

Ermittlung der Feldstärke- und Flussdichtewerte - Anforderungen -

DIN VDE 0848 Teil 1 "Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern" gilt für Mess- und Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Sicherheit in elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz. Die folgenden Hinweise sind eine Anleitung zu einem praktischen und einheitlichen Vorgehen. Die Einhaltung der Anforderungen nach der 26. BImSchV kann durch Berechnung, Messung, Herstellerangaben oder Vergleich überprüft werden. Eine Übertragung von Ergebnissen bei vergleichbaren Anlagen ist dann möglich, wenn dies aufgrund von Anlagentyp und Randbedingungen begründbar ist (z. B. bei Standardanlagen).

Die Grundlage für die Ermittlung der Feldstärke nach der 26. BImSchV ist der Entwurf der DIN VDE 0848 Teil 1 (Ausgabe 1995). Der Stand der Technik ist die DIN VDE 0848 Teil 1 (Ausgabe 2000). Diese muss auch von der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) für die Ermittlung der Sicherheitsabstände nach BEMFV zugrunde gelegt werden. Die Unterschiede zwischen den beiden DIN-Norm Ausgaben sind für die Ermittlung der Anforderungen nach der 26. BImSchV unerheblich, da sie zu den gleichen Ergebnissen führen. Deshalb können zur Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen der 26. BImSchV auch Messungen und Rechnungen, welche die Ausgabe 2000 der Norm verwenden, herangezogen werden.

1. Rechnungen

Eine Reihe von Feldern, besonders im Rundfunkbereich und bei Hochspannungsfreileitungen, lassen sich in der Regel mit guter Genauigkeit berechnen. Dies gilt auch für komplexere Strukturen wie Umspannwerke und Ortsnetzstationen, wenn die komplexen Randbedingungen hinreichend bekannt sind.

Bei Berechnungsprogrammen ist die Genauigkeit der Ergebnisse davon abhängig, wie gut Feldquellen und Randbedingungen in diesen Programmen beschrieben sind. Für jedes verwendete Programm und jeden Typ von Feldquelle muss mindestens einmal eine Vergleichsmessung vorgenommen worden sein.

Die Beschreibbarkeit der Anlage durch die Rechnung für den Einzelfall muss bei komplexen Randbedingungen durch stichprobenhafte messtechnische Überprüfung sichergestellt werden. Rechnungen mit ausreichender Genauigkeit sind nur mit den jeweiligen spezifischen Daten des Betreibers der einzelnen Feldquelle durchführbar. Streufelder, wie sie im Arbeitsschutzbereich häufig auftreten, können in der Regel nicht berechnet werden.

Bei der Überlagerung von Feldern verschiedener Quellen (z. B. mehrere Erdkabel in einer Trasse) ist zu beachten, dass eine betragsmäßige Addition der Feldgrößen unrealistisch hohe Werte ergeben kann.

2. Messverfahren

Die Messverfahren zur Erfassung elektromagnetischer Felder lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

- Breitbandmessungen und
- frequenzselektive Messungen.

Entsprechend ergeben sich Unterschiede bei den benötigten Messgeräten, deren Handhabung und Kosten sowie in den erzielbaren Messergebnissen.

2.1 Messungen zur Überprüfung der Grenzwerte

Messungen zur Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten der 26. BImSchV können in der Regel mit kommerziellen Breitbandmessgeräten durchgeführt werden, da diese dafür ein hinreichendes Ansprechvermögen haben. Frequenzselektive Messungen sind ggf. dann durchzuführen, wenn Immissionen unterschiedlicher Frequenzen und/oder Quellen gleichzeitig an einem Messpunkt zu bewerten sind.

2.1.1 Messgeräte

Die Messgeräte müssen den Anforderungen nach DIN VDE 0848 Teil 1 genügen. Die Messgeräte zur Beurteilung dieser Felder müssen je nach Frequenzbereich so eingerichtet sein, dass sie die elektrische Feldstärke E , die magnetische Feldstärke H , die magnetische Flussdichte B oder die Leistungsflussdichte S messen. Die Messunsicherheit der Messgeräte sollte insgesamt $\pm 25\%$ (± 2 dB) (kombinierte Standardunsicherheit: 68 %) nicht überschreiten; Messgeräte für niederfrequente Magnetfelder sollten $\pm 10\%$ Messunsicherheit (kombinierte Standardunsicherheit: 68 %) insgesamt nicht überschreiten.

2.1.2 Vorbereitung und Durchführung von Messungen

Zur Messvorbereitung empfiehlt sich folgende Vorgehensweise:

- Einholen von technischen Angaben über die Feldquellen beim Betreiber (Frequenzen, Generatorleistung, Strahlungseigenschaften, ggf. Modulation, Leiterströme und -spannungen),
- Ermittlung von Expositionsbedingungen und Angaben zu den maßgebenden Immissionsorten,
- Festlegung eines bewertbaren Betriebszustandes bei Anlagen mit wechselnden Betriebsparametern,
- Auswahl von Messverfahren und -geräten entsprechend den technischen Bedingungen,
- Abschätzung der zu erwartenden maximalen Feldstärke oder Leistungsflussdichte vor Beginn der Messungen bzw. vor Inbetriebnahme einer Anlage,
- Messung, Protokollierung und Auswertung.

