

Behördengutachten Windkraftanlagen im Einwirkungsbereich des Wetterradars Boostedt

Bericht an das

MELUND / LLUR

durch die

hydro & meteo GmbH, Lübeck

November 2021

Verfasst von Dr. Thomas Einfalt
 M.Sc. Inga Frerk
 Dipl.-Ing. (FH) Markus Jessen

hydro& meteo GmbH
Breite Straße 6-8
D-23552 Lübeck
Tel.: (+49) 451 / 7027333
Fax.: (+49) 451 / 7027339
E-Mail: info@hydrometeo.de
Internet: www.hydrometeo.de

© hydro& meteo GmbH

All rights reserved

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	4
1 Sicherheitsrelevante gesetzliche Aufgaben des DWD	5
2 Regelungen zur Sicherstellung der Erfüllung dieser Aufgaben	8
2.1 DWD	8
2.2 Anforderungen anderer Institutionen an WKA	8
2.2.1 WMO	9
2.2.2 OPERA	9
2.2.3 Schwedischer Wetterdienst SMHI	9
2.2.4 Französischer Wetterdienst Météo France	10
2.2.5 Dänischer Wetterdienst DMI	10
2.2.6 Niederländischer Wetterdienst KNMI	10
3 Beeinträchtigungen der Radarmessung durch WKA	11
3.1 Grundlagen zur Radarmessung	11
3.2 Einfluss von WKA auf die Radarmessung	12
3.2.1 Windkraftanlagen als Bodenecho (Clutter)	13
3.2.2 Blockierung des Radarstrahls	13
3.2.3 Umlenkung des Radarstrahls	14
3.3 Auswirkungen auf die Produkte des DWD	14
3.4 Datenauswertung für den Standort Boostedt	17
3.4.1 Datengrundlage	17
3.4.2 Untersuchung der Strahlgeometrie	18
3.4.3 Untersuchung der Sichtbarkeit bestehender WKA	20
3.5 Bewertung der Ergebnisse	36
4 Vorgeschlagenes Bewertungsschema	42
5 Zusammenfassung	44
6 Literaturverzeichnis	45
Anhang 1: Schwellwerte verschiedener DWD-Verfahren zur Radardatenverarbeitung	47
Anhang 2: Abschaltautomatik	49

Abkürzungsverzeichnis

ADWICE: Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments (Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume)

AutoWarn: Automatische Unterstützung des Warndienstes

CellMOS: Cell Model Output Statistic (Gewittererkennungs- und prognoseverfahren)

dBZ: Dezibel des gemessenen Reflektivitätsfaktors Z

DMI: Danmarks Meteorologiske Institut (dänischer Wetterdienst)

DWD: Deutscher Wetterdienst

EU: Europäische Union

FeWIS: Feuerwehr-Wetterinformationssystem

KNMI: Royal Netherlands Meteorological Institute (niederländischer Wetterdienst)

KONRAD: Konvektive Entwicklung in Radarprodukten (Erkennung, Verfolgung und Vorhersage von Gewitterzellen)

LLUR: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume

MELUND: Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung

NowCastMIX: Nowcasting-System zur Erstellung von Gewitter-Warnvorschlägen

OPERA: Operational Programme for the Exchange of Weather Radar Information (Radarverbund der europäischen Wetterdienste)

POLARA: Polarimetric Radar Algorithms (Software-Umgebung zur Verarbeitung von Radardaten)

RadVOR: Radarbasierte Niederschlagsvorhersage im Kurzfristzeitraum

SMHI: Swedish Meteorological and Hydrological Institute (schwedischer Wetterdienst)

SWISinfo: Wetterinformationssystem für das Straßenwesen

UTC: Coordinated Universal Time (Koordinierte Weltzeit)

VDI: Verein Deutscher Ingenieure

WarnELEC: Gewitterwarntool für Flughäfen, Bodendienste und Flugsicherung

WaWis: WasserwirtschaftsWetterinformationssystem

webKONRAD: webbasierte Konvektionsentwicklung in Radarprodukten

WKA: Windkraftanlage(n)

WMO: World Meteorological Organization (Weltorganisation für Meteorologie der Vereinten Nationen)

WP: Windpark(s)

Z: Einheit Reflektivität bei der Radarmessung

Vorbemerkung

Die Planung von Windkraftanlagen (WKA) führt immer wieder zu Konflikten mit anderen Trägern öffentlicher Belange. Bei der Auswertung von Stellungnahmen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Beeinträchtigung der Radarmessungen durch Windkraftanlagen (WKA) im Nahbereich (< 15 km) des Radarstandortes stellt sich die grundsätzliche Frage, ob eine wesentliche Beeinträchtigung der sicherheitsrelevanten radarbezogenen Aufgaben des DWD vorliegt und anhand welcher Kriterien dies nachvollziehbar und einheitlich systematisch ermittelt werden kann.

Diese Fragestellung soll im Folgenden beantwortet werden.

Abschnitt 1 wird sich dabei mit den gesetzlichen Aufgaben des DWD und ihrer Sicherheitsrelevanz beschäftigen. In Abschnitt 2 wird dargestellt, welche Auflagen es für WKA in Deutschland und angrenzenden Ländern gibt. Diese werden miteinander verglichen, auch bezüglich ihrer Verbindlichkeit. In Abschnitt 3 wird detailliert auf verschiedene Aspekte des Konfliktes zwischen der Radarmessung und WKA eingegangen. Zunächst wird dargestellt, wie grundsätzlich die Radarmessung des Niederschlages funktioniert. Im Anschluss werden die Auswirkungen dargestellt, die WKA im Sichtbereich des Radars haben können. Das dritte Unterkapitel widmet sich den Folgen für die Radarprodukte des DWD, die sich aus den dargestellten Auswirkungen auf die Messung herleiten lassen. Danach werden Messwerte des Radars Boostedt über ein Jahr ausgewertet, um die Sichtbarkeit der bestehenden WKA in den Messungen zu quantifizieren. Entsprechend der Beauftragung wurde dabei ein besonderes Augenmerk auf die Untersuchung von Messdaten der Reflektivität gelegt, die detailliert ausgewertet wurden. Andere Messparameter wurden anhand von Literaturstudien bewertet. Abschnitt 4 stellt dann eine hieraus abgeleitete Methodik vor, mit der ermittelt werden kann, ob WKA ohne rechtserhebliche Störung der Funktionsfähigkeit der Radaranlage des DWD in Boostedt errichtet werden können.

1 Sicherheitsrelevante gesetzliche Aufgaben des DWD

Die gesetzlichen Aufgaben des DWD sind im DWD-Gesetz unter §4 Absatz 1 Nummer 1-9 beschrieben¹. Zur Erfüllung einiger dieser Aufgaben erhebt der DWD Radardaten mit polarimetrischen Doppler-Wetterradars:

- Nr. 1: die Erbringung meteorologischer und klimatologischer **Dienstleistungen** für die Allgemeinheit oder einzelne Kunden und Nutzer, insbesondere auf den Gebieten des **Verkehrs**, der **gewerblichen Wirtschaft**, der **Land- und Forstwirtschaft**, des **Bauwesens**, des **Gesundheitswesens**, der **Wasserwirtschaft** einschließlich des vorbeugenden Hochwasserschutzes, des **Umwelt- und Naturschutzes** und der **Wissenschaft**
- Nr. 2: die meteorologische **Sicherung der Luft- und Seefahrt**, der **Verkehrswege** sowie **wichtiger Infrastrukturen**, insbesondere der Energieversorgung und der Kommunikationssysteme
- Nr. 3: die Herausgabe amtlicher **Warnungen über Wettererscheinungen**, a) die zu einer **Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung** führen können b) die in Bezug zu drohenden Wetter- und Witterungsereignissen mit **hohem Schadenspotenzial** stehen
- Nr. 4: die **kurzfristige** und langfristige **Erfassung, Überwachung und Bewertung** der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der **Atmosphäre**
- Nr. 5: die **Erfassung** der meteorologischen und klimatologischen **Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und anderen Bereichen der Umwelt**
- Nr. 8: der **Betrieb der erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme** zur Erfüllung der in den Nummern 1 bis 7 genannten Aufgaben als Teil der Geodateninfrastruktur und
- Nr. 9: die **Bereithaltung**, Archivierung, Dokumentierung und Abgabe **meteorologischer und klimatologischer Geodaten und Dienstleistungen**.

¹ **DWDG (1998)** Gesetz über den Deutschen Wetterdienst. <https://www.gesetze-im-internet.de/dwdg/BJNR287100998.html>; letzter Zugriff am 4.6.2021

Diese Radardaten bilden die Grundlage für zahlreiche Radarprodukte, die wiederum in die Erstellung von Warnungen und anderen Spezialprodukten einfließen (können).

Basis für alle in diesem Zusammenhang angesprochenen Produkte sind zum einen Daten der Niederschlags-Scans und zum anderen Daten der Volumen-Scans. Neben der Reflektivität und der Radialwindgeschwindigkeit werden als weitere Größen die Spektrale Breite sowie die polarimetrischen Größen Differentielle Phase, Differentielle Reflektivität und Korrelationskoeffizient zwischen den Polarisierungen erhoben².

Beispiele für auf diese Daten aufbauende Produkte sind neben Radarprodukten mit unterschiedlichen Aussageschwerpunkten (Niederschlagsmenge, -phase und -beschaffenheit) auch Wettervorhersagen und Warnungen sowie Auswertungen vergangener Wetterereignisse. Je nach Produkt fließen hier z.T. verschiedene Radarprodukte sowie Informationen aus weiteren Quellen wie Modellen und Bodenmessungen ein.

Die vom DWD erzeugten Produkte werden teilweise veröffentlicht und teilweise intern verwendet, z.B. bei der manuellen Bewertung von Warnvorschlägen aus dem Entscheidungsunterstützungs-System AutoWarn, für technische Optimierungen und als Basis für die Erstellung von Analysen, Auswertungen und Re-Analysen zurückliegender Wetterereignisse.

Windkraftanlagen gehören zu den Objekten, die Radarmessungen beeinflussen, da sie – temporär oder dauerhaft – nichtmeteorologische Fehlmessungen verursachen können. Diese betreffen verschiedene Messgrößen und können sich als zu hohe oder zu niedrige Werte auch in Folgeprodukten wiederfinden (siehe Abschnitt 3.2).

Ohne die inhaltliche Relevanz der vielen im Kontext der Erfüllung der gesetzlichen Aufgaben vom DWD erstellten Produkte infrage zu stellen, kann dennoch eine Einordnung ihrer besonderen Sicherheitsrelevanz vorgenommen werden.

Zu einer Abstufung der potenziellen Sicherheitsrelevanz von Fehlmessungen in Bezug auf die gesetzlichen Aufgaben können folgende Kriterien herangezogen werden:

- **Wie zeitkritisch ist die Aufgabe?** Grundsätzlich haben Wetterberichte und Warnungen, die auf Echtzeit- sowie Kurzzeitvorhersageprodukten basieren, eine höhere Priorität als solche Produkte, die – oft unter Zuhilfenahme weiterer vorliegender Daten – nachträglich dokumentieren oder auswerten. Im Folgenden werden ausschließlich solche zeitkritischen Produkte betrachtet. Langfristigere Auswertungen können zukünftig ebenfalls sicherheitsrelevant werden, wenn dafür Radarprodukte eingesetzt werden, z.B. bei der Dimensionierung von Rückhaltebecken.
- **Welche Nutzergruppen verwenden das Produkt?** Bezüglich der Sicherheitsrelevanz haben Katastrophenschutz, Wasserwirtschaft, Luft- und Schifffahrt und Landverkehr die höchste Priorität.

Da der DWD im Zuge seiner Optimierungsprozesse immer wieder Änderungen bei der Datenerfassung und -weiterverarbeitung vornimmt, ist es kaum möglich und nicht zielführend, eine vollständige Auflistung aller betroffenen Daten und Produkte zu erstellen und zu bewerten, da es sich stets um eine Momentaufnahme handeln würde.

Stattdessen wurden die auf Echtzeit-Radardaten oder Kurzzeitvorhersagen basierenden Produkte zu den aufeinander aufbauenden Kategorien „allgemeine Radarprodukte“, Vorhersagen“ und „Warnungen“ zusammengefasst betrachtet und überprüft, für welche der im DWD-Gesetz genannten Nutzergruppen sie zur Verfügung gestellt werden. Aus jeder Kategorie werden Produkte für Nutzergruppen höchster Sicherheitsrelevanz bereitgestellt³ (siehe Tab. 1).

² VDI (2014) VDI 3786 Blatt 20: Umweltmeteorologie, Bodengebundene Fernmessung des Niederschlags: Wetterradar. Berlin, Beuth Verlag.

³ DWD (2021a) Internetauftritt des DWD; letzter Zugriff am 4.6.2021

Tab. 1: Sicherheitsrelevanz verschiedener Nutzergruppen und Beispiele für deren Nutzung sicherheitsrelevanter Radarprodukte

Nutzergruppe	Produktkategorie (alle basierend auf Echtzeitradar/Kürzestfristvorhersage)		
	allg. Radarprodukte	Vorhersagen	Warnungen
Sicherheitsrelevanz (hoch = 1 - niedrig = 3)	Standort- und Kompositprodukte zu 1 Niederschlagsintensität und -verteilung 2 sowie (Radial-)Windgeschwindigkeit 3	Eingang z.B. in WaWis (Wasserwirtschaft) oder FeWis (Katastrophenschutz)	basierend auf NowCastMIX Eingang z.B. in WarnWetter-App (Katastrophenschutz) oder SWISinfo (Landverkehr)
Bauwirtschaft	5-min-Reflektivitäten	RADVOR	Wetter- und Unwetterwarnungen
Energiewirtschaft	5-min-Reflektivitäten	RADVOR	Wetter- und Unwetterwarnungen
Geoinformationswirtschaft	5-min-Reflektivitäten	RADVOR	Wetter- und Unwetterwarnungen
gewerbliche Wirtschaft	5-min-Reflektivitäten	RADVOR, Wolken + Niederschlagsart	Wetter- und Unwetterwarnungen
Katastrophenschutz	5-min-Reflektivitäten	WebKonrad	Wetter- und Unwetterwarnungen
Landverkehr	5-min-Reflektivitäten	RADVOR	Wetter- und Unwetterwarnungen
Land- und Forstwirtschaft	5-min-Reflektivitäten	RADVOR	Wetter- und Unwetterwarnungen
Luftfahrt	FlugWetter-App	ADWICE, Segelflugwettervorhersage	Gewitterwarnung WarnELEC
Schifffahrt	5-min-Reflektivitäten	RADVOR	Küsten- und Binnenseewarnungen
Wasserwirtschaft	5-min-Niederschlag, RADOLAN	RADVOR	Wetter- und Unwetterwarnungen

Dabei gibt es innerhalb der einzelnen Kategorien je nach Zielgruppe inhaltliche Überschneidungen aber auch Unterschiede bzgl. der vom DWD eingesetzten Produkte und Verfahren, z.B. bei der Erstellung von Warnvorschlägen (NowCastMIX-Varianten). Die zugrunde liegenden Verfahrensschritte, bei denen Fehlmessungen sich negativ auswirken könnten, sind aber vergleichbar (siehe Abschnitt 3.3):

- die Korrektur
- die Erkennung relevanter Wetterphänomene
- das Auslösen von Warnvorschlägen.

Fragenkatalog

1.1 Kann einer Einstufung nach sicherheitsrelevanten gesetzlichen Aufgaben nach § 4 Abs. 1 DWDG gefolgt werden?

Bei der Betrachtung von möglichen sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen durch WKA sind Radarprodukte für die Nutzergruppen Katastrophenschutz, Wasserwirtschaft, Luft- und Schifffahrt und Landverkehr, die Echtzeit- und Kürzestfristvorhersage-Daten benötigen, als am relevantesten zu betrachten.

1.2 Welche Einzelprodukte fallen unter die radarbezogenen Aufgaben der sicherheitsrelevanten Aufgaben?

Es wird nicht als zielführend betrachtet, eine vollständige Liste zu erstellen. Entscheidend ist, dass vom DWD auf Niederschlags- und Volumenscan basierende Produkte verschiedener Verarbeitungskategorien an Nutzergruppen höchster Sicherheitsrelevanz bereitgestellt werden, Auswirkungen von WKA auf diese Produkte also die gesetzlichen Aufgaben des DWD berühren.

2 Regelungen zur Sicherstellung der Erfüllung dieser Aufgaben

Es wird ein Vergleich von Anforderungen der WMO, von OPERA (Zusammenschluss der europäischen Radarbetreiber), dem DWD, dem französischen Wetterdienst Météo France, dem schwedischen Wetterdienst SMHI, dem niederländischen Wetterdienst KNMI und dem dänischen Wetterdienst DMI durchgeführt. Dadurch wird deutlich, an welchen Stellen der DWD höhere oder geringere Anforderungen stellt. Hieraus können zusätzliche Überlegungen für eine standortspezifische Bewertung nach aktuellen Erkenntnissen abgeleitet werden, die in Tab. 2 zusammengefasst sind.

Tab. 2: Übersicht über Kriterien für die Zulassung von WKA in der Nähe von Wetterradarstationen in verschiedenen Ländern

GILT FÜR C-BAND-RADAR							
Land		EU	Deutschland	Schweden	Frankreich	Dänemark	Niederlande
Organisation	WMO	OPERA	DWD	SMHI	Météo France	DMI	KNMI
Radius für Ausschluss	5 km	5 km	5 km	5 km	5 km	5 km	5 km
Radius für Beurteilung	20 km	20 km	15 km	50 km	20 km	20 km	20 km
Radius ohne Bewertung, WMO empfiehlt Benachrichtigung	> 20 km	> 20 km	> 15 km	> 50 km	> 20 km	> 20 km	> 20 km
Software, falls verwendet				Vindrad+	Qinetiq		
Erstbewertung durch			Antragsteller	Energiebehörde	Antragsteller, nur anerkanntes Verfahren akzeptiert		KNMI wird nicht zwingend konsultiert
Bewertungsverfahren	Analyse des Effekts	Verträglichkeitsstudie	nein	anerkanntes Verfahren	Gesetz, anerkanntes Verfahren	Umweltverträglichkeitsprüfung	nein
Genehmigung durch	entfällt	entfällt	zuständige Behörde nach BImSchG	Militär / Energiebehörde	Météo France / Gerichte	Kommune (an Land) Staat (im Meer)	?
Beurteilungsverfahren	Höhengrenze		0°-Linie				
	Differenz in der Reflektivität			0.01 mm/h			
	Abschattung			< 5% pro WKA	< 10% pro Windpark		< 10% im Mittel
	Einflusszone: Größe				< 10 km		< 10 km
	Abstand zwischen Einflusszonen				> 10 km		> 10 km
	Abstand zu sensitiven Anlagen					> 10 km	
weitere Maßnahmen				Lückenfüller-Radar			

2.1 DWD

Der DWD verlangt, dass die Gesamthöhe von WKA unterhalb der Null-Grad-Elevation der Radarmessung liegen muss⁴. In Schleswig-Holstein liegen derzeit im Nahbereich des Radars Boostedt alle Naben der WKA unterhalb dieser Grenze, die Gesamthöhe mit Rotoren ist aber zum Teil höher (siehe Abb. 3.4.2).

2.2 Anforderungen anderer Institutionen an WKA

International gibt es unterschiedliche Verfahrensweisen, wie staatliche meteorologische Dienste mit der Errichtung von WKA umgehen. Allen gemeinsam ist, dass sie die Empfehlungen der WMO nutzen und interpretieren, um Wechselwirkungen zwischen WKA und der Radarmessung zu bewerten. Dabei werden lokale und räumliche Kriterien genutzt, und teilweise gibt es auch Zusatzmaßnahmen wie die Errichtung eines Lückenfüller-Radars innerhalb eines Windparks, die zunächst nicht genehmigungsfähige WKA wieder erlauben können.

Es muss hierbei aber auch gesagt werden, dass diese Herangehensweisen nur zum Teil auch für die tatsächliche Errichtung von WKA von Belang sind – in manchen Ländern spielt die Bewertung keine Rolle für die Bewilligung.

⁴ DWD (2013) Informationen zur Errichtung von Windenergieanlagen im Nahbereich der Messsysteme des Deutschen Wetterdienstes - Abstandsanforderungen und Höhenbeschränkungen. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 12 S.

2.2.1 WMO

Die WMO stellte fest, dass WKA im Bereich bis 5 km die Radarmessung blockieren können und deshalb in einer solchen Entfernung vom Radar nicht errichtet werden sollten⁵. Im Bereich zwischen 5 und 20 km liegt ein moderater Einfluss auf die Radarmessung vor, so dass eine Untersuchung und Beratung empfohlen werden. Im Bereich von 20 bis 45 km Entfernung vom Radar werden WKA in der Regel als Bodenechos sichtbar sein, aber es wird lediglich empfohlen, dass eine Information zu Standorten und Eigenschaften der Anlagen veröffentlicht wird. Diese Information wird auch für Anlagen mit größerem Abstand empfohlen.

2.2.2 OPERA

OPERA fordert, dass keine WKA innerhalb von 5 km um ein Radar aufgestellt werden sollte, und dass Anlagen zwischen 5 und 20 km einer Verträglichkeitsstudie unterworfen werden sollten⁶. Welche Untersuchungsdetails diese Verträglichkeitsstudie enthalten soll, wird nicht genannt.

2.2.3 Schwedischer Wetterdienst SMHI

Das SMHI arbeitet mit der Software Vindrad+, die von den schwedischen Streitkräften entwickelt wurde⁷. Dabei wird für jede WKA die mögliche Störung berechnet, unter anderem als prozentuale Abschattung des Radarstrahls, und in Form eines Qualitätsindex quantifiziert. Die prozentuale Abschattung wird unter Berücksichtigung der Elemente Turm, Nabe und Rotorblätter der WEA berechnet. Es wird auch nach Ersatzpixeln für den Ort der WKA gesucht und diese – falls gefunden – für den operationellen Betrieb benannt. Diese stammen dann von höheren Elevationen oder benachbarten Radargeräten, müssen das beanstandete Pixel komplett überdecken und eine Mindestqualität (Messhöhe, Messvolumen) erfüllen. Je nach Wert des Qualitätsindex (bzw. des Ersatzpixels) wird dann die WKA genehmigt oder nicht.

Dabei sind die schwedischen Streitkräfte die Entscheidungsinstanz in dem Prozedere. Neben dem Wetterradar spielen auch andere (militärische) Aspekte für die Bewilligung oder Ablehnung neuer Windkraftanlagen eine Rolle.

⁵ **WMO (2010)** Commission for instruments and methods of observation, Fifteenth session WMO-No.1046, World Meteorological Organization. http://www.wmo.int/pages/prog/www/CIMO/CIMO15-WMO1064/1064_en.pdf; letzter Zugriff am 4.6.2021

⁶ **OPERA (2010)** Statement of the OPERA group on the cohabitation between weather radars and wind turbines. https://www.eumetnet.eu/wp-content/uploads/2017/01/OPERA_2010_14_Statement_on_weather_radars_and_wind_turbines.pdf; letzter Zugriff am 4.6.2021

⁷ **Norin, L. (2015)** Vindrad+, Gap-filling radars as a method for reducing the conflict between weather radars and wind turbines. SMHI, Version 1.1, o.O.

2.2.4 Französischer Wetterdienst Météo France

In Frankreich ist ebenfalls eine Software (QinetiQ CLOUDSIS 1.0) für die Prüfung der Zulässigkeit von WKA im Einsatz, die per gesetzlichem Erlass zugelassen ist⁸. Diese Software gehört der Firma QinetiQ Ltd. in England und wird nicht extern lizenziert.

Mit der Software wird insbesondere der Einflussbereich einer WKA abgeschätzt, der für die Überprüfung der vier Kriterien von Météo France eine Schlüsselrolle spielt:

1. Die Abschattung des Radarstrahls durch einen Windpark muss weniger als 10 % betragen
2. Die Einflusszone eines Windparks darf in seiner größten Ausdehnung nicht mehr als 10 km betragen
3. Der Mindestabstand zwischen zwei Einflusszonen muss mindestens 10 km betragen, sonst gelten sie als ein Einflussbereich
4. Der Mindestabstand der Einflusszone eines Windparks zu gefährlichen Anlagen (z.B. Atomkraftwerke, Chemiefabriken) muss mindestens 10 km betragen.

