

DIN ISO 19926-1

Diese Norm ist Bestandteil des VDI/DIN-Handbuches Reinhaltung der Luft, Band 1b.

ICS 07.060

Einsprüche bis 2017-10-11

Entwurf**Meteorologie –
Wetterradar –****Teil 1: Systemleistung und Betrieb (ISO/DIS 19926-1:2017);
Text Deutsch und Englisch**

Meteorology –

Weather radar –

Part 1: System performance and operation (ISO/DIS 19926-1:2017);

Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-08-11 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an krdl@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss, 40002 Düsseldorf, Postfach 10 11 39, VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 209 Seiten

VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich.....	7
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Abkürzungen.....	8
5 Grundlagen.....	9
5.1 Frequenzbänder.....	9
5.2 Systemkonfiguration	9
5.2.1 Übersicht der Radarsystemkomponenten	9
5.2.2 Duale Polarisations-Sendemodi.....	12
5.2.3 Beschreibung der Komponenten.....	13
6 Systemleistung und Messparameter	16
6.1 Allgemeine Aspekte	16
6.2 Grundlegende Parameter	19
6.2.1 Empfindlichkeit.....	19
6.2.2 Räumliche Auflösung	23
6.2.3 Phasenstabilität	27
6.2.4 Genauigkeit der dualen Polarisationsmessung.....	28
6.3 Sonstige Hauptparameter	29
6.3.1 Nebenkeule	29
6.3.2 Parallele Strahlausrichtung.....	29
6.3.3 Abstimmung der Strahlbreite	29
6.3.4 Maximale Rotationsgeschwindigkeit	29
6.3.5 Beschleunigung	29
6.3.6 Genauigkeit der Antennenpeilrichtung	29
6.3.7 Dynamischer Bereich.....	30
6.3.8 Nebenwellenunterdrückung	30
7 Kalibrierung, Überwachung und Instandhaltung.....	31
7.1 Allgemeine Aspekte	31
7.2 Kalibrierung	32
7.2.1 Kalibrierungsarten	32
7.2.2 Elemente, Verfahren und Kalibrierungsintervalle	32
7.3 Überwachung	33
7.3.1 Allgemeines	33
7.3.2 Stabilität von Radarsystemen	33
7.3.3 Überwachen der Empfängerstabilität und der elektrischen Peilung mithilfe der Sonne	34
7.4 Instandhaltung	35
7.4.1 Allgemeine Aspekte	35
7.4.2 Präventive Instandhaltung	36
7.4.3 Korrektive Instandhaltung	36
7.4.4 Instandhaltungsoptionen	36
7.4.5 Instandhaltungselemente und -intervalle.....	36

7.5	Lebenszyklusmanagement	37
7.5.1	Ersatzteilstrategie	37
7.5.2	Systemverfügbarkeit	37
7.5.3	Lebensdauerkosten	39
8	Personal, Kompetenzen und Schulung	39
9	Standortwahl und Installation	42
9.1	Allgemeine Aspekte	42
9.2	Auswahl und Vorbereitung eines Radarstandorts	42
9.3	Unterstützende Infrastruktur	43
9.4	Abdeckung	44
9.5	Meteorologische Sicht und Störungen	45
Anhang A (normativ)	Messung der Systemleistungsparameter	46
A.1	Standardspezifikationsformat	46
A.2	Messung der grundlegenden Parameter	48
A.2.1	Halbwertsbreite des Übertragungsimpulses	51
A.2.2	Spitzensendeleistung (P_t)	53
A.2.3	Antennengewinn, Strahlbreite	56
A.2.4	Kreuzpolarisationsisolierung	59
A.2.5	Minimal erkennbares Signal (S_{min})	62
A.2.6	Impulskompressionsgewinn	66
A.2.7	Entfernungsauflösung	69
A.2.8	Systemverlust (F)	73
A.2.9	Phasenstabilität	79
A.3	Sonstige Hauptparameter	82
A.3.1	Nebenwellenaussendung	84
A.3.2	Antennennebenkeule	85
A.3.3	Parallele Strahlausrichtung	86
A.3.4	Abstimmung der Strahlbreite	86
A.3.5	Maximale Rotationsgeschwindigkeit	86
A.3.6	Beschleunigung	87
A.3.7	Genauigkeit der Antennenpeilrichtung	87
A.3.8	Dynamischer Bereich	90
A.3.9	Linearität	91
A.3.10	Bereichsnebenkeule	92
Anhang B (informativ)	Beispielspezifikationen für Radargeräte	93
Anhang C (informativ)	Aufzeichnung von Messergebnissen	95
Anhang D (informativ)	Empfohlene Instandhaltungs- und Kalibrierungsmaßnahmen	99
Anhang E (informativ)	Radardatenaustausch	103
Anhang F (informativ)	Sonstige Radarsysteme	104
F.1	Wetterradarsystem mit phasengesteuerten Gruppenantennen	104
F.2	Mikro-Regen-Radar	105
F.3	Terminal Doppler Weather Radar (TDWR)	105
F.4	Terminal Doppler LIDAR (TAL)	105
F.5	Wolkenradar	106
F.6	Kleines Radarsystem	106
	Literaturhinweise	107

Nationales Vorwort

ISO/DIS 19926-1 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 146 „Air quality“, Unterkomitee SC 5 „Meteorology“, in der Arbeitsgruppe WG 7 „Weather radar“ erarbeitet. Die Obmannschaft und das Sekretariat liegen bei Deutschland. An der Erstellung dieser Norm waren die deutschen Experten der Arbeitsgruppe NA 134-02-01-23 UA „Niederschlagsmessung mittels Radar“ des Fachbereiches II „Umweltmeteorologie“ der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss maßgeblich beteiligt.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Vorwort

Die ISO (Internationale Organisation für Normung) ist die weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedskörperschaften). Die Erarbeitung Internationaler Normen obliegt den Technischen Komitees der ISO. Jede Mitgliedskörperschaft, die sich für ein Thema interessiert, für das ein Technisches Komitee eingesetzt wurde, ist berechtigt, in diesem Komitee mitzuarbeiten. Internationale (staatliche und nichtstaatliche) Organisationen, die mit der ISO in Verbindung stehen, sind an den Arbeiten ebenfalls beteiligt. Die ISO arbeitet bei allen Angelegenheiten der elektrotechnischen Normung eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Insbesondere die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien sollten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu ermitteln. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Alle in diesem Dokument verwendete Handelsnamen werden als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellen keine Empfehlung dar.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertungen beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der WTO-Grundsätze zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

ISO 19926-1 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 146 „Air quality“, Unterkomitee SC 5 „Meteorology“ und von der World Meteorological Organization (WMO) als gemeinsame ISO/WMO-Norm nach der im Jahr 2008 von WMO und ISO unterzeichneten Vereinbarung über die Zusammenarbeit erarbeitet.

Einleitung

Die rapide Entwicklung des Wetterraders begann kurz vor dem zweiten Weltkrieg und setzte sich während des Weltkriegs fort. Radar wurde zu Beginn anhand langer Wellenlängen (10 bis 50 m) demonstriert. Schon bald jedoch erforderten kürzere Wellenlängen (3 cm bis 10 cm) die Entwicklung kompakter und leistungsstarker Sender. C-Band-Wellenlängen (5 cm) standen in den späten 1950er Jahren zur Verfügung. Die ersten betriebsfähigen Doppler-Radargeräte erschienen Mitte der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts, als ihre Anwendung im Betrieb demonstriert wurde und schnell erschwingliche Prozessoren und effiziente Software-Codes verfügbar waren. Eine Einführung der dualen Polarisationsfunktion für operative Radargeräte folgte Mitte bis Ende der 1990er Jahre.

Radargeräte bieten eine lokalisierte, hochdetaillierte, zeitnahe und dreidimensionale Sensor- und Beobachtungsfunktion, die kein anderes meteorologisches Überwachungssystem liefern kann. Diese Geräte können Veränderungen der Niederschlagsraten mit einer Auflösung von wenigen Quadratkilometern oder noch präziser und mit Zeitzyklen im Bereich von wenigen Minuten messen. Darüber hinaus können sie sich schnell entwickelnde Wetterereignisse beobachten und bieten so eine wichtige Funktion für Frühwarnungen bei schweren oder gefährlichen Witterungsbedingungen. Hierzu zählen Starkregen, Hagel, Starkwinde (z. B. Tornados und tropische Wirbelstürme) sowie Scherwinde, die von allen Wetterelementen die größte Auswirkung auf die Gesellschaft haben. Doppler- und duale Polarisationsradargeräte können die hohe Veränderlichkeit von Wind- und Niederschlagsarten darstellen und sogar Insekten oder klare Luftturbulenzen erkennen, die genutzt werden, um einsetzende Gewitter vorherzusagen und vertikale Windprofile zu messen. Die duale Polarisation wird darüber hinaus zur Qualitätssicherung und Verbesserung der Niederschlagschätzungen eingesetzt.

Dank schneller Telekommunikation und Datenverarbeitung sind Radarsysteme heute vernetzt, um großräumige Wetterphänomene wie etwa Tropenstürme und Stürme außerhalb tropischer Zonen (im Sommer und Winter) besser zu überwachen. Die aus der Vernetzung von Radarsystemen gewonnenen Daten können längere Vorlaufzeiten (von 60 oder 90 Minuten bis zu mehreren Stunden) für frühzeitige Warnungen ermöglichen. Digitale Wetterprognosesysteme haben sich ebenfalls weiterentwickelt und die Umwandlung von Radarniederschlagsdaten auf kontinentaler Ebene kann Niederschlagsprognosen über 4 bis 5 Tage für benachbarte Regionen und Kontinente erheblich verbessern.

Die Bereitstellung homogener Daten in hoher Qualität beginnt mit der Installation und Nutzung geeigneter Radartechnologie für die lokalen Wetterumgebungen und -bedingungen. Die Wellenlänge des Radars, die Strahlbreite der Antennen, die Art und Stärke des Senders, die Empfindlichkeit des Empfängers und die Wellenform haben einen wesentlichen Einfluss auf die Auflösung und Qualität der Radardaten. Wetterradersysteme werden seit jeher entsprechend den lokalen Anforderungen an die Wetterbeobachtung und -überwachung ausgelegt und konfiguriert und berücksichtigen neben der lokalen Geografie auch andere Faktoren. Dies führt weltweit zu einer Vielzahl unterschiedlicher Technologien und Messstrategien. All diese Faktoren wirken sich auf verschiedene Datenqualitätsmessgrößen wie etwa die Verfügbarkeit, Aktualität und Genauigkeit aus. Diese Messgrößen basieren auf dem Betrieb und der Instandhaltung der Radarsysteme durch Anwendung vorgeschriebener und genormter Praktiken. Dies erfordert die Entwicklung von Normen, technischen Spezifikationen, optimalen Verfahren und Richtlinien für die Gestaltung des Netzwerks, die Auswahl des Standorts, die Kalibrierung, die Instandhaltung der Systeme und Geräte, die Messung und die Datenverarbeitung und Weitergabe.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt die Systemleistung erdbasierter Wetterradersysteme fest, die die Erdatmosphäre mit Frequenzen zwischen 2 GHz und 10 GHz messen. Diese Systeme sind für die flächendeckende Erkennung von Niederschlägen und anderen meteorologischen Zielen in verschiedenen Höhen geeignet. Diese Internationale Norm beschreibt darüber hinaus Methoden zur Verifizierung der verschiedenen Aspekte der Systemleistung einschließlich der Infrastruktur. Diese Internationale Norm ist auf Parabolantennen-Radarsysteme mit linearer Polarisation, duale Polarisations- und Einzelpolarisationsradarsysteme beschränkt. Fächerstrahl-Radarsysteme (niedriger Azimuth und breiter Höhenwinkel) werden nicht berücksichtigt. Hierzu zählen Schiffs- und aeronautische Überwachungsradarsysteme, die zwar verwendet werden, aber nicht vornehmlich für Wetteranwendungen ausgelegt sind. Radarsysteme mit phasengesteuerten Gruppenantennen mit elektronisch gebildetem und gelenktem Strahl einschließlich Fächerstrahl mit nicht-kreisförmigen Abweichungssichtmustern sind neu und hierfür liegen bisher nur unzureichende Leistungsdaten vor.

Diese Internationale Norm beschreibt nicht die Wetterradartechnologie und ihre Anwendungen. Wetterradarsysteme können für Anwendungen wie QPE, die Klassifizierung von Hydrometeoren (z. B. Hagel), die Schätzung von Windgeschwindigkeiten oder die Erkennung und Überwachung schwerer meteorologischer Phänomene (z. B. Scherwinde und Wirbelstürme) eingesetzt werden. Einige dieser Anwendungen stellen besondere Anforderungen an die Positionierung des Radarsystems oder erfordern spezielle Messstrategien. Die in dieser Internationalen Norm festgelegten Verfahren für die Kalibrierung und Instandhaltung gelten jedoch auch hier.

Diese Internationale Norm richtet sich an Hersteller und Radarbetreiber.

Diese Internationale Norm dient einem breitgefächerten Zweck und richtet sich an Organisationen in allen Ländern, die Wetterradarsysteme verwenden, und ganz besonders in Ländern, in denen der Betrieb und die Nutzung von Wetterradarsystemen noch keine lange Tradition hat:

- Unterstützung von Herstellern bei der Aufrechterhaltung eines vergleichbaren und hohen Maßes an konkurrenzfähigen Wetterradarsystemen;
- Hilfe für ausschreibende Behörden zur Berücksichtigung von Systemleistungen nach dem aktuellen Stand der Technik anstatt nur von Komponentendefinitionen in ihren Dokumenten und damit Hilfe für den Vergleich verschiedener eingehender Angebote;
- Bereitstellung einer gültigen Dokumentation des Potenzials und der Beschränkungen von Wetterradarsystemen und hierdurch die Unterstützung des weltweiten Kapazitätsausbaus;
- Empfehlungen zu allgemeinen Anforderungen an die Standortwahl, den Betrieb, die Instandhaltung und die Kalibrierung, um eine hohe Datenqualität und Verfügbarkeit von Radarsystem aufrechtzuerhalten;
- Beschreibung des erforderlichen Aufgabenbereichs für den Betrieb und die Instandhaltung von Wetterradarsystemen, um Managern die Möglichkeit zu geben, ausreichende finanzielle Ressourcen und Personalkapazitäten für diesen Zweck zuzuweisen.

Weitere Informationen wie etwa zu Grundlagen der Wetterradarmessungen sind in [1] verfügbar.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

(keine normativen Verweisungen)

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

(keine Begriffseinträge)

4 Abkürzungen

ADC	Analog-Digital-Wandler
AZ	Azimuth
BITE	integriertes Prüfgerät
BPF	Bandpassfilter
CW	Dauerstrich
EL	Höhenwinkel
FTE	Mitarbeiterkapazität
HPBW	Halbwertsbreite
LDR	lineares Depolarisationsverhältnis
LNA	rauscharmer Verstärker
NMHS	National Meteorological and Hydrological Service
PPI	Rundsichtanzeigergerät
PRF	Impulswiederholrate
PRT	Impulswiederholzeit
QPE	Quantitative Niederschlagsschätzung
RF	Funkfrequenz
STALO	frequenzkonstanter lokaler Oszillator
STAR	gleichzeitiges Senden und Empfangen
TR	Senden/Empfangen
TWT	Wanderfeldröhre

UPS unterbrechungsfreie Stromversorgung

5 Grundlagen

5.1 Frequenzbänder

Ein Wetterradar ist ein für die Messung von Hydrometeoren in einem großen Gebieten unter Verwendung einer Fernsensortechnologie auf der Grundlage von Mikrowellen ausgelegtes System. Die Mikrowellen der S-, C- und X-Bänder werden in vielen Fällen verwendet und die Skalen- und Beobachtungseigenschaften der Systeme unterscheiden sich je nach den Eigenschaften jeder Frequenz (Wellenlänge). S-Band-Systeme sind groß und haben einen weiten Beobachtungsbereich, während X-Band-Systeme kompakt sind und einen engen Beobachtungsbereich haben. Der Nutzbereich von S-Band- und C-Band-Radarsystemen ist üblicherweise durch die Erdkrümmung (≥ 300 km) begrenzt, während die Grenze bei X-Band-Systemen üblicherweise dämpfungsabhängig ist (50 km bis 100 km). Siehe [1] für ausführliche Informationen. Tabelle 1 zeigt die typischen Elemente für jedes Frequenzband.

Tabelle 1 — Typische Spezifikationen für verschiedene Frequenzbänder des Wetterradars

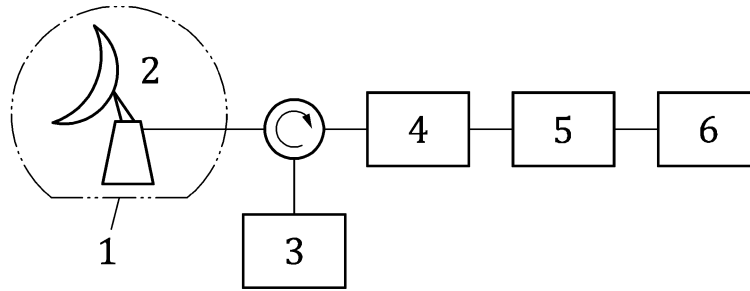
Frequenz-band	Typische Mittenfrequenz und typischer Bereich^{a)}	Antennendurchmesser^{b)c)}	Regendämpfung (Zwei-Wege) bei 30 mm/h^{d)}
S	2,8 GHz (2,700 GHz bis 2,900 GHz)	8,5 m	0,02 dB/km
C	5,625 GHz (5,600 GHz bis 5,650 GHz)	4,2 m	0,13 dB/km
X	9,4 GHz (9,300 GHz bis 9,500 GHz)	2,4 m	1,22 dB/km
a) ITU-R-Empfehlung. Der Frequenzbereich variiert je nach Land. b) Weitere Informationen zu Frequenzbändern und Antennengrößen sind in [1] Kapitel 9.6.8 enthalten. c) Typische Werte für einen Halbwertsbreite von 1° d) Für Angaben zur Regendämpfung siehe [1] Kapitel 9.2.3.			

