



Doctoral Thesis

Depth, anisotropy, and water equivalent of snow estimated by radar interferometry and polarimetry

Author(s):

Leinss, Silvan

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010603517> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 23093

**DEPTH, ANISOTROPY, AND WATER EQUIVALENT OF
SNOW ESTIMATED BY RADAR INTERFEROMETRY AND
POLARIMETRY**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
Silvan Leinss

Dipl. Phys., University of Konstanz

born on 18.06.1981
in
Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Irena Hajsek
Prof. Dr. Helmut Rott
Prof. Dr. Matthias Braun

2015

Abstract

Snow contributes to the water supply of almost one-sixth of the world's population and has a strong influence on the energy balance of the earth. Snow provides water for life but also threatens life in the form of avalanches and flooding due to snow melt. Most of the world's snow cover is located in remote and inaccessible regions, therefore large-scale snow monitoring is only possible with remote sensing techniques.

In the entire electromagnetic spectrum, ranging from kilometer long radio waves to ultrashort gamma waves, only three atmospheric spectral windows exist through which satellites can observe the surface of the earth. Two of them, the optical and the infrared window, are often blocked by clouds or atmospheric water vapor. Visible or infrared light, which is reflected at the snow surface, is difficult to be used for derivation of any volumetric information of the snow pack. Active and passive microwave systems, which operate in the radio window, have the potential to obtain volumetric information of snow because microwaves can penetrate the snow cover.

The aim of this thesis is to determine snow properties, like snow depth, snow anisotropy, and snow water equivalent, by analyzing phase differences of radar signals reflected from snow covered regions.

Current radar systems provide not only the backscatter intensity of an object, but also an object-specific scattering phase. The phase contains information about object properties as well as accurate information about the propagation delay time. In this thesis, phase differences resulting from propagation delays are analyzed with respect to different polarizations, observation times and observation geometries.

Based on polarimetric phase differences, a method to determine the depth of fresh snow was developed. The copolar phase difference (CPD) obtained from radar images acquired with vertically and horizontally polarized microwaves by the satellites TerraSAR-X and TanDEM-X were analyzed. Positive phase differences could be explained by a horizontal anisotropy in fresh snow, which results from snow settling. As the phase difference is a volumetric property, the magnitude of the phase difference is roughly proportional to the depth of fresh snow. The validation with snow depth measurements on the ground show that the spatial variability of the depth of fresh snow can be determined with a resolution below 100 m with space-borne sensors like TerraSAR-X. Cold temperatures have been found to decrease observed phase differences due to temperature gradient metamorphism.

The observed relation between the CPD and fresh snow, snow settling, and temperature gradient metamorphism provides a contact-less and destruction-free tool to observe the anisotropy, which is a metamorphic state of snow. The measurable dielectric anisotropy is directly linked to the structural anisotropy of snow which is responsible for the mechanical stability as well as the thermal conductivity of the snow pack. This makes the anisotropy relevant for the energy balance of snow and snow covered soil. In order to measure the anisotropy, a rigorous electromagnetic model was developed which provides a parameter free link between three-dimensional two-point correlation functions of the microstructure of snow, the effective permittivity tensor, and the macroscopically measured copolar phase difference. For verification of the model, four years of ground-based radar data, acquired by the SnowScat instrument in Sodankylä, Finland, were analyzed with respect to the frequency and incidence angle dependence of the copolar phase. Computer tomography data were used for validation of the anisotropy determined from the copolar phase difference measured by SnowScat.

The unique dataset of the currently longest time series of anisotropy measurements provides a new basis for improvement of existing snow models. Four years of anisotropy data were used to develop and validate a thermodynamic snow model based on meteorological input data. The model consists of three terms which describe snow settling, temperature gradient metamorphism, and relaxation based on isotropic water vapor transport. The model was calibrated by balancing the three terms in order to reproduce the measured anisotropy time series. The results of the model, vertically resolved anisotropy profiles of the snow pack, were validated with anisotropy profiles determined by computer tomography.

