# Kurzbericht gemäß NKBF 98 zum Verbundprojekt AEROSENSE

| | | | |
|---|---|---|---|
| ZE: | IMST GmbH | Förderkennzeichen: | 20 Q 1911 B |
| Autor: | Carsten Günner | Vorhabenbezeichnung: | AEROSENSE |
| Laufzeit: | 01.05.2021 – 30.04.2024 | | |

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

## 1. Aufgabenstellung

Gegenstand des AEROSENSE-Projektes ist die Entwicklung und der Test eines Sensors zur Strukturüberwachung von Flugzeugteilen. Bei dem Sensor wurde auf hochfrequente elektromagnetische Wellen bis zu 40 GHz anstelle von sonst üblichen akustischen oder modalen Verfahren gesetzt.

## 2. Konsortium

Das AEROSENSE-Konsortium besteht aus 3 Projektpartnern aus Industrie und Forschung, die unterschiedliche Fähigkeiten mitbringen und sich bei den Arbeiten ergänzen:

- IMST GmbH,
- Goethe-Universität Frankfurt (GUF),
- Herzog Luftsportgerätetechnik.

# 3. Durchgeführte Arbeiten

In den ersten 3 Monaten der Projektlaufzeit konzentrierten sich die Arbeiten der IMST GmbH auf die Spezifikation des geplanten VNAs. Basierend auf den Anforderungen der Projektpartner konnte eine Tabelle mit Spezifikationen aufgestellt werden. Diese war zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig und endgültig, dient aber als Anhaltspunkt für Auswahl der Komponenten und die Entwicklung des VNA. Die Tabelle wurde während des Projektes aktualisiert. Tabelle 1 enthält die Liste der Systemparameter zum Projektende.

| Parameter bzw. Komponente | Wert |
|---|---|
| Gehäuse | 35 cm * 32 cm * 10 cm |
| Stromversorgung | 220 V AC |
| Leistungsaufnahme | 45 W |
| Kühlung | aktiv |
| Interface | USB, Ethernet |
| min. Frequenz | 9 kHz |
| max. Frequenz | 40 GHz |
| max. Sendeleistung | >+5 dBm |
| Dynamik | 30 ... 50 dB |
| HF Stecker | K-female |
| Impedanz Stecker | 50 Ω |
| Anpassung Stecker | -15 dB |
| Anzahl Tore | 2 |

Tabelle 1: Liste Systemanforderungen bzw. Spezifikationen

Anhand dieser Parameter wurde der schematische Aufbau des VNA entwickelt. Er ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein Signalgenerator erzeugt das HF-Signal des VNA. Über Koppler wird es zum Test-Tor des VNA geleitet an dem des DUT (Device Under Test) angeschlossen ist. Nachdem das Signal durch das DUT geflossen ist, kommt es durch das 2. Test-Tor wieder in den VNA. Nach Kopplern wird es über einen Abschluss abgesumpft. Die Koppler koppeln für jedes Tor die hin- und rücklaufenden Wellen aus. Diese werden über Mischer in das Basisband gemischt. Nach einer IF-Verstärkung werden sie digitalisiert und mittels DSPs (Digitale Signalprozessoren) ausgewertet werden. Ein Mikroprozessor

übernimmt die Steuerung des VNA und ist gleichzeitig die Schnittstelle zu einem Laptop oder PC auf dem das User Interface des VNA betrieben wird.

