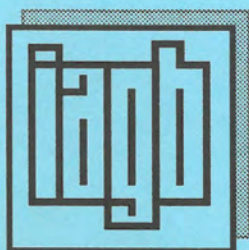


Universität Stuttgart



Schriftenreihe der Institute des Fachbereichs Vermessungswesen

Technical Reports
Department of Geodesy



Ulrich Kälberer

Untersuchungen zur
flugzeuggetragenen
Radaraltimetrie

ISSN 0933-2839

Report Nr. 1997.2

Untersuchungen zur flugzeuggetragenen Radaraltimetrie

Von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.- Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dipl. Ing. Ulrich Kälberer
aus Hannover

Hauptberichter :	Prof. Dr. - Ing. Ph. Hartl
Mitberichter:	Prof. Dr. - Ing. D. Fritsch
Tag der Einreichung:	02.12.96
Tag der mündlichen Prüfung:	13.02.97

Institut für Navigation der Universität Stuttgart
1997

Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Einleitung

1.1 Überblick Radarsensoren	1
1.2. Einsatzmöglichkeiten des Radaraltimeters	4
1.3 Zielsetzung der Arbeit	6

2. Altimeterplattform

2.1 Radaraltimeter	11
2.1.1 Radarverfahren	13
2.1.2 Leistungsbilanz	15
2.1.3 Systemreichweite	18
2.1.4 Linearitätsverhalten	19
2.2. Datenaufzeichnung	23
2.2.1 Zeitsynchronisation	24
2.2.2 Echtzeitauslegung der Recordersoftware	25
2.2.3 Speicherstrategie	28
2.2.4 Programmstruktur	30
2.2.5 Datenprozessierung	32
2.2.6 Extraktion von Bodenpunkten	36
2.3. Systemanalyse	
2.3.1 Kalibrierung der Höhenmessung	41
2.3.2 Systemgenauigkeit	44
2.3.3 Höhenfehler	46
2.3.4 Richtdiagramme der Sende- und Empfangsantenne	48
2.3.5 Kalibrierung der Rückstreumessung	50

3. Empirische Untersuchungen

3.1. Befliegung Andechs	60
3.1.1 Auswertung der Radarmessung	63
3.1.2 Profilspur	64
3.1.3 Genauigkeitsuntersuchungen	65
3.1.4 Profilvergleich	67

3.2	Befliegung Neugilching	68
3.2.1	Auswertung der Radarmessung	70
3.2.2	Profilspur	72
3.2.3	Genauigkeitsuntersuchungen	73
3.3	Befliegung Woerthsee	76
3.3.1	Auswertung der Radarmessung	77
3.3.2	Profilspur	79
3.3.3	Kartenvergleich	80
3.3.4	Genauigkeitsuntersuchungen	82
3.3.5	Profilvergleich	85
3.4	Befliegung Bonn	86
3.4.1	Auswertung der Radarmessung	87
3.4.2	Profilspur	89
3.4.3	Kartenvergleich	90
3.5	Ergebnis	92

4. Untersuchung der Radarmessung

4.1	Höhenmessung	
4.1.1	Ebene Fläche	94
4.1.2	Wasserfläche	95
4.1.3	Gebäude mit Flachdach	97
4.1.4	Gebäude mit Schrägdach	98
4.1.5	Metallische Objekte	99
4.1.6	Wald	101
4.1.7	Felder	102
4.1.8	Rauhigkeit	103
4.1.9	Untersuchung der Rauhigkeitsmessung	106
4.2	Rückstreumessung	
4.2.1	Rückstreuquerschnitt	109
4.2.2	Untersuchung der Rückstreumessung	111
4.2.3	Vergleiche der Rückstreukoeffizienten	113
4.2.4	Abhängigkeit des Rückstreukoeffizienten von der Rauhigkeit	117
4.2.5	Abhängigkeit des Rückstreukoeffizienten von den diel. Eigenschaften	119

4.3 Modellbildung für verteilte Ziele	
4.3.1 Modellansätze	121
4.3.2 Leistungsdichteverteilung des Sendefeldes	124
4.3.3 Reflexion an den Flächenelementen	126
4.3.4 Leistungsdichteverteilung des Empfangsfeldes	128
4.3.5 Modelluntersuchungen Geländeanstieg	129
4.3.6 Modelluntersuchungen Hechendorf	131
5. Zusammenfassung	139
6. Literaturverzeichnis	141

1. Einleitung

1.1 Überblick Radarsensoren

Die Fernerkundung hat sich in den zurückliegenden Jahren durch die satellitengetragenen und flugzeuggetragenen Sensoren mit großer Geschwindigkeit weiterentwickelt. Dazu haben unter anderen auch die Radarsensoren einen wesentlichen Beitrag geleistet. Die neueren Entwicklungen von Fernerkundungssensoren lassen den Bedarf nach größerem räumlichen Auflösungsvermögen erkennen. Allerdings führt die Verbesserung der Auflösung auch zu einer Vervielfachung der Datenmenge. Damit verbunden sind Probleme der Echtzeitaufzeichnung und der Bereitstellung leistungsfähiger Datenverarbeitungsanlagen beim Nutzer. Die aktiven Radarsensoren lassen sich nach Elachi / 1 / grundsätzlich in drei Klassen gliedern:

Altimeter erfassen die Entfernung zwischen Meßplattform und überflogenem Gelände. Dies läßt sich durch die hochgenaue Zeitintervallmessung, die ein Puls für diese Zweiwegentfernung benötigt, erreichen. Ist die Flugzeugposition und Orientierung bekannt, so kann durch die gemessene Altimeterentfernung die Geländehöhe ermittelt werden. Dadurch werden die Höhenmesser, die bisher vorwiegend als Navigationsinstrument Verwendung fanden, zu einem geodätischen Instrument erweitert, das eine hochgenaue Topographievermessung erlaubt.

Scatterometer stellen ein nicht abbildendes Radarsystem dar, das die Streu- oder Reflexionseigenschaften von Oberflächen mißt. Ein Scatterometer erfaßt hochgenau die Rückstreuungseigenschaften in Abhängigkeit vom Raumwinkel, von der Frequenz oder von der Polarisation. Daraus kann unter anderem die Oberflächenrauigkeit abgeleitet werden. Die räumliche Auflösung steht bei der Auslegung von Scatterometern nicht unbedingt im Vordergrund, dafür aber die Meßgenauigkeit der Reflexionsleistung / 2 /.

Abbildende SAR-Systeme erfassen in hochaufgelöster Form die reflektierten Leistungen der Geländeoberfläche. Sie werden eingesetzt, um geologische Strukturen, Meeresoberflächen, Eisbedeckung oder Landnutzung zu erfassen. Beim SAR wird die hohe Auflösung der Geländeaufnahmen erreicht, indem die rückgestreute Leistung von einer Auflösungszelle an aufeinander folgenden Antennenpositionen prozessiert wird. Durch diese synthetische Apertur erhält man eine derart kleine Auflösungszelle, wie sie mit einer Antenne mit realer Apertur nicht mehr zu erreichen wäre.

Hinsichtlich der prinzipiellen Funktionsweise ergeben sich für satellitengetragene oder flugzeuggetragene Systeme keine Unterschiede. Oft ist vielmehr die flugzeuggetragene Version der Prototyp zur Erprobung für die satellitengetragene Version. Trotzdem wird beim folgenden Überblick über den Stand der Technik an der üblichen Unterscheidung zwischen flugzeuggetragenen und satellitengetragenen Systemen festgehalten. Tabelle 1.2 gibt einen

Überblick über die satellitengetragenen Radaraltimeter.

Tabelle 1.2: satellitengetragene Altimeter

Plattform	Start	Auflösung	Sendeleistung	Frequenz (GHz)	Beamlim. Footprint	Pulslim. Footprint
GEOS-3	1975	50 cm	2000 W	13.9	38 km	3.5 km
Seasat	27.06.78	10 cm	2000 W	13.5	22 km	1.7 km
Geosat	1985	5 cm	20 W	13.5	29 km	1.7 km
ERS-1	17.07.91	5-7 cm	55 W	13.8	18 km	1.7 km
Topex	10.08.92	2.4 cm	20 W	13.6 / 5.3	26/56 km	2.2 km
ERS-2	27.04.95	5-7 cm	55 W	13.8	18 km	1.7 km
Priroda	26.04.96	10 cm	40 W	13.76	13 km	2.3 km

Die erste satellitengestützte Beobachtung der Ozeane wurde mit den Mikrowellensensoren von SEASAT durchgeführt. Die SEASAT-Plattform führte unter anderem einen SAR Sensor, ein SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) zur Bestimmung der ozeanischen Oberflächentemperatur und ein Radaraltimeter zur Bestimmung von Meeresoberflächenprofilen mit. Leider wurde diese Mission nach kaum mehr als 100 Tagen durch einen Fehler in der Stromversorgung vorzeitig beendet. Die SEASAT - Altimeterdaten lieferten erstmals genaue Karten der ozeanischen Topographie und ermöglichten die Auswertung von Meeresströmungen und Windgeschwindigkeiten.

Das Satellitenradaraltimeter der GEOSAT-Plattform (Tabelle 1.2) hat vergleichbare Spezifikationen wie SEASAT. Das Hauptziel dieser Mission war die Erarbeitung eines dichten globalen Netzes von Höhendaten, die zur Erweiterung der Gravitationsmodelle der Erde beitragen. Die Gravitationsmodelle sind unter anderem die Grundlage für die Voraussage der genauen Satellitenbahnen.

Die Topex-Poseidon Plattform (Topographic Experiment for Oceanic Circulation) ist eine wissenschaftliche Mission der NASA (JPL) und CNES (Frankreich). Die Plattform verfügt neben dem Radaraltimeter, das die Aufnahme der Meerestopographie bewerkstelligt, über ein TMR (Topex Microwave Radiometer), das den Wasserdampfdruck bestimmt und einen GPS Demonstration Receiver.

Die ERS-1 und ERS-2 Plattformen der ESA sind zu großen Teilen ähnlich strukturiert und beinhalten folgende Sensoren: AMI (Active Microwave Instrument), das einen SAR-Sensor und ein Scatterometer umfaßt, ATSR (Along Track Scanning Radiometer), GOME (Global Ozone Monitoring Experiment), PRARE (Precise Range and Rate Equipment) und ein RA (Radar Altimeter). Das Radaraltimeter (Tabelle 1.2) liefert Höhendaten der Ozeane und des Polareises,

detektiert Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten. ERS-1 und ERS- 2 Daten decken ein breites, wissenschaftliches Anwendungsspektrum ab: geomorphologische Studien und Meerestopographie im Rahmen des PIPOR Programms (Programm for International Polar Ocean Research), des weiteren Untersuchungen bezüglich Meteorologie und Physik der Atmosphäre. Studien über polare Eisbedeckung sind im PISP (Polar Ice Sheet Proposal) vertreten. ERS-1 und ERS-2 werden zur Zeit in einer Tandem Mission geflogen, wobei der ERS-2 Satellit unter eintägigem Versatz dieselben Szenen wie der ERS-1 Satellit aufzeichnet. Dadurch ergeben sich für die interferometrische Auswertung der SAR-Bilder wertvolle neue Möglichkeiten. Diese Bildpaare ermöglichen eine wesentlich präzisere Ableitung der Geländehöhe, als die bisherigen SAR-Szenen, die aus dem 35 Tage Repeat-Orbit stammen.

Die russische PRIRODA Plattform (IRE, Moskau) verfügt unter anderem über die passiven Mikrowellensensoren IKAR, die die Strahlung der Ozeane aufnehmen, den SAR Sensor TRAVERS und das Radaraltimeter GREBEN. Das Radaraltimeter mit den in Tabelle 1.2 angeführten Leistungsdaten, hat unter anderem die Aufgabe die Meerestopographie zu vermessen und die Wellenhöhe aufzuzeichnen.

Für alle Aufgaben, die ein hohes räumliches Auflösungsvermögen verlangen, kommen heute flugzeuggetragene Systeme zum Einsatz. Diese Aufnahmen sind jedoch im Vergleich mit Satellitenaufnahmen hinsichtlich der erfaßten Fläche pro Szene um Größenordnungen kleiner. Für Fragestellungen, bei denen die schnelle Erfassung von Phänomenen in ihrer zeitlichen und räumlichen Veränderung eine Rolle spielt, ist der Einsatz von flugzeuggetragenen Systemen unabdingbar. Flugzeuggetragene Sensoren bieten den Vorteil des flexiblen zeitlichen Einsatzes, beispielsweise wenn zu bestimmten Wetterbedingungen oder zu bestimmten Ereigniszeitpunkten Aufnahmen gemacht werden müssen.

Der Stand der Technik soll im speziellen die flugzeuggetragene Radaraltimetrie beleuchten, auch wenn das allgemeine technische Interesse sonst eher bei den SAR Systemen liegt. Zwar existieren mehrere Systeme, jedoch hinsichtlich der technischen Eigenschaften sind nur das HUTSCAT- und das MARA - System mit gewissen Einschränkungen mit dem in der vorliegenden Arbeit untersuchten AMAP-System vergleichbar. Die technischen Daten der Systeme sind in Tabelle 1.4 zusammengefaßt:

Das HUTSCAT der Universität Helsinki verfügt, wie das Radaraltimeter AMAP über Altimeter- und Scatterometereigenschaften. Es wurde im Hinblick auf die Erfassung von Waldvolumen, Meeresvereisung und Schneebedeckung als Einsatzgebiete entwickelt / 6 /.

Von der NASA wurde das MARA (Multimode Airborne Radar Altimeter) entwickelt um hochgenaue Land-, See- und Eisvermessungen durchzuführen. Es wurde als scannendes Altimeter ausgeführt und verfügt über einen ausgesprochen kleinen Footprint von 3 m / 7 /.

Das ARMAR (Airborne Rain Mapping Radar) wurde vom JPL im Hinblick auf eine spätere satellitengetragene Plattform entwickelt. Es soll über den Tropen zur Regenmengenbestimmung im Rahmen des TRMM Projekts eingesetzt werden.

Das E-SLAR (Experimental Side-Looking Airborne Radar) ist ein experimentelles System der DLR, Oberpfaffenhofen. Es wird eingesetzt, um Ölverschmutzung auf Meeresoberflächen zu detektieren. Des weiteren können aus den Meßdaten Landnutzungsklassifizierungen durchgeführt werden / 5 /.

Tabelle 1.4: Flugzeuggetragene Altimeter

Plattform	Organ.	Typ	Genau- igkeit	Sendeleistung	Frequenz (GHz)	Swath Widths	Footpr./ Auflös.	Pol.
ARMAR	NASA/JPL		80 m	200 W	13.8	9 km	800m	Quad
E-SLAR	DLR	SLAR		20 kW	93935	3- 15 km	-	VV
HUTSLAR	Universität Helsinki	SLAR	-	4KW	9.44		75x75m	VV
HUTSCAT	Universität Helsinki	Scatt. & Altimet.	0.65 m	-	5.4 9.8	Profiler	-	Quad
AMAP	Universität Stuttgart	Altimet. & Scat.	0.1 m	10 W	13.74	Profiler	30m	HH
MARA	NASA/ GSFC	Scan. Alimet.	0.15 m	1.7 kW	36	$\pm 22^\circ$	3m	HH
LFR	NOAA	Scatt.	-	70 kW	5.3	-	1° / 4°	HH
ROWS	NASA/ GSFC	Scatt	-	2 kW	19.9	16°	10° / 4°	HH
NUSCAT	NASA/JPL	Scatt.	-		13.9	0° - 70°		Quad

1.2. Einsatzmöglichkeiten des Radaraltimeters

Die vorgestellten Einsatzmöglichkeiten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, geben aber einen Eindruck von der Vielfalt der Anwendungsbereiche. Dabei liegt der Schwerpunkt der Anwendung in der Erstellung von digitalen Geländemodellen (DGMs), die zur Anfertigung und Fortführung von topographischen Karten verwandt werden können.

In der Erprobungsphase eines jeden Sensors werden bekannte Gebiete kartiert und mit den vorhandenen Datenbeständen und Karten verglichen. Hat der Sensor seine Genauigkeit bewiesen, kann er für seine eigentliche Aufgabe, die Kartierung von noch nicht vermessenen Gebieten verwandt werden. Vermessungen mit Radarsensoren sind dort von Bedeutung, wo

wegen der starken Bewölkung kaum brauchbare optische Bilder existieren oder die klassische Luftbildauswertung nicht möglich ist. Beispielsweise lassen sich Regenwälder, über denen ständige Bewölkung liegt, problemlos mit dem Radaraltimeter kartieren. Wenig strukturierte Wüstengebiete, bei denen die Stereoauswertung der Luftbilder mangels korrelierbarer Strukturen Schwierigkeiten bereitet, bieten weitere Einsatzbereiche. Besondere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich bei den Ländern, in denen nicht flächendeckend gesichertes Kartenmaterial erhältlich ist. Digitale Geländemodelle, wie sie von den deutschen Landesvermessungsämtern zur Zeit für diverse Nutzer bereitgestellt werden, sind nicht weltweit die Regel.

In polaren Regionen stellen Höhenkarten eine entscheidende, aber bisher fehlende Informationsquelle dar, um das Gleichgewicht und die Dynamik der polaren Eisschicht zu ermitteln. Das ausgedehnte arktische Eisschild bildet den größten Frischwasserspeicher der Erde. Insbesondere bieten die Veränderungen seines Höhenverlaufs Hinweise über Ab- oder Zunahme des arktischen Eisschildes. Wegen mangelnder Oberflächenstruktur haben die klassischen Verfahren der Luftbildauswertung hier Schwierigkeiten. Die Signalisierung erweist sich meist als unmöglich und die Wahl natürlicher Strukturen als Paßpunkte ist sehr eingeschränkt. Für diese Aufgabe kommen nur Sensoren, wie beispielsweise das Radaraltimeter in Frage, die die Höheninformation direkt aufnehmen können.

Für Beobachtung und Überwachung von Naturgefahren und Katastrophen stellt die Fernerkundung seit langem ein bewährtes Hilfsmittel dar. Kartierung von Oberflächenwasser in Überschwemmungsgebieten ist mit dem Radaraltimeter möglich, da die Wasserflächen signifikant im Rückstreubild erscheinen. Die Überwachung der Wasserspiegelveränderungen ist durch die freie zeitliche Wahl der Befliegungen entsprechend kurzfristig und in der zeitlichen Folge dem Wetterverlauf angepaßt zu realisieren. Da gerade katastrophale Überschwemmungen mit starken Schlechtwetterperioden einhergehen, erfüllt die Wetterunabhängigkeit des Radaraltimeters eine unabdingbare Voraussetzung. Großräumige Veränderungen wie Bergstürze oder Hangrutschungen können mittels flugzeuggetragener Vermessung bezüglich ihrer Häufigkeit und ihres Ausmaßes aus den digitalen Geländemodellen ermittelt werden. Diese Art von Kartierung gründet auf Erstellung von Differenzhöhenmodellen. Die Schadensabschätzung läßt sich durch Vergleich der Geländemodelle vor und nach der Natureinwirkung berechnen. Durch die automatisierte Datenauswertung ist eine schnelle Ergebnisvisualisierung gegeben, so daß einerseits Basisdaten für die situationsbezogene Entscheidung vorhanden sind, andererseits Tendenzen und Prognosen für den weiteren Verlauf abgelesen werden können.

Die Abbauüberwachung im Braunkohletage bietet ein weiteres Einsatzfeld des Radaraltimeters. Durch eine schnelle und automatisierte Generierung der Geländemodelle sind zeitkritische Kontrollen des Abbaus möglich. Die Bestimmung der abgebauten Erdmassen ergibt sich ebenfalls durch das Differenzmodell.

Einsatzmöglichkeiten des Radaraltimeters im Rahmen der Umweltkartierung bieten sich auch in der Aufnahme von Waldbeständen. Während manche Meßverfahren ungenügende Durchdringungsraten aufweisen, erlaubt das Radaraltimeter eine Messung von Baumspitzen und Bodenoberfläche. Dadurch läßt sich das Volumen der Biomasse relativ einfach abschätzen.

Die Radardaten können außerdem als Grundlage für küstenmorphologische Untersuchungen herangezogen werden, die beispielsweise Veränderungen in Wattgebieten oder das Einfließverhalten von Flüssen aufzeigen. Die Ablagerungen von Sedimenten oder Auswaschungen können sowohl über das Höhenmodell als auch über die Rückstreumessung detektiert werden. Dies ist vor allen in Gebieten, in denen noch keine Beobachtungen vorliegen von hohem Interesse.

In der Meeresforschung wurde die Radaraltimetrie zur Untersuchung des Geoids, der ozeanischen Zirkulation und der Tiden bereits erfolgreich angewandt. Für die Kartierung von Meeresflächen ist eine geringere Flächenauflösung erforderlich. Aus der Bestimmung der Wellenhöhen können die Windgeschwindigkeit und die Strömungskreisläufe ermittelt werden. Wird eine mittlere Wellenhöhe aus den Radaraltimeterdaten abgeleitet, folgt der Wasserspiegel dem Geoid. Für ausgewählte Regionen mit Schwereanomalien ist das Radaraltimeter ein hervorragendes Instrument für die Kartierung. Damit läßt sich die lokale Feingestalt des Geoid im entsprechenden Untersuchungsbereich ermitteln. Da die küstennahen Strömungen sehr von morphologischen Kleinstrukturen beeinflußt werden, benötigt man für Küstengebiete eine bessere Auflösung und Höhengenaugigkeit, als die zur Zeit vorhandenen Satellitendaten bieten. Im Rahmen des AGMASCO-Projekts wurde das Radaraltimeter für diese Aufgabe in Zusammenarbeit mit dem Geoforschungszentrum Potsdam und dem Alfred-Wegener-Institut Bremerhafen ausgewählt.

Die aus Radaraltimeterdaten generierten digitalen Geländemodelle können für die Positionsoptimierung von Richtfunkstationen oder Rundfunksendern herangezogen werden. Feldstärkevorhersage und Störungsabschätzungen lassen sich am jeweiligen DGM simulieren. So können mit geringem Aufwand mehrere Standorte der Sendestation hinsichtlich der flächendeckenden Rundfunkversorgung verglichen werden. Für Richtfunkstrecken kann ebenfalls die Verbindungsgüte über Simulation anhand eines digitalen Geländemodells vorhergesagt werden. Von Interesse sind die Positionen der Sende- und Relaisstationen bezüglich lokaler Abschattungen durch Berge. Hierfür sind Geländemodelle mit mittlerer Auflösung und einer Genauigkeit im Bereich von 1 m durchaus ausreichend.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Wie aus der Zusammenstellung der existierenden Systeme hervorgeht, wurden weltweit nur wenige flugzeuggetragene Radaraltimeter entwickelt. Insofern kann das am Institut für

Navigation entwickelte und realisierte Altimeter AMAP (Airborne Microwave Altimeter Platform) durchaus einen Beitrag zur flugzeuggetragenen Mikrowellen-Fernerkundung leisten. Das Altimeter ist aufgrund seiner Multi-Mode Systemauslegung für den Vermessungseinsatz über Land wie auch für die Aufnahme der Meerestopographie geeignet. Das in der vorliegenden Arbeit untersuchte Radaraltimeter mißt sowohl die Geländehöhe als auch die Intensität der rückgestreuten Leistung. Durch Interpolation der Meßspuren ergibt sich hierbei die Möglichkeit der bildhaften Darstellung. Die Intensitätsbilder der rückgestreuten Leistung sind in gewisser Weise mit einem SAR - Bild vergleichbar. Aus den aufgezeichneten Höhendaten können digitale Geländemodelle erstellt werden /38, 41, 42, 64/.

Die vorliegende Arbeit baut auf den Untersuchungen von Kim /4/ auf, die die Systemauslegung und Realisierung eines hochgenauen Radaraltimeters beinhalten. Jedoch endeten diese Untersuchungen bei der funktionellen Verifikation des Radars auf kurze Distanz, eine flugzeuggetragene Messung fand nicht statt. Für den operationellen Einsatz mußten einzelne Komponenten des Radaraltimeters, wie beispielsweise der Pulsdetektor überarbeitet werden.

In einer zeitlich parallelen Entwicklung wurde von Hug /61/ ein Laserscanner-System realisiert, welches ebenfalls in die Plattform integriert wurde. Des weiteren baut die vorliegende Arbeit auf den Arbeiten von Heinze /37,63/ und Söhne /39,69/ auf, die die hochgenaue Positions- und Orientierungsbestimmung mittels eines INS- und GPS- Sensorpackets untersuchten. Wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist die Systemintegration der verschiedenen Einzelsensoren zu einem flugzeuggetragenen Vermessungsinstrument, mit dem Genauigkeiten in der Klasse geodätischer Aufnahmen nachgewiesen werden konnten. Darüberhinaus wurde die Systemkalibration bezüglich der Altimeterhöhe, wie auch der Echoleistung durchgeführt, die ein wichtiger Schritt bezüglich der hochgenauen Topographieaufnahme darstellt.

Die vorliegende Arbeit, in der detaillierte Untersuchungen zur Radaraltimetrie vorgenommen wurden, gliedert sich in drei Schwerpunkte:

Im ersten Teil der Arbeit wird die Altimeterplattform, bestehend aus Radaraltimeter, INS und GPS untersucht. Dabei wird insbesondere die Systemanalyse des Radaraltimeters bezüglich Meßverhalten und Meßfehler durchgeführt. Ferner werden Abschätzungen zu Linearität und Höhenrauschen unternommen. Weiter wird, nach der Vorstellung der gesamten Systemplattform aus Radar, INS und GPS, eine Analyse bezüglich Höhen- und Lagefehlern vorgenommen. Darüber hinaus wird die Software der Systemplattform und der Auswertung vorgestellt, die die Prozessierung der Rohdaten zu einem digitalen Geländemodell ermöglicht. Durch die Messung eines Cornerreflektors konnten die Echoleistungswerte kalibriert und die empfangene Leistung in den zugehörigen Rückstreukoeffizient umgerechnet werden.

Im weiteren Teil der Arbeit werden die empirischen Ergebnisse der 8 Befliegungskampagnen vorgestellt. Hier wird der Frage der Eignung der Altimeterplattform zur topographischen Geländeaufnahme nachgegangen. Jede Befliegungsauswertung schließt mit der Erstellung eines digitalen Geländemodells. Diese Modelle werden zur Kontrolle stets mit Referenzmodellen oder Karten verglichen. Bei einzelnen Gebietsausschnitten geben Detailvergleiche mit mehreren digitalen Referenzmodellen Aufschluß über lokale Strukturanomalien. Ebenso wird für jedes Gebiet eine bildhafte Darstellung der Echoleistung errechnet, die Luftbildern oder Satellitenbildern gegenübergestellt wird.

In einem dritten Teil wurde das Meßverhalten der Altimeterplattform bei verschiedenen topographischen Oberflächen, die typisch für die Topographievermessung sind, dargestellt. Insbesondere wird hierbei die Genauigkeit der Höhenmessung überprüft. Des weiteren wird die rückgestreute Echoleistung analysiert. Zuerst ist die Echoleistung in den Rückstreukoeffizienten zu überführen und die typischen Objektklassen beispielhaft darzustellen. Ein Vergleich ordnet die vom Radaraltimeter gewonnenen Ergebnisse in die bereits in der Literatur veröffentlichten Messungen ein. Es wird der Frage nachgegangen, inwieweit sich die Größe des Rückstreukoeffizienten zur Klassifizierung verwenden läßt. Die Abhängigkeit der Rückstreukoeffizienten vom Einfallswinkel, von der Bodenrauigkeit und von den dielektrischen Eigenschaften des Objekts werden anschließend besprochen. Insbesondere wird geprüft, inwieweit sich die Höhenmessung als Bestimmungsmaß der Oberflächenrauigkeit verwenden läßt. Um zu einem tieferen Verständnis der eigentlichen Messung zu gelangen, wird ein Modell der Radarmessung entwickelt. Da es sich bei der topographischen Messung stets um verteilte Ziele handelt, ist die Zuordnung der Messung zu bestimmten Objekten im Ausleuchtfleck nicht immer möglich. Über eine Zerlegung der topographischen Oberfläche in einzelne Flächenelemente wird die Reflexion der Echoleistung simuliert. Dabei wird das entwickelte Modell sowohl an Testflächen als auch an einem realen Gelände überprüft.

2. Altimeterplattform

Altimeter nach dem barometrischen Prinzip oder nach dem Radarprinzip sind seit langem in der Luftfahrt im Einsatz. Die Bestimmung der Flughöhe über Grund ist für den Piloten eine wichtige Navigationsinformation. Wird nun aber die Höhe des Flugzeugs anderweitig gemessen, so kann mit dieser Altimeterhöhe die Geländehöhe bestimmt werden. Auf diesem Prinzip der Umkehrung der Höhenmessung basiert die vorliegende Arbeit.

Durch die Systemintegration eines hochgenauen Radaraltimeters mit einem Inertial-Navigationssystem (INS) und einem GPS-Sensor konnte in dieser Weise aus einem Navigationsinstrument ein geodätisches Vermessungsinstrument geschaffen werden. Mit der so erstellten flugzeuggetragenen Altimeterplattform ist die hochgenaue Aufnahme der Topographie möglich. Voraussetzung hierfür sind allerdings eine hochgenaue Bestimmung der Flugzeugposition, was mittels GPS und der differentiellen Phasenauswertung jetzt möglich geworden ist. Ebenfalls muß die Genauigkeit der Orientierung gegeben sein. Des weiteren ist der Einsatz eines hochgenauen Altimeters unabdingbar, um mit der Gesamtplattform Meßgenauigkeiten im Dezimeterbereich zu realisieren. Bild 2.01 zeigt die Altimeterplattform im Meßeinsatz.



Bild 2.01: Flugzeuggetragene Altimeterplattform

Wie Bild 2.02 zu entnehmen ist, beinhaltet die Altimeterplattform ein Radaraltimeter und einen Laserscanner, die beide die Höhe des Flugzeugs über Grund erfassen. Die Position des Flugzeugs wird mittels eines GPS-Empfängers Trimble SSE mit einer Datenrate von 2 Hz aufgezeichnet. Die Orientierung der Altimeterplattform wird mit dem Inertialsystem

Lasernav II gemessen. Obwohl das Strapdown-System ein Gerät der mittleren Genauigkeitsklasse darstellt, wird durch eine Kalman-Filterung mit GPS-Daten eine wesentliche Genauigkeitssteigerung erreicht. Die aufzuzeichnende Datenrate der INS-Werte betrug bei allen Flügen 50 Hz. Ferner beinhaltet die Altimeterplattform einen Datenrekorder, der während des Fluges die Rohdaten von allen Sensoren aufzeichnet.

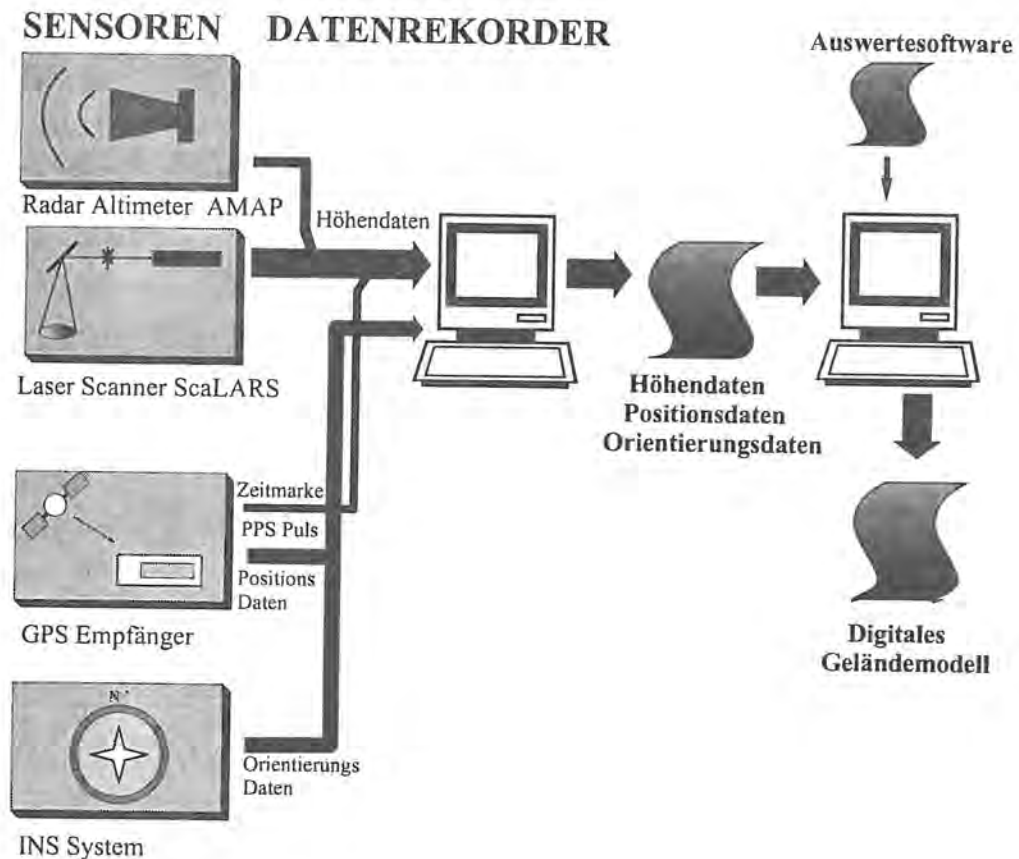


Bild 2.02: Systemkonfiguration Altimeterplattform

Ein Kernstück der Sensorintegration bildet ein Softwaremodul, das die Datenströme des Radaraltimeters und Laserscanners interrupt-gesteuert speichert und durch die Erfassung von Zeitsignalen aus beiden Systemen die zeitliche Synchronisation beim Postprozessor ermöglicht.

Ein weiterer wesentlicher Teil der Systemintegration erfolgt durch die Auswertesoftware im Postprozessor. Dabei werden die Flugzeugposition und Orientierung den Altimeterhöhen zeitlich zugeordnet. Da alle Sensoren fest mit der Trägerplattform verbunden sind, wird die Überführung der Gerätorientierung in ein Horizontsystem rechnerisch im Postprozessor

realisiert. Durch die räumliche Verknüpfung der Altimeterhöhe mit der Flugzeugposition und der Orientierung kann die geographische Position und Höhe des abgetasteten Geländepunktes errechnet werden.

Die Integration der verschiedenen Sensoren und die Implementierung der zugehörigen Algorithmen konnte in der vorliegenden Arbeit realisiert werden. Gerade durch diese Integration von sensorieller Information und a-priori Wissen, gelangt man zu einem neuartigen System, mit dem sich völlig neue Möglichkeiten eröffnen. Für die hochgenaue Topographievermessung werden besondere Anforderungen an die einzelnen Sensoren bezüglich der Genauigkeit, als auch an die zeitliche Synchronisation gestellt. Dem mußte bei der Systemintegration Rechnung getragen werden. Im folgenden Kapitel werden zunächst die einzelnen Sensoren, insbesondere das Radaraltimeter, besprochen. Anschließend wird die Integration der Altimeterplattform vorgestellt und die im Postprozessor realisierten Algorithmen dargelegt, die eine Verarbeitung der Sensordaten ohne weitere manuelle Eingriffe erlauben. So werden die vom Flugzeug gemessenen Punkte automatisch als digitales Geländemodell in ein in der Landesvermessung übliches Format überführt. Darüberhinaus wurde eine Extraktion von Bodenpunkten durch ein Fuzzy Logik Filter implementiert. Dadurch werden aus den aufgenommenen Radarpunkten die relevanten Bodenpunkte ausgesondert, die im Hinblick auf die topographische Kartierung von Interesse sind.

2.1 Radaraltimeter

Bild 2.1 zeigt das am Institut für Navigation entwickelte Radaraltimeter in einem stationären Meßaufbau. Der Entwurf und die Realisierung des Radaraltimeters erfolgte in der Arbeit von

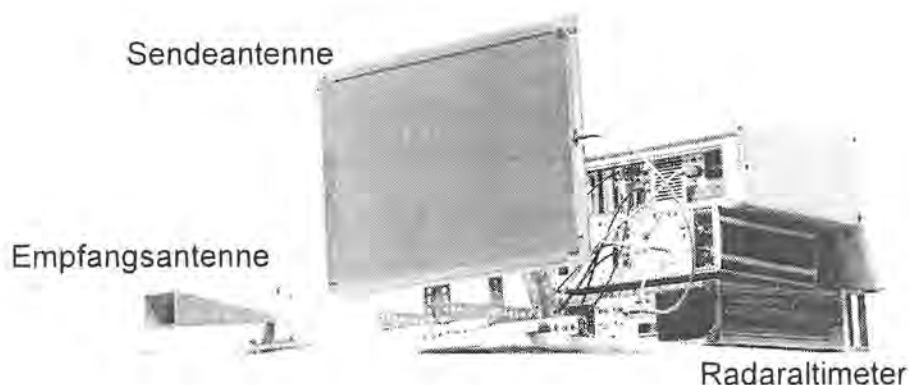


Bild 2.1: Versuchsaufbau des Radaraltimeters

Kim / 4 /, in den folgenden Kapiteln wird daher der Systementwurf nur zusammengefaßt. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch eine Weiterentwicklung und Verbesserung der Hardware erreicht.

Für das Radaraltimeter wurde ein Modulationsverfahren gewählt, das ein kontinuierliches, in seiner Phase mit einem PN-Code modulierte Trägersignal aussendet. Bei einer PN - Codelänge von 16 μsec wird eine eindeutige Bestimmung der Distanz zwischen Radar und Ziel bis zu einer Flughöhe von 2.4 km ermöglicht. Für die Messungen wurde die PN Chiprate von 30 MHz bei einer Codelänge von 511 Chips gewählt. Die zeitliche Auflösung bis zu 1/100 Chip gestattet die hohe Entfernungsauflösung von 10 cm. Die digitale Impulskompression erfolgt mit einem SAW-Convolver in Echtzeit.

Das Korrelationssignal wird aus dem empfangenen Echosignal und einem internen Referenzsignal im Konvolver durch eine nichtlineare Multiplikation beider Signale erzeugt. Dieser Vergleich der beiden Signale erfolgt kontinuierlich und liefert im Augenblick der Übereinstimmung einen Korrelationspeak. Die Laufzeitmessung wird mit einem Zeitintervallzähler durchgeführt. Man erhält durch die Integrationszeit im Konvolver und der Spreizungsredundanz des Sendesignalspektrums einen wesentlichen Modulationsgewinn. Hierdurch sind trotz der geringen Sendeleistung von 10 W große Reichweiten möglich oder Ziele mit kleinem Rückstreuquerschnitt detektierbar. Die technischen Leistungsdaten des Radaraltimeters sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle 1: Leistungsdaten des Radaraltimeters

Mittenfrequenz	13.74 GHz
Wellenlänge	2.18 cm
Bandbreite	80 MHz
Sendeleistung	10 W
PN Kodelänge	16 μsec
Antennengewinn	25 dB
3 dB Breite Antenne (Fa, Fb)	3.5°, 4.0°
Rauschzahl	4 dB
Dynamikbereich	50 dB

Im operationellen Betrieb wurde eine Meßrate von 200 Hz gewählt, was bei einer typischen Fluggeschwindigkeit von 60 m/s einer Meßpunktdichte am Boden von 30 cm entspricht. Die Sendeantenne wurde als planare Gruppenantenne mit 24 auf 132 Elementen und einem Gewinn von 25 dB realisiert. Mit dieser Technologie wird eine scharf gebündelte Sendekeule von 3,5°

und 4° erreicht, obwohl die Abmessungen der Antenne von 56 cm x 42 cm recht klein sind. Hierdurch ist eine hohe Flächenauflösung gewährleistet; beispielsweise wird bei Flughöhen von 500 m ein Fleck von 30 m auf 35 m ausgeleuchtet. Der CW - Betrieb setzt eine separate Empfangsantenne voraus, da nicht wie beim Impulsbetrieb zwischen Senden und Empfangen umgeschaltet werden kann. Das Radaraltimeter verwendet eine Sendefrequenz von 13.74 GHz.

2.1.1 Radarverfahren

Beim Pulsverfahren wird ein hochfrequenter Puls in den Raum abgestrahlt. Trifft er auf ein Ziel, wird ein Teil der rückgestreuten Leistung wieder vom Radar empfangen. Die Laufzeitmessung Δt zwischen Abstrahlung und Echoempfang entspricht der Zweifwegentfernung r zwischen Radar und Ziel. In Bild 2.2 ist das Funktionsprinzip des Radaraltimeters in Schaltblöcken zusammengefaßt. Der PN Generator erzeugt zwei zueinander spiegelbildliche PN Folgen, die Sendefolge TxPN und die Referenzfolge RxPN. Beide Signale werden auf die Zwischenfrequenz von 300 MHz hochgemischt. Als Modulatoren TxMOD und RxMOD wurden PSK Modulatoren verwendet. Das Radar arbeitet als kohärentes System, alle benötigten Frequenzen werden aus einem hochstabilen 10.00 MHz Oszillator in der FSU abgeleitet. Das Sendesignal wird ein zweites Mal mit dem eigentlichen Trägersignal von 13.74 GHz moduliert. Durch diese zweimalige Modulation kommt die Bandspreizung zustande. Ein Treiberverstärker und die Hauptverstärker HPA heben die Signalpegel auf die Ausgangsleistung von 10 W an.

Die Sendeantenne strahlt das Sendesignal ab. Das von einem Ziel reflektierte Signal gelangt wieder über die Empfangsantenne zu einem rauscharmen Empfangsverstärker. Durch eine weitere Modulation wird das Signal auf die Zwischenfrequenz von 300 MHz heruntergesetzt. Ein AGC- Verstärker regelt den Pegel des Empfangs- PN Signals auf denselben Pegel wie das Referenzsignal. Beide Signale werden dem SAW-Convolver zugeführt, der die Korrelation zwischen Referenz und Empfangssignal durchführt. Durch diese Korrelation erfolgt die Impulskompression, zum Zeitpunkt der Übereinstimmung beider Signale wird vom Konvolver ein Puls generiert.

Die Zeitspanne zwischen dem Anfang der PN -Folge, die der PN-Generator mit einem Startpuls quittiert und dem Convolverpuls, der das Eintreffen des Echos meldet, wird mit einem Timeintervallcounter gemessen. Des weiteren wird zu jeder Zeitmessung auch die Verstärkerstellung der AGC aufgezeichnet, welche ein Maß für die Leistung des empfangenen Echos darstellt. Es werden also die beiden wesentlichen Meßgrößen aufgezeichnet, die Laufzeitmessung, die dann in die Schrägentfernung zwischen Radar und Ziel umgerechnet wird und die AGC Stellung, die den Rückstreuquerschnitt des Ziels enthält.

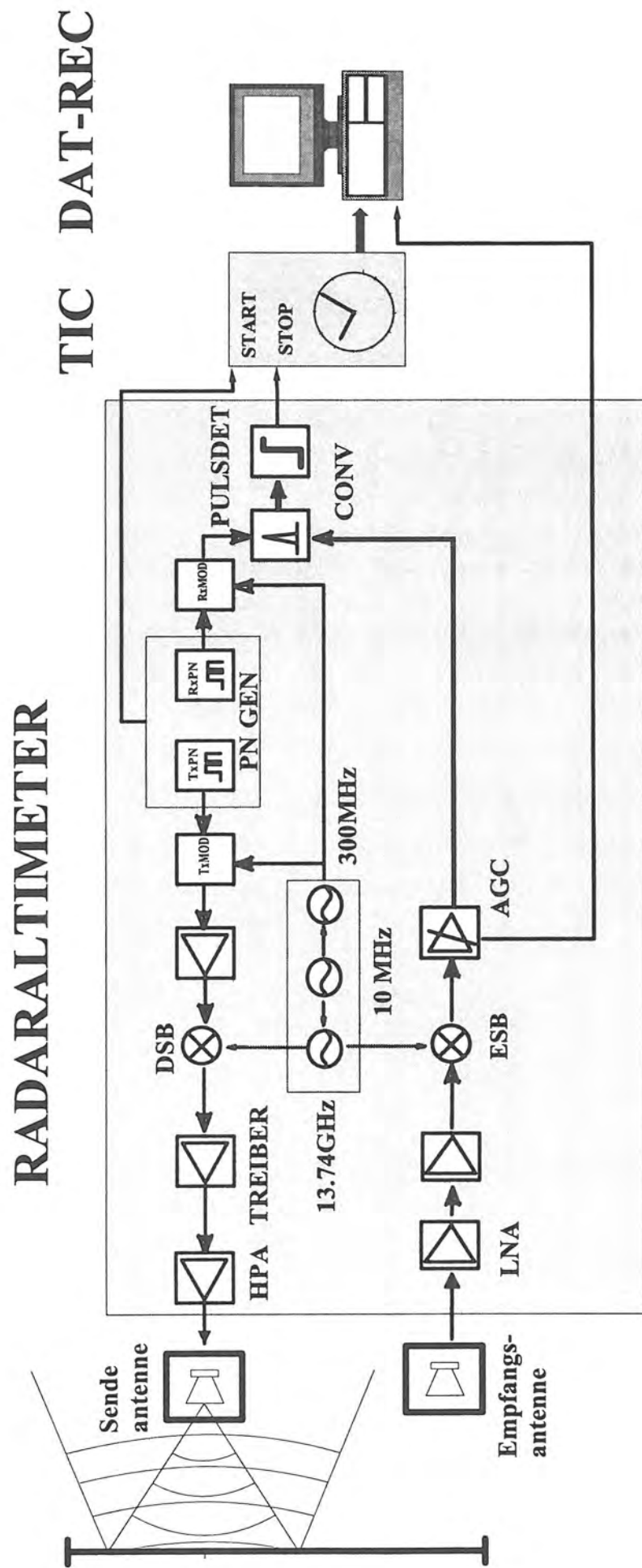


Bild 2.2 Blockschaubild Radaraltimeter

2.1.2 Leistungsbilanz

Die Leistungsbilanz ist im Hinblick auf die Beurteilung des Gesamtsystems von entscheidender Bedeutung. Das Verhältnis von empfangener Leistung zu Rauschen bestimmt die zur Zieldetektion erforderliche minimale Empfangsleistung und damit die maximale Reichweite des Systems in Abhängigkeit vom Rückstreuverhalten des Ziels. Die für die Leistungsbilanz entscheidenden Funktionsblöcke werden in Bild 2.3 aufgeführt.

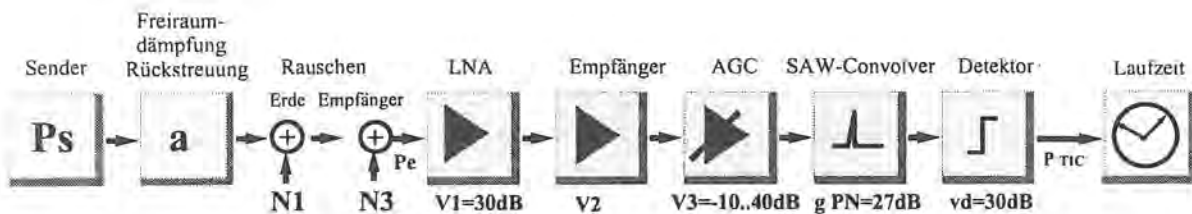


Bild 2.3: Leistungsbilanz Radaraltimeter

Die gesendete Signalleistung P_s wird durch die Freiraumdämpfung und die Rückstreuverluste a_F gemindert. Das Nutzsignal P_e wird mit den entsprechenden Rauschleistungen N_1 und N_3 überlagert. Da die Empfangsantenne auf die Erde gerichtet ist, ergibt sich die Rauschleistung N_1 mit der Bandbreite B_e zu:

$$N_1 = k \cdot T \cdot B_e = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}} \cdot 290^\circ \text{K} \cdot 1 \text{ GHz} = -84 \text{ dBm}$$

Des weiteren läßt sich durch die im Flugzeug limitierte räumliche Distanz zwischen Sende- und Empfangsantenne ein gewisses Übersprechen N_2 nicht unterdrücken. Dabei ist beim Einbau ins

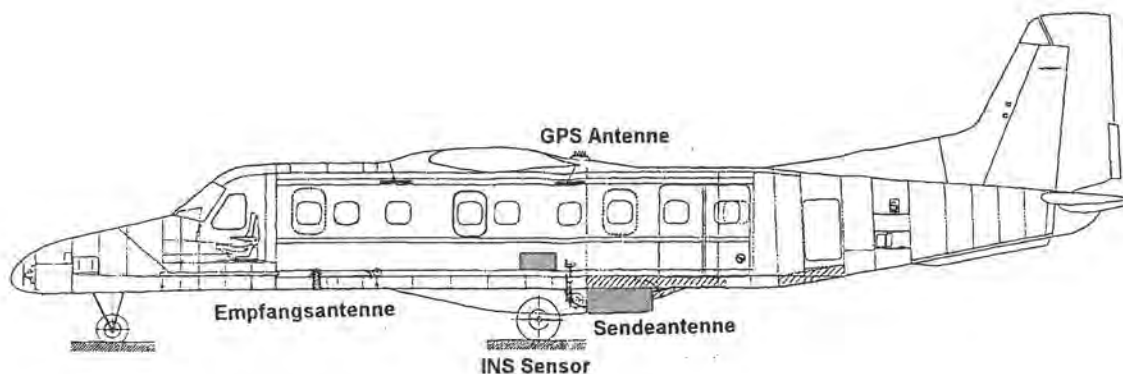


Bild 2.4: Einbauskizze DO 228

Flugzeug stets der maximal mögliche Abstand zwischen den Antennen verwirklicht worden. Es wurden Einbauweiten von 6 m bei der Dornier DO 228 und von 4 m bei der Cessna 404 gewählt. Beispielhaft sei in Bild 2.4 eine Einbauskizze gezeigt, wobei die Empfangsantenne in der Öffnung für das Navigationsrohr im vorderen Teil des Flugzeugs untergebracht ist. Die Sendeantenne ist im Einbauschacht im hinteren Teil des Rumpfs eingelassen.

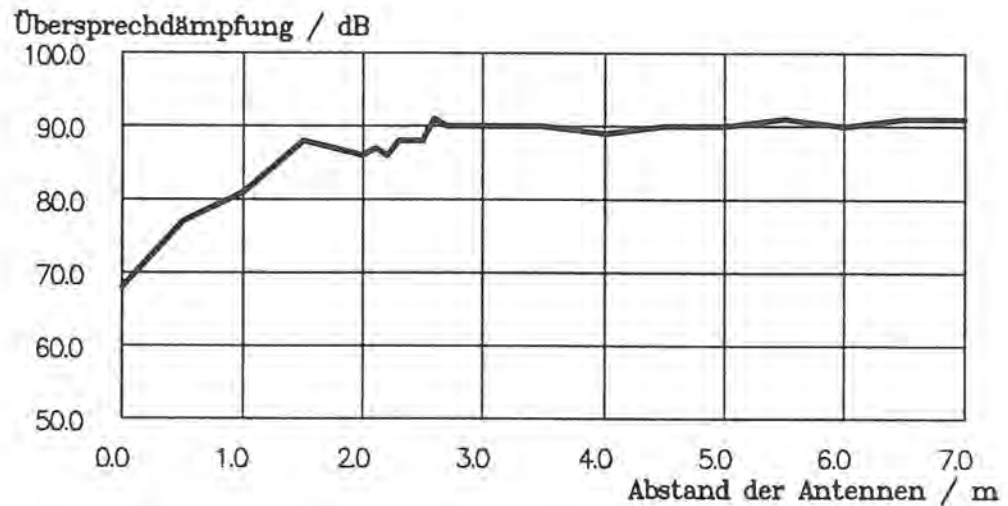


Bild 2.5: Messung der Übersprechdämpfung

Eine Messung des Übersprechens in Abhängigkeit vom Antennenabstand ist in Bild 2.5 dargestellt. Im Meßaufbau strahlten beide Antennen in den Himmel, die von der Empfangsantenne registrierte Leistung kennzeichnet das Übersprechen. Wird der Abstand kleiner als 3 m, rückt die Empfangsantenne ins Nahfeld der Sendeantenne, der Übersprechpegel steigt stark an. Erst ab einer Einbaudistanz von 4 m ist mit einem Übersprechpegel von -80 dBm zu rechnen. Für die Leistungsbilanz wird als Störsignal des Übersprechens $P_{ü_2}$ angenommen:

$$P_{ü_2} = -90 \text{ dBm}$$

Der erste Verstärker wird direkt hinter der Empfangsantenne eingesetzt und bestimmt ganz maßgeblich das Rauschen des Empfangsteils. Zwar trägt jeder andere Verstärker zur Vermehrung der Rauschzahl F_E des Empfangsteils bei, da aber der LNA eine Verstärkung von $v_1 = 30 \text{ dB}$ besitzt, fallen die Rauschzahlen F_i der nachfolgenden Stufen kaum mehr ins Gewicht:

$$F_E = F_1 + \frac{F_2 - 1}{v_1} + \frac{F_3 - 1}{v_1 v_2} + \dots \approx F_1 = 3 \text{ dB}$$

Daher ergibt sich die Rauschleistung N_3 des Empfangsteils zu:

$$N_3 = F_E \cdot k \cdot T \cdot B_e = 2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K} \cdot 290^\circ K \cdot 500 \text{ MHz} = -84 \text{ dBm}$$

Das Summensignal aus der empfangenen Nutzleistung und den Störleistungen gelangt durch den Eingangsverstärker LNA mit der Verstärkung v_1 zu einer weiteren Verstärkerstufe v_2 . Anschließend hebt der AGC- Verstärker das Signal auf denselben Pegel wie das Referenzsignal. Dabei stellt sich die Verstärkung in einem Dynamikbereich von 50 dB stets so ein, daß schwache Ziele in größerem Maße und helle Ziele weniger verstärkt werden. An den Eingang des SAW Convolvers gelangt sowohl das empfangene Nutzsignal, als auch die Rauschleistung. Beim eingangsseitigen Signal/Rausch-Verhältnis S_1/N addieren sich die einzelnen Störer folgendermaßen:

$$\frac{S_1}{N} = \frac{P_E}{N_1 + P_{\dot{u}_2} + N_3}$$

Durch die PN-Codierung wird eine große Bandbreite des Nutzsignals erreicht. Die Impulskompression des gespreizten Spektrums durch den SAW Convolver in die Original Informationsbandbreite bringt einen Modulationsgewinn g_{PN} im Störabstand:

$$\frac{S_{OUT}}{N} = g_{PN} \cdot \frac{S_1}{N}$$

Durch diesen Kompressionsgewinn g_{PN} kann noch Echoleistung von Zielen detektiert werden, die weit geringer als die eingestreute Rauschleistung ist. Der empfangsseitige Korrelationsprozeß entfernt die PN Kodierung vom Nutzsignal und zurück bleibt ein niederfrequenter Stop-Puls. Für den Convolver wird nun der maximale Korrelationsgewinn g_{PNMAX} bestimmt, der dem Produkt aus der Integrationszeit Δt und der Bandbreite ΔB_{NF} entspricht:

$$g_{PNMAX} = 10 \log (\Delta t \cdot \Delta B_{NF}) = 27 \text{ dB}$$

Alle Messungen der vorliegenden Arbeit wurden mit einer Bandbreite $\Delta B_{NF} = 30 \text{ MHz}$ und einer Integrationszeit $\Delta t = 16 \mu\text{sec}$ durchgeführt. Bild 2.6 zeigt die Messung des Kompressionsgewinns g_{PN} aus der Untersuchung von Kim / 4 /. Im Bereich kleiner Amplituden und schlechtem Eingangs-S/N ist der Kompressionsgewinn konstant und entspricht dem maximalen Gewinn g_{PNMAX} . Bei größerem Eingangs S/N geht der Kompressionsgewinn in die Sättigung und wird zu $g_{PNMIN} = 0 \text{ dB}$. Die untere Grenze für die optimale Signaldetektion liegt

vom Convolver aus betrachtet bei einem Ausgangs S/N_{OUT} von 10 dB, was einem Eingangs S/N_I von -17 dB entspricht. Selbst Ziele, deren Signalleistung 50 mal kleiner als die Rauschleistung sind, können noch erkannt werden.

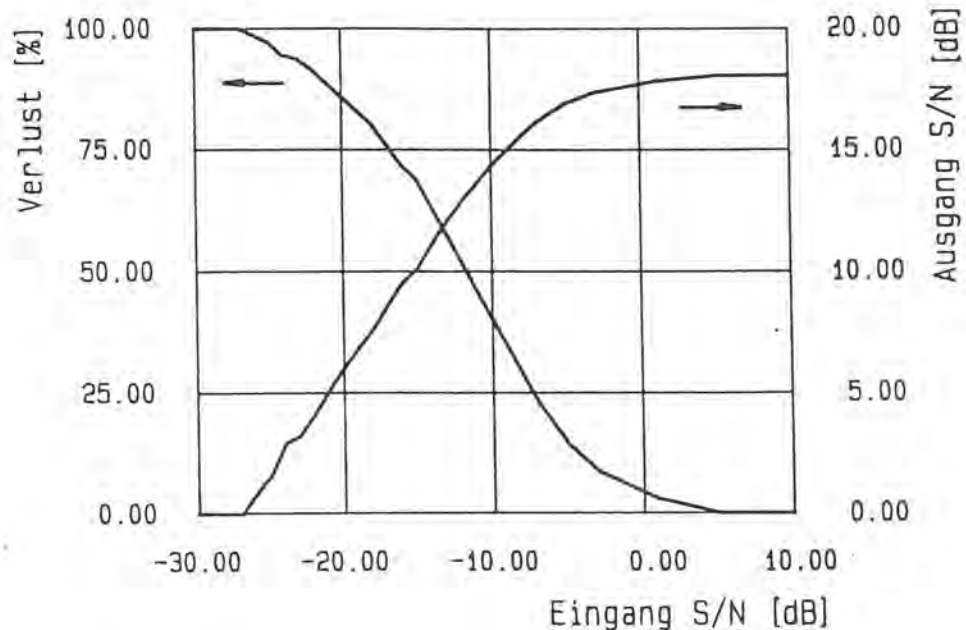


Bild 2.6: Kennlinie des Convolvers

Die sich an den Convolver anschließende Detektorstufe ist in Bezug auf den Signal/Rausch-Abstand von untergeordneter Bedeutung. Das Signal wird vom Zeitintervallzähler ausgewertet. Für die Auswertung des Stop-Pulses sind nach / 18 / folgende Spezifikationen einzuhalten:

$$\frac{S_{MIN}}{N} = 10 \text{ dB} \qquad P_{TIC MIN} = + 6 \text{ dBm}$$

Daraus ergibt sich die noch minimal detektierbare Empfangsleistung eines Ziels zu:

$$P_{E MIN} = \frac{S_{MIN}}{N} \cdot N_{GES} \approx -100 \text{ dBm}$$

2.1.3 Systemreichweite

Die Systemreichweite ist auf der einen Seite eng mit der verfügbaren Sendeleistung verknüpft. Je größer der Signal/Rausch-Abstand ist, den das Radarverfahren bietet, desto eher kann man schwache oder weit entfernte Ziele detektieren. Die maximale Reichweite des Radaraltimeters in Abhängigkeit vom Rückstreuquerschnitt σ ist folgendermaßen zu ermitteln:

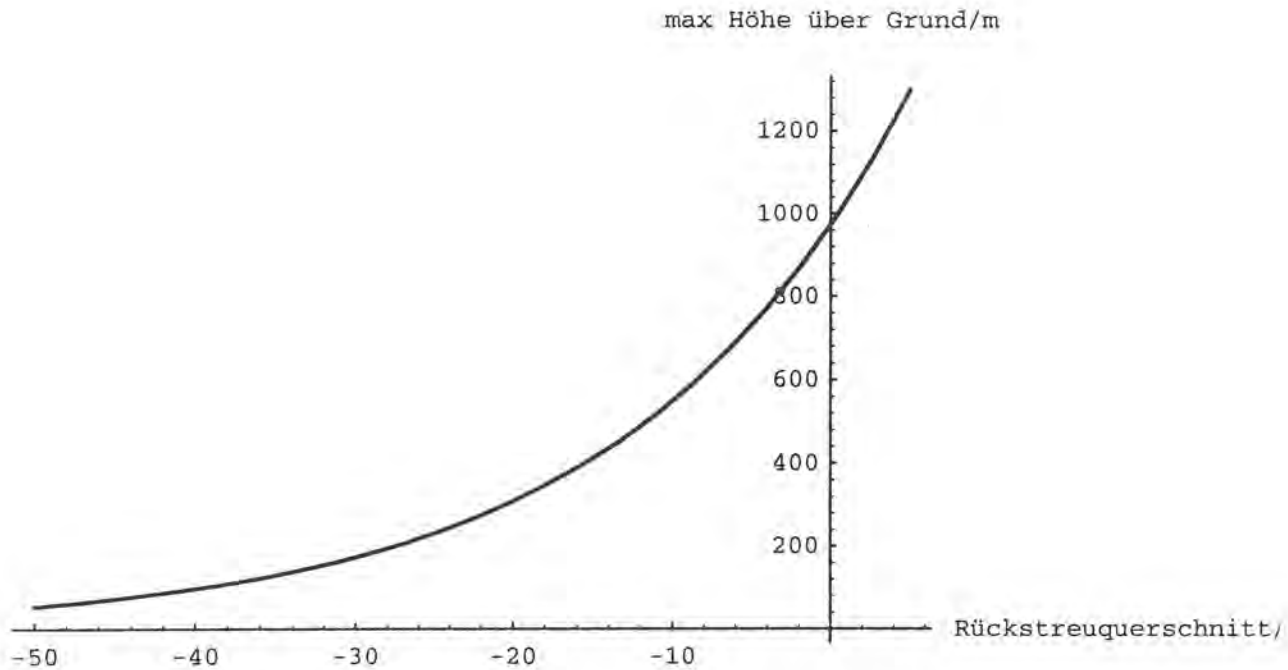


Bild 2.7: Theoretische Reichweite des Radaraltimeters

$$R_{MAX}^4 = \frac{P_s \cdot G_{s0} \cdot A_{E0}}{(4\pi)^2 \cdot k \cdot T \cdot B_e \cdot F \cdot S/N_{MIN}} \cdot \sigma$$

Die maximale Reichweite R_{MAX} ist proportional zur vierten Wurzel des Rückstreuquerschnitts σ . In Bild 2.7 ist dieser Zusammenhang als Graph aufgetragen. Will man Ziele mit einem Rückstreuquerschnitt von $\sigma = -10$ dB noch erfassen, ist die Reichweite auf 550 m begrenzt. Fliegt man über Ziele mit starkem Rückstreuquerschnitt, wie es zur Bestimmung der Wellenhöhe der Fall ist, sind Reichweiten zwischen 800 m und 1000 m möglich. In den unterschiedlichen Flugkampagnen, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, sind Flughöhen über Grund von 300 m bis zu 475 m geflogen worden. Bei einem Kalibrationsflug wurden Flughöhen von 250 m auf 700 m über Grund eingenommen.

2.1.4 Linearitätsverhalten

Eine weitere Aussage über die Systemgenauigkeit kann in einer internen Kalibration des Radaraltimeters gewonnen werden. Dazu wird das Sendesignal über ein verstellbares Dämpfungsglied wieder dem Empfänger zugeführt (Bild 2.8). Über die verschiedenen Dämpfungen von 30 dB bis 100 dB wird jeweils die Laufzeit und die AGC Verstärkung gemessen. Da in dieser Messung die Laufzeiten der Sende- und Empfangsantenne nicht eingehen und die Einbaukonfiguration im Flugzeug nicht immer exakt nachgestellt werden kann, bedarf es zusätzlich einer externen Kalibration. Jedoch liefert die interne Kalibration Aussagen über Linearitätsfehler und ermöglicht die AGC - Eichung.

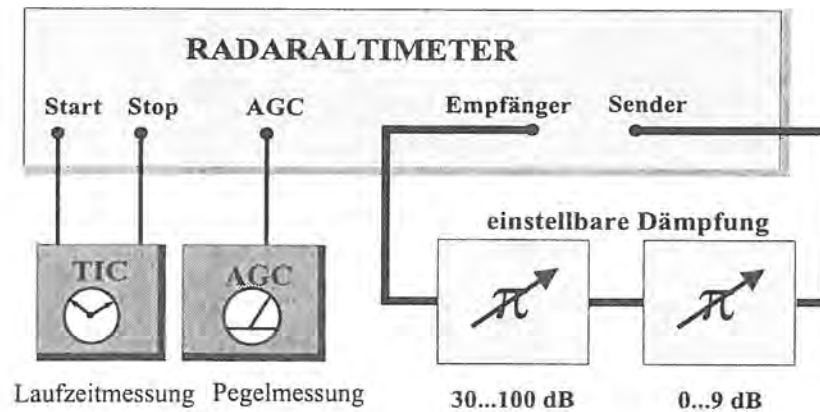


Bild 2.8: Meßaufbau Kalibration

Die AGC Verstärkung wird über eine Regelspannung gemessen. Diese Spannung entspricht dem Pegel, um den das Signal angehoben wird. Wird beispielsweise die externe Dämpfung um 10 dB erhöht, gleicht die AGC den Pegel mit einer um 10dB höheren Verstärkung aus. Dies ist an der AGC Spannung abzugreifen. Der gemessene Verlauf der AGC Spannung über der Dämpfung ist in Bild 2.9 gezeigt. Durch ein Näherungspolynom dritten Grades wird der Verlauf approximiert. Dadurch kann bei jeder gemessenen AGC Spannung die zugehörige Dämpfung berechnet werden.