Das Frequenzband muss entsprechend dem Beobachtungsbereich und der Größe des Systems am Standort ausgewählt werden.

5.2 Systemkonfiguration

5.2.1 Übersicht der Radarsystemkomponenten

Bild 1 zeigt die grundlegende Konfiguration eines Radarsystems. Antennenmontierte Empfänger (und in einigen Fällen auch Sender) werden in jüngster Zeit immer häufiger eingesetzt.

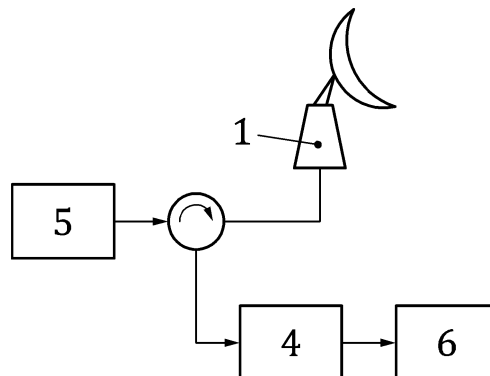


Legende

- 1 Radarkuppel
- 2 Antenne
- 3 Sender
- 4 Empfänger
- 5 Signalprozessor
- 6 Datenprozessor

Bild 1 — Konfiguration und Diagramm des Radarsystems

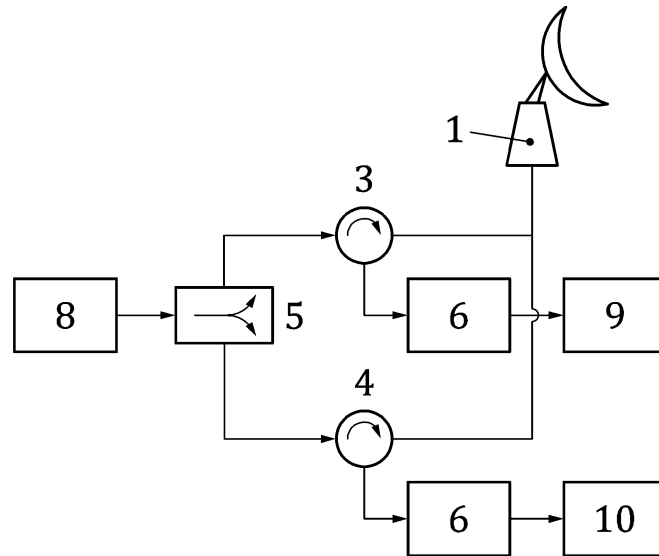
Wetterradarsysteme sind in Einzelpolarisations- (fast immer horizontal) und duale Polarisationssysteme unterteilt, bei denen horizontale und vertikale Polarisationen der gesendeten und empfangenen Mikrowellen verwendet werden. Duale Polarisationssysteme sind weiter in duale Polarisationsverteilungssender, die eine einzelne Senderausgabe verteilen, und duale polarisationsunabhängige Sender, die über zwei unabhängige Sendersysteme verfügen, unterteilt.



Legende

- 1 Antenne
- 4 TR-Begrenzer
- 5 Sender
- 6 Empfänger

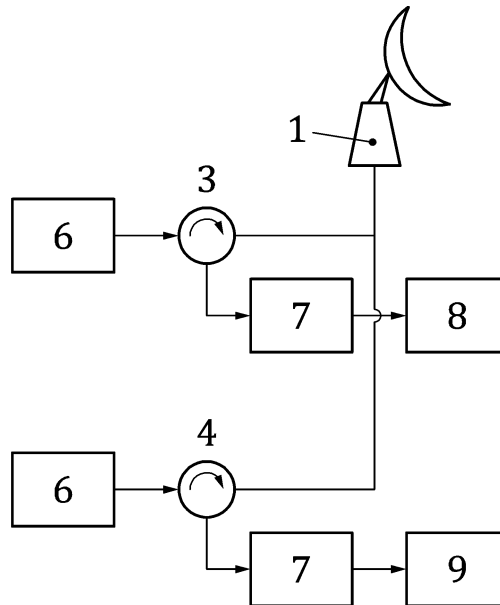
Bild 2 — Systemdiagramm der Einzelpolarisationsbauart



Legende

- 1 Antenne
- 3 Horizontaler Polarisationskanal (H)
- 4 Vertikaler Polarisationskanal (V)
- 5 3dB-Leistungsteiler
- 6 TR-Begrenzer
- 8 Sender
- 9 Empfänger (H-Kanal)
- 10 Empfänger (V-Kanal)

Bild 3 — Systemdiagramm des dualen Polarisationsverteilungssenders



Legende

- 1 Antenne
- 3 Horizontaler Polarisationskanal (H)
- 4 Vertikaler Polarisationskanal (V)
- 6 Sender
- 7 TR-Begrenzer
- 8 Empfänger (H-Kanal)
- 9 Empfänger (V-Kanal)

Bild 4 — Systemdiagramm des dualen polarisationsunabhängigen Senders

5.2.2 Duale Polarisations-Sendemodi

Je nach Transmittersystem (siehe dualer Polarisationsverteilungssender oder unabhängiger Sender oben) stehen verschiedene Sendemodi zur Verfügung.

5.2.2.1 STAR- oder Hybridmodus

Im STAR-Modus (gleichzeitiges Senden und Empfangen) werden eine linear horizontal und eine vertikal polarisierte Welle gleichzeitig gesendet und beide Wellen werden von der entsprechenden Empfängergruppe empfangen. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sie mit einem einzelnen Sender (verteilte Senderbauart) genutzt werden kann, kein teurer zweiter Sender benötigt wird und ein einfacher Leistungsverteiler im Sendepfad ausreicht. Der Nachteil besteht darin, dass im Fall eines depolarisierenden Mediums (z. B. eine schmelzende Schicht, nasser oder schmelzender Hagel) ein Übersprechen zwischen den horizontalen und vertikalen Wellen auftritt und Radarprodukte kontaminiert werden (wie etwa durch unterschiedliche Reflektivität Z_{dr}). Bei Verwendung zweier unabhängiger Sender kann ein leichter Frequenzversatz Kontamination durch Übersprechen verhindern.

5.2.2.2 Alternierender H/V-Modus

Im alternierenden H/V-Modus werden horizontal und vertikal polarisierte Wellen alternierend von Impuls zu Impuls gesendet. Zwei Empfänger empfangen das kopolare und kreuzpolare Signal für jeden Impuls. Der Vorteil des alternierenden H/V-Modus besteht darin, dass die kopolaren und kreuzpolaren Komponenten des Streugitters gemessen werden können. Wenn das Radarsystem aus einem verteilten Sender besteht, wird ein Polarisierungsschalter anstelle eines Leistungsverteilers benötigt. Schnelle Hochleistungsschalter sind derzeit teuer und empfindlich. Aus diesem Grund wird der alternierende H/V-Modus üblicherweise nur für Forschungsradarsysteme verwendet, die nicht kontinuierlich betrieben werden. Sofern das Radarsystem zwei unabhängige Sender nutzt, kann der alternierende H/V-Modus durch alternierendes Senden bei jedem Sekundenimpuls pro Sender simuliert werden.

5.2.2.3 LDR-Modus

Der LDR-Modus ist ein spezieller Modus, der den Bau von Radarsystemen mit verteilter Senderkonfiguration (siehe Bild 3) ermöglicht, um das lineare Depolarisationsverhältnis (LDR) zu messen. Das LDR ist das Verhältnis zwischen der kreuzpolaren und kopolaren Reflektivität. Das LDR ist ein guter Indikator für eine Schmelzschicht oder nassen oder schmelzenden Hagel und Bodenecho. Die Nutzung des LDR-Modus erfordert eine Umgehung des Leistungsverteilers. Diese Umgehung sendet die Übertragungsleistung nur an das horizontale Speisesystem. Bei Empfang misst der horizontale Polarisierungsempfänger das kopolare Signal und der vertikale Polarisierungsempfänger misst das kreuzpolare Signal. Üblicherweise wird ein langsamer Schalter (Schaltzeit ungefähr 1 s bis 3 s) verwendet und der Wechsel zwischen dem STAR- und LDR-Modus findet erst nach einem PPI-Scan statt. Außer dem LDR kann kein anderes duales Polarisationsprodukt gemessen werden.

5.2.3 Beschreibung der Komponenten

5.2.3.1 Antenne

Eine Richtantenne wird verwendet, um die Energie auf einen engen Strahl zu konzentrieren. Üblicherweise wird eine Parabolspiegelantenne verwendet. Die Größe der Antenne zur Erreichung der gleichen Strahlbreite variiert je nach verwendeter Frequenz. Ist die Wellenlänge kürzer, wird die gleiche Strahlbreite durch eine Parabolantenne mit einem kleineren Durchmesser erzielt. Im Allgemeinen erfüllt eine einzelne Antenne die Aufgabe des Sendens und Empfangens. Darüber hinaus ist die Antenne in Einzelpolarisations- (ein Speisehornstrahler) und duale Polarisationsbauarten (ein Speisehornstrahler, der in der Lage ist, zwei orthogonale Polarisierungen zu trennen) unterteilt.

Das Radarsystem mit phasengesteuerten Gruppenantennen ist eine aufstrebende Technologie für Wetterradarsysteme, bei denen die Antenne aus einer Reihe von Festkörperstrahlern besteht, siehe Anhang F für weitere Informationen.

5.2.3.2 Radarkuppel

Eine Radarkuppel wird verwendet, um die Antenne abzudecken und vor Regen, Wind, Eis und Schnee zu schützen. Die Radarkuppel ist kugel- oder kuppelförmig und besteht aus mehreren Platten. Es stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Kuppelbauarten je nach Größe und Beobachtungszweck der Antenne zur Verfügung.

Die Kuppel für duale Polarisierungssysteme ist ausgelegt, um ein möglichst einheitliches Verhalten der beiden die Kuppel durchquerenden horizontal und vertikal polarisierten Wellen darzustellen. Dies kann durch eine entsprechende Gestaltung der Plattenformen wie etwa durch eine geodätische oder quasi zufällige Geometrie dieser Platten erreicht werden.

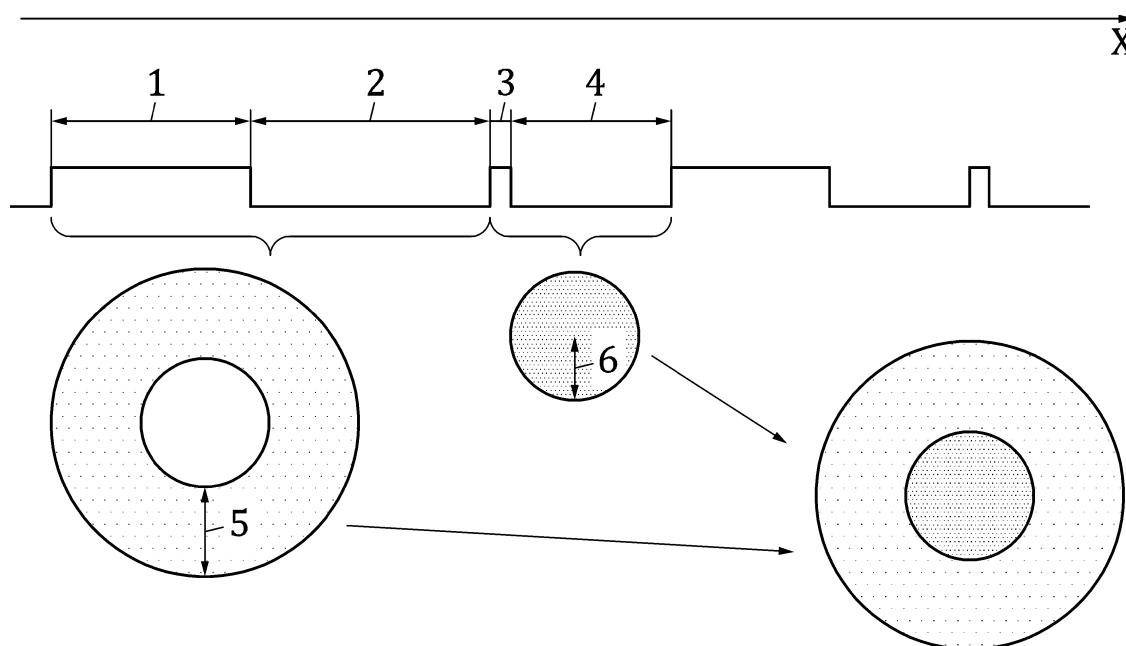
Die Radarkuppel verursacht gewisse Verluste; siehe Anhang A.2.8.1 für die Schätzung der Verluste einer trockenen Radarkuppel. Wasser, Schnee oder Eis auf der Radarkuppel können zu erheblichen Verlusten (einige dB) führen.

5.2.3.3 Sender

5.2.3.3.1 Allgemeine Aspekte

Ein Sender ist ein Gerät, das Funkübertragungswellen erzeugt. Der Sender erzeugt einen stabilen starken Mikrowellenimpuls und strahlt Funkwellen über eine Antenne in die Luft aus. Es gibt zwei Arten von Sendegeräten: Sender mit Elektronenstrahlröhren (Magnetfeldröhre, Klystron, Wanderfeldröhre (TWT) usw.) und Halbleiter (Festkörper). Bei TWT- und Festkörpersendern wird die Impulskompression angewendet, um eine feine Auflösung und ausreichende Sendeleistung zu erhalten.

Bei Impulskompressionsradargeräten werden üblicherweise abwechselnd ein langer und ein kurzer Impuls gesendet, da beim Senden eines langen Impulses ein Blindbereich erzeugt wird, der abgedeckt werden muss.



Legende

- 1 Senden des langen Impulses
- 2 Empfang des langen Impulses
- 3 Senden des kurzen Impulses
- 4 Empfang des kurzen Impulses
- 5 Beobachtungsbereich bei langem Impuls
- 6 Beobachtungsbereich bei kurzem Impuls
- X Zeit

Bild 5 — Beispiel für das Senden langer/kurzer Impulse

5.2.3.3.2 Senderbetriebszeit

Bei einem gepulsten Radarsystem ist die Funkfrequenzleistung des Senders nur kurzzeitig eingeschaltet. Während der verbleibenden Zeit werden Echos aus der Atmosphäre empfangen. Der Zeitraum, über den der Sender eingeschaltet ist, wird als Senderbetriebszeit bezeichnet. Die Betriebszeit bestimmt in Kombination mit der Spitzenleistung die mittlere in die Atmosphäre ausgestrahlte Leistung oder Energie.

Bei einem Wetterradarsender, der einen Röhrensender (Magnetfeldröhre oder Klystron) verwendet, liegt die Betriebszeit üblicherweise im Bereich von 1 ‰. Dies führt zu einer typischen mittleren Leistung von einigen Hundert W. Bei TWT-Sendern ist die Spitzenleistung üblicherweise geringer und es werden mit

Festkörpersendern vergleichbare lange Impulse gesendet. Die Spitzenleistung von Röhrendern liegt zwischen einigen Dutzend kW und einigen Dutzend MW je nach Anwendung und Frequenz des Radargeräts.

Bei einem Wetterradarsystem mit einem Festkörpersender (Halbleiter) beträgt die Betriebszeit üblicherweise 10 %, was wiederum zu einer vergleichbaren mittleren Leistung von einigen Hundert W führt (einige Röhrenden wie etwa TWT-Sender basieren ebenfalls auf einer geringen Spitzenleistung und hoher Betriebszeit wie die Festkörpersender).

5.2.3.3.3 Impulsbreitenbereich des Systems

Bei Elektronenröhrengeräten werden üblicherweise kurze Impulse mit hoher Spitzenleistung verwendet. Die Impulsbreite liegt im Bereich von 1 µs (zwischen 0,3 µs und 5 µs bei Magnetfeldröhren- und Klystron-Sendern).

Die Impulsbreite eines Festkörpersenders liegt üblicherweise im Bereich von 100 µs (zwischen 20 µs und 200 µs) entsprechend einem Bereich von 15 km. Das Impulskompressionsverfahren wird angewendet, um eine vergleichbare Entfernungsauflösung wie bei den kurzen Impulsen eines Röhrenders zu erreichen. Oftmals wird auch ein separater kurzer Impuls gesendet, um kurze Entfernungen abzudecken, die durch den langen Sendeimpuls maskiert werden (siehe Bild 5).

5.2.3.3.4 Impulswiederholrate

Die Impulswiederholrate (f_{PRF}) oder das Zeitintervall zwischen der Auslösung von Radarsendeimpulsen (PRT) ist ein Parameter, der von dem Radarbetreiber definiert werden kann. Die Auswahl von f_{PRF} unterliegt jedoch mehreren Einschränkungen. Eine hohe f_{PRF} reduziert den eindeutigen maximalen Bereich r_{max} eines Radarsystems. Radarechos aus Entfernungen über r_{max} hinaus werden als Zweitauslenkechos angezeigt.

$$r_{\text{max}} = \frac{c}{2f_{\text{PRF}}} \quad (1)$$

Dabei ist:

c die Lichtgeschwindigkeit.

BEISPIEL Für einen maximalen Bereich von 250 km sollte f_{PRF} nicht mehr als 600 Hz betragen.

Andererseits wird ein hoher Wert für f_{PRF} benötigt, um einen breiten, eindeutigen Dopplergeschwindigkeitsbereich v_a zu erhalten (oftmals auch als Nyquist-Frequenz bezeichnet). Unter λ ist die Wellenlänge des von dem Radar gesendeten Impulses.

$$v_a = f_{\text{PRF}} \frac{\lambda}{4} \quad (2)$$

Für ein C-Band-Radarsystem mit einem Wert für f_{PRF} von 600 Hz läge v_a im Bereich von 8 m/s, was für die Beobachtung der meisten Wetterphänomene zu langsam ist.

