

DIN ISO 19926-1

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

ICS 07.060

**Meteorologie –
Wetterradar –
Teil 1: Systemleistung und Betrieb (ISO 19926-1:2019)**

Meteorology –

Weather radar –

Part 1: System performance and operation (ISO 19926-1:2019)

Météorologie –

Radars météorologiques –

Partie 1: Performance et fonctionnement des systèmes (ISO 19926-1:2019)

Gesamtumfang 109 Seiten

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

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich.....	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Abkürzungen	8
5 Grundlagen.....	9
5.1 Frequenzbänder.....	9
5.2 Systemkonfiguration	10
5.2.1 Übersicht der Radarsystemkomponenten	10
5.2.2 Duale Polarisations-Sendemodi.....	13
5.2.3 Beschreibung der Komponenten	14
6 Systemleistung und Messparameter	17
6.1 Allgemeine Aspekte	17
6.2 Grundlegende Parameter	20
6.2.1 Empfindlichkeit.....	20
6.2.2 Räumliche Auflösung	24
6.2.3 Phasenstabilität	28
6.2.4 Genauigkeit der dualen Polarisationsmessung.....	29
6.3 Sonstige Hauptparameter	30
6.3.1 Nebenkeule	30
6.3.2 Parallele Strahlausrichtung.....	30
6.3.3 Abstimmung der Strahlbreite	30
6.3.4 Maximale Rotationsgeschwindigkeit	30
6.3.5 Beschleunigung	30
6.3.6 Genauigkeit der Antennenpeilrichtung	30
6.3.7 Dynamischer Bereich.....	31
6.3.8 Nebenwellenunterdrückung	31
7 Kalibrierung, Überwachung und Instandhaltung.....	32
7.1 Allgemeine Aspekte	32
7.2 Kalibrierung	33
7.2.1 Allgemeines	33
7.2.2 Kalibrierungsarten	33
7.2.3 Elemente, Verfahren und Kalibrierungsintervalle	33
7.3 Überwachung	34
7.3.1 Allgemeines	34
7.3.2 Stabilität von Radarsystemen	34
7.3.3 Überwachen der Empfängerstabilität und der elektrischen Peilung mithilfe der Sonne	35
7.4 Instandhaltung	36
7.4.1 Allgemeine Aspekte	36
7.4.2 Präventive Instandhaltung	37
7.4.3 Korrektive Instandhaltung	37
7.4.4 Instandhaltungsoptionen	37

7.4.5	Instandhaltungselemente und -intervalle.....	37
7.5	Lebenszyklusmanagement	38
7.5.1	Ersatzteilstrategie	38
7.5.2	Systemverfügbarkeit.....	39
7.5.3	Lebensdauerkosten	40
8	Personal, Qualifikation und Schulung	40
9	Standortwahl und Installation.....	43
9.1	Allgemeine Aspekte	43
9.2	Auswahl und Vorbereitung eines Radarstandorts.....	43
9.3	Unterstützende Infrastruktur.....	45
9.4	Abdeckung	46
9.5	Meteorologische Sicht und Störungen	46
Anhang A (normativ)	Messung der Systemleistungsparameter	48
A.1	Allgemeines	48
A.2	Standardspezifikationsformat.....	48
A.3	Messung der grundlegenden Parameter	50
A.3.1	Allgemeines	50
A.3.2	Halbwertsbreite des Sendepulses	53
A.3.3	Spitzensendeleistung (P_t)	54
A.3.4	Antennengewinn, Strahlbreite	57
A.3.5	Kreuzpolarisationsisolierung.....	59
A.3.6	Minimal erkennbares Signal, S_{min}	63
A.3.7	Pulskompressionsgewinn	67
A.3.8	Entfernungsauflösung.....	70
A.3.9	Systemverlust (F).....	74
A.3.10	Phasenstabilität	80
A.4	Sonstige Hauptparameter	84
A.4.1	Allgemeines	84
A.4.2	Nebenwellenaussendung.....	85
A.4.3	Antennennebenkeule.....	86
A.4.4	Parallele Strahlausrichtung.....	87
A.4.5	Übereinstimmung der Strahlbreite	87
A.4.6	Maximale Rotationsgeschwindigkeit	87
A.4.7	Beschleunigung	88
A.4.8	Genauigkeit der Antennenpeilrichtung	88
A.4.9	Dynamischer Bereich.....	90
A.4.10	Entfernungsnebenkeule.....	92
Anhang B (informativ)	Beispielspezifikationen für Radargeräte	93
Anhang C (informativ)	Aufzeichnung von Messergebnissen.....	95
Anhang D (informativ)	Empfohlene Instandhaltungs- und Kalibrierungsmaßnahmen.....	100
Anhang E (informativ)	Radardatenaustausch	104
Anhang F (informativ)	Sonstige Radarsysteme.....	105
F.1	Wetterradarsystem mit phasengesteuerten Gruppenantennen	105
F.2	Mikro-Regen-Radar	106
F.3	Terminal Doppler Weather Radar (TDWR).....	106
F.4	Terminal Doppler LIDAR (TDL)	106
F.5	Wolkenradar	107
F.6	Kleines Radarsystem.....	107
Literaturhinweise.....		108

Nationales Vorwort

ISO 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 des Unterausschusses NA 134-02-01-23 UA „Niederschlagsmessung mittels Radar“ des Fachbereichs II „Umweltmeteorologie“ der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss maßgeblich beteiligt.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen 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. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten 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 identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument 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.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 19926 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

Die rapide Entwicklung des Wetterradars begann kurz vor und während des Zweiten Weltkriegs. Ursprünglich wurde das Radar anhand langer Wellenlängen (10 m bis 50 m) demonstriert, wechselte aber schnell zu kürzeren Wellenlängen (3 cm und 10 cm) mit der Anforderung an und Entwicklung von kompakten und leistungsstarken Sendern. C-Band (5 cm) Wellenlängen standen in den späten 1950er Jahren zur Verfügung. Die ersten betriebsfähigen Doppler-Radargeräte erschienen Mitte der 1980er Jahre, als ihre Anwendung im Betrieb demonstriert wurde und schnelle, erschwingliche Prozessoren und effiziente Software-Codes verfügbar waren. Die Möglichkeit der dualen Polarisationsfunktion für operative Radargeräte wurde Mitte der 1990er Jahre vorgestellt.

Radargeräte bieten eine lokalisierte, hochdetaillierte, zeitnahe und dreidimensionale Mess- und Beobachtungsfunktion, die kein anderes meteorologisches Überwachungssystem liefern kann. Sie sind in der Lage, Schwankungen der Niederschlagsraten mit einer Auflösung von wenigen Quadratkilometern oder noch präziser und mit Zeitzyklen im Bereich von wenigen Minuten zu messen. Sie können darüber hinaus sich schnell entwickelnde Wetterereignisse überwachen, was für die Bereitstellung von Frühwarnungen bei schweren oder gefährlichen Witterungsbedingungen entscheidend ist. 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 Turbulenzen in klarer Luft erkennen, die genutzt werden, um einsetzende Gewitter vorherzusagen und vertikale Windprofile zu messen. Die duale Polarisation wird darüber hinaus zur Qualitätssicherung und Verbesserung der Niederschlagsschätzungen 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 min oder 90 min bis zu mehreren Stunden) für frühzeitige Warnungen ermöglichen. Numerische Wetterprognosesysteme haben sich ebenfalls weiterentwickelt und die Assimilation von Niederschlagsdaten auf kontinentaler Ebene in globale Modelle kann die 4- bis 5-tägigen Niederschlagsvorhersagen benachbarter Regionen und Kontinente erheblich verbessern.

