

ENAMS - ein innovatives flächendeckendes Störfeldstärkenmesssystem

Prof. Dr.-Ing. Michael Hartje, Hochschule Bremen, Deutschland

Dipl.-Ing. Klaus Eichel, DARC, Deutschland; Dr. Andreas Lock, DARC, Deutschland

1 Einleitung und Motivation

Man Made Noise (MMN) und dessen Abstrahlung über das elektrische Energieversorgungsnetz, Informationsnetzwerke (VDSL, Kabelfernsehen) ist eine vermeidbare Störung der primär an Funkdienste zugewiesenen Frequenzbereiche bis 30 MHz [1]. Es besteht die Sorge, dass die Überlagerung weiterer Anwendungen in vielen Haushalten den MMN-Pegel weiter ansteigen lässt [2]. Zu den schon in den 1960-ziger Jahren bekannten Störquellen sind deutlich mehr leistungselektronische Anwendungen mit anderem Störpotenzial hinzugekommen [3]. Der vorliegende Beitrag berichtet über das Electromagnetic Noise Area Monitoring System (ENAMS). Dies beinhaltet Konzept und Realisierung für ein langfristiges Monitoring elektromagnetischer Störungen im Frequenzbereich zwischen 50 kHz und 30 MHz [4]. Seit mehr als einem Jahr sind eine größere Anzahl von Anlagen über die Bundesrepublik Deutschland verteilt aufgestellt und werden aktuell betrieben. Durch Anwendung der ITU Regulations [5] und ein daran angelehntes Messverfahren mit reproduzierbarem Wandlungsfaktor der als Feldsensoren verwendeten kurzen Antennen wird der gesamte Frequenzbereich mehrfach in der Stunde erfasst und die Messdaten in einem Server gesammelt.

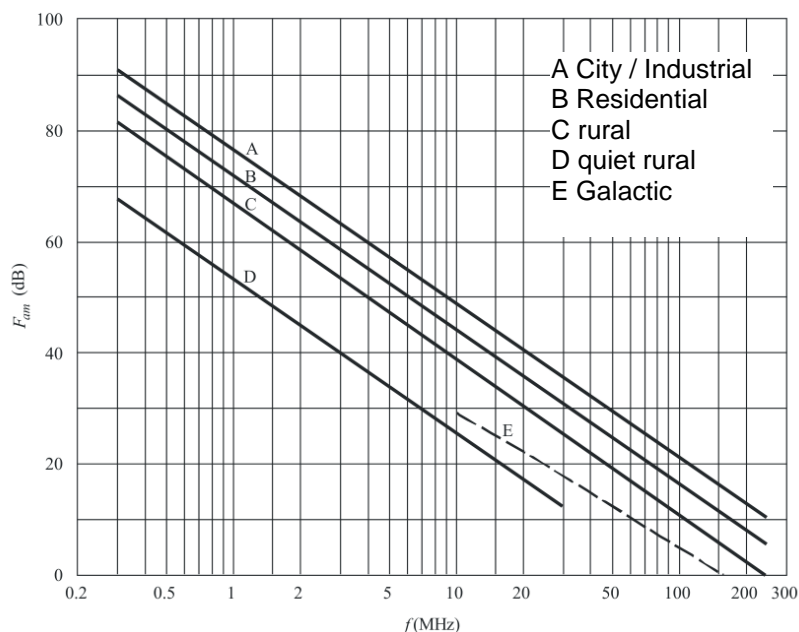


Bild 1: Darstellung der mittleren Rauschzahl über der Frequenz (Auszug aus der ITU-R P.372 [1])

Die inzwischen mehr als 50 Messstandorte sind auf drei ITU-R P.372-Kategorien, Bild 1, (City/Industrial, Residential, Rural) verteilt und sollen für die kommenden Jahre dort dauerhaft in Betrieb bleiben. Diese oberen 3 Kategorien sind an Orten zu erwarten, an denen u.a. auch Amateurfunkdienst betrieben wird.

Das Bild 1 zeigt im doppelt logarithmischen Maßstab den Verlauf der mittleren Rauschzahl F in dB über der Frequenz, wie er durch die Summe aller Störungen in den 1960-ziger Jahren gemessen und festgelegt worden ist und somit auch heute noch Grundlage der Planungen von Funkverbindungen ist.

Ziel von ENAMS ist es, den momentanen Zustand der MMN-Störpegel in diesen Kategorien statistisch gesichert zu erfassen und zu beschreiben, welche Änderungen über das Jahr und in den kommenden Jahren auftreten. Finanziert wurde das Projekt bisher vom Deutschen Amateurradio Club (DARC) und aus privater Initiative und Firmenspenden. Inzwischen sind auch europäische und außereuropäische Standorte (USA, Neuseeland) hinzugekommen und haben den Betrieb aufgenommen.

