



Bundesnetzagentur

ZY531/00161/19

Testbericht

TDOA-System

Decodio RED und TDoA

BNetzA Standort München
Prangerlstr. 12
81247 München

Thomas Hasenpusch, Augsburg-2

Version 1.1

Stand: 28.02.2020

1 Einleitung, Hintergrundinformationen

Im Februar 2020 hatten wir für 3 Wochen die Möglichkeit, ein TDOA-System von Decodio in der DSt München zu testen. Das TDOA-Netz bestand aus 3 festen Empfängerstandorten (Dienststelle München, FuMOS Grünwald und München Freimann), die jeweils ca. 9 - 12 km voneinander entfernt waren. Wir konnten das System über den von Decodio bereitgestellten Laptop bedienen, auf dem die Auswerte-Software Decodio Localizer/TDoA lief.

Die Software besteht aus zwei Teilen: Einer („Decodio Localizer/TDoA“) dient ausschließlich zur Ortung, während ein anderer („Decodio RED“) die detaillierte Analyse von Aussendungen ermöglicht, die an einem gewählten Sensor empfangen wird. Der vorliegende Test konzentrierte sich hauptsächlich auf die TDOA-Funktionalität, insbesondere im Hinblick auf einen Einsatz bei Veranstaltungsbetreuungen.

2 Systembeschreibung

2.1 Hardware

Jeder Empfangsstandort („Sensor“) war mit folgendem Equipment ausgestattet:

- Antenne(n)
- Messempfänger (optional mit mehreren schaltbaren Antenneneingängen)
- GPS-Empfänger
- LTE-Modem
- Stromversorgung (Power over Ethernet)

Der Empfänger war in einem wetterfesten Gehäuse untergebracht, das an einem Mast montiert werden kann. In demselben Gehäuse kann auch bei Bedarf das Netzteil und LTE-Modem sowie optional ein Industrie-PC (für die Verarbeitung größerer Bandbreiten) untergebracht werden.



Bild 2-1: Sensorempfänger im Gehäuse

Das Standard-Gehäuse ist jedoch kleiner als das zum Test verwendete Gehäuse und beherbergt nur den Empfänger selbst. Wenn zusätzliche Hardware im Gehäuse untergebracht werden soll, muss ein größeres Gehäuse wie das getestete Exemplar spezifiziert werden.

Als Sensorempfänger wurden SignalSharks der Firma Narda verwendet. Decodio unterstützt aber auch eine ganze Reihe alternativer Empfänger verschiedener Hersteller, u. A. R&S, Tektronix und IZT.

Die folgende Tabelle enthält die wesentlichen Technischen Daten des Sensors.

Parameter	Wert
Empfänger	Narda SignalShark
Frequenzbereich	8 kHz – 8 GHz
ZF-Bandbreite	2 MHz (bis zu 20 MHz)*
Rauschmaß, typisch (30-3000MHz)	-160 dBm/Hz
IP3 (200-2200 MHz)	+12 dBm
Externe Anschlüsse	10-48V DC (ext. Netzteil), 1 x Messantenne (N), 3 x Messantenne (SMA) GPS-Antenne (SMA), Gbit LAN (RJ45)
Abmessungen (wetterfest)	49 x 41 x 17 cm
Gewicht (wetterfest)	Ca. 7 kg

Tabelle 2-1: Technische Daten des Sensor-Empfängers

*) Im Testsystem wurde der im SignalShark befindliche Rechner zur Aufbereitung der Daten verwendet. Da dieser nur eine geringe Leistungsfähigkeit (aber dafür energiesparend ist) hat, wurde die Erfassungsbandbreite auf 2 MHz begrenzt. Wenn ein externer Rechner mit handelsüblicher Leistung am Ort der Sensoren verwendet wird, ist die volle IQ-Streaming-Bandbreite des SignalSharks von 20 MHz nutzbar. Derartige Rechner sind heute auch in so kleinen Bauformen verfügbar, dass sie mit in das wetterfeste Gehäuse des Sensors passen.

Wenn der Empfänger nicht direkt über LAN an das Messnetz angebunden werden kann, wird zusätzlich noch ein Router bzw. Mobilfunk-Modem benötigt.

Der Empfänger beinhaltet auch einen Rechner, auf dem unter Windows 10 ein Teil der Empfänger-Software läuft. Die Basiskonfiguration ist entweder durch Anschluss von Tastatur und Monitor direkt am Empfängerbaustein, oder durch Remote Desktop-Verbindung über das Netz möglich.

Das getestete System bestand außer dem Zentralrechner (Laptop) aus drei Empfängern:

- DSt (Dienststelle München mit direkter LAN-Anbindung in das Messnetz)
- Grw (FuMOS-Standort Grünwald mit LTE-Router)
- Frm (Privater Standort in München Freimann mit LTE-Router)

An allen den Standorten DSt und Grw wurde die R&S HK014 Rundempfangsantenne 80 – 1300 MHz, am Standort Frm eine Breitband-Discone verwendet.