Die Bereitstellung homogener und qualitativ hochwertiger Daten beginnt mit der Installation und dem Einsatz geeigneter Radartechnik für die lokalen Wetterbedingungen. Die Wellenlänge des Radars, die Strahlbreite der Antenne, die Art und Leistung des Senders, die Empfindlichkeit des Empfängers und die Wellenform haben alle einen wesentlichen Einfluss auf die Auflösung und Qualität der Radardaten. Wetterradarsysteme werden seit jeher entsprechend der lokalen Anforderungen an die Wetterbeobachtung und -überwachung ausgelegt und konfiguriert und berücksichtigen neben der lokalen Geografie auch andere Faktoren. Dies führt weltweit zu einer globalen Vielzahl unterschiedlicher Technologien und Messstrategien. All diese Faktoren wirken sich auf verschiedene Datenqualitätsmessgrößen wie etwa die Verfügbarkeit, Aktualität und Genauigkeit aus. Die Datenqualität basiert auf dem Betrieb und der Instandhaltung der Radarsysteme durch Anwendung vorgeschriebener und genormter Verfahren und Praktiken. Dies erfordert die Entwicklung von Normen, technischen Spezifikationen, optimalen Verfahren und Richtlinien für die Festlegung von Standards, Best Practices und Richtlinien für die Netzwerkgestaltung, die Standortwahl, die Kalibrierung, die System- und Gerätewartung, die Probenahme und Datenverarbeitung sowie die Weitergabe.

Das Ziel dieses Dokuments ist weit gefasst und richtet sich an Organisationen aller Länder, die Wetterradare verwenden, insbesondere Länder, in denen Betrieb und Nutzung von Wetterradarsystemen noch keine lange Tradition hat. Es bietet:

- Unterstützung der Hersteller bei der Aufrechterhaltung einer vergleichbaren und hohen Qualität konkurrenzfähiger Wetterradarsysteme;
- Hilfe für ausschreibende Behörden zur Berücksichtigung von Systemleistungen nach dem aktuellen Stand der Technik sowie von Komponentendefinitionen in ihren Dokumenten und damit Hilfe für den Vergleich verschiedener eingehender Angebote;
- Bereitstellung einer gültigen Dokumentation der Möglichkeiten und der Grenzen von Wetterradarsystemen und damit Unterstützung beim weltweiten Aufbau von Wissen und Kompetenz;
- Empfehlungen zu den allgemeinen Anforderungen an die Standortwahl, den Betrieb, die Wartung und Kalibrierung, um Radarsysteme mit hoher Datenqualität und -verfügbarkeit zu betreiben;
- Beschreibung des erforderlichen Aufgabenbereichs für den Betrieb und die Wartung von Wetterradarsystemen, um Führungskräften die Möglichkeit zu geben ausreichend finanzielle Ressourcen und Personalkapazitäten bereitstellen zu können.

Weitere Informationen, wie z.B. die Grundlagen der Wetterradarmessung, finden Sie in Referenz [1].

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt die Systemleistung bodengestützter Wetterradarsysteme 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 gültig für Parabolantennen-Radarsysteme mit linearer Polarisierung, duale Polarisations- und Einzelpolarisationsradarsysteme. Sie gilt nicht für Fächerstrahl-Radarsysteme (niedriger Azimuth und breiter Höhenwinkel). Hierzu zählen Schiffs- und aeronautische Überwachungsradarsysteme, die zwar für Wetteranwendungen verwendet werden, aber nicht vornehmlich dafür ausgelegt sind. Radarsysteme mit phasengesteuerten Gruppenantennen mit elektronisch gebildetem und gelenktem Strahl einschließlich Fächerstrahl mit nicht-kreisförmigen Abweichungssichtmustern sind neu weshalb hierfür bisher nur unzureichende Leistungsdaten vorliegen.

Diese Internationale Norm beschreibt nicht die Wetterradartechnologie und ihre Anwendungen. Wetterradarsysteme können für Anwendungen wie Quantitative -Niederschlagsabschätzung (QPE), die Klassifizierung von Hydrometeoren (z. B. Hagel), die Schätzung von Windgeschwindigkeiten oder die Erkennung und Überwachung signifikanter 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.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

In diesem Dokument werden keine Begriffe aufgeführt.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

4 Abkürzungen

ADC	Analog-Digital-Wandler
AZ	Azimuth
BITE	integriertes Prüfgerät
BPF	Bandpassfilter
CW	Dauerstrich (kontinuierliche Welle)
EL	Höhenwinkel
H/V	horizontal/vertikal
HPBW	Halbwertsstrahlbreite
ITU-R	International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector

LDR	lineares Depolarisationsverhältnis
LNA	rauscharmer Verstärker (en: low noise amplifier)
MTBF	mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen
NMHS	Nationaler Meteorologischer und Hydrologischer Dienst
PRT	Pulswiederholzeit
QPE	Quantitative Niederschlagsschätzung
RF	Funkfrequenz
SG	Signalerzeuger
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
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 System, das entwickelt wurde, um Hydrometeore in einem großen Gebiet zu messen, unter Verwendung einer Fernerkundungstechnologie, die auf Mikrowellen basiert. Die Mikrowellen der S-, C- und X-Bänder werden in vielen Fällen verwendet, und Maßstab und Beobachtungseigenschaften unterscheiden sich je nach den Eigenschaften jeder Frequenz (Wellenlänge). S-Band-Systeme sind groß und haben einen weiten Beobachtungshorizont, während X-Band-Systeme kompakt sind und einen engen Beobachtungshorizont haben. Der Sichtbereich 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 Referenz [1] für ausführliche Informationen. Tabelle 1 zeigt die typischen Werte für jedes Frequenzband.

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

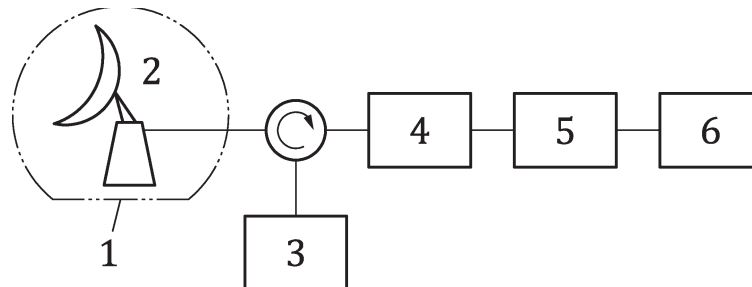
Tabelle 1 — Typische Spezifikationen für verschiedene Frequenzbänder des Wetterraders

Frequenz-band	Frequenzbereich ^a	Antennen-durchmesser ^{b,c}	Regendämpfung (Zwei-Wege) bei 30 mm/h ^d
S	2,700 GHz bis 3,000 GHz	8,5 m	0,02 dB/km
C	5,250 GHz bis 5,900 GHz	4,2 m	0,13 dB/km
X	9,300 GHz bis 9,800 GHz	2,4 m	1,22 dB/km
^a Der Frequenzbereich variiert je nach Land. ^b Weitere Informationen zu Frequenzbändern und Antennengrößen sind in Referenz [1] und Kapitel 7.6.8 enthalten. ^c Typische Werte für einen Halbwertsbreite von 1° ^d Für Angaben zur Regendämpfung siehe Referenz [1] und Kapitel 7.2.3.			