2 Neugigkeiten des Verfahrens

Das Verfahren nutzt einen in [6] als Konzept, in [7] mit einem Eingangsteil und in [8] im Aufbau und mit Messergebnissen beschriebenen, eigenentwickelten E-Feldsensor. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen mit aktiven, magnetische Komponenten aufnehmenden Rahmenantennen in [9] und in [10] verwendet sowie horizontalen aktiven Dipolantennen[10], wird in Anlehnung an [1] und [5] hier ein kurzer, vertikaler und aktiv impedanzgewandelter Strahler von 1 m Länge in Höhe von 1 m über einem erdgebundenen Radialnetz mit 7 m Durchmesser verwendet. Untersuchungen haben gezeigt, dass damit ein reproduzierbarer Antennenfaktor (k-Faktor, Wandlungsmaß) erreicht wird, wie in [6] berechnet und in [8] erläutert.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Wahl der Messstandorte gelegt. Die nach einem Aufruf im Kreise der über 30000, im DARC vertretenen Funkamateure, gemeldeten Standorte wurden einzeln beurteilt hinsichtlich der zu erfüllenden Kriterien:

- bestimmte ITU-Kategorie (City, Residential, Rural),
- Antenne ebenerdig mit Radialnetz,
- vertikaler Winkel gegen Bebauung und Bewuchs aus Sicht des Sensors kleiner als 45°,
- Abstand zur Bebauung,
- natürlicher Grasboden für den Standort des E-Feld-Sensors,
- Einsatz des vorgegebenen abgeglichenen Messsystems über mehrere Jahre ausgewählt.

Während manche Veröffentlichungen über die im Labor und dann mobil eingesetzten Geräte und deren Messergebnisse wie z.B. in [9] und [10] berichten, wurde hier ein neu entwickeltes, autark, auf der Grundlage eines SDR-Systems mit digitaler Signalverarbeitung arbeitendes FPGA-basiertes Messsystem eingesetzt. [11] Das eigentliche Messsystem ist kompakt und vollständig fernwartbar in einem kleinen Gehäuse mit geringer Leistungsaufnahme untergebracht [7].

3 Messsystem ENAMS

ENAMS verwendet, wie erwähnt, gegenüber herkömmlicher Laborausstattung zur EMV-Messung neuartige Messprinzipien, weil es zur Erfüllung der Aufgabe um die zeitlich lang anhaltende Erfassung des Grundstörpegels von statistisch kurzzeitig konstanten Quellen geht. Messungen der Störbeeinflussung und Zuordnung zu einer Quelle ist damit nur mittelbar möglich, da im Bereich unterhalb 30 MHz in den heute angewendeten EMV-Normen nur leitungsgebundene Untersuchungen, aber keine Messung der E-Feldstärke vorgesehen sind.

3.1 Systemkonzept

Das Systemkonzept in Bild 2 besteht aus mehreren Messempfängern an verschiedenen Standorten sowie aus einem redundant ausgelegten Serversystem zur Datenspeicherung, Verarbeitung und Ergebnispräsentation mit Webschnittstelle [12]. Das Bild 2 zeigt das Systemkonzept mit E-Feld-Sensoren, autarken Empfängern und redundanten ENAMS-Server. (www.enams.de)

3.2 Eigenschaften des ENAMS Messsystems im Überblick

ENAMS zeichnet ferner mit allen Messanlagen alle 10 min das komplette Spektrum mit RMS und PEAK-Bewertung für jeweils 1 s Messdauer mit einer Auflösung von 305 Hz auf. Aus den Messergebnissen kann in einem ersten Schritt durch statistische Signalverarbeitung der im Frequenzbereich zwischen mehreren Signalen erkennbare Grundstöörpegel der 1-s-Messzeit bei RMS- und PEAK-Bewertung ermittelt werden.[4] Die geringe verwendete Basisbandbreite von 305 Hz erlaubt es auch bei dicht aneinander befindlichen Sendern den momentanen Grundstöörpegel in einem Frequenzabschnitt von einigen zehn Kilohertz zuverlässig zu bestimmen.