Die Messungen sind bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; anderenfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen.

Gemessen wird grundsätzlich ohne eine mögliche Beeinflussung durch die Anwesenheit von Personen. Die Beurteilung der Messergebnisse erfolgt auf der Basis der gemessenen maximalen Werte der Feldstärke oder Leistungsflussdichte am Messort.

Die das Messgerät bedienende Person hat darauf zu achten, dass sie sich während der Messung nicht zwischen Feldquelle und Feldsonde bzw. Messantenne befindet und sich alle nicht mit der Messung beauftragten Personen aus dem Bereich des Messortes entfernen.

Feldsonden mit isotroper Empfangscharakteristik, die durch eine orthogonale Anordnung von drei Messwertaufnehmern/Detektorkombinationen im Sondenkopf erzielt wird, liefern einen von Einfallrichtung und Polarisation des zu messenden Feldes weitgehend unabhängigen Messwert und sind Feldsonden mit Richtcharakteristik vorzuziehen.

Feldsonden mit nur einem Messwertaufnehmer/einer Detektorkombination oder Messantennen weisen eine Richtcharakteristik auf und erfordern eine Orientierung der Sonde bzw. Antenne im Feld auf Maximumanzeige am Messgerät. Dieser Maximalwert entspricht in vielen Fällen praktisch der Ersatzfeldstärke nach DIN VDE 0848 Teil 1 (Wenn der Quotient zwischen dem maximalen und minimalen Messwert größer 3 ist, ist ein Fehler in der Größenordnung von 0,5 dB zu erwarten.). Bei bestimmten Feldkonfigurationen, z. B. 50-Hz-Drehstromfelder, ist zur exakten Bestimmung der Ersatzfeldstärke die Sonde nacheinander in x-, y- und z-Richtung auszurichten und aus den Einzelmesswerten die Ersatzfeldstärke zu berechnen.

Treten am Messort gleichzeitig Felder von mehr als einer Feldquelle auf, ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Sind die Grenzwerte im zu untersuchenden Frequenzbereich gleich, so können die resultierenden Feldstärken mit breitbandigen Messeinrichtungen direkt gemessen werden.
- Arbeiten die Feldquellen in Frequenzbereichen mit unterschiedlichen Grenzwerten, so darf mit breitbandigen Geräten nur bei Einzelbetrieb der Feldquellen gemessen werden, anderenfalls

sind frequenzselektive Messsysteme einzusetzen, oder es ist der niedrigste im Frequenzbereich vorkommende Grenzwert zur Bewertung heranzuziehen.

- Bei Verwendung von Feldsonden oder Messantennen mit ausgeprägter Richtcharakteristik sollte die Messung durch Abtastung des Raumes in Schritten mit dem Öffnungswinkel der Antenne und Berücksichtigung der Polarisierung mit anschließender Berechnung der Feldstärke (Raumintegral) durchgeführt werden.

2.1.3 Besonderheiten in einzelnen Frequenzbereichen

a) Niederfrequenzbereich

Bei zeitabhängiger Richtung der Feldvektoren, z. B. Drehfelder von dreiphasigen Leiteranordnungen, ist die mit eindimensionalen Messwertaufnehmern (Feldsonden mit Richtcharakteristik) gemessene maximale Feldstärke immer kleiner als die Ersatzfeldstärke. In diesem Fall muss in drei orthogonalen Achsen gemessen und aus den Einzelmesswerten die Ersatzfeldstärke berechnet werden.

Es ist bei der Messung der elektrischen Feldstärke besonders darauf zu achten, dass die Messergebnisse nicht durch die feldverzerrende Wirkung von Personen oder Gegenständen, z. B. Messleitungen, leicht veränderliche Bodenstrukturen und leichtveränderlicher Bewuchs, unzulässig hoch beeinflusst werden. Objekte, die bei Messungen eine unveränderliche Abschirmung hervorrufen (Bäume, Büsche), müssen berücksichtigt und im Messprotokoll dargestellt werden. Deshalb werden die Geräte zur Messung der elektrischen Feldstärke entweder an einer Isolierstange ins Feld gehalten oder das Messgerät befindet sich auf einem Stativ, und die Messwertübertragung erfolgt über einen Lichtwellenleiter zu einem abgesetzten Anzeigeteil. Auf diesbezügliche Angaben des Geräteherstellers ist zu achten.

Bei inhomogenen elektrischen Feldern sind Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Ersatzfeldstärke (DIN VDE 0848 Teil 1) über die Messung des Gesamtkörperableitstroms zugelassen, wenn der dabei entstehende Fehler bekannt ist.