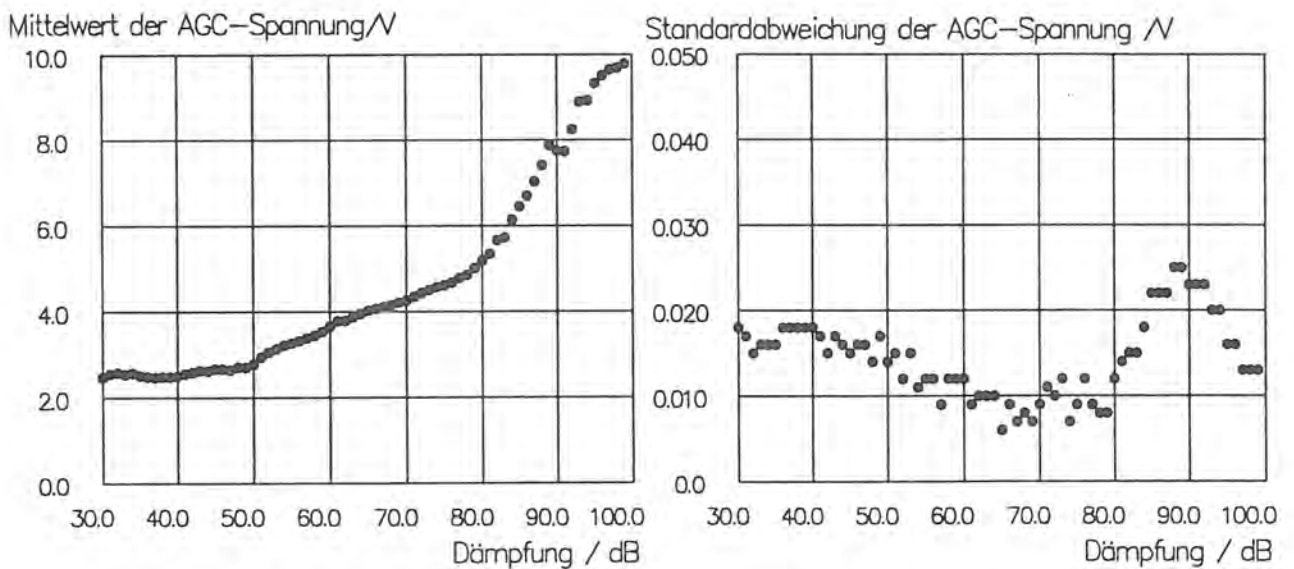


Bild 2.9: Kalibration der AGC Spannung

$$P_{AGC} = 48.97 - 3.29 \cdot 10^{-2} \cdot U_{AGC} + 2.54 \cdot 10^{-6} \cdot U_{AGC}^2 - 6.88 \cdot 10^{-11} \cdot U_{AGC}^3$$

Die Streuung der AGC Spannung liegt bei etwa $\text{rms}(U_{AGC}) = 0.02 \text{ V}$ und entspricht im wesentlichen dem Rauschen der A/D Wandler. In dieser internen Kalibration wird also die Laufzeit des Signals nicht verändert, nur der Pegel. Damit ist der konstante Offset und die Nichtlinearität der Messung zu ermitteln. Die Dämpfung wird im Bild 2.10 über einen Bereich von 30 dB bis 100 dB variiert. Bis zu einer Dämpfung von 80 dB bleibt die Entfernungsmessung näherungsweise konstant. Erst ab 80 dB treten erhebliche Abweichungen von mehreren Metern auf. Das erklärt sich dadurch, daß der Regelbereich der AGC verlassen wird, die sehr schwachen Pegel können nicht mehr ausgeglichen werden. Außerdem verschlechtert sich das Signal/Rausch-Verhältnis, was bei der Detektion des Stop-Pulses im Time Intervall Counter zu einer Verschiebung des Triggerzeitpunktes führt. Schließlich ergeben sich in den Verstärkern je nach Verstärkungsgrad andere Signallaufzeiten, die sich in einem Distanzfehler äußern. All diese Einflüsse führen zu dem Linearitätsfehler der Distanzmessung. Da die Dämpfung bekannt ist, kann mit Hilfe einer Kalibrationsfunktion dieser systematische Fehler eliminiert werden. Der Distanzfehler kann abzüglich eines Grundoffsets von 146 m durch ein Polynom 3. Grades approximiert werden. Die Kalibrationsfunktion lautet wie folgt:

$$\Delta h(U_{AGC}) = -0.15 + 2.01 \cdot 10^{-4} \cdot U_{AGC} - 4.73 \cdot 10^{-8} \cdot U_{AGC}^2 + 2.64 \cdot 10^{-12} \cdot U_{AGC}^3$$

Das Distanzrauschen nimmt mit steigender Dämpfung zu. Der Time Intervall Counter bestimmt die Meßdistanz aus dem Zeitintervall zwischen Start- und Stop-Puls.

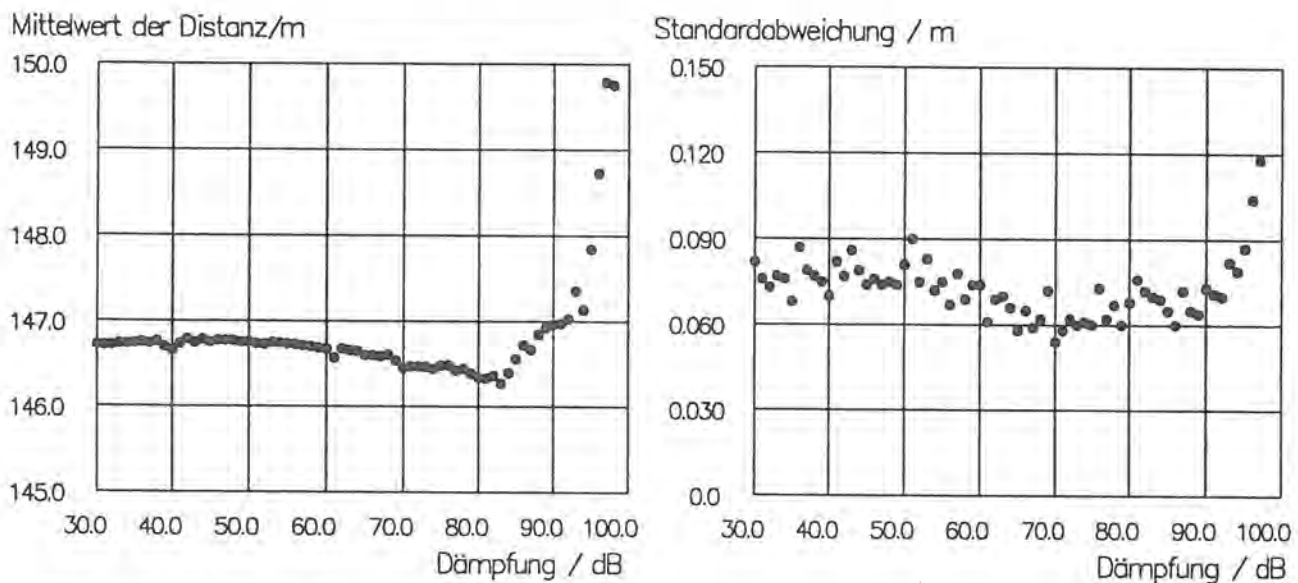


Bild 2.10: Kalibration der Altimeterhöhe

Ein Oszillogramm der entsprechenden Signale ist in Bild 2.11 aufgezeichnet. Der Stop-Puls ist das Korrelationsprodukt zwischen dem Radarecho und der PN Referenz. Je nach Stärke des Radarechos variiert die Amplitude des Stop-Pulses. Wie in der Messung Bild 2.10 gezeigt, ist bei schwachem Echo beziehungsweise bei hoher Dämpfung die Amplitude des Convolver Pulses dem Rauschen recht nahe. Der Time Intervall Counter besitzt eine hysteresesebehaftete Schwelle zum Starten und Stoppen der Zeitmessung. Ein verrauschter Stopppuls kann diese Schwelle etwas zu früh oder zu spät auslösen. Die Amplitudenunsicherheit äußert sich in einem Jitter der Zeitintervallmessung. Je steiler der Puls und je besser das S/N ist, desto geringer ist die Standardabweichung der Zeitintervallmessung beziehungsweise der Distanzmessung. Nach Forsell / 21 / gilt :

$$rms(R) = c \cdot rms(t) \approx c \cdot \frac{\sqrt{500\mu V + U_N^2}}{\frac{dU_{STOP}}{dt}} = c \cdot \frac{\sqrt{500\mu V + 4 \cdot 50\Omega \cdot N}}{\frac{dU_{STOP}}{dt}}$$

Mit einer Pulslänge $\tau = 18$ ns des Stop-Pulses ist also die Standardabweichung $rms(t)$ reziprok zur Flankensteilheit mit $dU_{STOP}/dt = 66$ V/us und ist proportional zur Wurzel der Rauschleistung N .

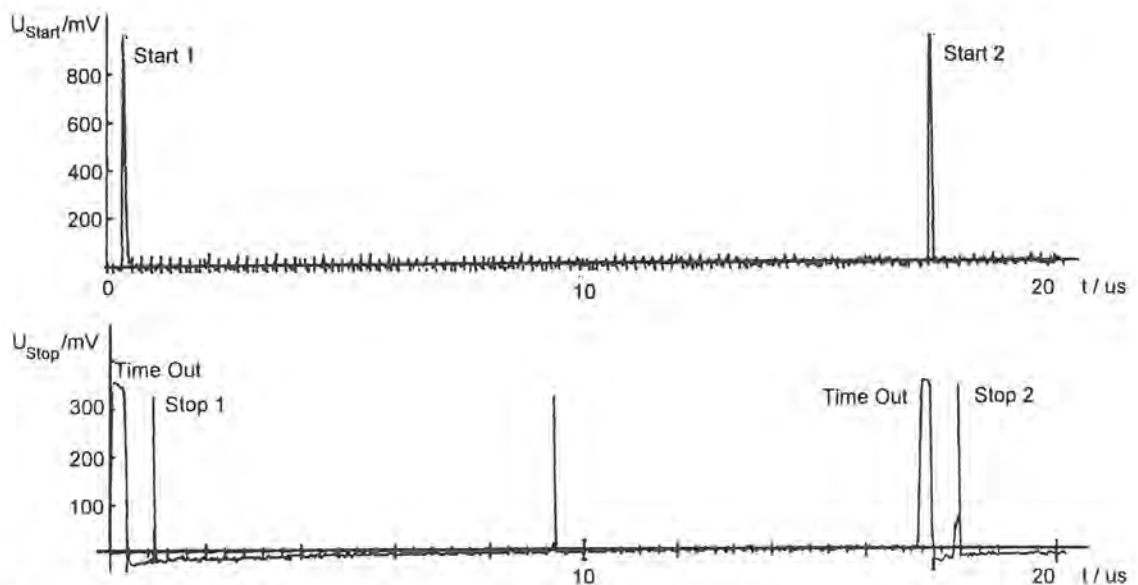


Bild 2.11: Time Intervall Counter Messung

2.2. Datenaufzeichnung

Wie Bild 3.1 zeigt, wurden die Komponenten Radaraltimeter, Laserscanner, GPS- Receiver und INS zum flugzeuggetragenen Geländevermessungssystem integriert. Für die Datenaufzeichnung sind zwei getrennte PC-Systeme verantwortlich. Die Entwicklung einer Software, die bei der Speicherung der Datenströme auch die zeitliche Synchronisation berücksichtigt, ermöglicht die Integration der Sensoren zu einer gemeinsamen Plattform. Auch wenn in der vorliegenden Arbeit der Schwerpunkt bei der Untersuchung der Radardaten liegt, so war die Realisierung der Plattform die entscheidende Voraussetzung für die dreidimensionale Messung von Geländeoberflächen.

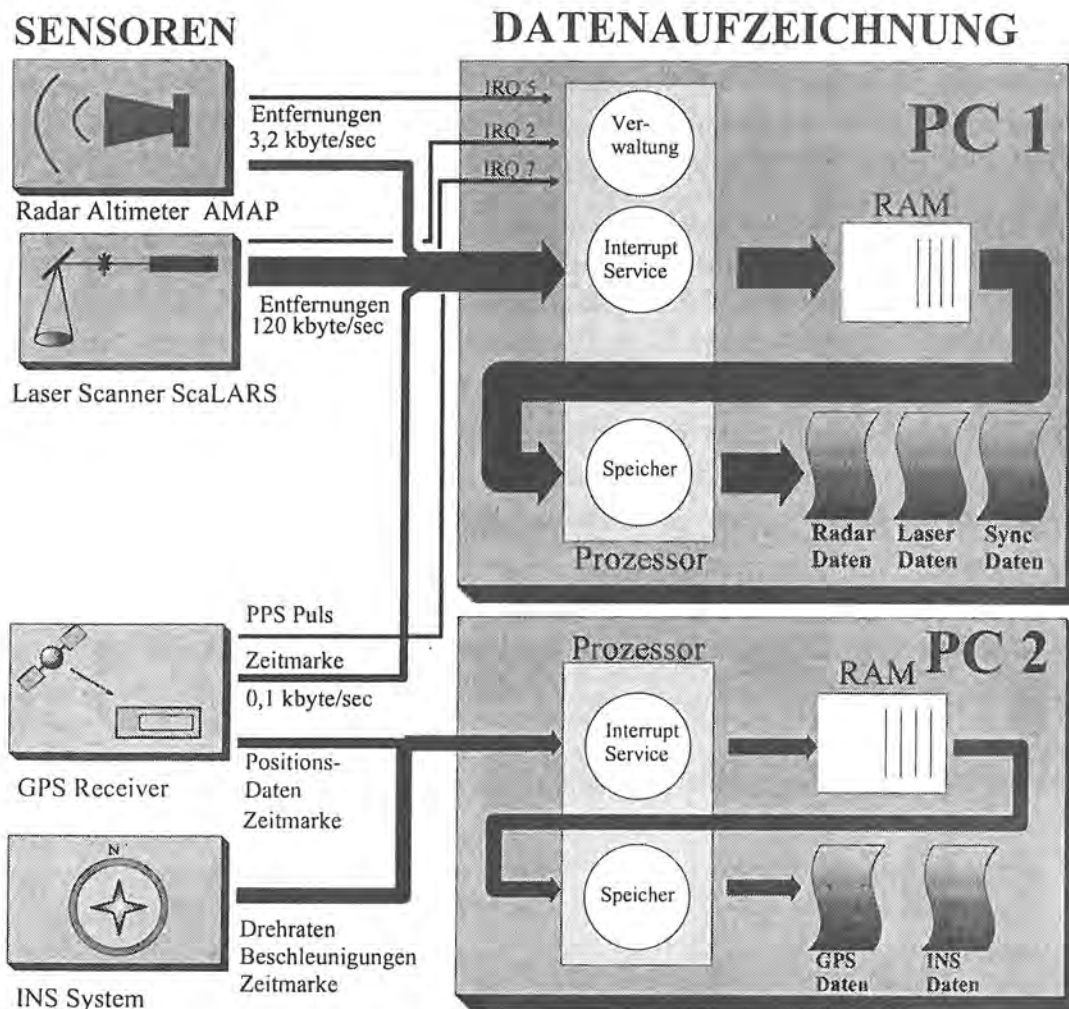


Bild 3.1: Datenfluß

Die beiden aktiven Entfernungssensoren Radaraltimeter und Laserscanner messen die Entfernung zwischen Flugzeug und Geländeoberfläche. Die Position und Orientierung der Sensoren wird durch einen GPS Empfänger und das INS registriert. Die Datenaufzeichnung der Systemplattform erfolgt mittels einer speziell entwickelten Datenrekordersoftware. Dabei

zeichnet ein Datenrekorder Meßdaten der aktiven Entfernungssensoren, des Radaraltimeters und des Laserscanners während des Meßfluges auf. Ein zweiter PC ist für die Speicherung der GPS und INS Daten verantwortlich. Die Aufgabe der Datenrekordersoftware ist es, die zufällig eintreffenden Anforderungen der Sensoren zu bedienen. Die Anforderungen werden von den Analog - Digital- Wandlern oder dem Time Intervall Counter als Interrupt IRQ5 und IRQ2 ausgelöst. Die Daten werden von den Datenquellen über Interruptserviceroutinen abgeholt und im RAM zwischengespeichert. Dabei erzeugt das Radar mit Altimeterhöhen und Echoleistungswerten einen Datenstrom von 3.2K Byte/sec. Für den Laserscanner werden während des gesamten Scankreises äquidistant analoge Phasen- und Intensitätswerte aufgenommen. Dieser Datenstrom von 120 KByte/sec kann nicht mehr mit konventionellen Softwaretechniken bewältigt werden. Wird der Rechner nicht durch Interruptanforderungen belegt, so werden die im RAM zwischen-gespeicherten Daten auf Platte geschrieben.

Der Datenrecorder ist ein speziell konfigurierter 486-PC mit einer 1.2 GB SCSI Platte, deren Kapazität für eine Aufzeichnungsdauer von etwa 2.5 Flugstunden ausreicht. Insgesamt wurde durch dieses Konzept ein Datenrekoder mit 8 analogen Meßkanälen für den Laserscanner mit einer Abtastrate von 10 KHz erreicht. Desweiteren kann der Datenrecorder das Zeitintervall der Radarpulse mit einer Meßfrequenz bis zu 2.4 KHz ermitteln. Schließlich ist die Synchronisation durch die Aufzeichnung des PPS Pulses gesichert. Bei voller Auslastung von Bildschirmausgaben, Programmverwaltung, Laseraufzeichnung und Radaraufzeichnung wird noch eine Abtastfrequenz von 7.6 KHz für die analogen Meßkanäle und 200 Hz für Radardaten sicher gewährleistet. Das entspricht einem maximalen Datendurchsatz von 150 KByte/sec. Somit kann das Datenaufkommen von Laserscanner und Radaraltimeter in Echtzeit bewältigt werden. Während des Fluges werden nur Rohdaten aufgezeichnet, die Umrechnung erfolgt dann im Postprozessor.

2.2.1 Zeitsynchronisation

Durch die separate Aufzeichnung der Navigationsdaten und Entfernungsdaten existieren im System zwei verschiedene Zeiten. Die Raumkoordinaten des Flugzeugs liegen auf die GPS-Zeit bezogen vor, während die Messungen des Radars und des Laserscanners auf die lokale Rechnerzeit bezogen sind. Die Flugzeugposition und Orientierung muß im Postprozessor den Schrägentfernungsdaten zeitlich zugeordnet werden, damit die geographischen Koordinaten des abgetasteten Geländeflecks errechnet werden können. Die lokale Rechnerzeit wird von der TIC-Karte bereitgestellt und ist auf μsec genau. Die beiden Entfernungssensoren werden bezüglich der lokalen Rechnerzeit kodiert, indem zu Beginn jedes Laserscans die lokale Rechnerzeit eingespielt und für die Radarmeßwerte alle 512 Meßwerte eine Zeitmarke eingefügt wird. Um die lokale Rechnerzeit mit der GPS-Zeit zu synchronisieren, wird das vom GPS-Empfänger generierte PPS-Signal (Puls Per Sekunde) und den Time Tag und die lokale Rechnerzeit aufgezeichnet. Dabei ist es entscheidend, daß diese Synchroninformationen zeitgleich und ohne

Verzögerung aufgezeichnet werden. Das PPS-Signal löst den Interrupt IRQ7 aus und die Zeitmessungsroutine überträgt die lokale Rechnerzeit und die GPS - Zeit in die Protokolldatei. Damit ist eine absolute Synchronisation gewährleistet. Prinzipiell würde es ausreichen, einmal am Beginn der Messung diese Synchronisation auszuführen. Mögliche Uhrenfehler der lokalen Rechnerzeit können durch sekundliche Synchronisationswiederholung an dem hochstabilen Zeitnormal der GPS-Zeit ermittelt und korrigiert werden. Damit steht für alle Meßereignisse eine zeitliche Kodierung mit einer Genauigkeit von besser als 1 ms zur Verfügung, was einem räumlichen Versatz von 7.5 cm in Flugrichtung entspricht.

2.2.2 Echtzeitauslegung der Rekordersoftware

Die entsprechenden Anforderungseinheiten Radaraltimeter, Laserscanner und GPS müssen in Echtzeit bedient werden. Das zeitliche Eintreffen der Anforderungen kann als zufällig betrachtet werden, der Ankunftsprozeß ist gekennzeichnet durch die mittlere Anzahl der Anforderungen pro Zeiteinheit und der Abstandsverteilungsfunktion. Anforderung und Bedienung verändern jeweils den Systemzustand des Rechners. Die zeitliche Folge der Zustände und Zustandsänderungen bildet den Zustandsprozeß. Die Anforderungsrate λ definiert sich als die Anzahl der Anforderungen pro Zeit. Das Angebot A stellt das Produkt aus Anforderungsrate λ und Bedienzeit T dar.

$$A = \lambda \cdot T$$

Für die einzelnen Bedieneinheiten wurden die für die Beschreibung nötigen Größen gemessen und in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Die Anforderungsrate für das Speichern der Laser und Radardaten ergibt sich aus der gewählten Größe des Datenbuffers von 64 KByte, der 4096 Messungen mit je 16 Byte speichern kann.

$$\lambda_{\text{Daten}} = \lambda_{\text{Anforderung}} / 4096$$

Tabelle 3.1: Zeitbilanz Datenaufzeichnung

Anforderungseinheit	Anforderungsrate λ	Bedienzeit T	Angebot A
Laserscanner	6250 / sec	0.16 msec	0.376
Radaraltimeter	200 / sec	0.10 msec	0.020
GPS Synchronplus	2.00 / sec	0.25 msec	$5 \cdot 10^{-4}$
Speichern Laserdaten	1.52 / sec	86.0 msec	0.13
Speichern Radardaten	0.049 / sec	86.0 msec	$4.14 \cdot 10^{-3}$

Die zeitliche Verarbeitung einzelner Anforderungen, welche auf die Belegung des Datenrekorders warten, kann als Warteprozeß beschrieben werden. Der zeitliche Prozeß der Anforderungen und Bedienungen ist beispielhaft in Bild 3.2 dargestellt, wobei das zeitliche Eintreffen der Anforderungen als Pfeil gekennzeichnet ist und die Bedienzeiten als Zeitblock eingetragen sind. Wenn sich auch die Ankunftsabstände einer Quelle periodisch wiederholen, so ist doch der Ankunftsabstand zwischen zwei beliebigen Anforderungen zeitlich zufällig. Die Anforderungseinheiten sind zeitlich nicht korreliert.

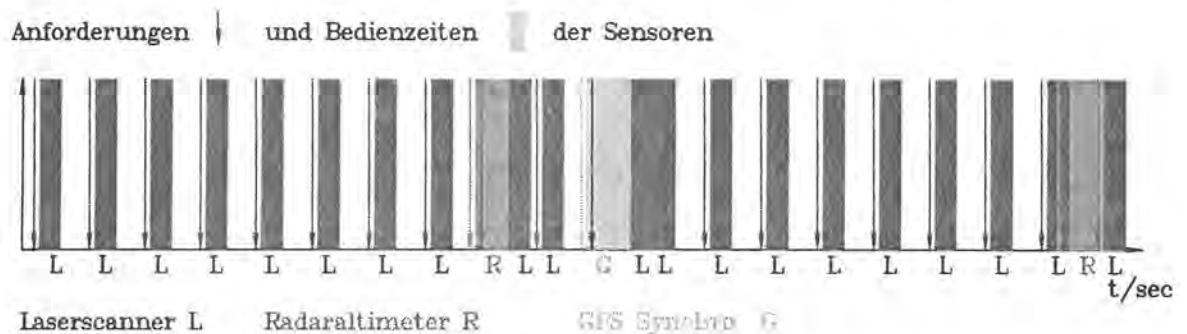


Bild 3.2: Zufälliges Eintreffen der Anforderungen

In fast allen Fällen wird die Anforderung unverzüglich nach Eintreffen verarbeitet. Trifft aber die Anforderung ein, während eine andere Bedienung vorliegt, so erfolgt die Bedienung der späteren Anforderung verzögert. Falls sich die Bedienung jedoch so verspätet, daß von derselben Bedieneinheit eine weitere Anforderung eintrifft, geht die noch unbediente Anforderung verloren. Für die Echtzeitauslegung der Software ergibt sich daher folgende Forderung: Zum einen soll die Verlustwahrscheinlichkeit einer Anforderung minimal sein. Zum anderen ist eine minimale Wartewahrscheinlichkeit anzustreben, so daß die Anforderung sofort bedient wird. Prinzipiell stehen zur Abarbeitung der Anforderungen 4 verschiedene Verwaltungsstrategien zur Auswahl:

DMA Verfahren:	Direktspeicherzugriffssteuerung
Interrupt Verfahren 1:	Unterbrechungssteuerung mit unterbrechender Priorität
Interrupt Verfahren 2:	Unterbrechungssteuerung mit nichtunterbrechender Priorität
Polling Verfahren:	Abfragesignalisierung

Je nach Anwendung weisen die einzelnen Verfahren spezifische Vorteile auf. Das DMA-Verfahren ist für die Übertragung großer Datenmengen recht schnell, allerdings ist während des DMA-Prozesses keine Unterbrechung über Interrupts möglich. Dies ergibt sich, da nicht der Prozessor, sondern der DMA-Controller den DMA-Prozeß steuert. Zum anderen benötigt das DMA-Verfahren eine bestimmte Hardwarestruktur der Betriebsmittel, so daß letztlich das Verfahren nicht gewählt werden konnte. Da die Anforderungseinheiten im Ankunftsabstand um mehrere Zehnerpotenzen streuen, ist das Polling-Verfahren ungeeignet. Dabei werden nach einer

vorgegebenen Reihenfolge alle Anforderungseinheiten abgefragt, die Anforderungseinheiten mit großem Ankunftsabstand entsprechend oft umsonst. Daher wurde für das Echtzeitsystem das Interruptverfahren gewählt, wobei letztlich der nichtunterbrechbaren Priorität aus Gründen des Datenverlusts der Vorzug gegeben wurde.

Der Belegungszustand des Rechners wird als Geburts- und Sterbeprozess modelliert. Für die Organisation der Abarbeitung der eingegangenen Bedienanforderungen ist der Interruptcontroller zuständig. Den Anforderungen T_{LASER} , T_{RADAR} und T_{GPS} sind Interrupts IRQ2, IRQ5 und IRQ7 zugeordnet, da diese Anforderungen in Echtzeit bedient werden müssen. Für die Erkennung und Verwaltung der Interrupts stehen dem Controller unter anderem das Interrupt Request Register (IRR) zur Verfügung. Bei einer Interrupt Aufforderung wird das der Anforderungseinheit zugeordnete Bit im Interrupt Request Register gesetzt. So werden alle Bedieneinheiten festgehalten, die gegenwärtig eine Interrupt Anforderung ausgeben.

Da es möglich ist, daß mehrere Bedieneinheiten gleichzeitig einen Hardwareinterrupt auslösen und daher mehrere Bits im Interrupt Request Register gleichzeitig gesetzt sein können, leitet der Prioritätsgeber zuerst die Bedieneinheit mit der höchsten Priorität weiter. 5 Anforderungseinheiten (Laser, Radar, GPS, Speichern Laser und Speichern Radar) mit 5 zugehörigen Bedienprozessen sind beim Datenrekorder vorhanden. Dabei entspricht der Zustand 0 des Rechners einer unbelegten Maschine, beim Zustand 5 fordern alle Bedieneinheiten den Prozessor an.

Übergangsrate	$\lambda_x = 1/T_{\text{ANFORDERUNG}}$	für $x = 0, 1 \dots 4$
Bedienrate	$\epsilon_x = 1/T_{\text{BEDIENUNG}}$	für $x = 0, 1 \dots 4$

Die mittlere Übergangsrate λ_m ergibt sich einfach zu:

$$\lambda_m = \frac{1}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_i} = \frac{5}{(T_{\text{LASER}} + T_{\text{RADAR}} + T_{\text{GPS}} + T_{\text{LASERSPEICHERN}} + T_{\text{RADARSPEICHERN}})} = \frac{1}{4.328 \text{sec}}$$

Bei dem vorliegenden mittleren Angebot A_m

$$A_m = \lambda_m / \epsilon_m = 0.106$$

ergibt sich die Erlang - Zustandsverteilung nach folgender Formel:

$$p_x = \frac{\frac{A^x}{x!}}{\sum_{i=0}^4 \frac{A^i}{i!}}$$

Der Zustand 1, also eine Anforderungseinheit belegt den Rechner, wäre mit einer Wahrscheinlichkeit $p_1 = 9.5\%$ anzunehmen. Für das System des Datenrekorders wurde eine Verlustwahrscheinlichkeit von $p_n = 10^{-7}$ ermittelt, also würde nur jede 10-millionste Messung verloren gehen. Die Wartewahrscheinlichkeit p_w berechnet sich nach folgender Formel:

$$p_w = \frac{\frac{A^n}{n!} \cdot \frac{n}{n-A}}{\sum_{i=0}^n \frac{A^i}{i!} + \frac{A^n}{n!} \cdot \frac{n}{n-A}}$$

Es ergibt sich somit für das Gesamtsystem eine Wartewahrscheinlichkeit von $p_w = 1.02 \cdot 10^{-7}$. Somit muß also nur jede 10-millionste Anforderung warten, was einem Echtzeitsystem durchaus gerecht wird.

2.2.3 Speicherungsstrategie

Geht man auf die Beschreibung des Rechners als Schalenmodell zurück, ergibt sich für den Datenfluß folgendes Bild 3.3.

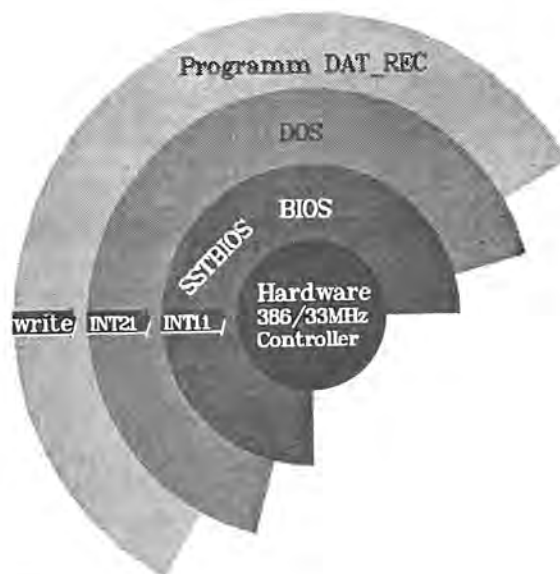


Bild 3.3: Schalenmodell des Datenflusses

Die Rechnerstruktur besitzt im Innersten den Hardwarekern, also die Funktionseinheiten 386-Prozessor, Controller und RAM. Auf der nächsten Ebene sind Mikroprogramme wie das BIOS des Rechners, Controllertreiber wie zum Beispiel SSBIOS.SYS angesiedelt. Sie schaffen eine für das Betriebssystem DOS einheitliche, von speziellen Hardwarebausteinen unabhängige Ein - Ausgabe - Umgebung. Das eigentliche Anwenderprogramm, das in einer Hochsprache wie zum Beispiel Turbopascal geschrieben ist, befindet sich dann auf Ebene 4.

Verfolgt man den Weg des Datenflusses beim Abspeichern, so ist dieser eng mit der durch das Schalenmodell beschriebenen Struktur verknüpft. So wird zum Beispiel ein 'WRITE'- Befehl durch den Compiler in eine Befehlssequenz, die schließlich den DOS Interrupt 21h aufruft, übersetzt. Beim Aktivieren des Interruptverteilers 21h wird der Befehl in einen Zugriff auf die logischen Sektoren über INT 25h und INT 26h umgewandelt. Hierbei baut DOS die Verwaltungsstruktur, also die Einträge in die File Allocation Tabel auf und rechnet die logischen Sektoren in physikalische Sektoren um. Damit leitet DOS den Befehl zum Datentransfer an das BIOS weiter. Der Einsprung in den BIOS Treiber SSTBIO.SYS geschieht über den vom DOS aktivierten Interrupt INT 11h. Dieser Treiber gibt dann letztendlich den Befehl an den Controller weiter, indem er die Controllerregister programmiert, und den Datentransfer somit initiiert.

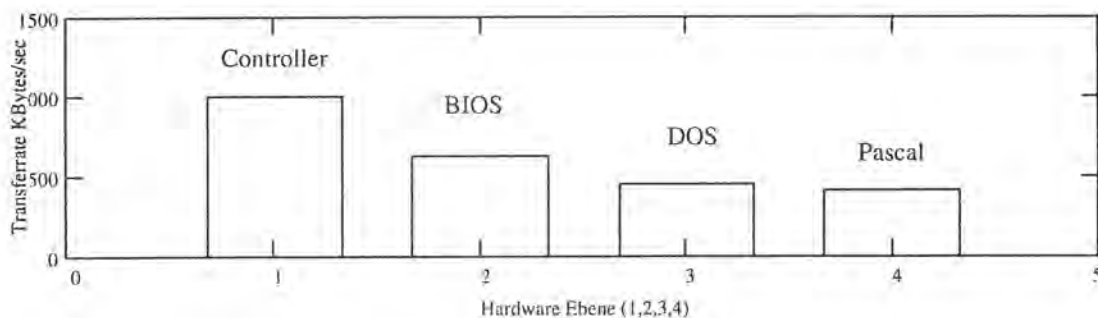


Bild 3.4: Vergleich der Speicherungsstrategien

Je nachdem, auf welcher Ebene das Programm zum Datentransfer geschrieben wird, lässt sich durch Minimierung des Verwaltungsaufwands eine höhere Datenübertragungsrate erreichen. Wie sich an Messungen Bild 3.4 zeigt, werden beim Abspeichern mit den Befehlen einer Hochsprache maximale Übertragungsraten von 409 Kbyte/sec erreicht, die allerdings von der transferierten Blockgröße abhängig sind. Programmiert man den Datentransfer auf der Controller-Ebene, lässt sich die Übertragungsrate auf 1 Mbyte/sec steigern. Diese Grenze bestimmt letztlich die Transferkapazität der Platte. Der SCSI-Bus lässt wesentlich höhere Übertragungsraten zu. Da beim Echtzeitprogramm eine hohe Übertragungsrate wichtig ist,

wurde die direkte Programmierung des Controllers gewählt. Dabei wurde ein Verlust an Kompatibilität in Kauf genommen und ein auf diese spezielle PC-Konfiguration hin optimiertes Programm entwickelt.

2.2.4 Programmstruktur

Der Hardwareaufbau des Datenrekorders wurde in Bezug auf abgetastete Meßwerte als Verlustsystem realisiert. Die A/D Wandler speichern stets nur den letzten Abtastwert. Holt ihn der Prozessor nicht vor Erscheinen des neuen Meßwertes ab, wird er überschrieben. Um äquidistante Meßpunkte auf dem Gelände aufzunehmen, ist eine Minimierung der Datenausfälle anzustreben. Die stetige Meßwertaufnahme in einem Singletask-System ist nur mit priorisierten Unterbrechungen möglich, insofern als das Aufnehmen der Meßwerte das Grundprogramm des Abspeicherns unterbricht. Die Speicherung erfolgt direkt über 'lowlevel'-SCSI Befehle. Der eingesetzte Controller FDC885 zeichnet sich durch 'host controlled' -Datentransfer via 'mapped memory' aus. Nur damit wird erreicht, daß jederzeit Unterbrechungen zur Meßwertaufnahme möglich sind. Der Prozessor schreibt die Daten in das I/O-Datenregister des Controllers. Über das Status/Controllregister steuert der Prozessor den SCSI-Befehlsablauf. Die Blöcke zu 512 Byte werden dabei linear auf der Platte hintereinandergereiht. Die einzelnen Interruptroutinen Lasermessung, Radarmessung und Zeitmessung können nicht unterbrochen werden. Somit kann auch ein höher priorisierter Interrupt nicht eine laufende Interruptroutine unterbrechen. Das gewährleistet einerseits ein hohes Maß an Betriebssicherheit, zum anderen sind die Meßwerte zeitlich genauer zu lokalisieren. Da es möglich ist, daß mehrere Anforderungseinheiten gleichzeitig einen Interrupt auslösen, wird immer der am höchsten priorisierte Interrupt nach Beendigung der laufenden Unterbrechnung bedient.

Die Laserdaten besitzen mit IRQ2 wegen des hohen Datenaufkommens und der kürzesten Abholzeit die höchste Priorität. Dann folgt die Time Intervall Counter -Karte mit IRQ5 und mit niedriger Priorität schließt sich der GPS-Interrupt an. Als Festplattensystem wurde die neuere Technologie des SCSI-Standards dem verbreiteten AT-Bus vorgezogen. Das SCSI (Small Computer System Interface) ist eine flexible Bus-Schnittstelle mit festgelegtem Protokoll für den Datenaustausch. Somit kann der PC über einen Controllerbaustein, den Host Adapter, die SCSI -Festplatte zum Datentransfer veranlassen. Die Übertragung der Daten aus dem RAM auf Festplatte erfolgt mit der für die Platte maximal möglichen Geschwindigkeit. Die Übertragung von 64K Daten wird mit SCSI-Befehlen bewerkstelligt, die SCSI-Phasen (Arbitration-Phase, Selection-Phase, Command-Phase, Data-Phase, Status-Phase, Message-Phase) müssen dabei für jeden Datenbuffer durchlaufen werden. In der Datenphase wird eine Übertragungsgeschwindigkeit von 1 MByte/sec erreicht.

Für die endgültige Aufzeichnungsrate des Datenrekorders ist der Zeitverbrauch der einzelnen Routinen ausschlaggebend: Je schneller die Interruptserviceroutinen sind, desto mehr Zeit steht

für das Abspeichern zur Verfügung. Um die Interruptserviceroutinen im Zeitverbrauch zu minimieren, wurden sie direkt in Assembler programmiert. Der Datenstrom, der von den Karten generiert wird, wird im RAM gesammelt, bevor er blockweise auf Platte gespeichert wird. Je größer die Abtastfrequenz der Karten, desto höher ist der zwischenzuspeichernde Datenstrom, desto mehr Rechenzeit wird für den Prozeß des Datenauslesens aus den Karten benötigt. Das RAM füllt sich schneller mit Daten und muß öfters auf Platte gespeichert werden. Das System kollabiert, wenn der eintreffende Datenstrom so groß ist, daß der Prozessor zeitlich mit dem Abspeichern nicht mehr nachkommt. Der Zeitbedarf für die Lasermessungen steigt linear mit der Abtastfrequenz an. Der Datenstrom der Lasermessungen und Radarmessungen von 16 Byte pro Messung ist jeweils von der Abtastfrequenz abhängig und beträgt

$$\Upsilon_{\text{SAMPLE}} = f_{\text{meß}} \cdot 16 \text{ Byte}$$

Damit ergibt sich ein Zeitbedarf um einen Datenpuffer der Größe B_{Puffer} zu füllen. Dabei sollte

$$t_{\text{DATA}} = \frac{B_{\text{Puffer}}}{\Upsilon_{\text{SAMPLE}}} = \frac{2^n}{f_{\text{meß}} \cdot 16 \text{ Byte}}$$

der Datenpuffer jeweils die Größe einer Zweierpotenz besitzen. Das Abspeichern dieses Puffers ist ebenfalls linear von der Zeit abhängig. Die Übermittlung des Schreibbefehls und die damit zusammenhängende Verwaltung erfordert einen konstanten Zeitbedarf, während der Zeitanteil für das eigentliche Abspeichern von der zu speichernden Puffergröße abhängt.

$$t_{\text{sp}} = 0.002 \text{ sec} + 2.907 \cdot 10^{-6} \text{ sec/Byte} \cdot 2^n$$

Als Grenzbedingung für den maximal möglichen Datenfluß, ergibt sich der Fall, an dem sich der Puffer genauso schnell füllt, wie er abgespeichert wird.

$$t_{\text{DATA}} = t_{\text{SP}}$$

Daraus läßt sich die maximal zulässige Abtastfrequenz in Abhängigkeit von der Größe des Datenpuffers bestimmen. Es erweist sich nach Bild 3.5 besonders günstig, große Puffer zu verwenden. Allerdings läßt sich eine Obergrenze der Abtastung von 22 KHz nicht überschritten. Die maximal unter DOS zulässige Puffergröße von 64 Kbyte wurde für das System auch gewählt.

$$f_{\text{meß}} = \frac{2^n}{16 \cdot (0.002 \text{ sec} + 2.907 \cdot 10^{-6} \text{ sec/Byte} \cdot 2^n)}$$

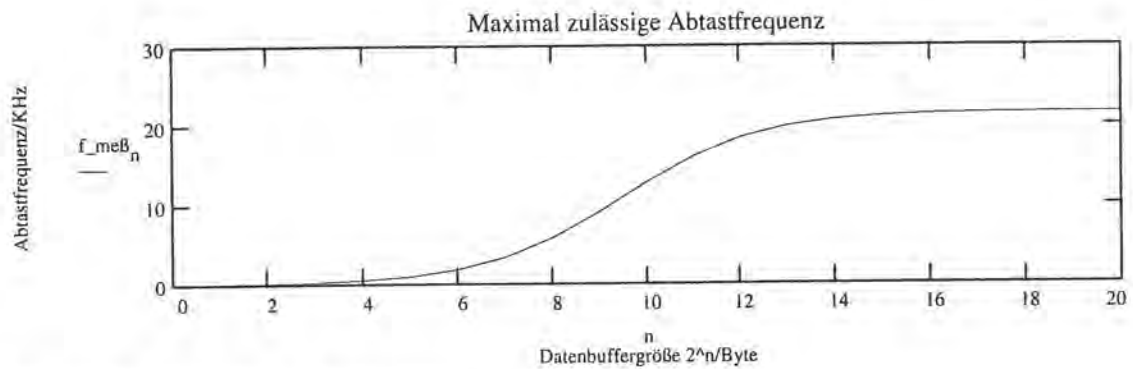


Bild 3.5: Maximal zulässige Meßfrequenz

2.2.5 Datenprozessierung

Während des Fluges ist wegen der begrenzten Prozessorkapazität nur die Aufzeichnung von Rohdaten möglich. Das Erstellen des digitalen Geländemodells wird mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Auswertesoftware durchgeführt.

Im ersten Schritt werden Navigationsdaten und Radarrohdaten jeweils unabhängig voneinander prozessiert. Dabei wird die Flugzeugposition aus den differentiellen GPS-Messungen über die Trägerphasenauswertung bestimmt. Diese Positionsdaten werden als Koordinaten-Updates im Kalmanfilterprozeß genutzt, um die Drift des INS zu korrigieren.

Die Laufzeitmessung des Radaraltimeters wird in eine Entfernung umgewandelt, und über die Kalibrationsfunktion werden die systematischen Fehler, wie beispielsweise die internen Signallaufzeiten, korrigiert. Dabei ist jede Radarmessung bezüglich der lokalen Rechnerzeit kodiert. Weiter wird die Radarecholeistung von der aufgezeichneten AGC-Spannung abgeleitet. Bild 3.7 gibt einen Überblick über den räumlichen Zusammenhang der verschiedenen Koordinatensysteme. Auf dieser Stufe der Prozessierung liegen die Daten bezüglich des Radarkoordinatensystems vor, das seinen Ursprung im Zentrum der Sendeantenne hat. Die Radarmessung der räumlichen Distanz zwischen Ursprung des Radarkoordinatensystems und

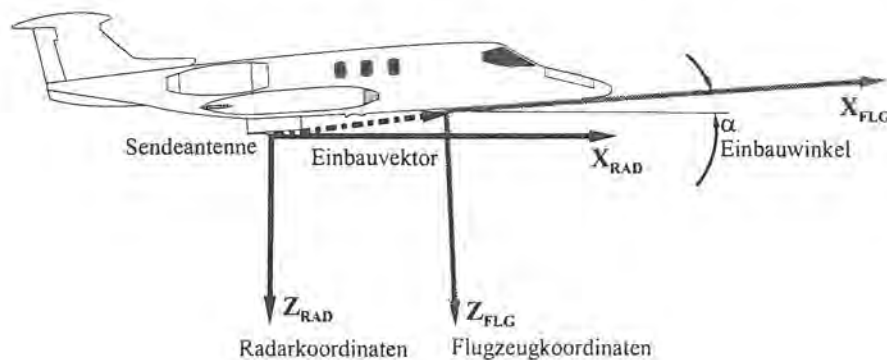


Bild 3.7: Radarkoordinaten und Flugzeugkoordinaten

dem Ausleuchtfleck der Sendekeule auf der Erdoberfläche wird dem Höhenvektor $H(t).RAD$ zugeordnet. Vom Radarkoordinatensystem wird der Höhenvektor ins Flugzeugkoordinatensystem transformiert.

$$\begin{pmatrix} x_{FLG}(t) \\ y_{FLG}(t) \\ z_{FLG}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{RAD}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Ex \\ Ey \\ Ez \end{pmatrix}$$

Höhenvektor $H(t).FLG$ Einbaumatrix Höhenvektor $H(t).RAD$ Einbauvektor

Das Flugzeugkoordinatensystem ist ein mit dem Flugzeug bewegtes kartesisches System, dessen Ursprung ins Zentrum des INS-Sensors gelegt wurde. Durch den Einbauvektor werden die unterschiedlichen Positionen des INS-Sensors und der Radarsendeantenne im Flugzeugboden berücksichtigt. Beim Einbau wurde darauf geachtet, daß bei normaler Fluglage die Sendekeule senkrecht auf die Erdoberfläche trifft. Der Einbauwinkel α wurde in der Größe des mittleren Anstellwinkels des Flugzeugs zu 2.6° vorgewählt. Durch die Einbaumatrix wird diese Verdrehung des Radarkoordinatensystems gegenüber dem Flugzeugkoordinatensystem berücksichtigt.

Über die Parameterdatei werden die Synchronisationsparameter ins Programm eingespeist, was die Umrechnung der lokalen Rechnerzeit in die GPS-Zeit ermöglicht. Damit kann die Radarmessung in Flugzeugkoordinaten zu den entsprechenden Positions- und Orientierungsdaten, die ebenfalls bezüglich GPS-Zeit kodiert sind, in Beziehung gesetzt werden. Da die Neigungswinkel des Flugzeugs, Bild 3.7a in die gemessene Distanz eingehen, muß der Höhenvektor durch eine Rotation um drei Achsen in ein Horizontkoordinatensystem überführt

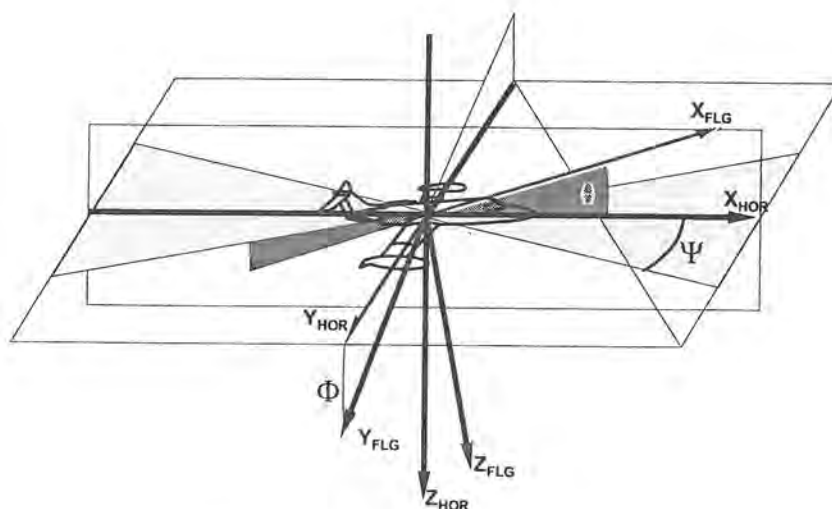


Bild 3.7a: Flugzeugkoordinaten und Horizontkoordinaten

werden. Dies geschieht durch die Multiplikation der drei Eulerdrehmatrizen mit dem Höhenvektor. Durch den gemeinsamen Ursprung beider Koordinatensysteme, der im Zentrum der GPS-Antenne liegt, wird eine Translation entbehrlich.

$$\begin{pmatrix} x_{HOR}(t) \\ y_{HOR}(t) \\ z_{HOR}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi_{kurs} & -\sin\psi_{kurs} & 0 \\ \sin\psi_{kurs} & \cos\psi_{kurs} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos\theta_{nick} & 0 & \sin\theta_{nick} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{nick} & 0 & \cos\theta_{nick} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_{roll} & -\sin\phi_{roll} \\ 0 & \sin\phi_{roll} & \cos\phi_{roll} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_{FLG}(t) \\ y_{FLG}(t) \\ z_{FLG}(t) \end{pmatrix}$$

Höhenvektor $H(t).HOR$ Kurswinkelmatrix Nickwinkelmatrix Rollwinkelmatrix Höhenvektor $H(t).FLG$

Der Höhenvektor wird nun vom lokalen, im Flugzeug mitbewegten Horizontkoordinatensystem in ein erdfestes, kartesisches Koordinatensystem transformiert. Da die Meßergebnisse letztlich mit den Koordinaten der Landesvermessung verglichen werden sollen, bietet es sich an, das der Landesvermessung der Bundesrepublik Deutschland zugrunde liegende Bessel-Ellipsoid als Koordinatensystem zu wählen.

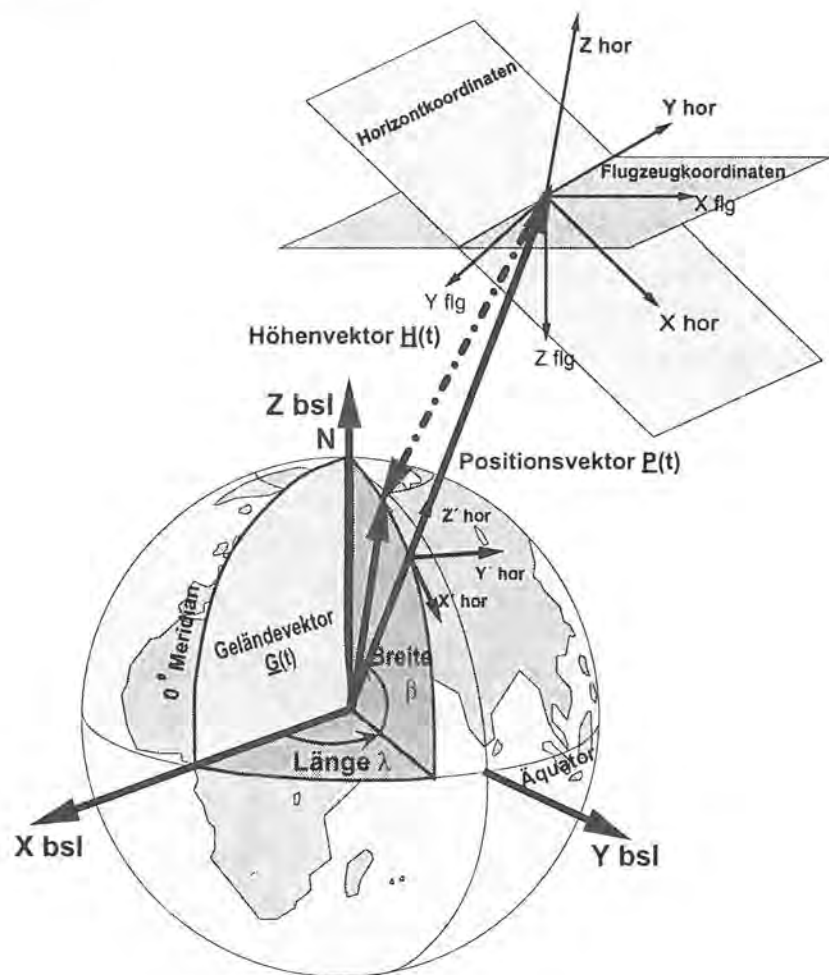


Bild 3.8: Koordinatensysteme

Bild 3.8 gibt einen Überblick über die entsprechenden Koordinatensysteme. Die Verdrehung des Horizontsystems, das tangential zum Erdellipsoid steht und südlich ausgerichtet ist, ist in den Winkeln der geographischen Breite Φ und Länge λ gegeben. Durch die Lotmatrix wird die Abweichung zwischen Geozentrum und Fußpunkt der Ellipsoidnormale berücksichtigt. Die Abweichung kommt durch die Differenz von geographischer Breite Φ und geozentrischer Breite β zustande. Durch die Multiplikation des Höhenvektors mit den Drehmatrizen wird die gemessene Höhe in erdfesten Koordinaten angegeben.

$$\begin{pmatrix} x_{BSL}(t) \\ y_{BSL}(t) \\ z_{BSL}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\lambda & -\sin\lambda & 0 \\ \sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sin\beta & 0 & \cos\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos\beta & 0 & \sin\beta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos(\Phi-\beta) & 0 & \sin(\Phi-\beta) \\ 0 & -1 & 0 \\ \sin(\Phi-\beta) & 0 & -\cos(\Phi-\beta) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_{HOR}(t) \\ y_{HOR}(t) \\ z_{HOR}(t) \end{pmatrix}$$

Höhenvektor $H(t).BSL$ Längenmatrix Breitenmatrix Lotmatrix Höhenvektor $H(t).HOR$

Der Geländevektor, der die Ortskoordinaten des Meßpunktes enthält, setzt sich aus der Vektorsumme des Höhenvektors und des Positionsvektors zusammen. Als Höhenbezugssystem wird, um einen Vergleich mit der topographischen Karte zu erleichtern, das Geoid genommen. Die Höhenangaben beziehen sich auf Normal-Null. Die Umrechnung in Höhen über Normal-Null erfolgt über die Geoidundulation des jeweiligen Gebiets, die von der Parameterdatei übergeben wird.

Der Geländevektor, der die Ortskoordinaten des Meßpunktes enthält, setzt sich aus der Vektorsumme des Höhenvektors und des Positionsvektors zusammen:

$$\begin{pmatrix} x_{GLD}(t) \\ y_{GLD}(t) \\ z_{GLD}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{POS}(t) \\ y_{POS}(t) \\ z_{POS}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{BSL}(t) \\ y_{BSL}(t) \\ z_{BSL}(t) \end{pmatrix}$$

Geländevektor $G(t)$ Positionsvektor $P(t)$ Höhenvektor $H(t).BSL$

In einer letzten Transformation werden dann diese Koordinaten ins Gauß-Krüger-System abgebildet. Das Ergebnis der Transformationen sind also die Koordinaten der gemessenen Geländepunkte in einem Bezugssystem der Landesvermessung, eine allgemeine Voraussetzung die jedes konventionelle Vermessungsverfahren erfüllen muß. Bild 3.8b faßt noch einmal die gesamten Transformationen als Flußbild zusammen.

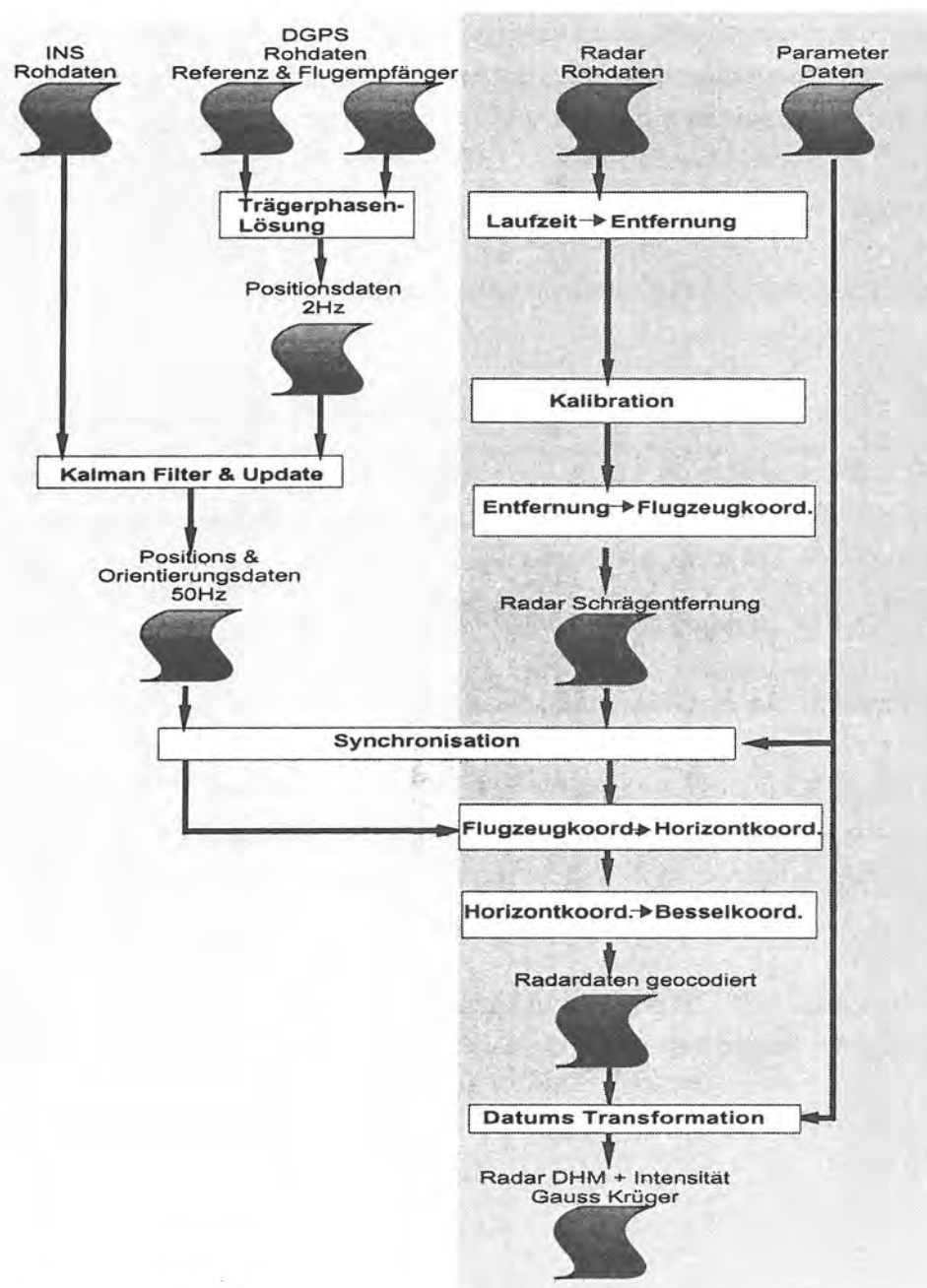


Bild 8.4b: Auswertungsprozeß der Daten

2.2.6 Extraktion von Bodenpunkten

Bei der Erfassung der Topographie werden die Geländehöhen der überflogenen Profils pur aufgezeichnet. Da es sich um einen automatischen Meßvorgang handelt, werden nicht nur die Bodenpunkte erfaßt, sondern alle im Profil liegenden Objekte wie Bäume oder Häuser gehen in die Messung ein. Da für die topographische Kartierung jedoch nur Bodenpunkte von Interesse sind, muß nachträglich die Auswahl dieser Höhenpunkte aus den aufgenommenen Daten

erfolgen. Diese Extraktion von Bodenpunkten aus Radarmeßdaten wird mittels Fuzzy-Logik-Algorithmen realisiert. Die in den folgenden Kapiteln erstellten Höhenlinienkarten wurden mit dieser Software prozessiert. Die Menge der Höhenpunkte beinhaltet alle vom Radar gemessenen Punkte entlang einer Profillinie. Die Bodenpunkte gehören zur Menge der Höhenpunkte. Sie zeichnen sich aber dadurch aus, daß sie direkt auf der Erdoberfläche liegen. Alle Höhenpunkte wurden in zwei Klassen unterteilt: Bodenpunkte oder Nichtbodenpunkte. Diese Trennung erfolgt mittels zweier Merkmale:

- der Streuung der Höhendifferenz und
- der Bodendifferenz.

Dabei stellt die Höhendifferenz, den Unterschied zwischen zwei hintereinanderliegenden Höhenpunkten dar. Zur Berechnung der Streuung der Höhendifferenz werden alle Höhenpunkte des Gebietes benutzt. Die Bodendifferenz ist die Höhendifferenz zwischen dem letzten Bodenpunkt und dem aktuellen Höhenpunkt. Diese Bodendifferenz ist maßgeblich dafür verantwortlich, ob der Höhenpunkt als Bodenpunkt extrahiert wird oder nicht.

Die Auswahl der beiden obigen Merkmale hat folgende Gründe: Durch die Streuung der Höhendifferenz $rms(h)$ wird die Rauigkeit des Profilschnitts eines Gebiets gewonnen. Große Streuung der Geländehöhen sind ein Hinweis auf inhomogenes Gebiet wie Waldfläche oder besiedelte Fläche. Kleine Streuungen dagegen weisen auf homogenes Gebiet wie See oder Wiesen hin. Die Bodendifferenz ist ein weiteres Merkmal für die Akzeptanz des Meßpunkts als Bodenpunkt. Eine große Bodendifferenz ist ein Indikator für einen unstetigen Höhenverlauf, wie er durch anthropogene Bebauung oder Bäume entsteht. Diese Merkmale sind allerdings nicht scharf zu fassen, in dem Sinne, daß eine kleine Bodendifferenz bei einer mittleren Streuung eher zur Menge der Bodenpunkte als zur Menge der Nichtbodenpunkte zu zählen ist. Diese unscharfe Zuordnung spricht für die Anwendung der Fuzzy-Logik-Verfahren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Filterprogramm entwickelt, das Bodenpunkte aus den Radardaten extrahiert.

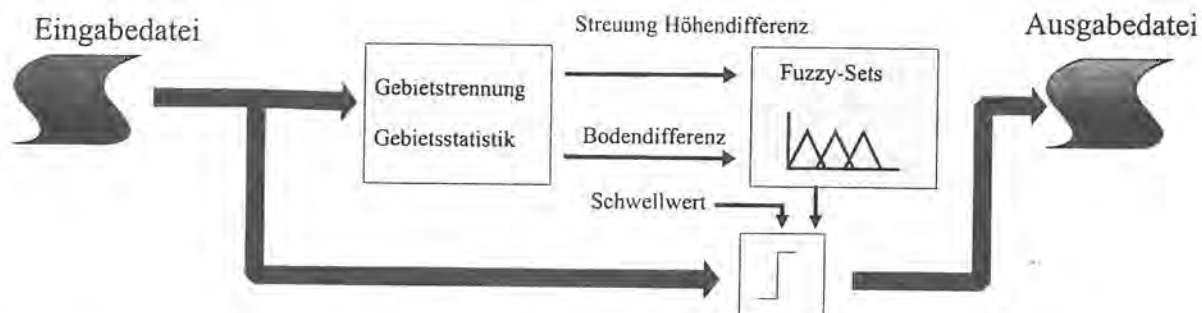


Bild 3.9: Extraktion von Bodenpunkten

Abbildung 3.9 zeigt den Datenfluß des Programms, das die Radardaten des Eingabefiles analysiert. Falls es sich bei einem Radarpunkt um einen Bodenpunkt handelt, wird dieser in das Ausgabefile übertragen. Für das Erkennen des Bodenpunktes bedarf es vorbereitender statistischer Analysen, bevor mittels Fuzzy-Logik die Schlußentscheidung über Bodenpunkt oder Nichtbodenpunkt gefällt wird. Die Einteilung der Profilsur in homogene Gebiete geht der Gebietsstatistik voraus. Für jedes Gebiet wird die Streuung der Höhendifferenz und für jeden Punkt die Bodendifferenz berechnet. Die implementierten Fuzzy-Logik-Algorithmen treffen aus diesen beiden Merkmalen die Schlußentscheidung, also die Zugehörigkeit zur Gruppe der Bodenpunkte oder Nichtbodenpunkte.

Die Profilsur wird in kleine Gebiete unterteilt, die über eine ähnliche Höhenstruktur verfügen. Für diese Gebiete wird die Standardabweichung der Höhen $rms(h)$ berechnet:

$$\text{Streuung der Höhendifferenz } rms(h) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}$$

Eingangsgröße des Fuzzyextraktionsprogramms ist die relative Bodendifferenz Δrh_i , die Differenz der aktuellen Höhe h_i und der Höhe des letzten Bodenpunktes h_{BODEN} , die auf die Standardabweichung des Gebiets bezogen wird.

$$\text{relative Bodendifferenz } \Delta rh_i = \frac{(h_i - h_{BODEN})}{rms(h)}$$

Im ersten Schritt erfolgt eine Fuzzifizierung der Eingangsgröße, was einer linearen Transformation in den Zugehörigkeitsraum entspricht. In der vorliegenden Arbeit wird das Fuzzy Set durch fünf dreieckige Zugehörigkeitsfunktionen $\mu[\text{Sehr Gut}]$, $\mu[\text{Gut}]$, $\mu[\text{Mittel}]$ und $\mu[\text{Schlecht}]$ modelliert.

