



Carlos Alberto Cárdenas Mansilla (Autor)
**Hochaufgelöste Hochfrequenzsensoren für
geophysikalische und glaziologische Anwendungen**

Carlos Alberto Cárdenas Mansilla

**Hochauflösende Hochfrequenzsensoren
für geophysikalische und glaziologische
Anwendungen**

 Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2008>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

Die ursprüngliche Anwendung des Radars ist die Entdeckung von Zielen durch das reflektierte Signal und die Bestimmung der Zielentfernung durch die Messung der Signallaufzeit zwischen Sender und Empfänger. Dieses Verfahren wurde beispielweise zur Messung des Abstandes von Flugzeugen zum Boden ausgenutzt.

Aber schon 1933 wurde eine Ursache für Messfehler von Radarhöhenmessern in Flugzeugen, die über den polaren Eiskappen flogen, erkannt: Das Radarsignal wird nicht total an der Oberfläche reflektiert, sondern dringt in das Eis ein und wird erst vom Untergrund des Eises total reflektiert [9]. Diese Erkenntnis führte zu der Entwicklung von Radarsystemen nicht nur zur Bestimmung der Eismächtigkeit, sondern auch zur Untersuchung eisinterner Reflexionshorizonte. Damit steht heute neben seismischen Messverfahren, wie der Gravimetrie und Magnetometrie, eine relativ einfach zu handhabende Messmethode zur Untersuchung nicht nur der polaren Eiskappen, sondern auch von Gletschern zur Verfügung [16].

Für die Klimaforschung ist die Untersuchung und Beobachtung der polaren Eiskappen von großer Bedeutung. Dafür sind die Georadargeräte effektive Systeme, da man vom Satelliten zwar die Oberfläche des Eises vermessen kann, nicht aber dessen Mächtigkeit. Die Verwendung solcher Radargeräte für oberflächennahe Bodenuntersuchungen war nur ein kleiner Entwicklungsschritt, sind doch die physikalischen Eigenschaften von trockenem, kaltem Eis denen von relativ trockenen Böden sehr ähnlich.

Betrachtet man die Verteilung der Wasservorräte auf der Erde, speziell die des Süßwassers, wird die Notwendigkeit eines geeigneten Explorationsinstruments für Grundwasservorkommen schnell deutlich. Aus einem Bericht der UNO¹ vom August 2002 wird die weltweite Verteilung der Trinkwasservorräte deutlich. 71% der Erdoberfläche ist von Wasser bedeckt, jedoch von Salzwasser. Mit dem Wachstum der Weltbevölkerung braucht man immer mehr Trinkwasser, aber auch für die Industrie und die Energiewirtschaft [19].

Aus der Tabelle 1.1 kann man sehen, wie viele Wasservorräte die Erde hat [1]. Ein Anteil von nur 3,46% ist Süßwasser, und ungefähr die Hälfte der weltweiten Süßwasservorräte sind in Eis und Schnee gebunden. Das Volumen des Süßwassers, das in den Eisschilden der Antarktis und Arktis, in Meereis, den Gebirgsgletschern, in Permafrostböden² und in den permanenten sowie saisonalen Schneefeldern vorkommt, beträgt $24.364.100 \text{ km}^3$. Das

¹ United Nations Organization

² Material, das eine Temperatur unter 0 °C für mehr als 2 Jahre zeigt [12]

Teil der Hydrosphäre	Wasservolumen (km^3)	Anteil (%)
Total	1.385.984.610	100
davon Süßwasser	47.764.100	3,46
Weltmeer	1.338.000.000	96,54
Eis und Schnee	24.364.100	1,76
Grundwasser (süß)	10.530.000	0,76
Grundwasser (Saltz, mineralisiert)	12.870.000	0,93
Oberflächengewässer	189.990	0,013
Bodenfeuchte	16.500	0,001
Atmosphäre	12.900	0,001
Organismen	1.120	0,001

Tabelle 1.1: Die Wasservorräte der Erde [5]

sind ungefähr 70% der gesamten Trinkwasservorräte der Erde. Die Tabelle 1.2 zeigt die Verteilung der im Eis gebundenen Süßwassermenge. Die andere wichtige Trinkwasserreserve ist das Grundwasser mit ca. $10.530.000 km^3$ [1].

