

Entwicklung einer Methode zur automatischen
Quantifizierung des Vogelzuges im Bereich von Offs-
hore-Windparks und der Barrierewirkung der techni-
schen Anlagen für den Vogelzug mittels
fixed beam Radar



Abschlussbericht
November 2009

Dieses Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0327632 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Zitiervorschlag:

Neumann, R., Kube, J., Liechti, F., Steuri, T., Wendeln, H. & H. Sordyl (2009):

Entwicklung einer Methode zur automatischen Quantifizierung des Vogelzuges im Bereich von Offshore-Windparks und der Barrierewirkung der technischen Anlagen für den Vogelzug mittels fast fixed beam Radar. Abschlußbericht. Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 0327632). Neu Broderstorf.



Alte Dorfstr. 11
18184 Neu Broderstorf
Tel. 038204 618-0
Fax 038204 618-10
Email info@ifaoe.de
Internet www.ifaoe.de

IfAÖ Forschungsgesellschaft mbH:

Geschäftsführer: Prof. Dr. H. Sordyl
Projektleiter: Dr. J. Kube
Bearbeiter: Dipl. Biol. R. Neumann
Dr. H. Wendeln

Unterauftrag:

Softwarebüro Steuri GmbH
T. Steuri
Gommen 338
CH-4950 Huttwil

in Kooperation mit:

Schweizerische Vogelwarte Sempach
Dr. F. Liechti
CH-6204 Sempach

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht werden die Entwicklung und Kalibrierung eines pencil beam Radars beschrieben. Dieses Radar basiert auf einem herkömmlichen Schiffsradar, welches im fixed beam Modus, d.h. mit fest stehender Antenne, betrieben wird. In einem Freilandtest mit dem „Bird Scan System M1“ genannten Prototypen konnte gezeigt werden, dass ein nahezu wartungsfreier und verlässlicher Dauerbetrieb in Offshore-Windparks möglich ist. Durch synchrone Parallemessungen mit dem Zielfolgeradar „Superfledermaus“ der schweizerischen Vogelwarte Sempach wurde der fixed beam Radar Prototyp für die Vogelzugerfassung kalibriert. Dadurch können Zugraten sehr verlässlich bestimmt werden.

Beim Freilandtest wurde ebenfalls parallel mit einem Schiffsradar (25 kW Bridgemaster) gemessen, welches derzeit standardmäßig zur Quantifizierung des Vogelzugs im Rahmen von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen von Offshore-Windenergieanlagen eingesetzt wird. Dieses Radar rotiert in vertikaler Stellung und gibt Informationen über Zugraten und Höhenverteilungen. Durch die langfristigen Vergleichsmessungen ließen sich diverse Vorteile identifizieren, die ein fixed beam Radar gegenüber einem vertikal rotierenden Schiffsradar aufweist:

1. Beim „Bird Scan System M1“ werden keine internen Filter verwendet. Daher erfolgt eine direkte Digitalisierung des Radarrohsignals. Die Filterung der Daten geschieht erst softwareseitig und ist deshalb genau nachvollziehbar.
2. Die aufgezeichnete Echosignatur (Variation der Echointensität über die Zeit) ermöglicht eine Unterscheidung von Vögeln und Nicht-Vögeln und erlaubt dadurch eine genauere Ermittlung der Zugrate.
3. Durch die eng gebündelte Radarkeule ist das Stichprobenvolumen für die Zugratenberechnung genau definiert.
4. Die enge Bündelung des Strahls führt im Vergleich zum Schiffsradar mit gleicher Leistung zu einer fast dreifach größeren Reichweite für die Erfassung von Vögeln.
5. Durch die scharfe Bündelung des Radarstrahls können flach fliegende Vögel deutlich besser erfasst werden als mit dem Schiffsradar.

Um den Einfluss zweier wesentlicher Störfaktoren bei Radarmessungen im Offshore-Bereich – Reflexion der Radarstrahlen an Wellen (*sea clutter*) und die Störungen durch Windenergieanlagen – zu untersuchen, wurden zwei weitere Feldversuche durchgeführt. Eine Überlagerung von Echos durch *sea clutter* ist danach nicht zu erwarten. Windenergieanlagen verursachen Störungen, die Echos überlagern können. Diese sind jedoch klar erkennbar und können automatisch herausgefiltert werden. Durch Messungen in verschiedenen Elevationen bleibt nahezu der ganze Höhenbereich auswertbar.

Die Auswertungssoftware ermöglicht in mehreren Schritten eine automatische Echoanalyse. Nach manuellem Erstellen eines Trainingsdatensatzes werden automatisiert Vögel von Nicht-Vögeln unterschieden (Flügelschlagmuster) und in Vogelgruppen eingeteilt (Flügelschlagmuster und -frequenz). Im Vergleich zur manuellen Auswertung von Schiffsradarbildern wird die Datenanalyse dadurch enorm beschleunigt und weniger personalkostenintensiv.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Radar – Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Funktionsweise – Technische Grundlagen	3
2.2 Radar in der ornithologischen Forschung	4
2.2.1 Typen von Radargeräten	6
2.2.1.1 Fächerstrahlradar	6
2.2.1.2 pencil beam Radar	7
2.2.2 Zugratenbestimmung mittels Radar	8
3 Material und Methode	10
3.1 fixed beam Prototyp – Bird Scan	10
3.1.1 Technische Daten	10
3.1.1.1 Radargerät	10
3.1.1.2 Registriereinheit	13
3.1.2 Theoretische Leistung	13
3.1.3 Praktischer Test	13
3.1.3.1 Langzeittest auf Rügen	13
3.1.3.2 Parallelmessung mit dem Zielfolgeradar „Superfledermaus“	15
3.1.4 Sonstige Testmessungen	16
3.1.4.1 Wellenbewegungen	16
3.1.4.2 Störungen durch vertikale Strukturen	17
3.2 Software	18
3.2.1 Erfassungsssoftware BIRDSCAN	18
3.2.2 Auswertungssoftware <i>fixbeam</i>	20
3.2.3 Berechnung der MTR	23
4 Ergebnis	24

4.1	Praxistest	24
4.1.1	Praktische Überprüfung der Leistung	24
4.2	Parallelmessung mit dem Zielfolgeradar „Superfledermaus“	26
4.2.1	Keulenvolumen des Bird Scan	27
4.2.1.1	Öffnungswinkel	28
4.2.1.2	Keulenform außerhalb des STC-Bereichs	29
4.3	Vergleich der Zugraten	32
4.3.1	Vergleich zwischen pencil beam Radargeräten	32
4.3.2	Vergleich zwischen pencil beam Radar und Vertikalradar	34
4.4	Sonstige Testmessungen	39
4.4.1	Wellenbewegungen	39
4.4.2	Störungen durch vertikale Strukturen	40
4.5	Aufgetretene Probleme	41
5	Schlussfolgerungen	43
5.1	Direkte Digitalisierung des Radarrohsignals	43
5.2	Echoanalyse und Automatisierung der Auswertung	44
5.3	Berechnung der Zugrate	44
5.3.1	Definiertes Keulenvolumen	44
5.3.2	Erfassungsleistung	45
5.3.3	Einfluss der Zugrichtung	46
5.4	Störungen durch <i>clutter</i>	46
6	Ausblick	49
7	Danksagung	50
8	Literatur	51

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: wichtige Termini in der Radarornithologie	4
Tab. 2: technische Spezifikationen des fixed beam Prototyps Bird Scan	10
Tab. 3: Übersicht über die für die Ermittlung des Keulenvolumens des Bird Scan notwendigen Messgrößen. Für den Bird Scan ist Anzahl Vögel aufgrund der unterschiedlichen Messdauer mit dem mit Faktor 0,873 angepasst worden (BS = Bird Scan, SFM = Superfledermaus)	30
Tab. 4: Zusammenfassende Gegenüberstellung des bisher für Begleituntersuchungen verwendeten Schiffsradargeräte und des fixed beam Radars	48

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Wichtige Kenngrößen bei der Erfassung mit Radar (verändert nach LARKIN 2005)	4
Abb. 2: Technische Zeichnung mit Maßen von Radar und Antenne sowie Radom (gestrichelte Doppellinie)	11
Abb. 3: Antennenjoch von hinten ohne Parabolspiegel und Feed (Nullstellung der Elevation).	12
Abb. 4: Antennenjoch von vorn nach Montage von Parabolspiegel und Feed (hohe Elevation).	12
Abb. 5: Anordnung der Radargeräte bei der Parallelmessung auf Rügen im Herbst 2008 (Mitte: Bird Scan unter Radom; Rechts: Bridgemaster 25 kW Vertikalradar).	14
Abb. 6: Nicht maßstabsgerechte, schematische Darstellung der fixed beam Messungen in verschiedenen Elevationen (Höhenschicht 101 – 200 m exemplarisch mit Vögeln). Je nach Elevation wird pro Höhenschicht ein unterschiedlich großer Bereich überwacht.	15
Abb. 7: Blickrichtung der ersten Testmessung (Elevation: 100%). Im Hintergrund die drei Windenergieanlagen und ein Sendemast.	18
Abb. 8: Oberfläche der Betriebssoftware BIRDSCAN; der Sender ist angeschaltet (<i>Transmitter Enabled</i>) und die Antenne steht auf der Elevation 200%.	19
Abb. 9: Oberfläche der Auswertungssoftware <i>fixbeam</i> ; der große blaue Kasten stellt eine als komprimiertes, zweidimensionales Bild visualisierte Radarmessung mit der Zeit auf der X- und der Entfernung zum Sender auf der Y-Achse dar. Der weiße Pfeil markiert ein Echo, das etwa zwischen 140 und 155 s nach Beginn der Messung die Radarkeule in einer Entfernung von rund 2300 m passiert hat.	21
Abb. 10: Oberfläche der Auswertungssoftware <i>fixbeam</i> ; die gelb-orange Fläche betrifft Regenechos, die durch den schmalen roten Kasten als nicht auswertbarer Raum markiert worden sind. Die waagerechten, grünen Linien sind durch eine Maske versehene, permanente Clutter.	21
Abb. 11: Oberfläche der Auswertungssoftware <i>fixbeam</i> ; das kleine weiße Kästchen markiert das Echo mit der ID-Nummer 37. Im linken unteren Kasten wird die Signatur (typischer Singvogel mit Schlagphasen und –pausen) sichtbar. Die Frequenzanalyse ergibt 14,3 Hz, was einem Singvogel etwa in der Größe eines Rotkehlchens entspricht. Gut erkennbar ist eine Frequenzverdopplung bei ca. 30 Hz.	22

