

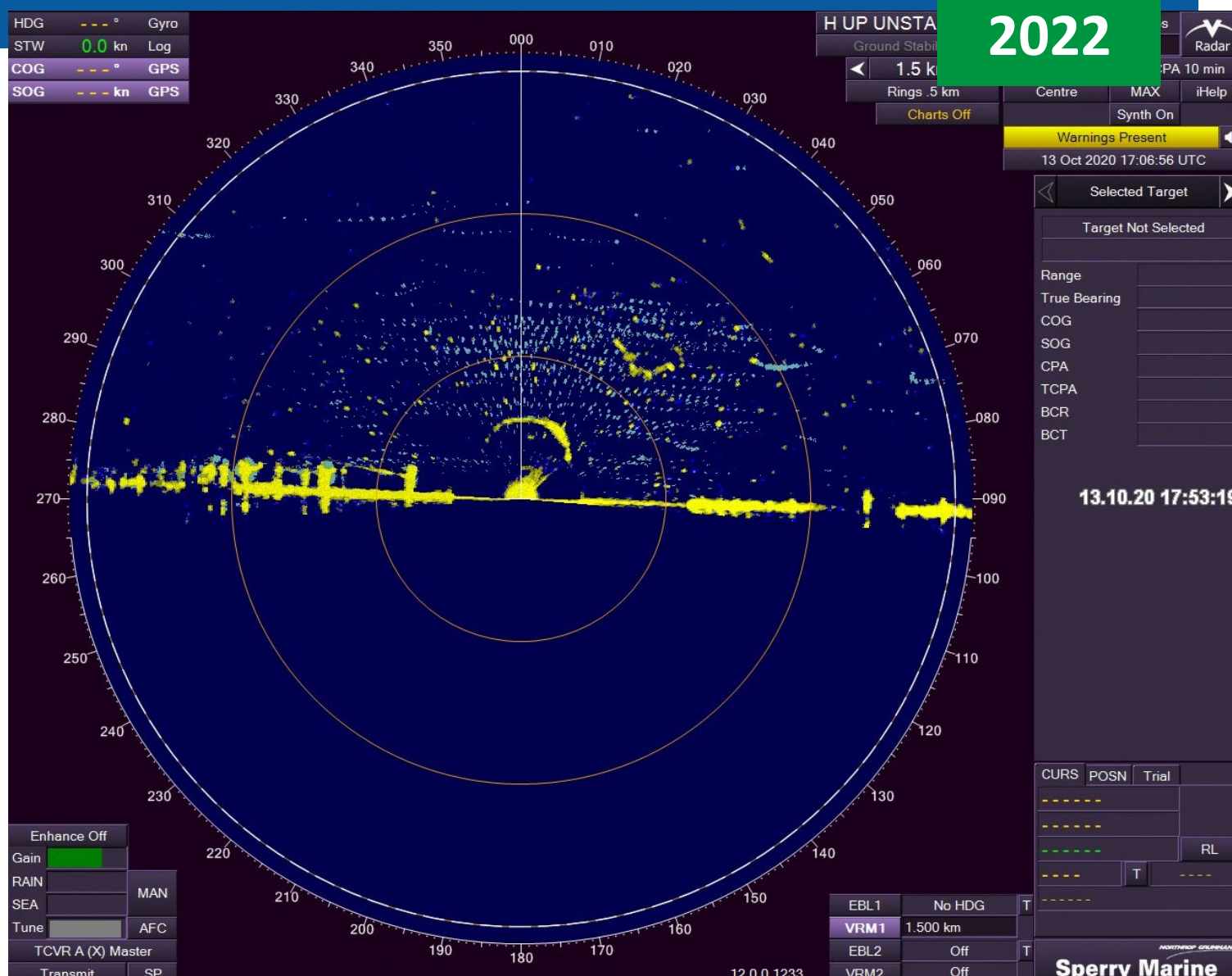
Vergleichbarkeit verschiedener Radarsysteme zur Erfassung des Vogelzugs

Jorg Welcker

BfN-Schriften

635

2022



Vergleichbarkeit verschiedener Radarsysteme zur Erfassung des Vogelzugs

Jorg Welcker



Bundesamt für
Naturschutz

Titelbild: Beispiel eines Screenshots des Vertikalradars bei starkem Vogelzug (Bioconsult)

Adresse des Autors:

Dr. Jorg Welcker

BioConsult SH GmbH Co.KG
Schobüller Str. 36, 25813 Husum
E-Mail: j.welcker@bioconsult-sh.de

Fachbetreuung im BfN:

Dipl.-Ing. Kathrin Ammermann

Dipl.-Ing. Dirk Bernotat

Fachgebiet II 4.3 „Naturschutz und erneuerbare Energien“

Fachgebiet II 4.2 „Eingriffsregelung, Verkehrswegeplanung“

E-Mail: kathrin.ammermann@bfm.de
dirk.bernotat@bfm.de

Diese Veröffentlichung wird aufgenommen in die Literaturdatenbank „DNL-online“ (www.dnl-online.de).

BfN-Schriften sind nicht im Buchhandel erhältlich. Eine pdf-Version dieser Ausgabe kann unter www.bfn.de/publikationen heruntergeladen werden.

Institutioneller Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz
Konstantinstr. 110
53179 Bonn
URL: www.bfn.de

Der institutionelle Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des institutionellen Herausgebers übereinstimmen.



Diese Schriftenreihe wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz Namensnennung – keine Bearbeitung 4.0 International (CC BY - ND 4.0) zur Verfügung gestellt (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de>).

ISBN 978-3-89624-396-6

DOI 10.19217/skr635

Bonn 2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Zusammenfassung	7
2 Einleitung	8
3 Material und Methoden	10
3.1 Radarsysteme.....	11
3.1.1 Schiffsradar.....	11
3.1.2 Spezialisiertes Vogelradar MR1	14
3.2 Datenanalyse	15
3.2.1 Berechnung der Zugintensität (MTR)	15
3.2.2 Vergleich der Radarsysteme	19
4 Ergebnisse	23
5 Diskussion.....	33
5.1 Fazit.....	39
6 Literaturverzeichnis	40

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Untersuchungsstandort bei Westermarkelsdorf auf Fehmarn	10
Abb. 2:	Aufbau des Schiffsradargeräts nahe Westermarkelsdorf auf Fehmarn.....	11
Abb. 3:	Beispiel eines Screenshots des Vertikalradars bei starkem Vogelzug	12
Abb. 4:	Aufzeichnungsperioden des Schiffsradargeräts im Untersuchungszeitraum vom 05.10. bis 15.12.2020.	13
Abb. 5:	Links: Darstellung des überwachten Radarvolumens der Hornantenne des MR1-Radars.....	14
Abb. 6:	Thumbnail der MR1-Software zeigt die detektierten Radarechos und deren Klassifizierung in Echtzeit.....	15
Abb. 7:	Beispielhafte Darstellung der Verteilung der Vogel-Rohsignale eines Schiffsradargeräts.	16
Abb. 8:	Verteilung der Vogel-Rohsignale des Schiffsradars aus dem Untersuchungszeitraum Oktober bis Dezember 2020 auf Fehmarn.	17
Abb. 9:	Abhängigkeit der Anzahl Radarsignale von der Entfernung zum Radargerät ..	17
Abb. 10:	Bereiche des für die Berechnung der Zugintensitäten verwendeten Radarerfassungsraums mit reduzierter Detektionswahrscheinlichkeit	18
Abb. 11:	Histogramm der stündlichen MTRs bis 200 Höhenmetern des MR1 (links) und des Schiffsradars (rechts).....	20
Abb. 12:	Histogramm der log-transformierten (log+1) Zugintensitäten bis 200 Höhenmetern des MR1 (links) und des Schiffsradars (rechts).....	20
Abb. 13:	Vergleich der stündlichen MTR-Werte des Tag- und des Nachtzugs zwischen Schiffsradar und MR1 im Höhenbereich bis 1000 m.	21
Abb. 14:	Boxplots der MTR-Werte des Nachtzugs (links) und des Tagzugs (rechts) der verschiedenen Radarsysteme für drei Höhenbereiche.	23
Abb. 15:	Vergleich der stündlichen MTR-Werte von MR1 und Schiffsradar für den Nachtzug mit „Major Axis“-Regression.	24
Abb. 16:	Absolute Abweichung [MTR] der stündlichen Zugintensität zwischen Schiffsradar und MR1.....	25
Abb. 17:	Vergleich der stündlichen MTR-Werte von MR1 und Schiffsradar für den Tagzug mit „Major Axis“-Regression.	26
Abb. 18:	Zeitlicher Verlauf der nächtlichen Zugintensitäten nach MR1 und Schiffsradar.....	29
Abb. 19:	Zeitlicher Verlauf der täglichen Zugintensitäten nach MR1 und Schiffsradar ...	30
Abb. 20:	Vergleich der nächtlichen Mittelwerte der Zugintensität (MTR) von MR1 und Schiffsradar mit Major Axis-Regression.....	31
Abb. 21:	Absolute Abweichung [MTR] der mittleren Zugintensität pro Nacht (links) bzw. Tag (rechts)	31
Abb. 22:	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Zugintensitäten [%] innerhalb eines Tages nach MR1 und Schiffsradar	32

Abb. 23:	Zusammenhang zwischen der Flugaktivität von Insekten [MTR] und der absoluten Abweichung der Zugintensität des Nachtzugs	36
Abb. 24:	Zusammenhang zwischen der stündlichen Zugintensität des Nachtzugs (bis 200 m Höhe) und der Flugaktivität von Insekten (MTR)	36

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Technische Spezifikationen des verwendeten Schiffsradargeräts des Typs VisionMaster FT der Firma Sperry Marine.....	11
Tab. 2:	Parameter der für die Distanzkorrektur der Schiffsradarsignale verwendeten Detektionsfunktion	18
Tab. 3:	Konfusionsmatrix: Überprüfung, ob stündliche Zugintensitäten des MR1 und Schiffsradars den Wert von 250 MTR (links) bzw. 500 MTR (rechts) gleichzeitig überschritten.....	27
Tab. 4:	Konfusionsmatrix mit anhand der Major Axis-Regression korrigierten Daten ..	27
Tab. 5:	Konfusionsmatrix mit anhand der logtransformierten Major Axis-Regression korrigierten Daten.	28

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AIC	Akaike Information Criterion
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
Beob.	Beobachtungen
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
bzw.	beziehungsweise
Kap.	Kapitel
MAR	Major Axis Regression
MTR	Migration Traffic Rate
N	Anzahl der Elemente der Stichprobe
OLS	ordinary least squares regression
RCS	Radar Cross Section
SE	Standard Error (Standardfehler)
StUK	Standarduntersuchungskonzept
Tab.	Tabelle
u.ä.	und ähnlich
vgl.	vergleiche
WEA	Windenergieanlage
z. B.	zum Beispiel

1 Zusammenfassung

Kollisionen von nachts ziehenden Vögeln an Windenergieanlagen stellen einen Konflikt beim naturverträglichen Ausbau der Offshore-Windenergienutzung dar. Um ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko bzw. eine Gefährdung des Vogelzugs zu vermeiden, sind derzeit schwellenwertbasierte Maßnahmen wie z. B. Turbinenabschaltungen in der Diskussion. Die potenziellen Schwellenwerte beziehen sich auf die Intensität des Vogelzugs, welche mit Hilfe von Radargeräten gemessen werden kann. Daten zum nächtlichen Vogelzug in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone der Nord- und Ostsee werden bislang nahezu ausschließlich mit einem bestimmten Radartyp (marine Navigationsgeräte oder „Schiffsradar“) erhoben. Dieses Radarsystem entspricht jedoch nicht den technischen Anforderungen, um schwellenwertbasierte Vermeidungsmaßnahmen im Offshore-Bereich zu implementieren. Diese Voraussetzungen, primär eine automatisierte Echtzeiterfassung des Vogelzugs, werden von Radarsystemen erfüllt, die sich auf die Erfassung von Vögeln spezialisiert haben. Bislang ist jedoch nicht bekannt, inwiefern eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen solcher Radare und den Messungen von Schiffsradargeräten besteht.

Ziel der vorliegenden Studie war es, die Konkordanz zwischen den von einem Schiffsradar ermittelten Zugintensitäten und jenen eines Vogelerfassungsradars zu überprüfen. Im Vordergrund stand dabei die Frage, ob im Hinblick auf Schwellenwertüberschreitungen eine hohe Übereinstimmung zwischen den Radarsystemen besteht. Diese Frage wäre für die radargestützte Implementierung von schwellenwertbasierten Maßnahmen von zentraler Bedeutung.

Die Datenerhebung erfolgte mit einem häufig zur Vogelerfassung in der AWZ eingesetzten Schiffsradar (Sperry Marine VisionMaster) und einem Vogelerfassungsradar des Typs Birdscan MR1 (Swiss Birdradar Solution AG), die an einem küstennahen Standort für eine Zeitspanne von 10 Wochen parallel betrieben wurden. Für insgesamt 1.110 Stunden in diesem Zeitraum konnte die Zugintensität mit beiden Radarsystemen ermittelt und damit eine gute Datengrundlage geschaffen werden. Der Vergleich der Radarsysteme wurde anhand der stündlichen Zugintensitäten ($\text{Radarsignale} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ [MTR – migration traffic rate]) für verschiedene Höhenbereiche sowie der mittleren Zugintensität pro Nacht bzw. Tag durchgeführt.

Für die Zugintensität des Nachtzugs zeigte sich insgesamt eine hohe Übereinstimmung zwischen den Radarsystemen. So lag eine hochsignifikante Korrelation zwischen den mittleren nächtlichen Zugraten vor, und auch die Variation der stündlichen Werte der verschiedenen Geräte entsprach sich weitgehend (zwischen 67 % und 83 % je nach Höhenbereich). Die verschiedenen Analysen zeigten jedoch auch einen systematischen Unterschied zwischen den Radargeräten. Die mit dem Schiffsradar ermittelte nächtliche Zugintensität lag über die gesamte Spanne der festgestellten Zugraten um etwa 20 % höher als die des MR1. Dies hatte entsprechende Auswirkungen auf die Kongruenz theoretischer Schwellenwertüberschreitungen. So lag die Übereinstimmung, ob ein Schwellenwert von 250 bzw. 500 MTR in einer Stunde über- oder unterschritten wurde bei über 90 %, die Anzahl der Stunden mit Schwellenwertüberschreitung lag beim Schiffsradar jedoch deutlich höher (26 %). Eine Korrektur der Daten, die anhand des Zusammenhangs zwischen den Zugraten der Radare vorgenommen wurde, führte zur weitgehenden Angleichung der Schwellenwertüberschreitungen und konnte somit den festgestellten Unterschied ausgleichen.

Die Zugintensitäten des Tagzugs wiesen im Vergleich zum Nachtzug eine deutlich geringere Übereinstimmung zwischen den Radarsystemen auf. Hier lagen die mit dem Schiffsradar ermittelten Zugintensitäten teilweise erheblich niedriger als die des MR1; zudem war eine deutlich höhere Streuung der Werte zu verzeichnen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass trotz einer insgesamt hohen Übereinstimmung der nächtlichen Zugintensitäten eine direkte Übertragbarkeit zwischen einem Schiffsradar und dem zur automatischen Echtzeiterfassung des Vogelzugs befähigten MR1 nicht ohne Korrektur möglich ist. Als Erklärungsansätze für die Variation zwischen den Radarsystemen kommen Unterschiede in deren Funktionsweise wie beispielsweise Unterschiede in dem von der jeweiligen Radarkeule erfassten Raum oder unterschiedliche Erfassungszeitpunkte in den untersuchten Stunden in Frage. Die systematische Diskrepanz kann möglicherweise auf inkorrekte Interpretation von Radarsignalen (Vögel vs. Insekten) oder eine fehlerhafte Korrektur der Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln beim Schiffsradargerät zurückzuführen sein. Eine abschließende Beurteilung dieser Faktoren war auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht möglich.

Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass zumindest für den nächtlichen Vogelzug durch eine Korrektur der bestehenden Unterschiede zwischen den Radartypen eine sehr hohe Übereinstimmung in Hinsicht auf Schwellenwertüberschreitungen erzielt werden kann. Mit Anwendung einer solchen Korrektur kann somit eine weitgehende Übertragbarkeit der nächtlichen Zugintensitäten der in der Studie getesteten Radare hergestellt werden. Somit scheint die technische Implementierung von Schwellenwerten (für den Nachtzug), die auf Basis von Schiffsradardaten definiert wurden und für situative Vermeidungsmaßnahmen herangezogen werden könnten, durch das Vogelerfassungsradar MR1 möglich.

2 Einleitung

Die ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) Deutschlands in Nord- und Ostsee wird alljährlich von Millionen Zugvögeln auf ihrem Weg zwischen Brut- und Überwinterungsgebieten überquert. Ein Großteil dieses Vogelzugs findet dabei nachts und bis in große Höhen statt (Alerstam 1990; Berthold 2000; Bruderer et al. 2018).

Eine vollständige Erfassung und Quantifizierung des nächtlichen Vogelzugs ist nur mit technischen Hilfsmitteln möglich. Neben Infrarotgeräten (Zehnder et al. 2001) kommt hierbei vornehmlich Radartechnik zum Einsatz (Eastwood 1967; Bruderer 1997a; b; Shamoun-Baranes et al. 2014). Schon kurz nach der Entwicklung von Radargeräten wurde festgestellt, dass mit dieser Technik Vögel auch in großer Entfernung detektiert werden können, da Vogelkörper und primär das darin enthaltene Wasser, die Radarstrahlen reflektieren (Eastwood 1967). Mittlerweile werden etliche verschiedene Radarsysteme für die Erfassung von Vögeln genutzt (Van Belle et al. 2007; Hüppop et al. 2009; Dokter et al. 2011; Assali et al. 2017; Liechti et al. 2018; Nilsson et al. 2018; Weisshaupt et al. 2018) und mehrere Hersteller haben Radargeräte speziell für diese Aufgabe entwickelt (Dirksen 2017; KNE 2020).

Radarerfassungen werden auch standardmäßig eingesetzt, um im Rahmen der Entwicklung, des Baus und Betriebs von Offshore-Windparks in der deutschen AWZ Daten zum Vogelzug zu erhalten. Die technischen und methodischen Anforderungen an diese Erfassungen sind im Standarduntersuchungskonzept (StUK) des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) festgelegt (BSH 2013). Durch diese Standardisierung soll eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen verschiedenen Projekten erreicht werden. Die Untersuchungen werden mit handelsüblichen marinen Navigationsradargeräten („Schiffsradare“) durchgeführt. Durch eine vertikale Rotationsebene der Antenne eines solchen Geräts lässt sich der lokale Vogelzug bis in Höhen von etwa 1.000 m quantifizieren.

Kollisionen von nachts ziehenden Vögeln an Windenergieanlagen werden häufig als wesentlicher potenzieller Konflikt zwischen dem Natur- und Artenschutz einerseits und dem naturverträglichen Ausbau der Offshore-Windenergienutzung andererseits angesehen. Im

Rahmen der Weiterentwicklung von Raum- und Flächenentwicklungsplanung in der AWZ sowie aktuellen Genehmigungsverfahren von Offshore-Windparks wird derzeit diskutiert, ob bedarfsgerechte Abschaltungen der Anlagen bei hohem nächtlichen Zugaufkommen notwendig sind, um eine Gefährdung des Vogelzugs (§ 48 Abs. 4 WindSeeG) bzw. ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko der Nachtzieher nach §44 BNatSchG zu vermeiden. Für eine Operationalisierung solcher Abschaltungen wäre die Festlegung von Schwellenwerten notwendig, bei deren Überschreitung Maßnahmen eingeleitet werden müssten. In einer aktuellen, projektübergreifenden Studie zum nächtlichen Vogelzug in der deutschen AWZ (ProBIRD; Welcker & Vilela 2020) wurden Berechnungen zu möglichen Schwellenwerten durchgeführt. Grundlage dieser Berechnungen waren mehrjährige, durch das StUK standardisierte Erfassungen mit Schiffsradargeräten (Welcker 2019).