Diese vier Kriterien müssen alle erfüllt sein, damit eine WKA bzw. ein Windpark genehmigt wird. Das Verfahren ist ebenfalls per Erlass gesetzlich geregelt.

2.2.5 Dänischer Wetterdienst DMI

Der dänische Wetterdienst DMI wird im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung für die Errichtung eines Windparks zu Einwänden befragt. Bei landgestützten Windparks hat die Kommune dabei die Entscheidungsbefugnis, bei Windparks im Meer der Staat. Es gibt kein festgelegtes Prozedere für die Beurteilung der Wirkung von WKA⁹.

2.2.6 Niederländischer Wetterdienst KNMI

Der niederländische Wetterdienst KNMI wird bei der Errichtung neuer WKA nicht standardmäßig konsultiert. Falls sie angefragt werden, werden die folgenden drei Kriterien angelegt, die ähnlich auch in Frankreich Anwendung finden¹⁰:

1. Die Abschattung des Radarstrahls durch einen Windpark muss weniger als 10 % betragen
2. Die Maximalgröße eines Windparks darf in seiner größten Ausdehnung nicht mehr als 10 km betragen
3. Der Mindestabstand zwischen zwei Windparks muss mindestens 10 km betragen.

⁸ **Min (2015)** Décision du 20 novembre 2015 relative à la reconnaissance de la méthode de modélisation des perturbations générées par les aérogénérateurs sur les radars météorologiques CLOUDSIS 1.0 et de la société Qinetiq Ltd chargée de sa mise en œuvre. https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0028949/met_20150022_0000_0022.pdf; letzter Zugriff am 4.6.2021

⁹ **DMI (2021)** pers. Kommunikation vom 28.4.2021.

¹⁰ **KNMI (2021)** pers. Kommunikation vom 27.4.2021.

3 Beeinträchtigungen der Radarmessung durch WKA

3.1 Grundlagen zur Radarmessung

Für die Beobachtung der unteren Atmosphäre im Umkreis eines Radargeräts wird der Radarstrahl in einem Winkel zur Erdoberfläche abgestrahlt (Elevation). Dieser wird in Abhängigkeit von der Topografie der Umgebung gewählt, damit keine Abschirmungseffekte etwa durch Bergkuppen auftreten. In einem Messzyklus dreht sich die Antenne einmal um die eigene Achse, um Radarstrahlen in alle Richtungen auszusenden und die zurückgestrahlte Energie zu messen. In Abb. 3.1 ist die Geometrie einer Radarmessung schematisch dargestellt.

Die Radarmessung ist eine indirekte Messung der Objekte in der Atmosphäre. Es wird ein Reflektivitätsfaktor (vereinfacht: Reflektivität) gemessen, der eine nichtlineare Beziehung zur Niederschlagsintensität hat, die je nach Tropfengrößenverteilung im Messvolumen variiert.

Der vom Radar ausgesandte Strahl ist zwar beim DWD auf eine Strahlbreite von 1° fokussiert, aber das Radar erfasst über sogenannte Nebenkeulen auch benachbarte Objekte selber Entfernung, ähnlich dem Streulicht neben dem Lichtkegel einer Taschenlampe. Hierdurch werden Objekte mit einer hohen Reflektivität auch – abgeschwächt – in den Nachbarwinkeln erfasst.

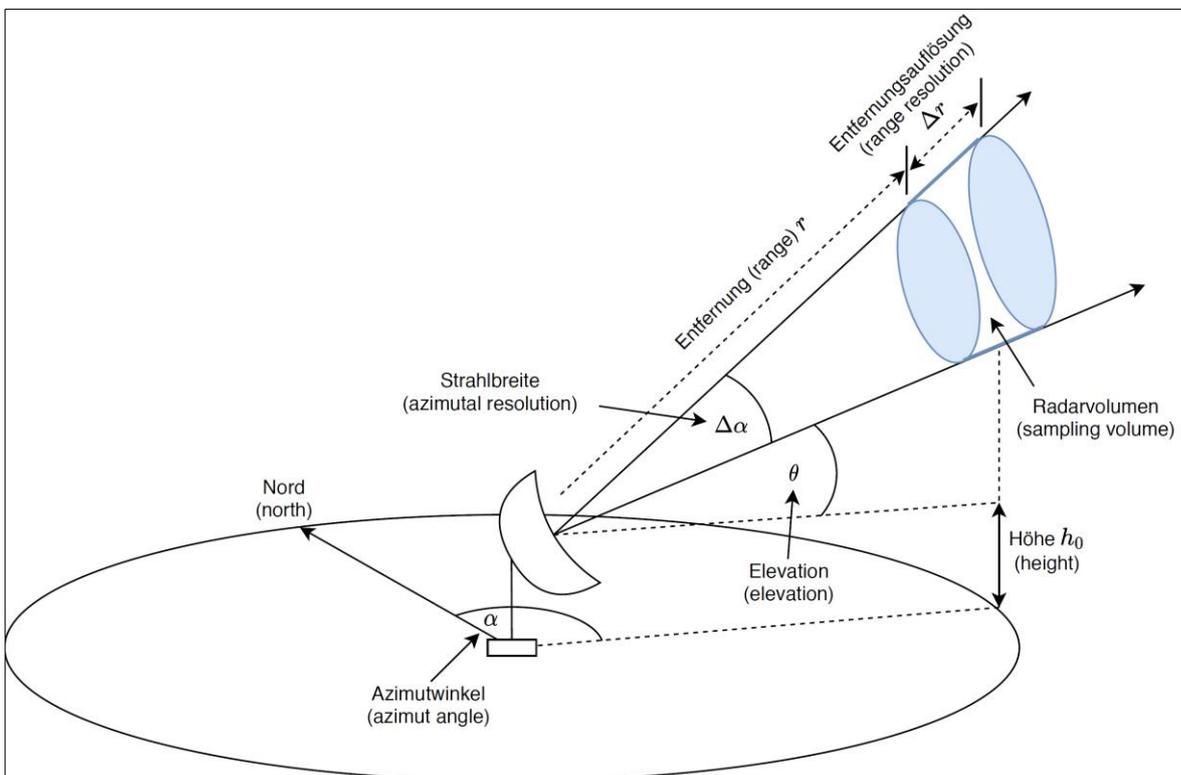


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Radarmessung

Um Niederschlag zu identifizieren und andere Objekte (hohe Gebäude, Flugzeuge, Berge, Windräder etc.) und Störungen zu eliminieren, müssen die Daten der Radarmessung gründlich geprüft und lokal korrigiert werden, bevor mit ihnen gearbeitet werden kann. Weitere Informationen liegen beispielsweise als Richtlinie 3786 Blatt 20 des VDI² (VDI, 2014) vor.

3.2 Einfluss von WKA auf die Radarmessung

Grundsätzlich können Windkraftanlagen folgende Auswirkungen in Form von nicht-meteorologischen Fehlmessungen auf die Radarmessung haben¹¹:

- Sichtbarkeit der WKA in der Radarmessung als permanente Reflektion (Bodenecho, Clutter)
- Blockierung des Radarstrahls
- Umlenkung des Radarstrahls

Darüber hinaus verändert ein Windpark das Windfeld^{12 13}, da er die Kraft des Windfeldes in Energie umwandelt und damit die Windgeschwindigkeit verringert. Dabei entsteht durch die erhöhte Rauheit zum einen ein Bremseffekt ähnlich wie an einem Hügel und zum anderen kann eine erhöhte Labilität entstehen, die die Konvektion erhöhen kann. Deshalb kann eine Windmessung an einem Windpark nicht den Bedingungen eines ungestörten Windfeldes ohne Windpark entsprechen.

Da polarimetrische Daten auf der Kombination von Reflektivitätsmessungen zweier Polarisierungsebenen beruhen, ist hier insbesondere mit einer räumlich klar begrenzten Sichtbarkeit der WKA in Form von Bodenechos und von Abschattung zu rechnen.

Es wird in der Literatur angegeben, dass die polarimetrischen Größen empfindlicher auf Störungen der Messung reagieren.¹¹ Hierfür gibt es allerdings noch keine statistischen Auswertungen an Messdaten über längere Zeiträume.

Lainer et al. (2020)¹⁴ schreiben, „dass die elektromagnetische Interaktion zwischen WKA und Wetterradar komplex ist und der Zusammenhang noch immer nicht gut genug verstanden wird“. Durch Modelle wird versucht, die verstandenen Zusammenhänge zu beschreiben. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, gemessene Werte des Radars genau auf einen erkannten Einfluss von WKA zu analysieren.

Die Komplexität der Interaktion rührt unter anderem daher, dass die Reflektion des Radarstrahls an der WKA abhängig ist von der Stellung des Rotors bzw. der Gondel zum Radar, von dem Anstellwinkel der Rotoren, von der Rotationsgeschwindigkeit und von der Stellung der drei Rotoren während der Momentanaufnahme durch das Radar. Hierzu gibt es bislang keine abgeschlossene Untersuchung, die eindeutige Ursache-Wirkung-Beziehungen darstellen würde und diese messtechnisch nachgewiesen hat. Solche Untersuchungen gehören derzeit in den Bereich der Forschung. In dem BMWi-Forschungsprojekt „Removing the Influence of Wind-Park-Echoes in Weather-Radar-Measurements“ (RIWER) sollen unter Beteiligung von DWD, Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Fachagentur Windenergie an Land und verschiedener Hochschulen mathematisch-signalanalytische Verfahren entwickelt werden, mit denen die Störeinflüsse der WEA auf Wetterradare herausgerechnet werden können.¹⁵

¹¹ Seltmann, J. & Böhme, T. (2018) Radarbezogene Probleme mit Windenergieanlagen in Deutschland. 18 Seiten, o.O.

¹² Emeis, S. (2015) Windphänomene in der atmosphärischen Grenzschicht, die die Nutzung der Windenergie entscheidend beeinflussen. Promet Heft 3/4, 39. Jahrgang, S. 151 -162.

¹³ Steinfeld, G., Witha, B., Dörenkämper, M., Gryschka, M. (2015) Hochauflösende Large-Eddy-Simulationen zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse in Offshore-Windparks. Promet Heft 3/4, 39. Jahrgang, S. 163 – 180.

¹⁴ Lainer, M., Figueras i Ventura, J., Schauwecker, Z., Gabella, M., Bolaños, M.F., Pauli, R., Grazioli, J. (2020) Insights into wind turbine reflectivity and RCS and their variability using X-band weather radar observations. Atmospheric Measurement Techniques. <https://doi.org/10.5194/amt-2020-384>

¹⁵ Fachagentur (2021) Fachagentur Windenergie an Land: Forschungsprojekt „Removing the Influence of Wind-Park-Echoes in Weather-Radar-Measurements“(RIWER). <https://www.fachagentur-windenergie.de/themen/radar-und-funkanlagen/riwer/>; letzter Zugriff am 10.6.2021

3.2.1 Windkraftanlagen als Bodenecho (Clutter)

In der Radarmessung treten WKA als Bodenecho (Clutter) auf, genau wie jedes andere hohe Objekt, das in den Radarstrahl hineinragt. Die Stärke der Reflektion hängt dabei ab von der Höhe der WKA im Radarstrahl, von der Ausrichtung der Rotoren und von der Dicke des Mastes und der Gondel (Nabe)¹⁴.

Die Nebenkeulen (siehe Abschnitt 3.1) tragen dazu bei, dass WKA auch noch einige Grad neben dem eigentlichen Ort in den Reflektivitäten der Radarmessung sichtbar sind, allerdings auf einem sehr viel geringeren Niveau¹⁴ (siehe auch Abschnitt 3.4).

Eine Sichtbarkeit von Windparks in Form von Clutter ist darüber hinaus nicht auf einen Radius von 15 km begrenzt – diese Beobachtung tritt auch in deutlich größerer Entfernung vom Radar auf (siehe Abb. 3.2.1).

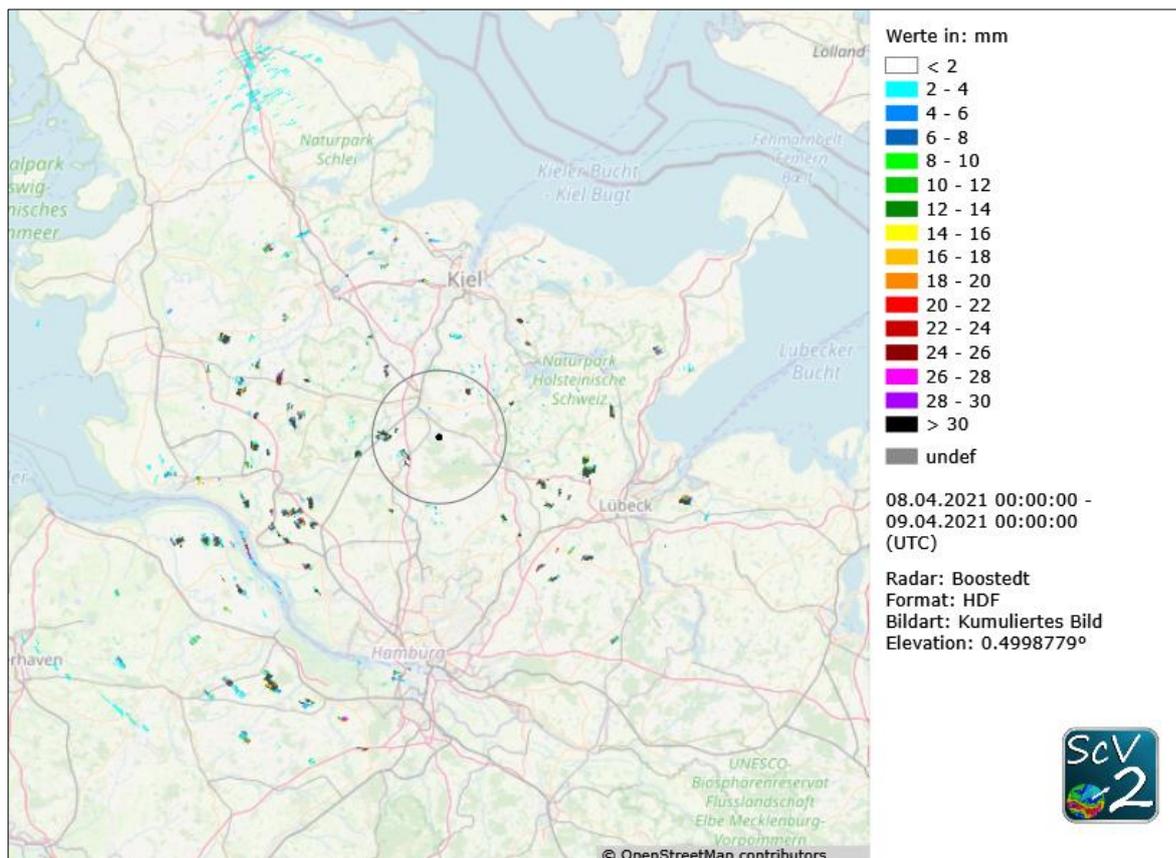


Abb. 3.2.1: Bodenechos an einem Trockentag ohne Niederschlag (24-Stunden-Summe)

3.2.2 Blockierung des Radarstrahls

Wie jeder andere Turm kann auch eine WKA den Radarstrahl blockieren oder teilweise blockieren. Weiter können temporär auch die Rotoren für eine Abschattung sorgen.

Diese Effekte wurden u.a. von Argemi et al. (2012)¹⁶ mit folgendem Ergebnis untersucht: In einem Abstand von > 5 km vom Radar liegt ein messbarer Einfluss der statischen Elemente einer WKA (Mast und Nabe) in Form einer Blockierung der Radarmessung in der Größenordnung der mengenmäßigen Auflösung des Radars (0.5 dBZ) vor. Für bewegliche Elemente

¹⁶ Argemí O., A. Belmonte, X. Fàbregas, N. Pineda, T. Rigo, J. Bech (2012) Wind turbine impact evolution and beam blockage analysis on the weather radar network of the Meteorological Service of Catalonia, 7th European Conference on radar in Meteorology and Hydrology (ERAD) Toulouse, France, 25th to 29th June 2012.

http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NET_o13_ext_abs.pdf; letzter Zugriff am 4.6.2021

(Rotoren) ist dieser Effekt geringer. Der Effekt nimmt dabei exponentiell mit der Entfernung ab. Untersucht wurden WKA mit den Ausmaßen Nabenhöhe 80 m und Gesamthöhe 125 m, Mastfußdurchmesser 4 m, Mastdurchmesser an der Nabe 2 m.

Diese Ergebnisse stimmen mit denen von Vogt et al. (2011)¹⁷ überein, die eine Strahlblockierung nur bei Distanzen unter 5 km als relevant feststellten.

Untersuchungen zu größeren und neueren Anlagen sind den Autoren dieses Gutachtens nicht bekannt.

3.2.3 Umlenkung des Radarstrahls

Eine Mehrfachreflektion des Radarstrahls (Mehrwegeeffekt) kann in Windparks dadurch auftreten, dass der Strahl von dem Mast bzw. den Rotoren abgelenkt und von anderen weitergeleitet wird²¹. Die Folge sind diffuse Reflektivitäten, die nicht örtlich zugeordnet werden können. Die Effekte in den Messwerten sind meist zeitlich und örtlich nicht andauernd, da sie unter anderem von der jeweiligen Windrichtung, -geschwindigkeit und Rotorstellung während der Momentaufnahme der Radarmessung abhängen.

3.3 Auswirkungen auf die Produkte des DWD

Grundlage der folgenden Angaben sind Informationen vom DWD aus dessen Internetauftritt³ sowie einer Stellungnahme¹⁸.

An verschiedenen Stellen in der Verarbeitungskette der Radardaten können nichtmeteorologische Fehlmessungen zu suboptimalen Radarprodukten führen: bei der Korrektur, bei der Erkennung relevanter Wetterphänomene und beim Auslösen von Warnvorschlägen.

Nach der Prozessierung am Radarstandort (u.a. Doppler-Festziel-Entfernung der „Echos“ von unbewegten, nicht-meteorologischen Streuobjekten, WKA werden nicht entfernt, sofern die Rotoren sich bewegen¹⁸ werden die Radarbasisdaten zentral in der Softwareumgebung POLARA zusammengeführt. Im Rahmen der Qualitätssicherung durchlaufen sie Algorithmen („Filter“) zur Erkennung verschiedener Störphänomene (z.B. Clutter, Dämpfung, Speichen). Diese werden je nach weiterem Verwendungszweck des Radarproduktes direkt korrigiert oder markiert und in dann folgenden Verfahrensschritten behandelt. Neben dem Zusammenführen der Einzelradars zu verschiedenen Komposits sind dies u.a. die Verfahren zur Erkennung von

- Niederschlagsphase (Hydrometeorklassifikation: Schnee, Graupel, Hagel, große Tropfen)
- Konvektiven (Gewitter-)Zellen (KONRAD und CellMOS, Beobachtung und Vorhersage)
- Mesozyklonen (rotierende meteorologische Strukturen, Tornadofrüherkennung).

Diese Informationen werden teilweise direkt an verschiedene Nutzergruppen herausgegeben (z.B. webKONRAD im Feuerwehr-Informationssystem FEWIS) und im automatischen Monitoringsystem NowCastMIX mit weiteren Informationen kombiniert. NowCastMIX erzeugt Hinweise auf warnwürdige Wettersituationen, die wiederum in den AutoWARN-Prozess eingehen. AutoWARN ist das Entscheidungshilfesystem für den Warndienst. Erzeugte Warnvorschläge werden manuell von Fachleuten bewertet, die ggf. eine Warnung veranlassen, aktualisieren oder hochstufen. Zur Frage, was im Falle einer größeren Gewitterlage geschieht, in der die Zeit zu einer Überprüfung im 5-min-Takt nicht immer ausreicht, die auflaufenden Warnvorschläge zu prüfen, gibt es von Seiten des DWD voneinander abweichende Aussagen. Während DWD (2021b)¹⁸ darauf hinweist, dass es temporär dazu kommen kann, dass Aktualisierungen und Hochstufungen sich verzögern, benennt DWD (2020b)¹⁹ auch das Herausgeben neuer, möglicherweise aufgrund von WKA-Einfluss fälschlich generierter Warnungen als mögliche Folge.

¹⁷ Vogt, R.J., Crum, T.D., Sandifer, M.J.B., Ciardi, E.J., Guenther, R. (2009) A way forward: windfarm – weather radar coexistence. NEXRAD Radar Operations Center, NOAA's National Weather Service; 2009.

¹⁸ DWD (2021b) Stellungnahme vom 23.4.2021, pers. Kommunikation

¹⁹ DWD (2020b) Ergänzende Stellungnahme zum Repowering von 5 Windkraftanlagen im Windpark Wiemersdorf vom 10.11.2020

Durch Störphänomene zu hohe oder im Zuge der Qualitätssicherung auf Null gesetzte Zellwerte werden je nach Produkt unterschiedlich behandelt (z.B. verschiedene Verfahren bei der Kompositerstellung) und bleiben in allen weiteren Verfahrensschritten erhalten.

Ausdehnung

Als deutschlandweite Übersicht werden die Daten im Komposit auf einem 1 km x 1 km-Raster dargestellt. Fehler in einzelnen Radarpixeln können bei der Kompositierung somit auf eine größere Flächeneinheit gezogen werden.

Um von den Basisdaten ein Komposit zu erstellen, gibt es verschiedene Verfahren, wie aus polaren Messwerten Rasterwerte erzeugt werden. Diese reichen von der Verwendung des Pixelwertes mit der geringsten Distanz zum Rastermittelpunkt über die Verwendung des maximalen Wertes aller die Rasterzelle überdeckenden Pixel bis zur Verschneidung der Pixelwerte zur Erstellung eines Rasterwertes. Der DWD verwendet, je nach Produkt, unterschiedliche Verfahren²⁰. Dadurch pflanzen sich sowohl Datenfehler als auch ausgeblendete bzw. interpolierte Werte in den Basisdaten unterschiedlich in ein Komposit fort.

Zellbasierte Vorhersage

Konvektive Niederschlagsysteme lassen sich unterteilen in Einzel-, Multi- und Superzellen³. Während Einzelzellen eine räumliche Gesamtausdehnung von ca. 2 - 10 km haben können, liegt die Ausdehnung von Multizellen bei ca. 15 - 30 km und von Superzellen bei ca. 20 - 50 km. Während von Einzelzellen ein geringes Gefahrenpotential ausgeht, können Multi- und insbesondere Superzellen schadensträchtige Auswirkungen haben und weisen ein hohes Gefahrenpotential auf²¹.

Bei der Ausdehnung der konvektiven Niederschlagszellen muss man beachten, dass:

- im Entwicklungsstadium der Zellen diese deutlich kleiner sind als in der maximalen Gesamtausdehnung, das Erkennen zu diesem Zeitpunkt aber wichtig ist, um eine rechtzeitige Warnung auszusprechen.
- sich die betroffene Fläche mit steigenden Reflektivitätswerten reduziert, d.h. die für das Erkennen der Zelle oberhalb eines Schwellwertes nicht die Gesamtausdehnung der Niederschlagszelle relevant ist, sondern nur die Ausdehnung oberhalb des jeweiligen Schwellwertes.

Unabhängig von einzelnen Warnprodukten kann die Gesamtausdehnung von schadensträchtigen Zellen im Entwicklungsstadium in einer Größenordnung von 10 - 15 km² (bei Reflektivitäten > 45 dBZ) bzw. 5 km² (bei Reflektivitäten > 55 dBZ) liegen.

Eine Vorhersage konvektiver Zellen, die mit Radar erkannt werden, beruht auf dem Prinzip, dass Zellen auf dem ersten Bild als Niederschlagsfelder erkannt werden (also eine Mindestgröße aufweisen, i.d.R. 15 - 20 km²) und auf dem folgenden Bild anhand von Formparametern (Größe, Intensität, Form) und bisherigem Zug der Zelle wiedererkannt werden. Aus bildverarbeitungstechnischen Gründen lassen sich Zellen erst ab einer Pixelanzahl von ca. 15 Pixeln wiedererkennen – sonst sind Fehlvorhersagen aufgrund von nicht wiedererkannten Formen, Fehlzuordnungen und Größen/Formänderungen innerhalb von 5 Minuten zu groß²².