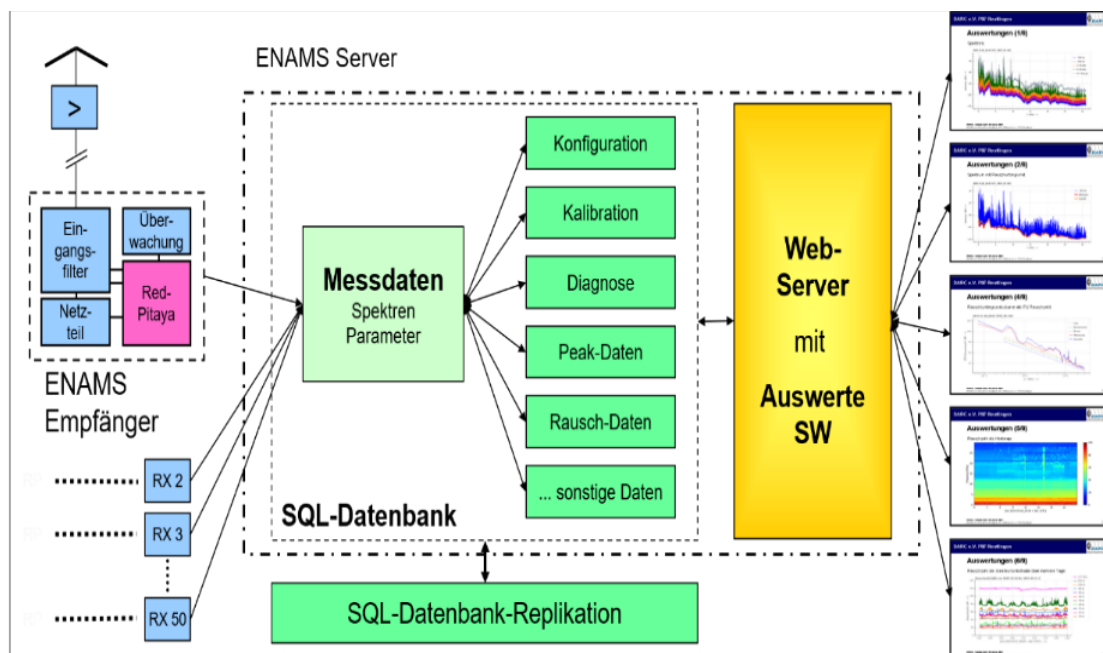


Bild 2: Systemkonzept des ENAMS

3.3 Eingangsteil und analoge Vorstufen

Durch die Verwendung eines doppelt geschirmten, 25 m langen Koaxkabels mit starker Mantelwellensperre zwischen E-Feldsensor (Antenne) und Messgerät auch bei individueller Kalibrierung jedes Messsystems vor der Auslieferung an den jeweiligen Standortgeber, konnte eine einheitliche Übertragung von der Antenne zum Messgerät erreicht werden. Die Messungen für die Kalibrierung sind im Server hinterlegt und erlauben die notwendige Korrektur der jeweiligen Messergebnisse.

Zur Ausweitung des Dynamikbereiches wurde der Frequenzbereich von 50 kHz bis 30 MHz in ein sich überlappendes Unter- und ein Oberband in einer Eingangsfrequenzweiche aufgeteilt. Beide Bänder werden in der Verarbeitung mit den Kalibrierdaten zu einem durchgehenden Spektrum zusammengesetzt und gespeichert. Im Unterband ist eine etwas geringere Signalverstärkung verwendet.

Mit Hilfe der Auswertung von Amplituden von ausgewählten Langwellensendern sowie einer Messung von im System erzeugten Sinussignalen auf mehreren Frequenzen nach jeder Messung kann eine Überwachung der analogen Betriebsparameter erreicht werden. Ggf. ist ein Vergleich mehrerer Stationen in einer Region möglich.

3.4 Messgerät

Das Messgerät besteht aus Antenne, sowie analogem und digitalem Teil. Der Digitalteil arbeitet als selbständiges und fernwartbares FPGA-basiertes Linux-System. Es besteht aus einem Redpitaya mit einer Netzwerkschnittstelle und verbindet sich mit dem ENAMS-Server über das jeweilige, vor Ort befindliche Netzwerk. Eine Messung von einer Sekunde mit Frequenzauflösung von 305 Hz wird im Redpitaya aufbereitet und in einer lokalen Datenbank auf etwa 275 kByte für das gesamte HF-Spektrum reduziert. Die Messung enthält neben der RMS-Bewertung auf verschiedenen Verfahren beruhende PEAK-Bewertungen mit geringerer Auflösung sowie Diagnose- und Systemdaten. Sollte der Server zeitweise nicht erreichbar sein, kann im Messgerät mehrere Tage zwischengespeichert werden und automatisch übertragen werden.

Die Messung wird in 30 aufeinander folgenden Segmenten von jeweils 1090 kHz Breite durchgeführt. Da ENAMS die MMN-Störpegel erfassen will, entsteht daraus die Eigenschaft, das lokale Schaltimpulse und auch fernübertragene Gewitterimpulse lediglich ein 1 MHz-Segment in der Amplitude anheben können. Die Einzelmessungen erfolgen in Blöcken von 8 bis 12 Einzelmessungen mit einem folgenden Verarbeitungsschritt und sind nach insgesamt 5 min beendet. Alle Einzelmessungen sind auf die Mikrosekunde genau zeitlich erfasst. Weitere Messverfahren und eine Pegelüberwachung schließen sich an.