- Abb. 12: Bestimmen der maximalen Reichweite pro auf 2000 m standardisierter Echogrößenklasse. Dargestellt sind alle von der Autoauswertung als Vögel klassierten Echos der Radarerfassung im Herbst 2008 ($n = 44.876$). Der untere Pfeil markiert die Erfassungsgrenze für die kleinsten Singvögel bei ungünstigstem *aspect*. Der obere Pfeil gibt die Erfassungsgrenze von Vögeln bei einem Streuquerschnitt von etwa 10 cm^2 an. 25
- Abb. 13: Beziehung zwischen Echogrößenklasse und Frequenz (Daten des Trainingsdatensatzes für Herbst 2008, $n = 994$ Vögel) 26
- Abb. 14: Parallelmessung mit der Superfledermaus: Korrigierte Anzahl Vögel pro 300 m Distanzschrift (nur Messungen bei 100%). Die Erfassungsleistung des Bird Scan Prototypen geht ab 2000 m etwas, ab 3000 m deutlich zurück. 27
- Abb. 15: Parallelmessung mit der Superfledermaus: korrigierte Anzahl Vögel bei 100% und 300% pro 300 m Distanzschrift bis 2100 m. Bei 100% wurde die Distanzklasse 300 m aufgrund von starken *clutter*-Überlagerungen weggelassen. Der Anstieg der Regressionsgeraden zeigt einen nahezu identischen Verlauf bei beiden Radargeräten. 29
- Abb. 16: Keulendurchmesser des Bird Scan pro 300 m Entfernungsklasse (siehe Tab. 3). Das Anlegen einer Trendlinie vierten Grades glättet und ermöglicht die Berechnung des Durchmessers für jede Distanz. 31
- Abb. 17: Keulendurchmesser der „Superfledermaus“ (bekannt durch Kalibrierungsmessungen der schweizerischen Vogelwarte) und des Bird Scan (ermittelt durch Parallelmessungen mit der „Superfledermaus“). 31
- Abb. 18: Vergleich der mittleren, nicht zugrichtungskorrigierten (siehe unten) MTR über den gesamten Zeitraum der Parallelmessungen zwischen den beiden pencil beam Radargeräten. 32
- Abb. 19: Vergleich zwischen nicht zugrichtungskorrigierter (schwarze Säulen) und zugrichtungskorrigierter (graue Säulen) pro Nacht gemittelter Zugrate der „Superfledermaus“ für die Zugnächte mit einer MTR von über 1.000. Im unteren Teil der Abbildung ist der prozentuale Anteil der nicht zugrichtungskorrigierten an der zugrichtungskorrigierten MTR (rote Karos) sowie die Abweichung von der angenommenen Zugrichtung 210° in Grad (blaue Dreiecke) dargestellt. 34
- Abb. 20: Vergleich der mittleren MTR im August 2008 bis 1400 m Höhe (anthrazit: Bird Scan, hellgrau: Vertikalradar). Rechts oben: prozentualer Anteil pro Höhenschicht mit dem Vertikalradar gemessene MTR an mit dem Bird Scan gemessener MTR. Unten: mittlere Zugrate pro Zugnacht; der weiße Anteil der Säulen gibt die MTR über 1400 m Höhe an. 35
- Abb. 21: Vergleich der mittleren MTR im Oktober 2008 bis 1400 m Höhe (anthrazit: Bird Scan, hellgrau: Vertikalradar). Rechts oben: prozentuale Anteil pro Höhenschicht mit dem Vertikalradar gemessene MTR an mit dem Bird Scan gemessener MTR. Unten: mittlere Zugrate pro Zugnacht; der weiße Anteil der Säulen gibt die MTR über 1400 m Höhe an. 36
- Abb. 22: Vergleich der parallel mit dem Bird Scan und dem Vertikalradar gemessenen mittleren MTR jeweils einer Nacht zu Beginn und zum Ende der Wegzugperiode pro 100 m Höhenschicht. Die beiden farbigen Linien (rot: Vertikalradar, blau: Bird Scan) kennzeichnen die Höhe bis zu der 50% der erfassten Vögel gezogen sind. Im unteren Teil der Abbildung ist die Zusammensetzung der Vogelgrößenklassen (anhand der manuell für eine Nachtstunde bestimmten Flügelschlagfrequenz) dargestellt. 38

- Abb. 23: Testmessung über See. Trotz deutlicher Wellenbewegung zeigen die Radarbilder bei 100% keine Wellenclutter. Die horizontalen Linien stammen von Schiffen. Erst bei 70% treten starke *sea clutter* auf, die Vogeleos überlagern würden. 40
- Abb. 24: Testmessung bei 100% direkt auf drei in einer Reihe stehende Windenergieanlagen und einen Messmast zu (auf dem Bild die vier Linien mit etwa gleichem Abstand). Ein Vergleich zweier STC Einstellungen verdeutlicht welchen Einfluss die Nahechodämpfung auf das Radarbild hat. 41

1 Einleitung

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien an der gesamten Energieversorgung Deutschlands von derzeit etwas über 15% bis zum Jahr 2020 auf mindestens 30% zu steigern (Bundesregierung 2008). Das größte Wachstumspotenzial wird dabei der Windenergie zugeschrieben. Der Raum für die Errichtung von Windenergieanlagen an Land ist begrenzt, weshalb besonders die Entwicklung im Offshore-Bereich stark voranschreiten wird. Der geplante Bau von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) im großem Maßstab wirft Fragen über die Umweltverträglichkeit eines solchen Vorhabens auf. Besonders Vögel und marine Säugetiere könnten davon betroffen sein.

Im Rahmen von Genehmigungsverfahren für Offshore-Windparks fordert das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) nach der Seeanlagenverordnung (SeeAnIV) die Durchführung mehrjähriger, betriebsbegleitender Monitoringuntersuchungen nach standardisierten Methoden (Standarduntersuchungskonzept, StUK 3, BSH 2007). Die „Gefährdung des Vogelzuges“ wird dabei explizit als Grund aufgeführt, dem Bau von OWEAs die Genehmigung zu entziehen. Als Hauptfaktoren für eine potentielle Gefährdung lassen sich eine mögliche Barrierewirkung und vor allem Kollisionen mit den Windenergieanlagen nennen. Dass Zugvögel an vertikalen Offshore-Strukturen, wie Forschungsplattformen oder Leuchttürmen, kollidieren, haben verschiedene Studien gezeigt (z.B. HANSEN 1954, MÜLLER 1981, OREJAS et al. 2005). Mit Hilfe von mathematischen Modellen wurde versucht, das Ausmaß der Zugvogelkollisionen an OWEAs zu prognostizieren (z.B. BAND et al. 2005, DESHOLM 2006). Vor allem für nachts ziehende Arten sind jedoch einige der Eingangsparameter dieser Kollisionsmodelle aufgrund technischer Einschränkungen nur unzureichend oder gar nicht bekannt. Studien zum Verhalten von Zugvögeln bei der Annäherung an Offshore-Windparks (KAHLERT et al. 2002, CHRISTENSEN et al. 2004, DESHOLM & KAHLERT 2005, DESHOLM et al. 2006, BLEW et al. 2008) zeigen, dass bis heute besonders Singvögel, die in Mitteleuropa über 90 % des nächtlichen Zugvolumens ausmachen (z.B. BRUDERER 1997b), aufgrund ihrer geringen Größe Probleme bei der Erfassung bereiten (HÜPPOP et al. 2006, BELLEBAUM et al. 2008). So gibt es kaum belastbare Angaben zum Meideverhalten (engl.: *avoidance behaviour*), was die Aussagekraft von Kollisionsmodellen deutlich verringert (FOX et al. 2006, CHAMBERLAIN et al. 2006). Ein Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen zur Klärung der Frage, inwieweit Offshore-Windparks eine mögliche Gefährdung des Vogelzuges darstellen werden, muss daher in der korrekten Quantifizierung des Vogelzuges und des Verhaltens der Zugvögel im Bereich von Offshore-Windparks liegen. Dies gilt vor allem für den Zug von Singvögeln. Die momentan zu diesem Zweck eingesetzten und vom BSH vorgeschriebenen Schiffsradargeräte mit vertikal drehender Balkenantenne (StUK 2007) eignen sich grundsätzlich zur Beschreibung des allgemeinen Zuggeschehens (WENDELN et al. 2007), haben aber entscheidende technische Schwächen: eine ungenaue Quantifizierung des Zuggeschehens durch unzureichend definiertes Radarvolumen, eine geringe Reichweite, Erfassungsschwächen tief fliegender Vögel und fehlende Information zum beteiligten Artenspektrum (WENDELN et al. 2007, BELLEBAUM et al. 2008).

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung einer technischen Alternative, die für eine automatische Quantifizierung des Vogelzuges und zur Erfassung von Verhaltensweisen im Bereich von Offshore-Windparks geeignet ist. Alternativ zum Radar mit rotierendem Balken wird dabei eine Parabolantenne mit einem Schiffsradar kombiniert. Die Parabolantenne ist fest stehend (daher die Bezeichnung „fixed beam Radar“) und erzeugt eine Radarkeule mit definiertem Volumen. Bisher waren Radargeräte, die im fixed beam Modus betrieben werden können, oft sehr groß, schwer und zudem nicht kommerziell verfügbar. Bereits in den 1980er Jahren schlug GAUTHREAU (1984) vor, kleine transportable Schiffsradare mit Parabolantennen auszurüsten, und damit fixed beam Messungen durchzuführen, um die methodischen Schwächen von Fächerstrahlradaren zu überwinden. In Zusammenarbeit mit dem Softwarebüro Steuri GmbH und der Schweizerischen Vogelwarte Sempach wurde im vorliegenden Projekt ein serienreifes, transportables fixed beam Radar entwickelt, welches entscheidende Vorteile gegenüber den bisher verwendeten vertikal rotierenden Schiffsradargeräten aufweist. Neben der Möglichkeit einer genauen Quantifizierung des Vogelzuges können auch Informationen zum beteiligten Artenspektrum anhand von Flügelschlagmustern und –frequenzen aufgenommen werden. Durch Vergleiche von Zugdichten an verschiedenen Stellen des Parks (verschiedene Ausrichtungen der Antenne) werden außerdem Rückschlüsse zum Meideverhalten möglich sein. Dieser Bericht beschreibt die Entwicklung eines Prototyps und stellt Ergebnisse von ersten Langzeitmessungen im Vergleich mit anderen Radartypen dar.

2 Radar – Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Funktionsweise – Technische Grundlagen

Eine sehr gut verständliche Einführung in die Arbeitsweise von Radargeräten wird auf der mehrsprachigen Website www.radartutorial.eu angeboten. Weiterführend bietet LUDLOFF (2008) eine gute Übersicht zur generellen Funktion von Radargeräten. Um die Funktionsweise dieser Technologie zu verstehen, beschränkt sich dieses Kapitel auf die wesentlichen Grundlagen. Erklärt wird die grundsätzliche Funktionsweise am Beispiel impulsemitrierender Primärradare, die ausschließlich das passiv reflektierte Signal eines Ziels auswerten.

