH Netzwerk sein oder per VPN damit verbunden sein)

2. **Download und Entpacken der benötigten Jupyter Notebooks**: Ladet das zip-File 'Jupyter_notebooks.zip' für Aufgabe 2 bzw. Aufgabe 3 herunter (`http://iacweb.ethz.ch/igp3/index.html`), entpackt die Dateien und speichert den Ordner im gewünschten Arbeitspfad ab. Hierfür gibt es 2 Möglichkeiten:
   - Download, Entpacken, und Upload auf Jupyter via GUI
   - via Command Line im JupyterHub Webinterface (schneller und einfacher):
     a) Terminal starten: *File* → *New* → *Terminal*
     b) Daten laden: `wget http://iacweb.ethz.ch/igp3/A_Jupyter_notebooks.zip`
     c) Daten entpacken: `unzip A_Jupyter_notebooks.zip`

3. Navigiert nun im File Browser (Ordnersymbol in der linken Statusleiste) zum gewünschten Ordner. Von hier könnt ihr via Doppelklick die Notebooks zu den verschiedenen Aufgaben starten.

5.1 Aufgabe 1: Kennenlernen von Satelliten- und Radarbildern

5.1.1 Interpretation von Satellitenbildern

(a) In Abbildung 7 sind verschiedene Meteosat-Satellitenbilder zu sehen, welche in unterschiedlichen Kanälen aufgenommen wurden. Ordnet mithilfe der Informationen aus dem Theorieteil die Satellitenbilder den Kanälen VIS008, IR108, WV062 und Natural Color RGB zu (siehe Tabelle 1). Begründet eure Antwort.

(b) Warum erscheinen Ozeane im Channel 3 dunkler als Landmassen? Kann man im Infrarotkanal ebenfalls eine generelle Aussage bezüglich des Land-Ozean-Kontrastes treffen? Begründet eure Antwort.

(c) Welchen Satellitenkanal würdet ihr benutzen um hohe Bewölkung von tiefer Bewölkung zu unterscheiden? Identifiziert anhand der Satellitenaufnahmen Regionen mit hoher und tiefer Bewölkung und zeichnet diese Gebiete in den jeweiligen Bildern ein. Begründet eure Antwort.

(d) Was bedeuten tiefe Intensitäten (weisse Regionen) in Channel 1? Welche Aussagen lassen sich damit über die Feuchteverhältnisse in der Troposphäre treffen?

(e) Beschreibt mithilfe der Echtzeit verfügbaren Satellitenbilder die aktuelle Wetterlage in Europa. Dazu findet ihr auf der Webseite einige nützliche Links. Eure Resultate werden anschliessend im Plenum besprochen.