Bei inhomogenen magnetischen Feldern dürfen die maximalen Feldstärken, arithmetisch gemittelt über eine kreisförmige Fläche von 100 cm², den zulässigen Wert nicht überschreiten. Bei Messungen ist ein Abstand von 20 cm zwischen Mittelpunkt des Messwertaufnehmers und Wänden, Absperungen u. ä. einzuhalten.

Nennenswerte Verzerrungen des magnetischen Feldes sind nur durch Gegenstände aus ferromagnetischen Metallen (Stahlträger, Armierungen, Blechtüren und -bedachungen, Fahrzeuge) zu erwarten. Personen beeinflussen das magnetische Feld nicht, so dass die Messgeräte vom Messenden direkt ins Feld gebracht werden dürfen.

Für die höchste betriebliche Anlagenauslastung sind die Angaben aus der Anzeige nach § 7 zu verwenden. Dabei muss nur von einer symmetrischen Strombelastung durch die Verbraucher und einer gleichmäßigen Verteilung der Last ausgegangen werden. (In der Praxis ist dies nicht immer gegeben, besonders bei Ortsnetzstationen kann die Unsymmetrie groß sein. Dies wird aber weitgehend durch die Verwendung der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung berücksichtigt.) Wird die Anlage mit verschiedenen Schaltzuständen betrieben, müssen alle Schaltzustände berücksichtigt werden, die im Betrieb eine Wahrscheinlichkeit von über 5% pro Jahr haben. Können die Messungen nicht bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchgeführt werden, muss bei Freileitungen mit einem Feldberechnungsprogramm auf diese Werte hochgerechnet werden, da z. B. die Leiterseilhöhe nicht linear vom Leiterstrom abhängt. Eine lineare Hochrechnung mit dem Leiterstrom ist nur möglich, wenn sichergestellt ist, dass es keine nichtlinearen Einflussgrößen gibt.

Werden für Standardanlagen (z. B. Kompaktstationen) "Hersteller-Zertifikate" ausgestellt, so sind diese immer für die höchsten betrieblichen Anlagenauslastungen zu berechnen oder bei diesen zu messen. Die Bezugsebene für die Rechen- oder Messwerte bei Elektromessanlagen liegt in 20 cm Abstand von der berührbaren und zugänglichen Oberfläche.

Werden Messungen unter anderen als den höchsten betrieblichen Anlagenauslastungen durchgeführt, ist zu berücksichtigen, dass die Messgröße nicht immer eine reine Sinusschwingung ist. Im Hinblick auf die Hochrechnung der Messergebnisse auf die höchste betriebliche

Anlagenauslastung müssen daher mögliche Oberwellen durch eine Spektralanalyse oder Breitbandmessung berücksichtigt werden.

Bei der Bestimmung der Gesamtexposition durch verschiedene Anlagen einer Frequenz ist eine phasenrichtige Addition der Feldgrößen einer betragsmäßigen vorzuziehen. Eine Addition der Beträge führt immer zu einer konservativen Abschätzung der Gesamtexposition.

Liegen Felder von Anlagen der öffentlichen Stromversorgung und Bahnstromanlagen gleichzeitig vor, so sind neben der Gesamtexposition auch die Feldanteile für die jeweilige Frequenz anzugeben.

b) Hochfrequenzbereich

Für die Messung der elektrischen Feldstärke gelten nicht die Abstandsforderungen von Personen und Gegenständen zur Feldsonde wie im Niederfrequenzbereich. Ein Mindestabstand von 0,8 m zwischen Sondenkopf und Messenden sollte allerdings nicht unterschritten werden. Bei der Messung mit symmetrischen E-Feld-Messwertaufnehmern, die klein gegen die Wellenlänge sind, ist ein Mindestabstand zum nächsten Objekt vom doppelten Durchmesser des Messwertaufnehmers nicht zu unterschreiten.

In der Regel gibt es Probleme, wenn die Messung zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte mit rundfunktechnischen Messgeräten oder allgemeinen Messgeräten der EMV-Messungen durchgeführt werden, da von diesen Geräten die Reflexionen nicht immer richtig berücksichtigt werden können.

Die RegTP verwendet für ihre Messungen im Hochfrequenzbereich eigene Messvorschriften (RegTP MV 09/EMF/3 „Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken“; Mainz 2003), da u. a. ihre Messungen über den Frequenzbereich der 26. BImSchV hinausgehen. Wenn Berechnungen oder Messungen der RegTP nachvollzogen oder überprüft werden sollen, sind dabei diese Messvorschriften mit zu berücksichtigen. Die genannten Messvorschriften können im Internet auf den Seiten der RegTP (www.regtp.de) eingesehen werden.