3.5 Datenbank- und Auswerteserver

Der Datenbankserver ist redundant ausgelegt. Nach Annahme der Messungen werden Auswertedaten unter Verwendung der spektralen Kalibrierdaten vorbereitet und täglich in ein Ergebnis zur Präsentation auf der Webseite aufbereitet. Aus den RMS-bewerteten, hoch aufgelösten Spektren wird mit statistischen Verfahren der „Noisefloor“ in Abschnitten von einigen zehn kHz ermittelt, gespeichert und zur Darstellung aufbereitet. Um höhere Empfängerbandbreiten für die Darstellung und den Vergleich mit bei Funkamateuren vorhandenen Empfangsgeräten und Laborgeräten zu erlangen, werden die hoch aufgelösten Spektraldaten mit der gewünschten Bandbreite „gefaltet“.

Neben der Spektraldarstellung sind verschiedene weitere Darstellungen der täglich genommenen 144 Messung auch auf der Webseite möglich. So können die „Standortgeber“ sich selbst einen Überblick verschaffen.

Wegen der im doppeltlogarithmischen Maßstab linear fallenden Referenzkurven für den MMN (Bild 1) haben sich Darstellungen mit relativem Bezug zum Verlauf der Kategorie „rural“ als vorteilhaft herausgestellt. Damit lassen sich auch übersichtliche „Heatmaps“ erstellen. (Bild 5)

3.6 Kalibrierung und Genauigkeit

Jedes Messgerät wurde mit dem Verbindungskabel zur Aktivantenne vor der Auslieferung vermessen. Diese Kalibrierdaten dienen der Korrekturrechnung. Eine Auswertung der Kalibriermessungen aller bisher in Betrieb gegangener Anlagen zeigt eine Abweichung der zu erwartenden Messergebnisse über alle Anlagen kleiner als 2 dB. Die größte Messunsicherheit besteht in der Umgebung des E-Feldsensors [13]. Der Sensor mit seiner elektrisch kurzen Antenne entspricht den Vorgaben der ITU. Eine Überprüfung ergab einen zu vernachlässigenden Einfluss des Erdbodens.

4 Messergebnisse

Zur Erläuterung der unterschiedlichen Darstellungsformen auf der Webseite wurde für die ersten Darstellungen ein Standort bei Bonn mit der Einstufung „residential“ (Wohngebiet) am 4. April 2022 mit internen Messstellen-Nummer 040 hier ausgewählt.

Das Bild 3 zeigt den Amplitudengang der gemessenen E-Feldstärke mit 2,75 und 9,15 kHz Messbandbreite als 1-s-RMS-bewertetes Spektrum. Der Abstand beider Kurven von 5,2 dB

ergibt sich aus dem Bandbreitenunterschied. Erst oberhalb 25 MHz fällt die Amplitude von etwa 20 dB μ V/m auf etwa 5 dB μ V/m bei 30 MHz. Auffällig sind auch die Absenkungen bei 18, 21, 24 und 28 MHz. Diese stimmen mit den Amateurfunkbändern überein. Sogenannte „regulierte Quellen“ (VDSL, PLC in Deutschland) blenden im zugelassenen Betriebsmodus die Nutzung der Amateurfunkbereiche aus, was zu einer Absenkung der Amplituden um ca. 20 dB und teilweise mehr führen kann. „Unregulierte Quellen“, wie z.B. leistungselektronische Steckernetzteile, sorgen mit Ihrem Spektrum bis in das Gebiet von GHz hinauf jedoch auch für ein Auffüllen dieser „Notches“.