In der modernen Signalverarbeitung stehen mehrere Verfahren zur Überwindung dieser physikalischen Beschränkungen zur Verfügung. Duale f_{PRF} oder abgestufte PRT-Verfahren ermöglichen die Erweiterung der Nyquist-Frequenz um einen Faktor von zwei bis drei oder sogar noch mehr. Verschiedene Verfahren zum Ausgleich der Zweitauslenkung ermöglichen die Beseitigung oder den Ausgleich von Zweitauslenkechos.

Der Wert für f_{PRF} der Sender ist durch die Betriebszeit begrenzt, siehe Abschnitt 5.2.3.3.2

Übliche Werte für f_{PRF} für X-, C- und S-Band-Radarsysteme liegen zwischen 300 Hz und 2 000 Hz. Die höheren Werte für f_{PRF} werden benötigt, um bei X-Band-Radarsystemen die Auswirkung der Wellenlänge auf v_a in Gleichung (2) auszugleichen. Dies führt zu einem niedrigen Wert für r_{max} in Gleichung (1), sodass eine Beseitigung von Zeitauslenkungsechos bei X-Band-Radarsystemen oftmals zwingend erforderlich ist.

5.2.3.4 Empfänger

Der Empfänger ist das Gerät zur Verstärkung und Erkennung von Funkwellen, die an die Antenne zurückgesendet werden, und für die Extraktion der Amplituden- und Phaseninformationen aus dem empfangenen Signal. Der Empfänger ist durch einen Zirkulator und/oder T/R-Begrenzer vor der gesendeten Leistung geschützt.

Darüber hinaus wenden Impulskompressionsradarsysteme die Frequenzmodulation bei der Übertragung langer Impulse an. Durch die Verarbeitung der Impulskompression in dem Empfänger werden eine hohe Verstärkung und eine hohe Entfernungsauflösung erzielt.

5.2.3.5 Signalprozessor

Ein Signalprozessor verarbeitet die digitalisierten Amplituden- und Phaseninformationen des Empfängers und berechnet eine Vielzahl unterschiedlicher Hauptvariablen, die für Beobachtungen wie etwa der Niederschlagsmenge oder der Radialgeschwindigkeit von sich bewegenden Niederschlagsgebieten erforderlich sind.

Nachfolgend werden typische Ausgabedaten eines dualen Polarisationsradarsystems aufgeführt:

- Reflektivitätsfaktor (Z)
- Differentielle Reflektivität (Z_{dr})
- Dopplergeschwindigkeit (V)
- Spektralbreite (W)
- Phasendifferenz (Φ_{dp})
- Korrelationskoeffizient zwischen Z_h und Z_v (ρ_{hv})

5.2.3.6 Datenprozessor

Ein Datenprozessor erzeugt die Wetterergebnisse je nach Zweck des Radarsystems auf der Grundlage einer Reihe von Hauptvariablen, die von dem Signalprozessor extrahiert werden.

6 Systemleistung und Messparameter

6.1 Allgemeine Aspekte

Die Systemleistung gibt die Leistung eines Wetterradarsystems als Ganzes anstatt der Leistung jeder einzelnen Einheit des Radars an.

Systemleistungskriterien werden so bestimmt, dass die Beurteilung durch diese Kriterien auf verschiedene Arten von Wetterradarsystemen angewendet werden kann. Dies macht es Benutzern leicht, Systemspezifikationen festzulegen. Andererseits ermöglicht die Anwendung einer Reihe von Standardkriterien einen fairen Wettbewerb unter den Herstellern, da hierdurch Radarsysteme mit unzureichender Systemleistung von den globalen Märkten ausgeschlossen werden. Zu diesem Zweck

müssen die Kriterien für alle Wetterradersysteme auf die gleiche Weise gemessen werden können, bevor diese vom Werk versandt werden.

Empfindlichkeit, räumliche Auflösung, die Genauigkeit der Dopplergeschwindigkeit und die Genauigkeit der dualen Polarisationsmessung werden als Hauptkriterien gewählt, die die Systemleistung des Wetterradersystems besonders eindeutig charakterisieren, und diese werden als grundlegende Parameter bezeichnet.

Darüber hinaus werden Parameter gewählt, die nicht in den grundlegenden Parametern enthalten, aber ebenfalls sehr wichtig für die Festlegung der Systemleistung sind, und diese werden als sonstige Hauptparameter bezeichnet. Eine Zusammenfassung ist in den Tabellen 2 und 3 enthalten. Abschnitt 6.2 enthält Erläuterungen der grundlegenden Parameter und Abschnitt 6.3 erklärt die sonstigen Hauptparameter. Die Messung dieser Werte wird in Anhang A erklärt.

Tabelle 2 — Grundlegende Parameter

Parameterkategorie	Zweck	Wert
Empfindlichkeit	Bestimmt, bis zu welcher Entfernung und Stärke das Radarsystem ein Radarecho erkennen kann.	Reflektivitätsempfindlichkeit A dBz bei B km: Je kleiner A für eine Entfernung B , desto schwächer ist das Echo, das das Radar noch erkennen kann, oder desto größer ist die Entfernung, über die das Radar dasselbe Echo noch beobachten kann.
Räumliche Auflösung	Bestimmt den Detailgrad, mit dem das Radar unterscheiden kann.	Strahlaufösung (in Grad), Entfernungsaufösung (in m): Je kleiner der Wert, desto höher der Detailgrad, mit dem das Radarsystem beobachten kann.
Genauigkeit der Doppler-Geschwindigkeit	Bestimmt die Fähigkeit, Bodenecho mit Hilfe des Doppler-Filterverfahrens zu entfernen.	Phasenstabilität (in Grad): Je kleiner der Wert, desto größer ist die Fähigkeit, Bodenechos zu entfernen.
Genauigkeit der dualen Polarisationsmessung	Bestimmt die Fähigkeit, Wetterechoarten genau durch polarimetrische Parameter zu beobachten.	Kreuzpolarisationsisolation (in dB): Wird als negativer Wert angegeben, je kleiner der Wert, desto besser ist das System in der Lage, das horizontale von dem vertikalen Signal zu trennen.

Tabelle 3 — Sonstige Hauptparameter

Parameterkategorie	Zweck	Wert
Nebenkeule	Bestimmt die Realitätstreue der Radarwerte aufgrund starker Echos außerhalb der Achse.	Verstärkung (in dB) relativ zur Antennenempfindlichkeit entlang der Antennenachse. Angegeben als negative Zahl, je kleiner der Wert, desto weniger Störenergie wird von dem Radarsystem beobachtet.
Bereichs-Nebenkeule	Relevant für Impulskompressionsradarsysteme, bestimmt die Realitätstreue der Radarwerte aufgrund großer Mengen radial ausgerichteter Echos außerhalb des Volumens.	Verstärkung (in dB) relativ zur Impulsspitzenstärke. Angegeben als negative Zahl, je kleiner der Wert, desto weniger Energie von außerhalb des Volumens wird von dem Radarsystem beobachtet.
Maximale Rotationsgeschwindigkeit	Bestimmt, wie schnell sich das Radarsystem drehen kann.	Maximale Rotationsgeschwindigkeit (in U/min oder Grad/s): Je größer der Wert, desto schneller kann das Radarsystem sich drehen.
Beschleunigung	Bestimmt, wie schnell die Antenne eine neue Peilrichtung einnehmen kann.	Zeit, bis die Antenne vollständig zum Halt kommt von 0 auf 90 Grad und von 90 auf 0 Grad (EL). Zeit, die die Antenne von der maximalen Geschwindigkeit bis zum vollständigen Stillstand benötigt (AZ).
Genauigkeit der Antennenpeilrichtung	Bestimmt die Genauigkeit der Winkelposition der Daten.	Genauigkeit der Antennenpeilrichtung (in Grad): Je kleiner der Wert, desto genauer und präziser.
Parallele Strahlausrichtung	Bestimmt, wie gut der horizontale und der vertikale Strahl ausgerichtet sind.	Ausrichtung (in Grad): Je kleiner der Wert, desto besser ist die Ausrichtung.
Abstimmung der Strahlbreite	Bestimmt, wie gut die horizontalen und vertikalen Strahlbreiten abgestimmt sind.	Abstimmung (in Grad): Je kleiner der Wert, desto besser ist die Abstimmung.
Dynamikbereich	Bestimmt die Breite der von dem Radarsystem messbaren Werte.	Dynamikbereich (in dB): Je größer der Wert, desto breiter ist der Signalbereich, den das Radarsystem erkennen kann.
Nebenwellenaussendung	Bestimmt die Reinheit des gesendeten Spektrums des Radarsystems.	A dBz bei B MHz Je kleiner der Wert, desto reiner und sauberer ist das gesendete Spektrum.

6.2 Grundlegende Parameter

6.2.1 Empfindlichkeit

6.2.1.1 Definition

Die Empfindlichkeit definiert, bis zu welcher Entfernung und Stärke das Radarsystem ein Radarecho erkennen kann. Wenn A dBz als Reflexionsvermögen des Niederschlags und B km als maximale Entfernung für die Beobachtung von A festgelegt wird, kann die Empfindlichkeit A dBz bei B km wie folgt berechnet werden.

$$A = 10\log(C_0 C_{1F}) + 20\log(B) \quad (3)$$

Dabei ist:

C_0 ein unabhängig von der Systemleistung bestimmter Parameter

C_{1F} ein für jedes Weterradarsystem einschließlich des Systemverlusts spezifischer Parameter

Die Einstellung B , C_0 , C_{1F} und A wird berechnet. Je kleiner A für die Entfernung B , desto geringere Echos kann das Radarsystem erkennen. Parameter, die C_0 und C_{1F} in Tabelle 4 festlegen (z. B. λ , SNR, $S_{\min}$, P_t usw.), werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

6.2.1.2 Ableitung von der Radargleichung

Die Empfindlichkeit in Verbindung mit dem Niederschlagsziel ist ein Messwert, um festzustellen, wie weit ein Niederschlagsziel beobachtet werden kann.

Wenn die empfangene von dem Niederschlagsziel gestreute Energie P_r ist und der Radarreflektivitätsfaktor des Niederschlagsziels Z beträgt, wird P_r wie folgt angegeben:

$$P_r = \frac{C \cdot Z}{r^2} \quad (4)$$

dabei ist

$$C = \frac{P_t G_t G_r h \theta_H \theta_V \pi^3}{2^{10} (\log_e 2) \lambda^2} \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right)^2 \quad (5)$$

und

$$Z = \int N_D D^6 dD \quad (6)$$

Dabei ist:

P_t die Sendeleistung in W

G_t, G_r der Antennengewinn (Senden, Empfangen)

h die räumliche Impulslänge, definiert als $c \cdot \tau$, in m

θ_H die Antennenstrahlbreite der horizontalen Ebene in rad

θ_V die Antennenstrahlbreite der vertikalen Ebene in rad

λ die Wellenlänge in m

ε die komplexe Permittivität der Niederschlagspartikel

D der Regentropfendurchmesser in m

N_D die Anzahl der Regentropfen pro Volumeneinheit in $1/m^3$

r der Streubereich in m

C die Radarkonstante in W/m [2]

P_r wird als minimal erkennbares Signal bezeichnet, wenn es der Mindestleistungsstärke entspricht, die erkannt werden kann, und wird als $S_{\min}$ angegeben. Dieser Wert $S_{\min}$ wird in der Gleichung (4) ersetzt, um den minimalen Radarreflektivitätsfaktor $Z_{\min}$ bei einer willkürlichen Entfernung r wie folgt zu berechnen:

$$Z_{\min}(r) = \frac{S_{\min}}{C} r^2 \quad (7)$$

Dabei ist:

$Z_{\min}(r)$ der Empfindlichkeitsindex des Wetterradarsystems

Wenn die Elemente auf der rechten Seite der Gleichung (7), die nicht für jede Radareinheit gemessen werden müssen, als C_0 gesetzt und die für jedes Radargerät spezifischen Elemente, die gemessen werden müssen, als C_1 gesetzt werden, wird die Gleichung (7) wie folgt angegeben:

$$Z_{\min}(r) = C_0 C_1 r^2 \quad (8)$$

C_0 beinhaltet die folgenden Elemente auf der rechten Seite der Gleichung (7):

$$C_0 = \frac{2^{10} (\log_e 2) \lambda^2}{\pi^3 \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right|^2} \quad (9)$$

Entsprechend gilt: wenn C_1 , P_t , G_t , G_r , h , θ_H , θ_V und $S_{\min}$ in Gleichung (7) hat, wird dies wie folgt angegeben:

$$C_1 = \frac{S_{\min}}{P_t G_t G_r h \theta_H \theta_V} \quad (10)$$

Der Wert von C_0 ist mit der Wellenlänge und der Temperatur verbunden. Typische Werte C_0 für jedes Frequenzband von S, C und X bei 20 °C sind in Tabelle 4 angegeben. Die Wellenlänge des S-Bands beträgt 0,1 m, die Wellenlänge des C-Bands 0,057 m und die Wellenlänge des X-Bands 0,032 m.

Tabelle 4 — Typische Werte für C_0 (Temperatur 20 °C)

Elemente	S-Band	C-Band	X-Band
$\lambda(\text{m})$	0,1	0,057	0,032
$\left \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right ^2$	0,928	0,928	0,927
C_0	0,2467	0,0801	0,0253

Da die Wellenlänge λ üblicherweise durch die Übertragungsfrequenz f_0 (MHz) bestimmt wird, wird sie wie folgt unter Verwendung der Lichtgeschwindigkeit als $3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ berechnet:

$$\lambda = \frac{300}{f_0} \quad (11)$$

6.2.1.3 Standardberechnung

(mm^6/m^3) wird für die Einheit des Radarreflektivitätsfaktors Z verwendet und üblicherweise als dBz angegeben. Der gemeinsame Logarithmus auf beiden Seiten der Gleichung (8) berücksichtigt dies und wird wie folgt mit 10 multipliziert:

$$10\log(Z_{\min}(r)) = 10\log(C_0) + 10\log(C_1) + 20\log(r) + 180 \quad (12)$$

$10\log(C_1)$ wird aus Gleichung (10) wie folgt erweitert:

$$10\log(C_1) = 10\log(S_{\min}) - 10\log(P_t) - 10\log(G_t) - 10\log(G_r) - 10\log(h) - 10\log(\theta_H) - 10\log(\theta_V) \quad (13)$$

Nachfolgend werden die für die zu messenden Elemente verwendeten Einheiten angegeben:

- Minimal erkennbares Signal: $10\log(S_{\min})$, in dBm
- Übertragungsleistung: $10\log(P_t)$, in dBm
- Antennengewinn: $10\log(G_t)$, $10\log(G_r)$, in dB
- Räumliche Impulslänge: h , in m

Die räumliche Impulslänge ist der Wert der Impulsbreite τ (in s) multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit. Da die Impulsbreite üblicherweise in der Einheit μs gemessen wird, wird die räumliche Pulslänge wie folgt bestimmt:

$$h = 300\tau_{(\mu\text{s})} \quad (14)$$

- $\theta_{H/V}$ in rad

Da die Strahlbreite in Grad gemessen wird, wird diese wie folgt in das Bogenmaß umgerechnet:

$$\theta_{H/V} = \frac{\pi}{180 \cdot \theta_{H/V}(\text{deg})} \quad (15)$$

6.2.1.4 Systemverlust und Dämpfung der Funkwelle

Die Funkwelle wird während der Übertragung im tatsächlichen Betrieb gedämpft (Leistungsverlust). Aus diesem Grund müssen der Leistungsverlust, der durch Radarkomponenten wie etwa Wellenleiter verursacht wird, und die verursachte Dämpfung, wenn sich die Funkwelle im Raum ausbreitet (durch Luft und Niederschlag), berücksichtigt werden. Der Verlust und die Dämpfung führen zu einer Verschlechterung des Radarempfindlichkeitsindex $Z_{\min}$ (Erhöhung). Wenn der durch die Radarkomponente verursachte Leistungsverlust F beträgt, ist F in C_1 enthalten, da dieses Element für das Radargerät spezifisch ist und gemessen werden sollte. Siehe A.2.8 für den zu messenden Systemverlust.

Dieser wird als C_{1F} berechnet und wie folgt aus der Gleichung (13) ermittelt:

$$10\log(C_{1F}) = 10\log(S_{\min}) - 10\log(P_t) - 10\log(G_t) - 10\log(G_r) - 10\log(h) - 10\log(\theta_H) - 10\log(\theta_V) + 10\log(F) \quad (16)$$

Wird darüber hinaus die Dämpfung durch Atmosphäre, Wasser und Dampf als L belassen, ist L die Funktion des Ausbreitungsbereichs r und der Niederschlagsintensität R und wird wie folgt angegeben:

$$L(r, R) = 2 \int_0^r (k_a + K_r R^\alpha) dr \quad (17)$$

Dabei ist

k_a die spezifische Dämpfung durch Luft in dB/km

K_r, α die spezifische Dämpfung durch Regen K_r in dB/km

R die Niederschlagsintensität in mm/h

r der Bereich in km

Wenn die Niederschlagsintensität entlang des Ausbreitungswegs R konstant ist (R_0), ist nur die Entfernung in der Gleichung (17) variabel und wird wie folgt angegeben:

$$L(r) = 2(k_a + k_r R_0^\alpha) r \quad (18)$$

zur Vereinfachung der Beurteilung des Empfindlichkeitsindex bei Niederschlag.

Da die Werte für k_a , k_r und α je nach verwendeter Frequenz unterschiedlich sind, werden hierfür typische Werte gemäß jedem Frequenzband zur Beurteilung eingesetzt, wie in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5 — Spezifische Dämpfung durch Luft und Regen (eingerichtet, R in mm/h)

Frequenzband	Spezifische Dämpfung durch Luft ^a	Spezifische Dämpfung durch Regen ^b	
	k_a (dB/km)	k_r (dB/km)	α
S	0,00589	0,000343	0,97
C	0,00707	0,0018	1,05
X	0,008835	0,01	1,21
^a siehe [1]			
^b CIMO Guide [1] Tabelle 9.5 eingerichtete spezifische Dämpfungen bei 18 °C			

Die unveränderte Verwendung von $S_{\min}$ ist darüber hinaus unzureichend. Die Verwendung eines angemessenen Werts für SNR (in dB) sollte hinzugefügt werden. Dieser Wert kann vom Anwender festgelegt werden. Wenn der Anwender sich nicht entscheiden kann, wird 1 dB verwendet.