Allein aus diesen Zahlen wird die Notwendigkeit klar, die exakte Lage von Trinkwasservorkommen auf der Erde in Zukunft erforschen zu können. Zum Beispiel wird der Trinkwasserbedarf der chilenischen Hauptstadt Santiago de Chile zu großen Teilen aus den Abflüssen der im Sommer abschmelzenden Andengletscher gedeckt. Im Salar de Atacama im Norden von Chile, einem der trockensten Gebiete der Welt, ist die Trinkwasserversorgung und die Versorgung großer Kupferminen mit Brauchwasser ganz auf die relativ tief liegenden Grundwasservorkommen angewiesen, deren Lage nur an wenigen Orten durch das Absenken von Bohrungen bekannt ist.

Für die Untersuchung der polaren Eiskappen wurde bereits am Institut für Hochfrequenztechnik der TUHH ein Pulsradar entwickelt, das in der Lage ist, Eisschichten bis zu einer Dicke von 4000 Metern mit einer Messgenauigkeit von fünf Metern zu vermessen [15]. Diese Entfernungsauflösung ist jedoch für die genauere Bestimmung der Lage von Grundwasserhorizonten nicht ausreichend. Es war daher erforderlich, ein neues Messsystem zu entwickeln, das bei gleicher maximaler Messtiefe eine höhere Entfernungsauflösung erreicht.

1.1 Ziel dieser Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau eines Radarsystems mit einer Entfernungsauflösung kleiner als 1 m zur Anwendung von einem Hubschrauber oder einem Flugzeug aus für geophysikalische und glaziologische Anwendungen. In dieser Arbeit werden unterschiedliche

Vorkommen	Wasservolumen (km^3)	Anteil (%)
Polareis, Meereis, Gletscher, Schnee	24364100	68,7
davon:		
Antarktis	21600000	(61,7)
Grönland	2340000	(6,68)
Arktische Inseln	83500	(0,24)
Gletscher	40600	(0,12)
Bodeneis	300000	0,86
Grundwasser (süß)	10530000	30,1
davon:		
bis 100 Meter Tiefe	3600000	(12,6)
Bodenfeuchte	16500	0,05
Süßwasserseen	91000	0,26
Moore, Sümpfe	11470	0,03
Flüsse	2120	0,006
Organismen	1120	0,003
Atmosphäre	12900	0,04
Total	35029210	100

Tabelle 1.2: Die Verteilung der Süßwasser-Reserven der Erde [5]

Radarverfahren für geophysikalische und glaziologische Anwendungen miteinander verglichen. Da für die Untersuchung großer Testgebiete die Verwendung solcher Systeme von einem Hubschrauber oder einem Flugzeug aus von großer Bedeutung ist, wird auch die Verwendbarkeit der untersuchten Radarsysteme von einer fliegenden Plattform aus mit berücksichtigt. Um nähere Informationen über die inneren Strukturen des untersuchten Untergrundes durch das Radarsystem zu erlangen, muss man zwischen Entfernungsauflösung und Reichweite einen Kompromiss eingehen, weil sowohl eine hohe Entfernungsauflösung als auch eine akzeptable Reichweite notwendig sind. Es ist daher sehr wichtig, diesen Kompromiss zu untersuchen, um ein optimales Radargerät für oberflächennahe und -ferne Bodenuntersuchungen zu entwickeln.

Diese Arbeit zeigt zunächst die theoretische Untersuchung von FMCW- und Stepped-Frequency-Radar mit einer deutlich besseren Tiefenauflösung als sie mit einem Pulsradar zu erreichen ist. Weiterhin wird in dieser Arbeit ein FMCW -Radar mit einer Tiefenauflösung, von besser als zwei Metern entworfen und aufgebaut, das im Frequenzbereich zwischen 200 und 400 MHz arbeitet. Dieses Gerät kann sowohl auf einem Flugzeug als auch auf einem Hubschrauber installiert werden, um umfangreiche Untersuchungen über großen Testgebieten durchzuführen. Es wird der Entwurf des gesamten Systems - breitbandige Antenne, Sender und Empfänger, Datenerfassung und - Darstellung - sowie die Simulation

der zu erwartenden Messergebnisse dargestellt. Erste Ergebnisse von einer Messkampagne in der Atacama Wüste in Chile und einer Antarktiskampagne werden vorgestellt und diskutiert.

