

Zielführende Strategien zur Lokalisierung von Störsignalen im Wirkungsbereich moderner Mobilfunksysteme

M. Sc. Mark Reinhard, Narda Safety Test Solutions, Pfullingen
Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek, Technische Hochschule Deggendorf

1 Einführung

1.1 EMV im Umfeld moderner Mobilfunktechnik

Der Schutz des elektromagnetischen Spektrums ist ein Kernelement der EMV. Er wird durch Zuteilung von Frequenzbändern und Vorgabe von Grenzwerten gewährleistet und ermöglicht so den Betrieb von Funkssystemen. Trotz dieses Schutzes werden auch moderne Netze wie GSM (2G), UMTS (3G) und LTE (4G) immer wieder durch Störsignale beeinträchtigt. Diese können ihre Ursache in Emissionen von Geräten bzw. Systemen besitzen oder sie werden gar absichtlich erzeugt. Der Fokus dieser Untersuchung liegt nicht auf dem Erklären und Beseitigen von EMV-Störungen, sondern auf der Lokalisierung der Störquelle im Wirkungsbereich moderner Funknetze. An die Stelle einer EMV-Labor-Umgebung tritt hier also ein von reflektierenden Objekten geprägtes Umfeld.

1.2 Fragestellungen innerhalb dieser Untersuchung

Um die Vielfältigkeit der behandelten Thematik zu unterstreichen, stellt Kapitel 2 zunächst verschiedene Funkpeilverfahren und das Prinzip der Triangulation vor. Ein besonderer Fokus liegt auf der manuellen Peilung. Dieses Verfahren wird in Kapitel 2 unter theoretischen, in Kapitel 3 unter praktischen Gesichtspunkten beleuchtet. Als Messmittel dient dabei ein moderner, tragbarer Spektrumanalysator mit handgeführter Richtantenne. Schlussendlich sollen so folgende Fragen beantwortet werden:

- In welchen Situationen ist die manuelle Peilung und Lokalisierung opportun?
- Wann ist die Triangulation von Funksignalen zweckmäßig?
- Welche Peil- und Lokalisierungsgenauigkeit geht unter Verwendung mobiler Empfangssysteme und handgeführter Antennen mit dieser Triangulation einher?
- Wie ist mit der Mehrwegeausbreitung von Funksignalen umzugehen?
- Wie lässt sich bestehende Infrastruktur ausnutzen, um Störsignale bestimmten Gebieten zuzuordnen und Ausbreitungswege abzuschätzen?

2 Funkpeilung und -lokalisierung

2.1 Übersicht existierender Funkpeilverfahren

Zu Beginn dieses Kapitels ist festzuhalten, dass Peilverfahren lediglich logische Standlinien zu einem Sender zu Verfügung stellen. Somit ist zwar eine Aussage zur Richtung zum Senderstandort möglich, aber nicht zu dessen Entfernung und Position. Demnach sind die nachfolgend behandelten Verfahren von einer Lokalisierung abzugrenzen.

Antennen mit ausgeprägter Richtcharakteristik

Das nach heutigem Verständnis grundlegendste Funkpeilverfahren beruht auf der Verwendung von Antennen mit ausgeprägter Richtcharakteristik. Die Peilung erfolgt hier

durch Rotation der Antenne und Maximums-/Minimumsdetektion in der Feldstärke. Prinzipiell existieren heute nicht mehr nur Systeme mit manuell durchzuführender Antennenrotation, sondern auch mit automatischer Rotation. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens entsteht durch den Gewinn der verwendeten Richtantenne. Dieser erhöht die Empfindlichkeit und somit die Reichweite des Gesamtsystems.

Goniometerpeiler und Bellini-Tosi-Prinzip, Dreh-Adcock-Peiler

Das oben beschriebene Peilverfahren bezieht sich auf die Ausnutzung der Richtwirkung einer einzelnen Antenne. Nun stehen Verfahren im Vordergrund, die von einem Array Gebrauch machen. Die Grundlage dafür lieferte nach [2] Ferdinand Braun um 1899. Er verwendete einen Einzel-Drehrahmen (Loop-Antenne) und später zwei gekreuzte Drehrahmen (Kreuzrahmen). Diese Konstruktionen besaßen in ihrer Richtcharakteristik Maxima und Minima und mussten zur Funkpeilung weiterhin mechanisch gedreht werden bis es 1907 gelang, den Kreuzrahmen mit einem Goniometer zu kombinieren. Darin überbrückte sich eine mechanische Bewegung der Antenne, indem zwei mit dem Kreuzrahmen verbundene Spulen ihre Spannungen winkelabhängig an eine drehbare Suchspule übertrugen. Prinzipiell wurde das elektromagnetische Goniometer nicht nur in Verbindung mit Kreuzrahmen betrieben, sondern auch mit so genannten Adcock-Antennen, welche aus einem oder zwei Mono- / Dipol-Antennenpaaren bestanden.