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.

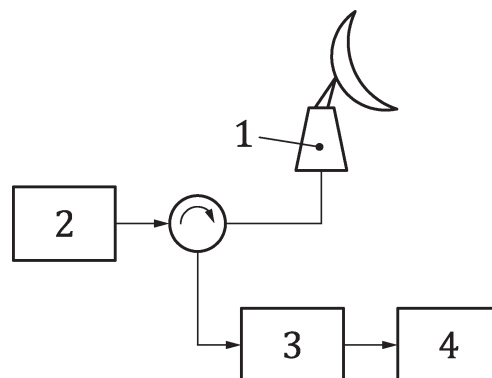


Legende

1	Radom	4	Empfänger
2	Antenne	5	Signalprozessor
3	Sender	6	Datenprozessor

Bild 1 — Konfiguration und Diagramm des Radarsystems

Wetterradarsysteme sind unterteilt in Einzelpolarisationssysteme, die fast immer horizontal polarisiert sind (siehe Bild 2), und duale Polarisationssysteme, bei denen horizontale und vertikale Polarisationen der gesendeten und empfangenen Mikrowellen verwendet werden. Duale Polarisationssysteme sind weiter unterteilt in Systeme mit einem einzelnen Sender (siehe Bild 3 und 4) und Systeme die über zwei unabhängige Sendersysteme verfügen (siehe Bild 5).



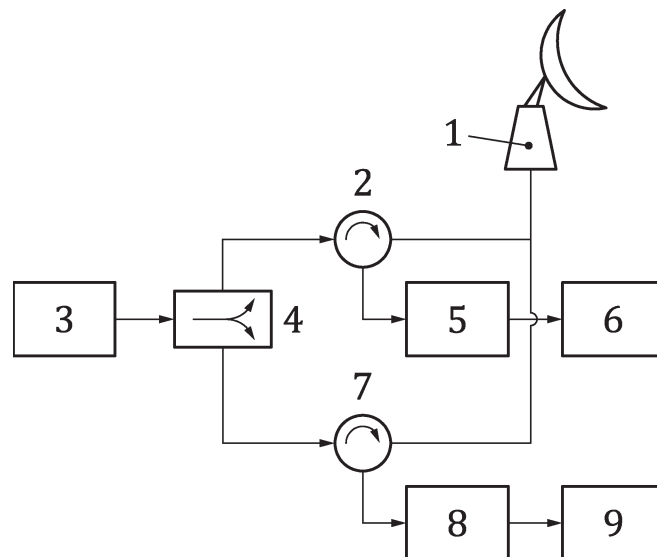
Legende

1	Antenne	4	TR-Begrenzer ^{N1)}
2	Sender	5	Empfänger ^{N2)}

Bild 2 — Systemdiagramm des Einzelpolarisationsradars

N1) Nationale Fußnote: Die Nummerierung wurde analog zur ISO 19926-1:2020 belassen. Korrekterweise muss hier eine „3“ stehen.

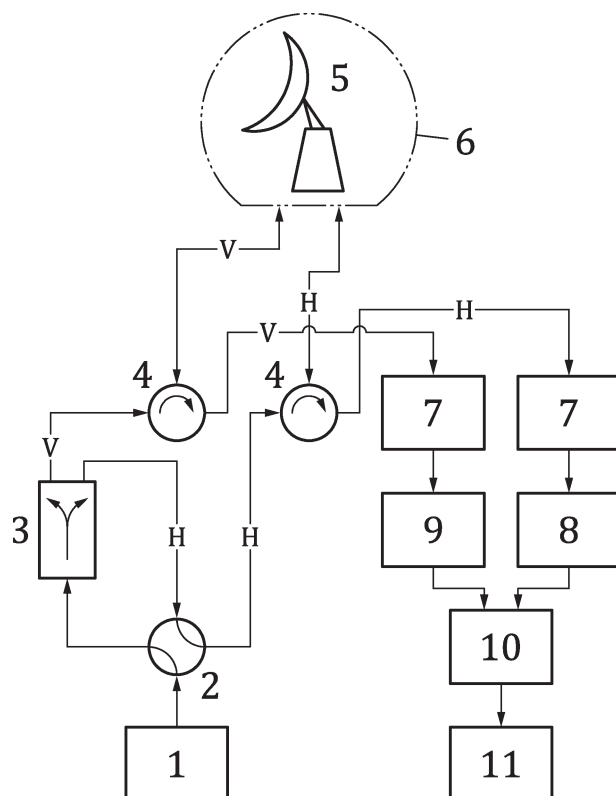
N2) Nationale Fußnote: Die Nummerierung wurde analog zur ISO 19926-1:2020 belassen. Korrekterweise muss hier eine „4“ stehen.



Legende

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Antenne | 6 Empfänger (H-Kanal) |
| 2 Horizontaler Polarisationskanal (H) | 7 Vertikaler Polarisationskanal (V) |
| 3 Sender | 8 TR-Begrenzer |
| 4 3dB-Leistungsteiler | 9 Empfänger (V-Kanal) |
| 5 TR-Begrenzer | |

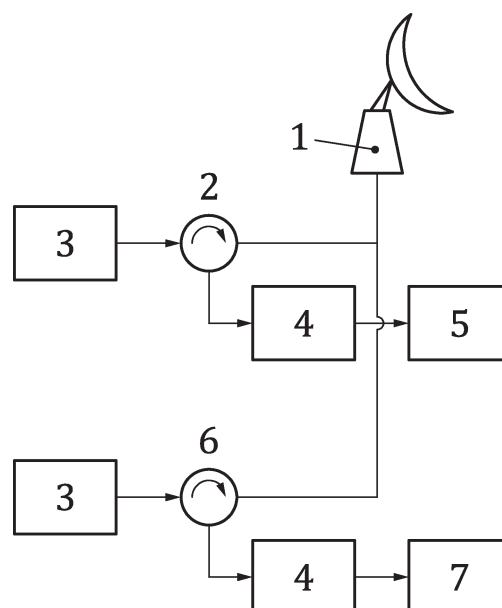
Bild 3 — Systemdiagramm des dualen Polarisationsverteilungssenders



Legende

- | | | | |
|---|-----------------------|----|-------------------------------------|
| 1 | Sender | 7 | TR-Begrenzer |
| 2 | Polarisationsschalter | 8 | Horizontaler Polarisationskanal (H) |
| 3 | 3 dB Leistungsteiler | 9 | Vertikaler Polarisationskanal (V) |
| 4 | Zirkulator | 10 | Signalprozessor |
| 5 | Antenne | 11 | Datenprozessor |
| 6 | Radom | | |

Bild 4 — Systemdiagramm eines dualen Polarisationsverteilungssenders plus zusätzlichem linearen Depolarisationsverhältnis-Modus



Legende

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Antenne | 5 Empfänger (H-Kanal) |
| 2 Horizontaler Polarisationskanal (H) | 6 Vertikaler Polarisationskanal (V) |
| 3 Sender | 7 Empfänger (V-Kanal) |
| 4 TR-Begrenzer | |

Bild 5 — Systemdiagramm eines dualen polarisationsunabhängigen Senders

5.2.2 Duale Polarisations-Sendemodi

5.2.2.1 Allgemeines

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

5.2.2.2 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. Die Vorteile dieser Methode bestehen 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 (z. B. differentielle Reflektivität Z_{dr}).