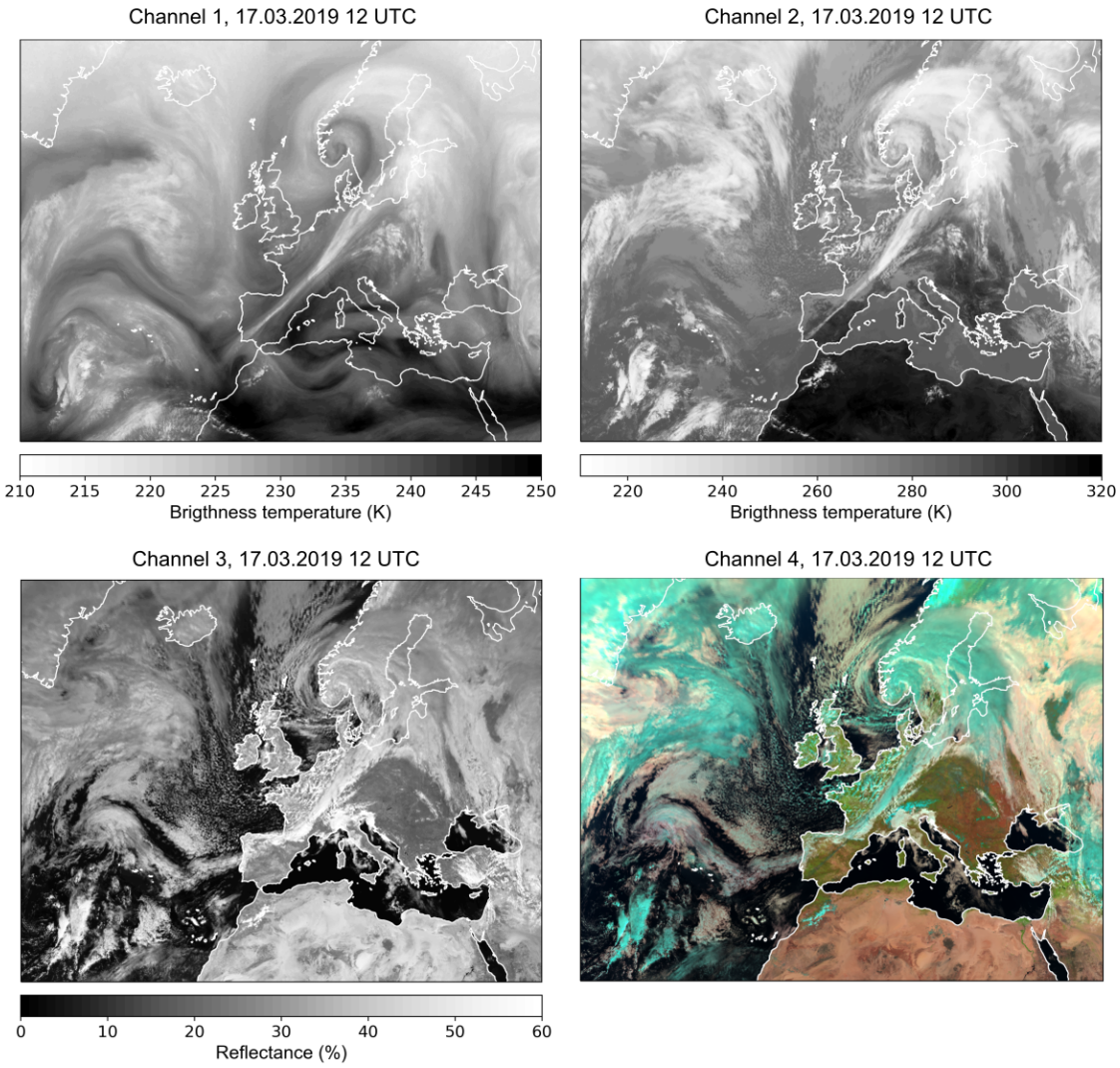

Abbildung 7: Meteosat-Satellitenbilder vom 17.03.2019 in verschiedenen Aufnahmekanälen.

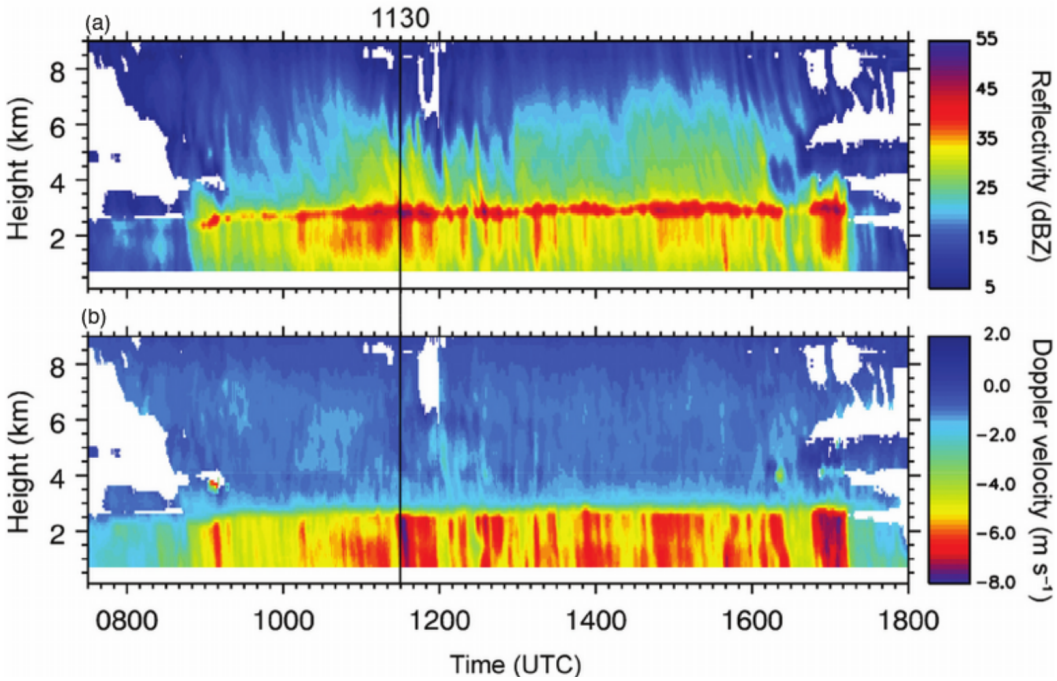

Abbildung 8: Radaraufnahmen (a: Reflektivität, b: Doppler Geschwindigkeit) von einem K-band Mikro-Regenradar (Quelle: Kim and Lee, 2016).