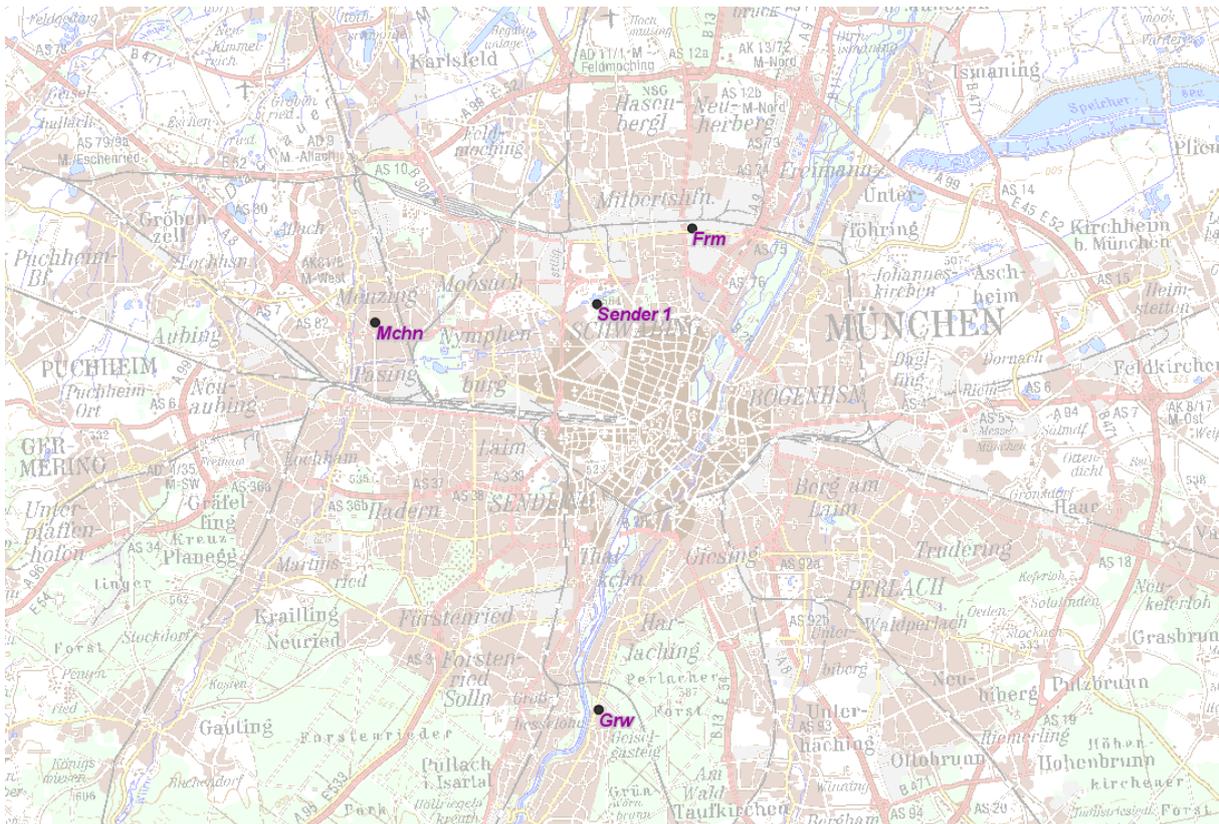


Bild 2-2: Standorte der TDOA-Empfänger und des mobilen Testsenders

2.2 Decodio Localizer TDoA-Software

Die Bedienung der einzelnen Empfänger kann direkt über die Software „Decodio RED“ erfolgen, oder gemeinsam über die Software „Decodio Localizer/TDoA“.