Auf der Grundlage des Vorgenannten wird die Gleichung (12) praktisch wie folgt angegeben:

$$10\log(Z_{\min}(r)) = 10\log(C_0) + 10\log(C_{1F}) + 20\log(r) + L(r) + SNR + 180 \quad (19)$$

6.2.1.5 Impulskompressionsgewinn

Bei Impulskompressionsradarsystemen werden der Impulskompressionsgewinn G_c und die Impulsbreite τ_c nach der Impulskompression für die Berechnung des Empfindlichkeitsindex der Gleichungen (13) und (14) verwendet.

$$P_t = P'_t G_c \quad (20)$$

$$10\log(P_t) = 10\log(P'_t) + 10\log(G_c) \quad (21)$$

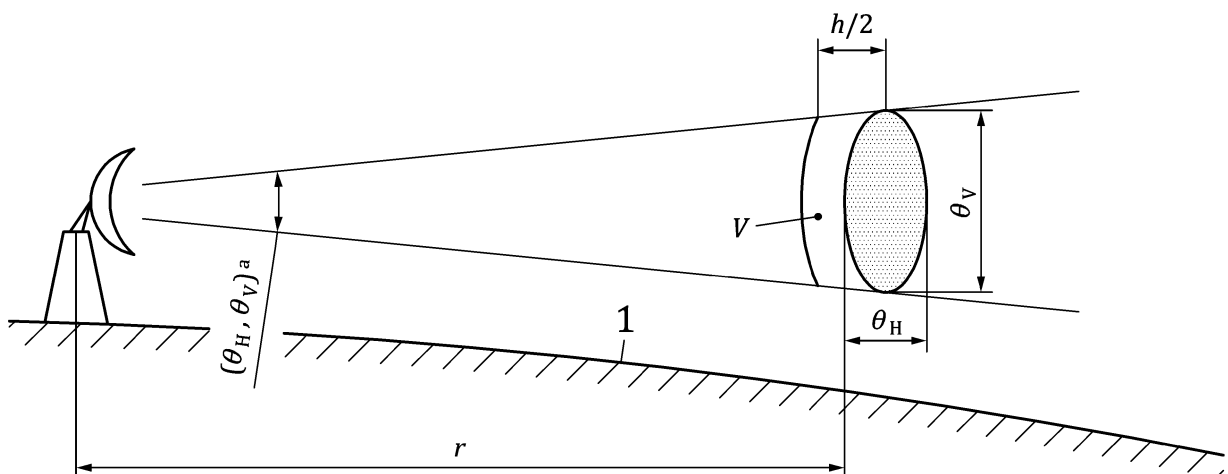
Dabei ist P'_t die ursprüngliche Übertragungsspitzenleistung multipliziert mit dem Impulskompressionsgewinn G_c , G_c wird $10\log(bT)$ theoretisch. (dabei ist b die Frequenzmodulationsbreite und T die Übertragungsimpulsbreite). h der Gleichung (14) wird unter Verwendung von τ_c berechnet.

6.2.2 Räumliche Auflösung

6.2.2.1 Definition

Bestimmt den Detailgrad, mit dem das Radarsystem unterscheiden kann.

Wie in Bild 6 gezeigt, entspricht dies einem Abtastvolumen des Radarsystems umgeben von $h/2$ (wenn h die räumliche Impulslänge ist) und der Strahlbreite. Je kleiner das Abtastvolumen, desto höher der Detailgrad, mit dem das Radarsystem beobachten kann.



Legende

- 1 Bodenoberfläche
- h Impulslänge
- r Bereich
- V Zielvolumen
- a Strahlbreite

Bild 6 — Räumliche Auflösung

Die räumliche Auflösung wird in die Strahlaufösung und die Entfernungsaufösung aufgeschlüsselt.

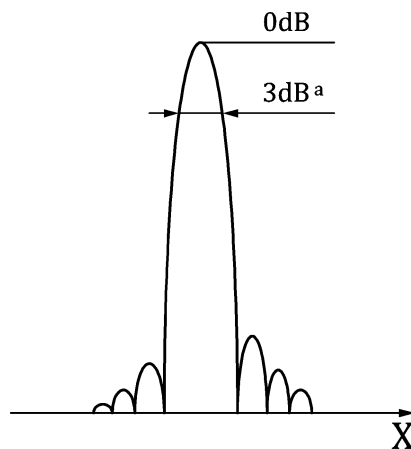
Die Systemleistung wird in Übereinstimmung mit der folgenden Tabelle beurteilt:

Tabelle 6 — Systemleistungsparameter

Kategorie	Parameter	Auswertung
Strahlaufösung	θ_H : Die Antennenhalbwertsbreite der horizontalen Ebene (in rad) θ_V : Die Antennenhalbwertsbreite der vertikalen Ebene (in rad)	Je kleiner, desto besser
Entfernungsaufösung	ΔR_{pc} : Für Impulskompressionsradar (in m) ΔR_{np} : Für Nicht-Impulskompressionsradar (in m)	Je kleiner, desto besser

6.2.2.2 Strahlaufösung

Die Strahlaufösung wird aus der Messung der Hauptkeule der Antenne ermittelt. Die Hauptkeule wird durch die Halbwertsbreite gemessen (bei 3-dB-Abgleichfrequenz, siehe Bild 7) und zeigt, wie eng der Strahl um die Emissionsmitte ist. Eine feine Strahlaufösung wird erreicht, wenn die Halbwertsbreite der Hauptkeule kleiner ist. Es sollte beachtet werden, dass die Strahlaufösung durch den schlechtesten Wert zwischen der Hauptkeule des Übertragungsstrahls und der Winkelverarbeitungseinheit des Empfängers begrenzt ist.



Legende

- ^a Abgleichfrequenz : Strahlbreite
- X Horizontaler/vertikaler Winkel

Bild 7 — Strahlaufösung

6.2.2.3 Entfernungsaufösung

Die Entfernungsaufösung ist mit der Übertragungsimpulslänge verbunden, wird aber durch Engpässe im gesamten System einschließlich der Merkmale des Empfängers wie etwa der Bandbreite und dem Abtastintervall begrenzt. Diese Beschränkungen müssen bei der Berechnung der Entfernungsaufösung berücksichtigt werden, anstatt einfach nur die räumliche Länge des Übertragungsimpulses zu verwenden.

Da das empfangene Signal als diskreter Wert für jedes Abtastintervall im Fall eines digitalen Empfängersystems erhalten wird, wird die Impulsbreite bei der 3-dB-Abgleichfrequenz der empfangenen Leistungswellenform nicht direkt in der gleichen Weise wie die Messung der Übertragungsimpulsbreite überwacht.

Diesbezüglich sollten Impulskompressions- und Nicht-Impulskompressionsradarsysteme unterschiedlich behandelt werden.

Für Nicht-Impulskompressionsradarsysteme sollte die Entfernungsauflösung durch eine Kombination aus Engpassfaktoren, die die Auflösungsleistung begrenzen, wie etwa die Übertragungsimpulshalbwertszeit, das Abtastzeitintervall und die Empfängerbandbreite, geschätzt werden.

Die Entfernungsauflösung wird geschätzt als

$$\Delta R_{np} = \max(L_1, L_2, L_3) \quad (22)$$

unter Verwendung von Auflösungswerten L_1 , L_2 , L_3 , die anhand von der Übertragungsimpulshalbwertsbreite, dem Abtastzeitintervall bzw. der Empfängerbandbreite entsprechenden Engpassfaktoren berechnet werden.

Für die Halbwertsbreite des Übertragungsimpulses wird L_1 mit der gemessenen Halbwertsbreite des Übertragungsimpulses τ_t berechnet.

$$L_1 = \frac{c}{2} \tau_t \quad (23)$$

Dabei ist:

τ_t die Halbwertsbreite des Übertragungsimpulses

Das Abtastzeitintervall des empfangenen Signals ist das Verarbeitungszeitintervall t_s in der Endphase des Signalprozessors. Bei Verwendung eines Zeitintervalls t_s wird L_2 berechnet als:

$$L_2 = \frac{c}{2} t_s \quad (24)$$

Schließlich wird die Bandbreite des Empfängers (3-dB-Abgleichfrequenz an der Spitze) L_3 wie folgt berechnet:

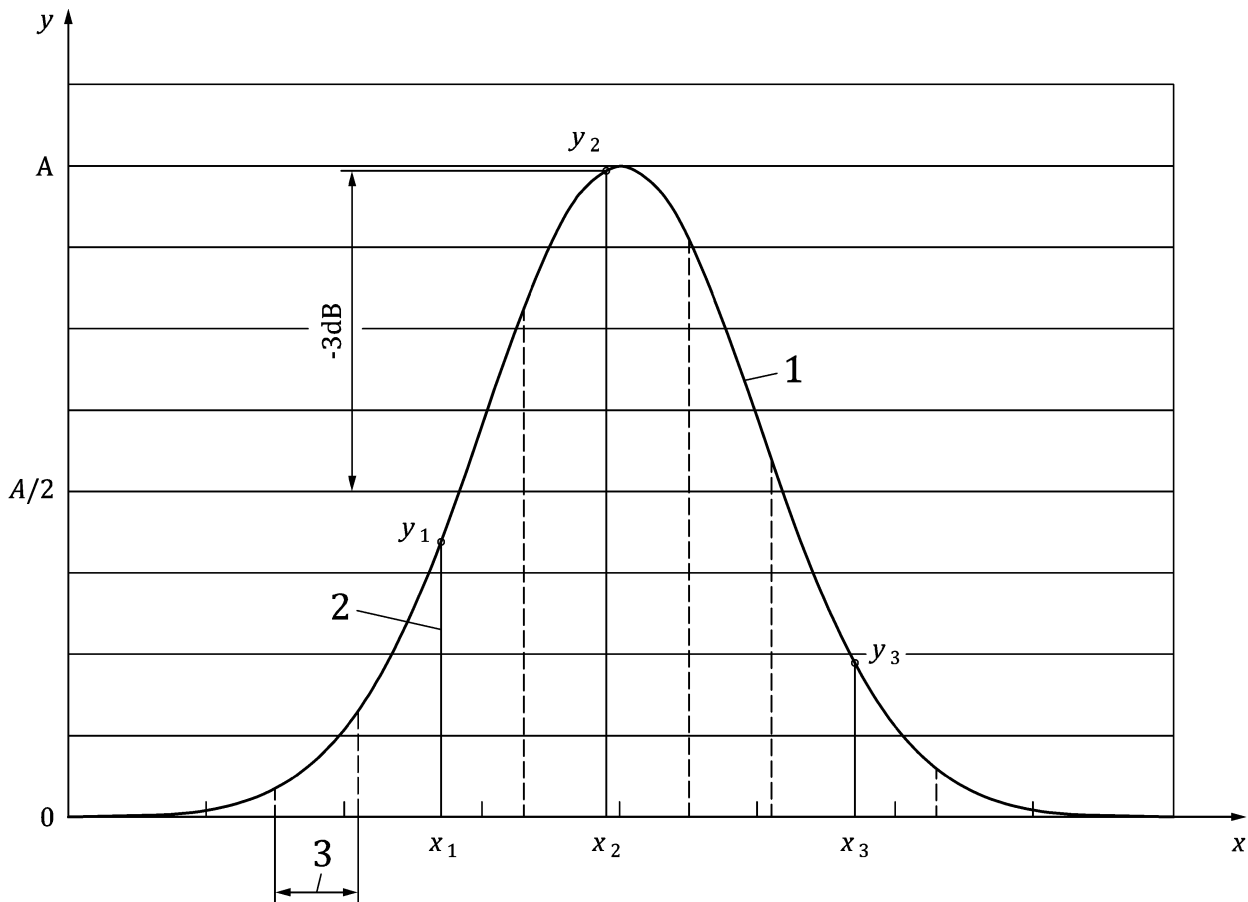
$$L_3 = \frac{c}{2} \frac{1}{\Delta f} \quad (25)$$

Dabei ist:

Δf die Bandbreite des Bandpassfilters des Empfängers gemessen an der 3-dB-Abgleichfrequenz von der Spitze.

Bei Impulskompressionsradarsystemen erfolgt die Änderung der Wellenform durch erhöhten Kosinus auf der Übertragungswelle, um eine Verbreiterung des Spektrums zu verhindern. Darüber hinaus wird eine Fensterungsfunktion auf die empfangene Welle angewendet, um Bereichsnebenkeulen zu unterdrücken. Bei dieser Wellenformänderung passt die Gauss-Näherung gut zu der Wellenform nach der Impulskompression. Bild 8 zeigt ein Beispiel für das Messmuster des empfangenen Signals.

Da das Abtastintervall im Allgemeinen im Vergleich zur Impulsbreite nicht klein genug ist, wird die Impulsbreite aus den drei Messpegeln der erhaltenen Signale entsprechend einem Übertragungsspitzenimpuls und beiden Seiten der 3-dB-Abgleichfrequenz der Impulsspitze geschätzt.



Legende

- 1 Erhaltene Impulswellenform nach Impulskompression
- 2 Messimpuls
- 3 Abtastintervall

Bild 8 — Erhaltene Signalmesswellenform

Unter Beibehaltung von x als X-Achse, A als maximale Amplitude, μ als Mittelwert und σ^2 als Varianz, wird die empfangene Impulswellenform $y(x)$ mit der folgenden Gleichung (26) angegeben.

$$y(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (26)$$

Die Impulsbreite wird durch Berechnung von A , μ und σ^2 mit drei gemessenen Werten von (x_1, y_1) , (x_2, y_2) und (x_3, y_3) , die an der empfangenen Impulswellenform gemessen wurden, geschätzt. Um die Genauigkeit der Impulsbreitenschätzung zu erhöhen, sollte y_2 ungefähr dem Spitzenwert entsprechen und y_1 und y_3 sollten knapp unter der 3-dB-Abgleichfrequenz aus y_2 liegen.

Der natürliche Logarithmus auf beiden Seiten der Gleichung (26) wird zu:

$$\ln(y(x)) = \ln(A) - \frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \quad (27)$$

Der Mittelwert μ , die Varianz σ^2 und die maximale Amplitude A werden wie folgt durch Ersetzen der drei gemessenen Werte in der Gleichung (27) und Lösen der simultanen Gleichungen berechnet.

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{y_3}{y_2}\right)(x_1^2 - x_2^2) - \ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)(x_2^2 - x_3^2)}{2\left(\ln\left(\frac{y_3}{y_2}\right)(x_1 - x_2) - \ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)(x_2 - x_3)\right)} \quad (28)$$

$$\sigma^2 = \frac{(x_1^2 - x_2^2) - 2\mu(x_1 - x_2)}{2\ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)} \quad (29)$$

$$A = y_1 e^{\left(\frac{(x_1 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (30)$$

Wenn die Impulsbreite als Breite der 3-dB-Abgleichfrequenz von der maximalen Amplitude A definiert wird, wird die Impulsbreite τ_{pc} wie folgt angegeben:

$$\tau_{pc} = 2(x_3 - \mu) \sqrt{\frac{3}{10\log(A) - 10\log(y_3)}} \quad (31)$$

Die Entfernungsauflösung von Impulskompressionsradarsystemen wird anhand der oben geschätzten τ_{pc} berechnet als

$$\Delta R_{pc} = \frac{c}{2} \tau_{pc} \quad (32)$$

6.2.3 Phasenstabilität

Die Genauigkeit der Dopplergeschwindigkeit des Radarsystems hängt von der Phasenstabilität der Übertragungsfrequenz und der Stabilität der Impulswiederholrate ab. Phasenrauschen verschlechtert die Doppler-Beobachtungsfähigkeit des Radarsystems und beeinflusst damit die Bodenecho-Unterdrückung und die Schätzung der dualen Polarisationsdaten. Der STALO wird üblicherweise als dominantester Faktor der Phaseninstabilität [4] in Systemen mit Verstärkern (Klystron, Festkörper) berücksichtigt. Ein Oszillator generiert üblicherweise eine einzige Frequenz, die jedoch in der Praxis Instabilität durch zufällige Phasenschwankungen um die Trägerfrequenz unterliegt. Das Phasenrauschen wird in Einheiten von dBc/Hz als spektrale Leistungsdichte jeder 1 Hz Bandbreite von der Trägerfrequenz entfernt gemessen und auf die Trägerfrequenzleistung bezogen.

Wenn $L(f)$ diese spektrale Dichte (angegeben als Antilogarithmus) mit einer Bandbreite von 1 Hz verursacht durch zufällige Schwankungen ist, wird θ_{ps} definiert als Phasenstabilität in einem bestimmten Bereich $[a, b]$ in Gradeinheiten, die wie folgt berechnet werden:

$$\theta_{ps} = \frac{180}{\pi} \sqrt{2 \int_a^b L(f) df} \quad (33)$$

dabei bedeutet $\sqrt{2}$, dass die Phasenstabilität als Zweiseitenband berechnet werden sollte. Als Integralbereich wird hier $[a, b]$ auf $[10 \text{ Hz}, 1 \text{ MHz}]$ für die Berechnung unter Berücksichtigung der üblichen f_{PRF} Werte für das S/C/X-Band gesetzt. Bezüglich der Frequenzdifferenzen Δn wird die Erhöhung des Phasenrauschens bei Multiplikation der Frequenz des Oszillators mit N wie folgt angegeben:

$$\Delta n = 20 \log_{10} N = 10 \log_{10} N^2 \quad (34)$$

Da das Phasenrauschen im Hinblick auf dem RMS-Wert der Quadratwurzel eines Integralwerts als Antilogarithmus entspricht, besteht eine proportionale Beziehung zwischen der Schwingungsfrequenz und dem Phasenrauschen in Grad-Maßeinheiten.