Eine technische Voraussetzung für die Umsetzung schwellenwertbasierter Turbinenabschaltungen an Offshore-Windparks ist eine automatisierte Messung der Vogelzugintensität in Echtzeit. Nur dadurch können standortbezogene Schwellenwertüberschreitungen erkannt und ohne Verzögerung entsprechende Maßnahmen veranlasst werden. Hier ergibt sich jedoch die Problematik, dass diese Voraussetzungen auf Basis der bisher im Offshore-Bereich angewendeten Methodik der Radarerfassungen nicht erfüllt werden können. Grundlage für die Bestimmung der Zugintensität mit Schiffsradaren sind Screenshots, d. h. in regelmäßigen Abständen gespeicherte Bilder des Radarbildschirms und den darauf abgebildeten Vogelsignalen. Die Auswertung dieser Bilder sowie die nachgeschalteten Berechnungen können vollumfänglich erst nach Ende der Erfassungen erfolgen, sodass die Zugintensität mit diesem System erst im Nachgang bestimmt werden kann.

Spezifische Vogelerfassungsradare verschiedener Hersteller sind hingegen in der Lage, Zugraten sowie die Höhenverteilung des Vogelzugs ohne zeitliche Verzögerung zu messen. Vogelradarsignale werden bei diesen Systemen über interne Algorithmen unmittelbar von anderen (biologischen) Signalen sowie Störungen unterschieden und somit unter Berücksichtigung des bekannten Radarvolumens eine direkte, unverzögerte Berechnung der Zugintensität ermöglicht. Der Einsatz solcher Radarsysteme zur Überwachung von Schwellenwerten, die ihrerseits auf Basis von Schiffsradardaten definiert wurden, setzt voraus, dass die ermittelten Zugintensitäten dieser Systeme eine direkte Vergleichbarkeit mit den von Schiffsradaren erhobenen Daten aufweisen. Ob dies zutrifft, ist bislang jedoch ungeklärt. Dies ist unter anderem dem grundlegenden Problem geschuldet, dass eine Validierung der mit den Radargeräten gewonnenen Daten über eine direkte (z. B. visuelle) Erfassung des Vogelzugs nicht möglich ist. Inwiefern die Messungen verschiedener Radarsysteme von der tatsächlichen Anzahl ziehender Vögel abweichen, ist daher nicht ohne Weiteres quantifizierbar. Von einer direkten Vergleichbarkeit der Daten verschiedener Radarsysteme kann somit nicht ohne vorherige Vergleichsstudien ausgegangen werden.

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, Zugintensitäten, die mit einem Schiffsradargerät unter Anwendung der im StUK dargelegten Methodik ermittelt wurden und so die Grundlage von Umweltverträglichkeitsstudien und Fachgutachten von Offshore-Windparks sowie wissenschaftlicher Studien wie ProBIRD bilden, mit einem spezifischen Vogelradarsystem zu vergleichen, das in der Lage ist, automatisiert und in Echtzeit Zugintensitäten zu erfassen und somit geeignet wäre, Turbinenabschaltungen zur Vermeidung von Vogelkollisionen zu implementieren. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Frage gelegt, inwieweit das Überschreiten potenzieller Schwellenwerte von den Radarsystemen übereinstimmend festgestellt wird. Da sich schwellenwertbasierte Vermeidungsmaßnahmen primär auf den Nachtzug beziehen, wurde der Schwerpunkt der Auswertungen auf das nächtlichen Zuggeschehen gelegt.

3 Material und Methoden

Für diese Vergleichsstudie wurde ein Radargerät des Typs Birdscan MR1 der Firma Swiss Birdradar Solution AG (Winterthur, Schweiz; nachfolgend kurz „MR1“ genannt) sowie ein Gerät der Typs VisionMaster FT der Firma Sperry Marine (New Malden, UK; nachfolgend kurz „Schiffsradar“) gleichzeitig betrieben. Das MR1 ist ein speziell für die Erfassung von Vögeln entwickeltes Echtzeit-Erfassungssystem, das die oben genannten Voraussetzungen für eine Implementierung schwellenwertbasierter Vermeidungsmaßnahmen erfüllt. Das VisionMaster FT ist ein häufig im Rahmen von StUK-Erfassungen eingesetztes marines Navigationsradar.

Der Untersuchungsstandort lag im Nordwesten der Insel Fehmarn, Schleswig-Holstein, innerhalb des Bürgerwindparks Westfehmarn bei Westermarkelsdorf (Abb. 1). Der Abstand zwischen den Radargeräten betrug etwa 250 m; der Abstand zur nächstgelegenen WEA lag bei etwa 150 m (MR1) bzw. 190 m (Schiffsradar). Die Datenaufzeichnung fand in der Zeit zwischen dem 05.10. und 15.12.2020 statt.

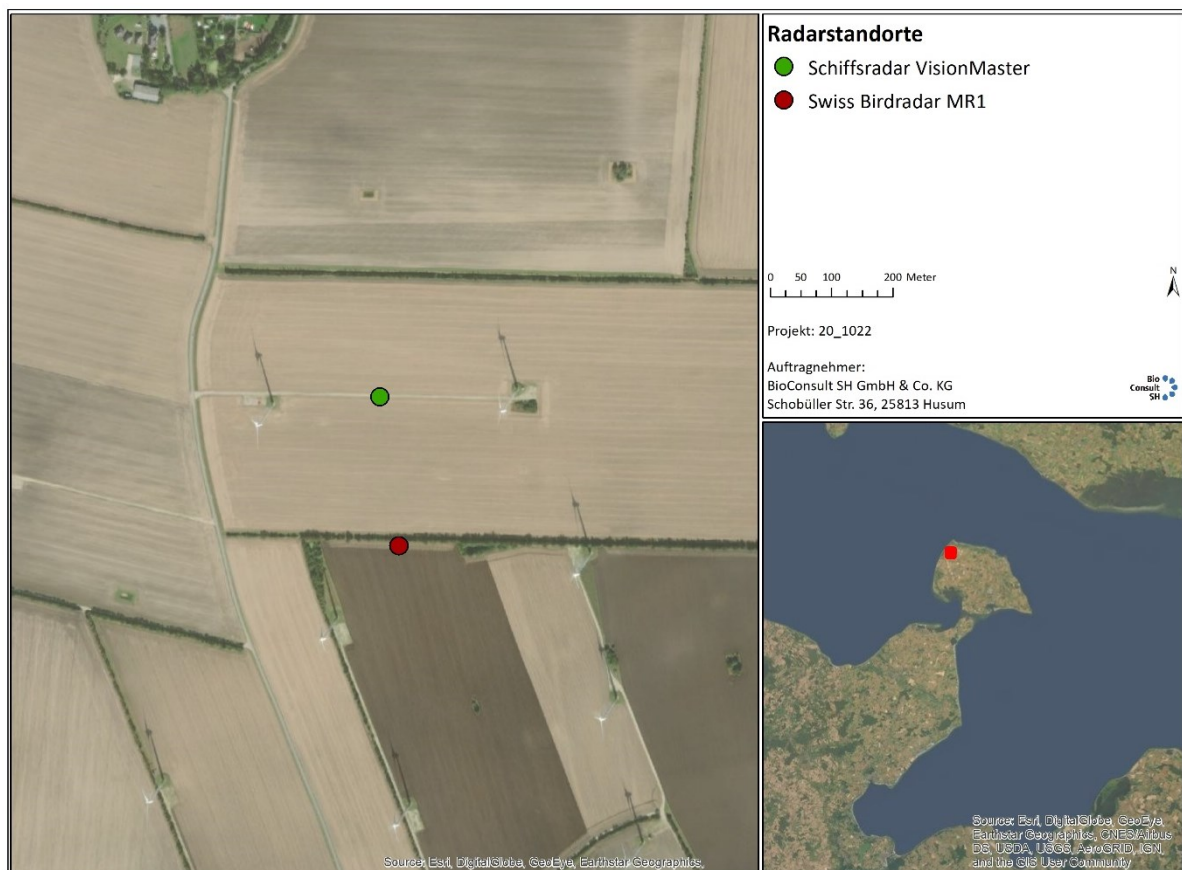


Abb. 1: Untersuchungsstandort bei Westermarkelsdorf auf Fehmarn, Schleswig-Holstein. Die Radarpositionen befanden sich innerhalb des Bürgerwindparks Westfehmarn in einem Abstand von etwa 250 m zueinander.

3.1 Radarsysteme

3.1.1 Schiffsradar

Das Schiffsradar wurde nach den Vorgaben des Standarduntersuchungskonzepts (StUK 4) des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) betrieben (BSH 2013). Damit wurde sichergestellt, dass keine methodischen Unterschiede zu den Radarerfassungen des Vogelzugs im Rahmen des Umweltmonitorings zu Offshore-Windparks bestanden.

Bei dem verwendeten Radargerät handelte es sich um ein handelsübliches marines Navigationsradar, das sehr häufig in der Schifffahrt eingesetzt wird. Die Sendeleistung des Geräts betrug 25 kW, die Sendefrequenz lag mit 9410 MHz im X-Band-Bereich. Diese Sendefrequenz ist gut geeignet, auch kleine Vögel zu detektieren. Weitere technische Spezifikationen sind in Tab. 1 angegeben. Die Radarantenne wurde auf dem Dach eines 8-ft Containers installiert (Abb. 2).

Tab. 1: Technische Spezifikationen des verwendeten Schiffsradargeräts des Typs VisionMaster FT der Firma Sperry Marine.

Radarspezifikationen	
Sendefrequenz	25 kW
Sendeleistung	9410 MHz
Pulslänge	0,05 μ s (short pulse)
Horizontaler Öffnungswinkel	1,0°
Vertikaler Öffnungswinkel	24°
Umdrehungsfrequenz	28 rpm
Antennenlänge	2,4 m (8 ft)
Erfassungsradius	1.500 m



Abb. 2: Aufbau des Schiffsradargeräts nahe Westermarkelsdorf auf Fehmarn.

Im Gegensatz zur herkömmlichen Anwendung eines Navigationsradars wurde die Antenne zur Vogelerfassung um 90° gekippt, sodass sie eine vertikale Rotationsebene einnahm (Abb. 2). Auf diese Weise erfasst das Radar den Luftraum in einem halbkreisförmigen Bereich oberhalb und seitlich des Radars. Die Rotationsebene der Antenne wurde auf etwa 135° ausgerichtet und somit senkrecht zur angenommenen Hauptzugrichtung Südwest.

Auch hinsichtlich der Einstellungen des Radars wurden die Vorgaben des StUK 4 (BSH 2013) berücksichtigt. So wurde der Erfassungsradius des Geräts auf 1.500 m; die Empfindlichkeit

der Antenne (gain) auf 70 % gestellt. Filterfunktionen zur Reduzierung von Störungen („clutter“) durch Regen und Wellenbewegungen (bei marinen Anwendungen) wurden nicht verwendet, da diese Auswirkungen auf die Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln haben können. Die eingestellte Nachleuchtdauer der Radarsignale belief sich auf 45 s. Die Nachleuchtdauer gibt die Zeitspanne an, die ein Radarsignal nach der ersten Registrierung auf dem Bildschirm angezeigt wird. Das Nachleuchten der Radarsignale hat zur Folge, dass bei sich bewegendem Vögeln ein charakteristischer Radarschatten entsteht, da die bei vorhergehenden Umläufen des Radarbalkens widergegebenen Signale desselben Objekts eine „Spur“ ergeben (Abb. 3).

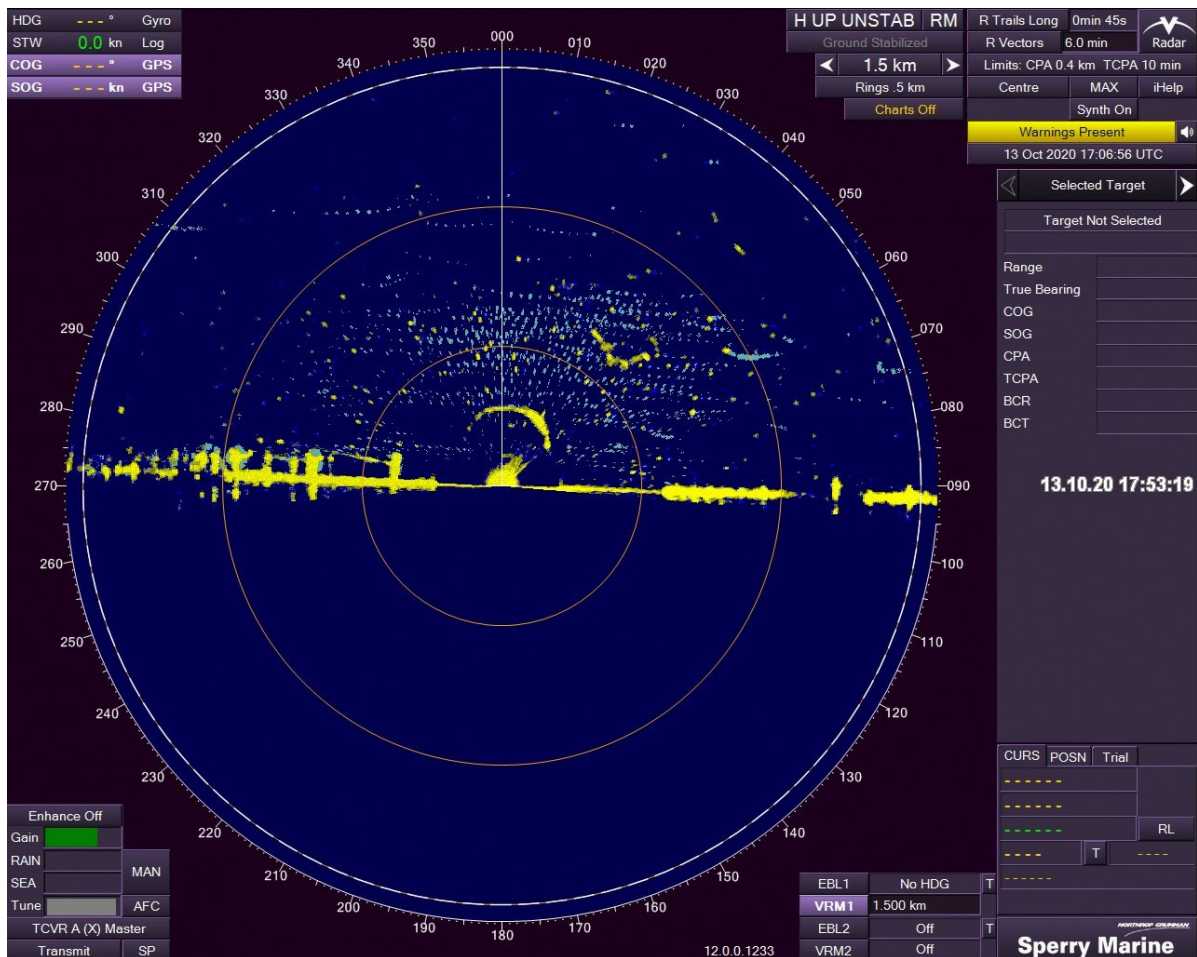


Abb. 3: Beispiel eines Screenshots des Vertikalradars bei starkem Vogelzug (13.10.2020 um 17:53 UTC). Das Radargerät befindet sich im Zentrum, der obere Halbkreis des Bildes zeigt den erfassten Luftraum. Die horizontale gelbe Linie gibt die Geländeoberfläche mit Vegetation („verdickte Bereiche“ rechte Seite) und WEA (linke Seite) wieder. Die Vogelsignale im Luftraum sind an den hellblauen Spuren hinter dem aktuellen gelben Signal zu erkennen.

Die Aufzeichnung der Radarsignale erfolgte durch die regelmäßige Speicherung eines Screenshots des Radarbildschirms (Abb. 3). Dazu wurde der Radarbildschirm über einen Framegrabber auf ein PC übertragen und alle vier Minuten im Bildformat „jpg“ gespeichert. Die aufgezeichneten Bilder wurden im Nachgang von einem erfahrenen Radarornithologen visuell nach Vogelsignalen abgesucht. Diese können anhand ihrer Größe, der Bewegungsgeschwindigkeit sowie der charakteristischen, durch das Nachleuchten entstehenden Spuren identifiziert werden (Abb. 3).

Die Digitalisierung der Vogelsignale erfolgte mit Hilfe des Softwareprogramms „GSA Bird Counter 1.17“ (Gesellschaft für Softwareentwicklung und Analytik, Rostock). Das Programm berechnet die Koordinaten der spezifizierten Signale in Relation zur Radarposition. Aus den Koordinaten ergeben sich dann der horizontale, der absolute (Euklidische) sowie der vertikale Abstand der Signale zur Geländeoberfläche. Diese Angaben bildeten die Grundlage für die weitere Datenanalyse (siehe Kap. 3.2).

Auf diese Weise wurden insgesamt 18.799 Radarbilder, die im Untersuchungszeitraum aufgezeichnet wurden, ausgewertet. Davon gingen insgesamt 1.383 Bilder (7,4 %) aufgrund von Regen sowie 21 Bilder (0,1 %) aufgrund von nicht näher definierbaren Störungen nicht in die weiteren Analysen ein. Da Regenclutter die Signale von Vögeln überlagert, müssen Bilder von Niederschlagsperioden verworfen werden.

Zu Beginn des Untersuchungszeitraums kam es zudem zu technischen Ausfällen, da das Framegrabber-basierte Aufzeichnungssystem, das in dieser Form auch standardmäßig im Offshore-Bereich zum Einsatz kommt, wiederholt ausfiel (Abb. 4). Erst mit Umstellung auf ein Videokarten-basiertes Aufzeichnungssystem der Screenshots am 19.10.2020 wurde eine durchgehende Datenaufnahme erreicht. Ein weiterer Datenausfall gegen Ende des Untersuchungszeitraums (04. – 09.12.2020) wurde durch einen Kabelschaden verursacht, der zu einem mehrtägigen Stromausfall führte.

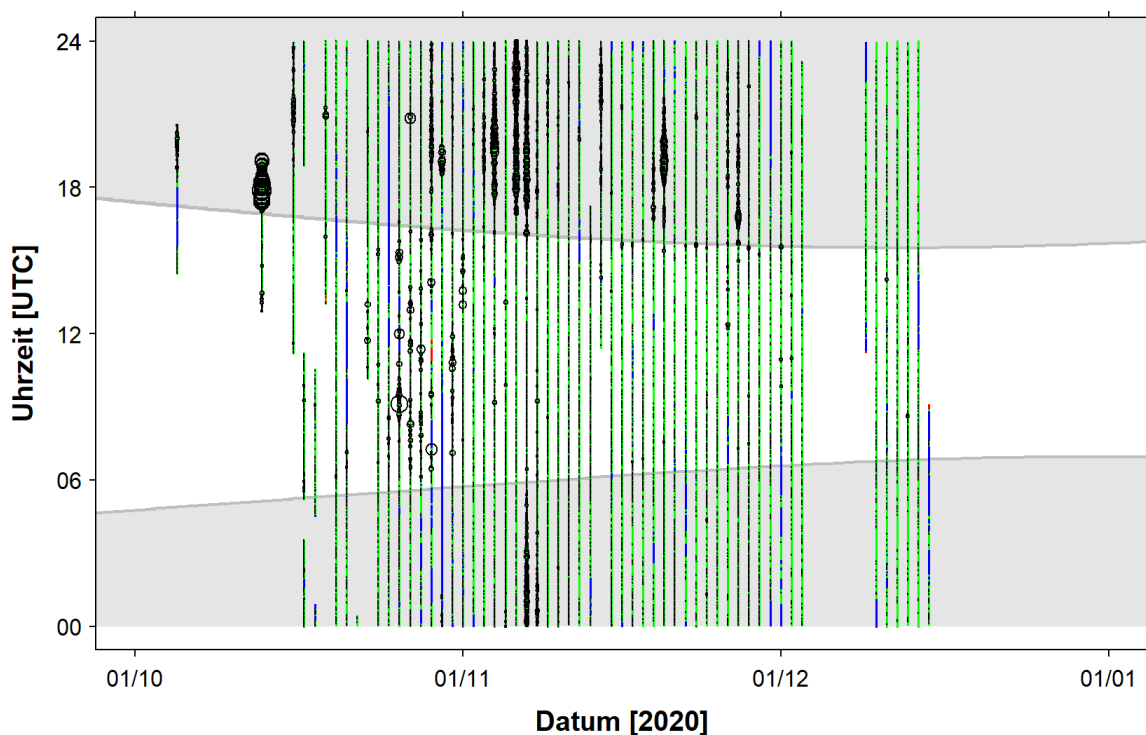


Abb. 4: Aufzeichnungsperioden des Schiffsradargeräts im Untersuchungszeitraum vom 05.10. bis 15.12.2020. Die Zeiten, in denen aufgezeichnet wurde, sind farblich markiert (grün: Vogel-signale auswertbar; blau: Vogel-signale aufgrund von Regen nicht auswertbar, rot: Vogel-sig-nale aufgrund von anderen Störungen nicht auswertbar). Schwarze Kreise geben die relative Verteilung der festgestellten Vogelsignale an. Der grau schraffierte Bereich markiert die Dunkelphase (definiert nach Bürgerlicher Dämmerung).