Im vorliegenden Fall gibt es zwei mögliche Datenquellen: standort-korrigierte Daten, die an WKA eine Tendenz zur Überschätzung der Werte haben, und POLARA-korrigierte Daten, die eine Tendenz zur Unterschätzung haben. Auch auf Daten,

²⁰ Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A. (2017) Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 251. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.

²¹ URBAS (2008) Schlussbericht. Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse, Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten. <http://www.urbanesturzfluten.de/schlussbericht>; letzter Zugriff am 4.6.2021

²² Einfalt, T. (1988) Recherche d'une méthode optimale de prévision de pluie par radar en hydrologie urbaine. Dissertation, ENPC Paris, 189 S. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00520784/en/>; letzter Zugriff am 13.9.2021

die an Fehlwerten in der (bearbeiteten) Messung räumlich interpoliert wurden, wird im Folgenden eingegangen. Das führt für eine Warnung vor Starkregen zu folgenden Überlegungen:

1. Die Zelle ist bereits bekannt, bevor sie über einen Windpark zieht. Dann besteht die Möglichkeit, dass sie über dem Windpark nicht erkannt wird, falls für den Windpark Korrekturen durchgeführt wurden. Dies passiert entweder, weil POLARA die Werte auf Null gesetzt hat, oder weil der Bereich interpoliert wurde, und dann geht die Kenntnis über die Zelle verloren und muss im Anschluss erst wieder neu gewonnen werden. Dadurch kann wichtige Zeit für eine Warnung verloren gehen („Unterwarnung“). Im anderen Fall, der standortbasierten Korrektur, kann die Zelle deutlich größer und intensiver erscheinen als sie ist, was dann zu einer zu hohen Vorhersage und Warnung führen kann („Überwarnung“).
2. Die Zelle entsteht über dem Windpark. Dann wird sie bei POLARA-korrigierten Daten und bei interpolierten Daten je nach Größe des Windparks, der Entwicklung und Zuggeschwindigkeit der Zelle, voraussichtlich später erkannt. Dadurch entsteht eine Verzögerung in der Vorhersage.
3. Eine weitgehend ortsfeste Zelle über den Windpark wird bei auf Null gesetzten Daten und bei interpolierten Daten nicht erkannt, dann erfolgt keine Vorhersage für den Windpark und die umliegenden Orte.
4. Eine Zelle wird fälschlicherweise über einem Windpark erkannt. Dies kann nur bei standortkorrigierten Daten geschehen. Dann wird sie entweder im Folgeschritt als ortsfest wiedererkannt oder es gibt keine erkannte Zelle im Folgezeitschritt. Ist eine Zelle ortsfest, so besteht der Verdacht, dass sie ein Festziel (Clutter) repräsentiert. Eine Prüfung der Messung in höheren Elevationen kann zeigen, ob eine konvektive Zelle vorliegt oder nicht.
5. Eine Warnung auf Basis einer Vorhersage hat nur dann einen Effekt, wenn sie Menschen und Institutionen erreicht, bevor die Gefahr eintritt, so dass es noch Handlungsmöglichkeiten gibt. Deshalb ist es für diese Anwendungen wichtig, vor Eintreten der Gefahr gewarnt zu werden. Kleine Zellen mit einer begrenzten Lebensdauer unter einer Stunde wachsen in dieser Zeit und schrumpfen wieder und können aus diesem Grunde nicht früh und präzise genug vorhergesagt werden. Lopez et al. (1984)²³ zeigen, dass im Mittel die dort untersuchten konvektiven Zellen mit einer Lebensdauer von 30 Minuten eine Flächenausdehnung um die 70 km² erreichten.

Schwellwerte des DWD

In diesem Gutachten wird der Begriff Schwellwerte für vom DWD festgelegte Werte verwendet, die in DWD-Verfahren bzw. Verfahrensschritten zur Radardatenverarbeitung vorkommen. Bei der Erstellung verschiedener Produkte werden vom DWD eine Vielzahl von Schwellwerten – teils in Kombination – eingesetzt, die unter bestimmten Bedingungen zum Tragen kommen. Diese Schwellwerte sind aufgrund von Umstellungen der Radardatenerstellung (z.B. Änderung der räumlichen Auflösung) oder Änderung bzw. Anpassung der Verfahren nicht dauerhaft festgelegt und Änderungen unterworfen. Aus diesem Grund ist eine Beurteilung unter welchen grundsätzlichen Voraussetzungen WKA eine Beeinträchtigung der Produkte des DWD erzeugen können allein auf Basis der Schwellwerte nicht zielführend. Eine Auflistung von Werten, die im Zusammenhang mit verschiedenen Verfahren vom DWD genannt wurden, findet sich in Anhang 1.

Bewertungsmaßstäbe

Unabhängig von veränderlichen Schwellwerten, die bei der Erstellung von DWD-Produkten genutzt werden, werden in diesem Gutachten auf Grundlage der zugrunde liegenden Charakteristik von potenziell schadensträchtigen Niederschlagszellen und Notwendigkeiten bei der Vorhersage dieser Niederschlagszellen, der Datenauswertung und dem Ergebnis der Literaturrecherche Bewertungsmaßstäbe hergeleitet, die im abschließenden Bewertungsschema Anwendung finden. Wenn auf Grundlage eingeschränkter Qualität in den Basisdaten die Erkennung und Vorhersage dieser kleinräumigen, potenziell

²³ López, R. E., Blanchard, D. O., Rosenfeld, D., Hiscox, W. L., Casey, M. J. (1984) Population characteristics, development processes and structure of radar echoes in south Florida. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 56–75.

schadensträchtigen Niederschlagszellen nicht möglich ist, kann dies auch in auf diesen Daten aufbauenden DWD-Produkten nicht sichergestellt werden.

3.4 Datenauswertung für den Standort Boostedt

3.4.1 Datengrundlage

Um spezifisch für das Radar Boostedt Aussagen zu dem Einfluss der Windkraftanlagen zu treffen, ist eine Auswertung von Radarmessdaten über einen längeren Zeitraum notwendig.

Als Radarbasisdaten wurden verschiedene Reflektivitätsdatensätze des Radarstandortes Boostedt herangezogen, die auf dem Niederschlagsscan und dem Volumenscan (drei unterste Elevationen 0,5°, 1,5°, 2,5°) und auf reiner Standortkorrektur sowie auch auf POLARA-Korrektur beruhen (siehe Abschnitt 3.3).

Während der Bearbeitung des Gutachtens ist von Seiten des DWD die räumliche Auflösung des Volumenscans von 1000 m auf 250 m angepasst worden, so dass am Radarstandort Boostedt seit dem 25.03.2021 14:30 UTC nur noch die höhere Auflösung zur Verfügung steht. Da sich diese Umstellung elementar auf die Ausdehnung von Störeinflüssen der WKA in den Radarpixeln auswirkt, wurde zusätzlich der erste Monat der standortgefilterten Volumendaten mit 250 m-Auflösung ausgewertet. Eine Übersicht der ausgewerteten Datensätze findet sich in der folgenden Tab. 3.4.1:

Tab. 3.4.1: Untersuchte Datensätze

Scan	Korrektur	räuml. Auflösung	Elevation	Auswertezeitraum	
Niederschlagsscan	standortgefiltert	250 m x 1°	0,8°	01.05.2019	30.04.2020
Niederschlagsscan	POLARA	250 m x 1°	0,8°	01.05.2019	30.04.2020
Volumenscan	standortgefiltert	250 m x 1°	0,5°	26.03.2021	25.04.2021
Volumenscan	standortgefiltert	250 m x 1°	1,5°	26.03.2021	25.04.2021
Volumenscan	standortgefiltert	250 m x 1°	2,5°	26.03.2021	25.04.2021
Volumenscan	standortgefiltert	1000 m x 1°	0,5°	01.05.2019	30.04.2020
Volumenscan	standortgefiltert	1000 m x 1°	1,5°	01.05.2019	30.04.2020
Volumenscan	standortgefiltert	1000 m x 1°	2,5°	01.05.2019	30.04.2020
Volumenscan	POLARA	1000 m x 1°	0,5°	01.05.2019	30.04.2020
Volumenscan	POLARA	1000 m x 1°	1,5°	01.05.2019	30.04.2020
Volumenscan	POLARA	1000 m x 1°	2,5°	01.05.2019	30.04.2020

Polarimetrische Messgrößen und Radialwindmessungen sind nicht Bestandteil der Auswertungen.

Vom LLUR wurden Kennwerte und Koordinaten der in Betrieb und im Genehmigungsverfahren befindlichen WKA zur Verfügung gestellt (Übersicht der Lage siehe Abb. 3.4.1, wesentliche Kennwerte Tab. 3.4.2).

Darüber hinaus standen für die Windparks (WP) Großenaspe/Wiemersdorf und Hardebek/Hasenkrug Betriebsdaten zu Leistung und Drehzahl zur Verfügung.

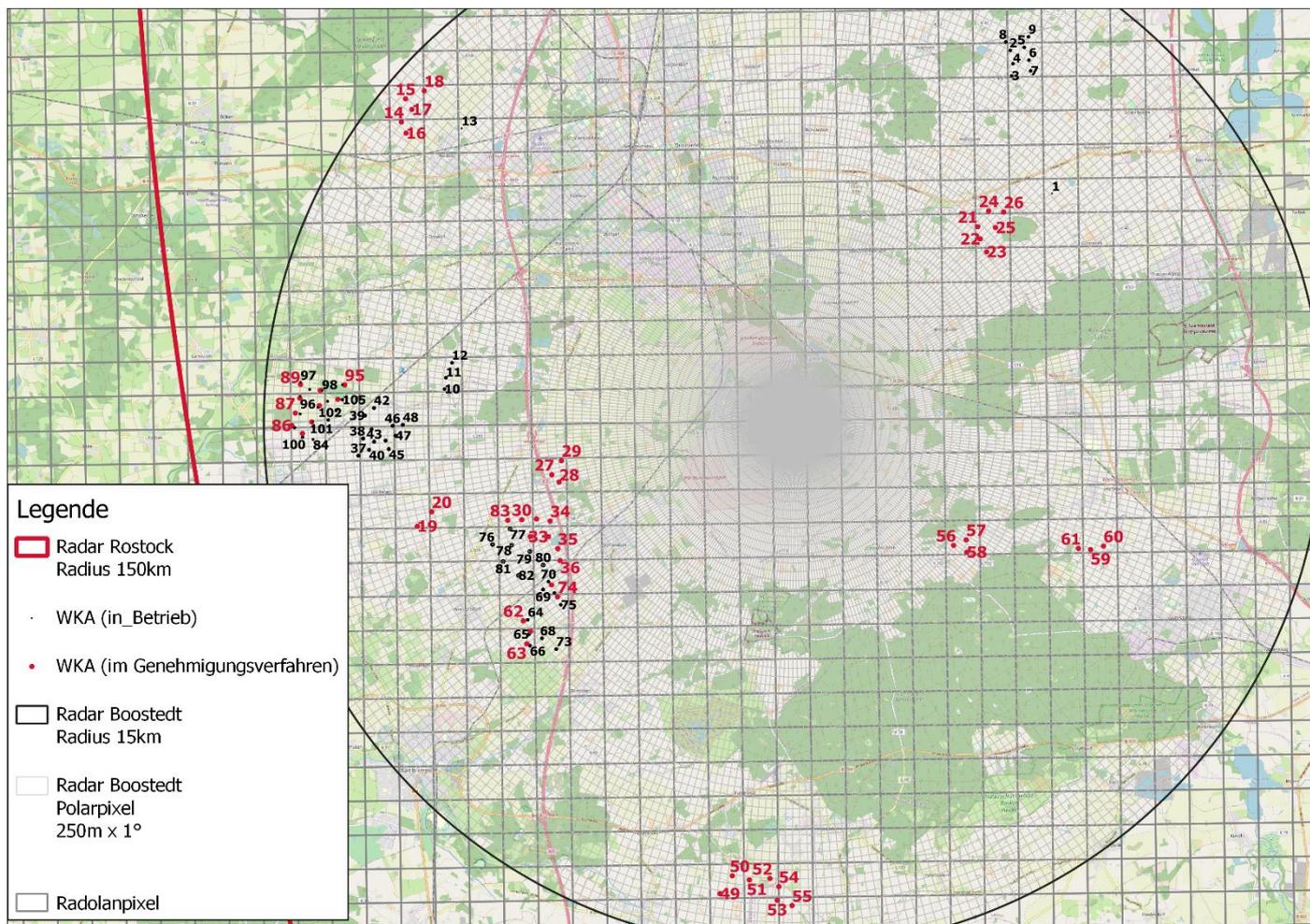


Abb. 3.4.1: Übersicht der in Betrieb und im Genehmigungsverfahren befindlichen WKA

3.4.2 Untersuchung der Strahlgeometrie

Ein Radarstrahl wird mit einer Elevation ausgesandt und von den Objekten reflektiert, die auf seinem Weg liegen. Um die Höhe, die eine WKA in den Radarstrahl hineinragt, zu bestimmen, wird eine einfache geometrische Berechnung durchgeführt, die die Unterkante des Radarstrahls, seinen Mittelpunkt und seine Oberkante zeigt und diese in Beziehung setzt zu der Nabenhöhe und Gesamthöhe jeder WKA. Für die Bestandsanlagen im Nahbereich des Radars Boostedt ergibt sich damit Abb. 3.4.2. In Tab. 3.4.2 sind die in Betrieb befindlichen Anlagen mit ihren Kennwerten und ihrer Lage im Radarstrahl dargestellt:

Tab. 3.4.2: in Betrieb befindliche Anlagen mit Kennwerten

ID hm	Name	Leistung [kW]	Nabe [m]	Rotor- durchm. [m]	Anlage- höhe [m]	Gesamt- höhe [mNHN]	Rechts- wert	Hoch- wert	Höhe im Radarstrahl bei 0,0°	Höhe im Radarstrahl bei 0,3°
WEA 1	Joachim_Hopp	5	7	6	10	0	575930	5991042	-84	-135
WEA 2	Windpark_Altbokhorst_Gut_Altbokhorst	1800	65	70	100	147	574749	5995126	11	-53
WEA 3	Windpark_Altbokhorst_Gut_Altbokhorst	1800	65	70	100	144	574788	5994400	9	-52
WEA 4	Windpark_Altbokhorst_Gut_Altbokhorst	1800	65	70	100	144	574825	5994744	9	-54
WEA 5	Windpark_Altbokhorst_Gut_Altbokhorst	1800	65	70	100	148	575147	5995209	12	-54
WEA 6	Windpark_Altbokhorst_Gut_Altbokhorst	1800	65	70	100	150	575277	5994849	14	-50
WEA 7	Windpark_Altbokhorst_III	2300	64	71	100	145	575327	5994544	9	-54
WEA 8	Windpark_Altbokhorst_VI	2300	64	71	100	149	574623	5995366	12	-53
WEA 9	Windpark_Altbokhorst_Windwaerts_Davendis	2300	64	71	100	152	575264	5995511	15	-53
WEA 10	Windpark_Padenstedt	2000	64	71	100	116	558738	5985476	-16	-68
WEA 11	Windpark_Padenstedt	2000	64	71	100	117	558777	5985799	-15	-67
WEA 12	Windpark_Padenstedt	2000	64	71	100	116	558947	5986224	-16	-67
WEA 13	Windkraftanlage_Wasbek	80	29	20	39	0	559222	5992901	-78	-144
WEA 37	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	162	556299	5983577	26	-39
WEA 38	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	163	556435	5984063	27	-36
WEA 39	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	163	556486	5984718	27	-36
WEA 40	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	162	556602	5983743	27	-36
WEA 41	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	163	556675	5984326	28	-35
WEA 42	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	163	556741	5984936	28	-34
WEA 43	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	163	556746	5983976	28	-34
WEA 44	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	162	557068	5984007	28	-33
WEA 45	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	162	557161	5983766	28	-32
WEA 46	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	163	557267	5984428	29	-31
WEA 47	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	163	557352	5984148	29	-30
WEA 48	Windpark_Hasenkrug_Hardebek	2300	108	82	149	163	557557	5984455	29	-28
WEA 64	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	1800	65	70	100	133	561093	5978901	2	-47
WEA 65	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	1800	65	70	100	140	561131	5978487	9	-42
WEA 66	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	1800	65	70	100	137	561154	5978165	5	-46
WEA 68	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	2000	90	77	128	162	561496	5978373	32	-18
WEA 69	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	2000	90	77	128	148	561527	5979764	19	-26
WEA 70	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	1800	65	70	100	119	561679	5979986	-10	-54
WEA 72	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	1800	65	70	100	120	561846	5979667	-9	-53
WEA 73	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	2000	90	77	128	154	561899	5978065	24	-25
WEA 75	Windpark_Wiemersdorf_GmbH_Co_KG	1800	65	70	100	120	562031	5979327	-10	-53
WEA 76	Buerger_Windpark_Wiesental_1	2500	100	100	150	165	560098	5981044	34	-14
WEA 77	Buerger_Windpark_Wiesental_1	2500	100	100	150	166	560591	5981489	36	-9
WEA 78	Buerger_Windpark_Wiesental_1	2500	100	100	150	166	560639	5981029	36	-10
WEA 79	Buerger_Windpark_Wiesental_2_GmbH_und_Co_KG	2500	100	100	150	167	561155	5980845	38	-6
WEA 80	Buerger_Windpark_Wiesental_2_GmbH_und_Co_KG	2500	100	100	150	168	561530	5980462	39	-4
WEA 81	Buerger_Windpark_Wiesental_3	2500	100	100	150	167	560398	5980563	36	-11
WEA 82	Buerger_Windpark_Wiesental_3	2500	100	100	150	169	560834	5980165	39	-8
WEA 84	WKA_Brockstedt_K_O_Foelster	850	74	52	100	111	555018	5984039	-28	-99
WEA 85	WKA_Brockstedt_Windpark_Holstein	2400	91	117	149	162	556311	5985195	27	-38
WEA 96	WKA_Windfarm_Buergerwindpark_Willenscharen_Brockstedt	1650	67	66	100	111	554647	5985258	-28	-102
WEA 97	WKA_Windfarm_Buergerwindpark_Willenscharen_Brockstedt	1650	67	66	100	111	554663	5985654	-28	-102
WEA 98	WKA_Windfarm_Buergerwindpark_Willenscharen_Brockstedt	1650	67	66	100	112	555264	5985437	-26	-96
WEA 99	WKA_Willenscharen_Brockstedt_GmbH_Co_KG	1650	67	66	100	112	554491	5984374	-28	-102
WEA 100	WKA_Willenscharen_Brockstedt_GmbH_Co_KG	1650	67	66	100	111	554720	5984105	-28	-101
WEA 101	WKA_Willenscharen_Brockstedt_GmbH_Co_KG	1650	67	66	100	112	555005	5984549	-27	-98
WEA 102	WKA_Willenscharen_Brockstedt_GmbH_Co_KG	1650	67	66	100	112	555164	5984960	-26	-97
WEA 103	WKA_Willenscharen_Brockstedt_GmbH_Co_KG	1650	67	66	100	113	555448	5984595	-25	-94
WEA 104	WKA_Willenscharen_Brockstedt_GmbH_Co_KG	1650	67	66	100	113	555669	5984862	-24	-92
WEA 105	WKA_Willenscharen_Brockstedt_GmbH_Co_KG	1650	67	66	100	113	555848	5985168	-24	-91
WEA 106	WKA_Willenscharen_Brockstedt_GmbH_Co_KG	1650	67	66	100	113	555862	5985599	-24	-91
WEA 107	WKA_BWB_GmbH_Windfarm_Willenscharen_Brockstedt	850	74	52	100	111	554923	5985463	-28	-100
WEA 108	WKA_Windpark_Aukrug_GmbH_Co_KG_Windfarm_Willenscharen_Brockstedt	850	74	52	100	112	554652	5984766	-27	-100
WEA 109	WKA_Windpark_Aukrug_GmbH_Co_KG_Windfarm_Willenscharen_Brockstedt	850	74	52	100	113	555429	5985125	-25	-94

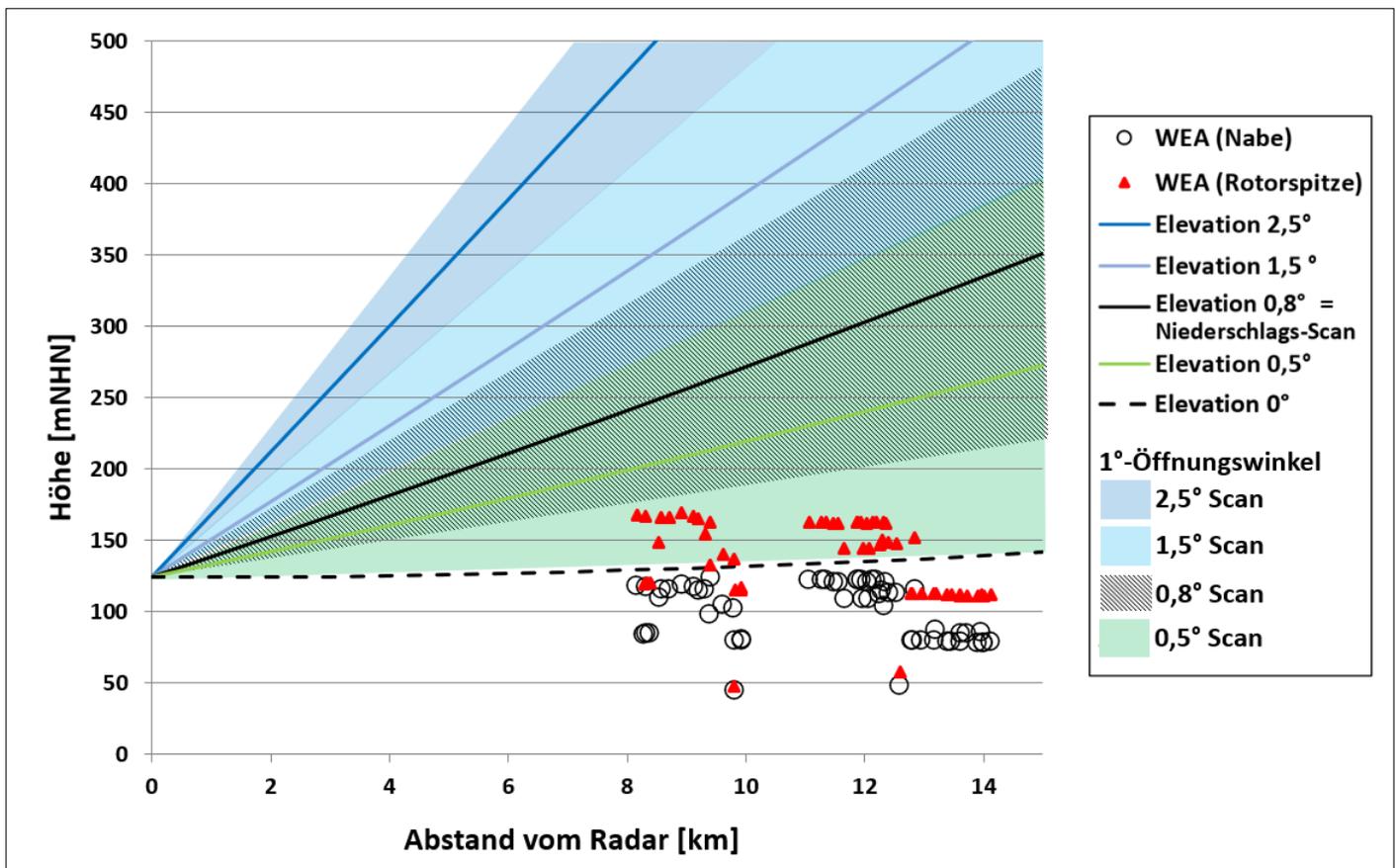


Abb. 3.4.2: Höhe der Bestandsanlagen im Radarstrahl und 1°-Öffnungswinkel der drei untersten Volumenscans und des Niederschlagsscans

Der ausgesandte Radarstrahl wird zusätzlich beeinflusst von den atmosphärischen Bedingungen, die den Ausbreitungspfad des Strahls beeinflussen. So kann es zum Beispiel vorkommen, dass der Radarstrahl von der Atmosphäre wieder zum Boden reflektiert wird und damit Objekte erfasst, die sich am Boden befinden (Anomale Propagation).