In comparison to the anisotropy, which determines specific properties of the snow volume, the snow water equivalent (SWE) determines how much water is stored in the snow pack. Differential interferometry, where the phase difference of two radar acquisitions separated by a certain time is analyzed, is a promising tool to determine SWE. However, temporal decorrelation of the phase signal is a major drawback of this technique. A decorrelation time of a few days has been observed in space-borne acquisitions from TerraSAR-X which prevents any successful SWE determination. However, using SnowScat as a ground based radar interferometer, it was possible for the first time to measure the accumulation of SWE during four entire winter seasons. A multi-frequency phase unwrapping technique was used for reconstruction of phase wraps which occurred due to intense snow precipitation. The study was performed at exceptionally high frequencies in the X- and Ku-band and with a very high temporal resolution of only 4 hours. The successful demonstration of differential interferometry to determine SWE raises hope to apply the demonstrated technique on data of future radar satellites which operate at longer repeat times of a few days and lower frequencies of a few GHz.

Both methods, the CPD analysis as well as differential interferometry, cannot be

applied for wet snow. Microwave penetration into wet snow is generally small and most of the reflected energy results from scattering at the snow surface. This is interesting for single-pass SAR interferometry, where phase differences are compared, which are measured by two SAR-sensors which simultaneously observe the same scene with slightly different angles. Single-pass SAR interferometry can provide accurate surface models at a horizontal resolution of a few meters. The difference between two digital elevation models (DEM), one obtained during snow free conditions and one obtained during the onset of snow melt, can therefore provide direct information about snow depth. DEM differencing was applied on TanDEM-X acquisitions from spring and autumn and snow depths maps were obtained which agree with the snow-depth-maps provided by the Institute for Snow and Avalanche Research, SLF. A key requirement for successful snow depth estimation is that the snow surface can be recognized as wet. As the backscatter intensity decreases significantly during snow melt, wet snow detection is straight forward and the total accumulated snow depth of wet spring snow can be determined.

This thesis shows that the analysis of the phase signal contained in radar acquisitions provides a broad spectrum of information about the snow pack. The developed method for anisotropy determination provides not only a unique opportunity to improve snow models, but also a method to globally sense the metamorphic state of snow. The currently longest radar-derived time series of SWE measurements raise hope to apply differential interferometry for global SWE determination of dry snow. The shown accuracy for snow depth determination from high frequency, interferometric, single-pass SAR systems demonstrates that such systems are important missions for monitoring changes in snow depth and ice thickness in remote alpine and polar regions in order monitor changes of the global distribution of fresh water stored in the form of ice or snow.

Kurzfassung

Schnee trägt einen wichtigen Teil zur Wasserversorgung von nahezu einem Sechstel der Weltbevölkerung bei und hat einen grossen Einfluss auf den Energiehaushalt der Erde. Schnee bietet lebensnotwendiges Wasser aber bedroht auch Leben in Form von Lawinen und Schmelzwasserfluten. Der Grossteil der schneebedeckten Gebiete der Erde befindet sich in weit entfernten und schwer zugänglichen Regionen, womit es nur mittels Fernerkundungsmethoden möglich ist Schnee über grosse Gebiete hinweg zu beobachten.

Im gesamten elektromagnetischen Spektrum, welches von kilometerlangen Radiowellen bis hin zu ultrakurzwelligigen Gammastrahlen reicht, befinden sich nur drei Fenster im atmosphärischen Absorptionsspektrum durch welche die Erdoberfläche mit Satelliten beobachten werden kann. Zwei davon, welche sich im Sichtbaren und im Infrarotbereich befinden, sind oft verdeckt durch Wolken und atmosphärischen Wasserdampf. Licht wird aber auch an der Schneeoberfläche reflektiert womit es nur erschwert möglich ist, damit Informationen über das Schneevolumen zu gewinnen. Aktive und passive Mikrowellensysteme, welche das astronomische Fenster der Atmosphäre nutzen, besitzen aufgrund ihres Durchdringungsvermögens von Schnee das Potential um volumenspezifische Schneeeigenschaften zu bestimmen.

Ziel dieser Dissertation ist es, aus Phasendifferenzen von Radarsignalen, welche von schneebedeckten Gebieten reflektiert wurden, Schneeeigenschaften wie z.B. die Schneetiefe, die Anisotropie von Schnee, sowie das Schnee-Wasser-Equivalent zu bestimmen.

Heutige Radarsysteme messen nicht nur die Rückstreuintensität von Objekten sondern auch die objekt-spezifische Streuphase. Die Streuphase enthält nicht nur objekt-spezifische Informationen, sondern auch extrem präzise Information über Signallaufzeiten. Phasendifferenzen können durch Beobachtung mit unterschiedlichen Polarisation ermittelt werden, aber auch durch unterschiedliche Beobachtungsgeometrien erzeugt werden, oder aus unterschiedlichen Signallaufzeiten von Messungen zu unterschiedlichen Beobachtungszeiten resultieren.