3.1.2 Spezialisiertes Vogelradar MR1

Das MR1 ist ein von der Firma Swiss Birdradar Solution AG entwickeltes Radargerät, das in der Lage ist, Vogelzug automatisiert und in Echtzeit zu messen. Das MR1 basiert auf einem kommerziellen marinen Navigationsradar mit 25 kW Puls-Leistung und einer Sendefrequenz von 9410 MHz. Anstatt einer rotierenden Balkenantenne ist das System mit einer stehenden bzw. nutierenden Hornantenne mit einem nach oben gerichteten Erfassungswinkel von etwa 60° ausgestattet (Abb. 5). Durch Reduktion von Radar-Nebenkeulen wird mit dieser Antenne eine klare Definition des Erfassungsvolumens möglich, auf dessen Basis die Berechnung der Zugintensitäten erfolgt (siehe Kap. 3.2.1).

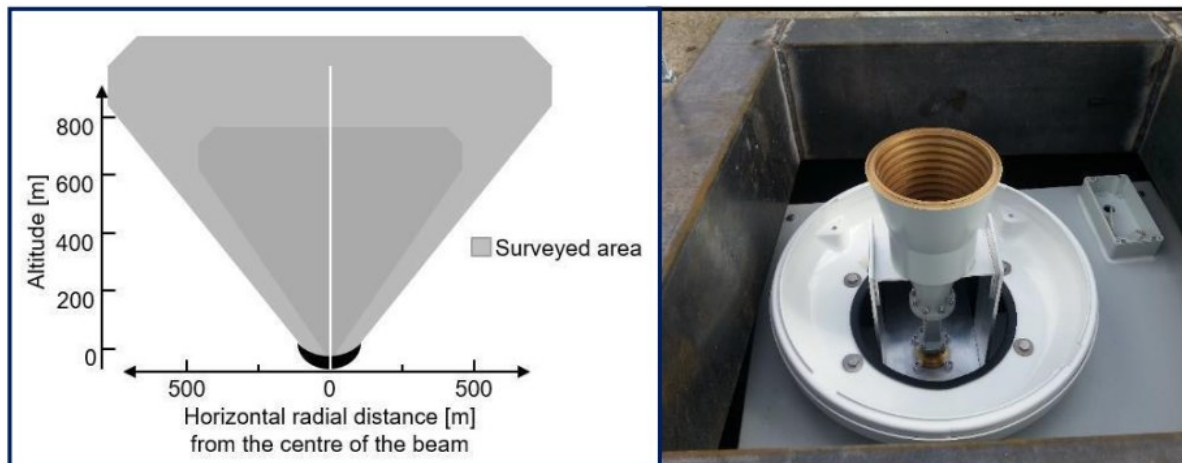


Abb. 5: Links: Darstellung des überwachten Radarvolumens der Hornantenne des MR1-Radars nach Reduktion von Rauschen und Nebenkeulen (Angabe des Herstellers). Rechts: Hornantenne des MR1.

Das Radargerät wurde ebenfalls auf dem Dach eines Containers montiert; über einen Online-Zugriff konnte das Gerät durchgehend auf seine Funktionalität überprüft und die Daten übertragen werden. Das System verfügt zudem über ein automatisches Überwachungssystem, das bei Fehlern eine Alarmmeldung versendet und ggf. die Software selbst neu startet.

Das MR1 wurde in drei alternierenden Operationsmodi betrieben: „short pulse“, „short pulse mit Antennennutation (2°)“ und „long pulse mit Antennennutation (2°)“. Ein Wechsel des Operationsmodus erfolgte alle 20 Minuten. Im „short pulse“-Modus wird die Distanzauflösung des Systems optimiert und somit die Detektion einzelner Vögel optimiert. Beim Betrieb der Antenne mit leichter Nutation können weitere Parameter der Radarsignale wie Flugrichtung und -geschwindigkeit errechnet werden. Die „short pulse“-Operationsmodi erlauben die Detektion eines kleinen Singvogels bis in Höhen von etwa 700 – 1.000 m. Im „long-pulse“-Modus ist eine Ausdehnung des vertikalen Erfassungsbereichs möglich, jedoch unter Einbußen der Distanzauflösung. Die Daten dieses Operationsmodus wurden daher in dieser Studie nicht verwendet.

Die integrierte Signalverarbeitungssoftware des MR1 detektiert und identifiziert die Radarechos in Echtzeit (Abb. 6). Aus den Radar-Rohsignalen werden unter anderem folgende Parameter extrahiert:

- Die Position jedes Echos in Höhe und Zeit
- Der Radarquerschnitt (RCS, Radar Cross Section) als ein Maß der Objektgröße
- Die Fluggeschwindigkeit und Richtung über Grund

- Zeitliche Muster der Echointensität, aus welchen die Flügelschlagfrequenz, die Länge der Flügelschlagphasen/Flügelschlagpausen und somit das Flügelschlagmuster abgeleitet wird.

Die Erfassung des Flügelschlagmusters bzw. der Flügelschlagfrequenz wird durch eine konstante Abtastung des überwachten Raumes ermöglicht; Systeme mit drehender Antenne wie das Schiffsradar sind dazu nicht in der Lage.

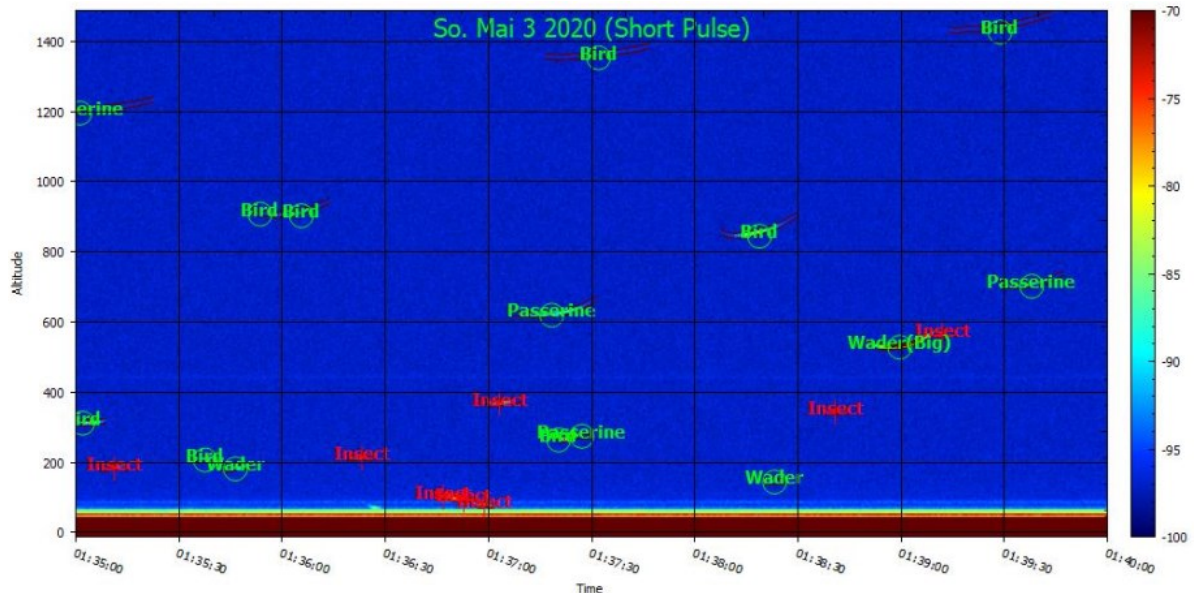


Abb. 6: Thumbnail der MR1-Software zeigt die detektierten Radarechos und deren Klassifizierung in Echtzeit über einen Zeitraum von 5min und bis zur Höhe von 1500m.

Anhand dieser Eigenschaften klassifiziert ein interner Klassifikations-Algorithmus die Radarechos in fünf verschiedene Gruppen: Insekten, Singvögel, Watvögel, große Vögel sowie nicht näher identifizierbare Vögel.

3.2 Datenanalyse

3.2.1 Berechnung der Zugintensität (MTR)

Die Erfassbarkeit von Vögeln durch Radargeräte ist von einer Reihe von Faktoren abhängig (Bruderer 1997a; Schmaljohann et al. 2008). Eine wesentliche Rolle spielt die Entfernung des Vogels vom Radargerät. Dies beruht unter anderem auf der Tatsache, dass das vom Radar erfasste Raumvolumen mit zunehmender Entfernung steigt, andererseits die von Vögeln reflektierte Energie mit der Entfernung abnimmt.

Bei Verwendung von Schiffsradargeräten ist daher eine Korrektur der distanzabhängigen Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln notwendig. Dafür wurde ein an „distance sampling“ (Buckland et al. 2001) angelehntes Verfahren verwendet (Hüppop et al. 2006; Welcker et al. 2017). Dieses Verfahren ist auch bei den Radarerfassungen für Offshore-Windparks vorgesehen (BSH 2013) und wird dort in gleicher Weise angewendet (siehe auch Welcker 2019).

Für die Distanzkorrektur wurde auf Basis der empirischen Verteilung der Radarsignale im Höhenbereich zwischen 50 und 150 m die entfernungsabhängige Erfassungswahrscheinlichkeit modelliert (Abb. 7). Dieser Höhenbereich wurde unter der Annahme ausgewählt, dass hier eine horizontale Gleichverteilung der Vögel gegeben ist, d. h. keine Beeinflussung der Verteilung durch die Topografie oder andere Strukturen vorliegt. Zudem bleibt der Erfassungswinkel gegenüber der Horizontalen in diesem Höhenband weitgehend konstant. Dies

verhindert eine systematische Änderung des effektiven Radarquerschnitts der Vögel, welcher ihre Erfassbarkeit zusätzlich beeinflusst (Eastwood 1967; Bruderer 1997a).

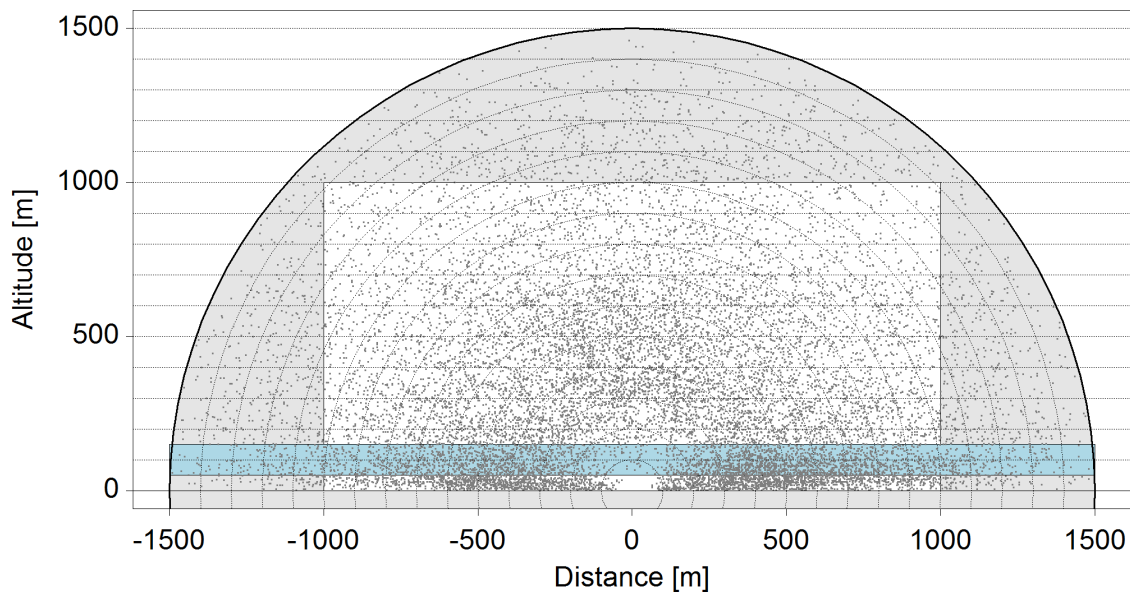


Abb. 7: Beispielhafte Darstellung der Verteilung der Vogel-Rohsignale eines Schiffsradargeräts. Der graue Halbkreis zeigt den Erfassungsraum von 1,5 km Radius. Das blaue Band markiert den Höhenbereich zwischen 50 – 150 m, der für die Distanzkorrektur verwendet wurde. Die (korrigierten) Signale in der weißen Fläche wurden für die Berechnung der Zugintensitäten verwendet.

Da im Nahbereich bis etwa 100 m um das Radargerät keine Vögel aufgezeichnet werden konnten, wurde dieser Bereich für die Ermittlung der Korrekturfunktion ausgeschlossen. Zudem befanden sich im unteren linken Erfassungsraum des Schiffsradars zahlreiche WEA. Aufgrund von Abschirmungs- und Überlagerungseffekten konnten in diesen Bereichen keine Vögel detektiert werden (Abb. 8). Daher wurden nur die Signale der rechten Hälfte des Erfassungsraums für die Distanzkorrektur verwendet.

Zur Ermittlung der passenden Detektionsfunktion wurden nach Buckland et al. (2001) sowohl „Half normal“ als auch „Hazard rate“-Modelle mit und ohne Cosinus-Erweiterung bis zur 5. Ordnung angepasst. Die Modellauswahl wurde mit Hilfe des „Akaike Information Criterion“ (AIC) vorgenommen. Die nach dieser Vorgehensweise ausgewählte Detektionsfunktion war ein Hazard rate-Modell mit Cosinus-Erweiterung der 5. Ordnung (Abb. 9 und Tab. 2).

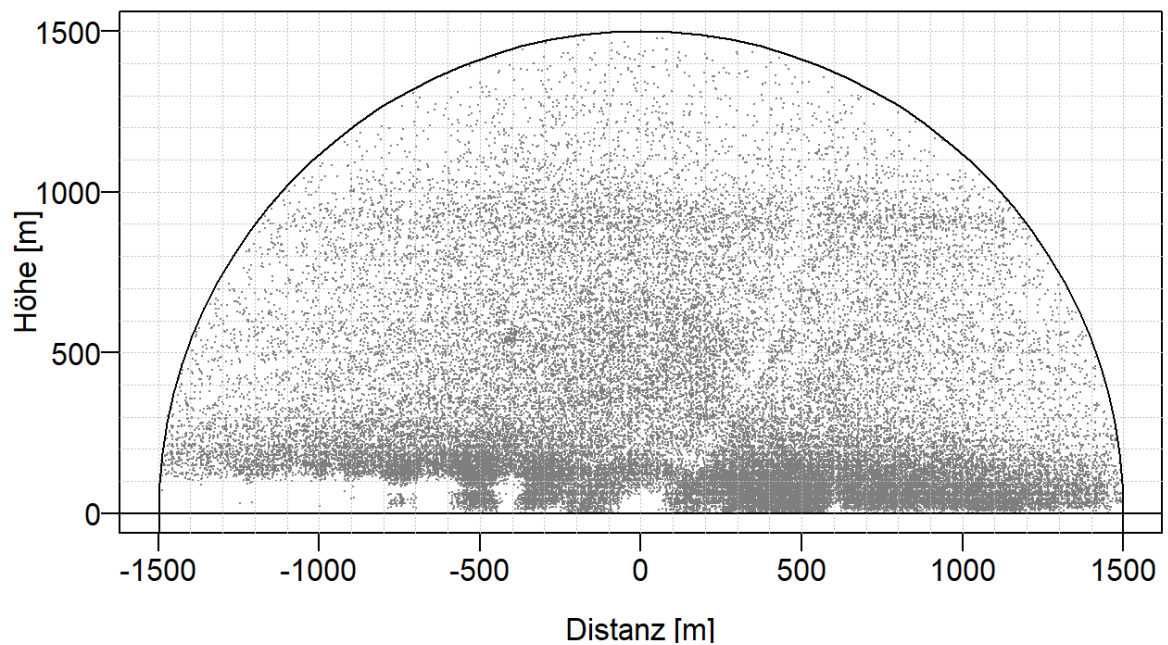


Abb. 8: Verteilung der Vogel-Rohsignale des Schiffsradars aus dem Untersuchungszeitraum Oktober bis Dezember 2020 auf Fehmarn. Deutlich zu erkennen sind die WEA-Standorte im unteren linken Bildbereich, in deren Umfeld keine Vögel detektiert werden können. Ebenso können im unmittelbaren Nahbereich des Radars (ca. 100 m) keine Vogelsignale erfasst werden.

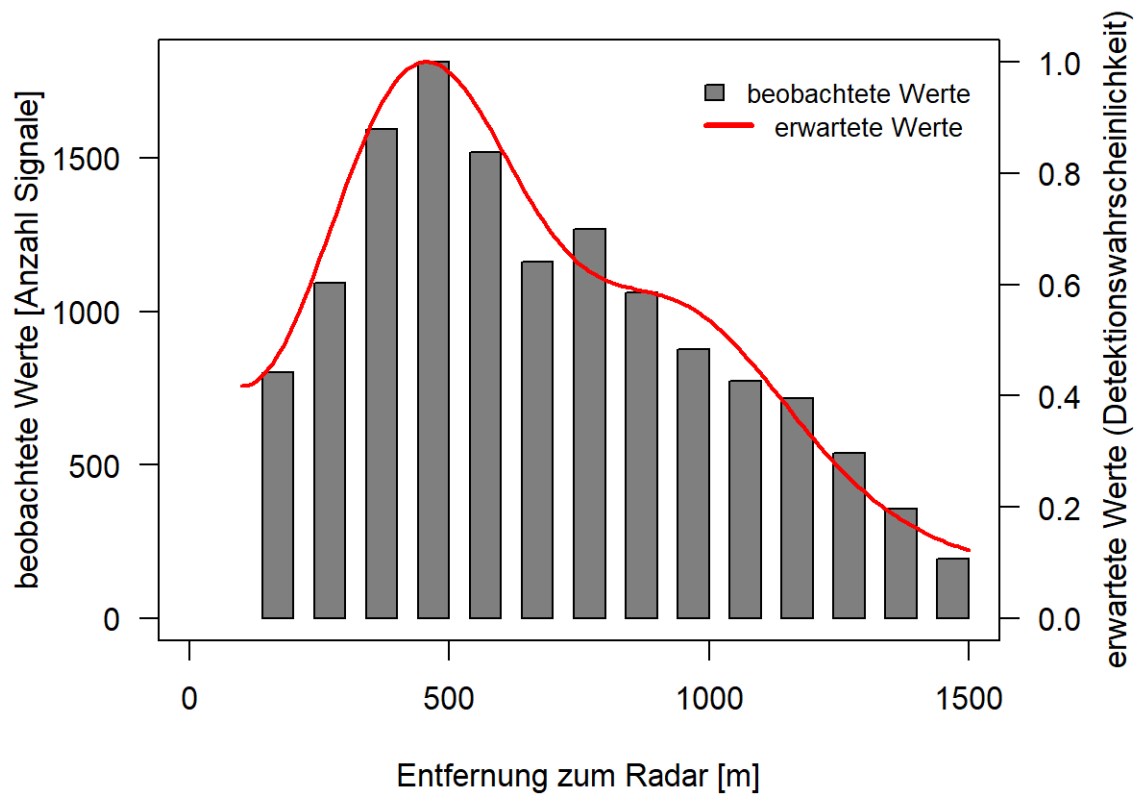


Abb. 9: Abhängigkeit der Anzahl Radarsignale von der Entfernung zum Radargerät (graue Balken) sowie Darstellung der für die Distanzkorrektur verwendeten Detektionsfunktion (rote Linie).