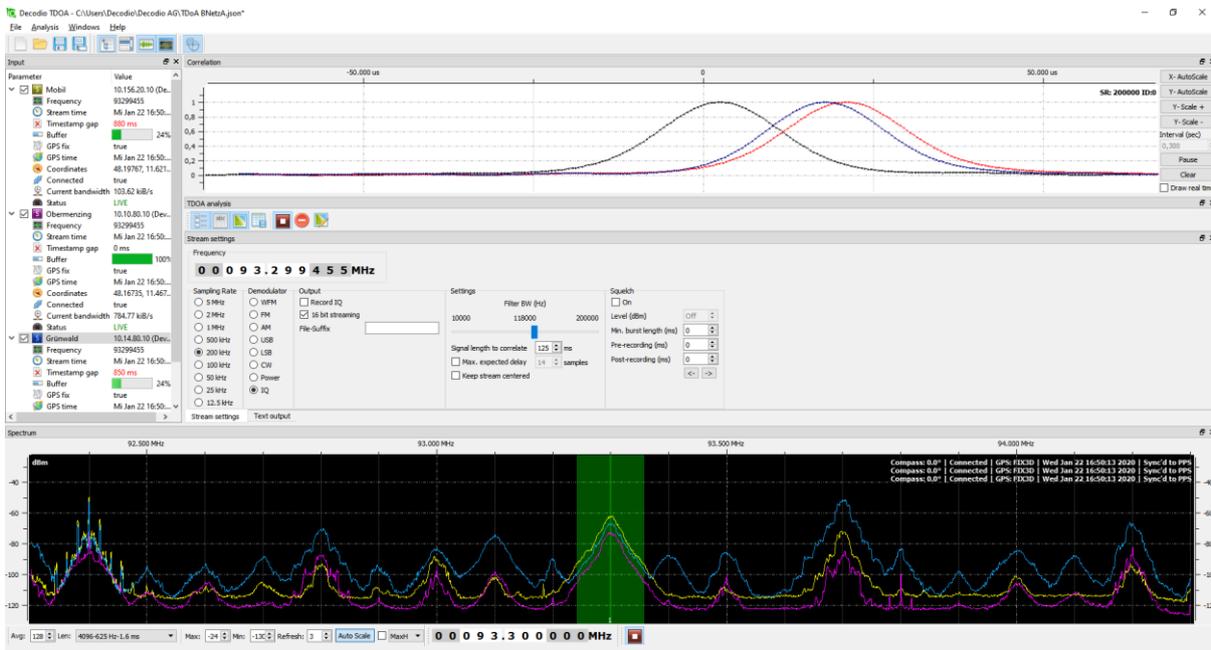


Bild 2-3: Hauptbildschirm der Software Decodio TDoA

Im linken oberen Fenster sind die installierten Sensoren zeilenweise aufgeführt. Zu jedem Sensor werden relevante Informationen angezeigt, z. B. der Verbindungsstatus, die gerade

übertragene Datenmenge, IP-Adresse u.s.w. Über dieses Fenster können die Sensoren auch direkt konfiguriert (Bandbreite, Attenuation, Antenneneingang) bzw. bearbeitet werden.

Im rechten unteren Fenster ist das live-Spektrum aller verbundenen Sensoren dargestellt, und zwar in der Farbe des jeweiligen Sensors. Hier sind Einstellungen z. B. der (Mitten-)frequenz möglich. Verändern des Spans oder der Frequenz sind durch Ziehen mit der Maus möglich oder dessen Scrollrad möglich. Außerdem kann man durch einen Doppelklick in das Spektrum die gewünschte Frequenz festlegen, auf der eine TDoA-Ortung erfolgen soll (grüner Bereich in Bild 2-3). Diese muss nicht die Mittenfrequenz des Empfängers sein, sondern kann irgendwo im Erfassungsbereich liegen. Die Frequenzauflösung des Spektrumsfensters (und damit die realisierte RBW) ist durch Setzen der FFT-Länge in weiten Schritten bis zu einer 128k FFT einstellbar.

Die Peilbandbreite und Akquisitionszeit für die Korrelation wird im mittleren Fenster eingestellt.

Im rechten oberen Fenster wird das Korrelationsergebnis (mit Cursorsen zur Zeitmessung) grafisch durch den zeitlichen Versatz der von den Sensoren eintreffenden Signale dargestellt. Dies ermöglicht eine Beurteilung der Korrelationsqualität.

Das Ortungsergebnis wird als Hyperbeln und auch als Heatmap auf einer Karte dargestellt.