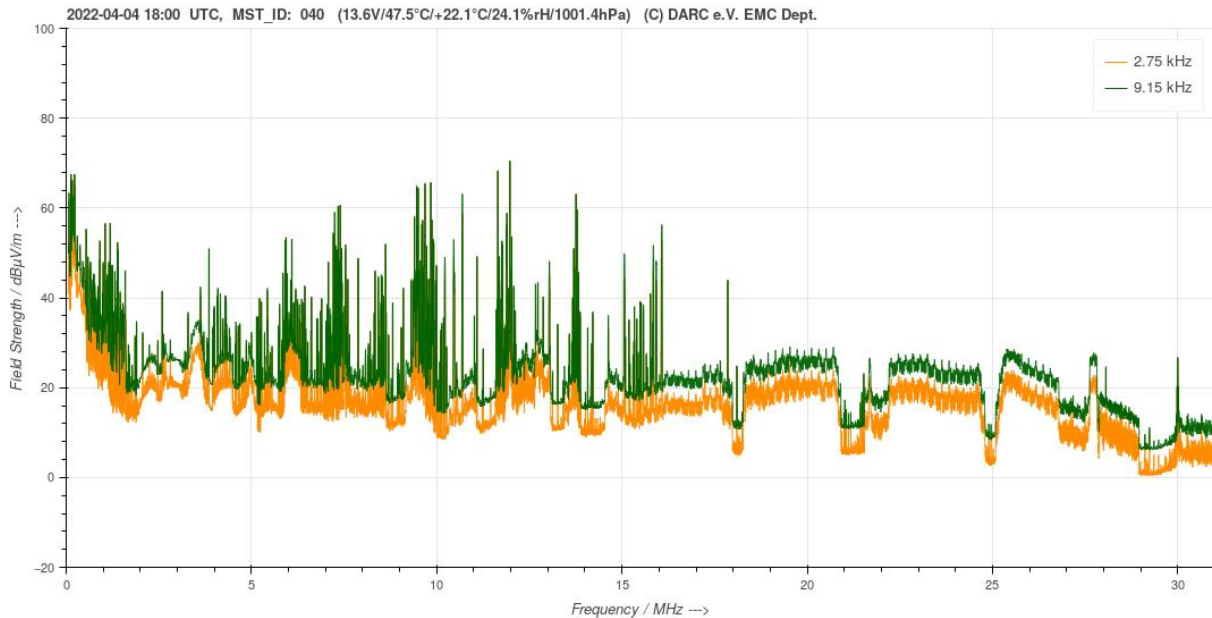


Bild 3: Darstellung der gemessenen E-Feldstärke des 1-s-RMS-bewerteten Spektrums mit Messbandbreite 2,75 und 9,15 kHz am 4. April 2022 um 18:00 UTC in der Nähe von Bonn an einem „Residential“-Standort.

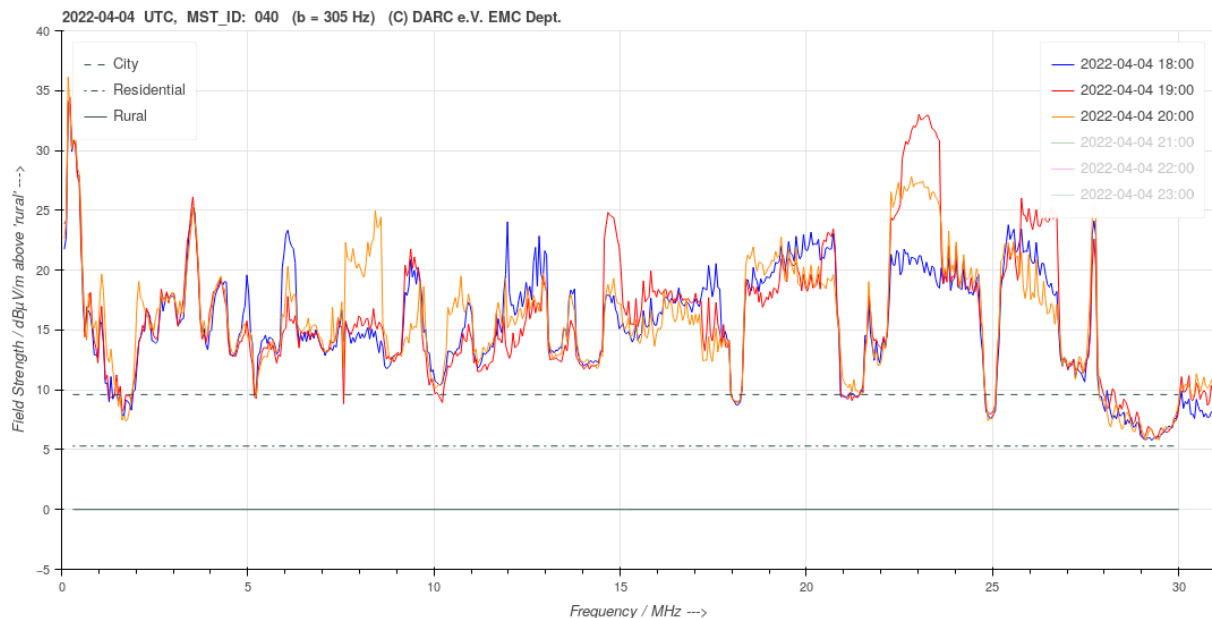


Bild 4: ITU-Noisefigure über der Frequenz zu 3 ausgesuchten Zeiten von 18 bis 20 Uhr GMT am 4. April 2022 in der Nähe von Bonn an einem „Residential“-Standort.

Das Bild 4 zeigt an 3 ausgewählten Zeiten (18, 19 und 20 Uhr UTC) die ermittelte ITU-Noisefigure relativ mit Bezug zu ITU-Rural. Deutlich erkennbar sind wieder die Notches um die Amateurfunkbänder herum bei 10, 14, 18, 21, 24 und 28 MHz. Die 3 Messkurven haben jedoch

zueinander Abweichungen von bis zu 15 dB. Daraus wird nachvollziehbar, dass eine punktuelle Messung auf nur wenigen ausgesuchten Frequenzen und zu bestimmten Zeitpunkten keine abgesicherten Aussagen erlauben kann.