Tab. 2: Parameter der für die Distanzkorrektur der Schiffsradarsignale verwendeten Detektionsfunktion (Hazard rate-Modell mit Cosinus-Erweiterung der 5. Ordnung). Zusätzlich Angabe der Anzahl Rohsignale, auf deren Basis das Modell angepasst wurde.

Parameter	Koeffizient
Key function, shape	3,662
Key function, scale	915,520
Series expansion, b1	-0,081
Series expansion, b2	-0,076
Series expansion, b3	-0,217
Series expansion, b4	-0,073
N Signale	13.810

Neben der Distanzkorrektur für die entfernungsabhängige Detektionswahrscheinlichkeit mussten die Daten noch für die Tatsache korrigiert werden, dass die Erfassungswahrscheinlichkeit von Vögeln in einigen Bereichen des Radarraums eingeschränkt war (Abb. 10). Dies betraf, wie oben erwähnt, Bereiche, in welchen durch die Präsenz von WEAs keine Vögel detektiert werden konnten, sowie Bereiche innerhalb eines Bandes in der rechten Hälfte des Erfassungsraums, die dauerhafte Störungen aufwiesen. Die genaue Ursache dieser Störungen ist nicht bekannt, möglicherweise spielt die Nähe der Antenne zum Dach des Containers eine Rolle. Ähnliche Phänomene können auch beim Einsatz im Offshore-Bereich auftreten, was dort häufig mit Störungen durch Schiffsaufbauten in Verbindung gebracht wird.

Die beeinflussten Bereiche wurden von der Analyse ausgeschlossen und die übrigen Signale für den Verlust an Detektionsfläche korrigiert.

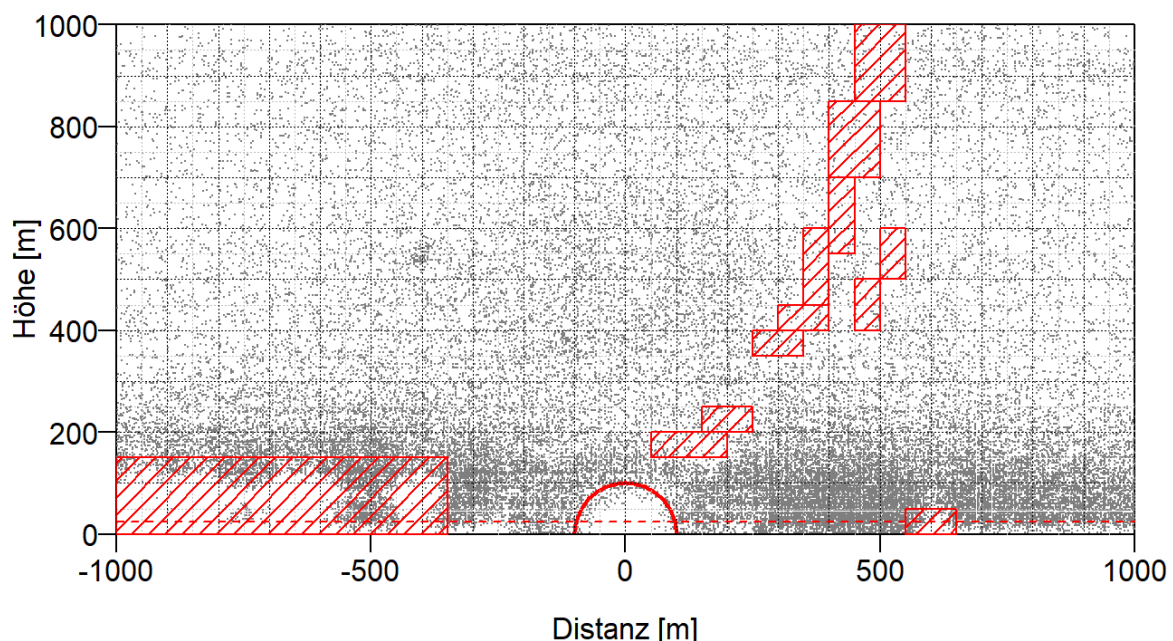


Abb. 10: Bereiche des für die Berechnung der Zugintensitäten verwendeten Radarerfassungsraums mit reduzierter Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln (rot schraffiert). Zusätzlich ist der 100 m-Radius um das Radargerät dargestellt, der ebenfalls von der Auswertung ausgeschlossen wurde, sowie die 25 m-Höhenlinie (gestrichelte Linie), die das untere Höhenlimit der Auswertung darstellt (Details siehe Text).

Mit den auf diese Weise korrigierten Radarsignalen wurden für jede Zeitstunde, für die mindestens drei auswertbare Screenshots vorlagen (entsprechend 20 % der möglichen 15 Screenshots pro Stunde), die Zugintensität in Signalen pro Stunde und Kilometer (MTR, migration traffic rate) berechnet. Es wurden dafür alle Vogelsignale verwendet, die bis 1.000 m beiderseitig des Radars aufgezeichnet wurden (Abb. 7 und Abb. 10). Die Berechnung der MTRs wurde für drei Höhenbereiche durchgeführt: von 25 m bis 200 m Höhe, von 25 m bis 500 m und von 25 m bis 1000 m. Die Vogelsignale in Höhen unterhalb von 25 m wurden nicht berücksichtigt, da dies derzeit das untere Erfassungslimit des MR1 darstellt.

Für das MR1 wurde die Zugintensität ebenfalls in $\text{Signale} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (MTR) berechnet. Grundlage hierfür bildeten die in Echtzeit klassifizierten Radarechos. Die Anzahl der Vogelsignale wurde auf Grundlage des für jede Artgruppe bekannten Erfassungsraums des Radars (Abb. 5) auf einen Kilometer extrapoliert sowie für die tatsächliche Erfassungszeit pro Stunde korrigiert. Die Erfassungszeit betrug in der Regel 40 min pro Stunde (Betriebszeit in den Operationsmodi „short pulse“). Sank die Erfassungszeit aufgrund von Regen oder anderen Störungen auf unter 12 Minuten pro Stunde (20 %), wurde für diese Stunde analog zum Schiffsradar kein MTR-Wert berechnet. In die Analyse flossen die Signale aller Vogeluntergruppen ein und sie wurde ebenso für die oben genannten Höhenbereiche durchgeführt.

3.2.2 Vergleich der Radarsysteme

Für die statistische Analyse der Vergleichbarkeit der Radarsysteme wurde grundsätzlich zwischen Tag- und Nachtzug unterschieden. Die Definition der Hell- und Dunkelphase wurde anhand der bürgerlichen Dämmerung vorgenommen, d. h. anhand des Zeitpunkts, an dem der Tiefenwinkel der Sonne (Sonnenstand unterhalb des Horizonts) 6° betrug. Diese Vorgehensweise entspricht den Vorgaben des StUK.

Die Vergleichbarkeit wurde primär auf Grundlage der stündlichen MTR-Werte überprüft. Insgesamt standen für die Vergleiche 1.110 Stunden zur Verfügung, für die von beiden Radarsystemen ein MTR-Wert vorlag. Davon entfielen 465 h auf die Hellphase (Tagzug) und 645 h auf die Dunkelphase (Nachtzug).

Die Verteilung der stündlichen MTR-Werte war bei beiden Radaren stark rechtsschief und enthielt einen variablen Anteil an Null-Werten (Abb. 11). Nach Transformation mit dem natürlichen Logarithmus ($\log + 1$) ergab sich in beiden Fällen eine annähernde Normalverteilung der Werte $> \text{Null}$ (Abb. 12).

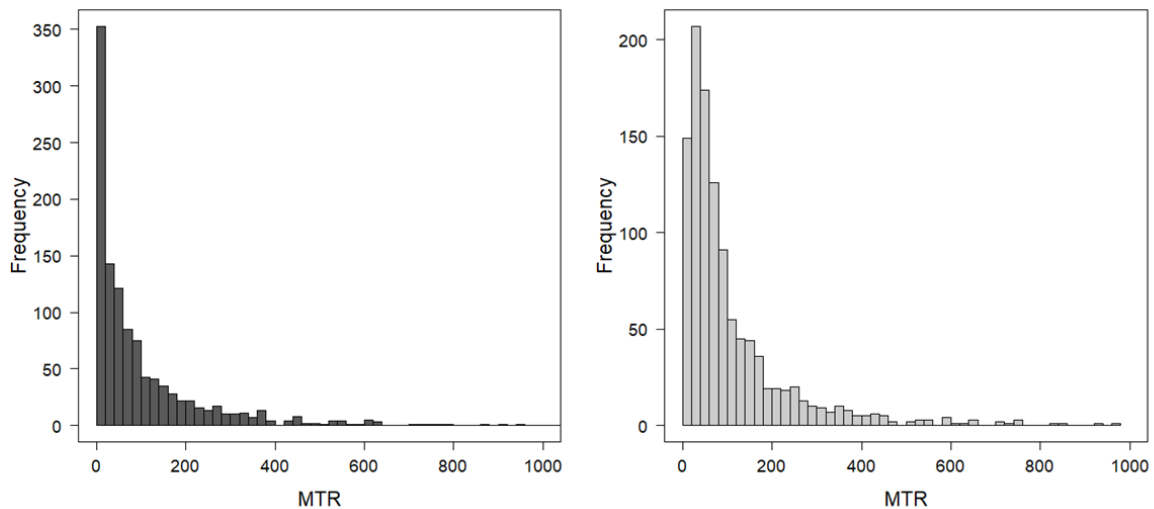


Abb. 11: Histogramm der stündlichen MTRs bis 200 Höhenmetern des MR1 (links) und des Schiffsradars (rechts). Es sind die Daten des Tag- und des Nachtzugs enthalten. Zur besseren Vergleichbarkeit ist die x-Achse bei 1.000 MTR abgeschnitten.

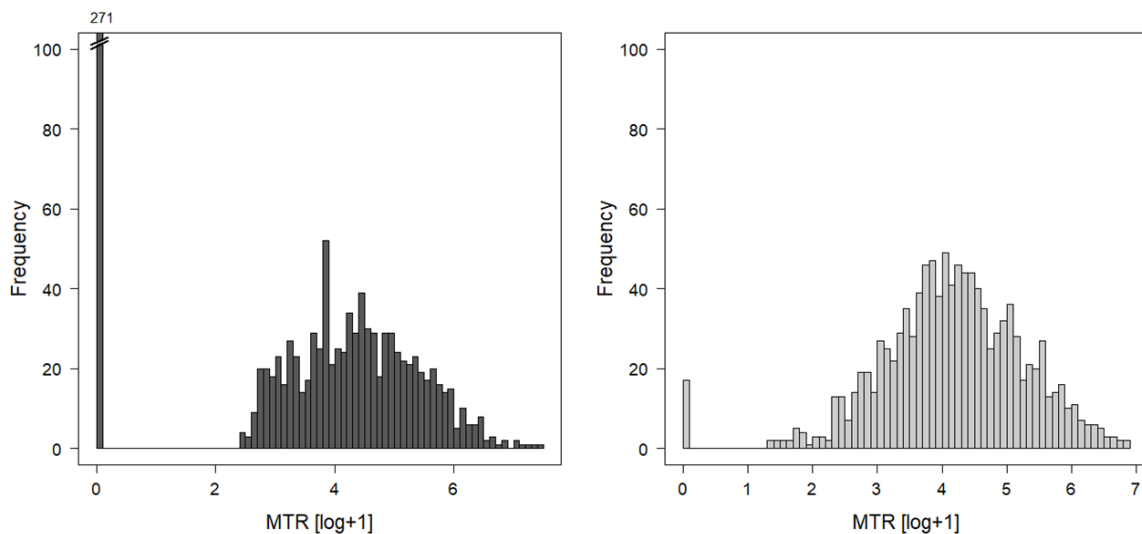


Abb. 12: Histogramm der log-transformierten ($\log+1$) Zugintensitäten bis 200 Höhenmetern des MR1 (links) und des Schiffsradars (rechts). Es sind die Daten des Tag- und des Nachtzugs enthalten.

Die visuelle Inspektion der stündlichen Zugintensitäten zeigte, dass der Datensatz zwei auffällige Extremwerte enthielt (Abb. 13). Der MTR-Wert in diesen beiden Stunden lag für beide Radarsysteme etwa 5-mal höher als die Höchstwerte des übrigen Datensatzes. Da diese Datenpunkte einen sehr hohen Einfluss auf die weitere Auswertung ausgeübt hätten, wurden sie aus dem Datensatz entfernt. Da sie zudem weit ausserhalb des in dieser Studie primär betrachteten Schwellenwerte von 250 und 500 MTR lagen, hatte ihr Ausschluss keine Auswirkungen auf die Interpretation des Datensatzes.

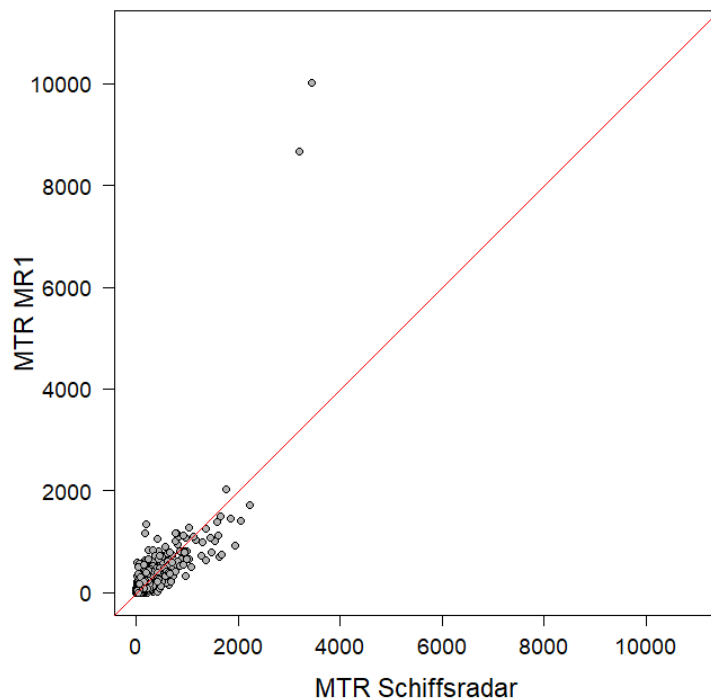


Abb. 13: Vergleich der stündlichen MTR-Werte des Tag- und des Nachtzugs zwischen Schiffsradar und MR1 im Höhenbereich bis 1000 m. Die beiden deutlich zu erkennenden Extremwerte (outlier) wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Die Korrespondenz der stündlichen MTR-Werte der beiden Radarsysteme wurde mit Hilfe einer „Major Axis“-Regression (MAR) überprüft. Ein solcher Regressionstyp ist für Fälle geeignet, in denen es keine kontrollierte unabhängige Variable gibt, sondern beide Variablen gleichermaßen natürliche Variabilität enthalten. Während bei der herkömmlichen Regression („ordinary least squares regression“, OLS) die Summe der quadratischen Abweichungen um die vorhergesagten Werte minimiert wird, minimiert die MAR die Quadratsummen des senkrechten Abstands zwischen jedem Datenpunkt und der Regressionslinie. Im Gegensatz zur OLS-Regression ist eine MAR dadurch weitgehend robust hinsichtlich der Spezifizierung des Modells ($y \sim x$ vs. $x \sim y$).

In einem ersten Schritt wurde eine MAR auf Basis des vollständigen, nicht-transformierten Datensatzes berechnet. Die Analyse wurde dann mit den log-transformierten Daten wiederholt. Da bei einer $\log+1$ -Transformation mit Null-Werten die Regression in hohem Maße von Anzahl und Lage der Null-Werte abhängig ist, wurde diese Analyse unter Ausschluss der Null-Werte durchgeführt.

Für den Nachtzug wurde zudem eine Konfusionsmatrix erstellt, um die Übereinstimmung der Radarsysteme hinsichtlich des Überschreitens von Schwellenwerten zu prüfen. Es wurde zunächst eine Matrix für Schwellenwertüberschreitungen beider Radargeräte auf Basis der gemessenen MTRs erstellt. Im Anschluss wurden die MTR-Werte entsprechend der MAR-Ergebnisse korrigiert und die Matrices erneut erstellt. Somit wurde überprüft, ob eine Korrektur der Daten zu einer höheren Übereinstimmung in der Einschätzung von Schwellenwertüberschreitungen führt. Diese Analyse wurde für angenommene Schwellenwerte von 250 und 500 MTR durchgeführt.

Des Weiteren wurde auf Grundlage der stündlichen MTR-Werte die mittlere Zugintensität für die Hell- und Dunkelphase eines Tages bestimmt. Ein Mittelwert wurde dabei nur berechnet, wenn für mindestens 70 % der Hell- bzw. Dunkelphase eines Tages stündliche Werte

vorlagen. Die Dunkelphase wurde dabei dem Datum des Beginns der Nacht zugeordnet und nicht nach Datum (d. h. jeweils um Mitternacht) geteilt. Der zeitliche Verlauf der mittleren täglichen Zugintensität innerhalb des Untersuchungszeitraums wurde graphisch dargestellt und die Stärke der Korrelation zwischen den Werten der beiden Radarsysteme mit Hilfe einer Spearman-Rangkorrelation überprüft. Für diese Auswertung lagen 42 Mittelwerte für den Tagzug und 44 für den Nachtzug vor.

In einem letzten Schritt wurde die Korrespondenz der Systeme hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Zugintensität innerhalb eines Tages (24 h) evaluiert. Für diese Auswertung wurden nur die Daten des Novembers verwendet, um Auswirkungen der zeitlichen Verschiebung des Sonnenauf- und Sonnenuntergangs zu begrenzen. Für jede Stunde des Tages dieses Monats wurde die mittlere Zugintensität berechnet und graphisch dargestellt. Die Korrelation zwischen den Radarsystemen wurde ebenfalls per Spearman-Rangkorrelation getestet.

Alle statistischen Analysen wurden jeweils für den Höhenbereich bis 200 m, bis 500 m und bis 1.000 m durchgeführt. Da jedoch nur geringe Unterschiede zwischen den Höhenbereichen festgestellt wurden, werden im Folgenden (Kap. 4) für die meisten Auswertungsschritte lediglich die Ergebnisse der Bereiche bis 200 m und bis 1000 m dargestellt. Für alle Analysen wurde das Software-Programm R 3.6.1 (R Core Team 2019) verwendet, die MAR-Analysen wurden mit dem R-Paket „lmodel2“ (Legendre 2018) durchgeführt.

4 Ergebnisse

Der einfache Vergleich der stündlichen Zugintensitäten zeigte für den Nachtzug signifikant höhere mediane MTRs des Schiffsradars im Vergleich zum MR1 (Abb. 14; gepaarte Wilcoxon-Tests: $p < 0,001$). Der Unterschied trat dabei in allen Höhenbereichen gleichermaßen auf und belief sich auf etwa 32 %. Für den Tagzug konnte hingegen kein statistischer Unterschied der medianen Zugintensität gefunden werden. Die MTR-Werte des MR1 zeigten jedoch eine größere Streuung im Vergleich zum Schiffsradar (Abb. 14). Zudem enthielt der Datensatz des MR1 insgesamt einen höheren Anteil an Null-Werten als das Schiffsradar (24,2 % vs. 1,5 % im Höhenbereich bis 200 m).

