

Aus der Schweizerischen Vogelwarte Sempach

## Vom militärischen Zielfolgeradar zum Vogelradar

Bruno Bruderer, Thomas Steuri, Janine Aschwanden und Felix Liechti



BRUDERER, B., T. STEURI, J. ASCHWANDEN & F. LIECHTI (2012): From military tracking radar to dedicated bird radar. *Ornithol. Beob.* 109: 157–176.

A brief summary shows the history of Swiss-made military tracking radar, used from the late 1960s for research on bird migration, being progressively transformed into a dedicated bird radar over a time of 40 years. Based on this development, three types of bird radars are now available for different tasks: (1) the robust military tracker, equipped with modern receivers and an automatic recording system, which is still the best multi-task radar available (with the capabilities of tracking single targets as well as recording the number and spatial distribution of migrating birds by its pencil-beam fixed at various elevations or conically scanning, the fixed-beam as well as tracking providing echo-signatures); (2) in order to bring the radar into difficult terrain, its essential parts were mounted on a truck, at the cost of losing tracking and scanning capability; (3) the most recent development was the replacement of the old radar by small modern ship radar adapted for pencil-beam surveillance in combination with the well-established automatic recording and analysis equipment; protected against weather by a radome and with the capability of automatic recording and data handling it is now a reasonably cheap array for specific tasks even in remote areas like marine platforms.

Data from four sites across Europe show height distributions and migration traffic rates recorded with the new radar. Advantages and limitations of the new method in comparison with other methods are discussed.

Bruno Bruderer, Janine Aschwanden, Felix Liechti, Schweizerische Vogelwarte, CH–6204 Sempach, E-Mail [bruno.bruderer@vogelwarte.ch](mailto:bruno.bruderer@vogelwarte.ch); Thomas Steuri, Softwarebüro Steuri GmbH, Gommen 1, CH–4950 Huttwil, E-Mail [info@swiss-birdradar.com](mailto:info@swiss-birdradar.com)

Die erste Phase der Radar-Ornithologie beruhte auf der Verwendung von militärischen oder zivilen Überwachungsradar-Anlagen mit horizontal rotierender Antenne (Übersicht in Eastwood 1967). Nach anfänglich eher zufälligen oder sporadischen Beobachtungen fanden in den Fünfzigerjahren erste systematische Studien mit solchen Anlagen statt (Weitnauer 1956, Sutter 1957a, b, Lack 1960a, 1963a, b). Da die in der Vertikalebene stark gefächerten Strahlen keine Höhenangaben lieferten, wur-

den in Einzelfällen auch vertikal wippende Antennen zur Erfassung von Flughöhen eingesetzt (Sutter 1957a, Harper 1958, Lack 1960b). Detailliertere Datenerfassung in begrenzten Bereichen wurde möglich mit eng gebündelten Radarstrahlen, die entweder konische Rotationsbewegungen ausführten (Bellrose & Graber 1963) oder senkrecht empor gerichtet wurden (Eastwood & Rider 1966, Eastwood 1967). Nachdem Schaefer (1966) gezeigt hatte, dass sich der Detaillierungsgrad der Radar-

information mit einem Zielfolgeradar noch erheblich steigern liess, griff Gehring (1967a, b) die Methode auf und zeigte, dass auch der Prototyp «Fledermaus» des Nachfolgegerätes «Superfledermaus» für ornithologische Studien verwendbar war. Edwards & Houghton (1959), Eastwood (1967) und insbesondere Schaefer (1968) erarbeiteten Grundlagen zum Verständnis der Entstehung und Eigenschaften von Vogeleos.

In der vorliegenden Publikation dokumentieren wir in einem ersten Schritt die technische Weiterentwicklung des militärischen Zielfolgeradars «Superfledermaus» und die damit angegangenen ornithologischen Fragen in ihrem historischen Zusammenhang. Wir verzichten dabei auf ornithologische Details und verweisen diesbezüglich auf die entsprechende Literatur. In einem zweiten Schritt wird ein auf dieser Entwicklung basierender, allwettertauglicher Kleinradar vorgestellt, der spezifisch für die automatische, quantitative Registrierung des Vogelzuges konzipiert wurde. Beispiele von Messungen über ganze Herbstzugperioden illustrieren erstmals die Unterschiede in den Höhenverteilungen und Zugintensitäten in Abhängigkeit von den topographischen Gegebenheiten auf einem Nord-Süd-Querschnitt durch Europa. Weil die neuen Nachtzugmessungen strikte auf identifizierte Vogeleos beschränkt sind, werden die mit dem neuen Radar erzielten Ergebnisse mit früheren Radardaten sowie mit Infrarot- und Mondbeobachtungen verglichen.

## 1. Vom Feuerleitradar zum Vogelradar

### 1.1. Die Superfledermaus als militärischer Zielfolgeradar

Aufbauend auf den Erfahrungen mit dem in den Fünfzigerjahren entwickelten Prototyp baute die Firma Contraves AG in den Sechzigerjahren den Zielfolgeradar «Superfledermaus», der ab 1963 das Standard-Feuerleitsystem der taktischen Fliegerabwehr in der Schweizer Armee war und ab 1975 schrittweise durch das Nachfolgegerät «Skyguard» ersetzt wurde. Mit 3,3 cm Wellenlänge, 0,3  $\mu$ s Pulslänge und 2,2° nomineller Strahlöffnung war das Gerät in einen 5 t schweren Anhänger eingebaut.

Es konnte ein erfasstes Ziel mit einer Genauigkeit von  $\pm 10$  m in der Distanz sowie von 0,06° in Azimut und Elevation verfolgen. Abgesehen von dieser hohen Genauigkeit in der Zielverfolgung zeichnete sich der Radar durch eine ausserordentlich hohe Pulsleistung von 150 kW aus. Diese grosse Leistung war für die militärische Zielverfolgung nicht nötig, weil die Kanonen auf Reichweiten von 4–5 km beschränkt waren. Sie wurde jedoch benötigt für die mit derselben Antenne erfolgende Raumüberwachung: Die Antenne konnte in eine vertikale Wipp-Bewegung und eine Rundsuch-Bewegung versetzt werden und lieferte damit ein Bild wie ein Überwachungsradar mit 50 km Reichweite, aber mit zusätzlicher Höheninformation. Eine rasche Rundsuch-Bewegung mit langsamer Vertikalbewegung der Antenne ermöglichte eine ähnliche Raumüberwachung.

### 1.2. Die Superfledermaus in der Ornithologie

Das aussergewöhnliche Verständnis, das der Erstautor in den späten Sechzigerjahren im Direktorium der Firma Contraves fand, ermöglichte den Einsatz eines damals noch unter strenger militärischer Geheimhaltung stehenden Hochleistungsgerätes für die wissenschaftliche Forschung. Die Firma stellte nicht nur die Radargeräte zur Verfügung, sondern sorgte auch für deren Unterhalt und für vielfältige technische Unterstützung. Wichtig war auch die Beratung durch den Radarmeteorologen Jürg Joss vom Osservatorio Ticinese der Meteorologischen Zentralanstalt. Ab 1968 wurden die Grundlagen für systematische Vogelzugbeobachtungen erarbeitet (Bruderer 1969, Bruderer & Joss 1969). Damit begann der konsequente Einsatz der Superfledermaus in der Ornithologie.

Wichtige Voraussetzung für die Erfassung der kleinen Ziele war die Abschirmung von Störeechos mit einem natürlichen oder künstlichen Erdwall mit im besten Fall 45° Böschungswinkel (Abb. 1). Die genauesten Angaben über die räumliche Verteilung der Vögel konnten mit vertikal gestelltem «Bleistiftstrahl» erreicht werden. Dabei musste ein bodennaher Bereich bis etwa 150 m Höhe mit ergänzenden Messungen auf geringer Elevation senkrecht zur

Hauptzugrichtung abgedeckt werden. Die Entfernungen der den Strahl passierenden Vögel wurden anfänglich auf Tonband diktiert, später filmisch registriert (Bruderer 1971, Bruderer & Steidinger 1972). Daraus konnte der zeitliche und räumliche Zugablauf abgeleitet werden. Dank der enorm hohen Pulsleistung des Gerätes konnten Kleinvögel bei Ansicht von unten und von der Seite bis etwa 5 km registriert werden. Im Zielfolgemodus war die automatische Verfolgung einzelner Kleinvögel bis knapp 4,5 km möglich.

Anhand der Echosignaturen von automatisch verfolgten Zielen konnten Vögel von Insekten und Fledermäusen unterschieden und verschiedene Vogeltypen und Vogelgrößen differenziert werden (Bruderer 1969). Der Radar wurde bezüglich seiner Reichweite für kleine definierte Ziele geeicht, indem ballon-getragene Metallkugeln verfolgt wurden (Bruderer & Joss 1969).

Eine erste umfassende Studie über den Ablauf des Frühlingszuges im schweizerischen Mittelland (Bruderer 1971) enthielt unter anderem eine Übersicht über Flügelschlagmuster, Analysen der räumlichen Verteilung des nächtlichen Vogelzuges, der Dichte- und Höhenvariation im Zusammenhang mit Wetterabläufen sowie des Flugverhaltens von Tag- und Nachtziehern. Steidinger (1972) untersuchte die

Reaktionen der Zugvögel auf die Windverhältnisse in unterschiedlichen Höhen.

In den Jahren 1971–1980 wurde versucht, den überwachten Raum zu vergrössern, indem eine Zählfläche senkrecht zur Hauptzugrichtung mit dem vertikal wippenden Strahl abgetastet und der auf dem Radar-Bildschirm resultierende Sektor fotografisch registriert wurde (Bruderer 1980). Allerdings liessen sich die Daten nur beschränkt auswerten, weil sie es (im Gegensatz zur Methode mit feststehendem Strahl und zur später entwickelten konischen Abtastung) nicht erlaubten, den Einfluss der Entdeckungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Distanz, Strahlelevation und Einfallswinkel der Radarwellen zu berechnen (s. unten). Obwohl die Methode aufgrund der offensichtlichen Nachteile nicht weiter verwendet wurde, setzte man im Zusammenhang mit der Verwendung von kleinen Schiffsradaranlagen in jüngerer Zeit wieder vergleichbare Methoden (vertikales Wippen oder Rotieren eines Fächerstrahles) ein, oft ohne die an sich bekannten Probleme der unbekanntenen Entdeckungswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen (s. dazu Schmaljohann et al. 2008). Für die Flugwege und Echosignaturen automatisch verfolgter Vögel wurden erste elektronische Registrierungsverfahren entwickelt (Bloch et al. 1981), und die Zahl bekannter Flügelschlagmuster wurde

**Abb. 1.** Radarstandort bei Bachenbülach (Kanton Zürich) im Herbst 1970. Der Grubenrand hinter dem Radar ist relativ hoch; auf der Gegenseite (Standort des Fotografen) konnte mit sehr niedriger Antennenelevation beobachtet werden (vgl. Bruderer 1971). Aufnahme B. Bruderer. – *Radar site near Bachenbülach (canton of Zurich) in autumn 1970. The slope of the gravel pit behind the radar is relatively high, but on the opposite side (position of the photographer) it was possible to work with very low elevation of the antenna (see Bruderer 1971).*





**Abb. 2.** Der Zielfolgeradar «Superfledermaus» auf dem Hahnenmoospass (Kanton Bern) vor dem Bergmassiv des Wildstrubels im Herbst 1974. Parallel zum Radarstrahl ist eine Filmkamera zur Aufzeichnung der Flügelschlagbewegungen von Vögeln und Fledermäusen montiert (Bloch et al. 1981). Aufnahme B. Bruderer. – *The tracking radar «Superfledermaus» on the pass of Hahnenmoos (canton of Bern) in autumn 1974. A cine camera is mounted parallel to the radar beam in order to record the wing-beat movements of birds and bats (Bloch et al. 1981).*

durch Freilassung identifizierter Vögel im Radarstrahl gesteigert (Bruderer et al. 1972, Bruderer & Neusser 1982).