Da sich die Zugehörigkeitsfunktionen überlappen, wird eine bestimmte Bodendifferenz stets durch zwei Zugehörigkeitsfunktionen fuzzifiziert. Über sogenannte Regeln sind die Zugehörigkeitsfunktionen mit Ausgangsfunktionen verbunden. Diese bilden den Zugehörigkeitsraum auf die Schlußentscheidung ab. Um aus der unscharfen Ausgangsmenge der Schlußentscheidung eine binäre Ausgangsgröße herzuleiten, wird die Defuzzifikation angewandt. Dabei wird die Fläche unter den Funktionen herangezogen, so daß aus einer Flächenschwerpunktbildung eine scharfe Ausgangsgröße folgt. Im Beispiel (Bild 3.10) liegt bei einem Bodenpunkt mit der Bodendifferenz $\Delta rh = 0.25$ eine Schlußentscheidung von 14 vor, er gehört mit 14% der Gruppe der Nichtbodenpunkte und mit 86% der Gruppe der Bodenpunkte

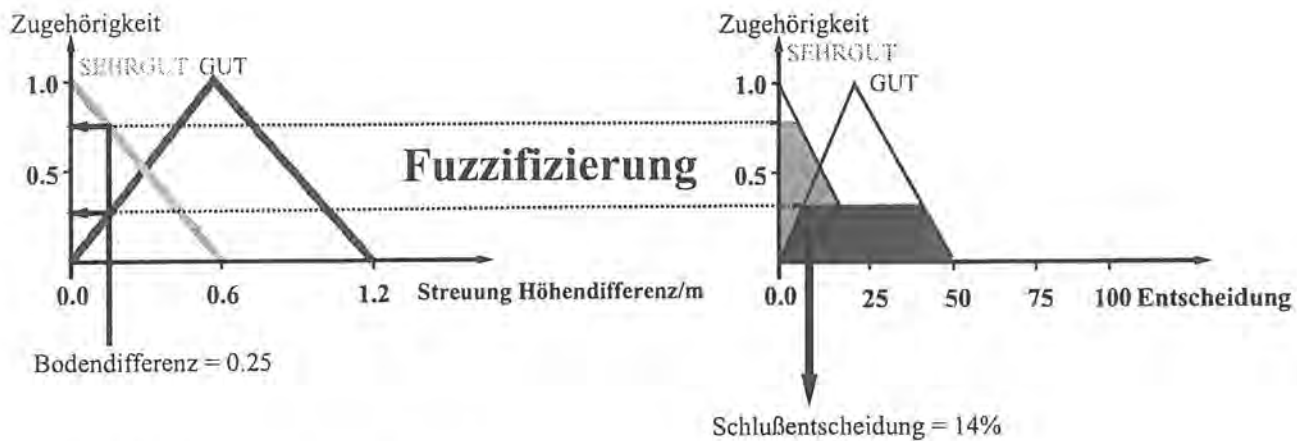


Bild 3.10: Prinzip der Fuzzy-Extraktion

an. Eine Schwelle entscheidet schließlich über seine Zugehörigkeit. Bild 3.11 zeigt die Funktion des Programms anhand einer Spur aus dem Meßdatensatz Neugilching. Alle Punkte einer Spur wurden sequentiell untersucht und in Bodenpunkte und Nichtbodenpunkte eingeteilt. Gerade auch in schwierigen Gebieten mit Vegetation und Bebauung extrahiert das Programm die Bodenpunkte. Die Güte der Extraktion wird durch den Fehler 1.Art und den Fehler 2.Art bestimmt. Insgesamt hat das Programm bei einer repräsentativen Profillinie 93 % der Bodenpunkte richtig erkannt. Demnach werden beim Fehler 1. Art 7 % der Bodenpunkte nicht erkannt und der Gruppe der Nichtbodenpunkte zugeschlagen. Während der Fehler 2.Art, Vegetationspunkte werden den Bodenpunkten zugeordnet, sich auf 4 % beläuft.

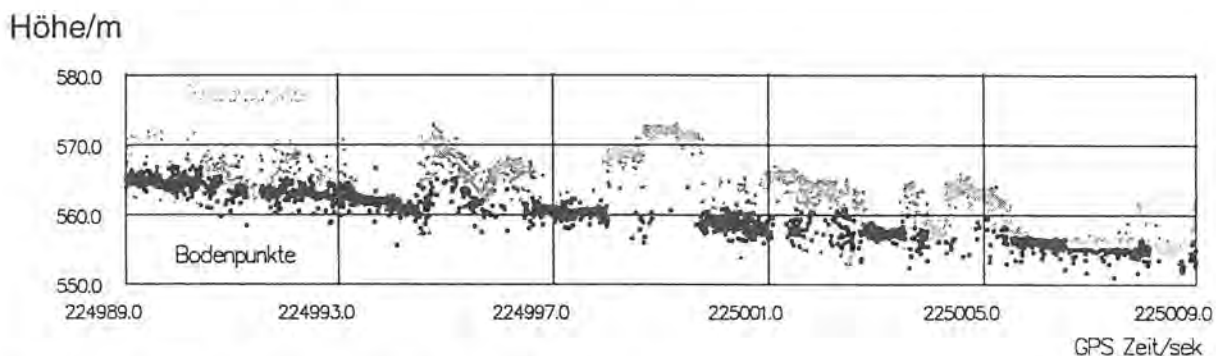


Bild 3.11: Höhenprofil vor und nach der Fuzzy-Extraktion

Bild 3.12 zeigt den Zusammenhang zwischen Bodendifferenz und Schlußentscheidung, sozusagen die Übertragungsfunktion des Fuzzyextraktionsprogramms. Allerdings wird hier nicht die relative Bodendifferenz, sondern die absolute Bodendifferenz über der Streuung der Höhendifferenz $rms(h)$ parametrisiert. Beispielsweise sei eine Bodendifferenz von 3.5 m bei einer kleinen Höhenstreuung $rms(h)=1$ gegeben. Dies führt zu einer Zugehörigkeits-

klassifizierung von 85% zur Gruppe der Nichtbodenpunkte. Bei einer größeren Höhenstandardabweichung wird die Zugehörigkeit zur Klasse der Nichtbodenpunkte geringer. Anhand dieses Kennlinienfeldes kann man bei bekannter Streuung die Schwelle der Schlußentscheidung optimal legen.

Schlußentscheidung

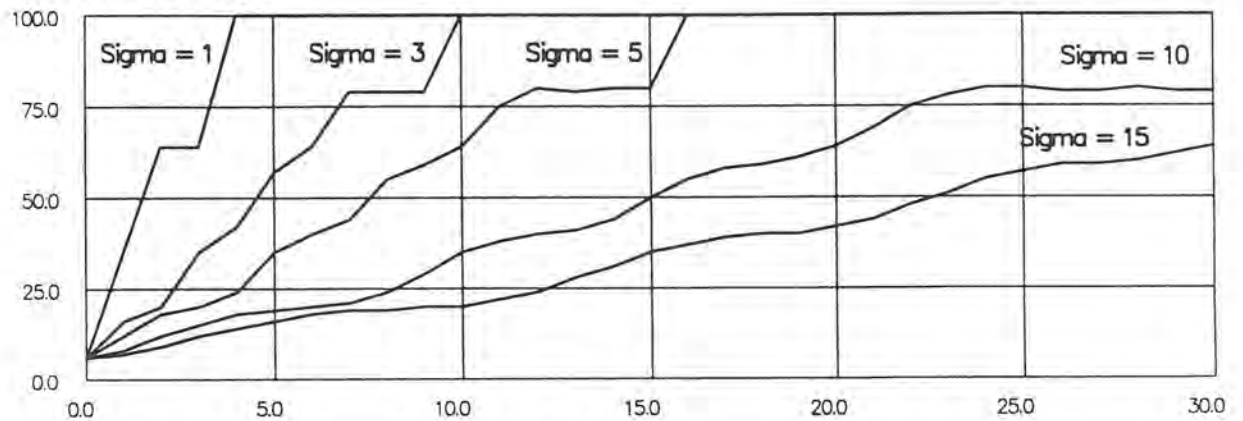


Bild 3.12: Übertragungsfunktion der Fuzzy-Extraktion

Bodendifferenz/m

2.3 Systemanalyse

Das Altimetersystem wurde bei der Befliegung Neugilching auf seine Systemperformance geprüft. Die einzelnen Systemkomponenten wurden in Bezug auf ihr Meßverhalten schon analysiert. Bei den Genauigkeiten bezüglich der GPS / INS-Integration kann auf erste Untersuchungen von Heinze / 63 / und Söhne / 37,39 / zurückgegriffen werden. Jedoch ist es völlig offen, welche Ergebnisse sich letztlich mit der Gesamtplattform erreichen lassen. Daher befaßte sich der erste Teil des Meßfluges mit Kalibrationsmessungen, die eindeutige Aussagen über die Genauigkeit und Leistungsfähigkeit der Altimeterplattform erlauben. Dabei werden im folgenden die Parameter, die die Systemperformance charakterisieren, untersucht:

- maximale Reichweite
- Auflösungsvermögen
- absolute Höhengenaugkeit
- Punktgenaugkeit.

2.3.1 Kalibrierung Höhenmessung

Für die Kalibrierung eignet sich das Flughafengelände Oberpfaffenhofen in besonderer Weise: Die Runway stellt eine leicht geneigte Ebene dar, deren Oberflächenrauhigkeit kleiner als das Meßrauschen des Systems ist. Die Runway wurde in vier unterschiedlichen Höhen zwischen 250 m und 550 m überflogen. Desweiteren wurde ein Steigflug und ein Sinkflug über der Runway durchgeführt. Diese Flüge geben Auskunft über die optimale Flughöhe für die Geländevermessung.

Die theoretische Reichweite wurde bereits in Kapitel 2.2 über den Signal/Rausch-Abstand als Funktion des Rückstreuquerschnitts ermittelt. Je größer die Einsatzhöhe des Systems gewählt wird, desto geringer ist die empfangene Echoleistung im Verhältnis zum Rauschen. Die asphaltierte Runway stellt ein helles Ziel mit recht geringer Rauigkeit dar, was bezüglich der reflektierten Echoleistung optimale Meßbedingungen verkörpert. Für dieses Ziel wäre ein Rückstreuquerschnitt von $\sigma > 0$ dB anzusetzen, was einer theoretischen Reichweite von 900 m bis 1000 m entspricht. Wie die Auswertung der Steig- und Sinkflüge zeigt, liefert das Radaraltimeter bei 700 m über der Runway gute Meßergebnisse.

Allerdings ist die Reichweite stets im Zusammenhang mit dem Rückstreuquerschnitt des Ziels zu sehen. Über einem guten Reflektor wie der Runway ist die Reichweite wesentlich größer, als über einem Gebiet mit geringem Rückstreuquerschnitt. Daher muß für den Einsatz in einem bestimmten Gebiet stets die Struktur der Streuobjekte in Betracht gezogen werden. Die Flughöhe ist dann in Abhängigkeit vom schlechtesten Reflektor, der noch gemessen werden soll, festzulegen.

Bild 4.1 zeigt die Karte des Flugfelds Oberpfaffenhofen mit den Kalibrationsspuren über der Runway. Das helle Ziel der Runway und die Rasenbedeckung des Flugfeldes kontrastieren im Echo und im Höhenrauschen stark. Werden die Positionslampen, die die Runwayränder säumen, vom Ausleuchtfleck erfaßt, so verfälschen sie die Höhen- und Echomessung wesentlich. Bedauerlicherweise weichen die Spuren von der Runwaymitte erheblich ab. Daher können nicht die gesamten Spuren zur Auswertung herangezogen werden, sondern nur die Spurausschnitte, die sich über der Runway befinden. Die Runway hat eine Breite von 45 m, während der Ausleuchtfleck des Radaraltimeters 30 m Durchmesser besitzt. Um zu garantieren, daß es sich um Meßwerte der Runway handelt, werden nur Werte zugelassen die weniger als 10 Meter rechts und links von der Runwaymitte abweichen.

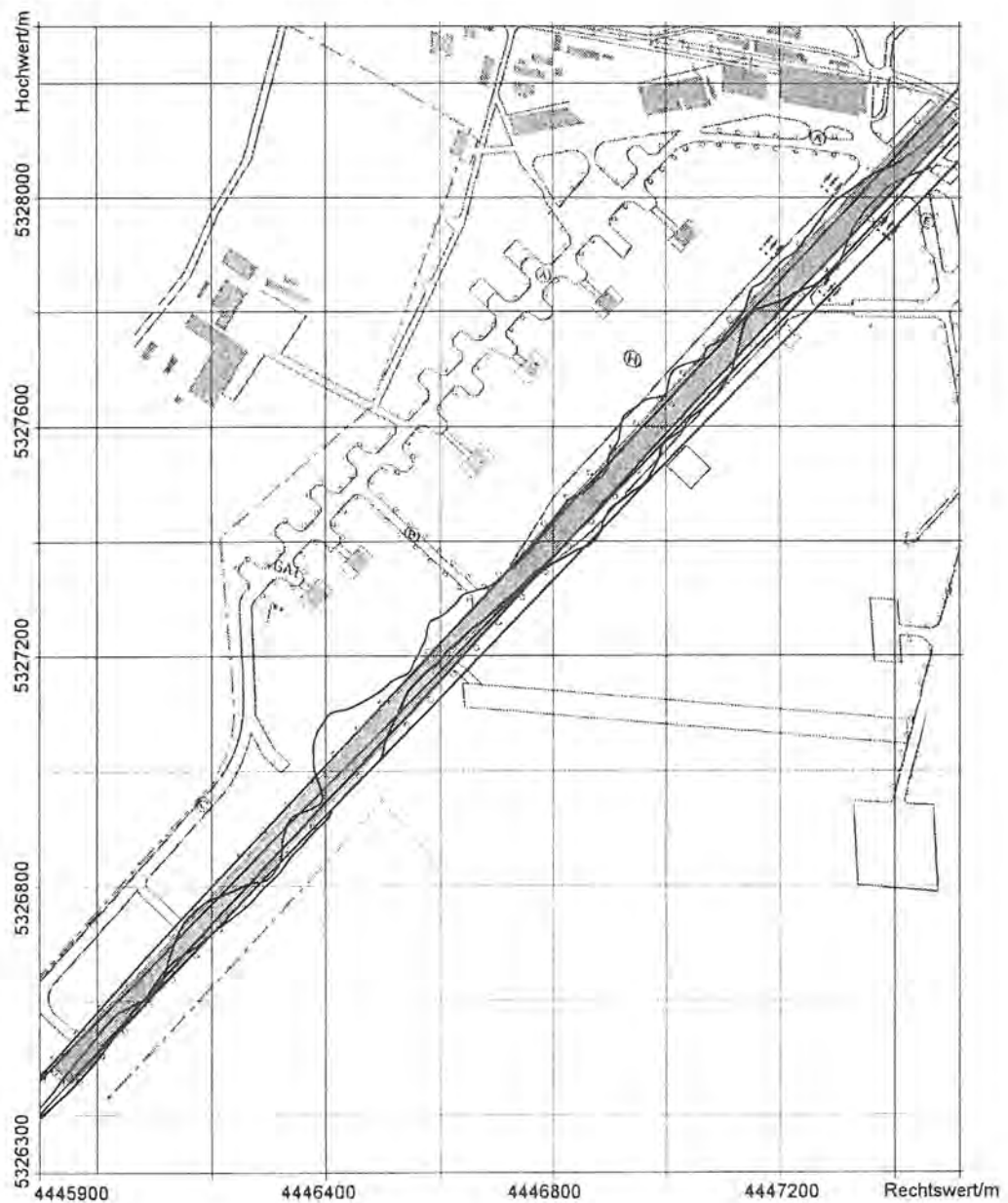


Bild 4.1: Flugplatz Oberpfaffenhofen

In Bild 4.2 ist die zugehörige Altimeterhöhe über Grund aufgetragen. Die vier Spuren wurden in unterschiedlichen Höhen von 200 m, 250 m, 350 m und 550 m geflogen, des weiteren ein Steigflug von 300 m auf 700 m und ein Sinkflug von 700 m auf 300 m. Die für die Kalibration benützen Meßwerte sind in Schwarz unterlegt.

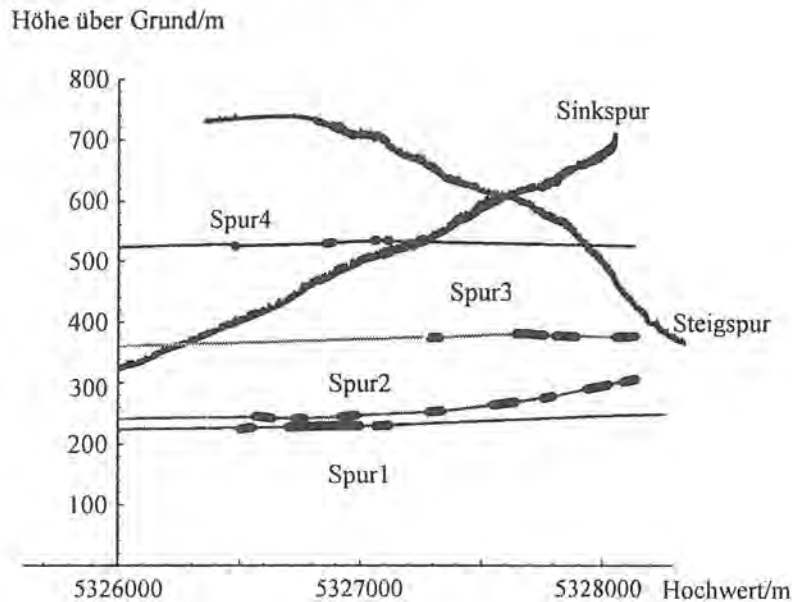


Bild 4.2: Profile über der Runway

Gemäß der Radargleichung nach Ulaby / 9 / gilt für ein monostatisches Radar:

$$P_E(R, \varphi) \approx \frac{P_s \cdot G_{s0} \cdot A_{E0}}{(4\pi)^2} \cdot \frac{\sigma(\varphi)}{R^4}$$

Die empfangene Leistung P_E ist also abhängig von der Schrägentfernung R und dem Einfallswinkel φ . Die konstanten Einflüsse werden in einem Faktor aus der Sendeleistung P_s , dem Sendeantennengewinn G_{s0} und der Antennenwirkfläche A_e der Empfangsantenne zusammengefaßt. Die empfangene Echoleistung P_E nimmt einerseits mit $1/R^4$ ab und ist andererseits proportional zum Rückstreuquerschnitt σ . Dieser stellt wiederum eine Funktion des Einfallswinkels dar, wobei für die Runway eine Rückstreufunction von Asphalt nach Ulaby / 16 / angesetzt wurde.

Je nach Flugbewegung treten Einfallswinkel von $3^\circ - 10^\circ$, beim Steigflug sogar Winkel bis 15° auf, unter denen die topographische Oberfläche erfaßt wird. Da die Einfallswinkel durch die momentane Fluglage vorgegeben werden, liegen bei den entsprechenden Höhen nicht zu jedem Winkel Messungen vor. In Bild 4.3 zeigt die gekrümmte Fläche im Raum die theoretische Abhängigkeit der Empfangsleistung P_E von der Höhe und dem Einfallswinkel φ .

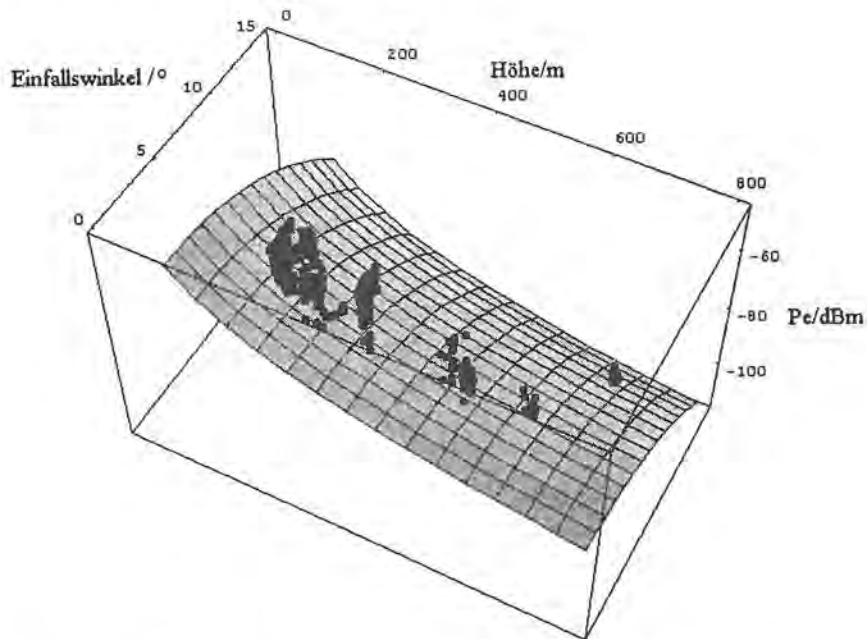


Bild 4.3: Empfangsleistung in Abhängigkeit der Altimeterhöhe und des Einfallswinkel:

Die gemessenen Empfangsleistungen sind über der Höhe und dem Einfallswinkel als schwarze Punkte aufgetragen. Je nach Spur treten bestimmte Meßwerthäufungen auf der Sollfläche auf.

2.3.2 Systemgenauigkeit

Für die Untersuchung der Genauigkeit spielt die Standardabweichung der Höhenmessung eine wichtige Rolle. Aus den Kalibrationsflügen läßt sich eine statistische Auswertung der Höhenmessung vornehmen. Die Standardabweichung der Höhenmessung ist bei der Messung eines glatten, ebenen Ziels großer Ausdehnung ein Maß für das Meßrauschen, das sich mit zunehmender Höhe verschlechtert. Stellt man die Gleichung aus Kapitel 2.1.3 nach dem Signal/Rausch-Verhältnis um, so folgt:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s \cdot G_{so} \cdot Ae \cdot \sigma}{(4\pi)^2 \cdot k \cdot T \cdot Be \cdot F} \cdot \frac{1}{R^4}$$

Die Standardabweichung der Altimeterhöhe $rms(R)$ ist nach Forsel / 21 / reziprok zur Wurzel des Signal zu Rauschabstandes:

$$rms(R) = \frac{2 \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot \sqrt{\frac{S}{N}}} = \frac{4 \cdot c \cdot \tau}{\sqrt{\frac{P_s \cdot G_{so} \cdot Ae \cdot \sigma}{k \cdot T \cdot Be \cdot F}}} \cdot R^2 = 1.27 \cdot 10^{-6} \cdot R^2$$

Daraus folgt, daß die Standardabweichung der Höhe $rms(R)$ mit dem Quadrat der Altimeterhöhe R anwächst. Bild 4.4 zeigt die ermittelte Standardabweichung als Punkte bei den mittleren Flughöhen 230 m, 380 m, 530 m und 730 m. Der theoretische Zusammenhang wird durch die gemessenen Punkte bestätigt. Dabei handelt es sich um die Standardabweichung der Einzelmessungen, eine Mittelung wurde noch nicht vorgenommen.

Standardabweichung (R) / m

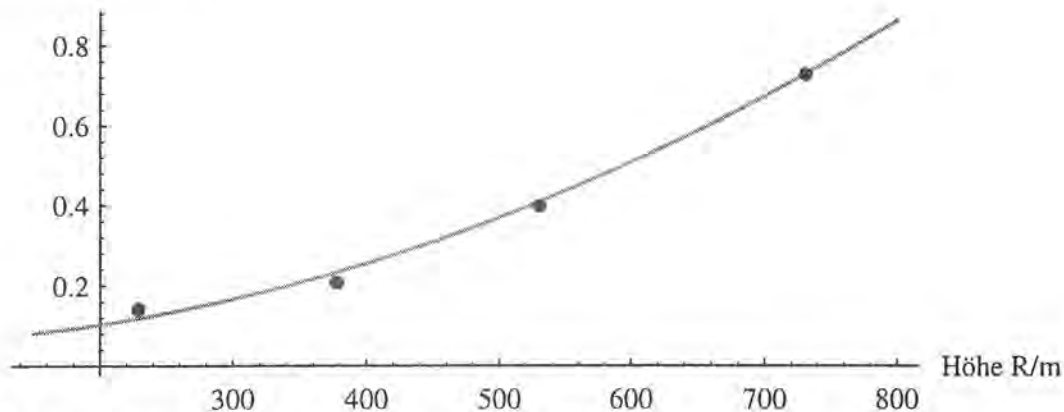


Bild 4.4: Standardabweichung in Abhängigkeit der Altimeterhöhe

Bei einer Flughöhe von 230 m über der Runway erreicht das Radaraltimeter eine Standardabweichung von $rms(R) = 0.14$ m. Bei obiger Gleichung ist das Grundrauschen, das auch bei der Höhe $R=0$ m vorhanden ist, nicht berücksichtigt. Daher wurde ein internes Grundrauschen von 5 cm angenommen, was zu der in Bild 4.4 gezeichneten Parabel führt:

$$rms(R) = 0.05m + 1.27 \cdot 10^{-6} \cdot R^2$$

Steigt die Flughöhe an, so wird die Empfangsleistung geringer. Bei gleichbleibendem Rauschen verschlechtert sich der Signal-zu-Rauschabstand. Dabei wird die Amplitude des Stop-Pulses geringer, was zu einer Unsicherheit in der Zeitintervallmessung führt. Das wirkt sich als größere Standardabweichung bei der Höhenmessung aus. Für die Meßgenauigkeit eines Sensors wird die Standardabweichung in Bezug zur geflogenen Meßhöhe gesetzt:

$$Meßgenauigkeit = \frac{rms(R)}{R} \cdot 100\%$$

Diese Meßgenauigkeit ist in Bild 4.5 aufgetragen. Mit steigender Flughöhe verschlechtert sich die Meßgenauigkeit. Optimal ist ein Einsatzbereich des Radaraltimeters von 250 m bis 550 m über Grund. Dieser Einsatzbereich wurde bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen eingehalten.

Meßgenauigkeit / %

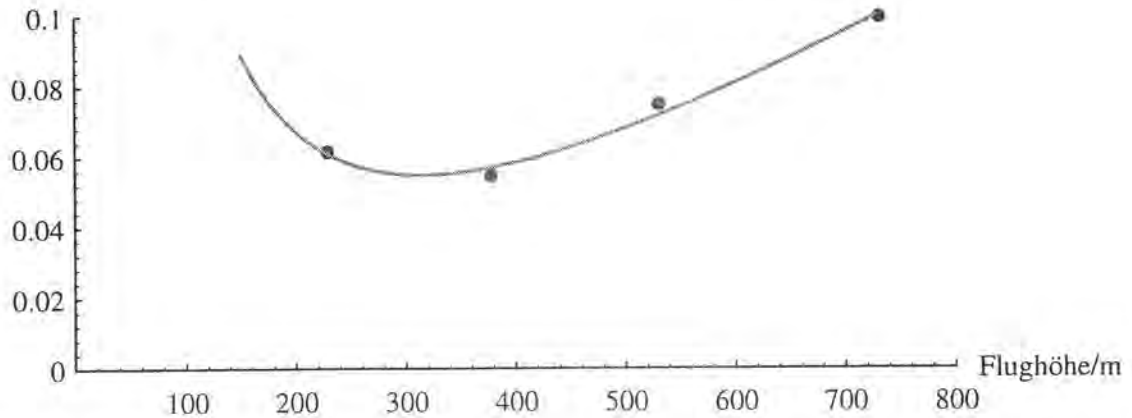


Bild 4.5: relative Meßgenauigkeit

2.3.3 Höhenfehler

Einen Ansatz zur Bestimmung des absoluten Höhenfehlers bietet der Vergleich einer Profilsur mit dem tatsächlichen Gelände. Die Spuren über der ebenen, glatten Fläche der Runway eignen sich hierfür in besonderer Weise. Vom untersuchten Terrain lag ein digitales Geländemodell mit einem Flächenraster von 50 m und einer Höhenauflösung von 1 m vor, das einen Teil der 2286 m langen Runway beinhaltet. So konnte ein 1 km langer Ausschnitt der Runway mit dem Geländemodell verglichen werden. Das Höhenrauschen der Runway, das durch die Rauigkeit des Asphalts zustande kommt, ist wesentlich geringer als das Meßrauschen des Radaraltimeters. Die Runway besitzt nach Auskunft der Flughafenverwaltung ein vom Scheitel ausgehendes Quergefälle von 1,5%. Unter Vernachlässigung dieser Faktoren wird für die folgende Fehleruntersuchung angenommen, daß der gemessene Höhenfehler dem Radaraltimeter zuzuschreiben ist. Bild 4.5a zeigt die Fehlerverteilung dieser Messung.

Häufigkeit

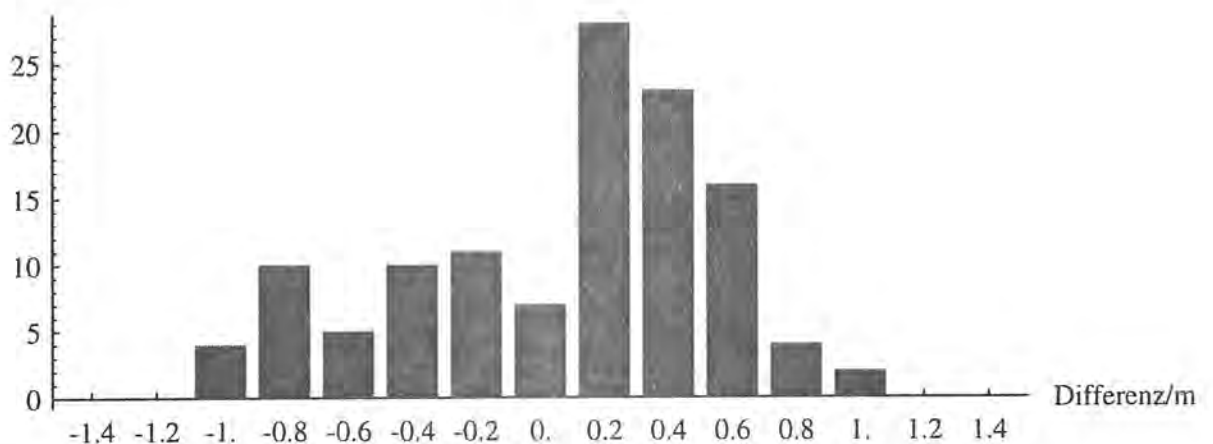


Bild 4.5a: Histogramm des Höhenfehlers

In Bild 4.6 bis Bild 4.8 wurde dazu ein 1 km langer Abschnitt der Runwaymessung herangezogen. Im Diagramm 4.6 sind Referenzhöhe und Radarhöhe eingetragen, während im anschließenden Bild 4.7 die Differenz zwischen Radar und Referenz aufgezeichnet ist. An zwei Stellen werden Differenzen bis zu 1 m gemessen. Der mittlere Fehler zwischen Radarhöhe und Referenz beträgt 0.51 m. Da das Referenzmodell nur über eine Auflösung von 1 m verfügt, ist der Fehler nicht eindeutig zuzuordnen.

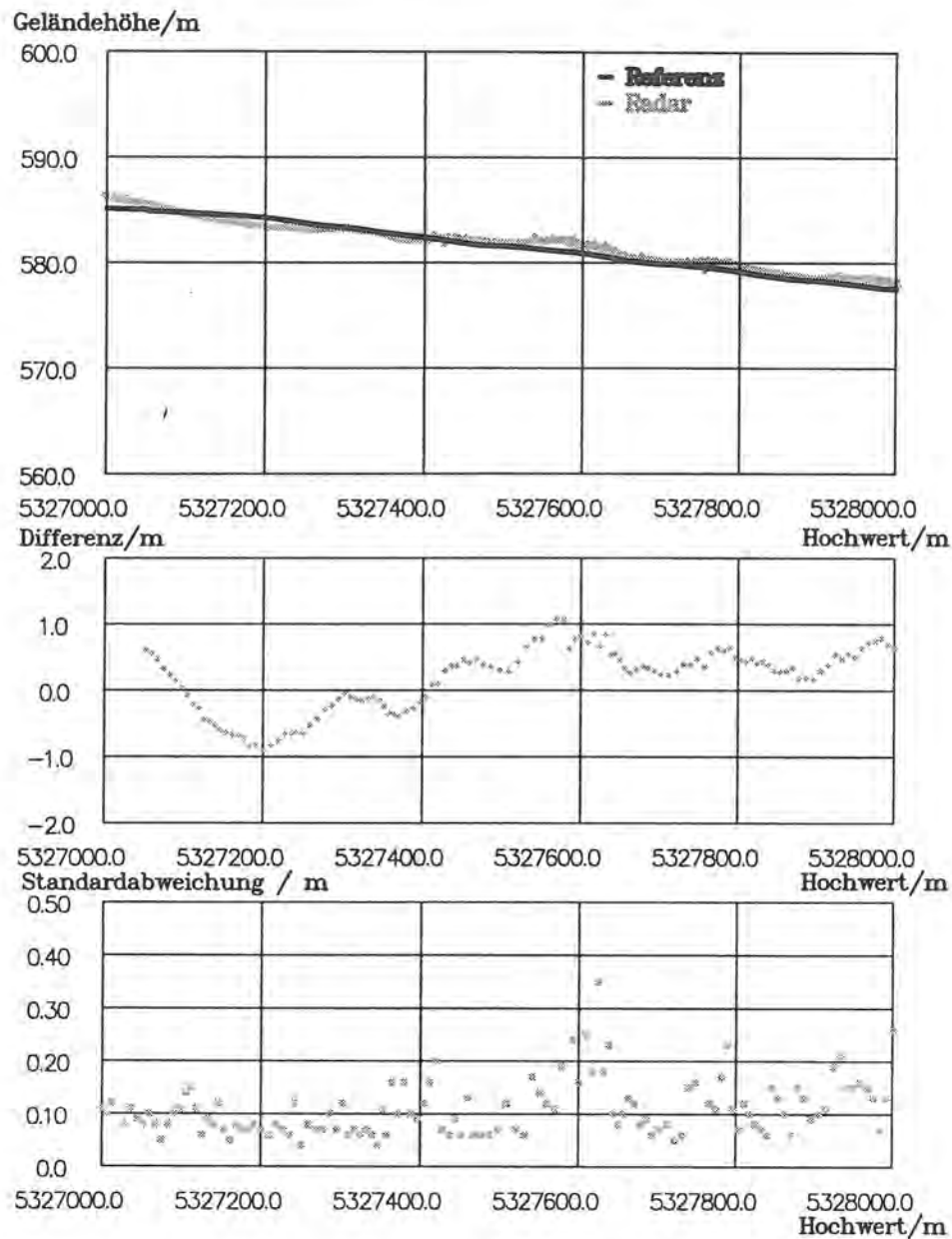


Bild 4.6 - Bild 4.8: Runwaymessung Flugplatz Oberpfaffenhofen

Im Bild 4.8 ist die Standardabweichung von je 100 Meßwerten aufgetragen. Sie beträgt im Mittel 0.12 m, steigt aber an Stellen an denen der seitliche Grasbewuchs mitgemessen wurde auf

0.35 m. Da das Radaraltimeter bei einer Flughöhe von 380 m über Grund einen Ausleuchtfleck von 30 m hat, sind schon geringe Abweichungen der Fußpunktsspur von der Runwaymitte problematisch. Beim Hochwert 5327600 m weicht die Spur von der Runwaymitte ab und der Ausleuchtfleck streift das Gras seitlich der Bahn. Insgesamt aber bestätigt der Vergleich die korrekte Höhenbestimmung der Runway.

mittlerer Höhenfehler	0.51 m
maximaler Höhenfehler	± 1.09 m
Standardabweichung der Höhe	0.12 m

2.3.4 Richtdiagramme der Sende- und Empfangsantenne

Die Kenntnis des räumlichen Strahlungsverhaltens der Antennen ist für die Berechnung der Echosignalstärke und der Auflösungsfläche notwendig. Vom Boden aus betrachtet, strahlt die Sendeantenne die Leistungsdichte S_s ab, die von einem einzigen Punkt, dem Phasenzentrum auszugehen scheint. In der Konfiguration des Meßaufbaus befindet sich das Zielobjekt im Fernfeld der Sendeantenne. Die Richtcharakteristik E_a gibt die Richtungsabhängigkeit der von einer Antenne erzeugten Feldstärke in einem konstanten Abstand unter Fernfeldbedingungen an. Um eine hohe Flächenauflösung zu erhalten, muß eine scharf bündelnde Antenne verwendet werden. Eine planare Gruppenantenne bietet eine Richtcharakteristik mit sehr kleinem Öffnungswinkel infolge der vektoriellen Überlagerung der Feldstärken von vielen kleinen Antennenelementen. Die verwendete Sendeantenne wurde im Rahmen der Dissertation / 4 / entwickelt. Bild 4.9a und 4.9b zeigen die Meßergebnisse des Richtdiagramms der Sendeantenne in X und Y Richtung. Um den Abstand der Nebenkeulen zur Hauptkeule zu optimieren, wurde für die Apertur als Leistungsbelegung eine Cosinusverteilung gewählt. Der Richtfaktor einer planaren Gruppenantenne kann nach Johnson / 54 / wie folgt angenähert werden:

$$G_s(\theta, \psi) = G_{0s} \cdot E_a(\theta, \psi) = G_{0s} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot M \cdot \frac{dx}{\lambda} \cdot \sin\theta \cdot \cos\psi) \cdot \sin(\pi \cdot N \cdot \frac{dy}{\lambda} \cdot \sin\theta \cdot \sin\psi)}{M \cdot \sin(\pi \cdot \frac{dx}{\lambda} \cdot \sin\theta \cdot \cos\psi) \cdot N \cdot \sin(\pi \cdot \frac{dy}{\lambda} \cdot \sin\theta \cdot \sin\psi)}$$

Bei der eingesetzten Sendeantenne beträgt der Abstand der Antennenelemente $dx = 0.4$ cm und $dy = 1.57$ cm in x- beziehungsweise y-Richtung. Bei der Sendeantenne handelt es sich um $N = 24$ auf $M = 132$ Antennenelemente. Damit wird ein Gewinn $G_0 = 25$ dB erreicht. In Y-Richtung beträgt der Abstand der Hauptkeule zur 1. Nebenkeule -17 dB demgegenüber macht der Abstand in X-Richtung -11 dB aus. Die 3 dB Breite in X-Richtung ist mit 4° abzulesen, in Y-Richtung beträgt sie 3.5° .

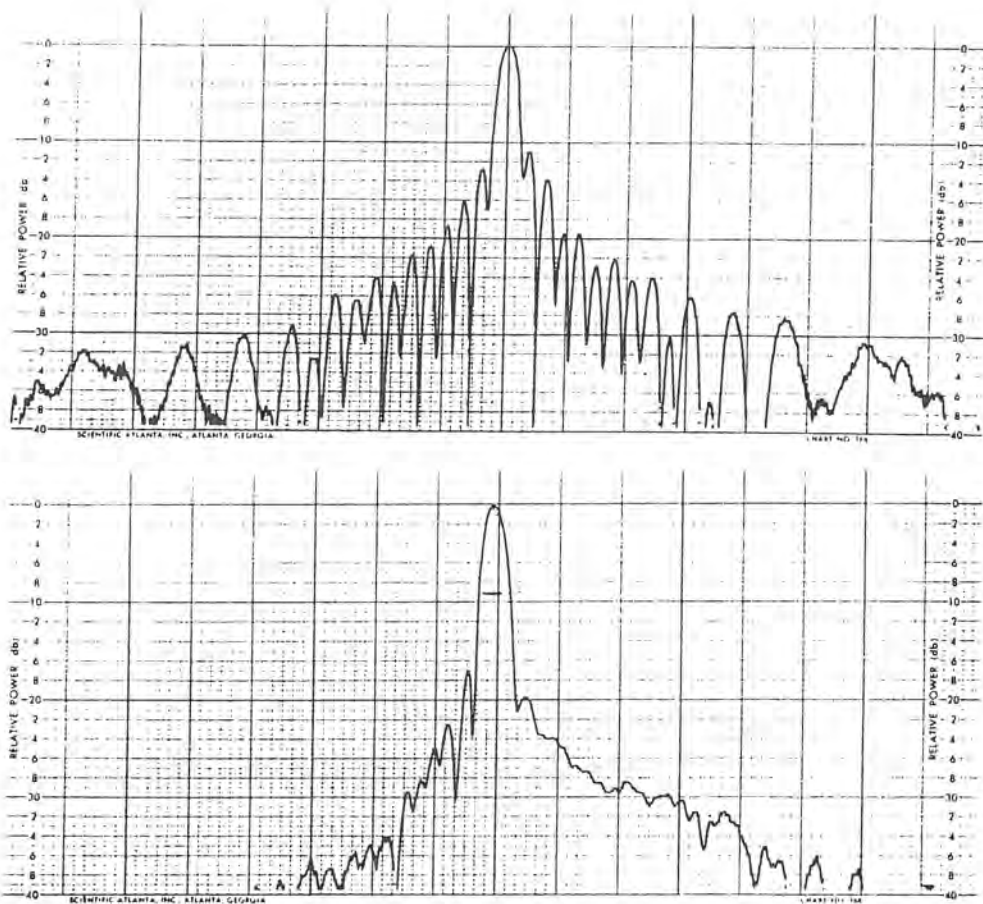


Bild 4.9a und Bild 4.9b: Richtdiagramme Sendeantenne

Der CW - Betrieb des Radaraltimeters setzt eine separate Empfangsantenne voraus, da nicht wie beim Impulsbetrieb zwischen Senden und Empfangen umgeschaltet werden kann. Eine Standard Gain Hornantenne wurde als Empfangsantenne verwandt. Sie bietet einen Gewinn von $G_{0E} = 20$ dB, die Nebenkeulen liegen 20 dB unter der Hauptkeule. Nach Johnson / 54 / kann der Richtfaktor einer Hornantenne mit folgender Funktion approximiert werden.

$$G_E(\theta, \psi) = G_{0E} \cdot E a_E(\theta, \psi) = G_{0E} \cdot \frac{\sin(2\pi \cdot \frac{b}{\lambda} \cdot \sin\theta) \cdot \sin(2\pi \cdot \frac{b}{\lambda} \cdot \sin\psi)}{2\pi \cdot \frac{b}{\lambda} \cdot \sin\theta \cdot 2\pi \cdot \frac{b}{\lambda} \cdot \sin\psi}$$

Die Hauptstrahlrichtung liegt im Ursprung des Koordinatensystems, sie nimmt mit $\sin x/x$ - Funktionen über den Raumwinkeln ab. In Ergänzung dazu ist die gemessene Richtfunktion der Empfangsantenne in Bild 4.12 dargestellt. Im Vergleich zur Sendeantenne verfügt die Empfangsantenne über eine wesentlich breitere Richtcharakteristik. Kleinere Ausrichtungsfehler beim Einbau der Antennen sind somit unproblematisch.

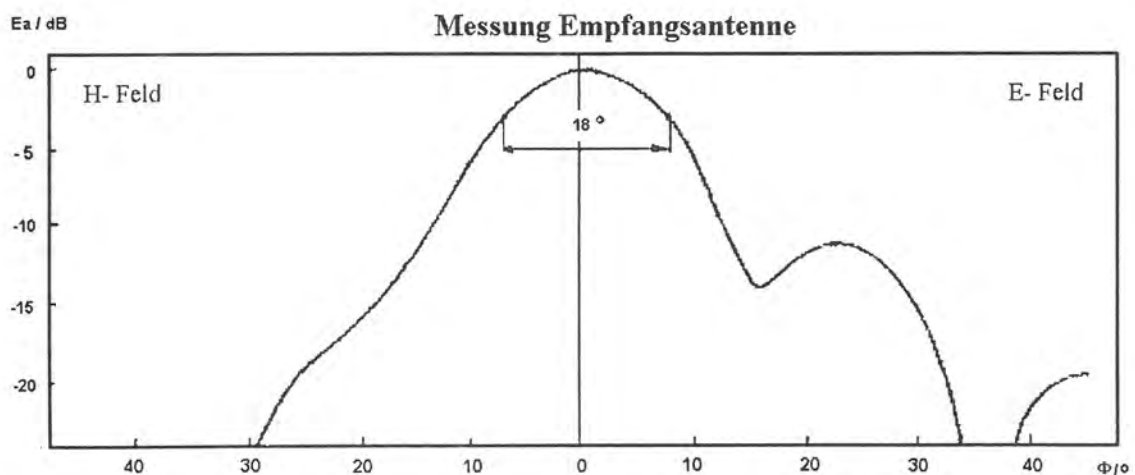


Bild 4.12: Richtdiagramm Empfangsantenne

2.3.5 Kalibration Rückstreuung

Nachdem in den vorherigen Betrachtungen die Messung der Geländehöhe im Mittelpunkt stand, soll nun die empfangene Echoleistung analysiert werden. Ein Vergleich der empfangenen Echoleistung kann mit der bekannten Systemantwort von Punktzielen durchgeführt werden. Als einfach zu beschreibende Punktziele eignen sich beispielsweise Cornerreflektoren. Sie verfügen über einen hohen Rückstreuquerschnitt, der in einem Einfallswinkelbereich von $\pm 30^\circ$ zu erzielen ist. So wurde im Rahmen der Kalibrationsflüge, die über der Runway des Flugplatzes Oberpfaffenhofen durchgeführt wurden, ein Reflektor mittig zum Anfang der Runway aufgestellt. Bild 4.13 zeigt die Umgebung des Aufstellungsortes des Cornerreflektors auf einem Schrägsichtfoto.

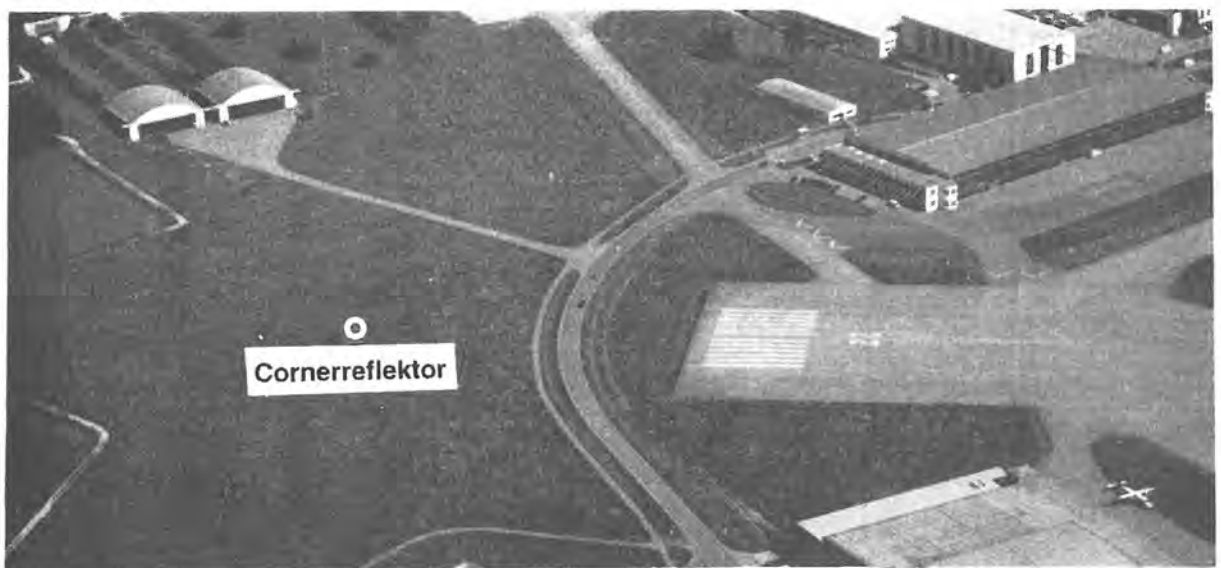


Bild 4.13: Aufstellung Cornerreflektor

Dabei wurde die Aperturbenebene des Reflektors waagrecht ausgerichtet, die Symmetrieebene des Reflektors wurde in Flugrichtung justiert, also mit einem Aufstellwinkel $\beta = -45^\circ$ gegen Ostrichtung verdreht. Bei der Aufstellung wurde darauf geachtet, daß der Reflektor auf schwach reflektierendem Grund stand. Die grasbewachsene Ebene am Kopf der Runway, in der sich keine Flughafenbefeuerung oder andere stark reflektierende Objekte befanden, erfüllte diese Voraussetzung. Ferner schrieb die Flugsicherung einen Abstand von etwa 100 m zum Beginn der Runway vor. Obwohl mehrere Überflüge gemacht wurden, wurde der Cornerreflektor nur bei Spur 3 getroffen.

Die Karte in Bild 4.14 gibt einen Ausschnitt des Fluggeländes mit der Runway und den Gebäuden der Firma Dornier wieder, wobei die Flugspur in Rot und der Aufstellungsort des

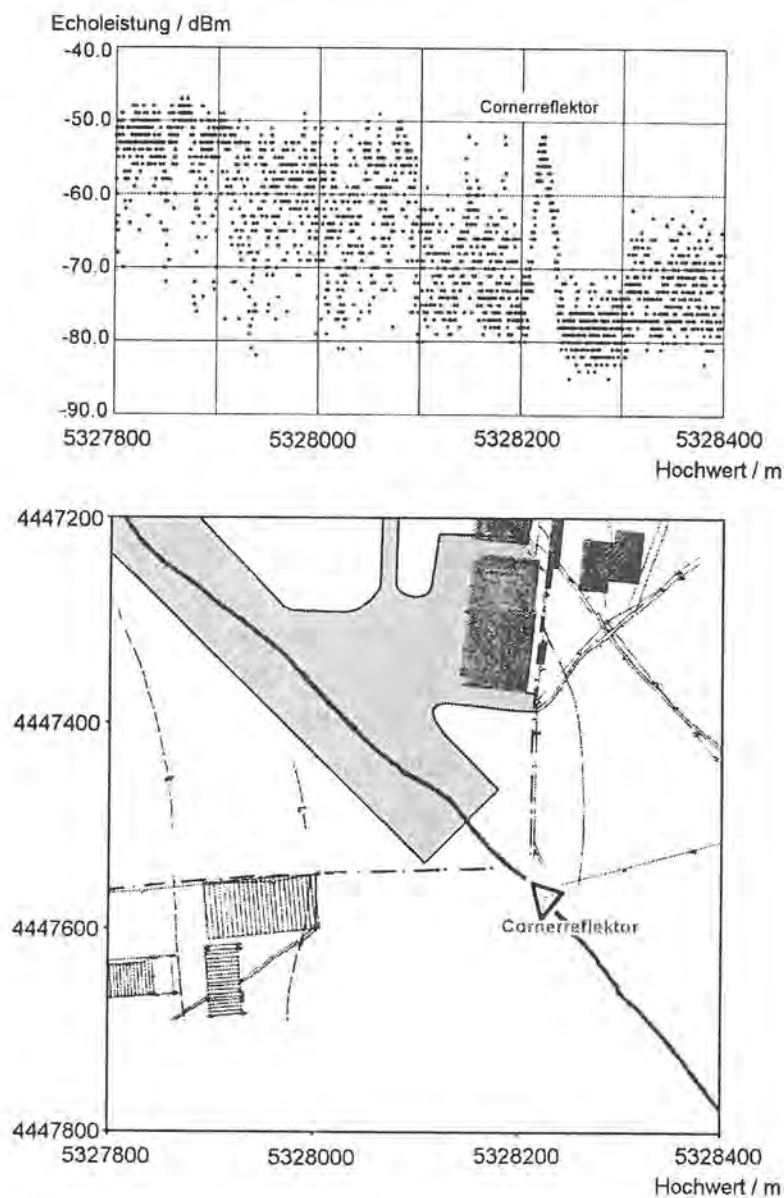


Bild 4.14, Bild 4.15: gemessene Echoleistung Cornerreflektor

Cornerreflektors eingezeichnet sind. Die zugehörige Messung der Empfangsleistung ist in Bild 4.15 aufgetragen. Der Reflektor befindet sich bei Hochwert 5328220 m. Charakteristisch hebt er sich mit einer um 25dB größeren Leistung aus dem Rückstreuecho der Wiese, das zwischen -80 dBm und -65 dBm liegt, heraus. Der gemessene Verlauf der rückgestreuten Echoleistung des Reflektors ist sinusförmig.

Die Simulation der rückgestreuten Leistung Pr_{SIMU} erfolgt nach der Radargleichung, die in der Integralform nach Ulaby / 9 / folgendermaßen lautet:

$$Pr_{SIMU} = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \iint \frac{G_t \cdot G_r \cdot \sigma_0 \cdot Pt}{R^4} dA$$

Die rückgestreute Leistung Pr_{SIMU} stellt sich als das Integral über der ausgeleuchteten Fläche A der Sendeantenne dar. Dabei ist die rückgestreute Leistung eine räumliche Überlagerung der gesendeten Leistung Pt und des Rückstreukoeffizienten σ_0 des angeleuchteten Radarziels. Da es sich bei dem Cornerreflektor um ein Punktziel handelt, vereinfacht sich die Radargleichung wesentlich. In erster Näherung muß jetzt nicht mehr über die Fläche integriert werden, sondern nur noch ein Punkt betrachtet werden:

$$Pr_{SIMU}(t) \approx \frac{\lambda^2 \cdot G_S(\theta(t), \psi(t)) \cdot G_E(\theta(t), \psi(t)) \cdot Pt \cdot \sigma_0(\theta(t), \psi(t))}{(4\pi)^3 \cdot R(t)^4}$$

Da zu jeder Zeit t die Flugzeugposition bekannt ist, können die entsprechenden Raumwinkel $\theta(t)$, $\psi(t)$ ermittelt und so die empfangene Leistung simuliert werden.

Die Vereinfachung, nur den Reflektor zu betrachten und die Aufstellfläche zu vernachlässigen, übergeht den rückgestreuten Beitrag der Grasfläche. Dieser Fehler ist mit etwa 0.5 dB zu bewerten, da die Aufstellfläche um etwa 25 dB dunkler als der Corner selbst ist. Die zur Zeit t rückgestreute Leistung hängt also, abgesehen von den Antennengewinnen G_S und G_E , vom Produkt der Sendeleistung Pt und dem Rückstreukoeffizienten σ_0 ab. Die Richtfunktion der Antennen wurde nach dem im vorigen Kapitel besprochenen Modell approximiert.

Bei dem Reflektor von Typ SP 316/90 handelt es sich um einen dreiflächigen Cornerreflektor mit einer Seitenlänge von $l=0.9$ m. Er ist ein für das SAR-580 Programm optimierter Reflektor, insofern als die Grundfläche des dreieckigen Reflektors in ein Rechteck modifiziert wurde. Trotzdem kann für eine erste Näherung die bekannte Formel des dreieckigen, trihedralen Cornerreflektors benützt werden.

$$\sigma(t) = 4\pi \cdot \frac{I^4}{\lambda^2} \cdot [(\cos\theta_c(t) + \sin\theta_c(t) \cdot (\sin\psi_c(t) + \cos\psi_c(t)) - 2(\cos\theta_c(t) \cdot \sin\theta_c(t) \cdot (\sin\psi_c(t) + \cos\psi_c(t)))^{-1}]^2$$

Die Näherungsformel für den Rückstreuquerschnitt wurde aus Ruck / 10 / entnommen. Der maximale Rückstreuquerschnitt σ ist nur von der Geometrie des Reflektors und der Wellenlänge λ des Radars abhängig. Die geometrischen Gegebenheiten sind in Bild 4.16 zusammengestellt.

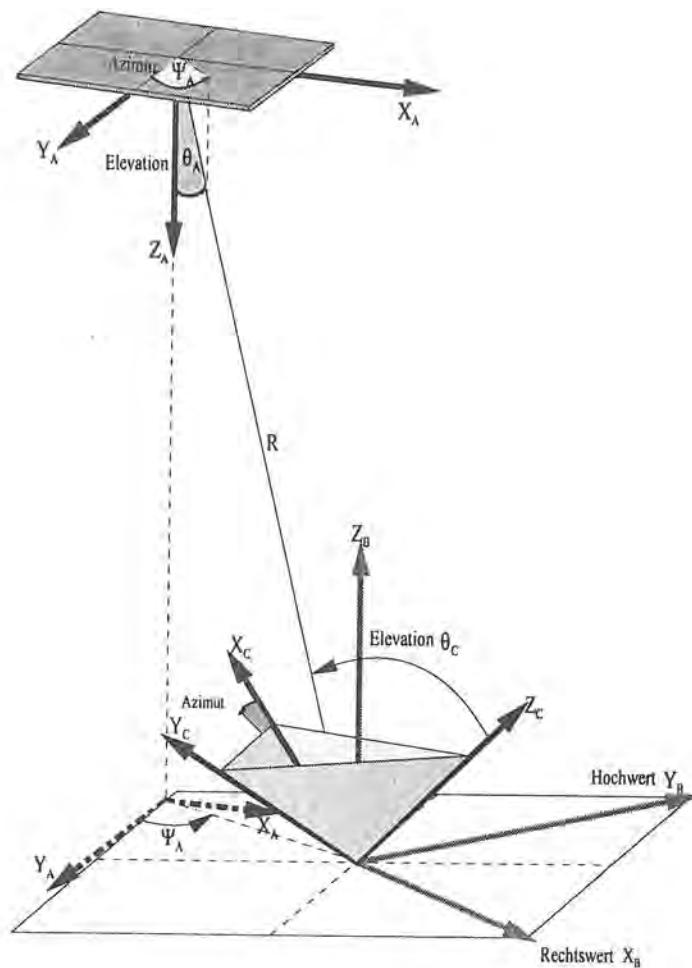


Bild 4.16: Anordnung der Koordinatensysteme von Cornerreflektor und Sendeantenne

Die räumliche Verteilung des Rückstreuoeffizienten $\sigma(\theta_c, \psi_c)$ des Cornerreflektors ist in Bild 4.17 über Elevation θ_c und Azimut ψ_c dargestellt. Der Ausschnitt aus dem Reflexionsdiagramm zeigt das Maximum des Rückstreuoeffizienten, das sich bei den Winkeln $\theta_c = 54.74^\circ$ und $\psi_c = 45^\circ$ einstellt.

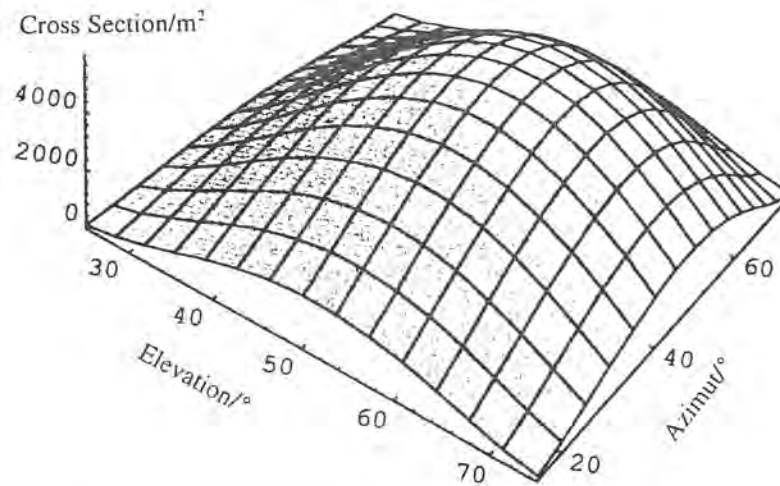


Bild 4.17: theoretischer Rückstreuquerschnitt eines Cornerreflektors

Für die Simulation des Rückstreuverhaltens des Cornerreflektors wird ein zeitlicher Ausschnitt von 3 Sekunden herangezogen, der ab der GPS Zeit 222800.0 sek beginnt. Zuerst werden die sphärischen Winkel Elevation θ_c und Azimut ψ_c , unter denen der Reflektor das Flugzeug herannahen und wieder verschwinden sieht, ermittelt. Da der Reflektor in Nord-Ost-Richtung aufgestellt wurde, kann mit folgender Koordinatentransformation die Flugzeugposition in Cornerkoordinaten umgewandelt werden. Der Ursprung der Cornerkoordinaten befindet sich im Fußpunkt des Reflektors, die beiden Koordinatensysteme sind um 45° verdreht.

$$\begin{bmatrix} x_{gk}(t) \\ y_{gk}(t) \\ z_{gk}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{Rechtswert}(t) - \text{Rechtswert}_{\text{Corner}} \\ \text{Hochwert}(t) - \text{Hochwert}_{\text{Corner}} \\ \text{Höhe}(t) - \text{Höhe}_{\text{Corner}} \end{bmatrix}$$

Bild 4.18 zeigt die Flugzeugposition aus der Sicht des Reflektors. Im dargestellten Zeitausschnitt wird das Flugzeug bereits unter einer Elevation von 40° gesehen und erreicht zum Zeitpunkt $t = 1.44$ sek die Quersymmetrieachse des Reflektors mit einer Elevation $\theta_c = 54.74^\circ$. Der Reflektor wurde mittig überflogen, die beiden Symmetrieachsen des Reflektors von $\psi_c = 45^\circ$, beziehungsweise $\theta_c = 54.74^\circ$ sind im Bild 4.18 markiert.

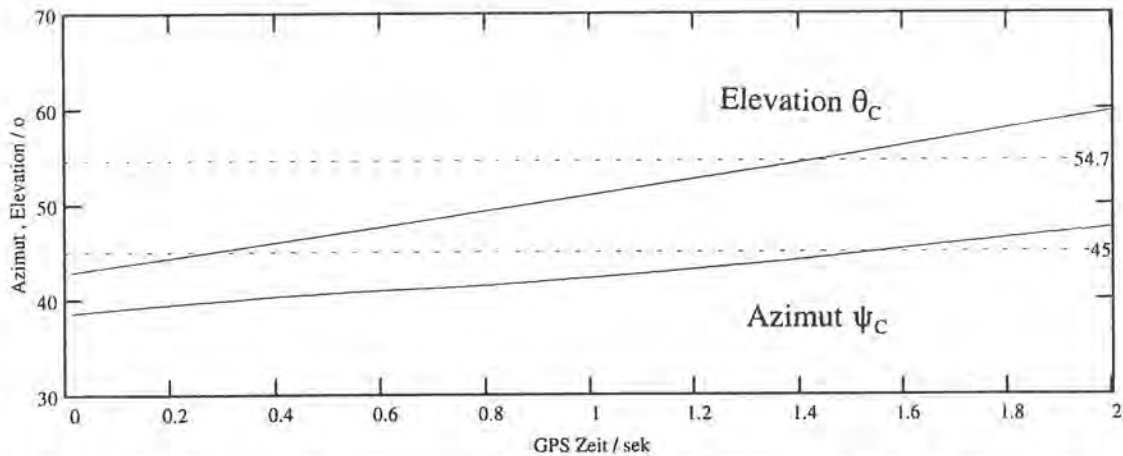


Bild 4.18: zeitliche Änderung von Azimut und Elevation beim Überflug bezogen auf Reflektorkoordinaten

Das Bild 4.19 zeigt den zeitlichen Verlauf des Rückstreuquerschnitts des überflogenen Reflektors. Durch die Flugbewegung ergibt sich ein Schnitt durch das Reflexionsdiagramm. Das Flugzeug nähert sich also dem Reflektor, wobei der Rückstreuquerschnitt stetig zunimmt. Zum Zeitpunkt $t = 1.44$ sek wird die vertikale Symmetrieachse von 54.74° überflogen, der Reflektor besitzt hier den maximalen Rückstreuquerschnitt.

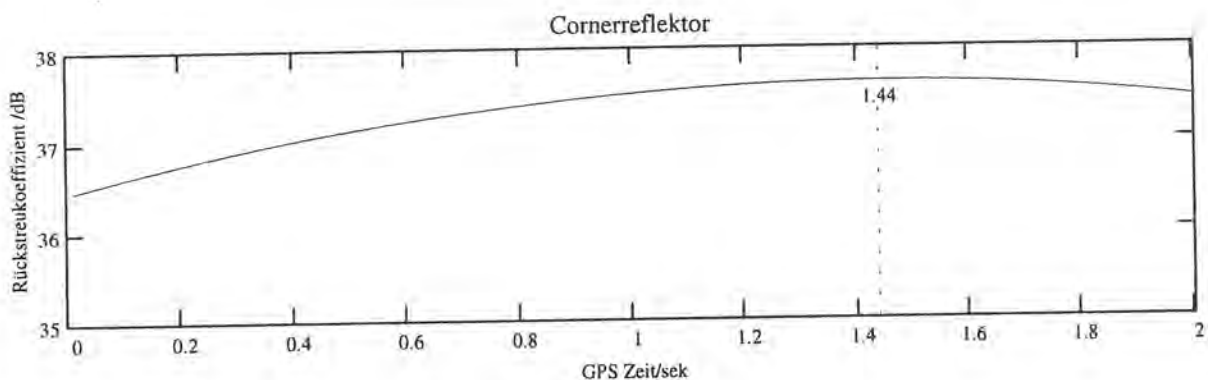


Bild 4.19: zeitliche Änderung des Rückstreuquerschnitts beim Überflug

In der Messung wird das Reflexionsdiagramm des Cornerreflektors mit dem Antennendiagramm überlagert. Um die Messung entsprechend nachbilden zu können, muß dies in einem zweiten Schritt berücksichtigt werden. Azimut ψ_a und Elevationswinkel θ_a unter denen die Antenne den Reflektor auf sich zukommen und unter sich passieren sieht, werden aus den Flugzeugpositionsdaten errechnet (Bild 4.20). Über dem Reflektor selbst ist der Azimutwinkel nicht definiert, was sich in der Unstetigkeitsstelle zur Zeit $t = 1.44$ sek ausdrückt. Deshalb wurde der Azimut ψ_a durch den Winkel ψ_b angenähert.