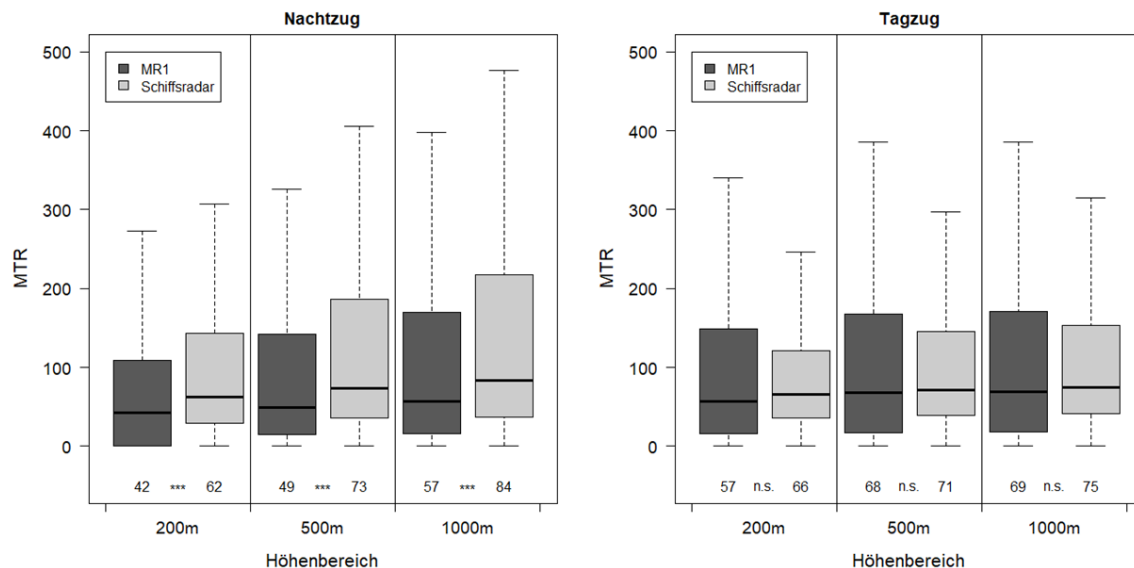


Abb. 14: Boxplots der MTR-Werte des Nachtzugs (links) und des Tagzugs (rechts) der verschiedenen Radarsysteme für drei Höhenbereiche. Die Plots zeigen den Median (schwarze Linie), die Box stellt den Interquartilsabstand dar und die Whisker repräsentieren die Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands. Unterhalb der Boxplots ist der Median sowie das Ergebnis des Median-Vergleichs mit Hilfe eines gepaarten Wilcoxon Tests angegeben (***) = $p < 0,001$, n.s. = nicht signifikant [$p > 0,05$])

Der Vergleich der stündlichen Zugintensitäten mittels Major Axis-Regression ergab für den Nachtzug ein ähnliches Ergebnis. Die Steigungen der Regressionsgeraden von 0,82 (Höhenbereich bis 200 m) bzw. 0,80 (Höhenbereich bis 1.000 m) wiesen auf einen systematischen Unterschied zwischen den Radarsystemen hin mit im Mittel 18,6 % bzw. 20,0 % höheren Zugintensitäten des Schiffsradars (Abb. 15, oben). Auf Basis der log-transformierten Daten ergab die MAR-Analyse eine hohe Übereinstimmung für beide Höhenbereiche (Abb. 15, unten). Das 95 %-Konfidenzintervall der Steigung schloss hier jeweils die 1 (d. h. die erwartete Steigung bei vollständiger Korrespondenz der Radarsysteme) mit ein.

Gleichzeitig wiesen die stündlichen Werte jedoch sowohl auf Basis der Original- als auch der log-transformierten Daten eine relativ hohe Streuung auf (Abb. 15). So lag das Bestimmtheitsmaß (R^2) bei 0,67 (Höhenbereich bis 200 m) und 0,83 (Höhenbereich bis 1.000 m). Die absolute Abweichung der MTR-Werte zwischen den Radarsystemen nahm mit der Zugintensität zu und lag im Mittel bei $54,6 \text{ MTR} \pm 2,6 \text{ SE}$ (bis 200 m) bzw. $81,2 \text{ MTR} \pm 4,7 \text{ SE}$ (bis 1.000 m) (Abb. 16). Bei einer Zugintensität von 250 MTR (im Höhenbereich bis 200 m) lag die absolute Abweichung nach der Regressionsanalyse im Mittel bei 100,5 MTR.

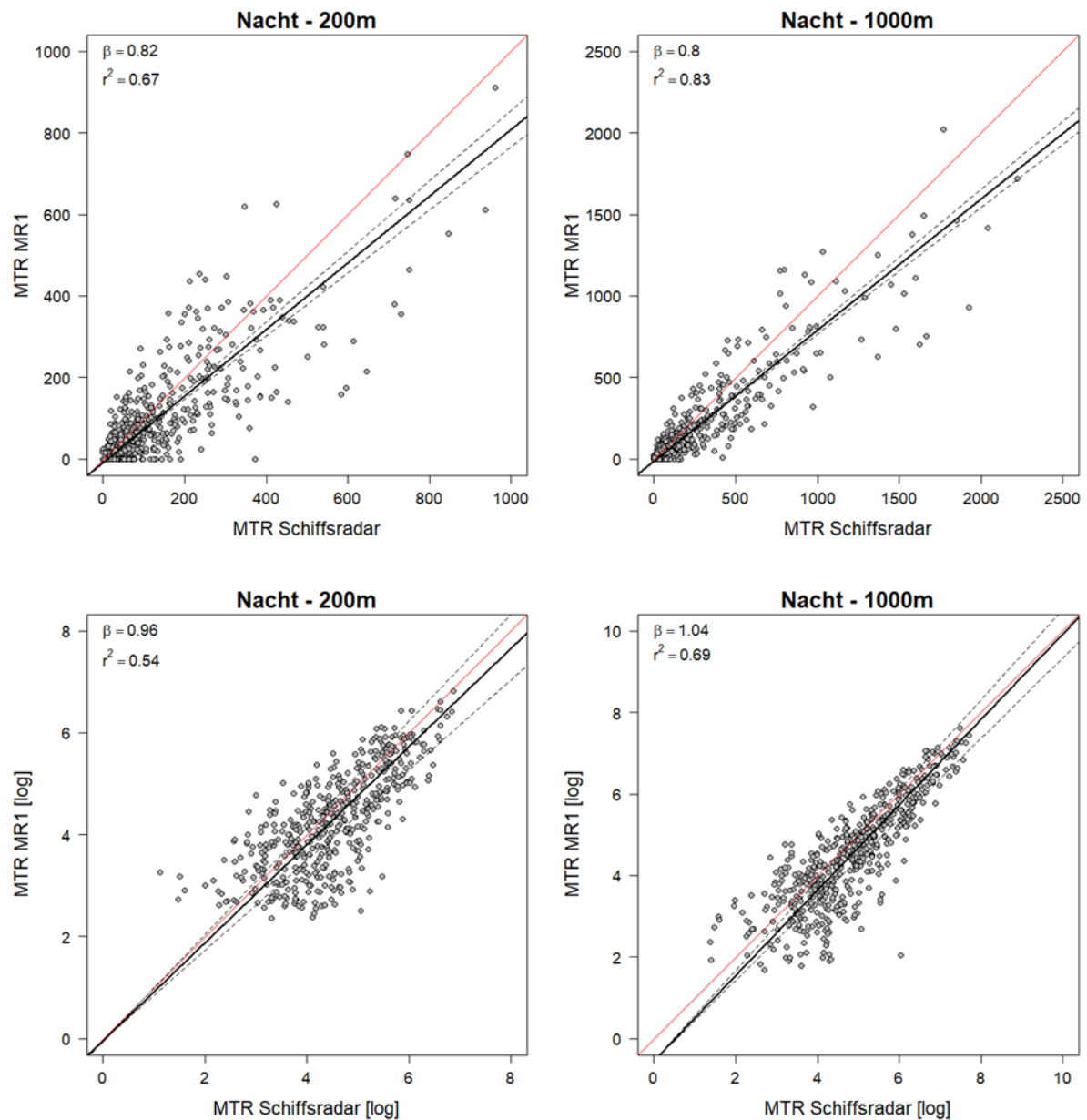


Abb. 15: Vergleich der stündlichen MTR-Werte von MR1 und Schiffsradar für den Nachtzug mit „Major Axis“-Regression. Dargestellt sind die MTR-Werte im Höhenbereich bis 200 m (links) und bis 1.000 m (rechts), sowie die Originaldaten (oben) bzw. die log-transformierten Daten (ohne Null-Werte; unten). Schwarze durchgehende und gestrichelte Linien zeigen die MA-Regression sowie das 95%-Konfidenzintervall der Steigung, die rote Linie zeigt die erwartete Regression bei vollständiger Korrespondenz der beiden Radarsysteme.

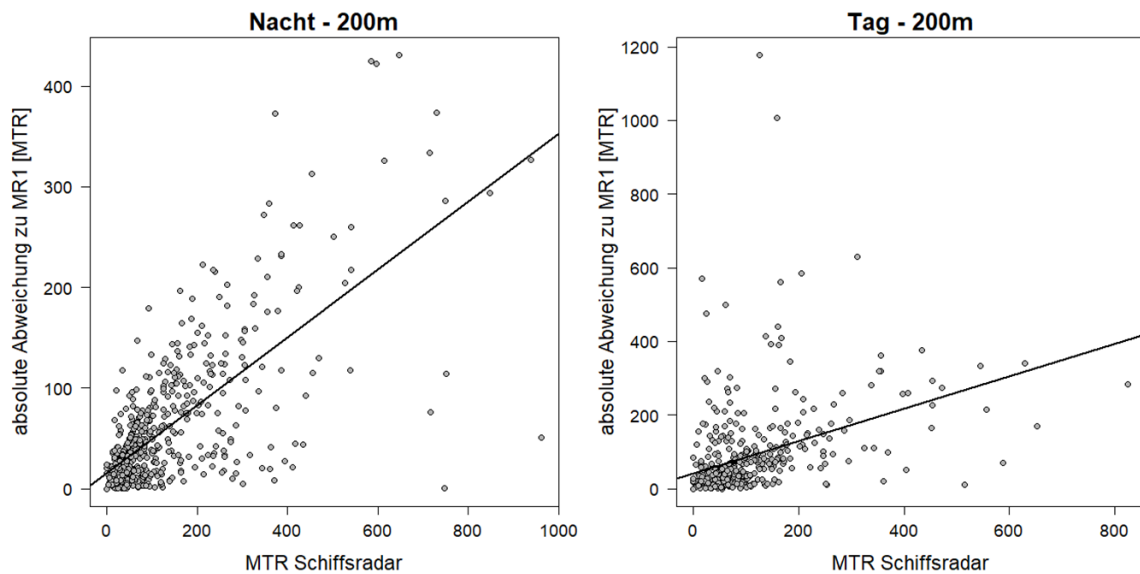


Abb. 16: Absolute Abweichung [MTR] der stündlichen Zugintensität zwischen Schiffsradar und MR1 für den Nachtzug (links) und den Tagzug (rechts) jeweils im Höhenbereich bis 200 m.

Die Ergebnisse des Tagzugs wichen von jenen des Nachtzugs teilweise erheblich ab. Die Steigung der Regressionsgeraden auf Basis der Originaldaten lag hier mit 2,27 (Höhenbereich bis 200 m) bzw. 1,90 (Höhenbereich bis 1.000 m) deutlich oberhalb von 1 (Abb. 17). Zudem wies der Tagzug eine höhere Streuung der Daten auf; das Bestimmtheitsmaß lag hier bei 0,30 (bis 200 Höhe) bzw. 0,33 (bis 1.000 m Höhe) und damit deutlich niedriger als beim Nachtzug. Auch die Analyse der log-transformierten Daten wies auf ähnliche Unterschiede zwischen Tag- und Nachtzug hin (Abb. 17). Die mittlere absolute Abweichung der MTR-Werte des Tagzugs lag mit $85,6 \pm 5,5$ SE im Höhenbereich bis 200 m ebenfalls deutlich, im Höhenbereich bis 1.000 m mit $92,7 \text{ MTR} \pm 5,7$ SE geringfügig höher als beim Nachtzug. Bei 250 MTR (bis 200 m) lag die absolute Abweichung des Tagzugs im Mittel bei 152,1 MTR.

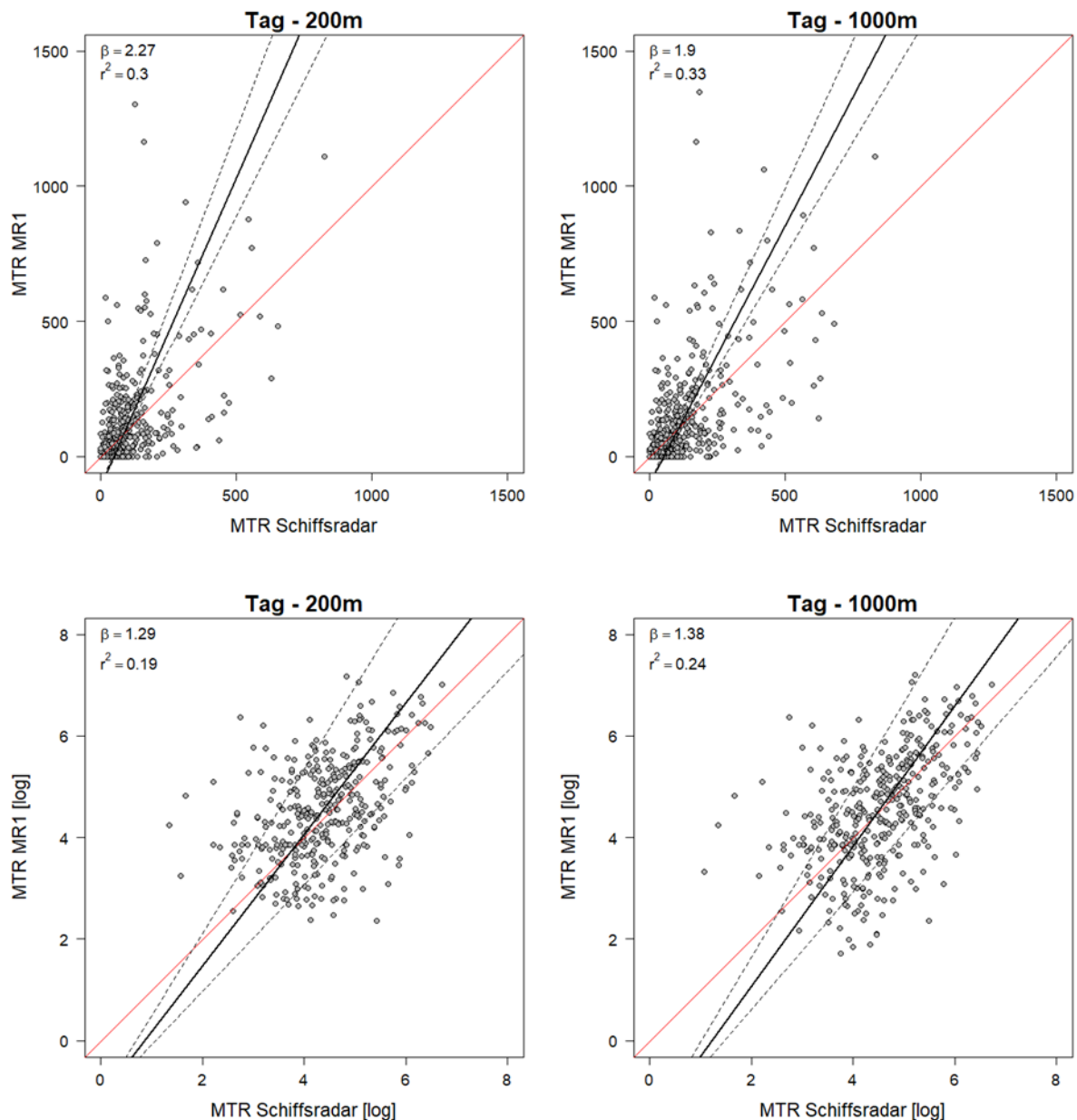


Abb. 17: Vergleich der stündlichen MTR-Werte von MR1 und Schiffsradar für den Tagzug mit „Major Axis“-Regression. Dargestellt sind die MTR-Werte im Höhenbereich bis 200 m (links) und bis 1.000 m (rechts), sowie die Originaldaten (oben) bzw. die log-transformierten Daten (ohne Null-Werte; unten). Schwarze durchgehende und gestrichelte Linien zeigen die MA-Regression sowie das 95%-Konfidenzintervall der Steigung, die rote Linie zeigt die erwartete Regression bei vollständiger Korrespondenz der beiden Radarsysteme.

Die Überprüfung der Vergleichbarkeit der Radarsysteme anhand der Konfusionsmatrizen ergab für den Nachtzug insgesamt eine hohe Übereinstimmung. Hinsichtlich eines Schwellenwerts von 250 MTR zeigte sich eine Übereinstimmung von 91,0 %, d. h. in 583 von 645 Stunden ermittelten beide Systeme gleichermaßen Zugintensitäten unterhalb bzw. oberhalb dieses Wertes (Tab. 3). Für einen Schwellenwert von 500 MTR lag die Übereinstimmung bei 97,5 % (Tab. 3).

Insgesamt zeigte das Schiffsradar häufiger eine Schwellenwertüberschreitung an. Der Wert von 250 MTR wurde von diesem Radarsystem in insgesamt 84 h überschritten, das MR1 ergab eine Überschreitung in nur 62 h. Ein ähnliches Bild zeigte sich beim Schwellenwert

von 500 MTR (Tab. 3). Eine Korrektur der MTR-Werte des MR1 anhand der Steigung der Major Axis-Regressionsgeraden ($MTR_{MR1 \text{ korrigiert}} = MTR_{\text{Schiffsradar}} / 0,82$) brachte eine Annäherung der Häufigkeit der Schwellenwertüberschreitung (Tab. 4). Eine entsprechende Korrektur auf Basis der log-transformierten Daten ($MTR_{MR1 \text{ korrigiert}} = \exp(\log_n(MTR_{\text{Schiffsradar}} / 0,96))$) führte zu einer Überschreitung von 250 MTR in 84 h von beiden Systemen (Tab. 5). In 55 dieser Stunden zeigten nach Korrektur beide Systeme gleichzeitig eine Schwellenwertüberschreitung, in jeweils 29 h war dies bei nur einem Radarsystem der Fall (Tab. 5).

Tab. 3: Konfusionsmatrix: Überprüfung, ob stündliche Zugintensitäten des MR1 und Schiffsradars den Wert von 250 MTR (links) bzw. 500 MTR (rechts) gleichzeitig überschritten. Geprüft wurden die Originaldaten, d. h. die nicht korrigierten Daten. Die Zellen der Tabelle zeigen die Anzahl der Stunden, in denen beide Radare eine Unterschreitung des Schwellenwertes (oben links) bzw. eine gleichzeitige Überschreitung (unten rechts) ergaben. Die Zellen unten links und oben rechts zeigen die Anzahl Stunden, in denen nur das Schiffsradar bzw. das MR1 eine Überschreitung des Werts ermittelten.

Originaldaten		
Schiffsradar \ MR1	<250	>250
	<250	>250
<250	543	18
>250	40	44

Originaldaten		
Schiffsradar \ MR1	<500	>500
	<500	>500
<500	623	2
>500	12	8

Tab. 4: Konfusionsmatrix mit anhand der Major Axis-Regression korrigierten Daten. Weitere Details siehe Tab. 3 und Text.

Korrigiert MAR		
Schiffsradar \ MR1	<250	>250
	<250	>250
<250	535	26
>250	31	53

Korrigiert MAR		
Schiffsradar \ MR1	<500	>500
	<500	>500
<500	619	6
>500	10	10

Tab. 5: Konfusionsmatrix mit anhand der logtransformierten Major Axis-Regression korrigierten Daten. Beim Schwellenwert von 500 MTR ergab sich kein Unterschied zu den in Tab. 4 dargestellten Werten.