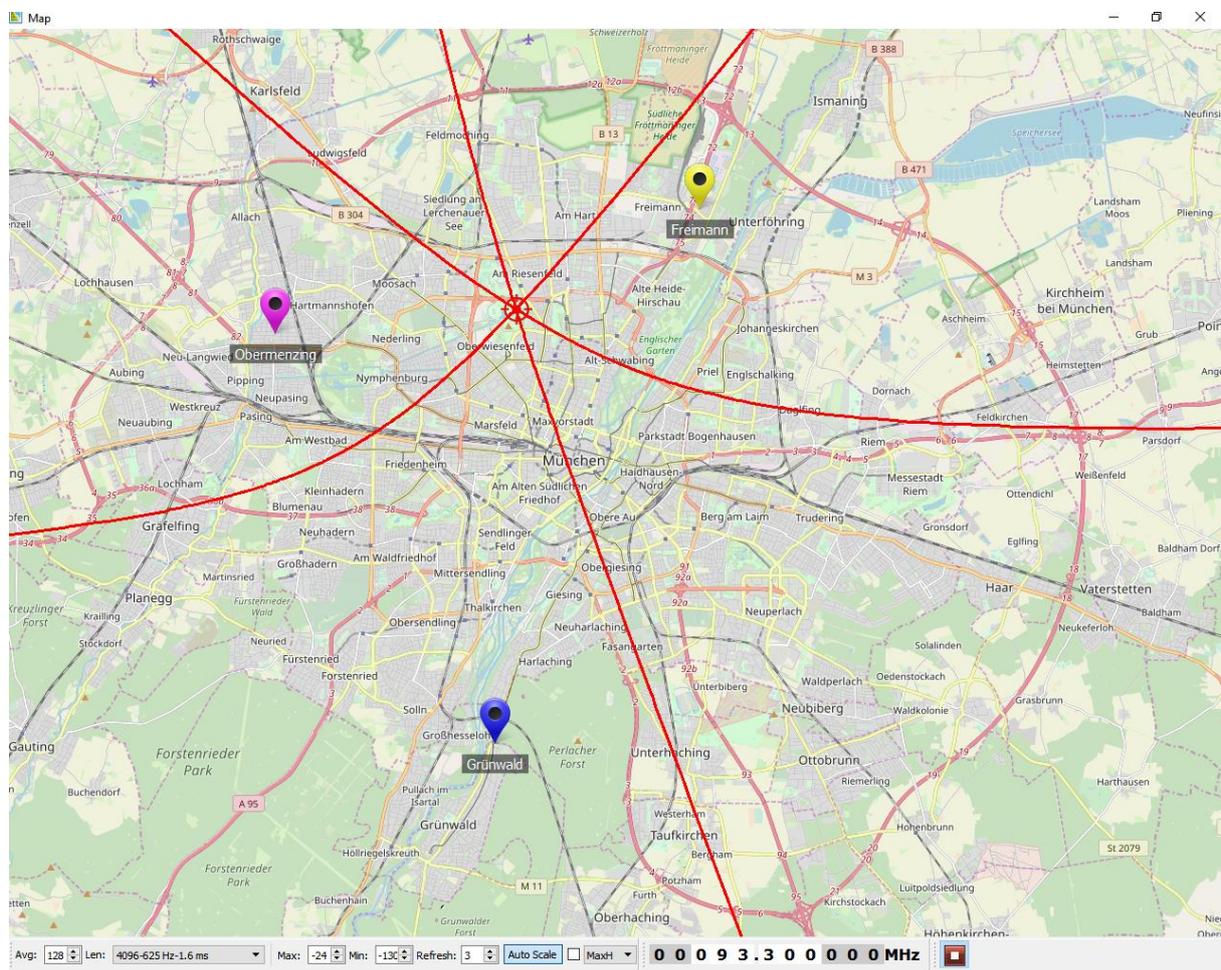


Bild 2-4: Kartendarstellung einer TDoA-Ortung

Als Kartenmaterial kann z. B. OpenStreetMap verwendet werden. Wenn der Zentralrechner eine Internetverbindung hat, werden die Kartenausschnitte automatisch geladen. Jede Kachel der geladenen Karten wird aber auch lokal gespeichert. Dadurch ist es möglich, ein Zielgebiet vorab bei bestehender Internetverbindung zu laden und die eigentliche Messung bzw. Ortung dann später ohne Internetverbindung durchzuführen.

Komplette Einstellungen des Systems können abgespeichert und direkt aus der Oberfläche heraus geladen werden.

Die Ortungsaktivität kann mit einem Squelch-Pegel versehen werden, so dass nur dann I/Q-Daten übertragen werden, wenn ein Signal diesen Pegel überschreitet. Dabei kann sogar eingestellt werden, wie lange der Squelch-Pegel überschritten sein muss, damit die Ortung beginnt. Dadurch wird vermieden, dass Knackstörungen den Squelch auslösen.

Alle Ortungsvorgänge werden automatisch gespeichert, so dass nachträglich jedes einzelne TDoA-Ortungsergebnis wieder angezeigt werden kann.

Zur Beschleunigung von Systemreaktionen werden dank einer intelligenten Flow-Control immer nur die gerade benötigten Informationen von den Sensoren zum Zentralrechner übertragen. Die Flow-Control wird realisiert, indem die Übertragungsgeschwindigkeit geschätzt und dann von den Sensoren koordiniert nur Teile der IQ-Daten übertragen werden.

2.3 Software Decodio RED

Die Software Decodio RED verbindet einen der Sensoren mit dem Benutzer. Sie bietet unter anderem folgende Möglichkeiten zur Signalanalyse:

- Scannen des aktuellen Erfassungsbereiches und automatisches Erkennen von Signalen verschiedener Standards, u. A. TETRA, Tetrapol, dPMR, DMR, POGSAC
- Demodulation des Audios aller oben erkannten digitalen Signale (außer TETRAPOL)
- Demodulation analoger Signale (AM, FM, SSB) und Durchführen von Messungen von Symbolraten und Autokorrelationen
- Aufnahme des HF-Spektrums und Audio-Streams