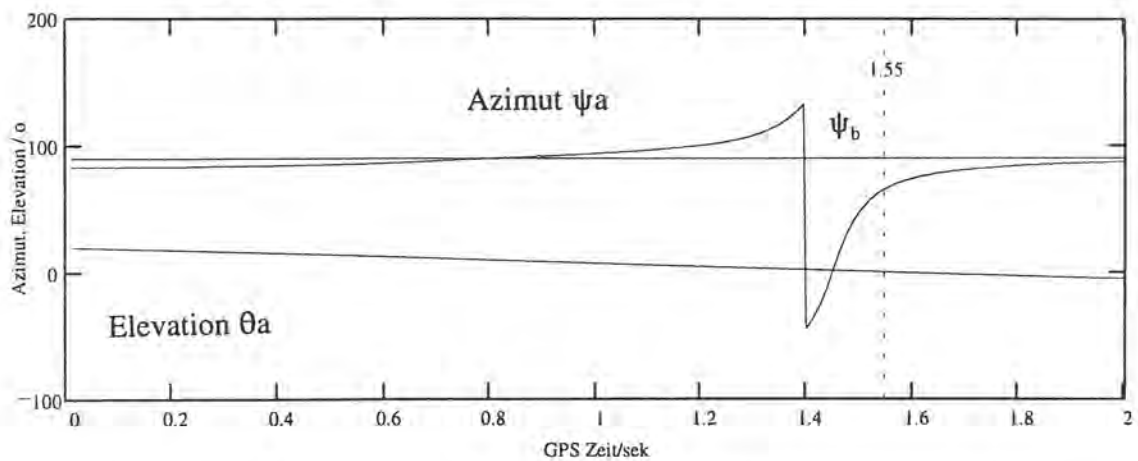


Bild 4.20: zeitliche Änderung von Azimut und Elevation bezogen auf Antennenkoordinaten

Die empfangene Echoleistung wurde mit dem in Kapitel 4.3 ermittelten Antennendiagramm und der theoretischen Rückstreuungsfunktion des Reflektors berechnet. Die Faltung der beiden Diagramme bestimmt die Form des empfangenen Echsignals. In Bild 4.21 ist die gemessene Echoleistung $P_{\text{ECHO}}(t)$ und die simulierte Echoleistung $P_{\text{SIMU}}(t)$ wiedergegeben. Da die Sendeantenne das schmalere Richtdiagramm besitzt, prägt sie hauptsächlich dem Echsignal die Form auf.

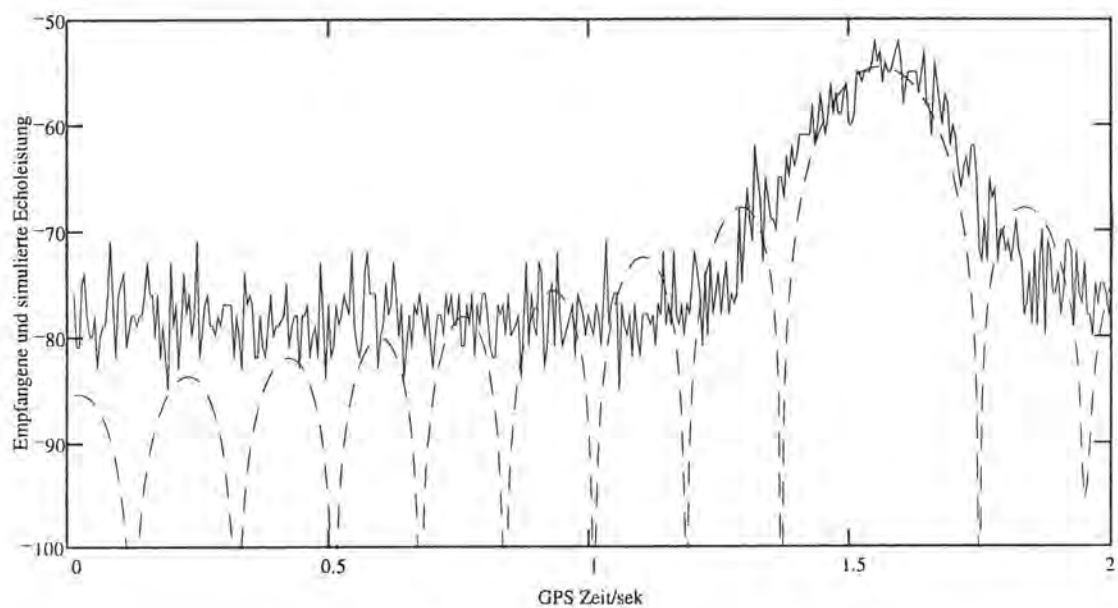


Bild 4.21: gemessene und simulierte Echoleistung beim Überflug eines Cornerreflektors

In der Messung zeigt sich nur die Hauptkeule der Sendeantenne, während die Nebenkeulen im Rauschen untergehen. Beim gewählten Simulationsmodell ergibt sich ein Abstand der Nebenkeulen zur Hauptkeule mit etwa 13 dB. Das gemessene Richtdiagramm in Bild 4.9 zeigt hingegen, daß die Nebenkeulen wesentlich unter 20 dB liegen. Somit wurde das Verhältnis von Hauptkeule zu Nebenkeule pessimistischer angenommen, als es bei der Sendeantenne tatsächlich vorlag.

Die Kalibration der Echoleistung am Cornerreflektor erfolgt durch die Bestimmung eines mittleren Offsetfehlers P_{OFFSET} :

$$P_{\text{OFFSET}} = \sum_{i=0}^N \frac{P_r(t)_{\text{SIMU}} - P_r(t)_{\text{ECHO}}}{N}$$

Hierbei konnte ein Leistungsoffset von 1.9 dB errechnet werden. Dieser Offset kommt durch kleinere Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Antennengewinne und durch unberücksichtigte Kabeldämpfungen zustande. Des weiteren wurde ein Schielen der Sendeantenne von 2° rechnerisch eliminiert.

Offset	$P_{\text{OFFSET}} = 1.94 \text{ dB}$
Schielwinkel der Sendeantenne	$\xi = 2.0^\circ$

Durch die Kalibration der Echoleistung wurden diese entscheidenden Parameter erfaßt. Dadurch wurde es jetzt möglich, die gemessene Echoleistung anderer Objekte in den zugehörigen Rückstreuquerschnitt zu überführen.

3. Empirische Untersuchungen

Aufbauend auf den Arbeiten von Kim / 4 / konnte durch die Systemintegration das Radaraltimeter zu einem geodätischen Instrument erweitert werden, das die hochgenaue, topographische Kartierung erlaubt. In der Arbeit von Kim wurden noch keine flugzeuggetragenen Meßungen durchgeführt, lediglich eine Talmessung von einer Brücke diente als Funktionsverifikation.

Von Lindenberger wurden Untersuchungen über Laserprofilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme vorgenommen. Wie aus Lindenberger und den nachfolgenden Arbeiten von Ackermann, Englich und Kilian / 68 / hervorgeht, muß bei einer profilierenden Lasermessung der Spurabstand sehr dicht geflogen werden, um eine Geländeaufnahme zu erreichen. Fehler im Geländemodell entstehen hauptsächlich durch Geländestrukturen, die parallel zur Spurrichtung und zwischen den aufgezeichneten Meßspuren verlaufen. Dies erfordert einen enormen Flugaufwand, um eine entsprechende Genauigkeit zu erreichen. Durch den Einsatz von scannenden Systemen kann dieses Problem vermieden werden. Die Untersuchungen von Hug / 61 / zeigen, daß es möglich ist, eine flächendeckende Geländeaufnahme zu erhalten, bei der sich mit vertretbarem Flugaufwand die Scanstreifen überlappen.

Im Gegensatz zu den Entfernungssensoren mit Lasertechnologie soll im Rahmen dieser Arbeit ein Radaraltimeter auf seine Eignung zur topographischen Geländeaufnahme untersucht werden. Die einzelnen Systemkomponenten wurden in Bezug auf ihre Genauigkeit analysiert, jedoch ist es völlig offen, welche Ergebnisse sich letztlich mit der Gesamtplattform erreichen lassen. Des weiteren soll die Untersuchung die Vorteile des Radarverfahrens gegenüber anderen Verfahren beleuchten. Die empirischen Untersuchungen beziehen sich auf die Befliegungen aus dem Jahren 1993, 1994, 1995, die in Tabelle 5.0 zusammengestellt sind. Dabei sind insbesondere vier verschiedene Testgebiete, die typisch für die Topographievermessung sind, zur näheren Analyse ausgewählt worden :

- Ein hauptsächlich landwirtschaftlich genutztes Gebiet : **Andechs**,
- ein ländliches Gebiet: **Wörthsee**,
- ein Stadtrandgebiet mit Gewerbefläche und einem Flugplatz: **Neugilching**,
- ein typisches Stadtgebiet: **Bonn**.

Dabei wird das Verhalten und die Leistungsfähigkeit der Altimeterplattform bei diesen verschiedenen Geländetypen untersucht. Die aufgenommenen Daten werden jeweils in ein digitales Geländemodell umgerechnet. Diese Modelle werden zur Überprüfung der Höhengenaugkeit stets mit Referenzmodellen oder Karten verglichen. Ebenso wird für jedes Gebiet eine bildhafte Darstellung der Echoleistung errechnet, die Luftbilder oder Satellitenbilder gegenübergestellt wird.

Tabelle 5.0: Überblick Befliegungen

Projekt	Ausrüstung	Gebiet	Tag der Messung	Dauer
DLR Institut für Navigation: A3 Institut für Navigation: A2 Institut für Phys. Geodäsie: E2	Flugzeug DO 228 Radaraltimeter Laserscanner diff.GPS, INS	Andechs Süd Andechs Nord Pilsensee	12.03.93 16.03.93 17.03.93	1 h 30 min 1 h 30 min 1 h 20 min
Geoscan Institut für Navigation: A3 Institut für Navigation: A2	Flugzeug Cessna 404 Radaraltimeter Laserscanner Bordnavigation	Wietze	12.01.94	2 h 25 min
DLR Institut für Navigation: A3 Institut für Navigation: A2 Institut für Phys. Geodäsie: E2 DLR	Flugzeug DO 228 Radaraltimeter Laserscanner diff. GPS, INS Luftbild RMK A15/23 Videokamera	Neugilching Wörthsee I Wörthsee II	31.05.94 31.05.94 01.06.94	50 min 2 h 10 min 2 h 15 min
Geoscan Institut für Navigation: A3 Institut für Navigation: A2	Flugzeug Cessna 404 Radaraltimeter Laserscanner Bordnavigation	Bonn	12.09.95	5 h 08 min

Ein erster, flugzeuggetragener Funktionstest der gesamten Systemplattform fand im März 1993 statt. Dabei stellte die DLR / Oberpfaffenhofen eine zweimotorige Propellermaschine vom Typ DO 228 mit Pilot zur Verfügung. Das im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 228 "Hochgenaue Navigation" kooperierende Institut für Physikalische Geodäsie der TH Darmstadt führte zur Positionsbestimmung das GPS / INS Sensorpaket mit. Die Systemplattform wurde während der Meßkampagne in drei verschiedenen Testgebieten zwischen Starnberger See und Ammersee und unter verschiedenen Wetterbedingungen erprobt. Das Radaraltimeter funktionierte zuverlässig bei den drei kartierten Testgebieten.

Aus den Erfahrungen dieser Kampagne wurden weitere Verbesserungen am System vorgenommen. Um die Einsatzhöhe des Radaraltimeters von 300 m auf 700 m zu erweitern, wurde die Sendeleistung auf 10 W erhöht. Die Abhängigkeit der gemessenen Schrägentfernung von der empfangenen Eholeistung konnte durch die Entwicklung einer neuen Pulsdetektorschaltung wesentlich verringert werden. Statt dem Prinzip der Schwellwertdetektion wurde eine zeitsignifikante Triggerschaltung eingesetzt. Die verbleibende Abhängigkeit konnte durch die Ermittlung von Korrekturparametern eliminiert werden.

Mit der so modifizierten Systemplattform wurde eine weitere Meßkampagne im Mai 1994 durchgeführt. Dabei stellte die DLR Oberpfaffenhofen wieder die zweimotorige Propellermaschine DO 228 mit Pilot zur Verfügung. Das Institut für Physikalische Geodäsie der TH Darmstadt führte zur Positionsbestimmung das DGPS / INS Sensorpaket mit. Dabei wurden die Testgebiete Wörthsee und Neugilching kartiert. Diese Messungen wurden sowohl unter dem Aspekt der operationellen Einsatzfähigkeit ausgeführt, als auch um die Leistungsfähigkeit der Sensoren und des Systems zu prüfen. Dabei wurden insbesondere die maximale Reichweite bestimmt, die Entfernungsauflösung und die Höhengenaugkeit untersucht.

Eine letzte Kampagne wurde mit der Firma Geoscan im September 1995 geflogen. Bei dieser Messung stand die kommerzielle Kartierung eines großflächigen Stadtgebiets im Vordergrund. Dabei stellte die Firma Geoscan das bordeigene INS / DGPS Sensorsystem zur Verfügung. Durch das DGPS gestützte Flugführungssystem war eine wesentlich präzisere Spurtreue möglich. Die Spurdichte konnte zu einer fast vollständig flächendeckenden Geländeerfassung erhöht werden.

In den folgenden Kapiteln werden im einzelnen die Ergebnisse der Kampagnen dargestellt. Dabei wird auf im Rahmen der Arbeit entwickelten Programme zurückgegriffen, die die folgenden Bearbeitungsschritte ausführten:

- Berechnung der Koordinaten aus den Meßwerten der Systemkomponenten
- Filterung der Profile mittels Fuzzylogik-Extraktionsalgorithmen
- Profilanalyse zur Genauigkeitsermittlung

Darüberhinaus wurden kommerzielle Programmpakete benutzt, die die folgenden Standardfunktionen bereitstellten:

- Ableitung eines flächendeckenden Geländemodells durch Interpolation der Profillinien
- Darstellung der Geländemodelle

3.1. Befliegung Andechs

Bei der ersten Befliegungskampagne Andechs wurde das Verhalten des Sensors im Testgebiet mit unterschiedlichster Geländestruktur erprobt. Der vermessene Geländestreifen liegt südlich von München und umfaßt ein rechteckiges Gebiet von 2 km auf 8 km Ausdehnung. Die Flugführung mit einem GPS gestützten Navigationssystem ließ eine Spurgenaugkeit in der Größenordnung von 150 m zu.

Das Radaraltimeter AMAP wurde während der Meßkampagne unter verschiedenen Wetterbedingungen eingesetzt. Dabei wurde das Testgebiet Andechs sowohl bei klarer Sicht als auch bei starker Bewölkung und leichtem Regen befliegen. Unabhängig vom Wetter ließen sich gute Meßergebnisse erzielen. Die entsprechenden Daten des Fluges sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Tabelle 5.1: Testgebiet Andechs

Lage	30 km südlich von München	Punktabstand auf dem Profil	ca. 40 cm
Befliegungsdatum	12. 03. 93	Meßrate	200 Hz
Koordinaten des Testgebiets	4435000 m - 4450000 m 5313500 m - 5315000 m	Flughöhe über Grund	300 m
Größe des Testgebiets	2 km Nord-Süd Ausdehnung 8 km Ost-West Ausdehnung	Fluggeschwindigkeit	65 m/s - 75 m/s
Geländehöhen	540 m bis 700 m über NN	Flugdauer	2 h
Flugplan	150 m Profilabstand	Flugzeit	8 : 32 - 11 : 20 Uhr
Querstreifen	13 Profile	Anzahl Meßpunkte	163520

Das aus den aufgenommenen Radarmeßdaten erstellte digitale Geländemodell ist in Bild 5.2 als 3D-Darstellung zu sehen. Dabei wurde die Geländeoberfläche mit dem graucodierten Meßwert der Echoleistung belegt. Bei der durch glaziale Einflüsse geformten Landschaft handelt es sich um einen unruhigen Höhenrücken, der sich vom Ammersee her erhebt und zum Starnbergersee hin abfällt. Um das Verhalten der Sensoren zu prüfen, wurde bei der Erprobungsmessung ein Gebiet mit unterschiedlichster Strukturierung gewählt : Wasserfläche, Landwirtschaftsfläche und Waldfläche sind im Testgebiet vorhanden.

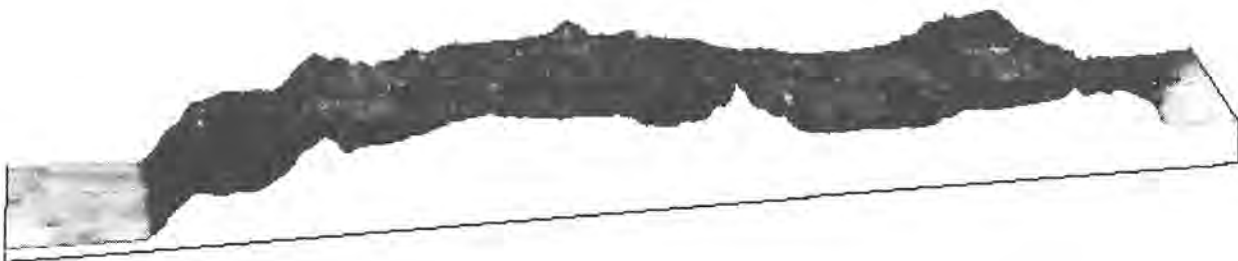


Bild 5.2: Testgebiet Andechs

3.1.1 Auswertung der Radarmessung

Bild 5.3 bis Bild 5.6 fassen die Meßdaten des Testgebiets zusammen. In der vierteiligen Zusammenstellung sind die vom Radar aufgezeichneten Meßgrößen, nämlich die Höhenwerte und die Rückstreuwerte, einem Kartenausschnitt und einem Luftbild gegenübergestellt. Dabei sind der Topographischen Karte TK 25 - 8032/8033 die Fußpunktsspuren des Radaraltimeters als rote Linien aufgelegt. Der Geländestreifen wurde durch parallele Profilsuren in Ost-West-Richtung abgetastet. Die für die topographische Geländeaufnahme erforderliche Flächendeckung wurde durch 13 Profillinien im Abstand von ca. 150 m erreicht. Bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von $v = 75$ m/sec wurde alle 40 cm ein Geländepunkt erfaßt. Für die flächenhafte Darstellung wurde zwischen den Spuren interpoliert.

Bei der in Ost - West Richtung geflogenen Messung beginnt die Geländeerfassung am Ufer des Ammersees. Das bewaldete Gelände steigt steil an und bildet ein Zwischenplateau. Eine weitere Stufung zum Klosterberg von Andechs läuft in einem leicht gewellten Höhenzug aus. Der Anstieg zeigt sich jeweils in einer Verdichtung der Höhenlinien. Nach Westen schließt sich ein hügeliger Höhenrücken an. Die kleineren Erhebungen auf dem Höhenrücken stellen sich im Höhenlinienbild als geschlossene Ringe dar. Der nordwestliche Teil des Höhenrückens wird durch die im Bild angeschnittene Bergkuppe des Seebuchets durchbrochen.

Das Luftbild, Bild 5.6, wurde mit einer RMK-A Kamera auf einem Infrarotfilm aufgenommen. Allerdings wurde die Luftbildaufnahme nicht zum Zeitpunkt der Radarmessung erstellt. Der bei der Messung schneebedeckte Zustand des Geländes geht aus dem Luftbild nicht hervor. In der Höhenlinienkarte Bild 5.3 ist je 10 m eine Isolinie eingetragen, volle 50 m sind durch dicke Linien dargestellt. Aus dem Höhenlinienbild ist zu entnehmen, daß sich das Gelände wie ein welliger Rücken zwischen Ammersee und Starnberger See spannt. Außer diesen beiden Seen befinden sich im Testgebiet noch der Eßsee und mehrere kleinere Feuchtgebiete wie das Maisinger Moos.

Das Intensitätsbild, Abbildung 5.5, zeigt die empfangene Echoleistung gemäß der angegebenen Farbcodierung. Insgesamt verfügt das Bild über einen großen Dynamikbereich hinsichtlich der rückgestreuten Leistung, die von -30 dBm an den hellsten Stellen bis -80 dBm in den dunklen Gebieten reicht. Wasser erweist sich für das nadirgerichtete Radar als ein guter Reflektor, so erscheinen die Seen markant im Intensitätsbild. Die hierfür gewählten Rottöne entsprechen einer empfangenen Echoleistung von -40 dBm bis -50 dBm. Der Eßsee reflektiert mit geringfügig höherer Echoleistung. Da er auf dem Höhenrücken liegt, erfährt das von ihm rückgestreute Echo eine etwas geringere Freiraumdämpfung. Der Höhenrücken trägt mehrere bewaldete Gebiete, die Folge von Wald und offenem Feld gestaltet den hügeligen Rücken abwechslungsreich. Die bewaldeten Gebiete zeigen sich im Intensitätsbild dunkel, mit ihrem geringen Rückstreuquerschnitt reflektieren sie nur Leistungen von -80 dBm. Auf dem Höhenrücken

zwischen Rechtswert 4444000 m und 4446000 m erscheinen die Felder um die Ortschaft Aschering mit einer ungewöhnlich hohen rückgestreuten Leistung von - 60 dBm. Dies erklärt sich dadurch, daß die Felder zur Zeit der Messung teilweise mit Schnee bedeckt waren. Diese Schneebedeckung lag allerdings nur auf dem Höhenrücken vor, in den Niederungen war sie schon im Schmelzen begriffen. Bild 5.7 gibt eine Schrägaufnahme des Geländes wieder.



Bild 5.7: Testgebiet Andechs

3.1.2 Profilsur

In Bild 5.8 und Bild 5.9 ist ein Profilabschnitt der nördlichsten Meßspur dargestellt. Im Diagramm 5.8 sind die Höhen entlang der Profilsur aufgetragen. Der Höhenverlauf zeichnet sich durch die Bewaldung hindurch ab. Die oft steilen Endmoränenwälle sind überwiegend von Buchen- und Fichten - Mischwald bestanden. Charakteristisch bildet sich eine bewaldete Bergkuppe ab, an deren linker Seite eine Hochspannungsleitung verläuft. Der Eßsee, dessen Ufer mit Gebüsch und Bäumen bewachsen sind, fällt durch seine glatte, ebene Oberfläche ins Auge.

Im Diagramm 5.9 ist die zugehörige, reflektierte Echoleistung aufgetragen. Dabei hebt sich besonders die hohe rückgestreute Leistung des Eßsees mit -30 dBm heraus. Auch die Straße und die Hochspannungsleitung treten durch höhere Rückstreuung von -35 dBm aus der umgebenden Echoleistung von -55 dBm hervor.

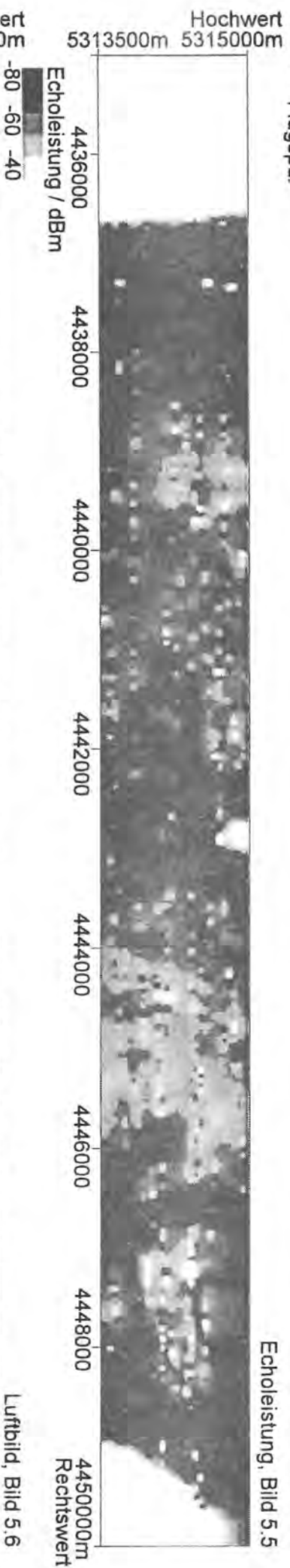
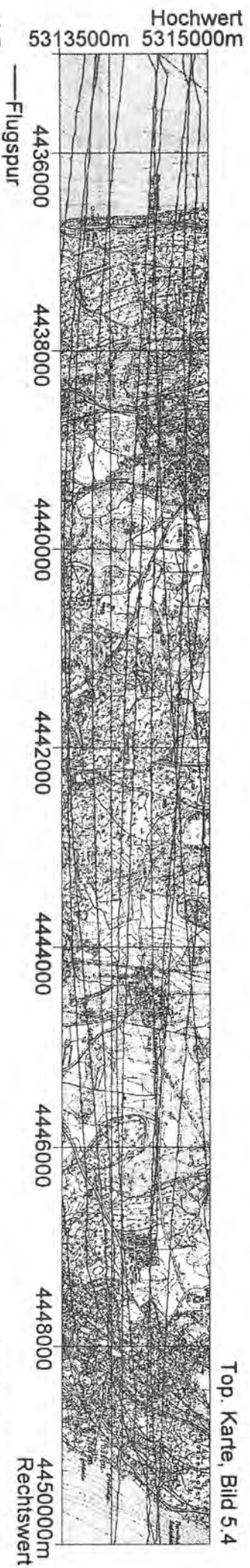
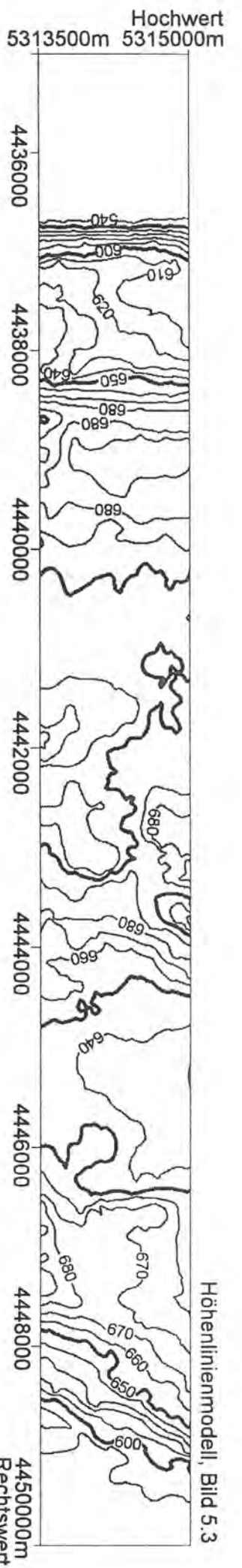


Bild 5.3 - Bild 5.6 Radardaten Andechs

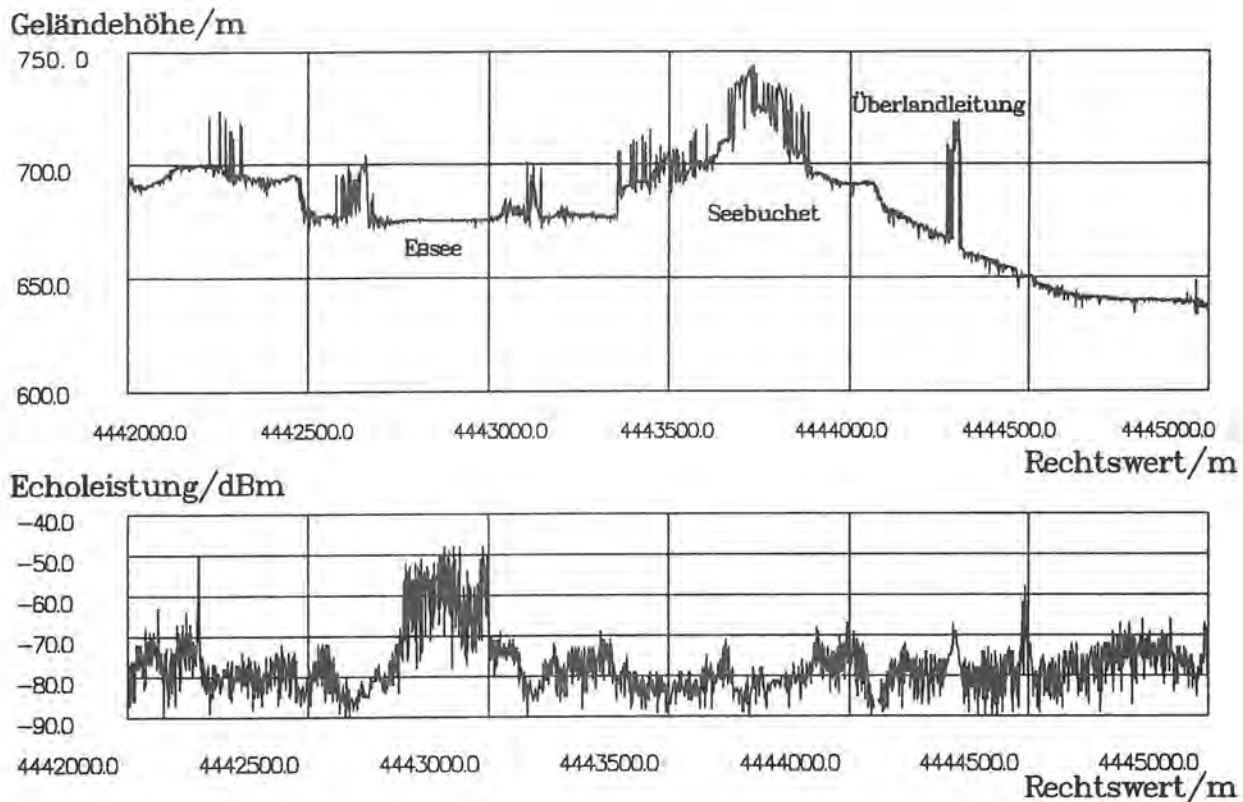
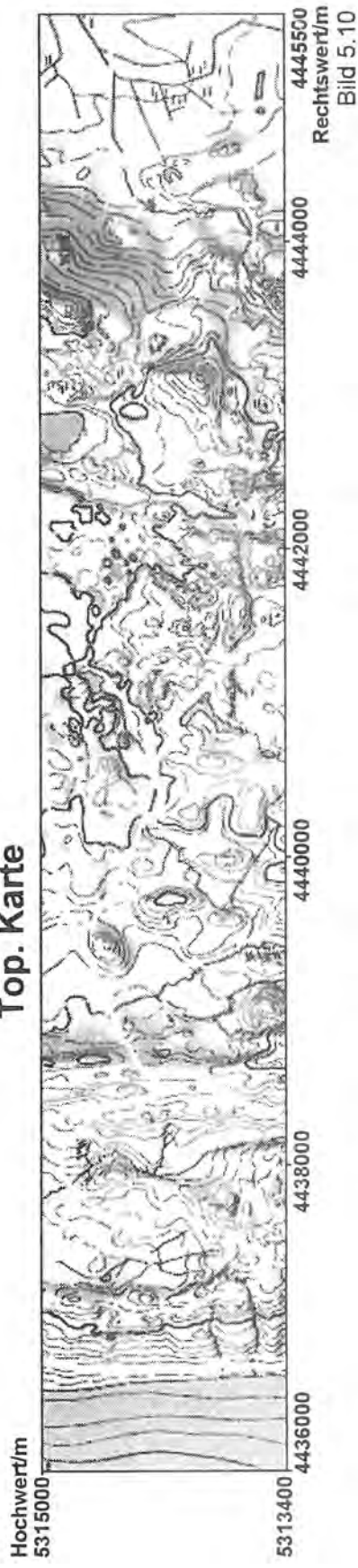


Bild 5.8, Bild 5.9: Meßprofil

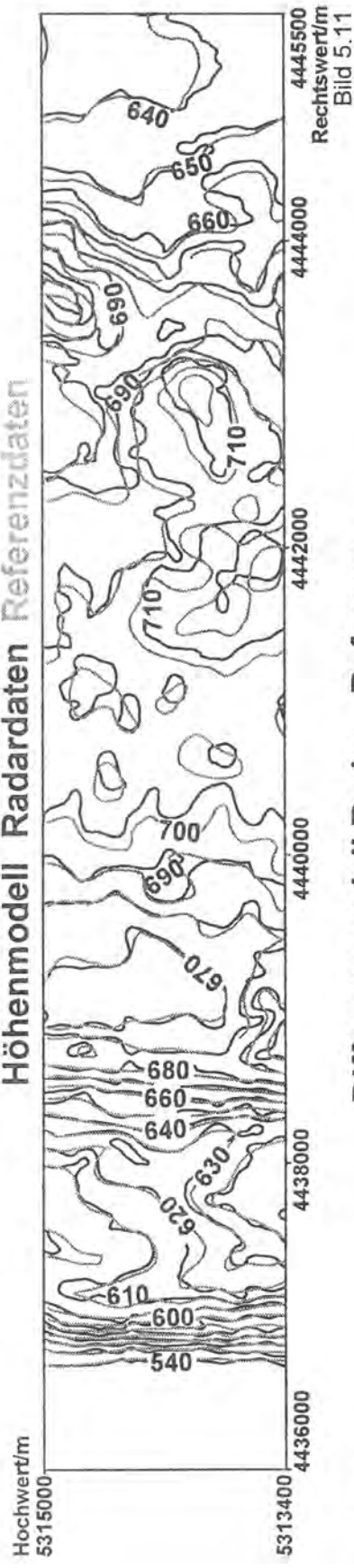
3.1.3 Genauigkeitsuntersuchungen

Ein räumlicher Vergleich der gemessenen Radardaten mit Referenzdaten wird in Bild 5.10 bis Bild 5.12 gezeigt. Im Maßstab 1 : 50 000 sind topographische Karte, Radarhöhen und Referenzhöhen, sowie der Vergleich dieser Werte dargestellt. Im Diagramm 5.11 sind die aus den Radardaten gewonnenen Höhenlinien in Blau und die aus den Referenzdaten gerechneten Höhenlinien in Braun eingezeichnet. Insgesamt lassen die beiden Höhenlinienbilder durchaus befriedigende Übereinstimmung erkennen. Im westlichen Teil des Geländes, insbesondere beim Anstieg des Geländes zum Klosterberg hin, decken sich die Höhenlinien von Radar und Referenz. Im östlichen Teil des Geländes, auf dem Höhenrücken, sind jedoch Verschiebungen zwischen Radar und Referenz festzustellen. Bei der Isoliniendarstellung treten Höhenfehler als Lageverschiebung in Erscheinung. Daß diese Verschiebungen unter anderem im Waldgebiet des Sporenritts auftreten, deutet auf Probleme der Bodenermittlung bei dichter Bewaldung hin.

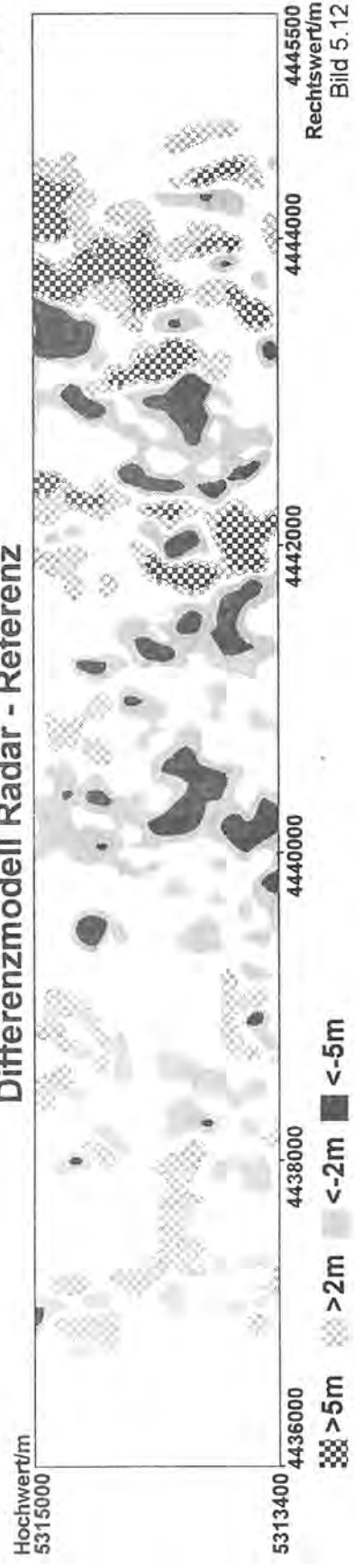
Top. Karte



Höhenmodell Radardaten Referenzdaten



Differenzmodell Radar - Referenz



Das Höhenlinienmodell der Radardaten wurde aus 13 Profilsuren interpoliert. Auf den Spuren ist die Meßpunktsdichte hoch, während zwischen den Spuren keine Information über das Gelände vorliegt. Somit verfügt man zunächst über ein Rohgeländemodell mit sehr hoher Auflösung in Ost - West Richtung und sehr geringer Punktdichte in Nord - Süd Richtung. Aus dieser ungünstigen Punktverteilung muß aber ein regelmäßiges Punktraster interpoliert werden. Der schwerwiegendste Fehler des Geländemodells ergibt sich aus der fehlenden Abtastung zwischen den Spuren.

Die hohe Punktdichte auf den Profilsuren läßt sich erheblich ausdünnen. Zum einen lassen sich nichtrelevante Meßpunkte von Bäumen oder Siedlungsobjekten entfernen, so daß sich nur noch Bodenpunkte in der Messung befinden. Zum anderen kann eine Mittelung der verbleibenden Messungen solange durchgeführt werden, bis der vorgegebene Rasterabstand entlang der Profillinie erreicht ist. Eine durchschnittliche Mittelung von 10 bis 30 Werten ergibt ein Abtastintervall von etwa 10 m.

Zum Vergleich der Messung mit der Referenz wurden im Diagramm 5.12 die Referenzhöhen von den Radarhöhen abgezogen. Bei den negativen, in Blau gezeichneten Höhendifferenzen hat das Radaraltimeter zu geringe Geländehöhen gemessen. In den roten Bereichen, die positiven Höhendifferenzen entsprechen, hat der Radar zu hohe Geländehöhe ermittelt. Im westlichen Teil des Geländes treten nur vereinzelt Differenzen auf. Bei dem großen Geländeanstieg von 140 Höhenmetern äußern sich kleine Lagefehler in großen Höhendifferenzen. Im östlichen Teil des Geländes treten Fehler zwischen Referenz und Radardaten bis zu 7 m auf.

3.1.4 Profilvergleich

In einer weiteren Untersuchung wurden die einzelnen Profillinien der Radardaten mit der Referenz verglichen. Die Referenzdaten der DLR lagen im Rasterabstand von 50 m und einer Höhenauflösung von 1 m vor. Beispielhaft wird in Bild 5.13 eine Profillinie der Radardaten der Referenz gegenübergestellt. Die Profillinie zeigt auf 700 m Länge eine Höhenundulation von mehr als 150 m. Im wesentlichen hat der Radarprofiler die Geländehöhen korrekt erfaßt, die beiden Profillinien korrelieren.

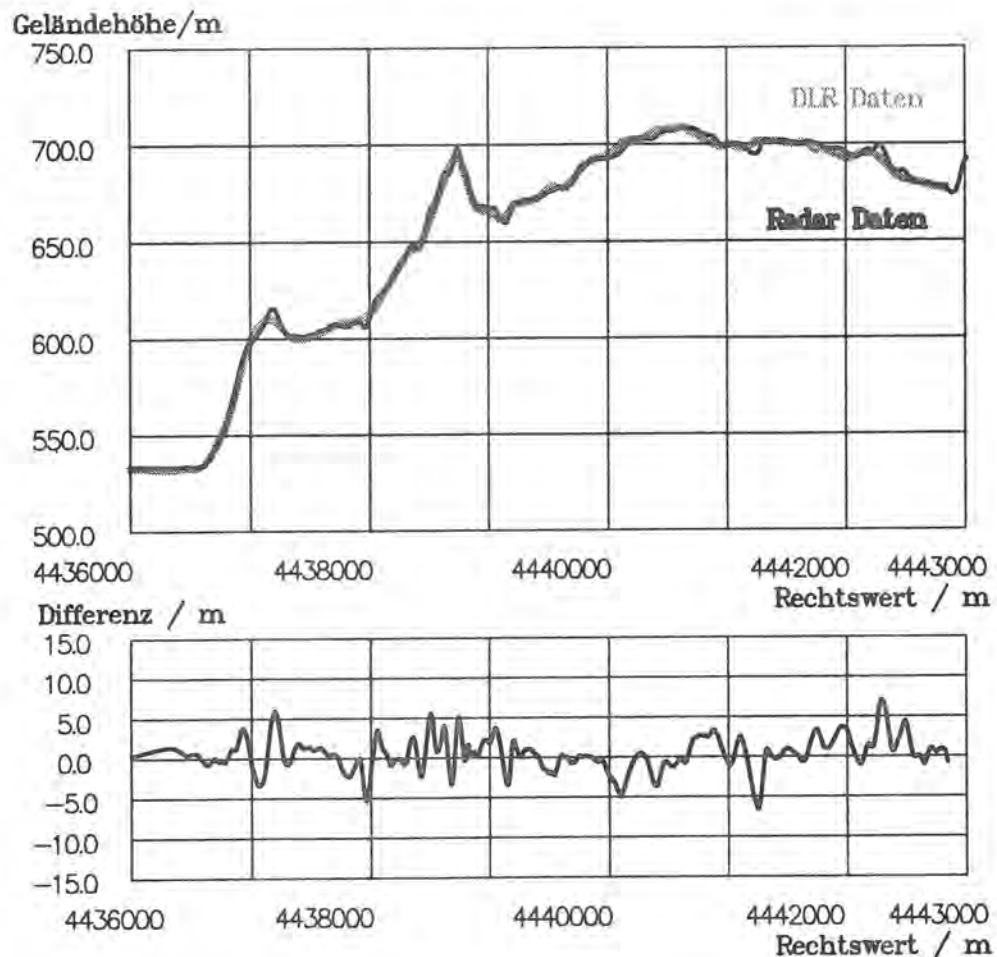


Bild 5.13: Profilvergleich Radardaten und Referenzdaten

Im Bild 5.14 wird die Differenz zwischen Radardaten und Referenz gezeigt. Aus der Betrachtung der Differenzen zwischen den beiden Profilen geht hervor, daß der Radarprofiler im Mittel einen Fehler von 0.5 m verzeichnet. Der quadratische Mittelwert der Differenzen liegt bei 3.3 m. Lokale Stellen differieren wesentlich stärker, wobei dies auf den höheren Anteil an Feinstruktur bei den Radardaten zurückgeht. Da die Radardaten im 10 m Raster vorliegen, erlaubt dies eine feinere Darstellung des Höhenprofils als bei den Referenzdaten.

Der Vergleich des aus Radardaten erzeugten Geländemodells mit dem Referenzmodell läßt den Schluß zu, daß die Altimeterplattform in der Lage ist eine Geländeaufnahme zu erstellen. Am Beispiel des Testgebiets Andechs wurde gezeigt, daß durch Interpolation der gemessenen Profillinien digitale Geländemodelle mit einer Rasterweite von 100 m generiert werden können. Dabei wird die minimale Rasterweite nicht durch die Punktdichte auf der Spur, sondern durch den Spurabstand vorgegeben. In den folgenden Beispielen werden weitere für die topographische Kartierung typische Gelände betrachtet.

3.2. Befliegung Neugilching

Für weiterführende Untersuchungen bezüglich der Leistungsfähigkeit des Radaraltimeters wurde im Mai 1994 eine Befliegung über dem Testgebiet Neugilching durchgeführt. Anhand der bereits gewonnenen Erfahrungen der Kampagne Andechs konnte nun folgender Flugplan durchgeführt werden: Das Altimetersystem wurde auf Höhengenaugigkeit, Lagegenauigkeit, Auflösungsvermögen und seinen maximalen Entfernungsbereich getestet. Ferner wurde eine Höhenkalibration und eine Intensitätskalibration (vergleiche Kap. 2.3.1 und Kap. 2.3.4) durchgeführt. Im zweiten Teil der Messung wurde eine Geländeaufnahme des Gebiets Neugilching vorgenommen. In Tabelle 3.2 sind die relevanten Daten der Befliegung zusammengestellt.

Tabelle 3.2: Testgebiet Neugilching

Testgebiet Neugilching	30 km südlich von München	Punktabstand auf dem Profil	ca. 40 cm
Befliegungsdatum	31.05.94	Meßrate	200 Hz
Koordinaten des Testgebiets	4446500 m - 4447500 m 5326000 m - 5331000 m	Flughöhe über Grund	350 m
Größe des Gebiets	6 km Nord-Süd 1 km Ost-West Ausdehnung	Fluggeschwindigkeit	65 m/s - 75 m/s
Geländehöhen	540 m bis 590 m über NN	Flugzeit	15:00 - 17:20 Uhr
Flugplan	150 m Profilabstand	Flugdauer	2 h 20 min
Querstreifen	11 Profile	Anzahl Meßpunkte	73200

Das Meßgebiet befindet sich 40 km südlich von München. Es handelt sich um einen einförmigen Geländestreifen, der in Form einer schiefen Ebene nach Süden hin leicht ansteigt. Geologisch kann dieses Gebiet noch der Münchner Schotterebene zugerechnet werden. Das ebenmäßige Relief der Landschaft zeigt nur geringe Höhenmodulationen. Bild 6.1 zeigt ein 3D-Höhenmodell des Testgebiets Neugilching.

So zeichnet sich das Gebiet eher in den Unterschieden bezüglich Bebauung und Vegetation aus. In der Nutzung des Gebiets überwiegt der Ackerbau, die Restfläche nimmt Grünland ein. Neben der landwirtschaftlichen Nutzung ist auch der Abbau von Kies und Schotter in der Region verbreitet. Der Aushub von Kies im Norden des Testgebietes führte zur Bildung von Baggerseen.

Im nördlichen Teil des Testgebiets liegt die Ortschaft Neugilching, die neben dem älteren Ortskern ein Neubaugebiet mit mehrstöckigen Reihenhäusern besitzt. Neugilching kann zum Wohn- und Einzugsbereich von München gerechnet werden. Ein Gewerbegebiet im Norden

enthält eine Vielzahl von Industriehallen in Flachdachbauweise. Die Bundesautobahn A96 durchschneidet das Testgelände. Während im nördlichen Teil die Häuser der Ortschaft Neugilching liegen, finden sich im Süden neben den Fabrikhallen von Dornier und DLR Wiesen und das Flugplatzgelände.

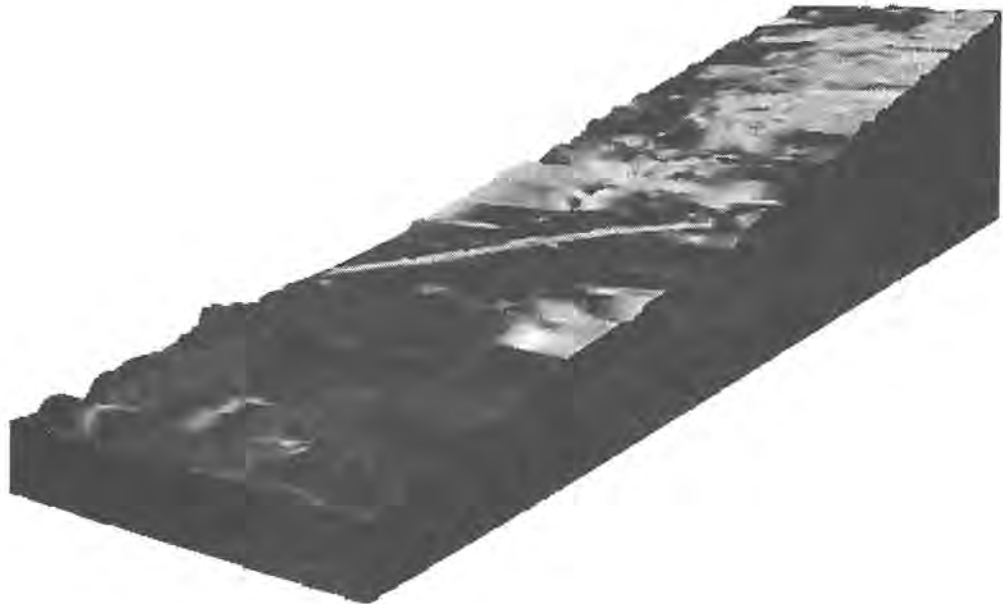


Bild 6.1: Testgebiet Neugilching

3.2.1 Auswertung der Radarmessung

Bild 6.2 bis Bild 6.5 zeigen das Luftbild, die rückgestreute Radarleistung, den Kartenausschnitt des vermessenen Gebiets Neugilching und die Höhenlinienkarte. Das Gebiet, das eine rechteckige Ausdehnung von 1 km Breite auf 6 km Länge aufweist, wurde bei einer Flughöhe von 350 m über Grund kartiert.

Die Geländestrukturen lassen sich am besten durch eine Nord - Süd Befliegung erfassen. 11 Spuren im Abstand von 150 m wurden für eine flächendeckende Topographieaufnahme geflogen. Das Luftbild 6.2 des Testgebiets wurde mit einem Infrarotfilm und der Luftbildkamera RMK-A aufgenommen. Im Süden sind die Strukturen der Runway, der Taxiway und der Hallen von Dornier zu sehen,

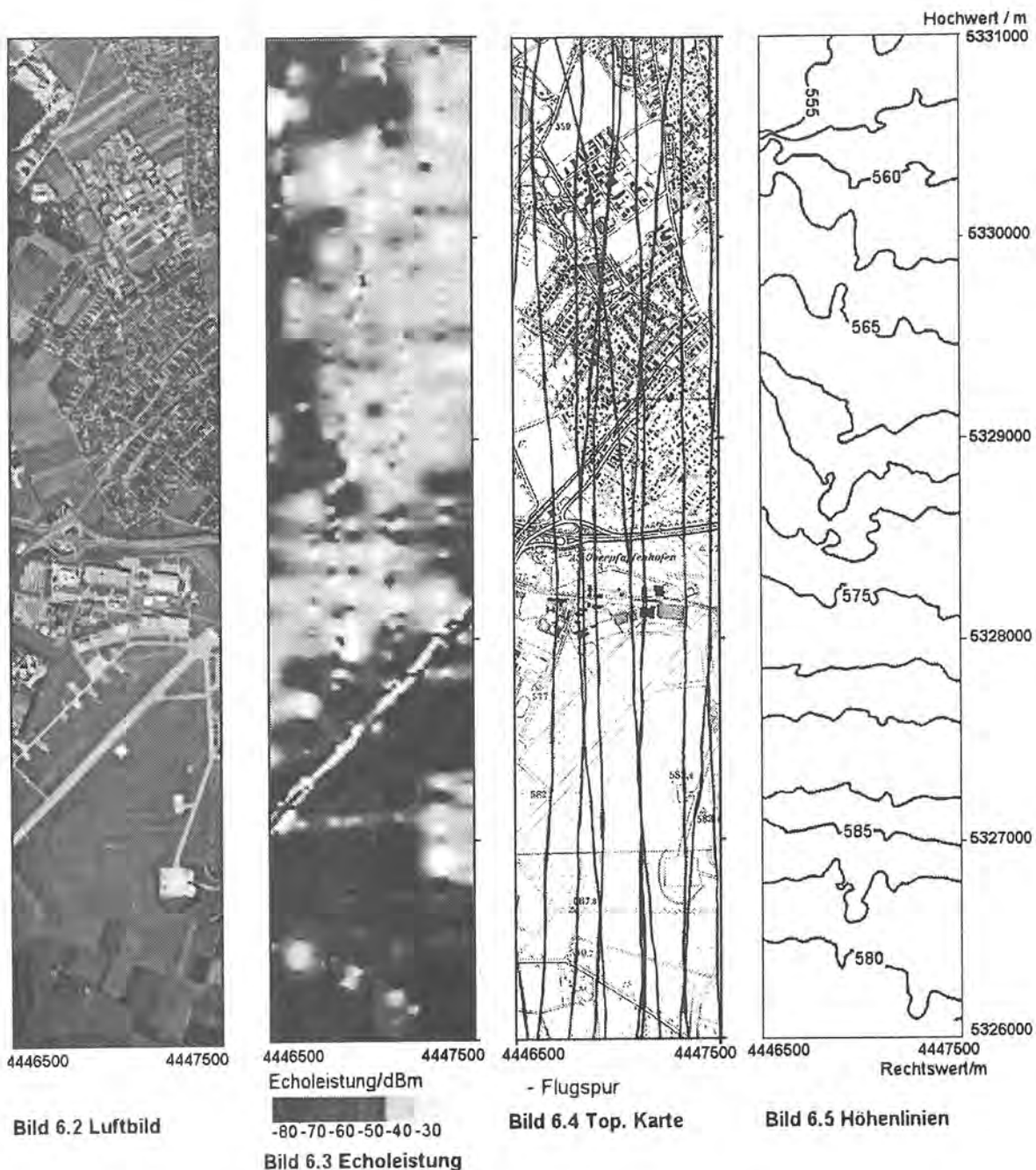


Bild 6.2 - Bild 6.5 Radardaten Neugilching

Die vom Radaraltimeter AMAP empfangene Echoleistung ist im Diagramm 6.3 aufgezeigt. Die rückgestreute Echoleistung ist so farbcodiert, daß die geringeren Echoleistungen schwarz bis blau, die größeren, rückgestreuten Leistungen den Farben Rosa bis Weiß entsprechen. Dabei wird ein Dynamikbereich des Nadirechos von 50 dB überstrichen. Markant bildet sich die Runway in der dunklen Fläche der Flugplatzwiese ab. Der zur Runway gehörende Wartungsplatz der Firma

Dornier, der sich am rechten Bildrand bei Hochwert 5327000 befindet, strahlt mit einer Echoleistung von -40 dBm zurück. Ebenso zeichnet sich die versiegelte Fläche der Ortschaft Neugilching im nördlichen Teil des Bildes hell ab.

Mit einer Auflösungszelle von 30 m sind keine Einzelkonturen von Hausobjekten erkennbar, vielmehr wird die bebaute Fläche als Ganzes wahrgenommen. In den schlierenähnlichen Strukturierungen zeichnen sich die Profillinien ab. Prinzipiell bilden sich ebene Flächen, wie Straßen, Parkplätze oder die Runway hell ab. Dunkel dagegen zeigen sich Felder oder rauher Ackerboden, denn sie besitzen einen geringeren Rückstreuquerschnitt.

Im Bild 6.4 ist dem Ausschnitt der topographischen Karte die Fußpunktsspur in Rot untergelegt. Auf jeder der 11 Profilsuren wurden Meßwerte aufgezeichnet, wobei jeder Meßwert die Koordinaten, die Geländehöhe und die rückgestreute Echoleistung beinhaltet. Um zu einem Rasterbild zu gelangen, wurden die Punkte zwischen den Meßspuren interpoliert.

Das Diagramm 6.5 zeigt die aus Radardaten ermittelte Höhenlinienkarte. Je Höhenmeter ist eine Höhenlinie gezeichnet. Das Gebiet hat eine homogene Höhenstruktur, die am südlichsten Punkt 590 m Höhe und am nördlichen Ende eine Höhe von 540 m über NN aufweist. Die Höhenlinien verlaufen im Groben parallel zur Ost-West Richtung. Das Gelände ist, von geringen Höhenundulationen abgesehen, eine nach Norden abfallende schiefe Ebene.

3.2.2 Profilspur

Eine der 11 vom Radaraltimeter aufgezeichneten Spuren ist in Bild 6.6 bis Bild 6.8 gezeigt. Im zweiteiligen Diagramm sind die Geländehöhe und die Echoleistung über dem Hochwert aufgetragen. Um die Spur in ihrer Gesamtheit darzustellen, wurde nur jeder 6. Meßpunkt ins Bild eingetragen.

Die Spur 2 beginnt über dem Flughafengelände Oberpfaffenhofen und kreuzt die Runway und die Signale der Flughafenbefeuerung. Die Spur verläuft dann weiter über die Gebäude der DLR, die sich mit einer Höhe von etwa 15 m in den Daten abbilden. Daran anschließend führt die Spur über die S-Bahnlinie und das Autobahnkreuz Oberpfaffenhofen. Der Weiler St.Gilgen wird weiter nördlich überflogen, das Meßgebiet endet beim Hochwert von 5331000 m. Die Spur 2 gibt einen Profilschnitt durch das nach Norden um etwa 30 Höhenmeter fallende Gelände wieder.

Bei Gebäudestrukturen wird eine Leistung von -40 dBm rückgestreut, während Wiesen und landwirtschaftliche Nutzflächen bei -80 dBm bis -90 dBm meßbar sind.

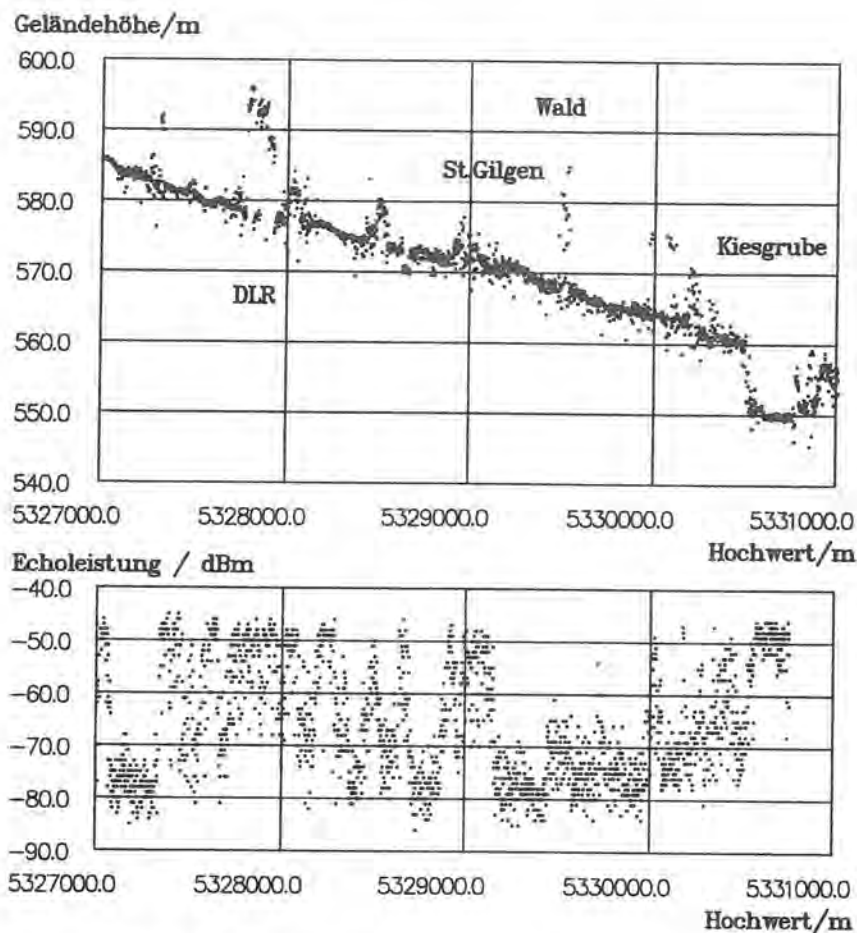


Bild 6.6, Bild 6.7: Profilsur Neugilching

3.2.3 Genauigkeitsuntersuchungen

Das Gelände Neugilching wurde zur Genauigkeitsüberprüfung einem Vergleich mit einem Referenzdatensatz unterzogen. Als Referenz stand ein Modell mit 50 m Rasterweite und einer Höhenauflösung von 1 m zur Verfügung. Da im Referenzmodell keine Bebauungsstrukturen enthalten sind, kommt für den Vergleich nur der vorwiegend unbebaute, südliche Teil des Testgebiets in Frage. Der 800 m auf 1100 m große Ausschnitt umfaßt das grasbewachsene Flugplatzgelände. Die Runway quert den Ausschnitt in einem Winkel von 43° .

Da das Gelände in Ost-West-Richtung eine recht homogene Struktur besitzt, konnte es mit den 7 Profilschnitten vollständig erfaßt werden. Wenn das Gelände stetig zwischen den Meßspuren verläuft, kommt die Interpolation dem tatsächlichen Geländeverlauf nahe. Diese Profilschnitte wurden in Bild 6.10 in ein Höhenlinienmodell umgerechnet und der 1:5000 Flurkarte SW III/10 unterlegt. Die Linien konstanter Höhe verlaufen in Ost - West Richtung von 587 m bis 579 m, jedem Höhenmeter ist eine Linie zugeordnet. Die vom Radar gemessenen, in Rot gezeichneten Höhen stimmen mit den Höhen der Flurkarte gut überein. Die gleichen Intervallabstände der Höhenlinien zeigen, daß der Höhenverlauf korrekt bestimmt wurde. Kleinere Abweichungen treten lediglich im Bereich der Runway auf. Allerdings führt ein Höhenfehler von 2 Dezimetern

bei der flachen Geländeneigung von 0.8% schon zu einer Verschiebung der Höhenlinie um 25m.

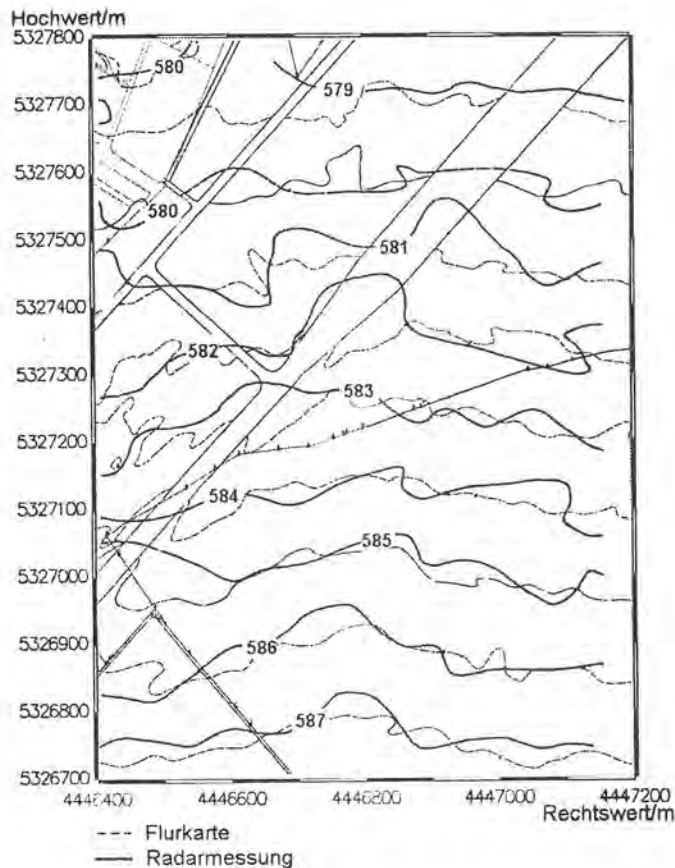


Bild 6.10: Höhenlinien Radarmessung und Flurkarte

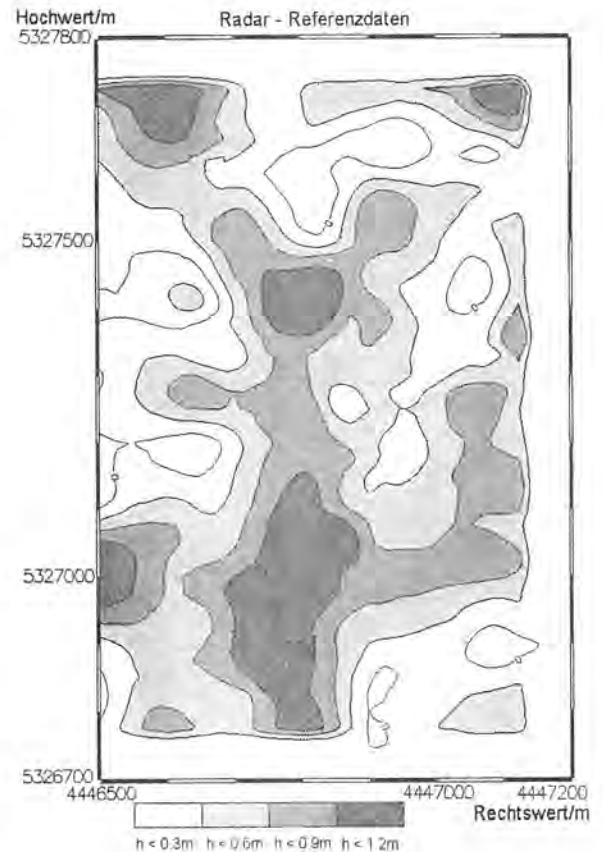


Bild 6.11: Isolinien der Differenz

Im Bilde 6.11 ist ein Vergleich mit der Referenz errechnet. Die Höhenlinien entsprechen der Differenz zwischen Radar und Referenz, alle 30 cm wurde eine Isolinie gezeichnet. Insgesamt liegen die positiven Differenzen im Bereich von 0 m bis 1.2 m. Die Radarhöhen zeigen jedoch gute Übereinstimmung zu den Referenzhöhen. Die bestehenden, lokalen Abweichungen sind nicht notwendigerweise Fehler der Radarmessung. Da das Referenzmodell nur über eine Höhenauflösung von 1 m verfügt, kann der Fehler auch auf Rundungsprobleme des Referenzmodells beruhen. Ein weiteres Problem der exakten Höhenbestimmung ergibt sich aus dem Grasbewuchs des Flugfeldes, der Ende Mai eine Höhe von fast einem halben Meter erreicht hatte. Insofern läßt sich aus dem Vergleich der Schluß ziehen, daß das Radarhöhenmodell in der gleichen Genauigkeitsordnung wie die Referenzdaten liegt.

Das Gelände wurde also mit einer Höhengenaugkeit von 1 m bestimmt. Damit ist gezeigt, daß bei einer homogenen Landschaft das Radaraltimeter durchaus für die Erzeugung von Geländemodellen mit einer Rasterweite von 100 m und einer Höhengenaugkeit von 1 m benützt

werden kann. Bild 6.12 zeigt ein Luftbild des entsprechenden Geländes, das den Vegetationszustand während der Messung wiedergibt.