Der Zeitraum von 1981 bis 1990 war charakterisiert durch die intensivierte Kombination verschiedener Methoden (Radar, Fang, Beringung, Feldbeobachtung des Tagzuges sowie des Nachtzuges mit grossräumig koordinierten Mondbeobachtungen) im Hinblick auf das Studium des Vogelzuges im Alpenraum (Bruderer

& Jenni 1990, Liechti et al. 1995a, Liechti et al. 1996a; Abb. 2). Die elektronische Registrierung von Radardaten wurde unter Einbeziehung der ersten Personal Computer so ausgebaut, dass schliesslich ein völlig computerisiertes Registriersystem zur Verfügung stand (Bruderer et al. 1995). Es ermöglichte die Darstellung von Flugwegen, Flügelschlagmustern und konischer Abtastung auf dem Computerbildschirm (Bruderer & Jenni 1988b, Bruderer



**Abb. 3.** Idealer Radarstandort in einer natürlichen Grube mit niedrigem Rand bei Nürnberg im Herbst 1987. Weitere Abbildungen bei Bruderer & Liechti (1990). Aufnahme B. Bruderer. – *Ideal radar site in a natural cavity near Nuremberg in autumn 1987. Further illustrations in Bruderer & Liechti (1990).*

1997a). Konische Abtastbewegungen auf verschiedenen Elevationen wurden ab 1987 zum Standard-Messsystem für die Quantifizierung des Vogelzuges. Diese Messmethode lieferte Angaben über die Zugdichte (Vögel/km<sup>3</sup>). Detaillierte Analysen der elektronisch gespeicherten Daten ermöglichten es, den Einfluss der Entdeckungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Distanz, vom Elevationswinkel und vom Einfallswinkel der Radarwellen auf die Ziele zu berechnen (Bruderer et al. 1995).

Das Jahrzehnt von 1991 bis 2000 galt dem Studium des Vogelzuges im östlichen (Bruderer 1999, Bruderer et al. 2000; Abb. 5) und westlichen Mittelmeergebiet (Bruderer & Liechti 1999). Methodische Fortschritte betrafen die Einführung einer mathematisch exakten distanzabhängigen Verstärkungsanpassung (sensitivity time control STC). Sie kompensiert die Abnahme der Echogrösse mit der vierten Potenz der Zielentfernung (R<sup>4</sup>-Gesetz). Indem

der Radarstrahl, ein Fernrohr und ein passives Infrarotgerät gleichzeitig auf den Mond gerichtet wurden, konnte beim Radar die effektive Strahlbreite ermittelt werden, während bei den beiden optischen Systemen die Silhouettengrösse der Vögel in verschiedenen Distanzbereichen definiert wurde (Liechti et al. 1995b). Die Präsentation der elektronisch registrierten Flugwege und Flügelschlagmuster wurde perfektioniert ([www.swiss-birdradar.com](http://www.swiss-birdradar.com)). Experimente zeigten, dass unser Radar keinen sichtbaren Einfluss auf das Flugverhalten von Vögeln hatte, während ein Lichtstrahl auffallende Veränderungen ergab (Bruderer et al. 1999). Im Hinblick auf verbesserte Identifikationsmöglichkeiten und für die Berechnung von spezifischen Zugleistungen wurde ein Katalog der Flugeschwindigkeiten von 139 Vogelarten erarbeitet (Bruderer & Boldt 2001).

2001–2010 war das Jahrzehnt des Sahara-Projektes (Liechti & Schmaljohann 2007) und



**Abb. 4.** Registrieranlage in den späten Achtzigerjahren mit (von links nach rechts) einem X(t)-Schreiber zur Visualisierung von Flügelschlagmustern, einem Tonbandgerät zur Speicherung von Flügelschlagmustern und einem XYY'-Schreiber zur Aufzeichnung der Flugwege verfolgter Vögel. All diese Daten wurden zugleich elektronisch in einem PC gespeichert. Im Computer wurden zudem die auf konischer Abtastung mit dem Radarstrahl basierenden Messungen der Zugdichte registriert (s. das Computerbild mit dem digitalisierten Radarbildschirm rechts im Hingergrund). Weitere Abbildungen dazu in Bruderer et al. (1995, 2000). – *Recording equipment in the late 1980s comprising (from left to right) an X(t)-plotter for the visualisation of wing-beat patterns, a tape recorder to register the wing-beat patterns electronically, and an XYY'-plotter recording the flight paths of the tracked birds. All these data were simultaneously stored in a PC. Additionally we registered the measurements of migratory density based on conical scanning of the radar beam (note the computerized radar scope on the computer screen to the right in the background). Further illustrations in Bruderer et al. (1995, 2000).*

der Entwicklung des «Swiss Birdradar». In der westlichen Sahara (Mauretanien) wurden in zwei Frühlingszugperioden (2003 und 2004) und einer Herbstzugperiode (2003) zwei Zielfolgeanlagen in der Standardversion eingesetzt, eine an der Küste und eine in der Nähe einer Oase, 500 km landeinwärts. Um auch weiter nach Osten in die Wüste vordringen zu können, wurde ein mobiler Radar entwickelt (Abb. 6). Unter Verzicht auf konische Abtastung und automatische Verfolgung wurde das Gewicht der Radaranlage auf weniger als eine Tonne und der Energieverbrauch auf etwa 1 kW reduziert. Als Messmethode wurde die bereits 1968 verwendete Methode mit auf verschiedenen Elevationen fixierbarem Strahl reaktiviert und mit einem elektronischen Steuerungs- und Registriersystem verbunden. Die ganze Anlage wurde auf einem Steyr-Lastwagen montiert.

Dank optimiertem Empfängersystem und digitaler Registrierung konnte der zeitliche Ablauf des Vogelzuges bis 7,5 km Höhe erfasst werden. Zudem wurde es möglich, von jedem den Strahl durchquerenden Vogel ein Flügelschlagmuster zu erhalten. Im Gegensatz zur konischen Abtastung wird im stillstehenden Strahl nicht die Zugdichte gemessen, sondern die Zugfrequenz oder Durchzugsrate, d.h. die Zahl der Vögel, die innerhalb eines bestimmten Höhenintervalls pro Stunde eine Linie von einem Kilometer quer zur Zugrichtung überqueren (Vögel/km/h).

Auf den Standardstationen (d.h. den festen Stationen an der Küste und bei der Oase) wurden für die quantitative Erfassung des Zuges die konische Abtastung und der feststehende Strahl parallel verwendet. Der Wunsch nach einem Katalog von Flügelschlagmustern wurde erfüllt mit der Publikation der Schlagfrequenzen von 155 Arten sowie der intermittierenden Schlagmuster von 41 Arten mit singvogelartigem Flug (Bruderer et al. 2010).

Die Datenanalyse basiert mittlerweile auf einem Computerprogramm, das alle Echos sammelt, die nicht als Fest-Echos deklariert sind und deren Amplitude die distanzabhängige Abschwächungsvorrichtung (STC) übersteigt. Für jedes Ziel extrahiert das Programm eine Reihe von Variablen. Diese ermöglichen es mit Hilfe einer Diskriminanzfunktion, die Ziele als Vögel, Insekten oder «andere Signale» zu klassieren (Zaugg et al. 2008). Die Vögelechos werden herausfiltriert und bezüglich Distanz, Elevation und Aspekt korrigiert, was schliesslich unter Berücksichtigung des überwachten Raumes die Berechnung von Zugfrequenzen (Vögel/km/h) ermöglicht und unter Einbeziehung der mittleren Flugeschwindigkeit die Berechnung von Zugdichten (Vögel/km<sup>3</sup>) erlaubt (Schmaljohann et al. 2008).

Der für das Sahara-Projekt entwickelte mobile Radar bildete die Basis für die im Folgenden dargestellte Entwicklung von Vogel-Registrieranlagen, welche dank der Integration von



**Abb. 5.** Künstlich gebauter Damm in der Wüste des Arava-Tals (Israel, 1991), der den Radar gegen alle störenden Echos aus der Umgebung abschirmte. Weitere Abbildungen dazu in Bruderer et al. (2000). Aufnahme H. Stark. – *An artificially constructed dam in the desert of the Arava-Valley (Israel, 1991) screening off all ground-clutter from the surroundings. Further illustrations in Bruderer et al. (2000).*



**Abb. 6.** Forschungscamp in der mauretanischen Sahara mit dem auf einem Steyr-Lastwagen montierten und damit mobilen Radar. Weitere Bilder bei Liechti & Schmaljohann (2007). Aufnahme F. Liechti. – *Research camp in the Mauritanian Sahara, the radar mounted on a truck in order to become a mobile station. Further illustrations in Liechti & Schmaljohann (2007).*

modernen, kleinen Radargeräten leichter und elektronisch stabiler wurden.

Übersichten zu den Möglichkeiten und Grenzen der Radarornithologie finden sich bei Eastwood (1967) und Bruderer (1997a, b, 2003), weitere Angaben über die Entwicklung der Superfledermaus zum Vogelradar auf der Website [www.swiss-birdradar.com](http://www.swiss-birdradar.com), wo in der Rubrik «history» auch eine entsprechende Publikation (Bruderer 2007) als PDF zur Verfügung steht.

Die Superfledermaus in der Standardversion ist immer noch das vielseitigste System zum Studium des Verhaltens ziehender Vögel. Es ist aber aufwändig im Einsatz und im Unterhalt und wird nur noch für spezifische Aufgaben (z.B. Sahara-Projekt) eingesetzt. Der für das Sahara-Projekt speziell entwickelte mobile Radar wird durch den nachfolgend beschriebenen Swiss Birdradar ersetzt.

## 2. Swiss Birdradar

### 2.1. BirdScanMT1

Die langjährige Erfahrung mit der Superfledermaus ermöglichte es, ein neues leistungsfähiges Radarsystem zur Detektion und Analyse von Vogelzugbewegungen zu konzipieren. Die Sende-/Empfängereinheit eines handelsüblichen Schiffsradargerätes wurde kombiniert mit einem selbst entwickelten Radarprozessor und

einer Registriereinheit, die beide in bis zu 30 m Entfernung vom Radar untergebracht werden können.

