

## HNAP4PlutoSDR - HAMNET auf 70cm mit dem PlutoSDR

Jann Traschewski, DG8NGN

*Nachdem das Projekt „NPR – New Packet Radio“ von Guillaume, F4HDK, unseren 200-kHz-Duplexkanal im 70-cm-Amateurfunkband wieder stärker belebt hat, gibt es nun mit der Implementierung des „HAMNET Access Protocol“ für den ADALM Pluto SDR (siehe auch Titelthema CQ DL 6-2020) eine weitere Möglichkeit, höhere Datenraten beim Zugang zum HAMNET auf 70-cm zu realisieren.*

Das DARC VHF/UHF/SHF-Referat bemüht sich seit einigen Jahren um eine Aktivierung der Duplex-Frequenz 439,700 MHz (Knoten) / 434,900 MHz (Nutzer) mit je 200 kHz Bandbreite für den Zugang zum HAMNET im 70-cm-Band [1]. Vor allem für HAMNET-Interessierte ohne „line-of-sight“-Bedingungen zum nächsten HAMNET-Knoten eröffnet es eine Möglichkeit am HAMNET über Funk teilnehmen zu können. Zuletzt wurde der Sachstand auf der HAMNET-Tagung 2019 in Passau zusammengefasst [2]. Ende letzten Jahres hat das VHF/UHF/SHF-Referat in Abstimmung mit der Bundesnetzagentur die Rahmenbedingungen zur Nutzung der Duplex-Frequenz neu definiert. In einem Beitrag auf der Mailingliste der IP-Koordination DL sind weitere Details als auch Informationen zur Beantragung eines Knotens bei der Bundesnetzagentur zu erfahren [3]. Als erste nicht AX.25-basierte Lösung hat das Projekt „NPR – New Packet Radio“ von Guillaume, F4HDK, eine neue Aktivitätswelle ausgelöst [4]. Einige HAMNET-Knoten sind bereits für den Duplex-Betrieb von 439,700 MHz TX / 434,900 MHz RX ertüchtigt worden und bedienen den Kanal mit NPR.

### **Ein neues flexibles Verfahren basierend auf SDR-Technik**

Wie in [1] aufgeführt, wurde die von Christian, DL1COM, und Jann, DG8NGN, angeregte Abschlussarbeit mit dem Thema „Spezifikation und Implementierung eines Funkverfahrens“ bei ihrem Arbeitgeber ausgeschrieben. Lukas Ostendorf hat sich als Masterand des Instituts für vernetzte Systeme der RWTH Aachen der Aufgabe gestellt und seine Masterarbeit bei Rohde & Schwarz in München absolviert. Das Ergebnis ist das HAMNET Access Protocol (HNAP), welches auf der ADALM Pluto SDR-Plattform implementiert wurde (HNAP4PlutoSDR).

### **Überblick der Systemanforderungen**

Das zu entwickelnde System sollte mehreren Anforderungen gerecht werden:

- mehrere Nutzer sollen parallel VoIP-Verbindungen bei ausreichender Gesprächsqualität führen können
- die nutzbare Datenrate soll mit höherer Signalqualität steigen
- eine Verbindung soll auch ohne direkte Sicht zum HAMNET-Knoten möglich sein (für „line-of-sight“-Bedingungen stehen bereits höhere Frequenzbänder zur Verfügung)
- gesetzliche Vorgaben müssen eingehalten werden (keine Verschlüsselung, Einhaltung der Spektralmaske, Nennung des Rufzeichens, ...)
- das System soll auf auf Ethernetebene transparent arbeiten (OSI-Schicht 2)
- die Kosten sollen sich insbesondere auf Anwenderseite im niedrigen dreistelligen Bereich befinden
- eine offene Systemarchitektur soll künftigen Weiterentwicklungen Raum geben (open source)
- die Einstiegshürde zur Nutzung des Systems soll tief gehalten werden

## Beschreibung des System-Designs

Die HAMNET-Basisstation arbeitet im 70-cm-Oberband und sendet auf 439,700 MHz, während die Nutzer sich die Eingabe auf 434,900 MHz im TDMA-Betrieb teilen. Als Modulationsverfahren wird bisher das OFDM-Verfahren mit 64 Unterträgern bei 4 kHz Trägerabstand genutzt. 40 Unterträger werden davon mit QPSK, QAM-16, QAM-64 oder QAM-256 moduliert [Bild 1].