Dazu zeigt das Bild 5 einen Tagesgang der ITU-Noisefigure relativ zu ITU-Rural gewonnen aus den typisch 144 Messungen des 4. April an Anlage Bonn, Typ Residential. Im Vergleich mit Bild 4 wird sichtbar, dass mit Bezug zur Kategorie Residential das gesamte Bild einen dominant blauen bis hellblauen Farbton (+5 dB_{rural}) aufweisen müsste. Das Bild 4 zeigt deutlicher, dass im Durchschnitt der 3 Messzeitpunkte Amplituden mit 15-25 dB oberhalb Residential gemessen worden sind und nur in den oberen Amateurfunkbändern das Niveau „City / Industrial“ (Residential + 5 dB) erreicht wird.

Die hellblauen bis grünen Streifen im Bild 5 auf diesen oberen Amateurfunkbändern zeigen das für den gesamten Tag an.

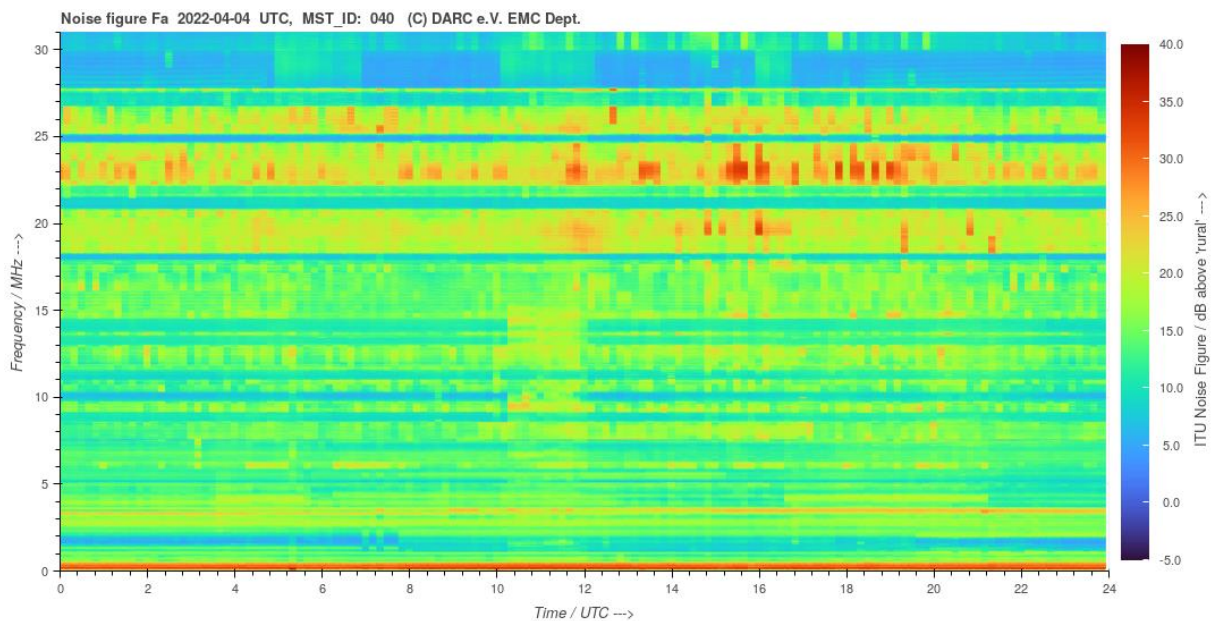


Bild 5: Tages-Heatmap der relativen ITU-Noisefigure oberhalb „Rural“ über Zeit und Frequenz am 4. April 2022 in der Nähe von Bonn an einem „Residential“-Standort.

Das Bild 6 zeigt im Vergleich zu Bild 5 deutlich blaue bis dunkelblau-schwarze Bereiche auf. Erwartet werden darf in dieser Kategorie "Rural" ein dominant blaues Bild. Die grünen horizontalen Striche zeigen eine Anhebung des Rauschpegels innerhalb der Rundfunkbänder bei 7,3, 9,7, 12, 13,5 und 17 MHz an. Der dunklere Bereich von 6 bis etwa 18 Uhr GMT von 0 bis 10 MHz weist auf die Ausbreitungsdämpfung der Ionosphäre für die tiefen Frequenzen hin. Gleichfalls zeigen die "hellblauen Wolken" die Übertragung von weit entfernten Störquellen über die Ionosphärenausbreitung an. Mit dem Sonnenstand ändert sich die maximal nutzbare Übertragungsfrequenz für "breitbandige Störquellen" im Verlauf des Tages bis hoch zu 30 MHz zwischen 10 bis 12 und 16-18 Uhr GMT. Ab 20 Uhr GMT wird die Ionosphärenübertragung auf Frequenzen unterhalb 15 MHz begrenzt. Die unregelmäßigen Schleier vormittags hängen mit der Sonnenaktivität und der Ionosphäre des gerade beginnenden 25. Sonnenfleckenzykluses zusammen. Die "maximum usable frequency for 3000 km" verläuft parallel zum oberen Ende des Schleiers.