Das neue System «BirdScanMT1» zeichnet sich durch eine relativ hohe Pulsleistung (25 kW), einen empfindlichen Empfänger sowie einen hohen Antennengewinn und damit eine grosse Reichweite selbst für kleine Vögel aus (einzelnes Goldhähnchen *Regulus* sp. bis etwa 3 km, Mauersegler *Apus apus* bis 6,2 km). Die Inbetriebnahme ist einfach und erfordert weniger als 2 h. Hohe Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb wurde durch Verwendung robuster Standardkomponenten erreicht. Eine als «Radom» bezeichnete Kunststoffhaube macht die Anlage allwettertauglich, so dass der Einsatz sowohl im Hochgebirge als auch auf marinen Plattformen möglich ist. Die Anlage ist wartungsarm und für automatischen, programmgesteuerten Betrieb geeignet.

### 2.2. Die Radareinheit

BirdScanMT1 verwendet den von Sperry Marine produzierten Radar Bridgemaster E, Typ 65825H. Ein Magnetron-Sender mit einer Leistung von wahlweise 10 oder 25 kW wird durch einen Modulator angesteuert, der keine Röhren, sondern nur Halbleiter enthält, was hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer garantiert. Die für den Schiffsradareinsatz charakteristische Bal-

kenantenne wurde durch eine Parabolantenne von 1 m Durchmesser ersetzt. Der Empfänger besteht aus einem schmalbandigen und rauscharmen Verstärker mit einer Rauschzahl von 5 dB. Die empfangenen Signale werden direkt im X-Band-Bereich verstärkt und an einen logarithmischen Verstärker weitergereicht. Am Ausgang der Verstärkereinheit werden die Signale demoduliert und können als Videosignal abgegriffen und weiter verarbeitet werden.

Der in der Originalversion vorhandene Motor für die Rundsuchbewegung wurde durch eine horizontale Positionssteuerung ersetzt. Damit kann der horizontale Winkel oder Seitenwinkel im Bereich von  $270^\circ$  mit einer Genauigkeit von  $\pm 1^\circ$  verstellt werden.

Auch die Elevation- oder Höhenwinkelverstellung der Antenne wird über einen Positionsmotor erreicht, der auf der einen Seite des Elevationssystems montiert ist und Elevationen von  $-1$  bis  $70^\circ$  erreichen kann. Nach jedem Einschalten des Systems bestimmt ein Absolutwert-Sensor die genaue Position der Elevation (präziser als  $0,05^\circ$ ). Zur Einstellung und Kontrolle der horizontalen Ausrichtung des Radarsystems ist auf der Grundplatte des Antennenchochs eine Kreuzlibelle mit einer Auflösung

von 1 Promille montiert. Unter Berücksichtigung von Horizontierfehler und Antennenfehler dürfte in der Praxis eine Genauigkeit des Höhenwinkels von etwa  $0,2^\circ$  erreicht werden.

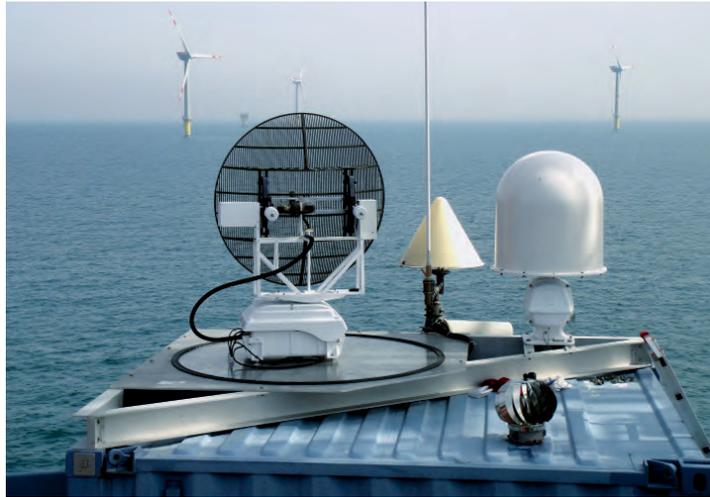
Die Radaranlage und speziell die offene Einrichtung für die vertikale Positionierung der Antenne werden mit einem Radom vor Witterungseinflüssen geschützt. Diese Haube hat einen Durchmesser von etwa 1,5 m und besteht aus einem glasfaserverstärkten Kunststoff, der hohe mechanische Belastungen aushält, aber relativ leicht ist und Mikrowellenstrahlung nur marginal abschwächt. Ausgezeichnetes Korrosionsverhalten ist vor allem für den Einsatz auf hoher See nötig. Für die Offshore-Anwendung wird das Radom mit 12 Edelstahl-Klammern auf eine seewasserbeständige Aluminium-Grundplatte geklemmt. Eine dazwischen gelegte Gummidichtung verhindert das Eindringen von Feuchtigkeit. Für Anwendungen auf dem Land reicht eine Grundplatte aus Holz (z.B. Siebdruckholz).

### 2.3. Steuerungs- und Registereinheit

Eine Steuerungs- und Registereinheit wird über vier je bis zu 30 m lange Kabel an das



**Abb. 7.** Blick auf die Meeresplattform Fino 1 in der Nordsee ( $54^\circ 1' N / 6^\circ 35' E$ ) am Rand des ersten deutschen Offshore-Windparks. Links der Helikopter-Landeplatz, darunter ein Messgeräte-Container; im Zentrum ein Container-Dach mit dem Swiss Birdradar unter dem grossen Radom, einem weiteren Radar (für Vergleichsmessungen) unter dem kleinen Radom sowie einem GPS unter einer kegelförmigen Kunststoffabdeckung. Im Hintergrund mehrere Windturbinen, diejenige rechts mit einem Unterhaltsschiff. Aufnahme T. Steuri. – *View of the marine platform Fino 1 in the North Sea ( $54^\circ 1' N / 6^\circ 35' E$ ). To the left a landing place for helicopters with an office-container below it; in the centre the roof of a container with the Swiss Birdradar under the big radome, another radar (for comparison measurements) under a small radome as well as a GPS under a cone-shaped plastic-cover. In the background several wind turbines, the one at the right with a maintenance-vessel.*



**Abb. 8.** Der Swiss Birdradar ohne Radom neben den beiden in Abb. 7 erwähnten Zusatzgeräten. Unter dem Radar befindet sich die Aluminium-Grundplatte mit dem schwarzen Ring der Gummidichtung für das Radom. Die parabolische Gitterantenne ist aufs Meer hinaus gerichtet. Links und rechts am Antennenjoch sind die weissen Anbauten für die Steuerung und Kontrolle der Elevation sichtbar, unter dem Joch die Radareinheit mit dem Steuermotor für den Seitenwinkel. Ein flexibler Schlauch mit den Steuerkabeln verbindet Antenne und Radareinheit; vier Verbindungskabel führen zur im Container untergebrachten Steuerungs- und Registriereinheit. Aufnahme T. Steuri – *Swiss Birdradar without radome next to the two additional devices mentioned under Fig. 7. Below the radar, the aluminium platform with the black circle of the rubber-joint for the radome is visible. The parabolic grid-antenna is directed towards the sea. To the left and right of the antenna-cross-head are the mountings for the elevation control, below the antenna the radar-unit with the integrated azimuth-motor. A flexible tube containing the control cables connects the antenna with the radar-unit; four cables lead to the control- and recording-unit in the container.*

Radarsystem angeschlossen. Sie besteht aus einem Radarprozessor zur Ansteuerung des Radars sowie einem Industriecomputer, der das Rohvideo in Echtzeit digitalisiert. Ein integriertes Datenerfassungsprogramm verarbeitet online alle Daten einer Messung und speichert sie in einer Binärdatei. Diese beiden Einheiten werden separat an einem geschützten Ort (z.B. Container oder Anhänger) untergebracht.

Der eigens entwickelte, PC-gestützte Radarprozessor ersetzt – in Kombination mit einem bei Sperry Marine erhältlichen Steuerungsinterface – die für die Steuerung eines Schiffsradars normalerweise vorhandene Konsole. Das Interface ermöglicht auf der Ausgangsseite die Ansteuerung des Radars und bietet auf der Eingangsseite offene Schnittstellen für den Steuerungscomputer. Der Radarprozessor liefert die Steuersignale für den Betrieb des Radars (Abb. 9). Der Steuerungs- und Registriercomputer ist ein aus Standardkomponenten aufge-

bauter Industriecomputer, der in ein Racksystem eingebaut werden kann. Der Steuerungsteil enthält die Software für die Ansteuerung des Radarprozessors. Im Registrierteil ist eine Einheit für die Erfassung des vom Radar gelieferten Rohvideosignals eingebaut, die das Radarsignal mit einer Frequenz von 12 MHz abtastet und die Daten laufend an die interne Datenerfassungssoftware «BirdScan» übergibt. Diese Software digitalisiert die vom Radar gelieferten Rohdaten, verarbeitet sie in Echtzeit (Ausmittlung, Datenreduktion, Interferenzfilterung) und speichert sie als Binärfiles. Sämtliche Messungen, Parameter und Systemmeldungen werden in einer SQL-Datenbank protokolliert.

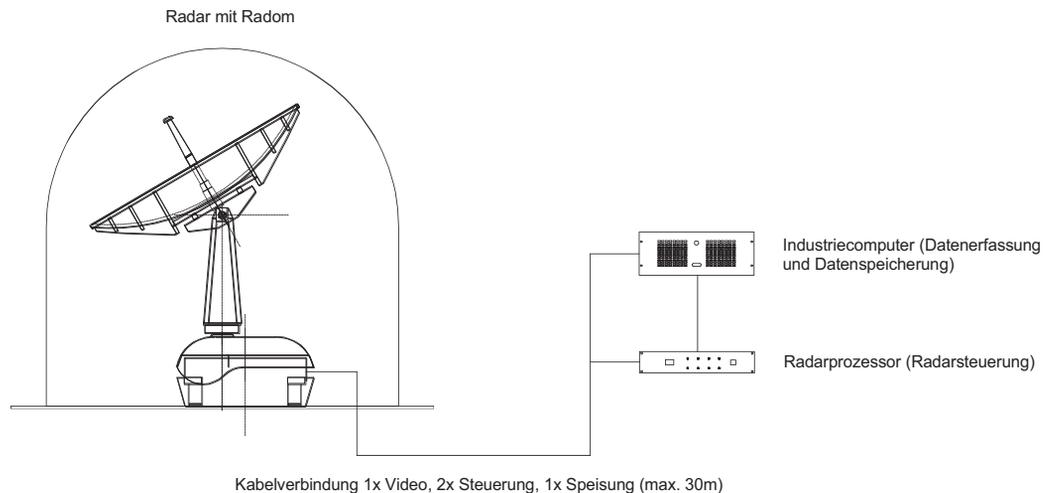
Messungen können entweder manuell oder automatisch ausgelöst werden. Manuelle Messungen eignen sich zu Kontrollzwecken oder für die Beurteilung eines geeigneten Messstandortes, während automatische Messungen für Messkampagnen verwendet werden. Das

Messprogramm kann in einem Textfile hinterlegt werden und umfasst die Startzeit einer Messung, die Einstellung der Antennenposition (Azimut und Elevation), die Pulslänge und die Messzeit. In der Regel dauert eine Messung etwa 5 min. Im Anschluss an die Messung werden Vorschaubilder in verschiedenen Auflösungen erzeugt, die mit Hilfe einer kleinen Software auf einen beliebigen FTP-Server im Internet hochgeladen und extern kontrolliert werden können. Das System ist so konfiguriert, dass es nach einem Stromausfall selbstständig wieder startet und so einen praktisch unterbrechungsfreien Betrieb über lange Zeit ermöglicht. Informationen über den Systemzustand und die gemachten Messungen werden automatisch per E-Mail an externe Kontrollinstanzen verschickt.