Adcock-Antenne und Watson-Watt-Peiler

Auch heute noch kommen Adcock-Antennen zum Einsatz. Diese sind dann nicht mehr mit einem Goniometer verbunden, sondern mit einem modernen Peilempfänger. Die Grundlage zwischen beidem schuf Robert Watson-Watt mit dem nach ihm benannten Peiler. Das Goniometer war hier durch eine Elektronenstrahlröhre mit XY-Oszillographen ersetzt. Infolgedessen war es möglich, die zwei Antennenpaare eines Vierfach-Adcocks einzeln abzugreifen. Im Vergleich zum Goniometer, bei dem die Peilung durch eine drehbare Suchspule (ein Kanal) erfolgte, lagen beim Watson-Watt-Peiler somit zwei Kanäle vor. Dadurch wurde es möglich auch kurzzeitige Funksignale sicher zu peilen.

Wullenwever-Peilbasis

Der Wullenwever-Peiler wird typischerweise als große Peilbasis realisiert und arbeitet mit phasenabhängig induzierten Momentanspannungen. Er besteht aus einem äußeren Ring, auf dem zum Beispiel Mono- oder Dipolantennen angeordnet sind und einem inneren Ring, der mittels einer großen Reflektorwand gegenüberliegende Antennenelemente voneinander abschirmt. Zur Peilung werden stets Gruppen nebeneinander liegender Elemente periodisch zusammengeschaltet und additiv / subtraktiv verglichen.

Doppler-Peiler

Die Peilung von Funksignalen ist auch unter Ausnutzung des Dopplereffekts möglich. Dabei bewegt sich ein Antennenelement mit Rundempfangscharakteristik auf einer Kreisbahn. Der Dopplerversatz steigt dabei mit der Rotationsgeschwindigkeit. Bewegt sich die Antenne senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der EM-Welle, so entsteht kein Dopplerversatz, da keine Relativgeschwindigkeit vorliegt. Bewegt sie sich parallel zur Ausbreitungsrichtung, so entstehen maximale bzw. minimale Dopplerversätze, wodurch eine Standlinie zum Sender bzw. vom Sender weg gebildet werden kann.

Interferometer-Peiler und korrelativer Interferometer-Peiler

Bei einigen der in den vorigen Abschnitten erläuterten Verfahren erfolgte die Peilung durch Auswertung der Summen und Differenzen der phasenabhängigen Momentanspannungen. Im Gegensatz dazu findet beim Interferometer eine echte Phasenauswertung

tion statt. Dafür müssen mindestens drei Antennenelemente (mit Rundempfangscharakteristik) eine nicht-kollineare Basis bilden. Der korrelative Interferometer-Peiler besteht typischerweise aus mehr als fünf Antennenelementen. Diese werden über eine bestimmte Schaltmatrix nacheinander abgetastet. Das Peilerggebnis resultiert aus einer korrelativen und stochastischen Auswertung in Abhängigkeit von der Position bzw. der Gruppenmanigfaltigkeit der verwendeten Antennenelemente.

Signallaufzeit-Peiler / Time Difference of Arrival (TDOA)

Auch die Messung von Signallaufzeiten erlaubt eine Peilung von Funksignalen. Mit Hilfe zweier Antennen, die nicht zwangsläufig omnidirektional sein müssen, und zweier synchronisierter Empfänger ist bereits die Bildung einer Standlinie möglich. Mit Hilfe weiterer Antennen und Empfänger wird es möglich den Senderstandort zu ermitteln. Normalerweise haben die Empfangseinheiten von TDOA-Systemen signifikante Abstände zueinander, da mit geringerem Abstand eine genauere Synchronisation erforderlich ist.