5.2.2.3 Alternierender H/V-Modus

Im alternierenden H/V-Modus werden horizontal und vertikal polarisierte Wellen alternierend von Puls zu Puls gesendet. Zwei Empfänger empfangen das kopolare und kreuzpolare Signal für jeden Puls. Der Vorteil des alternierenden H/V-Modus besteht darin, dass die kopolaren und kreuzpolaren Komponenten des Streugitters gemessen werden können. Wenn das Radarsystem mit einem verteilten Sender arbeitet, 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 zweiten Puls pro Sender simuliert werden.

5.2.2.4 LDR-Modus

Das lineare Depolarisationsverhältnis (LDR) ist ein spezieller Modus, der bei Radarsystemen mit verteilter Senderkonfiguration (siehe Bild 4) ermöglicht, 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 Bodenechos. Die Nutzung des LDR-Modus erfordert eine Umgehung des Leistungsverteilers. Diese Umgehung sendet die Sendeleistung nur an das horizontale Sendesystem. Beim Empfang misst der horizontale Polarisationsempfänger das kopolare Signal und der vertikale Polarisationsempfänger 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 Mess (PPI) -Scan statt. Außer dem LDR kann kein anderes duales Polarisationsprodukt direkt 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 Aufgaben des Sendens und Empfangens. Darüber hinaus ist die Antenne in Einzelpolarisations- (ein Sendehorn) und duale Polarisationsbauarten (ein Sendehorn, das 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 Einzelstrahlern besteht. Siehe Anhang F für weitere Informationen.

5.2.3.2 Radarkuppel (Radom)

Ein Radom 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.

Das Radom für duale Polarisationsysteme 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.

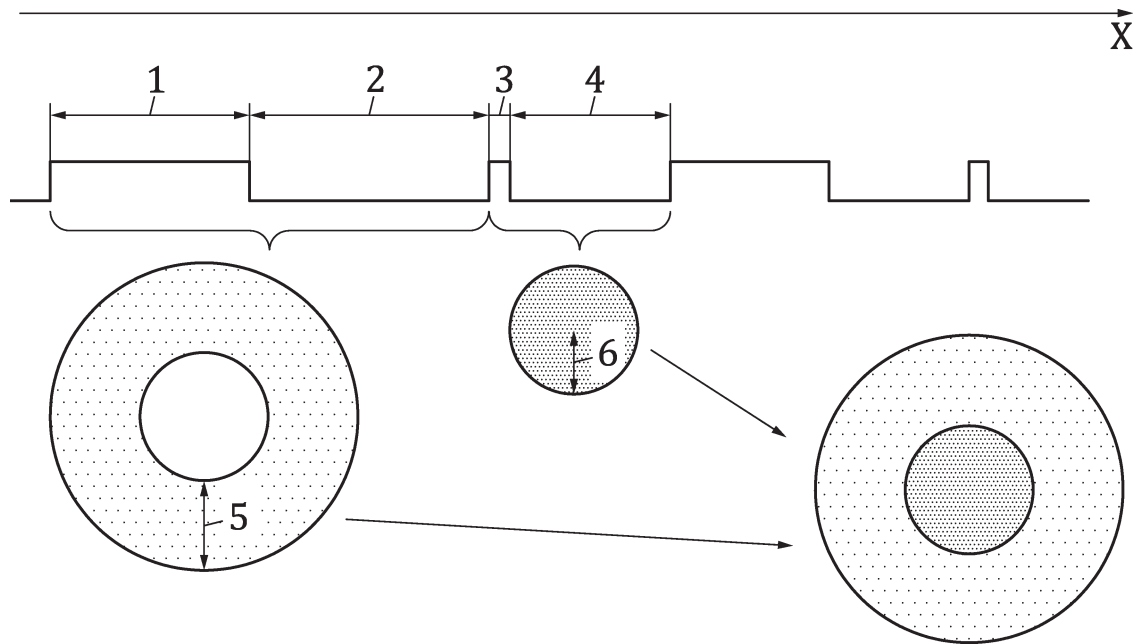
Das Radom verursacht Verluste beim Senden und Empfangen; siehe Anhang A.3.9.2 für die Schätzung der Verluste einer trockenen Radarkuppel. Wasser, Schnee oder Eis auf der Radarkuppel können zu erheblichen Verlusten (einige dB) führen.

5.2.3.3 Sender

5.2.3.3.1 Allgemeine Aspekte

Ein Sender ist ein Gerät, das Funkwellen erzeugt. Er erzeugt einen stabilen starken Mikrowellenpuls und strahlt Funkwellen über eine Antenne in die Luft aus. Es gibt zwei Arten von Sendegeräten: Sender mit Elektronenstrahlröhren [Magnetron, Klystron, Wanderfeldröhre (TWT) usw.] und Halbleiter (Festkörper). Bei TWT- und Festkörpersendern wird die Pulskompression angewendet, um eine feine Auflösung zu erhalten und das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erhöhen.

Bei Pulskompressionsradargeräten werden üblicherweise abwechselnd ein langer und ein kurzer Puls gesendet, da beim Senden eines langen Pulses ein Blindbereich erzeugt wird, der abgedeckt werden muss. Ein Beispiel für die Übertragung von langen und kurzen Pulsen ist in Bild 6 dargestellt.



Legende

- | | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| 1 Senden des langen Pulses | 5 Beobachtungszeit bei langem Puls |
| 2 Empfang des langen Pulses | 6 Beobachtungszeit bei kurzem Puls |
| 3 Senden des kurzen Pulses | X Zeit |
| 4 Empfang des kurzen Pulses | |

Bild 6 — Beispiel für das Senden langer/kurzer Pulse

5.2.3.3.2 Senderbetriebszeit

Bei einem gepulsten Radarsystem ist der Sender jeweils nur kurzzeitig eingeschaltet. Während der verbleibenden Zeit werden reflektierte Echos des gesendeten Strahls 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 (Magnetron 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 (Halbleitern) vergleichbare lange Pulse gesendet. Die Spitzenleistung von Röhrensendern liegt zwischen einigen Dutzend kW und einigen 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 Röhrensender wie etwa TWT-Sender basieren ebenfalls auf einer geringen Spitzenleistung und hoher Betriebszeit wie die Halbleitersender).

