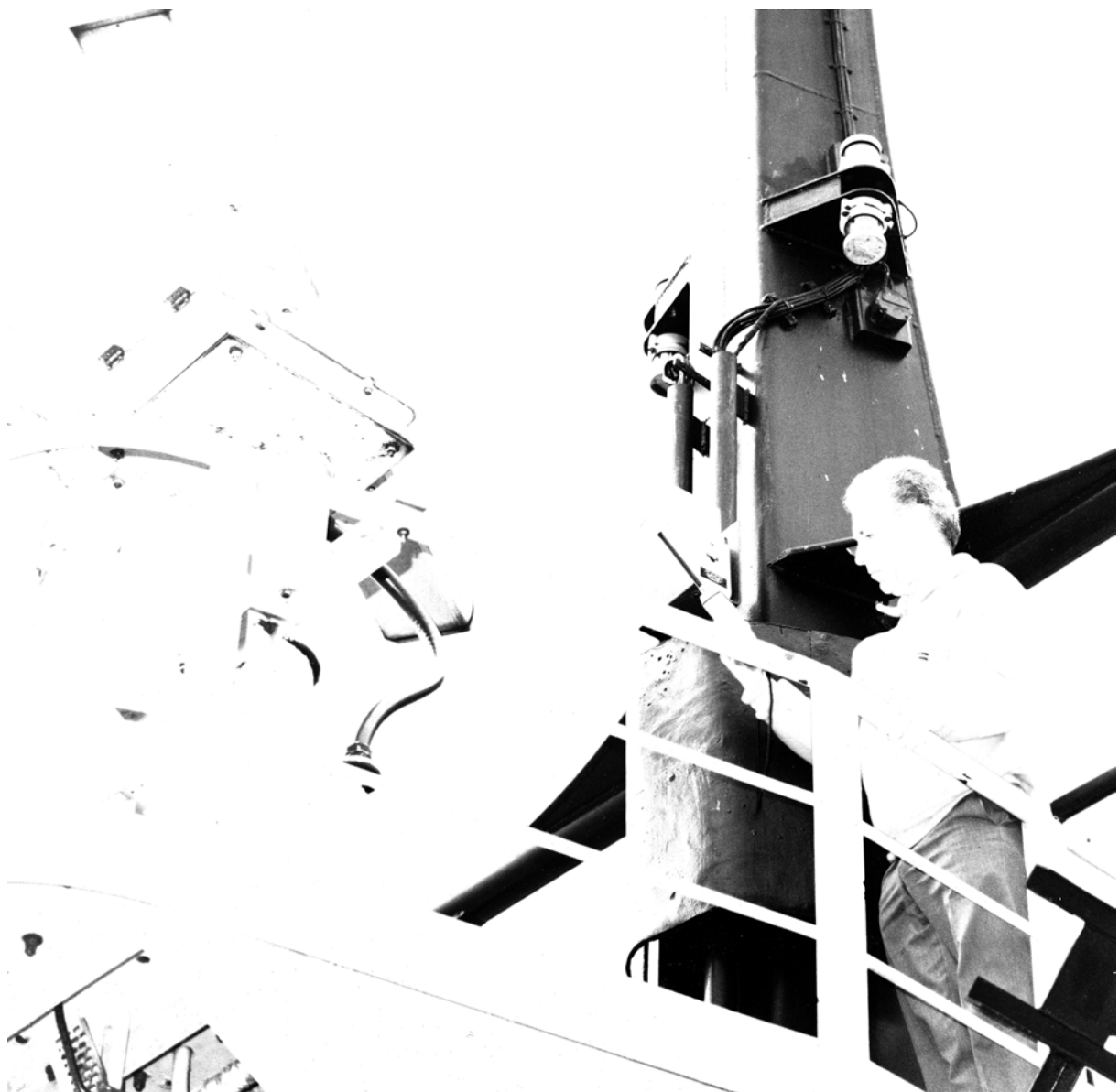


# Technische Applikation 2

Normgerechte Messung nichtionisierender  
elektromagnetischer Strahlung an Radaranlagen



# **Applikation: Normgerechte Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung an Radaranlagen**

## **1 Einleitung**

Die Kontrolle von nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung im Personenschutz erfordert bei komplexen Expositionsbedingungen neben einer entsprechenden messtechnischen Ausrüstung auch spezielles Know-how. Gegenüber voluminösem Equipment bestehend aus Breitbandantenne und Spektrumanalysator bieten handliche leistungsfähige HF-Feldstärkemessgeräte mit isotropen Feldsonden für den Anwender eine erhebliche Vereinfachung und zusätzliche technische Vorteile. So kann das elektromagnetische Feld unabhängig von der Polarisierung und der Strahlungsrichtung ohne nennenswerte Rückwirkungen und Verzerrungen des Feldes abgetastet werden. In einigen Feldsonden sind die frequenzabhängigen Grenzwerte als Bewertungsfilter vor dem Detektor integriert. Mit diesen frequenzgangbewertenden Sonden (Shaped Probes) können die Personenschutzgrenzwerte ohne Kenntnis der Frequenz der Strahlungsquelle kontrolliert werden und das Feldstärkemessgerät zeigt die normgerecht bewertete Belastung direkt prozentual zum Grenzwert an.

Bei pulsförmigen Signalen mit einem extremen Verhältnis zwischen dem kurzzeitigen Spitzenwert und dem Effektivwert, wie sie in der Praxis bei Radaranlagen vorkommen, bleibt eine explizite Betrachtung aus zweierlei Gründen erforderlich. Einerseits verlangen manche Personenschutzstandards bei pulsförmigen Signalen zusätzlich die Kontrolle des Spitzenwertes. Andererseits ist eine genaue Kenntnis des Geräteverhaltens erforderlich, weil sich bei kurzzeitigen Pulssignalen die Trägheit der Geräte bemerkbar macht und außerdem das Detektionsverfahren einen Einfluss auf das Messergebnis gewinnen kann. Für den Anwender der Geräte soll diese Schrift bei Messungen an Radaranlagen wichtige Fragen klären und praktische Hilfestellung geben.

## **2 Personenschutznormen für hochfrequente elektromagnetische Strahlung**

Die relevanten Normen und Richtlinien zum Schutz von Personen in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern sehen grundsätzlich eine Kontrolle der abgeleiteten Personenschutzgrenzwerte vor. Diese Grenzwerte für hochfrequente elektromagnetische Felder sind frequenzabhängig. Sie berücksichtigen eine höhere Absorption im Bereich der Körperresonanz durch niedrigere Grenzwerte für das elektrische und das magnetische Feld. Prinzipiell müssen die elektrischen und die magnetischen Feldkomponenten ohne Anwesenheit von Personen bestimmt werden [6-9]. Weder die elektrische noch die magnetische Feldstärke dürfen die Grenzwerte überschreiten.

Die Messgeräte sollen generell den Effektivwert der Feldstärke, also die Wurzel der mittleren quadrierten Feldstärke (englisch: Root of Mean of Square = RMS), anzeigen. Der Effektivwert darf allgemein bis zu 6 Minuten gemittelt werden, oberhalb von 10 GHz nimmt die maximal erlaubte Mittelungszeit etwas ab. Der Begriff 6 Minuten-Mittelwert steht im folgenden stellvertretend für den Mittelwert über das längste erlaubte Zeitintervall. In der Regel kann der Zeitbedarf für die Messungen deutlich reduziert werden, da bei den meisten in der Praxis vorkommenden Signalen eine Mittelung im Sekundenbereich schon ausreichend ist, um eine dem 6 Minuten-Mittelwert gleichwertige Anzeige zu erhalten. Soll eine Person, die sich im Feld bewegt, z. B. von einem Monitor vor zu hoher Belastung gewarnt werden, dann besteht bei einer 6 Minuten-Mittelung die Gefahr, dass die Warnung zu spät erfolgt.

Bei gepulsten Signalen machen die Personenschutzstandards teilweise Ausnahmen von der Bewertung des Effektivwertes. Nach den ICNIRP-Richtlinien [6] und nach DIN VDE 0848 Teil 2 [8] ist zusätzlich der Spitzenwert des Signals zu kontrollieren. Im Sinne der ICNIRP-Richtlinie wird bei hohen Frequenzen unter dem Spitzenwert der Maximalwert, des über die Pulsbreite gemittelten Effektivwertes, verstanden. Zusätzlich zum über 6 Minuten gemittelten Effektivwert darf dieser Spitzenwert der Feldstärke das 32-fache des Grenzwertes für die Feldstärke (entspricht dem 1000-fachen Grenzwert für die Leistungsflussdichte) nicht überschreiten.