Bild 6.12: Testgebiet Neugilching

Für die Auswertung der Messung Neugilching wurden 742 Bodenpunkte verwendet, die durch Fuzzylogik aus den Radarmeßpunkten extrahiert wurden. Der Vergleich mit den Referenzdaten ergab in einem ersten Ansatz einen mittleren Fehler von 0.53 m, der aber durch eine ausgewählte Höhenkalibrierung im Testgebiet noch verbessert werden kann. Die Standardabweichung der Höhenabweichungen betrug 0.37 m und kann als Maß für die Genauigkeit des Gesamtsystems herangezogen werden. Bild 6.13 zeigt im einzelnen die Fehlerverteilung der Differenzen zwischen Radarmessung und Referenzmodell, wobei ein Kalibrationsoffset von 0.6 m berücksichtigt wurde. Zusammenfassend läßt sich der Schluß ziehen, daß die topographische Aufnahme des Testgebiet Neugilching gute Übereinstimmung zu den Referenzdaten zeigt.

Häufigkeit

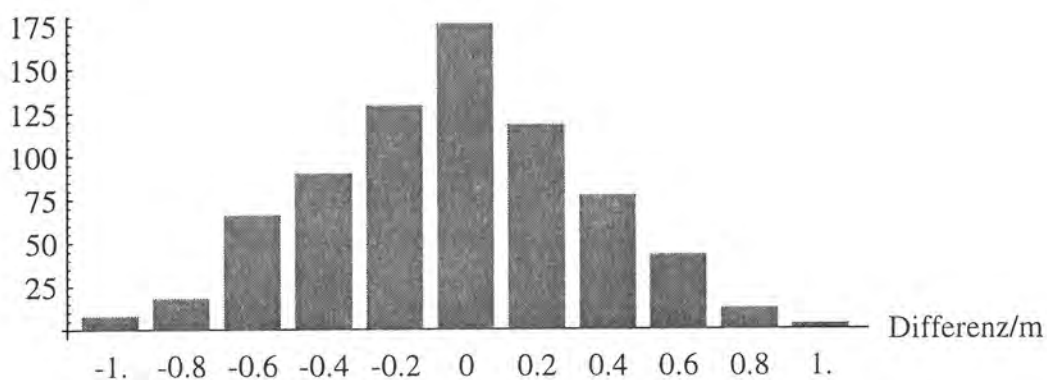


Bild 6.13: Häufigkeitsverteilung der Differenzen

3.3 Befliegung Wörthsee

Eine weitere Validierungskampagne des Radaraltimeters wurde im Testgebiet Wörthsee, einem Geländestreifen südwestlich von München geflogen. Um die Reproduzierbarkeit der Messung zu prüfen, wurde dasselbe Gebiet zweimal aufgenommen. Am 31. 05. 95 wurde das Testgelände Wörthsee mit 19 Spuren in Ost-West-Richtung bei einer Höhe von 350 m über Grund beflogen. Damit wird ein Spurabstand von etwa 150 m erreicht, was die mit dem verfügbaren Navigationssystem kleinstmögliche Spurweite darstellt. Von den 19 Spuren wurden zwei Spuren wegen zu großer Abweichung von der Sollvorgabe abgebrochen und wiederholt. In Tabelle 7.0 sind die Kennungsdaten der Befliegung zusammengestellt.

Im Verlauf von Spur 8 und Spur 5 wurden mit der Kamera RMK-A Luftbilder aufgenommen. Aus diesen sich überlappenden Luftbildern wurde später durch Stereoauswertung ein digitales Geländemodell errechnet. Außerdem wurde in einer gesonderten Spur in Höhe von 1500 m über Grund das Gesamtgelände in Luftbildern dokumentiert. Beide Befliegungen wurden bei klarem, sonnigen Wetter durchgeführt. Die Messung Wörthsee II fand am 01.06.95 statt und umfaßte 20 Spuren über demselben Geländeausschnitt. Hierbei wurde im Unterschied zur ersten Messung im Norden des Gebiets mit der Befliegung begonnen und die Flughöhe auf 400 m über Grund angesetzt. Für beide Messungen wurde dieselbe Spurplanung vorgegeben, jedoch fallen die Spuren der zwei Messungen in den seltensten Fällen aufeinander.



Bild 7.1: Testgebiet Wörthsee

Ziel der Messungen Wörthsee I und Wörthsee II war einmal die Funktionstauglichkeit des Gesamtsystems unter realen Einsatzbedingungen zu validieren. Zum anderen wurden über Cornerreflektoren Kontrollpunkte im Gelände eingemessen, um die Höhen und Lagegenauigkeit zu überprüfen. Dabei zeigte sich, daß alle Sensoren zuverlässig arbeiteten, die Datenregistrierungseinheit und das Synchronisationssystem den Anforderungen entsprachen. Die gemessenen Daten wurden anschließend in ein digitales Geländemodell umgerechnet, eine 3D Darstellung ist in Bild 7.1 zu sehen.

Tabelle 7.0 Testgebiet Wörthsee

Lage	25 km südlich von München	Punktabstand auf dem Profil	ca. 40 cm
Befliegungsdatum	Messung I: 31.05.94 Messung II: 01.06.94	Meßrate	200 Hz
Koordinaten des Testgebiets	4435000 m - 4449000 m 5322000 m - 5323500 m	Flughöhe über Grund	Messung I: 350 m Messung II: 400 m
Größe des Gebiets	1.5 km Nord-Süd 14 km Ost-West Ausdehnung	Fluggeschwindigkeit	65 m/s - 75 m/s
Geländehöhen	540 m bis 700 m über NN	Flugzeit	Messung I: 8:59 - 11:20 Messung II: 9:44 - 12:12
Flugplan	100 m Profilabstand	Flugdauer	Messung I: 2 h 21 min Messung II: 2 h 28 min
Querstreifen	Messung I: 19 Profile Messung II: 20 Profile	Radarmeßpunkte Messung I & II	1106800

Das Meßgebiet Wörthsee liegt im sogenannten Fünfseenland und umfaßt Geländestrukturen und Objekte einer typischen Voralpenlandschaft. Drei größere Seen sind zwischen die geschwungenen Hügel eingebettet, im Westen der Ammersee, im Süden der Pilsensee und im Norden der Wörthsee. Der Pilsensee entwässert zum Ammersee, von dem er durch das Herrschinger Moos getrennt ist. Die mittleren Wasserspiegel dieser Seen differieren nur um 1 m, was darauf schließen läßt, daß der Pilsensee früher ein Teil des Ammersees war. Der Wörthsee, dessen mittlerer Wasserspiegel 27 m über dem des Ammersees liegt, füllt dagegen ein eigenes Becken. Alle drei Seen sind eiszeitlicher Entstehung.

Mehrere kleine Ortschaften befinden sich im Meßgebiet, Breitbrunn am Ufer des Ammersees, Seefeld in der Mulde zwischen Pilsensee und Wörthsee. Die wellige Landschaft umfaßt eine Vielzahl von Vegetationstypen wie Felder, Ackerflächen, Wiesen und Mischwälder.

3.3.1 Auswertung der Radarmessung

Bild 7.2 bis Bild 7.5 zeigen die Meßergebnisse der Befliegung Wörthsee I und Wörthsee II. Die Daten beider Meßkampagnen wurden zu einem Geländemodell zusammengefaßt. Die beiden vom Radaraltimeter aufgezeichneten Meßgrößen Höhe und rückgestreute Leistung sind neben einem Kartenausschnitt und einem Luftbild in vier Diagrammen zusammengestellt. Bild 7.2 stellt das Höhenlinien-Modell des Geländes dar. Die Geländehöhen sind als Isolinien im Abstand von jeweils 10 m gezeichnet, beginnend mit der Höhe des Ammersees und des Pilsensees von jeweils 540 m über NN. Der leicht gewellte Höhenrücken, in den das Gelände östlich ausläuft, weist Erhebungen bis zu 640 m über NN auf.

Bild 7.2 Höhenlinien

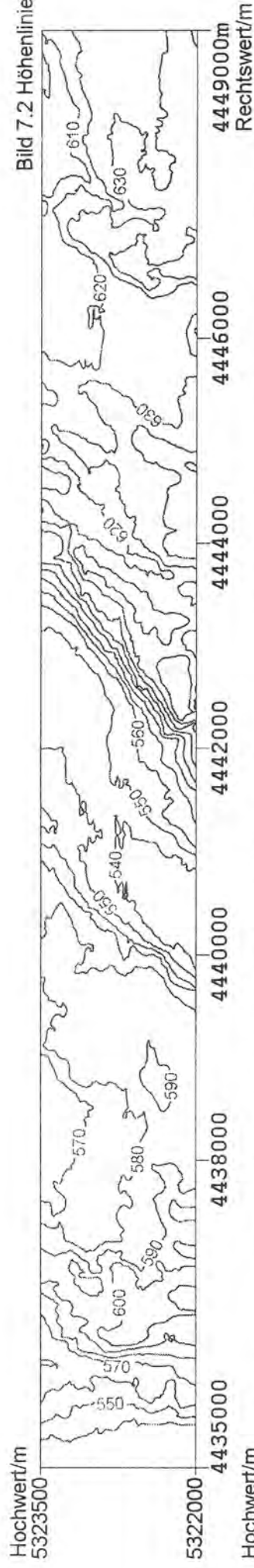


Bild 7.3: Top. Karte

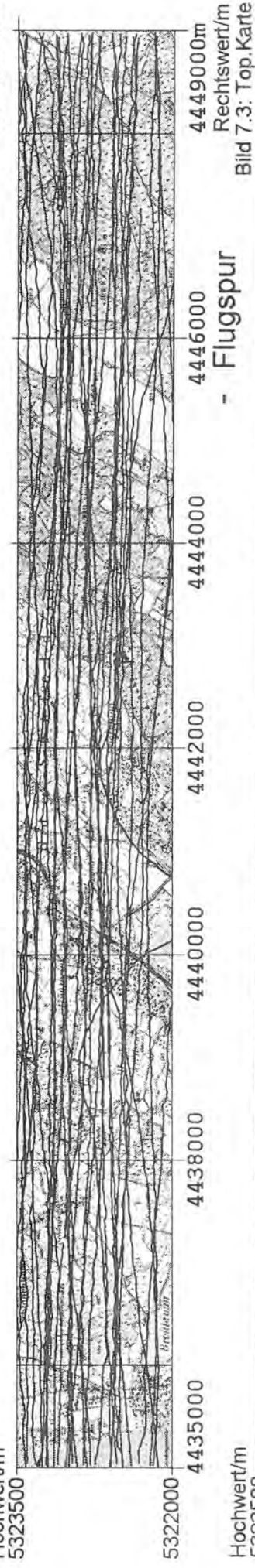


Bild 7.4: Echoleistung



Bild 7.5: Luftbild



Bild 7.2 - Bild 7.5: Radardaten Wörthsee

Bild 7.3 zeigt den entsprechenden Geländeausschnitt der topographischen Karte 7932 / 7933. Die Flugspuren sind in Schwarz eingezeichnet. Diese flächenhafte Darstellung der Meßdaten ergibt sich, wenn zwischen den Spuren interpoliert und so ein regelmäßiges Raster der Höhendaten und der Rückstreudaten ermittelt wird.

Im Bild 7.4 ist die rückgestreute Leistung des Geländeausschnitts aufgetragen. Dabei sind die Leistungswerte entsprechend der angegebenen Skala farbcodiert. Gut reflektierende Objekte sind in Orangetönen, die einer Leistung von -30 dBm entsprechen, dargestellt. Mit abnehmender Leistung wandeln sich die Farben zum dunklen Blau, das einer Leistung von -80 dBm entspricht.

Die Seen lassen sich aufgrund ihres hohen Rückstreuquerschnitt deutlich zuordnen, da sie die hellsten Objekte im Geländeausschnitt darstellen. Ebenfalls markant erscheinen die Ortschaften Breitbrunn und Seefeld mit -30 dBm bis -40 dBm Echoleistung. Im östlichen Teil des Geländeausschnitts, der überwiegend von Mischwald und Feldern bedeckt ist, sind Rückstreuleistungen zwischen -70 dBm und -80 dBm anzutreffen. Freie, nicht vom Wald überschattete Straßenstücke durchziehen das Blau als orangene Linienstücke. Kleinere Weiler wie Tiefenbrunn oder selbst einzelne Aussiedlerhöfe sind als helle Flecken im östlichen Teil des Geländes noch erkennbar.

Im untersten Bild 7.5 ist ein aus 9 Luftbildern montierter Ausschnitt des Geländes zu sehen. Die Aufnahmen wurden während des Fluges auf einem Infrarotfilm im Maßstab von 1:10000 aufgenommen und zeigen den tatsächlichen Vegetationszustand während der Messung.

3.3.2 Profilspur

Beispielhaft ist die Profillinie Spur 7, die das Testgebiet mittig schneidet, in den Bildern 7.6 und 7.7 dargestellt. Im Bild 7.6 ist die Höhe über dem Rechtswert aufgetragen. Einer Längsausdehnung von 14 km steht eine Höhenvariation von 540 m auf 640 m gegenüber, das Gelände ist etwa vierfach überhöht dargestellt.

Am Ufer des Ammersees, bei Rechtswert 4435000 m erhebt sich ein Bergrücken. In der Mulde bei Rechtswert 4441000 m liegen Pilsensee und Wörthsee und am Rande der Mulde erstreckt sich die Gemeinde Seefeld mit den beiden Ortsteilen Hechdorf und Oberalting. Daran schließt ein Höhenrücken mit den Waldgebieten Altinger Buchet und östlich das Oberbrunner Holz an. Bei diesen Bewaldungen bilden sich in den Daten Baumspitzen und Bodenpunkte ab. Die mittlere Baumhöhe von 25 m ist direkt aus dem Diagramm abzulesen.

Im Diagramm 7.7 ist die rückgestreute Echoleistung aufgetragen. Insgesamt variiert die empfangene Echoleistung um fast 50 dB. Die hellsten Stellen finden sich am Ammersee und bei den Ortschaften Hechendorf und Oberalting, die eine Echoleistung von -40 dBm rückstreuen. Die Echoleistung unterliegt jedoch einer großen Streuung, die gelegentlich fast 15 dB ausmacht. Wald oder offene Wiesen streuen zwischen -70 dBm und -80 dBm Leistung zurück.

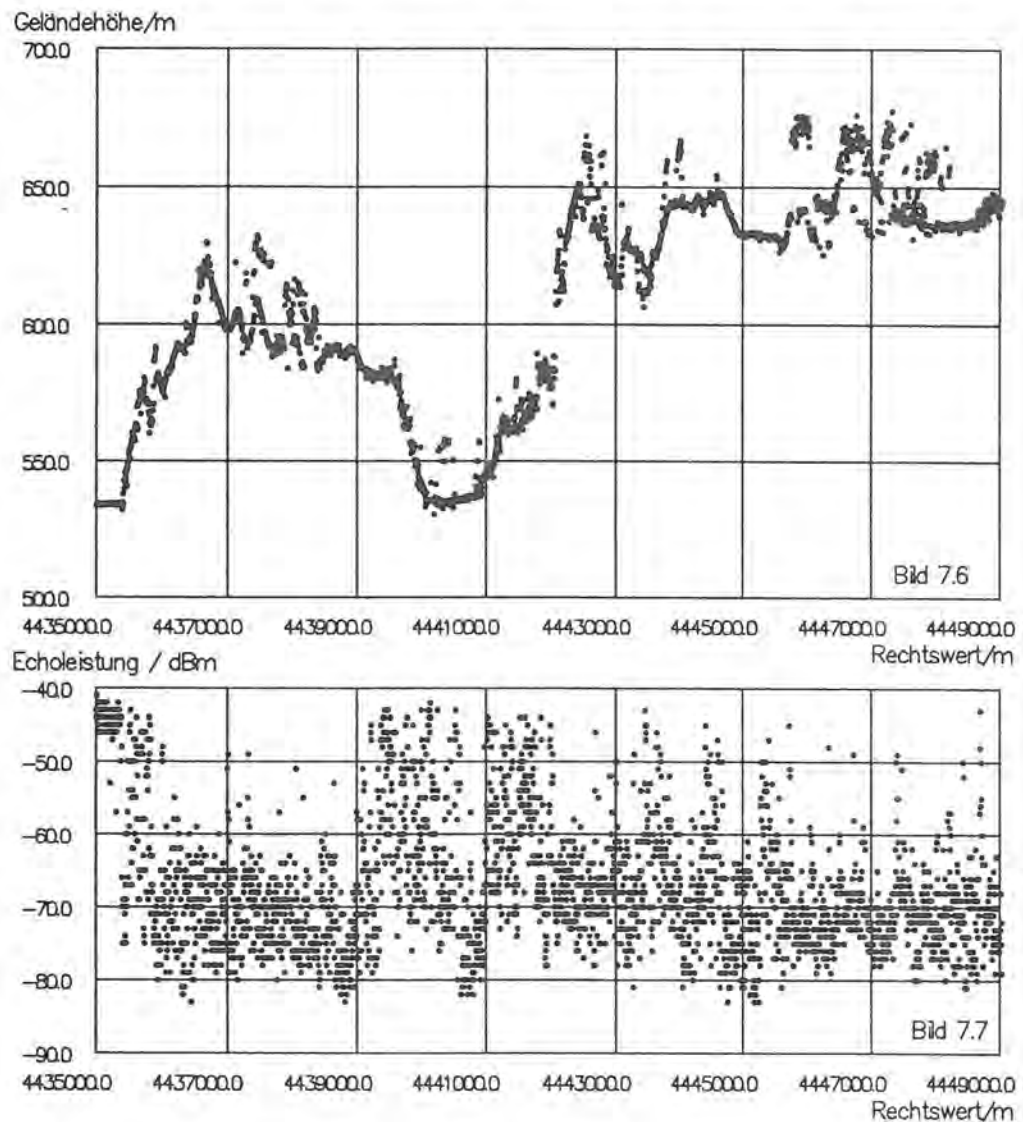


Bild 7.6, Bild 7.7: Profillinie Würthsee

3.3.3 Kartenvergleich

Für einen ersten Vergleich der Radardaten mit der topographischen Karte wurde ein Ausschnitt um die Ortschaften Hechendorf, Günthering und Oberalting gewählt. Bild 7.9 stellt einen Kartenausschnitt der topographischen Karte 1:25000 den aus Radardaten ermittelten Höhenlinien gegenüber. Das Gelände fällt von etwa 600 m auf 530 m zum See hin ab. Die

Ortschaften Hechendorf und Günthering sind am Hang gelegen, in der sumpfigen Seeau befinden sich vorwiegend Wiesen.

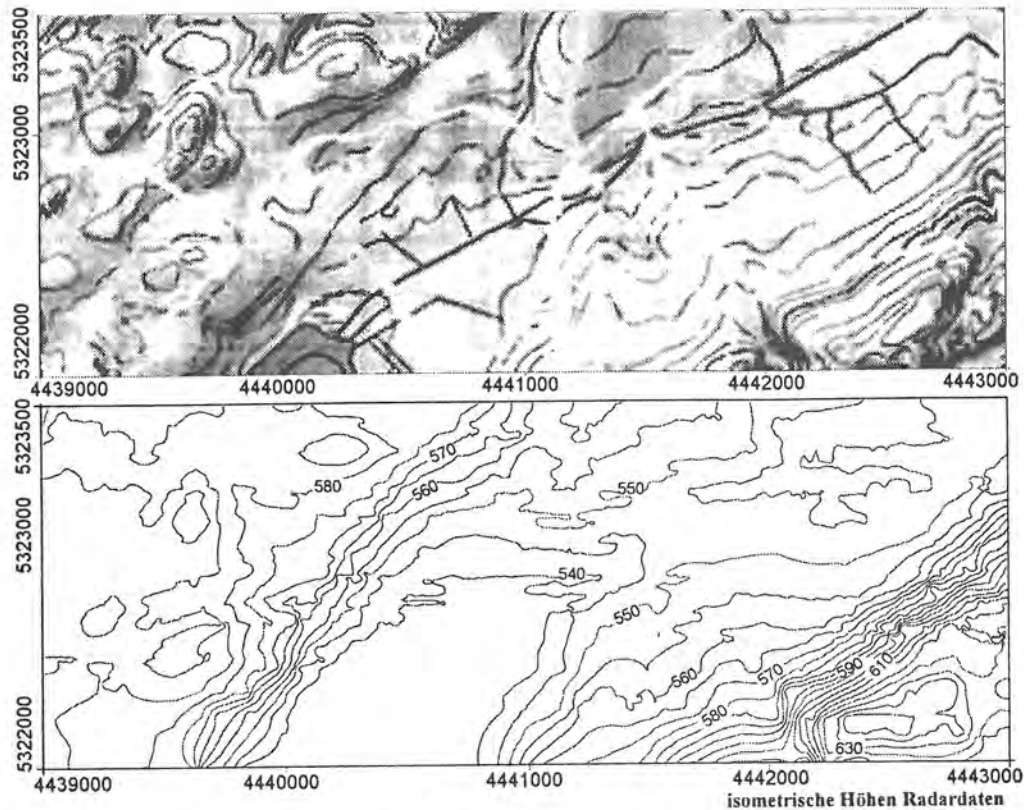


Bild 7.9 Ausschnitt Testgebiet Würthsee, Topographische Karte und Radardaten

Das Gelände steigt jenseits des Pilsensees zum Bad Bühl hin an, der mit 640 m den höchsten Punkt des Geländeausschnitts darstellt. Die Messung zeigt gute Übereinstimmung mit den Höhenlinien der Karte. Besonders die beiden Geländeanstiege östlich und westlich des Pilsensees, die sich in einer Verdichtung der Höhenlinien ausdrücken, kommen in Karte und Messung zur Deckung.



Bild 7.10: Testgebiet Würthsee

Für die Radardaten wurde alle 5 m eine Höhenlinie gewählt. In der Karte sind die 10 m Höhenlinien durchgezogen und die 5 m Linien gestrichelt wiedergegeben. Bild 7.10 zeigt eine Schrägsicht des Geländeausschnitts mit Blick nach Süden.

3.3.4 Genauigkeitsuntersuchung

Bild 7.11 bis 7.14 geben einen räumlichen Vergleich von Referenzdaten und Radardaten wieder und fächern ihn in Flurkarte, Höhenlinien der Referenzkarte, Höhenlinien der Radarkarte und die Differenzhöhen auf. Der untersuchte Ausschnitt vom 800 m auf 300 m umfaßt 7 Straßen, einen Sportplatz und ein markantes fünfstöckiges Hochhaus, das die umgebenden Einfamilienhäuser überragt. Die Kreisstraße ST 2070 bildet die Ortsdurchfahrt, quer dazu verläuft die S-Bahn-Linie. Das Bild 7.11 zeigt einen Kartenausschnitt des Untersuchungsgebietes, der der Flurkarte SW5-13 des Vermessungsamtes Starnberg entnommen ist. Neben den Straßen und Gebäudekonturen sind die Grundstücksgrenzen, trigonometrische Punkte und Höhenlinien eingetragen.

Während des Fluges wurden Luftbilder bei einer Flughöhe von 320 m über Grund aufgenommen, was einem Bildmaßstab von ca 1:2000 entspricht. Daraus wurde durch Stereoauswertung ein Referenzmodell errechnet. Dieses Modell im 2 m Raster mit einer Höhengenaugkeit im Dezimeterbereich bildet die Vergleichsreferenz, die als Höhenlinienkarte in Bild 7.12 dargestellt ist. Hierbei läßt sich die Hanglage der Ortschaft aus den gegen Osten fallenden Höhen von 558 m auf 538 m über NN ablesen. Neben den Höhenlinien des Geländes sind die Höhenlinien, die die Hauskonturen umschließen in der Darstellung zu sehen. Südlich der Seestraße schließt sich der Sportplatz an. Im südöstlichen Teil endet die Bebauung, am Ortsausgang befinden sich Wiesen.

Bild 7.13 zeigt die aus Radarmeßpunkten errechneten Höhenlinien. Von den 20 Spuren der Messung fallen 9 Spuren in den gewählten Ausschnitt. Sie sind dem Höhenlinienbild der Radardaten hellgrau unterlegt. Auf den Spuren wurde im Durchschnitt alle 30 bis 40 cm ein Meßpunkt aufgenommen, insgesamt stehen zur Berechnung des Geländemodells 10829 Radarpunkte zur Verfügung. Allerdings sind diese Punkte höchst ungünstig verteilt. Auf den Spuren selbst besteht hohe Meßwertdichte, während zwischen den Spuren keine Meßwerte vorhanden sind. Um zu einem regelmäßigen Punktraster für die Höhenliniendarstellung zu gelangen, muß zwischen den Spuren interpoliert werden. Da die Spurlücken gelegentlich bis zu 150 m betragen können, kommt die Interpolation dem tatsächlichen Geländeverlauf nur dann nahe, wenn das Gelände stetig zwischen den Meßpunkten verläuft.

Hier zeigen sich die prinzipiellen Grenzen eines profilierenden Systems. So ist die Übereinstimmung zwischen Referenzmodell und Radarmodell nur lokal vorhanden. Für eine

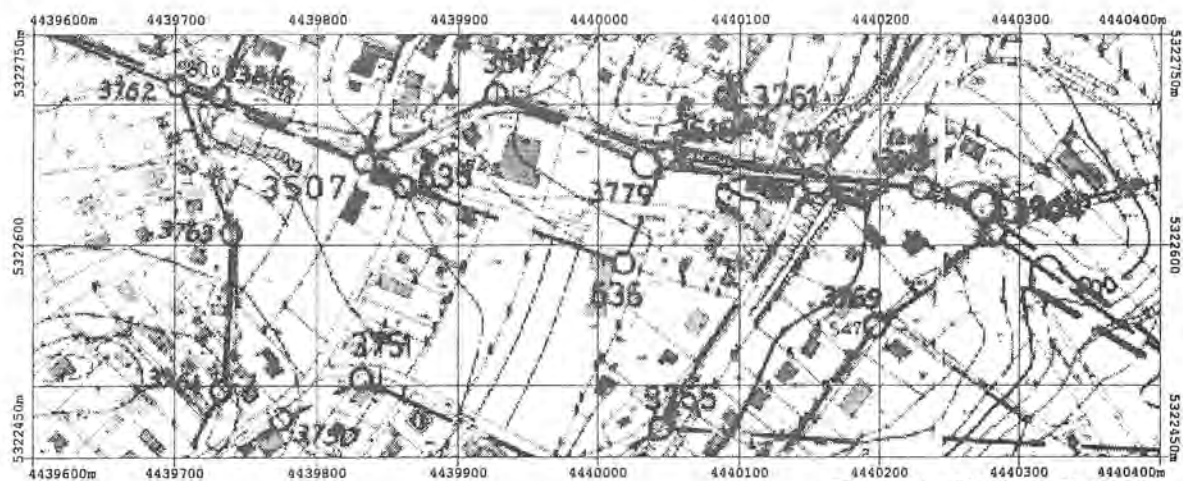


Bild 7.11

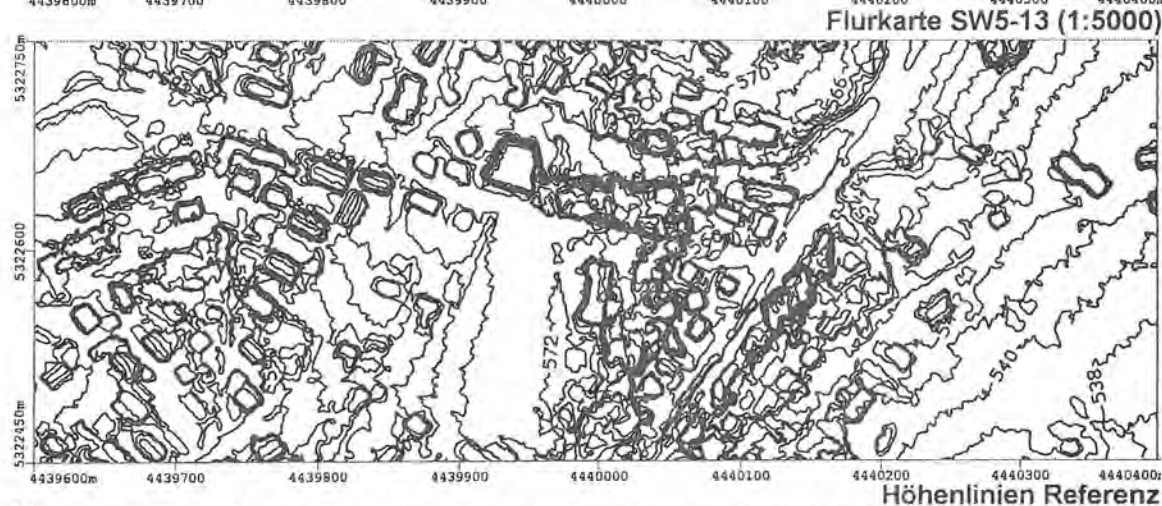


Bild 7.12

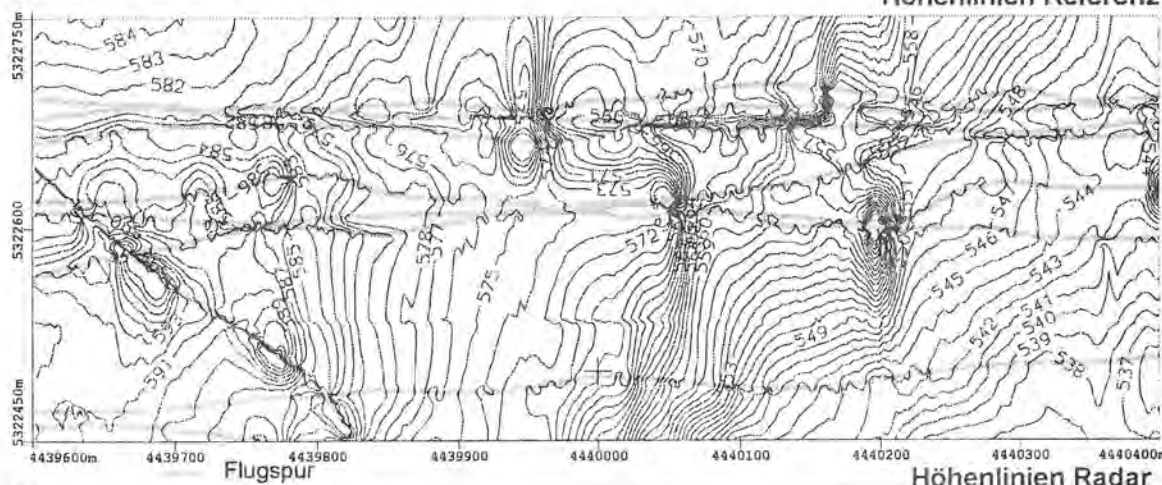


Bild 7.13

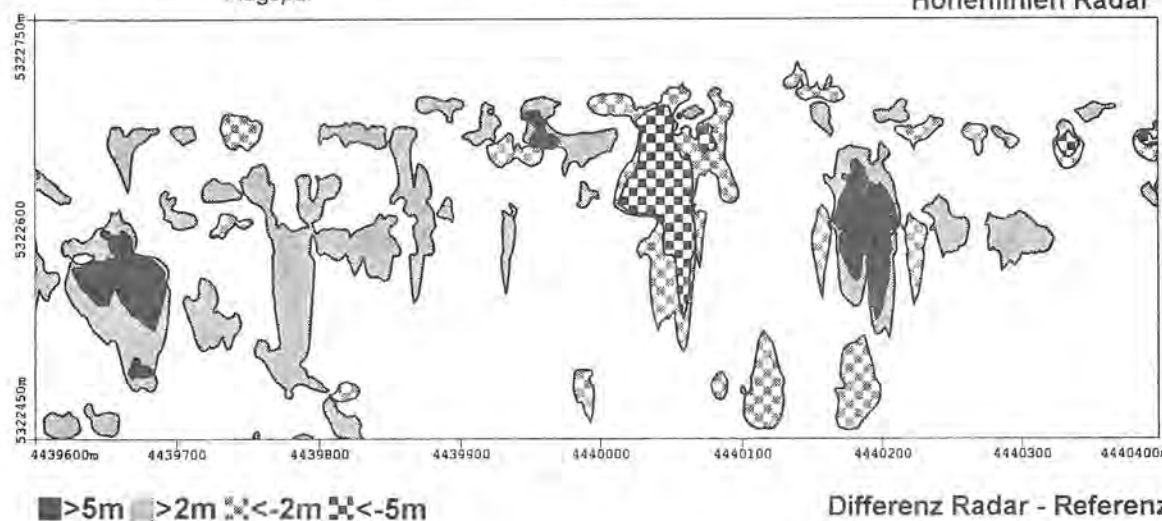


Bild 7.14

inhomogene Geländestruktur wie eine Ortschaft müßten die Spuren wesentlich dichter geflogen werden. Für die Messung Wörthsee stand leider nur ein GPS gestütztes Navigationssystem zur Verfügung, das eine Abweichung der Spur um 150 m zuläßt. Dadurch ergaben sich bedauerlicherweise statt dem geplanten regelmäßigen Spurabstand von 50 m zwei Zonen, in denen je drei Spuren aufeinanderfallen.

Im Diagramm 7.14 ist die Differenz zwischen Radar und Referenzhöhen dargestellt. Beim Vergleich der beiden Datensätze stehen zwei Ansatzmöglichkeiten zur Wahl: Entweder ist zu jedem Geländepunkt der zugehörige Radarpunkt zu interpolieren und zu vergleichen oder es muß zu jedem Radarpunkt der entsprechende Geländepunkt interpoliert und verglichen werden. Der erste Ansatz zielt auf die Genauigkeit, mit der das Gelände als Ganzes vom Radar erfaßt wurde, während der zweite Ansatz auf die Genauigkeit der Radarmessung abhebt. Die beiden Datensätze sind in ihrer räumlichen Punktverteilung so verschieden, daß sich der Ansatz maßgeblich auf den zu erwartenden Fehler auswirkt. Um die Genauigkeit der Radardaten zu prüfen, wurde der zweite Ansatz gewählt.

Um den Vergleich wieder auf die Fläche zu beziehen, wurden die auf den Spuren auftretenden Fehler durch Interpolation in Isolinien umgewandelt. Bei negativen Differenzen, in Blautönen gezeichnet, hat das Radaraltimeter zu geringe Höhen gemessen. Sei es, daß Objekte nicht erfaßt wurden oder aber Bodenpunkte zu niedrig gemessen wurden. In den Fehlerbereichen, die mit Rot gezeichnet sind, ist der Radarmedwert zu hoch gegenüber der Referenz. Da das Radaraltimeter im Ausleuchtfleck stets die erhabenen Stellen mißt, ist es möglich, daß Objekte in ihrer Ausdehnung nicht richtig bestimmt wurden. Der Hausgrundriß wird dann von einem Fehlersaum umzogen. So erklärt sich beispielsweise der Fehlersaum um das fünfstöckige Hochhaus durch die zu große räumliche Auflösung. Insgesamt werden die auf den Spuren auftretenden Fehler in Nord - Süd - Richtung durch den Interpolationsalgorithmus jedoch verwischt.

3.3.5 Profilvergleich

In den Bildern 7.15 bis 7.16 ist ein weiterer Vergleich von Radar und Referenz dargestellt, der sich auf die Profillinie der Spur 7 bezieht. Dabei zeigt der Vergleich auf der Profillinie gute Übereinstimmung, Haus und Baumstrukturen wurden korrekt erfaßt. Um das mehrstöckige Haus bei Rechtswert 4439950 m machen sich jedoch auftretende Fehler rechts und links der Hauskontur mit Abweichungen bis 15 m bemerkbar. Ein weitere Abweichung von -20 m zeigt sich bei Rechtswert 4440050 m. Eine Baumreihe, die in den Referenzdaten mit anderer Ausdehnung erfaßt wurde, bildet hier die Ursache für die Differenz.

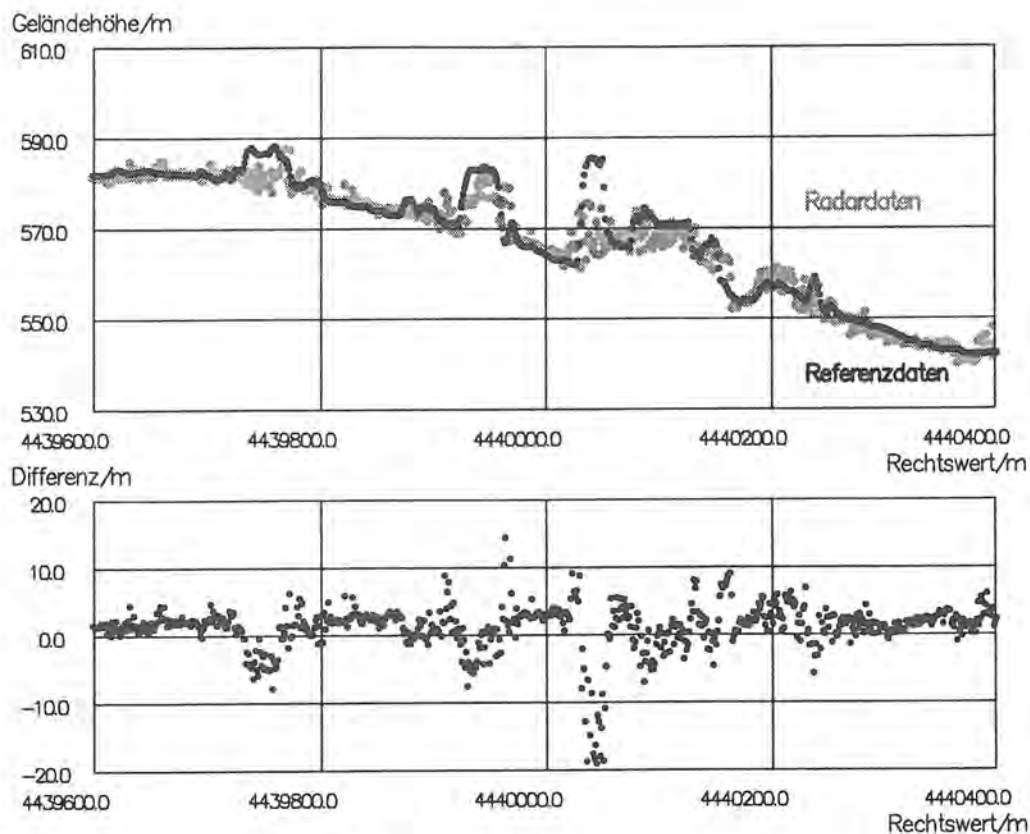


Bild 7.15, Bild 7.16: Profillinie im Gebiet Hechendorf

Eine mittlere Differenz von 0,7 m und eine Standardabweichung der Höhendifferenz von 3,0 m wurde zwischen Referenz und Radardaten ermittelt. Die Verteilung der Höhendifferenz zeigt Bild 7.17. Der Mittelwert von +0,7 m spiegelt sich in einer Verschiebung des Histogramms wieder.

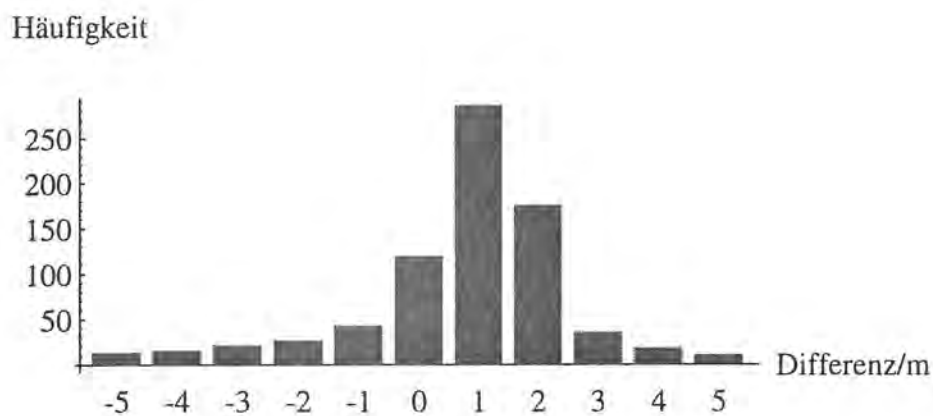


Bild 7.17: Histogramm der Differenzen

3.4 Befliegung Bonn

Eine weitere Kartierungskampagne des Radaraltimeters wurde im Testgebiet Bonn geflogen. Im Vordergrund der Untersuchungen stand die Eignung des Radarprofilers für die Kartierung von Stadtgebieten. Das rechteckige Testgebiet umfaßte einen 6 km auf 4,5 km großen Ausschnitt, der im wesentlichen den Stadtkern von Bonn und die umliegenden Vororte beinhaltet. Die Kartierung erfolgte mit 68 Profillinien über dem Testgebiet, womit diese Kartierung gegenüber den anderen Testgebieten die dichteste Spurlage aufwies. Dies war für die Erfassung der sehr differenzierten Stadtlandschaft wesentlich wichtiger als bei einer homogenen Topographie, die weniger Meßspuren erfordert. Mit dem DGPS gestützten Navigationssystem wurde eine präzise Spurtreue erreicht und somit eine fast vollständig flächendeckende Geländeaufnahme möglich.

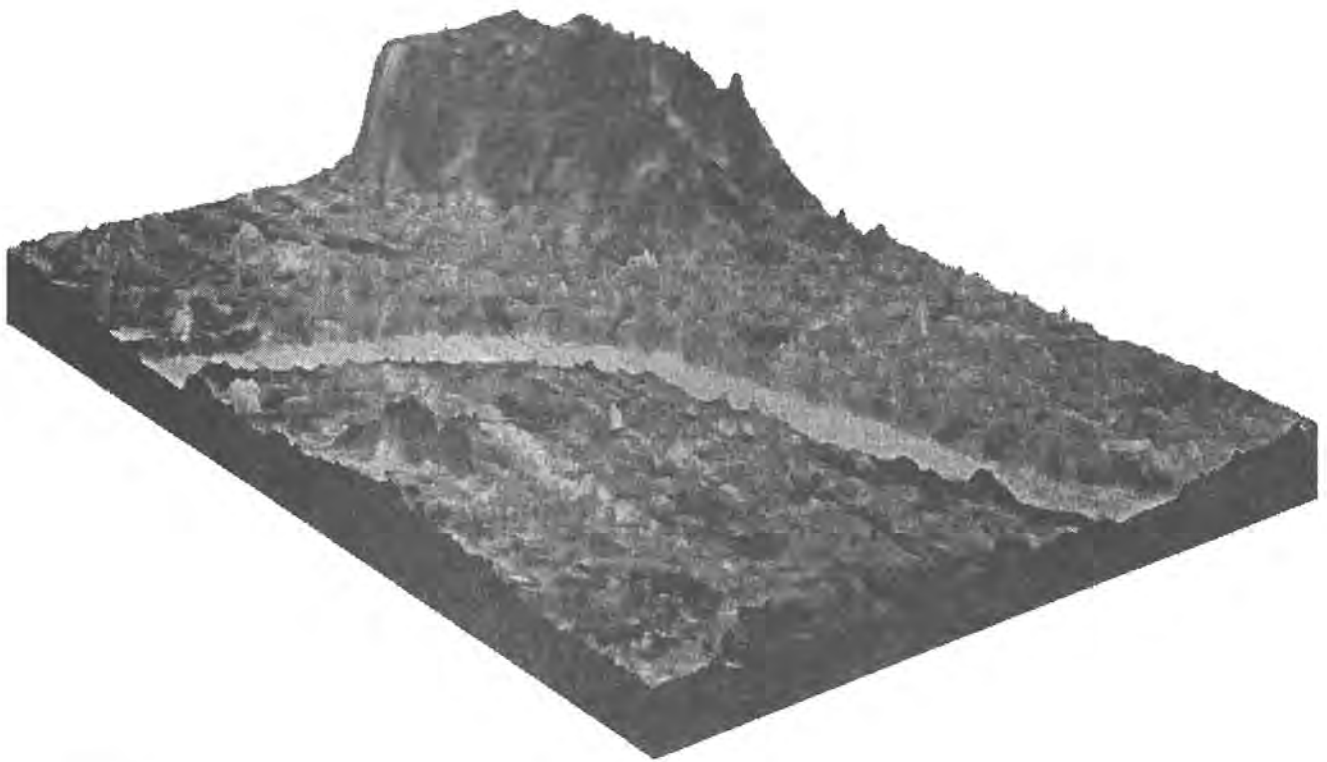


Bild 7.17: Testgebiet Bonn

Der Flug war in allen Punkten erfolgreich und aus den gemessenen Daten konnte ein digitales Geländemodell errechnet werden. Eine 3D-Darstellung des digitalen Geländemodells ist in Bild 7.17 zu sehen. Das Testgebiet wird von einem nordwestlichen Standpunkt mit Blick nach Süden gezeigt. Dabei wurde die Geländeoberfläche mit dem graucodierten Meßwert der Echoleistung belegt. Im Süden erhebt sich der Venusberg, an dessen Fuß der linksrheinische Teil der Stadt Bonn angesiedelt ist. Deutlich hebt sich das Knie des Rheins als Einschnitt aus dem Stadtreief hervor. In Tabelle 7.6 sind die Daten der Befliegung zusammengestellt.

Tabelle 7.6: Testgebiet Bonn

Bonn		Punktabstand auf dem Profil	ca. 40 cm
Befliegungsdatum	12.09.95	Meßrate	200 Hz
Koordinaten des Testgebiets	2576500 m - 2581000 m 5619000 m - 5625000 m	Flughöhe über Grund	475 m
Größe des Gebiets	6 km Nord-Süd 4,5 km Ost-West Ausdehnung	Fluggeschwindigkeit	65 m/s - 75 m/s
Geländehöhen	45 m bis 170 m über NN	Flugdauer	5,5 h
Flugplan	75 m Profilabstand	Radarmeßpunkte	108000
Querstreifen	68 Profile	Flugzeit	7:33-15:45

3.4.1 Auswertung der Radarmessung

Bild 7.18 bis Bild 7.21 zeigen die Meßergebnisse der Befliegung Bonn. Die beiden vom Radaraltimeter aufgezeichneten Meßgrößen Höhe und rückgestreute Leistung sind neben einem Kartenausschnitt und den Flugspuren in vier Diagrammen zusammengestellt.

Bild 7.18 stellt das Gelände in der Form von Höhenlinien dar. Die Geländehöhen sind als Isolinien im Abstand von jeweils 10 m gezeichnet, beginnend mit der Höhe des Rheins in 50 m über NN. Im Süden des Testgebiets liegt der Venusberg mit einer Höhe von 160 m, der Geländeanstieg drückt sich in einer Verdichtung der Höhenlinien aus. Der Rhein durchquert das Testgebiet, die 50 m Isolinie markiert das Flußbett, die mittlere Wasserstandshöhe liegt je nach Jahreszeit zwischen 40 m und 48 m. Die Stadt Bonn liegt auf einem ebenen Plateau mit einer Höhe von 60 m über NN. Die geringe Höhendifferenz bezüglich des Rheins stellt bekannterweise bei Hochwasser ein Problem dar. Am nordwestlichen Rand des Gebiets mündet der Villicher Bach in den Rhein, die 50 m Isolinie folgt dem Einfluß nach Osten. Auf der rechtsrheinischen Seite befindet sich die kleinere Erhebung des Finkenbergs, der Höhen bis zu 80 m aufweist.

Bild 7.19 zeigt die über dem entsprechenden Geländeausschnitt geflogenen Meßspuren. Die flächenhafte Darstellung der Meßdaten ergibt sich, wenn zwischen den Spuren interpoliert und so ein regelmäßiges Raster der Höhendaten und der Rückstreudaten ermittelt wird.

Im Bild 7.20 ist die rückgestreute Leistung des Geländeausschnitts aufgetragen. Dabei sind die Leistungswerte entsprechend der angegebenen Skala farbcodiert. Gut reflektierende Objekte sind in Orangetönen, die einer Leistung von -30 dBm entsprechen, dargestellt. Mit abnehmender

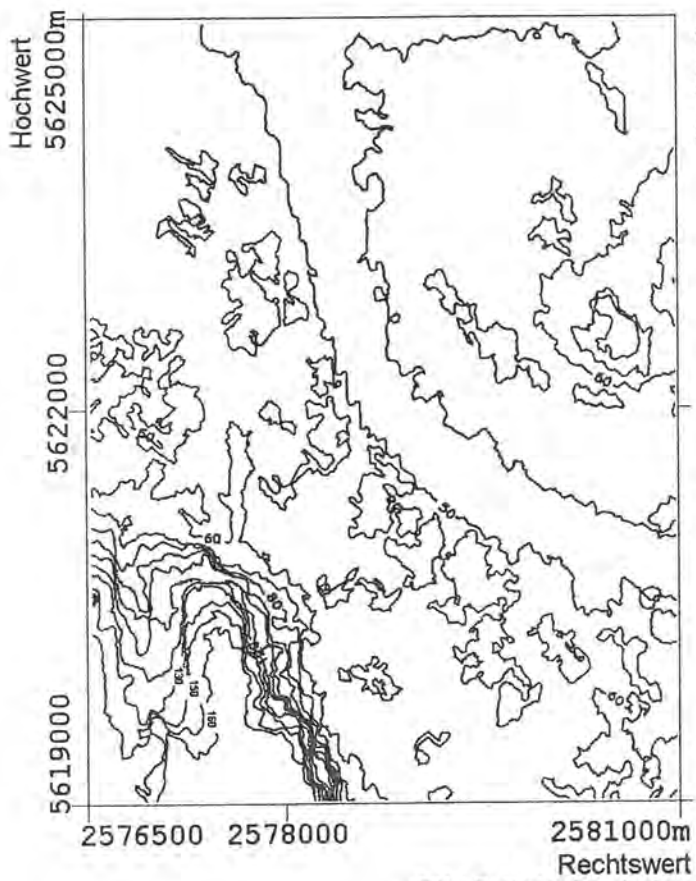


Bild 7.18: Höhenlinien

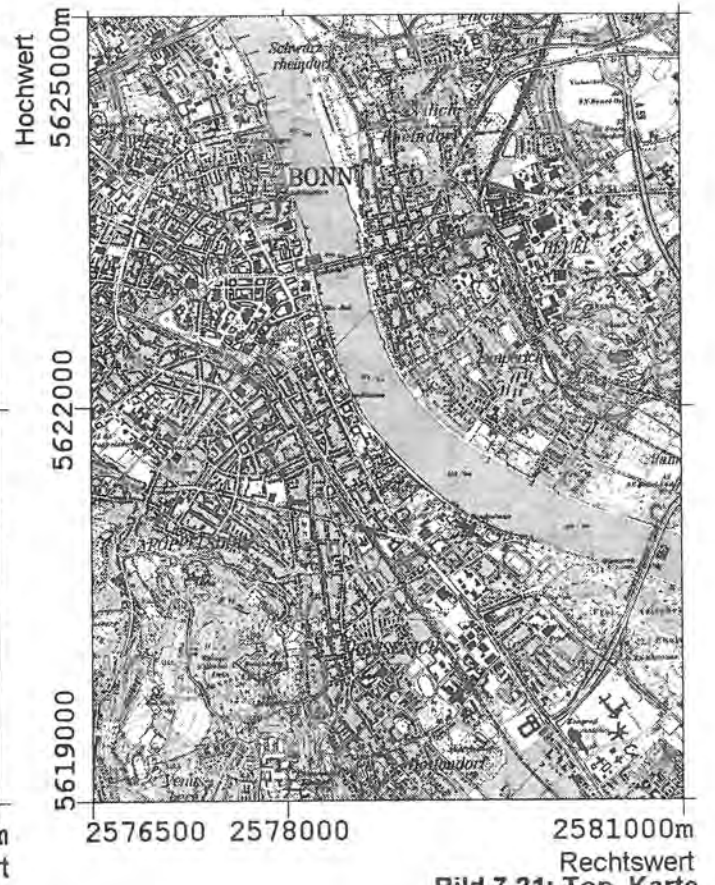


Bild 7.21: Top. Karte

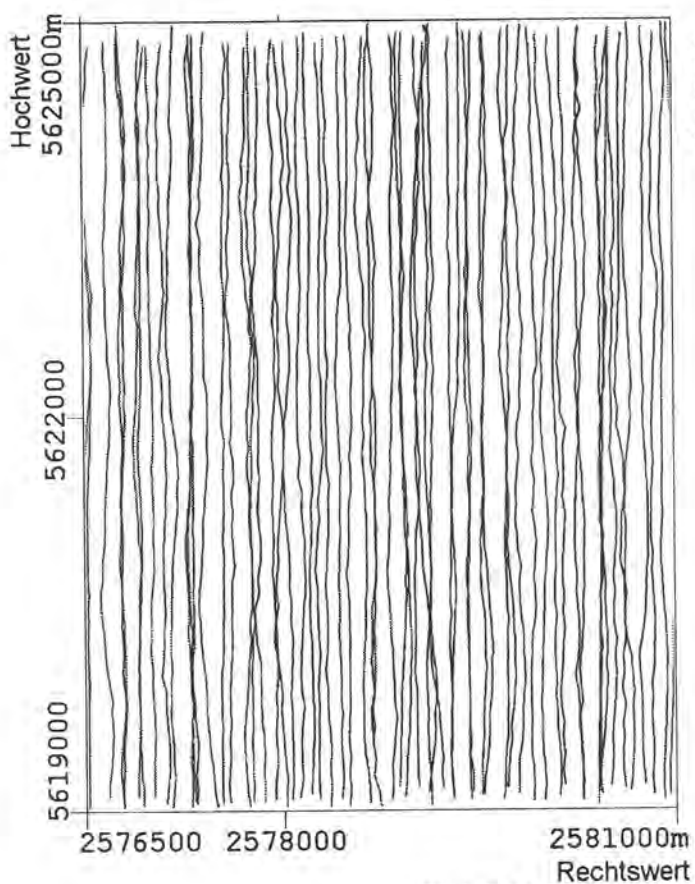


Bild 7.19: Flugspuren

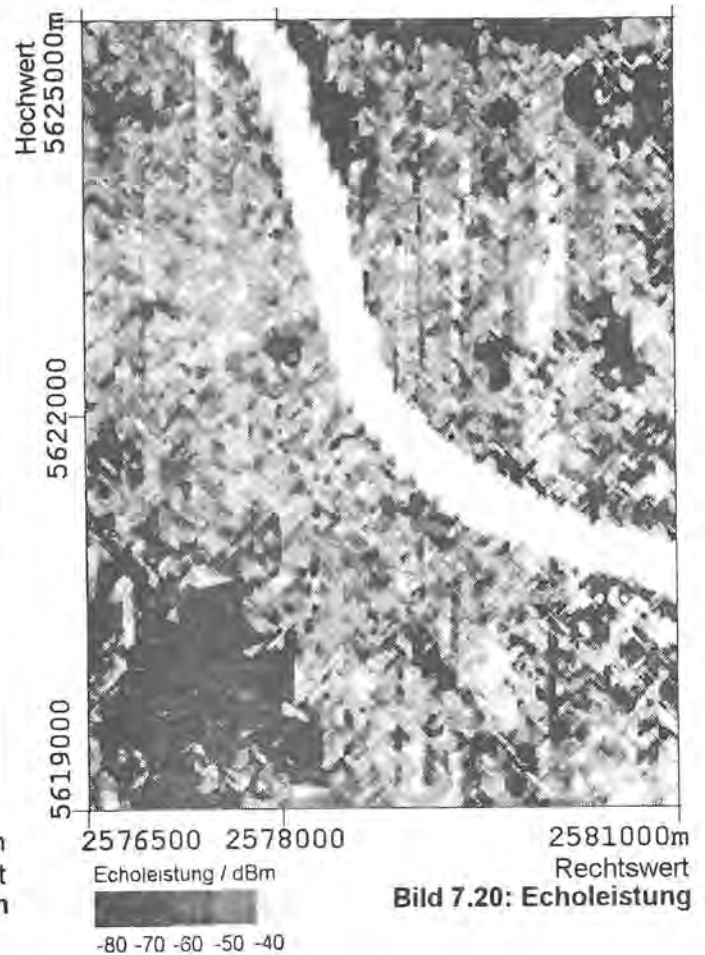


Bild 7.20: Echoleistung

Leistung wandeln sich die Farben zum dunklen Blau, das einer Leistung von -80 dBm entspricht. Das Rheinknie läßt sich aufgrund seines hohen Rückstreuquerschnitts deutlich zuordnen. Im Stadtgebiet selbst ist eine Echoleistung von -50 dBm bis -60 dBm vorherrschend. Einzelne Häuser oder Straßen heben sich nicht aus den Rückstreudaten heraus, vielmehr wird die Stadt als versiegelte Fläche aufgezeichnet. Lediglich Grünflächen treten aufgrund ihres geringen Rückstreuquerschnitts von -70 dBm bis -80 dBm hervor. Die bewaldete Kuppe des Venusbergs erscheint ebenfalls dunkel durch die Vegetation. Durch das stark unterschiedliche Reflexionsverhalten von Grünflächen und versiegelter Fläche eignet sich die rückgestreute Echoleistung als Größe zur Klassifizierung. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 4.1.3 näher untersucht.

3.4.2 Profilspur

Beispielhaft ist die Profillinie Spur 25, die das Testgebiet mittig schneidet, in den Bildern 7.22 und 7.23 dargestellt. Dabei ist im Bild 7.22 die Geländehöhe über dem Hochwert aufgetragen.

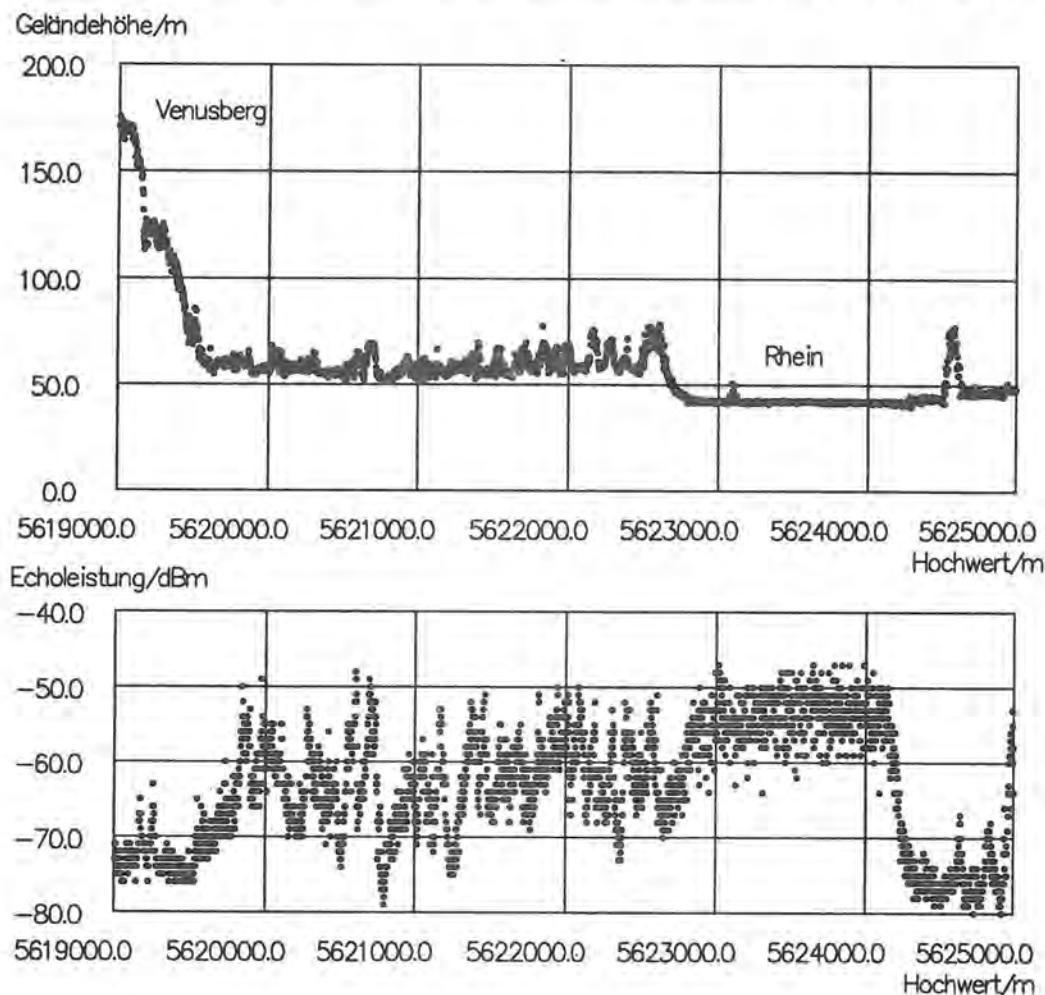


Bild 7.22, Bild 7.23: Testgebiet Bonn

Einer Längsausdehnung von 6 km steht eine Höhenvariation von 140 m gegenüber, das Gelände ist etwa 15fach überhöht dargestellt.

Bei Hochwert 5619000 ist der Venusberg, eine der nördlichsten Erhebungen des rheinischen Schiefergebirges im Schnitt zu sehen, das Gelände fällt zur Stadt hin ab. Die Bauten des Regierungsviertels und der Altstadt werden von der Meßspur erfaßt. Markant zeigt sich der Rhein mit einer Wasserstandshöhe von 42 m. Bei Hochwert 5624250 m steigt das östliche Rheinufer an, eine als Naturdenkmal geschützte Baumreihe am nördlichen Ende des Testgebiets ragt aus der Rheinaue empor.

Bild 7.23 zeigt die empfangene Echoleistung auf der Profilspur. Vegetation der Rheinaue und Bewaldung des Venusbergs liegen bei -75 dBm, während die höchsten rückgestreuten Leistungen beim Rhein in der Größe von -50 dBm vorliegen.

3.4.3 Kartenvergleich

Bild 7.24 zeigt einen Vergleich zwischen der topographischen Karte und den aus Radardaten gewonnenen Höhenlinien. Der für den Vergleich herangezogene Ausschnitt umfaßt den südlichen Teil des Testgebiets von Bonn. Alle 10 m wurde eine Isolinie gezeichnet. Der Flußverlauf des Rheins wird in den Radardaten durch die Höhenlinie von 50 m über NN markiert. Sie zeigt gute Übereinstimmung mit der topographischen Karte. Am südwestlichen

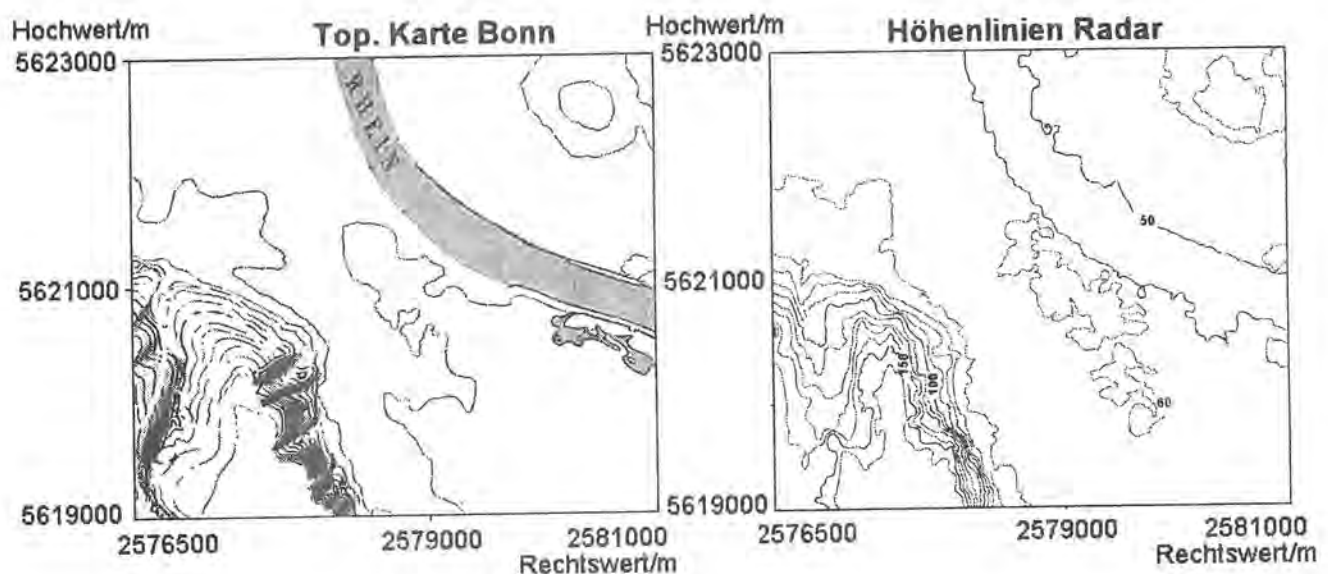


Bild 7.24: Vergleich Topographische Karte und Radardaten

Teil des Testgebiets erhebt sich der Venusberg mit Höhen bis zu 160 m über NN. Trotz der dichten Bewaldung der Hänge und der damit verbundenen Problematik der Extraktion der Bodenpunkte ist das Relief im wesentlichen korrekt wiedergegeben.

Das Stadtgebiet befindet sich auf der ebenen Flußterasse, die bei einer Höhe von 60 m lokalisiert ist. Somit wird der Verlauf der 60 m Höhenlinie durch die Hausstruktur mitbestimmt. Dies führt zu kleineren Differenzen gegenüber der topographischen Karte, in der keine Hausstrukturen berücksichtigt sind. Der Verlauf der 70 m Isolinie in den Radardaten zeigt wieder Übereinstimmung mit der Karte. Im nordöstlichen Teil des Testgebiets befindet sich der Finkenberg als kleinere Erhebung mit 75 m über NN.