5.2.3.3.3 Pulsbreitenbereich des Systems

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

Die Pulsbreite eines Halbleitersenders liegt üblicherweise im Bereich von 100 µs (zwischen 20 µs und 200 µs) entsprechend einer räumlichen Genauigkeit von 15 km. Das Pulskompressionsverfahren wird angewendet, um eine vergleichbare Entfernungsauflösung wie bei den kurzen Pulsen eines Röhrensenders zu erreichen. Oftmals wird auch ein separater kurzer Puls gesendet, um kurze Entfernungen abzudecken, die durch den langen Sendepuls maskiert werden (siehe Bild 6).

5.2.3.3.4 Pulswiederholrate

Die Pulswiederholrate f_{PRF} oder das Zeitintervall zwischen der Auslösung von Radarsendepulsen, der Pulswiederholungszeit (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 die eindeutige maximale Entfernung r_{max} eines Radarsystems. Radarechos aus Entfernungen über r_{max} hinaus werden als Geisterechos angezeigt. r_{max} ist in Gleichung (1) aufgeführt:

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

dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit.

BEISPIEL Für eine maximale Entfernung 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), wie auch in Gleichung (2) gezeigt:

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

dabei ist λ die Wellenlänge des von dem Radar gesendeten Pulses.

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 niedrig 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 Geisterechos.

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

Pulskompressionsradarsysteme wenden die Frequenzmodulation bei der Übertragung langer Pulse an und erreichen mit der Pulskompressionsverarbeitung im Empfänger die gleiche SNR und Entfernungsauflösung in dem durch den modulierten Puls abgetasteten Bereich wie ein Radar mit Röhrensender. Der SNR des Bereichs, der durch den kurzen Puls abgetastet wird, ist niedriger als der des Bereichs, der durch ein Röhrensenderradar abgetastet wird.

Die Kombination aus kurzen und langen Pulsen erhöht den effektiven Dynamikbereich aus dem Nah- und Fernbereich, ähnlich der Empfindlichkeitszeitsteuerung (STC).

ANMERKUNG STC wird verwendet, um starke Signale im Nahbereich zu dämpfen. Es ist nicht erforderlich für Empfängersysteme mit einem großen Dynamikbereich.

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);
- Spektrale Breite (W);
- Phasendifferenz (Φ_{dp});
- Korrelationskoeffizient zwischen Z_h und Z_v (ρ_{hv}).

5.2.3.6 Datenprozessor

Ein Datenprozessor erzeugt die Datenprodukte je nach Zweck des Radarsystems auf der Grundlage von verschiedenen 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 sie auf verschiedene Arten von Wetterradarsystemen angewendet werden können. Dadurch wird den Benutzern erleichtert, Systemspezifikationen zu erstellen. Andererseits ermöglicht die Anwendung von Standardkriterien einen fairen Wettbewerb unter den Herstellern, da hierdurch Radarsysteme mit unzureichender Systemleistung vom globalen Markt ausgeschlossen werden. Zu diesem Zweck müssen die Kriterien für alle Wetterradarsysteme auf die gleiche Weise gemessen werden können, bevor diese vom Hersteller versandt werden.

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

Darüber hinaus wurden Parameter festgelegt, die nicht zu den grundlegenden Parametern gehören, aber ebenfalls sehr wichtig für die Festlegung der Systemleistung sind; diese werden als sonstige Hauptparameter bezeichnet. Eine Zusammenfassung ist in den Tabellen 2 und 3 enthalten. 6.2 enthält Erläuterungen der grundlegenden Parameter und 6.3 erklärt die sonstigen Hauptparameter. Die Messung dieser Werte wird in Anhang A erklärt. Ein Beispiel, wie diese Werte aufgenommen werden, wird in Anhang C gegeben.

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, dass das Radar noch erkennen kann, oder umgekehrt: 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, Bodenechos 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 Messachse	Wertunterschied (in dB) relativ zum maximalen Wert im Zentrum der Hauptkeule Angabe als negative Zahl, je kleiner der Wert, desto weniger Störenergie wird von dem Radarsystem beobachtet
Entfernungs-Nebenkeule	Relevant für Pulskompressionsradarsysteme, bestimmt die Realitätstreue der Radarwerte aufgrund starker radial ausgerichteter Echos außerhalb der Hauptkeule	Wert (in dB) relativ zur Pulsspitzenstärke Angabe als negative Zahl, je kleiner der Wert, desto weniger Energie von außerhalb der Hauptkeule 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 sich das Radarsystem drehen
Beschleunigung	Bestimmt, wie schnell die Antenne ihre Geschwindigkeit ändern kann	Beschleunigung (in Grad/s ²)
Genauigkeit der Antennenpeilrichtung	Bestimmt die Genauigkeit der Winkelposition der Daten	Genauigkeit der Antennenpeilrichtung (in Grad) Je kleiner der Wert, desto genauer und präziser
Übereinstimmende Strahlausrichtung	Bestimmt, wie gut die Richtungen des horizontalen und des vertikalen Strahls übereinstimmen	Ausrichtung (in Grad) Je kleiner der Wert, desto besser ist die Übereinstimmung
Übereinstimmung der Strahlbreite	Bestimmt, wie gut die horizontalen und vertikalen Strahlbreiten übereinstimmen	Übereinstimmung (in Grad) Je kleiner der Wert, desto besser ist die Übereinstimmung
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 Reflektivitätsfaktor des Niederschlags und B km als maximale Entfernung für die Beobachtung von A festgelegt wird, kann die Empfindlichkeit A dBz bei B km wie in Gleichung (3) berechnet werden:

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

Dabei ist

C_0 ein von der Systemleistung unabhängig bestimmter Parameter

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

ANMERKUNG Ein Pulskompressionsradar hat zwei Konstanten C_{1F} , eine für den kurzen Puls und eine für den langen Puls.

Die Werte B , C_0 , C_{1F} und A werden 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), werden in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

6.2.1.2 Ableitung von der Radargleichung

Die Empfindlichkeit bezogen auf einen Hydrometeor ist ein Messwert, um festzustellen, wie weit ein Hydrometeor beobachtet werden kann.

Wenn die von dem Hydrometeor zurückgestreute Energie P_r ist und der Radarreflektivitätsfaktor des Hydrometeors Z beträgt, wird P_r wie in Gleichung (4) angegeben:

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

dabei ist (siehe z.B. Referenz [2])

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

und Gleichung (6)

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

Dabei ist

P_t die Sendeleistung in W;

G_t, G_r der Antennengewinn (Senden, Empfangen);

h die räumliche Pulslänge, 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/m³;
 r der Messentfernung in km;
 C die Radarkonstante in W/m^[2].

ANMERKUNG Für die praktische Anwendung werden Systemverluste berücksichtigt (siehe 6.2.1.4).