### 3 Normgerechte Messung an Radaranlagen

#### Messungen an stillstehenden Radaranlagen

Bei manchen Radaranwendungen, z. B. bei Messungen an stillstehenden Radaranlagen oder bei der Bestimmung von Leckstellenstrahlung an der Hohlleiterspeisung, ist die Kenntnis des Effektivwertes der Feldstärke zur messtechnischen Beurteilung der Belastung ausreichend. Anders formuliert darf hier die Leistungsflussdichte über mehrere Perioden der niedrigsten Frequenzkomponente des Signals, also über mehrere Perioden der Pulswiederholfrequenz gemittelt werden.

Bei Bewertungen nach ICNIRP [6] oder nach DIN VDE 0848 Teil 2 [8] ist zusätzlich der Spitzenwert des Signals zu kontrollieren. Die über die Pulsbreite gemittelte Leistungsflussdichte darf das 1000-fache des 6 Minuten-Mittelwertes nicht überschreiten. Folglich wird bei Tastverhältnissen kleiner als 1:1000 der Spitzenwert relevant und der durch 32 geteilte Spitzenwert der Feldstärke darf den abgeleiteten Grenzwert nicht überschreiten. Ist das Tastverhältnis bekannt, dann kann der Spitzenwert aus dem Effektivwert berechnet werden. Um das Resultat einer Effektivwertmessung auf den relevanten Grenzwert nach ICNIRP bzw. DIN VDE 0848 zu beziehen, müssen die Messwerte der Effektivfeldstärke  $E_{rms}$  für Tastverhältnisse kleiner 1:1000 mit dem Faktor

$$\frac{E_{peak}/32}{E_{rms}} = \sqrt{\frac{S_{peak}/1000}{S_{rms}}} = \frac{1}{\sqrt{Duty\ cycle \cdot 1000}} \quad (1)$$

bewertet werden. Das Tastverhältnis *Duty cycle* berechnet sich aus der Pulsbreite *PW* (pulse width) und der Pulswiederholfrequenz *PRF* (pulse repetition frequency) zu

$$Duty\ cycle = PW \cdot PRF \quad (2)$$

Bei Tastverhältnissen größer als 1:1000 bleibt der Effektivwert relevant, da der durch 32 dividierte Spitzenwert der Feldstärke kleiner ist als der Effektivwert.

#### Messungen im Scan-Betrieb

Im Scan-Betrieb des Radars ist die Exposition der gepulsten Signale nur in einem Bruchteil der Zeit vorhanden. Die empfangen Signale sind zweifach gepulst. Nach ICNIRP bzw. DIN VDE 0848 darf die über die Pulsbreite gemittelte Leistungsflussdichte das 1000-fache des 6 Minuten-Mittelwertes nicht überschreiten. An praktisch allen Radaranlagen ist dann der Spitzenwert relevant (auch bei Tastverhältnissen größer als 1:1000). Andere Normen machen keine klaren Aussagen über die Belastung durch gepulste Signale. Aus Gründen der Vorsorge ist es jedoch ratsam, auch in diesen Fällen die Belastung durch das potentiell stillstehende Radar und den sich dabei ergebenden Effektivwert zu kontrollieren.

### 4 Einflussfaktoren des Messgerätes

#### Trägheit des Messinstrumentes

Bei Messungen im Scan-Betrieb ergibt sich am Feldstärkemessgerät eine schwankende Anzeige. Infolge der Trägheit des Gerätes kann vielfach die Anzeige während des kurzzeitigen Auftreffens des Radarstrahls nicht einschwingen. Zum Erfassen des maximalen Anzeigewertes während des Scans ist die Auswertart MAX bzw. MAX HOLD hilfreich. Hierbei wird der größte Messwert seit dem Aktivieren bzw. Reset der Funktion angezeigt. In der Praxis ist es sinnvoll, in der Betriebsart MAX [HOLD] einige Scans des Radars abzuwarten.

Mit Kenntnis der Integrationszeit des Messgerätesystems, welche dessen Trägheit charakterisiert und der Verweildauer des Signals (time on target) kann dann aus dem Anzeigewert in der Betriebsart MAX [HOLD] der Effektivwert beim stillstehenden Radar berechnet werden. Solange die Verweildauer deutlich größer als die Integrationszeit des Messgeräts ist, sind keine zusätzlichen Abweichungen zu erwarten. Ist jedoch die Verweildauer viel kleiner als die Integrationszeit, so führt dies zu einer

Unterbewertung der Anzeige. In diesem Fall kann eine Anzeigekorrektur für die Leistungsflussdichte aus dem Verhältnis von äquivalenter Integrationszeit zur äquivalenten Verweildauer abgeleitet werden.

Die zu berücksichtigende Dämpfung in dB berechnet sich zu

$$a = 5 \cdot \log_{10} \left( 1 + \left( \frac{t_{\text{int}}}{t_{oT}} \right)^2 \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

Beim rotierenden Radar kann die Verweildauer  $t_{oT}$  aus der Rotationszeit und dem Abstrahlwinkel der Antenne abgeschätzt werden:

$$t_{oT} = \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} \cdot t_{\text{rot}} \quad (4)$$

Im Nahfeld einer Antenne jedoch ist die Verweildauer des Signals bedeutend größer, weil diese hier durch die Geometrie (Öffnungsbreite  $a_{\text{hor}}$  der Antenne) und den Betrachtungsabstand  $r$  bestimmt wird:

$$t_{oT} = \frac{\Delta\alpha}{360^\circ} \cdot t_{\text{rot}} = \frac{\arcsin\left(\frac{a_{\text{hor}}}{2r}\right)}{180^\circ} \cdot t_{\text{rot}} \quad (5)$$

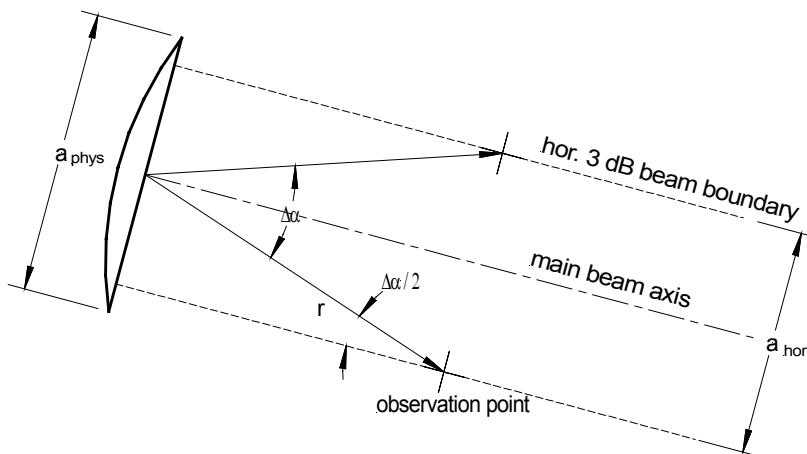


Bild 1: Betrachtung im Nahfeld der Antenne

Es bedeuten

- $t_{\text{int}}$  Pulsintegrationszeit des Messgerätes
- $t_{oT}$  Verweildauer des Signals (time on target)
- $t_{\text{rot}}$  Zeit pro Umdrehung des Radars
- $\Delta\varphi$  Abstrahlwinkel der Antenne (3 dB Sektorbreite)
- $a_{\text{hor}}$  horizontale Breite der Antennen-Öffnung
- $r$  Betrachtungsabstand.

Für den Abstrahlwinkel  $\Delta\varphi$  ist hier ein flächengleiches Rechteck der Leistungsflussdichte relevant, mit guter Näherung kann mit der Halbwertsbreite des Strahles (-3 dB) gerechnet werden.

Einige Standards (ICNIRP bzw. DIN VDE 0848) verlangen die Kontrolle des Spitzenwertes. Für ein bekanntes Tastverhältnis kann der Spitzenwert wiederum aus dem Effektivwert berechnet werden und eine zusätzliche Korrektur ist mit Gl. (1) wie beim stillstehenden Radar zu berücksichtigen.

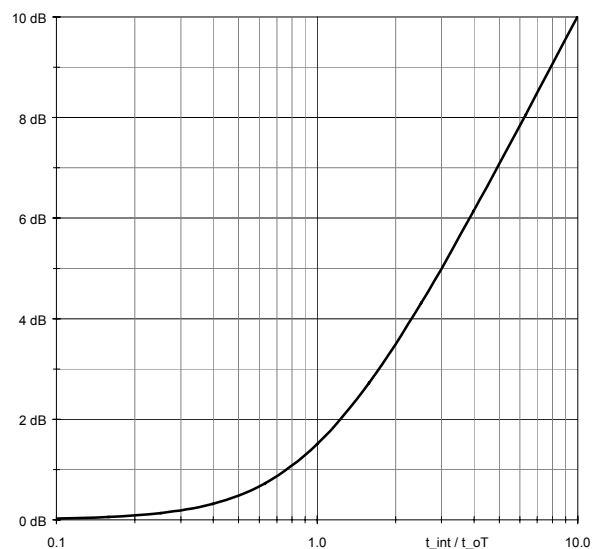


Bild 2: Dämpfung bei rotierendem Radar durch die Trägheit des Messgerätes

sichtigen.