Radar steht für engl. **Radio Detection and Ranging** und kann ins deutsche mit „Funkortung und –abstandsmessung“ übersetzt werden. Dabei wird in einem Radargerät von einem Sender eine hochfrequente Schwingung erzeugt (je nach genutztem Frequenzband zwischen 30 MHz und 98 GHz, bei einer Wellenlänge zwischen 2 m und einigen mm), die von dem Duplexer, der in der Antenne zwischen Senden und Empfangen umschaltet, an die Radarantenne weitergeleitet wird. Die elektromagnetischen Wellen werden gebündelt ausgesendet und breiten sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit aus (Primärsignal). Treffen die Wellen auf ein Hindernis, wird ein sehr geringer Teil der Strahlungsenergie zur Antenne reflektiert. Dieses Echo (Sekundärsignal) wird über den Duplexer an den Empfänger weiter geleitet, dort in ein Videosignal umgewandelt und anschließend maßstabsgerecht auf einem Bildschirm dargestellt.

Bei Pulsradaren wird die elektromagnetische Strahlung in Impulsen emittiert. Der Zeitraum zwischen den Impulsen wird für den Empfang von Echos genutzt. Die Entfernungsbestimmung erfolgt dabei über die Laufzeit, also die Zeit, die zwischen Senden des Impulses und Empfangen eines Echos vergeht. Für die Reichweite eines Radars sind Sendeleistung, Empfängerempfindlichkeit, Antennengröße und Zielgröße primär entscheidend. Zusätzlich gilt je niedriger die Frequenz ist, desto größer ist die Reichweite. Zur Positionsbestimmung eines Echos muss ein Rundsichtradar, dessen Antenne um eine vertikale Achse drehbar ist, eingesetzt werden. In Relation zur Himmelsrichtung (Nord entspricht 0°) gibt die Position der Antenne im Moment der Echodetektion den Seitenwinkel (Azimuth, Tab. 1) an. In Kombination mit der Information über die Entfernung lässt sich so die Position eines Objektes bestimmen. Dabei gilt generell, je kürzer die Wellenlänge, desto kleinere Objekte können detektiert werden und je niedriger die Pulslänge (Länge des Pulses im Raum) desto höher ist das Auflösungsvermögen. Das Antennendiagramm eines jeden Radargerätes, mit Angaben über die Form des Strahls in horizontaler und/oder vertikaler Ebene (Öffnungswinkel im Raum), lässt ebenfalls Rückschlüsse auf das Auflösungsvermögen zu.

Zusätzlich kann mit bestimmten Radargeräten die Höhe eines Echos über Grund ermittelt, und so dessen Position im dreidimensionalen Raum bestimmt werden (Abb. 1). Dazu

muss das Gerät in der Lage sein, den Höhenwinkel (Elevation, Tab. 1) zu messen. Über die Winkelfunktion können sowohl die Höhe über Grund als auch die horizontale Distanz bestimmt werden. Die Bezugsgröße Elevation 0‰ ist eine auf Höhe der Antenne verlaufende horizontale Ebene. In der technischen Fachsprache wird die Elevation oft in Promille (‰) angegeben, wobei 6400‰ gleich 360° sind.

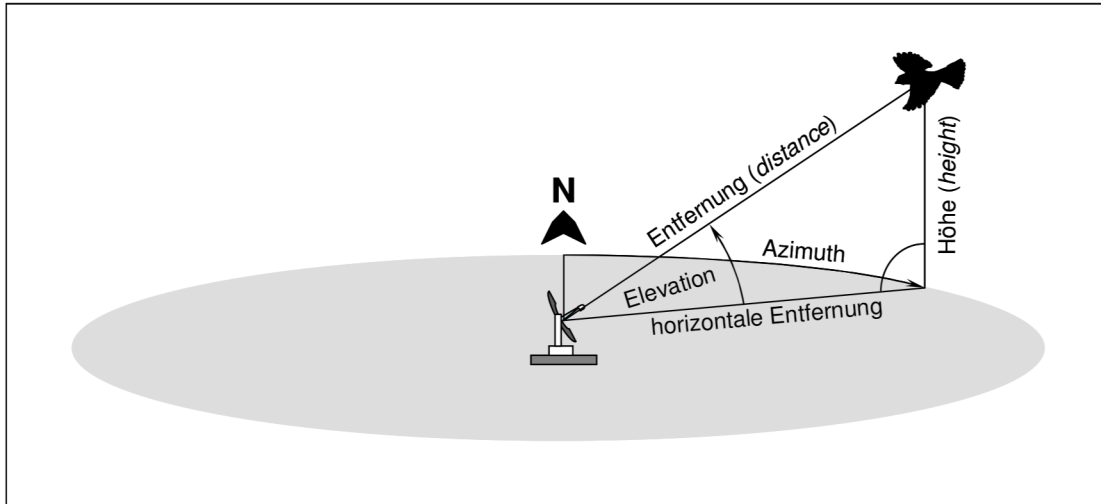


Abb. 1: Wichtige Kenngrößen bei der Erfassung mit Radar (verändert nach LARKIN 2005)

2.2 Radar in der ornithologischen Forschung

In diesem Bericht werden viele in der Radarornithologie regulär gebräuchliche Termini aus der englischen Fachsprache verwendet. Diese sollen daher im Folgenden aufgeführt und kurz erläutert werden (Tab. 1).

Tab. 1: wichtige Termini in der Radarornithologie

Terminologie	englisch	Definition
Streuquerschnitt	<i>radar cross-section</i>	Maß für die reflektierende Fläche; abhängig von Größe, Form, <i>aspect</i> und Reflektionseigenschaften eines Objekts sowie der Wellenlänge des Radarstrahls
Anstrahlwinkel/Aspekt	<i>aspect</i>	Position eines Objektes im Raum relativ zum Radar
Höhenwinkel/Elevation	<i>elevation</i>	Auf die horizontale Ebene bezogener, vertikaler Winkel eines Objekts zum Radar. Bei fixed beam Messungen auch die Angabe über die Position der Radarkeule.
Seitenwinkel/Azimuth	<i>azimuth</i>	Auf Nord (0°) bezogener horizontaler Winkel eines Objekts zum Radar (Angabe oft in ‰).
Standzeichenunterdrückung	<i>MTI = moving target indicator</i>	Echos mit geringer Radialgeschwindigkeit, wie langsam fliegende aber auch stehende Objekte, werden herausgefiltert

Terminologie	englisch	Definition
Echosignatur	<i>echo signature</i>	Variation der Echointensität über die Zeit
Clutter/Standzeichen	<i>clutter</i>	Unerwünschte Reflexionen der Radarstrahlen am Boden oder an vertikalen Strukturen wie Häusern, Bäumen, etc. (<i>ground clutter</i>) oder durch Wellen (<i>sea clutter</i>)
STC	<i>sensitivity time control</i>	Auch als Nahechodämpfung bezeichnet; distanzabhängige, automatische Verstärkungsregelung, bei der Echos von nahen Objekten unterdrückt werden
Zugrate = MTR	<i>migration traffic rate</i>	Ein Maß für das Zugaufkommen: Vögel, die pro Stunde eine Linie von 1 km überfliegen
Dezibel-Schwelle	<i>dB-threshold</i>	Schwelle, die die Intensität eines Echos überschreiten muss, um detektiert zu werden (über dem thermalen Grundrauschen).
Blip	<i>blip</i>	Visualisierung eines Radarechos als Leuchtpunkt auf dem Bildschirm, ohne Information über die Echoqualität
Antennendiagramm	<i>antenna pattern</i>	Grafische Darstellung der Strahlungscharakteristik einer Antenne im Raum
standardisierte Echogröße	<i>standardized echo size</i>	Die Intensität eines in einer beliebigen Entfernung detektierten Echos wird so umgerechnet, dass es der Intensität entspricht, die dasselbe Echo in einer bestimmten Entfernung hätte (in dB)

EASTWOOD (1967) und BRUDERER (1997a, 2003) geben einen Überblick zu wichtigen Grundlagen beim Einsatz der Radartechnologie in der ornithologischen Forschung. Bereits in den 1940er Jahren wurden erstmals durch Vögel verursachte Radarechos festgestellt (BRUDERER 1997a, GAUTHREAU & BELSER 2003). In der ornithologischen Forschung kam es ab den 1950er, besonders aber in den 1960er Jahren, zu einem vermehrten Einsatz von Radargeräten zur Erfassung von Vögeln, überwiegend während des Zuges (EASTWOOD 1967, BRUDERER 1997a). In der als Radarornithologie bezeichneten Disziplin wurden weltweit in vielen Arbeitsgruppen verschiedene Geräte eingesetzt, mit zum Teil sehr unterschiedlichen methodischen Ansätzen. In den meisten Arbeitsgruppen wurden allerdings nur wenige Anstrengungen unternommen, die Methode weiterzuentwickeln. Zudem machte die kritische Auseinandersetzung mit der Materie durch EASTWOOD (1967) deutlich, dass die Interpretation der gewonnenen Radardaten sehr vorsichtig zu erfolgen hat. Nur wenige ornithologische Arbeitsgruppen setzten danach noch Radare ein.

Seit Anfang der 1990er Jahre kam es in Verbindung mit Umweltverträglichkeitsuntersuchungen zum Kollisionsrisiko von Vögeln mit artifiziellen, vertikalen Strukturen, wie Offshore-Windenergieanlagen, wieder zu einem vermehrten Einsatz der Radartechnologie (z.B. GAUTHREAU & BELSER 2003, DESHOLM et al. 2006). In der überwiegenden Zahl von Studien wurden und werden bis heute Pulsradargeräte eingesetzt.

Die in der Ornithologie eingesetzten Radargeräte unterscheiden sich vor allem in drei Punkten von konventionellen Schiffsradaren: dem Frequenzband und damit der Wellenlänge (siehe Kap. 2.2.2), der maximalen Sendeleistung (engl.: *peak power output*) und dem Operationsmodus. Die operationelle Reichweite eines Radargerätes wird primär durch die maximale Sendeleistung, die Empfängerempfindlichkeit und das genutzte Frequenzband bestimmt. In der Radarornithologie wurde eine breite Spanne von Radargeräten eingesetzt, die abhängig von den technischen Eigenschaften für sehr unterschiedliche Fragestellungen verwendet werden konnten. Es kamen Hochleistungs-Überwachungsradare mit mehreren hundert kW Leistung, die großräumige Vogelbewegungen im Bereich von hundert Kilometern und mehr erfassen können, bis hin zu Schiffsradaren mit etwa 10 kW Leistung, deren Reichweite für kleine Singvögel weniger als 1 km beträgt, zum Einsatz. Zwei grundlegende Typen von Radaren, bestimmt durch den Operationsmodus und die Form des Antennendiagramms, lassen sich dabei unterscheiden: Fächerstrahl-Überwachungsradare und pencil beam Radare.