Wenn P_r der Mindestleistungsstärke entspricht, die erkannt werden kann, kann es als $S_{\min}$ angegeben werden (siehe A.3.6). Wird dieser Wert $S_{\min}$ in der Gleichung (4) eingesetzt, ergibt dies den minimalen Radarreflektivitätsfaktor $Z_{\min}$ bei einer beliebigen Entfernung r , wie durch die Gleichung (7) dargestellt:

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

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) als Gleichung (8) ausgedrückt:

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

C_0 beinhaltet die folgenden Elemente auf der rechten Seite der Gleichung (7), wie in Gleichung (9) dargestellt:

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

Entsprechend gilt: wenn C_1 in Gleichung (7) $P_t, G_t, G_r, h, \theta_H, \theta_V$ und $S_{\min}$ hat, ergibt sich Gleichung (10) als:

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

Der Wert von C_0 ist abhängig von Wellenlänge und Temperatur. 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 Sendefrequenz f_0 (MHz) bestimmt wird, wird sie wie in Gleichung (11) unter Verwendung der Lichtgeschwindigkeit von $3 \cdot 10^8$ m/s berechnet:

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

6.2.1.3 Standardberechnung

Die Einheit (mm^6/m^3) wird als Einheit des Radarreflektivitätsfaktors Z verwendet und üblicherweise mittels dBz als Dezibel relativ zu Z angegeben. Der gemeinsame Logarithmus auf beiden Seiten der Gleichung (8) berücksichtigt dies und wird wie in Gleichung (12) 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) hergeleitet wie in Gleichung (13) gezeigt:

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

Die für die zu messenden Elemente verwendeten Einheiten sind:

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

Die räumliche Pulslänge ist der Wert der Pulsbreite τ (in s) multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit. Da die Pulsbreite 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 in Gleichung (15) 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.3.9 für den zu messenden Systemverlust.

Dieser wird als C_{1F} berechnet und wie in Gleichung (16) gezeigt 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 Wasserdampf als L bezeichnet, ist L eine Funktion der Entfernung r und der Niederschlagsintensität R und wird wie in Gleichung (17) 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 die Entfernung 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 in Gleichung (18) 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 eingesetzt, wie in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5 — Spezifische Dämpfung durch Luft und Regen (ein-Weg Werte, 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 Referenz [3]			
^b siehe Referenz [1], Tabelle 9.5, ein-Weg spezifische Dämpfungen bei 18 °C.			

Die Verwendung von $S_{\min}$ allein ist letztendlich unzureichend. Ein angemessener Wert für SNR (in dB) sollte hinzugefügt werden. Dieser Wert muss vom Anwender festgelegt werden. Wenn der Anwender sich nicht entscheiden kann, wird 1 dB verwendet.

Auf der Grundlage des Vorgenannten wird die Gleichung (12) in der Praxis wie in Gleichung (19) 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 Pulskompressionsgewinn

Bei Pulskompressionsradarsystemen werden der Pulskompressionsgewinn G_c und die Pulsbreite τ_c nach der Pulskompression für die Berechnung des Empfindlichkeitsindex der Gleichungen (13) und (14), wie in Gleichung (20) und (21) angegeben, 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 Sendespitzenleistung multipliziert mit dem Pulskompressionsgewinn G_c , G_c wird theoretisch $10\log(bT)$ (dabei ist b die Frequenzmodulationsbreite und T die Sendepulsbreite). h der Gleichung (14) wird unter Verwendung von τ_c berechnet.

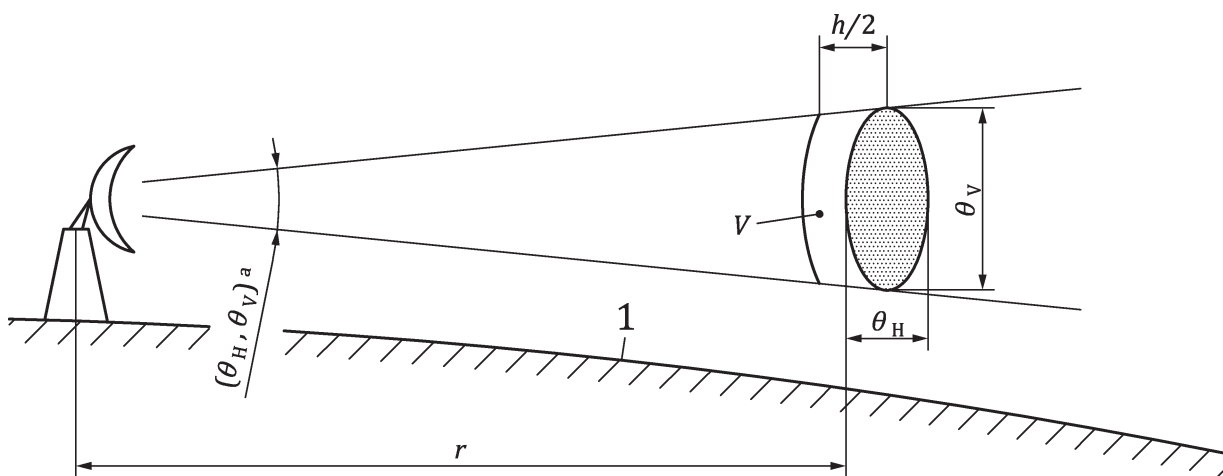
ANMERKUNG Der Pulskompressionsgewinn ist nur für den langen Puls anzuwenden.

6.2.2 Räumliche Auflösung

6.2.2.1 Definition

Bestimmt den räumlichen Detailgrad, mit dem das Radarsystem unterscheiden kann.

Wie in Bild 7 gezeigt, entspricht dies einem Abtastvolumen des Radarsystems umgeben von $h/2$ (wenn h die räumliche Pulslänge ist) und der Strahlbreite. Je kleiner das Abtastvolumen, desto höher der Detailgrad, mit dem das Radarsystem beobachten kann.



Legende

1 Bodenoberfläche
 H Pulslänge
 R Entfernung

V Zielvolumen
 a Strahlbreite.

Bild 7 — Räumliche Auflösung

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

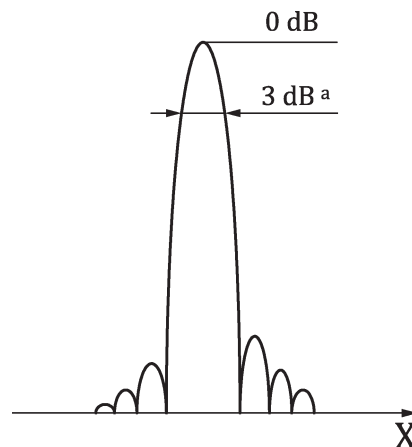
Die Systemleistung wird anhand von Tabelle 6 beurteilt:

Tabelle 6 — Systemleistungsparameter

Kategorie	Parameter	Bewertung
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 Pulscompressionsradar (in m) ΔR_{np} : Für Nicht-Pulscompressionsradar (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 8) und zeigt, wie nah der Strahl an der Emissionsmitte ist. Eine hohe Strahlaufösung wird erreicht, wenn die Halbwertsbreite der Hauptkeule klein ist. Es sollte beachtet werden, dass die Strahlaufösung durch den schlechtesten Wert zwischen der Hauptkeule des Sendestrahls und der Winkelverarbeitungseinheit des Empfängers begrenzt ist.



Legende

X Horizontaler/vertikaler Winkel

^a Abgleichfrequenz: Strahlbreite

Bild 8 — Strahlaufösung

6.2.2.3 Entfernungsaufösung

Die Entfernungsaufösung ist abhängig von der Pulslänge, 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 Sendepulses zu verwenden.

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

Diesbezüglich sollten Pulskompressions- und Nicht-Pulskompressionsradarsysteme unterschiedlich behandelt werden.