Auf polarimetrischen Phasendifferenzen basiert eine Methode, welche zur Bestimmung der Tiefe von Neuschnee entwickelt wurde. Hierzu wurden Kopolare Phasendifferenzen (engl. CPD) aus Radaraufnahmen analysiert, welche durch die Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X mit vertikal und horizontal polarisierten Mikrowellen

aufgenommen wurde. Positive Phasendifferenzen konnten durch eine horizontale Anisotropie von Neuschnee erklärt werden, wobei die Ursache der horizontalen Anisotropie durch die Setzung von Schnee begründet wird. Die Differenz der horizontalen und vertikalen Phase ist proportional zur Tiefe von Neuschnee, da die Phasendifferenz proportional zur Anisotropie und zur Länge des im Schnee propagierten Weges der Mikrowellen ist. Durch Validierung von Schneetiefenmessungen im Feld konnte gezeigt werden, dass sich die Tiefe von Neuschnee mit einer Auflösung von unter 100 Metern mit weltraum-gestützten Radarsensoren wie TerraSAR-X bestimmen lässt. Zusätzlich wurde festgestellt, dass sehr kalte Lufttemperaturen zu einer Abnahme der gemessenen Phasendifferenzen führen, da sich die Anisotropie aufgrund von temperaturgradient-bedingtem Schneemetamorphismus verringert oder sogar ihre Orientierung umkehrt.

Der beobachtete Zusammenhang zwischen kopolarer Phase, Neuschnee, Schneesetzung und Temperaturgradientmetamorphismus (TGM) ermöglicht es, die Anisotropie von Schnee kontaktlos und zerstörungsfrei zu beobachten. Die Anisotropie stellt dabei einen Zustand im Umwandlungsprozess von Schnee dar. Die dielektrische Anisotropie, welche durch Mikrowellenmessungen bestimmt werden kann, steht dabei in direktem Zusammenhang mit der struktureller Anisotropie von Schnee, welche für die mechanische Stabilität sowie für die Wärmeleitfähigkeit von Schnee verantwortlich ist. Aufgrund des Zusammenhangs zur thermischen Leitfähigkeit ist die Anisotropie relevant für die Energiebilanz von Schnee und von schneebedeckten Böden. Zur Messung der Anisotropie wurde daher ein streng-physikalisches elektromagnetisches Modell entwickelt, welches parameterfrei einen Zusammenhang zwischen dreidimensionalen Zweipunkt-Korrelationsfunktion der Schneemikrostruktur, dem elektrischen Permittivitätstensor von Schnee, sowie der mittels Radargeräten messbaren kopolaren Phase herstellt. Zur Verifizierung des Modells wurden Radardaten, welche über vier Jahre hinweg mit dem bodengestützten Radargerät SSnowScat in Sodankylä, Finland, aufgenommen wurden, auf die Winkel- und Frequenzabhängigkeit der Kopolaren Phase hin untersucht. Zur Verifikation der mittels Radarmessungen bestimmten Anisotropie wurden Computertomographische Messungen des Schneevolumens verwendet, aus welchen die Anisotropie durch Korrelationsfunktionen bestimmt wurde.

Das einzigartige Datenset, welches die aktuell längste Zeitserie von Anisotropiemessungen an Schnee darstellt, bietet eine neue Basis zur Weiterentwicklung von existierende Schneemodellen. In diesem Sinne wurden die Anisotropiemessungen direkt zur Entwicklung und Validierung eines thermodynamischen Schneemodells verwendet, welches auf meteorologischen Inputdaten basiert. Das entwickelte Modell besteht aus einer Differenzialgleichung mit drei Termen, welche Schneesetzung, Temperaturgradientmetamorphismus, sowie die Relaxation aufgrund von isotropem Wasserdampftransport beschreiben. Durch Gewichtung der drei Terme wurde das Modell so kalibriert, dass es die gemessenen Anisotropie-Zeitserien reproduzieren konnte. Die Ergebnisse des Modells, vertikal aufgelöste Anisotropieprofile, wurden mit Anisotro-

pedaten aus computertomographischen Messungen validiert.