### **Thermoelement-Sonden**

In diesen Feldsonden basiert die Signaldetektion auf der Erwärmung von Thermoelementen und Auswertung der thermoelektrischen Potentialdifferenz. In den Thermoelementen wird der Mittelwert der von der Sonde aufgenommenen Leistung gebildet. Daher bilden Thermoelement-Sonden unabhängig von der Signalform, selbst für stark gepulste Radarsignale, in praktisch idealer Weise den Effektivwert. Bei Effektivwertmessungen an stillstehenden Radaranlagen ist also keine Korrektur notwendig.

Die Messdynamik von Thermoelement-Sonden ist auf etwa 30 dB bis 40 dB begrenzt. Reicht ihre Empfindlichkeit bei geringen Feldstärken nicht mehr aus, dann können Feldsonden mit Diodengleichrichter eingesetzt werden, da sie allgemein eine höhere Empfindlichkeit aufweisen.

### **Feldsonden mit Diodengleichrichter**

Gegenüber Thermoelement-Sonden weichen E-Sonden mit Detektordioden jedoch von einem idealen Effektivwertmesser ab, weil der Diodengleichrichter nur bei kleinen Signalen mit guter Näherung den Effektivwert bildet. Bei hoher Aussteuerung verhält sich ein Diodendetektor nicht mehr wie ein idealer Effektivwertgleichrichter und die Signalform der Feldquelle hat einen Einfluss auf das Messergebnis. Beispielsweise wird das Verhalten bei multifrequenten oder modulierten Signalen in [1] sehr detailliert beschrieben. Bei den frequenzgangbewertenden Sonden (EMR Shaped Probes bzw. ESM-20) wurde durch das spezielle Sensordesign dafür gesorgt, dass die Detektordioden im interessierenden Dynamikbereich nur gering angesteuert werden. Auf diese Weise bleiben die Abweichungen vom Effektivwertgleichrichter bei vielen Signalen, wie sie im Rundfunk und in der Telekommunikation vorkommen, vernachlässigbar.

Bei gepulsten Signalen mit hohen Crestfaktoren, also mit einem extremen Verhältnis zwischen dem kurzzeitigen Spitzenwert und dem Effektivwert, sind jedoch bei höheren Feldstärken signifikante Abweichungen vom echten Effektivwert zu erwarten. Dabei können je nach Pulswiederholfrequenz höhere oder niedrigere Werte als der Effektivwert angezeigt werden. Verschiedene E-Feldsonden wurden messtechnisch für zahlreiche Radarsignal-Parameter untersucht und dabei das Parameternetz aus Pulswiederholfrequenz und Tastverhältnis so gewählt, dass die praktisch relevanten Radarapplikationen enthalten sind. Die Ergebnisse sind für drei verschiedene Tastverhältnisse zwischen 1:316 und 1:3162 sowie Pulswiederholfrequenzen (PRF) zwischen 316 Hz und 3,16 kHz im Anhang 1 zu finden.

## 5 Auswahlhilfe der Feldsonde

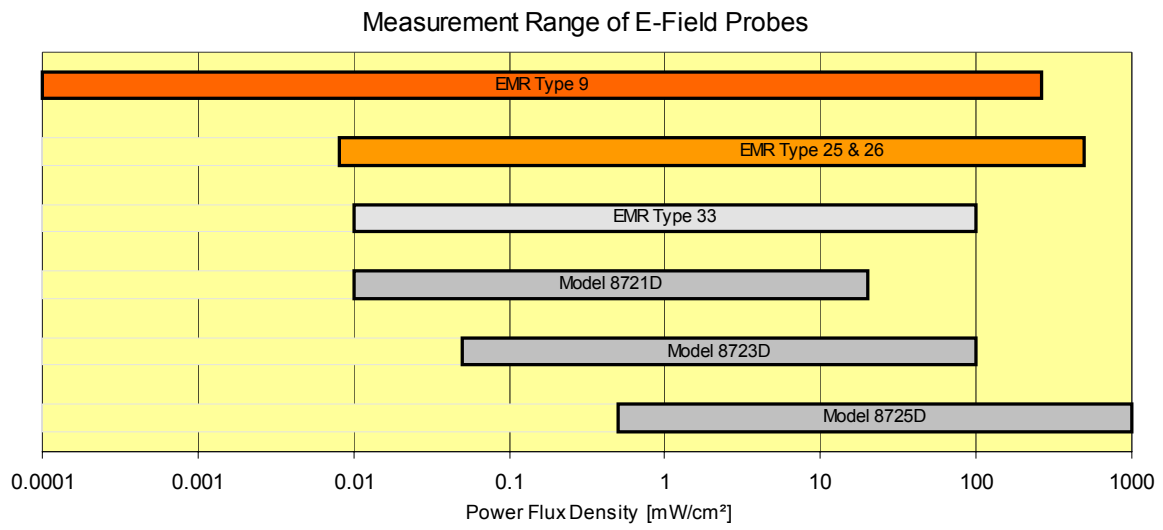


Bild 3: Dynamikbereich von Thermoelement- und Dioden-Sonden

Bild 3 gibt einen Überblick über den Dynamikbereich verschiedener E-Feldsonden im Frequenzbereich ab 2 GHz. Bei mittlerer bis hoher Belastung bieten die Thermoelement-Sonden den Vorteil einer idealen Effektivwertmessung. Der Dynamikbereich beträgt typisch 33 dB bei den Modellen 8721D bis 8725D und 40 dB bei der neuen EMR Thermoelement-Sonde Typ 33.

Bei einem typischen Radarsignal (Rotationszeit 5 s, Abstrahlwinkel  $1,8^\circ$ ) liegt die äquivalente Verweildauer im Scan-Betrieb bei etwa 25 ms. Mit der äquivalenten Systemintegrationszeit der Strahlungsmessgeräte 8712, 8715 oder 8718B in Kombination mit einer Thermoelement-Sonde (411 ms bis 655 ms je nach Sonde) ergibt sich für die Systemträgheit eine Korrektur zwischen 12,2 dB und 14,2 dB. Dies ist bereits eine erhebliche Dämpfung, welche die Messempfindlichkeit und die Dynamik beschränkt. Die Sonde ist deshalb für die jeweilige Anwendung passend zu wählen, wobei ihr reduzierter Dynamikbereich sowie auch die maximal zulässige Spitzenbelastung während der Pulsdauer zu berücksichtigen sind.

Die EMR-Feldstärkemessgeräte weisen, unabhängig von der verwendeten Sonde, eine Pulsintegrationszeit von 307 ms auf. Zusammen mit der empfindlichen Dioden-Sonde Typ 9 mit flachem Frequenzgang ergeben sich auf Grund ihrer hohen Empfindlichkeit Vorteile gegenüber Thermoelement-Sonden. Bei kleinen Feldstärken kann auch hier auf eine Korrektur des Effektivwertverhaltens verzichtet werden. Bei größeren Feldstärken sind „true RMS“-Abweichungen zu erwarten, wobei bei Signalen mit hohem Crestfaktor die Tendenz zu einer Unterbewertung besteht. Mit Hilfe der Kurven im Anhang 1 (Bild A1 bis A3) ist eine Korrektur der Messwerte möglich. Für sehr hohe Feldstärken sind keine Korrekturwerte mehr verfügbar, weil sich die Detektordioden schon nahe ihrer bauartbedingten Begrenzung befinden.

Mit den frequenzgangbewertenden E-Sonden Typ 25 und Typ 26 (EMR Shaped Probes) können die abgeleiteten Personenschutzgrenzwerte auch ohne Kenntnis der Signalfrequenz der Quelle kontrolliert werden. Selbst multifrequente Signale werden gleichermaßen richtig bewertet. Durch das spezielle Design bleiben die Abweichungen vom echten Effektivwert auch bei pulsförmigen Signalen relativ gering. Mit Hilfe der Kurven im Anhang 1 ist auch hier eine Korrektur der Messwerte möglich, aber nicht immer notwendig.

Die E-Feld-Sonde Typ 25 für den Standard FCC 96-326, occupational [7] zeigt lediglich bei der niedrigen Pulswiederholfrequenz von 316 Hz eine nennenswerte Unterbewertung (Bild A7 bis A12). Bei höheren Pulswiederholfrequenzen ergibt sich dagegen die Tendenz, dass etwas höhere Werte als der Effektivwert angezeigt werden. Die E-Sonde Typ 26 für die Standards ICNIRP [6] bzw. DIN VDE 0848 [8] zeigt ein ähnliches, jedoch noch etwas ausgeglicheneres RMS-Verhalten (Bild A13 bis A18). Die RMS-Abweichungen bleiben bis zum Grenzwert im wesentlichen innerhalb  $\pm 3$  dB und können bei vielen Anwendungen vernachlässigt werden.