2.2.1 Typen von Radargeräten

Zur Erfassung von Vögeln kommen derzeit vor allem zwei Radarmethoden zum Einsatz, die sich vor allem durch die Form des ausgesendeten Radarstrahls und den Operationsmodus unterscheiden.

2.2.1.1 Fächerstrahlradar

Zu diesem Radartyp gehören die derzeit bei Umweltverträglichkeitsuntersuchungen standardmäßig eingesetzten Schiffsradargeräte mit Balkenantenne. Die Antennenform dieser Radargeräte führt zum Aussenden eines fächerförmigen Radarstrahls, dessen Öffnungswinkel in der einen Ebene schmal und in der anderen Ebene breiter ist. Normalerweise rotiert eine Fächerstrahlantenne um eine vertikale Achse (Horizontalbetrieb) und hat einen Radarstrahl, der in der vertikalen Ebene einen großen Öffnungswinkel hat. Damit erreicht das Radar gute Informationen über die horizontale Verteilung der Echos, ohne jedoch Angaben zur Höhenverteilung liefern zu können. Beim Einsatz im Offshore-Bereich besteht jedoch durch den im Vergleich zu einem pencil beam Radar deutlich schwächer gebündelten Radarstrahl das Problem starker Reflexion der Radarstrahlen an Wellen. Dadurch wird der Einsatz auf sehr ruhige Wetterbedingungen beschränkt. Die Rotationsachse der Antenne kann auch um 90° gekippt (Vertikalbetrieb) und dadurch Informationen über die vertikale Echoverteilung gewonnen werden. Durch Reflexionen am Boden oder an Wellen, sind die niedrigsten Luftschichten nur unzureichend überwacht. Wenn Operationsmodi kombiniert eingesetzt werden, können Informationen über die räumliche und zeitliche Verteilung der Echos gewonnen werden aus denen sich Aussagen zur Intensität und Richtung von Echobewegungen ableiten lassen.

Die meisten der zur Vogelzugerfassung eingesetzten Radargeräte arbeiten in Frequenzbereichen, in denen auch Insekten erfasst werden können. Ein wesentliches Problem von Fächerstrahlradaren besteht darin, dass keine qualitativen Informationen zu den Echos geliefert werden. Bei den auf dem Bildschirm abgebildeten Radarechos kann nicht zwi-

schen Insekten und Vögeln unterschieden werden. Je nach Standort und Beobachtungszeit kann dies zu deutlichen Fehleinschätzungen über das tatsächliche Zugvolumen führen (z.B. EASTWOOD 1967, BRUDERER 1997a, SCHMALJOHANN et al. 2007, 2008). Für die Ermittlung von Zugraten ist darüber hinaus die genaue Kenntnis des mit dem Radar überwachten Volumens wichtig. Für Vögel ist das dafür notwendige Antennendiagramm jedoch bei Fächerstrahlradaren in der Regel nicht bekannt. Aufgrund der geringeren Bündelung des Radarstrahls ist die Reichweite im Vergleich mit pencil beam Radargeräten mit gleicher Leistung deutlich geringer. Zudem besteht dadurch auch das Problem, den Verlauf und die Stärke von Nebenkeulen einzuschätzen. Diese vergrößern den überwachten Bereich möglicherweise erheblich.

Trotz aller Einschränkungen sind Schiffsradare generell geeignet, Informationen über Zugraten und die Höhenverteilung des Vogelzuges zu liefern (WENDELN et al. 2007). Da Schiffsradare eigentlich zur marinen Überwachung dienen, gibt es einen bestehenden Markt und die Geräte sind daher gut verfügbar und haben verhältnismäßig geringe Anschaffungskosten. Der Einsatz in der Vogelzugforschung ist mit einem verhältnismäßig geringen logistischen Aufwand verbunden.

2.2.1.2 pencil beam Radar

Der Radarstrahl von pencil beam Radargeräten wird durch eine Parabolantenne ausgesendet. Die Form der Antenne bewirkt eine starke Bündelung des Radarstrahls, der dadurch in etwa die Form eines Bleistifts (engl.: *pencil*) hat. Daher wird er in der Regel als Radarkeule bezeichnet. Durch die enge Bündelung wird eine hohe Winkelgenauigkeit erreicht und gleichzeitig die Reichweite im Vergleich zu einem Fächerstrahlradar mit gleicher Leistung deutlich erhöht. Durch diese Eigenschaften gehören z.B. Zielfolgeradare zu diesem Radartyp. Diese können in mehreren Operationsmodi arbeiten. Zum einen können einzelne Vögel in verschiedenen Höhen gezielt verfolgt und damit eine mittlere Flugrichtung bestimmt werden, zum anderen ist es möglich in verschiedenen Elevationen über konische Scans (schnelles Drehen der Antenne) oder einen fest in eine Richtung zeigenden Strahl (engl.: *fixed beam*), Zugintensitäten zu erfassen.

Ein wesentlicher Vorteil von pencil beam Radaren gegenüber Fächerstrahlradaren besteht darin, dass Informationen über die zeitliche Variation der von einem Objekt reflektierten Energie erfasst werden (Echosignatur). Dadurch können Vögel von Insekten unterschieden werden. Zudem haben die meisten Vogeleos erkennbare Flügelschlagfrequenzen und -muster, die eine Zuordnung zu Größen- und Vogelklassen ermöglichen. Durch die starke Bündelung des Strahls ist bei einem pencil beam Radar das Keulenvolumen und damit das gesamte überwachte Volumen relativ genau bekannt. Dies ermöglicht eine wesentlich verlässlichere Ermittlung der Zugraten. Trotz der Bündelung des Radarstrahls treten auch bei pencil beam Radaren Nebenkeulen auf, deren Intensitäten jedoch verglichen mit der Hauptkeule relativ schwach sind. Sie führen daher nicht zu einer Vergrößerung des überwachten Bereichs für Vögel, können aber durch Reflexion am Boden oder anderen Strukturen Probleme durch *clutter*, die den zu überwachenden Bereich überlagern, verursachen.

Der Nachteil der bisher verwendeten pencil beam Radargeräte liegt besonders in ihrer Größe und damit in ihrer beschränkten Einsetzbarkeit durch einen hohen logistischen Aufwand. Die Auswertung der Daten war bisher sehr zeitaufwendig und erforderte außerdem eine Schulung der auswertenden Personen. Eine zunehmende Automatisierung wird in Zukunft zu einer wesentlichen Zeitersparnis bei der Auswertung führen.

2.2.2 Zugratenbestimmung mittels Radar

Um mit Radargeräten verlässliche Zugraten ermitteln zu können, müssen bei den eingesetzten Geräten bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Zudem sind verschiedene Besonderheiten und Probleme, die Vögel als Radarziel verursachen, zu berücksichtigen (EASTWOOD 1967, BRUDERER 1997a, BRUDERER & LIECHTI 1998).

Da der Streuquerschnitt von Vögeln mit einigen Quadratzentimetern sehr gering ist, muss - als wichtigste Voraussetzung - die Wellenlänge sehr kurz gewählt werden, um überhaupt einzelne Individuen erfassen zu können. Zur Erfassung kleiner Vogelarten eignet sich am besten das C-Band bei etwa 5 cm Wellenlänge (BRUDERER et al. 1995). Radargeräte, die in diesem Frequenzband operieren, haben jedoch verhältnismäßig große Antennen, da die Abmessungen der Antenne linear mit der Wellenlänge erhöht werden muss. Nur dadurch wird ein konstanter, gebündelter Radarstrahl mit ausreichender Winkelgenauigkeit erzeugt. Insbesondere für den mobilen Einsatz ist die Größe eines Radargerätes allerdings oft ein begrenzender Faktor. Deshalb werden vielfach Geräte mit kleineren Antennen eingesetzt, die im kurzwelligeren X-Band (2,4 – 3,8 cm Wellenlänge) arbeiten (BRUDERER & LIECHTI 1998). Ein Nachteil von X-Band Radaren ist, dass viele Insekten detektiert werden (z.B. SCHMALJOHANN et al. 2007).

Die Wahrscheinlichkeit mit der ein Vogel von einem Radar erfasst wird, ist abhängig von seinem Streuquerschnitt. In Abhängigkeit von der Größe eines Vogels und dem Anstrahlwinkel (Position im Strahl, Vögel werden von unten und von der Seite wesentlich besser erfasst, als von vorne oder hinten, BRUDERER & JOSS 1969, SCHMALJOHANN et al. 2008), verändern sich sowohl die Wahrscheinlichkeit einer Detektion als auch die Entfernung bis zu der er detektiert werden kann. Dadurch ändert sich auch das überwachte Volumen des Radargeräts. Generell wird an einem Objekt, das durch einen Radarstrahl fliegt, nur ein Teil der Energie zurück zur Antenne reflektiert. Die durch die Antenne empfangene Energie (P_r) wird durch die folgende Formel bestimmt (Radargleichung, EASTWOOD 1967):

$$P_r = \frac{P_t \cdot G \cdot \sigma \cdot A}{(4\pi R^2)^2}$$

Hierbei ist: P_t – die ausgesendete Energie (*transmitted power*), G – der Gewinn der Antenne (*antenna gain*), σ – der Streuquerschnitt (*radar cross-section*), A – die Fläche der Antenne und R – die Entfernung zwischen Objekt und Antenne.

Aus der Radargleichung geht hervor, dass die Energiedichte der Strahlen nach dem Senden und dem Reflektieren am Vogel jeweils um den Faktor $4\pi R^2$ (*4th power law*) abnimmt.

Die Pulslänge bestimmt das Auflösungsvermögen des Radargeräts umgekehrt proportional. Demnach sollte eine niedrige Pulslänge gewählt werden, um ein hohes Auflösungsvermögen zu bewirken. Eine zu grobe Auflösung würde mehrere Vögel zu einem Echo zusammenfassen. Zusammen mit einer hohen Sendeleistung bei gleichzeitig hoher Empfängerempfindlichkeit wird so eine hohe Reichweite des Radars erreicht, wodurch auch hoch fliegende Vögel erfasst werden können.

Verlässliche Zugraten können nur ermittelt werden, wenn das durch den Radarstahl überwachte Volumen möglichst genau bekannt ist. Dazu muss das Antennendiagramm bekannt sein und im Idealfall der operationelle Öffnungswinkel des Radarstahls empirisch bestimmt werden (vgl. BRUDERER & LIECHTI 1998). Je nach technischer Spezifikation eines Radargerätes werden unter Umständen interne Filter (z.B. Standzeichenunterdrückung) verwendet, die die Interpretation der Daten erschweren. Optimalerweise sollte ein Radar ohne hardwareseitige Filter eingesetzt werden und die Filterung der Daten erst durch die Software erfolgen.