3.4.3 Untersuchung der Sichtbarkeit bestehender WKA

Um den Einfluss der WKA auf die Radarmessungen zu bewerten, sind Aussagen zu der Sichtbarkeit der WKA in der Radarmessung hinsichtlich

- Intensität der Messwerte
- zeitlicher Ausdehnung der Sichtbarkeit
- räumlicher Ausdehnung der Sichtbarkeit

notwendig.

Auf Basis der bestehenden Anlagen im Umkreis von 15 km um den Radarstandort Boostedt können diese Parameter quantifiziert werden.

3.4.3.1 Intensität und zeitliche Ausdehnung

Eine Zuordnung der Intensität der Sichtbarkeit zu einzelnen WKA ist nur in den hochaufgelösten 250 m-Datensätzen ohne POLARA-Korrektur möglich. Bei einer niedrigeren räumlichen Auflösung (1 km) können beispielsweise mehrere WKA innerhalb eines Radarpixels liegen oder dieses zumindest durch ihre räumliche Nähe beeinflussen.

Aus diesem Grund wurden sowohl der Niederschlagsscan mit einer Elevation von $0,8^\circ$ (Strahlbereich $0,3^\circ - 1,3^\circ$) und einem Jahr Daten sowie der unterste Volumenscan mit einer Elevation von $0,5^\circ$ (Strahlbereich $0,0^\circ - 1,0^\circ$) und einem Monat Daten anlagenspezifisch ausgewertet.

An den Beispielen der WPs Hardebek-Hasenkrug (Abb. 3.4.3.1a) und Wiesental (Abb. 3.4.3.1b) lässt sich anhand der Histogramme der Reflektivität (Anzahl der Messwerte pro $0,5$ dBZ Schrittweite, Werte $> 63,5$ dBZ zusammenfassend aufsummiert) erkennen, dass die einzelnen WKA eine deutliche Störwirkung haben, wie der Vergleich mit einem ungestörten Pixel (Anteil der 0 dBZ Pixel in dem Datensatz ca. 90 %) außerhalb des Einflussbereiches der WKA zeigt.

Die Reflektivitätswerte im WP Hardebek-Hasenkrug erreichen über 60 dBZ und die Intensität der Sichtbarkeit steigt mit Anlagenhöhe im Radarstrahl.

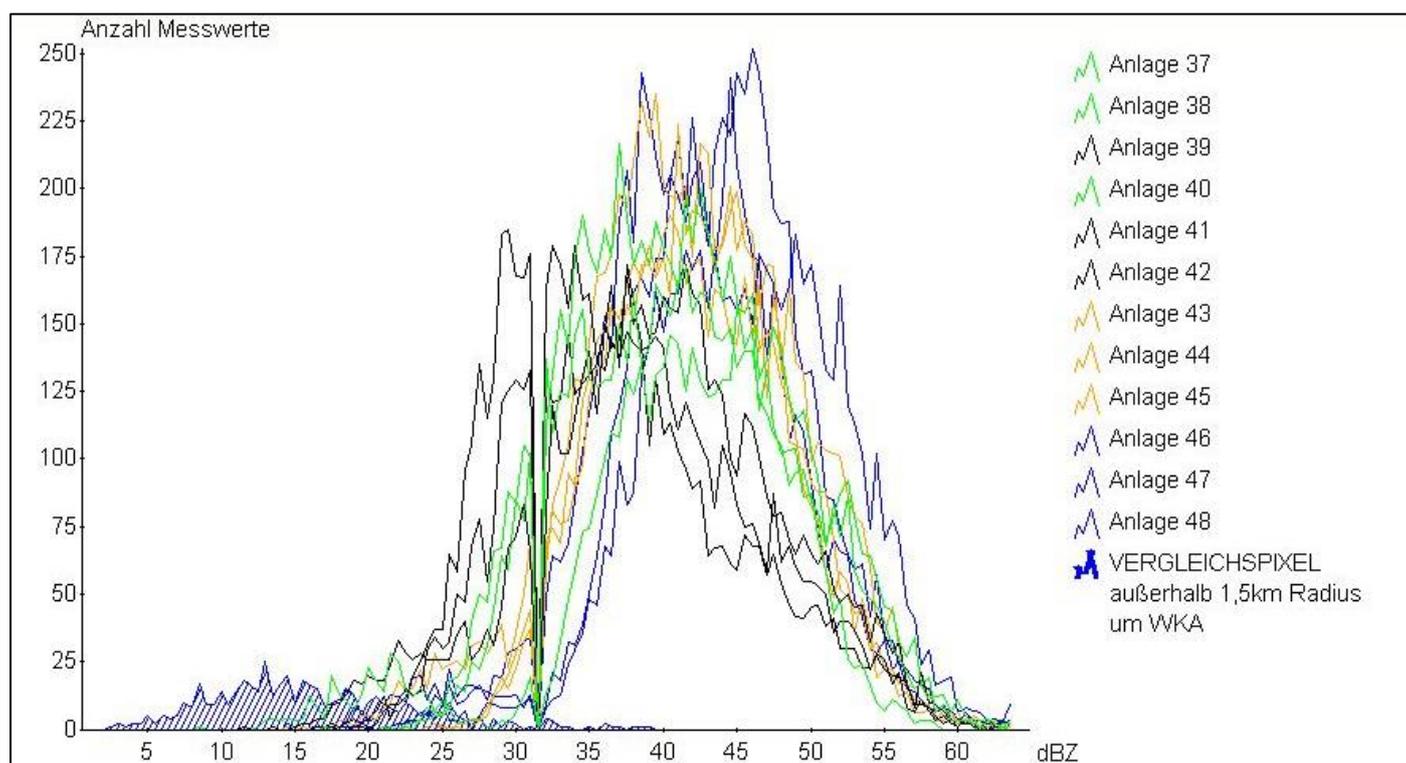


Abb. 3.4.3.1a: Histogramm der Reflektivität für Radarpixel mit WKA im WP Hasenkrug-Hardebek (Volumendaten; $0,5^\circ$; $250 \text{ m} \times 1^\circ$)

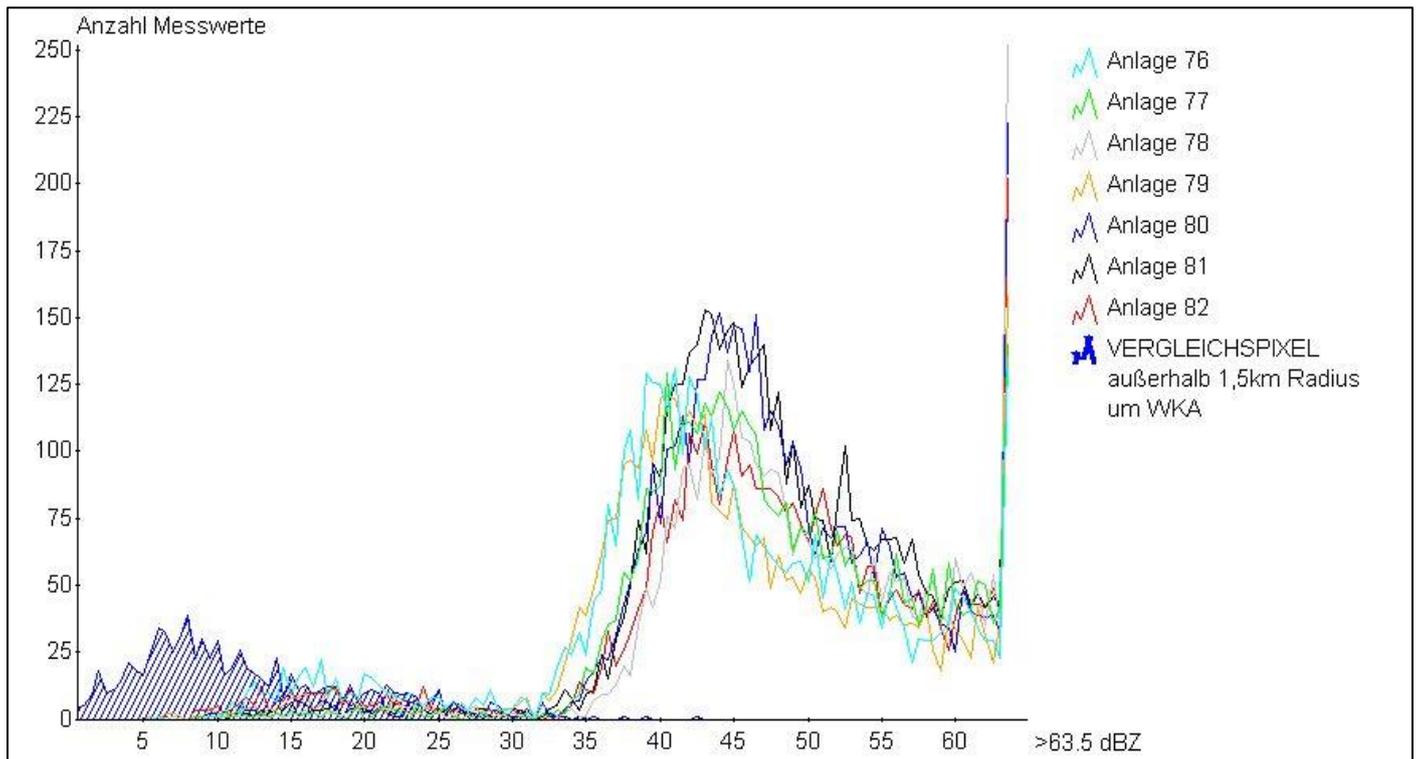


Abb. 3.4.3.1b: Histogramm der Reflektivität für Radarpixel mit WKA im WP Wiesental (Volumendaten; $0,5^\circ$; $250 \text{ m} \times 1^\circ$)

Betrachtet man den Windpark Wiesental mit den geringfügig höheren und näher am Radar stehenden WKA, verschiebt sich die Anzahl der Messwerte deutlich in den höheren Reflektivitätsbereich, Werte $< 35 \text{ dBZ}$ kommen nur noch selten vor.

Um die zeitliche Ausdehnung zu erfassen, wurde jeder WKA ein Radarpixel zugeordnet und hinsichtlich der Überschreitungshäufigkeit der Reflektivitätswerte 35 dBZ bzw. 45 dBZ (beispielhaft für konvektiven Niederschlag) ausgewertet. Bei WKA, die auf der Grenze zweier Pixel liegen, wurde das Pixel mit der höherem Störanteil ausgewählt. Dabei wurde der prozentuale Anteil der Überschreitungen an den gesamten Messungen in Abhängigkeit zur Anlagenhöhe der WKA im Radarstrahl in Abb. 3.4.3.1c und Abb. 3.4.3.1d dargestellt.

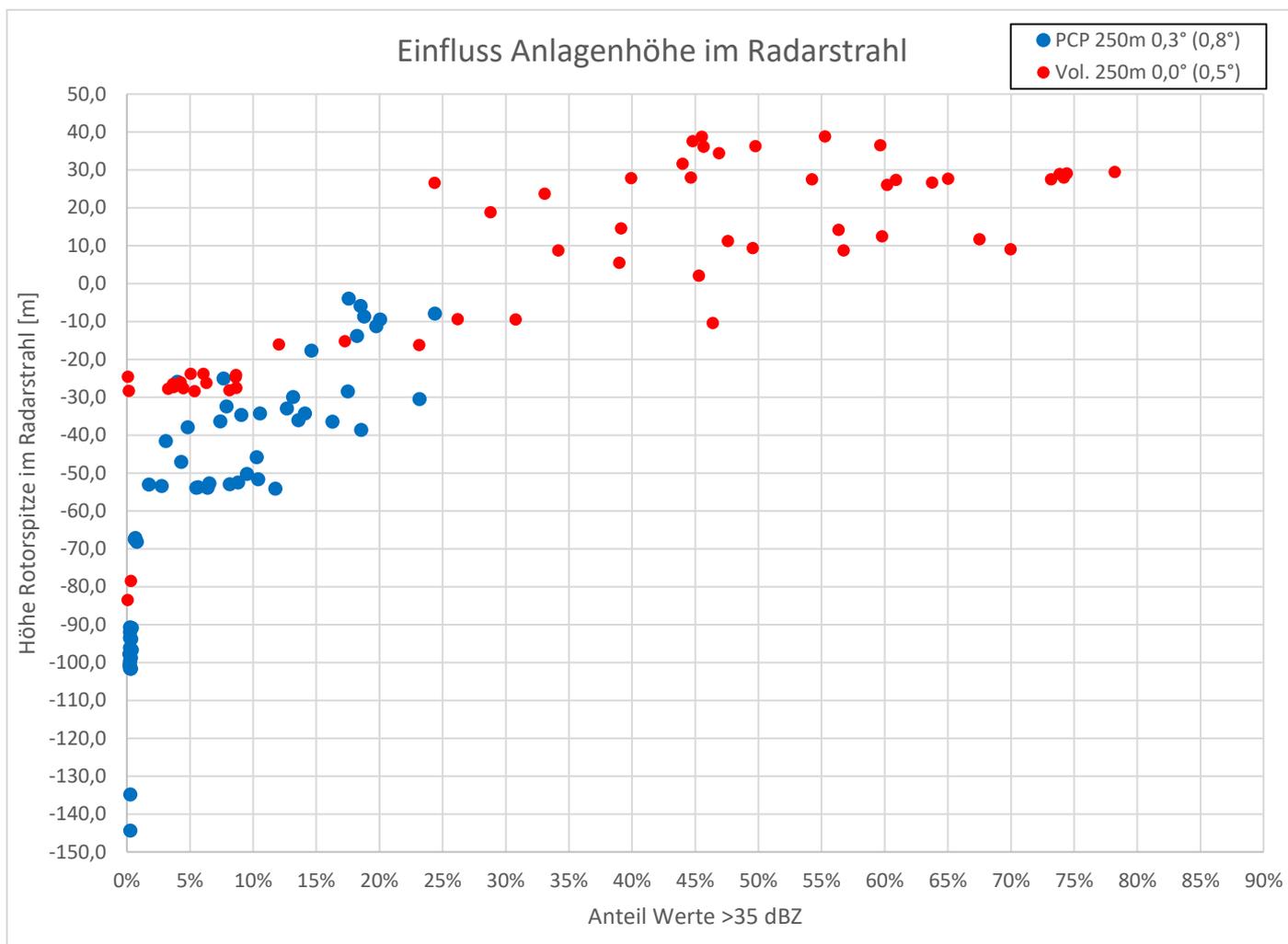


Abb. 3.4.3.1c: Anlagenhöhe im Radarstrahl für Niederschlagsscan (0,8°) und Volumenscan (0,5°) für Reflektivitätswerte >35 dBZ

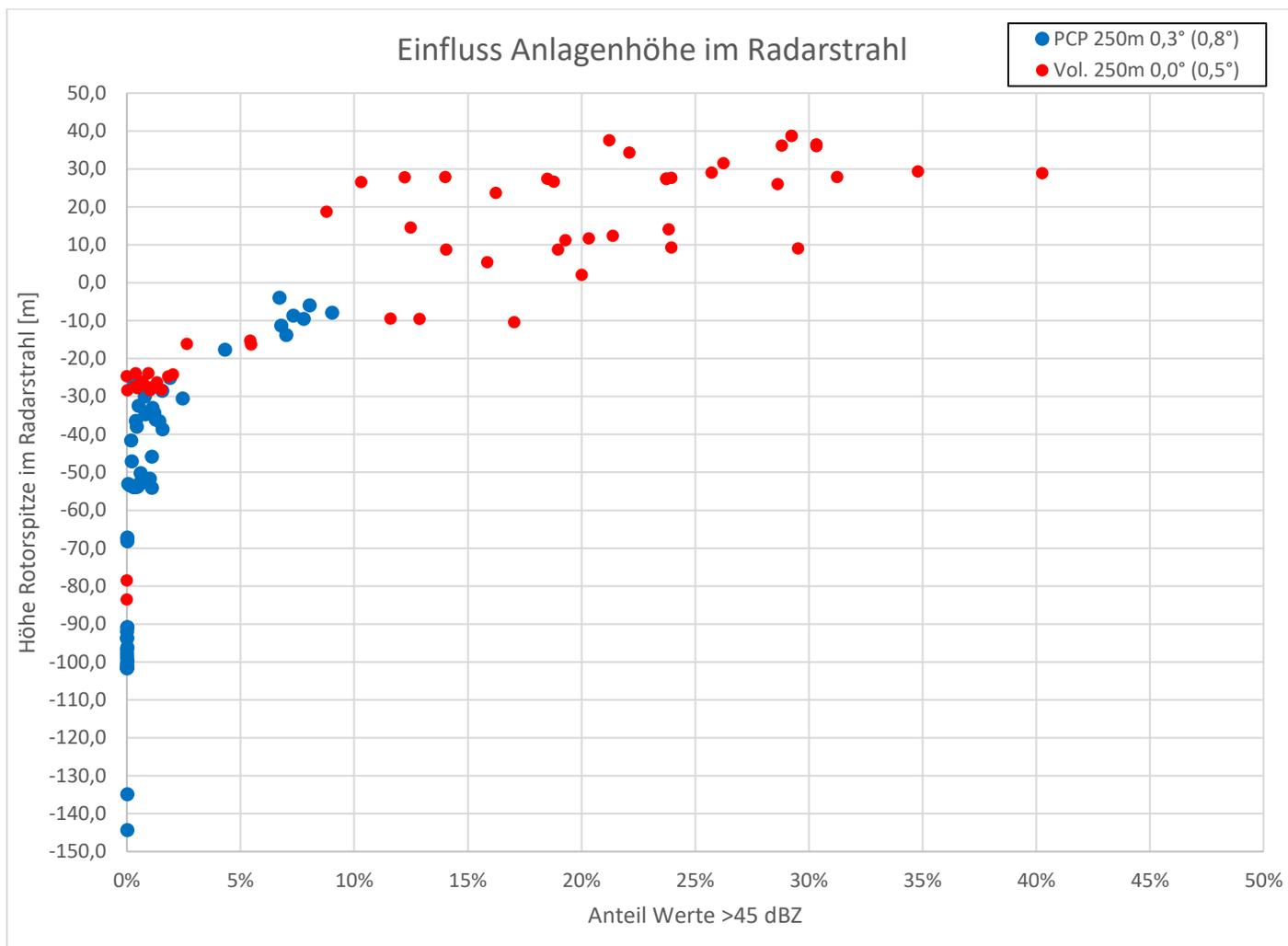


Abb. 3.4.3.1d: Anlagenhöhe im Radarstrahl für Niederschlagsscan (0,8°) und Volumenscan (0,5°) für Reflektivitätswerte >45 dBZ

Wie sich aus den beiden Abbildungen erkennen lässt, wird ein Reflektivitätswert von 35 dBZ an einzelnen WKA in bis zu 80 % der Zeit überschritten. Bei einem Wert 45 dBZ liegt der höchste Anteil bei ca. 40 %.

Nur Anlagen, die ca. 70 Meter unterhalb des Radarstrahles liegen, weisen keine anomal erhöhten Werte der Reflektivität auf (zeitlicher Anteil <0,5 %).

Eine Abhängigkeit im Hinblick auf die Anlagenhöhe im Radarstrahl ist in Abb. 3.4.3.1c und Abb. 3.4.3.1d zu erkennen. Diese hängt allerdings ab von:

- der Lage der WKA innerhalb des Pixels (mittig oder Randlage)
- dem Einfluss der benachbarten WKA auf dieses Pixel
- Abschaltungen der WKA und
- anderen Faktoren (atmosphärische Ausbreitungsbedingungen für den Radarstrahl, Ausrichtung der WKA zum Radar etc.)

Die Drehzahl bzw. die Leistung der WKA haben keinen relevanten Einfluss auf die Intensität der Sichtbarkeit der WKA im Niederschlagsscan (Abb. 3.4.3.1e). Allerdings beeinflussen die untersuchten, abgeschalteten Anlagen, deren Nabe unterhalb des Radarstrahles liegt, die Reflektivitätsmessung nicht mehr so stark.

Das hat dazu geführt, dass für manche WKA eine Abschaltautomatik eingerichtet wurde: Wenn der DWD eine amtliche Unwetterwarnung vor heftigem Starkregen und schwerem Gewitter für den betroffenen Landkreis und die Nachbarlandkreise ausspricht, wird die WKA so lange abgeschaltet (Drehzahl auf Null gesetzt), wie die Warnung Bestand hat. Diese Warnung wird in der Regel mehrere Stunden vor einer Gefahrensituation auf Basis der numerischen Wettervorhersage ausgesprochen.

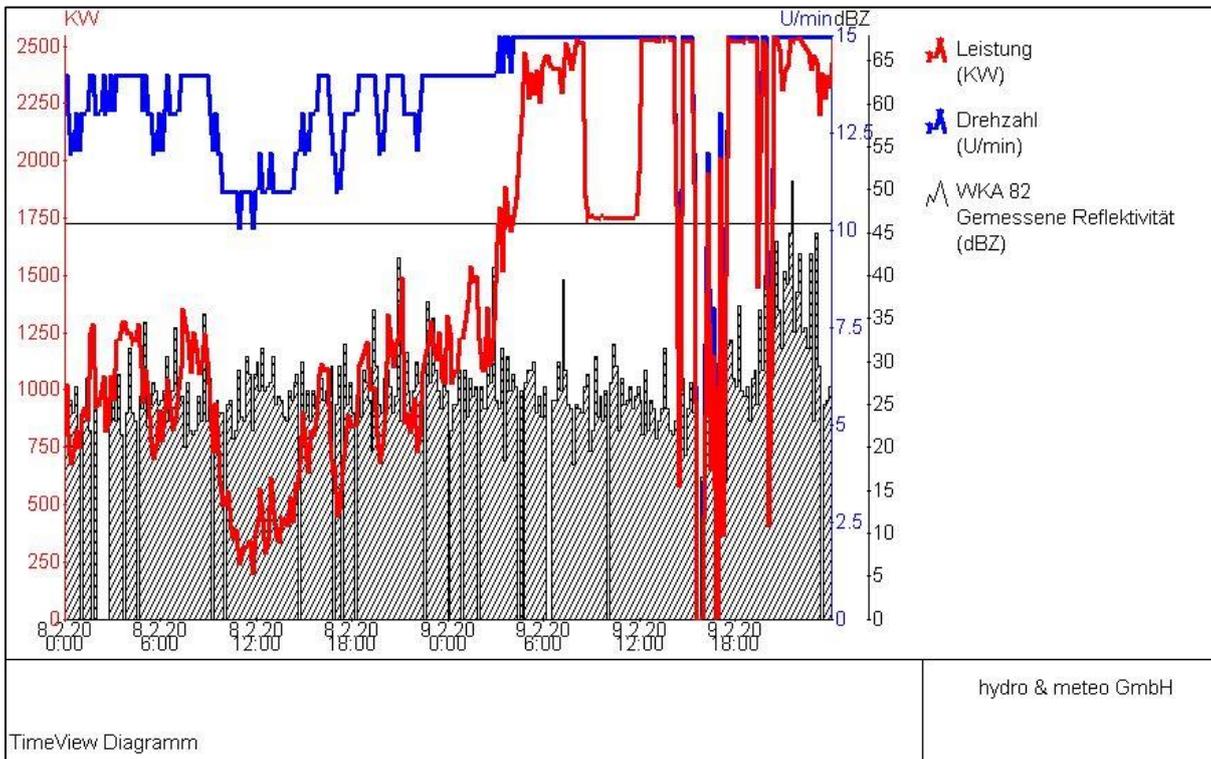


Abb. 3.4.3.1e: Beispiel für Betriebsdaten der WKA 82 im Vergleich zur gemessenen Reflektivität

3.4.3.2 Räumliche Ausdehnung

Die räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA ist u.a. abhängig von:

- der Lage der WKA innerhalb des betroffenen Radarpixels
- der räumlichen Auflösung und der Lage der Radarpixel
- der Naben- bzw. Gesamthöhe der WKA
- der Rotordurchmesser der WKA
- der Überlagerung von Effekten von benachbarten WKA.