Mit dem Strahlungsmonitor ESM-20 kann die elektrische und die magnetische Feldstärke im Frequenzbereich von 1 MHz bis 40 GHz (bzw. 1 GHz) gleichzeitig kontrolliert werden. In diesem Gerät sind zwei isotrope Sensoren mit Frequenzgangbewertung integriert. Das genaue RMS-Verhalten für stillstehendes Radar ist Bild A19 bis A24 für zwei der verfügbaren Standards dargestellt. Die Geräte für den europäischen Standard CENELEC ENV 50166-2, für ICNIRP 1998 und für Canada Safety Code 6, 1993 zeigen gleiches RMS-Verhalten wie der Standard DIN VDE 0848. Monitore für den japanischen RCR Standard 38 und für die ÖNORM S 1120 verhalten sich identisch zum Standard FCC 96-326. Die Abweichungen zum Effektivwert sind durchweg sehr gering. Bei kleinem Tastverhältnis besteht die Tendenz zu einer leichten Überbewertung des Effektivwertes. Dies ist jedoch bei DIN VDE 0848 und ICNIRP durchaus erwünscht.

Gegenüber den frequenzgangbewertenden E-Sonden für die EMR-200/300 Familie bietet der Monitor ESM-20 den zusätzlichen Vorteil einer schnellen Signalauswertung (Integrationszeit 30 ms). Er zeigt damit auch im Scan-Betrieb keine nennenswerte Trägheit. Praktisch ist also weder beim stillstehenden noch beim rotierenden Radar eine Korrektur der Messabweichungen notwendig. Dies ist besonders vorteilhaft, weil der Monitor ESM-20 auch ungeschultes Personal vor zu hoher Belastung warnen soll.

## 6 Zusammenfassung

In dieser Schrift wurde gezeigt, wie richtlinienkonforme Messungen an Radaranlagen durchzuführen sind. Für verschiedene Strahlungsmessgeräte mit isotropen Feldsonden und den Strahlungsmonitor ESM-20 wurde das Verhalten bei gepulsten Signalen, wie sie beim Radar vorkommen, beschrieben. Dabei sind die Messabweichungen häufig nicht mehr zu vernachlässigen, sie können jedoch berücksichtigt werden, wenn die Parameter der Radaranlage bekannt sind oder grob abgeschätzt werden können. Je nach Anwendung bieten entweder Thermoelement-Sonden als echte Effektivwertmesser, empfindliche Sonden mit Diodendetektion oder auch frequenzgangbewertende Sonden Vorteile. Mit dem Monitor ESM-20 wird die Exposition an üblichen Radaranlagen auch im Scan-Betrieb selbst ohne Korrektur der Messabweichungen im Bereich weniger Dezibel richtig bewertet.

## Literaturverzeichnis

- [1] Keller, H.: Normgerechte Personenschutzmessungen im HF- und Mikrowellenbereich. Applikationsschrift, Wandel&Goltermann, 1996.
- [2] Bitzer, R.; Keller, H.: Fortschrittliche Technik zur einfachen normgerechten Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung. Jahrestagung NIR 99, Fachverband für Strahlenschutz in Köln, 27. 09. - 1. 10. 1999.
- [3] Bitzer, R.; Keller, H.; Scholmann, J.: Normgerechtes Messen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung leicht gemacht. EMV-Symposium 13.-15. Sept. 1999 an der BAKWVT in Mannheim.
- [4] Bitzer, R.; Keller, H.; Schallner, M.: Feldstärkemeßsystem bis 18 GHz. EMV-Symposium 12.-14. Mai 1997 an der BAKWVT in Mannheim.
- [5] Keller, H.; Bitzer, R.: Technische Problemlösungen bei der Entwicklung von Messgeräten für nichtionisierende Strahlung. EMV-Symposium 4.-6.10.1995 an der BAKWVT Mannheim.
- [6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics, Vol. 74, No.4, pp. 494-522, April 1998.
- [7] Federal Communications Commission (FCC 96-326). Guidelines for Evaluating the Environmental Effects of Radiofrequency Radiation. Washington, D.C., August 1996.
- [8] DIN VDE 0848 Teil 2, Entwurf Oktober 1991, Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz.
- [9] Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) vom 16. Dezember 1996. Bundesgesetzblatt Jahrgang 1996 Teil I Nr. 66, Bonn am 20. Dezember 1996.
- [10] Datenblätter EMR-200/300 und Feld-Sonden Typ 8, 9, 10, 25 etc., Wandel&Goltermann, 1999.

## Anhang 1: Effektivwertverhalten von E-Sonden mit Diodengleichrichter bei gepulsten Signalen

Zu Charakterisierung wurden verschiedenen E-Feldsonden mit Diodendetektion meßtechnisch untersucht und die Abweichung vom Effektivwert für gepulste Signale ermittelt. Die Ergebnisse sind für jeweils drei verschiedene Tastverhältnisse zwischen 1:316 und 1:3162 sowie Pulswiederholfrequenzen (PRF) zwischen 316 Hz und 3,16 kHz auf den folgenden Seiten grafisch dargestellt.

Zur handlichen Auswertung ist in zwei nebeneinander liegenden Diagrammen teilweise die gleiche Information dargestellt. Dabei sind die Kurvenscharen über unterschiedlichen x-Achsen aufgetragen. Die linke Hälfte weist als x-Achse den Anzeigewert auf und ermöglicht eine Korrektur des angezeigten Messwertes. Die rechte Hälfte dagegen dokumentiert das RMS-Verhalten über dem Effektivwert ( $E_{rms}$ ) bzw. über dem relativen Grenzwert (1% bis 1000% bezogen auf die Leistungsflussdichte). Die y-Achse stellt in allen Diagrammen das Verhältnis des Effektivwertes zum Anzeigewert (r.m.s. value / display value) in Dezibel dar. In der logarithmischen Darstellung bedeutet ein positiver Wert von +3,01 dB, dass der auf die Leistungsflussdichte bezogene Anzeigewert (in Prozent) um den Faktor 2 kleiner ist als der Effektivwert. Der angezeigte Feldstärkemesswert wäre damit um den Faktor Wurzel aus 2 kleiner ist die effektive Feldstärke. Umgekehrt steht ein negativer y-Wert von -3,01 dB für eine Überbewertung der Leistungsflussdichte um den Faktor 2.

Praktisch können die Kurven für die in der untenstehenden Tabelle angegebenen Bereiche angewendet werden, welche alle relevanten Radarapplikationen abdecken. Dabei ist die Genauigkeit der Korrekturwerte in der Regel besser als 2 dB. Durch Interpolation zwischen den Kurven können noch genauere Werte abgeschätzt werden.

| Parameter             |                            | Gültigkeitsbereich    |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| Tastverhältnis        | <i>Duty cycle</i> = 1/316  | 1/562 bis 1/177       |
|                       | <i>Duty cycle</i> = 1/1000 | 1/1778 bis 1/562      |
|                       | <i>Duty cycle</i> = 1/3162 | 1/5620 bis 1/1778     |
| Pulswiederholfrequenz | <i>PRF</i> = 316 Hz        | 177 Hz bis 562 Hz     |
|                       | <i>PRF</i> = 1 kHz         | 562 Hz bis 1,78 kHz   |
|                       | <i>PRF</i> = 3,16 kHz      | 1,77 kHz bis 5,62 kHz |