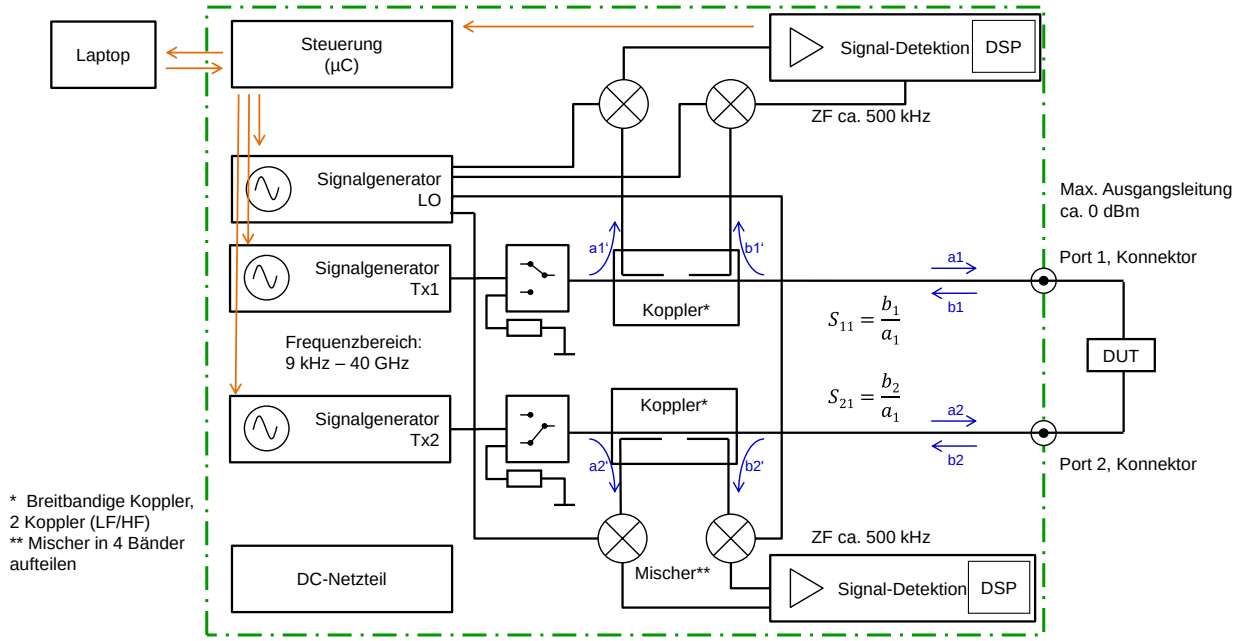


Abbildung 1 Schematischer Aufbau des VNA

Die hohe Mindestbandbreite des VNA verursacht, dass es für die Schlüsselkomponenten wie Synthesizer, Koppler, Mischer und Verstärker keine Bauteile gibt, die für die gesamte Bandbreite einsetzbar sind. Daher wurde der VNA in Untergruppen aufgeteilt, die verschiedene Bänder benötigen. Die Koppler waren dabei die breitbandigsten Komponenten und wurden bei IMST entwickelt. Sie können einen Bereich von 9 kHz bis 40 GHz abdecken.

Die Hardwareentwicklung teilte sich in folgende Aufgaben auf:

- Entwicklung eines Steuermoduls, das von einem PC bedient wird und die gemessenen Daten an den PC übergibt
- Entwicklung von 2 mehrbändigen Signalquellen, die die Sendesignale der beiden Tore speisen
- Koppler, die die hin- und rücklaufenden Signale an den Toren auskoppeln
- Mischer mit lokalen Oszillatoren, die die ausgekoppelten Signale in das Basisband mischen
- Signaldetektoren mit analog-digital Konvertern, die die Signale aus dem Basisband digitalisieren
- Die digitalisieren Signale werden in Mikrocontrollern in S-Parameter umgerechnet

Insgesamt wurden pro Sensor 3 unterschiedliche PCBs entwickelt und aufgebaut. Die Realisierung dieses VNA ist ohne externes Gehäuse aber mit Steuergerät und Monitor in Abbildung 2 dargestellt. Da die aktiven Komponenten viel Verlustleistung produzieren wurde eine aktive Kühlung integriert.

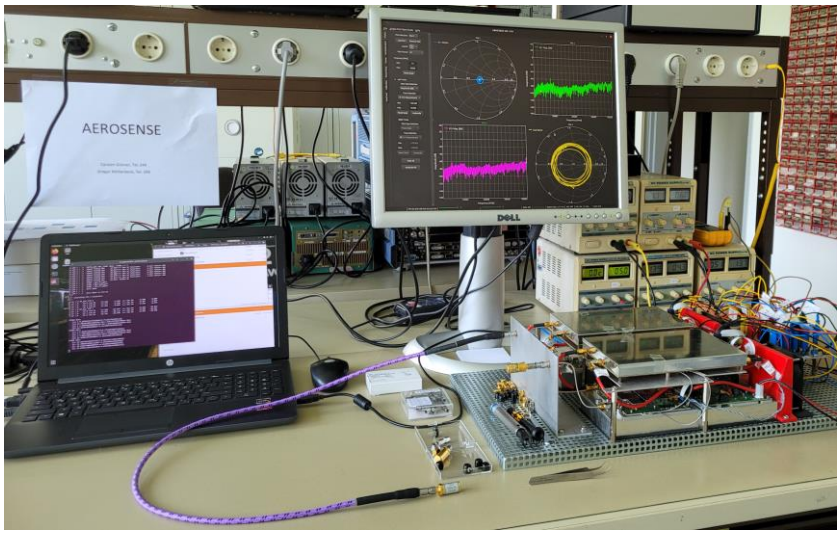


Abbildung 2 VNA-Messplatz

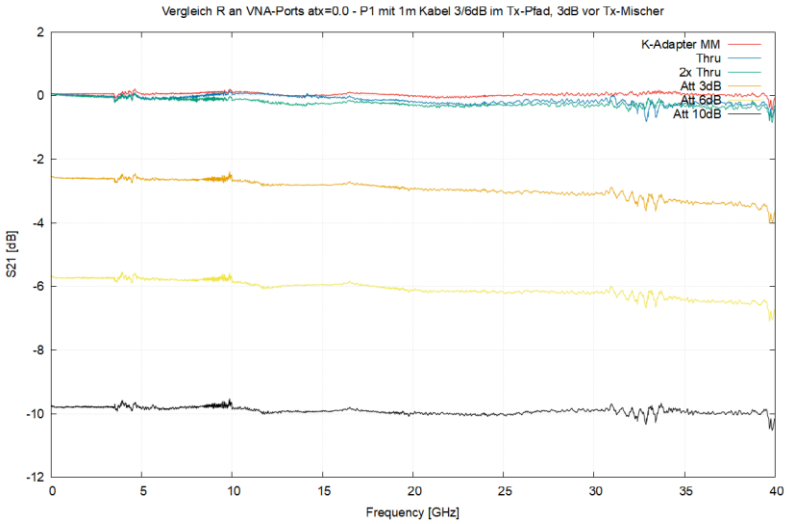


Abbildung 3 Zwei-Tor S-Parameter Messungen - Dämpfungsglieder (0, 3, 6 und 10 dB)

Abbildung 3 zeigt Zweitor-S-Parametermessungen von Dämpfungsgliedern. Diese sind in weiten Bereichen der Messungen gut, aber bei Frequenzen um 5, 10 und 33 GHz weist der VNA noch erhebliche Rippel auf. Nach umfangreichen Untersuchungen ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Verkopplungen von unterschiedlichen Baugruppen handelt. Ein Re-design des VNA konnte in diesem Projekt aus zeitlichen Gründen nicht durchgeführt werden.