Bei Immissionen durch Felder unterschiedlicher Frequenzen sind die dafür vorgesehen Summenformeln zu verwenden (EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Felder (0 Hz – 300 GHz), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L 199/59, 1999, bzw. RegTP MV 09/EMF/3), siehe auch Abschnitt 2.2.6.2.

c) Gepulste Felder

Bei der Messung pulsmodulierter Felder mit Thermokoppler-Feldsonden, insbesondere an Radaranlagen, sollte $\frac{1}{10}$ des maximalen Messbereichs nicht überschritten werden, da die Impuls-Spitzenleistung den Detektor zerstören kann (Warnhinweise des Herstellers beachten!). Das gilt auch für Messungen mit Kombinationen aus Höchsthochfrequenz-Leistungsmessern und angepassten Antennen, sofern nicht zum Schutz des Leistungsmesskopfes und zur Messbereichserweiterung zwischen Antenne und Leistungsmesskopf Dämpfungsglieder geschaltet wurden. Dabei muss aber für die verwendeten Antennen die jeweils frequenzabhängige Wirkfläche bekannt sein. Die Messung der Exposition im Strahlungsbereich einer Radaranlage ist z. B. wie folgt vorzunehmen:

- Die Rotations- oder Schwenkautomatik der Radarantenne wird außer Betrieb gesetzt und die Antenne nacheinander so auf jeden der zu untersuchenden Messorte gerichtet, dass sich dieser im Strahlungsmaximum befindet.
- Bei umschaltbarer Antennen- und Modulationscharakteristik ist diejenige mit der höchsten Leistungsflussdichte am jeweiligen Messort zu wählen.
- Wenn keine dafür geeigneten Messgeräte zur Verfügung stehen, können zur Kontrolle der Einhaltung der Spitzenwerte diese aus den Messwerten der mittleren Leistungsflussdichte und den Parametern Impulsbreite und Pulsfolgefrequenz errechnet werden.

Bei dem gleichzeitigen Vorliegen von Exposition durch Feldstärken unterschiedlicher Frequenzen sind die dafür vorgesehenen Summenformeln zu verwenden (EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG) bzw. RegTP MV 09/EMF/3).

2.1.4 Messorte und Messpunkte

Die Lage des Messortes sollte durch Entfernungsangaben zu mindestens zwei Bezugspunkten und/oder Bezugslinien in horizontaler Ebene angegeben werden. Messpunkte werden am jeweiligen Messort durch die Höhenangabe festgelegt.

Messorte und Messpunkte werden nach dem jeweiligen Erfordernis der maßgebenden Immissionsorte ausgewählt. Die Anzahl der Messpunkte muss ausreichend sein, um alle für die Bewertung der Anlage relevanten Inhomogenitäten des Feldes zu erfassen. Dabei ist davon auszugehen, dass die Feldstärken des Feldes im Fernfeld mit der Funktion $1/r$ von der Quelle abnehmen, wobei r den Abstand zur Quelle bezeichnet. Im Nahfeld ist eine genauere Betrachtung erforderlich.

Bei Messungen niederfrequenter Felder im Freien unter Hochspannungsleitungen und anderen homogenen Feldern genügt es im Allgemeinen, an einem Messort einen Messpunkt in einer Höhe von 1 m über Standfläche und bei Erdkabeln einen Messpunkt in einer Höhe von 20 cm vorzusehen. Bei Messung homogener und reflexionsarmer Felder ist im Bereich über 100 kHz eine Messhöhe von 1,5 m zu verwenden.

Bei inhomogenen Feldern ist es in der Regel ausreichend, Messungen in drei Höhen durchzuführen. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, wird die Verwendung einheitliche Messpunkthöhen über der Standfläche (1,55 m, 0,90 m und 0,45 m) empfohlen. Die Messhöhen basieren auf den Festlegungen der einschlägigen internationalen Normungsgremien.

2.2 Anforderungen an Messungen im Hochfrequenzbereich zur Information der Öffentlichkeit

2.2.1 Einführung

Messungen im Bereich des Immissionsschutzes dienen hauptsächlich einer Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen gesetzlicher Vorschriften. Im Zusammenhang mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern, also Feldern mit einer Frequenz von 9 kHz und darüber, wird die Einhaltung von Grenzwerten im Wesentlichen mit Hilfe des Standortverfahrens der RegTP gewährleistet. Anhand von Standortbescheinigungen und den bekannten Entfernungen zur betroffenen Nachbarschaft ist eine Abschätzung über die maximal zu erwartende Immission leicht zu berechnen. Derartige Berechnungen zeigen, dass in den meisten Fällen die Grenzwerte um weitaus mehr als einen Faktor 10 unterschritten werden. Entsprechend besteht zur Überprüfung der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften nur äußerst selten ein Bedarf an Messungen.

Darüber hinaus werden im Rahmen der öffentlichen Diskussion Messungen gefordert und durchgeführt, obwohl die tatsächlichen Immissionen weit unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte liegen. Diese Messungen ermöglichen eine direkte Beurteilung der tatsächlich vorhandenen Immissionen und fördern gleichzeitig das Vertrauen in die Richtigkeit der Berechnungsverfahren, die stets auf der Annahme des ungünstigsten Falles basieren.

Ebenso ist die Frage nach den in der Umwelt allgemein vorhandenen Immissionen durch elektromagnetische Felder und deren langfristiger Veränderungen von öffentlichem und politischem Interesse. Im Folgenden werden Hinweise für die Durchführung derartiger Messungen und deren Darstellung gegeben, die im Wesentlichen der Qualitätssicherung, der Vergleichbarkeit von Messergebnissen und damit der Erhöhung der Transparenz dienen.