Das vorgenannte Verfahren dient ausschließlich der Schätzung des aus dem STALO resultierenden Phasenrauschens. Bei Magnetfeldröhrenradarsystemen wird eine Messung jedes gesendeten Impulses vorgenommen und die Phaseninformationen aus dieser Messung werden von dem Empfänger verwendet, um die Dopplerverschiebung aus sukzessiven Impulsen zu messen. Dies wird als „kohärenter Empfang“ bezeichnet. Bei diesen Systemen müssen zusätzliche Quellen für Phasenrauschen berücksichtigt werden. Die Phasenstabilität des gesamten Radarsystems kann mithilfe einer optischen Verzögerungsleitung gemessen werden. Die Verzögerungsleitung erzeugt die für die Dopplermessung erforderliche Verzögerung. Andere Optionen wie etwa Verzögerungsleitungen für akustische Oberflächen oder akustische Volumenwellen leiden unter hohen Einfügedämpfungen, die das Signal-Rausch-Verhältnis reduzieren. Darüber hinaus sind die inhärenten Verzögerungen zu kurz für Messungen über größere Entfernungen.

Die optische Verzögerungsleitung besteht aus einem RF-zu-Optisch- und Optisch-zu-RF-Wandler mit zwischengeschalteter Gasfaser-Spule. Der RF-zu-Optisch-Sender besteht aus einer Dauerstrich-Laserdiode (CW), die üblicherweise mit dem Mikrowellensignal amplitudenmoduliert wird. Der Optisch-zu-RF-Empfänger wandelt das durch die Gasfaser-Spule gesendete optische Signal wieder in ein Funksignal mit denselben Eigenschaften bei reduzierter Amplitude um. Die Länge der Spule bestimmt die Verzögerung des empfangenen Sendeimpulses.

Bei Verwendung der vorhandenen Signalverarbeitungs-Hardware zeigt der Vergleich der Sendesignalphase (Sendeabtwert) mit der empfangenen Echophase das inhärente Phasenrauschen des Systems. Die Systemkohärenz wird darüber hinaus durch die Signalverarbeitungseinheit des Radarempfängers berechnet. Dieses Verfahren kann nicht nur für Magnetfeldröhrenradarsysteme verwendet werden, sondern ermöglicht auch integrale Messungen des Phasenrauschens für Klystron- oder Festkörpersysteme.

6.2.4 Genauigkeit der dualen Polarisationsmessung

6.2.4.1 Duale Polarisation

Die Genauigkeitsanforderungen für duale Polarisationsradarsysteme sind höher als bei herkömmlichen Radarsystemen mit einfacher Polarisation. Duale Polarisationsprodukte basieren auf den Unterschieden zwischen den beiden Polarisierungen und Versatz zwischen den beiden Kanälen kann zu erheblichen Fehlern der ermittelten Mengen wie beispielsweise der geschätzten Niederschlagsrate führen. Es wird beispielsweise angenommen, dass der Reflektivitätsfaktor mit einer Messunsicherheit von ungefähr 1 dB geschätzt werden kann, während bei der Reflektivitätsdifferenz (Z_{dr}) – der Differenz des Reflektivitätsfaktors der linearen horizontalen und vertikalen Polarisierung – eine Messunsicherheit von mindestens 0,2 dB erforderlich ist [5].

6.2.4.2 Kreuzpolarisation und Signaltrennung

Die Kreuzpolarisation ist die Fähigkeit der Antenne, das horizontale von dem vertikalen Signal zu trennen. Dieser Parameter wird üblicherweise von dem Antennenhersteller auf einem Fernfeld-Prüfstand ermittelt. Ein polarisiertes Signal mit hoher Qualität wird an die Antenne auf der Hauptachse gesendet, um ein kopolarisiertes Antennendiagramm zu erhalten. Dies wird üblicherweise für das kreuzpolarisierte Signal wiederholt, indem die Empfängerantenne um 90 Grad gedreht wird. Der Kreuzpolarisationsparameter wird definiert als die Differenz zwischen dem Höchstwert beider Polarisierungen innerhalb der 3-dB-Strahlbreite.

Die Signaltrennung beschreibt die Fähigkeit des Radarsystems, die horizontalen und vertikalen Signale nach dem Empfang durch das Antennensystem voneinander zu trennen. Dieser Parameter kann leicht für einzelne Radarkomponenten wie die Drehgelenke oder den Hohlleiterschalter bestimmt werden. Die Schätzung der integralen Signaltrennung für alle beitragenden Komponenten ist jedoch technisch sehr komplex. Da bei

aktuellen Radarsystemen die Größenordnung der Signaltrennung um einiges geringer ist als die Kreuzpolarisation, ist dieser Parameter in Bezug auf die Systemleistung von untergeordneter Bedeutung.

6.3 Sonstige Hauptparameter

6.3.1 Nebenkeule

Für Nebenkeulen sollte der Unterdrückungsgrad der Antennennebenkeule und der Bereichsnebenkeule gemessen werden. Dies bestimmt die Realitätstreue der Radarwerte aufgrund starker Echos außerhalb der Achse. Letzteres ist relevant für Impulskompressionsradarsysteme, bestimmt die Realitätstreue der Radarwerte aufgrund großer Mengen radial ausgerichteter Echos außerhalb des Volumens.

6.3.2 Parallele Strahlausrichtung

Dieser Parameter wird als Graddifferenz zwischen den Spitzen der horizontalen und vertikalen kopolarisierten Antennendiagramme festgelegt. Es handelt sich hierbei um einen Messwert für den Vergleich der Strahlrichtung des horizontalen und vertikalen Strahls.

6.3.3 Abstimmung der Strahlbreite

Dieser Parameter ist festgelegt als Graddifferenz zwischen den horizontalen und vertikalen kopolarisierten Antennendiagrammen bei einem gegebenen Pegel (-3 dB, -10 dB). Es handelt sich hierbei um einen Messwert für den Vergleich des durch den horizontalen und vertikalen Strahl ausgestrahlten Volumens.

6.3.4 Maximale Rotationsgeschwindigkeit

Dieser Parameter ist mit der Drehgeschwindigkeit der Antenne verbunden. Je größer der Wert, desto schneller kann das Radarsystem scannen.

6.3.5 Beschleunigung

Dieser Parameter gibt an, wie schnell das Radargerät den Antennenscan beschleunigen kann und wie schnell die Antenne eine neue Peilrichtung einnehmen kann. Da eine korrekte Messung der absoluten Beschleunigung in deg/s^2 kompliziert ist, legt diese Norm als Alternative die benötigte Dauer bis zum vollständigen Stillstand der Antennen in AZ-/EL-Richtung aus voller Bewegung fest.

6.3.6 Genauigkeit der Antennenpeilrichtung

Die Genauigkeit der Antennenpeilrichtung behandelt verschiedene Aspekte:

- die Fähigkeit des Positionierungssystems, die Antennenschüssel mit einer definierten Genauigkeit zu einem gegebenen Azimuth und Höhenwinkel im Verhältnis zum mechanischen Bezugspunkt an der Positionierungseinheit zu steuern
- die Fähigkeit des Systems, wiederholt über einen längeren Zeitraum (Monate, Jahre) in eine gegebene Richtung zu zeigen
- die präzise Ausrichtung der internen (Hardware) Azimuth-/Höhenreferenz auf die lokale geografische Auswirkung, um die gemessenen Daten mit einer Erdposition zu verbinden
- die Ausrichtung des Strahls in beiden Polarisierungen (sofern anwendbar) auf den Fokus der Antenne.

Die Peilgenauigkeit ist vielen Einflüssen unterworfen, wie etwa der Art der Positionierungssysteme (Getriebe, Riemen), der mechanischen Installation am Standort (Nivellierung), der baulichen Struktur des Turms (Stahl, Beton), der Nordausrichtung, der Montage der Schüssel und des Speisehorns.

Die geografische Ausrichtung der Antenne und ihre Stabilität über einen längeren Zeitraum können mit Software-Tools des Radarherstellers, die das elektromagnetische Signal der Sonne als Positionsreferenz nutzen, verifiziert und überwacht werden. Diese Art der Messung setzt die Verfügbarkeit der genauen geografischen Position des Radarsystems und die korrekte Uhrzeit voraus, da beides zur Schätzung der Bezugsposition der Sonne verwendet wird. Anhang D enthält Details zu der empfohlenen Frequenz der Antennenpeilrichtungsprüfungen mithilfe der Sonne.

In Anbetracht der Problematik der Bestimmung der absoluten Peilgenauigkeit in einem Werk besteht eine gangbare Methode zur Messung der Peilgenauigkeit in der Messung der Wiederholpräzision im Werk, gefolgt von der Sonnenprüfung vor Ort. Wiederholpräzisionsprüfungen dienen der Prüfung der Fähigkeit der Antenne, nach kontinuierlicher Bewegung in die gleiche Richtung zu zeigen.

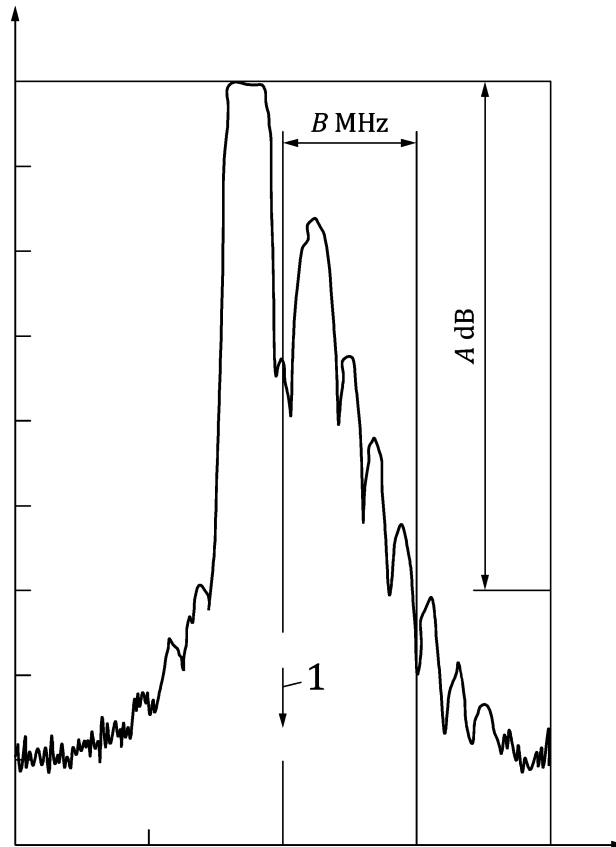
6.3.7 Dynamischer Bereich

Der dynamische Bereich entspricht dem Verhältnis zwischen der maximalen und der minimalen Signalstärke, die der Radarempfänger messen kann. Hierbei handelt es sich um die Differenz der Empfängerleistung zwischen dem minimal erkennbaren Signal ($S_{\min}$) und der Sättigung des Verstärkers in dB. Die Sättigung kann auch im digitalen Bereich durch Überlauf auftreten. Die Messung oder Berechnung von $S_{\min}$ wird beschrieben in A.2.. Das maximale Signal kann über den Kompressionspunkt eines Verstärkers festgelegt werden. Der Kompressionspunkt für die Charakterisierung von Empfängern liegt sehr häufig bei 1 dB. Dies ist der Punkt, an dem die Empfängerverstärkung durch die Kompression um 1 dB reduziert wird. Der Verstärker beginnt bei dem Kompressionspunkt von 1 dB abzufallen oder nachzulassen. Wenn der Verstärker im linearen Bereich betrieben wird, führt eine Erhöhung des Eingangssignals um 3 dB zu einer Erhöhung des Ausgangssignals um 3 dB.

Es wird empfohlen, für die Messung einen externen und hochstabilen Signalerzeuger zu verwenden. Der Ausgangsleistungsbereich des Signalerzeugers muss den erwarteten Dynamikbereich des Empfängers abdecken. Der Dynamikbereich sollte über die gesamte Empfängergruppe von dem Eingang des Empfängers gemessen werden, der sich üblicherweise am Übergang zwischen Hohlleiter und Koaxialleiter befindet. Dies umfasst die analoge und digitale Signalverarbeitung. Die komplette Empfängergruppe umfasst das rauscharme Front-End-Gerät, die Abwärts-Frequenzumsetzer, die Filter, die A/D-Wandler und die digitale Signalverarbeitung.

6.3.8 Nebenwellenunterdrückung

Die Nebenwellenunterdrückung misst die Reinheit des gesendeten Radarspektrums (siehe Bild 9). Der Ausdruck A dB bei B MHz zeigt, dass A dB an einem Punkt B MHz entfernt von der Mittenfrequenz von dem spektralen Höchstwert reduziert ist. Je größer der Wert für A ist, desto mehr Radarsysteme können aufgrund der engen Frequenzbandbreite in demselben Band betrieben werden.



Legende

- 1 Mittenfrequenz

Bild 9 — Nebenwellenunterdrückung

7 Kalibrierung, Überwachung und Instandhaltung

7.1 Allgemeine Aspekte

Die Begriffe Kalibrierung, Instandhaltung und Überwachung sind miteinander verbunden und oftmals nur schwer eindeutig voneinander zu trennen. Während der Kalibrierung (Abschnitt 7.2) wird die Leistung des Radarsystems charakterisiert, um Radardaten mit hoher Genauigkeit zu liefern, d. h. die Reflektivität mit einer Genauigkeit besser als 1 dB zu schätzen. Die Instandhaltung (Abschnitt 7.3) dient dazu, beschädigte Teile des Radarsystems zu ersetzen (Abschnitt 7.3.3), die präventive Instandhaltung (Abschnitt 7.3.2) stellt die Leistung des Radarsystems sicher und verlängert den Zeitraum zwischen Ausfällen. Nach dem Austausch von Teilen des Radarsystems ist oftmals eine Kalibrierung erforderlich. Die Überwachung (Klausel 7.4) ist ein Prozess, der die hohe Datenqualität des Radarsystems sicherstellt. Oftmals werden während der Überwachung Entscheidungen über Zwischeninstandhaltungsarbeiten oder Kalibrierungen getroffen.

Die Kalibrierung und Instandhaltung erfolgt in regelmäßigen Intervallen, wie nachfolgend beschrieben. Die Instandhaltung der Hardware des Radarsystems muss in den meisten Fällen vor Ort erfolgen. Die Software-Instandhaltung kann von einem entfernten Ort aus durchgeführt werden, wohingegen die Kalibrierung vor Ort (z. B. wenn Hardwareeinstellungen geändert werden müssen oder spezielle Geräte beteiligt sind) oder von einem entfernten Ort aus vorgenommen werden kann (z. B. wenn die Kalibrierungskonstanten geändert werden). Die Überwachung sollte mindestens auf täglicher Basis erfolgen und wird daher bei unbemannten Standorten als Fernüberwachung durchgeführt. Die Überwachung wird während des normalen Betriebs durchgeführt, ohne dass eine Unterbrechung des Radarbetriebs erforderlich ist.

Die Kalibrierung und Instandhaltung aller Radarsysteme sollte unter Beachtung der Verfahrensanweisungen des Herstellers erfolgen. Der nachfolgende Abschnitt bietet eine Zusammenfassung.

7.2 Kalibrierung

Die regelmäßige Kalibrierung ist wichtig für eine gute Systemleistung.

7.2.1 Kalibrierungsarten

Die gesamte Kalibrierung der Reflektivität verwendet idealerweise ein externes Ziel eines bekannten Radarreflektivitätsfaktors wie etwa eine metallbeschichtete Kugel. Das Konzept besteht darin, zu prüfen, ob die Antenne und die Hohlleiter ihre Nenneigenschaften aufweisen. Dieses Verfahren wird jedoch aufgrund praktischer Probleme bei dem Betrieb einer fliegenden Kugel und mehreren Bodenreflexionen nur sehr selten angewendet. Die Antennenparameter können ebenfalls durch Sonnen-Kraftflussmessungen verifiziert werden. Die Routine-Kalibrierung ignoriert die Antenne, umfasst aber den Hohlleiter und das Sender-Empfänger-System. Üblicherweise werden die folgenden Maßnahmen vorgeschrieben:

- Messung der emittierten Leistung und Wellenform in dem entsprechenden Frequenzband;
- Messung der Übertragungs- und Empfängerverluste;
- Prüfung der gesendeten Frequenz und des Frequenzspektrums;
- Einführung eines bekannten Mikrowellensignals vor der Empfängerstufe, um einer gegebenen Analog-Digital-Wandlerzahl (ADC) eine Referenzleistung zuzuweisen;
- Messung des Rauschabstands, der in dem Nennbereich in Übereinstimmung mit den Radarspezifikationen liegen sollte.

Sofern eine dieser Kalibrierungsprüfungen auf Veränderungen und Unsicherheiten hindeutet, müssen Korrekturanpassungen vorgenommen werden. Die Dopplerkalibrierung umfasst: die Verifizierung und Einstellung der Phasenstabilität anhand fester Ziele oder künstlicher Signale, die Skalierung der realen oder imaginären Teile des komplexen Videosystems und die Prüfung des Signalprozessors mit bekannten künstlich erzeugten Signalen.

Auch wenn moderne Radarsysteme üblicherweise mit sehr stabilen elektronischen Komponenten ausgestattet sind, müssen Kalibrierungen oft genug durchgeführt werden, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Daten sicherzustellen. Die Kalibrierung muss entweder durch qualifiziertes Personal oder automatische Verfahren wie etwa Online-Diagnose- und Prüfgeräte ausgeführt werden. In dem ersten Fall, der Personaleinsatz erfordert, sollte die Kalibrierung möglichst einmal pro Jahr erfolgen. Im zweiten Fall darf die Kalibrierung täglich oder sogar halbkontinuierlich vorgenommen werden. Einfache Vergleichsprüfungen der Echostärke und des Echostandorts können regelmäßig unter Verwendung von zwei auf ein geeignetes Ziel gerichteten überlappenden Radarsystemen vorgenommen werden.

Radarsysteme müssen regelmäßig kalibriert werden, um eine dauerhafte hohe Messgenauigkeit sicherzustellen. Dies umfasst die Kalibrierung verschiedener Parameter in unterschiedlichen Zeitintervallen. Die Radarkonstante C sollte mit einer Messunsicherheit von ± 1 dB gemessen werden. Der Fehler in den Radarreflektivitätsfaktoren ist größer, weil dieser zusätzlich zu den Radarkonstanten weitere Parameter umfasst (z. B. atmosphärische Dämpfung). Die folgende Tabelle fasst die zu messenden Parameter, die in der Praxis anzuwendenden Verfahren und die erforderliche Kalibrierungshäufigkeit zusammen.