Neben den zu beachtenden Besonderheiten, die einen Vogel als Radarziel charakterisieren, wird bei vielen Radar-Studien zur Vogelzug-Quantifizierung eine wesentliche Voraussetzung vernachlässigt, die Unterscheidung von Vögeln und Insekten. Nach Möglichkeit sollte eine solche Auftrennung der Radarechos angestrebt werden.

3 Material und Methode

3.1 fixed beam Prototyp – Bird Scan

3.1.1 Technische Daten

Das entwickelte Radargerät, mit dem Namen „Bird Scan System M1“, wird im Folgenden als Bird Scan bezeichnet.

3.1.1.1 Radargerät

Dieses Forschungsprojekt hatte zum Ziel, ein verhältnismäßig kleines, transportables pencil beam Radar auf der Basis eines kommerziell verfügbaren marinen Überwachungsradars zu entwickeln. Die IfAÖ Forschungsgesellschaft mbH verfügt bereits über mehrjährige Erfahrungen bei der Erfassung des Vogelzuges mit dem Modell Bridgemaster E des Herstellers Sperry Marine (vgl. BELLEBAUM et al. 2008). Daher wurde dieses Modell (Baujahr 2006/2007) als Basisradar gewählt. In einem ersten Schritt musste das Radar, das sonst als Schiffsradar mit drehender Balkenantenne operiert, durch hardwareseitige Änderung der vom Hersteller vorgegebenen Spezifikation in eine nicht drehende Send-/Empfangseinheit umgewandelt werden. Die Veränderung des *azimuth* ist jetzt nur noch manuell möglich.

Tab. 2: technische Spezifikationen des fixed beam Prototyps Bird Scan

Sender:	
Theoretische Spitzen-Pulsleistung	25 kW
Pulslänge	0,25 µs
Pulsrepetitionsfrequenz	1800 Hz
Sendefrequenz	X-Band (9410 MHz, ±30 MHz)
Antenne:	
Nomineller Strahlöffnungswinkel	2,2 °
Durchmesser der Antenne	1,0 m
Gewinn der Antenne	35 dB
Empfänger:	
Noisefigure	5,0 dB
Bandbreite	20 MHz

Die Firma Softwarebüro Steuri GmbH, die bereits über eine jahrzehntelange Erfahrung mit der Wartung und dem Betrieb des pencil beam Zielfolgeradars „Superfledermaus“ der schweizerischen Vogelwarte Sempach verfügt, wurde mit der Konstruktion der in der Elevation verstellbaren Parabolantenne beauftragt. Die gesamte Einheit wurde als offenes System gebaut. Um das System vor Witterungseinflüssen zu schützen, wurde ein Radom

konstruiert, das als Schutzhülle über die ganze Anlage gestülpt werden kann. Die Abmessungen von Radargerät und Radom lassen sich aus Abb. 2 entnehmen.

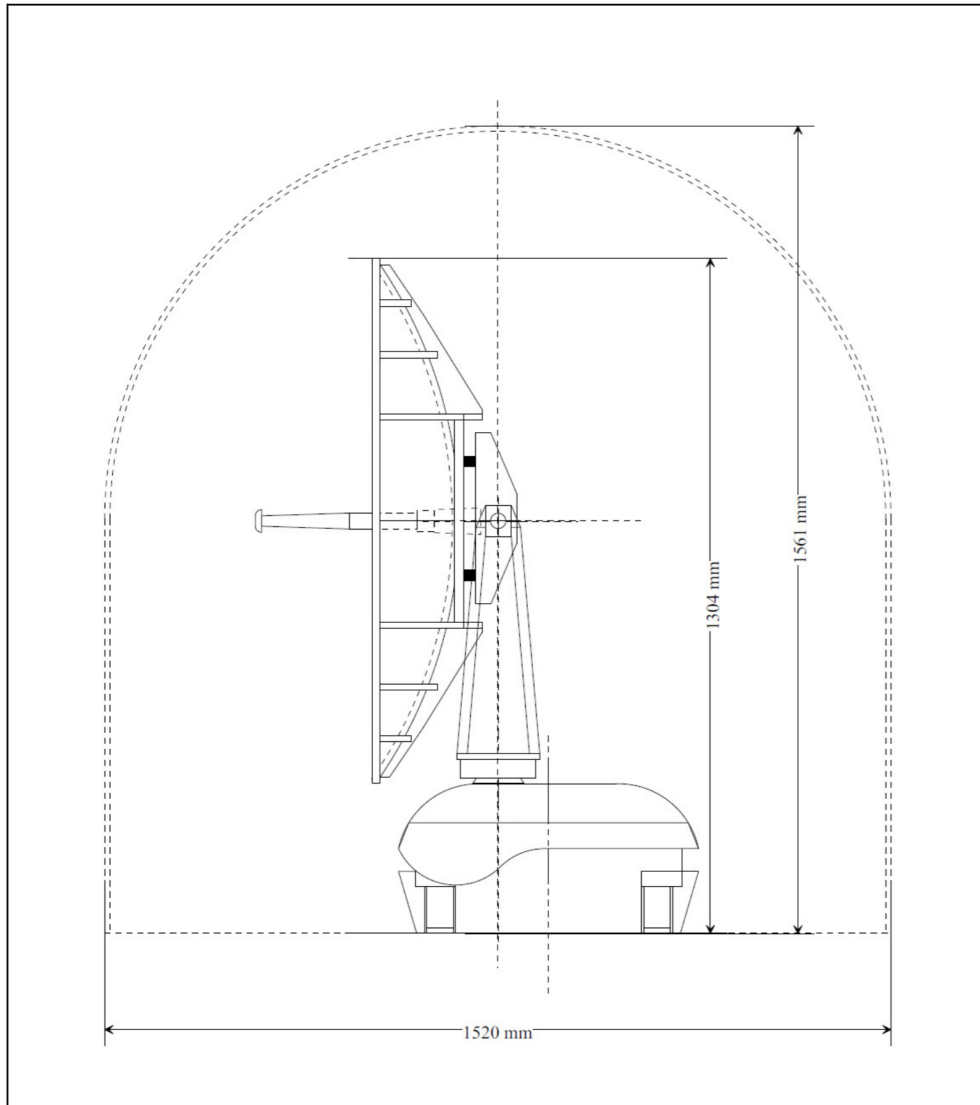


Abb. 2: Technische Zeichnung mit Maßen von Radar und Antenne sowie Radom (gestrichelte Doppelinie)

Als Antenne wurde ein Parabolspiegel des ehemals militärisch genutzten Zielfolgeradars „Superfledermaus“ verwendet, da dessen Eigenschaften bereits genau bekannt sind (Abb. 4, Tab. 2). Das so genannte Antennenjoch wurde völlig neu entwickelt und besteht aus der über Drehgelenke (engl.: *rotary joint*) schwenkbaren Halterung für den Parabolspiegel mit einem zentralen Eingang für den *Feed* (Einspeisung der Radarwellen), einem Elektromotor zur Elevationssteuerung sowie einem flexiblen Wellenleiter (Abb. 3). Zum Einrichten der genauen horizontalen Lage dient eine Kreuzlibelle, die auf dem unbeweglichen Teil des Antennenjochs montiert ist. Mit einer weiteren Libelle an der Halterung für den

Parabolspiegel lässt sich die Nullstellung der Elevation überprüfen. Nach Montage der Antenne werden an der Rückseite der Halterung des Parabolspiegels zwei Gegengewichte angeschraubt, um die Antenne in der Balance zu halten.

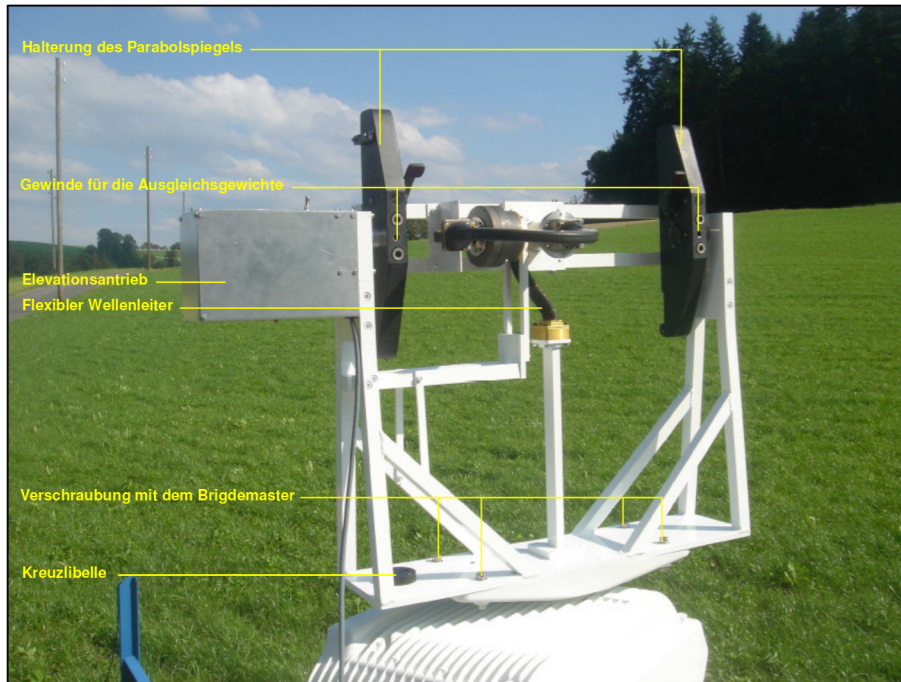


Abb. 3: Antennenjoch von hinten ohne Parabolspiegel und Feed (Nullstellung der Elevation).