5.1.2 Interpretation von Radarbildern

(a) In Abbildung 8 findet ihr Radardaten von einem Mikro-Regenradar. Welche Informationen liefern die beiden Parameter 'Radarreflektivität' und 'Doppler Geschwindigkeit'? Schaut euch dazu die Grundlagen aus dem Theorieteil an.

(b) Was stellt das rote Band im Reflektivitätssignal (zwischen 2.5 km und 3 km) dar? Wieso nimmt die Reflektivität in dieser Höhe zu? Tipp: Benutzt in eurer Argumentation die Radargleichung (siehe Formel 3) aus dem Theorieteil und berücksichtigt insbesondere den Faktor k.

(c) Warum nimmt die Doppler Geschwindigkeit unterhalb von 3 km zu? Bestimmt anhand der Radardaten aus Abbildung 8 und mithilfe von sinnvollen Annahmen bezüglich Umgebungsbedingungen die Fallgeschwindigkeit von Regentropfen und Schneeflocken.

5.2 Aufgabe 2: Durchzug einer Kaltfront

Eine Kaltfront erreichte die Schweiz im Verlauf vom 17. März 2019. MeteoSchweiz hat euch beauftragt den Zeitpunkt der Ankunft der Kaltfront zu bestimmen und zu überprüfen ob eine Warnung für hohen Niederschlagsmengen veröffentlicht werden soll.

5.2.1 Wetterlage

Ihr möchtet euch als erstes einen Überblick über die Wetterlage in Europa verschaffen. Dafür stehen euch verschiedene Wetterkarten und Satellitenbilder zur Verfügung (`http://iacweb.ethz.ch/igp3/index.html`).

(a) Beschreibt anhand der Satellitenaufnahmen und Bodenwetterkarten die Wetterlage in Europa (z.B. Lage der Tiefdruck- und Hochdruckgebiete, Wege der Luftmassen). Schaut euch dazu die Satellitenbilder in den verschiedenen Kanälen an (VIS, IR, WV) und verwendet auch die Bodenwetterkarten. Wie zeigt sich die Kaltfront in den verschiedenen Aufnahmekanälen? In welchem Stadium (siehe Abbildung 6) befindet sich die extratropische Zyklone am 17. März 2019 um 12 UTC?

(b) Welcher Satellitenkanal (VIS, IR, WV) ist am besten geeignet um Wolkenstrukturen zu untersuchen? Charakterisiert mithilfe dieses Satellitenkanals die Wolkentypen in verschiedenen Regionen. Was ist ein Nachteil dieses Satellitenkanals?

(c) Wurden die Satellitenbilder von einem geostationären oder einem polumlaufenden Satelliten aufgenommen? Begründet eure Antwort. Nennt je zwei Vorteile und Nachteile dieses Satellitentyps.

(d) Berechnet anhand der Informationen aus dem Theorieteil (Sektion 3.3) die Höhe h des Satelliten. Die Winkelgeschwindigkeit ω kann aus der Umlaufzeit T berechnet werden: $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Benutzt für die Höhenbestimmung des Satelliten einen Erdradius r_E von 6371 km.
Tipp: Überlegt euch welche Kräfte auf den Satelliten einwirken und bestimmt dessen Umlaufzeit.

5.2.2 Meteorologische Messungen

Ihr möchtet den Zeitpunkt der Ankunft der Kaltfront bestimmen. Dafür stehen euch meteorologische Messungen von der MeteoSchweiz Wetterstation in Kloten sowie das Jupyter Notebook *'A2_2a_Meteorologische_Messwerte'* zum Einlesen und Plotten der Daten zur Verfügung.

(a) Schaut euch als erstes die zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Stärke der Windböen, Temperatur und des Drucks bei der Wetterstation Kloten an. Öffnet dazu das Jupyter Notebook *'A2_2a_Meteorologische_Messwerte'* und folgt den Anweisungen im Skript.

(b) Beschreibt den Verlauf der einzelnen Messwerte an der Wetterstation Kloten und bestimmt den Zeitpunkt der Ankunft der Kaltfront. Begründet eure Antwort mithilfe der meteorologischen Messungen.

5.2.3 Höhenbestimmung

Ihr möchtet nun anhand von Satellitenbildern (Methode 1) und Radiosondenaufstiegen (Methode 2) die Höhe der mit der Kaltfront assoziierten Wolken ermitteln.