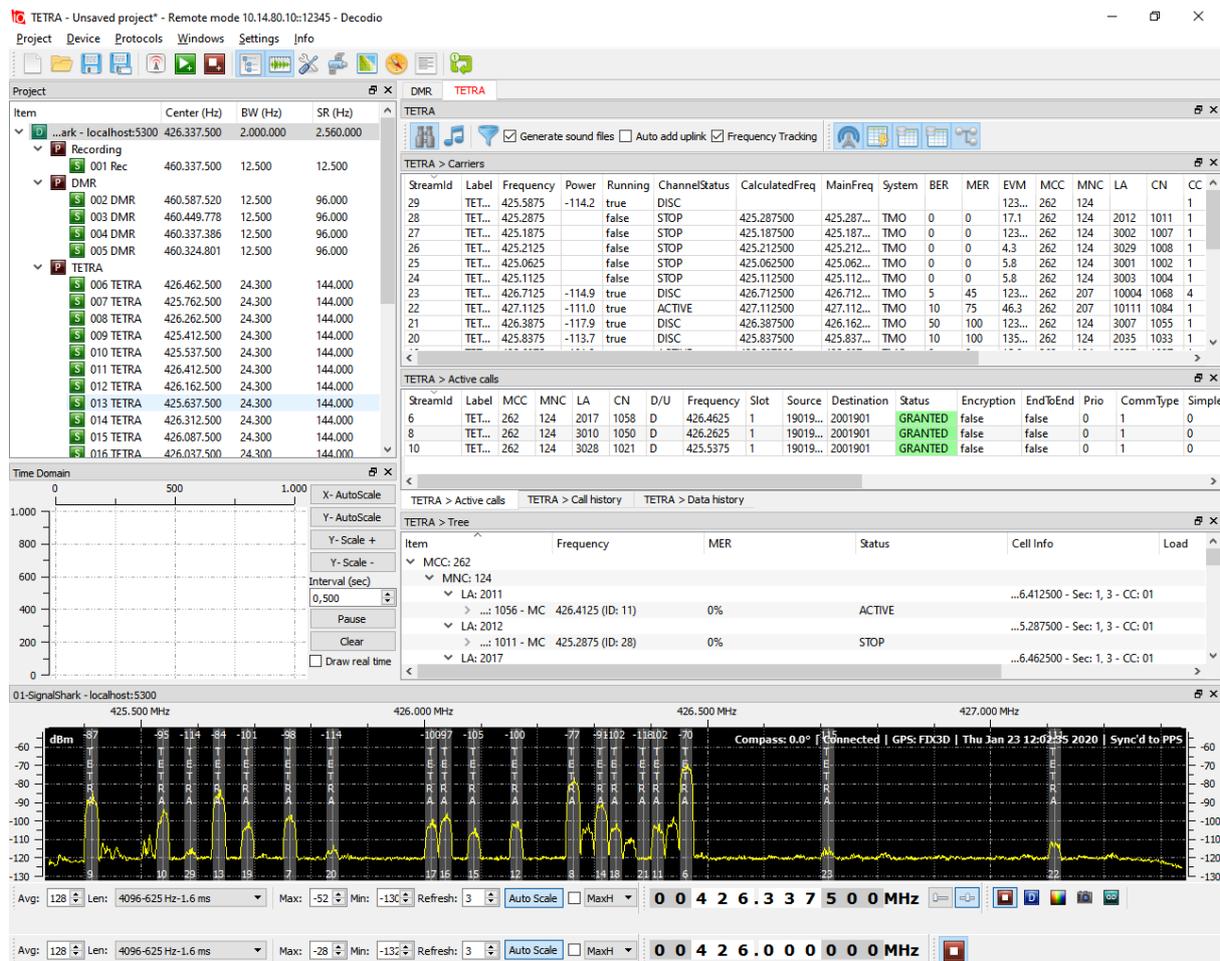


Bild 2-5: Hauptfenster der Decodio RED Software mit Analyse von TETRA-Signalen

Von allen erkannten Signalen werden die relevanten Informationen wie Color Code, Network ID, Cell-ID und momentaner Status angezeigt und laufend aktualisiert. Durch Doppelklick auf eines der erkannten Signale im Spektrumsfenster kann der gewählte Kanal direkt demoduliert werden, bei unverschlüsselten Systemen auch das Audiosignal. Dadurch hat man die Möglichkeit, in dPMR, DMR, TETRA, P25, D-STAR und NXDN hineinzuhören.

3 Test der Empfängereigenschaften

Die für uns relevanten HF-Eigenschaften des verwendeten Empfängertyps Narda Signalhark wurden in der DSt durch Beaufschlagung mit verschiedenen Signalen aus dem Messsender untersucht. Diese sind insbesondere:

- Empfindlichkeit
- Großsignalfestigkeit

Das im Datenblatt angegebene Rauschmaß des Empfängers von 14 dB konnte bestätigt werden. Damit ist der Empfänger wesentlich (ca. 10 dB) empfindlicher als alle anderen Empfänger und Analytoren ohne Vorverstärker, die im PMD derzeit im Einsatz sind. Narda bietet darüber hinaus zwar auch noch einen Vorverstärker an, der aber nur in den zum Signalhark gehörenden Antennen verbaut ist und damit im fernbedienten Modell nicht genutzt werden kann.