Dieser Bread-Bord Aufbau wurde bereits so entwickelt, dass er in ein Standard-Gehäuse mit den Abmessungen 35 cm * 32 cm * 10 cm integriert werden kann. Bei der Genauigkeit des VNA besteht noch optimierungsbedarf, weshalb zum Abschluss dieses Projektes Flugtests nur mit reduzierter Hardware durchgeführt wurden.

## Software GUI

Zu der Hardware wurde auch eine Steuer-Software mit einem grafischen Benutzerinterface entwickelt. Sie wird im Weiteren präsentiert. Das klassische Pull Down Menü muss für den VNA nicht benutzt werden. Auf der linken Seite können über Reiter 5 unterschiedliche Bedienfenster angewählt werden:

- Display
- Marker/Analysis
- Sweep
- Sweep Setup
- Calibration
- Save/Load

Abbildung 4 zeigt das Display-Fenster. Auf der rechten Seite ist das Daten-Fenster. Hier werden die Messdaten angezeigt. Auf der linken Seite werden die wählbaren Optionen für das Display angezeigt und können angepasst werden. Die Anzahl der Plots kann verändert und die Daten-Fenster können darin angeordnet werden. Es kann zwischen xy-Ansicht und Smith-Chart gewählt werden. Der Frequenzbereich kann eingeschränkt und neben der linken Achse eine weitere Achse auf der rechten Seite gewählt werden. Für diese Achsen können individuelle Skalierungen eingestellt oder eine automatische Skalierung gewählt werden. Es können aus den Messungen von S11, S21, S12, S22 einzelne oder mehrere Messungen dargestellt werden. Folgende Darstellungsformen sind möglich:

- Magnitude [linear]
- Magnitude [dB]
- Phase [deg]Complex
- Group delay [ns]
- Trath Math (wird weiter unter erklärt)