(a) Methode 1: Bestimmt aus den Satellitendaten die Temperatur an der Wolkenoberkante zum Zeitpunkt 12 UTC (z.B. über Deutschland). Welcher Kanal (VIS, IR, WV) ist am besten geeignet um die Temperatur an der Wolkenoberkante zu bestimmen? Begründet eure Antwort.
Auf welcher Höhe stimmt diese Temperatur mit der Umgebungstemperatur überein? Die Umgebungstemperatur auf verschiedenen Höhen könnt ihr mithilfe der ECMWF-Daten abschätzen.

(b) Methode 2: Bestimmt die Höhe der Wolkenoberkante aus den Radiosondendaten. Schaut euch dazu den Radiosondenaufstieg vom 17. März 2019 aus Idar-Oberstein, Deutschland, auf der Webseite an. Wo ist die Luft bezüglich Wasser gesättigt?
Tipp: Beachtet die Definition der Taupunkttemperatur (`https://glossary.ametsoc.org/wiki/Dewpoint`) und die Legende unterhalb des Radiosondenaufstiegs.

(c) Vergleicht die Höhe, die ihr durch die beiden Methoden erhalten habt. Wie lassen sich mögliche Unterschiede zwischen den beiden Methoden erklären?

5.2.4 Feuchtigkeitsverteilung

Als nächstes möchtet ihr die Feuchtigkeitsverteilung innerhalb der extratropischen Zyklone untersuchen. Auf der Webseite findet ihr eine Abbildung von der vertikalen Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit entlang des 45. Breitengrades zum Zeitpunkt 12 UTC.

(a) Beschreibt die vertikale Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit. Welche beiden Strukturen sind in der Abbildung ersichtlich? Betrachtet insbesondere die Neigung der Feuchtigkeit-Konturlinien und erklärt mithilfe von den Informationen aus dem Theorieteil (Sektion 4.1) wie diese zustande kommt.
Tipp: Die ECMWF-Daten und Satellitenbilder können euch helfen die beiden Strukturen zu identifizieren.

(b) Welche Informationen gibt uns die vertikale Feuchtigkeitsverteilung bezüglich der Dynamik innerhalb des Systems? Fertigt eine Skizze von dem Vertikalquerschnitt an (mit den beiden Strukturen) und zeichnet mit aufsteigenden und absinkenden Pfeilen die Luftbewegungen ein. Berücksichtigt auch die Stärke der Luftbewegungen. Wo und wieso findet Kondensation statt? Wie wirkt sich die Dynamik auf die Wolkenbildung aus?

(c) Ordnet die Begriffe 1) 'Kaltfront', 2) 'Warmfront', 3) 'Warmsektor', 4) 'stratiformer Niederschlag', 5) 'konvektiver Niederschlag', 6) 'Kaltluft', 7) 'Warmluft', 8) 'Cumulonimbus', 9) 'Nimbostratus', 10) 'Druckabfall', 11) 'Druckanstieg' den entsprechenden Strukturen in eurer Skizze zu. Begründet eure Zuordnungen.

5.2.5 Wolkenstruktur und Niederschlag

Ihr möchtet untersuchen wie viel Niederschlag während dem Durchgang der Kaltfront gefallen ist. Dafür stehen euch Messungen von einem vertikal zeigenden Wolkenradar und Niederschlagsmessungen aus Davos zur Verfügung.

(a) Der Wolkenradar liefert Einblicke in die Wolkenstruktur. Schaut euch die Abbildung von der Radarreflektivität auf der Webseite an und beschreibt die zeitliche Entwicklung der Wolkenstruktur. Mit welchen Wettererscheinungen geht der Durchzug der Kaltfront einher? In welcher Form (flüssig/fest) erreicht der Niederschlag die Messstation Davos? Begründet eure Antwort.

(b) Die Radarreflektivität enthält Informationen über die Anzahl und Grösse der Wolkenpartikel (siehe Theorieteil). Die Radarreflektivität kann unter der Annahme der Rayleigh-Approximation wie folgt berechnet werden und wird häufig in Dezibel ausgedrückt:

$$Z = \int_0^\infty n(D) D^6 dD = \sum_i N_i D_i^6 \tag{7}$$

$$\mathrm{dBZ} = Z[\mathrm{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{Z}{\mathrm{mm}^6\ \mathrm{m}^{-3}} \right) \tag{8}$$

Z: Radarreflektivität ($\mathrm{mm}^6\ \mathrm{m}^{-3}$)
$n(D)$: Grössenverteilung
N: Anzahlkonzentration
D: Durchmesser

In Tabelle 2 findet ihr typische Grössen und Anzahlkonzentrationen von verschiedenen Wolkenpartikeln. Berechnet anhand der oben beschriebenen Formeln und mithilfe von Tabelle 2 die Radarreflektivität für die verschiedenen Wolkenpartikel in dBZ-Einheiten. Vergleicht eure Resultate mit den Werten in Tabelle 3.