Die nutzbare Dynamik, also der maximal ohne Übersteuerung mögliche Pegelabstand zwischen Nutzsignal und Eigenrauschen, wurde bei einem 10 MHz breiten Digitalsignal mit 65 dB gemessen. Das ist wesentlich mehr als beim Tektronix RSA6114, und sogar 2-3 dB mehr als beim R&S ESPI und ESNR.

Übersteuerungen zeigt der Empfänger zuverlässig und genau an der richtigen Schwelle an. Es gibt eine in 0,5 dB (!) schaltbare HF-Dämpfung bis 31,5 dB. Obwohl kaum anzunehmen ist, dass es sich hier um klassische analoge Dämpfungsglieder handelt, wirkt die Dämpfung zuverlässig gegen Übersteuerung in genau dem erwarteten Maß. Durch die extrem feine Abstufung der Dämpfung kann der Empfänger in nahezu allen Situationen bis an den maximalen Arbeitspunkt herangefahren werden, um eine möglichst hohe Dynamik auch in Gegenwart von starken Signalen zu erhalten.

4 TDoA-Tests mit existierenden Sendern

Wir haben an Sendern verschiedener Systeme mit bekannten Standorten Ortungsversuche durchgeführt. Die folgende Tabelle enthält die dabei gewonnenen wesentlichen Ergebnisse.

Die durch die Sensoren aufgespannte Fläche ist mit **SD** (für Sensorendreieck) abgekürzt.

Signal / Mod. / Peilbandbr.	Frequenzbereich (ca.)	Ergebnisse
Flugfunk, Feststation außerhalb des SD / AM / 12,5 kHz	130 MHz	Gute Angabe der Richtung, aber manchmal Verortung Nahe des SD-Randes
Flugfunk, Flugzeuge / AM / 12,5 kHz	130 MHz	Bei Erfassungszeit manuell von 2 s guter Fix, auch weiter außerhalb des SD
Betriebsfunk, Feststation innerhalb des SD / FM / 12,5 kHz	150 MHz	Guter Fix bei S/N > 10 dB
Betriebsfunk, Fahrzeuge innerhalb des SD / FM / 12,5 kHz	150 MHz	Nur gelegentlich Ortungsergebnis, auch bei Pegeln, die mehr als 10 dB über Rauschen sind, aber wenn ein Fix angezeigt wird ist er meistens genau.
E-Message, Feststationen / FSK / 12,5 kHz	466 MHz	Bei Stationen innerhalb des SD guter Fix, auch bei schwachen Pegeln, außerhalb des SD und schwachen Pegeln oft nicht einmal korrekte Richtungsangabe (möglicherweise Gleichwellennetze)
Gepulstes Datensystem, Feststation außerhalb des SD / FSK / 12,5 kHz	152 MHz	Recht guter Fix auf der Richtungslinie zum Sender, springt um +/- 5 km, aber Hyperbeln schneiden sich sehr spitz (Pulslänge < 200 ms)
TETRA Basisstation, innerhalb des SD / QPSK / 25 kHz	426 MHz	Sehr guter und stabiler Fix auch bei extrem schwachen Pegeln (Signal kommt teilweise kaum aus dem Rauschen heraus)
TETRA Basisstation, leicht außerhalb des SD / QPSK / 25 kHz	426 MHz	Sehr guter und stabiler Fix auch bei extrem schwachen Pegeln (Signal kommt teilweise kaum aus dem Rauschen heraus)
TETRA Basisstation, innerhalb des SD / QPSK / 25 kHz	426 MHz	Sehr guter und stabiler Fix (Pegel aber auch recht hoch)
TETRA Basisstation, weit außerhalb des SD / QPSK / 25 kHz	426 MHz	Oft gar kein Ergebnis, aber wenn eines angezeigt wird ist die Ortsbestimmung immer brauchbar.
UKW-Rundfunksender innerhalb des SD / FM / 200 kHz	90 MHz	Sehr guter und zuverlässiger Fix, Abweichung vom tatsächlichen Standort < 50 m.
UKW-Rundfunksender außerhalb des SD / FM / 200 kHz	103 MHz	Recht guter Fix bei sehr guter Richtungsangabe. Ortung springt um ca. 500 m, aber Schnittwinkel der Hyperbeln ist sehr spitz.

Tabelle 4-1: Testergebnisse mit existierenden Sendern

Das Folgende Bild zeigt den Kartenausschnitt bei der Ortung eines Rundfunksenders. Die Heatmap zeigt den Bereich, in dem das Ortungsergebnis während ca. einer Minute gesprungen ist. Dessen Ausdehnung beträgt nur etwa 30 – 50 m.