7.2.2 Elemente, Verfahren und Kalibrierungsintervalle

Die in Anhang D vorgeschlagenen Häufigkeiten sind lediglich Beispielwerte. Anwender sollten die Anweisungen des Herstellers befolgen.

7.3 Überwachung

7.3.1 Allgemeines

Die Überwachung beschreibt Verfahren zur Überwachung des Zustands, der Funktionalität und der Datenqualität eines Radarsystems. Die Überwachung sollte regelmäßig und mindestens täglich auf der Grundlage der Anweisungen und Verfahrensempfehlungen des Herstellers erfolgen. Bei unbemannten Radarstandorten erfolgt dies durch Fernüberwachung von einem zentralen Standort aus. Während der Wartung festgestellte Abweichungen können zu Zwischeninstandhaltungsarbeiten oder -kalibrierungen oder anderen von dem Hersteller festgelegten Maßnahmen führen.

Je nach Hard- oder Software des Radarsystems können verschiedene Parameter desselben automatisch oder manuell überwacht werden. Bei der automatischen Überwachung würden Textmitteilungen an das Betriebspersonal gesendet. Die manuelle Überwachung erfolgt auf regelmäßiger Basis durch das Betriebspersonal für die technische Leistung oder durch einen Meteorologen für Radarprodukte wie Reflektivität, Niederschlagsrate oder Dopplergeschwindigkeit. Eine einfache Überwachung der Funktionalität eines Wetterradarsystems würde eine regelmäßige Prüfung unkorrigierter Radarbilder und die Verifizierung der Stärke und Position von Bodenechozielen umfassen. Plötzliche Veränderungen würden auf Ausfälle des Senders oder Empfängers oder Fehler der Peilrichtungseinstellung der Antenne hindeuten. Selbst ein einfacher Vergleich der durch Radar ermittelten Niederschlagsrate mit einer nahegelegenen Niederschlagsanzeige könnte Hinweise auf die Funktionalität eines Wetterradarsystems bieten. Bei polarimetrischen Radarsystemen bietet die Überwachung des maximalen ρ_{HV} bei leichtem stratiformem Niederschlag während des normalen Betriebs des Radarsystems einen guten Hinweis auf die allgemeine Qualität und den Zustand des Systems.

Mehrere der oben in den Abschnitten 7.2 und 7.3 erwähnten Elemente können als Überwachung angesehen werden. Insbesondere die Elemente, die für tägliche oder häufigere Prüfungen vorgesehen sind, können als Überwachung angesehen werden, solange automatische Verfahren einen Alarm auslösen würden, wenn Parameter von den vorgegebenen Werten abweichen. Kalibrierungsprüfungen mit der Sonne (Abschnitt 7.3.3) können genutzt werden, um die Stabilität und Peilgenauigkeit des Empfängers zu prüfen, wenn die Datenanalyse in Echtzeit erfolgt und an den entfernten zentralen Standort gesendet wird. Ein integriertes Prüfgerät (BITE) kann eine Vielzahl technischer Parameter überwachen und löst Alarm aus, wenn die Parameter außerhalb festgelegter Grenzwerte liegen. Das BITE kann darüber hinaus externe Geräte wie Klimaanlage oder die unterbrechungsfreie Stromversorgung überwachen. BITE-Alarmmeldungen sollten automatisch als Textmitteilung an das Betriebspersonal gesendet werden.

Darüber hinaus muss die Dämpfung durch die Radarkuppel von mehreren dB in Situationen berücksichtigt werden, in denen schwerer Niederschlag oder Schneefall dazu führt, dass Wasser, Eis oder schmelzende Schneedecken die Radarkuppel bedecken. Darüber hinaus kann die Alterung der Radarkuppel die Dauer bis zum Ablauf des Wassers oder der Schneedecke verlängern. Dies kann durch eine wasserabweisende Beschichtung der Radarkuppel verbessert werden. Risse in der Radarkuppel können dazu führen, dass die Radarkuppel Wasser aufnimmt, was den Verlust erhöht. Eine regelmäßige Reinigung und Prüfung der Oberfläche der Radarkuppel wird daher empfohlen.

7.3.2 Stabilität von Radarsystemen

In Anbetracht der Vorteile der modernen Radartechnologie (z. B. rauscharme Verstärker (LNA) und schnelle und präzise A/D-Wandler) und bei sorgfältiger und regelmäßiger Kalibrierung kann eine hohe Systemstabilität erreicht werden: Inhärente Unsicherheiten in Verbindung mit dem Radarsystem selbst sind geringer als die Unsicherheiten in Verbindung mit der inhärenten Variabilität der Reflektivität des Radarziels.

Für quantitative Radaranwendungen ist eine hohe Stabilität und genaue Kalibrierung vorgeschrieben. Die reine Überwachung der Stabilität der Empfänger- oder Sendergruppe (in eine Richtung) ist einfacher als die Überwachung der Stabilität des gesamten Radarsystems (in beide Richtungen).

Um die Stabilität der Empfängergruppe zu überwachen, wird ein Referenzleistungssignal (anstatt der von der Antenne kommenden empfangenen Leistung) in den LNA-Eingang des Empfängers eingespeist und genau dieser Wert ($\pm$ einer gegebenen Unsicherheit) wird verwendet, um den Wert einer gegebenen Analog-zu-Digital-Einheit (ADU) am Ausgang des digitalen Empfängers mit dem Referenzleistungswert zu verknüpfen. Die von einem gegebenen Objekt in einer gegebenen Entfernung zurückgestreute Leistung wird nicht gemessen. Es ist bekannt, dass eine gegebene Leistung auf einer logarithmischen Skala (dem) einer gegebenen log-transformierten ADU (dBADU) entspricht. Im Fall eines antennenmontierten Empfängers verwendet eine effektive Lösung eine Geräuschquelle als Referenzsignal und nutzt hierbei deren hohe Temperaturstabilität [6].

Die Überwachung der Stabilität des gesamten Systems erfordert die Bewertung der Verluste (Empfänger- und Sendergruppen, einschließlich Hohlleiter, Drehgelenk, Koppler, Kabel, Radarkuppel usw.), Antennengewinn und Genauigkeit des Antennenpeilwinkels. Die Sicherstellung der Stabilität des gesamten Systems erfordert die Kalibrierung des Radarsystems auf der Grundlage bekannter Referenzziele (z. B. eine Metallkugel, ein Eckenreflektor mit zertifiziertem Radarquerschnitt) in verschiedenen Entfernungen zum Sensor. Passive Streuer wie etwa große Kugeln oder Eckenreflektoren sind jedoch schwer zu handhaben, insbesondere in bergigem Gelände mit starkem Bodenecho.

Dieses Problem kann auf zwei Arten überwunden werden:

- Die gesamte Systemstabilität (in beide Richtungen) wird gelegentlich [7;8] oder kontinuierlich [9;10] unter Verwendung aktiver Kalibrierungsgeräte geprüft.
- Das Problem wird in zwei einfachere, sich ergänzende Teile unterteilt:
 - Ein externer Empfänger wird als passives Kalibriergerät in eine Richtung verwendet, um die Sendergruppe zu prüfen (z. B. [7;11])
 - Die Sonne wird für die Kalibrierung [12] und Prüfung [13;14] der Empfängergruppe genutzt.

Die Ergebnisse aus dem letzteren Verfahren wurden mit in 2008 [13;14], einem Jahr mit geringen Sonnenmagnetfeldaktivitäten, erfassten Daten abgeleitet. Kürzlich hat sich gezeigt, dass dieses Verfahren auch in Zeiten mit stärkerer Sonnenaktivität angewendet werden kann [15;16]. Die Nutzung der Sonne bietet ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis. Die Überwachung unter Nutzung der Sonne kann kontinuierlich erfolgen.

Sofern die regelmäßige Überwachung auf eine Veränderung der Stabilität hinweist, sollte der Anwender die Anweisungen des Herstellers zu Korrekturmaßnahmen lesen.

7.3.3 Überwachen der Empfängerstabilität und der elektrischen Peilung mithilfe der Sonne

7.3.3.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Sonne ist eine bekannte Quelle für Mikrowellenenergie und kann verwendet werden, um verschiedene Aspekte des Betriebs eines Wetterradarsystems zu prüfen. Diese Prüfungen können als separate Aufgaben zwischen den betrieblichen Scans oder während der Instandhaltung des Radarsystems durchgeführt werden oder die Sonnenbeobachtungen während der normalen betrieblichen Scans können verwendet werden.

Ausführliche Anweisungen zur Durchführung der Prüfungen einzelner Radarsysteme sind den Systemhandbüchern zu entnehmen.

7.3.3.2 Genauigkeit der Antennenpeilrichtung

Die Position der Sonne zu einem gegebenen Zeitpunkt ist wohlbekannt. Das Mikrowellensignal der Sonne kann angewendet werden, um die Peilgenauigkeit der Radarantenne für den Azimuth und die Höhe zu verifizieren und kalibrieren. Dies wird üblicherweise durch einen Bereichsscan um die Sonne und die Berechnung der Verschiebung des Azimuth und der Höhe unter Verwendung der bekannten Position der Sonne und der Winkelinformationen der Radarantennensteuerung vorgenommen. (Für die Höhenverschiebung muss die Brechung bei niedrigen Höhenwinkeln berücksichtigt werden.) Die meisten Wetterradarsysteme bieten hierfür ein automatisches Verfahren. Darüber hinaus wurden Verfahren zur Berechnung der Verschiebung unter Verwendung der Sonnenauftrittswinkel während der normalen betrieblichen Scans entwickelt.

Um die Sonnenstrahlung zur Überwachung der Peilgenauigkeit der Antenne zu nutzen, muss natürlich die Uhrzeit des Radarsteuerungssystems korrekt synchronisiert werden.

Bereichsscans um die Sonne können darüber hinaus eine Schätzung des Antennengewinns und der Strahlbreite ermöglichen.

7.3.3.3 Stabilität von Empfängern

Der Zustand der Radarempfängergruppe kann darüber hinaus mithilfe des Mikrowellensignals der Sonne überwacht werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der solare Strahlungsfluss im Verlauf der Zeit erheblich fluktuiert. Referenzwerte für den solaren Strahlungsfluss können von Sonnenobservatorien angefragt werden.

Im Fall dualer Polarisationsradarsysteme kann das Sonnensignal in beiden Empfängerkanälen identifiziert werden. Die horizontalen und vertikalen Signale sollten dieselbe Größenordnung haben, aber nicht korreliert sein, (ρ_{HV} nahe 0), da die Sonne eine nichtpolarisierte Quelle ist.

7.4 Instandhaltung

7.4.1 Allgemeine Aspekte

Die Instandhaltung von Radarsystemen ist eine wesentliche Voraussetzung für einen korrekten und dauerhaften Radarbetrieb und erfordert hochqualifiziertes Personal und erhebliche finanzielle Ressourcen für die Anreise der Mitarbeiter, Prüfgeräte und die entsprechenden Ersatzteile.

Die Instandhaltung von Radarsystemen erfordert zudem die Verfügbarkeit ausführlicher Instandhaltungs-Handbücher und Unterlagen der Hersteller.

Ordnungsgemäß installierte und betriebene moderne Radarsysteme sollten nur selten ausfallen. Einige Hersteller geben für Radarsysteme eine allgemeine mittlere Betriebszeit zwischen (größeren) Ausfällen (MTBF) im Bereich von einem Jahr an. Diese Behauptungen sind jedoch oftmals optimistisch und die Erreichung einer solchen MTBF erfordert eine geplante präventive Instandhaltung. Ein Routine-Instandhaltungsplan und ausreichende technische Mitarbeiter sind erforderlich, um Reparaturzeiten zu minimieren.

Eine kompetente Organisation der Instandhaltung sollte zu einer Verfügbarkeit des Radarsystems von 96 % der Zeit auf jährlicher Basis mit Standardgeräten führen. Bessere Leistungen sind zu höheren Kosten möglich.

Um Stillstandszeiten zu Instandhaltungszwecken während kritischer Witterungsbedingungen zu vermeiden, wird dies im Vorfeld mit der Wettervorhersage koordiniert. Die Instandhaltung dauert üblicherweise nur wenige Stunden.

7.4.2 Präventive Instandhaltung

Die präventive Instandhaltung sollte mindestens eine monatliche Prüfung aller Verschleißteile des Radarsystems wie etwa Getriebe, Motoren, Gebläse und Infrastrukturen umfassen. Die Ergebnisse der Prüfungen sollten in einem Radar-Logbuch von den lokalen Instandhaltungsmitarbeitern festgehalten und gegebenenfalls an die Instandhaltungszentrale gesendet werden. Im Fall vieler Radarsysteme könnten eine zentralisierte Logistikversorgung und Instandsetzungswerkstatt eingerichtet werden. Die Werkstatt nimmt ausgefallene Teile aus den Radarsystemen entgegen, setzt sie instand und gibt sie zur Lagerung als Vorratsteile, die bei Bedarf im Feld eingesetzt werden können, an die Logistikeinrichtung weiter.

7.4.3 Korrektive Instandhaltung

Für die korrektive Instandhaltung muss die Abteilung ausreichend mit Folgendem ausgestattet werden:

- Ersatzteile für die empfindlichsten Komponenten wie etwa Rohre, statische Komponenten, Boards, Rahmen, Motoren, Getriebe, Stromversorgung usw. Die Erfahrung hat gezeigt, dass es empfehlenswert ist, bis zu 30 % der ursprünglichen Radarinvestition an Ersatzteilen vor Ort vorzuhalten. Im Fall vieler Radarsysteme kann dieser Prozentsatz mit einer geeigneten Verteilung zwischen der zentralen und lokalen Instandhaltung reduziert werden;
- Prüfgeräte einschließlich der vorgenannten Kalibrierungsgeräte. Dies würde üblicherweise bis zu 15 % des Kaufpreises des Radarsystems entsprechen;

Gut ausgebildetes Personal, das in der Lage ist, Probleme zu erkennen und Instandsetzungen schnell und effizient auszuführen.

7.4.4 Instandhaltungsoptionen

Wetterradarsysteme sollten mindestens mit den folgenden Instandhaltungsoptionen ausgestattet sein:

- Fernzugang;
- Ein/Aus-Schalter (Rücksetzung);
- Prüfung mit Referenzsignalen;
- Software- und Firmware-Upgrades;
- Einstellung der Antennenpeilrichtung;
- Fehler- und Statusdiagnose.

Einige Instandhaltungsaufgaben können im Fernzugang ausgeführt werden (erfordert eine zuverlässige Verbindung), während andere einen Besuch vor Ort erfordern.

7.4.5 Instandhaltungselemente und -intervalle

Die Instandhaltungsmethoden und -verfahren variieren je nach Radarhersteller. Nichtsdestotrotz verwenden Hersteller oftmals gleiche Instandhaltungselemente und Messinstrumente.

Dies umfasst in erster Linie die regelmäßige Prüfung der Parameterkalibrierungen durch den Hersteller. Im Fall einer Abweichung der Parameter von dem Referenzwert müssen diese neu kalibriert werden.

Prüfergebnisse wie etwa die Sendeleistung oder der Dynamikbereich sollten innerhalb der Toleranzgrenzen liegen, um eine hohe Datenqualität aufrechtzuerhalten. Es ist jedoch schwer, diese Toleranzwerte eindeutig zu definieren, da diese von dem Zweck der Beobachtung und der Systemkonfiguration abhängen.

Die empfohlene Mindestausrüstung für die Kalibrierung und Instandhaltung umfasst:

- Mikrowellensignalerzeuger;
- Mikrowellenleistungsmesser und/oder -leistungsaufnehmer;
- MHz-Oszilloskop;
- Mikrowellenfrequenzzähler und/oder Spektralanalysegerät;
- Mikrowellenkomponenten einschließlich Lasten, Koppler, Dämpfer, Verbinder, Kabel, Adapter usw.;
- Elektrische und mechanische Standardwerkzeuge und -geräte;
- Diodendetektor und 3-dB-Dämpfer für Impulsbreitenmessungen.

Anhang D enthält ein Beispiel für jedes Element mit den entsprechenden Instandhaltungsintervallen für das Radarsystem.

Die Instandhaltung umfasst nicht nur das Radarsystem selbst, sondern auch technische Einheiten, die für seinen Betrieb wichtig sind (z. B. Belüftung, unterbrechungsfreie Stromversorgung und Klimaanlage). Das Instandhaltungsintervall dieser Einheiten kann von den Intervallen für das Radarsystem selbst abweichen. Die mit in Steuerungssystemen sowie der Erzeugung von Dienstleistungen und Produkten verwendeten Software verbundene Hardware wird ebenfalls regelmäßig geprüft. Diese Prüfungen finden alle zwei Jahre statt. Darüber hinaus ist das Vorhalten eines Bestands an geeigneten Ersatzteilen am Standort des Radarsystems und in einem Zentrallager ebenfalls ein wichtiger Faktor für die dauerhafte Verfügbarkeit.

7.5 Lebenszyklusmanagement

7.5.1 Ersatzteilstrategie

Die Anforderung an die hohe Datenverfügbarkeit eines Wetterradarsystems erfordert einen Dauerbetrieb ohne lange Pausen für zeitraubende Instandhaltungen oder durch Systemausfälle. Um diese hohe Verfügbarkeit zu gewährleisten, empfiehlt es sich, kritische Ersatzteile am Radarstandort oder im Lager des Betreibers zu lagern, wo diese bei einem Ausfall schnell eingesetzt werden können. Diese Ersatzteile können beispielsweise kritische Teile des Radarsenders, des Empfängers, des Antennenantriebssystems, der Stromversorgung, der Kommunikationsschnittstellen usw. umfassen.

Die Unterlagen des Herstellers enthalten eine ausführliche Liste der empfohlenen Ersatzteile.