Tabelle 2: Typische Grössen und Konzentrationen von verschiedenen Wolkenpartikeln

Partikeltyp	Durchmesser D_i	Konzentration N_i
Wolkentröpfchen	10 µm	100 cm^{-3}
Niesel	0.1 mm	0.1 cm^{-3}
Regentropfen	2 mm	10^{-4} cm^{-3}

(c) Wie viele Wolkentröpfchen mit einem Durchmesser von 10 µm werden benötigt um eine Radarreflektivität von 20 dBZ zu produzieren? Was bedeutet das für die Sensitivität des Wolkenradars in Bezug auf die Partikelgrösse? Begründet eure Antwort mithilfe der Formel für die Radarreflektivität.

(d) Ihr möchtet nun anhand der Radarreflektivität die Niederschlagsrate berechnen. Wendet dafür eine empirische Beziehung zwischen der Radarreflektivität und Niederschlagsrate an. Beachtet, dass Z-R Beziehungen nur näherungsweise bzw. im Mittel über mehrere Niederschlagsevents gültig sind und Ungenauigkeiten aufweisen, wenn sie auf ein einzelnes Niederschlagsereignis angewendet werden.
Die MeteoSchweiz verwendet zum Beispiel folgende Z-R Beziehung:

$$Z = c\,R^{1.5} \tag{9}$$

Z: Radarreflektivität ($\mathrm{mm^6\ m^{-3}}$)
c: 300 $\mathrm{mm^{4.5}\ h^{1.5}\ m^{-3}}$
R: Niederschlagsrate ($\mathrm{mm\ h^{-1}}$)

Bestimmt die Niederschlagsrate während dem Durchgang der Kaltfront. Benutzt dazu die Abbildung aus Teilaufgabe (a) und lest eine Radarreflektivität in Bodennähe ab, welche repräsentativ für das Niederschlagsereignis ist.

(e) Ihr möchtet eure berechnete Niederschlagsrate mit dem gemessenen Niederschlag vergleichen. Dafür stehen euch Niederschlagsdaten von der MeteoSchweiz Wetterstation Davos sowie ein Jupyter Notebook zur Verfügung. Benutzt zum Einlesen und Plotten der Daten das Jupyter Notebook *'A2_5e_Niederschlagsrate'* und folgt den Anweisungen im Skript. Vergleicht eure berechnete Niederschlagsrate mit der gemessenen Niederschlagsrate. Wie lassen sich mögliche Unterschiede erklären? Welche Probleme können bei der Berechnung der Niederschlagsrate aus der Radarreflektivität auftreten? Nenne mindestens zwei Punkte.

(f) Bringt zum Abschluss eure Ergebnisse aus den einzelnen Teilaufgaben zusammen und entscheidet, ob ihr eine Warnung für hohe Niederschlagsmengen herausgeben möchtet. Berücksichtigt für eurer Entscheidung die Gefahrenstufen für Regen und Schnee auf der MeteoSchweiz Webseite:
`https://www.naturgefahren.ch/home/umgang-mit-naturgefahren/regen.html`
`https://www.naturgefahren.ch/home/umgang-mit-naturgefahren/schnee.html`
Welche Faktoren müssen neben der Niederschlagsrate berücksichtigt werden? Begründet eure Entscheidung.

(g) Stellt eine kurze Präsentation (10-15 Minuten) mit euren wichtigsten Erkenntnissen aus den verschiedenen Teilaufgaben zusammen. Diese werden anschliessend den anderen Gruppen vorgestellt.

5.3 Aufgabe 3: Atmosphärischer Fluss

Zwischen dem 14. und 15. März 2019 fiel auf der Alpennordseite verbreitet über 40 mm Niederschlag. MeteoSchweiz hat euch beauftragt der Ursache für die hohen Niederschlagsmengen auf den Grund zu gehen. Dafür stehen euch diverse Wetterkarten, Fernerkundungsdaten und meteorologische Messungen zur Verfügung (`http://iacweb.ethz.ch/igp3/index.html`).