1.2 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 wird kurz die Geschichte vom Anfang des Radars und sein Gebrauch für Eismessungen dargestellt und einige interessante Arbeiten mit hoch auflösenden Messsystemen vorgestellt. Das dritte Kapitel beschreibt die Grundlagen von solchen Radarsystemen, die als hoch auflösende Sensoren für geophysikalische und glaziologische Anwendungen in Frage kommen. Zwei dieser möglichen Systeme, frequenzmoduliertes Dauerstrichradar (FMCW) und Stepped-Frequency-Radar (SFR) werden in Kapitel 4 näher vorgestellt und ihre Theorie genauer beschrieben. Für die theoretische Untersuchung dieser beiden Systeme wurde ein Programm entwickelt, das unter Berücksichtigung der verschiedensten Parameter, eine Untersuchung der Messmöglichkeiten beider Systeme in einem möglichst wirklichkeitsnah simulierten Messszenario durchgeföhrt. Dieses Szenario wird in Kapitel 5 beschrieben und die simulierten Messergebnisse werden vorgestellt und diskutiert. Am Ende dieses Kapitels wird schließlich der Bau und Test eines FMCW Systems beschlossen. Das sechste Kapitel beschreibt den Aufbau des kompletten FMCW Sensors, wie er dann auch für die in Kapitel 7 beschriebenen Test- und Feldmessungen verwendet wurde. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der ersten Feldmessungen, die in der Atacama Wüste, Chile im Sand, und in der Antarktis im Eis durchgeföhrt wurden, vorgestellt und diskutiert. Kapitel acht gibt eine abschließende Zusammenfassung und einen Ausblick auf notwendige Weiterentwicklungen und eventuelle Erweiterungen des in dieser Arbeit entwickelten FMCW Sensors.

2 Hintergrund

Die Benutzung von elektromagnetischen Wellen für geophysikalische Untersuchungen beginnt gleichsam am 30.04.1904 mit dem Patent DE 165 546 [17] des Radars von **Christian Hülsmeier**. In diesem Patent beschreibt er eine Dauerstrichwelle, die die Reflexion der elektromagnetischen Welle von fernen, metallischen Zielen detektiert [14]. Danach haben **Gotthelf Leimbach und Heinrich Löwy** am 15.10.1910 eine ähnliche Methode für geologische Anwendungen mit dem Patent DE 237 944 angemeldet. Dieses Patent beschreibt die Verwendung von zwei parallelen Dipolantennen über dem Boden, mit denen man durch Veränderung der Wellenlänge der ausgesandten Strahlung und durch die Beobachtung der entstehenden Interferenzmaxima und -minima das Vorhandensein und die Tiefe von reflektierenden Flächen hätte bestimmen können [17]. Erst weitere Patentschriften dieser Erfinder erschließen dieses Verfahren für geophysikalische Anwendungen. Das erste Impulsradar - Verfahren wurde 1926 für Dr. Hülsenbeck patentiert.

Die Messungen von Eisdicken beginnt nach 1933, als in mehreren Antarktisberichten über Höhenmessfehler von Radarhöhenmessern in Flugzeugen, die über Eis flogen, berichtet wird. Die Erklärung war, dass ein Teil der Sendeleistung in das Eis eindringt und der Reflex von dem Trennfläche Eis-Stein unter dem Eis als eine falsche Eisoberfläche interpretiert wird [9]. Dann beweist 1957 eine Forschergruppe um Waite [18], dass man mit einem Radarhöhenmesser die innere Struktur von Gletschern erkunden kann.

Eis ist im Vergleich zu anderen Materialien durchsichtig für elektromagnetische Wellen. Seit 1957 werden Radargeräte benutzt, um den Eisuntergrund über große Entfernungen zu untersuchen [16]. In der Literatur werden verschiedene Radarsysteme beschrieben, mit denen die inneren Strukturen des Untergrundes bestimmt werden können. Eine Zusammenfassung alternativer, neuer Radarsysteme mit hoher Entfernungsauflösung wird im Folgenden kurz vorgestellt.

In der Literatur gibt es verschiedene Radarsysteme, mit denen man innere Strukturen eines Mediums bestimmen kann. Im Rahmen einer Dissertation an der Queensland Universität, Australien, wurde 1996 ein **Stepped-Frequency Radar** mit hoher Entfernungsauflösung entwickelt, um dünne Schichten von Kohle zu untersuchen. Die Reichweite des Gerät beträgt 1 m und die Entfernungsauflösung fünf Zentimeter [7]. 1999 entwickelt eine Gruppe der Kansas Universität von Kansas, USA, ein **Wideband Frequency Modulated Continuous Wave Radar**, um vulkanische Ablagerungen im Eis mit hoher Entfernungsauflösung bis zu 200 Meter Tiefe zu untersuchen [11]. 2002 wurde an der

Kansas Universität ein **FM-CW Radar** mit hoher Entfernungsauflösung für glaziologische Forschungen mit einer Entfernungsauflösung von weniger als 1 m und einer Reichweite von 100 Meter entwickelt [10].