2.2 Triangulation / Kreuzpeilung

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, stellen Peilverfahren logische Standlinien zu einem Sender zu Verfügung. Eine Standortinformation liegt somit noch nicht vor. Das in Folge grundlegendste Verfahren zur Lokalisierung ist die Triangulation. Hierbei werden mindestens zwei Standlinien überlagert und deren Schnittpunkt(e) ausgewertet. Theoretisch führt die Schnittpunktbildung zu einem präzisen Ergebnis. Aufgrund physikalischer Gegebenheiten (Fehlpeilungen, Halbwertsbreite der Antennenhauptkeule, Wellenausbreitungseffekte) handelt es sich bei den Standlinien tatsächlich aber um „Standkegel“. Eine Überlagerung dieser Figuren führt zu einer Schnittfläche, wie folgende Abbildung verdeutlicht.

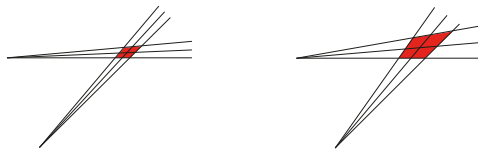


Bild 1: Triangulation zweier Peilungen mit 5° und 10° Öffnungswinkel ($\hat{=}$ Peilunsicherheit)

Einen essentiellen Einfluss auf den Öffnungswinkel von Peilungen hat die Richtwirkung der verwendeten Antenne. Mit höherer Richtwirkung verkleinert sich unter statistischen Gesichtspunkten auch der Öffnungswinkel, sprich die Peilunsicherheit. Ausführliche Versuchsreihen mit handgeführten Antennen ergaben nach [1] Unsicherheiten zwischen 2° und 5°. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren zählten dabei unter Freiraumbedingungen die frequenzabhängige Richtcharakteristik der verwendeten Antenne, die Antennenpolarisation und die Qualität der Antennendrehung. Hinsichtlich des zuletzt genannten Einflussfaktors war ersichtlich, dass handbasierte Antennendrehungen ähnliche Qualität aufweisen können wie stativbasierte (aber weiterhin manuelle) Drehungen.

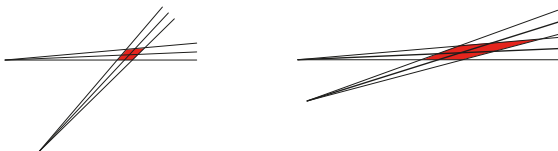


Bild 2: Triangulation mit verschiedenen Schnittwinkeln (jeweils 5° Peilunsicherheit)

Neben dem Öffnungswinkel spielt auch der Schnittwinkel von Peilungen zueinander eine sehr wichtige Rolle. Dies wird exemplarisch veranschaulicht durch Bild 2. Die Öffnungswinkel belaufen sich hier jeweils auf 5°.

Auch bei einer Distanzierung der Peilstandorte vergrößert sich die Fehler-Schnittfläche. Dies wird durch Bild 3 ersichtlich, in dem links zum Vergleich erneut die gleiche Figur wie in den Bildern 1 und 2 verwendet wird.

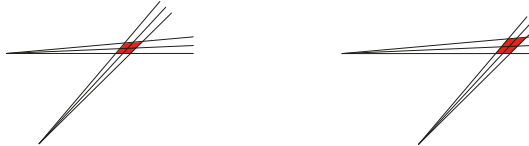


Bild 3: Distanzierung von Peil-Standorten führt zu größerer Fehler-Schnittfläche

Prinzipiell ist es möglich durch mehr als zwei Peilungen Senderstandorte noch weiter einzugrenzen. Dies wird durch Bild 4 veranschaulicht.

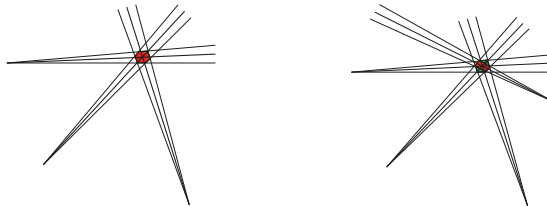


Bild 4: Triangulation bei drei und bei vier Peilungen

Bild 4 verdeutlicht, dass mit der Anzahl an Peilungen die Fehlerfläche minimiert werden kann. Grundsätzlich setzt dies voraus, dass Peilungen stets den gleichen Schnittpunkt bzw. ähnliche Fehler-Schnittflächen besitzen.