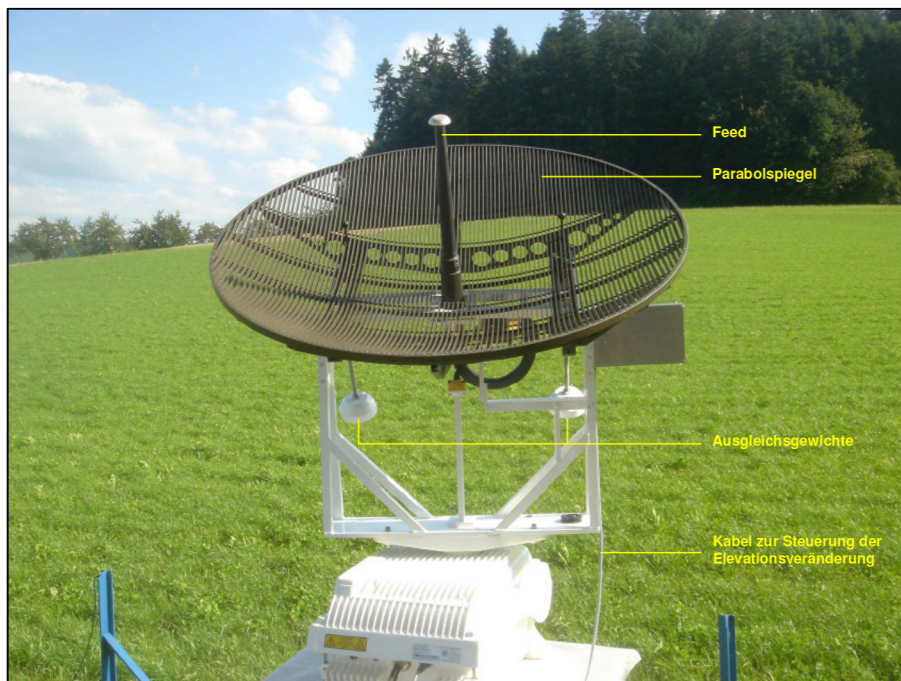


Abb. 4: Antennenjoch von vorn nach Montage von Parabolspiegel und Feed (hohe Elevation).

3.1.1.2 Registriereinheit

Als Registriereinheit werden diejenigen Komponenten bezeichnet, die zur Steuerung des Radars sowie zur Verarbeitung und Speicherung der Radardaten benötigt werden. Sie besteht im Wesentlichen aus einem leistungsfähigen Industriecomputer (PC). Für die Erfassung des Radar-Videosignals ist im PC ein spezieller Digitizer eingebaut. Dieser tastet das Radarsignal in Echtzeit mit einer Frequenz von 6 MHz ab und übergibt die Daten laufend an die interne Datenerfassungssoftware BIRDSCAN (Siehe 3.2.1). Die Daten werden auf 2 interne Festplatten mit großer Kapazität (750 GB) gespeichert, die als Raid 1-Verbund (Datenspiegelung) konfiguriert sind.

3.1.2 Theoretische Leistung

Die vom Hersteller angegebene Spitzen-Pulsleistung (engl.: *peak power output*) ist die Leistung, die direkt an der Senderöhre (Magnetron) emittiert wird. Infolge der Durchleitung durch mehrere Komponenten (z.B. Wellenleiter), wird von einer Antenne praktisch nie die theoretische Spitzen-Pulsleistung abgestrahlt. Um die tatsächliche Spitzen-Pulsleistung des Bird Scan zu bestimmen, wurde mit einem Leistungsmessgerät die mittlere Leistung am Ausgang der Antenne gemessen. Über die Pulsrepetitionsfrequenz und die Pulsdauer konnte dann berechnet werden, dass die tatsächliche Spitzen-Pulsleistung nur etwa 12 kW beträgt. Aufgrund des empfindlichen Empfängers des Bridgmaster 25 kW kann ein Vogel mit einem Radar-Streuquerschnitt von 10 cm^2 (entspricht etwa einem kleinen Singvogel bei günstigem Anstrahlwinkel) theoretisch noch bis etwa 4.300 m erfasst werden. Durch den praktischen Einsatz des Prototyps wird es möglich, diese theoretischen Werte für jede gewünschte standardisierte Echogröße (Tab. 1) zu bestimmen.

3.1.3 Praktischer Test

3.1.3.1 Langzeittest auf Rügen

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für einen automatisierten Dauerbetrieb ist der langfristig störungsfreie Einsatz. Um zu testen, ob der Bird Scan Prototyp diese Anforderung erfüllt, wurden Langzeittestmessungen auf Rügen durchgeführt. Der Standort für die Testmessung befand sich auf der Halbinsel Wittow im Nordwesten von Rügen auf einem ehemaligen Militärgelände der NVA ca. 500 m von der Steilküste entfernt.

Neben dem Test der langfristigen Verlässlichkeit des Bird Scan wurde noch ein weiteres Ziel verfolgt. Die mit dem Prototyp gemessenen Zugraten sollten mit den Daten eines parallel betriebenen Schiffsradars mit vertikal rotierender Balkenantenne verglichen werden (Abb. 5). Als Vergleichsgerät diente ein Sperry Marine Bridgmaster 25 kW mit Standardbalkenantenne (zum Vorgehen bei Auswertung der Radarbilder und Ermittlung der Zugra-

te siehe HÜPPOP et al. 2002, BELLEBAUM et al. 2008). Die Radargeräte kamen ausschließlich zur Zugzeit, in den Monaten August bis November und Februar bis Mai, zum Einsatz. Insgesamt waren beide Radare in drei Messperioden rund acht Monate in Betrieb. Die erste Testmessung begann am 2. September 2007 und endete am 29. Oktober 2007. Im Jahr 2008 kam es zur Frühjahrs- und zur Herbstzugzeit zu einem je gut dreimonatigen Betrieb (vom 19. Februar 2008 bis 27. Mai 2008 und vom 02. August 2008 bis 10. November 2008).



Abb. 5: Anordnung der Radargeräte bei der Parallelmessung auf Rügen im Herbst 2008 (Mitte: Bird Scan unter Radom; Rechts: Bridgemaster 25 kW Vertikalradar).

Um die mit beiden Radargeräten gemessenen Zugraten vergleichen zu können, war es wichtig, dass beide Antennen die gleiche Ausrichtung haben. Die Radargeräte wurden im rechten Winkel zur im südlichen Ostseeraum dominierenden Zugrichtung von etwa 210° (vgl. ZEHNDER et al. 2001, BELLEBAUM et al. 2008) ausgerichtet. Dadurch wurde das größtmögliche Volumen im Bezug zur Zugrichtung überwacht.

Radar-Messungen wurden nur in den Nachtstunden vorgenommen, da dann der überwiegende Teil der Vögel einzeln und nicht wie am Tag hauptsächlich in Schwärmen zieht (BRUDERER 1997b). Nur die Radarechos einzeln fliegender Vögel können anhand der Echsignatur in Vögel und Nicht-Vögel unterschieden werden. Zudem ist eine Zugratenbestimmung nur dann sinnvoll, wenn einem Radarecho jeweils nur ein Vogel zugeordnet wird.

Der jeweils zur halben Stunde begonnene fixed beam Messzyklus des Bird Scan bestand aus drei Messungen von je 4,7 min Länge in drei unterschiedlichen Elevationen (1.000, 300 und 100‰). Ein Messzyklus muss eigentlich als eine Messung, zusammengesetzt aus drei Teilmessungen, betrachtet werden. Durch die Messungen in drei Elevationen wird sichergestellt, dass Höheschichten, die von einer Elevation durch zu geringe Reichweite oder zu geringen Keulendurchmesser nur unzureichend erfasst werden, durch eine andere Elevation genügend abgedeckt wird (Abb. 6). Folglich ist die Zugrate in den Hö-

henschichten, die von mehr als einer Elevation überwacht werden, ein Mittelwert aus den einzelnen MTRs.

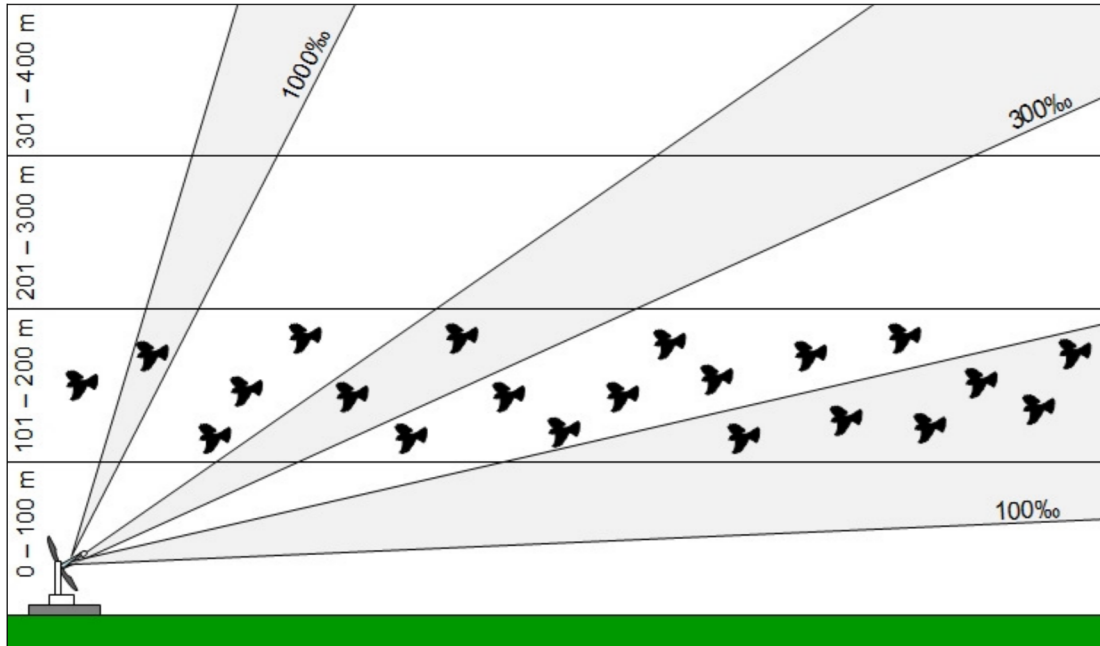


Abb. 6: Nicht maßstabsgerechte, schematische Darstellung der fixed beam Messungen in verschiedenen Elevationen (Höhenschicht 101 – 200 m exemplarisch mit Vögeln). Je nach Elevation wird pro Höhenschicht ein unterschiedlich großer Bereich überwacht.

3.1.3.2 Parallelmessung mit dem Zielfolgeradar „Superfledermaus“

Bei pencil beam Radaren ermöglicht die starke Bündelung der Radarkeule eine genaue Bestimmung des überwachten Volumens. Ein wichtiges Maß für das Volumen der Keule ist ihr Öffnungswinkel, der durch die technischen Spezifikationen der Antenne und die Leistung des Radarsenders bestimmt wird. Im praktischen Einsatz unterscheidet sich dabei der berechnete nominelle vom empirisch zu bestimmenden operativen Öffnungswinkel. Um den operativen Öffnungswinkel und damit das Keulenvolumen des Bird Scan Prototyps zu bestimmen, wurde in enger Zusammenarbeit mit der schweizerischen Vogelwarte Sempach eine parallele Messkampagne des fixed beam Prototypen mit dem Zielfolgeradar „Superfledermaus“ durchgeführt. Das Zielfolgeradar wurde ebenfalls im Fixed beam Modus betrieben. Durch die Eichung mit optischen Vogelzug-Erfassungsmethoden ist der operative Öffnungswinkel der Superfledermaus bekannt (LIECHTI et al. 1995, BRUDERER & LIECHTI 1998). Zudem wurde auch das vogelgrößenabhängige Keulenvolumen berechnet (SCHMALJOHANN et al. 2008). Die Superfledermaus arbeitet wie der Bird Scan im X-Band (Wellenlänge: 3,3 cm), weist allerdings eine wesentlich höhere theoretische Spitzen-Pulsleistung von 150 kW auf. Aufgrund des viel moderneren Empfängers des fixed beam Prototypen ist dessen Reichweite aber nur etwa ein

Drittel geringer als die des schweizer Zielfolgeradars. Weitere technische Details zur „Superfledermaus“ finden sich bei BRUDERER et al. (1995) und BRUDERER (1999).