1995-1999 wurden am Institut für Hochfrequenztechnik an der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) zwei Pulsradare zur Untersuchung der polaren Eiskappen entwickelt und aufgebaut (Max. Messtiefe im Eis ca. 4000 m, Tiefenauflösung 5 m). Beide Systeme werden seitdem vom Alfred -Wegner -Institut in Bremerhaven (AWI) und von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover (BGR) regelmäßig für Forschungsvorhaben in der Arktis bzw. Antarktis mit großem Erfolg vom Flugzeug oder auch vom Hubschrauber aus eingesetzt [15].

Der Wunsch der BGR, mit einem solchen Radar auch oberflächennahe Bodenuntersuchungen durchzuführen, führte mit dieser Arbeit zu der Entwicklung eines FMCW Radargerätes mit deutlich besserer Tiefenauflösung als bei den bestehenden Pulsradargeräten.

3 Grundlagen eines Radars

3.1 Einleitung

Das Radar ist ein Fernerkundungssystem, das elektromagnetische Wellen benutzt, um den Ort oder die Geschwindigkeit eines Zieles zu bestimmen oder das Ziel zu charakterisieren [4]. Es hat im Vergleich mit dem menschlichen Auge große Fähigkeiten, hat aber nicht die Anpassungsfähigkeit des menschlichen Auges, um Einzelheiten aufzulösen [14].

Das Radarsystem ist zusammengesetzt aus einem Sender, Empfänger, den Antennen und dem Datenerfassungssystem. Das Blockschaltbild zeigt Abb. 3.1. Das Sendergerät besteht aus einem Frequenzgenerator, der das Sendesignal erzeugt, einer Modulator, der die gewünschte Signalform generiert, einem Filter, um unerwünschte Frequenzkomponenten zu eliminieren, dem Sendeverstärker und der Sendeantenne. Der Empfänger besteht aus der Empfangsantenne mit nachgeschaltetem, rauscharem Vorverstärker und Eingangsfiler und dem Mischer, der das Empfangssignal in geeigneter Weise auf die Zwischenfrequenz umsetzt. Im Datenerfassungssystem wird das Zwischenfrequenzsignal digitalisiert, auf einem Speichermedium gespeichert und in geeigneter Weise zur Darstellung gebracht.

Die Zwei-Wege-Laufzeit τ , die das Signal von der Sendeantenne zum Ziel und wieder zurück zur Empfangsantenne benötigt, wird bei Entfernungsmessungen mit bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit v im zu untersuchenden Medium gemäß

$$\tau = \frac{2R}{v} \quad (3.1)$$

zur Berechnung der Zielentfernung R verwendet.

3.2 Die Radargleichung

Die Fähigkeit eines Radarsystems, ein Ziel zu entdecken, wird durch die Radargleichung beschrieben [6]. Die Sendeleistung P_s , abgestrahlt über eine Sendeantenne mit dem Gewinn G_s , erzeugt in der Entfernung R die Leistungsdichte S_s gemäß

$$S_s = \frac{P_s G_s}{4\pi R^2} \quad (3.2)$$

Mit dem effektiven Rückstrahlquerschnitt σ_o des Zieles und der effektiven Wirkfläche A_e der Empfangsantenne lässt sich die Empfangsleistung P_e an der Empfangsantenne