Durch Nebenkeulen auftretende Effekte wirken sich insbesondere bei niedrigen dBZ-Werten (>5 dBZ) aus, so dass sich in diesem Bereich der maximale Einflussbereich ermitteln lässt, da es zu Überlagerungseffekten benachbarter WKA kommen kann.

Bei Betrachtung der für konvektiven Niederschlag relevanten Werte (>35 dBZ bzw. >45 dBZ) ist der Einflussbereich reduziert, da in diesem Intensitätsbereich die Überlagerungseffekte durch Nebenkeulen von untergeordneter Bedeutung sind.

Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Anlagen und ihrer spezifischen Kennwerte findet bei der Ermittlung der räumlichen Ausdehnung nicht statt, da hier insbesondere die Einflusszone von Windparks und ihre Abgrenzung zueinander untersucht werden soll.

Die höchste Sichtbarkeit von WKA tritt bei dem untersten Volumenscan (Elevation 0,5°) auf. In den nachfolgenden Abbildungen sind der prozentuale Anteil der erhöhten Messwerte oberhalb der Werte >5 dBZ (Abb. 3.4.3.2a), >35 dBZ (Abb. 3.4.3.2b) und >45 dBZ (Abb. 3.4.3.2c) aller untersuchten Radareinzelbilder dargestellt. Herangezogen werden hier die seit dem 25.3.2021 existierenden Volumendaten mit der hohen räumlichen Auflösung von 250 m. Je höher der betrachtete Wert der Reflektivität gesetzt wird, desto geringer ist der Einflussbereich der WKA.

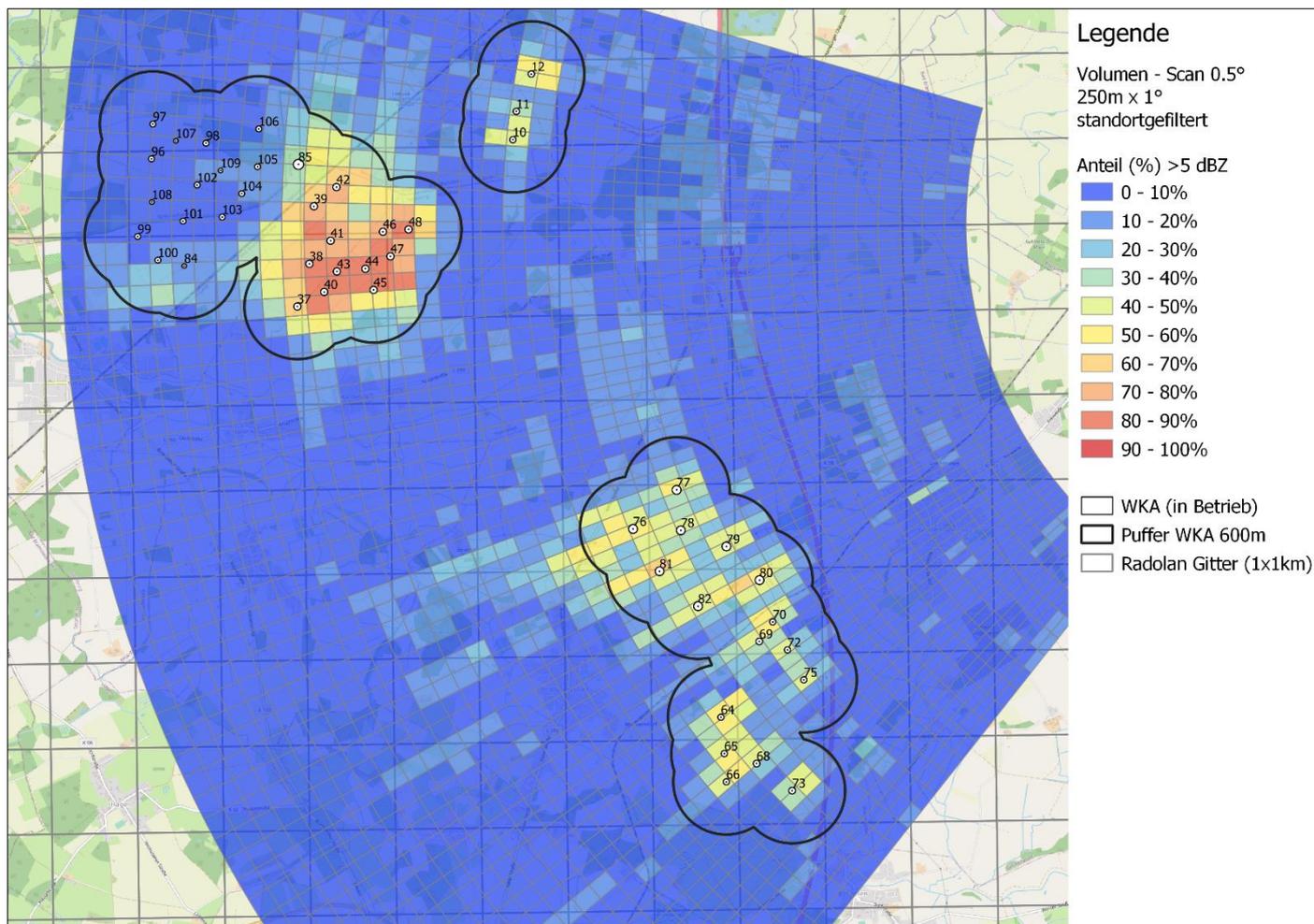


Abb. 3.4.3.2a: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Volumen-Scan: 0,5°; 250 m; standortgefiltert; > 5 dBZ)

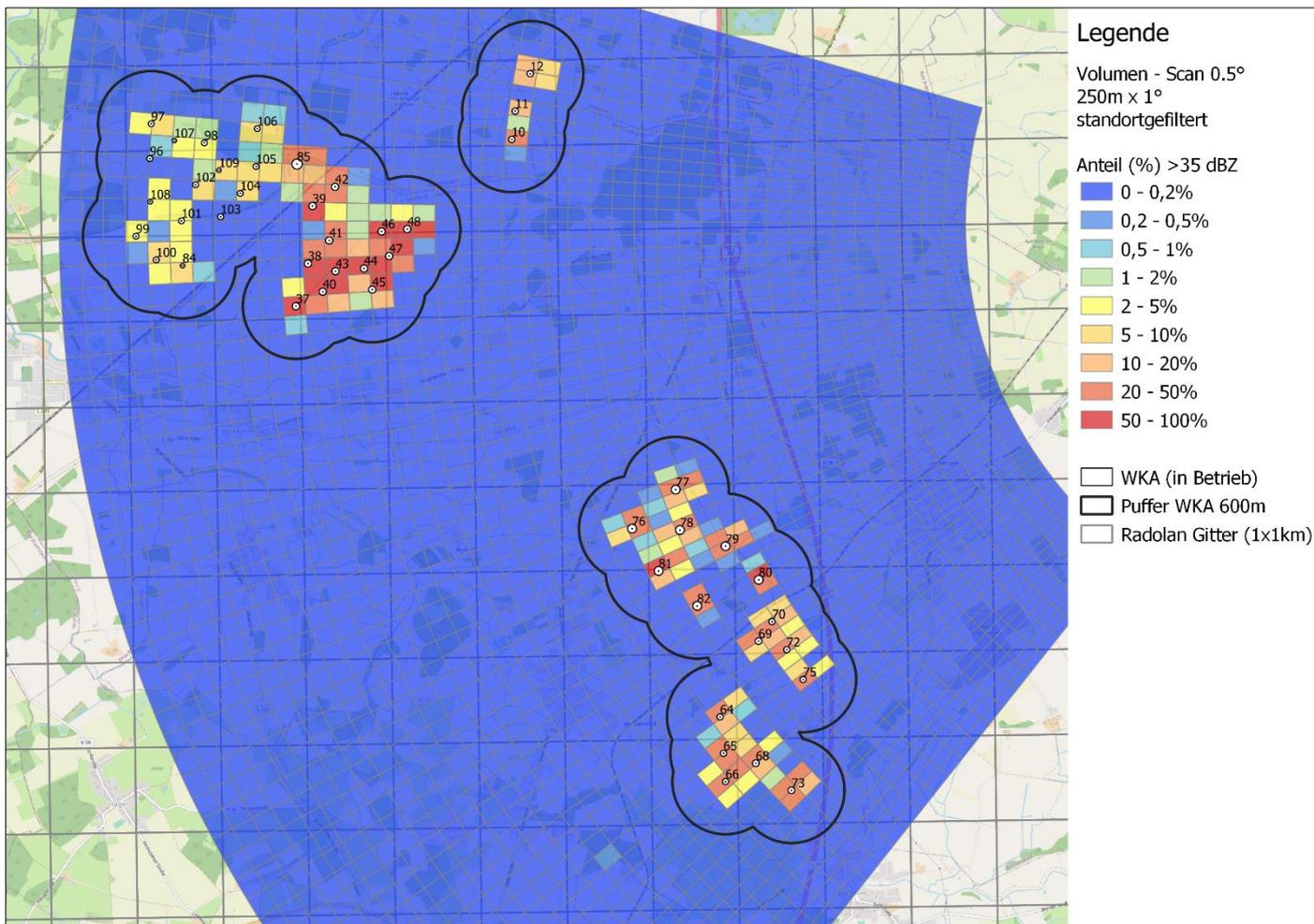


Abb. 3.4.3.2b: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Volumen-Scan: 0,5°; 250 m; standortgefiltert; > 35 dBZ)

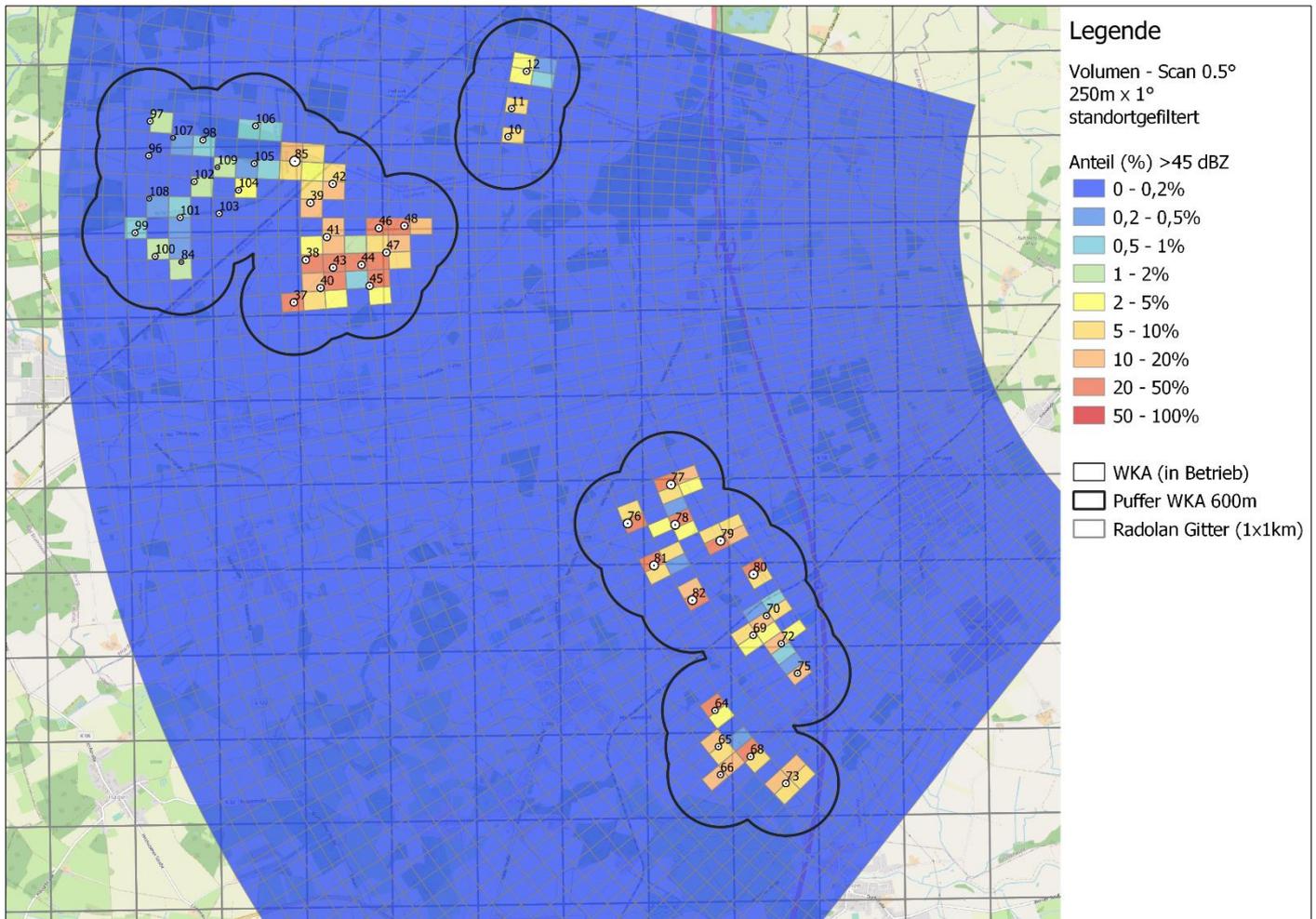


Abb. 3.4.3.2c: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Volumen-Scan: 0,5°; 250 m; standortgefiltert; > 45 dBZ)

Mit höherer Elevation nimmt die Sichtbarkeit der WKA ab, so dass im Niederschlags-Scan ($0,8^\circ$) der Anteil der erhöhten Messwerte an der Gesamtheit der untersuchten Bilder zurückgeht (Abb. 3.4.3.2d) und ab dem Volumen-Scan von $1,5^\circ$ nur noch wenige erhöhte Messwerte im unteren Reflektivitätsbereich (Abb. 3.4.3.2e) durch Nebenkeulen auftreten.

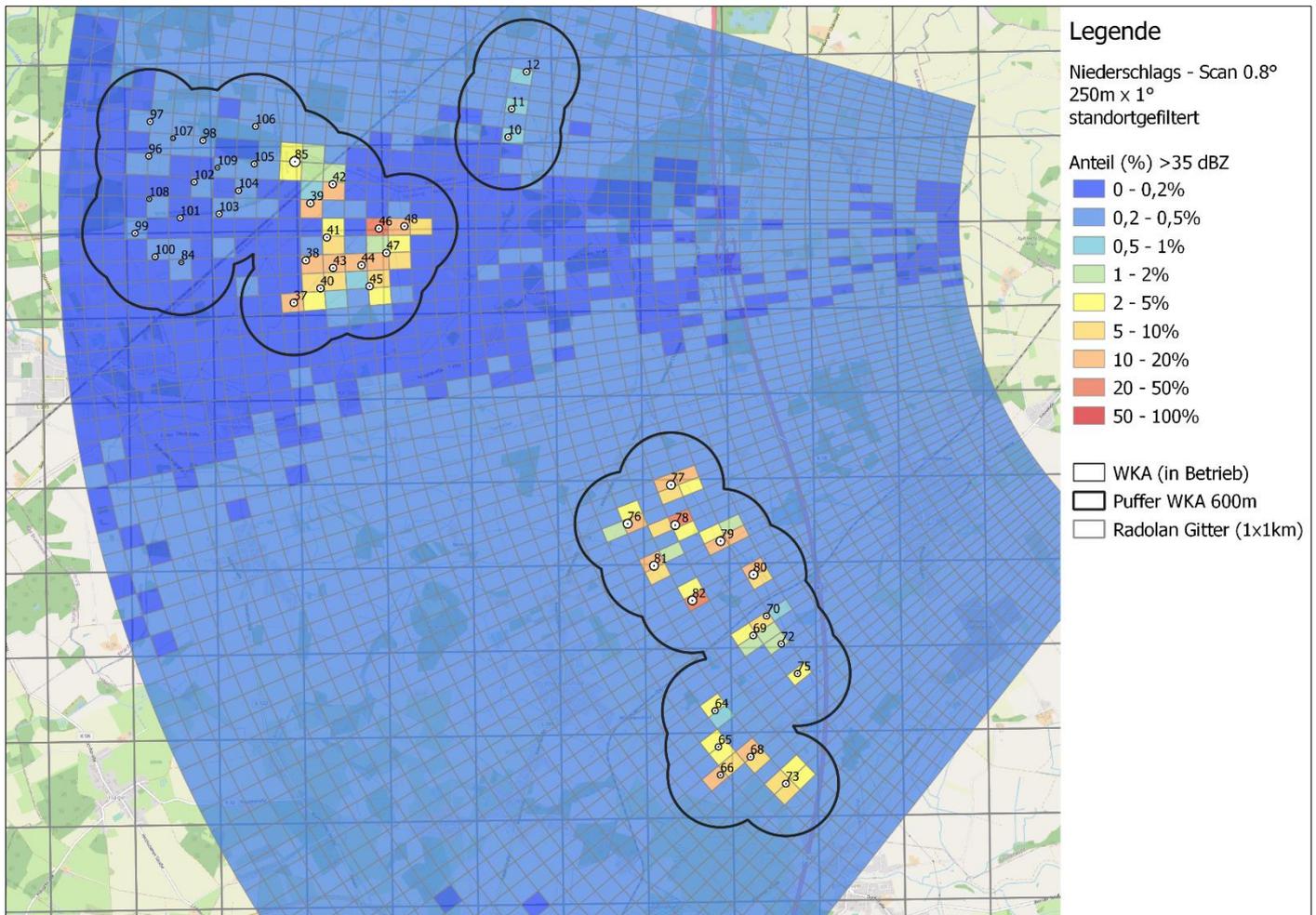


Abb. 3.4.3.2d: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Niederschlags-Scan: $0,8^\circ$; 250 m; standortgefiltert; > 35 dBZ)

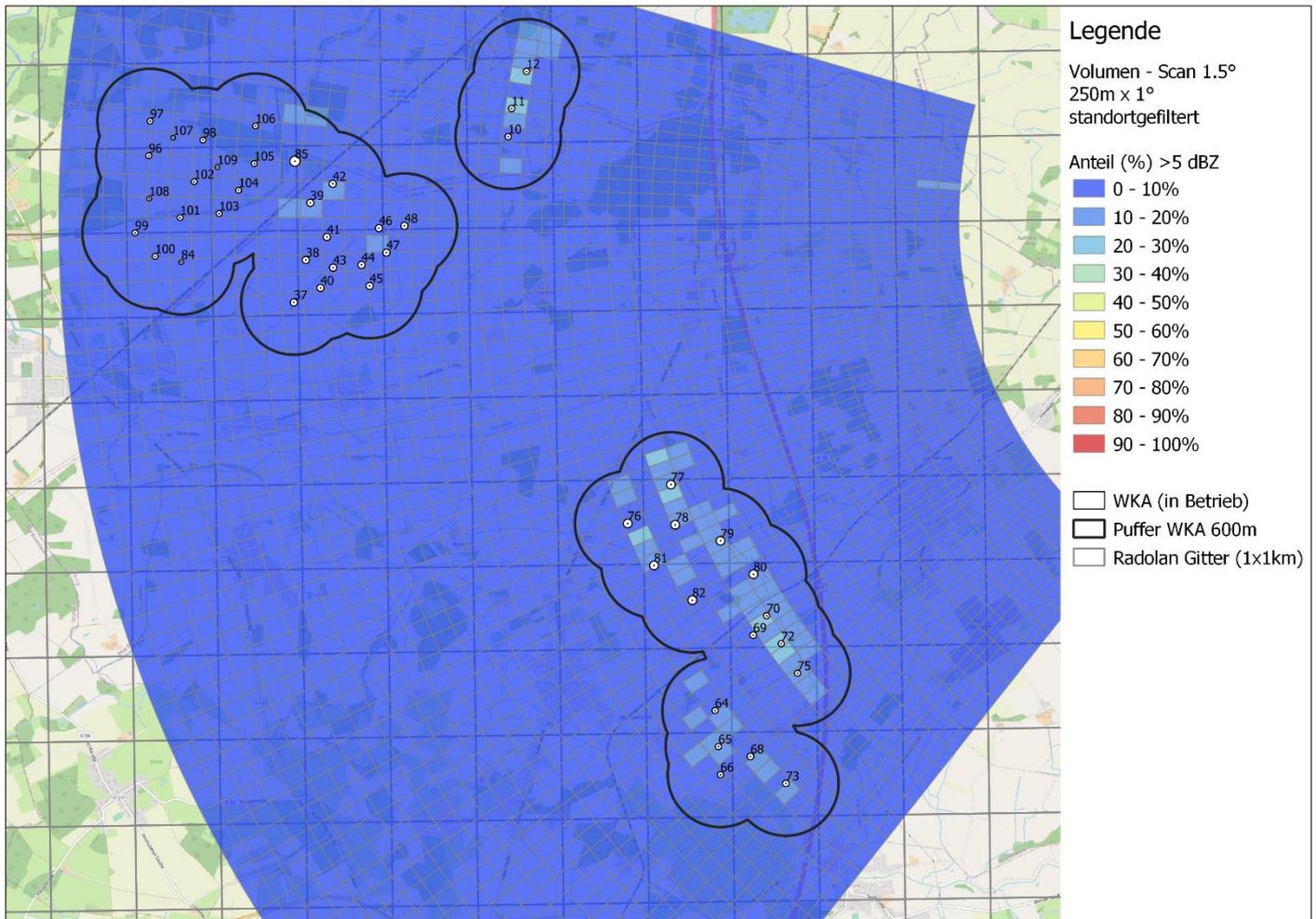


Abb. 3.4.3.2e: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Volumen-Scan: 1,5°; 250 m; standortgefiltert; > 5 dBZ)

Bei Datensätzen mit POLARA-Korrektur werden durch WKA beeinflusste Pixel teilweise korrigiert, aber zu einem erheblichen Teil auch auf 0 dBZ gesetzt. In Teilbereichen liegt der 0 dBZ Anteil bei 100 %, wie aus Abb. 3.4.3.2f deutlich wird. Somit liegen in diesem Bereich keine aussagekräftigen Messwerte zur Reflektivität mehr vor. Zu hohe Reflektivitätswerte werden allerdings durch die POLARA-Korrektur weitgehend beseitigt.