Nach [2] steigt die Wahrscheinlichkeit P_n , dass sich ein Sender tatsächlich im eingegrenzten Gebiet befindet mit der Anzahl n Peilungen.

$$P_n = 1 - \frac{n}{2^{n-1}} \quad (1)$$

So ergibt sich gemäß Formel 1 bei $n = 7$ Peilungen eine Wahrscheinlichkeit von 89% und bei $n = 10$ Peilungen bereits eine Wahrscheinlichkeit von 98%.

2.3 Manuelle Peilung und Lokalisierung mit Hilfe von Richtantennen

Die manuelle Peilung und Lokalisierung von Funksignalen ist ein elementares Verfahren der Funkpeiltechnik. Häufig wird es auch durch die Begriffe Interference / Transmitter Hunting, Homing, Last Mile Identification oder Manual Direction Finding referenziert. Bei dem Verfahren werden Empfänger und Richtantenne am Körper getragen oder in einem Fahrzeug mitgeführt. Die Signalquelle wird lokalisiert, indem der Nutzer dem empfangenen Funksignal ständig in Richtung der höchsten Feldstärke folgt. Dabei wird von der Richtwirkung der jeweiligen Antenne Gebrauch gemacht. Als Vorteil dieses Verfahrens erweist sich der geringe technische Aufwand sowie die hohe Flexibilität bzw. Mobilität. Weiterhin bedeutet die Antennenrichtwirkung für das Gesamtsystem eine erhöhte Empfindlichkeit und führt so zu einem größeren Suchgebiet. Als Nachteil erweist sich hinge-

gen die langsame Peilwertbildung aufgrund der manuellen Antennenbewegung. Dieser wirkt sich besonders bei der Peilung kurzzeitiger Signale aus. In den meisten Fällen wird die manuelle Peilung und Lokalisierung von Funksignalen erschwert durch die Funkausbreitung in urbanen Gebieten. So ist es wahrscheinlich, dass Empfangswege durch Gebäude und Straßenzüge geformt und zusätzlich durch Fahrzeuge und den Verkehrsfluss gestört werden. Dies kann zu sehr verzweigten „Jagden“ führen und erfordert häufig ein hohes Maß an Geduld, Erfahrung und Experimentierfreudigkeit. Wie in Kapitel 2.1 erläutert, erlaubt die Verwendung von Richtantennen auch die Erzeugung von Standlinien durch diskrete Peilungen, welche sich beispielsweise als Polardiagramm visualisieren lassen. Solche Darstellungen lassen eine Einschätzung der momentanen Funkausbreitung an einem bestimmten Ort zu und erlauben teilweise Aufschluss über mögliche Haupt- und Nebenausbreitungswege. Eine elementare Grundvoraussetzung ist dabei allerdings, dass das bei der Peilung referenzierte Funksignal einen stabilen Pegel aufweist. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, so können Peilungen und damit einhergehende Polardiagramme empfindlich verzerrt werden und falsche Hauptausbreitungswege suggerieren. Aus diesem Grund beziehen sich die in Kapitel 3 vorgestellten Untersuchungen stets auf Funksignale mit stabilen Pegeln. Bei GSM-Netzen trifft dies auf Broadcast Control Channels (BCCH) zu, bei TETRA auf Main Control Channels. Traffic Channels eignen sich aufgrund ihrer leistungsvariablen, pulsartigen und teilweise von Frequency Hopping geprägten Funktionsweise keinesfalls für derartige manuelle Peilungen. Auch UMTS- und LTE-Netze weisen im Leistungsspektrum erhebliche Instabilitäten auf. Zudem werden sie als Gleichwellennetze betrieben, so dass einzelne Senderstandorte nicht spektral aufgrund unterschiedlicher Sendefrequenz unterschieden werden können. Theoretisch ließe sich dieses Problem mit geeigneter codeselektiver Funkpeiltechnik kompensieren, dieser Gedanke soll hier jedoch nicht fortgeführt werden. Tabelle 1 stellt die obigen Aussagen prägnant gegenüber:

	Frequenzbereich [MHz]	Peileigenschaften
GSM	920 – 960, 1.805 – 1.880	Stabiler Pegel nur auf BCCH-Trägern
UMTS	2.110 – 2.170	Sehr instabiler Pegel (Gleichwellennetz)
LTE	791 – 821, 1.805 – 1.825, 1.853 – 1.873, 2.570 – 2.690	Sehr instabiler Pegel (Gleichwellennetz)
TETRA	390 – 400	Stabiler Pegel nur auf MCCH-Trägern