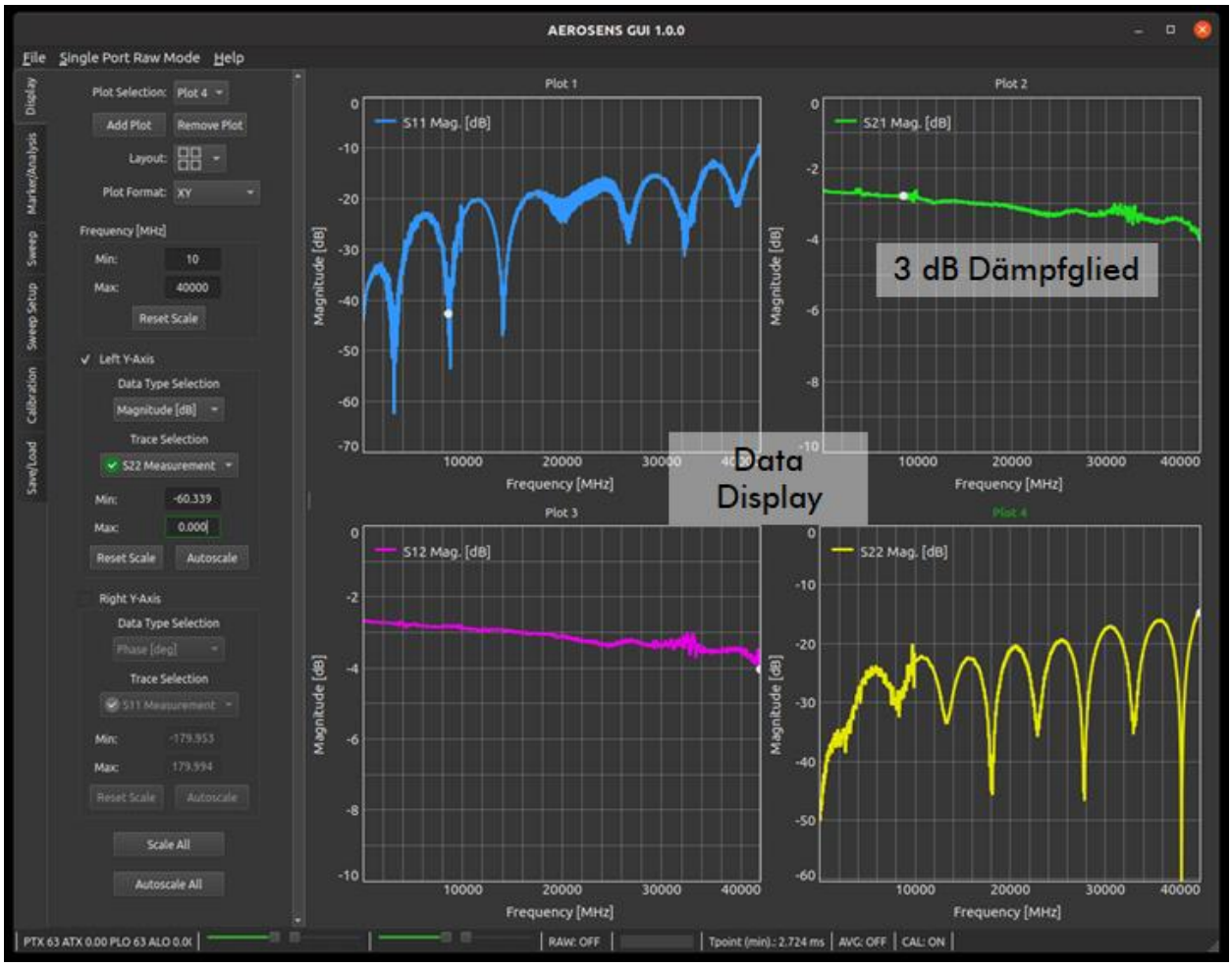


Abbildung 4 GUI - Display Ansicht

Unter dem Data-Display befindet sich eine Statuszeile, in der die Hauptfunktionen der laufenden Messung angezeigt wird:

- Einstellung der Dämpfungswerte für TX-Signal und LO-Signal
- RAW-Modus, der die Rohdaten anzeigt, diese Funktion ist nur für Debug-Zwecke aktiviert
- Tpoint (Mess-Zeit pro Datenpunkt)
- AVG: welcher Average-Wert eingestellt ist
- CAL: ob die Kalibration aktiv ist

In Abbildung 5 werden die Messergebnisse von S11 und S22 im Smith-Chart angezeigt.