Bei der Bestimmung des Keulenvolumens ist zu beachten, dass die Radarkeule in zwei Abschnitte unterteilt wird (SCHMALJOHANN et al. 2008). Im ersten Teil öffnet sich die Radarkeule aufgrund der Anwendung des STC-Filters zur Reduzierung von Insektenechos und schwachem *ground clutter*, entsprechend ihres Öffnungswinkels linear. Außerhalb des Bereichs der STC-Anwendung verringert sich das Volumen nicht-linear.

Die Parallelmessung beider Geräte wurde in der Zeit zwischen dem 12. September und dem 14. Oktober 2008 realisiert. An zwei Tagen, dem 21. und 22. September, wurden wegen anhaltenden Regens keine Messungen mit dem Zielfolgeradar durchgeführt. Während der Messkampagne operierte die „Superfledermaus“ nur in den ersten Nachtstunden, von Sonnenuntergang bis höchstens 0:00 Uhr. Die beiden Geräte waren im Abstand von ca. 100 m aufgebaut und die Antennen in die gleiche Richtung (300°, NW) ausgerichtet. Der Messmodus der „Superfledermaus“ war dabei synchron zu dem des Bird Scan (Messungen zur exakt gleichen Zeit in exakt gleicher Elevation), jeweils zur halben Stunde beginnend mit einer Messung bei 1.000 ‰. Die Einzelmessungen der „Superfledermaus“ waren mit 4,1 min jedoch etwas kürzer, was mit der höheren Pulsrepetitionsfrequenz und der damit verbundenen höheren Abtastrate des Gerätes zusammenhängt. Unter der Annahme einer kleinräumigen und zeitlichen Gleichverteilung der Zugvögel sollten beide Geräte die gleiche MTR ($\text{Vögel} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) messen, wodurch eine empirische Bestimmung des Keulenvolumens des Prototyps durch den Vergleich der Echoanzahl möglich wird. Zusätzlich zum Betrieb im fixed beam Modus wurde zwischen den automatischen Messungen ein manuelles Tracking einzelner Vögel durchgeführt, um die mittlere Zugrichtung zu ermitteln (näheres zur Methode siehe SCHMALJOHANN et al. 2008).

3.1.4 Sonstige Testmessungen

Das Radargerät soll in Zukunft auf See inmitten oder in der Nähe von Offshore-Windparks eingesetzt werden. Die an diesem Standort möglichen Störfaktoren wie Wellenreflexionen oder clutter, z.B. durch Windenergieanlagen, wurden während des regulären Langzeittestbetriebs auf Rügen nicht untersucht. Um einzuschätzen, wie diese Einflussfaktoren die Messungen mit dem Bird Scan beeinflussen, wurden zwei zusätzliche Feldversuche durchgeführt.

3.1.4.1 Wellenbewegungen

Eines der größten Probleme bei der Radarerfassung von Vögeln über dem Meer ist die Reflexion der Radarstrahlen durch Wellen (engl.: *sea clutter*). Bereits bei verhältnismäßig geringen Wellenhöhen (ab 1,0 m) und Windstärken (brechende Wellenkämme) werden bei herkömmlichen Schiffsradaren Störungen verursacht. Diese können die Echos fliegender Vögel überlagern und somit zu einer Fehleinschätzung des tatsächlichen Zugvolumens führen (z.B. DESHOLM 2006, BLEW et al. 2008). Um den Einfluss der Wellenreflexion auf die Messung mit dem fixed beam Radar einschätzen zu können, wurde ein Ort gewählt, der hoch genug über dem Meeresspiegel lag, um in etwa den Einsatzbedingun-

gen an einem Offshore-Standort zu entsprechen. Die etwa 15 m hohe Steilküste bei Elmenhorst westlich von Rostock war dafür geeignet. Die Testmessungen wurden am 23.06.2008 durchgeführt. Der an diesem Tag starke Wind (5-6 bft) aus WSW hatte eine signifikante Wellenhöhe von 1,5 bis 2 m zur Folge. Das Radar und die Registriereinheit wurden direkt an der Kante der Steilküste aufgebaut. Ziel war es zu untersuchen, bis zu welcher Elevation gemessen werden kann, ohne dass *sea clutter* die Messung beeinträchtigen. Die Messungen, 4,7 min pro Elevation, wurde in Richtung Nord durchgeführt und bei 1.000 ‰ begonnen. Nach abgeschlossener Messung wurde die Elevation schrittweise (300 ‰, 100 ‰, 70 ‰) weiter verringert, um auch die Erfassung in niedrigeren Elevationen beurteilen zu können.

3.1.4.2 Störungen durch vertikale Strukturen

Bei Radarmessungen an Land werden durch diverse vertikale Strukturen Bodenclutter (engl.: *ground clutter*) erzeugt. Die Radaruntersuchungen in unmittelbarer Nähe von Offshore-Windparks haben gezeigt, dass Clutter, die durch die Windenergieanlagen verursacht wurden, die Auswertung von Schiffsradar-Daten erheblich erschweren (vgl. BLEW et al. 2008). Ein Ziel zukünftiger Messung mit dem fixed beam Radar ist es durch die Reihen eines Offshore-Windparks hindurch zu messen. Da unbekannt war welche Störungen bei einer solchen Messung zu erwarten sind, wurde am 21.01.2009 eine Testmessung in der Nähe von Windenergieanlagen in der Feldmark bei Neu Broderstorf durchgeführt. Ziel dieses Testlaufs war es zu untersuchen, in welchem Maße die Messungen in der unmittelbaren Nähe von Windenergieanlagen beeinträchtigt werden. Das fixed beam Radar und die Registriereinheit wurden in 50 m Entfernung zur nächst gelegenen Windenergieanlage aufgebaut. Die Einzelmessungen wurden in drei verschiedene Richtungen durchgeführt, um die Auswirkungen von unterschiedlichen Entfernungen zu Windenergieanlagen zu testen. Die erste Messung wurde in Richtung Nord direkt auf drei in einer Reihe stehende Windenergieanlagen und einen Sendemasten zu getätigt (Abb. 7). Die Anlagen standen verhältnismäßig nah beieinander und hatten eine Entfernung von 1,9 km, 2,2 km, 2,4 km (Windenergieanlagen) und 2,7 km (Sendemast) zum Radar. Eine zweite Messung in Richtung Nordost zielte etwa 300 m an einer 1,1 km entfernten Windenergieanlage vorbei.



Abb. 7: Blickrichtung der ersten Testmessung (Elevation: 100%). Im Hintergrund die drei Windenergieanlagen und ein Sendemast.

3.2 Software

Die Software, die für den Betrieb des fixed beam Prototypen und die Bearbeitung und Teilauswertung der Radardaten erforderlich ist, wurde ursprünglich für den Einsatz des Zielfolgeradars „Superfledermaus“ geschrieben (© Softwarebüro Steuri GmbH und schweizerische Vogelwarte Sempach) und für die Verwendung mit dem Bird Scan teilweise modifiziert. Die Erfassungsssoftware BIRDSCAN übernimmt die Steuerung des Radars und die Datenspeicherung. Mit einem weiteren Programm, der Auswertungssoftware *fix-beam*, werden die Radardaten bearbeitet und teilweise ausgewertet. Beide Programme sind eng verknüpft und greifen auf dieselbe Access-Datenbank zurück.

3.2.1 Erfassungsssoftware BIRDSCAN

Das Programm BIRDSCAN vereint zwei wesentliche Schritte der Erfassung von Radardaten mit dem Bird Scan: Erstens die Steuerung des Radars, wie z.B. der automatischen Elevationsveränderungen oder das Ein- und Ausschalten des Senders (Abb. 8) und zweitens die Speicherung und Weiterverarbeitung der Radarrohdaten.

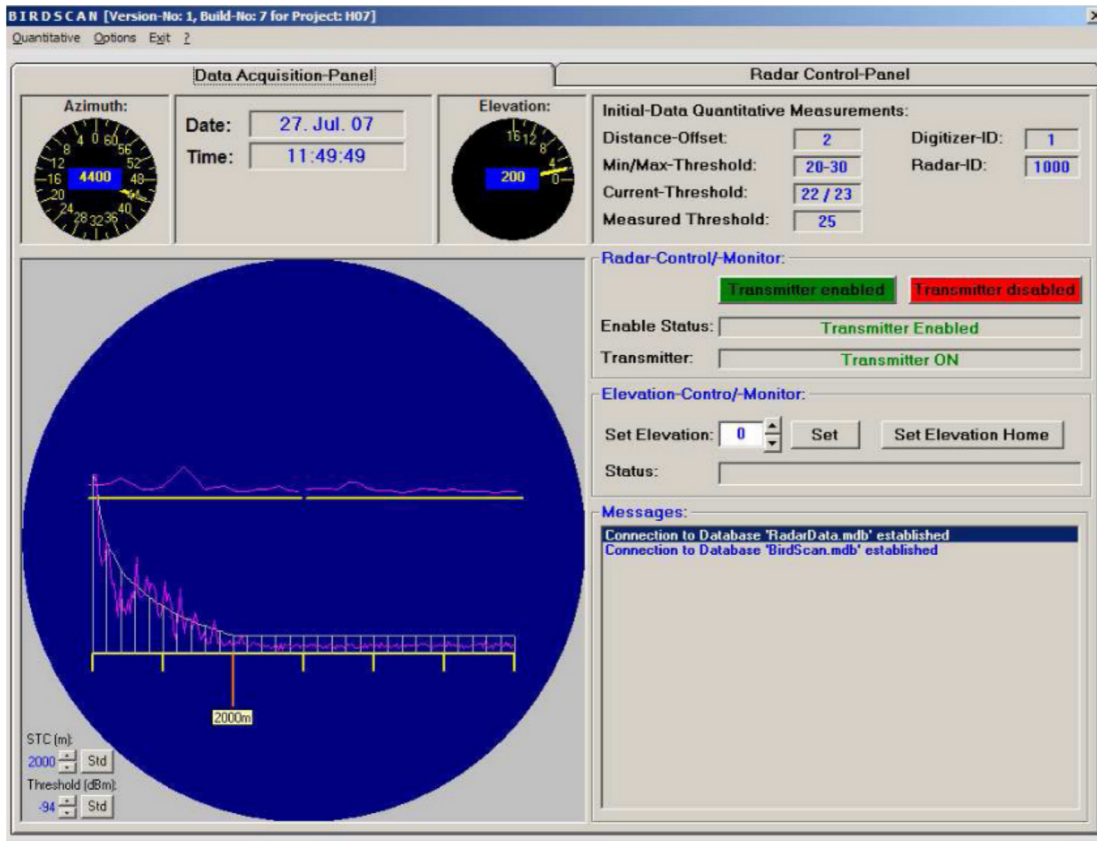


Abb. 8: Oberfläche der Betriebssoftware BIRDSCAN; der Sender ist angeschaltet (*Transmitter Enabled*) und die Antenne steht auf der Elevation 200%.