Tabelle 1: Übersicht Downlink-Frequenzen (ITU-Region 1, Deutschland) und pegelbezogene Peileigenschaften

Auf Basis dieser Erkenntnisse, die sich auf Nutzsignale bezogen, wird deutlich, dass auch Störsignale umso schwieriger zu peilen sind, wenn sie signifikante Pegelschwankungen aufweisen. Dieser Gedanke ist elementar für das tiefere Verständnis der Untersuchungen im folgenden Kapitel und für die Peilpraxis.

3 Untersuchung der Feldverteilung in verschiedenen Umgebungen

Aufbauend auf Kapitel 2.3 befasst sich dieses Kapitel mit der Feldverteilung in reflexionsarmer und -reicher Umgebung. Wie in Kapitel 1.2 erläutert, wurde als Messmittel ein Spektrumanalysator mit Richtantenne verwendet. Durch dessen Fähigkeit Feldstärken abhängig vom Azimut aufzuzeichnen, wurde die Richtungsabhängigkeit des Empfangspegels mit Hilfe von Polardiagrammen veranschaulicht. Bild 5 bezieht sich auf die Peilung einer GSM900-Basisstation, die noch mit einer Rundstrahlantenne aufgebaut

war. Die Peilungen erfolgten von verschiedenen Standorten um die Basisstation und konzentrierten sich stets auf einen BCCH-Träger. Im ersten Teilbild wird nahezu das ideale Strahlungsdiagramm der Peilantenne (horizontal polarisiert) wiedergegeben. Dies deutet auf eine reflexionsarme Wellenausbreitung an diesem Standort hin. Das zweite Teilbild weist hingegen Unregelmäßigkeiten auf, während das dritte Teilbild Keulen zeigt, die schmäler sind als es die Peilantenne eigentlich zulässt. Diese letzten Teilbilder basieren auf zwei nur vermeintlich reflexionsarmen Standorten, an denen vereinzelt Bäume standen und sich ein etwa zwei Meter hoher Wall aus Lehm befand.

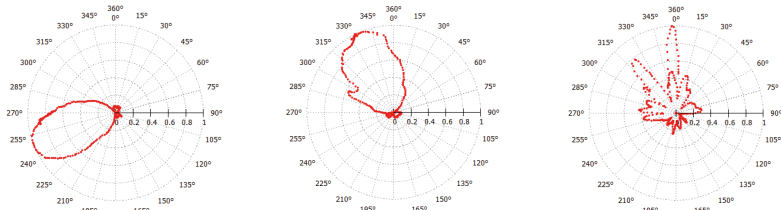


Bild 5: Vergleich dreier Peilresultate in gleicher Umgebung, versch. Standorte (900 MHz)

Die Bilder 6 und 7 beziehen sich erneut auf eine Basisstation mit Rundstrahlantennen für GSM900 und für GSM1800. Bild 6 veranschaulicht die Peilresultate an einem Standort für die beiden Frequenzbereiche. Während sich im ersten Teilbild näherungsweise das originale Strahlungsdiagramm der Peilantenne (vertikal polarisiert) ausprägt, zeigt das zweite Teilbild bereits signifikante Schwankungen im Bereich des Hauptmaximums. Hier deutet sich bereits an, dass zumindest in der vorherrschenden Messumgebung bei 1.800 MHz mehr Reflexionen zu Stande kommen als bei 900 MHz.

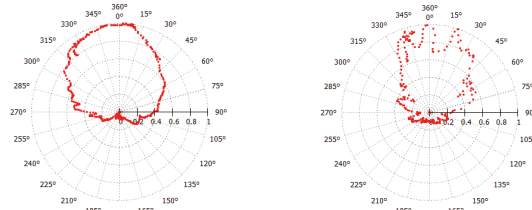


Bild 6: Vergleich Peilresultat 900 MHz (links) und 1.800 MHz (rechts) von gleichem Standort aus

Bild 7 zeigt im Vergleich ein äquivalentes Ergebnis von einem anderen Standort aus. Während bei 900 MHz nun zahlreiche Keulen im Polardiagramm ersichtlich werden, zeigt sich bei 1.800 MHz ein diffuses Ergebnis, das weniger durch diskrete Reflexionen als durch massive Streuung entstand. In der Tat lag der Peilstandort für Bild 7 nicht mehr in Sichtverbindung und wurde durch eine Anhöhe in hügeligem Gelände verdeckt.