Korrigiert log MAR		
Schiffsradar \ MR1	<250	>250
	<250	>250
<250	532	29
>250	29	55

Darüber hinaus zeigten die Radarsysteme eine hohe Korrespondenz der mittleren nächtlichen Zugraten. Der graphische Vergleich ergab nur geringe Unterschiede im zeitlichen Muster der nächtlichen Zugintensität (Abb. 18), die Korrelation zwischen den Radarsystemen war für beide Höhenbereiche (bis 200 m und bis 1.000 m) sehr hoch (Spearman's $\rho = 0,90$ (bis 200 m) und $0,95$ (bis 1.000 m), $p < 0.001$). Die mittlere absolute Abweichung zwischen den Radarsystemen nahm beim Nachtzug im Vergleich zu den stündlichen Werten auf $36,8 \pm 5,6$ SE (Höhenbereich bis 200 m) bzw. $60,9 \pm 13,2$ SE ab (Höhenbereich bis 1.000 m; Abb. 21). Auch bezogen auf 250 MTR lag die absolute Abweichung der mittleren nächtlichen Zugintensität mit 73,5 MTR geringer als bei den stündlichen Zugraten.

Ebenso ergab der Vergleich der mittleren Zugintensitäten des Tagzugs einen ähnlichen zeitlichen Verlauf beider Radargeräte; der Tagzug wies jedoch geringere Korrelationen auf (Abb. 19). Insbesondere in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums ab Mitte November zeigten sich stärkere Abweichungen zwischen den Radarsystemen; in diesem Zeitabschnitt lagen die mittleren täglichen Zugintensitäten des MR1 teilweise deutlich höher als die des Schiffsradars. Die absolute Abweichung der mittleren Zugintensität zwischen den Radargeräten nahm auch beim Tagzug im Vergleich zu den stündlichen Werten deutlich ab und lag im Mittel bei $31,1 \pm 3,5$ SE (Höhenbereich bis 200 m; Abb. 21).

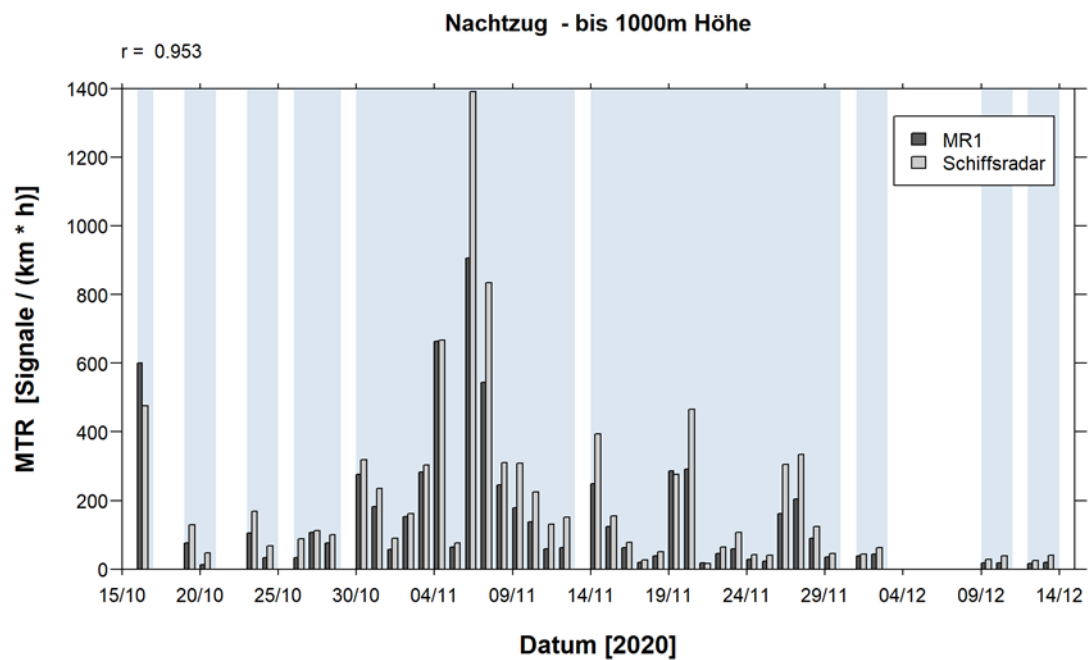
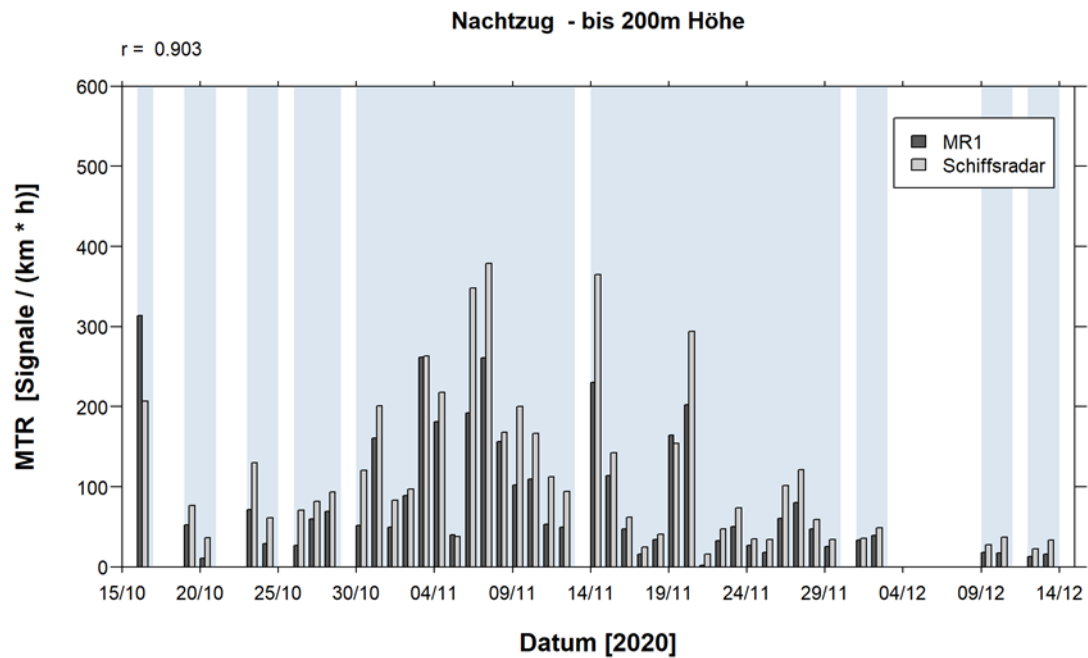


Abb. 18: Zeitlicher Verlauf der nächtlichen Zugintensitäten nach MR1 und Schiffsradar im Höhenbereich bis 200 m (oben) und bis 1.000 m (unten). Zusätzliche Angabe des Korrelationskoeffizienten (ρ) der Spearman-Rangkorrelation.

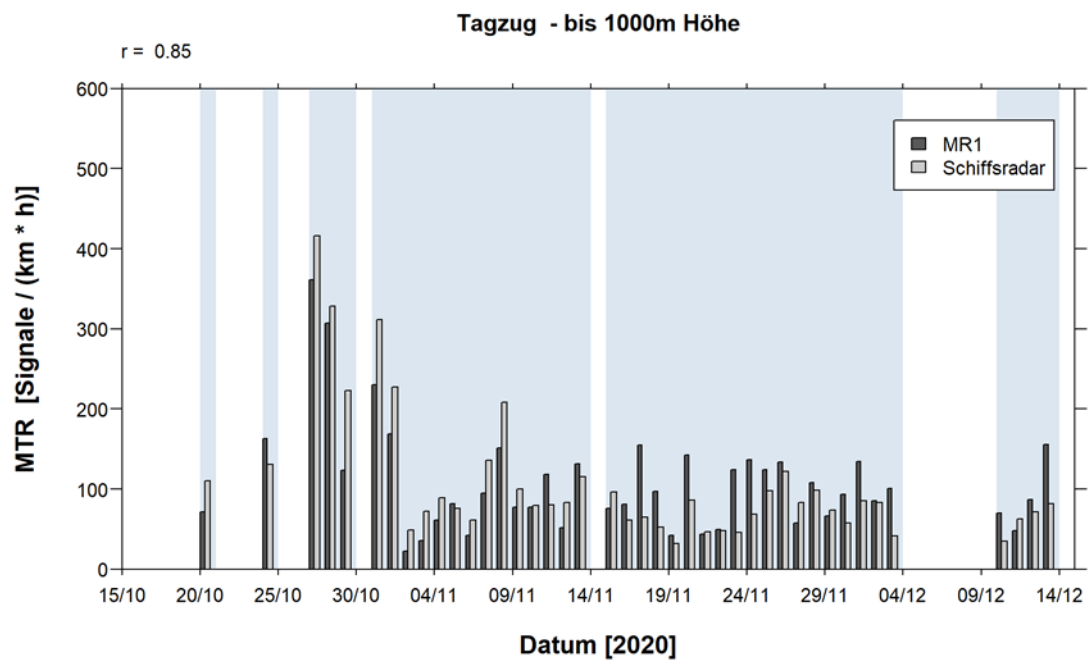
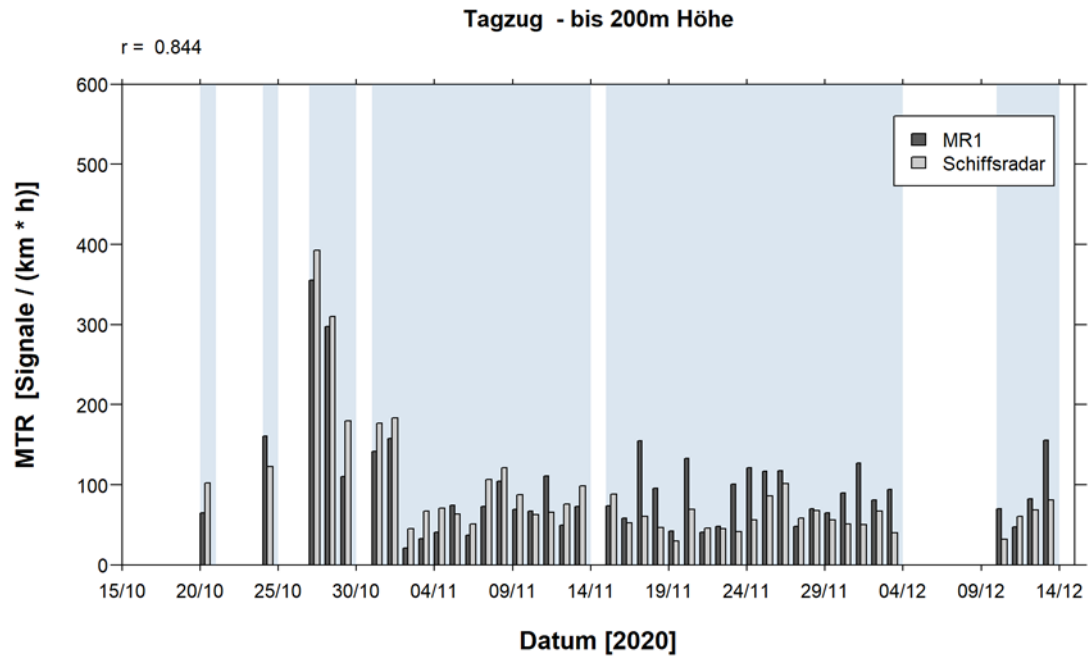


Abb. 19: Zeitlicher Verlauf der täglichen Zugintensitäten nach MR1 und Schiffsradar im Höhenbereich bis 200 m (oben) und bis 1.000 m (unten). Zusätzliche Angabe des Korrelationskoeffizienten (ρ) der Spearman-Rangkorrelation.

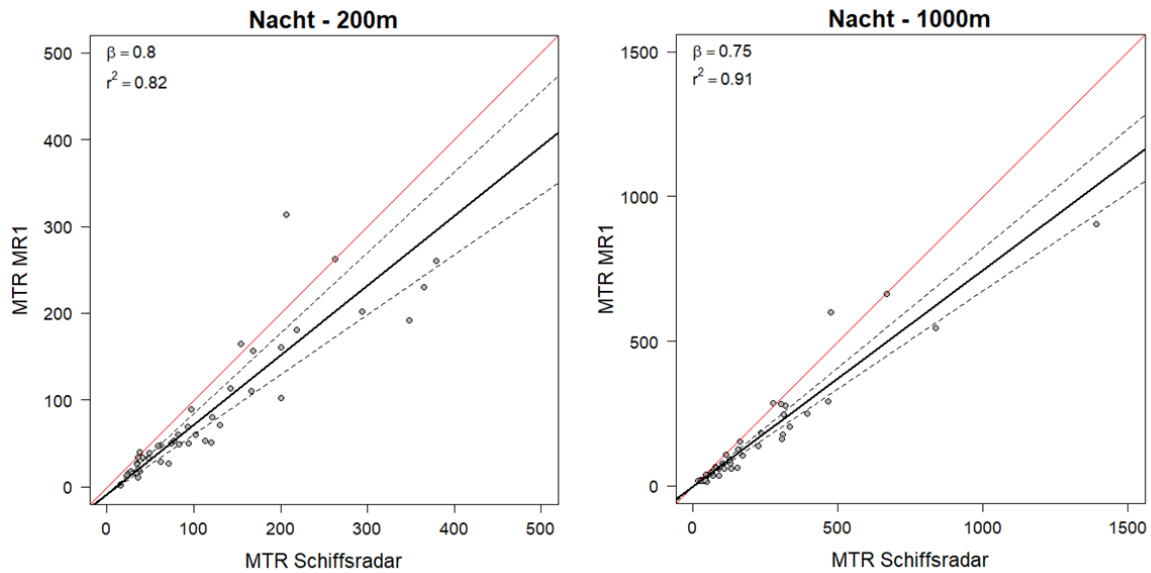


Abb. 20: Vergleich der nächtlichen Mittelwerte der Zugintensität (MTR) von MR1 und Schiffsradar mit Major Axis-Regression. Dargestellt sind die MTR-Werte im Höhenbereich bis 200 m (links) und bis 1.000 m (rechts). Schwarze durchgehende und gestrichelte Linien zeigen die MA-Regression sowie das 95%-Konfidenzintervall der Steigung, die rote Linie zeigt die erwartete Regression bei vollständiger Korrespondenz der beiden Radarsysteme.

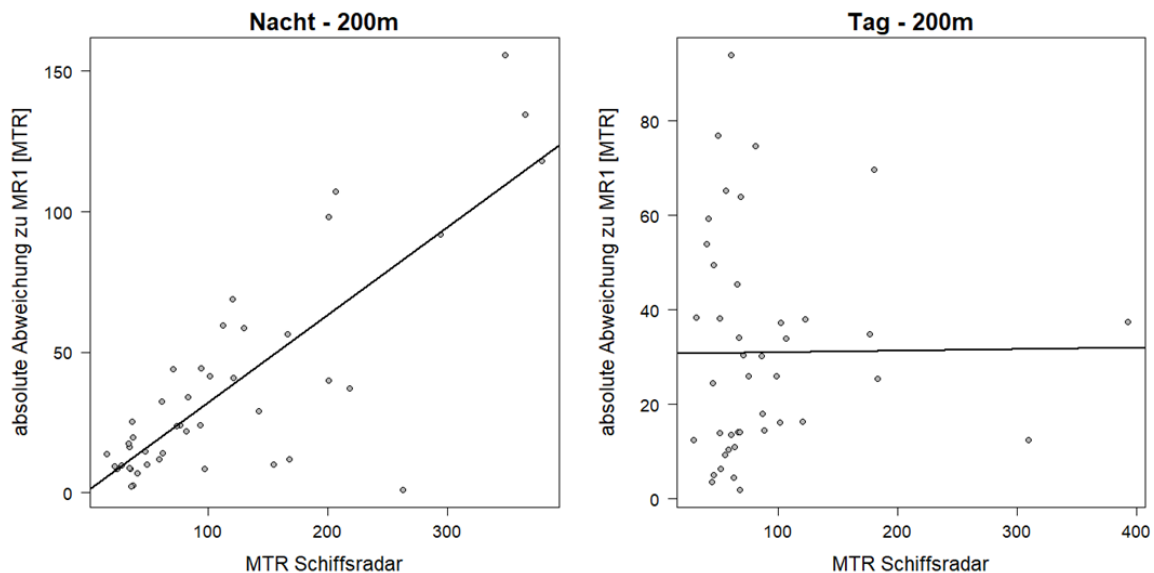


Abb. 21: Absolute Abweichung [MTR] der mittleren Zugintensität pro Nacht (links) bzw. Tag (rechts) zwischen Schiffsradar und MR1 jeweils im Höhenbereich bis 200 m.

Die Radarsysteme zeigten ebenso einen ähnlichen Verlauf der Zugintensitäten innerhalb eines Tages (Abb. 22). Die Korrelation zwischen den Radargeräten war mit einem Korrelationskoeffizienten ρ von 0,77 (Höhenbereich bis 200 m) und insbesondere mit $\rho = 0,91$ (Höhenbereich bis 1.000 m) hoch. Eine auffällige Abweichung zeigte sich in der Stunde zwischen 15:00 und 16:00 Uhr (Abb. 22). Hier lag die Zugintensität des MR1 in beiden Höhenbereichen deutlich höher als in den beiden angrenzenden Stunden und auch deutlich höher als die Zugintensität des Schiffsradars.

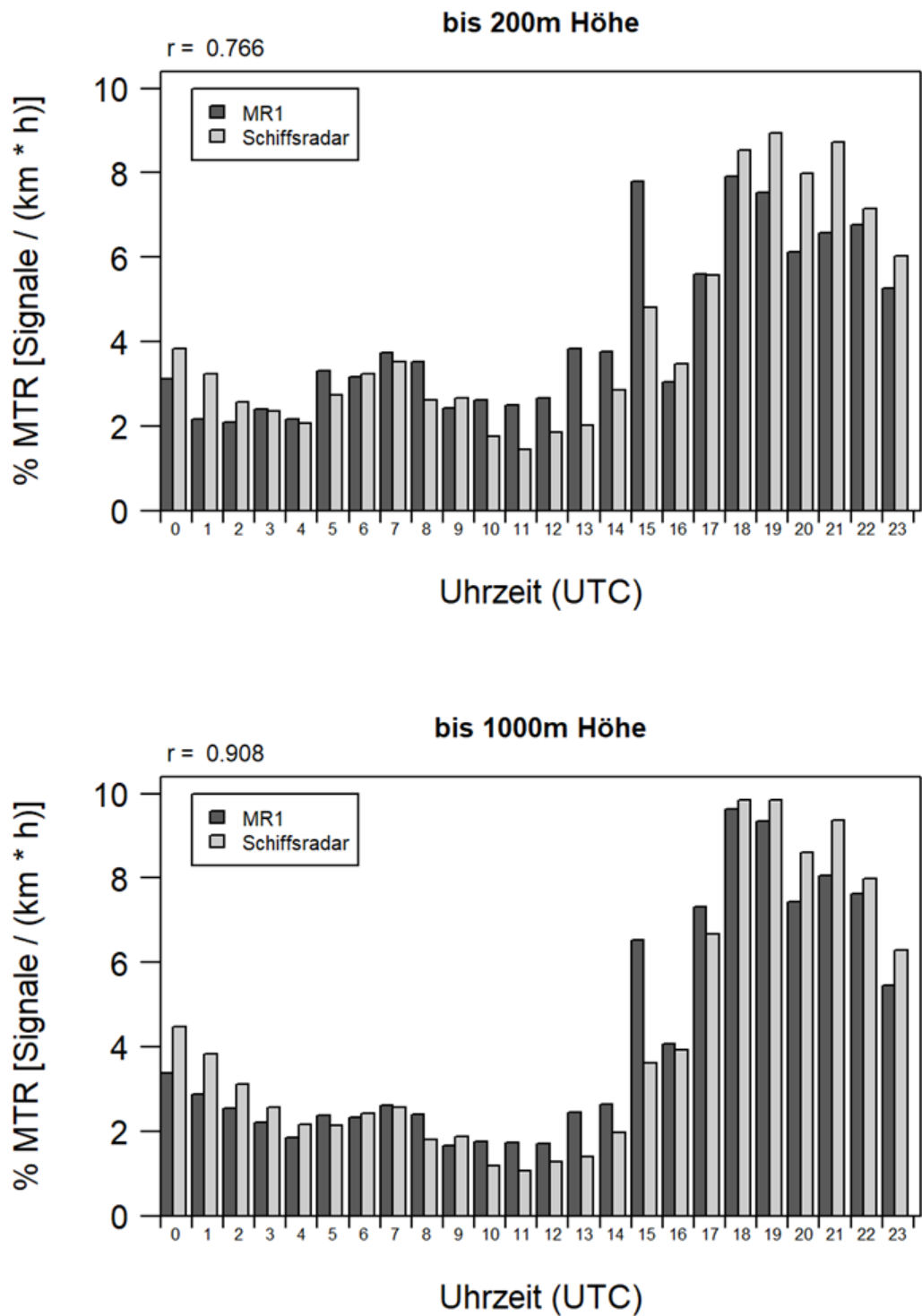


Abb. 22: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Zugintensitäten [%] innerhalb eines Tages nach MR1 und Schiffsradar im Höhenbereich bis 200 m (oben) und bis 1.000 m (unten). Es wurden nur Daten des Monats November verwendet. Zusätzliche Angabe des Korrelationskoeffizienten (ρ) der Spearman-Rangkorrelation.