Für Nicht-Pulskompressionsradarsysteme sollte die Entfernungsauflösung durch eine Kombination aus Engpassfaktoren, die die Auflösung begrenzen, wie etwa die Sendepulshalbwertszeit, das Abtastintervall und die Empfängerbandbreite, geschätzt werden.

Die Entfernungsauflösung wird nach Gleichung (22) 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 der Sendepulshalbwertsbreite, dem Abtastintervall bzw. der Empfängerbandbreite entsprechenden Engpassfaktoren berechnet werden.

Für die Halbwertsbreite des Sendepulses wird L_1 mit der gemessenen Halbwertsbreite des Sendepulses τ_t berechnet, wie in Gleichung (23) gezeigt:

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

dabei ist τ_t die Halbwertsbreite des Sendepulses.

Das Abtastintervall des empfangenen Signals ist das Verarbeitungszeitintervall t_s in der Endphase des Signalprozessors. Bei Verwendung eines Zeitintervalls t_s wird L_2 nach Gleichung (24) berechnet:

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

Schließlich wird die Bandbreite des Empfängers (3-dB-Abgleichfrequenz von der Spitze) L_3 wie in Gleichung (25) 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 Pulskompressionsradarsystemen erfolgt die Änderung der Wellenform durch erhöhte Werte des Kosinus auf der Sendewelle, um eine Verbreiterung des Spektrums zu verhindern. Darüber hinaus wird eine Fensterfunktion auf die empfangene Welle angewendet, um Entfernungsnebenkeulen zu unterdrücken. Bei dieser Wellenformänderung passt die Gauß-Näherung gut zu der Wellenform nach der Pulskompression. Bild 9 zeigt ein Beispiel für das Messmuster des empfangenen Signals.

Da das Abtastintervall im Allgemeinen im Vergleich zur Pulsbreite nicht klein genug ist, wird die Pulsbreite aus den drei Messpunkten der erhaltenen Signale an dem Sendespitzenpuls sowie auf beiden Seiten 3-dB unterhalb der Pulsspitze geschätzt.

Die empfangene Pulswellenform $y(x)$ wird mit der Gleichung (26) angegeben:

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

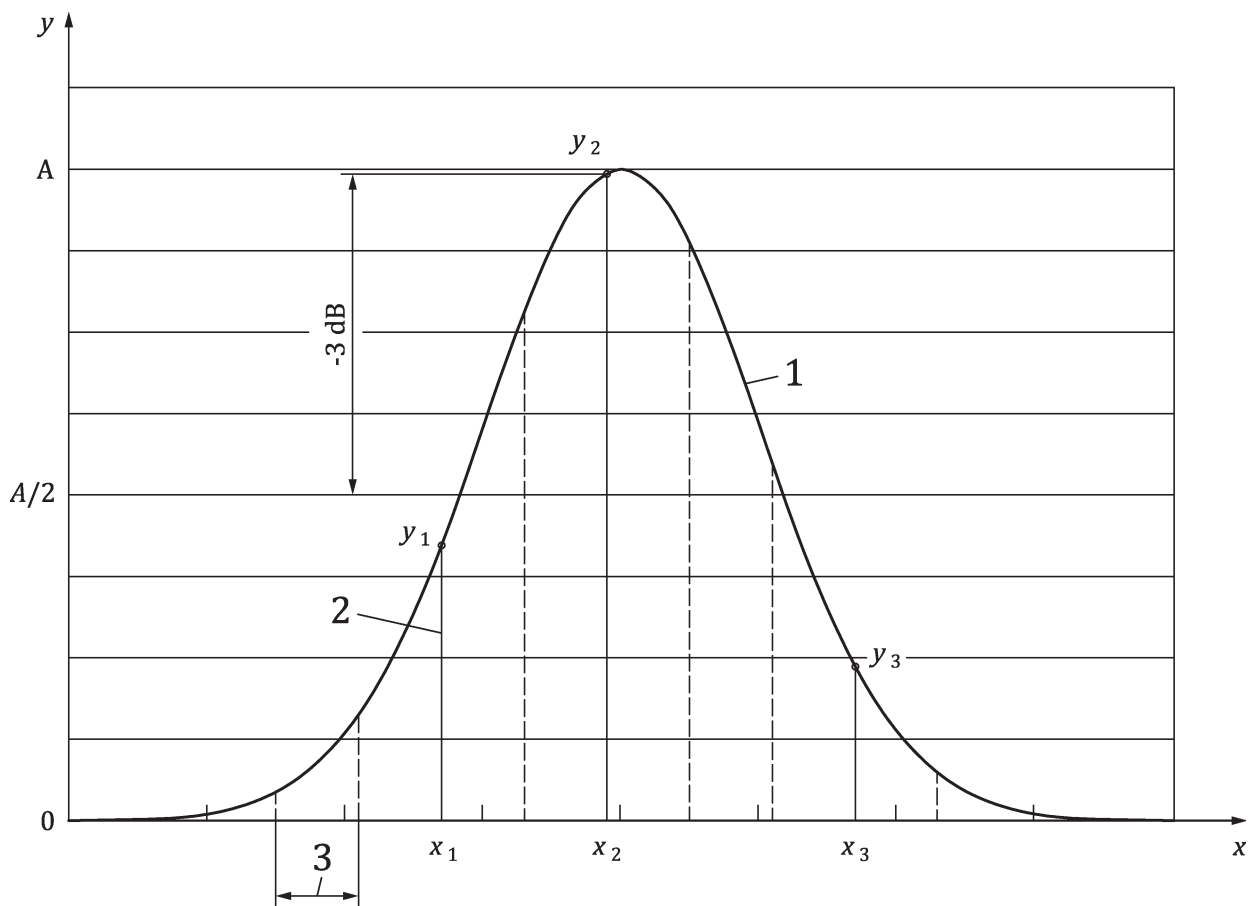
Dabei ist

- x die Zeit als Abszissenachse;
- A die maximale Amplitude;
- μ der Mittelwert;
- σ^2 die Varianz.

Die Pulsbreite 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) geschätzt, die an der empfangenen Pulswellenform abgetastet wurde. Um die Genauigkeit der Pulsbreitenschätzung 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 Gleichung (27):

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



Legende

- 1 Erhaltene Pulswellenform nach Pulskompression
- 2 Messpuls
- 3 Abtastintervall

Bild 9 — Wellenform des empfangenen Signals

Der Mittelwert μ , die Varianz σ^2 und die maximale Amplitude A werden wie folgt durch Einsetzen der drei gemessenen Werte in die Gleichung (27) und Lösen der simultanen Gleichungen (28), (29) und (30) berechnet:

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

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

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

Wenn die Pulsbreite als Breite der 3-dB-Abgleichfrequenz von der maximalen Amplitude A definiert wird, wird die Pulsbreite τ_{pc} wie in Gleichung (31) angegeben:

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

Die Entfernungsauflösung von Pulskompressionsradarsystemen wird anhand der oben geschätzten τ_{pc} wie in Gleichung (32) berechnet:

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

6.2.3 Phasenstabilität

Die Genauigkeit der Dopplergeschwindigkeit des Radarsystems hängt von der Phasenstabilität der Sendefrequenz und der Stabilität der Pulswiederholrate 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, Halbleiter) betrachtet. Ein Oszillator generiert idealerweise 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 in Gleichung (33) 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 [100 Hz, 1 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 in Gleichung (34) 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 Magnetronradarsystemen wird eine Messung jedes gesendeten Pulses vorgenommen und die Phaseninformationen aus dieser Messung werden von dem Empfänger verwendet, um die Dopplerverschiebung aus sukzessiven Pulsen 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 Verlusten, 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 Gasfaserpule. 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 Glasfaserpule gesendete optische Signal wieder in ein Funksignal mit denselben Eigenschaften bei reduzierter Amplitude um. Die Länge der Spule bestimmt die Verzögerung des empfangenen Sendepulses.