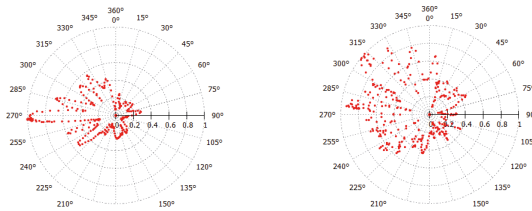


Bild 7: Peilresultate 900 MHz (links) und 1.800 MHz (rechts) von gleichem Standort aus

Abschließend zeigen die Bilder 8 und 9 erneut Peilergebnisse, die um eine GSM900-Basisstation herum gewonnen wurden. Die beiden Bilder beziehen sich auf zwei verschiedene Peil-Standorte und verdeutlichen die Unterschiede bei horizontaler und vertikaler Antennenpolarisation.

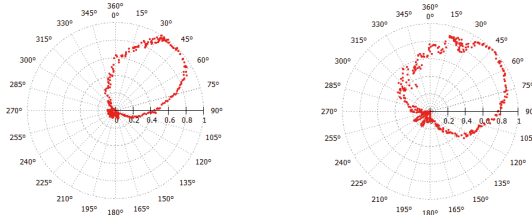


Bild 8: Peilergebnisse 900 MHz, horizontale (links) und vertikale (rechts) Polarisation, gleiche Standorte

Am ersten Standort (Bild 8) prägen sich horizontal wie vertikal näherungsweise die originalen Strahlungsdiagramme der verwendeten Antenne aus. Dies ist am zweiten Standort (Bild 9) nicht mehr der Fall. Hier liegen die Maxima zwar noch in der gleichen Richtung allerdings liegen vertikal deutlich mehr Effekte der Mehrwegeausbreitung vor als horizontal. Vermutlich ist dies mit mehreren Bäumen zu begründen, die in näherer Umgebung als (vertikaler) Reflektor fungierten.

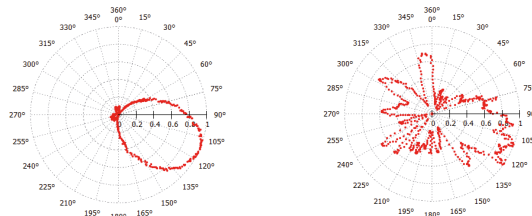


Bild 9: Peilergebnisse 900 MHz, horizontale (links) und vertikale (rechts) Polarisation, gleiche Standorte

Die in diesem Kapitel exemplarisch diskutierten Messergebnisse verdeutlichen, wie vielfältig Peilungen selbst in vermeintlich reflexionsarmen Umgebungen ausfallen können. Als Reflektoren fungieren nicht nur Gebäude, sondern beispielsweise auch Hügel und Bäume. Je nach Beschaffenheit und sonstiger Umgebung können jene Reflektoren über diskrete Reflexionen hinaus massive Streuungseffekte verursachen. Allgemein wurde die Mehrwegeausbreitung in diesem Kapitel dadurch erklärt und kenntlich gemacht, dass im Polardiagramm Keulen entstanden, die vom Original-Strahlungsdiagramm der verwendeten Antenne abweichen oder gar deutlich schmaler waren. Die Qualität der in den vorliegenden Untersuchungen erzielten Polardiagramme ist dadurch einzuordnen, dass ihre Grundform meist gut, wenn auch nicht deckungsgleich reproduzierbar war.

4 Schlussfolgerung und Diskussion von Lokalisierungsstrategien

Funklokalisierungen sollten stets dort beginnen, wo ihr Bedarf entsteht. Wird z. B. eine Mobilfunk-Basisstation durch ein unbekanntes Signal gestört, so sollte die Messung an genau dieser Stelle bzw. an der betroffenen Antenne beginnen. Grundsätzlich bieten sich dabei die drei Möglichkeiten die erste Messung in gewisser Distanz zur betroffenen Antenne zu beginnen, in ihrer unmittelbaren Nähe oder durch eine direkte leitungsge-

bundene Verbindung zum Analysator. Jede dieser Möglichkeiten bietet Vor- und Nachteile, welche im Wesentlichen mit dem erforderlichen Signal-zu-Rauschabstand einerseits und starken bzw. übersteuernden Nutzsignalen andererseits zusammenhängen. In derartigen „hochdynamischen Funkumgebungen“ sind Störsucher häufig auf zusätzliche Filter zum Unterdrücken benachbarter oder modulierender Frequenzen angewiesen.