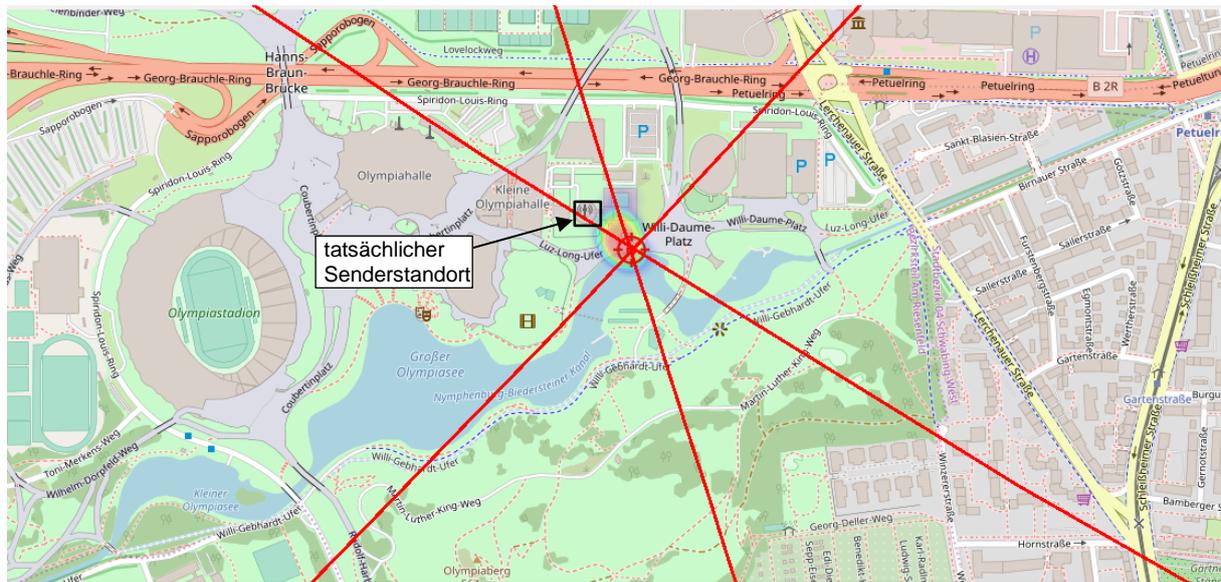


Bild 4-1: Ortung eines Rundfunksenders

5 TDoA-Tests mit eigenem Sender

Am 07.02.2020 haben wir verschiedene Signale von einem Messwagen gesendet, der sich innerhalb des Sensorendreiecks befand. Die maximale Sendeleistung (EIRP) betrug ca. 10 mW.

Signal / Mod. / Peilbandbr.	Frequenzbereich (ca.)	Ergebnisse
TETRA Handgerät, gepulstes Signal / QPSK / 25 kHz	144 MHz	Sehr guter und stabiler Fix, auch wenn das S/N unter 10 dB lag. Abweichung vom tatsächlichen Senderstandort 50 - 100 m
TETRA Handgerät, gepulstes Signal / QPSK / 25 kHz	430 MHz	Ab einem S/N von ca. 3 dB recht guter Fix.
GSM Handy, gepulstes Signal (1 Slot) / GMSK / 250 kHz	144 MHz	Kein Fix, obwohl das S/N ca. 5 dB betrug.
GSM Handy, gepulstes Signal (1 Slot) / GMSK / 12,5 kHz	144 MHz	Mit schmaler Peilbandbreite guter Fix
TETRA Basisstation / QPSK / 25 kHz	78 MHz	Sehr guter Fix auch bei sehr schwachem S/N
DECT-Station, gepulstes Signal / GMSK / 1 MHz	1240 MHz	Signal zu schwach, um an allen drei Sensoren empfangen zu werden. Kein Fix.

Tabelle 5-1: Testergebnisse mit eigenem mobilen Sender

Während der Messwagen vom Standort Olympiaberg in die Dienststelle zurückfuhr, haben wir versucht, ihn mit dem TDoA-System zu verfolgen. Ausgesendet wurde ein TETRA-Signal mit ca. 10 mW EIRP. Das Signal war bei Fahrt zwischen den Häusern der Stadt meist zu schwach, um an allen drei Sensoren empfangen zu werden. Allerdings wurde es über weite

Strecken von den Sensoren Obermenzing und Grünwald empfangen. Als Ergebnis wurde dann zumindest eine Hyperbel angezeigt. Diese schnitt den aktuellen Standort des Messwagens aber immer mit sehr hoher Genauigkeit.