5 Diskussion

Eine Quantifizierung des Vogelzugs erfolgt häufig mit Hilfe von Radargeräten, da diese in der Lage sind, auch nachts und bis in große Höhen Vögel zu detektieren. Dabei kann eine Reihe verschiedener Radarsysteme eingesetzt werden, die sich in ihrer Reichweite und ihren technischen Eigenschaften deutlich voneinander unterscheiden (z. B. Dokter et al. 2011; Liechti et al. 2018; Nilsson et al. 2018). Da eine unabhängige Validierungsmöglichkeit z. B. mittels direkter visueller Erfassungen in der Regel fehlt, ist die Frage nach der Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Radarsysteme nur mittels direkter Vergleiche der Systeme untereinander möglich.

In der vorliegenden Studie wurde die Vergleichbarkeit des Radarsystems geprüft, das standardmäßig zur Vogelzugerfassung in Verbindung mit Offshore-Windparks in der deutschen AWZ eingesetzt wird und damit eine wesentliche Informationsquelle zum Vogelzuggeschehen in diesem Bereich darstellt (Orejas et al. 2005; Hüppop et al. 2009; Bellebaum et al. 2010; BSH 2019a; b; Welcker & Vilela 2020). Ziel war es festzustellen, ob die mit diesem Radarsystem ermittelten Zugintensitäten mit den Ergebnissen eines Radars vergleichbar sind, welches eine automatisierte Echtzeiterfassung von Zugintensitäten ermöglicht. Hintergrund der Untersuchung ist die Fragestellung, ob mögliche Schwellenwerte der Zugintensität, die auf Basis von Schiffsradardaten definiert werden und ab deren Überschreitung Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung von Zugvögeln diskutiert werden, direkt auf ein solches Radar übertragbar sind.

Vorhergehende Studien, die eine Feststellung der Vergleichbarkeit von Schiffsradargeräten mit vertikal drehender Antenne zum Ziel hatten, kamen zu der Schlussfolgerung, dass in der Regel eine gute Korrespondenz der relativen Zugintensitäten mit einer Reihe anderer Radarsysteme besteht (Bellebaum et al. 2010; FEBI 2013; Nilsson et al. 2018). Über die Vergleichbarkeit der absoluten Zugraten von Schiffsradargeräten liegen jedoch aufgrund der Verwendung verschiedener Maßeinheiten für die Zugintensität (FEBI 2013) oder unterschiedlicher Auswertungsmethodik im Vergleich zu den Erfassungen nach Standarduntersuchungskonzept des BSH (Nilsson et al. 2018) bislang nur wenige Erkenntnisse vor. Einzig Bellebaum et al. (2010) führten bei ihrem Vergleich von Schiffsradargeräten mit einem Zielfolgeradar („Superfledermaus“) die Datenanalyse nach den Vorgaben des StUK durch. Sie kamen dabei zu der Einschätzung, dass die Daten der Schiffsradare und des Zielfolgeradars zwar eine hohe Korrelation aufwiesen, die Schiffsradare im Vergleich jedoch höhere Zugraten ergaben.

Im Einklang mit vorhergehenden Vergleichsstudien wiesen auch die Ergebnisse unserer Untersuchung auf eine hohe Übereinstimmung hinsichtlich der relativen Intensität des Nachtzugs zwischen einem Schiffsradar und einem spezialisierten Vogelradar (MR1) hin. Dies zeigte sich anhand des zeitlichen Verlaufs der mittleren nächtlichen Zugintensität (vgl. Abb. 18) sowie der relativen Verteilung der Zugaktivität im Verlauf eines Tages (vgl. Abb. 22).

Die Studie von Nilsson et al. (2018) schloss ebenfalls einen Vergleich zwischen Schiffsradar und MR1 mit ein. Sie stellten einerseits eine hohe Korrelation der mittleren nächtlichen Zugintensität zwischen diesen beiden Radarsystemen fest (Bestimmtheitsmaß einer vergleichbaren Major Axis-Regression $R^2 = 0,92$; $N = 12$ Nächte), der Vergleich der absoluten Zugintensität zeigte andererseits jedoch etwa 10 bis 20-fach höhere Zugraten des Schiffsradars. Im Gegensatz dazu zeigen unsere Ergebnisse nicht nur eine ähnlich hohe Korrelation der nächtlichen Zugintensitäten dieser Radarsysteme ($R^2 = 0,91$; $N = 44$ Nächte; vgl. Abb. 20), sondern darüber hinaus auch eine vergleichsweise hohe Übereinstimmung der absoluten Zugintensitäten. Die absolute Abweichung der Zugraten von Schiffsradar und MR1 lag nur bei etwa 60 MTR und damit bei etwa 29 %; die systematische Abweichung lag bei etwa 20 %. Dieser deutliche Unterschied zu den > 10-fach höheren Zugintensitäten des Schiffsradars

bei Nilsson et al. (2018) ist wahrscheinlich primär auf die unterschiedliche Auswertungsmethodik zurückzuführen. Nilsson et al. (2018) nutzten für das Schiffsradar eine Algorithmus-gestützte Identifikation von Vogelsignalen (R-Package RadR, (Taylor et al. 2010)). Nach Angaben der Autoren führte dieses Verfahren zur fälschlichen Unterteilung von längeren Vogeltracks in mehrere einzelne Signale, und somit zu einer Überschätzung der Zugintensität. Zusätzlich könnte die Abschätzung der Breite der Radarkeule eine Rolle spielen, die für die Berechnung der MTR-Werte verwendet wurde, da dies aufgrund von Nebenkeulen u. ä. nur sehr schwer möglich ist. Dahingegen scheint die standardisierte Auswertungsmethodik, die für Offshore-Erfassungen im StUK festgeschrieben wurde und auch in der vorliegenden Studie zur Anwendung kam, für die Auswertung von Schiffsradardaten besser geeignet zu sein. Aufgrund der anzuwendenden Distanzkorrektur entfällt eine Schätzung der Ausdehnung Radarkeule oder des Radarvolumens, zudem scheint die visuelle Analyse der Radarbilder durch Ornithologen zu einer realistischeren Identifikation von Vogeltracks zu führen.

In der vorliegenden Studie lag der Fokus auf dem Vergleich der stündlichen MTR-Werte, da sich mögliche Schwellenwerte für Vermeidungsmaßnahmen ebenfalls auf stündliche Werte beziehen. Für den Nachtzug konnte grundsätzlich auch eine hohe Übereinstimmung der stündlichen Zugintensitäten festgestellt werden. Dies galt für alle untersuchten Höhenbereiche. Im Vergleich zu den Ergebnissen der nächtlichen Mittelwerte trat jedoch eine höhere Streuung (geringeres Bestimmtheitsmaß R^2) und eine höhere absolute Abweichung auf. Die Streuung nahm dabei mit zunehmendem Höhenbereich ab. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass neben der stochastischen Variation ein systematischer Unterschied bei den ermittelten Zugintensitäten zwischen den Radarsystemen vorlag. Sowohl die stündlichen Werte aller Höhenbereiche als auch die nächtlichen Mittelwerte des Schiffsradars lagen im Mittel etwa 20 % höher als die des MR1.

Die prinzipiell hohe Übereinstimmung der ermittelten MTR-Werte beider Radarsysteme führte zu hoher Kongruenz bei der Bestimmung von theoretischen Schwellenwertüberschreitungen. Die Übereinstimmung der Radarsysteme, ob ein Schwellenwert über- oder unterschritten wurde, lag bei über 90 % (Schwellenwert von 250 MTR) bzw. über 97 % (Schwellenwert von 500 MTR). Aufgrund der höheren Messwerte des Schiffsradars lag die absolute Anzahl an Stunden mit Schwellenwertüberschreitung bei diesem Radartyp deutlich höher. Eine Korrektur der MTR-Werte des MR1 anhand der Steigung der Regressionsgeraden führte zwar insgesamt nicht zu einer wesentlichen höheren Übereinstimmung der Schwellenwertüber- oder -unterschreitung, sie hatte jedoch eine Angleichung der Anzahl Stunden, für die eine Überschreitung der Schwellenwerte von den Radarsystemen angezeigt wurde, zur Folge. Mit der durchgeführten Korrektur konnte also ein weitgehender Ausgleich des systematischen Unterschieds zwischen den Radaren erreicht werden.

Die Streuung der Daten bleibt von der Korrektur des systematischen Unterschieds jedoch unberührt. So lag die absolute Abweichung zwischen den Radargeräten bei einer stündlichen Intensität des Nachtzugs von 250 MTR (im Höhenbereich bis 200 m) im Mittel bei etwa 100 MTR. Die Konsequenz daraus war, dass nach Korrektur zwar eine Schwellenwertüberschreitung in einer gleichen Anzahl an Stunden festgestellt wurde, dies jedoch zu einem Teil unterschiedliche Stunden betraf (29 von 84 Stunden mit Schwellenwertüberschreitung).

Mehrere Erklärungsansätze kommen für die Variation der stündlichen Zugintensitäten zwischen den Radarsystemen infrage. Zum einen könnten Unterschiede in der Lage und Größe des Erfassungsraums der Radargeräte eine wichtige Rolle spielen. Auch wenn der Abstand zwischen den Aufstellungsorten der Radare nur etwa 250 m betrug, wurde aufgrund der unterschiedlichen Funktionsweise der Geräte nicht der gleiche Luftraum erfasst. Obwohl beim nächtlichen Breitfrontenzug mit einer weitgehenden horizontalen Gleichverteilung des

Zuggeschehens insbesondere über Entfernungen von wenigen hundert Metern zu rechnen ist, ist es nahezu unabdingbar, dass Unterschiede im erfassten Luftraum zumindest zu geringfügiger Variation der innerhalb einer Stunde gemessenen Zugintensität führt. Hinzu kommt, dass zwischen den Radarsystemen Unterschiede in der Größe des Erfassungsraums bestehen. Gerade in den unteren Höhenbereichen ist der durch das MR1 abgedeckte Bereich erheblich kleiner als bei einem Schiffsradar. Bei einer Höhe von 200 m beträgt der horizontale Erfassungsbereich des MR1 etwa 500 m, der des Schiffsradars hingegen knapp 3 km. Eine Folge dieses Unterschieds ist auch das häufigere Auftreten von Nullwerten bei der vom MR1 gemessenen Zugintensität, da die Wahrscheinlichkeit, innerhalb einer Stunde kein einziges Vogelsignal aufzuzeichnen, mit zunehmender Größe des erfassten Luftraums abnimmt.

Ein weiterer Erklärungsansatz bezieht sich auf Unterschiede zwischen den Radarsystemen in der tatsächlichen Erfassungsdauer innerhalb einer Stunde und damit auf Unterschiede in der Stichprobe, auf deren Basis die MTR-Werte berechnet werden. Die Erfassungszeit des MR1 belief sich in der Regel auf einen 40 min-Block pro Stunde, d. h. die stündliche Zugintensität wurde auf Grundlage einer 40-minütigen „Stichprobe“ auf eine Stunde hochgerechnet. In Einzelfällen konnte die Stichprobendauer durch Regen oder andere Störungen verringert werden. Beim Schiffsradar betrug die tatsächliche Erfassungszeit lediglich etwa 11 min pro Stunde (15 Screenshots, die jeweils die Vogelsignale von 45 sec wiedergeben), die gleichmäßig über die Stunde verteilt war und für die Berechnung der Zugintensität herangezogen wurde. Dadurch bestand nicht nur ein deutlicher Unterschied in der Erfassungszeit, es lag zudem nur teilweise eine Überlappung der Erfassungszeit innerhalb einer Stunde vor. Es ist anzunehmen, dass dieser Sachverhalt wesentlich zur stochastischen Variation der gemessenen Zugintensitäten zwischen den Radarsystemen beigetragen hat.

Auch für die Ursache des systematischen Unterschieds zwischen den Radargeräten sind mehrere Erklärungen denkbar. So ist zuvorderst zu bedenken, dass das MR1 in der Lage ist, Insekten anhand der Flügelschlagfrequenz und anderer Signalcharakteristika von Vögeln zu unterscheiden. Beim Schiffsradar ist diese Unterscheidung deutlich schwieriger, da hier ausschließlich eine visuelle Einschätzung der Signale erfolgt. Die höheren MTR-Werte des Schiffsradars könnten also zumindest teilweise von einer Fehlinterpretation von Insektensignalen herrühren.

In diesem Fall würde man eine deutliche Korrelation zwischen dem Insektenaufkommen (gemessen mit Hilfe des MR1) und der Differenz der Zugintensität zwischen MR1 und Schiffsradar erwarten. Eine entsprechende Auswertung zeigte jedoch nur einen schwachen Zusammenhang (Abb. 23). Nur etwa 7 % der Variation der Zugintensität zwischen den Radarsystemen konnte nach dieser Analyse durch das Auftreten von Insekten erklärt werden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass sowohl ein positiver Zusammenhang zwischen der nächtlichen Zugintensität und der Flugaktivität von Insekten bestand (Abb. 24) als auch die absolute Abweichung zwischen den Radarsystemen mit der Zugintensität zunahm (Abb. 16). Insofern ist es nicht auszuschließen, dass die (geringfügige) Zunahme der Abweichung zwischen den Radargeräten mit zunehmendem Insektenflug lediglich eine Folge dieser Multikollinearität und keinen ursächlichen Zusammenhang darstellt. Es kann in jedem Fall geschlussfolgert werden, dass fälschlicherweise als Vögel kategorisierte Radarsignale von Insekten die um 20 % höheren MTR-Werte des Schiffsradars allenfalls teilweise erklären können.

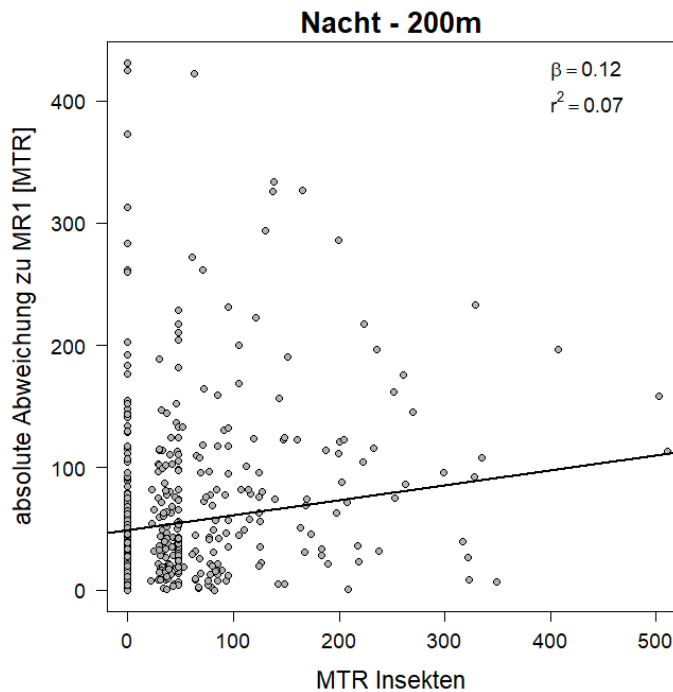


Abb. 23: Zusammenhang zwischen der Flugaktivität von Insekten [MTR] und der absoluten Abweichung der Zugintensität des Nachtzugs (Höhenbereich bis 200 m) zwischen dem Schiffsradar und dem MR1.

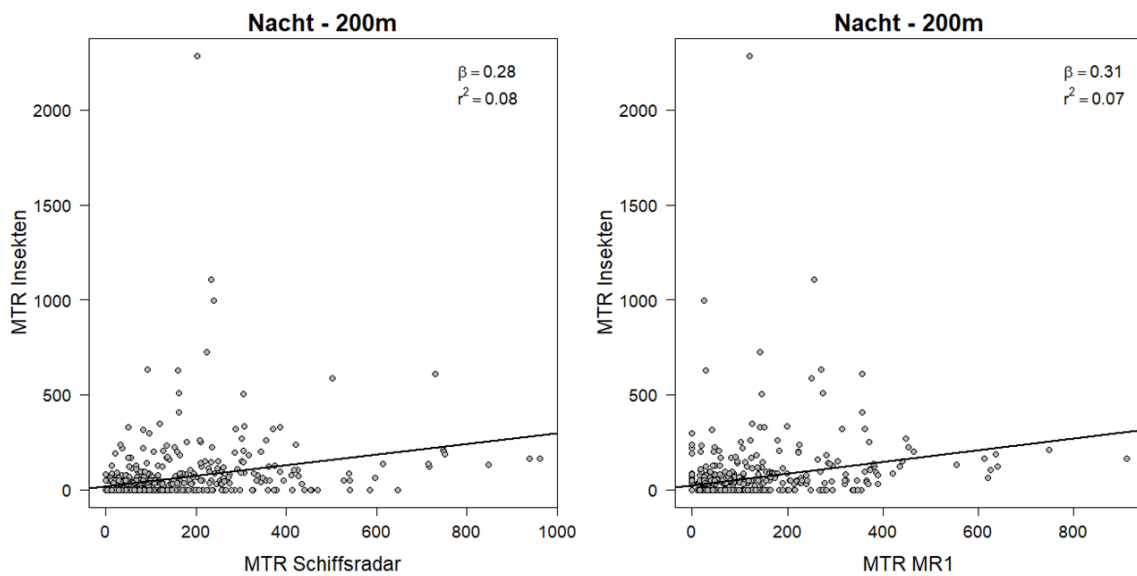


Abb. 24: Zusammenhang zwischen der stündlichen Zugintensität des Nachtzugs (bis 200 m Höhe) und der Flugaktivität von Insekten (MTR) für das Schiffsradar (rechts) und das MR1 (links).

Ein weiterer Erklärungsansatz könnte in der notwendigen Korrektur der Rohsignale des Schiffsradars liegen. Die sogenannte Distanzkorrektur soll die entfernungsabhängige Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln durch das Schiffsradar ausgleichen (Hüppop et al. 2006; Welcker et al. 2017; Welcker 2019). Wie oben beschrieben, werden dabei die Radarsignale eines unteren Höhenbands (50 m – 150 m) verwendet, da hier mit einer horizontalen Gleichverteilung des Vogelzugs zu rechnen ist. Die Korrekturfunktion wird dann für sämtliche

Radarsignale verwendet, also auch jene, die außerhalb dieses Höhenbereichs liegen. Dieses Verfahren setzt voraus, dass ausschließlich die Entfernung einen Effekt auf die Detektionswahrscheinlichkeit hat. Dies ist jedoch nicht der Fall (Bruderer 1997a; Schmaljohann et al. 2008). So ist beispielsweise der Radarquerschnitt (Radar Cross Section, RCS), d. h. die Fläche des Objekts, das die Radarstrahlen effektiv reflektiert, eine wesentliche Größe, die die Erfassungswahrscheinlichkeit beeinflusst. Der Radarquerschnitt ist seinerseits jedoch vom Anstrahlwinkel (Aspekt), d. h. von der Richtung, aus welcher die Radarstrahlen auf den Vogelkörper treffen und damit wiederum von der Flughöhe sowie der Flugrichtung relativ zum Radarstrahl, abhängig.