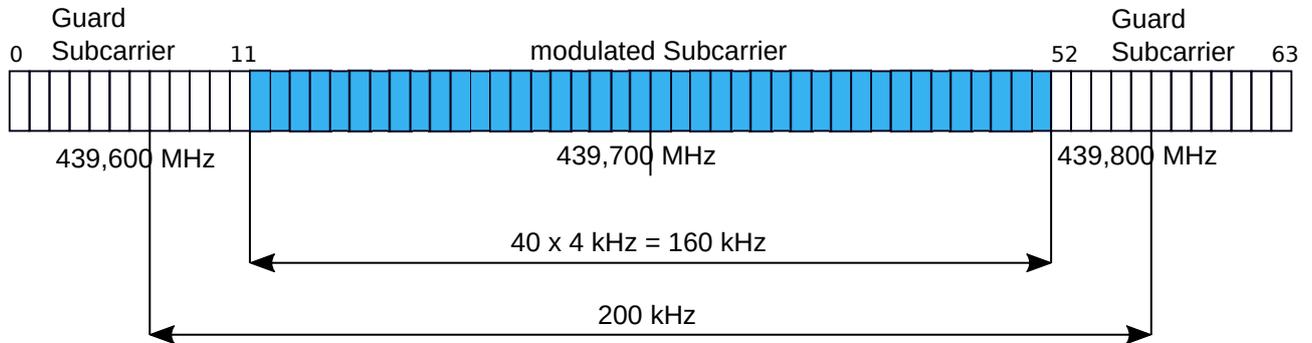


Bild 1: Modulierte Subcarrier werden in blau dargestellt

Links und rechts werden jeweils zwölf unmodulierte Guard-Subcarrier definiert, sodass die Spektralmaske nach ITU Recommendation SM.1541 Annex 9 [5] eingehalten werden kann [Bild 2].