Tabelle A1 Gültigkeitsbereich der Parameter

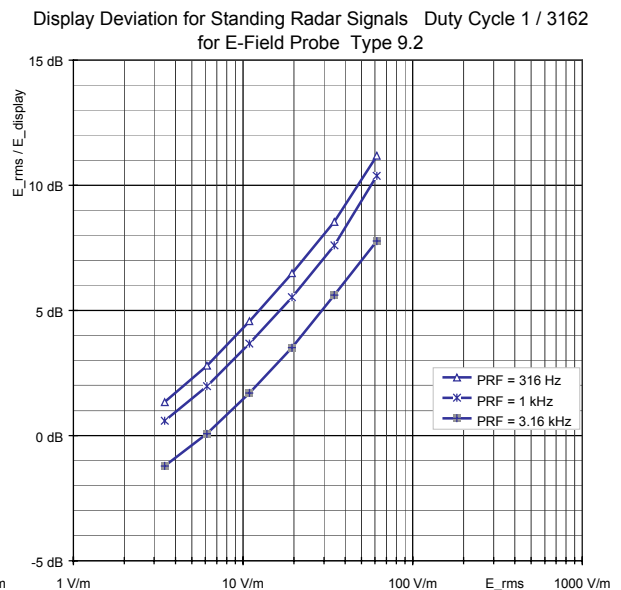
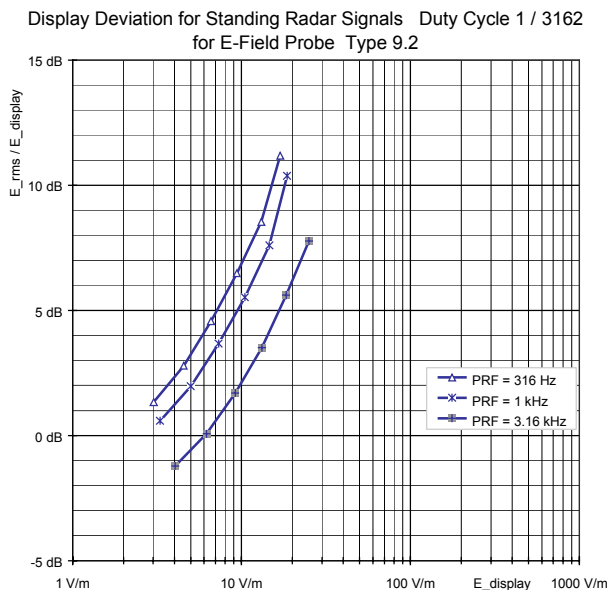
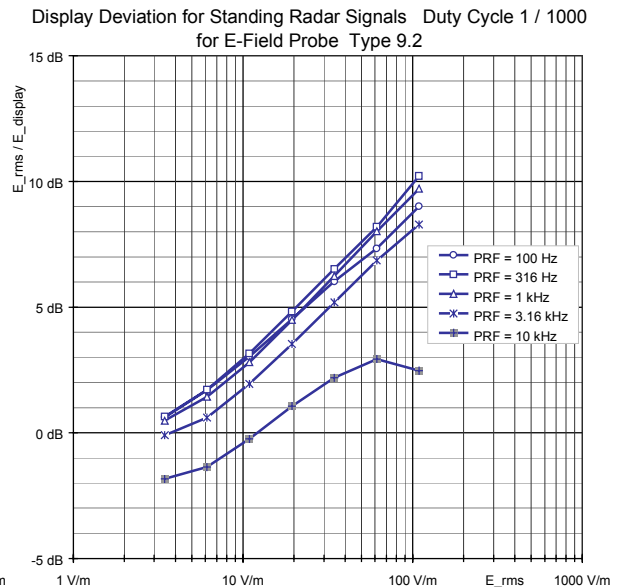
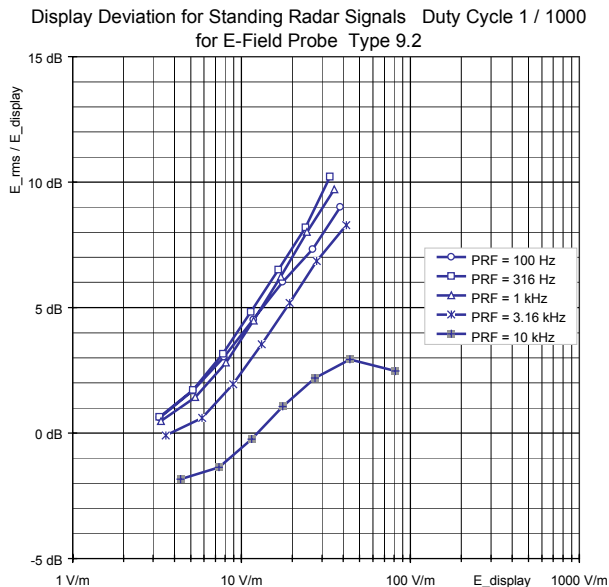
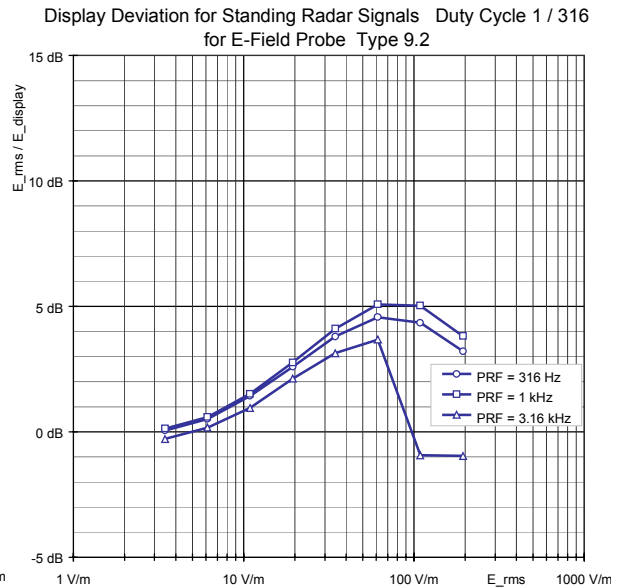
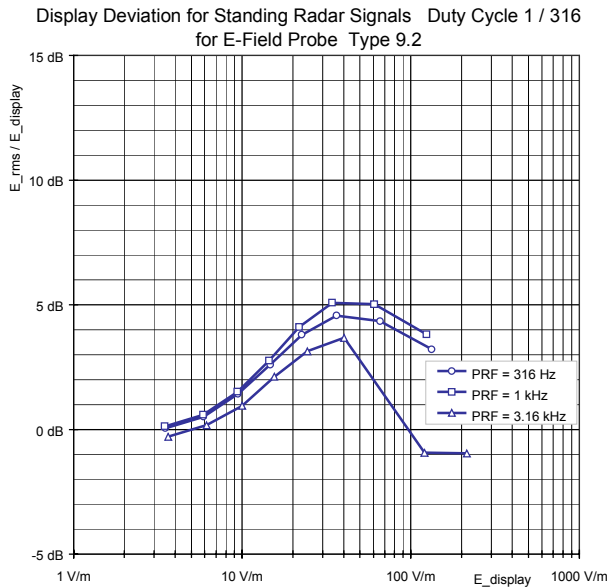