Insgesamt zeigt sich, daß auch der Geländetyp Stadtlandschaft gute Ergebnisse bezüglich der Kartierung aufweist. Nach erfolgter Extraktion der Hauspunkte zeigt das digitale Geländemodell Übereinstimmung mit der topographischen Karte. Leider standen für die Untersuchung keine weiteren Referenzdaten zur Verfügung.

3.5 Ergebnis

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier ausgewählte Testgebiete auf die Genauigkeit des digitalen Geländemodells hin untersucht. Dabei wurde die Eignung der Altimeterplattform zur topographischen Geländeaufnahme getestet.

Es wurde gezeigt, daß die Altimeterplattform in der Lage ist, digitale Geländemodelle von den unterschiedlichsten Geländetypen aufzunehmen. Da die Altimeterplattform ein profilierender Sensor ist, verfügt man zunächst über ein Rohgeländemodell mit sehr hoher Auflösung auf den Profilsuren und sehr geringer Punktdichte quer zu den Spuren. Aus dieser ungünstigen Punktverteilung muß aber ein regelmäßiges Punktraster interpoliert werden. Für die Genauigkeit des digitalen Geländemodell ist es entscheidend, wie dicht die Profilsuren über dem Gelände geflogen werden. Ein erheblicher Fehler des Geländemodells kann sich aus der fehlender Abtastung zwischen den Spuren ergeben. Insbesondere entstehen Fehler durch Geländestrukturen, die parallel zur Spurrichtung verlaufen. Ferner hängt die Genauigkeit bei gegebenem Profilabstand von der Morphologie des Geländes ab. Steile Strukturen bedürfen wesentlich höherer Profildichte als ebenes Gelände.

Testgebiet	Geländetyp	Spurdichte	mittlerer Fehler	Standardabweichung
Neugilching	homogenes, unbebautes Gelände	100 m	0.5 m	0.37 m
Andechs	bergiges, bewaldetes Gelände	150 m	0.5 m	3.3 m
Wörthsee	ländliches Gebiet, Ortschaft	70 m	0.7 m	3.0 m

Tabelle 6.1

Im Rahmen der Arbeit sind die Höhengenaugkeiten auf den Profilsuren untersucht worden. Tabelle 6.1 faßt die Charakteristika der Gebiete und die erreichten Genauigkeiten zusammen: Insgesamt ergaben die Vergleiche stets gute Übereinstimmung mit den aus Referenzdaten ermittelten Höhen. Fehler entstehen durch die begrenzte Auflösung des Ausleuchtfleck von 30 m Durchmesser. Trotzdem werden Objektkonturen aufgezeichnet, die wesentlich kleinere Abmessungen haben wie der Ausleuchtfleck. Jedoch sind die gemessenen Ausdehnungen dann mit einer Unsicherheitszone umgeben. Diese Abweichungen werden im nachfolgen Kapitel 4. näher besprochen. Bei topographischen Karten ist es wichtig, die Geländeaufnahme ausschließlich von Bodenpunkten zu erstellen. Fehler können insbesondere durch Einbeziehung von Bewuchspunkten oder Bebauungspunkten ins digitale Geländemodell entstehen.

Bei den Vergleichen Andechs und Neugilching lag ein digitales Geländemodell mit einer Rasterauflösung von 50 m und eine Höhenauflösung von 1 m zugrunde. Hierbei ist also zu berücksichtigen, daß auch die Referenz das Gelände nur in ihrer Auflösungsgenauigkeit

beschreibt. Bei dem Vergleich des Testgebiets Wörthsee stand ein besseres Referenzmodell mit einer Auflösung von 2 m und einer Höhenauflösung im Dezimeterbereich zur Verfügung.

Besondere gute Ergebnisse der Altimeterplattform ließen sich am Testgebiet Neugilching nachweisen mit einer maximalen Abweichung der Höhe vom Referenzmodell von 1.2 m und einem mittleren Fehler von 0.53 m. Eine Standardabweichung des Höhenfehlers von 0.37m zeigt die hohe Genauigkeit der Altimeterplattform. Diese Ergebnisse decken sich auch mit den Genauigkeitsuntersuchungen an der Runway in Kapitel 2.2.3, wo ebenfalls ein mittlerer Höhenfehler von 0.51 m erreicht wurde und ein maximaler Fehler von 1 m auftrat. Je dichter die Spuren geflogen werden, desto genauer ist die Geländeaufnahme. Am Beispiel Neugilching wurde gezeigt, daß eine Spurdichte von 150 m ausreichend für diesen Geländetyp ist. Für feinstrukturiertes, inhomogenes Gelände bedarf es einer dichteren Spurlage als in homogenem Gelände. Wie am Beispiel Wörthsee gezeigt wurde, ist für die Erfassung der Siedlungsstruktur die Spurdichte von 70 m nicht ausreichend. Hingegen werden auf den Profils Spuren die Häuser mit ausreichender Genauigkeit erfaßt.

4. Untersuchung der Radarmessung

Nach der Untersuchung der Gesamtgebiete sollen nun die für die topographische Geländeaufnahme typischen Oberflächenarten und Objekte betrachtet werden. Diese Details sollen beispielhaft dokumentieren, wie sich das Meßverhalten der Altimeterplattform darstellt. Dabei wird im ersten Teil des Kapitels die Höhenmessung besprochen, während im zweiten Teil des Kapitels die Rückstreumessung untersucht wird.

4.1 Höhenmessung

4.1.1 Ebene Flächen

Ebene Flächen treten in der topographischen Vermessung beispielsweise an Parkplätzen, der Runway, oder wie im folgenden Bild 6.18 an der Autobahn A96 auf. Diese Flächen eignen sich stets gut, um die Höhengenaugigkeit zu untersuchen, wie dies im Kapitel 2.3.3 an der Runway unternommen wurde. Das folgende Beispiel bezieht sich auf die Messung Neugilching, in der eine Profilspur die Ausfahrt Oberpfaffenhofen der Autobahn A96 querte. In Bild 6.18 ist eine entzerrte und geokodierte Videoaufnahme zu sehen. Zwei weiße Linien markieren die Flugspur. Ihr Abstand entspricht der 3 dB Breite des Ausleuchtflecks der Sendeantenne. Ein Streifen von

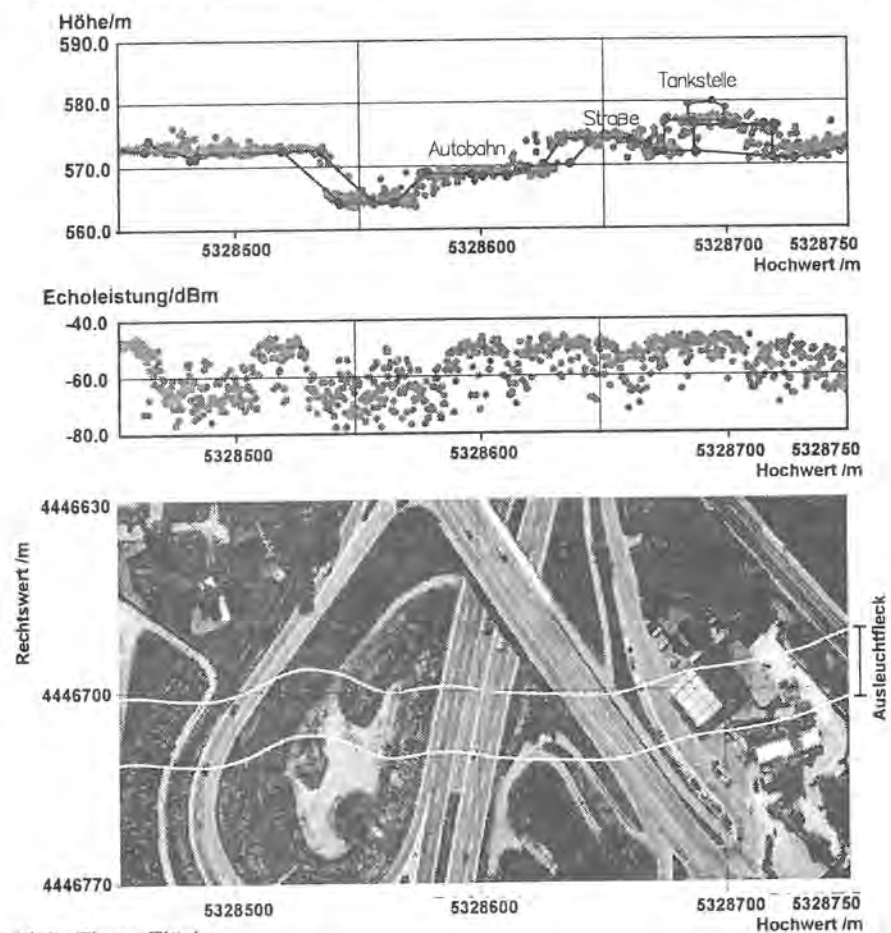


Bild 6.18: Testobjekt Ebene Fläche

etwa 30 m Breite wird also vom Radaraltimeter bezüglich Geländehöhe und rückgestreuter Echoleistung erfaßt.

Im Profilschnitt der Geländehöhe sind die einzelnen Höhenabstufungen der Zubringerstraßen und der Autobahn klar zu erkennen. Die Straße von Neugilching nach Oberpfaffenhofen quert die Autobahn über eine Brücke. An der Straße befindet sich eine Tankstelle mit Rastplatz, die im Profilschnitt ebenfalls erfaßt wird. Das bayerische Landesvermessungsamt hat in dankenswerter Weise aus Luftbildern die Höhen nachgemessen. Diese Messungen sind zu einer Profilkontur, die in Schwarz eingetragen ist, verbunden. Da die Straßen in schrägem Winkel zur Flugspur geschnitten wurden, ist der vordere und hintere Schnitt eingezeichnet. Es kann hier gezeigt werden, daß sich die Altimeterplattform zur Erfassung ebener Flächen ausgezeichnet eignet. Die zugehörige Echoleistung ist im untersten Bild festgehalten. Die Fahrbahn stellt ein helles Ziel dar, was sich in der hohen rückgestreuten Echoleistung von -45 dBm äußert. Dagegen streut die Böschungsvegetation nur recht wenig Leistung zurück.

4.1.2 Wasserflächen

Schon in der Auswertung der Gesamtgebiete hat sich gezeigt, daß sich die Altimeterplattform hervorragend zur Aufnahme von Wasserflächen eignet. Da sich Wasser als guter Reflektor für Mikrowellen erweist, ist die Höhengenaugigkeit des Radars wesentlich besser als bei anderen Objekten. Die Untersuchung von Wasserflächen wurde an mehreren Objekten durchgeführt / 38 /, exemplarisch sei eine Profilspur über dem Ammersee dargestellt.

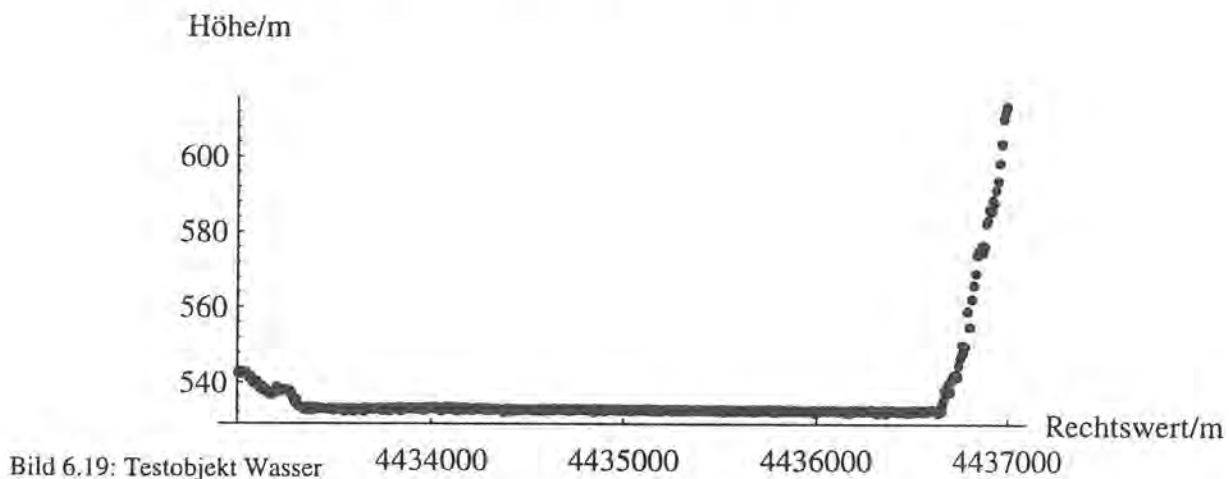
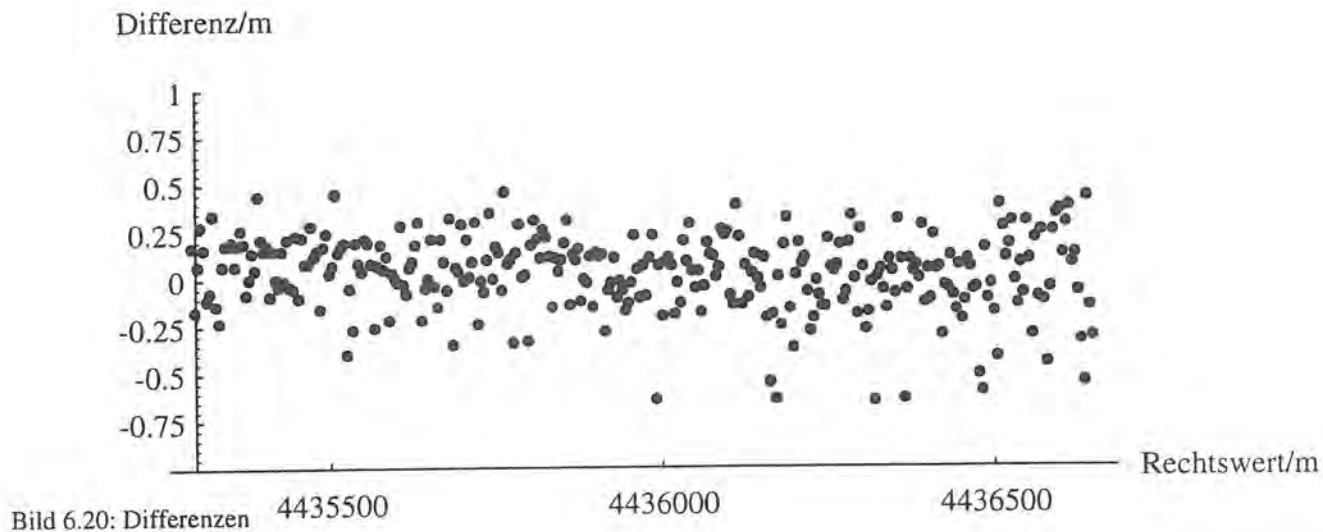
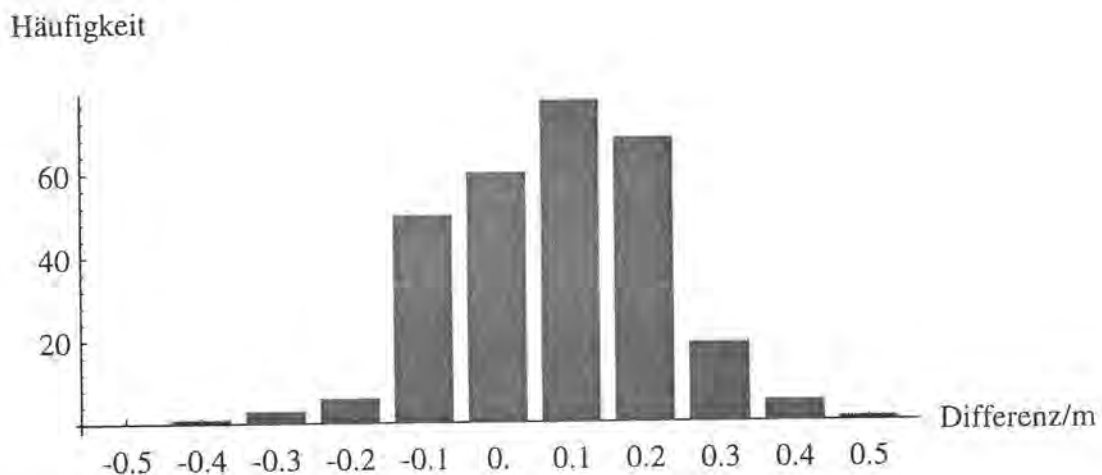


Bild 6.19 zeigt einen Ausschnitt aus der Messung Andechs, die den Ammersee einbezieht. Rechts vom See steigt der 'Höhenberg' an, während links die flachere Uferregion den See begrenzt. Bezieht man sich auf einen Wasserspiegel von 532,5 m, können die Differenzen zwischen Radarmessung und Wasserspiegel aufgetragen werden (Bild 6.20). Die statistische

Auswertung der Differenzen ergab einen mittleren Fehler zwischen Wasserspiegel und Radarmessung von 0.1 m. Eine Standardabweichung der Höhendifferenzen von 0.11 m konnte erreicht werden. Bild 6.21 zeigt im einzelnen die aufgetretenen Häufigkeiten der 300 Meßwerte über Wasser. Dabei wurde die Fehlerverteilung in Klassen zu je 10 cm eingeteilt.



Durch diese Auswertungen konnte gezeigt werden, daß sich das Altimetersystem bestens für die Aufnahme von Wasserflächen eignet. Das Altimetersystem kann daher sowohl für die hochgenaue Erfassung der Meerestopographie eingesetzt werden, wie auch für die Erfassung von Binnengewässern oder Hochwassergebieten. Dies erweist sich als ein entscheidender Vorteil gegenüber anderen Sensorsystemen, wie beispielsweise Laserhöhenmesser.



4.1.3 Gebäude mit Flachdach

Bild 6.15 bis Bild 6.17 zeigen einen Ausschnitt der 2. Spur, der mehrere Gebäude der DLR von den Flughallen bis zum ehemaligen Kontrollzentrum umfaßt. In das Videomosaik wurden die äußeren Fußspurbegrenzungen des Radaraltimeters eingeblendet. Bei einer Flughöhe von 400 m über Grund erfaßt die Radarkeule einen Ausleuchtfleck von etwa 30 m Durchmesser. Beginnend am südlichen Bildrand nimmt der Ausleuchtfleck des Radars Kleinbewuchs und einen Teil des Parkplatzes auf. Der Bewuchs stellt sich für die einfallende Phasenfront der Welle recht rauh dar, die Energie wird gestreut. Damit sinkt die rückgestreute Echoleistung um 14 dB ab. Sobald die südliche Ecke des winkelförmigen, fünfstöckigen DFD - Gebäudes in den Ausleuchtfleck der Radarkeule eintaucht, wird ein Höhengsprung um etwa 15 m registriert.

Da das Radaraltimeter zur Höhenmessung die Zeitspanne bis zum ersten eintreffenden Reflexionsecho benützt, werden stets die erhabenen Strukturen aufgezeichnet und später eintreffende Echos ignoriert. Im Falle, daß sich sowohl Gebäude als auch Erdboden im Ausleuchtfleck der Antenne befinden, entspricht dies zwei Echopulsen, wovon nur der erste, der des Daches aufgezeichnet wird.

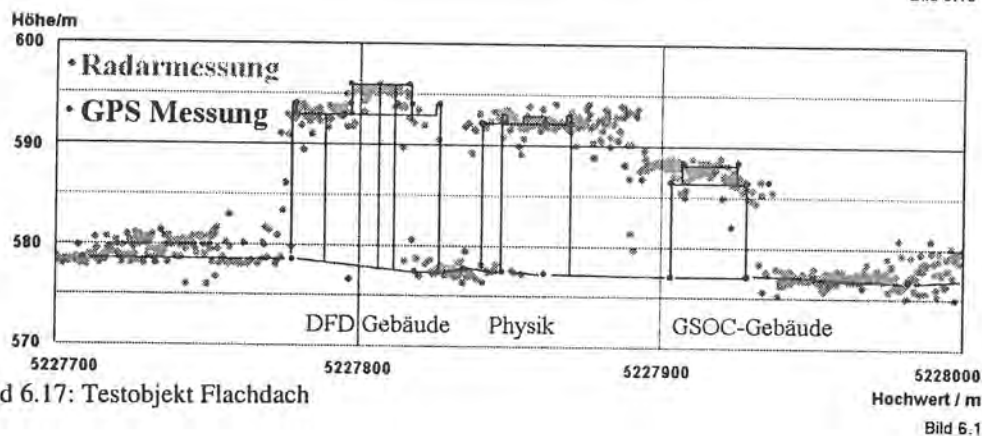
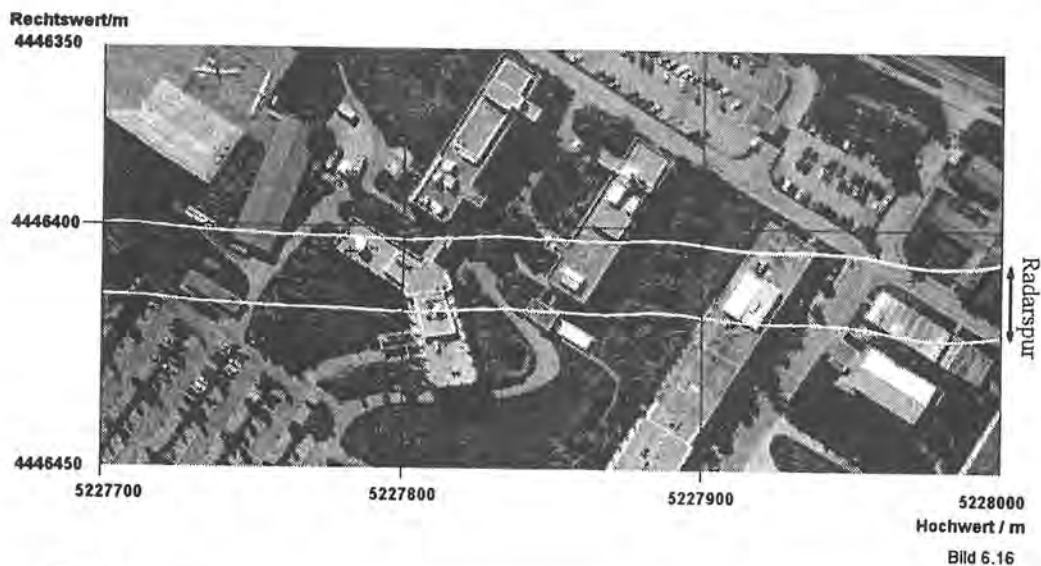


Bild 6.16, Bild 6.17: Testobjekt Flachdach

Bild 6.17

Bei der Höhenmessung ist allerdings auch zu berücksichtigen, wie hoch der rückgestreute Energieanteil des jeweiligen Objekts ist. Reflektiert beispielsweise ein Hausdach im Vergleich zum Boden einen kleineren Energiebetrag, so wird in diesem Fall nur das Bodenecho aufgezeichnet. Die Gebäudekanten werden nicht scharf abgebildet, sondern innerhalb einer Unsicherheitszone von wenigen Metern werden sowohl Bodenpunkte als auch Dachpunkte gemessen. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 4.3.5 genauer dargestellt.

Bei dem DFD - Gebäude zeichnet sich in den Radardaten sogar der Dachaufbau mit einer Höhe von etwa 2 m ab. Das Gebäude verläßt den Ausleuchtfleck bei einem Hochwert von 5327825 m. Etwa 25 m weiter nördlich taucht das Gebäude 'Physik der Atmosphäre' in den Ausleuchtfleck der Keule ein. Das fünfstöckige Gebäude bildet sich mit einer Höhe von 25 m in den Daten ab. Nach einer Baumreihe folgt das ehemalige Kontrollzentrum GSOC. Dieses vierstöckige Gebäude wird mit einer Höhe von 11 m aufweisen. Zwischen dem Gebäude 'Physik der Atmosphäre' und dem GSOC-Gebäude nahm das Radaraltimeter statt der Bodenpunkte den Baumbewuchs auf.

Zur weiteren Kontrolle wurden pseudokinematische GPS Messungen entlang der Fußpunktspur auf dem Boden und statische GPS Messungen auf den Gebäuden DFD, Physik der Atmosphäre und dem GSOC-Gebäude durchgeführt. Sie sind als durchgehendes Konturprofil in die Messung eingezeichnet. Wie aus Bild 6.17 zu entnehmen ist, stimmen die beiden Messungen gut überein.

4.1.4 Gebäude mit Schrägdach

Das Meßverhalten des Altimeters bei Gebäuden mit schrägen Dachflächen wurde exemplarisch an einem Verwaltungsgebäude, das der Messung Neugilching entnommen wurde, untersucht. Bild 6.23 zeigt das einstöckige Gebäude mit Satteldach, an das sich ein Seitenanbau anschließt. Das bayerische Landesvermessungsamt hat in dankenswerter Weise aus Luftbildern die Höhen erfaßt. Diese Messungen sind zu einer Profilkontur, die in Schwarz eingetragen ist, verbunden. Die Geometrie des Hauses ist der geokodierten Videoaufnahme, Bild 6.25 zu entnehmen. Zwei weiße Linien markieren die 3 dB Breite der Sendekeule. Dem vom Ausleuchtfleck erfaßten Geländestreifen mit etwa 30 m Breite sind die gemessenen Höhen zuzuordnen. Die zugehörige Eholeistung ist im Bild 6.24 aufgetragen.

Die Spur führt von einer Gartenanlage zu dem Seitenanbau und dem Hauptdach des Gebäudes. In der Höhenmessung ist im Gegensatz zu den Flachdachgebäuden keine klare Hauskontur zu erkennen. Die vom Radar gemessene Gebäudehöhe beträgt etwa 5 m, was keinesfalls der wirklichen Höhe von etwa 9 m entspricht. Die empfangene Eholeistung sinkt über dem Dach von etwa -50 dB auf -65 dB. Die Signalleistung wird durch die schräge Dachfläche

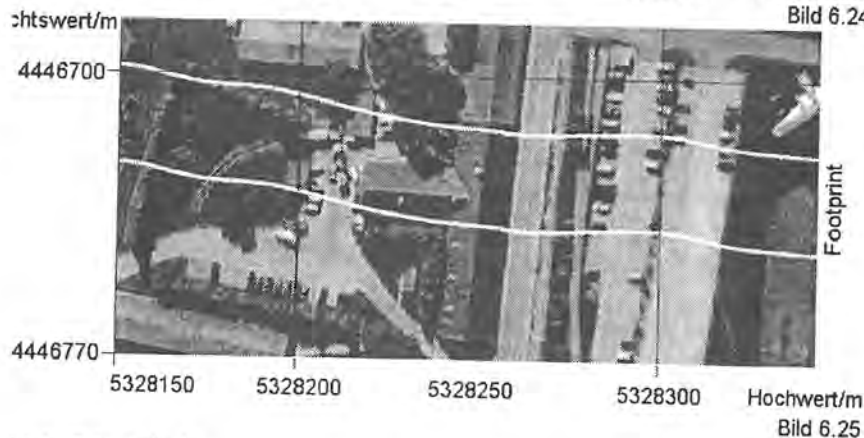
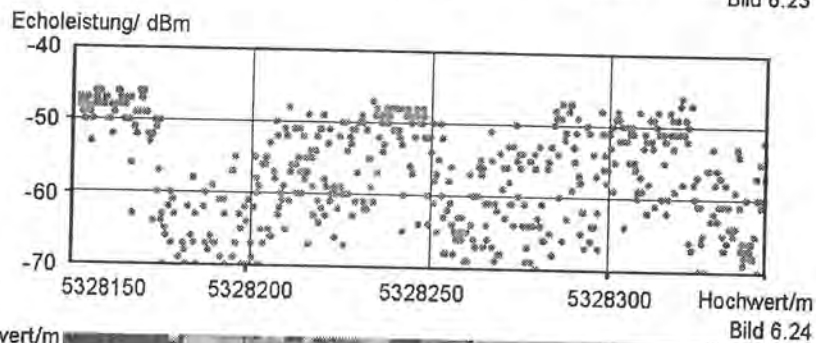
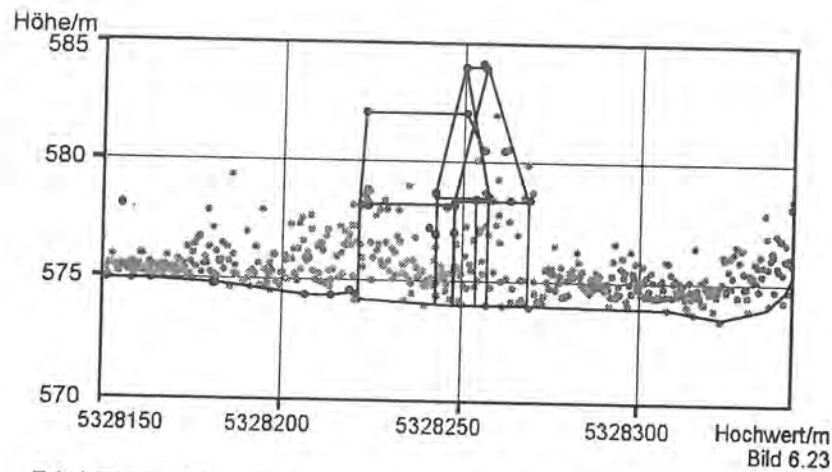


Bild 6.23-6.25: Testobjekt Schrägdach

wegreflektiert, was sich in dem Einbruch der Echoleistung ablesen läßt. Um die tieferen Zusammenhänge aufzuzeigen, wird der Einfluß der Schrägfläche im Kapitel 6.5 theoretisch simuliert. Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß Gebäude mit schrägen Dachflächen in ihrer Höhe nur ungenügend erfaßt werden.

4.1.5 Metallische Objekte

Exemplarisch für metallische Objekte, wie Masten, Antennenanlagen, oder Leitungen wird das Meßverhalten der Altimeterplattform im folgenden dargestellt. Bei der Befliegung Andechs wurde nördlich der Ortschaft Aschering eine Hochspannungsleitung aufgezeichnet. Die Messung der Hochspannungsleitung ist in Bild 6.26 gezeigt. Es wurden sowohl Höhenpunkte vom Boden als auch von den Leitungen selbst aufgezeichnet.

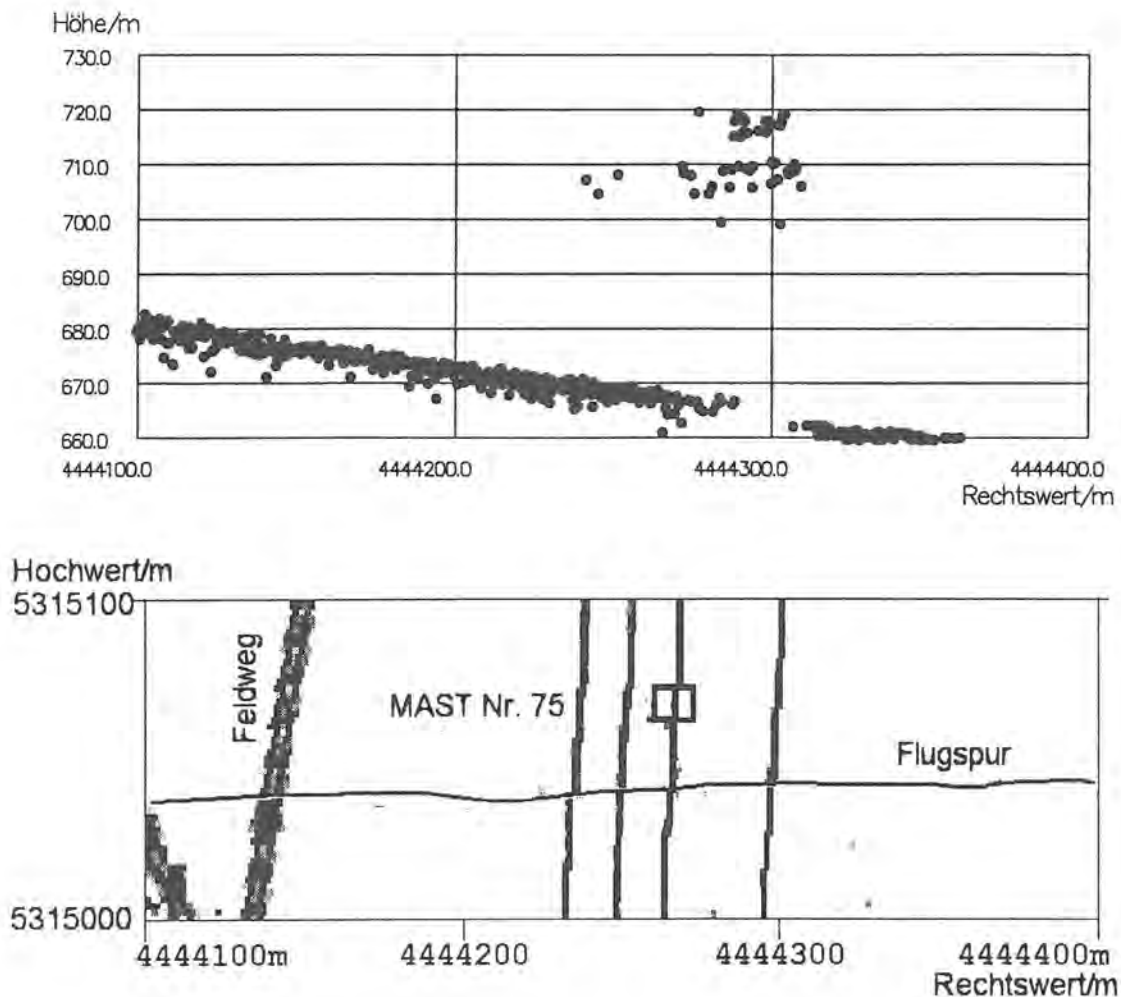


Bild 6.26: Testobjekt: Hochspannungsleitung

Die gemessene Höhe der Leitung wurde mit den Plänen der Bayernwerke verglichen. Es handelt sich um eine 220 KV/380 KV Doppelleitung. In Bild 6.27 ist der Plan des nächstgelegenen Masten gezeigt. Da das erste vom Radar zurückkommende Echo aufgezeichnet wird, bilden sich stets die oberen Strukturen der Leitung in den Daten ab. Die unteren Leitungen liegen im Radarschatten des Erdseils. Der Abstand zwischen Erdseil mit 718 m und Gelände mit 667 m über NN beträgt nach der Radarmessung 52 m. Die von den Bayernwerken angegebene Masthöhe von 53 m stimmt gut mit der Messung überein. Zu berücksichtigen ist, daß bei der Messung nicht der Mast überflogen, sondern die Leitung erfaßt wurde. Die auftretende Höhendifferenz ist der Durchhängung der Leitung zuzuschreiben.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß metallische Objekte sich ausgezeichnet in der Messung abbilden. Diese Objekte bestimmen die Höhenmessung insofern, als stets die erhabenste Kontur abgebildet wird. Die von ihnen rückgestreute Echoleistung dominiert, so daß tieferliegende Objekte nicht erkannt werden.

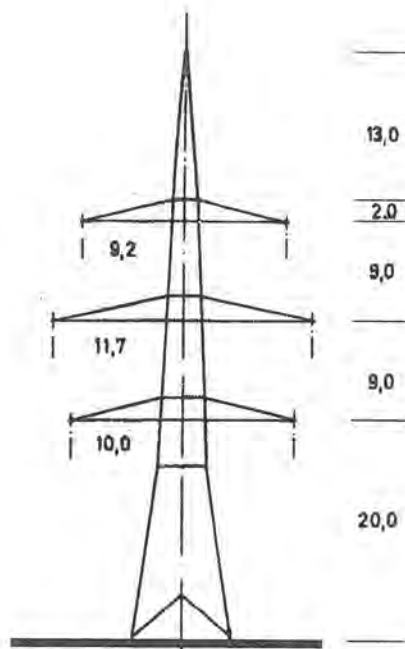


Bild 6.27: Hochspannungsmast Nr. 75, (Pläne Bayernwerk)

4.1.6 Wald

Bäume oder Vegetation äußern sich in der Höhenmessung als Unstetigkeiten. In der Radarmessung werden dabei stets die Gipfel der Bäume detektiert. Somit stellt sich ein Waldgebiet in der Form von Höhengsprüngen zwischen Boden und Gipfeln dar. Da für die topographische Kartierung ausschließlich Bodenpunkte von Interesse sind, ist die Frage der Durchdringungsrate von Bedeutung. Die Anzahl der gemessenen Bodenpunkte muß groß genug sein, um eindeutig die Topographie detektieren zu können.

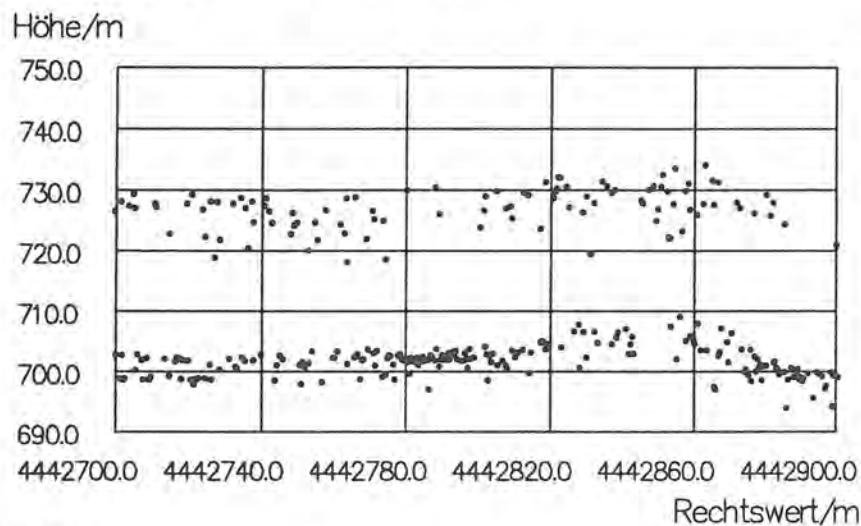


Bild 6.28: Testobjekt Wald

Bild 6.28 zeigt den Ausschnitt einer Profillinie über einem Mischwaldgebiet. Eine mittlere Baumhöhe von etwa 20 m bis 30 m ist aus den Höhendaten abzulesen. Die Messung zeigt deutlich das Bodenprofil bei einer Höhe von 700 m und die Baumgipfel bei einer Höhe von etwa 730 m. Bei dieser Messung wurde eine Durchdringungsrate von 60% erreicht, die aber auch für andere Waldgebiete typisch ist.

4.1.7 Felder

Als Beispiel für das Meßverhalten der Altimeterplattform bei Feld - und Wiesenflächen sei ein Gebiet bei Oberalting herangezogen. Das Luftbild 6.29 beinhaltet eine Meßspur, die über einen Sportplatzrasen zu einem Feld und einen Tennisplatz führt. Die Referenzhöhen wurden aus einem digitalen Geländemodell entnommen, das aus Luftbildern extrahiert wurde und über eine Höhengenaugigkeit im Dezimeterbereich verfügt.

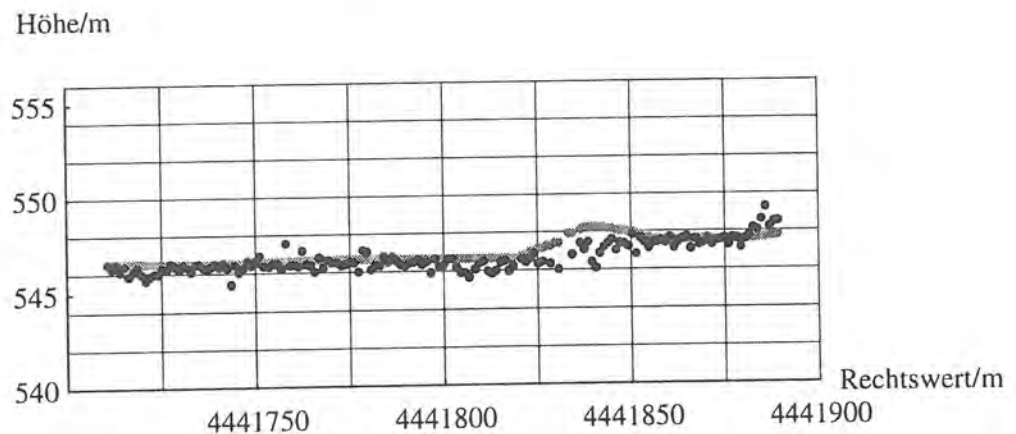


Bild 6.29a: Testobjekt Felder, Radarhöhe und Referenzhöhe

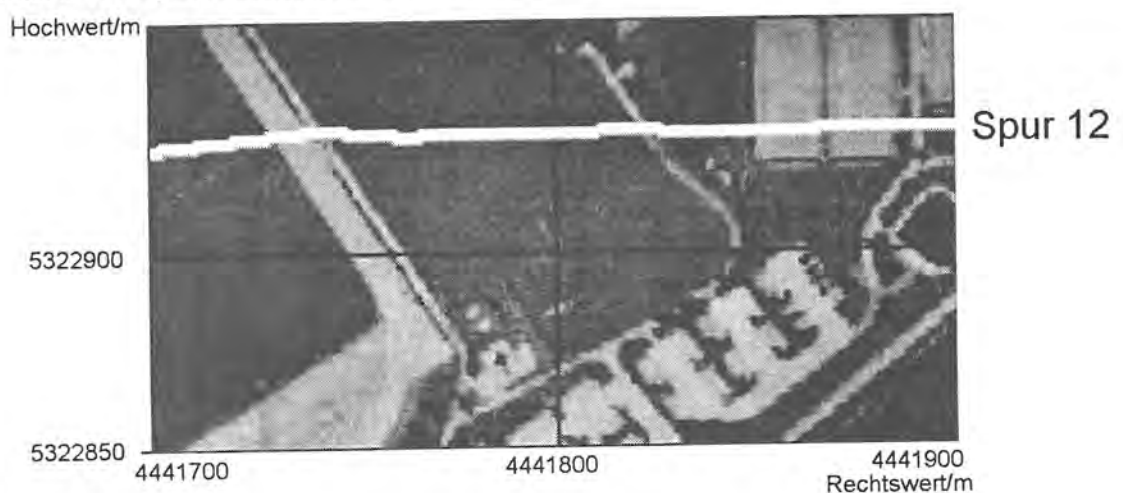


Bild 6.29b: Profilspur

In Bild 6.29a sind die gemessenen Radarhöhen in schwarz und die Referenzhöhen in Grau wiedergegeben. Das Radarprofil und die Referenz zeigen gute Übereinstimmung. Es hatte sich schon in der Untersuchung Neugilching gezeigt, daß die Altimeterplattform gut geeignet ist, um landwirtschaftlich genutzte Fläche zu erfassen. Da es sich um stetige Flächen handelt, werden sie in ihrem Höhenverlauf korrekt wiedergegeben.

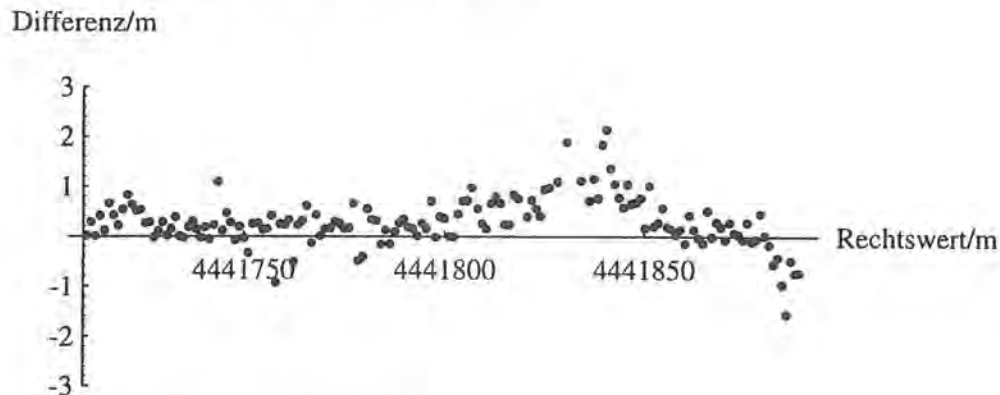


Bild 6.30: Differenz Radar- und Referenzdaten

Bild 6.30 zeigt, die Höhendifferenz zwischen der Radarmessung und der Referenz. Gewisse Differenzen zeigen sich bei Rechtswert 4441840 m, einer bewachsenen Böschung. Im Referenzmodell beinhaltet die Geländeoberfläche den dichten Bewuchs, während die Höhenmessung der Altimeterplattform den Bewuchs zu durchdringen vermag. Bei dem ausgewerteten Profilausschnitt von 200 m wurde ein mittlerer Fehler von 0.28 m ermittelt und eine Standardabweichung der Höhendifferenzen von 0.49 m erreicht. Bild 6.31 gibt die zugehörige Verteilung der Höfendifferenzen in Klassen zu 0.2 m zusammengefaßt wieder.

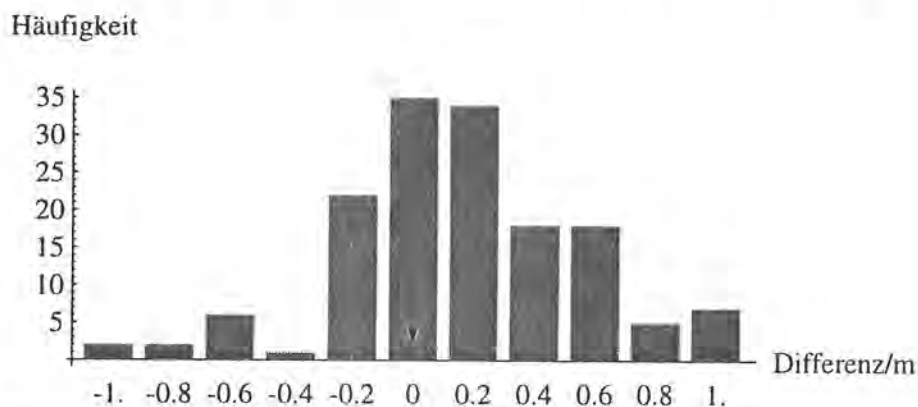


Bild 6.31: Histogramm der Höfendifferenzen

4.1.8 Rauhigkeit

Die Rauhigkeit wird durch die Standardabweichung der Geländehöhe und die Korrelationslänge

des Geländes charakterisiert. Die Standardabweichung der Höhe ist kein alleinstehendes Maß für die Rauigkeit, da die Standardabweichung der Höhe stets in Beziehung zur Wellenlänge gesehen werden muß. Die Rauigkeit F berechnet sich nach Ulaby / 9 / als die Höhenstandardabweichung $rms(h)$ bezogen auf die Wellenlänge λ

$$F = \frac{rms(h) \cdot 2\pi}{\lambda}$$

Dabei ist das Maß der Rauigkeit von der einfallenden Wellenlänge abhängig. Eine bestimmte Oberfläche erscheint für eine Welle im optischen Bereich rau, während dieselbe Oberfläche für eine Welle im Mikrowellenbereich als glatt erscheint. Nach dem Rayleigh-Kriterium kann entschieden werden, für welche Wellenlänge eine Oberfläche als glatt erscheint. Dabei fließt der Einfallswinkel α in die Bedingung ein, der für das nadirgerichtete Radaraltimeter als 0° angenommen werden kann:

$$rms(h) < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \alpha} = \frac{2.18cm}{8 \cdot \cos 0^\circ} = 0.275cm$$

Somit darf also eine Oberfläche, die über eine Höhenstandardverteilung von weniger als 3 mm verfügt, für das Radaraltimeter als glatt angenommen und die Reflexion als spiegelnd berechnet werden. Des weiteren ist eine Oberfläche dann als glatt zu betrachten, wenn die Standardabweichung der Höhe wesentlich kleiner ist als die Wellenlänge oder mit einem flachen Einfallswinkel gemessen wird. Das Spiegeln einer Straße bei niedrigem Sonnenstand ist ein alltägliches Beispiel für die Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften vom Einfallswinkel.

$$\text{Glatte Oberfläche:} \quad rms(h) \ll \lambda \quad \text{oder} \quad \alpha \rightarrow 90$$

Ein anderes von Moore in / 9 / eingeführtes Kriterium unterscheidet die Reflexionsarten ausschließlich über die Rauigkeit. Da das Radaraltimeter im allgemeinen in einem Winkelbereich von 0° bis 5° mißt, ist die Standardabweichung der Höhe bezogen auf die Wellenlänge ein brauchbares Maß.

$$\text{Reflexion an einer glatten Fläche:} \quad F < 0.2$$

Demnach wird eine Geländeoberfläche als spiegelnd angenommen, wenn die Rauigkeit F kleiner als 0.2 ist. Für die Wellenlänge des Radaraltimeters entspräche dies einer Höhenstandardabweichung von etwa 1 mm. Dieses von Moore eingeführte Kriterium ist noch etwas schärfer als das Rayleigh-Kriterium. Allerdings verfügen die wenigsten in der

Geländeerfassung betrachteten Oberflächen über eine Rauigkeit, die wesentlich unter der vom Rayleigh-oder Moore - Kriterium gesetzten Grenze liegen. Selbst asphaltierte Flächen wie Parkplätze, Straßen oder die Runway haben eine Rauigkeit, die nicht ausschließlich als spiegelnd angenommen werden kann.

Eine Fläche wäre nach Moore / 9 / als rau anzunehmen, wenn für die Rauigkeit folgende Grenze überschritten wird:

$$\text{Reflexion an einer rauhen Fläche: } F > 1$$

Dies bedeutet für die Wellenlänge des Radaraltimeters, daß die Reflexion an Flächen mit einer Höhenstandardabweichung von mehr als 40 cm als Reflexion an einer rauhen Fläche betrachtet werden muß. Die Mehrzahl der vermessenen Flächen sind demnach als rau anzunehmen.

In Bild 6.32 sind die geometrischen Gegebenheiten der Höhenmessung vereinfacht dargestellt. Das Gelände ist in einzelne Flächenelemente F_{ij} mit den Eckpunkten i und j aufgeteilt. Durch die verschiedenen Höhen der Flächeneckpunkte verfügt das Gelände über eine gewisse Rauigkeit. Nach der obigen Definition berechnet sich die Rauigkeit des Geländes F_G demnach:

$$F_G = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{(n-1)^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h_{ij}^2 - n^2 \cdot \bar{h})$$

Die mittlere Geländehöhe \bar{h} im Ausleuchtfleck bestimmt sich über die Flächenelemente i, j zu:

$$\bar{h} = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}$$

Die Messung eines ausgedehnten Ziels, wie beispielsweise eine topographische Oberfläche, ergibt einen ganzen Satz von Schrägentfernungen $h_{si,j}$. Das Radaraltimeter mißt die Schrägentfernungen integral über den Ausleuchtfleck, gewichtet mit der Echoleistung. Bei ideal senkrechter Orientierung des Flugzeugs und gleichen Rückstreueigenschaften der Flächenelemente mißt das Radaraltimeter also die Lotentfernung. Dominiert aber ein Flächenelement bezüglich seiner Rückstreueigenschaften, so kann diese Schrägentfernung für

die Messung bestimmend sein. Die Schrägentfernung variiert zwischen dem mittleren Flächenelement und den äußeren Flächenelementen erheblich. Bei einer Flughöhe von 400 m über Grund ergibt sich ein Schrägentfernungsunterschied Δh_s zwischen dem senkrechten

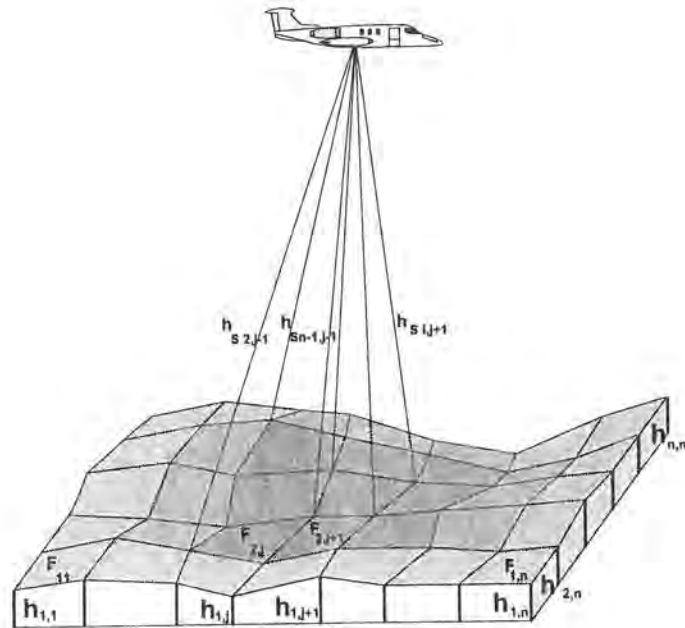


Bild 6.32; Flächenelemente

Flächenelement und einem Flächenelement am Rande der 3dB Grenze des Ausleuchtflechs von:

$$\Delta h_s = h_{s\perp} \cdot (1 - \cos\delta) = 0.5m$$

Die vom Radaraltimeter gemessene Rauigkeit ist also eine Überlagerung des Meßrauschens mit der tatsächlich vorhandenen Rauigkeit der Topographie. Eine Standardabweichung von $\text{rms}(h) = 15 \text{ cm}$ entspricht einer Rauigkeit von $F = 43$. Erst Rauigkeiten, die größer als 50 sind, können vom Radaraltimeter direkt erfaßt werden. Kleinere Rauigkeiten gehen im Meßrauschen unter.

4.1.9 Untersuchung der Rauigkeitsmessung

Das Testgebiet Bild 6.33 liegt in der ebenen Talaue des Pilsensees und unterliegt kaum einer nennenswerten Höhenundulation. Daher eignet sich dieses Gebiet für die Untersuchung der Bodenrauigkeit. Die Rauigkeit läßt sich einerseits aus dem digitalen Geländemodell ermitteln,

andererseits aus der Standardabweichung der Radarhöhen errechnen. Dadurch ist die Möglichkeit zu einem Vergleich gegeben, der für die Eignung des Radaraltimeters zur Rauigkeitsmessung ausschlaggebend ist.

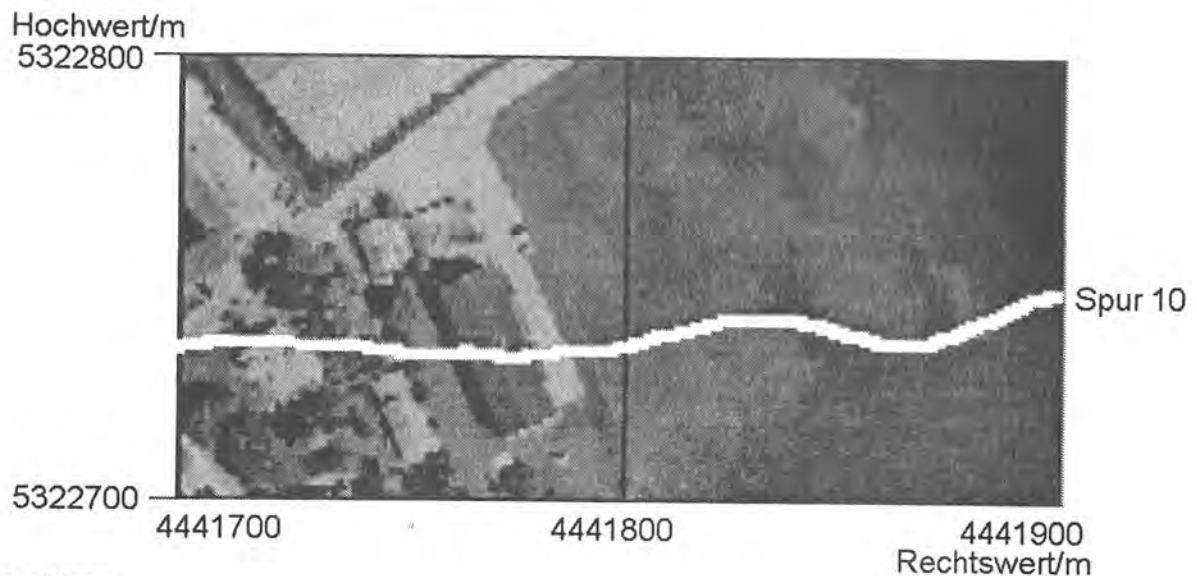


Bild 6.33: Profilspur

In Bild 6.34 sind die Geländehöhen der Radardaten in Schwarz den Referenzdaten in Grau gegenübergestellt. Die ersten 150 m der Spur beinhalten noch den Ortsausgang von Oberalting, dabei ist ein vierstöckiges Mehrfamilienhaus mit etwa 12 m Höhe deutlich in den Höhendaten zu erkennen. Insgesamt korrelieren Radardaten und Referenzdaten ausgesprochen gut. Dann führt die Spur über unbebauten Acker. Die Rauigkeit der Geländeoberfläche läßt sich an den homogenen Strukturen der Äcker und Felder im östlichen Teil des Gebiets gut testen.

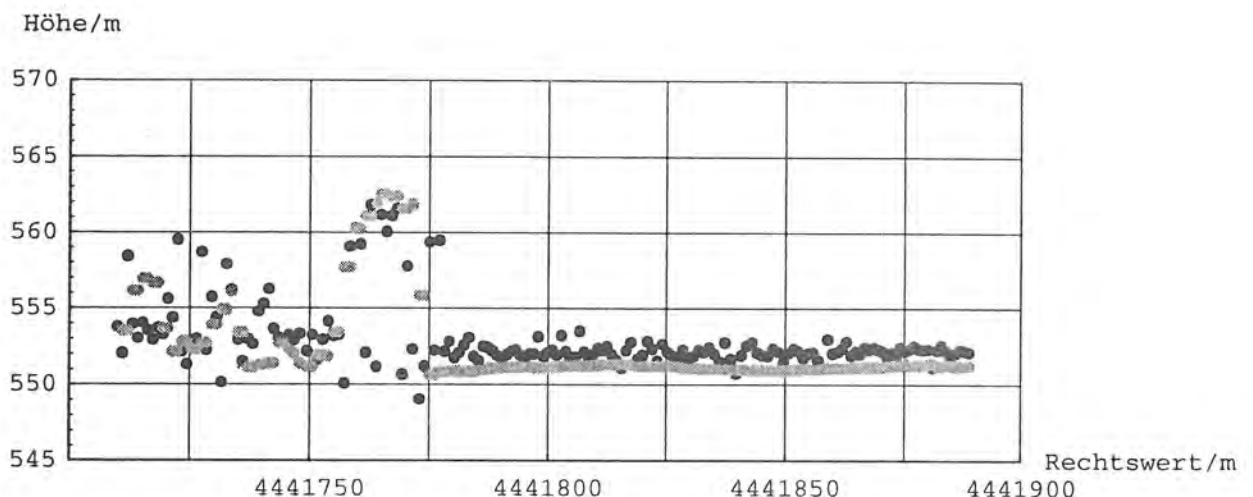


Bild 6.34: Höhenprofil Radardaten und Referenzdaten

Bei der Messung wurde die Rauigkeit aus jeweils 10 Radarmesswerten ermittelt, während von den Referenzdaten ein Raster von 10 auf 10 Werten zur Rauigkeitsermittlung herangezogen wurde. Die Rauigkeit der Radar- und Referenzdaten in Bild 6.35 zeigt gute Übereinstimmung. Die Bodenrauigkeit wurde sowohl aus den Referenzdaten als auch aus den Radardaten mit etwa 100 bestimmt. Einschränkend muß gesagt werden, daß Flächen deren Rauigkeit unter dem Meßrauschen des Radars liegen, nicht erfaßt werden können.

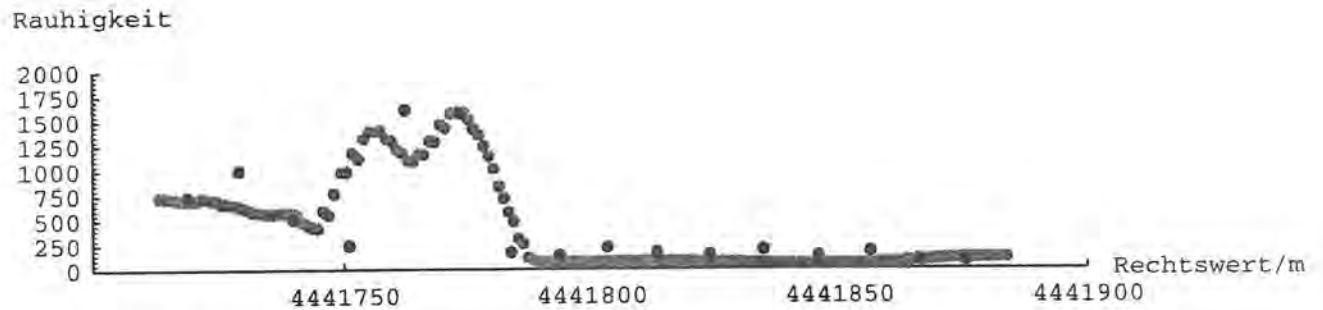


Bild 6.35: Rauigkeit

4.2. Rückstreuungsmessung

Ein wichtiges Anliegen der Mikrowellenfernerkundung besteht darin, die Beziehung zwischen geophysikalischen Parametern, wie Rauigkeit oder Bodenfeuchte und dem Radarrückstreuquerschnitt zu beschreiben. Sollten sich die empirisch gewonnenen Beziehungen als umkehrbar erweisen, so könnten die entsprechenden Intensitätsbilder als Grundlage für geophysikalische Karten genutzt werden. Die im zweiten und dritten Teil der Arbeit vorgestellten Meßergebnisse zeigen, daß sich in den meisten Fällen die Höhen- und Intensitätsmessung eindeutig verhält. Die geometrischen Verhältnisse werden durch die Höhenmessung wiedergegeben, die radiometrischen Eigenschaften des Meßobjekts werden durch die Echoleistung beschrieben. Der Faktor, der die Bodenreflexion in Bezug auf die rückgestreute Leistung beschreibt, ist der Rückstreuquerschnitt. Im allgemeinen ist der Rückstreuquerschnitt eine Funktion:

- des Einfallswinkels unter dem das Objekt angeleuchtet wird,
- der Frequenz der einfallenden Wellen,
- der Polarisation,
- der Größe des Ausleuchtflecks,
- der geometrischen Ausdehnung des Objekts ,
- der Rauigkeit der Objektoberfläche und
- der Eigenschaften des Objekts.

Als Voraussetzung für die folgenden Untersuchungen muß die vom Radaraltimeter gemessene Echoleistung in den Rückstreukoeffizienten umgerechnet werden. Anschließend können die empirischen Ergebnisse weiter analysiert und mit der Literatur verglichen werden. Dabei muß berücksichtigt werden, daß das Radaraltimeter bei der festen Sendefrequenz von 13.74 GHz arbeitet und durch die Antennenkonfiguration nur in der Lage ist, die HH- Polarisation zu senden und zu empfangen. Dann erst können obige Faktoren, die Einfluß auf das Rückstreuverhalten haben, untersucht werden.

4.2.1 Rückstreuquerschnitt

Die Charakteristika, die das angeleuchtete Objekt der rückgestreuten Welle aufprägt, sind im Rückstreuquerschnitt zusammengefaßt. Der Rückstreuquerschnitt ist die Fläche, die statt des rückstreuenden Objekts als Kugelfläche benötigt würde um dieselbe Leistung in den Halbraum abzustrahlen. Der Rückstreuquerschnitt $\sigma = 1$ bedeutet, daß das streuende Objekt, gleich einer Kugel, die Leistung omnidirektional in den Raum abstrahlt. Für den Rückstreuquerschnitt $\sigma > 1$ hat das rückstreuende Objekt eine Vorzugsrichtung und bündelt die gestreute Leistung in Einfallrichtung. Für den Rückstreuquerschnitt $\sigma < 1$ streut das Objekt in Einfallrichtung

weniger Leistung zurück, als ein Punktstrahler. Diese räumliche Leistungsverteilung läßt sich durch den Rückstreuquerschnitt $\sigma(\theta, \phi)$ über die Raumwinkel θ, ϕ ausdrücken. Der Rückstreuquerschnitt σ wird nach [10] als Verhältnis der reflektierten Leistung S_R zur einfallenden Leistung S_s in Einheiten der Kugelfläche definiert:

$$\sigma = 4\pi r^2 \cdot \frac{\vec{S}_R \cdot \vec{S}_R^*}{\vec{S}_s \cdot \vec{S}_s^*}$$

Der Radarrückstreuquerschnitt σ ist also, abgesehen von den objektunabhängigen Parametern eine Funktion des Einfallswinkels und der ausgeleuchteten Fläche. Daher ergibt die Messung desselben Objekts durch eine Antenne mit einer schmalen Keule einen kleineren Rückstreuquerschnitt als bei einer Messung mit breiter Keule. Um die Vergleichbarkeit der Messungen unabhängig von Gerät und Antenne zu gewährleisten, wird der Rückstreuquerschnitt σ auf die ausgeleuchtete Fläche A_A normiert. Damit erhält man den Rückstreukoeffizienten σ_0 nach folgender Gleichung:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{A_A}$$

Bild 8.1 zeigt vereinfacht die geometrischen Verhältnisse der flugzeuggetragenen Meßplattform. Die ausgeleuchtete Fläche $A_A(r_s, \alpha)$ stellt eine Ellipse mit den Halbmessern a und b dar, deren Größe vom Einfallswinkel α und der Schrägentfernung h_s abhängt.

$$A_A(\alpha, r_s) = \pi \cdot a(\alpha, r_s) \cdot b(\alpha, r_s) \approx 4 \cdot \pi \cdot h_s^2 \cdot \tan(2^\circ) \cdot \tan(1.75^\circ) \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$$

Die Größe des Ausleuchtflecks A_A wird durch die 3 dB-Breite der Sendeantennenkeule festgelegt. Die Öffnungswinkel der Antennenapertur von 4° , beziehungsweise 3.5° ergeben bei horizontaler Fluglage einen fast kreisförmigen Ausleuchtfleck. Durch eine Schräglage des Flugzeugs wächst der Einfallswinkel α und der kreisförmige Ausleuchtfleck verzerrt sich zur Ellipse. Für einen ausleuchtenden Strahl mit dem Öffnungswinkel β und dem Einfallswinkel α ist die einfallende Leistung durch die Projektionsfläche A_p konstant. Andererseits wächst die am Boden ausgeleuchtete Fläche A mit steigendem Einfallswinkel α , beziehungsweise die Leistung pro Fläche sinkt in dem Maße wie α ansteigt. Das heißt, daß der Rückstreuquerschnitt, der auf die Fläche bezogen ist, abhängig vom Einfallswinkel eine cosinusförmige Reduktion der aufgenommenen Leistung erfährt. Der Einfallswinkel α bestimmt sich aus dem Rollwinkel φ und dem Nickwinkel ϕ des Flugzeugs, die durch das INS gemessen werden.