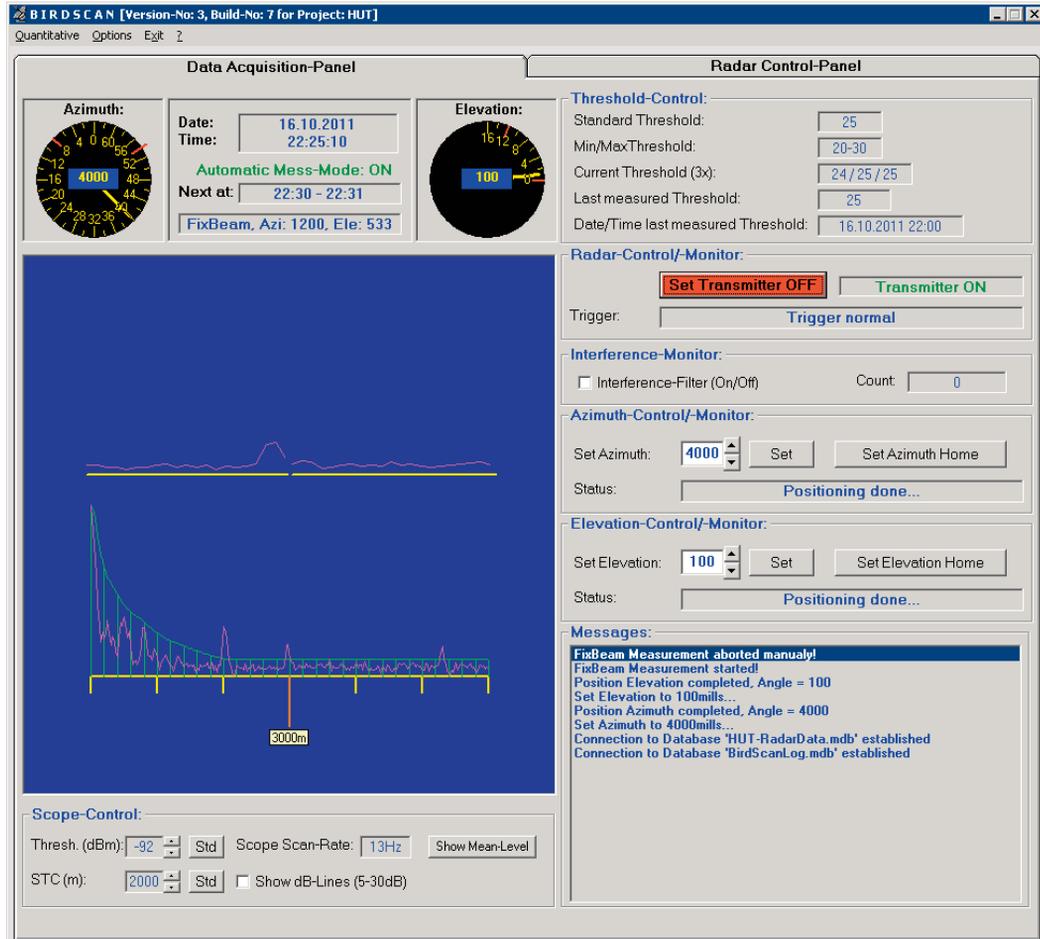
#### 2.4. Der Bildschirm von BirdScan

Die beiden Instrumente am oberen Bildschirmrand von BirdScan zeigen die aktuellen Messrichtungen (Azimut 4000 = Südost; Elevation

100 = 5,6°; Abb. 10). Die Masseinheiten sind Artillerie-Promille (A‰ = Kreiseinteilung mit 6400 Promillen statt 360°), da die Auswerteprogramme für die Superfledermaus mit diesen Einheiten rechnen. Der Hauptteil des Bildes umfasst den Radarbildschirm, der die Echoamplituden in Abhängigkeit von der Distanz zeigt (A/R-Scope). Die gelbe Linie mit Kilometer-Marken entspricht dem Radarstrahl von 0 bis 6 km. Die orange Linie zeigt einen mit der Maus verschiebbaren Distanzmarker, der hier bei 3000 m steht, das Radarecho eines Vogels bei knapp 3000 m. Das Echo wird auf der oberen gelben Linie vergrößert dargestellt ( $\pm 500$  m um den Distanzmarker). Ein anderes Vogechecho befindet sich in einer Distanz von 2000 m und ein weiteres schwächeres Echo bei 5300 m. Die grüne Linie stellt einen Schwellenwert dar, der im Nahbereich (bis 2000 m) entsprechend der gewählten STC-Funktion verläuft. Die Darstellung lässt sich über die Steuerelemente (Scope-Control) unter dem Radarbild beliebig anpassen. Diese Einstellungen



**Abb. 9.** Schema des Swiss Birdradar mit den Verbindungen zwischen der Radareinheit links und den Registrier- und Steuerungseinheiten rechts. Im Industriecomputer erfolgt die Datenerfassung und -speicherung. Der Radarprozessor nimmt (via das integrierte Radar-Interface) die Zustandsdaten des Radars auf und gibt (über dasselbe Interface) die Steuerungsbefehle an die Radareinheit weiter. Die Befehle und Programme für die Steuerung werden im Industriecomputer generiert und gespeichert. Abb. 10 zeigt den zugehörigen Bildschirm. – Schematic of the Swiss Birdradar with the radar-unit to the left and its cable connections to an industry computer containing the units for video-scanning and data recording. The radar processor receives (via the integrated radar-interface) the status signals of the radar and transmits (via the same interface) the control signals for the operation of the radar-unit. The commands and programs for the control of the radar-unit are produced and stored in the industry computer. Fig. 10 shows the associated display-unit.



**Abb. 10.** Bildschirm von BirdScan. Beschreibung im Text. – *The display-unit of BirdScan shows the actual status of the radar and a digitized radar scope with an amplitude-range indicator (A/R-scope) covering 6 km, and an enlarged part of the A/R-indicator ( $\pm 500$  m to the left and right of the distance marker) in the upper part of the screen. The distance marker (orange line next to a bird echo at about 3000 m) can be moved with the computer mouse. Further bird echoes are visible at 2000 and 5300 m. The green line indicates the STC-function chosen for the actual display. Above the screen, two instruments show the azimuth and elevation of the antenna (in artillery per mills). The display can be adapted with the control elements (Scope-Control). The right side of the screen contains control elements for azimuth, elevation, and the radar itself. A further panel allows switching on an interference filter to avoid disturbance by other radars working in the same frequency band.*

haben aber nur Einfluss auf die Darstellung der Daten und nicht auf ihre Erfassung. Diese umfasst immer das ganze Rohvideo ohne Veränderungen des Originalsignals durch die STC. So lassen sich Auswertungen beliebig mit anderen Auswerteparametern wiederholen.

Auf der rechten Seite des Bildschirms befinden sich weitere Kontrollelemente für die Steuerung

der Radarantenne (Azimut- und Elevation-Control) und des Senders (Radar-Control/Monitor). Über ein weiteres Panel kann ein Interferenzfilter zu- oder abgeschaltet werden, das Störungen durch andere Radarsysteme mit gleichem Frequenzbereich verhindert. Im Feld rechts unten werden laufend wichtige Systemmeldungen angezeigt.

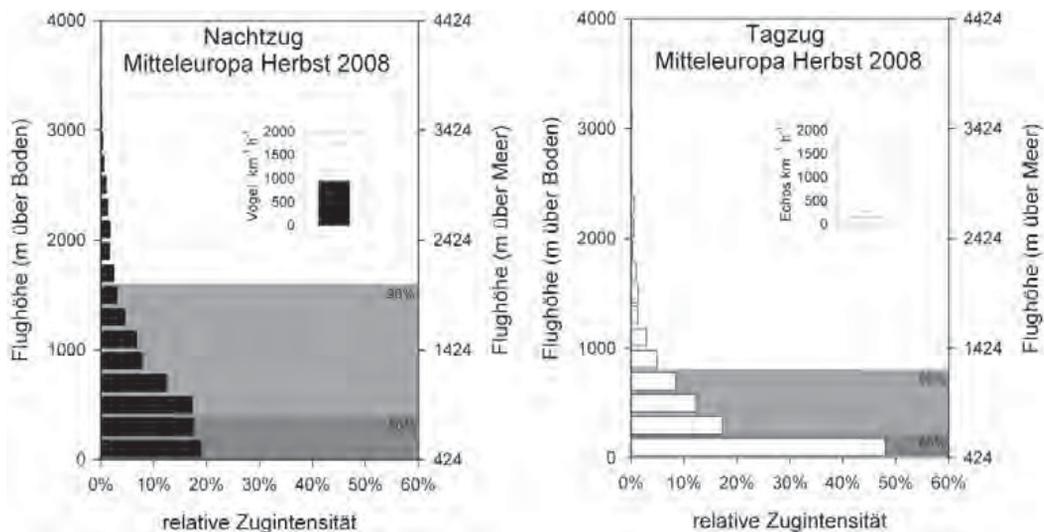
### 3. Zughöhen und Zugintensitäten von der Ostsee bis Sizilien

In verschiedenen Publikationen haben wir die generelle Höhenverteilung des Nacht- und Tagzuges im Flachland von Mitteleuropa, im Falle des Nachtzuges auch dessen Variation unter verschiedenen Wetterbedingungen gezeigt (z.B. Bruderer 1971, Bruderer & Liechti 1998, 2004). Die neuen mobilen Anlagen ermöglichen nun auch Messungen an extremen Standorten. Abgesehen von den hier nicht gezeigten Daten aus der Sahara (z.B. Liechti & Schmaljohann 2007) konnten quantitative Messungen auf einem Alpenpass, an der Südspitze Italiens und an der Ostsee durchgeführt werden. Um die Extremstandorte mit einer Situation in Mitteleuropa zu vergleichen, fügen wir Daten von Möggingen am Bodensee bei.