Weniger kritische Teile können im Bedarfsfall bei dem Hersteller bestellt werden. Viele Hersteller bieten Serviceverträge oder Express-Ersatzteillieferungen an, um auch eine schnelle Lieferung der Werksersatzteile sicherzustellen.

Der Hersteller muss in der Lage sein, eine vollständige Liste aller Ersatzteile im System mit Angabe der Lieferzeiten vorzulegen.

7.5.2 Systemverfügbarkeit

Die Systemverfügbarkeit sollte festgelegt werden als der Prozentsatz des zufriedenstellenden Betriebs des Systems über einen bestimmten Zeitraum einschließlich des Zeitaufwands der präventiven Instandhaltung und korrektiven Instandhaltung in Übereinstimmung mit Gleichung (35):

$$\text{Systemverfügbarkeit} = \frac{(MTBF \cdot NF)}{(MTBF + MSRT) \cdot NF + TTPM} \cdot 100\% \quad (35)$$

Dabei ist:

- NF* die Gesamtzahl der „Ausfälle“ während der Systembetriebszeit; „Ausfall“ wird definiert als Verlust der Funktionalität, durch den das System die Systemanforderungen nicht mehr erfüllen kann. Selbst wenn ein Funktionsausfall an einer bestimmten Einheit auftritt, gilt dies nicht als „Ausfall“, wenn das System beispielsweise aufgrund von Redundanz weiterhin die Systemanforderungen erfüllt.
- MTBF* ist die mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen, festgelegt als gesamte gemessene Betriebszeit geteilt durch die Gesamtzahl der Ausfälle (*NF*) des Systems.
- MSRT* ist die mittlere Dauer bis zur Wiederherstellung des Betriebs
- TTPM* ist die Gesamtdauer der präventiven Instandhaltung

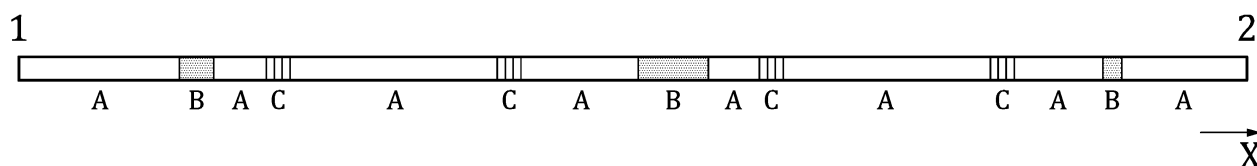
Die *MSRT* ist in Gleichung (36) festgelegt:

$$MSRT = MTTR + MRT \quad (36)$$

Dabei ist:

- MTTR* die mittlere Wiederherstellungszeit, festgelegt als die gesamte gemessene Instandsetzungszeit geteilt durch die Gesamtzahl der Ausfälle (*NF*) des Systems unter der Voraussetzung, dass die notwendigen Ersatzteile vor Ort verfügbar sind.
- MRT* die mittlere Instandsetzungszeit, festgelegt als die mittlere Zeit ab dem Auftreten des Ausfalls bis ein Techniker bereit ist, mit der Instandsetzung zu beginnen. Wenn benötigte Ersatzteile nicht am Standort des Radarsystems verfügbar sind, muss die Zeit für den Transport vom Zentrallager oder dem Hersteller mit in die *MRT* eingerechnet werden. Das Vorhalten eines ausreichenden Vorrats an Ersatzteilen und deren Bestandsverwaltung sind ebenfalls wichtig für eine hohe Verfügbarkeit.
- TTPM* die Gesamtdauer der präventiven Instandhaltung, festgelegt als die Gesamtzeit der geplanten präventiven Wartung während der Systembetriebszeit.

Bild 10 zeigt eine Konzeptdarstellung aller Parameter.



Legende

- 1 Beginn des Betriebs
- 2 Ende des Betriebs
- A Normalbetriebszeit
- B Dauer bis zur Wiederherstellung des Betriebs bei Ausfällen
- C Dauer der geplanten präventiven Instandhaltung
- X Zeit

Bild 10 — Beispiel für die Berechnung von Systemverfügbarkeitskriterien

7.5.3 Lebensdauerkosten

Ein Dopplerradar ist ein komplexes Werkzeug, das in der Lage ist, ein Objekt zu erkennen, seine Position und die radiale Komponente seiner Geschwindigkeit zu einem gegebenen Zeitpunkt zu erkennen. Ein Doppler-Wetterradarsystem ist ein ebenso komplexes wie einzigartiges Werkzeug, das in der Lage ist, einen Echtzeit-Überblick über aktuelle Niederschlagsgebiete zu liefern: Es zeigt genau an, wo und wann etwas passiert. Genau zu beschreiben, was passiert und die Niederschlagsrate genau zu quantifizieren, ist jedoch weitaus schwieriger. Unter diesen Voraussetzungen ist es nicht verwunderlich, dass diese Internationale Norm in Bezug auf den erforderlichen Personalaufwand ein Verhältnis zwischen der Mitarbeiterkapazität (FTE) der Radartechniker/Wissenschaftler und der Anzahl von Radarsystemen im Netz von mehr als 1 empfiehlt.

8 Personal, Kompetenzen und Schulung

Die Auswahl, die Gestaltung, der Betrieb, die Instandhaltung und die Nutzung eines Wetterradarnetzwerks erfordert ein umfassendes Verständnis der Technologie, ihrer Beschränkungen und der Anforderungen an die Anwendung.

Die Gestaltung des Radarnetzwerks und die Auswahl der Radartechnologie erfordert Kompromisstudien und die Betrachtung einer Vielzahl unterschiedlicher Benutzeranwendungen. Anwender der Radardaten und -produkte benötigen Kenntnisse der Endnutzer-Anwendungen und der Mesoskalen-Meteorologie. Wenn neue Erfahrungen und Kenntnisse zu den Radarkapazitäten gewonnen werden, ermöglichen zusätzliche Entwicklungen die Nutzung nachhaltiger und verbesserter Wetterdienste.

Radarsysteme nutzen Hochleistungssender, sehr empfindliche Empfänger, hochentwickelte Signalverarbeitung, schwere drehbare Podeste und Antennen sowie Selbstüberwachungsinstrumente. Das Radarsystem wird oftmals freistehend an einem dezentralen Standort mit Heiz- und Kühlanlagen, Unterständen, Telekommunikationsanlagen, Hilfsstromversorgung und ortsnahe Instandhaltungseinrichtungen aufgestellt. Das Radarsystem muss kalibriert und instandgehalten werden, um zuverlässige Messungen zu liefern. Geringfügige Veränderungen der Kalibrierung und Interpretation können die Ergebnisse erheblich beeinflussen. Qualitätsmanagement erfordert Änderungen von Überwachungs- und Aufzeichnungssystemen.

Es erfordert daher eine große Vielfalt an Kompetenzen zum Betrieb und zur Nutzung eines Radarsystems und eines Radarnetzwerks, einschließlich wissenschaftlicher, meteorologischer, technischer und logistischer Fähigkeiten. Diese Kompetenzen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 7 — Personal, Kompetenzen und Schulung

Projektleitung und -management	Die Organisation muss die Verantwortung für das Projekt übernehmen. Das Verständnis der allgemeinen Ziele und die Fähigkeit, das gesamte Projekt zu leiten und zu steuern, sind von kritischer Bedeutung. Ein ganzheitlicher Ansatz für die Verhandlung und Verwaltung von Finanzmitteln, die Personalleitung und das Vertragsmanagement ist erforderlich. Viele Kompetenzen können auf kreative Weise durch Teams, externe Berater oder andere Personen bereitgestellt werden. Die Projektverantwortung muss jedoch in der Organisation verbleiben. Ausbildung/Erfahrung: Führungskompetenzen, Projektmanagementfähigkeiten
Wissenschaftlich und meteorologisch	Strategische Planung ist erforderlich, um Dienstleistungen und das Dienstleistungsniveau festzulegen sowie das Radarnetzwerk und die Anwendungen zu gestalten. Dies ist zu Beginn des Projekts erforderlich und könnte von den Beratern in enger Zusammenarbeit mit dem NMHS geliefert werden.

	Besondere Kompetenzen: — Verständnis des strategischen Plans der Organisation und der vorgesehenen Dienste und des Dienstleistungsniveaus, — Verständnis des Wetters (Klimatologie der Niederschlagsintensität, Wetterhöhe, Eigenschaften schwerer Witterungsbedingungen) in dem betrachteten Gebiet — Grundlegendes Verständnis der Anwendungsanforderungen der Benutzer (Unsicherheiten, Genauigkeit, Datenqualität) — Grundlegende Kenntnisse der Radartechnologien (Dämpfung, Strahlbreite, Scanstrategie, Bodenechodämmung) und Kompromisse Ausbildung/Erfahrung (des Teams): Meso-meteorologische und hydrologische Kenntnisse (Mesoskalen-Meteorologie, verteiltes Einzugsgebiet-Modell); Verständnis der Anwendung von Radartechnologie; strategische Ausrichtung der NMHS; in der Lage, Anforderungsanalysen durchzuführen; wissenschaftliche Kenntnisse der Radarbeschränkungen.
Wissenschaft und Technik	Die technische Unterstützung muss Benutzerspezifikationen in technische Spezifikationen und für die technische und Prozessplanung umwandeln. Dies kann von einem Team oder von Beratern in Zusammenarbeit mit dem NMHS und Systemplanern geliefert werden. — Verständnis der Radartechnologie und der Kompromisse — Verständnis der Auswirkung auf das Dienstleistungs- und Anwendungsniveau — Verständnis der organisatorischen Kompetenzen (Projektmanagement, technische Kapazitäten) — Kenntnis der Sicherheits-, Lizenzierungs- und Konstruktionspraktiken Ausbildung/Erfahrung: Industrietechnik, Elektromechanik für technische Planung, Kenntnisse der Radar-Hardware, organisatorische Kenntnisse, Qualitätsmanagementplanungsgrundlagen
Technisch – Unterstützung und Instandhaltung	Eine laufende Instandhaltung, Kalibrierung und Unterstützung ist erforderlich. Diese kann in Auftrag gegeben werden, was jedoch problematisch sein kann (Schwierigkeiten, Dienstleister mit Radarkenntnissen zu finden). — Allgemeine Kenntnisse und Erfahrung in betrieblichen Sicherheitsverfahren bei der Arbeit mit Starkstromanlagen und Schwermaschinen. — Allgemeine Elektronikkenntnisse (muss Spannungsmessgeräte, Signalerzeuger, Oszilloskope, Spektralanalysegeräte bedienen) — Geübt im Umgang mit Computern, der Einrichtung von Netzwerken, der Sicherung von Daten und Computern. — Allgemeine Kenntnisse der Objektinstandhaltung (Straßeninstandsetzung, Diesel- und unterbrechungsfreie Stromversorgung, Klimaanlage, Heizsysteme)

	— Grundlegende Kenntnisse von Starkstromsystemen, Schwermaschinen, elektronischen Komponenten auf Leitungersatzteilebene, Telekommunikationsanlagen — Diagnose- und Analysekenntnisse. — Qualitätsmanagementkultur. — Grundlegende Kenntnisse der Radaranwendungen. Ausbildung/Erfahrung: Umfassende technische Kenntnisse in Bezug auf elektrische Hochleistungsfunksysteme, Elektronik- und Computersysteme und mechanische Schwermaschinen. Kenntnisse in Bezug auf Hilfsstromsysteme und die allgemeine Objektinstandhaltung.
Qualitätsmanagement	Die Aufgaben bestehen in der Leitung des Radarnetzwerkbetriebs und der Instandhaltung einschließlich der technischen (Instandhaltung, Prüfung, Ersatzteilplanung) und wissenschaftlichen Unterstützung (Unterstützung bei der Hardware-Diagnose), des Metadaten-Managements, der Archivierung sowie der Überwachung und Aktualisierung des Radar- und Datenverarbeitungssystems. Ausbildung/Erfahrung: (Erfordert Team- und andere Fähigkeiten). Grundlegende technische Kenntnisse in der Überwachung und Diagnose von Betriebssystemen und Meldung von Systemänderungen. Technische Computerkenntnisse für die Archivierung und den Aufruf von Metadaten und Daten. Computersoftware- und Systeminstallationskenntnisse zur Aktualisierung der Radardatenverarbeitungs- und Hardwaresysteme.
Meteorologische und/oder Anwendungs-entwicklung und Forschung	Die Aufgabe besteht in der Optimierung der Nutzung von Radardaten und ihrer Integration in Vorhersagesysteme sowie die Schulung der Endnutzer. Dies umfasst das Qualitätsmanagement des Radarsystems, kann eine vielfältige Personengruppe umfassen („lokaler Guru“) und könnte im Verlauf der Zeit weiterentwickelt werden. — Schulungen und Produkte können zunächst mit der Software des Radarherstellers erstellt werden. — Erfahrung mit der Technologie wird zu einem kontinuierlichen Kapazitätsausbau führen, der am besten intern erfolgen sollte. — Die Ausreifung der Technologie kann zu erhöhten oder erweiterten Anforderungen führen und Änderungen der Radar- oder Produktionskonfiguration oder des Datenaustauschs erfordern. — Umfassende Kenntnisse in Bezug auf Radaranwendungen, Kenntnisse der Wolkenphysik, Mesoskalen-Meteorologie, Niederschlagsmessungen und hydrologische Anwendungen. — Entwicklung von Anwendungen jeder Art – von geschäftlichen Diensten über Datenaustausch, Software-Anwendungen für das Radarsystem und integrierte Beobachtungssysteme bis zur Vorhersage, Produktverbesserung und -erweiterung. Ausbildung/Erfahrung: Kenntnisse in der Endnutzer-Anwendung, Entwicklung wissenschaftlicher/Software-Anwendungen, einschließlich der Integration in Vorhersage- oder andere Anwendungssysteme.

Radarbetreiber werden darüber hinaus andere Überwachungstechnologien unterstützen und die World Meteorological Organization entwickelt umfangreiche Kompetenzen in einer Vielzahl von Technologien.

9 Standortwahl und Installation

9.1 Allgemeine Aspekte

Informationen zu Auswirkungen, die die Qualität der Niederschlagsmessung durch Radarsysteme beeinträchtigen, ihrer Erkennung und zu Gegenmaßnahmen, wie der Nachbearbeitung von Radardaten werden in Teil 2 dieser Internationalen Norm behandelt.

9.2 Auswahl und Vorbereitung eines Radarstandorts

Die Auswahl des Standorts für ein Radarsystem richtet sich nach der geplanten Anwendung.

Im Fall eines Radarnetzwerks, das hauptsächlich für synoptische Anwendungen vorgesehen ist, sollten Radarsysteme in mittleren Breitengraden in einem Abstand von ca. 150 km bis 200 km zueinander installiert werden. Wenn ein Radarnetzwerk für die quantitative Niederschlagsmessung verwendet wird und es zwingend erforderlich ist, Radarstrahlen in geringer Höhe zu nutzen, sollte dieser Abstand nicht mehr als 100 km betragen. Der Abstand darf in Breitengraden, die näher am Äquator liegen, erhöht werden, wenn die betreffenden Radarechos regelmäßig große Höhen erreichen. In all diesen Fällen erzielt ein enger Radarstrahl bei Niederschlagsmessungen die höchste Genauigkeit.

Im Fall einer festgelegten Zone, die Unwetterwarnungen erfordert, besteht der beste Kompromiss üblicherweise darin, die Anlagen in einem Abstand zwischen 20 km und 50 km von dem betreffenden Bereich und grundsätzlich windwärts des Hauptunwetterwegs zu platzieren. Es wird empfohlen, das Radarsystem in einem leichten Abstand von dem Hauptunwetterweg zu platzieren, um Messprobleme zu vermeiden, während das Unwetter den Radarbereich passiert. Darüber hinaus sollte dies zu einer guten Auflösung über den betreffenden Bereich führen und eine bessere Unwettervorwarnung ermöglichen [17].

Radarstandorte auf hohen Bergen sind nur von geringem Nutzen bei der Erkennung bodennaher Niederschläge. Messungen mit negativem Höhenwinkel erzeugen starke Bodenechos und sind daher nur in Ausnahmefällen sinnvoll. In Bergregionen ist es daher nahezu unmöglich, einen Kompromiss zwischen einer guten meteorologischen Sichtweite und bodennahen Messungen zu finden. Hier kann die hilfsweise Positionierung kleinerer Systeme in großen Bergtälern eine wichtige ergänzende Rolle spielen.