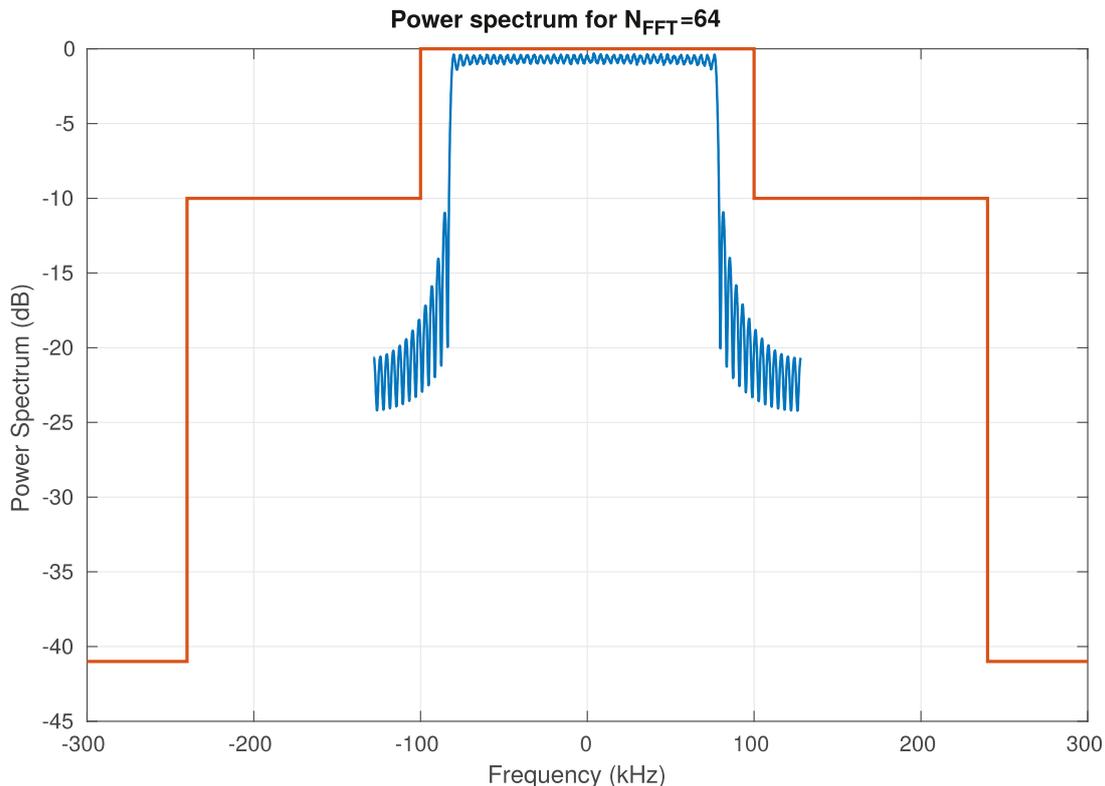


Bild 2: Simuliertes OFDM-Spektrum mit Spektralmaske nach SM.1541 Annex 9

Auf der Zeitachse werden 512 OFDM-Symbole (= 136ms) in einem Frame definiert. Ein Frame besteht aus acht Subframes mit je 64 OFDM-Symbolen (= 17ms). Die Up- und Downlink-Frames sind zeitlich zueinander verschoben [Bild 3].

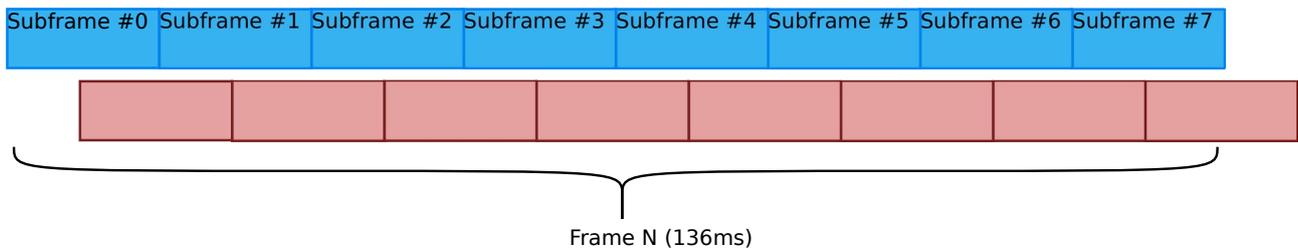


Bild 3: Zeitliche Anordnung der Frames im Downlink (blau) zum Uplink (rot)

Ein Subframe besteht aus Slots der Typen „Synchronisation“, „Downlink Control“, „Uplink Control“, „Downlink Data“, „Uplink Data“ und „Random Access“ mit unterschiedlichen Längen [Bild 4].

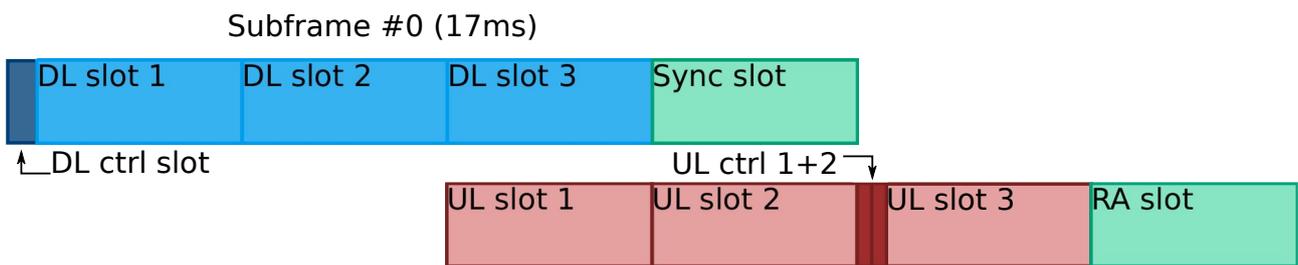


Bild 4: Das erste Subframe eines jeden Frames beherbergt alle vorkommenden Slot-Typen