Alle Darstellungen für den Nachtzug beziehen sich auf die Zeit zwischen der Zivilen Dämmerung am Abend und jener am Morgen. Für den Tagzug wurden Daten zwischen Ziviler Dämmerung am Morgen und jener am Abend

verwendet. Um Tag und Nacht sowie verschiedene Stationen direkt vergleichen zu können, werden relative Zugdichten pro Höhenintervall von 200 m gezeigt. Die Höhenbereiche, in denen 50 % bzw. 90 % der Vogeleos festgestellt wurden, sind unterschiedlich schattiert. Die mittlere Gesamtzugintensität (Gesamtdurchzugsrate = Anzahl Vögel, die in einer Stunde eine Linie von 1 km quer zur Hauptzugrichtung überqueren) wird in Form einer eingefügten Säule (mit der Standardabweichung als Streuungsmass) gezeigt.

Im Nachtzug werden nur aufgrund von Echosignaturen identifizierte Vogeleos einbezogen. Tagzugdaten sind weniger ausschliesslich auf Vogeleos limitiert, da die am Tag mehrheitlich in Schwärmen ziehenden Vögel nicht anhand von Echosignaturen identifizierbar sind. Da die Schwärme eine unbekannte Zahl von Individuen enthalten, sagen Tagzugdaten lediglich etwas aus über die Anzahl und Verteilung der mutmasslichen Vogeleos, aber nichts über die effektive Zahl der passierenden Vögel.



**Abb. 11.** Relative Höhenverteilung des Nachtzuges und des Tagzuges bei Möggingen am Bodensee (424 m ü.M.). Die Bereiche, innerhalb derer 50 % bzw. 90 % der Vögel flogen, sind dunkel- bzw. hellgrau schattiert. Die linke Skala zeigt die Höhe über dem Radarstandort, die rechte Skala die Höhe über Meer. Als Zusatzinformation ist in den kleinen eingefügten Grafiken die Gesamtzugrate (Vögel/km/h) im Höhenbereich mit 90 % des Zuges angegeben. – *Proportional height distribution of nocturnal and diurnal migration near Möggingen at the Lake of Constance (424 m a.s.l.). The zones containing 50 % and 90 % of the birds are shaded dark and light grey, respectively. The scale to the left indicates the altitude above the radar, the right scale altitude a.s.l. The small inset indicates total migration traffic rate (birds/km/h) within the 90 % range of migration.*

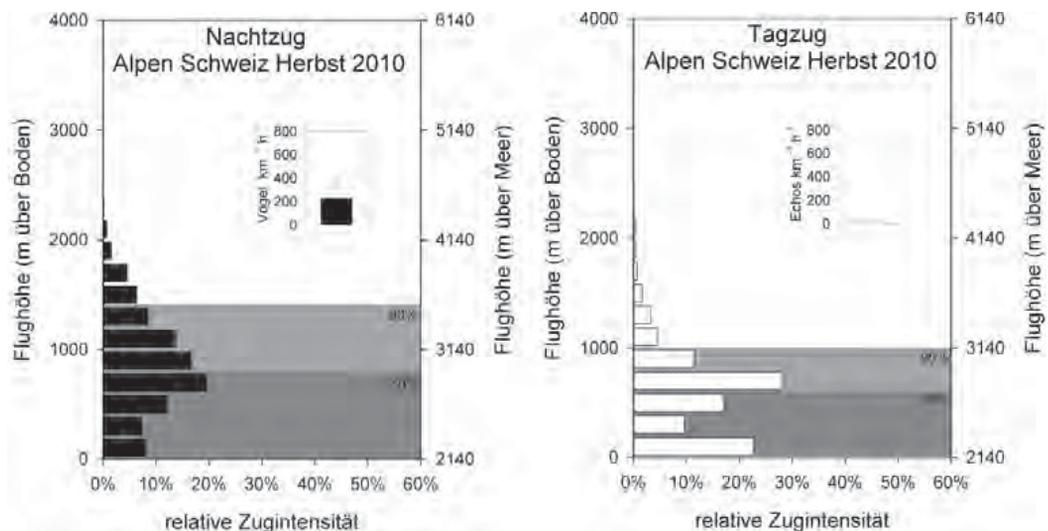
### 3.1. Bodensee

Als Referenzdatensatz für Mitteleuropa verwenden wir Daten von Möggingen am Bodensee (47° 46'N/9° 00'E, 424 m ü.M., 16 km nordwestlich von Konstanz D) aus der Zeit vom 12. August bis 6. November 2008 (Abb. 11). Die Hügel in der Umgebung des Sees erheben sich 200–300 m über das Seenniveau und verlaufen senkrecht zur Hauptzugrichtung. Aufgrund der Hügelzüge ist deshalb nicht mit einer lokalen Kanalisierung des Zuges zu rechnen. Der Tagzug dürfte allerdings am Westrand des Bodensees etwas verdichtet sein, weil es viele Tagzieher vermeiden, den See an der breitesten Stelle zu überqueren (Schuster et al. 1983). Da der Vogelzug grossräumig durch den Verlauf der Alpen gegen WSW abgelenkt wird (Bruderer & Jenni 1988a), ist zu erwarten, dass die Zugintensität gegenüber weiter von den Alpen entfernten Gebieten um einen Faktor 2–3 erhöht ist; sie ist wohl etwa 3- bis 5-mal höher als über den Alpen (Liechti et al. 1996a, b). Die Höhenverteilung des Nachtzuges dürfte für den mitteleuropäischen Durchschnitt repräsentativ sein, es sei denn, dass der Zug in Höhen über

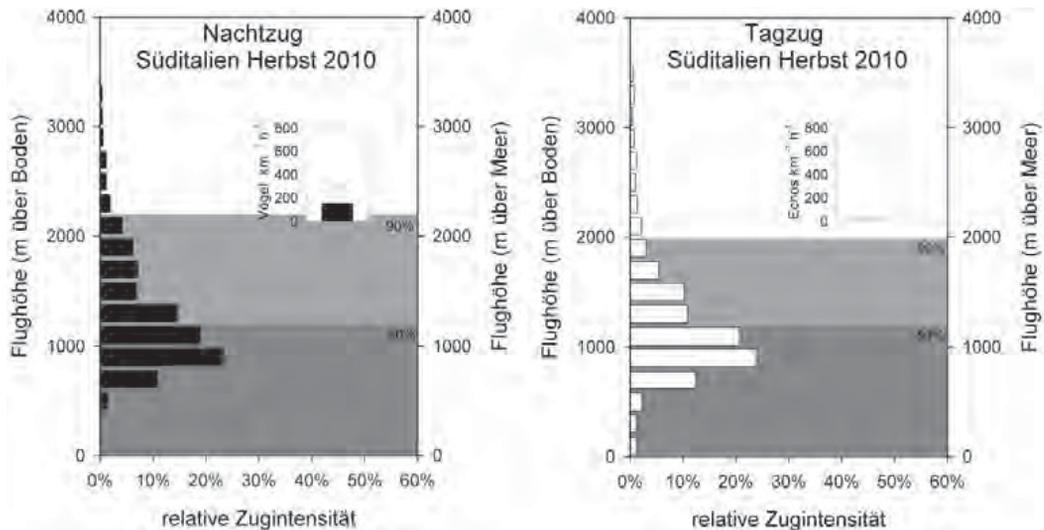
2000 m etwas weniger verdichtet wäre als in den stark durch die Zugablenkung betroffenen Bereichen darunter. Die Höhenverteilungen sind in der Nacht und am Tag ähnlich wie jene im Zentrum des schweizerischen Mittellandes und an der Schwäbischen Alb (Bruderer & Liechti 2004). In den Daten von der Alb ist der Tagzug im untersten Intervall durch die lokale Topographie und den Wetterverlauf noch etwas stärker verdichtet als am Bodensee.

### 3.2. Schweizer Alpen

Die Beobachtungen in den Schweizer Alpen erfolgten in der Zeit vom 3. September bis 18. Oktober 2010 auf dem St. Gotthardpass (46° 33'N/8° 35'E, 2140 m ü.M., Kantone Uri und Tessin) im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung für geplante Windturbinen. Die im Norden vorgelagerten Bergkämme ragen etwa 500 m über die Passhöhe auf. Es ist deshalb verständlich, dass neben den vor allem im Tagzug durch das Tal anfliegenden Vögeln ein grosser Anteil auf der Höhe von 500 m über dem Radar konzentriert ist, während die Zugdichte unter und über diesem Niveau abnimmt



**Abb. 12.** Relative Höhenverteilung des Nachtzuges und des Tagzuges über dem St. Gotthardpass, gemessen von einer leicht erhöhten Stelle (2140 m ü.M.) östlich des Passes. Darstellung wie in Abb. 11. – *Proportional height distribution of nocturnal and diurnal migration above the St. Gotthard pass, as seen from a slightly elevated site (2140 m a.s.l.) to the east of the pass. Presentation as in Fig. 11.*



**Abb. 13.** Relative Höhenverteilung des Nacht- und Tagzuges am Mittelmeer (Strasse von Messina). Darstellung wie in Abb. 11. – *Proportional height distribution of nocturnal and diurnal migration at the Mediterranean Sea (Strait of Messina). Presentation as in Fig. 11. Note that the lowest elevation of the radar beam was  $-5.6^\circ$  allowing measurements down to sea-level.*

(Abb. 12). Die Vögel vermeiden es, nach der Überquerung eines Bergkammes wieder abzusinken; im Tagzug folgen aber mehr Vögel dem Talverlauf, was zu einer gewissen Konzentration unmittelbar über dem Passniveau führt.

Da die Untergrenze des Zuges auf dem Alpenpass aufgrund der Topographie angehoben ist und die Obergrenze des Zuges nicht gemäss dem Reliefverlauf ansteigt, fliegen alle Vögel innerhalb eines Höhenbandes von etwa 2200 m, während der Zug im Tiefland in einem Höhenbereich von etwa 3400 (bis 3800) m über Boden (ü.B.) abläuft.