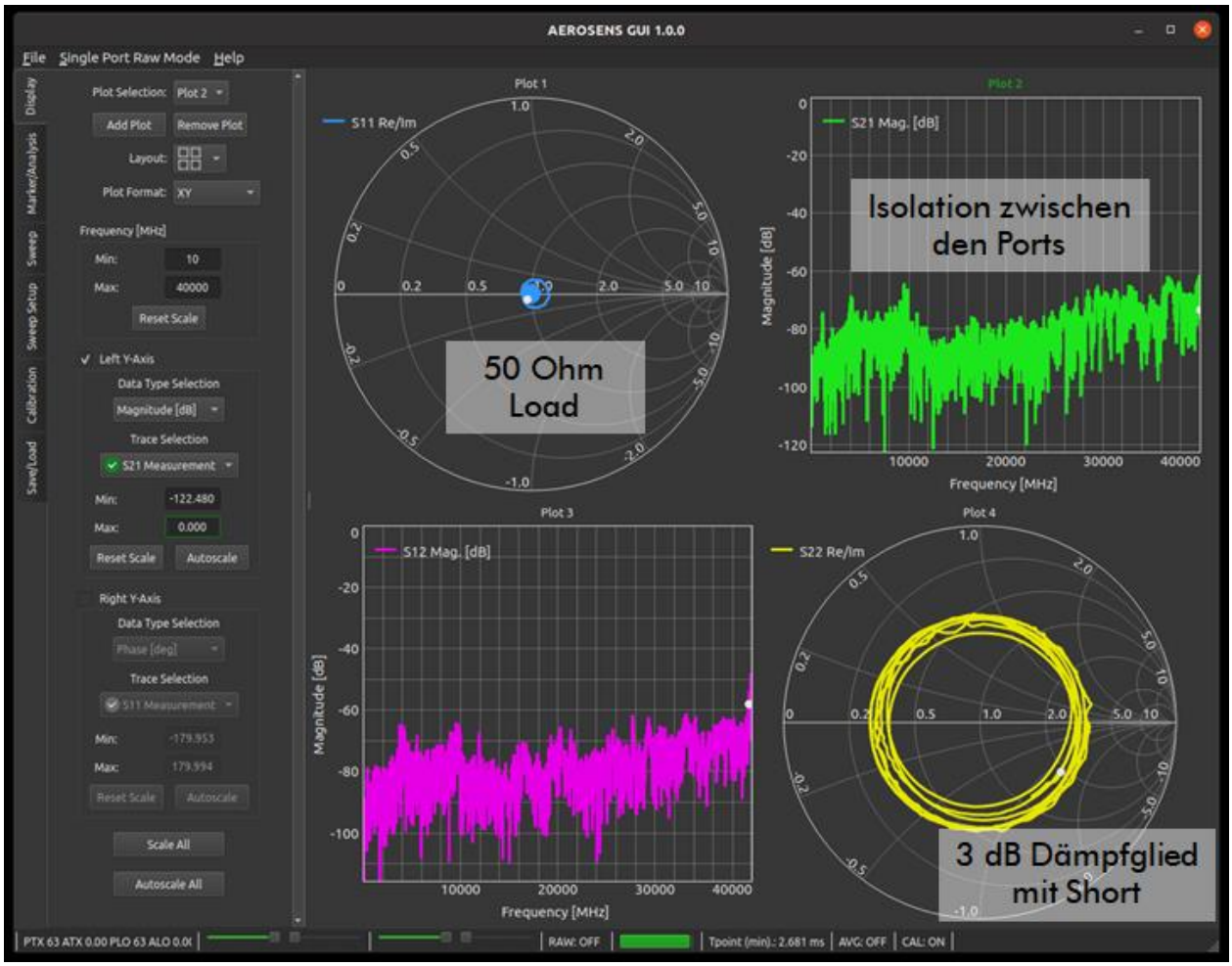


Abbildung 5 GUI Data Display mit Smith-Chart

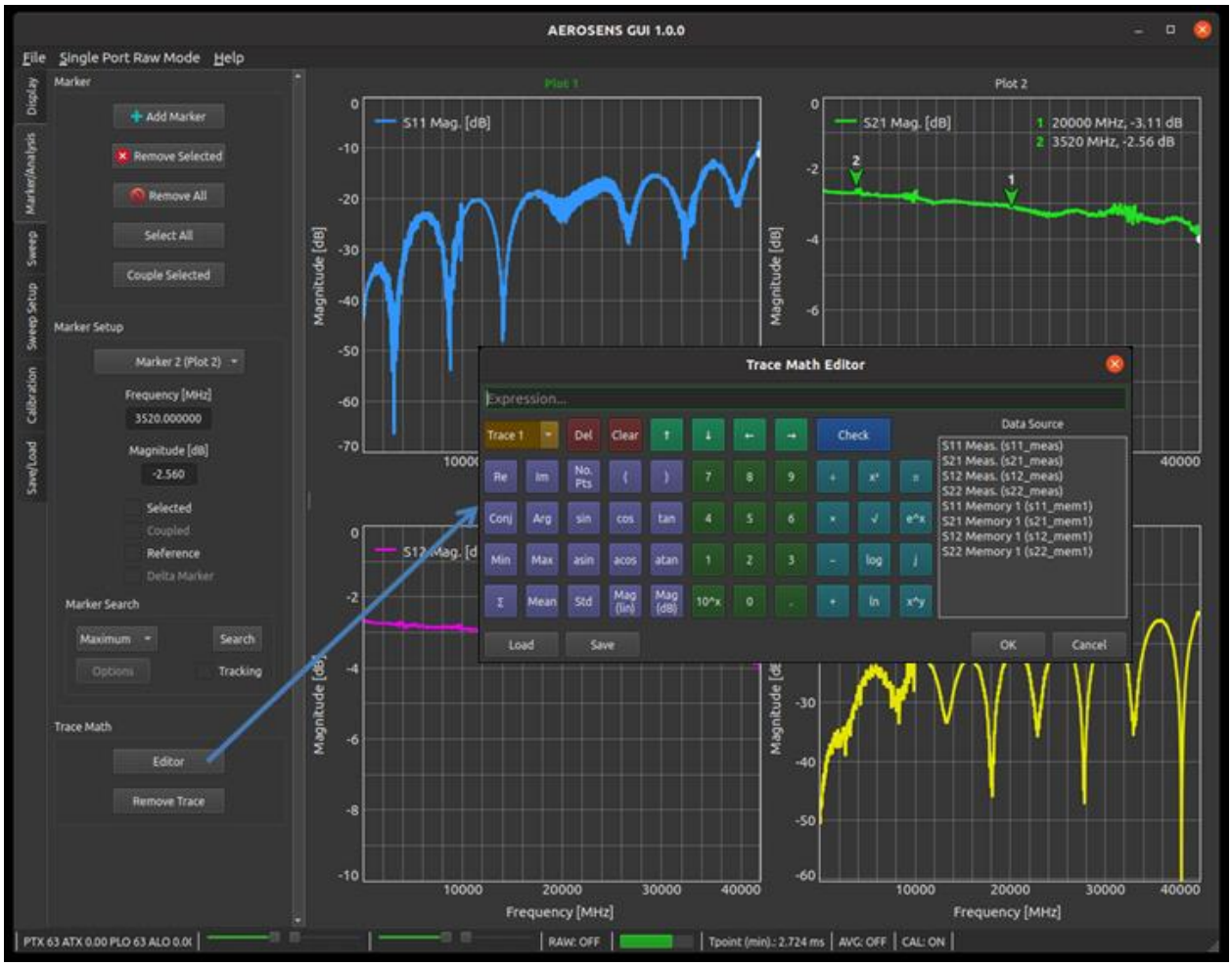


Abbildung 6 GUI - Marker/Analysis Ansicht

Abbildung 6 zeigt die Marker/Analysis-Seite. Hier können für jeden Plot Marker gesetzt, verschoben, gekoppelt und gelöscht werden. Auch das Suchen nach einem Minimum oder Maximum ist möglich. Zusätzlich wurde ein Mathematischer Editor (Trace Math) eingefügt. Hiermit können die gemessenen Daten in Echtzeit weiterverarbeitet werden. Dazu kann ein Formeleditor, der die Funktionen eines wissenschaftlichen Taschenrechners besitzt, genutzt werden. Das Ergebnis kann über die Trace-Math-Funktion im Display dargestellt werden.