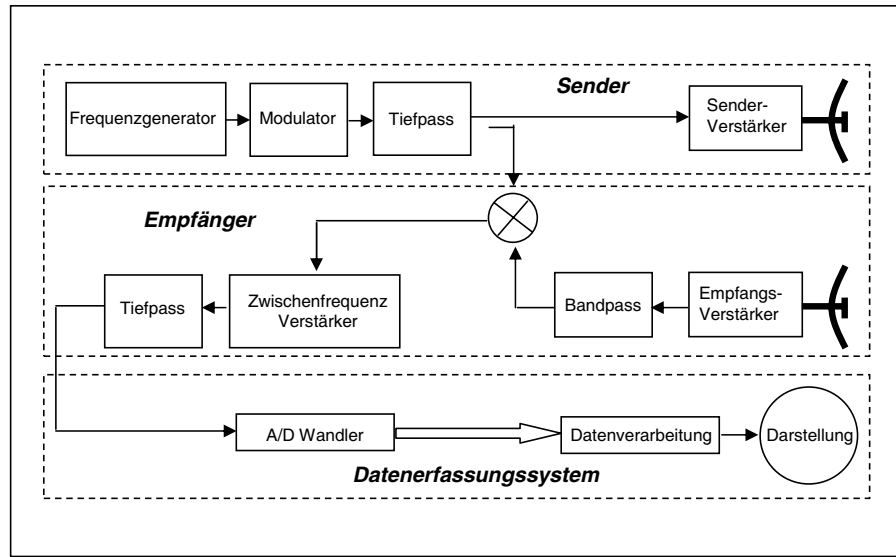


Abbildung 3.1: Blockschaltbild eines einfachen Radarsystems

schreiben als

$$P_e = \frac{P_s G_s}{4\pi R^2} \frac{\sigma_o}{4\pi R^2} \frac{1}{L} A_e \quad . \quad (3.3)$$

Darin sind L die Signalverluste auf dem Ausbreitungsweg des Signals. Mit der Beziehung zwischen Wirkfläche der Empfangsantenne A_e und Gewinn der Empfangsantenne G_e

$$G_e = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (3.4)$$

ergibt sich die Leistung an der Empfangsantenne zu

$$P_e = \frac{P_s G^2 \sigma_o \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad , \quad (3.5)$$

wobei angenommen wurde, dass G_e gleich G_s gleich G gilt.

Das Empfangssignal wird immer durch Rauschen gestört sein. Mit B_N der Rauschbandbreite des Empfängers, T_R seiner Rauschtemperatur, F der Rauschzahl des Empfängers und k_B der Boltzmannkonstante ($k_B = 1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$), definiert man die effektive Rauschleistung des Empfängers zu

$$N = k_B T_R B_N F. \quad (3.6)$$

Damit kann man das Signal- Rauschverhältnis am Ausgang des Empfängers durch

$$SNR = \frac{P_e}{N} = \frac{P_s G^2 \sigma_o \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 N L} \quad (3.7)$$

beschreiben.

Aus der Gleichung 3.7 kann man die maximale Reichweite des Radarsystems berechnen.

$$R_{max} = \left(\frac{P_s G^2 \sigma_o \lambda^2}{(4\pi)^3 N (SNR) L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.8)$$

3.3 Radarverfahren für geophysikalische Anwendungen

Für die Anwendung als Georadar bieten sich unterschiedliche Radarverfahren an. Die wichtigsten Auswahlkriterien für eine vorgegebene Anwendung sind die Reichweite und die Entfernungsauflösung, d. h. die Fähigkeit eines Radars, zwei Ziele voneinander zu unterscheiden. So ist zum Beispiel für ein Radargerät zur Untersuchung oberflächennaher Bodenschichten eine hohe Entfernungsauflösung von größerer Bedeutung als die Reichweite, und ein Radargerät zur Vermessung der polaren Eiskappen mit einer Mächtigkeit von 4000 m muss in erster Linie eine hohe Reichweite aufweisen.

Unabhängig vom Typ des verwendeten Radars wird die Reichweite in erster Linie durch die Radargleichung (3.8) bestimmt. Eine hohe Signaldämpfung L , wie sie zum Beispiel bei der Vermessung von Gletschern auftritt, lässt sich, in gewissen Grenzen, durch eine höhere Sendeleistung P_s oder durch einen höheren Gewinn G der Antennen ausgleichen. Wie im Weiteren noch gezeigt wird, ist die Entfernungsauflösung bestimmt durch die Bandbreite des verwendeten Messsignals. Aber auch systembedingte Parameter, wie z. B. der Pulsabstand beim Pulsradar oder die Breite des Pulses selbst, bestimmen maßgeblich die eindeutige Reichweite und haben ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die Entfernungsauflösung eines Radarsystems.

Im Folgenden sollen die für Georadare in Frage kommenden Radarprinzipien und der Einfluss ihrer Systemparameter auf Reichweite und Entfernungsauflösung kurz vorgestellt werden.

3.3.1 Das Impulsradar

Das Impulsradar erzeugt einen periodisch wiederholten schmalen Puls (Pulsbreite zwischen 0,25 und 1 ns) sehr hoher Amplitude. Zur Bestimmung der Zielentfernung wird die Zwei-Wege-Laufzeit τ des Echos herangezogen. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit v im Medium errechnet sich die Zielentfernung zu

$$R = \frac{v\tau}{2} \quad . \quad (3.9)$$

Die maximale Reichweite des Impulsradars wird zunächst durch Gleichung 3.8 bestimmt. Jedoch hat der zeitliche Abstand $T_{Pulsabstand}$ der einzelnen Pulse zueinander eine