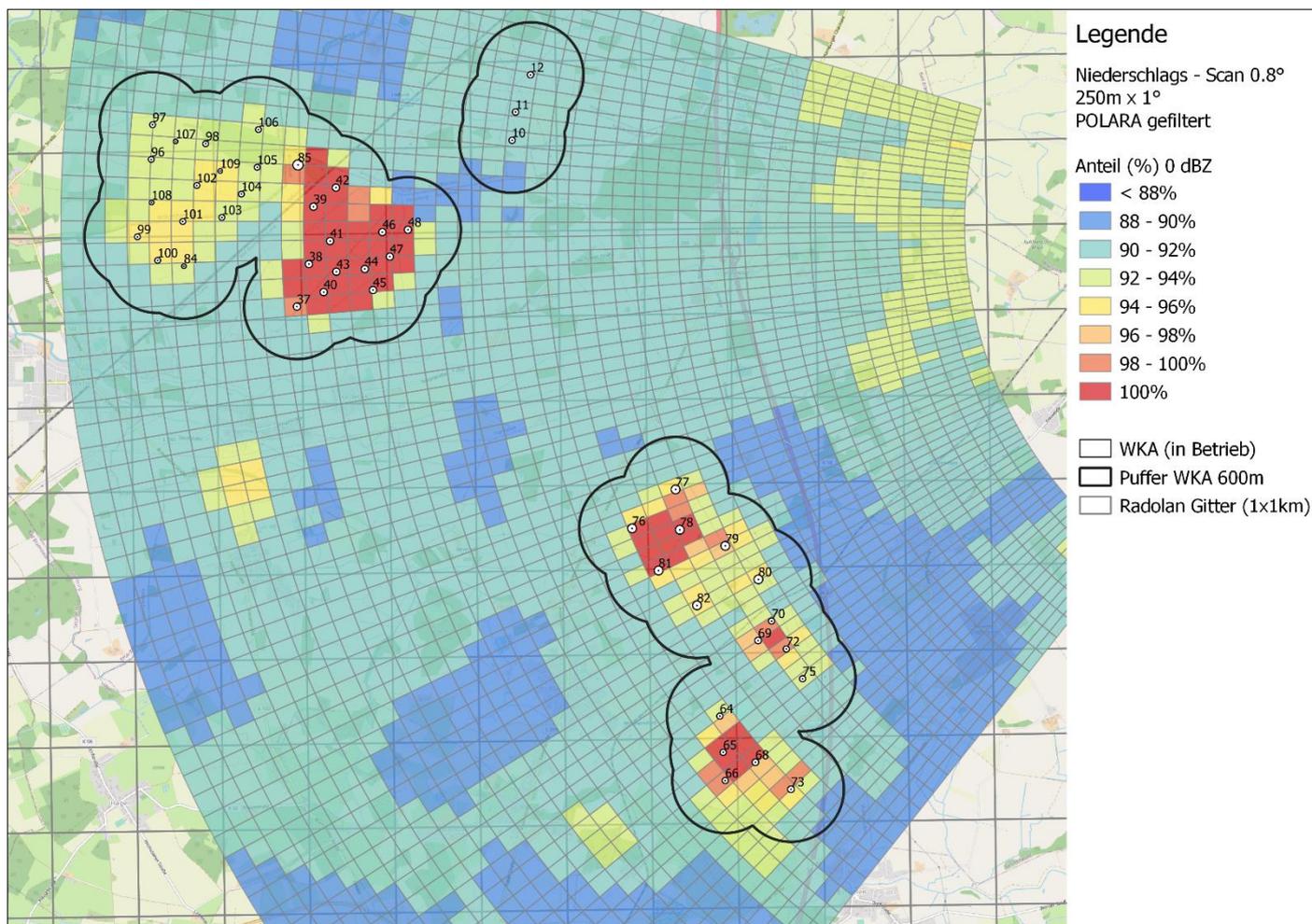


Abb. 3.4.3.2f: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Niederschlags-Scan: 0,8°; 250 m; POLARA-gefiltert; 0 dBZ)

Bei den Radardaten mit einer Pixelgröße $1^\circ \times 1$ km ergibt sich ein anderes Bild hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA. Durch das größere Radarpixel ergibt sich zumindest in radialer Richtung eine deutlich vergrößerte Einflusszone der WKA. Dies lässt sich deutlich an den untersten Volumenscan des standortgefilterten Datensatz aus den Abb. 3.4.3.2g und 3.4.3.2h und auch im POLARA-gel filterten Datensatz in Abb. 3.4.3.2i erkennen. Seit dem 25.03.2021 wurden in dem Volumenscan die Auflösung von $1^\circ \times 1$ km auf $1^\circ \times 250$ m geändert.

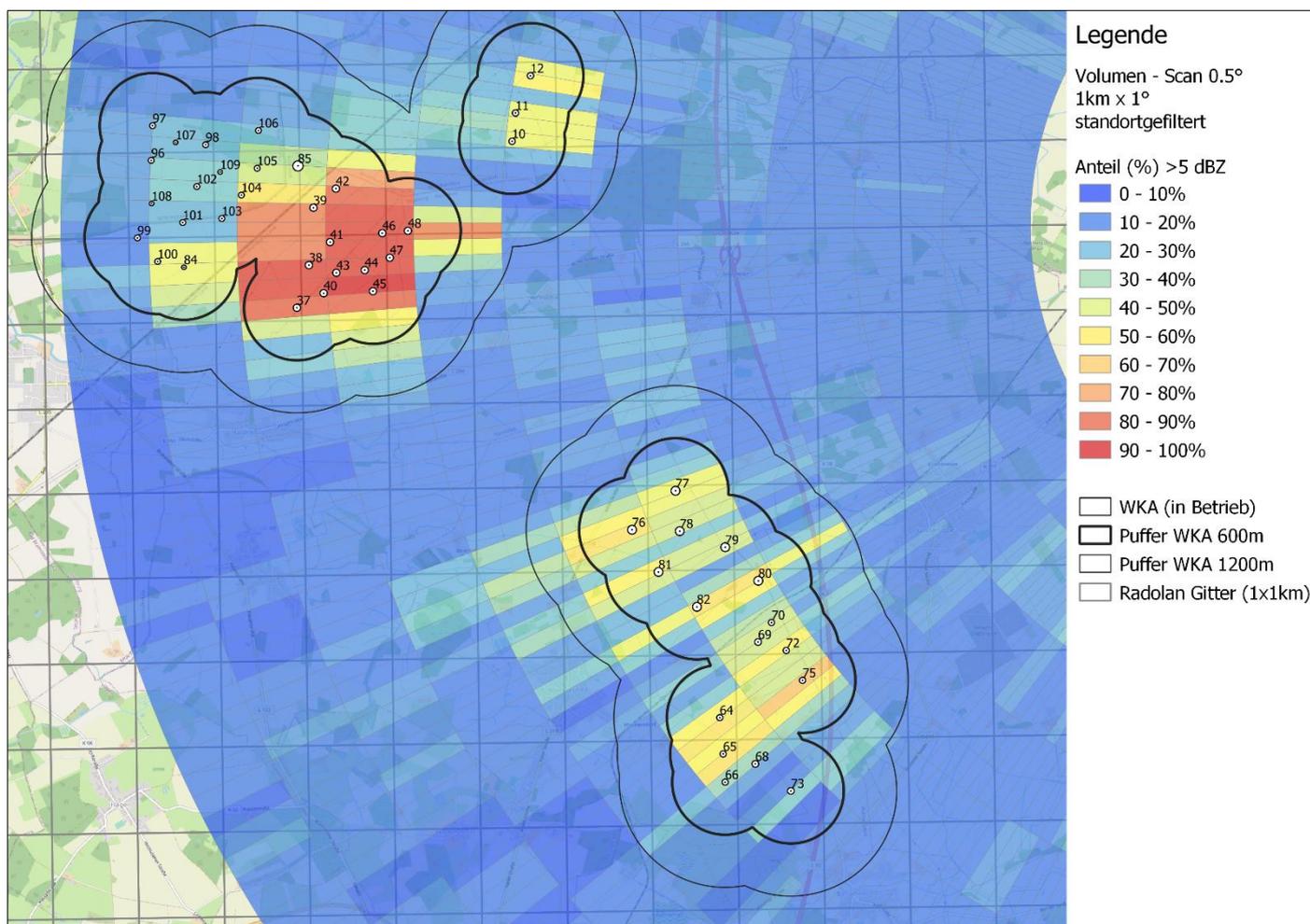


Abb. 3.4.3.2g: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Volumen-Scan: $0,5^\circ$; 1 km; standortgefiltert; > 5 dBZ)

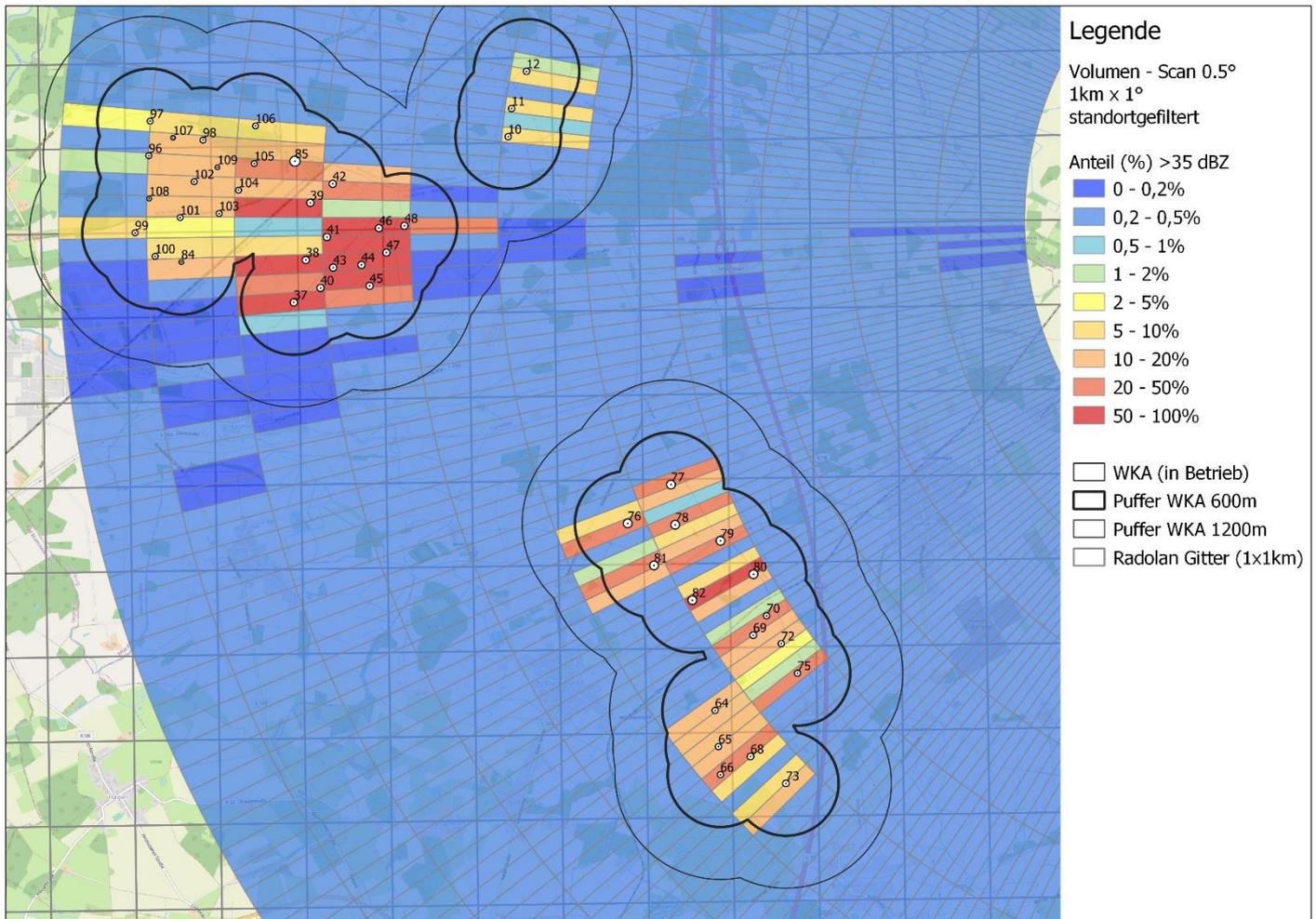


Abb. 3.4.3.2h: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Volumen-Scan: 0,5°; 1 km; standortgefiltert; > 35 dBZ)

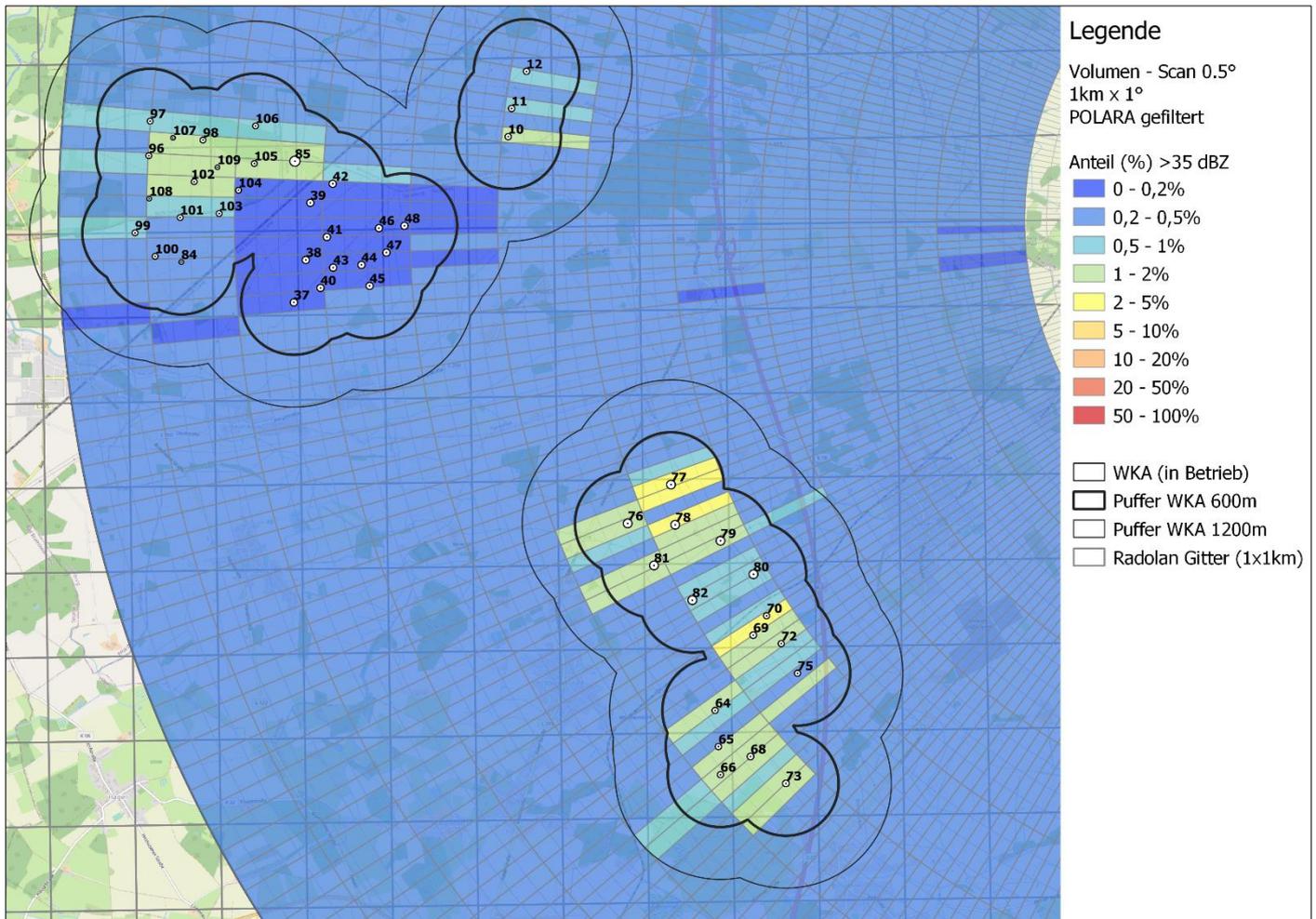


Abb. 3.4.3.2i: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Volumen-Scan: 0,5°; 1 km; POLARA gefiltert; >35 dBZ)

Ein vergleichbares Bild bei den Auswertungen der räumlichen Ausdehnung liefert auch der Windpark Altbokhorst wie beispielhaft aus Abb. 3.4.3.2j deutlich wird.

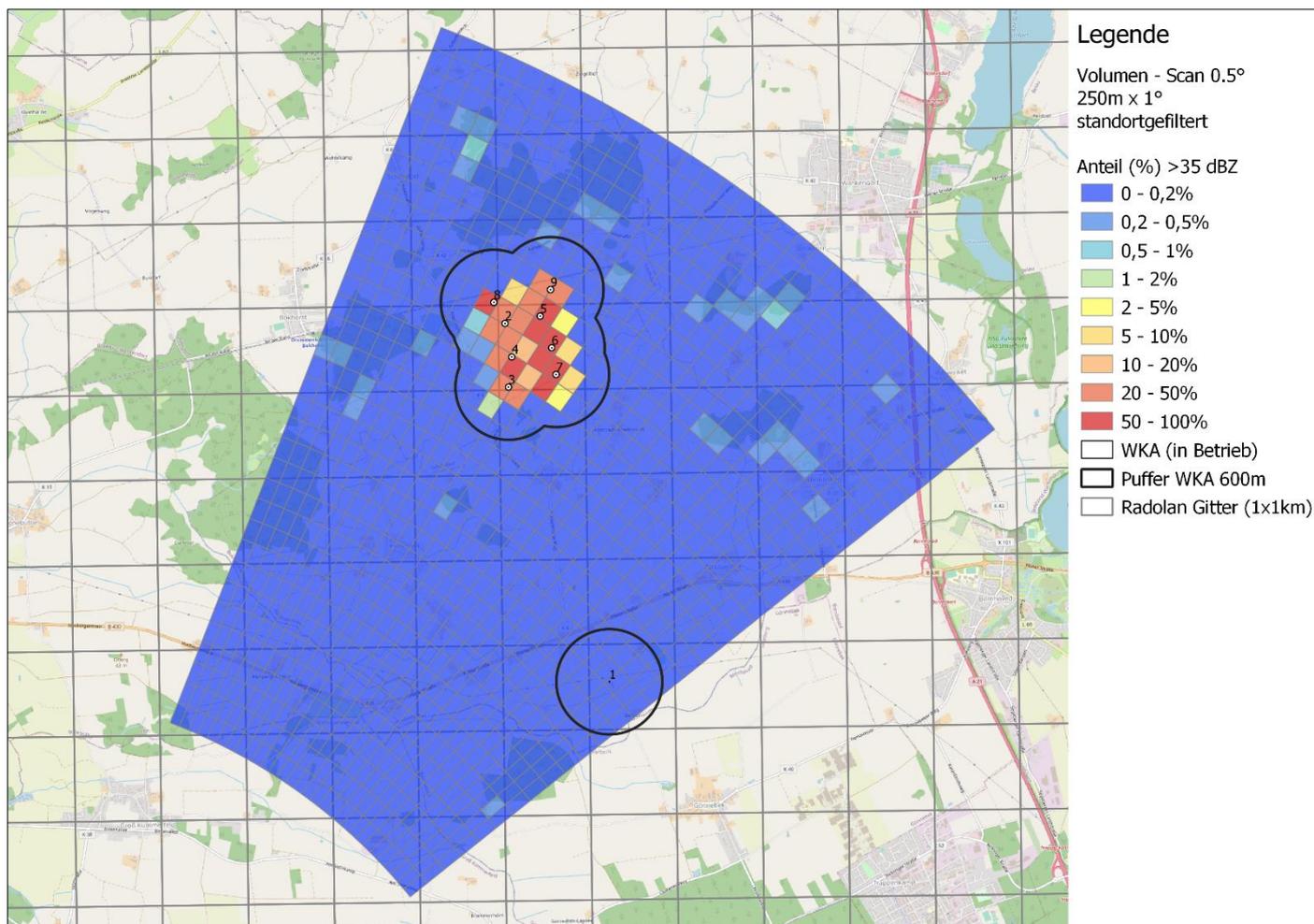


Abb. 3.4.3.2j: räumliche Ausdehnung der Sichtbarkeit der WKA (Volumen-Scan: 0,5°; 250 m; standortgefiltert; > 35 dBZ; Altbokhorst)

Der maximale Einflussbereich der WKA ist für die ausgewerteten Datensätze in Tab. 3.4.3.2 in Abhängigkeit der Höhe der Messwerte dargestellt.

Tab. 3.4.3.2: maximaler Einflussbereich der WKA in Abhängigkeit der Höhe der Messwerte

Maximaler Einflussbereich um WKA			0dBZ	>5 dBZ	>35 dBZ	> 45dBZ	
Niederschlagsscan	standortgefiltert	250 m x 1°	0,8°	-	600 m	500 m	400 m
Niederschlagsscan	POLARA	250 m x 1°	0,8°	700 m	-	500 m	500 m
Volumenscan	standortgefiltert	250 m x 1°	0,5°	-	1200 m	600 m	500 m
Volumenscan	standortgefiltert	250 m x 1°	1,5°	-	700 m	keine	keine
Volumenscan	standortgefiltert	250 m x 1°	2,5°	-	700 m	nicht auswertbar	
Volumenscan	standortgefiltert	1000 m x 1°	0,5°	-	1200 m	1200 m	1100 m
Volumenscan	standortgefiltert	1000 m x 1°	1,5°	-	1000 m	keine	keine
Volumenscan	standortgefiltert	1000 m x 1°	2,5°	-	1000 m	keine	keine
Volumenscan	POLARA	1000 m x 1°	0,5°	1300 m	-	1500 m	1500 m
Volumenscan	POLARA	1000 m x 1°	1,5°	1000 m	-	keine	keine
Volumenscan	POLARA	1000 m x 1°	2,5°	1000 m	-	keine	keine

Aus dem maximalen Einflussbereich der WKA auf die untersuchten Radarbasisprodukte (siehe Tab. 3.4.3.2) lässt sich ein Pufferbereich um die WKA ableiten. Bei 250-m-Daten ist der Pufferbereich von 600 m notwendig, um den Bereich mit Reflektivitätswerten im warnrelevanten Bereich von der Umgebung sicher abzugrenzen und Überlagerungseffekte mit weiteren WKA in diesem Bereich auszuschließen. Eine Betrachtung ausschließlich der Umgebungspixel (Neunerumgebung) kann den maximalen Einflussbereich der WKA nicht vollständig abdecken. In den Abb. 3.4.3.2a-j sind zur Veranschaulichung die Pufferbereiche 600 m und bei 1-km-Daten auch von 1200 m integriert.

Für Neuanlagen (Anlagenhöhe > 150 m) ist zu erwarten, dass (abhängig von Standort und Lage der Radarpixel) im ungünstigsten Fall sechs hochaufgelöste Radarpixel direkt von Rotor und Nabe betroffen sein können sowie weitere Umgebungspixel durch Mehrfachreflektionen, Nebenkeulen und Überlagerungseffekte mit Nachbar-WKA. Die räumliche Sichtbarkeit von Reflektivitätswerten im warnrelevanten Bereich wird sich dadurch nur geringfügig vergrößern, so dass der festgelegte Pufferbereich von 600 m weiterhin als ausreichend angesehen wird. In vertikaler Ausrichtung ist allerdings davon auszugehen, dass diese WKA weiter in den Radarstrahl reichen und somit in weiteren Elevationen sichtbar werden, sofern die Rotorspitze nicht 70 m unterhalb der jeweiligen Elevation liegt (siehe Abschnitt 3.4.3.1).

Eine optimierte Aufstellung von WKA in einer Linie ist mit den vorliegenden hochauflösenden Daten in der Regel nicht sinnvoll. Sie könnten höchstens in Fällen interessant sein, bei denen sich WKA hinter anderen statischen Objekten (z.B. Hochhäusern) verbergen¹¹. Das ist im Untersuchungsgebiet allerdings nicht der Fall.

3.5 Bewertung der Ergebnisse

Die Sichtbarkeit der WKA im Radarstrahl (siehe Abschnitt 3.4.3) lässt sich anhand der untersuchten Reflektivitäts-Datensätze in den standort-gefilterten Daten eindeutig nachweisen und auch in den mit POLARA gefilterten Datensätzen sind diese Bereiche von WKA stark beeinflusst und eindeutig nachweisbar. Bei den Standort-gefilterten Daten sind WKA als hohe Reflektivitäten und bei POLARA-gefilterten Daten als Nullwerte erkennbar.

Insbesondere die direkt durch den Rotor der WKA beeinflussten Pixel weisen hohe Intensitätswerte auf, die ohne Korrektur potenziell zu Überwarnungen führen können und mit POLARA-Korrektur zu Unterwarnungen. Der Einfluss der WKA weist aber über diese direkt betroffenen Pixel sowohl in der Höhe wie auch in der räumlichen Ausdehnung hinaus und es kann beispielsweise auch zu Überlagerungseffekten zwischen benachbarten WKA kommen. Da die Weiterverarbeitung in den verschiedenen Produkten des DWD (siehe Abschnitt 3.3) auf POLARA-korrigierten Daten basiert, können vor allem Unterwarnungen im Bereich des Windparks und der angrenzenden Orte auftreten.

Aussagen, ob und inwieweit schadensträchtige Ereignisse in dem Bereich der Windparks und seiner Umgebung tatsächlich aufgetreten sind, lassen sich auf Basis der vorhandenen Datensätze nicht treffen, da die Auftretenshäufigkeit solcher Ereignisse bei einmal in 10 Jahren liegt, wie eine Untersuchung von Schadensmeldungen mit Bezug zu Niederschlagsmengen gezeigt hat²⁴. Aus diesem Grund ist eine Belegbarkeit von tatsächlich auf Windparks basierenden Unterwarnungen im Untersuchungsbereich nicht möglich.