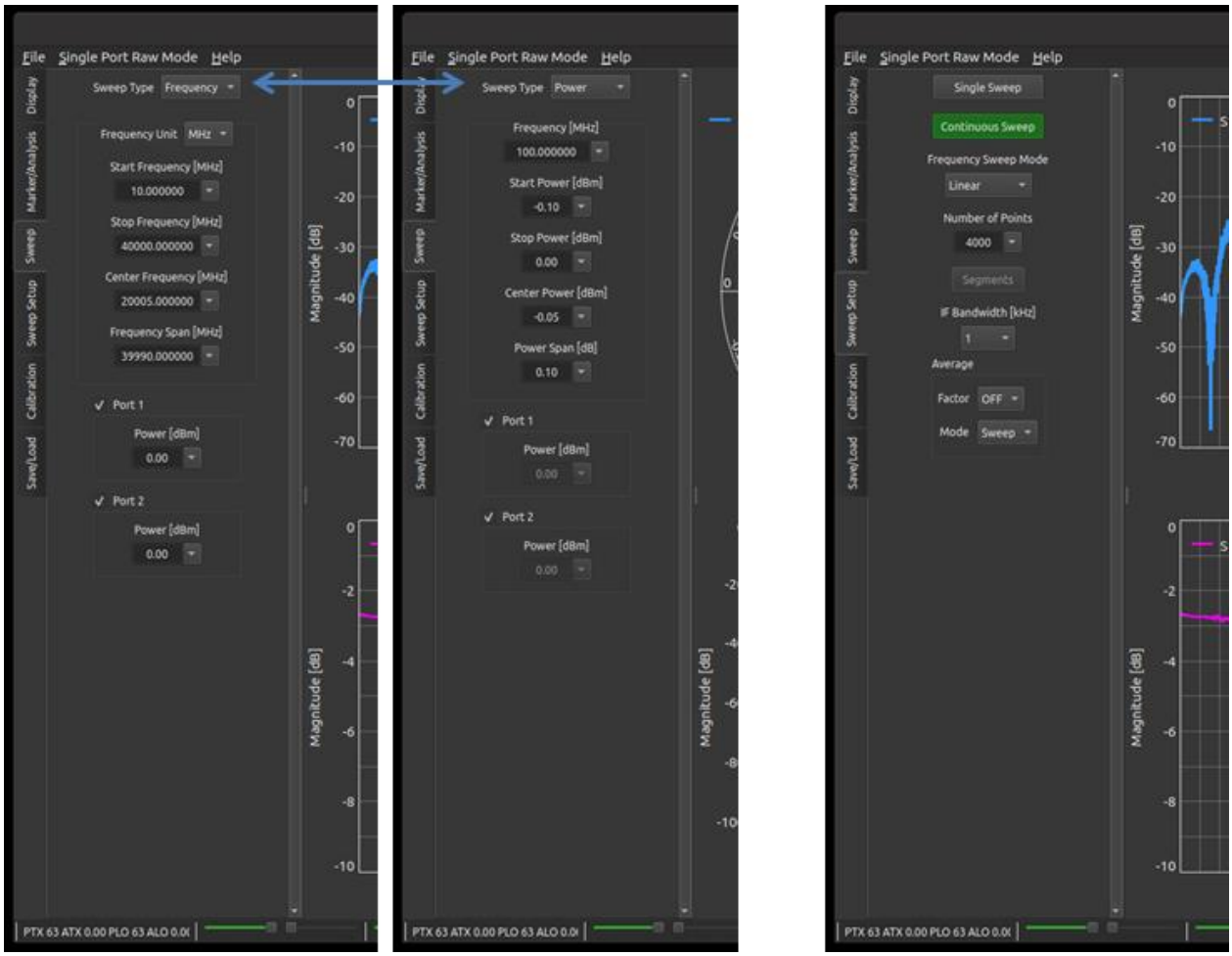


Abbildung 7 GUI - Sweep und Sweep Setup Ansicht

Unter der Sweep-Ansicht (Abbildung 7) kann der Sweep-Typ (Frequenz oder Power) gewählt werden. Je nachdem was gewählt wurde, können im Weiteren die entsprechenden Sweep-Parameter eingestellt werden. Zusätzlich können hier die aktiven Ports gewählt werden, es kann also zwischen Ein- und Zweitormessung umgeschaltet werden. Beim Sweep-Setup wird zwischen einem einzelnen und kontinuierlichem Sweep gewählt. Zusätzlich kann die Anzahl der Sweep-Punkte eingestellt werden. Hier können auch die IF-Bandbreite und das Average eingestellt werden.