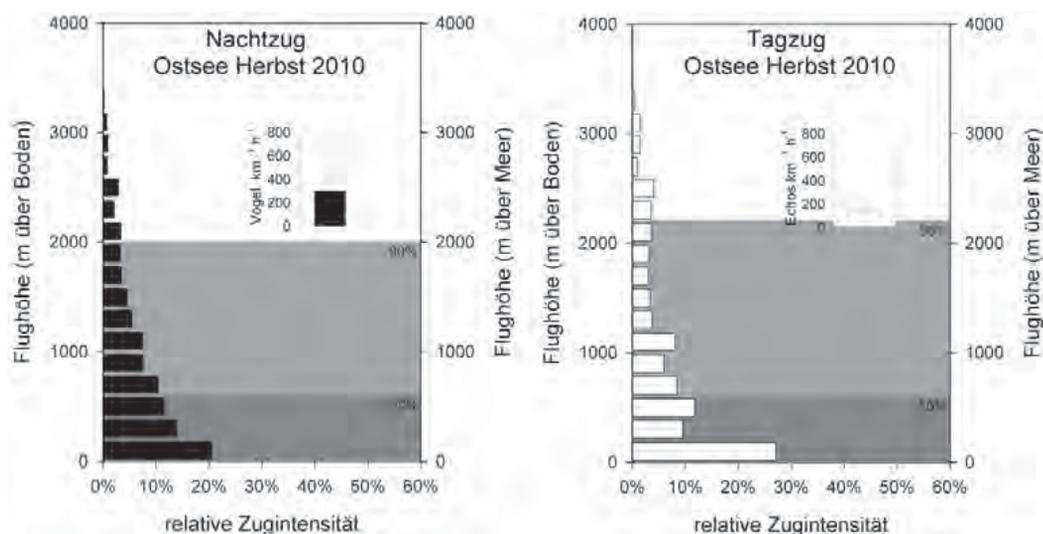
### 3.3. Süditalien

Die Station in Süditalien wurde im Hinblick auf eine Umweltverträglichkeitsprüfung für eine Brücke über die Strasse von Messina betrieben. Die Radarstation befand sich östlich des Dorfes Villa San Giovanni im «Fortino di Matiniti inferiore» ( $38^\circ 13'N/15^\circ 40'E$ ) auf 310 m ü.M. Der Radar stand also auf der kalabrischen Seite der Meerenge, am Südennde der geplanten Brücke, 1,4 km von der Küste entfernt. Die Messungen erfolgten mit Elevationswinkeln

des Radarstrahls zwischen  $-5,6^\circ$  und  $50,6^\circ$  und einer horizontalen Ausrichtung auf NW, d.h. über die Strasse von Messina hinweg. Da der unterste Elevationswinkel negativ war, konnte bis auf Meeresniveau hinunter beobachtet werden. Bei niedrigen Elevationen wurden etwa  $\frac{1}{3}$  der Vögel über Land detektiert; bei höheren Elevationen nahm dieser Anteil zu (Abb. 13). Die Beobachtungen dauerten vom 6. September bis 9. November 2010. Die Hauptzugrichtung lag sowohl im Nacht- wie auch im Tagzug bei WSW und folgte damit dem lokalen Küstenverlauf. Im Osten und Ost-Nord-Osten der Radarstation befinden sich ab einer Entfernung von knapp 3 km Höhenzüge und Hochflächen von 600 m ü.M. In einer Entfernung von 10 km erreichen diese 1000 m ü.M. Da auch die Berge auf der sizilianischen Seite, westlich von Messina, 600–1000 m aufragen, wird das weitgehende Fehlen von Vögeln unter 600 m und die geringe Zahl unter 800 m verständlich.

### 3.4. Ostsee

Die Station an der Ostsee befand sich im Hafengelände bei Puttgarden auf der Insel Feh-



**Abb. 14.** Relative Höhenverteilung des Nacht- und Tagzuges an der Ostsee (Fehmarn). Darstellung wie in Abb. 11. – *Proportional height distribution of nocturnal and diurnal migration at the Baltic Sea (Fehmarn). Presentation as in Fig. 11. Note the relatively high intensity of diurnal migration, probably caused by the visual attraction of birds from southern Sweden towards the island of Fehmarn.*

marn ( $54^{\circ} 30' N / 11^{\circ} 13' E$ ) direkt an der Küste, nur wenige Meter über dem Normalhöhennull (NHN). Die Beobachtungen stammen aus der Zeit vom 15. August bis zum 14. November 2010. Die Höhenverteilung des Nachtzuges entspricht recht gut den Verhältnissen im flachen mitteleuropäischen Hügelland (Abb. 14). Der Hauptunterschied gegenüber Inlandstationen liegt in der relativ grossen Echodichte am Tag. Die der deutschen Ostseeküste vorgelagerte kleine Insel Fehmarn (quer zur Zugrichtung etwa 20 km breit) liegt in der Hauptzugrichtung der von Südschweden und der Insel Seeland anfliegenden Vögel. Die Distanz zwischen Seeland und Fehmarn beträgt nur etwa 20 km. Fehmarn ist also für die anfliegenden Tagzieher gut sichtbar und dürfte für diese eine grosse Attraktionswirkung haben, besonders weil in der Verlängerung des Zugweges die Landzunge von Heiligenhafen weit in die Ostsee vorragt.

Die leicht erhöhten Echodichten um 2500 m könnten allenfalls auf nicht vollständig eliminierte Wolkenechos oder auf eine gewisse Konzentration von Zugvögeln an der Unter- oder Obergrenze von Wolkenbänken beruhen.

#### 4. Diskussion zur Vergleichbarkeit verschiedener Messmethoden

Quantitative Angaben über die Zugintensität beruhen in unseren Studien normalerweise auf einer der vier nachfolgend dargestellten Methoden. Da sie nicht in jeder Hinsicht vergleichbare Daten liefern, diskutieren wir im Folgenden die relevanten Unterschiede.

##### 4.1. Messmethoden

###### 4.1.1. Konische Abtastung

Bei der konischen Abtastung eines Kegelmantels auf verschiedenen Elevationen wird die Zahl der Radarechos im abgetasteten Raum mit einer sogenannten Video-Sampling-Unit (VSU) registriert. Anschliessend wird die Echodichte pro Volumeneinheit im Sinne einer Momentaufnahme ermittelt (Bruderer et al. 1995). Insektenechos werden ausgeschieden, indem das Radarsignal im antennennahen Bereich durch eine distanzabhängige Verstärkungsanpassung (STC) abgeschwächt wird. Mit der Ausfilterung aller schwachen Echos wird die Haupt-

masse der Insekten eliminiert. Besonders bei warmem, ruhigem Wetter dürften die ermittelten Zahlen aber durch einen unbekanntesten Rest an Grossinsekten überhöht sein. Höhenverteilungen werden in der Regel als relative Zugdichten (% pro Höhenintervall) angegeben. Die Gesamtdichte (Vögel/km<sup>3</sup>) stellt einen Mittelwert über alle Höhen dar. Gesamtdichten für Mitteleuropa machen nach Bruderer & Liechti (1998, 2004) unter Einschluss verschiedener Wetterlagen (aber unter Ausschluss der infolge von Regen fehlenden Messungen) etwa 20–25 Vögel/km<sup>3</sup> aus. Da die meisten anderen Methoden nicht Dichten, sondern Durchzugsraten messen, müssen wir für Vergleiche die Dichten mit einer mittleren Zuggeschwindigkeit (in Mitteleuropa etwa 43 km/h) multiplizieren. Dies ergibt eine mittlere Gesamtdurchzugsrate (MTR = migration traffic rate) von 860–1075 Vögeln/km/h im Höhenbereich bis 4000 m ü.B. Für den Vergleich mit Mondbeobachtungen (welche nur Höhen bis 2000 m erreichen) sind nur die Dichten unterhalb von 2000 m zu berücksichtigen, in denen 90 % der Vögel unterwegs sind. Wir müssen also für diesen Höhenbereich die berechnete MTR beinahe verdoppeln und erhalten so für Mitteleuropa Werte zwischen 1600 und 2000 Vögeln/km/h. In Alpennähe (Bruderer & Liechti 2004) wurden Dichten um 45 Vögel/km<sup>3</sup> gemessen, was für die untersten 2000 m eine MTR von rund 3500 Vögel/km/h ergibt.

#### 4.1.2. Mondbeobachtungen

Mondbeobachtungen messen die Zahl der in verschiedenen Entfernungen zwischen dem Beobachter und dem Vollmond durchfliegenden Vögel. Das Resultat ist eine MTR pro Höhenintervall oder die Gesamtdurchzugsrate (MTR) bis zur erfassbaren Maximalhöhe von knapp 2000 m. Nach Liechti et al. (1996a) liegen die mittleren MTR in Süddeutschland im Bereich von 1000–2000 Vögeln/km/h, im Schweizerischen Mittelland und am Alpenrand erreichen sie 2500 Vögel/km/h, in guten Zugnächten auch 3000–4000 Vögel/km/h. Über Alpentälern sinkt die Frequenz wieder auf etwa 1000 Vögel/km/h und südlich der Alpen auf 500. Die mit Mondbeobachtungen ermittelten MTR

sind also etwas niedriger als die aus VSU-Dichten berechneten Werte, obwohl Mondbeobachtungen nur bei schönem Wetter innerhalb weniger Tage um Vollmond ausgeführt werden können. Gründe dafür könnten sein, (a) dass bei den Mondbeobachtungen die untersten 200 m kaum erfasst werden (Liechti et al. 1996b) und dass (b) in den VSU-Messungen eine Restmenge an Grossinsekten enthalten sein könnte.

#### 4.1.3. Infrarot-Beobachtungen

Infrarot-Beobachtungen ergeben Durchzugsraten analog zu den Mondbeobachtungen. Kleinvögel können gegen den klaren Himmel bis etwa 3000 m über dem Standort gesehen werden, Wolken und feuchter Dunst reduzieren aber die Reichweite (Liechti et al. 1995b). Auf der schmalen Landzunge von Falsterbo an der Südspitze von Schweden lagen die mittleren MTR in der ersten Nachthälfte im Bereich von 1000–1800 Vögeln/km/h (Zehnder et al. 2002). Solche Zugintensitäten sind plausibel, wenn man annimmt, dass der Zug im Norden einerseits schwächer ist als in Mitteleuropa, andererseits aber auf der Halbinsel enorm verdichtet. Über dem Tal von Bivio (Kanton Graubünden) wurden 1400 Vögel/km/h festgestellt, auf dem Ost-West verlaufenden Julierpass (Kanton Graubünden) 400 Vögel/km/h (Zehnder et al. 2001).

#### 4.1.4. Feststehender Radarstrahl

Messungen mit feststehendem Radarstrahl erfassen (wie Mond- und Infrarot-Beobachtungen) die Zugfrequenz (Bruderer 1971, Schmaljohann et al. 2008). Ab 2003 wurde für die Berechnung der Zugfrequenz ein sehr strenges Ausscheidungsverfahren angewendet, bei dem nur die sicher als Vögel identifizierten Echos einbezogen wurden (Zaugg et al. 2008). Diese strengen Kriterien führen zu deutlich geringeren Zugintensitäten als bei den obigen Methoden. Zudem umfassten diese Untersuchungen jeweils eine gesamte Zugsaison, und daher flossen auch Regennächte in die Berechnung der Mittelwerte ein; Regen führt oft zu Nullwerten. Die auf Fehmarn gemessenen Frequenzen (300 Vögel/km/h) sind 3- bis 6-mal nied-

riger als die mit Infrarot auf Falsterbo gemessenen. Dies dürfte allerdings nur zum Teil auf die strengen Ausschlusskriterien zurückgehen; mindestens so stark ins Gewicht fallen dürfte die Konzentration des Zuges über Falsterbo (etwa 500 m Breite) gegenüber 20 km an der Küste von Fehmarn. Die MTR bei Möggingen beträgt im Schnitt etwa 900 Vögel/km/h. Dies ist knapp 3-mal weniger als in den Mondbeobachtungen und beinahe 4-mal weniger als in den VSU-Messungen im Schweizerischen Mittelland. Auf dem nicht in Hauptzugrichtung verlaufenden St. Gotthardpass sind die Dichten 2-mal niedriger als gemäss IR-Beobachtungen auf dem etwa gleich hohen Julierpass.