6 Bewertung der TDoA-Tests

Die wesentlichen Ergebnisse der TDoA-Tests waren wie folgt:

- Wenn das Signal zu schwach für eine Peilung ist, wird kein Ergebnis angezeigt. Das verhindert Missdeutungen von falschen oder „geratenen“ Ergebnissen
- Die Genauigkeit der Ortung ist relativ unabhängig vom Signalpegel. Sobald das System eine Ortung als gültig einstuft und anzeigt, ist sie sehr genau und stabil. Diese Genauigkeit erhöht sich durch Steigerung des Signalpegels kaum.
- Das System ortet gepulste Signale genauso gut wie Dauersignale. Die Empfindlichkeit ist in beiden Fällen überraschenderweise relativ gleich.
- Signale mit schmaler Bandbreite werden fast genauso gut geortet wie mit großer Bandbreite. Es muss bei schmaler Peilbandbreite nur länger akquiriert werden, so dass die Updaterate am Bildschirm geringer wird.
- Es können auch schmalbandige AM-Signale wie Flugfunk geortet werden, wenn sie einen ausreichend hohen Signalpegel haben.
- Die Empfindlichkeit bei der Peilung digitaler Signale ist extrem hoch. Eine Ortung ist oft schon möglich, wenn sich das Signal im Spektrum praktisch nicht vom Rauschen abhebt.

Durch die intelligente Nutzung der verfügbaren Übertragungsbandbreite von den Sensoren, die keine unnötigen Daten überträgt, reagiert das System im Vergleich zu den bisher getesteten TDoA-Systemen sehr schnell. Eine erste Ortung wird in der Regel mit einer Verzögerung von ca. 2-4 Sekunden angezeigt. Danach erfolgte bei den gewählten Einstellungen der Tests mindestens ein Bildschirm-Update pro Sekunde, was auch die Verfolgung von beweglichen Sendern sowie die Ortung von Gesprächsrunden mit mehreren Teilnehmern möglich macht.

7 Fazit

Das getestete System aus Narda SignalShark- Empfängern in Verbindung mit der Decodio-Software ist durchweg positiv zu bewerten. Im Vergleich mit den bisher getesteten Systemen anderer Hersteller sind folgende positive Eigenschaften besonders hervorzuheben:

- Die SignalShark-Empfänger haben hervorragende HF-Eigenschaften. Empfindlichkeit und Großsignalfestigkeit sind sogar besser als bei den meisten anderen Geräten im Einsatz beim PMD.
- Die TDoA-Software (Decodio Localizer/TDoA) bietet einen großen Funktionsumfang und ist dabei sehr benutzerfreundlich sowie intuitiv bedienbar.
- Alle zur Ortung notwendigen Einstellungen sind direkt zugänglich. Alle während einer Ortung erforderlichen Informationen sind auf dem Hauptbildschirm und der Karte verfügbar.
- Das System benötigt zur Kartendarstellung keine Verbindung ins freie Internet. Das Kartenmaterial für das Veranstaltungsgebiet kann vor dem Einsatz entweder bei bestehender Internetverbindung automatisch geladen und gespeichert, oder per USB-Stick auf den Auswerte-PC kopiert werden.
- Die hohe Geschwindigkeit, mit der das System Ortungen durchführt, erlaubt sogar den interaktiven Betrieb bei Wechselgesprächen mit nur wenigen Sekunden Sendezeit pro Station.
- Das System kann gepulste Signale genauso gut und mit etwa der gleichen Empfindlichkeit orten wie Dauersignale.
- Das System funktioniert auch bei schmalbandigen FM- und AM-Signalen zufriedenstellend.
- Die Ortungsgenauigkeit ist sogar bei schwachen Signalpegeln gut.

Insbesondere für den gedachten Einsatz bei der Betreuung von Großveranstaltungen wäre ein TDoA-System wie das hier getestete eine große Hilfe für den Messdienst vor Ort.

Bei Großveranstaltungen werden die meisten Störungen von Sendern (und nicht von elektronischen Geräten) verursacht. Dasselbe gilt für Aussendungen nicht zugeteilter Sender, die oft gesucht werden müssen. Da das Veranstaltungsgelände meist räumlich begrenzt ist und die gesuchten Aussendungen fast immer vom Gelände selbst kommen, wären deren Signale praktisch immer an allen Sensoren zu empfangen, was eine TDoA-Ortung möglich macht.

Mit derzeitigen Mitteln (AoA-Peiler, Richtantennen) bekommt man maximal die Richtung heraus, aus der ein Signal kommt. Um den Standort herauszufinden, muss man mit dem portablen Empfänger in der Peilrichtung nach Feldstärke gehen, was jedoch bei den dicht besetzten Veranstaltungsorten meist sehr zeitaufwändig ist. Mit einem TDoA-System hätte man gleich eine Information, in welchem Gebiet sich der gesuchte Sender befindet.

Unserer Ansicht nach wäre die Beschaffung eines Systems sinnvoll. Im Vergleich mit den bisher getesteten TDoA-Systemen ist das System von Decodio mit Abstand das Beste.

Eine detaillierte Liste der Anmerkungen, Fehler und Vorschläge befindet sich im Anhang (getrennte Excel-Datei).

Thomas Hasenpusch