Bild A1-A6: Abweichung des Effektivwertes vom Anzeigewert für E-Sonde Typ 9

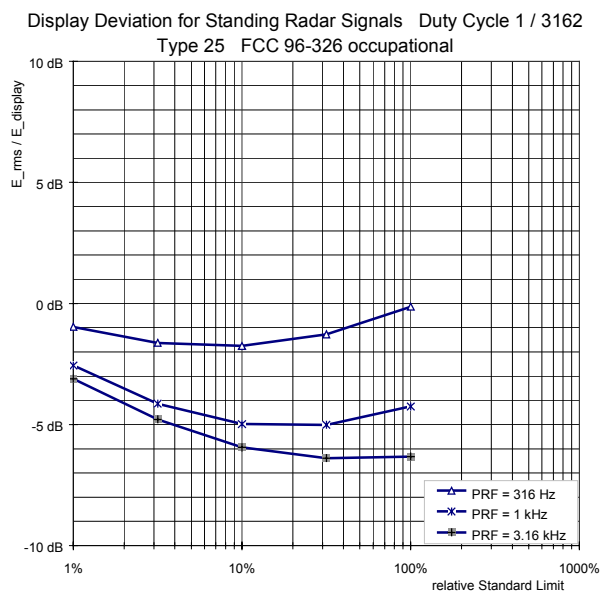
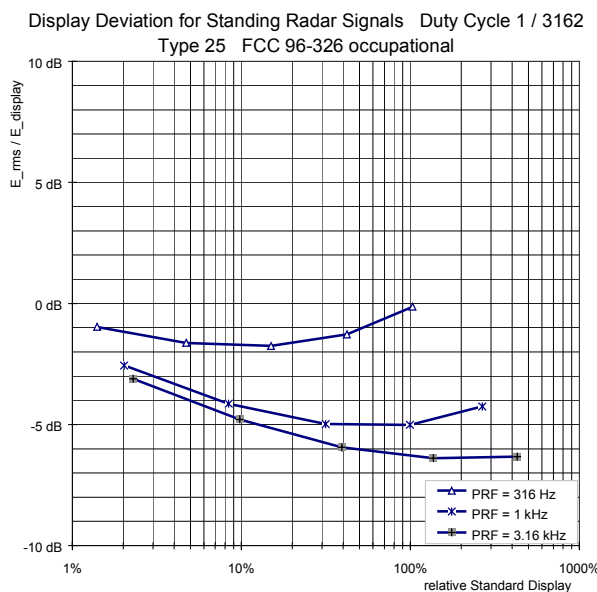
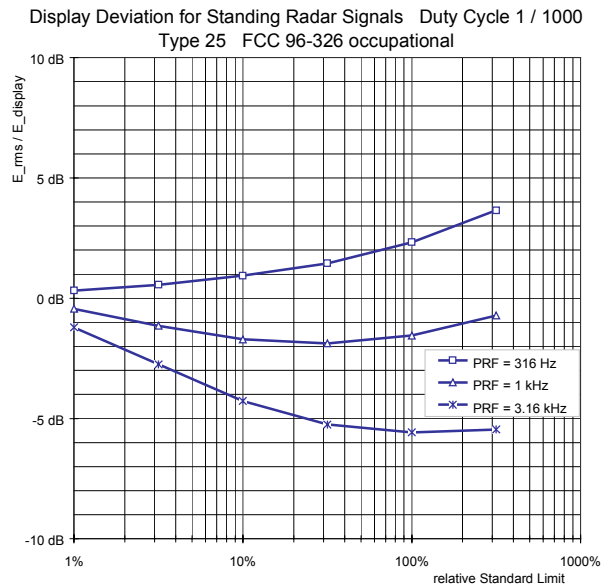
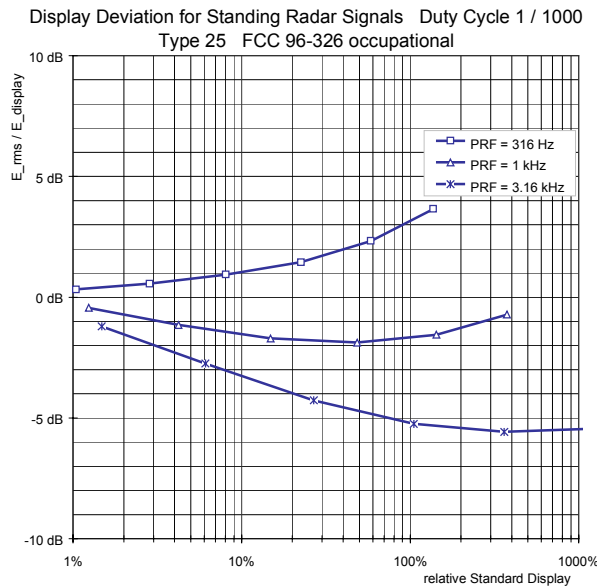
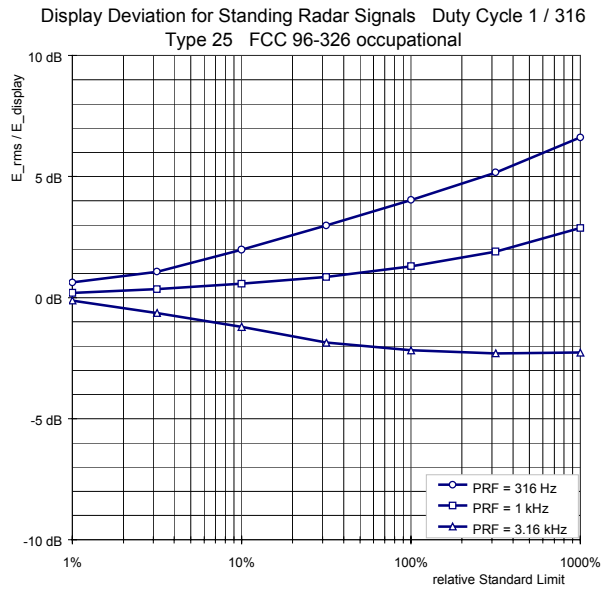
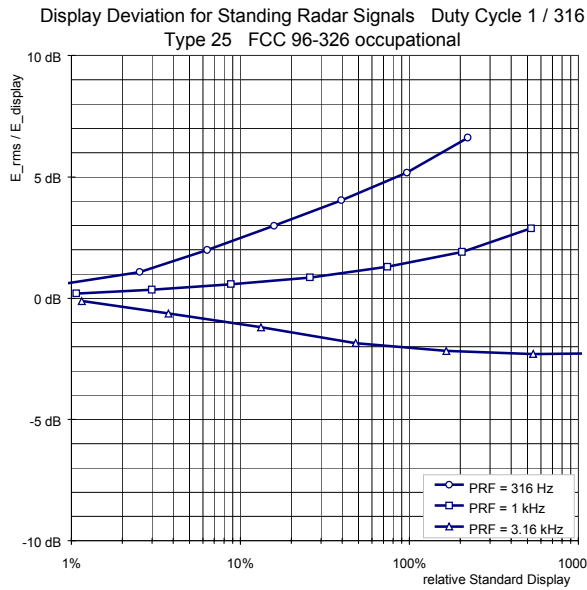


Bild A7-A12: Abweichung des Effektivwertes vom Anzeigewert für Shaped Probe Typ 25