Sichtbar ist weiter, dass die abendlichen, weit entfernten Störquellen (vermutet: Afrika, Amerika) den gemessenen Störpegel um etwa 5 bis 7 dB über die Kategorie Rural anheben können.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Festlegungen für MMN-Quellen immer eine internationale Übereinkunft sein muss, da Millionen von Haushaltsgeräten auch aus anderen Kontinenten mit leistungselektronischen Steckernetzteilen als unregulierte Störquellen wegen

des unmittelbaren "Antennenanschlusses" (Versorgungsnetz) auch weit entfernt Störpegel beeinflussen können.

5 Ausblick

Im Weiteren wurden messgeräteübergreifende statistische Auswertungen für die 3 ITU-Kategorien sowie zeitliche Entwicklungen der Rauschpegel aus den Datenbanken abgeleitet. Die Spektralmuster bestimmter auffälliger Störquellen können heute bereits bestimmten technischen Systemen zugeordnet werden: z.B. LED-Straßenlaternen, Solaranlagen mit ihren "Optimierern" unterschiedlicher Hersteller, Elektro-KFZ-Ladestationen, unterschiedliche Fabrikate von PLC-Systemen in der Umgebung der Messstandorte, xDSL und Haushaltsgeräte. Die ansatzweise Darstellung der bisher gesammelten Erkenntnisse würde im Umfang einen eigenen Beitrag erforderlich machen.

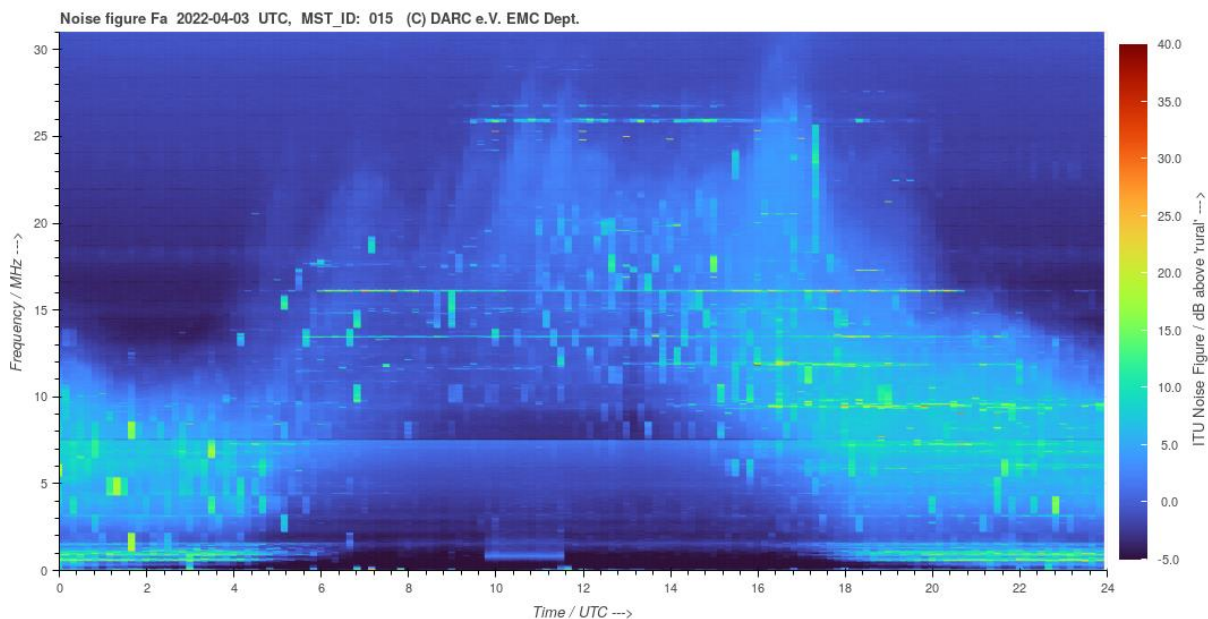


Bild 6: Tages-Heatmap der relativen ITU-Noisefigure oberhalb „Rural“ über Zeit und Frequenz am 3. April 2022 in der Nähe von Landshut an einem „Rural“-Standort.

Ergebnisse der außerhalb Deutschlands betriebenen ENAMS-Standorte zeigen bisher keine "regulierten" Störquellen und deuten damit auch deutlich höhere Störpegel in den primär dem Amateurfunkdienst zugewiesenen Frequenzbändern an. Dies dürfte sicherlich die nationalen Regulierungsbehörden in absehbarer Zeit interessieren.