Ist die Messung der Basisdaten in der Fläche so sehr beeinträchtigt, dass potenziell schadensverursachende, konvektive Zellen nicht erkannt und verfolgt werden können, so werden hierauf aufbauende, weiterverarbeitende Produkte in ihrer Aufgabe behindert, vor dieser Gefahr zu warnen. Als Bewertungsmaßstab auf Basis dieser konvektiven Niederschlagszellencharakteristik wurde eine Flächenbegrenzung festgelegt. Maßgeblich hierfür ist zum einen die Größenordnung, ab der schadensträchtige Niederschlagszellen auftreten können, und zum anderen die Grenzen der Vorhersagbarkeit dieser Zellen (automatische Erkennung/Wiedererkennung, siehe Abschnitt 3.3, Zellbasierte Vorhersage). Daraus leitet sich der Wert von 15 km² für die Flächenbegrenzung her.

²⁴ Einfalt, T., Pfeifer, S., Burghoff, O. (2012) Feasibility of deriving damage functions from radar measurements. 9th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, St. Moritz, 6-9 December. ISBN 978-3-906031-21-7

Anhand der Auswertungen zur Reflektivität lässt sich sagen, dass bei räumlich hochaufgelösten Radardaten (250 m) eine relevante Sichtbarkeit der WKA (>35 dBZ bzw. 0 (Null) dBZ bei POLARA-gefilterten Daten) in einem Radius von bis zu 600 m auftritt. Bei Pixelgrößen von 1 km vergrößert sich dieser Radius deutlich auf 1200 m, bei POLARA-gefilterten Datensätzen mit 1 km-Auflösung sogar auf 1500 m. Diese Datenauflösung wird aber seit der Umstellung des Volumenscans auf $1^\circ \times 250$ m nicht mehr bei der Datenerhebung verwendet, sondern spielt nur noch bei historischen Daten eine Rolle.

Aus diesem Grund ist für hochaufgelöste 250 m-Daten als Bewertungsmaßstab ein Pufferbereich von 600 m, in dem warnrelevante Veränderungen sowie Überlagerungseffekte durch WKA stattfinden, nötig. Dieser Wert wird in Metern angegeben, da die Größen polarer Pixel in Abhängigkeit der Entfernung zum Radar variieren (Abstand in Azimuthrichtung: 1° entspricht zwischen 87 m (Radarentfernung 5 km) und 262 m (Radarentfernung 15 km) und so auch eine Unabhängigkeit von der Lage der WKA innerhalb eines Polarpixels im Gegensatz zu einer Neunerumgebung gewährleistet ist.

Im Rahmen der Komposit-Erstellung werden je nach Verfahren auch durch WKA beeinflusste Radarpixel auf einen größeren Flächeninhalt transferiert (siehe Abschnitt 3.3) und können so die Einflusszone der WKA vergrößern. Als deutschlandweite Übersicht werden die Daten im Komposit auf einem kartesischen 1 km x 1 km-Raster dargestellt, dieses stellt im Gegensatz zu den polaren Rastern ($1^\circ \times 1$ km und $1^\circ \times 250$ m) der untersuchten Datensätze die Grundlage für weitere Warn- und Vorhersageprodukte dar (siehe Abschnitt 3.3). Um unbeeinflusste Zonen von mindestens einem kartesischen 1 km x 1 km Pixel zwischen Windparks zu gewährleisten (und damit deren Unabhängigkeit voneinander bei Warn- und Vorhersageprodukten), ist neben den Pufferbereich von 600 m ein Mindestabstand von 4 km zwischen den nächstgelegenen Anlagen zweier Windparks als weiterer Bewertungsmaßstab notwendig. Dieser Wert setzt sich zusammen aus den Pufferbereichen von jeweils 600 m um die Windkraftanlagen sowie der diagonalen Ausdehnung von zwei kartesischen Kompositpixeln (2×1400 m) zwischen den Pufferbereichen, so dass unabhängig von der Lage der WKA innerhalb der kartesischen Kompositpixel ein unbeeinflusster Kompositpixel sicher gewährleistet ist (Abb.3.5.1).

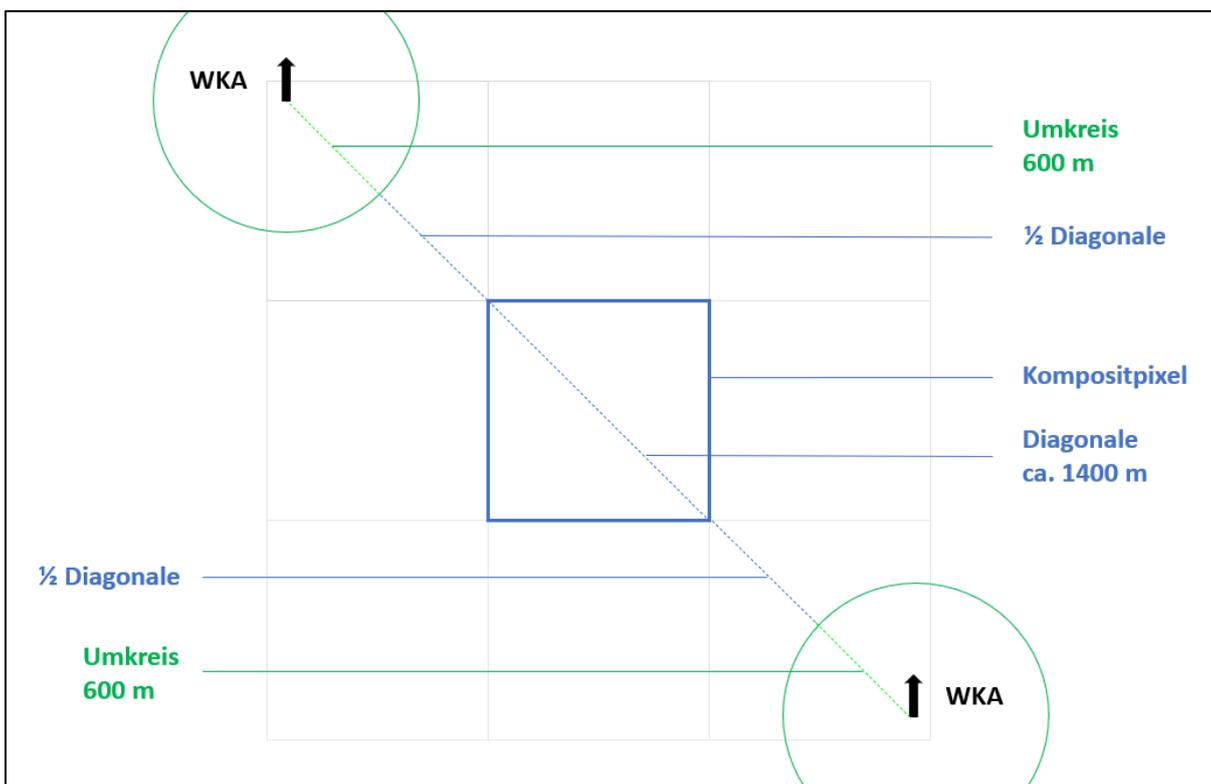


Abb. 3.5.1: Mindestabstand zwischen WKA

In der Höhe ist bei den bestehenden WKA nur noch eine geringfügige Sichtbarkeit in der zweiten Elevation des Volumenscans ($1,5^\circ$) zu erkennen, dies würde sich bei Neuanlagen (Anlagenhöhe > 150 m) in Abhängigkeit von der Anlagenhöhe im Radarstrahl aber ändern. Mit zunehmender Höhe der WKA im Radarstrahl erhöht sich auch der Zeitanteil, in dem WKA in für konvektive Niederschläge relevanten Reflektivitätsbereichen sichtbar sind. Dieser kann schon bei bestehenden Anlagen bis zu 80 % betragen. Nur für WKA, die 70 m unterhalb des Strahlbereichs der jeweiligen Elevation der Radarmessung liegen, kann die Sichtbarkeit der WKA und Wechselwirkungen zwischen WKA und Radar in dieser Elevation vernachlässigt werden. Bei der untersten Elevation (Untergrenze $0,0^\circ$) ist dies nur bei zwei Alt-Anlagen der Fall.

Wie in Abschnitt 3.4 dargelegt, können die Messdaten am Ort der WKA weder aus dem Niederschlagsscans noch aus dem untersten Volumenscan verwendet werden. Deshalb ist eine Höhenbegrenzung der WKA erforderlich, die in Anlehnung an die internationale Erfahrung in Nachbarländern auf maximal 10 % Überdeckung des Niederschlagsscans durch die WKA-Rotoren als weiterer Bewertungsmaßstab festgelegt wurde (Abb. 3.5.2) und somit eine Beeinflussung der Elevationen oberhalb des Niederschlagsscans (insbesondere $1,5^\circ$ Elevation) durch WKA weitestgehend minimieren soll. Dieses Kriterium bezieht sich nicht auf Abschattungsberechnungen wie in Abschnitt 2, sondern es bedient sich ausschließlich der Überlappung von Radarstrahl und Rotorkreis, um die Höhe der Rotoren im Radarstrahl zu beschreiben. Das Höhenkriterium kann nach positiver Flächenprüfung außer Kraft gesetzt werden, wenn eine Abschaltautomatik für warnrelevante Wetterereignisse eingerichtet ist (s. Anhang 2).

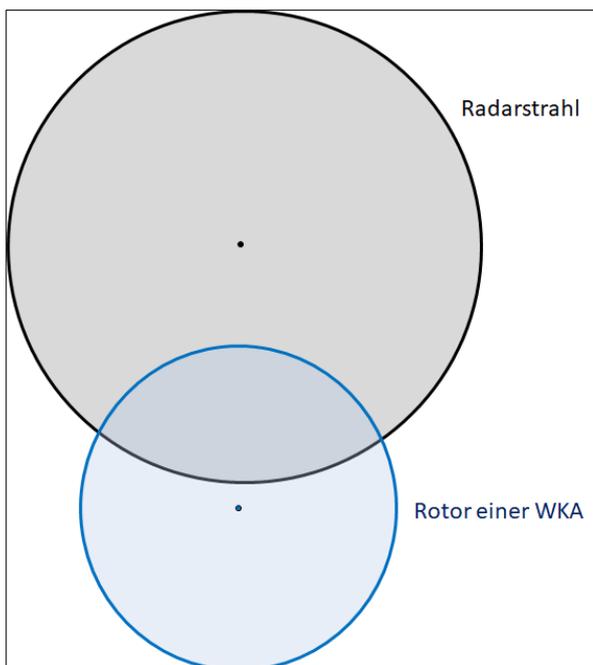


Abb. 3.5.2: Schemazeichnung Überlappung des Radarstrahls durch die Rotoren einer WKA

Wesentlich für Warn- und Vorhersageprodukte sind aber nicht die Standort-geländerte Radarbasisdaten, sondern die mit POLARA korrigierten Datensätze. In diesen spielt die Überschreitung von Schwellwerten durch Sichtbarkeit der WKA keine wesentliche Rolle mehr, denn durch POLARA-Filterung werden die durch WKA entstandenen hohen Reflektivitäten maßgeblich reduziert. Allerdings entstehen in diesem Zuge Bereiche mit 0 dBZ-Werten, die eine vergleichbare Ausdehnung wie die durch WKA beeinflussten Pixel in den Standort-korrigierten Daten haben und zu Unterwarnungen bei konvektiven Zellen führen können. Selbst eine räumliche Interpolation oder die Hinzuziehung höherer Elevationen ist bei Betrachtung kleinräumiger konvektiver Niederschlagszellen mit hohen Unsicherheiten behaftet. Diese bestehen zum einen darin, dass der Niederschlagskern aus seiner Umgebung nicht interpoliert werden kann und zum anderen darin, dass zwischen Messung des Niederschlagsscans und der nächstgelegenen Elevationen bis zu 2,5 Minuten liegen. Durch die dann fehlende zeitliche

Übereinstimmung zwischen den Elevationen ist dann nicht gewährleistet, dass Niederschlagszellen wiedererkannt werden können. Dies muss insbesondere für den Niederschlagsscan beachtet werden, der für viele Kompositprodukte des DWD und wasserwirtschaftlichen Anwendungen die elementare Grundlage bildet.

Insgesamt lässt sich die Notwendigkeit eines Pufferbereichs von 600 m unabhängig von Schwellwerten feststellen.

Fragenkatalog

2 Können sich die nachteiligen Beeinträchtigungen (Rotoren ragen in (1) Volumen- oder (2) Niederschlagsscan hinein, (3) WKA werden durch Nebenkeulen erfasst) auf sicherheitsrelevante Aufgaben der Einstufung 1 auswirken?

(1-3) Ja

3 Ab wann sind die Auswirkungen ((1) Erzeugung von Fehlechos durch Rückstreuung des Radarsignals an WKA und (2) reduzierte Signalintensitäten durch Abschattung im Bereich hinter den WKA) derart erheblich, dass sie eine wesentliche Beeinträchtigung von sicherheitsrelevanten Aufgaben der Einstufung 1 darstellen können:

(1) Bei Überschreitung einer zusammenhängenden Fläche von 15 km² (siehe Abschnitte 3.3 und 3.5)

(2) Nur bei einem Abstand < 5 km (siehe Abschnitt 3.2.2)

3.1 Welche Signalintensität aus der radartechnologischen Reflektivität (Rückstreuung an z.B. Niederschlag) ist für die Erstellung und das Auslösen dieser meteorologischen Einzelprodukte erforderlich?

Es werden vom DWD eine Vielzahl von Schwellwerten eingesetzt, die Änderungen unterliegen und die teilweise nur unter bestimmten Bedingungen zum Tragen kommen. Deshalb gibt es auch nicht den einen Wert, der als maßgeblich angenommen werden kann. In Abschnitt 3.3 ist dargestellt, welche Größen relevante konvektive Zellen haben, und diese Flächen wurden dann anstelle einer Signalintensität für die weitere Bewertung verwendet.

3.2 Welche Signalintensität aus der radartechnologischen Reflektivität stellen demgegenüber die WKA-Vorbelastung und Zusatzbelastung dar und ab welcher Signalintensität (durch einzelne WKA) führt dies zu einer wesentlichen Beeinträchtigung? (Schwellenwertüberschreitung)

Anhand der Histogramme (siehe Abschnitt 3.4.3) lässt sich erkennen, dass sich nicht eine bestimmte Signalintensität als Zusatzbelastung definieren lässt, sondern eine Zusatzbelastung immer abhängig ist von der zeitlichen Auftretenshäufigkeit einer bestimmten Reflektivität. Bei POLARA-gefilterten Daten (Standardverfahren des DWD) spielen Reflektivitätsschwellwerte keine Rolle, da die von WKA beeinträchtigten Pixel im Regelfall auf Null gesetzt wurden, so dass eine wesentliche Beeinträchtigung vorliegt, wenn dies dauerhaft geschieht.

3.3 Können hierzu Schwellenwerte definiert werden (z.B. Prozentual, Anzahl der gestörten Zellen)?

In diesem Gutachten wird als Schwellwert hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung ein Pufferbereich von 600 m um WKA, in dem eine wesentliche Beeinträchtigung vorliegt, als Bewertungsmaßstab definiert (siehe Abschnitt 3.4.3.2).

3.4 Haben die untersten Sweeps (Radarumläufe im untersten Winkel der Elevation), in die die WKA hineinragen, eine besondere Bedeutung für die sicherheitsrelevanten Aufgaben der Einstufung 1?

Ja, der unterste Volumenscan hat eine besondere Bedeutung für die bodennahe Messung des Niederschlages. Im Nahbereich < 15 km um das Radar gibt es allerdings auch Messungen in höheren Elevationen (Niederschlagsscan, 2. Scan mit 1.5° Elevation), die den wichtigen Bereich von wenigen hundert Metern über Grund abdecken. Da das Radar jeweils Momentanwerte misst, geht eine Ersetzung eines Scans jedoch einher mit einer Inhomogenität in der Messzeit und behindert die Wiedererkennung von Zellen und die Interpolation. Aus diesem Grund ist der Rückgriff auf höhere Elevationen als den Niederschlagsscan grundsätzlich eine Notlösung und erzeugt mehr Unsicherheiten und Aufwand in der Verarbeitung.

4 Vor dem Hintergrund der konkreten Windparkplanung (WP X und WP Y): Welche Auswirkungen haben die geplanten WKA auf die Erfüllung der Aufgaben des DWD konkret? In welchem Maße wird die Erstellung von Warnprodukten des DWD abgestuft

- 4.1 verhindert,
- 4.2 verschlechtert,
- 4.3 verzögert,
- 4.4 spürbar erschwert?

WP X und WP Y sind konkrete Vorhaben, auf die das Bewertungsschema angewendet werden soll. Die Ausführungen dazu werden in einem separaten Dokument enthalten sein.

5 Inwieweit können etwaige Störwirkungen nach dem Stand der Technik durch geeignete Maßnahmen minimiert werden (z.B. Korrekturverfahren zur Abschwächung von Fehlchos, POLARA)

Die POLARA-Korrektur scheint nach Analyse der Messungen nicht die optimale Lösung zu sein, da a) die Ersetzung der Messwerte durch den Wert 0 nicht zielführend erscheint und innerhalb von Niederschlagsgebieten zu systematischen Unterschätzungen der Werte führt und b) nicht alle WKA regelmäßig ausgefiltert werden. Andere Korrekturverfahren wie Nutzung der Messungen aus einer höheren Elevation (erste Alternative) oder die räumliche Interpolation betroffener Gebiete (zweite Alternative) verringern systematische Unterschätzungen. Während Alternative 1 insbesondere bei konvektiven Ereignissen mit ihrer vertikalen Struktur sinnvoll erscheint, aber aufgrund der unterschiedlichen Messzeiten und Messhöhen der einzelnen Elevationen auch mit Unsicherheiten bei der Wiedererkennung der konvektiven Zellen behaftet ist, wird Alternative 2 kleinräumige konvektive Niederschlagszellen nur bedingt interpolieren können. Potenziell ist Alternative 2 besser als POLARA, aber nicht so gut wie Alternative 1.

6 In welcher Höhe können etwaige Störwirkungen z.B. durch Abschaltungen von WKA ausreichend minimiert werden. Bei welchen Warnsituationen können Abschaltungen wirksam und erforderlich sein sowie automatisch umgesetzt werden? (z.B. bei vorhergesagten Extremwettersituationen oder amtlichen Unwetterwarnungen?)

Die Analyse der Betriebszeiten von zwei WKA, deren Naben unterhalb der untersten Elevation liegen, zeigt, dass eine Drehzahl von 0 U/Min zu einer starken, aber nicht vollständigen Verringerung der Sichtbarkeit der WKA in den Radardaten führt (siehe Abb. F6). Falls mit Unwetter zu rechnen ist, ist eine Abschaltung mit Drehzahl 0 U/Min deshalb sinnvoll für die Reduzierung von Fehlmessungen bei Anlagen, die das Höhenkriterium nicht einhalten und somit weitere Elevationen beeinträchtigen. Eine Abschaltautomatik kann auf Basis der amtlichen Unwetterwarnungen des DWD durchgeführt werden (s. Anhang 2). Diese Unwetterwarnungen erfolgen zwei bis zwölf Stunden vor Eintritt des möglichen Unwetters. Die WKA werden dann innerhalb von Minuten abgeschaltet und erst nach Entwarnung wieder in Betrieb genommen. Aber: Nicht vor allen Unwettern wird vom DWD gewarnt, deshalb kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Abschaltautomatik immer die in 3.3 beschriebenen Flächeneffekte verhindert.

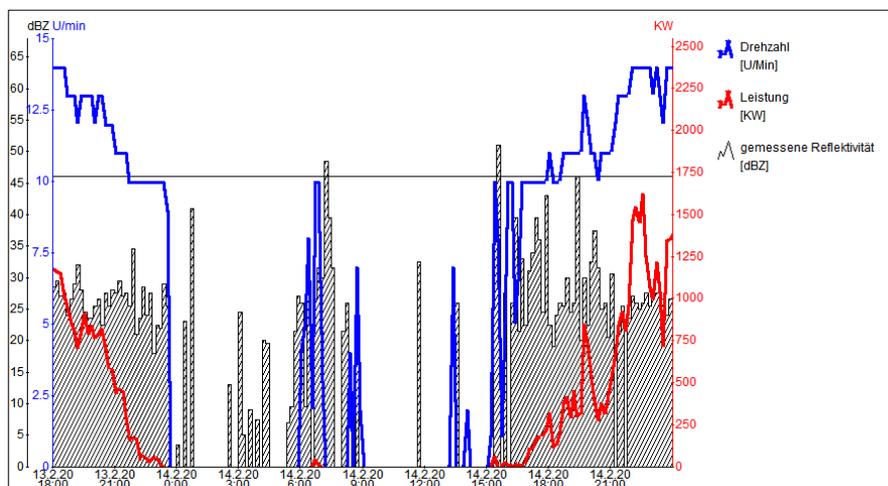


Abb. F6: Effekt der Abschaltung der WKA 82 (Drehzahl in blau) auf die Reflektivitätsmessung (schwarz)

4 Vorgeschlagenes Bewertungsschema

Das hier vorgeschlagene Bewertungsschema (siehe Abb. 4) hat als Ziel, sowohl qualitativ gesicherte Niederschlagsmessungen mittels Wetterradar im Bereich von 15 km um den Radarstandort sicherzustellen, als auch Gebiete und Maßnahmen für WKA zu identifizieren, so dass diese die Radarmessung nicht wesentlich beeinträchtigen. Hierfür geht es in mehreren Schritten vor:

1. **Entfernungsprüfung:** Windkraftanlagen, die **weniger als 5 km von einem Radarstandort** entfernt sind, sind von einer Genehmigung ausgeschlossen, da sie den Radarstrahl blockieren und somit die Radarmessung in eine Richtung über ein großes Gebiet unbrauchbar machen können (siehe Abschnitt 3.2.2).
2. **Entfernung zwischen WKA:** Falls in einem Abstand von 4 km um eine WKA weitere WKA liegen (Entfernungsberechnung über Standortkoordinaten), so müssen sie **gemeinsam betrachtet** werden. Dieses gilt auch, wenn die benachbarten WKA außerhalb des 15 km-Radius liegen, und innerhalb desselben Windeignungsgebietes. Dadurch wird gewährleistet, dass auch in der Umgebung von Windparks genügend unbeeinflusste Radarmessungen für eine Warnung vor signifikantem Wetter vorliegen (siehe Abschnitt 3.5).
3. **Flächenprüfung:** Für die gemeinsame Untersuchung mehrerer Anlagen spielt die Ausdehnung in der Fläche eine wichtige Rolle. Im Nahbereich einer WKA wird von einem potenziell betroffenen Radius von 600 m (Einflussfläche) ausgegangen (siehe Abschnitt 3.4). Die zu betrachtende Fläche setzt sich aus der **Summe aller Einflussflächen von gemeinsam betrachteten WKA** zusammen und darf eine Größe von 15 km² nicht überschreiten (siehe Abschnitt 3.3). Liegt die Gesamthöhe einer (Bestands-)Anlage mindestens 70 m unterhalb des untersten Radarstrahls aus dem Volumenscan, so braucht die Anlage bei der Flächenberechnung nicht berücksichtigt zu werden.

Für Bestandswindparks mit einer Fläche > 15 km² gilt, dass die Gesamtfläche durch neue Anlagen nicht vergrößert werden darf. Damit ist **Repowering** auch in diesen Fällen möglich, wenn keine der weiteren Prüfungen dem entgegensteht.

4. **Höhenprüfung:** Für jede WKA wird eine Höhenprüfung durchgeführt. Dabei darf sie sich **höchstens um 10 % mit dem Niederschlags-Scan überlappen**, um prinzipiell zulässig zu sein (siehe Abschnitt 3.5): Bei Genehmigungsaufgaben wie einer Abschaltautomatik bei Unwetterwarnungen kann im Ausnahmefall eine höhere Anlage trotzdem zugelassen werden, wenn keine der weiteren Prüfungen dem entgegensteht. Dies ermöglicht ggf. ein **Repowering** in Bestandswindparks.