Da sich der mittlere Anstrahlwinkel und damit der effektive Radarquerschnitt mit der Flughöhe ändert, kann die Anwendung der Distanzkorrektur zu gewissen Fehlkorrekturen führen. Mit zunehmender Höhe werden die Vögel vermehrt von unten angestrahlt, wodurch der Radarquerschnitt tendenziell zunimmt. Die Detektionswahrscheinlichkeit könnte somit mit zunehmender Entfernung zum Radargerät in senkrechter Richtung (= zunehmende Höhe) in geringerem Maße abnehmen als von der Distanzkorrektur für die horizontale Entfernung in unteren Höhenbereichen bestimmt wurde. Die Anwendung der Distanzkorrektur könnte somit zu einer Überschätzung der Zugintensität insbesondere in oberen Höhenbereichen führen. Als Folge einer solchen Überkorrektur wäre allerdings zu erwarten, dass die systematische Abweichung zwischen den Radarsystemen im Höhenbereich bis 1.000 m größer ausfällt als im Höhenbereich bis 200 m. Da dies nur in sehr geringem Maße der Fall war, ist diese potenzielle Fehlerquelle eher unwahrscheinlich, um die systematische Abweichung zu erklären.

Eine weitere potenzielle Quelle für systematische Abweichungen zwischen den Radargeräten stellt die Tatsache dar, dass bei der Signalverarbeitung des MR1 Radarechos verworfen werden, die durch den eingesetzten Algorithmus nicht mit hinreichender Wahrscheinlichkeit als Insekt oder Vogel bzw. einer der definierten Vogeluntergruppen zugeordnet werden kann. Dies betrifft in der Regel jedoch nur eine sehr geringe Anzahl Signale, sodass der Effekt auf die berechnete Zugintensität als gering eingeschätzt wird.

Welcher dieser Faktoren hauptsächlich zu den höheren nächtlichen Zugintensitäten des Schiffsradars geführt hat, oder ob es weitere, hier bisher nicht beachtete Variationsquellen gibt, kann mit den vorliegenden Daten nicht abschließend beurteilt werden. Hierzu wären weitere Untersuchungen insbesondere zu Unterschieden der Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln im Erfassungsraum des Schiffsradars notwendig.

Generell muss beachtet werden, dass die Interpretation der Radarsignale des Schiffsradars durch visuelle Inspektion erfolgt und somit im Gegensatz zum MR1 hier subjektive Wahrnehmung („Beobachtereffekt“) eine Rolle spielen kann. Da einzelnen Radarechos durch Distanzkorrektur und zeitliche Interpolation auf eine Stunde großes Gewicht bei der Berechnung der MTR-Werte zukommen kann, können auch geringe subjektive Unterschiede bei der Identifikation der Signale Auswirkungen auf die ermittelten Zugraten haben. Detaillierte Erkenntnisse hierzu stehen bislang aus; die Auswertung großer Datensätze von verschiedenen Bearbeitern ergaben keine Hinweise auf einen starken „Beobachtereffekt“ (Welcker 2019). Nichtsdestotrotz erscheint es denkbar, dass dieser Faktor wesentlich zur Variation von Schiffsradardaten beitragen kann mit entsprechenden Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit mit anderen Radarsystemen. Entsprechende Studien zur Quantifizierung individueller Unterschiede wären wünschenswert.

Die Übereinstimmung zwischen Schiffsradar und MR1 wich für die Zugintensitäten des Tagzugs deutlich vom Nachtzug ab. Tagsüber lag sowohl eine höhere Streuung der Daten als auch eine stärkere systematische Abweichung vor. Diese ausgeprägte Diskrepanz zwischen

Tag- und Nachtzug ist wahrscheinlich auf Unterschiede in der Artzusammensetzung bzw. unterschiedliches Zugverhalten zurückzuführen.

Im Gegensatz zu nachts ziehenden Arten, die vornehmlich einzeln oder in lockeren Verbänden fliegen, findet der Tagzug überwiegend in Trupps statt, die oftmals einen geringen Abstand zwischen den einzelnen Individuen aufweisen. Die Fähigkeit der Radarsysteme, einzelne Individuen von in Trupps fliegenden Vögeln zu separieren, ist wesentlich von deren räumlicher Auflösung abhängig. Die räumliche Auflösung des Schiffsradars ist nicht bekannt; die Prozessierung der Radarsignale ist für den Anwender im Einzelnen nicht nachvollziehbar („black box“). Zusätzlich spielt hier die räumliche Unterscheidbarkeit einzelner Signale auf dem Bildschirm eine Rolle. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die räumliche Auflösung des MR1 (Auflösung nach Herstellerangaben 10 m) die des Schiffsradars übersteigt und somit beim Tagzug mit diesem Radarsystem eine höhere Anzahl einzelner Individuen erfasst werden kann.

Die Auswertung der mittleren Zugintensität pro Tag zeigte eine deutlich erhöhte Zugintensität des MR1 in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums (ab ca. Mitte November). Dies weist darauf hin, dass dieser Effekt zu einem Großteil an das Auftreten bestimmter Arten oder Artgruppen gebunden sein könnte. Hierfür kämen insbesondere tagziehende bzw. ihre Nahrungsgebiete aufsuchende Gänse sowie Goldregenpfeifer in Betracht, die sich vermehrt in diesem Zeitraum im Untersuchungsgebiet aufgehalten haben (eigene Beob.).

Diese Interpretation wird zudem von einer Auffälligkeit gestützt, die bei der Analyse des tageszeitlichen Musters der Zugintensität auftrat. Hier zeigte sich eine markante Abweichung der Zugintensität der Radarsysteme zwischen 15:00 und 16:00 Uhr UTC (entsprechend 16:00 – 17:00 Uhr lokale Zeit, vgl. Abb. 22). Dieses Phänomen könnte durch das regelmäßige Auftreten von Vogeltrupps vor Sonnenuntergang, beispielsweise durch Goldregenpfeifer, die sich zu dieser Tageszeit möglicherweise regelmäßig zwischen Nahrungsgebieten und nächtlichen Rastplätzen bewegten, verursacht worden sein.

Das häufige Auftreten von Trupps während des Tagzugs könnte auch eine wesentliche Rolle hinsichtlich der größeren Streuung der ermittelten Zugintensität zwischen den Radarsystemen spielen. Das lokale Zuggeschehen innerhalb einer Stunde wird dadurch stark durch das konkrete zeitliche und räumliche Auftreten einzelner großer Vogeltrupps bestimmt. In Verbindung mit den oben beschriebenen Unterschieden in Größe und Lage des erfassten Luftraums sowie der zeitlichen Stichprobe führt das vermutlich zu einer größeren Variation der berechneten Zugintensitäten des Tagzugs.

Der vorliegende Vergleich der Radarsysteme wurde anhand eines einzigen Schiffsradartyps (Sperry Marine VisionMaster) durchgeführt. Im Rahmen des Vogelzugmonitorings für Offshore-Windparks in der deutschen AWZ kamen in den vergangenen Jahren neben diesem Fabrikat noch Radare einer Reihe weiterer Hersteller zum Einsatz. Inwieweit die Radargeräte verschiedener Hersteller zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, ist weitgehend unbekannt. Ergebnisse von Bellebaum et al. (2010) legen die Vermutung nahe, dass Radargeräte der gleichen Leistungsklasse (25 kW) bei weitgehender Standardisierung der Einstellungen (BSH 2013) nur vergleichsweise geringe Unterschiede aufweisen. Eine dezidierte Vergleichsstudie steht jedoch noch aus.

Die Radarechos der Schiffsradargeräte werden nach der StUK-Methodik von Radarornithologen ausgewertet. Hierbei, sowie bei der nachgeschalteten Auswertung, kann es zu Unterschieden zwischen den beteiligten Personen kommen. Im Rahmen der ProBIRD-Studie wurden Schiffsradardaten ausgewertet, die von verschiedenen Personen bzw. Büros im Laufe mehrerer Jahre erhoben wurden (Welcker 2019; Welcker & Vilela 2019). Hierbei wurde nur

eine geringe Bedeutung dieses Faktors festgestellt. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie können daher als repräsentativ für Schiffsradarerfassungen angesehen werden, sofern diese nach der im StUK beschriebenen Methodik durchgeführt und ausgewertet wurden. Von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse ist unter diesen Bedingungen auszugehen.

5.1 Fazit

Der Vergleich des spezialisierten Vogelerfassungsradars MR1 mit einem herkömmlichen Schiffsradar (Sperry Marine VisionMaster) zeigte eine hohe Übereinstimmung hinsichtlich der ermittelten nächtlichen Zugintensitäten. Die Werte des Schiffsradars lagen dabei über die gesamte Spanne der festgestellten Zugraten im Mittel etwa 20 % höher. Als Erklärungsansatz für diesen systematischen Unterschied kommen mehrere Faktoren in Betracht, auf Grundlage der vorliegenden Daten war eine abschließende Beurteilung jedoch nicht möglich. Die Ergebnisse zeigen somit jedoch, dass eine Korrektur notwendig ist, um eine direkte Vergleichbarkeit der stündlichen Zugintensitäten des Nachtzugs dieser beiden Radarsysteme herzustellen.

Die Vergleichbarkeit sollte insbesondere in Bezug zu der Frage geklärt werden, inwiefern die von beiden Radarsystemen ermittelten Zugraten übereinstimmend theoretische Schwellenwerte für den Nachtzug überschreiten. Dies wäre für die Implementierung von Vermeidungsmaßnahmen im Offshore-Bereich bei hohen Zugintensitäten von Bedeutung, da hierfür automatisierte Radarsysteme zur Echtzeiterfassung des Vogelzugs eingesetzt werden müssten.

Es zeigte sich, dass für zwei betrachtete Schwellenwerte (für den Höhenbereich 25 – 200 m) mit einer entsprechenden Korrektur eine vollständige Angleichung der Anzahl der Schwellenwertüberschreitungen (Schwellenwert 250 MTR) bzw. eine weitgehende Angleichung (Schwellenwert von 500 MTR) erreicht werden konnte. Durch die stochastische Variation der berechneten Zugintensitäten wurden die Schwellenwertüberschreitungen jedoch teilweise in unterschiedlichen Stunden ermittelt.

Die einfache Korrektur anhand der Regressionsgeraden einer Major Axis-Regression

$$(1) \text{ MTR}_{\text{MR1 korrigiert}} = \text{MTR}_{\text{Schiffsradar}} / 0,82$$

führte dabei zu einer geringfügig schlechteren Anpassung als eine entsprechende Korrektur auf Basis der log-transformierten Daten

$$(2) \text{ MTR}_{\text{MR1 korrigiert}} = \exp(\log_n(\text{MTR}_{\text{Schiffsradar}} / 0,96))$$

Diese Korrektur wird daher zum Herstellen einer direkten Vergleichbarkeit von nächtlichen Zugintensitäten (im Höhenbereich bis 200 m) dieser Radarsysteme empfohlen.

Das Fazit der vorliegenden Studie kann somit wie folgt zusammengefasst werden:

Mit > 1.100 Stunden (entsprechend 44 Nächten) einer zeitgleichen Erfassung verfügt die vorliegende Untersuchung über einen ausreichend guten Datensatz, um einen belastbaren Vergleich zwischen dem Vogelerfassungsradar MR1 mit einem 25 kW Schiffsradar vorzunehmen. Für den nächtlichen Vogelzug konnte eine hohe Übereinstimmung der beiden Systeme festgestellt werden und bei Anwendung der o.e. Korrekturfaktoren kann eine nahezu vollständige Angleichung der Anzahl der Schwellenwertüberschreitungen beider Systeme erreicht werden. Für den Tagzug zeigte sich sowohl eine höhere Streuung der Daten als auch eine stärkere systematische Abweichung zwischen den Systemen, so dass hier keine entsprechende Vergleichbarkeit erreicht werden konnte und somit weitere Untersuchungen notwendig wären.

6 Literaturverzeichnis

- Alerstam, T. (1990): Bird Migration. Cambridge University Press/Cambridge, New York, Melbourne, 420 Seiten.
- Assali, C., Bez, N. & Tremblay, Y. (2017): Seabird distribution patterns observed with fishing vessel's radar reveal previously undescribed sub-meso-scale clusters. *Scientific Reports* 7/1, S: 7364.
- Bellebaum, J., Grieger, C., Klein, R., Köppen, U., Kube, J., Neumann, R., Schulz, A., Sordyl, H. & Wendeln, H. (2010): Ermittlung artbezogener Erheblichkeitsschwellen von Zugvögeln für das Seegebiet der südwestlichen Ostsee bezüglich der Gefährdung des Vogelzuges im Zusammenhang mit dem Kollisionsrisiko an Windenergieanlagen. Abschlussbericht, Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 0329948). IfAÖ, LUNG MV/Neu Broderstorf (DEU), S: 333.
- Berthold, P. (2000): Vogelzug. Eine aktuelle Gesamtübersicht. (4., stark überarb. und erw. Aufl. Auflage). Wissenschaftliche Buchgesellschaft/Darmstadt (DEU), 280 Seiten.
- Bruderer, B. (1997a): The study of bird migration by radar. Part 1: The technical basis. *Naturwissenschaften* 84/1, S: 1–8.
- Bruderer, B. (1997b): The study of bird migration by radar. Part 2: Major achievements. *Naturwissenschaften* 84/2, S: 45–54.
- Bruderer, B., Peter, D. & Korner-Nievergelt, F. (2018): Vertical distribution of bird migration between the Baltic Sea and the Sahara. *Journal of Ornithology* 159/2, S: 315–336.
- BSH (2013): Standard - Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)/Hamburg & Rostock, S: 86.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.) - **BSH** (2019a): Umweltbericht zum Flächenentwicklungsplan 2019 für die deutsche Nordsee, (Hrsg. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie). Hamburg (DEU), S: 330.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hrsg.) - **BSH** (2019b): Umweltbericht zum Flächenentwicklungsplan 2019 für die deutsche Ostsee, (Hrsg. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie). Hamburg und Rostock (DEU), S: 318.
- Buckland, S. T., Anderson, D. R., Burnham, K. P., Laake, J. L., Borchers, D. L. & Thomas, L. (2001): Introduction to distance sampling estimating abundance of biological populations. (1. Auflage). Oxford University Press/Oxford (UK), 452 Seiten.
- Dirksen, S. (2017): Review of methods and techniques for field validation of collision rates and avoidance amongst birds and bats at offshore wind turbines, Final Report. Nr. SjDE 17-01, Sjoerd Dirksen Ecology/Utrecht (NLD), S: 47.
- Dokter, A. M., Liechti, F., Stark, H., Delobbe, L., Tabary, P. & Holleman, I. (2011): Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. *Journal of the Royal Society Interface* 8/54, S: 30–43.
- Eastwood, E. (1967): Radar ornithology. Methuen & Co Ltd./London (GBR), 278 Seiten.
- FEBl (2013): Fehmarnbelt Fixed Link EIA. Bird Investigations in Fehmarnbelt – Baseline. Volume II. Waterbirds in Fehmarnbelt. Nr. E3TR0011.
- Hüppop, O., Dierschke, J., Exo, K. M., Fredrich, E. & Hill, R. (2006): Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis* 148, S: 90–109.
- Hüppop, O., Hill, R., Hüppop, K. & Jachmann, F. (2009): Auswirkungen auf den Vogelzug - Begleitforschung im Offshore-Bereich auf Forschungsplattformen in der Nordsee (FINOBIRD), Abschlussbericht. Institut für Vogelforschung „Vogelwarte Helgoland“/Helgoland (DEU), S: 278.

- KNE (2020): Synopse - Detektionssysteme zur ereignisbezogenen Abschaltung von Windenergieanlagen zum Schutz von tagaktiven Brutvögeln.
- Legendre, P. (2018): Package 'lmodel2', Model II Regression, Version 1.7-3.
- Liechti, F., Aschwanden, J., Blew, J., Boos, M., Brabant, R., Dokter, A. M., Kosarev, V., Lukach, M., Maruri, M., Reyniers, M., & others (2018): Cross-calibration of different radar systems for monitoring nocturnal bird migration across Europe and the Near East. *Ecography* 42, S: 1–12.
- Nilsson, C., Dokter, A. M., Schmid, B., Scacco, M., Verlinden, L., Bäckman, J., Haase, G., Dell’Omo, G., Chapman, J. W., Leijnse, H. & Liechti, F. (2018): Field validation of radar systems for monitoring bird migration. *Journal of Applied Ecology*.
- Orejas, C., Schroeder, A., Joschko, T., Dierschke, J., Exo, K. M., Friedrich, E., Hill, R., Hüppop, O., Pollehne, F., Zettler, M. L. & Bochert, R. (2005): Ökologische Begleitforschung zur Windenergienutzung im Offshore-Bereich auf Forschungsplattformen in der Nord- und Ostsee (BeoFINO), BMU 0327526-Abschlußbericht. Alfred Wegener Institut für Polar und Meeresforschung/Bremerhaven (DEU), S: 354.
- R Core Team (2019): R: A Language and Environment for Statistical Computing, R version 3.6.1. R Foundation for Statistical Computing/Vienna (AUT).
- Schmaljohann, H., Liechti, F., Bächler, E., Steuri, T. & Bruderer, B. (2008): Quantification of bird migration by radar – a detection probability problem. *Ibis* 150/2, S: 342–355.
- Shamoun-Baranes, J., Alves, J. A., Bauer, S., Dokter, A. M., Hüppop, O., Koistinen, J., Leijnse, H., Liechti, F., van Gasteren, H. & Chapman, J. W. (2014): Continental-scale radar monitoring of the aerial movements of animals. *Movement Ecology* 2/1, S: 9.
- Taylor, P. D., Brzustowski, J. M., Matkovich, C., Peckford, M. L. & Wilson, D. (2010): radR: an open-source platform for acquiring and analysing data on biological targets observed by surveillance radar. *BMC Ecology* 10/1, S: 22. DOI: 10.1186/1472-6785-10-22, ISSN: 1472-6785.
- Van Belle, J., Shamoun-Baranes, J., Van Loon, E. & Bouten, W. (2007): An operational model predicting autumn bird migration intensities for flight safety. *Journal of Applied Ecology* 44/4, S: 864–874.
- Weisshaupt, N., Arizaga, J. & Maruri, M. (2018): The role of radar wind profilers in ornithology. *Ibis* 160/3, S: 516–527.
- Welcker, J. (2019): Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas. ProBIRD report 2. BioConsult SH/Husum (DEU), S: 70.
- Welcker, J., Liesenjohann, M., Blew, J., Nehls, G. & Grünkorn, T. (2017): Nocturnal migrants do not incur higher collision risk at wind turbines than diurnally active species. *Ibis* 159/2, S: 366–373.
- Welcker, J. & Vilela, R. (2019): Weather-dependence of nocturnal bird migration and cumulative collision risk at offshore wind farms in the German North and Baltic Seas., Final Report. BioConsult SH/Husum (DEU), S: 82.
- Welcker, J. & Vilela, R. (2020): ProBIRD - Prognose des regionalen und lokalen Vogelzugs und des kumulativen Vogelschlagrisikos an Offshore-Windenergieanlagen, Endbericht. Husum (DEU), S: 70.
- Zehnder, S., Åkesson, S., Liechti, F. & Bruderer, B. (2001): Nocturnal autumn bird migration at Falsterbo, South Sweden. *Journal of Avian Biology* 32/3, S: 239–248.