2.2.2 Breitbandmessungen

Breitbandmessgeräte zeigen einen **Gesamtwert** für die auftretende Immission innerhalb eines durch das Messgerät vorgegebenen Frequenzbereiches an. Es ist nur dann eine zweifelsfreie Zuordnung der auftretenden Immissionen zu den vorhandenen Emittenten möglich, wenn angenommen werden kann, dass der betrachtete Emittent die Immissionen vor Ort wesentlich dominiert. Für Breitbandmessgeräte sind unterschiedliche Messsonden (Antennen) erhältlich, deren Empfindlichkeit heute in der Regel jedoch keine quantitative Bestimmung der elektrischen Feldstärke unter 0,5 V/m erlaubt. An Orten des nicht nur vorübergehenden Aufenthalts treten jedoch oftmals nur schwächere Feldstärken auf. Vorteilhaft ist, dass die Messsonden in der Regel isotrope Messungen ermöglichen, d. h. es werden gleichzeitig die Felder von drei senkrecht zueinander stehenden Raumrichtungen gemessen und die resultierende Gesamtfeldstärke ermittelt. Die Handhabung der Geräte ist zumeist einfach und die Kosten sind allgemein deutlich niedriger als bei frequenzselektiven Messsystemen.

2.2.3 Frequenzselektive Messungen

Frequenzselektive Messungen erlauben die Ermittlung von Immissionen bei jeder einzelnen Funkfrequenz und damit die Zuordnung der Immissionen zu den jeweils vorhandenen Emittenten. Entsprechend ist es möglich, Auskunft darüber zu geben, welche Anteile an einer Gesamtimmission durch spezielle Funkanwendungen vor Ort verursacht werden. Außerdem sind die allgemein auftretenden Immissionen oftmals so gering, dass sie nur noch mit frequenzselektiven Messungen ermittelt werden können, da frequenzselektive Messsysteme eine deutlich höhere Empfindlichkeit besitzen als Breitbandmessgeräte.

Frequenzselektive Messsysteme bestehen im Allgemeinen aus einem Spektrumanalysator und einer (oder mehreren) geeigneten Hochfrequenzantennen, die über ein Hochfrequenzkabel miteinander verbunden sind. Entsprechend sind derartige Systeme (je nach Ausführung) kostspielig und die Handhabung setzt eine Vertrautheit mit dem verwendeten System sowie einschlägige Kenntnisse der zu messenden Signalcharakteristika voraus. Außerdem kann mit einer herkömmlichen Messantenne nur die elektrische Feldstärke in einer Raumrichtung ermittelt werden, da die meisten Antennen eine Richtcharakteristik aufweisen. Dies erhöht den Aufwand während der Messung, wenn richtungsunabhängige (isotrope) Feldstärken ermittelt werden sollen. Inzwischen sind jedoch erste isotrope Messantennen für frequenzselektive Messgeräte erhältlich.

2.2.4 Messortauswahl

Die Auswahl von Messorten hängt von der jeweiligen Fragestellung ab. Oft stehen im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses Bereiche, an denen geringe Immissionen zu erwarten sind. Grundsätzlich sind Außen- und Innenmessungen voneinander zu unterscheiden. Bei Innenmessungen ist speziell darauf zu achten, dass die Abmessungen der Antenne deutlich kleiner als der zu untersuchende Raum sind (siehe hierzu unter Abschnitt 2.1.3 b)). Darüber hinaus ist darauf zu achten, ob die Messungen im Fernfeld erfolgen. In der unmittelbaren Nähe zu einer Sendeantenne ist es nicht mehr möglich, anhand der Größe der elektrischen Feldstärke die Größe der magnetischen Feldstärke zu berechnen oder umgekehrt. Vielmehr müssen beide Feldstärken getrennt messtechnisch ermittelt werden. Als Faustregel für eine ausreichende Entfernung r , ab der ein Fernfeld angenommen werden kann, ist das Maximum für r aus den beiden folgenden Gleichungen zu ermitteln:

$$r > 4\lambda$$

und

$$r > \frac{2D^2}{\lambda}$$

Hierbei ist λ die Wellenlänge und D die größte Ausdehnung der Sendeantenne.

2.2.5 Messmethode

Sofern ein **Breitbandmessgerät** mit isotroper Messsonde verwendet wird, ist zunächst darauf zu achten, dass der Frequenzbereich der Messsonde den zu untersuchenden Frequenzbereich der Immissionen umfasst. Danach zeigt das Messgerät wählbar den Effektiv- oder Spitzenwert der aufgetretenen Gesamtimmission direkt an. Mit der Spitzenwert-Einstellung kann so in einem zu untersuchenden Bereich durch langsames Schwenken des Messgerätes mit Messsonde die aktuell maximal auftretende Gesamtimmission direkt ermittelt werden.