#### 4.2. Vergleich der Methoden

Die mit verschiedenen Methoden ermittelten Zugfrequenzen dürfen nur bedingt miteinander verglichen werden. Die neue Fixbeam-Methode führt zu einer gewissen Unterschätzung der Zugintensität, insbesondere wenn die Zugvögel am Abend in Gruppen starten oder am Morgen mit unkenntlichen Flügelschlagmustern landen. Für den Hauptteil der Nacht darf die neue Methode aber als konservative Schätzung des Zugvolumens betrachtet werden.

Auch die mit verschiedenen Methoden ermittelten relativen Höhenverteilungen sind nur bedingt vergleichbar. Zu beachten ist insbesondere, dass Mondbeobachtungen auf Höhen unterhalb von 2000 m beschränkt sind, bei niedrigem Mondstand auch auf deutlich geringere Höhen. Mond- und Infrarotbeobachtungen basieren in den bodennahen Bereichen auf einem sehr engen Beobachtungskonus; die Zahl der erfassten Vögel ist deshalb extrem klein. Das von uns verwendete Wärmebildgerät reichte gemäss Vergleichsmessungen mit Radar unter idealen Bedingungen bis etwa 3000 m Höhe (Liechti et al. 1995b); feuchter Dunst oder Bewölkung schränkten die Reichweite aber erheblich ein.

Die auf den beiden Radarmethoden basierenden relativen Höhenverteilungen dürften vergleichbar sein – abgesehen von einer Restmenge an nicht ausgeschiedenen Insektenechos in den älteren Messungen und den in den neuen Messungen aufgrund unkenntlicher Flügel-

schlagmuster fehlenden Echos von landenden Vögeln und startenden Gruppen. Unter Einbeziehung der bei Bruderer & Liechti (2004) publizierten Daten kann gefolgert werden, dass der Vogelzug über dem europäischen Tiefland normalerweise bis etwa 3500 m ü.B. aufsteigt, in Alpennähe auch einige 100 m höher. Die 90%-Grenze variiert in den mittleren Verteilungen des Nachtzuges zwischen 1400 und 2000 m ü.B. Die 90%-Grenze des Tagzuges liegt oft in ähnlichen Höhen, kann aber wetter- oder topographiebedingt auch unter 1000 m sinken, besonders wenn der bodennahe Zug dominiert. Da die Vögel bei der Überquerung eines Höhenzuges ansteigen müssen und vor allem die Nachtzieher anschliessend die Flughöhe beibehalten, wird die Verteilung der Vögel in den unteren Höhenbereichen stark durch das Relief des überflogenen Gebietes beeinflusst. Die Obergrenze des Zuges folgt jedoch nicht dem Relief und steigt über den Alpenpässen nicht wesentlich über 4200 m ü.M.

**Dank.** Die Radaranlagen wurden ursprünglich von der Firma Oerlikon-Contraves AG zur Verfügung gestellt, begleitet von erheblicher technischer Unterstützung. Später erhielten wir die Geräte leihweise und schliesslich als Geschenk von der Schweizer Armee. Die Entwicklung der Radar-Ornithologie gehörte zwischen 1970 und 2010 zu den Kernaufgaben der Schweizerischen Vogelwarte, die erhebliche finanzielle Mittel in diese Sparte der Vogelzugforschung investierte. Von Anfang an wurden die meisten wissenschaftlichen Projekte vom Schweizerischen Nationalfonds unterstützt. Das Sahara-Projekt wurde zusätzlich gesponsert von den Stiftungen Volkart, Vontobel, MAVA für Naturschutz, Ernst Göhner, Felis und Syngenta, durch die Firmen Bank Sarasin, Helvetia Patria Versicherungen und F. Hoffmann-La Roche AG sowie die European Science Foundation und BirdLife Schweiz und International. Das erste angewandte Projekt (1991/92) wurde vollständig vom Israelischen Kommunikations-Ministerium finanziert. Eines der jüngsten angewandten Projekte, das zum ersten Exemplar eines Schiffsraders in Kombination mit den vorhandenen Steuerungs-, Registrier- und Analyse-Anlagen führte, wurde vom deutschen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) mitfinanziert. Die Daten von Möggingen wurden in Zusammenarbeit mit Wolfgang Fiedler vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell gesammelt. Die Daten von der Ostsee, Süditalien und den Schweizer Alpen wurden im Rahmen von Umweltverträglichkeitsstudien zu den Brückenbauprojekten «Fehmarnbelt» und «Stretto di Messina» sowie zum Windparkpro-

jekt Gotthard erarbeitet. Diese Daten wurden von den Auftraggebern für die vorliegende Publikation freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Für Verbesserungsvorschläge zum Manuskript danken wir Lukas Jenni, Peter Knaus und ganz besonders Christian Marti, für die Korrektur der englischen Texte Verena Keller.

### Zusammenfassung

Die Geschichte der ornithologischen Verwendung des in der Schweiz hergestellten Zielfolgeradars «Superfledermaus» begann in den späten Sechzigerjahren. Im Laufe von 40 Jahren wurde es in einen eigentlichen Vogelradar umgebaut. Aufgrund dieser Entwicklung sind heute Radaranlagen für verschiedene Forschungsaufgaben verfügbar:

(1) Der robuste militärische Zielfolgeradar – ausgerüstet mit modernem Empfänger und automatischem Registriersystem – ist immer noch die beste Anlage zur Erfüllung multipler Aufgaben: (a) Verfolgung ausgewählter Ziele, (b) quantitative Erfassung der Zahl und Verteilung ziehender Vögel mit auf verschiedenen Elevationen fixiertem oder konisch abtastendem Bleistiftstrahl, (c) Registrierung von Echosignaturen bei der Zielverfolgung sowie im feststehenden Strahl.

(2) Um die Anlage in schwieriges Gelände bringen zu können, wurden die essentiellen Teile (unter Verzicht auf konische Abtastung und Zielverfolgung) auf einem Lastwagen montiert.

(3) Basierend auf dieser Entwicklung wurde schliesslich der alte Radar durch einen kleinen Schiffsradar ersetzt, der mit einer Parabolantenne versehen, wetterfest unter einer glasfaserverstärkten Kunststoffhaube (Radom) versorgt und mit automatischen Registrier- und Analyse-Anlagen sowie mit Einrichtungen für die automatische Fernübermittlung der Daten ausgerüstet wurde. Damit steht nun eine relativ preisgünstige Anlage für spezifische Aufgaben zur Verfügung, die auch an abgelegenen Orten, wie etwa auf Meeresplattformen, zum Einsatz kommen kann. Beispiele von Höhenverteilungen und Zugintensitäten von vier Standorten zwischen Ostsee und Sizilien zeigen die Möglichkeiten der neuen Methoden; deren Vergleichbarkeit mit älteren Daten wird diskutiert.

### Summary

Following earlier studies with surveillance radars, the history of the «Swiss Birdradar» starts with a Swiss-made military tracking radar in the late 1960s. In the course of 40 years this radar was more and more adapted and optimized for ornithological research. The main steps of this development are briefly summarized, including some hints on pitfalls and caveats in the use of radar, and providing access to more detailed descriptions in the literature and on the web ([www.swiss-birdradar.com](http://www.swiss-birdradar.com)).

For the use in remote areas of the Sahara one individual of the original multi-task radar was reduced to a recording system with a pencil-beam steerable to various elevations, in this form offering the capacity to quantitatively record migratory passage and to provide echo-signatures of the passing targets, but no tracking and no conical scanning.

This simplified radar provided the basis for the development of cheaper and more mobile equipment, implementing small ship radar with parabolic dish antenna, protected by a weather-resistant radome, integrating automatic recording and analysis equipment as well as the capability of automatic data transfer.

We provide insight in the functioning of the new array «BirdScanMTI» by briefly describing the radar unit, the control unit, recording, display and data transfer. In addition, we summarize results from some recent studies.

The radar unit consists of a commercially available Bridgmaster X-band ship radar, its T-bar antenna replaced by a parabolic dish antenna ( $\varnothing$  1 m) that is steerable in the horizontal plane over  $270^\circ$  and in the vertical plane from  $-1^\circ$  up to  $70^\circ$ . Weatherized by a radome, the radar can be used under a wide range of environmental conditions.

The control unit can be installed up to 30 m away from the radar in a protected place. An interface (Display Compatibility Unit) that is provided by the producer of the radar (Sperry Marine) allows to control the radar on the radar-oriented side, while on the other side offering in- and output ports for an industrial computer (composed of standard components mounted in a rack-system). One of the components is the radar processor that produces the control signals for the operation of the radar unit. For tests of the system, instructions for single measurements can be entered manually, while for measuring campaigns the data recording program is lodged in a text file defining e.g. the temporal sequence and duration of measurements as well as the position of the antenna and the pulse length. After a power cut the system starts again independently according to the installed program.

Recording is based on a unit scanning the radar signal at a frequency of 12 MHz and transferring the data to the data acquisition program «BirdScan» that digitizes, processes and stores the data in real time in binary files. At the end of each measurement, the system produces preliminary images of the results, which can be viewed on site as well as externally via internet. The display and control unit shows the actual status of the radar and a digitized radar scope with an amplitude-range indicator (A/R-scope) covering 6 km. A threshold line provides the STC (sensitivity-control) curve chosen for the display (without any impact on the recorded signals). Echoes of birds are prone to surmount the STC (sensitivity time control) curve. They can be selected by the operator to show their exact form and  $\pm 500$  m surroundings on an enlarged A/R-indicator in the upper part of the screen. Additional panels allow control of the radar. For the

data transfer, all the measurements, parameters and messages about the state of the system are recorded in an SQL database. Messages about the state of the system and on the accomplished measurements are transmitted automatically by e-mail to those responsible for the campaign.

Some results comprise examples of height distributions for nocturnal and diurnal migration at four exemplary locations (1) in the lowlands of central Europe, (2) at an Alpine pass, (3) at the Mediterranean coast near Sicily, and (4) on the island of Fehmarn in the Baltic Sea. The distribution at the coast of the Baltic Sea is similar to the reference distribution in central Europe, with some more diurnal activity due to increased funnelling of diurnal migrants from southern Sweden towards the island of Fehmarn. The distributions at the Alpine pass and in Sicily show reduced migration at low levels due to mountain ridges in the approach area. The effect is reduced in diurnal migration at the Alpine pass because many diurnal migrants approach the pass through the valley leading up to it. While the lower limit of migration is shifted higher up than the crossing of the pass would require, the upward shift of the 90 % limit and even more the upper limit of migration are reduced in comparison with the topographical relief, leading to a notable «compression» of the migratory movement within a height zone of about 2200 m above ground level (a.g.l.) instead of 3400–3800 m above the lowlands.