Bei Verwendung der vorhandenen Signalverarbeitungs-Hardware zeigt der Vergleich der Sendesignalphase (Sendeabtastwert) 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 Magnetronradarsysteme verwendet werden, sondern ermöglicht auch integrale Messungen des Phasenrauschens für Klystron- oder Halbleitersysteme.

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 z. B. 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 Signalisolation

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.

Die Signalisolation 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 Signalisolation für alle beitragenden Komponenten ist jedoch technisch sehr komplex. Da bei aktuellen Radarsystemen die Größenordnung der Signalisolation 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 Entfernungsnebenkeule gemessen werden. Ersterer bestimmt die Realitätstreue der Radarwerte aufgrund starker Echos außerhalb der Achse. Letzterer ist relevant für Pulskompressionsradarsysteme, und bestimmt die Realitätstreue der Radarwerte 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 Winkeldifferenz 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 die Antenne ihre Geschwindigkeit ändern 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.

Der Beschleunigungswert allein beschreibt nicht vollständig, wie schnell und präzise die Antenne die EL- und AZ-Position ändern kann. Dies wird als "Sprungantwortzeit" bezeichnet, die in diesem Dokument nicht weiter erläutert wird. Dieser Parameter definiert die Zeit, die benötigt wird, um die Antenne innerhalb eines vorgegebenen Genauigkeitsfensters von einer Position zur anderen zu bewegen. Eine wichtige Anwendung ist der Wechsel von einer Elevation zur nächsten während eines Volumenscans.

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 Richtung, um die gemessenen Daten mit einer Position relativ zur Erde 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 Sendehorns.

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 Gebäude besteht eine gangbare Methode zur Messung der Peilgenauigkeit in der Messung der Wiederholpräzision im Gebäude, 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

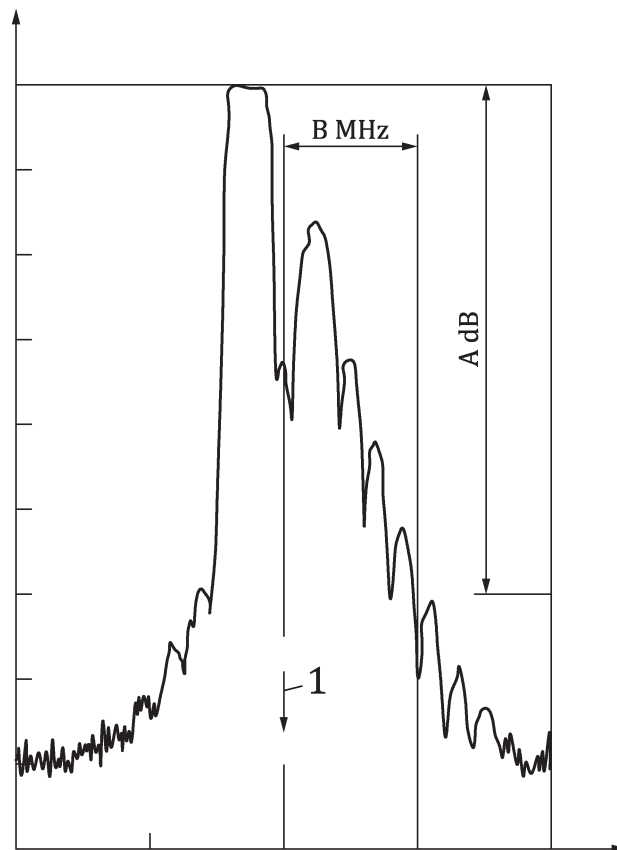
Der dynamische Bereich, LV_d , entspricht dem Verhältnis zwischen der maximalen und der minimalen Signalstärke, die der Radarempfänger messen kann. Hierbei handelt es sich um die Differenz der Empfängerleistung zwischen dem minimal erkennbaren Signal (S_{min}) und der Sättigung des Verstärkers in dB. Die Sättigung kann auch im digitalen Bereich durch Überlauf auftreten. Die Messung oder Berechnung von S_{min} wird in A.3.6 beschrieben. 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 Analog-Digital-Wandler (ADC) und die digitale Signalverarbeitung.

6.3.8 Nebenwellenunterdrückung

Die Nebenwellenunterdrückung misst die Reinheit des gesendeten Radarspektrums (siehe Bild 10). 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.

Grenzwerte für die 6.3.8 Nebenwellenunterdrückung sind in mehreren nationalen und internationalen Normen festgelegt, z. B. CEPT ERC Rec (02)05 (2012), CEPT ERC Rec 74-01E (2011), ITU-R SM.329-12 und ITU-R SM.1541-6.



Legende

1 Mittenfrequenz

Bild 10 — 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 (siehe 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 (siehe 7.4) dient dazu, beschädigte Teile des Radarsystems zu ersetzen (siehe 7.4.3), die präventive Instandhaltung (siehe 7.4.2) 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 (siehe 7.3) ist ein Prozess, der die hohe Datenqualität des Radarsystems sicherstellt. Oftmals werden während der Überwachung Entscheidungen über Zwischeninstandhaltungsarbeiten oder Kalibrierungen getroffen.

Kalibrierung und Instandhaltung erfolgen 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. 7.2 bis 7.5 bieten eine Zusammenfassung.

7.2 Kalibrierung

7.2.1 Allgemeines

Die regelmäßige Kalibrierung ist wichtig für eine gute Systemleistung.

7.2.2 Kalibrierungsarten

Die gesamte Kalibrierung der Reflektivität verwendet idealerweise ein externes Ziel mit einem bekannten Radarreflektivitätsfaktor 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 mehrerer Bodenreflexionen nur sehr selten angewendet. Die Antennenparameter können ebenfalls durch Messungen der solaren Strahlung im Mikrowellenbereich 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 Sende- und Empfängerverluste;
- Prüfung der gesendeten Frequenz und des Frequenzspektrums;
- Einspeisung eines bekannten Mikrowellensignals vor der Empfängerstufe, um einer gegebenen Analog-Digital-Wandlerzahl (ADC) eine Referenzleistung zuzuweisen;
- Messung des Signal-Rauschverhältnis, das 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 Analogsignals 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). Tabelle D.1 fasst die zu messenden Parameter, die in der Praxis anzuwendenden Verfahren und die erforderliche Kalibrierungshäufigkeit zusammen.

7.2.3 Elemente, Verfahren und Kalibrierungsintervalle

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