5.3.1 Wetterlage

Als erstes möchtet ihr euch einen Überblick über die Wetterlage verschaffen. Schaut euch dazu die Abfolge von Satellitenbildern und Bodenwetterkarten auf der Webseite an.

(a) Charakterisiert anhand der Bodenwetterkarten und Satellitenbilder die grossräumige Wetterlage in Europa. Überlegt euch welche Informationen die verschiedenen Satellitenkanäle (VIS, IR, WV) enthalten. Bestimmt die Lage von Hochdruck- und Tiefdruckgebieten sowie der Fronten und berücksichtigt die Wege der Hauptluftmassen.

(b) Welche Aussagen könnt ihr mithilfe des Wasserdampfkanals über die Feuchteverhältnisse der Troposphäre treffen? Betrachtet insbesondere das Band mit tiefen Intensitäten (weisse Regionen) westlich von Europa. Warum beobachtet man hohe Intensitäten (schwarze Regionen) über Afrika?

(c) Welches Phänomen beeinflusst mit grosser Wahrscheinlichkeit das Wetter in Mitteleuropa zwischen dem 14. und 15. März 2019? Begründet eure Antwort mithilfe der Satellitenbilder, Bodenwetterkarten und eurem Wissen aus dem Theorieteil.

5.3.2 Feuchtetransport

Die Schweiz befindet sich unter dem Einfluss von einem sogenannten 'Atmosphärischen Fluss' (engl.: atmospheric river), welcher sich bis nach Mitteleuropa erstreckt. Ein atmosphärischer Fluss ist ein langer und enger Luftkorridor, in dem ein intensiver Feuchtigkeitstransport stattfindet (siehe Sektion 4.2).

(a) Könnt ihr anhand des Wasserdampf-Satellitenkanals bestimmen, ob es sich um einen atmosphärischen Fluss handelt? Begründet eure Antwort.

(b) Atmosphärische Flüsse werden über einen hohen 'integrated water vapor (IWV)' ($> 20\,\mathrm{mm}$) und einen hohen 'integrated vapor transport (IVT)' ($> 250\,\mathrm{kg\,m^{-1}\,s^{-1}}$) definiert (siehe Sektion 4.2). Schaut euch die integrierten ECMWF-Daten auf der Webseite an und überprüft ob die beiden Kriterien erfüllt sind.

(c) Bestimmt anhand des IWV-Kriterium die Länge und Breite des atmosphärischen Flusses. Lest dazu mithilfe des Cursors die Längen- und Breitengrade der Randgebiete zu einem bestimmten Zeitpunkt ab. Berechnet mithilfe der abgelesenen Koordinaten die Distanz des Phänomens: `http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html`. Vergleicht euer Resultat mit Literaturwerten.

(d) Ihr möchtet nun untersuchen auf welcher Höhe der grösste Feuchtigkeitstransport stattfindet. Überlegt euch welcher Feuchteparameter sich für die Analyse am besten eignet und wo ihr den grössten Feuchtigkeitstransport erwartet. Begründet eure Antwort. Besprecht eure Lösung mit den Betreuern bevor ihr mit der nächsten Teilaufgabe fortfährt.
Tipp: Schaut euch die Definitionen von den verschiedenen Feuchteparameter (relative Feuchte, spezifische Feuchte, absolute Feuchte) auf folgender Webseite an:
`https://www.engineersedge.com/thermodynamics/humidity.htm`

(e) Erstellt nun mithilfe der ECMWF-Daten (Druckniveaus) ein Feuchteprofil entlang des 40. Breitengrad zum Zeitpunkt 12 UTC. Benutzt dazu das vorgefertigte Raster im Anhang 6.2 und füllt bei den Punkten jeweils die entsprechende Feuchtigkeit ein. Zeichnet die ungefähre Höhe der 80 % IWV-Konturlinie in den Raster ein. Wo findet der grösste Feuchtigkeitstransport statt ($> 80\,\%$ IWV)? Stimmt das mit euren Erwartungen überein?

(f) Ihr möchtet nun mithilfe der barometrischen Höhenformel die Höhe des Feuchtigkeitsgebietes ermitteln. Die barometrische Höhenformel ist durch folgende Formel gegeben:

$$p(h_1) = p(h_0) \cdot e^{-\frac{M\,g}{T\,R}h} \tag{10}$$

p: Druck
h: Höhe zwischen den Druckniveaus
M: molare Masse von Luft ($29\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$)
g: Erdbeschleunigung ($9.81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$)
R: universelle Gaskonstante ($8.314\,\mathrm{J\,K^{-1}\,mol^{-1}}$)
T: mittlere Temperatur zwischen den Druckniveaus

Der Einfachheit halber könnt ihr die mittlere Temperatur zwischen den Druckniveaus benutzen.