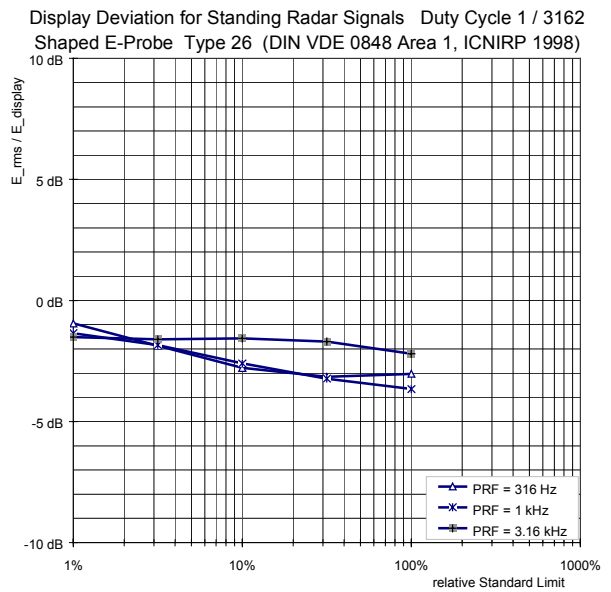
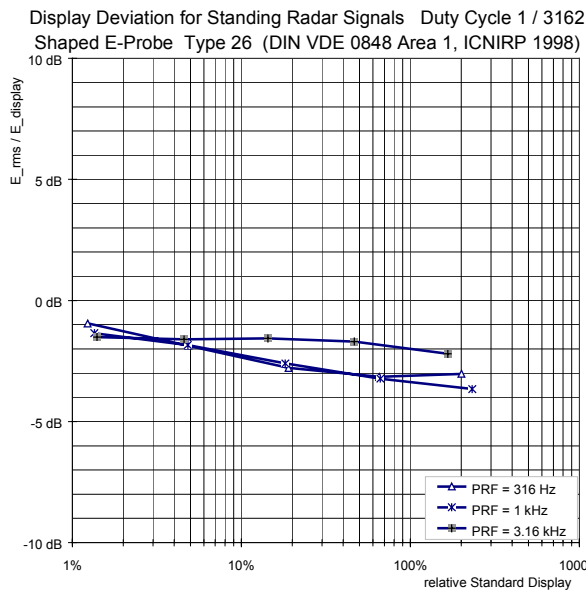
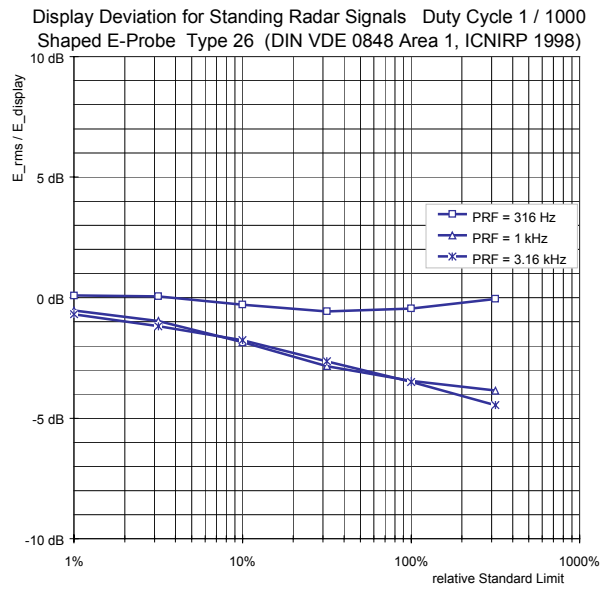
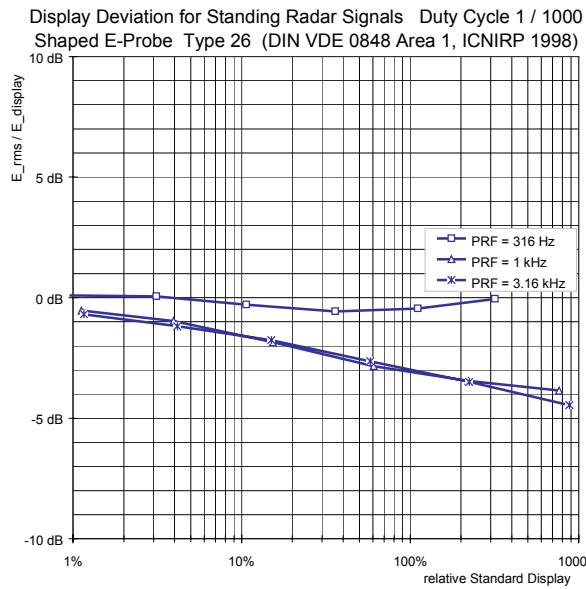
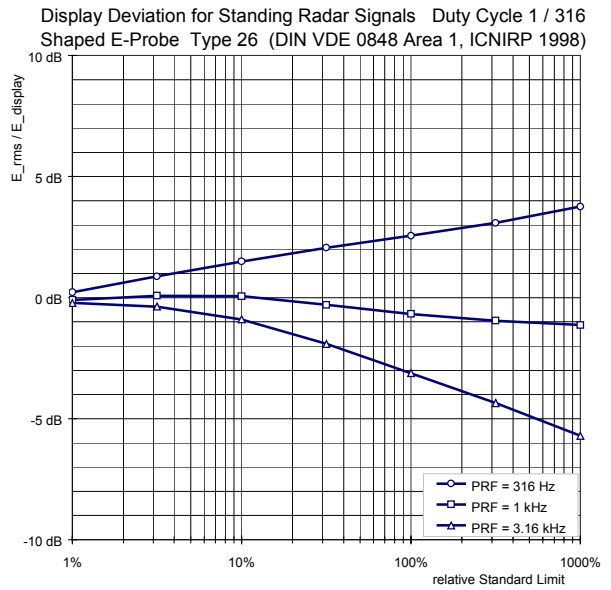
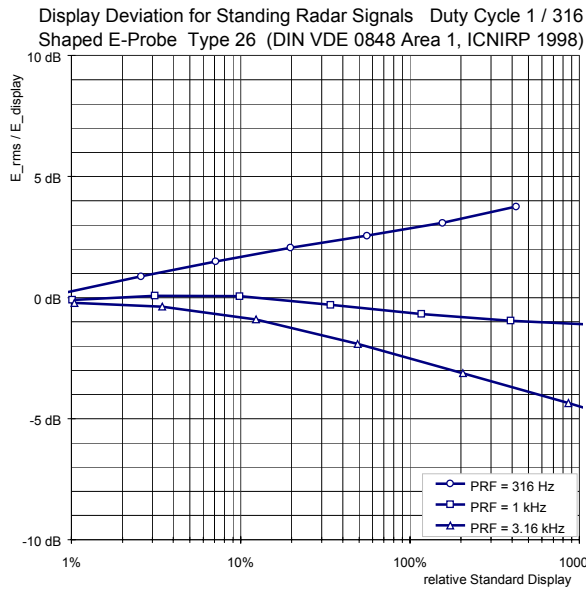
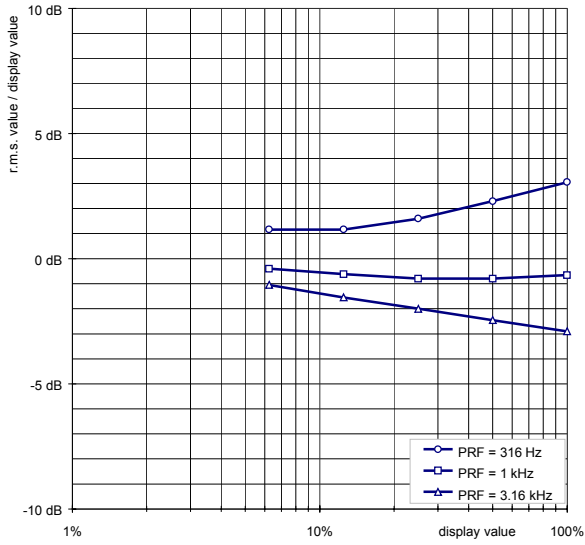
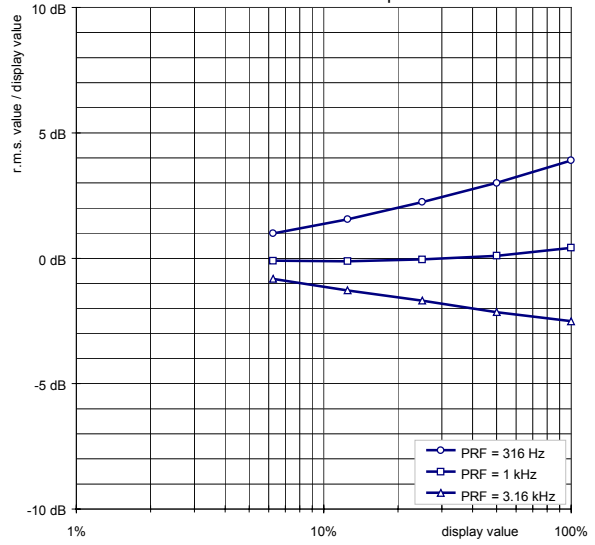


Bild A13-A18: Abweichung des Effektivwertes vom Anzeigewert für Shaped Probe Typ 26

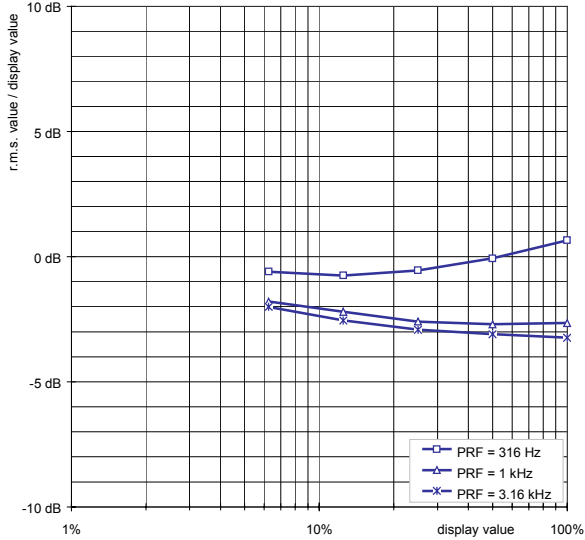
Display Deviation for Standing Radar Signals Duty Cycle 1 / 316  
ESM-20 DIN VDE 0848 Area 1



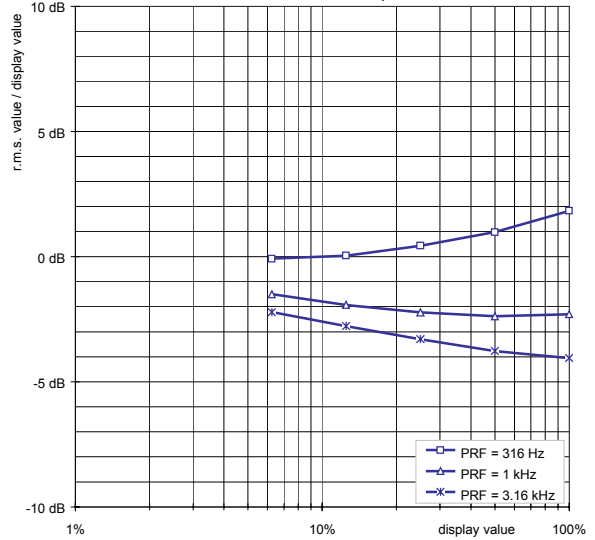
Display Deviation for Standing Radar Signals Duty Cycle 1 / 316  
ESM-20 FCC 96-326 occupational



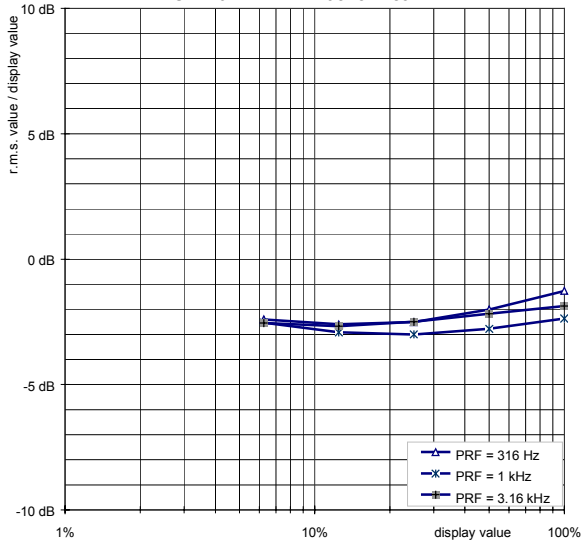
Display Deviation for Standing Radar Signals Duty Cycle 1 / 1000  
ESM-20 DIN VDE 0848 Area 1