The discussion emphasizes differences between quantitative methods, such as conical scanning, moon-watching, infrared observations, and measurements with a fixed pencil-beam radar. Due to stringent selection of birds versus unidentified targets and inclusion of measurements with rain as zero values, the latter tends to underestimate true migration, while conical scanning tends to overestimate migration due to insufficient exclusion of insects. Relative height distributions provided by the two radar methods are comparable. Thermal imaging is restricted to heights below 3000 m a.g.l. even under ideal conditions, and may be impaired by clouds, mist, haze and insects. Moon-watching is restricted to altitudes below 2000 m a.g.l. and to cloudless nights. Both optical methods are constrained by narrow surveyed space at low altitudes.

## Literatur

- BLOCH, R., B. BRUDERER & P. STEINER (1981): Flugverhalten nächtlich ziehender Vögel – Radardaten über den Zug verschiedener Vogeltypen auf einem Alpenpass. *Vogelwarte* 31: 119–149.
- BRUDERER, B. (1969): Zur Registrierung und Interpretation von Echosignaturen an einem 3-cm-Zielverfolgungsradar. *Ornithol. Beob.* 66: 70–88.
- BRUDERER, B. (1971): Radarbeobachtungen über den Frühlingszug im Schweizerischen Mittelland (Ein Beitrag zum Problem der Witterungsabhängigkeit des Vogelzugs). *Ornithol. Beob.* 68: 89–158.
- BRUDERER, B. (1980): Vogelzugforschung unter Einsatz von Radargeräten. *Med. Informatik und Statistik* 17: 144–154.
- BRUDERER, B. (1996): Vogelzugforschung im Bereich der Alpen 1980–1995. *Ornithol. Beob.* 93: 119–130.
- BRUDERER, B. (1997a): The study of bird migration by radar. Part 1: The technical basis. *Naturwissenschaften* 84: 1–8.
- BRUDERER, B. (1997b): The study of bird migration by radar. Part 2: Major achievements. *Naturwissenschaften* 84: 45–54.
- BRUDERER, B. (1999): Three decades of tracking radar studies on bird migration in Europe and the Middle East. S. 107–142 in: Y. LESHEM, Y. MANDELIC & J. SHAMOUN-BARANES (eds): *Migrating birds know no boundaries*. Proc. int. seminar on birds and flight safety in the Middle East. International center for the study of bird migration, Latrun.
- BRUDERER, B. (2003): The radar window to bird migration. S. 347–358 in: P. BERTHOLD, E. GWINNER & E. SONNENSCHNEIN (eds): *Avian migration*. Springer, Berlin.
- BRUDERER, B. (2007): Adapting a military tracking radar for ornithological research – The case of the «Superfledermaus». S. 32–37 in: J. M. RUTH (ed.): *Applying radar technology to migratory bird conservation and management: Strengthening and expanding a collaborative*. U. S. Geological Survey, Biological Resource Discipline, Fort Collins.
- BRUDERER, B. & A. BOLDT (2001): Flight characteristics of birds: I. radar measurements of speeds. *Ibis* 143: 178–204.
- BRUDERER, B., B. JACQUAT & U. BRÜCKNER (1972): Zur Bestimmung von Flügelschlagfrequenzen tag- und nachziehender Vogelarten mit Radar. *Ornithol. Beob.* 69: 189–206.
- BRUDERER, B. & L. JENNI (1988a): Strategies of bird migration in the area of the Alps. *Acta XIX Congr. Int. Ornithol.* 2150–2161.
- BRUDERER, B. & L. JENNI (1988b): *Vogelzug*. Bericht der Schweizerischen Vogelwarte, Sempach.
- BRUDERER, B. & L. JENNI (1990): Migration across the Alps. S. 60–77 in: E. GWINNER (ed.): *Bird migration: physiology and ecophysiology*. Springer, Berlin.
- BRUDERER, B. & J. JOSS (1969): Methoden und Probleme der Bestimmung von Radarquerschnitten freifliegender Vögel. *Rev. suisse Zool.* 76: 1106–1118.
- BRUDERER, B. & F. LIECHTI (1998): Intensität, Höhe und Richtung von Tag- und Nachtzug im Herbst über Südwestdeutschland. *Ornithol. Beob.* 95: 113–128.
- BRUDERER, B. & F. LIECHTI (1999): Bird migration across the Mediterranean. S. 1983–1999 in: N. J. ADAM & R. H. SLOTOW (eds): *Making rain for African ornithology*. Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Ornithol. Congr., Durban. BirdLife South Africa, Johannesburg.
- BRUDERER, B. & F. LIECHTI (2004): Welcher Anteil ziehender Vögel fliegt im Höhenbereich von

- Windturbinen? *Ornithol. Beob.* 101: 327–335.
- BRUDERER, B., F. LIECHTI, M. KESTENHOLZ, D. PETER, R. SPAAR, H. STARK & T. STEURI (2000): Vogelzugstudien mit Zielfolgeradar im Süden Israels. *Ornithol. Beob.* 97: 21–44.
- BRUDERER, B. & V. NEUSSER (1982): Nächtliche Aktivität und «Heimfinden» beim Hausrotschwanz *Phoenicurus ochruros*. *Ornithol. Beob.* 79: 145–157.
- BRUDERER, B., D. PETER, A. BOLDT & F. LIECHTI (2010): Wing-beat characteristics of birds recorded with tracking radar and cine camera. *Ibis* 152: 272–291.
- BRUDERER, B., D. PETER & T. STEURI (1999): Behaviour of migrating birds exposed to X-band radar and a bright light beam. *J. Exp. Biol.* 202: 1015–1022.
- BRUDERER, B. & P. STEIDINGER (1972): Methods of quantitative and qualitative analysis of bird migration with a tracking radar. S. 151–167 in: S. R. GALLER, K. SCHMIDT-KOENIG, G. J. JACOBS & R. E. BELLEVILLE (eds): *Animal orientation and navigation*. NASA, Washington.
- BRUDERER, B., T. STEURI & M. BAUMGARTNER (1995): Short-range high-precision surveillance of nocturnal migration and tracking of single targets. *Isr. J. Zool.* 41: 207–220.
- EASTWOOD, E. (1967): *Radar ornithology*. Methuen, London.
- EASTWOOD, E. & G. C. RIDER (1966): Grouping of nocturnal migrants. *Nature* 211: 1146.
- EDWARDS, J. & E. W. HOUGHTON (1959): Radar echoing area polar diagrams of birds. *Nature* 184: 1059.
- GEHRING, W. (1967a): Analyse der Radarechos von Vögeln und Insekten. *Ornithol. Beob.* 64: 145–151.
- GEHRING, W. (1967b): Radarbeobachtungen über den Vogelzug am Col de Bretolet in den Walliser Alpen. *Ornithol. Beob.* 64: 133–145.
- HARPER, W. (1958): Detection of bird migration by centrimetric radar – a cause of radar «angels». *Proc. R. Soc. Lond. B* 149: 484–502.
- LACK, D. (1960a): Migration across the North Sea studied by radar. Part 2. The spring departure 1956–59. *Ibis* 102: 26–57.
- LACK, D. (1960b): The height of bird migration. *Brit. Birds* 53: 5–10.
- LACK, D. (1963a): Migration across the southern North Sea studied by radar, part 4. Autumn. *Ibis* 105: 1–54.
- LACK, D. (1963b): Migration across the southern North Sea studied by radar, part 5. Movements in august, winter and spring, and conclusion. *Ibis* 105: 461–492.
- LIECHTI, F., B. BRUDERER, R. LARDELLI & D. PETER (1995a): The Alps, a weather dependent obstacle for nocturnal autumn migration? *Avocetta* 19: 68.
- LIECHTI, F., B. BRUDERER & H. PAPROTH (1995b): Quantification of nocturnal bird migration by moonwatching: comparison with radar and infrared observations. *J. Field Ornithol.* 66: 457–468.
- LIECHTI, F., D. PETER, R. LARDELLI & B. BRUDERER (1996a): Die Alpen, ein Hindernis im nächtlichen Breitfrontzug – eine grossräumige Übersicht nach Mondbeobachtungen. *J. Ornithol.* 137: 337–356.
- LIECHTI, F., D. PETER, R. LARDELLI & B. BRUDERER (1996b): Herbstlicher Vogelzug im Alpenraum nach Mondbeobachtungen – Topographie und Wind beeinflussen den Zugverlauf. *Ornithol. Beob.* 93: 131–152.
- LIECHTI, F. & H. SCHMALJOHANN (2007): Vogelzug über der westlichen Sahara. *Ornithol. Beob.* 104: 33–44.
- SCHAEFER, G. W. (1966): The study of bird echoes using a tracking radar. A synopsis of recent experiments. Distributed at the XIV Int. Ornithol. Congr., Oxford, July 1966.
- SCHAEFER, G. W. (1968): Bird recognition by radar. A study in quantitative radar ornithology. S. 53–86 in: R. K. MURTON (ed.): *The problems of birds as pests*. Academic Press, London.
- SCHMALJOHANN, H., F. LIECHTI, E. BÄCHLER, T. STEURI & B. BRUDERER (2008): Quantification of bird migration by radar – a detection probability problem. *Ibis* 150: 342–355.
- SCHUSTER, S., V. BLUM, H. JACOBY, G. KNÖTZSCH, H. LEUZINGER, M. SCHNEIDER, E. SEITZ & P. WILLI (1983): *Die Vögel des Bodenseegebietes*. Ornithologische Arbeitsgemeinschaft Bodensee, Konstanz.
- STEIDINGER, P. (1972): Der Einfluss des Windes auf die Richtung des nächtlichen Vogelzuges. *Ornithol. Beob.* 69: 20–39.
- SUTTER, E. (1957a): Radar als Hilfsmittel der Vogelzugforschung. *Ornithol. Beob.* 54: 70–96.
- SUTTER, E. (1957b): Radar-Beobachtungen über den Verlauf des nächtlichen Vogelzuges. *Rev. suisse Zool.* 17: 294–303.
- WEITNAUER, E. (1956): Zur Frage des Nächtigens beim Mauersegler. *V. Beitrag. Ornithol. Beob.* 57: 74–81.
- ZAUGG, S., G. SAPPORITA, E. VAN LOON, H. SCHMALJOHANN & F. LIECHTI (2008): Automatic identification of bird targets with radar via patterns produced by wing flapping. *J. R. Soc. Interface* 5: 1041–1053.
- ZEHNDER, S., S. ÅKESSON, F. LIECHTI & B. BRUDERER (2002): Observation of free-flying nocturnal migrants at Falsterbo: occurrence of reverse flight directions in autumn. *Avian Science* 2: 103–113.
- ZEHNDER, S., F. LIECHTI, B. TRÖSCH & B. BRUDERER (2001): Gibt es topographie-unabhängigen Nachtzug über den Alpen? *Ornithol. Beob.* 98: 215–222.

*Manuskript eingegangen 29. Januar 2012*  
*Bereinigte Fassung angenommen 10. April 2012*