Verglichen mit der Anisotropie von Schnee, welche eine spezifische Eigenschaft eines beliebigen Schneevolumens beschreibt, beschreibt das Schnee-Wasser-Equivalent (SWE), die Gesamtwassermenge, welche in der Schneedecke gespeichert ist. Eine vielversprechende Methode zur Bestimmung des SWE stellt die differenzielle Radarinterferometrie dar, bei welcher die Phasendifferenzen von zwei zu unterschiedlichen Zeiten gemachten Radaraufnahmen verglichen werden. Leider stellt die zeitliche Dekorrelation des Phasensignals einen grossen Nachteil dieser Technik dar. Eine Dekorrelationszeit von wenigen Tagen wurde in TerraSAR-X Aufnahmen beobachtet, was eine erfolgreiche SWE Bestimmung bisher verhindert hat. Trotzdem konnte mit dem als Radarinterferometer verwendeten SSnowScatInstrumentes, erstmals die Akkumulation des SWE über vier Winter hinweg gemessen werden. Zur Rekonstruktion von "Phasewraps", welche während intensivem Schneefall auftreten können, wurde eine Mehrfrequenz-Phasenunwrapping-Technik verwendet. Das Experiment wurde mit einer extrem hohen zeitlichen Auflösung durchgeführt, wodurch die zeitliche Dekorrelation trotz der verwendeten aussergewöhnlich hohen Frequenzen im X- und Ku-Band minimal ist. Die erfolgreiche Demonstration von differenzieller Interferometrie zur SWE-Bestimmung lässt hoffen, dass sich diese Methode auf Daten zukünftiger Radarsatelliten anwenden lässt, welche die Erde mit einer zeitlichen Auflösung von einigen Tagen bei Frequenzen von mehreren GHz beobachten.

Beide beschriebenen Methoden, die Analyse der kopolaren Phase sowie die differenziellen Interferometrie, sind nicht für nassen Schnee anwendbar. Die Mikrowelleneindringtiefe in nassen Schnee ist bei Frequenzen von mehreren GHz gering womit der Grossteil der reflektierten Energie aus der Streuung an der Schneeoberfläche stammt. Dies ist interessant für Single-pass Interferometrie, bei welcher diejenigen Phasendifferenzen verglichen werden, die von zwei SAR-Sensoren aus leicht unterschiedlichen Winkeln gleichzeitig über dem selben Gebiet gemessen wurden. Mittels Single-pass Interferometrie ist es somit möglich, präzise Höhenmodelle mit einer horizontalen Auflösung von wenigen Metern zu erzeugen. Aus dem vertikale Unterschied von zwei Höhenmodellen, wobei eines während schneefreien und eines während der Schneeschmelze aufgenommen wurde, kann damit direkt auf die Schneetiefe geschlossen werden. Die Differenz zweier Höhenmodelle, welche aus TanDEM-X Aufnahmen von Frühjahr und Herbst erzeugt wurden, ermöglichte es Schneetiefekarten zu erzeugen, welche mit den Schneetiefekarten des Schweizer Schnee- und Lawinenforschungsinstitutes übereinstimmen. Eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Schneetiefenabschätzung ist eine erkennbar nasse Schneeoberfläche. Nassschnee ist jedoch unmittelbar aus Radaraufnahmen abzuleiten, da die Rückstreuintensität für nassen Schnee signifikant reduziert ist.

Diese Dissertation zeigt, dass die Analyse von Phasensignalen aus Radaraufnahmen ein breites Spektrum an Informationen über die Schneedecke liefern kann. Die entwickelte Methode zur Anisotropiebestimmung bietet nicht nur eine einzigartige

Möglichkeit um Schneemodelle zu verbessern, sondern ermöglicht es auch, einen Umwandlungszustand von Schnee global zu vermessen. Die momentan längsten gemessenen Zeitserien des Schnee-Wasser-Equivalentes machen Hoffnung darauf, dass differenzielle Radarinterferometrie verwendet werden könnte, um global das Wasseräquivalent von Schnee zu bestimmen. Die gezeigte Präzision zur Schneetiefenbestimmung und zur Messung von Eisdickenänderungen mittels Radar Single-pass Interferometrie demonstriert, dass derartige Systeme wichtige Satellitenmissionen darstellen, um Änderungen von Schnee und Eis in abgelegenen alpinen und polaren Regionen zu beobachten. Derartige Missionen bilden ein wichtiges Instrument zur Beobachtung von Änderungen in der räumlichen Verteilung von Trinkwasser, welches in Form von Schnee und Eis gespeichert ist.