6 Zusammenfassung

Der Amateurfunkdienst wird zumeist ohne besondere Grundstücke und besondere funktechnische Anlagen mit großem Abstand zur allgemeinen Bevölkerung betrieben. Die häufig auch die gesetzlichen Bestimmungen verletzenden MMN-Störquellen können somit zu einer Beeinträchtigung des Amateurfunkdienstes und anderer Funkdienste mit primären Nutzungszuweisungen führen.

Das hier erläuterte neu entwickelte MMN-Messsystem ENAMS ist seit über einem Jahr mit mehr als 50 Stationen in Deutschland im Dauerbetrieb. Das europäische Ausland sowie einige überseeische Anlagen befinden sich im Aufbau bzw. schon im Betrieb und speisen in die ENAMS-Datenbank mit ein. Die Voraussetzungen für eine mehrjährige Beobachtung der Entwicklung von MMN-Rauschpegel und auftretenden Störquellen sind im Rahmen dieses ersten Schrittes im Projekt geschaffen worden.

Die neu entwickelte E-Feldsensortechnik und die Kontrolle der Aufstellungsweise mit Bezug zu den ITU-Recommendations hat sich bewährt. Die aufgebauten Systeme zeigen auch nach mehr als einem Jahr Betrieb keine nennenswerten Abweichungen der Amplituden von den Kalibrierdaten, so dass das System insgesamt in der Lage ist, E-Feldstärkemessungen mit einer absoluten Genauigkeit von 1 dB μ V/m durchzuführen. Die Überwachungsmöglichkeiten haben sich bereits bewährt und zeigen die erwartete Zuverlässigkeit.

Es lässt sich mit den ersten Ergebnissen der Auswertung bereits deutlich erkennen, dass von 50 kHz bis etwa 10 MHz "Rauschteppiche" ohne die Notches der regulierten Störquellen dominant sind. Die intensiv eingesetzte, aber teilweise nicht marktkonforme Haushalts-elektronik und andere technische Systeme können dafür die Ursache sein. Aber auch regulierte Störquellen können durch ungeeignete Installation die Störpegel massiv anheben.

Das ENAMS-Projekt ist mit geringen finanziellen Mitteln des Deutschen Amateurradio Clubs (DARC) unterstützt aber von einer großen Zahl von ungenannten, unermüdlichen, unbezahlten, ehrenamtlichen und freiwilligen Mitarbeitenden auch an den Messstandorten getragen worden und wird weiter von diesen vorangebracht. Der Frequenz- und Funkschutz ist ihnen das wert. Diesen ist das System zu verdanken.

Literaturangaben

- [1] *RECOMMENDATION ITU-R P.372-15 - Radio noise*. ITU. 2021.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-15-202109-!!!PDF-E.pdf
- [2] Entfellner, C.; Eichel, K.: *Mess-System für elektromagnetische Störungen*. cqDL. 2017. H. 12, S. 12.
- [3] Hartje, M.: *Grundlagen der Messung von Störungen mit ENAMS*. cqDL. 2021. H. 1, S. 47-49.
- [4] Hartje, M.; Eichel, K.: *Konzept für das langfristige Monitoring von elektromagnetischen Störungen im Bereich von 50 kHz bis 30 MHz*. e & i. Elektrotechnik und Informationstechnik. 2019. H. 8, S. 345-351.
- [5] *ITU - R-REP-SM.2155-2009 Man-made noise measurements in the HF range*. 2009.
https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2155-2009-PDF-E.pdf
- [6] Logemann, J.: *Aktive KW-Empfangsantenne*. cqDL. 2020. H. 6, S. 43.
- [7] Logemann, J.: *Das ENAMS-Projekt im Detail*. cqDL. 2020. H. 6, S. 46.
- [8] Logemann, J.: *Die Antenne – wichtiger Teil des System*. cqDL. 2020. H. 7, S. 42.
- [9] *Research - Analysis-of-BT-Openreach-VDSL_Redacted*. Ofcom. 2017.
https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0013/102640/Analysis-of-BT-Openreach-VDSL_Redacted.pdf
- [10] Fockens, T. W. H.; Zwamborn, A. P. M., Leferink, F.: *Measurement Methodology and Results of Measurements of the Man-Made Noise Floor on HF in The Netherlands*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2019. H. 2, S. 337-343.
- [11] Hartje, M.: *ENAMS – Messsystem für die elektromagnetische Umwelt (2) -- Messverfahren und Software des Messsystems*. cqDL. 2021. H. 8, S. 38-45.
- [12] Eichel, K.; Logemann, J., Lock, A.: *ENAMS - das Messsystem für die elektromagnetische Umwelt*. cq DL. 2021. H. 8, S. 6-13.
- [13] Lock, A.: *Überlegungen zur Mess-Toleranz*. cqDL. 2020. H. 9, S. 58-59.