Bei einer laufenden Messung verarbeitet BIRDSCAN die vom Digitizer abgetasteten Radardaten weiter, indem 16 aufeinander folgende Abtastungen ausgemittelt werden. So wird einerseits eine massive Reduktion der Datenmenge erreicht und andererseits das Verhältnis zwischen Signal und Rauschen (engl.: *SNR = signal to noise ratio*) optimiert. Die so verarbeiteten Signale werden in der Software laufend auf dem Bildschirm als A/R-Scope dargestellt und können kontrolliert und beobachtet werden. Jede Einzelmessung läuft über 4,7 min. In dieser Zeit werden 30.000 Abtastungen im Distanzbereich zwischen 0 bis 6,25 km des Radarsignals vorgenommen, was eine Datenmenge von rund 8 MB ergibt. Es wird eine Datei im Format *.ff1 erzeugt, die dann später von der Auswertsoftware *fixbeam* gelesen werden kann. Zusätzlich werden verschiedene Daten, wie Datum, Startzeit einer Messung, Elevation, Länge der Messung und der Name der ff1-Datei, in einer der Messkampagne zugeordneten Microsoft Access Datenbank geschrieben. Auf diese Datenbank wiederum wird bei späteren Bearbeitungs- und Auswertungsschritten durch das *fixbeam*-Programm zugegriffen.

Das Programm verfügt über zwei Messmodi, einen für manuell ausgelöste Messungen (default-Einstellung) und einen automatischen Messmodus, bei dem das Programm einen vorgegebenen Zeitplan für eine Messreihe befolgt. Das Messprogramm (Messzeiten, Messelevationen) ist als *.txt file gespeichert und kann den Bedürfnissen des Standortes

und/oder der Fragestellung angepasst werden. Im automatischen Messmodus laufen sämtliche Messvorgänge vollautomatisch ohne Benutzereingriff ab und ermöglichen so den autonomen Betrieb des Radars über mehrere Monate. Nach Abschluss einer Messung wird der Sender ausgeschaltet und das Radar ist im Standby-Modus (Schonung der Senderöhre).

3.2.2 Auswertungssoftware *fixbeam*

Die *fixbeam*-Software visualisiert die Radar-Rohdaten, ohne dass diese zuvor von unbekannten internen Filtern in irgendeiner Form weiterverarbeitet wurden. Um eine optimale Darstellung und damit die Bearbeitung und Auswertung zu ermöglichen, musste im Zusammenspiel aus Sendeleistung und Empfängerempfindlichkeit eine optimale Rauschschwelle (*dB-threshold*) ermittelt werden, bei der möglichst viele Störechos und Insekten aber möglichst wenig Vögel herausgefiltert werden. Die für Radarerfassungen mit dem fixed beam Radar ermittelte *dB-threshold* von -94,0 dB bleibt für jede Messung und jede Messkampagne gleich.

Als Basis-Software für statistische Berechnungen während der Auswertungen läuft im Hintergrund die Open Source Software R (Version 2.4.1, R Development Core Team 2007). Beim Start des Programms muss eine Verknüpfung mit der bei der Datenaufnahme erstellten Microsoft Access Datenbank hergestellt werden und anschließend die zugehörigen FF1-Dateien eingelesen werden (vgl. Kap. 3.2.1). Die Visualisierung einer Radarmessung erfolgt als zweidimensionale Darstellung von Zeit (Dauer der Messung) und Entfernung zum Sender (Abb. 9). Jedes Radarecho hat dabei einen standardisierten dB-Wert, d.h. jedes Echo bekommt den Wert zugewiesen, den es in 2.000 m Entfernung hätte (SCHMALJOHANN et al. 2008). Die Konvertierung der relativen Intensität des Radarrohsignals in einen dB-Wert ist durch die vorangegangene Kalibrierung mit einem Signal Generator möglich. Es werden nur solche Radarechos, deren standardisierte dB-Werte die *dB-threshold* überschreiten, dargestellt. Ein Echo wird als gelber bis oranger Strich dargestellt, dessen Länge in Abhängigkeit der Dauer der Passage durch die Radarkeule variiert und dessen Farbe die Intensität eines Echos angibt.

Bevor die Auswertung der Radardaten beginnen kann, werden permanent auftretende Clutter (z.B. Windenergieanlagen) durch eine Maske markiert und Regenechos als nicht auswertbarer Raum gekennzeichnet (Abb. 10). Als letzter vorbereitender Schritt muss die eigentliche Echodetektion durchgeführt werden. Dabei wird das blaue Radarbild nach Pixeln oberhalb der *threshold* gescant, wobei verschiedene Parameter der bisher nur visualisierten Echos erfasst und in eine Tabelle der Datenbank geschrieben werden. Jedes Echo erhält eine ID-Nummer. Insgesamt werden pro Echo 93 Variablen gespeichert, von denen die meisten vor allem für spätere automatische Auswertungsschritte erforderlich sind.

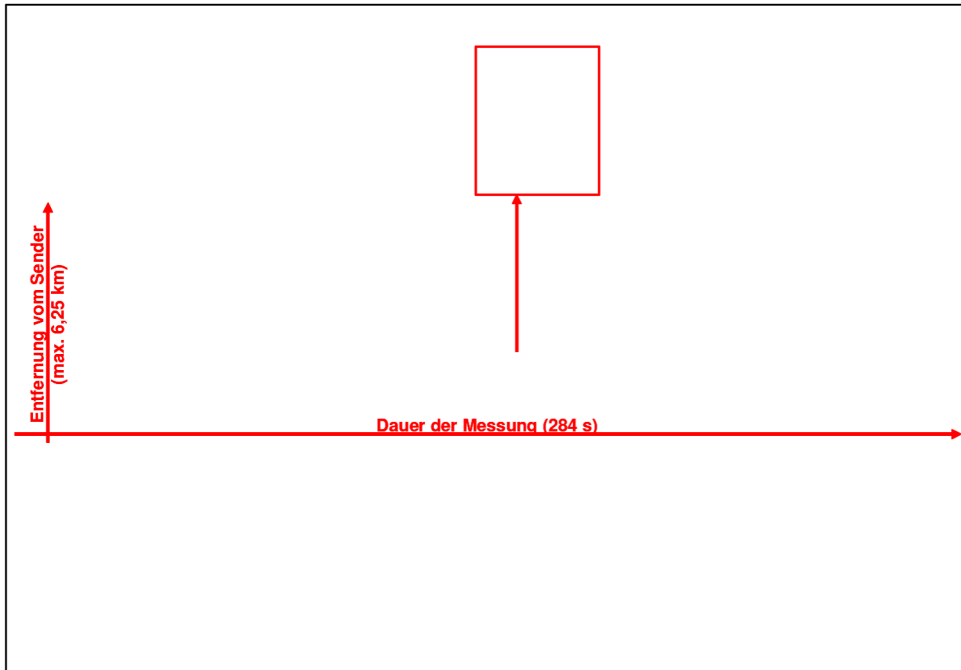


Abb. 9: Oberfläche der Auswertungssoftware *fixbeam*; der große blaue Kasten stellt eine als komprimiertes, zweidimensionales Bild visualisierte Radarmessung mit der Zeit auf der X- und der Entfernung zum Sender auf der Y-Achse dar. Der weiße Pfeil markiert ein Echo, das etwa zwischen 140 und 155 s nach Beginn der Messung die Radarkeule in einer Entfernung von rund 2300 m passiert hat.

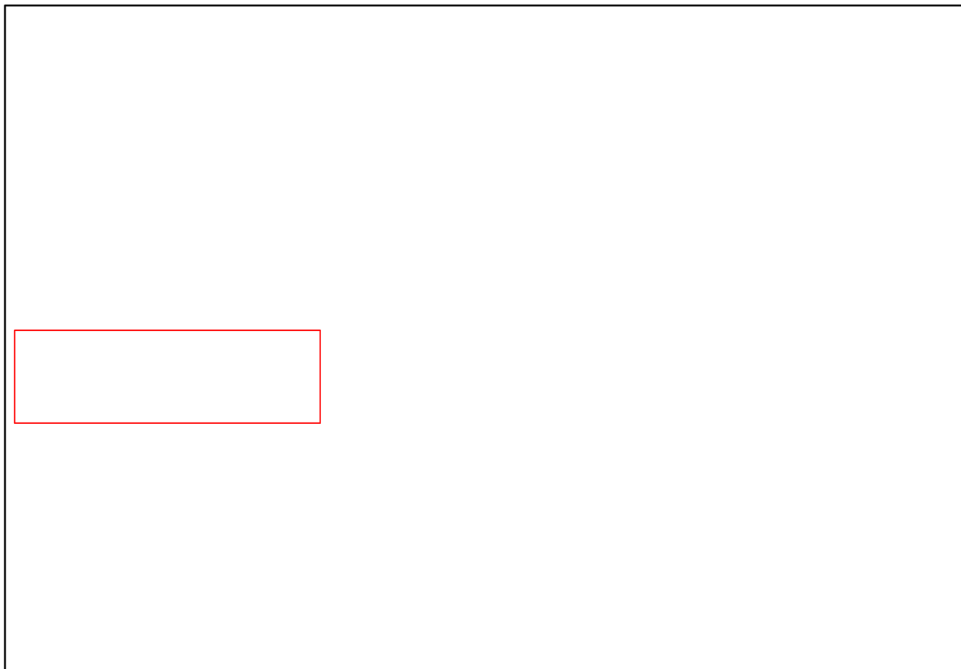


Abb. 10: Oberfläche der Auswertungssoftware *fixbeam*; die gelb-orange Fläche betrifft Regenechos, die durch den schmalen roten Kasten als nicht auswertbarer Raum markiert worden sind. Die waagerechten, grünen Linien sind durch eine Maske versehene, permanente Clutter.