Bei **frequenzselektiven Messungen** wird zwischen drei Messmethoden unterschieden:

- Punktrastermethode,
- Drehmethode,
- Schwenkmethode.

Zur Bestimmung der maximalen Immissionen innerhalb eines Bereiches oder Raumvolumens, dem Messpunkt, ist bereits aus Plausibilitätsgründen die Schwenkmethode am besten geeignet (Messempfehlung „Mobilfunk-Basisstationen (GSM)“ des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (BUWAL), Bern, 2002). Bei der Schwenkmethode wird der Messbereich mit der Messantenne langsam abgetastet, wobei gleichzeitig eine Änderung der Polarisations- und Raumrichtung der Antenne vorgenommen wird. Letzteres entfällt bei Verwendung einer isotropen Messsonde. Die Messung soll etwa in 1,5 Meter Höhe über dem Boden (Körperhöhe) durchgeführt werden. Am Spektrumanalysator erfolgt die Messung mit der Einstellung „max-hold“. Dies bewirkt, dass nach der Abtastung die maximal auftretende Immission am Messpunkt angezeigt wird.

Daneben ist bei frequenzselektiven Messungen auch auf die korrekten Einstellungen am Spektrumanalysator zu achten (Frequenzbereich, Auflösebandbreite, Eingangsdämpfung usw.). Einen Anhaltspunkt für Übersichtsmessungen bzw. für Messungen der Hintergrundfeldstärke gibt Tabelle 1 aus RegTP MV09/EMF/3.

Werden konkrete Anlagen vermessen, sind die für die Anlage relevanten Bandbreiten zu verwenden; z. B. für GSM 1800 eine Bandbreite von 100 - 300 kHz. Nur mit solchen Messungen sind Hochrechnungen auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung möglich.

Bei Funkanwendungen mit einer großen Kanalbandbreite (DAB, DVB und UMTS) ist bei der Messung auch eine ausreichend große Auflösebandbreite gemäß Tabelle 2 aus RegTP MV09/EMF/3 einzustellen.

2.2.6 Auswertung von Messergebnissen

Das Ergebnis einer **Breitbandmessung** besteht aus dem angezeigten Wert (in V/m, A/m oder W/m²) und der zugehörigen Messunsicherheit.

Bei einer **frequenzselektiven Messung** erfordert die Auswertung eine korrekte Berücksichtigung von weiteren Faktoren (Antennenfaktor, Kabeldämpfung usw.) des verwendeten Messsystems. Für den Fall, dass bei der Messung von DAB, DVB oder UMTS entsprechend große Messbandbreiten am Spektrumanalysator nicht eingestellt werden können, ist in RegTP MV09/EMF/3 eine Näherungsformel enthalten. Dort ist auch eine Anweisung zur Erfassung stark gepulster Signale angegeben, wie sie bei Radaranlagen auftreten. Das Ergebnis ist eine Tabelle mit ermittelten Feldstärken, deren Frequenzen und Angaben zur Messunsicherheit. Eine ausführlichere Betrachtung zu Messunsicherheiten befindet sich beispielsweise in BUWAL 2002 und in der Empfehlung ECC Recommendation (02)04 „Measuring Non-Ionising Elektromagnetic Radiation (9 kHz – 300 GHz)“ des Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administration. Aus Erfahrung sind Messunsicherheiten nicht kleiner als ± 3 dB zu erwarten.

2.2.6.1 Momentanimmission und höchste betriebliche Anlagenauslastung

Bei den im vorhergehenden Abschnitt ermittelten Messwerten handelt es sich um **Momentanwerte**. Diese können als Eingangsdaten zur Ermittlung der maximal durch eine

Anlage verursachten Immission (bei unterstellter höchster betrieblicher Anlagenauslastung) dienen.

Die korrekte Ermittlung der Immission bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung setzt eine detaillierte Kenntnis über die vorhandenen Sendeanlagen, der Umgebung sowie im Regelfall eine frequenzselektive Messung voraus. Einen Überblick zu den vorhandenen Sendeanlagen in der Umgebung des Immissionsortes erhält man durch die Standortbescheinigungen, die in der Datenbank der RegTP oder bei den zuständigen Immissionsschutzbehörden eingesehen werden können. Eine Hochrechnung auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung ist nur möglich, sofern der Betriebszustand einer Anlage während der Messung bekannt ist.

Im speziellen Fall des **GSM-Mobilfunks** kann der Zustand der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung mit Hilfe der Feldstärke eines speziellen Kanals einer Anlage, des so genannten BCCH (broadcast-channel) ermittelt werden. Zur Trennung von anderen vorhandenen Immissionen wird die Sendefrequenz des BCCH benötigt. Zusätzlich ist zur weiteren Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung auch die Anzahl n der genehmigten Kanäle für die betrachtete Anlage erforderlich. Diese Angaben können beim Betreiber oder der RegTP erfragt werden.