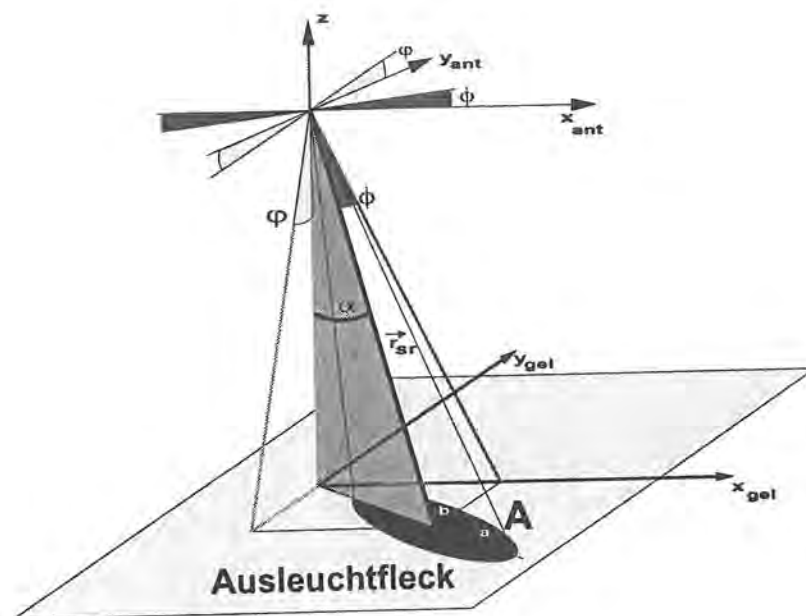


Bild 8.1: Ausleuchtungsfleck der Sendeantenne

$$\cos \alpha = \cos \varphi \cdot \cos \theta$$

Die Schrägentfernung h_s vom Flugzeug $[x_F, y_F, z_F]$ zum Geländepunkt $[x_G, y_G, z_G]$ berechnet sich zu:

$$h_s = \sqrt{(x_F - x_G)^2 + (y_F - y_G)^2 + (z_F - z_G)^2}$$

Die vom Radar gemessenen Echoleistungen werden nun in die entsprechenden Rückstreu-
koeffizienten σ_0 umgerechnet. Dadurch ist ein Vergleich der Radarmessungen mit anderen
Messungen möglich geworden. Da das Radar, wie in Kapitel 3 beschrieben, mit Hilfe eines
Corner-Reflektors kalibriert wurde, ist auch der Leistungsoffset P_{OFFSET} bekannt. Dazu wird die
bekannte Radargleichung aus Ulaby / 9 / nach dem Rückstreu-
koeffizienten σ_0 aufgelöst:

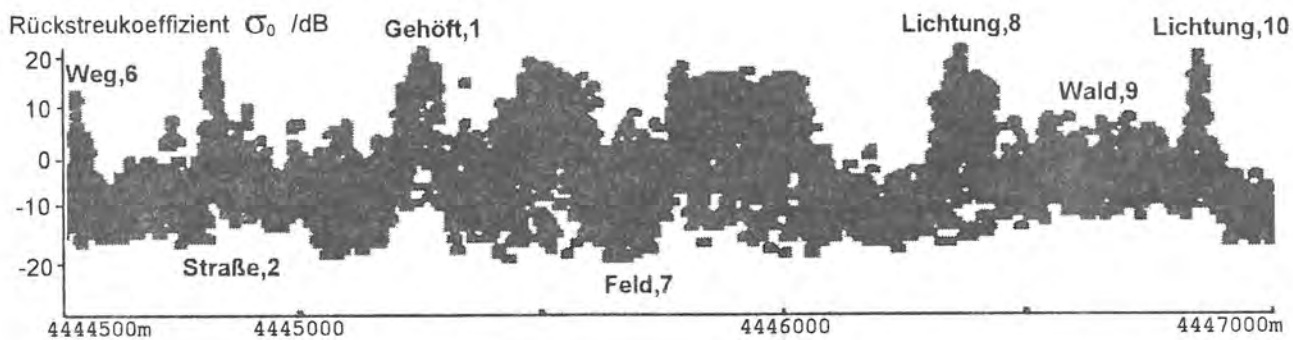
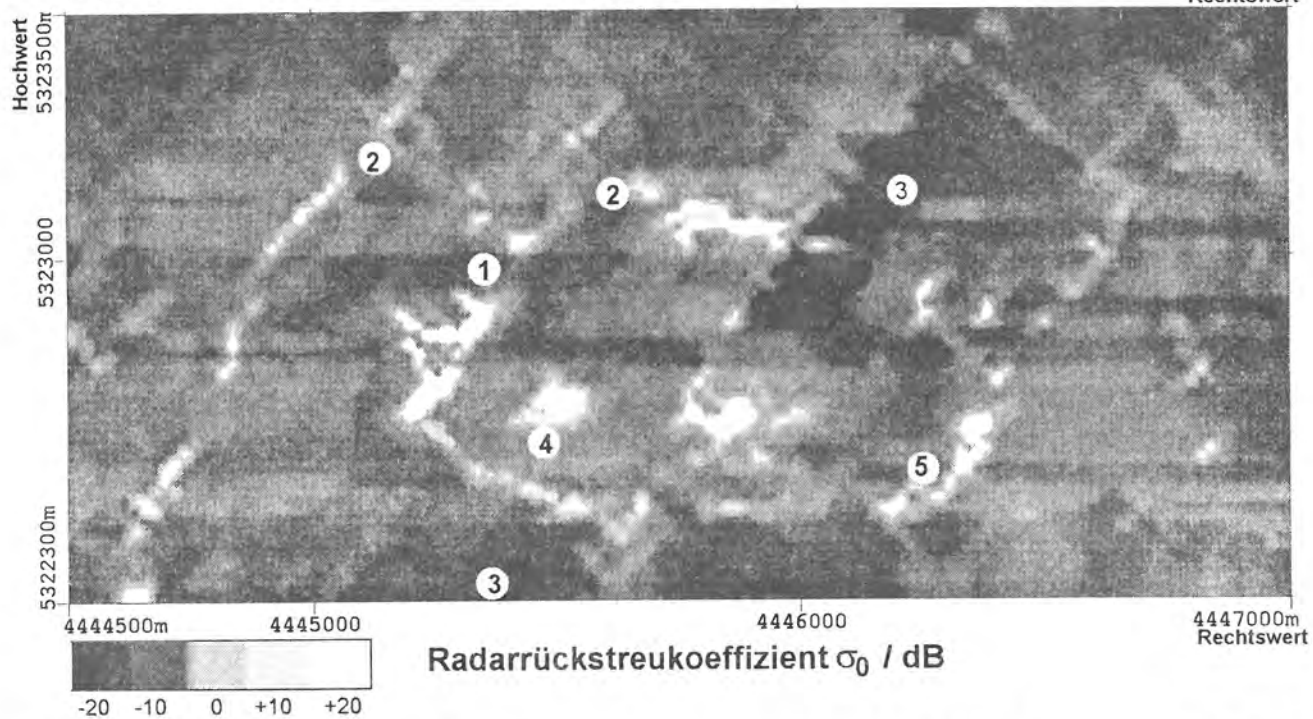
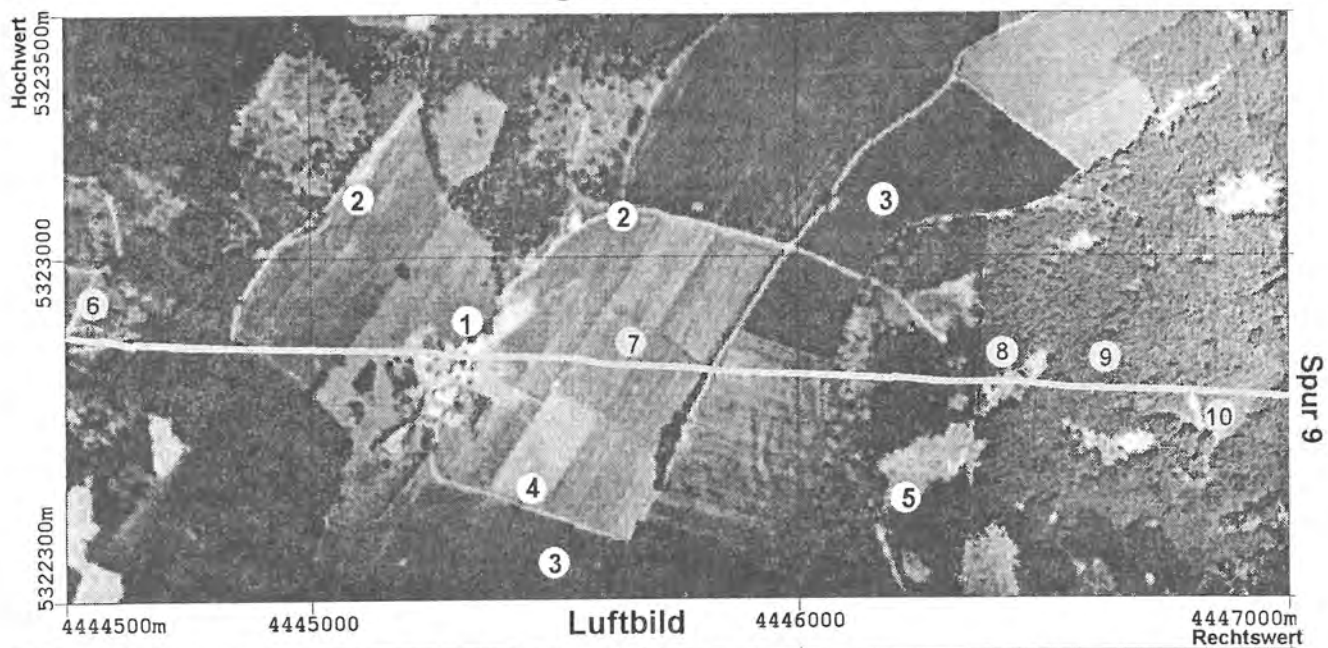
$$\sigma_0(\phi, \theta, t) = \frac{(P_R(t) - P_{\text{OFFSET}}) \cdot 4\pi^3 \cdot h_s^4(t)}{P_T \cdot G_T(\phi, \theta) \cdot G_R(\phi, \theta) \cdot \lambda^2 \cdot A_A(\phi, \theta)}$$

4.2.2 Untersuchung der Rückstreumessung

Die topographische Vermessung beinhaltet eine Vielzahl von Objekten, wie Wald, Wiesen oder
Wege, die die unterschiedlichsten Rückstreu-
koeffizienten besitzen. Bild 8.2 zeigt einen



Schrägschichtfoto Tiefenbronn



Ausschnitt aus der Messung Wörthsee. Das Testgebiet umfaßt eine offene Landschaft, die von kleineren Waldstücken umgeben ist. In der Bildmitte bei Rechtswert 4445200 ist der Einsiedlerhof Tiefenbronn ① gelegen. Dieser Ausschnitt wurde gewählt, weil eine Vielzahl von Vegetationstypen, wie beispielsweise Landwirtschaftsflächen, versiegelte Flächen und Waldgebiete vorhanden sind

Insgesamt verfügt das Rückstreubild über eine schlechtere Auflösung als das Luftbild. Das flächenhafte Rückstreubild ist durch Interpolation der einzelnen Spuren entstanden. Manche Objekte wie Straßen wurden nur dann durchgängig gemessen, wenn die Flugspuren entsprechend dicht lagen. Die Rückstreukoeffizienten erstrecken sich laut angegebener Scala von $\sigma_0 = -20$ dB bis $\sigma_0 = +20$ dB, was einer Leistungsdynamik von einem Faktor 10000 entspricht. Trotzdem lassen sich charakteristische Objekte auf den Rückstreubild dem Luftbild direkt zuordnen. Die Straßen zum Einsiedlerhof Tiefenbronn ② und der Hof ① selbst streuen mit $\sigma_0 \approx +10$ dB zurück. Entsprechend der Skala sind dies die hellsten Flächen, die im Bild mit rosa Färbung erscheinen. Je nach Bewuchs verfügen die Felder über sehr unterschiedliche Rückstrequerschnitte. Einzelne Felder beispielsweise ③ reflektieren auffällig schlecht, $\sigma_0 = -16$ dB. Auf dem Schrägsichtfoto sind sie als Winterweizen zu identifizieren, der im Mai einen kniehohen Wachstumsstand erreicht hat. Der dichte Weizenbestand absorbiert die ankommende Leistung. Die Wiesen um den Hof werden zur Weidewirtschaft genutzt und sind mit niederem Gras bewachsen. Rückstrequerschnitte von $\sigma_0 = -10$ dB herrschen hier vor. Felder mit frischer Einsaat ④ streuen mit $\sigma_0 = 0$ dB recht gut zurück, da das Verhältnis von Pflanzen zu offener Boden günstig ist.

Beispielhaft für die gemessenen Rückstreukoeffizienten σ_0 wird Spur 9 der Messung herausgegriffen. Im Luftbild ist die Spur gelb eingetragen und quert von Ost nach West. Der Rückstreukoeffizient σ_0 variiert von -20 dB bis +20 dB. Beginnend im Osten hebt sich der Waldweg ⑤ hervor, der mit $\sigma_0 = +14$ dB gegenüber dem umliegenden Wald rückstreut. Desweiteren zeichnen sich die Straße ② und das Gehöft ① mit einem hohen Rückstreukoeffizienten von $\sigma_0 = +19$ dB deutlich aus den Daten ab. Die Felder besitzen recht unterschiedliche Rückstrequerschnitte von $\sigma_0 = -8$ dB bis $\sigma_0 = +15$ dB, je nach Fruchtichte und Wachstumshöhe. Im östlichen Gebiet hebt sich der offenen Boden der Waldlichtungen ⑧, ⑩ vom umgebenden Wald ⑨ ab.

4.2.3 Vergleiche der Rückstreukoeffizienten

Ebenso wie die gemessenen Höhen stets den amtlichen Karten oder Referenzmodellen gegenübergestellt wurden, so soll nun der gemessene Rückstreukoeffizient σ_0 mit Literaturwerten verglichen werden. Trotz der Fülle der inzwischen veröffentlichten Literatur ist es schwierig, Messungen bei der Frequenz 13.74 GHz und bei den entsprechenden nadirnahen

Winkeln aufzufinden.

Das NASA Manned Spacecraft Center hat Rückstreumessungen bei 13 GHz durchgeführt, die in Verbindung mit einer ausführlichen vor-Ort-Untersuchung stehen / 56 /. Das Remote Sensing Laboratory der University of Kansas hat mit LKW-montierten Scatterometern Studien an verschiedensten versiegelten Flächen und Vegetationstypen vorgenommen und weitestgehende Untersuchungen veröffentlicht / 16 /. Auch die DLR Oberpfaffenhofen hat in einer Vielzahl von Veröffentlichungen wichtiges Datenmaterial beigetragen / 57 /.

Ein Literaturvergleich bezüglich Rückstreukoeffizienten verschiedener Objektklassen ergibt im Detail nachfolgendes Bild. Der Vergleich bezieht sich dabei stets auf die HH Polarisation. Die Klasseneinteilung erfolgte in Anlehnung an die Kategorien des Statistischen Landesamtes / 58 /.

Wasserflächen:

Die Literaturvergleiche sind aus Untersuchungen der Wellenhöhenvermessung entnommen, wobei die Vergleichswerte für eine glatte Meeresoberfläche herangezogen wurden. Außerdem wurden zusätzlich Vergleiche mit den Untersuchungen von Schnee und Eiswasser getätigt. Da der Rückstreukoeffizient sehr steil über dem Einfallswinkel abfällt, ist es wichtig nadirnahe Winkel zum Vergleich heranzuziehen. Wasserflächen haben bei Nadir den höchsten Rückstreukoeffizient mit $\sigma_0 = 19$ dB. Insgesamt zeigen die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen Übereinstimmung mit der Literatur.

Tabelle 8.1: Rückstreukoeffizient von Wasser

Objektklasse Radar	α	Rückstreukoeffizient	rms	Objektklasse Literatur	α	Rückstreukoeffizient	Frequenz	Literatur
Pilsensee	2 °	$\sigma_0 = +19$ dB	1 dB	Eiswasser	0 °	$\sigma_0 = +12$ dB	7.6 GHz	/25/
Ammersee	1 °	$\sigma_0 = +18$ dB	2 dB	Ozeanwasser	5 °	$\sigma_0 = +5$ dB		
					0 °	$\sigma_0 = +18$ dB	24 GHz	/25/

Versiegelte Flächen:

Diese Klasse beinhaltet asphaltierte Straßen, Gebäude und Hofflächen ebenso wie Wegeland. Daher ist die Streuung des Rückstreukoeffizienten entsprechend groß. Untersucht wurden unter anderem dörfliche Siedlungen. So besitzt beispielsweise Hechendorf einen mittleren Rückstreukoeffizienten von +10 dB. Ein hoher Anteil an Flachdachfläche oder Straßenfläche erhöht den Rückstreuquerschnitt. Literaturvergleiche sind aber nur mit ausgewählten Flächen wie Asphalt oder Beton möglich. Der Vergleich mit der Runway deckt sich gut mit anderen Messungen. Für die versiegelte Fläche wurde im Rahmen der Vergleichbarkeit Übereinstimmung erzielt.

Tabelle 8.2: Rückstreuoeffizient von versiegelter Fläche

Objektklasse Radar	α	Rückstreu- koeffizient	rms	Objektklasse Literatur	α	Rückstreu- koeffizient	Frequenz	Literatur
Stadt (Hechendorf)	3°	$\sigma_0 = +10\text{dB}$	4dB	Betonflächen	0°	$\sigma_0 = +22\text{dB}$	8.6 GHz	/16/
Runway (Asphalt)	5°	$\sigma_0 = +9\text{dB}$	3dB	Asphalt (glatt) (rauh)	5°	$\sigma_0 = +10\text{dB}$	8.6 GHz	/16/
					10°	$\sigma_0 = -2\text{dB}$	8.6 GHz	/16/
					5°	$\sigma_0 = +7\text{dB}$	17 GHz	/16/
					10°	$\sigma_0 = -5\text{dB}$	17 GHz	/16/
					10°	$\gamma = -18\text{dB}$	Ku Band	/59/
					10°	$\gamma = -17\text{dB}$	Ku Band	/59/

Landwirtschaftsfläche:

Diese Klasse umfaßt die Flächen des Ackerbaus, Wiesen- und Gartenbauflächen ebenso, wie Brachflächen, Moor- und Heideflächen. In dieser Klasse liegt eine besonders große Streuung vor, da sie entsprechend vielgestaltig ist. Andererseits ist die jeweilige Fruchtart dem Wandel der Witterung und der Wachstumsperioden unterworfen, der großen Einfluß auf den Rückstreuoeffizienten hat, aber selten in der Literatur qualitativ spezifiziert wird. Die Dichte und Höhe der Bepflanzung spielt eine besonders entscheidene Rolle. Gras mit einer Höhe von 10 cm hat einen signifikant anderen Rückstreuquerschnitt als Gras mit einer Wuchshöhe von 80 cm. Insgesamt besitzen landwirtschaftlich genutzte Flächen einen negativen Rückstreuoeffizienten. Bei hohem Bewuchs sinken die Werte sogar bis - 15 dB. Bei offenem Boden hingegen wurden positive Rückstreuquerschnitte bis + 3 dB gemessen. Hier wirkt sich die Rauigkeit der Oberfläche besonders stark aus. Je glatter der Boden ist, desto mehr nähert er sich den Rückstreuoeffizienten der versiegelten Fläche an. In dieser Klasse stimmten Messung und Literaturangaben überein.

Tabelle 8.3: Rückstreuoeffizient von Landwirtschaftsfläche

Objektklasse Radar	α	Rückstreu- koeffizient	rms	Objektklasse Literatur	α	Rückstreu- koeffizient	Frequenz	Lite- ratur
gepflügter Boden	3°	$\sigma_0 = +3\text{dB}$..-7dB	5 dB	lockerer Boden Kies	5°	$\sigma_0 = -4\text{dB}$	17 GHz	/16/
					5°	$\sigma_0 = -7\text{dB}$	8.6 GHz	/16/
					5°	$\sigma_0 = +9\text{dB}$	17 GHz	
Grass (0.1m)	3°	$\sigma_0 = 0\text{ dB}$	5 dB	Grass (0.8m) (0.1m)	5°	$\sigma_0 = -7\text{dB}$	8.6 GHz	/16/
					5°	$\sigma_0 = -4\text{dB}$	17 GHz	/16/
					5°	$\sigma_0 = +1\text{dB}$	8.6 GHz	/16/
					5°	$\sigma_0 = +1\text{dB}$	17 GHz	/16/
Winterweizen (0.5m)	3°	$\sigma_0 = -15\text{dB}$	6 dB	Luzerne (0.8m)	10°	$\gamma = -16\text{dB}$	Ku-Band	/25/

Waldfläche:

Diese Klasse verfügt über geringe Rückstreukoeffizienten von -8 dB bis -15 dB, in Abhängigkeit von der Dichte des Baumbestandes. Bei lockerem Baumbestand bestimmt der Waldboden den Rückstreukoeffizienten mit. Wege und Waldlichtungen gehen ebenfalls in diese Messung ein. Der Literaturvergleich zeigt auch hier gute Übereinstimmung zu den Radarmessungen.

Tabelle 8.4: Rückstreukoeffizient von Waldfläche

Objektklasse Radar	α	Rückstreu- koeffizient	rms	Objektklasse Literatur	α	Rückstreu- koeffizient,	Frequenz	Lite- ratur
Mischwald (Höhenrain)	4 °	$\sigma_0 = -8\text{dB}$	5 dB	Wald	0 °	$\sigma_0 = -10\text{dB}$	8.6 GHz	/16/
					5 °	$\sigma_0 = -8\text{ dB}$	8.6GHz	/16/
					40 °	$\sigma_0 = -16\text{dB}$	13 GHz	/25/
dichter Wald	4 °	$\sigma_0 = -15\text{dB}$	7 dB	Kiefernwald	5 °	$\sigma_0 = -10\text{dB}$	4.75GHz	/60/

Insgesamt zeigen die vom Radar gemessenen Werte im Rahmen der Vergleichbarkeit hinsichtlich der meisten Objekte gute Übereinstimmung. Bild 8.3 zeigt eine Zusammenfassung von verschiedenen aus der Literatur zusammengetragenen Rückstreuemessungen, in der auch die Radarmessungen eingetragen sind. Dabei sind die vier verschiedenen Objektklassen Wasserfläche, versiegelte Fläche, Landwirtschaftsfläche und Waldfläche über dem Einfallswinkel aufgetragen. Der Verlauf des Rückstreukoeffizienten bei nadirnahen Einfallswinkeln beinhaltet Information über die Verteilung der Oberflächengrobstruktur des Geländes.

Bei größeren Einfallswinkeln spiegelt sich im Verlauf des Rückstreukoeffizienten die Feinstruktur des Geländes wieder. So zeigen sich die objektbezogenen Streucharakteristiken, die beispielsweise ein Weizenfeld und ein Maisfeld unterscheiden erst bei sehr schrägen Einfallswinkeln. In Nadirnähe haben Wasserflächen und versiegelte Flächen die höchsten Rückstreukoeffizienten. Beide Klassen zeigen aber auch die stärkste Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Besonders der Rückstreukoeffizient von Wasserflächen fällt bei einer Winkeländerung von 10 Grad um 30 dB. Die Vegetationsklassen liegen im negativen Bereich der Rückstreuquerschnitte und zeigen eine geringere Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Selbst in der Literatur sind Abweichungen von mehr als 10 dB in einer Klasse zu finden. Beispielsweise wird Asphalt mit Werten von -18 dB bis zu -2 dB angegeben. Außerdem sind Überschneidungen zwischen den Klassen Wasserflächen und versiegelte Flächen vorhanden. Diese beiden heben sich jedoch gut gegenüber der Klasse landwirtschaftlichen Fläche ab. Bei schrägem Einfallswinkel entzerren sich die Klassen erheblich. Ideal für eine Klassifizierung wäre die Messung des Rückstreuverlaufs über dem Einfallswinkel, insofern als dann eine Trennung der Objekte über ihre Winkelsignatur möglich wäre / Elachi, 1 /.

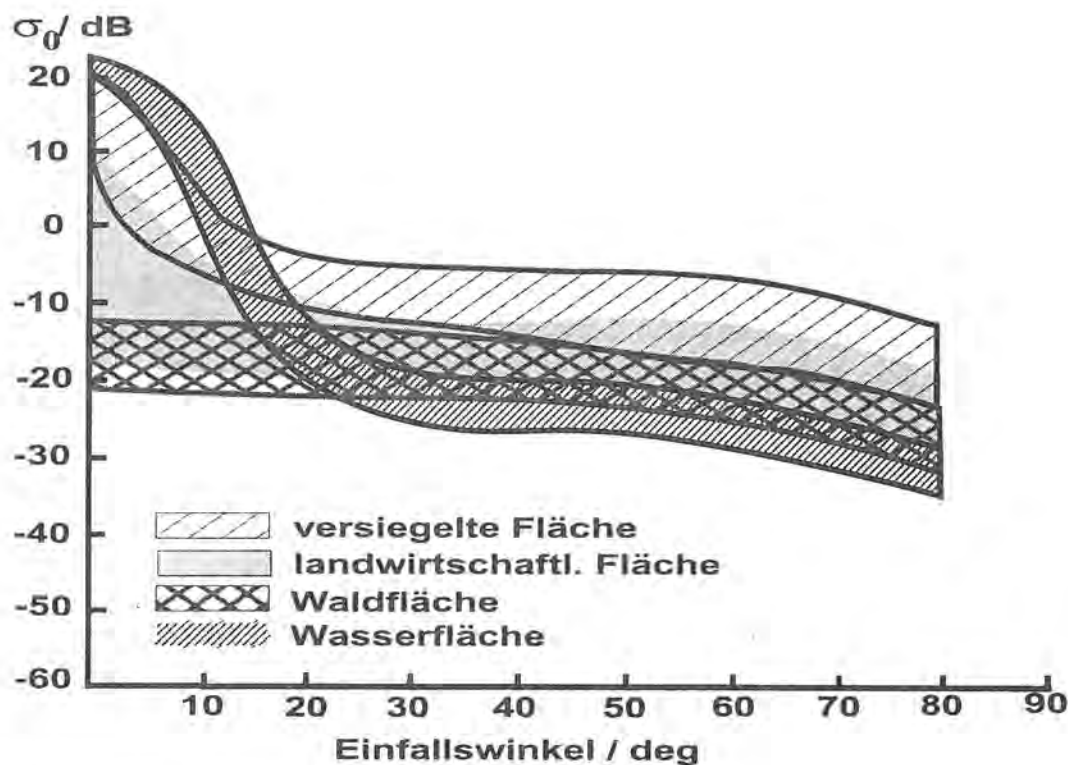


Bild 8.3: Rückstreukoeffizient in Abhängigkeit des Einfallswinkels

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß das Radaraltimeter zur Grobklassifizierung geeignet ist. Aus der Radarmessung heben sich versiegelte Flächen signifikant hervor und sind gut zu extrahieren. Beispielsweise kontrastieren Straßen scharf gegenüber den umgebenden Wiesen, und Seen oder Städte zeichnen sich hell in der Landschaft ab. Wie im Beispiel Tiefenbronn gezeigt, sind in Einzelfällen sogar Feldstrukturen im Radarrückstreubild zu erkennen.

4.2.4 Abhängigkeit des Rückstreuquerschnitts von der Rauigkeit

Der Unterschied zwischen einer rauhen Fläche und einer glatten Fläche äußert sich im Streuverhalten. Eine raue Oberfläche strahlt die einfallende Welle in alle Raumrichtungen ab, während eine glatte Oberfläche die einfallende Leistung in Richtung des Ausfallswinkel spiegelt. Die Standardabweichung der Höhe ist kein alleinstehendes Maß für die Rauigkeit, da die Standardabweichung der Höhe stets in Beziehung zur Wellenlänge gesehen werden muß. Die Rauigkeit wurde im Zusammenhang mit der Höhenmessung in Kapitel 4.8 und 4.9 untersucht.

Die qualitativen Beziehungen zwischen Objektoberfläche und Rückstreuung werden in Bild 8.8 gezeigt. Reflexion an einer glatten Oberfläche wird spiegelnde Reflexion genannt und durch das

Reflexionsgesetz nach Snellius beziehungsweise durch die Fresnelschen Beziehungen beschrieben. Eine Welle, die auf eine raue Grenzfläche fällt, wird teilweise in die Ausfallsrichtung, teilweise omnidirektional reflektiert. Für die spiegelnde Oberfläche entspricht das Streufeld einer Delta - Funktion, die räumlich in der Ausfallsrichtung liegt. Für eine leicht raue Oberfläche ist das Streufeld aus zwei Komponenten, der reflektierten und der gestreuten Komponente zusammengesetzt. Die reflektierte Komponente verläuft wie bei der spiegelnden Oberfläche in Richtung des Ausfallswinkels, aber ihre Amplitude ist geringer als im ersten Fall. Diese reflektierte Komponente wird als kohärente Streukomponente bezeichnet. Die gestreute Komponente stellt den diffusen oder nichtkohärenten Anteil dar. Die Leistung wird hierbei in alle Richtungen verteilt. Je rauher die Oberfläche wird, desto geringer wird der kohärente Anteil im Streufeld. Schließlich nähert sich das Streufeld für eine sehr raue Oberfläche einem Lambertschen Strahler an, wobei das Streufeld nur eine inkohärente Komponente aufweist.

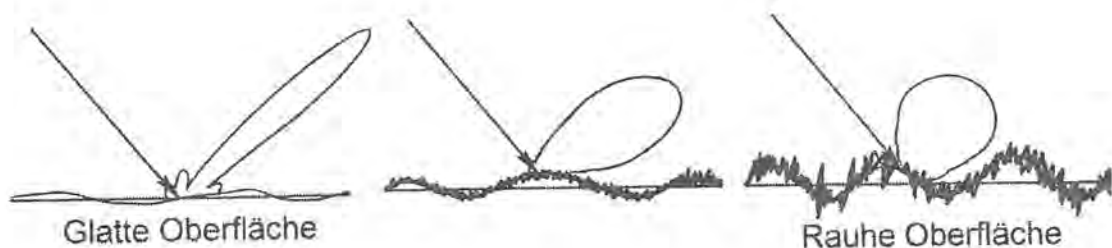


Bild 8.8: Einfluß der Rauigkeit auf den Rückstreuungskoeffizienten

Beckmann and Spizzichino legen in /23/ ihre Untersuchungen über die Modelle der Rückstreuungskoeffizienten σ_0 in Abhängigkeit von der Rauigkeit F dar. In Übereinstimmung dazu wird von Ulaby / 9 / als Modell für diese Abhängigkeit folgende Formel vorgeschlagen:

$$\sigma_0(\alpha) = \frac{|R(0)|^2}{2 F^2} \cdot \cos^4(\alpha) \cdot e^{-\frac{\tan^2(\alpha)}{2F^2}}$$

wobei α den Einfallswinkel und $R(0)$ den Fresnell-Reflektionskoeffizienten bei senkrechtem Einfall darstellt. Dieser Modellansatz gilt aber nur für entsprechend raue Oberflächen. Bild 8.9 zeigt die nach obiger Gleichung simulierten Rückstreuquerkoeffizienten von vier verschiedenen rauhen Oberflächen. Dieser Modellansatz bestätigt sich an den Messungen in Bild 8.3. Eine glatte Oberfläche hat den größten Rückstreuquerschnitt bei nadirnahen Winkeln. Je geringer die Rauigkeit, desto markanter ist das Absinken des Rückstreuungskoeffizienten σ_0 bei steigendem Einfallswinkel. Im Gegensatz zu einer sehr rauhen Oberfläche, die nur eine kleine Änderung des

Rückstreuquerschnitts σ_0 beim Durchlaufen des Winkels zeigt. Mit steigender Rauigkeit weitet sich das Streufeld von einer Delta-Funktion über eine Keule hin zu einer omnidirektionalen Charakteristik. Für den nadirnahen Winkel bedeutet das, daß sich die rückgestreute Leistung mit zunehmender Rauigkeit verringert. Sie wird im Raum verteilt, statt in die Einfallsrichtung zurückgesandt. Dabei entfällt auf die Nadirrichtung nur ein geringerer Teil.

Rückstreukoeffizient/dB

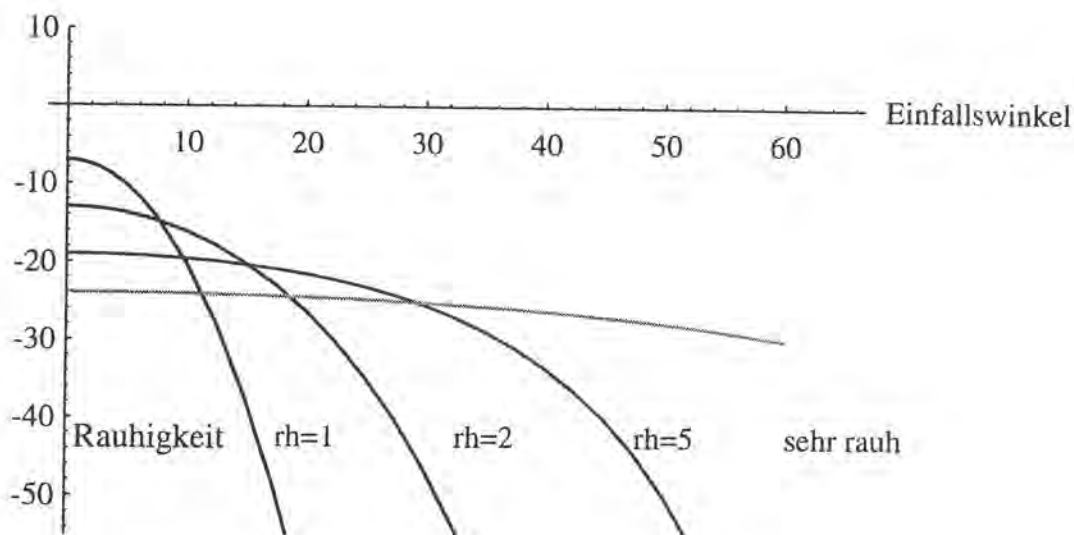


Bild 8.9: Rückstreukoeffizient und Rauigkeit

Rauhe Objekte wie bebaute Äcker oder Felder erscheinen beim Radaraltimeter dunkel im Intensitätsbild. Hingegen werden wenig raue Flächen, wie sie im Stadtgebiet häufig auftreten, hell zurückgestreut. Das Radaraltimeter kann die Rückstreumessungen nicht kontinuierlich über den Einfallswinkel vornehmen, sondern das Objekt wird unter den sich bei der Flugbewegung zufällig einstellenden Raumwinkeln aufgenommen. Daher kann das Radaraltimeter lediglich nadirnahe Meßpunkte hinsichtlich der Winkelabhängigkeit des Rückstreukoeffizienten aufnehmen.

4.2.5 Abhängigkeit des Rückstreukoeffizienten von den dielektrischen Eigenschaften

Neben den geometrischen Bedingungen, die den Rückstreukoeffizienten bestimmen, sind die physikalischen Materialeigenschaften wichtig. So können zwei gleich raue Objekte durchaus verschiedene Rückstreueigenschaften haben. Beispielsweise sind bei einem Maisfeld nach einem Niederschlag wesentlich höhere Rückstreukoeffizienten zu messen als im trockenen

Zustand. Die dielektrischen Eigenschaften des Terrains bestimmen an der Grenzfläche Erde - Luft, wieviel Energie reflektiert und welcher Anteil absorbiert wird. Die dielektrischen Eigenschaften der Topographie wiederum werden, abgesehen von der chemischen Beschaffenheit, maßgeblich vom Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst. Dabei beeinflusst die dielektrische Konstante weniger die räumliche Verteilung des Rückstreukoeffizienten, jedoch entscheidend seine Größe. Beispielhaft ist in Bild 8.10 der Rückstreuquerschnitt über dem Einfallswinkel von trockenen und feuchtem Ackerboden aus / 9 / wiedergegeben.

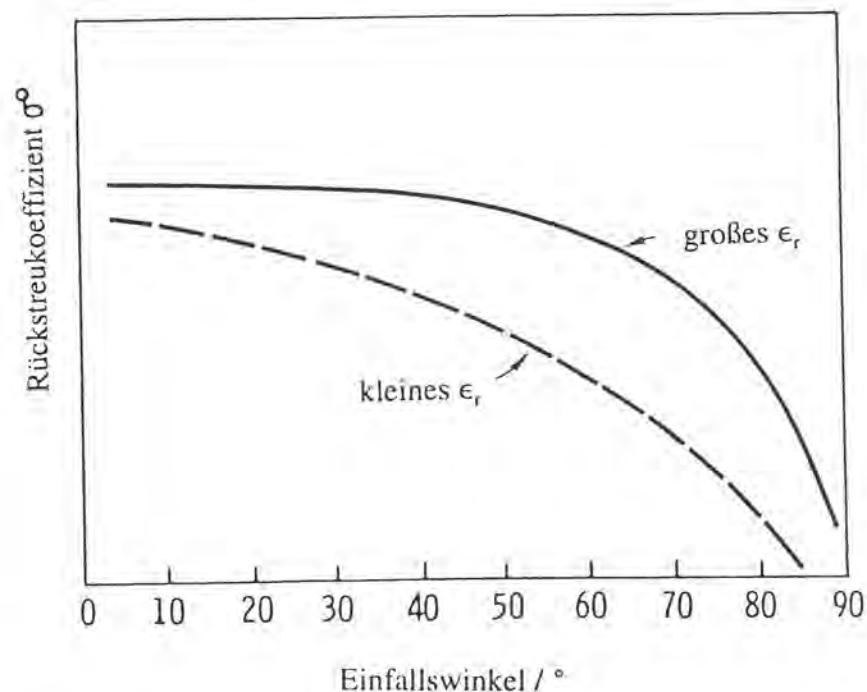


Bild 8.6: Rückstreukoeffizient und dielektrische Eigenschaften

Diese qualitative Darstellung deckt sich mit den Messungen des Radaraltimeters, insofern feuchte oder gut leitende Strukturen hell im Rückstreubild zu erkennen sind. Feuchtgebiete, Moore, schneebedeckte Landschaften oder jede Art von Gewässer stellen aufgrund ihrer guten dielektrischen Eigenschaften helle Reflektoren dar. Außerdem existieren viele anthropogene Objekte, die eine hohe dielektrische Konstante besitzen, wie Eisenbahnschienen, Autos Hochspannungsleitungen, Ampeln oder Straßenbeleuchtungen. Schlechtere Reflektoren sind unbebaute Äcker, trockene Wiesen oder Sand.

4.3. Modellbildung für verteilte Ziele

Für die Modellierung der Reflexion können verschiedene Ansätze gewählt werden, die im wesentlichen alle aus den Maxwell'schen Gleichungen ableitbar sind. Fällt das vom Radar ausgesandte elektromagnetische Feld auf eine Geländestruktur, so werden in dieser Ströme induziert. Diese erzeugen ihrerseits ein Streufeld, das vom Radaraltimeter wieder empfangen wird. Da das Feld der Sendeantenne in seiner räumlichen Verteilung bekannt ist, wird versucht, bei bekannten geometrischen und elektromagnetischen Eigenschaften der Geländestruktur, das rückgestreute Feld zu bestimmen.

Die Bestimmung der Streucharakteristik erfordert im allgemeinen Fall die Lösung eines dreidimensionalen Randwertproblems. Ausgehend von der Darstellung des elektromagnetischen Feldes in Integralform und der daraus resultierenden Integralgleichungen läßt sich die Streufeldberechnung nach Schroth [20] folgendermaßen bewerkstelligen: Die Integralgleichung für die Oberflächenströme wird unter Erfüllung der Randbedingungen angesetzt. Dann folgt die Überführung der Integralgleichung in ein lineares Gleichungssystem und dessen Lösung. Dieses Verfahren wird als die Integralgleichungsmethode bezeichnet. Diese Methode liefert eine exakte Lösung des Streufelds und wird auf einfache Körper, die sich mathematisch geschlossen darstellen lassen, angewandt. Beispiel hierfür wäre das Streufeld einer unendlich ausgedehnten, ideal leitfähigen Platte.

Wird die Integralgleichungsmethode nicht geschlossen, sondern numerisch gelöst, lassen sich auch die Ströme und Streufelder komplexerer Objekte berechnen. Dabei wird für die Berechnung der Oberflächenströme auf dem Objekt eine geometrische Modellierung mit einem Stützstellenabstand von $\lambda/10$ angestrebt. Für die vorliegende Arbeit kommt dieses Verfahren der Integralgleichungsmethode nicht in Betracht. Die vom Radaraltimeter ausgestrahlte Wellenlänge beträgt 2 cm, während die gemessenen Bebauungsobjekte eine Ausdehnung von mehreren Metern bis Kilometern haben. Der geforderte Stützstellenabstand würde den Speicherplatz der zur Zeit verfügbaren Rechner sprengen. Außerdem ist es schwierig, die Geländestrukturen in einer so fein aufgelösten Geometrie zu erhalten und deren dielektrischen Eigenschaften abzuschätzen.

Zur numerischen Lösung der Streufeldprobleme kommen daher nur asymptotische Verfahren in Frage. Dabei wird die Wellengleichung des elektromagnetischen Feldes mit einem Reihenansatz gelöst. Bei steigender Anzahl der in die Rechnung einbezogenen Glieder nähert man sich asymptotisch der exakten Lösung. Im Bereich kleiner Wellenlängen dominiert das Glied nullter Ordnung über die Restglieder. Es repräsentiert das geometrisch-optische Feld. Für die explizite Herleitung der asymptotischen Entwicklung der Wellengleichung wird auf Schroth [20] verwiesen. In der vorliegenden Arbeit wird die Modellierung des Reflexionsvorgangs über das geometrisch-optische Feld beschrieben.

4.3.1 Modellansätze

Die Beschreibung des Systems beinhaltet die Modellierung des Radaraltimeters, des Freiraums und der Reflexion der Topographie. Dabei werden ausschließlich die Größen modelliert, die einen direkten Vergleich zur Messung erlauben. Das Radaraltimeter erfaßt die Entfernung zum gemessenen Objekt und die rückgestreute Leistung. Daher beschränkt sich die Modellbeschreibung auf die geometrischen Verhältnisse, welche die Entfernungsmessung bestimmen und die Verteilung der Leistung innerhalb dieser Geometrie. Die Modellbeschreibung des Meßvorgangs des Radaraltimeters umfaßt folgende Schritte:

- die Beschreibung des ausgesandten Feldes bezogen auf Antennenkoordinaten,
- die räumliche Verteilung der ausgesandten Leistung bezogen auf Geländekoordinaten,
- die Reflexion an der Topographie,
- die räumliche Verteilung der rückgestreuten Leistung,
- die Transformation dieser Leistungsverteilung in Antennenkoordinaten und
- die Aufnahme dieser Leistung durch die Empfangsantenne.

Die Beschreibung der topographischen Oberfläche entzieht sich der exakten analytischen Modellierung. Vegetation wie Bäume oder Bodenbedeckung lassen sich analytisch nicht direkt fassen. Ebenso ist die urbane Bebauung, wie Häuser und Verkehrswege schwer mit geschlossenen Formeln zu modellieren. Gerade diese verteilten Ziele, die bei der Vermessung mit dem Radaraltimeter immer wieder auftauchen, werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Der Modellierungsansatz ist der geometrischen Optik entnommen, und wurde nach der 'facet theory' /8/ ausgeführt. Dabei werden die verteilten Ziele in sogenannte Facetten oder Flächenelemente zerlegt, die bezüglich ihrer Geometrie und ihrer Rückstreuungseigenschaften homogen sind. Das Flächenelement selbst wird als Ebene mit einem definierten Rückstreckoeffizienten σ_0 angenommen. Für jedes Flächenelement wird die rückgestreute Leistung errechnet. Nach dem Überlagerungsprinzip ergibt sich die Gesamtleistung durch räumliche und zeitliche Summation der von den Flächenelementen reflektierten Einzelleistungen.

Wenn man die Flächenelemente hinreichend klein wählt, läßt sich eine durchaus repräsentative Geometrie erreichen. Dabei geht man davon aus, daß bei ausreichend feiner geometrischer Modellierung das digitale Geländemodell die gleichen elektromagnetischen Eigenschaften aufweist wie die tatsächliche Landschaft. Im Hochfrequenzfall erfolgt nicht mehr eine Anregung des Objektvolumens, sondern nur die Ströme an der Oberfläche des Objekts tragen zum rückgestreuten Feld bei. Daher ist es für die Modellierung der Landschaft ausreichend, sich auf die Beschreibung der geometrischen Oberfläche zu beschränken. In der vorliegenden Arbeit wird für die Simulation der rückgestreuten Felder ausschließlich von Reflexionen an der Oberfläche ausgegangen, was bei einer Sendefrequenz von $f = 13.74$ GHz gerechtfertigt ist. Da in dieser Arbeit der Ansatz der geometrischen Optik für die Reflexionsberechnung gewählt

wird, darf die von der Sendeantenne ausgeleuchtete Fläche nicht in beliebig kleine Flächenelemente zerlegt werden. Im Vergleich zur Wellenlänge $\lambda = 2.18 \text{ cm}$ müssen die einzelnen Flächenelemente hinreichend groß sein.

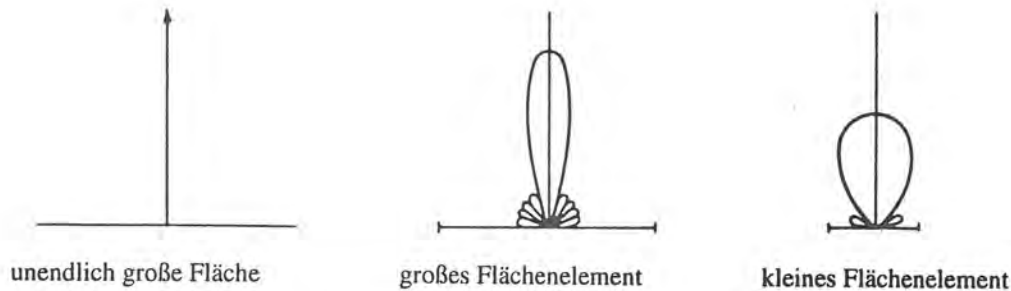


Bild 9.1: Rückstreukeule in Abhängigkeit der Flächenelementgröße

Abbildung 9.1 zeigt die qualitative Rückstreukeule von glatten Flächenelementen in Bezug auf ihre Größe. Je kleiner das Flächenelement ist, desto mehr fächert sich die Keule omnidirektional auf. Damit die Rückstreuereigenschaften nur von der Oberflächenbeschaffenheit und den dielektrischen Eigenschaften abhängen, muß das Flächenelement hinreichend groß gewählt werden. Wird das Flächenelement wiederum zu groß gewählt, wird die Geometrie nicht mehr

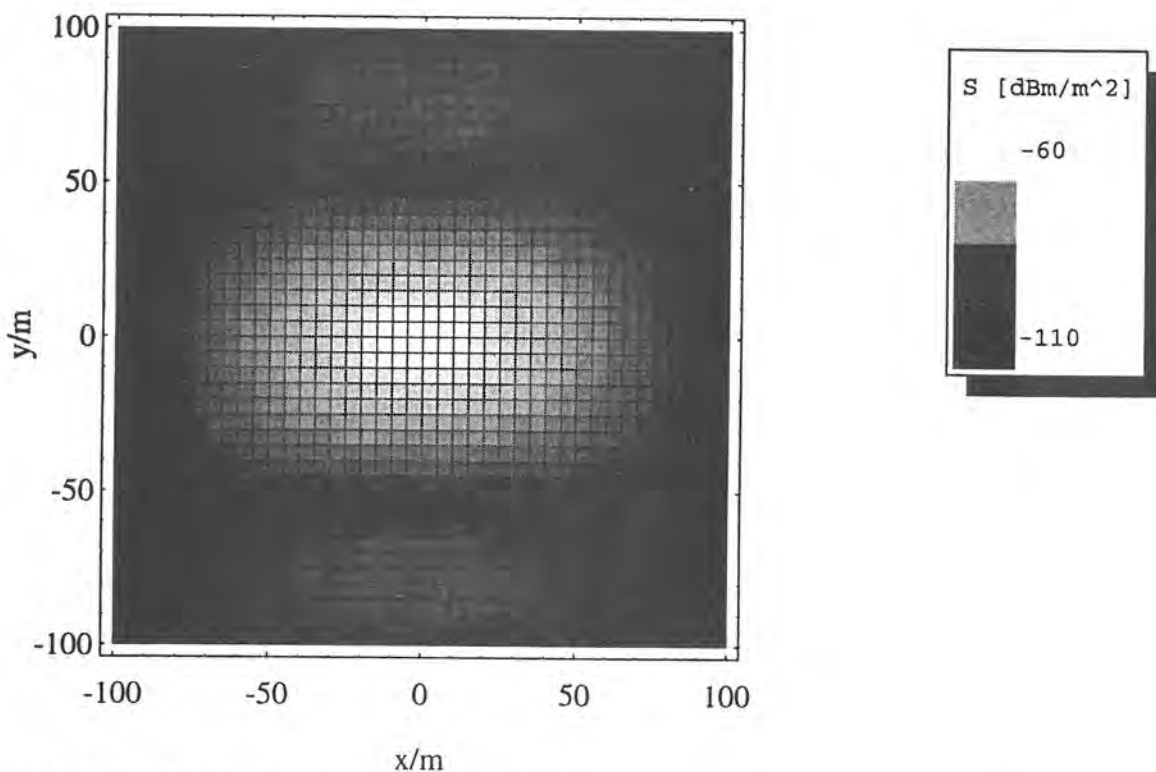


Bild 9.2: Leistungsdichte S des Footprints auf dem Boden

genau genug abgebildet. Die Wahl der Flächenelemente in einer Größe von 2 m auf 2 m hat sich als brauchbar erwiesen.

Die Größe des Ausleuchtflecks variiert je nach Flughöhe. Bei Geländeanstiegen verkleinert sich der Abstand Flugzeug Gelände, der Ausleuchtfleck wird somit kleiner. Die 3 dB Breite der Sendekeule beträgt bei der mittleren Flughöhe von 400 m über Grund etwa 25 m. Der 3 dB Ausleuchtfleck, der 98 % der Sendeenergie beinhaltet, läßt sich somit in 15 auf 15 Flächenelemente aufteilen. In Bild 9.2 ist die Simulationsfläche, die mit 20 x 20 Flächenelementen oder 1600 m² etwas größer gewählt wurde, veranschaulicht.

4.3.2 Leistungsdichteverteilung des Sendefeldes

Bei der vom Radaraltimeter ausgesandten und empfangenen Welle handelt es sich um eine linear polarisierte Welle. Diese harmonische, ebene Welle besteht aus einer elektrischen Komponente E_x und einer magnetischen Komponente H_y . Beide stehen quer zur Ausbreitungsrichtung z und sind nur abhängig von der Ausbreitungsrichtung z und der Zeit t . Mit der Welle ist ein in Ausbreitungsrichtung wandernder Leistungsfluß verbunden. Die komplexe Leistungsdichte oder auch der Pointing-Vektor ist definiert als:

$$\vec{S}_s(r_A) = \begin{pmatrix} S_{xs} \\ S_{ys} \\ S_{zs} \end{pmatrix} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_A}$$

Der Pointing-Vektor wird als komplexe Größe angesetzt, um die Phaseneinflüsse modellieren zu können. Es werden kartesische, rechtshändige Koordinaten zugrunde gelegt. Für den Fall der ebenen Welle erhält man die mittlere Leistungsdichte S_{sm} , indem man die Leistungsdichte konjugiert komplex multipliziert. Alle Diagramme, in denen die Leistungsdichte aufgetragen ist, beziehen sich stets auf die mittlere Leistungsdichte S_{sm} .

$$\vec{S}_{sm} = \frac{1}{2} \vec{S}_s \cdot \vec{S}_s^*$$

Bild 9.3 zeigt die geometrischen Zusammenhänge. Für die Simulation existieren zwei verschiedene Koordinatensysteme, ein Flugzeugkoordinatensystem und ein Geländekoordinatensystem. Die Leistungsdichteverteilung wird in Geländekoordinaten als XZ-Schnitt gezeigt, der als blaue Fläche eingetragen ist. Für jeden Punkt der Schnittfläche mit dem Aufpunktvektor r_A wird die Leistungsdichte S_s berechnet.

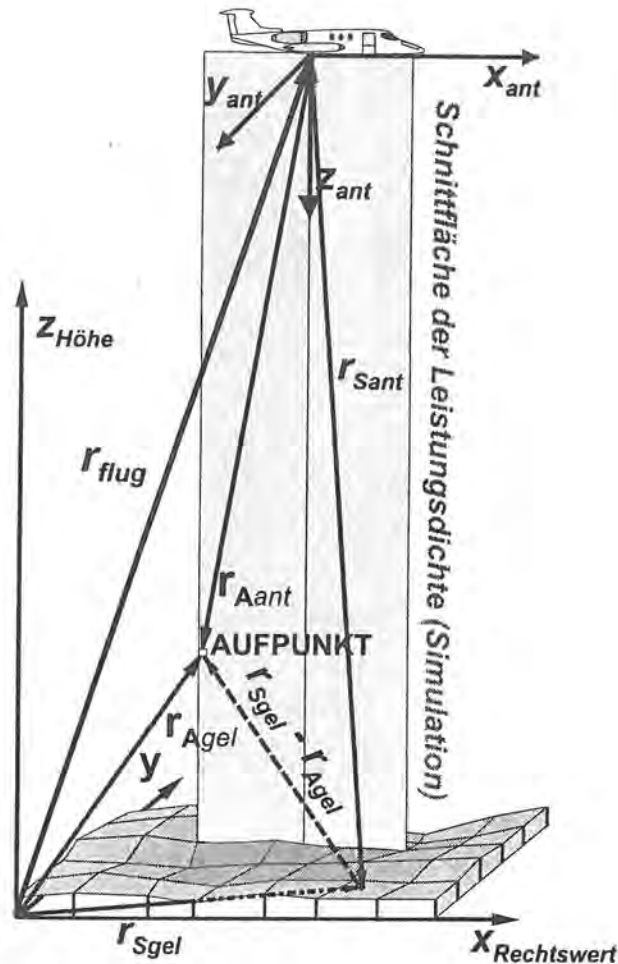


Bild 9.3: Koordinatensysteme

Strahlt eine Sendeantenne mit dem Gewinn $G_s(r)$ die Leistung P_s in Richtung des normierten Vektors \vec{n}_r ab, so beträgt die mittlere Leistungsdichte S_s in der Entfernung r :

$$\vec{S}_s(r_A) = P_s \cdot \frac{G_s(r_A)}{4 \cdot \pi \cdot |\vec{r}|^2} \cdot \vec{n}_r \cdot e^{\frac{j2\pi}{\lambda} \cdot r_A}$$

Die Leistung fächert sich mit wachsendem Abstand r kugelförmig im Raum auf. Durch den Richtfaktor $G_s(r)$ drückt sich die Richtwirkung der Sendeantenne aus, die die Leistungsdichte in eine schmale Keule mit einem Öffnungswinkel von 3° konzentriert. Die Modellierung der Gewinnfunktion wurde bereits in Kapitel 2.3.4 besprochen. Bild 9.4 zeigt einen Schnitt durch das Antennendiagramm mit der aufgetragenen Leistungsdichte S_{sm} , die von der Sendeantenne in den Raum abgegeben wird. Die Intensität der abgestrahlten Leistungsdichte ist gemäß der Legende kodiert, die hellen Flächen entsprechen der höchsten Leistungsdichte von 40 dBm/m^2 während die dunklen Bereiche für geringe Leistungsdichte stehen. Man erkennt die Hauptkeule, die den Boden berührt, während die Nebenkeulen sich in den Raum zerstreuen.

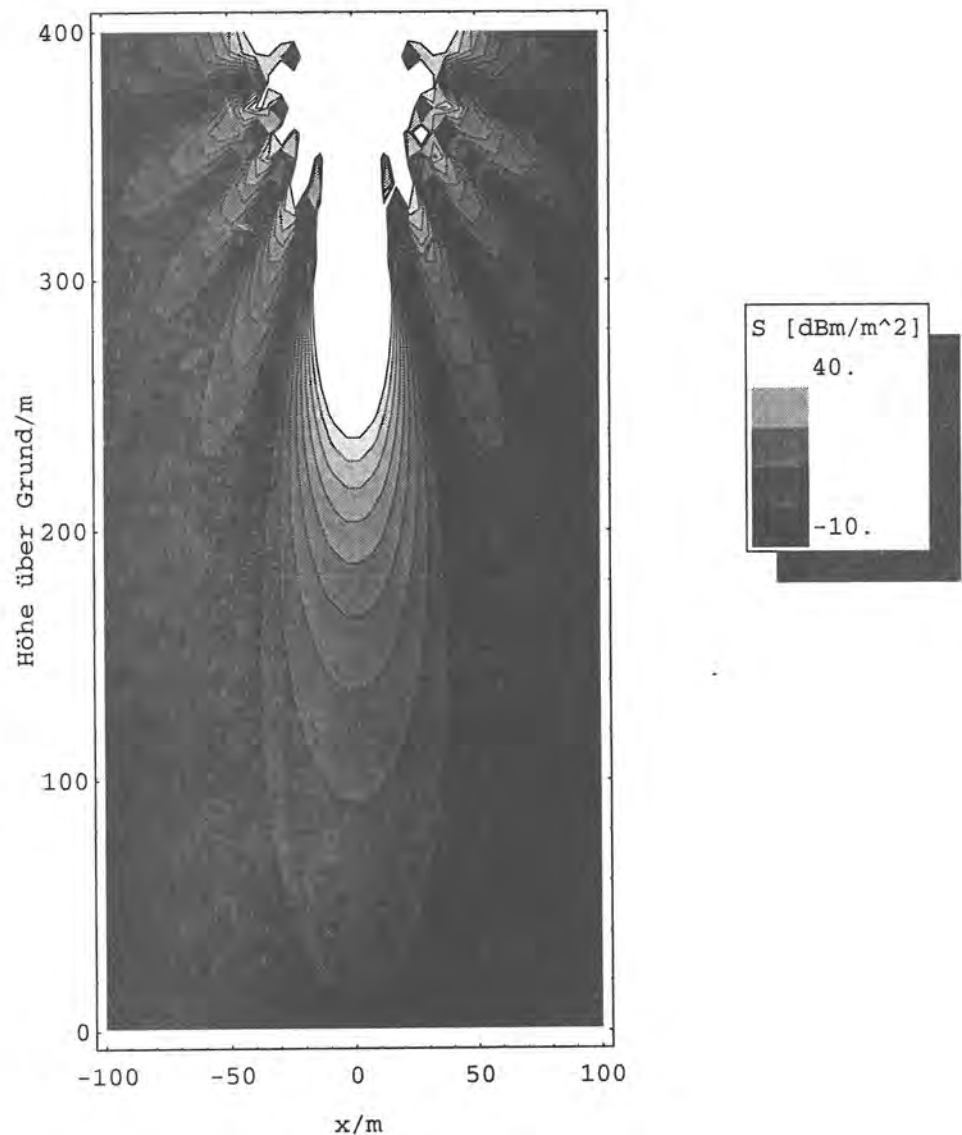


Bild 9.4: abgestrahlte Leistungsdichte S der Sendeantenne

4.3.3 Reflexion an den Flächenelementen

In der geometrischen Optik erfolgt die Beschreibung der Wellenausbreitung durch die Konstruktion von Strahlen und die Verwendung von Phasen bzw. Wellenfronten. Die Strahlenwege werden durch das Fermatsche Prinzip festgelegt [16]. Es besagt, daß die Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Wellen zwischen zwei Punkten so erfolgt, daß der wirklich eingeschlagene Ausbreitungsweg gegenüber den benachbarten Wegen ein Minimum aufweist. In einem homogenen Medium ist also der Strahl von der Sendeantenne zum Objekt geradlinig. Bei einem Übergang zwischen mehreren Medien sind die Strahlen Geradenabschnitte, die an den Trennflächen der verschiedenen Medien Knicke aufweisen. Die Strahlenwege stehen immer senkrecht auf den Phasenflächen. Der Pointing-Vektor zeigt in

Ausbreitungsrichtung des Strahls, sein Betrag entspricht der Leistungsdichte. Das Streufeld eines Objekts setzt sich im allgemeinen aus dem Feld des direkten Strahls und den Feldern der gebrochenen und reflektierten Strahlen zusammen. Da es sich beim Radaraltimeter um ein monostatisches Radar handelt, also Sende- und Empfangsantenne am selben Ort liegen, setzt sich das Streufeld lediglich aus der Summe der geometrisch-optisch reflektierten Strahlen zusammen. Die Simulation der geometrischen Strahlenwege zeichnet sich durch große Anschaulichkeit aus, da die Beiträge der reflektierten Strahlen getrennt untersucht werden können. Darüberhinaus kann der Einfluß einzelner Streustrukturen auf das Gesamtfeld untersucht werden.

Die einfallende Strahlungsleistung S_s trifft auf dem Boden auf und wird an Objekten reflektiert. Die aus der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung umgelenkte Strahlungsleistung wird in den Raum zurückgestrahlt. Jedes Flächenelement wird getrennt berechnet, Bild 9.6 zeigt den geometrischen Zusammenhang. Dabei wird angenommen, daß die einfallende Leistungsdichte S_s nach den Gesetzen der geometrischen Optik reflektiert wird.

$$\vec{S}_R = \vec{S}_S + k_a \cdot \vec{n}_A$$

Durch das Reflexionsgesetz wird nur die Veränderung der Leistungsverteilung aufgrund der Geometrie beschrieben. Der Vektor S_R repräsentiert den reflektierten Pointing-Vektor und der Vektor n_A stellt den Normalenvektor auf dem reflektierenden Objekt dar. Der Vektor $(S_S - S_R)$ steht senkrecht auf der Mediengrenze zwischen Objekt und Luft, und ist somit ein Vielfaches k_a des Normalenvektors. Die zur Mediengrenze parallelen Komponenten von S_S und S_R sind dem Betrag nach gleich, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen. Für beide Winkel α_R und α_S gilt das bekannte Reflexionsgesetz, nachdem Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel $\alpha_R = \alpha_S = \alpha_i$ des Pointing-Vektors ist. Die aus dem Medium der Atmosphäre kommende Welle wird also an der Mediengrenze, der Bodenoberfläche reflektiert. Der größere Teil der Welle wird unter Änderung der Richtung wieder in die Atmosphäre zurückgesandt. Bei einer Sendefrequenz von 13.74 GHz läuft nur ein kleiner Anteil der ankommenden Leistungsdichte ins Medium Erde. Die vom Gelände absorbierte Leistung wird durch den Pointing-Vektor S_G repräsentiert, wobei nach dem Brechungsgesetz von Snellius sich der Winkel α_i folgendermaßen berechnet :

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_o} = \frac{\sqrt{\epsilon_o \cdot \mu_o}}{\sqrt{\epsilon_i \cdot \mu_i}}$$

Das Reflexionsgesetz nach Snellius setzt den einfallenden Leistungsdichtevektor mit dem reflektierten Leistungsdichtevektor in Beziehung. Die Länge des Pointing-Vektors bleibt erhalten, der ausfallende Vektor hat jedoch eine andere Richtung.