Display Deviation for Standing Radar Signals Duty Cycle 1 / 1000  
ESM-20 FCC 96-326 occupational



Display Deviation for Standing Radar Signals Duty Cycle 1 / 3162  
ESM-20 DIN VDE 0848 Area 1



Display Deviation for Standing Radar Signals Duty Cycle 1 / 3162  
ESM-20 FCC 96-326 occupational

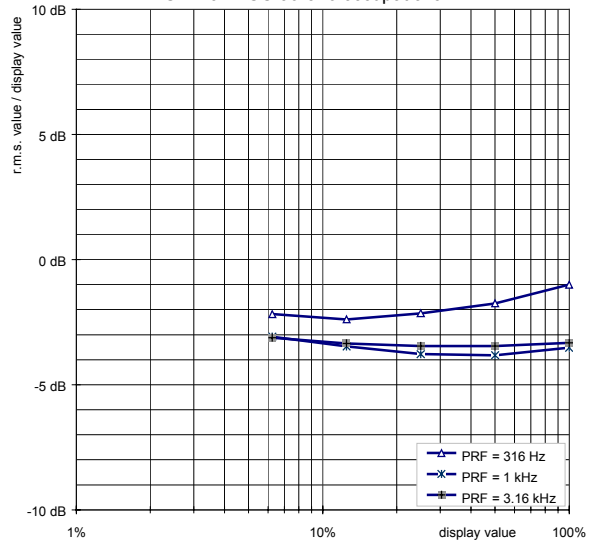
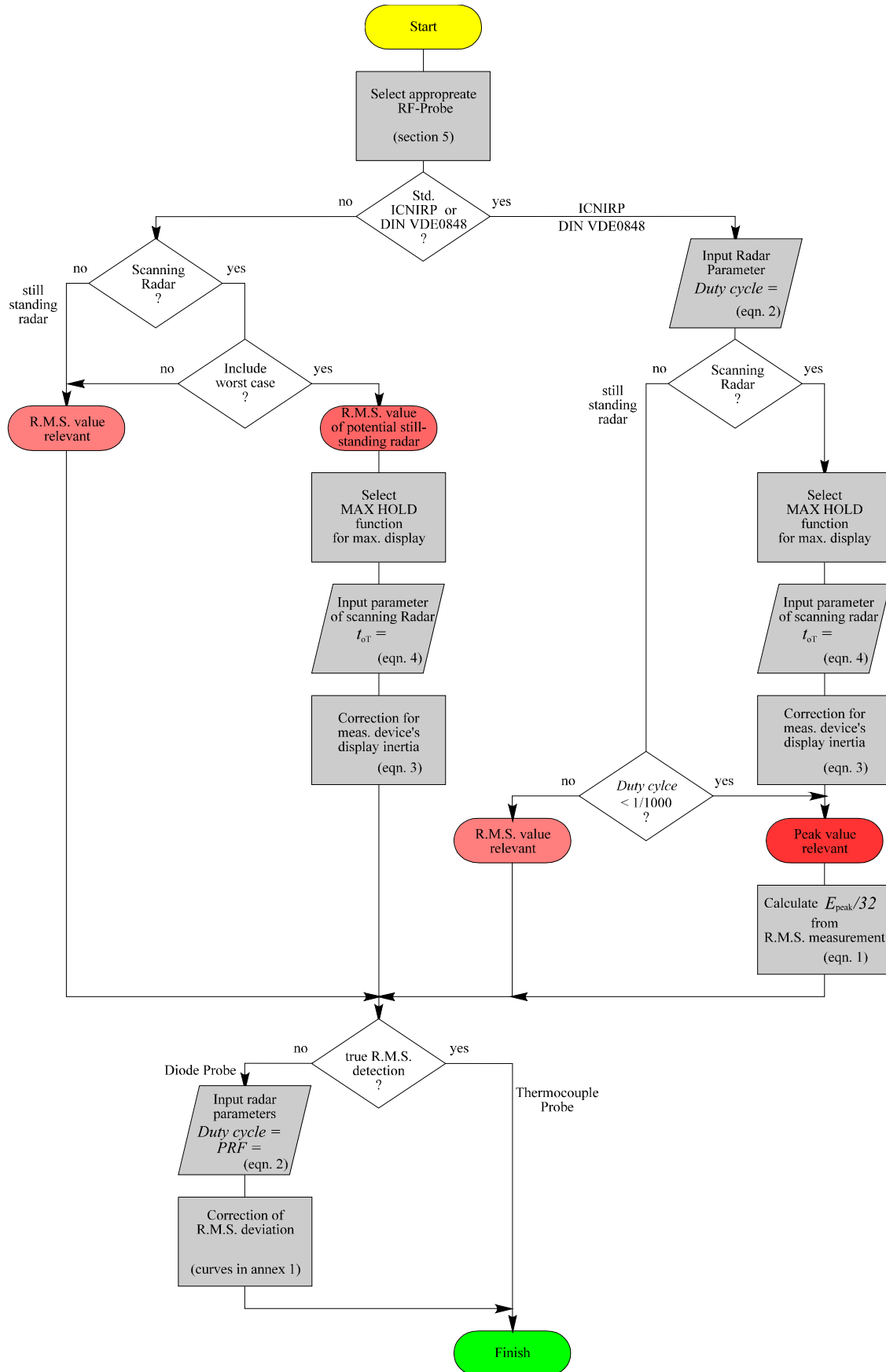


Bild A19-A24: Abweichung des Effektivwertes vom Anzeigewert für Strahlungsmonitor ESM-20

## Anhang 2: Ablaufdiagramm für Messungen an Radaranlagen



### Anhang 3: Beispiel für Anwendung der Korrekturwerte

Ein Beispiel soll abschließend zeigen, wie Messergebnisse mit diesen Erkenntnissen richtig bewertet werden. An einem Bodenradar (Tastverhältnis 1:2000, 2 kHz Pulswiederholfrequenz) soll die Strahlungsbelastung gemäß der ICNIRP Richtlinie bewertet werden. Bei Messung an der Hohlleiterspeisung mit der frequenzgangbewertenden E-Sonde Typ 26 werden am EMR-Gerät 80 % angezeigt und im Strahlungsfeld des rotierenden Radars (6 Umdrehungen/Minute, Abstrahlwinkel 1,8°) ergibt sich ein Anzeigewert von 25 %. Für das Signal wird durch Interpolation der Kurven in Diagramm Bild A14 und A15 beim Anzeigewert von 80 % eine Überbewertung des Effektivwertes von ca. 3 dB abgeschätzt. Nach ICNIRP ist für dieses Signal der Spitzenwert relevant, d. h. die über die Pulsbreite gemittelte Leistungsflussdichte darf das 1000-fache des Grenzwertes nicht überschreiten. Für das Tastverhältnis 1:2000 müssen die Kurven also um

$$\Delta y = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{E_{peak}/32}{E_{rms}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{S_{peak}/1000}{S_{rms}} \right) = -10 \cdot \log_{10} (Duty\ cycle \cdot 1000) = 3 \text{ [dB]}$$

verschoben werden. Dies bedeutet, dass der Anzeigewert von 80 % an der Leckstelle in diesem Fall nicht korrigiert werden muss. Bei Berücksichtigung von Messunsicherheiten z. B. von der Absolut- und der Frequenzgangkalibrierung wird die zulässige Belastung im worst case Fall leicht überschritten.

Für die Beurteilung der Belastung im Scan-Betrieb muss berücksichtigt werden, dass das Signal nur in einem Bruchteil der Zeit von der Sonde erfasst wird und bei der Integration im EMR-Gerät ( $t_{int} = 307 \text{ ms}$ ) bedämpft wird. Aus Diagramm Bild 2 oder Gleichung (3) ergibt sich bei einer Verweildauer von 50 ms eine Unterbewertung um den Faktor 6,2 (7,9 dB). Für den Anzeigewert von 25 % wird aus Bild A14 und A15 eine RMS-Abweichung von ca. -2,5 dB abgeschätzt. Um den Anzeigewert auf den relevanten Grenzwert zu beziehen ist die Anzeige also in der Summe um 3 dB - 2,5 dB + 7,9 dB = 8,4 dB bzw. um den Faktor 6,9 zu korrigieren. Ohne Berücksichtigung der Messunsicherheiten liegt die Belastung in diesem Fall bereits bei 173 %.

Anmerkung zum Rechengang:

$$\begin{aligned} & 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left( \frac{E_{peak}/32}{E_{rms}} \right) + 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left( \frac{E_{rms}}{E_{display}} \right) + 5 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left( 1 + \left( \frac{t_{int}}{t_{oT}} \right)^2 \right) \\ & = 3 \text{ dB} - 2,5 \text{ dB} + 7,9 \text{ dB} = 8,4 \text{ dB} \end{aligned}$$