Die Wahl des Radarstandorts wird zudem durch viele wirtschaftliche und technische Faktoren beeinflusst, wie etwa:

- Vorhandene Straßen zur Erreichung des Radarstandorts;
- Die Verfügbarkeit von Strom- und Kommunikationsverbindungen. Oftmals müssen handelsübliche Blitzschutzanlagen hinzugefügt werden; die Installation der Blitzschutzstangen sollte sorgfältig geplant werden, da die Antennenleistung (insbesondere die Nebenkeulendämpfung) erheblich beeinträchtigt werden kann, wenn der Radarstrahl auf solche Stangen trifft;
- Grundstückskosten;
- Die Nähe zu Überwachungs- und Instandhaltungseinrichtungen;

- Eine möglichst geringe Anzahl an Hindernissen für den Radarstrahl, um die meteorologische Sicht des Radarsystems zu maximieren und Bodenechos und Strahlblockierungen zu minimieren. Es sollte kein Hindernis in einem Winkel von mehr als der halben Strahlbreite über dem Horizont oder einer horizontalen Breite von mehr als einer halben Strahlbreite vorhanden sein. Dies gilt ebenso für die unmittelbare Umgebung wie für größere Entfernungen. Im Fall von Anwendungen im kleinen Umfang sollte besonders darauf geachtet werden, Bodenechos im Zielbereich zu vermeiden. Bei großen Anwendungen hat die uneingeschränkte meteorologische Sicht hingegen oberste Priorität. Simulationssoftware kann verwendet werden, um die Qualität eines potenziellen Radarstandorts in Bezug auf Bodenechos und Hindernisse zu beurteilen. Als Eingabe in diese Software dienen ein detailliertes Geländehöhenmodell (einschließlich nach Möglichkeit anthropischer Hindernisse) und die Eigenschaften der Antenne und des Radarimpulses: die Höhe des Speisehorns über dem Boden, die Impulsfrequenz, der Antennengewinn, die 3-dB-Strahlbreite, die Impulsleistung, die Höhe der Antennen;
- Die Hindernisse in der Umgebung eines Radarstandorts können sich verändern: neue Gebäude, wachsende Bäume usw. Dem Radarbetreiber stehen oftmals legale Mittel zur Begrenzung der zukünftigen Zunahme der Anzahl und Größe der Hindernisse zur Verfügung, die er vollumfänglich nutzen sollte;
- Wenn ein Radarsystem innerhalb einer relativ kurzen Reichweite eingesetzt werden soll, besteht manchmal die Möglichkeit, nach einer sorgfältigen Standortinspektion und Prüfung detaillierter topographischer Karten einen relativ flachen Bereich in einer leichten Senke zu finden, deren Rand als natürlicher Bodenechozaun für die Antennennebenkeulen bei minimaler Blockierung des Hauptstrahls dienen könnte. In allen Fällen sollte die Standortanalyse eine Kamera- und optische Theodolitprüfung auf potenzielle Hindernisse umfassen. In bestimmten Fällen ist es hilfreich, ein mobiles Radarsystem zu verwenden, um die Eignung des Standorts zu bestätigen [18];
- Wenn das Radarsystem für die Überwachung über lange Reichweiten benötigt wird, wie etwa bei Tropenstürmen oder anderen Anwendungen an der Küste, wird es üblicherweise auf einem Hügel platziert. Hierbei trifft das System auf zahlreiche Bodenechos, die jedoch bei der Überwachung über große Reichweiten eventuell nicht so wichtig sind.

Jede Analyse potenzieller Standorte sollte eine sorgfältige Prüfung auf elektromagnetische Störungen umfassen, um Interferenzen mit anderen Kommunikationssystemen wie etwa TV-Sendern, Mikrowellenverbindungen oder anderen Radarsystemen soweit wie möglich zu vermeiden. Darüber hinaus sollte bestätigt werden, dass die Mikrowellenstrahlung kein Gesundheitsrisiko für die Bevölkerung in der Umgebung des geplanten Radarstandorts darstellt [17;19]. In den meisten Fällen bestehen gesetzliche Vorschriften zu diesen Themen, die eingehalten werden müssen. Es kann sogar erforderlich sein, das Radarsystem ohne Strahlung in einem bestimmten Winkelbereich zu betreiben („Sektorausblendung“), um die gesetzlich zulässigen Expositionsgrenzwerte für Mikrowellen nicht zu überschreiten. Um Interferenzen zu vermeiden, müssen gegebenenfalls Sende- und/oder Empfangsfilter in dem Hohlleiter installiert werden, die das Signal zusätzlich dämpfen.

9.3 Unterstützende Infrastruktur

Die unterstützende Infrastruktur für einen Wetterradarstandort kann Folgendes umfassen:

- einen Radarturm (der gegebenenfalls gebaut werden muss);
- Stromversorgung;
- Datenübertragungseinrichtungen (in Anbetracht des zu erwartenden Volumens des Datenverkehrs);
- eine kontrollierte Umgebung in den Betriebsräumen (Luftfeuchtigkeit und Temperatur);

- eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (UPS) (Größe und erforderliche verfügbare Unterstützungszeit und ein Generator);
- Zugänglichkeit (falls ein unbemannter Betrieb erforderlich ist, muss die Qualität der Ausrüstung höher sein).

Ein sehr hoher Radarturm kann erforderlich sein, um eine übermäßige Blockierung des Strahls und Bodenechos in der Umgebung des Radarsystems zu überwinden. Die horizontale Ausrichtung der Bezugsebene des Radarsystems sollte auch bei Starkwind aufrechterhalten bleiben.

Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung wird für Radarsysteme benötigt, deren Daten jederzeit zur Verfügung stehen sollen. Wenn ein Radarstandort isoliert ist, genügt es gegebenenfalls nicht, sich nur auf das Stromnetz zu verlassen und ein Stromgenerator mit UPS ist in diesem Fall erforderlich.

Klimaanlagen sind in den meisten Fällen in Schaltschrankräumen erforderlich, um die Temperatur und Luftfeuchte in einem für Elektronik sicheren Bereich zu halten. Dies muss oftmals auf den Innenraum der Radarkuppel ausgedehnt werden, um Schimmelbildung zu unterbinden.

Telekommunikations- und Computertechnologie ermöglicht die Übertragung von Radardaten (üblicherweise) zu einem zentralen Daten-Hub. Hier werden Daten von vielen Radarsystemen und anderen Datenquellen wie etwa Satelliten gesammelt und integriert. Der Betrieb jedes Radarsystems muss fernüberwacht werden, sodass Fernsteuerungsmaßnahmen oder Maßnahmen vor Ort aus der Entfernung bestimmt werden können.

Die Übertragung kann durch Glasfaserkabelverbindungen oder andere schnelle Erdleitungen, Funk- oder Mikrowellenverbindungen sowie Satellitenkommunikationskanäle erfolgen. Es sollte beachtet werden, dass Radarsysteme oftmals an entfernten Standorten installiert werden, an denen nicht alle Telekommunikationssysteme verfügbar sind.

9.4 Abdeckung

Der physische Überwachungsbereich aller Wetterradarsysteme ist praktisch auf 450 km begrenzt, da selbst Sommerunwetter über diesen Bereich hinaus unter dem Horizont liegen. Ohne Strahlblockierung und bei normalem Brechwert beträgt die Höhe des Horizonts in 450 km Entfernung 12 km, sodass nur die Spitzen starker Konvektionsunwetterlagen erkannt werden können.

Die typische maximale Reichweite für die kontinuierliche Überwachung der meisten wetterbezogenen Phänomene beträgt 230 km. Die geringste Höhe, die ein Radarsystem ohne Strahlblockierung auf diese Entfernung beobachten kann, beträgt ungefähr 3 km. Darüber hinaus bietet eine Nadelstrahlantenne mit einer Halbwertsbreite (HPBW) von 1° auf 230 km eine Winkelauflösung von 4 km, sodass quantitative Schätzungen bei solchen Reichweiten unmöglich sind.

Dementsprechend ist die QPE typischerweise auf eine maximale Reichweite von 90 (150) km für eine HPBW = 1° (0,6) beschränkt. Ohne Strahlblockierung beträgt die geringste Höhe, die ein Radarsystem mit einem Höhenwinkel von 0° bei einer Reichweite von 90 (150) km erkennen kann, 500 (1300) m.

Die Situation wird natürlich noch viel problematischer im Gebirge, wo Wetterechos aufgrund der Strahlabschirmung durch das Geländere Relief nur in großen Höhen erkannt werden können: Hier führt die Blockierung durch das Gelände in Kombination mit der geringen Niederschlagstiefe in kalten Jahreszeiten und geringer Schneeschmelze zu einer unzureichenden Radarabdeckung, um QPE über eine Reichweite von 60 km bis 90 km zu unterstützen. Wie kann der zunehmende Bedarf einer verbesserten Abdeckung geringer Höhen erfüllt werden? Kosten, Strahlensicherheitsaspekte und ästhetische Gesichtspunkte unterstützen die Anwendung von Radargeräten mit kurzer Reichweite, die mit kleinen Antennen und Sendern mit niedriger Leistung ausgestattet sind und entweder an kostengünstigen Türmen oder vorhandener Infrastruktur installiert werden können. X-Band-Radarsysteme mit niedriger Leistung und kurzer Reichweite können eine

brauchbare Lösung für die Ergänzung von Radarsystemen mit langer Reichweite sein. In diesem Fall beträgt die übliche maximale Reichweite ungefähr 50 km.

Radarsysteme können eine nahezu dauerhafte Überwachung von Wetterphänomenen in Verbindung mit synoptischen oder Mesoskalen-Unwettern über einem großen Bereich (beispielsweise einer Reichweite von 220 km und einem Bereich von 125000 km²) liefern, sofern der Bereich nicht durch Hügel beeinträchtigt wird. Aufgrund des Bodenechos bei kurzen Reichweiten, der Erdkrümmung und der Verbreiterung des Radarstrahls ist eine quantitative Niederschlagserkennung in einer Entfernung von mehr als 10 km zum Radar nur in begrenztem Maße möglich und die maximale praktische Reichweite für die Wetterbeobachtung beträgt ungefähr 200 km.

Über großen unbevölkerten Gebieten sind andere Beobachtungsmittel oftmals nicht verfügbar oder möglich. In Regionen, in denen schwerer oder lang anhaltender Niederschlag häufig ist, wird ein S-Band-Radarsystem empfohlen. In anderen Bereichen wie etwa mittleren Breitengraden können C-Band-Radarsysteme eine kostengünstigere und effektive Lösung sein. X-Band-Radarsysteme unterliegen der Dämpfung und können daher nur über kurze Entfernungen eingesetzt werden.

9.5 Meteorologische Sicht und Störungen

An allen Radarstandorten sollte eine uneingeschränkte meteorologische Sicht des Radarsystems sichergestellt werden. Dies gilt ebenso für die unmittelbare Umgebung wie für größere Entfernungen.

Im Fall von Anwendungen im kleinen Umfang sollte besonders darauf geachtet werden, Bodenechos im Zielbereich zu vermeiden. Bei großen Anwendungen hat die uneingeschränkte meteorologische Sicht hingegen oberste Priorität.

Bodenechos sind Reflexionen des Radarstrahls von der natürlichen Topografie (z. B. Berge, Bäume) und/oder Hindernissen wie Gebäuden, Windparks usw. in der Nähe eines Wetterradersystems. Diese Bodenechos werden durch Nebenkeulen verursacht.

Topografische Karten können genutzt werden, um einen geeigneten Standort für ein Wetterradersystem zu finden. Standorte, an denen Nebenkeulen durch natürliches Gelände oder Bäume entfernt werden könnten, sind ideal. Eine Standortanalyse sollte mit einer Kamera und einem optischen Theodoliten durchgeführt werden, um das Gelände auf lokale Hindernisse wie Türme oder große Bäume zu untersuchen. In extremen Fällen ist es hilfreich, ein mobiles Radarsystem zu verwenden, um die Eignung des Standorts zu bestätigen. Eine elektromagnetische Störungsanalyse muss durchgeführt werden.

Anhang A (normativ)

Messung der Systemleistungsparameter

Je nach Konfiguration in Übereinstimmung mit Abschnitt 5.2.1 stehen drei Messdiagramme zur Verfügung. Als typische Konfiguration zeigt dieser Anhang Parametermessverfahren für duale polarisationsunabhängige Sender.

A.1 Standardspezifikationsformat

Tabelle A.1 listet auf der Grundlage von Abschnitt 6 wichtige Wetterradar-Leistungsparameter und ihre entsprechenden Grenzwerte auf. Da einige der Parameter von der Radarwellenlänge abhängig sind, werden gegebenenfalls separate Grenzwerte für das X-, C- und S-Band angegeben. Darüber hinaus wird jeder Parametergrenzwert für die drei Kategorien angegeben, die die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm geltenden Stufen technischer Präzision repräsentieren. Die Stufe „Grenzwert“ repräsentiert die Mindestanforderungen an ein quantitatives Wetterradarsystem. Die Stufe „Üblich“ bezieht sich auf die üblichen Anforderungen an Wetterradarsysteme. Die Stufe „Erreichbar“ erfordert Hochleistungshardware und eine ausgeklügelte Gestaltung und Fertigung, um die Grenzwerte einzuhalten. Dementsprechend sind die letzteren Systeme wesentlich teurer als die Radarsysteme der Stufe „Üblich“.

Da sich die Tabelle A.1 auf quantitative Wetterradarsysteme konzentriert, können andere Anwendungen bestehen, die nicht für alle Parameter die Stufe „Grenzwert“ oder eine bessere Stufe erfordern.

Tabelle B.1 in Anhang B listet Beispiele für „übliche“ Spezifikationen von derzeit auf dem Markt befindlichen Wetterradarsystemen auf (Stand 2016).

Tabelle A.1 — Standardspezifikationsformat

Systemleistungsanforderungen für Wetterradarsysteme		Kategorie		
Grundlegende Parameter	Kriterien	Erreichbar	Üblich	Grenzwert
Empfindlich- keit	Die Reflektivitätsempfindlichkeit muss A dBZ oder weniger bei Entfernungen bis zu B km sein, dabei wird die maximale eindeutige Geschwindigkeit von mehr als ± 48 m/s mit einem zweigestaffelten Wert für f_{PRF} von 2:3 oder 3:4 oder 4:5 erreicht			
	Für das S-Band	$< 10, 240$	$< 18, 240$	$< 23, 240$
	Für das C-Band	$< 10, 120$	$< 18, 120$	$< 23, 120$
	Für das X-Band	$< 10, 60$	$< 18, 60$	$< 23, 60$
Räumliche Auflösung	Die Strahlaufösung muss θ_H und θ_V (in Grad) oder weniger betragen	$< 0,55$	< 1	< 2
	Die Bereichsaufösung muss RR (in m) oder weniger betragen	≤ 75	≤ 150	≤ 1000
	Die Antennennebenkeule muss			
	ΔV_{pa} (in dB) oder weniger betragen	< -27	< -23	< -20
	Die Bereichsnebenkeule muss			
	ΔV_{pr} (in dB) oder weniger für Impulskompressionsradarsysteme betragen	< -70	< -50	< -30
Phasen- stabilität	Die Phasenstabilität muss θ_{ps} (in Grad) oder weniger betragen			
	Für das S-Band	$< 0,1$	$< 0,3$	< 1
	Für das C-Band	$< 0,2$	$< 0,6$	< 2
	Für das X-Band	$< 0,4$	$< 1,2$	< 4
Genauigkeit der dualen Polarisations- messung	Das Kreuzpolarisationsverhältnis muss $XPDSys$ (in dB) oder weniger betragen.	< -35	< -30	< -20
Sonstige Haupt- parameter	Kriterien			

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Systemleistungsanforderungen für Wetterradarsysteme		Kategorie		
Grundlegende Parameter	Kriterien	Erreichbar	Üblich	Grenzwert
Maximale Rotations- geschwindig- keit	Die maximale Antennenrotationsgeschwindigkeit muss $R_{\max}$ (in U/min) oder mehr betragen.	≥ 10	≥ 6	≥ 2
Beschleuni- gung	Als EL-Antennenbeschleunigung muss die Höhenantriebsdauer von 0 bis 90 Grad und 90 bis Grad weniger als t_{aEL} (in Sekunden) betragen.	< 10	< 20	< 40
	Als AZ-Antennenbeschleunigung muss die Dauer von der Höchstgeschwindigkeit bis zum vollständigen Stillstand weniger als t_{aAZ} (in Sekunden) betragen.	< 3	< 5	< 10
Genauigkeit der Antennenpeil- richtung	Die Genauigkeit der Antennenpeilrichtung muss			
	θ_{pa} (in Grad) oder weniger betragen.	$< 0,05$	$< 0,1$	$< 0,2$
Dynamik- bereich	Der Dynamikbereich muss LV_d (in dB) oder mehr betragen.	> 120	> 100	> 80
Linearität	Die Linearität der Amplitude muss unter $\pm LV_{lin}$ (in dB) gehalten werden.	$< 0,05$	$< 0,1$	$< 0,5$
Nebenwellen- unterdrückung	Die Nebenwelle muss A dB oder weniger bei B MHz entfernt von der Mittenfrequenz f_0 (in MHz) betragen.	$< -60,5$	$< -60,10$	$< -60,20$

A.2 Messung der grundlegenden Parameter

Die in Tabelle 2 angegebenen Systemleistungsparameter sind nach Radarsystemkomponenten sortiert. Für einige Elemente bestehen Unterschiede in der Messung zwischen Impulskompressions- und Nichtimpulskompressionsradarsystemen.

Tabelle A.2 — Systemleistungsparameter

Komponente	Messparameter	Parameter-kategorie	Anwendbarkeit	Hinweise	Abschnitt
Sender	Spitzensende-leistung (P_t)	Sensitivität	Üblich		A.2.2
	Sendeimpuls-breite (τ)	Sensitivität	Üblich	Auch verbunden mit der Bereichs-auflösung	A.2.1
Antenne	Gewinn (G_t, G_r)	Sensitivität	Üblich		A.2.3
	Strahlbreite ($\theta_{H/V}$)	Empfindlichkeit und räumliche Auflösung	Üblich		A.2.3
	Kreuz-polarisations-verhältnis (XPD)	Genauigkeit der dualen Polarisations-messung	Üblich	Muss zusammen mit der „Isolierung“ in der Empfänger-kategorie gemessen werden	A.2.4

Tabelle A.2 (fortgesetzt)

Komponente	Messparameter	Parameter-kategorie	Anwendbarkeit	Hinweise	Abschnitt
Empfänger	Minimal erkennbares Signal ($S_{\min}$)	Sensitivität	Unterschiedlich für Impulskompressions- und Nichtimpulskompressionsradarsysteme		A.2.5
	Impulskompressionsgewinn	Empfindlichkeit	Impulskompressionsgewinn		A.2.6
	Entfernungsauflösung (Nichtimpulskompressionsradarsystem)	Räumliche Auflösung	Nichtimpulskompressionsradarsystem		A.2.7.1
	Entfernungsauflösung (Impulskompressionsradarsystem) Entspricht der empfangenen Impulsbreite (τ)	Empfindlichkeit und räumliche Auflösung	Impulskompressionsradarsystem		A.2.7.3
	H/V-Isolierung	Genauigkeit der dualen Polarisationsmessung	Üblich	Verbunden mit dem „Kreuzpolarisationsverhältnis“ (XPD) in der Antennenkategorie	A.2.4
Systemverlust	Sendeweg		Üblich		A.2.8
	Empfangsweg		Üblich		A.2.8
	Radarkuppel-Übertragungsverlust		Üblich		A.2.8