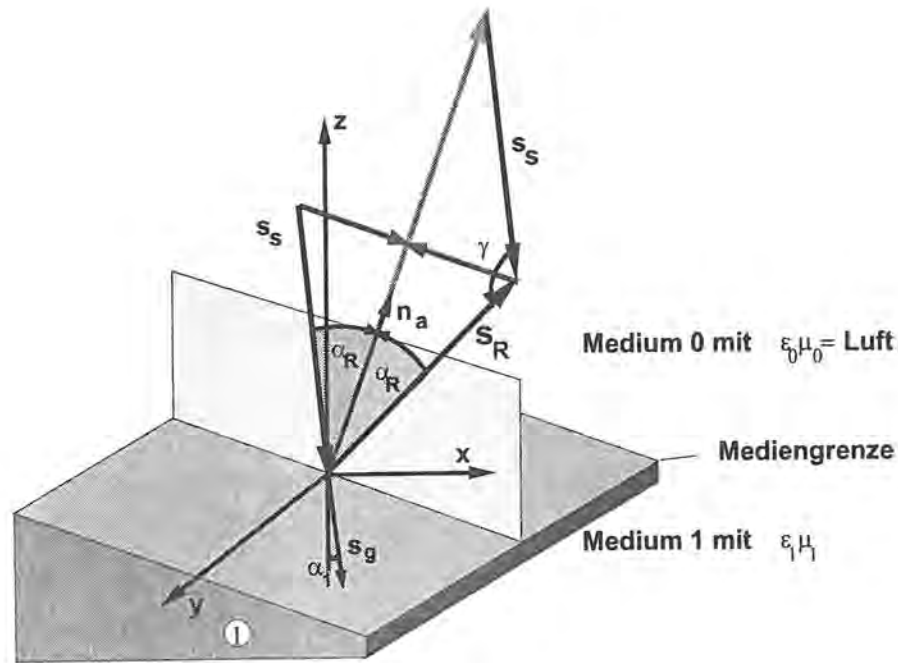


Bild 9.6: Reflexionsgesetz

Die von einem Flächenelement aufgenommene Leistung P_R entspricht der Leistungsdichte S_R mal der die Leistung aufnehmende Fläche $A[i,j]$. Diese Leistung wird wieder unter räumlicher Gewichtung mit der Rückstreufunction $\sigma[i,j]$ abgestrahlt.

$$P_{R[i,j]} = A[i,j] \cdot S_R[i,j] \cdot \sigma[i,j]$$

4.3.4 Leistungsdichteverteilung des Empfangsfeldes

Die von den Flächenelementen reflektierte Leistung P_{Ri} wird wieder in den Raum zurückgestreut. Nachdem die Beiträge der einzelnen Flächenelemente bekannt sind, ist es möglich, nach dem Überlagerungsprinzip die Leistungsverteilung des Empfangsfeldes zu bestimmen. Die Leistungsdichte S_u in einem beliebigen Aufpunkt r_u berechnet sich zu:

$$\vec{S}_E(r_u) = \frac{1}{4\pi} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{(\vec{r}_s - \vec{r}_{aij})^2} \cdot \vec{P}_R[i,j] \cdot e^{\frac{j2\pi}{\lambda} |\vec{r}_s - \vec{r}_u|}$$

Die Flächenelemente mit den Ortsvektoren r_s im Ausleuchtfleck der Antenne werden für die Simulation der Empfangsleistung verwandt. Dabei wird für den Pointing-Vektor S_E die Vektorsumme aller Leistungsbeiträge der Flächenelemente durch die jeweilige Entfernung zwischen Flächenelement r_s und Aufpunkt r_u (Bild 9.3) gebildet.

In einem letzten Schritt kann die Leistung P_E , die die Empfangsantenne diesem Feld entnimmt, summiert werden. Die dabei von der Empfangsantenne aufgenommene Leistung P_E entspricht dem Produkt der Wirkfläche A_E mit der Leistungsdichte S_E des rückgestreuten Feldes:

$$P_E = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \bar{n}_R \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{(\vec{r}_S - \vec{r}_{a,j})^2} G_E(r) \cdot \bar{P}_R[i,j] \cdot e^{\frac{j2\pi}{\lambda} |\vec{r}_S - \vec{r}_a|}$$

Damit ist also die Modellierung des Meßvorgangs abgeschlossen, insofern als im einzelnen nachvollzogen werden kann, wie sich die Empfangsleistung aus dem reflektierten Feld zusammensetzt.

4.3.5 Modelluntersuchungen Geländeanstieg

Bevor die Simulationen, die sich auf ein reales Gelände beziehen, diskutiert werden, soll der Einfluß verschiedener Geländeneigungen auf das reflektierte Radarsignal anhand des Modells aufgezeigt werden. Als vereinfachte Geländestruktur sei eine Platte mit verschiedenen Neigungen simuliert. Die Geländeneigung beeinflusst die Laufzeit und die Echosignalleistung des reflektierten Radarsignals. Bild 9.7 zeigt drei Fälle verschiedener Geländeneigung: ebenes Gelände, ein Gelände mit einem Anstiegswinkel $\theta_d = 10^\circ$ und einen Geländeanstieg mit $\theta_d = 20^\circ$. Die Sendeantenne erzeugt mit einem Öffnungswinkel von 3° einen 30 m großen Ausleuchtkeule. Die Empfangsantenne hat beim Öffnungswinkel von 18° einen Footprint von 130 m.

Die Größe des Ausleuchtkeules ist entfernungsabhängig und wird durch die Geländeneigung geformt. Bei ebenem Gelände wird eine kreisförmige Fläche ausgeleuchtet, wobei die mittlere Wellenfront zuerst auftrifft. Die Phasenringe der Wellenfronten sind in der Schemazeichnung im xy-Schnitt eingetragen. Auf der ebenen Platte zeichnen sich die Phasenfronten als konzentrische Kreise ab. Je stärker die Geländeneigung, desto mehr verzerren sich die Phasenfronten zur Ellipse. Bei leicht geneigtem Gelände sitzt das Zentrum der Phasenfronten noch im Sichtbereich der Empfangsantenne. Bei Gelände mit einem Anstiegswinkel $\theta_d > \delta_a/2$, der außerhalb der Antennenkeule liegt, wandert das Zentrum der Phasenringe außerhalb des Footprints. Im unteren Bildteil sind Schnitte durch die simulierte Leistungsverteilung auf dem Gelände wiedergeben. Die reflektierten Leistungen wurden bei einer Flugzeugposition von 400 m über Grund simuliert. Bei ebenem Gelände tritt in der Ausschnittsmitte deutlich die reflektierte Keule hervor. Je stärker die Neigung des Geländes, desto weniger Energie wird in Richtung der Empfangsantenne zurückgestreut. Bei ebenem Gelände sind Leistungen von -10 dBm/m^2 bis -30 dBm/m^2 vorherrschend, während bei stark ansteigendem Gelände die Empfangsleistungen bis -60 dBm/m^2 abfallen.

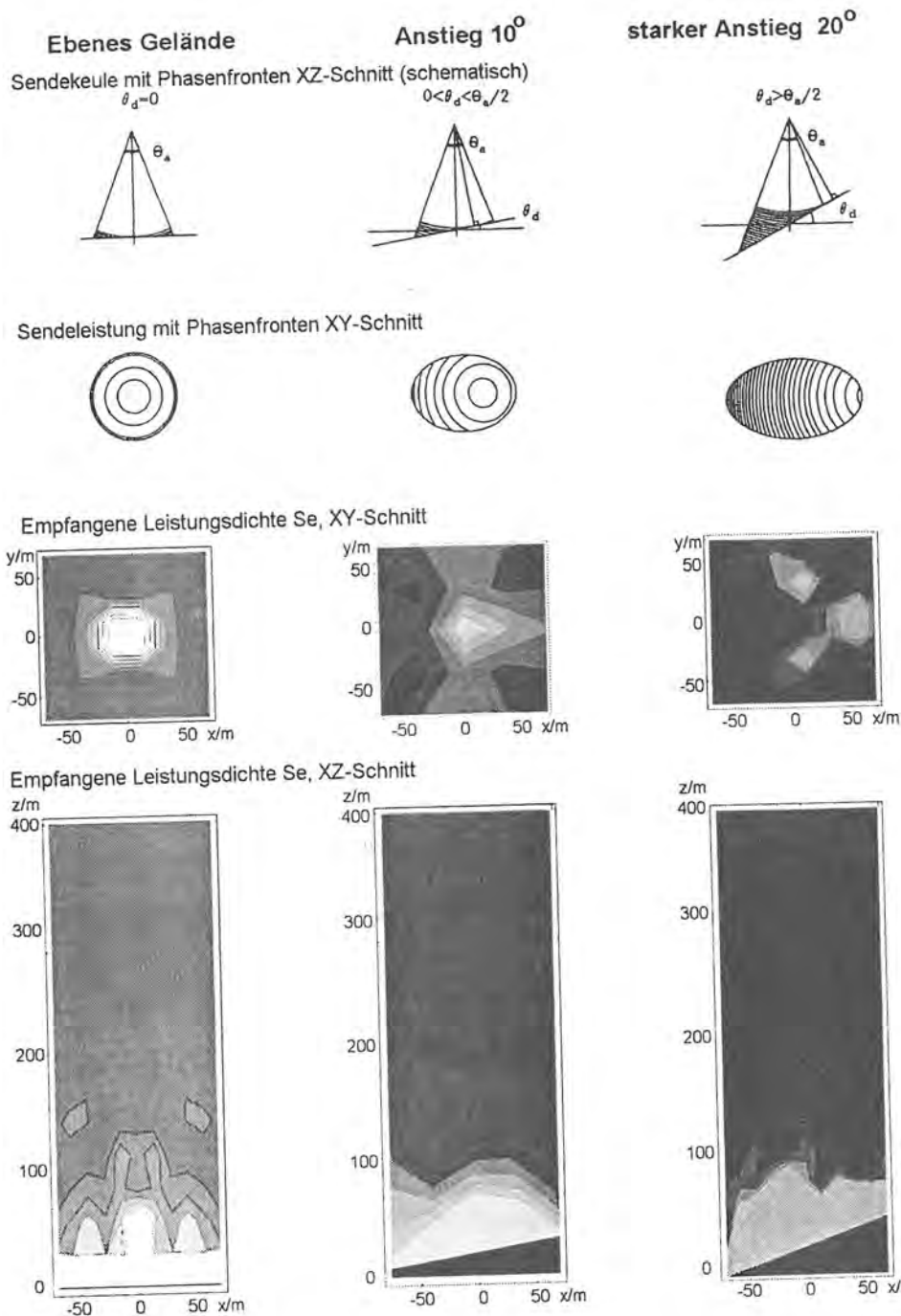


Bild 9.7: Simulierte Leistungsdichteverteilung bei einem Geländeanstieg

Die kürzeste Laufzeit bestimmt das Auftreffzentrum der Wellen, entspricht also dem Abstand zwischen Antenne und Gelände. Bei ebenem Gelände ist das Phasenzentrum und der Ort höchster Leistungsdichte identisch. Obwohl sich bei einem Geländeanstieg das Auftreffzentrum verschiebt, bleibt der Ort der maximalen Empfangsleistung in Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne. Der Geländeanstieg von 10° zeigt, daß das Zentrum maximaler Leistung weiterhin senkrecht unter der Sendeantenne liegt, sich jedoch in Richtung Auftreffzentrum

verzerrt. Beim Geländeanstieg von 20° sind schon die Effekte der Nebenkeulen deutlich zu sehen.

Übertragen auf die topographische Vermessung bedeutet dies, horizontales Terrain reflektiert die Sendeleistung direkt zum Empfänger zurück, Berghänge oder Geländesteigungen reflektieren die Leistung vom Empfänger weg. Geländeanstiege mit 20° oder mehr sind jedoch in der topographischen Vermessung selten. Ebenso verursacht eine Schrägstellung des Flugzeugs den Rückgang der Empfangsleistung. Gelegentliche Kurskorrekturen verursachen Rollwinkelausschläge bis zu 5° , während sich der annähernd konstante Nickwinkel von 2° durch einen entsprechenden Einbauwinkel der Sendeantenne kompensieren läßt.

4.3.6 Modelluntersuchungen Hechendorf

Die Simulationen am Geländemodell Hechendorf sollen zum tieferen Verständnis der gemessenen Daten führen. Eine Aussagekraft des Höhenmeßwerts ist nur dann vorhanden, wenn er eindeutig einem Objekt zuzuordnen ist. In bebautem Gelände befinden sich stets mehrere Objekte im Ausleuchtfleck der Sendeantenne, beispielsweise eine Straße, Häuser und Vorgärten. Die Mischreflexion der verschiedenen Objekte ergibt aber einen Höhenmeßwert und einen Echoleistungswert. Welches der Objekte bei der Mischreflektion dominant zur Höhenmessung beigetragen hat, ist im Einzelfall schwer zu entscheiden. Die Höhenmessung



Bild 9.8: Simulationsgebiet Hechendorf

ergibt sich aus der Phasenfront, welche aus der Überlagerung aller im Ausleuchtfleck vorhandenen Reflexionsbeiträge entstanden ist. Die Simulation, die am Geländeausschnitt

Hechendorf durchgeführt wurde, verdeutlicht diese Zusammenhänge. Dabei wurden die realen geometrischen Gegebenheiten ebenso wie die unterschiedlichen Rückstreuungseigenschaften der Objekte berücksichtigt. Das Simulationsergebnis wurde dann mit den gemessenen Echoleistungen verglichen.

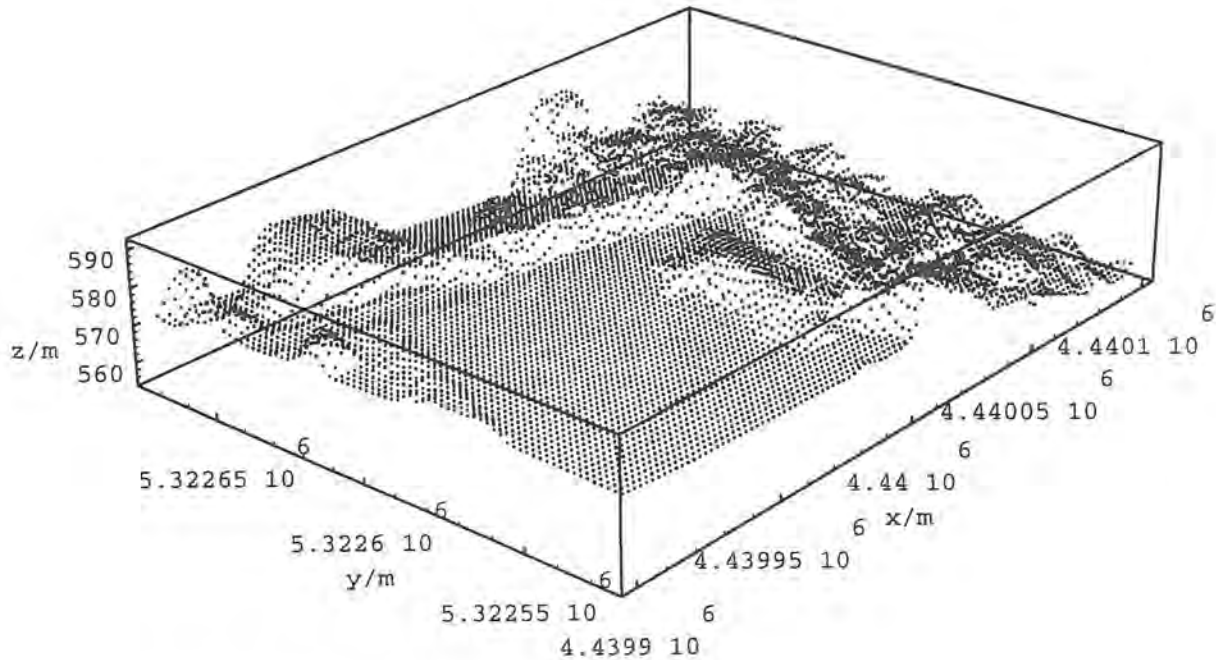


Bild 9.9: DHM Hechendorf

Bild 9.8 zeigt ein Foto des untersuchten Geländeausschnitts. Im Mittelpunkt des Bildes befindet sich der Sportplatz mit dem Vereinsheim. Am linken und rechten Bildrand schließt sich die Bebauung des Ortskerns an. Im Diagramm 9.9 ist das regelmäßige Punktraster des digitalen Geländemodells abgebildet. Alle zwei Meter wurde ein Geländepunkt durch Stereoauswertung aus den Luftbildern extrahiert.

Für jedes Flächenelement wird eine Reflexion nach den Gesetzen der geometrischen Optik berechnet. Die dazu benötigten Normalenvektoren n_a lassen sich aus den Ortsvektoren der einzelnen Eckpunkten der jeweiligen Flächenelemente wie folgt ermitteln:

$$n_a = \frac{1}{2} \cdot \left(\begin{pmatrix} \text{Rechtswert}[i, j+1] \\ \text{Hochwert}[i, j+1] \\ z[i, j+1] \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{Rechtswert}[i, j] \\ \text{Hochwert}[i, j] \\ z[i, j] \end{pmatrix} \right) \times \left(\begin{pmatrix} \text{Rechtswert}[i+1, j] \\ \text{Hochwert}[i+1, j] \\ z[i+1, j] \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{Rechtswert}[i, j] \\ \text{Hochwert}[i, j] \\ z[i, j] \end{pmatrix} \right)$$

Die Flächeninhalt der Flächenelemente bestimmt sich zu:

$$A[i,j] = (\text{Hochwert}[i+1,j] - \text{Hochwert}[i,j+1]) \cdot (\text{Rechtswert}[i,j+1] - \text{Rechtswert}[i,j-1])$$

Vier Rasterpunkte werden zu einem Flächenelement zusammengefaßt. Die Flächenelemente die definitionsgemäß einer Ebene entsprechen, sind in Bild 9.10 für das Testgebiet Hechendorf gezeigt. Der Normalenvektor steht definitionsgemäß senkrecht auf jedem Flächenelement. In Bild 9.11 sind die Normalenvektoren des Testgebiets dargestellt.

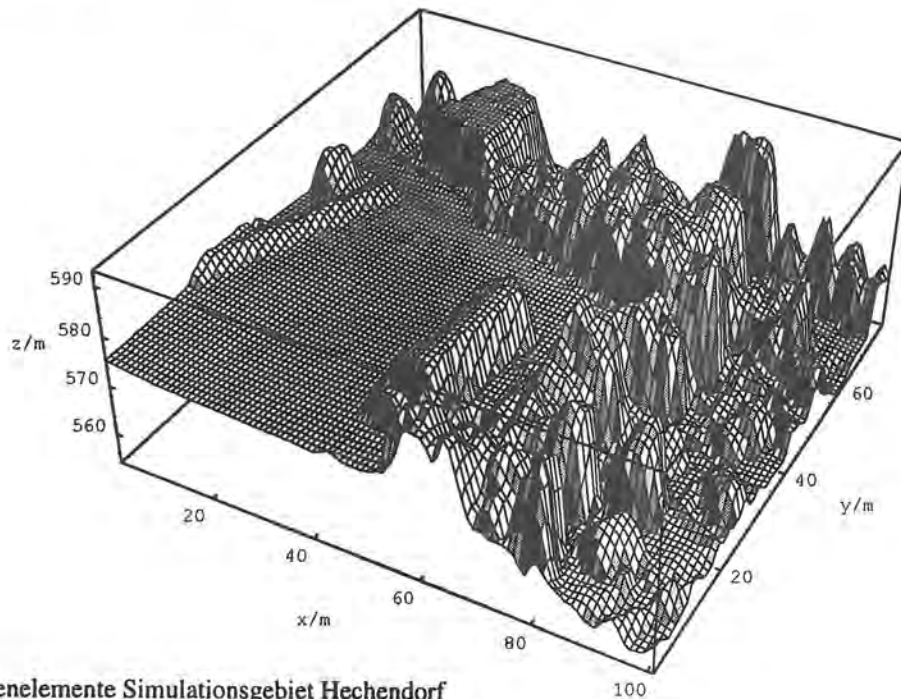


Bild 9.10: Flächenelemente Simulationsgebiet Hechendorf

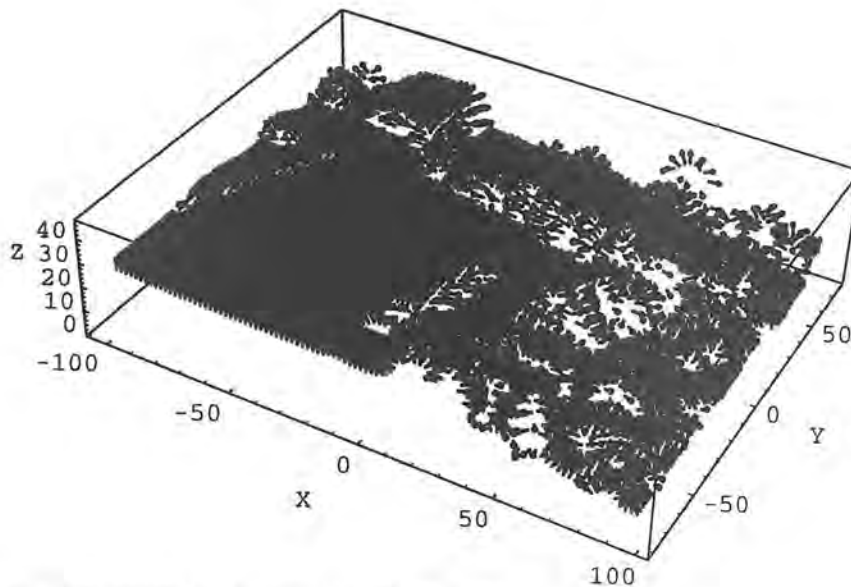
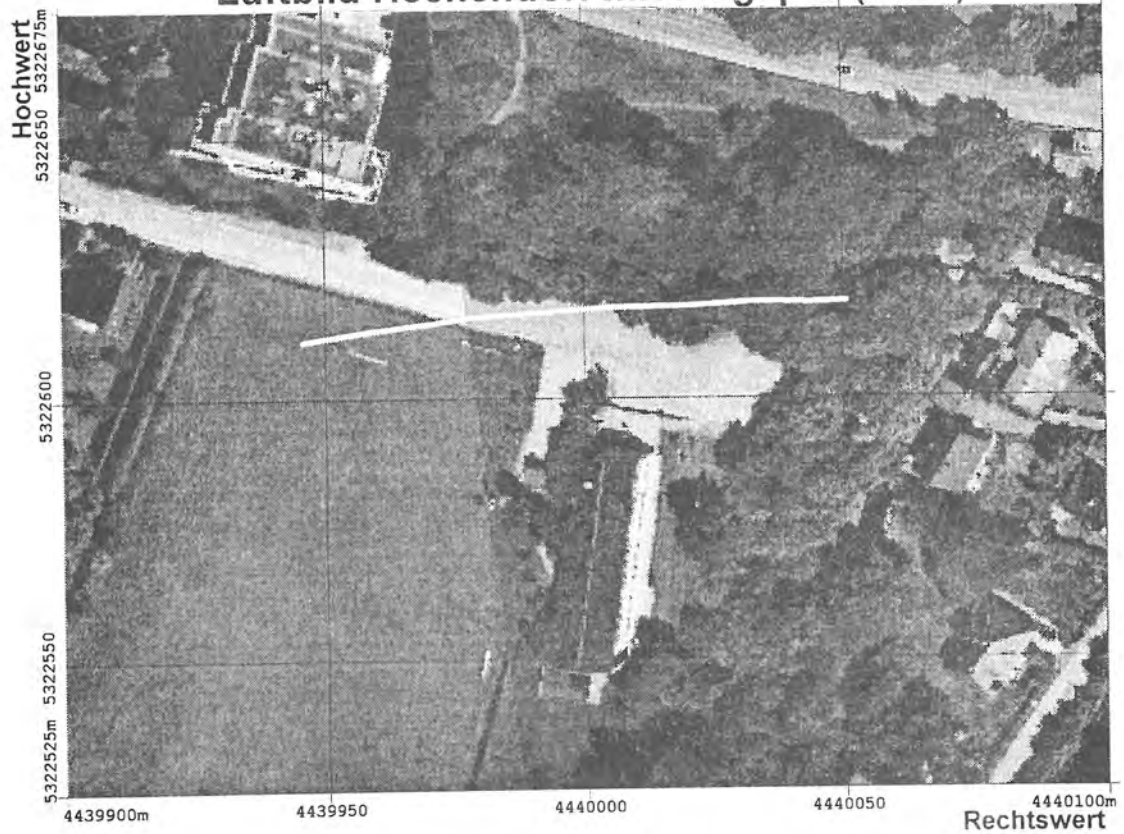
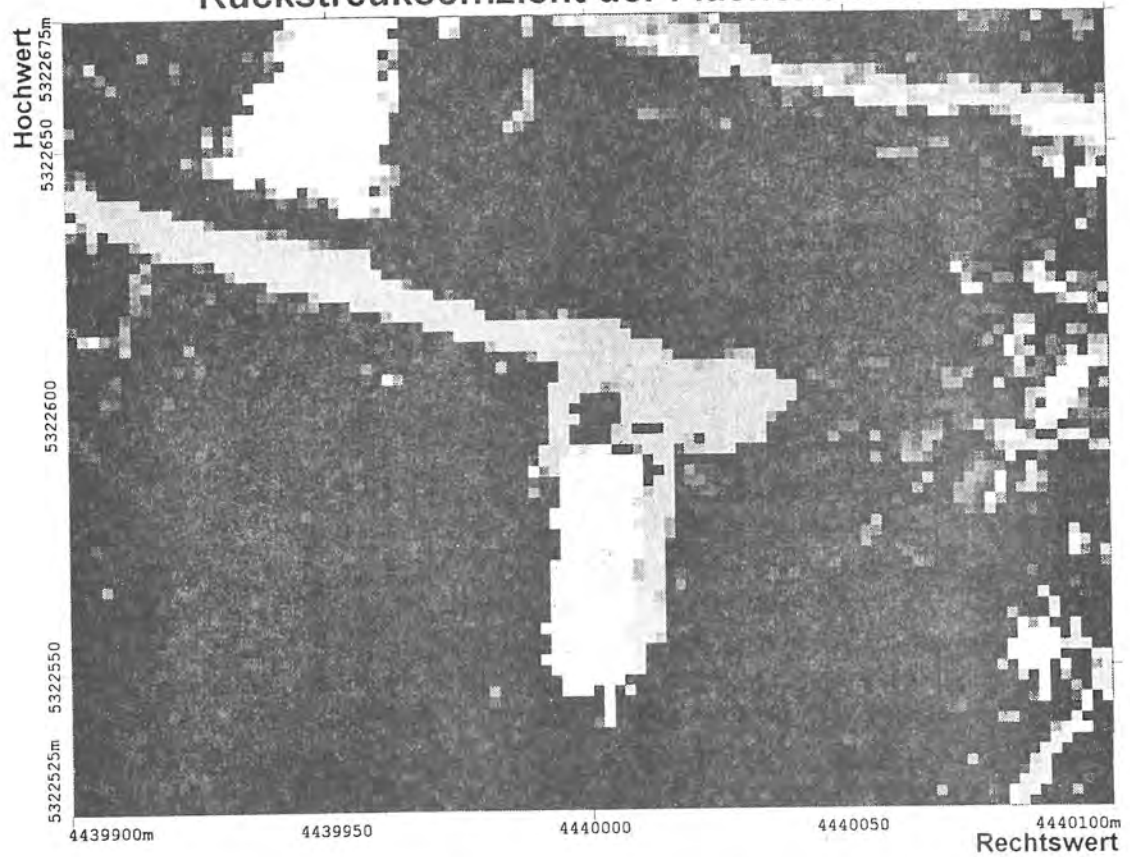


Bild 9.11: Normalenvektoren Simulationsgebiet Hechendorf

Luftbild Hechendorf mit Flugspur (weiß)



Rückstreukoeffizient der Flächenelemente



Rückstreukoeffizient / dB



Das Luftbild Abbildung 9.12 zeigt einen Ausschnitt von Hechendorf zwischen Sportplatz, Seestraße und Schluchtweg. Der Schluchtweg endet in einer Wendeplatte, die die Zufahrt zum Vereinsheim bietet. Am Schluchtweg fällt das mehrstöckiges Gebäude Nr. 62 auf. Für die zu simulierenden Messungen wurde ein 100 m langer Abschnitt der Spur 4 herausgegriffen, der in Weiß von Rechtswert 4439950 m bis 4440050 m ins Luftbild eingezeichnet ist. Im Testgebiet muß für jedes Flächenelement ein Rückstreukoeffizient σ_0 geschätzt werden. Das Luftbild läßt eine Klassifizierung der Flächenelemente in Objektklassen zu, die im vorigen Kapitel erläutert wurden. In Bild 9.13 ist das Ergebnis der Zuordnung der Rückstreukoeffizienten σ_0 als Grauwert dargestellt. Ein Vergleich der Rückstreukoeffizienten σ_0 mit der optischen Intensität zeigt für manche Objekte gewisse Ähnlichkeiten. Für Gras- und Baumflächen ist die optische Intensitätswert und der Rückstreukoeffizient recht ähnlich. Bei Häusern wurde der Rückstreuwert von Beton eingetragen. Dem Schluchtweg wurde der Rückstreuwert von Asphalt zugewiesen.

Der Ansatz, den Ausleuchtfleck in einzelne Elemente zu unterteilen, wird in vielen Simulationsmodellen unternommen. Clapp / 9 / setzte Modelle von rückstreuenden Oberflächen aus einer Vielzahl von Punktstreuern zusammen. Eines seiner Modelle hat folgenden Ansatz :

$$\sigma_0(\alpha) = \sigma_0 \cdot \cos^2 \alpha$$

Für einen ausleuchtenden Strahl mit dem Öffnungswinkel δ und dem Einfallswinkel α ist die einfallende Leistung durch die Projektionsfläche A_p konstant (Bild 9.13). Andererseits wächst die am Boden ausgeleuchtete Fläche A mit steigendem Einfallswinkel α , beziehungsweise die

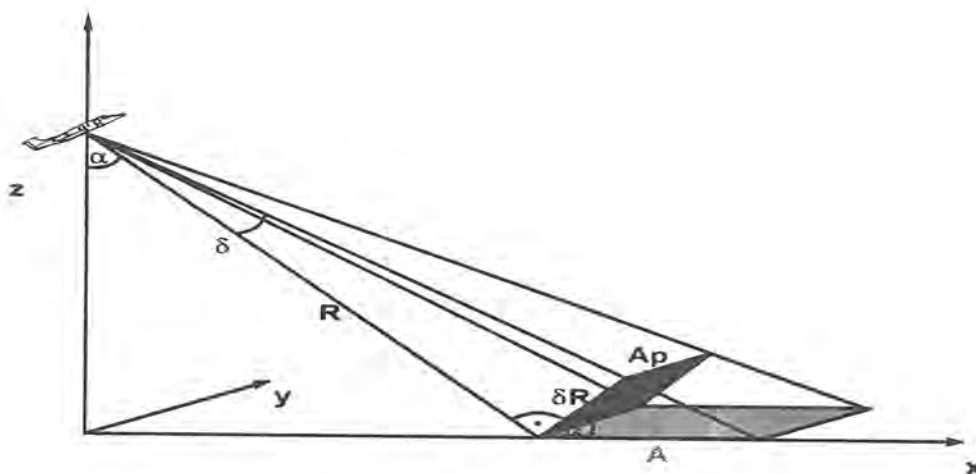


Bild 9.13: Ausgeleuchtete Fläche in Abhängigkeit vom Einfallswinkel

Leistung pro Fläche sinkt in dem Maße wie α ansteigt. Das bedeutet, daß der Rückstreuquerschnitt, der auf die Fläche bezogen ist, nicht unabhängig vom Einfallswinkel sein

kann. Der obige Modellansatz beschreibt, daß abhängig vom Einfallswinkel eine cosinusförmige Reduktion der aufgenommenen Leistung vorliegt, die aber omnidirektional wieder in den Raum abgegeben wird. Dies entspricht dem optische Gesetz für den Lambertschen Strahler.

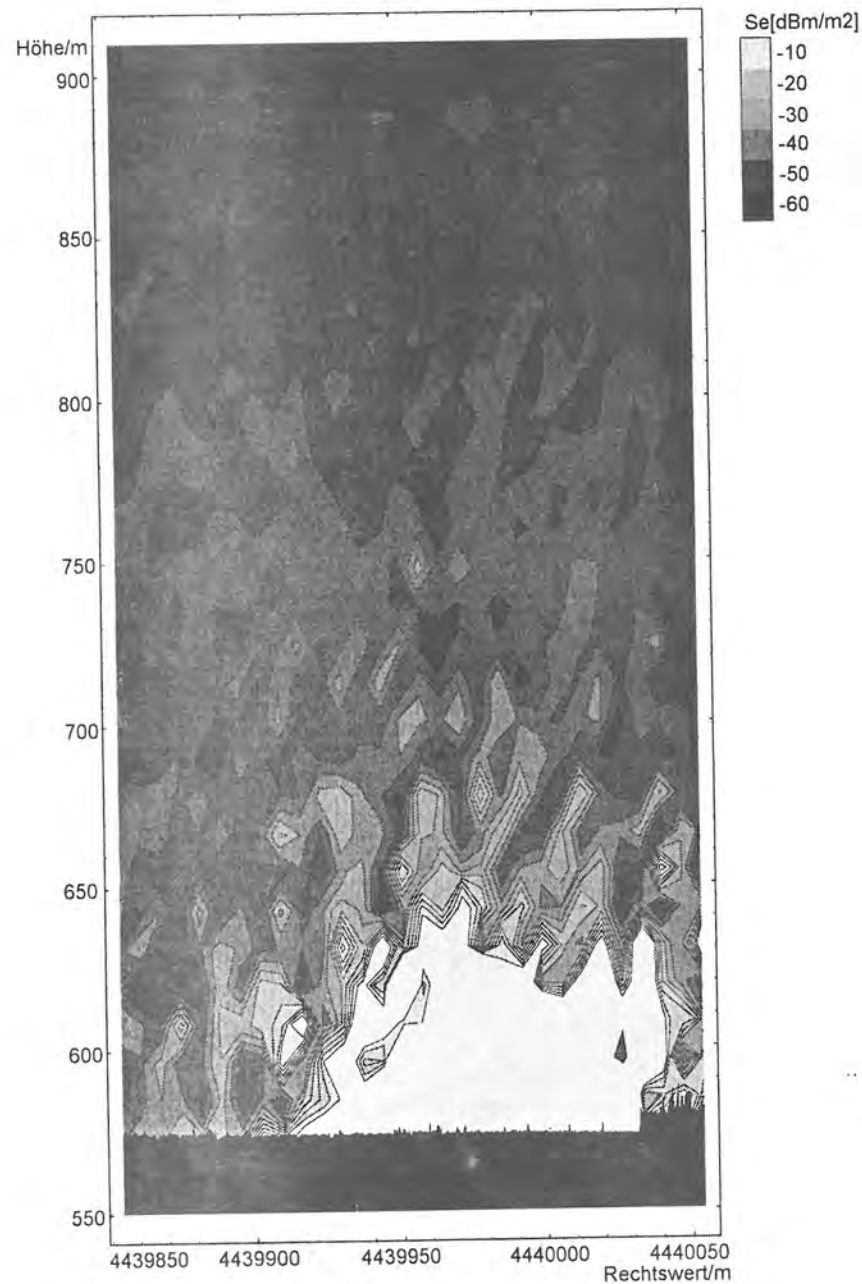


Bild 9.14: Rückgestreute Leistungsdichte beim Empfänger

Bild 9.14 zeigt einen Schnitt durch die vom Geländeausschnitt Hechendorf rückgestreute Verteilung der Echoleistung. Die Echoleistung nimmt in z-Richtung zum Flugzeug hin um

40 dB ab. Die angestrahlte Fläche reflektiert die Leistung mit einer räumlichen Charakteristik wieder in den Raum. Je nach Geländestruktur und Objekt ergibt sich eine andere Keulenform. Erst durch die Einbeziehung der Phase in die Modellierung konnte die Keulenform nachvollzogen werden. Durch die Berücksichtigung der Phase ergeben sich beim Aufsummieren der Leistungsbeiträge der einzelnen Flächenelemente Zonen der Auslöschung oder Verstärkung. Je statistischer die Verteilung der einzelnen Flächenelemente ist, desto mehr Energie verteilt sich von der Hauptkeule in die Nebenzipfel. Die helle Keule deutet auf entsprechend gute Rückstreuer hin, die Straße und die Wendeplatte. Um den Verlauf der simulierten Leistungsdichte Se den rückstreuenden Objekten zuordnen zu können, ist im Luftbild 9.12 die zugehörige Flugspur eingetragen.

Bild 9.15 zeigt den Vergleich der gemessenen und der simulierten Echoleistungen. Es wurden auf dem 100 m langen Ausschnitt der 4. Meßspur etwa 300 Messungen der rückgestreuten Leistung und der Geländehöhe aufgezeichnet. Die Simulation modelliert die vom Radar empfangene Echoleistung. Die Meßpunkte sind in schwarz eingetragen, die simulierten Punkte sind in grau gezeichnet. Die Zuordnung des Geländes zur Messung ist über das Luftbild 9.12 gegeben.

Bei Rechtswert 4439950 m erfaßt das Radaraltimeter den Sportplatzrasen. Die empfangene Echoleistung ist mit -55 dBm und -65 dBm eher gering. Im weiteren Verlauf der Meßspur steigt die empfangene Echoleistung auf - 45 dBm an, die Meßspur quert den Schluchtweg und die Wendeplatte. Die Empfangsleistung streut um mehr als 10 dB von Messung zu Messung. Im Ausleuchtfleck des Radaraltimeters befinden sich Objekte mit sehr unterschiedlichem Rückstreukoeffizienten, von Rasen mit $\sigma_0 = -10$ dB bis Asphalt, der mit $\sigma_0 = +20$ dB streut. Gegen Ende des Ausschnitts, bei Rechtswert 4440050 m sinkt die empfangene Echoleistung wieder stark ab. Die vom Ausleuchtfleck erfaßten Bäume absorbieren die Leistung und streuen relativ schlecht zurück. Insgesamt zeigen Messung und Simulation Übereinstimmung.

Die vom Radaraltimeter gemessene Echoleistung variiert von Messung zu Messung zwischen 5 dB und 10 dB. Näherungsweise wird zwischen zwei Messungen derselbe Ausleuchtfleck aufgezeichnet, die räumliche Verschiebung des Ausleuchtflecks beträgt im Mittel 30 cm. Für diese Schwankungen der Echoleistung sind einerseits Auslöschungs- und Verstärkungseffekte der reflektierenden Einzelstreuer im Ausleuchtfleck verantwortlich. Durch eine leichte Ortsveränderung addieren sich die unterschiedlichen Phasen der Einzelstreuer so, daß die Echoleistung sich deutlich verändern kann. Dieser Effekt verursacht ein Rauschen in der Größenordnung von 10 dB. Durch die Einbeziehung der Phase in die Simulation konnte dies Rauschen modelliert werden.

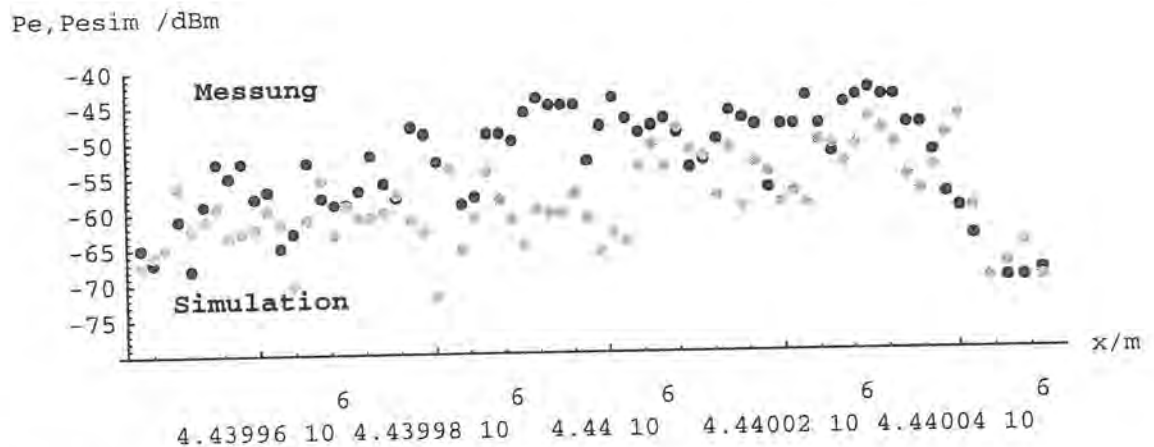


Bild 9.15: Gemessene und simulierte Echoleistung beim Überflug Hechendorf

Die Grenze der Simulation ergibt sich durch die sowohl in der Flächenauflösung, als auch in der Höhengenaugigkeit beschränkte Geometrie. Die Höhengenaugigkeit des DHM liegt im Dezimeterbereich, eine Ungenauigkeit von mehreren Wellenlängen geht in die Simulation ein. Daneben sind Mehrfachreflexionen und Beugungseffekte nicht berücksichtigt. Die Rückstreuereigenschaften der Objekte wurden sowohl in ihrer Amplitude σ_0 als auch in ihrem räumlichen Verlauf geschätzt. Diese Unzulänglichkeiten führen ebenfalls zu Abweichungen zwischen Messung und Simulation.

Die Simulation kann nicht den einzelnen, mit Rauschen behafteten Meßwert nachzeichnen, jedoch wurde die mittlere Empfangsleistung nachvollzogen. Der Effekt, daß Strukturen mit hohem Rückstreuoeffizienten weniger helle Flächenelemente überstrahlen, ließ sich in der Simulation ebenfalls nachvollziehen. Beispielsweise dominiert ein Fahrzeug auf einer Wiese die ganze Auflösungszelle. Gerade in bebautem Gebiet befinden sich in einer Auflösungszelle von 30 m meistens mehrere Objekte mit verschiedenen Reflexionseigenschaften. Anders als bei definierten Punktzielen, die eine eindeutig beschreibbare Systemantwort liefern, ist das Verhalten von verteilten Zielen nicht einfach vorherzusagen. Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Modell liefert einen möglichen Ansatz, das Rückstreuerverhalten von verteilten Zielen zu beschreiben und damit vorherzusagen.

5. Zusammenfassung

Die vorgestellten Meßkampagnen weisen die Leistungsfähigkeit der Radaraltimeterplattform als operationellen Sensor für die automatisierte dreidimensionale Geländeerfassung nach. Die Geländehöhe kann direkt aus der gemessenen Distanz zwischen Antenne und Boden gewonnen werden, wenn die Orientierung und die Position des Flugzeuges bekannt sind. Das in der Arbeit untersuchte Radaraltimeter bietet außer der Höhenmessung auch Information über die Intensität der rückgestreuten Leistung. Ferner ist die Altimeterplattform ein aktives Meßsystem, das unabhängig von Tageslicht und Witterung oder Dunst eingesetzt werden kann.

Das Radaraltimeter verfügt über eine mittlere Reichweite von 700 m über Grund bei Messungen über Land, so daß Kartierungen bis zu Mittelgebirgsgebieten möglich sind. Bei der Vermessung der Meerestopographie sind höhere Reichweiten möglich, weil Wasser einen wesentlich größeren Rückstreuquerschnitt besitzt. Das System verfügt über eine 2.5 stündige Datenaufzeichnungskapazität, was einer Kartierungsfläche von beispielsweise 2 km auf 10 km entspricht. Die Altimeterplattform wurde in 10 verschiedenen Flugkampagnen eingesetzt und arbeitete zuverlässig. Somit kann das System als operationell eingestuft werden.

Für die topographische Erfassung von Landoderflächen bedarf es einer hohen Flächenauflösung, um Detailstrukturen der Topographie zu erfassen. Eine große Höhendynamik und eine große Rückstreuvariation der Ziele kennzeichnet den Landeinsatz. Da das Radaraltimeter über einen Dynamikbereich von 50 dB verfügt, können extrem helle ebenso wie sehr schwache Ziele erfaßt werden. Eine schnelle AGC regelt diese Unterschiede aus, um für die Höhenmessung den optimalen Signalpegel zur Verfügung zu haben.

Im einzelnen schlüsselt sich das Meßverhalten des Radaraltimeters bezüglich der verschiedenen Zielklassen folgendermaßen auf:

Wasserflächen bilden sich ausgezeichnet in den Radardaten ab. Es konnten Meßgenauigkeiten von einem mittleren Fehler von 0.1 m und einer Höhenstandardabweichung von 11 cm nachgewiesen werden. Das Radaraltimeter ist demnach besonders für die Vermessung von Meerestopographie geeignet.

Ebene Flächen wie Plätze, Verkehrswege oder Flachdächer werden sehr gut erfaßt und bilden sich hell im Rückstreubild ab. Der jeweils gemessene Höhenwert kann eindeutig zugeordnet werden und ist mit geringem Rauschen versehen. So wurden beispielsweise die verschiedenen Fahrbahnen am Autobahnkreuz Oberpfaffenhofen in ihrer Ausdehnung und Höhe korrekt erfaßt. Von den gemessenen Objekten wurden stets die erhabenen Stellen aufgezeichnet. Bei Objekten mit hoher Rückstreuung tritt jedoch ein Effekt der Überstrahlung ein. Sobald diese hellen Objekte in den Ausleuchtfleck eintauchen, dominieren sie die Rückstreuung und Höhenmessung, während Objekte mit geringerem Rückstreukoeffizienten dann nicht in die

Messung eingehen. Bei Hausobjekten, die in ihren Abmessungen kleiner als der Durchmesser des Ausleuchtflecks sind, wird in der Messung eine Unschärfe bei den Hauskanten festgestellt. Am Beispiel der DLR-Gebäude wurde gezeigt, daß die Hausobjekte von einer gewissen Unsicherheitszone umgeben sind, in der Bodenpunkte und Dachpunkte gleichermaßen registriert werden. Schräge Dachflächen werden im allgemeinen schlecht erfaßt. Die Sendeleistung wird seitlich wegreflektiert, was eine große Streuung der Höhenwerte zur Folge hat.

Landwirtschaftsflächen, die je nach Feuchtigkeitsgehalt und Nutzungsart verschiedene Rückstreuquerschnitte besitzen, wurden gut erfaßt. Am Beispiel Tiefenbronn wurde gezeigt, daß sogar einzelne Feldstrukturen über die Echoleistung zu detektieren sind. Es zeigte sich, daß das Radaraltimeter zur Rauigkeitsmessung verwendet werden kann, falls die Rauigkeit das Eigenrauschen der Radarmessung signifikant übersteigt. Weiter wurde deutlich, daß alle natürlichen Bodenformen in ihrem Reliefverlauf korrekt erfaßt wurden. Selbst bei stark variierendem Geländeverlauf, wie sie beispielsweise bei Tagebauflächen oder Kiesabbaugruben auftreten, geben die Radardaten den Geländeverlauf zuverlässig wieder. Freistehende Bäume und Wald werden gut von der Radarmessung wiedergegeben. Dabei werden sowohl die Baumkronen als auch die Bodenpunkte gemessen. Wie bei der Messung Andechs gezeigt wurde, enthielt die Radarmessung selbst bei dichtem Baumbestand ausreichend Bodenpunkte für die Rekonstruktion des Geländes.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß das Radaraltimeter einen neuartigen Sensor für die topographische Kartierung darstellt. Obwohl das Radaraltimeter als Profiler arbeitet, ist bei genügend dichter Spurlage flächenhafte Geländeerfassung möglich. In der Arbeit wurde gezeigt, daß durch Interpolation der gemessenen Profillinien digitale Geländemodelle mit einer Rasterweite von 100 m und einer absoluten Höhengenaugkeit von 1 m generiert werden können. Bei Kalibrationsmessungen konnte eine Standardabweichung der Höhe von 10 cm nachgewiesen werden. In Kombination mit dem am Insitut für Navigation entwickelten Laserscanner kann die Profilmessung zu einer vollständig flächendeckenden Geländeerfassung erweitert werden. Durch die bessere Auflösung des Laserscanners ergeben sich dann für das Vermessungssystem neue Anwendungsbereiche bis hin zur Gebäudeerfassung. In der Arbeit wurden digitale Geländemodelle von vier Testgebieten vorgestellt und anhand von Referenzen auf ihre Genauigkeit überprüft. In den Meßkampagnen wurde die Detektionsqualität des Radaraltimeters bei unterschiedlichen topographischen Oberflächen untersucht. Die geometrischen Verhältnisse werden durch die Höhenmessung wiedergegeben, die radiometrischen Eigenschaften werden durch die Messung der Echoleistung erfaßt.

6. Literaturverzeichnis

- / 1 / C. Elachi, Spaceborne Radar Remote Sensing : Applications and Techniques, IEEE Press, New-York, 1988
- / 2 / H.Kramer: Observation of the Earth and Its Enviroment, Survey of Missions Springer Verlag, 2.nd Edition, Heidelberg, 1994
- / 3 / Ph. Hartl et al: Earth Observation by means of SAR, Present State and Future Possibilities, in Photogrammetric Week '95, Eds. D.Fritsch, D.Hobbie Wichmann Verlag, Heidelberg 1995, pp.127-137.
- / 4 / Y.H. Kim: Systementwurf und Realisierung eines hochgenauen Altimeters, Dissertation am Institut für Navigation, 1990
- / 5 / F.Witte: The Archimedes IIa experiment: remote sensing of oil spills in the North Sea, International Journal of Remote Sensing, 1991, Vol12, pp 809-821
- / 6 / M. Hallikainen et al: A Helicopter-Borne Eight Channel Ranging Scatterometer for Remote Sensing, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, Taylor and Francis, London, 1993, pp 161-169
- / 7 / C.L.Parsons,E.Walsh: Off-nadir altimetry IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol27, Taylor and Francis, London, 1989, pp 215-224
- / 8 / M.Scolnik: Radar Handbook, McGraw-Hill, New-York, NY, 1977
- / 9 / Ulaby, Moore, Fung: Microwave Remote Sensing, Vol I,II,III Addison-Wesely, Reading, Mass, 1982
- / 10 / G.Ruck et al: Radar Cross Section Handbook, Vol I,II Plenum Press, New-York, NY, 1970
- / 11 / Holmes: Coherent Spread Spectrum Systems, Witney Verlag, Malabar, Florida, 1982

- / 12 / Ph. Hartl: Fernwirktechnik der Raumfahrt,
Springer Verlag, Heidelberg, 1988
- / 13 / E.Löffler: Geographie und Fernerkundung
Teubner Verlag, Stuttgart, 1994
- / 14 / R.Messner: Das PC-Hardwarebuch
Addison Wessley, Reading, Mass, 1992, 1.Auflage
- / 15 / E.Bauer: Einführung in die Radartechnik,
Teubner Verlag, Stuttgart, 1985
- / 16 / Ulaby et al: Backscatter Response of Roads and Roadside Surfaces
Remote Sensing Lab- Technical Report 377-1, University of Cansas
- / 17 / Hewelett Packard: Understanding Frequency Counter Specifications
Application Note 200-4, Electronic Counter Series, 1990
- / 18 / Guide Technologie Inc: Operation Manual, 1990
San Jose, CA
- / 19 / S.Bhagavathula: Ein Radarscatterometer zur Polarisationsanalyse von
Fernerkundungssignalen,
Dissertation am Institut für Navigation, 1993
- / 20 / A.Schroth, V.Stein: Moderne numerische Verfahren zur Lösung von Antennen und
Streuproblemen,
Oldenbourg-Verlag, München, 1985
- / 21 / B.Forsell: Radionavigation Systems,
Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, NJ, 1991
- / 22 / D.K. Barton: Handbook of Radarmeasurement
Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, NJ, 1969
- / 23 / P.Beckmann, A.Spizzichino: The scattering of electromagnetic waves from rough
surfaces,
Pergamon Press, Oxford, 1987
- / 25 / R.N. Colwell: Manual of Remote Sensing, Vol I,
American Society of Remote Sensing, Sheridan Press, Falls Church, 1983

- / 26 / F. Ulaby, C.Elachi: Radar Polarimetry for Geoscience Applications
Artech House, London, 1990
- / 27 / N.Levanon: Radar Principles
Wiley Interscience Publication, Chichester, 1988
- / 28 / A.Fung: Microwave Scattering and Emission Models and their Applications,
Artech House, London, 1994
- / 29 / D.K. Barton: Modern Radarsystem Analysis
Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, NJ, 1988
- / 30 / E.Knott et al: Radar Cross Section
Artech House, London, 1985
- / 31 / H.Cole: Understanding Radar
Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1992
- / 32 / M.Carpentier: Principles of Modern Radar Systems
Artech House, London, 1988
- / 33 / W. Morchin: Radar Engineer's Sourcebook
Artech House, London, 1993
- / 34 / A.Ludloff: Handbuch Radar und Radarsignalverarbeitung
Vieweg Verlag, Braunschweig, 1993
- / 35 / D.Meyer: Radar Target Detection
Electrical Science Series, Acad. Press, New-York, NY, 1973
- / 36 / SFB 228: Arbeits- und Ergebnisbericht 1990-1992 des SFB 228,
Universität Stuttgart, 1992
- / 37 / W.Soehne,O.Heinze,C.Hug,U.Kälberer: Positioning and Orientation of a Laser/Radar -
Altimeter Survey Flight with GPS and INS
Proceedings of the Symposium Gyro Technologie, Stuttgart; September 1993.
- / 38 / U.Kälberer: Topographic Mapping by an Airborne Microwave Altimeter Platform
Proceedings of the 1.International Airborne Remote Sensing Conference and
Exhibition, Straßbourg, France; 11.-15. September 1994

- / 39 / O. Heinze, W. Söhne: Precise Positioning and Orientation of an Integrated Sensor System with GPS and INS during a Flight Application,
International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part 1, 1994
- / 40 / C. Hug: The Scanning Laser Altitude and Reflectance Sensor - An Instrument for Efficient 3D Terrain Survey,
Proceedings of the ISPRS Symposium 'Primary Data Acquisition and Evaluation', Sept. 12-15, 1994, Conlo, Italy; Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part 1, pp 100-107
- / 41 / C.Hug, U.Kälberer: Autonomous 3-D Topography Survey with the Airborne Terrain Survey System,
Proceedings of the 3 rd International Workshop 'High Precision Navigation', April 3-6, 1995, Stuttgart
- / 42 / U.Kälberer: An Airborne Microwave Altimeter for Topographic Mapping - Campaigns and Results, Eds. K.Linkwitz, U.Hangleiter,
3 rd International Workshop 'High Precision Navigation', April 3-6, 1995, Stuttgart
- / 43 / A.Chatterjee, P.K.Das, L.B. Milstein: The use of SAW convolvers in spread-spectrum and othe signal processing applications,
IEEE Transactions Sonics Ultrason., Vol. 32, No. 5, Sept. 1985, pp.745-759
- / 44 / H.P. Graßl: Oberflächenwellen- Bauelement als Convolver,
Elektronik 6/22, März 1985, pp 61-66
- / 45 / J.H. Cafarella et al. : Programable Matched Filtering with Acustoelectric convolvers in spread-spectrum systems,
IEEE Ultrasonics Syposium Proceedings, New York, 1973, pp 205-208
- / 46 / J.Bezdek: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms,
Plenum Press, New-York, NY, 1987
- / 47 / Bothe : Fuzzy Logic Einführung in Theorie und Anwendungen,
Springer-Verlag, Heidelberg, 1993
- / 48 / T.Tilli : Fuzzy-Logik Grundlagen, Anwendungen, Hard- und Software,
Franzis-Verlag, München, 1992

- / 49 / T.Tilli : Mustererkennung mit Fuzzy-Logik, Analysieren, klassifizieren, erkennen und diagnostizieren,
Franzis-Verlag, München, 1993
- / 50 / H. Preuß: Fuzzy Control - heuristische Regelung mittels unscharfer Logik,
atp - Automatisierungstechnische Praxis 34, Oldenbourg Verlag, München, 1992/ 4,
- / 51 / E. Kreyszig : Statistische Methoden und ihre Anwendungen,
7.Auflage, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1992
- / 52 / Meinke, Grumlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik I,II,III
Springer Verlag, Heidelberg, 1992
- / 53 / K.Kraus, Photogrammetrie,
Dümmler Verlag, Bonn, 1982
- / 54 / Johnson, Jasik: Antenna Engineering Handbook,
McGraw-Hill, New-York, NY, 1961
- / 55 / B.Heck: Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung
Wichmann-Verlag, Karlsruhe, 1987
- / 56 / C.Bidwell , et al. : Radar return from the vertical for Ground and Water Surface,
Sandia Corp. Monograph, SCR-107, 1968
- / 57 / DLR: AMI Calibration Study, Mid Term Report Vol.2
ESTEC Contract, 1983
- / 58 / Statistik von Baden-Württemberg, Band 424,
Die Land - und Forstwirtschaft, 1989, Stat. Landesamt Ba.- Wü.
- / 59 / Cosgriff, Peake, Taylor: Scattering for Sensor System Data, Terrain Handbook II,
Ohio State University, 1959
- / 60 / Ranson, Soachi: C-Band Microwave Scattering from Small Balsam Firms,
IEEE Transactions on Geoscience, New-York, Sept. 1992.
- / 61 / C.Hug: Entwicklung und Erprobung eines abbildenden Laseraltimeters für den
Flugeinsatz unter Verwendung des Mehrfrequenz Phasenvergleichsverfahrens.
Dissertation am Institut für Navigation, Universität Stuttgart, 1996
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, München

- / 62 / J.Lindenberger: Laser Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme
Dissertation am Insitut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, 1991
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, München

- / 63 / O.Heinze: Aufbau eines operablen inertailen Vermessungssystems zur Online-
Verarbeitung in der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown INS
Dissertation am Insitut für Physikalische Geodäsie, TH Darmstadt
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, München, 1996

- / 64 / Ph. Hartl, Ch. Hug, U.Kälberer, A. Wehr:
Integriertes Laser-/Radar zur Erfassung von Geländeoberflächen
Allgemeine Vermessungs Nachrichten, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 2/ 96

- / 65 / U.Kälberer: Bericht des Teilprojekts A3
im Abschlußbericht des SFB 228, Hochgenaue Navigation,
Universität Stuttgart, 1996

- / 66 / O.Heinze, W.Söhne: Precise Positioning and Orientation of an Integrated sensor System
with GPS and INS during Flight Application
Proceedings of the ISPRS Symposium 'Primary Data Acquisition and Evaluation',
Sept. 12-15, 1994, Como, Italy; Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,

- / 67 / J.Kilian: Calibration Methods for Airborne Laser Systems
Proceedings of the ISPRS Symposium 'Primary Data Acquisition and Evaluation',
Sept. 12-15, 1994, Conlo, Italy; Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,

- / 68 / Ackermann, Englich, Kilian: Die Laser Profil Befliegung Gammertingen,
Zeitschrift für Vermessungswesen, Wittwer-Verlag, Stuttgart, 1994

- / 69 / W. Söhne: Ein hybrides System in der Geodäsie- Einsatz des Navstar GPS mit dem
Inertial Navigations System Lasernav II für kinematische Punktbestimmung und
Orientierung
Dissertation am Insitut für Physikalische Geodäsie, TH Darmstadt
Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 463, München, 1996

Lebenslauf

Name: Ulrich Kälberer
Geboren: 11.03.64 in Hannover
Familienstand: Verheiratet mit Birgit Kälberer, geb. Nagengast
1 Kind, Debora Kälberer

Werdegang: 1970 - 1983 Gymnasium in Metzingen
1984 - 1987 Grundstudium Elektrotechnik an der Universität Stuttgart
1987 - 1991 Hauptstudium Elektrotechnik an der Universität Stuttgart
1992- 1996 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Navigation
der Universität Stuttgart bei Prof. Dr. Ph. Hartl
ab 01.04.96 Systemingenieur bei Alcatel Air Navigation Systems

Bisher erschienene Hefte:

(Die Hefte erscheinen in zwangloser Folge)

Nr.	1	(1976)	Vorträge des Lehrgangs Numerische Photogrammetrie (III), Esslingen 1975 - vergriffen
Nr.	2	(1976)	Vorträge der 35. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1975
Nr.	3	(1976)	Contributions of the XIIIth ISP-Congress of the Photogrammetric Institute, Helsinki 1976 - vergriffen
Nr.	4	(1977)	Vorträge der 36. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1977
Nr.	5	(1979)	E. Seeger: Das Orthophotoverfahren in der Architekturphoto- grammetrie, Dissertation
Nr.	6	(1980)	Vorträge der 37. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1979
Nr.	7	(1981)	Vorträge des Lehrgangs Numerische Photogrammetrie (IV): Grobe Datenfehler und die Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung, Stuttgart 1980 - vergriffen
Nr.	8	(1982)	Vorträge der 38. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1981
Nr.	9	(1984)	Vorträge der 39. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1983
Nr.	10	(1984)	Contributions to the XVth ISPRS-Congress of the Photogramme- tric Institute, Rio de Janeiro 1984
Nr.	11	(1986)	Vorträge der 40. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1985
Nr.	12	(1987)	Vorträge der 41. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1987
Nr.	13	(1989)	Vorträge der 42. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1989
Nr.	14	(1989)	Festschrift - Friedrich Ackermann zum 60. Geburtstag, Stuttgart 1989
Nr.	15	(1991)	Vorträge der 43. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1991
Nr.	16	(1992)	Vorträge zum Workshop "Geoinformationssysteme in der Ausbil- dung", Stuttgart 1992

- | | | |
|--------|--------|---|
| Nr. 1 | (1987) | K. Eren: Geodetic Network Adjustment Using GPS Triple Difference Observations and a Priori Stochastic Information |
| Nr. 2 | (1987) | F.W.O. Aduol: Detection of Outliers in Geodetic Networks Using Principal Component Analysis and Bias Parameter Estimation |
| Nr. 3 | (1987) | M. Lindlohr: SIMALS; SIMulation, Analysis and Synthesis of General Vector Fields |
| Nr. 4 | (1988) | W. Pachelski, D. Lapucha, K. Budde: GPS-Network Analysis: The Influence of Stochastic Prior Information of Orbital Elements on Ground Station Position Measures |
| Nr. 5 | (1988) | W. Lindlohr: PUMA; Processing of Undifferenced GPS Carrier Beat Phase Measurements and Adjustment Computations |
| Nr. 6 | (1988) | R.A. Snay, A.R. Drew: Supplementing Geodetic Data with Prior Information for Crustal Deformation in the Imperial Valley, California 1988 |
| Nr. 7 | (1989) | H.-W. Mikolaïski, P. Braun: Dokumentation der Programme zur Behandlung beliebig langer ganzer Zahlen und Brüche |
| Nr. 8 | (1989) | H.-W. Mikolaïski: Wigner 3j Symbole, berechnet mittels Ganzzahlarithmetik |
| Nr. 9 | (1989) | H.-W. Mikolaïski: Dokumentation der Programme zur Multiplikation nach Kugelfunktionen entwickelter Felder |
| Nr. 10 | (1989) | H.-W. Mikolaïski, P. Braun: Dokumentation der Programme zur Differentiation und zur Lösung des Dirichlet-Problems nach Kugelfunktionen entwickelter Felder |
| Nr. 11 | (1990) | L. Kubácková, L. Kubáček: Elimination Transformation of an Observation Vector preserving Information on the First and Second Order Parameters |
| Nr. 12 | (1990) | L. Kubácková: Locally best Estimators of the Second Order Parameters in Fundamental Replicated Structures with Nuisance Parameters |
| Nr. 13 | (1991) | G. Joos, K. Jörg: Inversion of Two Bivariate Power Series Using Symbolic Formula Manipulation |
| Nr. 14 | (1991) | B. Heck, K. Seitz: Nonlinear Effects in the Scalar Free Geodetic Boundary Value Problem |
| Nr. 15 | (1991) | B. Schaffrin: Generating Robustified Kalman Filters for the Integration of GPS and INS |
| Nr. 16 | (1992) | Z. Martinec: The Role of the Irregularities of the Earth's Topography on the Tidally Induced Elastic Stress Distribution within the Earth |
| Nr. 17 | (1992) | B. Middel: Computation of the Gravitational Potential of Topographic-Isostatic Masses |
| Nr. 18 | (1993) | M.I. Yurkina, M.D. Bondarewa: Einige Probleme der Erdrotationsermittlung |
| Nr. 19 | (1993) | L. Kubácková: Multiepoch Linear Regression Models |
| Nr. 20 | (1993) | O.S. Salychev: Wave and Scalar Estimation Approaches for GPS/INS Integration |

- | | |
|-------------------|--|
| Nr. 1994.1 (1994) | H.-J. Euler: Generation of Suitable Coordinate Updates for an Inertial Navigation System |
| Nr. 1994.2 (1994) | W. Pachelski: Possible Uses of Natural (Barycentric) Coordinates for Positioning |
| Nr. 1995.1 (1995) | J. Engels, E.W. Grafarend, P. Sorcik: The Gravitational Field of Topographic-Isostatic Masses and the Hypothesis of Mass Condensation - Part I & II |
| Nr. 1995.2 (1995) | Minutes of the ISPRS Joint Workshop on Integrated Acquisition and Interpretation of Photogrammetric Data |
| Nr. 1996.1 (1996) | Festschrift für Klaus Linkwitz anlässlich der Abschiedsvorlesung im Wintersemester 1995/96; herausgegeben von Eberhard Baumann, Ulrich Hangleiter und Wolfgang Möhlenbrink |
| Nr. 1996.2 (1996) | J. Shan: Edge Detection Algorithms in Photogrammetry and Computer Vision |
| Nr. 1997.1 (1997) | Erste Geodätische Woche Stuttgart, 7. - 12. Oktober 1996; herausgegeben von A. Gilbert, E.W. Grafarend |
| Nr. 1997.2 (1997) | U. Kälberer: Untersuchungen zur flugzeuggetragenen Radaraltimetrie |