5.3.3 Wolkenstruktur

Der atmosphärische Fluss transportierte zwischen dem 14. und 15. März 2019 feuchte Luft von tropischen Regionen in die Schweiz und sorgte für ergiebige Niederschläge. Auf der Webseite findet ihr Daten von einem vertikal zeigenden Wolkenradar aus Davos, welcher Einblicke in die Wolkenmikrophysik ermöglicht.

(a) Verschafft euch einen Überblick über die Radardaten und beschreibt die zeitlich Entwicklung der Wolkenstruktur. Informationen zu den verschiedenen Radarparametern findet ihr im Theorieteil.

(b) Wie lange braucht der Radarpuls um am 14. März um 12 UTC die Wolkenoberkante zu erreichen? Benutzt für die Bestimmung der Pulslänge die Informationen aus dem Theorieteil (Sektion 3.4.2).

(c) Die Temperatur an der Wolkenoberkante beeinflusst welche mikrophysikalischen Prozesse innerhalb der Wolke aktiv sind und wie schnell sich Niederschlag bildet. Ihr möchtet anhand eines Radiosondenaufstiegs die Temperatur an der Wolkenoberkante bestimmen. Dafür stehen euch Daten von einem Radiosondenaufstieg aus Payerne (14. März 2019, 12 UTC) sowie ein Jupyter Notebook zur Verfügung. Benutzt zum Einlesen und Plotten der Daten das Jupyter Notebook *'A3_3c_Radiosondenaufstieg'* und folgt den Anweisungen im Skript. Warum erreicht die relative Feuchte an der Wolkenoberkante nicht 100 %?
Tipp: Wolkentröpfchen können bis auf eine Temperatur von -38 °C unterkühlt werden (siehe Video: `https://www.youtube.com/watch?v=0JtBZGXd5zo`).

(d) Die Bildung von Wolkentröpfchen erfordert übersättigte Bedingungen bezüglich Wasser. Solche Bedingungen können in Aufwindzonen oder in turbulenten Regionen auftreten. Erwartet ihr die Bildung von flüssigem Wasser in der Wolke? Falls ja, in welchen Regionen? Begründet eure Antwort mithilfe der Radardaten und des Temperaturprofils. Wieso ist es schwierig anhand der Radarreflektivität festzustellen, ob Wolkentröpfchen in der Wolke enthalten sind?
Tipp: Überlegt euch welcher Radarparameter sich eignet um Aufwindzonen oder turbulente Regionen zu erkennen.

(e) Eiskristalle können unterschiedliche Formen annehmen. Die Eiskristallform und somit das Wachstum von Eiskristallen hängt von den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Übersättigung) ab (siehe Abbildung 9). Identifiziert anhand der Radardaten potentielle Regionen, in welchen Nadeln oder Säulen in der Wolke vorhanden sind. Für die Klassifizierung in unterschiedliche Eisarten können die polarimetrischen Messgrössen behilflich sein. Vergleicht die Temperatur in diesen Regionen mit dem Eiskristall-Morphologiediagramm in Abbildung 9 und überprüft ob die beobachteten Eiskristallformen mit der Theorie übereinstimmen.
Tipp: Die 'Linear depolarization ratio (LDR)' ist ein Mass für die Partikelform. Asphärische Partikel produzieren hohe LDR-Werte ($\sim$ -20 dB), während runde Partikel niedrige LDR-Werte ($\sim$ -30 dB) generieren.

5.3.4 Niederschlag

Ihr möchtet untersuchen wie viel Niederschlag zwischen dem 14. März 2019 (0 UTC) und dem 16. März 2019 (0 UTC) an verschiedenen Stationen gemessen wurde. Dafür stehen euch Niederschlagsmessungen von fünf MeteoSchweiz Wetterstationen (Payerne, Kloten, Lugano, Davos, Säntis) zur Verfügung.

(a) Berechnet den akkumulierten Niederschlag über 48 Stunden für die einzelnen Messstationen. Benutzt dazu das Jupyter Notebook *'A3_4a_Akkumulierter_Niederschlag'* und folgt den Anweisungen im Skript.

(b) Vergleicht die zeitliche Entwicklung des akkumulierten Niederschlags an den verschiedenen Stationen. Wie lassen sich die Unterschiede zwischen den Messstationen erklären? Nenne mindestens zwei Faktoren.