Die maximal auftretende Feldstärke E_{ges} ermittelt sich aus der Feldstärke E_{BCCH} des BCCH über den Zusammenhang:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{BCCH}} \sqrt{n}$$

Eine beim **GSM-Mobilfunk** aus Erfahrung gewonnene Faustformel für eine grobe Abschätzung der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung aus der gemessenen Feldstärke des Mobilfunks ergibt, dass die gemessene Immission im Mittel um einen Faktor $1,36 \pm 0,04$ unter der maximal möglichen Feldstärke (Höchstauslastung der Anlagen) liegt. Der genannte Faktor war das Ergebnis einer Messreihe im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz im Jahr 2002 von über zwanzig zufällig ausgewählten Anlagen, deren Immissionen sowohl mit dem zuvor genannten Hochrechnungsverfahren ermittelt wurde, als auch über die Summation aller am Spektrumanalysator auftretenden Mobilfunkimmissionen.

Die höchste betriebliche Anlagenauslastung bei **UMTS (FDD)-Mobilfunkanlagen** kann, wenn keine näheren Daten vom Betreiber bekannt sind, konservativ durch Multiplikation des Messwertes der Feldstärke mit einem Faktor 8 abgeschätzt werden. Für eine genauere Ermittlung ist eine Codeanalyse durchzuführen. Mit der Feldstärke des so genannten CPICH-Codes und der Anlagenkennung kann eine genauere Abschätzung der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchgeführt werden.

Für weitergehende Betrachtungen kann der Entwurf der Messempfehlung „Mobilfunk-Basisstationen (UMTS-FDD)“ des BUWAL vom 17.09.2003 herangezogen werden.

2.2.6.2 Darstellung von Messergebnissen

Grundsätzlich erfolgt die Beurteilung der Immissionen anhand der 26. BImSchV. Die anschauliche Darstellung der Gesamtimmissionen und deren Bewertung kann durch Summation der Beiträge aus den einzelnen Frequenzbereichen erfolgen. Damit erfolgt eine mit der BEMFV bzw. der EU-Ratsempfehlung und den geltenden Rechtsnormen konforme Bewertung der auftretenden Immissionen.

Im Fall einer **Breitbandmessung** entsteht nun das Problem, dass die Grenzwerte frequenzabhängig sind, jedoch die frequenzmäßige Zusammensetzung des Messwertes in der Regel nicht bekannt ist.

Entsprechend kann sowohl das Verhältnis von Messwert zum Grenzwert für den kleinsten als auch für den größten Grenzwert des mit der Messsonde erfassbaren Messbereiches berechnet werden. Damit ergibt sich eine obere und untere **orientierende Aussage**, zu wie viel Prozent die Grenzwerte durch Immissionen im Messbereich der Messsonde ausgeschöpft sind.

Bei **frequenzselektiven Messungen** sind in Bezug auf Grenzwerte mehrere Bedingungen einzuhalten. Für elektrische Felder gelten folgende Bedingungen mit $a = 87 \text{ V/m}$, $c = 87/f^{1/2} \text{ V/m}$ und $E_{L,i}$ als zugehörigem Grenzwert aus Tabelle 2 und 3 der EU-Ratsempfehlung (1999/519/EG) bzw. der RegTP MV 09/EMF/3:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{MHz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (\text{Bed. 1}) \qquad \sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{Bed. 3})$$

Für magnetische Felder gelten folgende Bedingungen mit $b = 5 \text{ A/m}$, $d = 0,73/f \text{ A/m}$ und $H_{L,i}$ als zugehörigem Grenzwert aus der genannten Tabelle 2 und 3:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{150\text{kHz}} \frac{H_i}{H_{L,i}} + \sum_{i>150\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_i}{b} \leq 1 \quad (\text{Bed. 2}) \qquad \sum_{i=100\text{kHz}}^{150\text{kHz}} \left(\frac{H_i}{d} \right)^2 + \sum_{i>150\text{kHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{H_i}{H_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{Bed. 4})$$

Die Bedingungen 1 und 2 ergeben sich aus der **Reizwirkung** durch Felder bei niedrigeren Frequenzen. In diesem Fall sind die Feldgrößen entscheidend und daher erfolgt eine lineare Summation.

Die Grenzwerte in Frequenzbereichen über 10 MHz (Bedingungen 3 und 4) beruhen auf **thermischen Wirkungen**, also aufgrund der im Gewebe deponierten Energie, weshalb eine quadratische Summation erfolgt.

Als **Faktor der Grenzwertunterschreitung** bei Reizwirkung und thermischer Wirkung wird oftmals der Kehrwert des Summenwertes von Bedingung 3 respektive 4 bezeichnet. Dies stellt ein Maß dar, in wie weit die gemessenen Immissionen den Grenzwert bezüglich der Summenformeln unterschreiten.