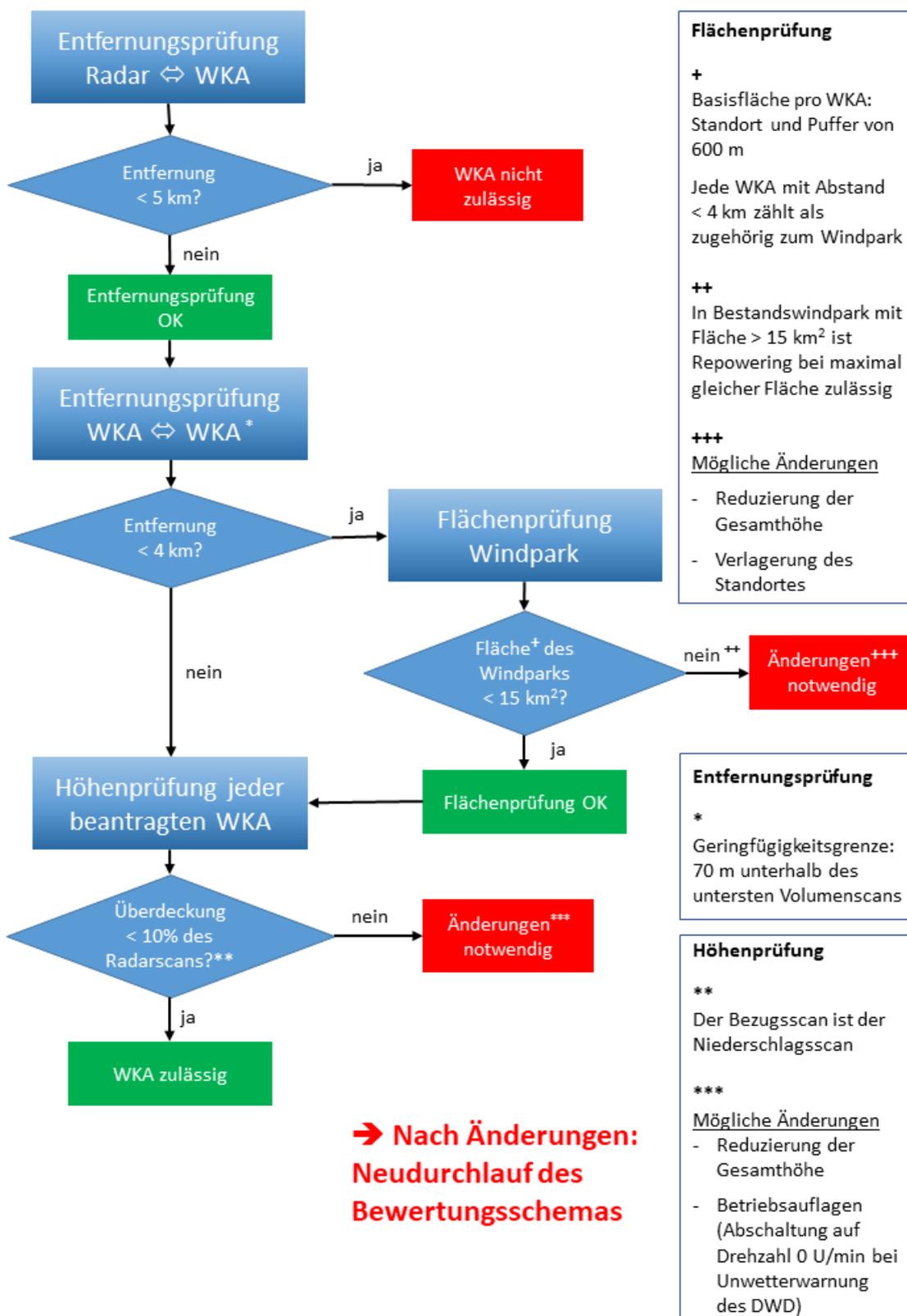


Abb. 4: Bewertungsschema

5 Zusammenfassung

Es wurde ein Bewertungsschema entwickelt, das es ermöglicht, eine Entscheidung für die Errichtung von WKA im Umkreis vom 15 km um einen Radarstandort zu treffen. Bei Verwendung eines solchen Bewertungsschemas und unter Einhaltung der Bewertungsmaßstäbe ist sichergestellt, dass sicherheitsrelevante Warnprodukte des DWD bezüglich der Reflektivitätsmessung im Bereich der Windparks gegenüber dem Ist-Zustand nicht

- verhindert,
- verschlechtert,
- verzögert,
- spürbar erschwert

werden. Ansonsten bestünde die Gefahr, dass konvektive, schadensträchtige Zellen für eine Warnung nicht zeitig genug erkannt werden.

Dieses Bewertungsschema bezieht auch die polarimetrischen Messdaten mit ein.

Aufgrund einer Vielzahl von Reflektivitäts- und Flächenschwellwerten in den sicherheitsrelevanten Produkten des DWD wurde sich nicht an einzelnen Produkten orientiert, sondern die Charakteristika der zugrundeliegenden Niederschlagszellen und deren Vorhersagbarkeit herangezogen. Dementsprechend bezieht sich der verwendete Flächenbezug auf die Größe von kleinräumigen, potenziell schadensträchtigen Niederschlagszellen, die mit einer automatischen Zellverfolgung wiedererkannt werden können und somit Grundlage für sicherheitsrelevante Warnungen sind.

Winddaten wurden nicht untersucht. Es ist davon auszugehen, dass die Veränderung des Windfeldes räumlich etwas weiter reicht als der festgelegte Puffer für die Niederschlagsmessung.

Auch wenn nicht alle Aspekte (z.B. Mesozyklonerkenntnis) im Rahmen dieses Gutachtens im Detail betrachtet wurden, war es möglich, die Störwirkung von WKA auf die DWD-Radarprodukte anhand der untersuchten Basisdaten und der Vorhersagbarkeit konvektiver Niederschlagsereignisse zu bewerten.

Es gibt eine Reihe von ungeklärten Zusammenhängen zwischen WKA und Wetterradar. Deshalb wird intensiv geforscht (z.B. im Projekt RIWER), wie Auswirkungen von WKA auf die Radarmessung weiter reduziert werden können. Zukünftige Ergebnisse hieraus können Auswirkungen auf Bewertungsmaßstäbe haben.

6 Literaturverzeichnis

- [1] **DWDG (1998)** Gesetz über den Deutschen Wetterdienst. <https://www.gesetze-im-internet.de/dwdg/BJNR287100998.html>; letzter Zugriff am 4.6.2021
- [2] **VDI (2014)** VDI 3786 Blatt 20: Umweltmeteorologie, Bodengebundene Fernmessung des Niederschlags: Wetterradar. Berlin, Beuth Verlag.
- [3] **DWD (2021a)** Internetauftritt des DWD; *letzter Zugriff am 4.6.2021*
- <https://www.dwd.de/DE/leistungen>
 - https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/met_fachverfahren
 - <https://www.dwd.de/DE/fachnutzer>
 - <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar>
- [4] **DWD (2013)** Informationen zur Errichtung von Windenergieanlagen im Nahbereich der Messsysteme des Deutschen Wetterdienstes - Abstandsanforderungen und Höhenbeschränkungen. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 12 S.
- [5] **WMO (2010)** Commission for instruments and methods of observation, Fifteenth session WMO-No.1046, World Meteorological Organization. http://www.wmo.int/pages/prog/www/CIMO/CIMO15-WMO1064/1064_en.pdf; *letzter Zugriff am 4.6.2021*
- [6] **OPERA (2010)** Statement of the OPERA group on the cohabitation between weather radars and wind turbines. https://www.eumetnet.eu/wp-content/uploads/2017/01/OPERA_2010_14_Statement_on_weather_radars_and_wind_turbines.pdf; *letzter Zugriff am 4.6.2021*
- [7] **Norin, L. (2015)** Vindrad+, Gap-filling radars as a method for reducing the conflict between weather radars and wind turbines. SMHI, Version 1.1, o.O.
- [8] **Min (2015)** Décision du 20 novembre 2015 relative à la reconnaissance de la méthode de modélisation des perturbations générées par les aérogénérateurs sur les radars météorologiques CLOUDSIS 1.0 et de la société Qinetiq Ltd chargée de sa mise en œuvre. https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0028949/met_20150022_0000_0022.pdf; *letzter Zugriff am 4.6.2021*
- [9] **DMI (2021)** pers. Kommunikation vom 28.4.2021.
- [10] **KNMI (2021)** pers. Kommunikation vom 27.4.2021.
- [11] **Seltmann, J. & Böhme, T. (2018)** Radarbezogene Probleme mit Windenergieanlagen in Deutschland. 18 Seiten, o.O.
- [12] **Emeis, S. (2015)** Windphänomene in der atmosphärischen Grenzschicht, die die Nutzung der Windenergie entscheidend beeinflussen. Promet Heft 3/4, 39. Jahrgang, S. 151 -162.
- [13] **Steinfeld, G., Witha, B., Dörenkämper, M., Gryscha, M. (2015)** Hochauflösende Large-Eddy-Simulationen zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse in Offshore-Windparks. Promet Heft 3/4, 39. Jahrgang, S. 163 – 180.
- [14] **Lainer, M., Figueras i Ventura, J., Schauwecker, Z., Gabella, M., Bolaños, M.F., Pauli, R., Grazioli, J. (2020)** Insights into wind turbine reflectivity and RCS and their variability using X-band weather radar observations. Atmospheric Measurement Techniques. <https://doi.org/10.5194/amt-2020-384>
- [15] **Fachagentur (2021)** Fachagentur Windenergie an Land: Forschungsprojekt „Removing the Influence of Wind-Park-Echoes in Weather-Radar-Measurements“(RIWER). <https://www.fachagentur-windenergie.de/themen/radar-und-funkanlagen/riwer/>; *letzter Zugriff am 10.6.2021*
- [16] **Argemí O., A. Belmonte, X. Fàbregas, N. Pineda, T. Rigo, J. Bech (2012)** Wind turbine impact evolution and beam blockage analysis on the weather radar network of the Meteorological Service of Catalonia, 7th European Conference on radar

in Meteorology and Hydrology (ERAD) Toulouse, France, 25th to 29th June 2012.

http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NET_013_ext_abs.pdf; letzter Zugriff am 4.6.2021

[17] Vogt, R.J., Crum, T.D., Sandifer, M.J.B., Ciardi, E.J., Guenther, R. (2009) A way forward: windfarm – weather radar coexistence. NEXRAD Radar Operations Center, NOAA's National Weather Service; 2009.

[18] DWD (2021b) Stellungnahme vom 23.4.2021, pers. Kommunikation

[19] DWD (2020b) Ergänzende Stellungnahme zum Repowering von 5 Windkraftanlagen im Windpark Wiemersdorf vom 10.11.2020

[20] Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A. (2017) Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 251. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.

[21] URBAS (2008) Schlussbericht. Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse, Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten. <http://www.urbanesturzfluten.de/schlussbericht>; letzter Zugriff am 4.6.2021

[22] Einfalt, T. (1988) Recherche d'une méthode optimale de prévision de pluie par radar en hydrologie urbaine. Dissertation, ENPC Paris, 189 S. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00520784/en/>; letzter Zugriff am 13.9.2021

[23] López, R. E., Blanchard, D. O., Rosenfeld, D., Hiscox, W. L., Casey, M. J. (1984) Population characteristics, development processes and structure of radar echoes in south Florida. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 56–75.

[24] Einfalt, T., Pfeifer, S., Burghoff, O. (2012) Feasibility of deriving damage functions from radar measurements. 9th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, St. Moritz, 6-9 December. ISBN 978-3-906031-21-7.

Anhang 1: Schwellwerte verschiedener DWD-Verfahren zur Radardatenverarbeitung

CellMOS³

- Schwellen 37, 46 und 53 dBZ
- Gewitterzelle: Gebietsgröße mit Reflektivität > 37 dBZ mindestens 9 km² und mindestens ein Blitz im Umkreis von maximal 10 km um einen Zellmittelpunkt

KONRAD 2D^{18 25 26}

- Mindestzellgröße 15 Kompositpixel
- 1. Schritt: liegt eine bestimmte Anzahl von Pixeln ≥ 46 dBZ vor?
- 2. Schritt: mind. 1 Pixel 55 dBZ? -> Hagelwarnvorschlag
- Warnschwelle Unwetter 46 dBZ
- $F > 15$ km², $Z > 46$ dBZ
- Sekundärzellen: 37 dBZ 4 km h
- Starkregenwarnung: > 10-12mm / 30min bzw. 20-25 mm / 60min

KONRAD3D^{18 19 27}

- $F > 10$ km $Z > 35$ dBZ, adaptiv
- Gewitterzellmarkierung bei 1 Pixel > 42 dBZ
- Input: Dämpfungskorrigierte, qualitätsgesicherte Reflektivität, Hymec, Quantitative Niederschlagsabschätzung, geplant (2017) auch Blitze, Satellitendaten und Mesozyklone

Mesozyklonenerkennung^{18 3 28 29}

- Vortex mit einer horizontalen Ausdehnung von 2 - 10 km innerhalb einer konvektiven Wolke
- $\varnothing > 3$ km, $Z > 10$ dBZ, $a > 5$ m/s
- Input: Dämpfungskorrigierte, qualitätsgesicherte Reflektivität; Qualitätsgesicherter Radialwind
- Echo-Top-Höhe 18 dBZ

²⁵ DWD (2020a) Stellungnahme zum Antrag auf Genehmigung von zwei Windkraftanlagen am Standort 24616 Armstedt vom 17.8.2020

²⁶ Böhme, T., Hengstebeck, T., Seltmann, J., Stephan, K. (2013) Anlage B1 - Einfluss des Betriebs von Windenergieanlagen auf die Wetterradarmessung und Warnprodukte beim DWD. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 29 S.

²⁷ Werner, M. (2017) KONRAD3D: A NEW TOOL FOR DETECTION AND NOWCASTING OF CONVECTIVE CELLS AT DWD. 2nd European Nowcasting Conference, Offenbach, 3.-5.5.2017. Book of Abstracts 32 S.

²⁸ DWD (2017) Dokumentation Mesozyklonenerkennung (Mesocyclone Detection MCD). Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 8 S.

²⁹ Hengstebeck, T., Wapler, K., Heizenreder, D., Joe, P. (2018) Radar Network-Based detection of mesocyclones at the German Weather Service. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 35, pp 299 – 321, doi: 10.1175/JTECH-D-16-0230.1.

Hydrometeorklassifikation NG¹⁸

- $Z > 5,6$ dBZ für als flüssig kategorisierte Hydrometeore
- 2 m ü. Grund, Berechnung mit Radar-, Modell- und Bodenstationsdaten

NowCastMIX³⁰

- runde 7,5 km-Warn-Polygone um von KONRAD oder CellMOS gefundene Zellen
- Entweder ≥ 1 mm VIL oder ≥ 2 Blitze in 15 min und 7,5 km Abstand zueinander
- 20 min = Beobachtungszeit einer Zelle

³⁰ **James P.M., Reichert B.K., Heizenreder D. (2018)** NowCastMIX: Automatic Integrated Warnings for Severe Convection on Nowcasting Time Scales at the German Weather Service. Weather and Forecasting Volume 33, S. 1413-1433. DOI: 10.1175/WAF-D-18-0038.1

Anhang 2: Abschaltautomatik

Für die Dauer der Gültigkeit von amtlichen Unwetterwarnungen vor heftigem Starkregen und schwerem Gewitter wird die WKA außer Betrieb genommen.

Basis: Informationen des DWD

Es gibt zwei Möglichkeiten, eine Abschaltautomatik auf Basis der Warninformationen des DWD einzurichten: die automatische Auswertung des Newsletters der amtlichen Unwetterwarnungen (Variante A) und die automatische Auswertung der CAP-Warmmeldungen des DWD (Variante B).

Variante A: Automatische Auswertung des Newsletters des DWD

Der WKA-Betreiber erhält die amtlichen Unwetterwarnungen vom DWD auf dem aktuell üblichen Vertriebsweg in maschinenlesbarer Form als Newsletter per Email für die ausgewählten Landkreise (Stormarn, Pinneberg, Steinburg, Segeberg, Plön, Neumünster und Rendsburg-Eckernförde). Hintergrund dieser räumlichen Aufteilung ist, dass der DWD landkreisgenau warnt, aber insbesondere bei Gewitterlagen eine hohe räumliche Unsicherheit der Vorhersage besteht.

Die Anmeldung zum Newsletter des DWD erfolgt über

https://www.dwd.de/DE/service/newsletter/form/amtliche_warnungen/amtliche_warnungen_node.html

Die Herausgabe von Warnungen erfolgt in 3 Zeitstufen:

1. Frühwarninformation bis 5 Tage vorher
2. Vorwarninformation bis 2 Tage vorher über die 6 Regionalzentralen an die Landkreise und die
3. Unwetterwarnung über die 17 Wetterradarstationen des Bundeslandes ab 12 h bis 2 h vor dem Ereignis

Ich stimme den Nutzungsbedingungen ([AGB/Disclaimer](#)) zu.

Ich habe die [Datenschutzinformation](#), die Bestandteil dieser Erklärung ist, zur Kenntnis genommen und verstanden. Ich bin damit einverstanden, dass meine Daten zu dem in der [Datenschutzinformation](#) unter Punkt 2.2. beschriebenen Zweck verarbeitet werden.

<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Wind / Sturm / Orkan
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Gewitter
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Starkregen
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Dauerregen
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Schneefall/-verwehungen
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Glätte
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Frost
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Nebel

Suchbegriff

LANDKREISE

Vielen Dank für Ihr Interesse an den "amtlichen Warnungen" des Deutschen Wetterdienstes!

Hier finden Sie unsere Kriterien/Warnschwellenwerte:
([Warnkriterien für amtliche Wetter- und Unwetterwarnungen des DWD](#))

Ein Newsletter ist die Kombination aus einem Landkreis und einem Warnereignis.

Anmeldung am Newsletter:

1. Wählen Sie zunächst die Warnereignisse und die gewünschte Intensitätsstufe aus:

- = Keine Auswahl
- = **Amtliche Wetterwarnung** (Stufe 1, Blau)
- = **Amtliche Warnung vor markantem Wetter** (Stufe 2, Gelb)
- = **Amtliche Unwetterwarnung** (inkl. Warnung vor extremem Unwetter, Stufe 3+4, Rot+Lila)

WICHTIG:

- Wenn Sie die Stufe 1 wählen, erhalten Sie auch alle Warnungen der Stufen 2 und 3+4.
- Stufe 2 enthält alle Unwetterwarnungen der Stufe 3+4, nicht aber Warnungen der Stufe 1.
- Im Vorfeld von amtlichen Unwetterwarnungen Stufe 3+4 erhalten Sie ggf. Vorabinformationen.

Abb. A1: Anmeldefenster des DWD für den Newsletter zu den amtlichen Warnungen

Die Warnungen erfolgen in 4 Intensitätsabstufungen: blau (Wetterwarnung), gelb (Warnung vor markantem Wetter), rot (Unwetterwarnung) und lila (Warnung vor extremem Unwetter).

Die Warnkriterien können in den einzelnen Diensten bezogen auf die jeweilige Wetterregion separat ausgewählt werden (s. Abb. A1).

Tabelle A.1: Kreisschlüssel der zu berücksichtigenden Kreise in Schleswig-Holstein nach dem amtlichen Gemeindeschlüsselverzeichnis

01 SCHLESWIG-HOLSTEIN

Kreisfreie Städte

01 0 04 Neumünster, Stadt

Kreise

01 0 56 Pinneberg

01 0 57 Plön

01 0 58 Rendsburg-Eckernförde

01 0 60 Segeberg

01 0 61 Steinburg

01 0 62 Stormarn

Gültigkeitsbereich und Gültigkeitsdauer

Für den WKA-Betrieb sind hier nur die Warnstufen 3 (Unwetterwarnung) und 4 (Warnung vor extremem Unwetter) zu Gewitter und Starkregen relevant.

Unwetterwarnungen aus dem Landkreis des WKA Standortes sowie der umliegenden Landkreise (aus oben genannter Auswahlliste) sind für die Abschaltung relevant. Die Abschaltung erfolgt mit Erhalt der Unwetterwarnung aus einem der für die WKA ausgewählten Landkreis und ist gültig bis zum Ablauf der Unwetterwarnung.

Realisierung: Verarbeitung der Meldungen

Der WKA-Betreiber installiert im Windpark für Erfassung der Email, automatische Umsetzung der Information in einen Befehl und Weiterleitung des Befehls an die jeweilige WKA einen separaten, zusätzlichen Rechner (Windpark-Rechner), welcher auf Basis des Internets über eine schnelle Datenleitung oder schnellen Mobilfunk die Email des DWD automatisch empfängt.

Durch eine entsprechende Software wird die Email jeweils in einen internen Befehl zum Starten und Stoppen der WEA umgewandelt. Gleichzeitig werden sowohl der Eingang der Email und deren Inhalt, als auch das jeweilige Ereignis über den diesbezüglichen Stillstand der WKA auf dem Windpark-Rechner archiviert.

Der Betrieb ist zu dokumentieren (Angabe des Betriebszustandes der WKA, der aktuellen Umdrehungszahl, dem Inhalt der aktuellen Warninformationen für die ausgewählten Landkreise) und jeweils mit einem Zeitstempel zu versehen. Die Dokumentation muss mindestens jede Zustandsänderung (an / aus) und jeden Empfang eines Newsletters enthalten, sowie Drehzahlen im 5-Minuten-Zeitschritt. Diese Dokumentation ist jährlich und auf Anforderung der Behörde auch zwischenzeitlich der zuständigen Überwachungsbehörde in geeigneter, abgestimmter Form zu übermitteln.

Die Funktionsfähigkeit des Systems ist mit Inbetriebnahme der WKA nachzuweisen.

Variante B: Automatische Auswertung CAP-Warnmeldungen des DWD

Die automatische Abschaltung ist so einzurichten, dass die WKA bei Erscheinen einer Warnmeldung des DWD zu Starkregen für das Einzugsgebiet der WKA abzuschalten ist. Hierbei sind in minütlichem Turnus die Warnmeldungen des DWD zu prüfen, die als CAP-Mitteilungen (Common Alerting Protocol) auf Open Data eingestellt werden

(<https://opendata.dwd.de/weather/alerts/cap/>). Zur Syntax der Warnmeldungen gibt es eine entsprechende Dokumentation des DWD

(https://www.dwd.de/DE/leistungen/opendata/help/warnungen/cap_dwd_profile_de_pdf_1_12.pdf?__blob=publicationFile&v=4).

Für die automatische Abschaltung sind relevant die Gefahrenklassen 42, 44, 45, 46, 48, 49, 62, 66, 92, 93, 95, 96 (siehe Abschnitt 3.1 der DWD-Dokumentation).

Die Landkreise sind entsprechend ihrem Kreisschlüssel aufgeführt (siehe Tabelle A.1). Die Abschaltung einer WKA ist erforderlich, solange wie eine Warnung der genannten Gefahrenstufe für den Kreis, in dem die WKA steht, oder einen der Nachbarkreise (aus in Variante A genannter Auswahlliste) gültig ist.

Der Betrieb ist zu dokumentieren (Angabe des Betriebszustandes der WKA, der aktuellen Umdrehungszahl, dem Inhalt der aktuellen Warninformationen für die ausgewählten Landkreise) und jeweils mit einem Zeitstempel zu versehen. Die Dokumentation muss mindestens jede Zustandsänderung (an / aus) und jeden Empfang einer CAP-Warnmeldung (Warnung / Entwarnung) zu einem der zu berücksichtigenden Kreise enthalten, sowie Drehzahlen im 5-Minuten-Zeitschritt. Diese Dokumentation ist jährlich und auf Anforderung der Behörde auch zwischenzeitlich der zuständigen Überwachungsbehörde in geeigneter, abgestimmter Form zu übermitteln.

Die Funktionsfähigkeit des Systems ist mit Inbetriebnahme der WKA nachzuweisen.