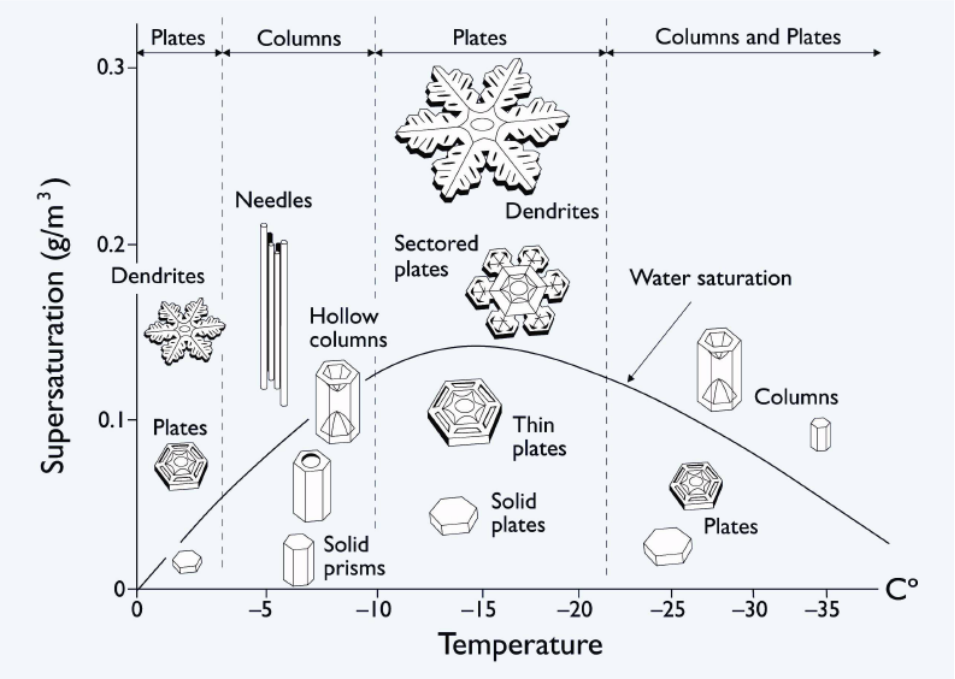

Abbildung 9: Eiskristall-Morphologiediagramm (Quelle: Libbrecht, 2008). Die Eiskristallform hängt von der Temperatur und Übersättigung der Umgebung ab.

(c) Die fünf Wetterstationen liefern Informationen über die lokalen Niederschlagsbedingungen. Um einen Überblick über die grossskalige Niederschlagsverteilung zu bekommen, findet ihr auf der Webseite ECMWF-Daten mit dem akkumulierten Niederschlag über 48 Stunden über Europa. Beschreibt wo die höchsten Niederschlagsmengen beobachtet wurden und begründet dies mithilfe der dynamischen und mikrophysikalischen Prozesse.

(d) Bringt zum Abschluss eure Ergebnisse aus den einzelnen Teilaufgaben zusammen und beschreibt welche Faktoren zu diesen hohen Niederschlagsmengen geführt haben. Fertigt dazu eine Skizze an, welche eure Erkenntnisse zusammenfasst. Berücksichtigt die Wetterlage (Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete), den Feuchtigkeitstransport und die Topographie in eurer Argumentation.

(e) Stellt eine kurze Präsentation (10-15 Minuten) mit euren wichtigsten Erkenntnissen aus den verschiedenen Teilaufgaben zusammen. Diese werden anschliessend den anderen Gruppen vorgestellt.

6 Anhang

6.1 Niederschlagsart aus Radarreflektivität

Tabelle 3: Typical values of Z for various hydrometeors and precipitation types, detected with either a cloud radar or a precipitation radar (from Lohmann et al. 2016).

Scatterer	Reflectivity
Cloud droplets	-40 to -20 dBZ
Mixed-phase clouds	-20 to -10 dBZ
Drizzle	-20 to 0 dBZ
Very light rain or light snow	0 to 10 dBZ
Moderate rain and heavier snow	10 to 30 dBZ
Melting snow	30 to 45 dBZ
Moderate to heavy rain	30 to 60 dBZ
Hail	$>$ 60 dBZ

6.2 Vertikale Feuchtigkeitsverteilung

Tabelle 4: Vertikales Raster entlang des 40. Breitengrades zur Erstellung des Vertikalschnittes der Feuchte von Aufgabe 3.

100 hPa					
250 hPa					
300 hPa					
400 hPa					
500 hPa					
700 hPa					
850 hPa					
1000 hPa					

55°W 50°W 45°W 40°W 35°W 30°W