Bei einer Datenübertragung werden die meisten OFDM-Symbole für Slots mit dem Typ „Downlink Data“ und „Uplink Data“ benötigt und können je nach Signal-/Rauschabstand höherwertig moduliert werden. Nur wenige OFDM-Symbole werden für die restlichen Slots benötigt und sind durchgängig mit QPSK moduliert. Dies sorgt neben dem verwendeten Vorwärtsfehlerkorrekturfaktor 1/2 (coding rate) für eine hohe Robustheit gegen Störungen (MCS 0) [Tabelle 1].

MCS idx	modulation	coding rate	logical channel size
0	QPSK	1/2	62
1	QPSK	3/4	93
2	16QAM	1/2	125
3	16QAM	3/4	187
4	64QAM	1/2	188
5	64QAM	3/4	282
6	256QAM	1/2	250

Tabelle 1: Modulation & Coding Scheme für Slots des Typs „Downlink Data“ und „Uplink Data“

Im „Downlink Data“- und „Uplink Data“-Slot wird ein logischer Kanal zur Übertragung von MAC-Nachrichten des Typs „Data“ und „Control“ definiert und mit einer CRC16 Checksumme gesichert [Bild 5].

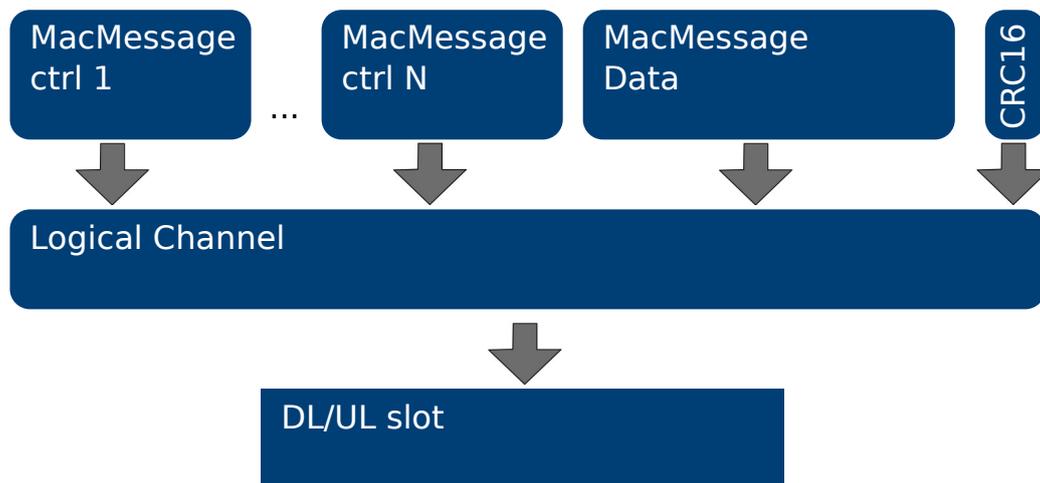


Bild 5: Im Datenkanal einer MAC-Nachricht werden die Ethernetframes bzw. deren Fragmente übertragen

Die genauen Definitionen des PHY- und MAC-Layers können dem Anhang der Masterarbeit entnommen werden [6]. Zusammen mit dem Kapitel „System-Design“ bilden sie die Definition des HAMNET Access Protocol (HNAP) [7].

### Implementierung auf dem ADALM Pluto

Der ADALM Pluto SDR kommt trotz seiner günstigen Anschaffungskosten bereits mit einem integrierten Linux-Betriebssystem daher, welches sich für die Implementierung gut bewährt hat. Losgelöst vom heimischen PC kann er mithilfe des USB-OTG-Anschlusses und eines USB-LAN-Adapters wie ein klassischer HAMNET-Transceiver für 13- oder 6-cm hier nun auf 70-cm abgesetzt betrieben werden.

Einen Systemüberblick der Implementierung bietet das Blockdiagramm [Bild 6].