Mit Hilfe moderner Messtechnik ist es möglich die momentane Funkumgebung anschaulich darzustellen und Ausbreitungswege abzuschätzen. Zum Erkennen von Mehrwegeausbreitung sollte stets das Original-Strahlungsdiagramm der verwendeten Antenne bekannt sein. Wird dieses bei einer 360°-Peilung nicht nachgebildet, sondern weist zahlreiche Keulen oder Streueffekte auf, so unterliegt die Ausbreitung des zu peilenden Signals der Mehrwegeausbreitung, also der konstruktiven und destruktiven Überlagerung von EM-Wellen („Kurzeitschwund“ aus Mobilteilnehmer-Sicht). Ausführliche Peilungen an einem bestimmten Messort sind dann laut [1] und [3] weniger zweckmäßig als viele Peilungen an vielen Messorten. Andererseits kann Infrastruktur, welche Mehrwegeausbreitung typischerweise provoziert auch im Sinne von Funklokalisierungen ausgenutzt werden. So hilft beispielsweise der Verlauf von Straßen beim Nachverfolgen, wenn auch erheblich gedämpfter, Funksignale und beschreibt somit Ausbreitungswege („Canyon-Effekt“). Ähnliche Verhältnisse gelten innerhalb von Gebäuden. Sollen hier Funkstationen lokalisiert werden, so empfiehlt es sich das Gebäude zunächst in einem gewissen Abstand zu umkreisen, um bestimmte Gebäudeteile zu selektieren. Auch die Eingrenzung in Frage kommender Stockwerke ist dabei oder später im Treppenhaus möglich.

Die Triangulation ist ein elementares Lokalisierungsverfahren. Es ist dann zweckmäßig, wenn Peilungen von reflexionsarmen, hoch gelegenen, exponierten Messpunkten erfolgen, so dass Polardiagramme nur wenig "aufgezupfelt" werden. Häufig trifft dies nur auf rurale Umgebungen zu. In der Tat finden sich in [1] allerdings Beispiele, in denen auch Peilungen von einem Hochhausbalkon in stark bebautem Gebiet gute Richtungsinformationen zu einem Störer im Abstand von 500 m lieferten. Die Peilunsicherheit mit einer log.-per. Antenne ergab in sehr ausführlichen Untersuchungen in [1] Werte zwischen 2° und 5°. Dabei zeigten sich unmittelbare Abhängigkeiten von der momentanen Richtcharakteristik der Antenne, welche sich mit der Polarisierung und der Frequenz verändert. Weiterhin spielte auch die Qualität der Antennenführung (Hand / Stativ) eine erhebliche Rolle, ließ allerdings den Schluss zu, dass handbasierte Peilungen ähnlich präzise verlaufen können wie stativbasierte Peilungen. Im Gegensatz dazu erreichen semimobile oder fest installierte Peilstationen, die insbesondere von den in Kapitel 2.1 erläuterten Peilverfahren Gebrauch machen Peilunsicherheiten von unter 1°. Jedoch gilt auch hier, wie in Kapitel 2.2 dargestellt, dass eine geringe Peilunsicherheit vergebens ist, wenn sich durch ungünstige Lage der Peilorte die Triangulationsgenauigkeit reduziert.

5 Quellen

- [1] „Analyse und Lokalisierung von Funksignalen mit Hilfe eines mobilen FFT-Spektrumanalysators“, Mark Reinhard, Masterarbeit, TH Deggendorf; 2015
- [2] „Funkpeiltechnik – peilen, orten, navigieren, leiten, verfolgen“; Grabau R., Pfaff K., et al.; Frankh-Verlag, Stuttgart; 1989
- [3] Veröffentlichungen versch. Hersteller portabler Messsysteme zur mobilen Störersuche (Narda STS, Anritsu, Rohde & Schwarz, Agilent / Keysight, Tektronix)