Darüber hinaus kann auch gefragt werden „wie viel Prozent vom Grenzwert“ die gemessenen Immissionen erreichen. Bezüglich der Reizwirkung bei Bedingung 1 bzw. 2 ergibt sich dies einfach aus dem erhaltenen Zahlenwert der jeweiligen Summe. Der Wert 1 würde also bedeuten, dass die Grenzwerte zu 100 % erreicht sind. Im Fall der thermischen Wirkungen, Bedingung 3 und 4, gibt es zwei Standpunkte:

1. Nachdem die Wirkung auf der deponierten Energiemenge und damit auf der eingestrahlt Energie (W/m^2) beruht, liefert die jeweilige Summe von Bedingung 3 bzw. 4 bereits den Prozentsatz eines Wertes, der dem Quadrat des Grenzwertes entspricht bzw. der eingestrahlt Energie proportional ist. Ein Ergebnis von 0,09 würde also bedeuten, dass 9 % von diesem Wert erreicht sind. In dieser Form verfährt z. B. die RegTP in ihren Veröffentlichungen.
2. Nachdem die Grenzwerte der 26. BImSchV durch die Feldstärken (elektrisch in V/m) gegeben sind, jedoch die Quadrate der Feldstärken summiert wurden, wird von der jeweiligen Summe von Bedingung 3 bzw. 4 am Ende die Wurzel gezogen. Ein Summenwert von 0,09 würde in diesem Fall bedeuten, dass 30 % vom Grenzwert erreicht sind ($\sqrt{0,09} = 0,3$). So ist es z. B. in der schweizerischen Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) festgelegt.

Ergänzend kann auch die auftretende Leistungsflussdichte der Immission dargestellt werden, wobei deutlich darauf hingewiesen werden sollte, dass dieser Wert keine Aussage bezüglich der biologischen Wirkung zulässt, da die Wirkungen **frequenzabhängig** sind.

Im Rahmen der Diskussion in der Öffentlichkeit kann die Gegenüberstellung von verschiedenen Funkanwendungen (Fernsehen, Rundfunk, DECT etc.) hilfreich sein. Dies setzt eine getrennte Berechnung der obigen Bedingungen für die betrachteten Funkanwendungen voraus.

3.3 Messbericht

Zu den erfolgten Messungen ist grundsätzlich ein **verständlicher** und **transparenter** Messbericht anzufertigen. Dies bedeutet, dass klar nachvollziehbar sein muss, wie die Messwerte ermittelt wurden und wie aus den Messwerten die dargestellten Ergebnisse ermittelt wurden. Ebenso müssen die getroffenen Annahmen und Verfahren bezüglich der Fehlerabschätzung und eventuell vorhandenen Hochrechnung auf höchste betriebliche Anlagenauslastung nachvollziehbar sein.

Folgende Punkte soll ein Messbericht **möglichst übersichtlich gegliedert** umfassen:

1. Messauftrag mit Anlass und Hintergrund der Untersuchung,
2. eindeutige Identifizierung des Messberichts,
3. Auftraggeber, Auftragnehmer mit Anschriften bzw. Kontaktpersonen,
4. gesetzliche Grundlagen und Messvorschriften,
5. Angaben zu Messzeit, Messort (Fotos, evtl. Begründung für den Ort) und beteiligte Personen,
6. Wetterverhältnisse,
7. Beschreibung der eingesetzten Messgeräte (Art, Bezeichnung, Hersteller, Seriennummer, Datum der letzten Kalibrierung),
8. Angaben zur betrachteten Feldquelle im Fall von speziellem Anlagenbezug (Betreiber, Kanalzahl, ggf. Frequenzinformationen, Betriebszustand der Anlagen usw.),
9. Angaben zur Messunsicherheit,
10. Angaben zum Messvorgang (Messverfahren, welche Immissionen wurden gemessen, usw.),
11. Messdaten (in originärer Form),
12. Angewandte Formeln und Grenzwerte,
13. Darstellung der mit Formeln, Grenzwerten und Messdaten erhaltenen Ergebnisse.

Die Berechnung der Ergebnisse unter Punkt 13 muss für fachlich versierte Personen anhand der Angaben des Messberichts jederzeit nachvollziehbar sein. Dabei müssen aber nur solche Angaben erhoben werden, die für die fragliche Messaufgabe relevant sind. So ist die Angabe von klimatischen Bedingungen für bestimmte Messaufgaben erforderlich.

Die Einhaltung eines Grenzwertes ist nur dann gegeben, wenn alle Messwerte zuzüglich der gesamten Messunsicherheit unterhalb des Grenzwertes liegen.

Die Erfüllung der oben genannten Punkte ist ein Kriterium für die Qualität der erstellten Messberichte und damit auch für die Qualität der Arbeit einer Messinstitution.

3.4 Kontrollmessungen/Nachkalibrierungen

Zur Sicherung korrekter Feldstärke- bzw. Leistungsflussdichte-Messergebnisse sind in regelmäßigen Abständen Nachkalibrierungen der Messgeräte durch ein anerkanntes Kalibrierlabor oder durch den Hersteller zu veranlassen. Die Bescheinigung hierfür ist auf Verlangen vorzulegen.

Des Weiteren wird empfohlen, regelmäßig an Ringmessungen und Vergleichsmessungen teilzunehmen.