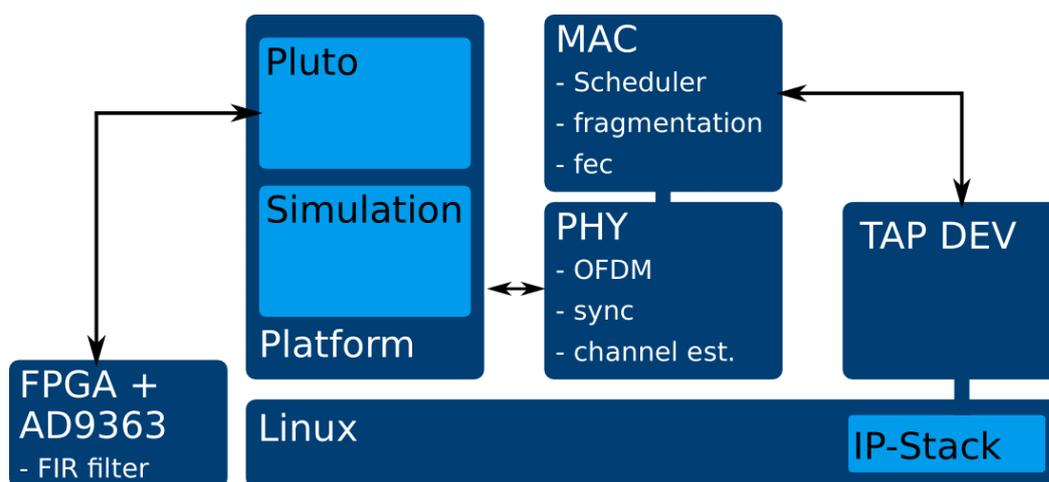


Bild 6: Aus dem Blockdiagramm sind der PHY- und MAC-Layer gut ersichtlich

Die Anwendung selbst nutzt mehrere Threads zur Abarbeitung der einzelnen Aufgaben. Die zeitlichen Anforderungen zur Befüllung der Puffer sind sehr hoch. Daher wurde ein Realtime-Kernel eingesetzt und die zeitkritischen Prozesse „PHY TX“ und „PHY RX“ auf den zweiten, isoliert laufenden CPU-Kern ausgelagert [Bild 7].

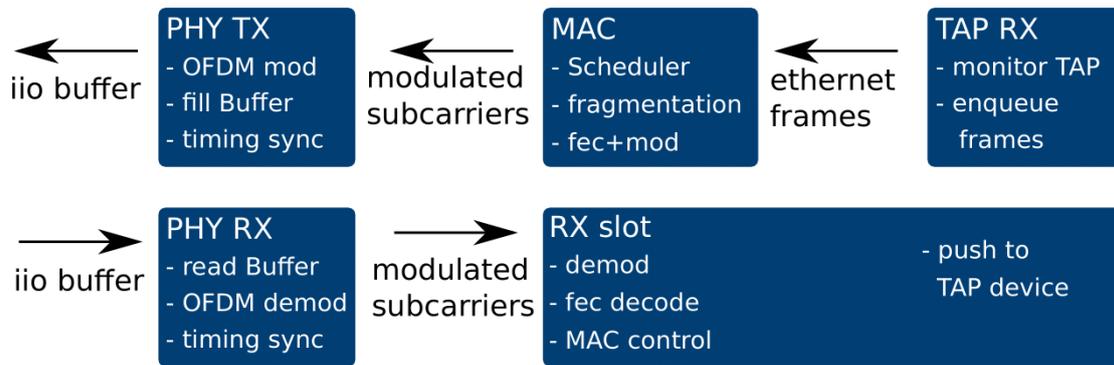


Bild 7: Kommunikation der Threads untereinander

## Kurzbeschreibung für den Laboraufbau

Eine ausführlichere Anleitung für den Nachbau auf dem Labortisch steht auf der Projekthomepage <http://hnap.de> [7] zur Verfügung. Für den Schnellstart sind folgende Schritte notwendig:

- Download des H NAP4PlutoSDR-Firmware-Images (pluto.frm) von [6]
- Einspielen des Firmwareimage (Drag&Drop vom PC in den Pluto)
- Initiale Systemkonfiguration (Einschalten des zweiten CPU-Kerns, IP-Adressen, Rufzeichen, Betriebsmodus)
- Start der Applikation beim Nutzer

Wichtige Hinweise betreffen noch das Modulationsverfahren und die mitgelieferten Antennen:

- Das OFDM-Modulationsverfahren erfordert zunächst eine hohe Frequenzstabilität und eine gute Schätzung der Frequenzabweichung. Der im Pluto verbaute Oszillator ist mit seinen 25 ppm absoluter Abweichung und seiner großen Abhängigkeit gegen Temperaturschwankungen zu ungenau, um das System stabil betreiben zu können. Zumindest die Basisstation benötigt einen stabileren TCXO. Wir empfehlen ausdrücklich auch den Austausch beim Nutzer. Wir haben uns für den „Epson TG-5006CJ-51H“ entschieden.
- Die beim ADALM Pluto mitgelieferten Antennen sind für das von uns genutzte 70-cm-Frequenzband ungeeignet und müssen auch im Laboraufbau durch passende Antennen ersetzt werden. Ansonsten kommt der Effekt zum tragen, dass Harmonische des Signals sich besser als die 70-cm Grundwelle über die mitgelieferten Antennen ausbreiten bzw. empfangen werden. Aufgrund des Empfängerprinzips kann die Schätzung der Frequenzabweichung dadurch fehlschlagen. Details sind dem Kapitel „5.2.3 – Issues with the carrier synchronization“ der Masterarbeit zu entnehmen [6].

## Aktueller Stand des Projekts

Dank des von Lukas auf die CPU-Plattform des ADALM Pluto portierten, optimierten Viterbi Decoders kann das System bis zu QAM-256 modulierte OFDM-Unterträger nutzen. Je nach Coderate wird allerdings die Leistungsgrenze der CPU überschritten, sodass die Decodierung nicht in der erforderlichen Zeit erfolgen kann. Praktische Datenraten größer 350 kbps sind machbar [Tabelle 2].

MCS idx	UDP segment size	UDP data rate
0	1408	86 kbps
1	1366	130 kbps
2	1398	184 kbps
3	1414	284 kbps
4	1422	284 kbps
5	1343	434 kbps
6	1428	380 kbps

Tabelle 2: Mit „iperf“ gemessene Datenraten bei optimaler Wahl von UDP-Paketlängen

Ein Praxistest bei dem verschiedene Nutzer mit verschiedenen MCS bedient wurden, haben die zu erwartenden Datenraten aufgezeigt.

Die gemessene Ausgangsleistung beträgt etwa 0 dBm. Die Aussendung hält den Anforderungen der Spektralmaske stand [Bild 8].