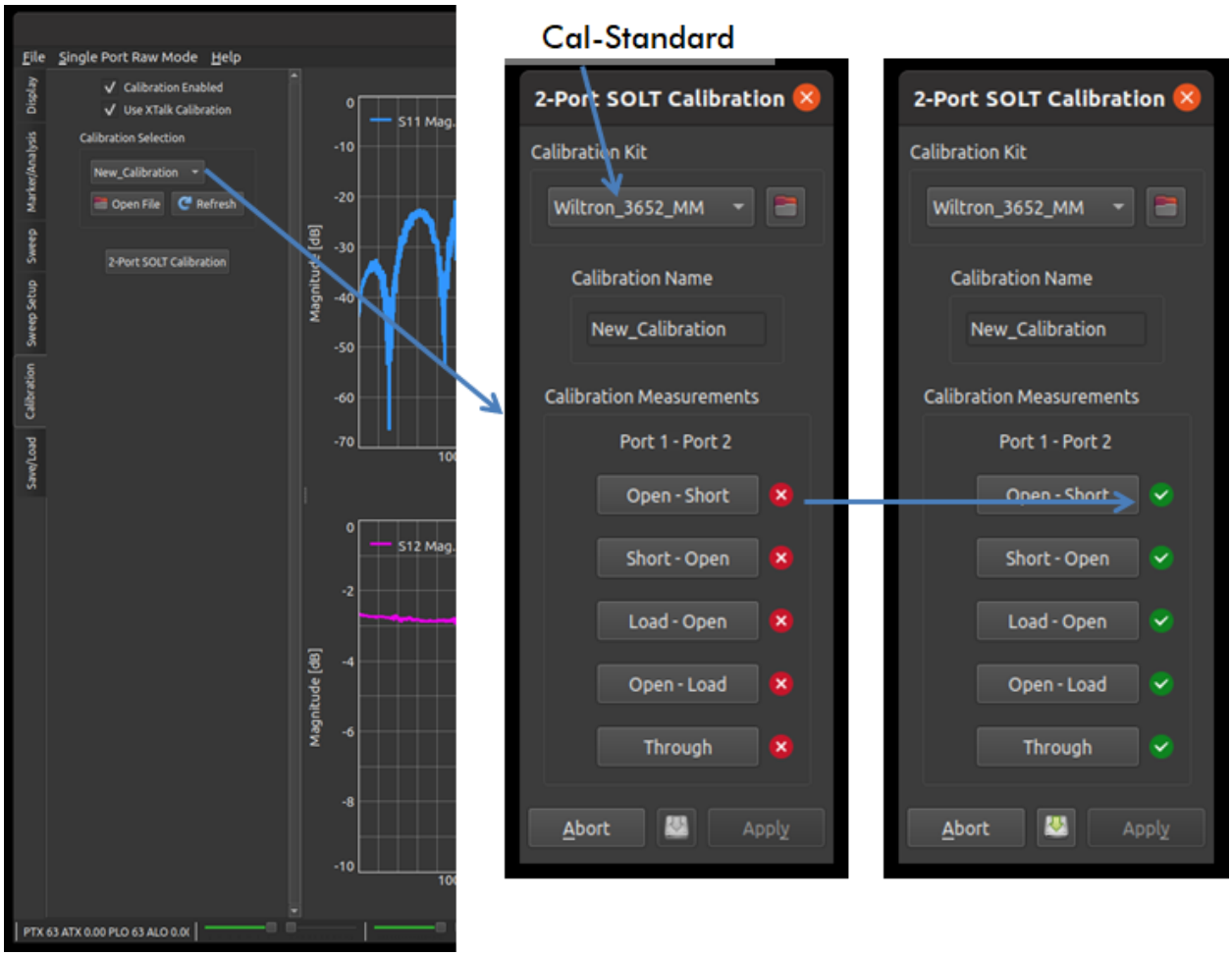


Abbildung 8 GUI - Kalibrations-Menü

In dem Kalibrations-Menü (Abbildung 8) kann die aktuelle Kalibration aktiviert oder deaktiviert werden. Bereits vorhandene Kalibrationen können von einem Speichermedium geladen werden. Für die Durchführung einer neuen Kalibration öffnet sich ein weiteres Fenster. Dort kann der Kalibrationsstandard ausgewählt werden. Die Kalibrations-Standards müssen auf die Tore geschraubt und danach die entsprechende Taste gedrückt werden. Eine erfolgreiche Durchführung wird mit einem grünen Häkchen markiert. Wurden alle Kalibrations-Schritte durchgeführt kann diese abgespeichert und angewendet werden.