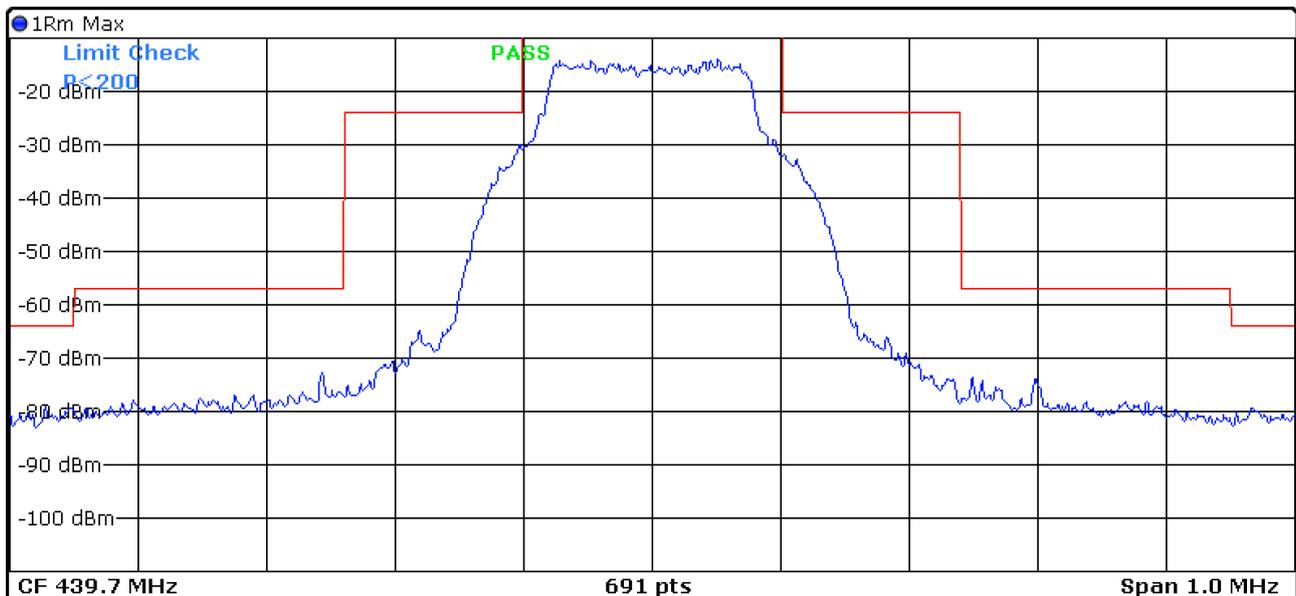


Bild 8: Gemessenes OFDM-Spektrum mit Spektralmaske nach SM.1541 Annex 9

## Ausblick

Der Weg vom Laboraufbau hin zum Einsatz an einer automatisch arbeitenden Station bedarf noch einiger Schritte. Insbesondere eine ausreichende Leistungsverstärkung ist in unserem angepeilten Anwendungsfall aufgrund der fehlenden direkten Sichtverbindung eine Hürde. Nachdem beim gewählten OFDM-Verfahren die „Peak-to-average power ratio“ recht hoch ist, werden dazu lineare Endstufen benötigt.

Erste Grundsteine für den Austausch des PHY-Layers durch eine „Single-Carrier“-Alternative (mit geringeren Linearitätsanforderungen an die Endstufe) sind zwar gelegt, die möglichen Arbeiten im Rahmen der Masterarbeit aber ausgeschöpft.

Das Projekt kann nun durch unsere Amateurfunkcommunity weitergeführt werden. Es gibt einige Baustellen an denen man sich beteiligen kann:

- Entwicklung einer passenden Endstufe mit Praxistests über größere Distanzen (die Tastung einer Endstufe mittels GPIO ist bereits implementiert)
- Arbeiten an einer „Single-Carrier“-Lösung
- Erweiterung zur Nutzung verschiedener HF-Bandbreiten im Up-/Downlink
- Entlastung der CPU durch Übernahme von Rechenaufgaben im FPGA
- Allgemeine Arbeiten am Programmcode und Dokumentation

## Fazit

Das Projekt HNAP4PlutoSDR ist ein Kandidat, um höhere Datenraten auf HAMNET-Einstiegen im 70-cm-Band zu ermöglichen. Es hat durch den offenen Programmcode und der Dokumentation anhand einer Masterarbeit beste Voraussetzungen durch Eure Mithilfe praxistauglich zu werden. Die regulatorischen und betrieblichen Voraussetzungen sind in [3] erläutert und gegeben.

[1] <http://hnap.de/history> → HAMNET auf 70-cm und andere Baender – Sachstand

[2] <https://www.de.ampr.org/meetings> → 5. HAMNET-Tagung → 2. Vortrag

[3] <http://hnap.de/history> → HAMNET-Zugang auf 70-cm – Automatische Stationen

[4] <https://www.darc.de/nachrichten/meldungen/archiv-details/news/vus-referat-bnetza-und-f4hdk-ebnen-weg-fuer-hamnet-auf-70-cm> (nach Anmeldung als DARC Mitglied)

[5] <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1541>

[6] <https://github.com/hamnet-access-protocol>

[7] <http://hnap.de>