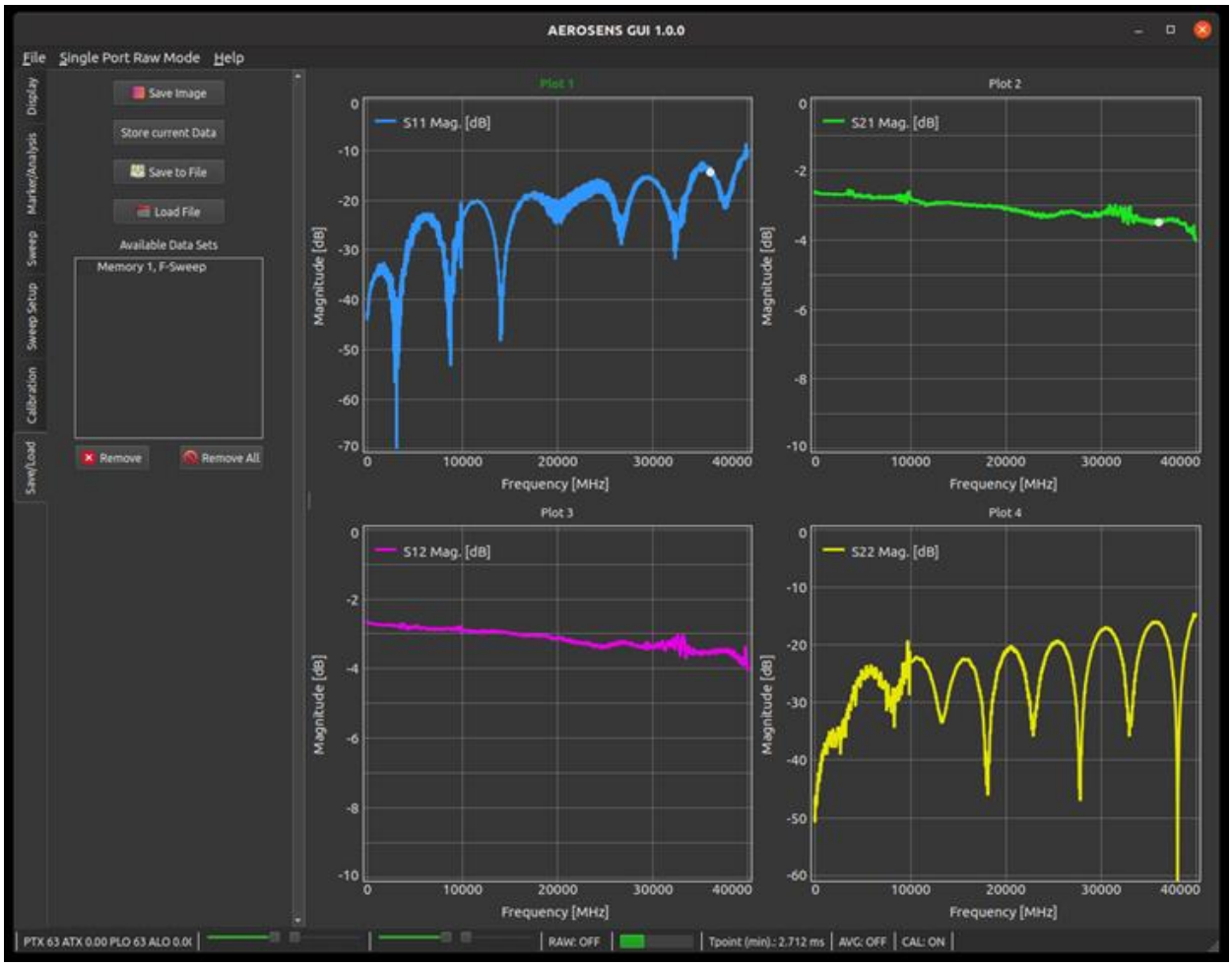


Abbildung 9 GUI - Save/Load Ansicht

In der Save/Load (Abbildung 9) können die Messergebnisse in einem internen Format oder als Touchstone- bzw. Bilddatei in einem beliebigen Verzeichnis abgespeichert werden. Touchstone-Dateien können auch geladen werden.

## Sensor

Der VNA ist Teil eines Sensors zur Strukturüberwachung. Dazu wurden von unserem Projektpartner die GUF Messfühler entwickelt, die mit der Außenhülle von Fluggeräten verbunden werden. Diese Messfühler wurden an den VNA angeschlossen und S-Parameter gemessen. In Laborversuchen wurden Fehler / Beschädigungen in der Außenhülle nachgestellt und die zugehörigen Messwerte erfolgreich in Klassen eigeteilt, die die Unversehrtheit der Außenhülle und die Stärke der Beschädigung beschreiben. Zum Abschluss des Projektes wurde ein Flugversuch durchgeführt, in dem eine S-Parametermessung in einer Drohne durchgeführt wurde. Der VNA konnte dabei nicht eingesetzt werden, da er noch nicht in das Gehäuse integriert war, aber es wurde ein Ersatzgerät beigestellt, dass Messungen im Bereich von 23,5 bis 26 GHz zuließ. Dadurch konnte gezeigt werden, dass eine Strukturüberwachung mit diesem Sensormöglich ist und Geräte für diesen Einsatz entwickelt werden können.

## Zusammenfassung

IMST hat im AEROSENSE Projekt eine VNA von 9 kHz bis 40 GHz als Breadboard-Aufbau entwickelt. Dazu gehören die Hardware, die auch in ein kompaktes Gehäuse integriert werden kann, eine Firmware, die den VNA intern steuert und die Messabläufe durchführt, sowie eine graphische Benutzeroberfläche für Windows und Linux, mit der die Messdaten angezeigt und Geräteparameter eingestellt werden können. IMST hat umfangreiche Testmessungen mit dem System durchgeführt. Dazu gehören auch entsprechende Kalibrationsfunktionen. S-Parameter-Messungen können bereits als Eintor- und Zweitormessungen durchgeführt werden. Die Ausgangsleistung lässt sich im Bereich von ca. -40 dBm bis +5 dBm steuern. Die Empfindlichkeit weist bei einigen Frequenzbereichen noch Optimierungspotential auf. IMST sieht, dass im Aufbau noch Verkopplungen zwischen einzelnen Baugruppen reduziert werden können. Das erfordert ein Re-design des VNA und ist für eine Nachfolgeaktivität geplant. Trotzdem konnten Messungen an der Außenhülle von Fluggeräten durchgeführt werden und die Unversehrtheit der Außenhülle sowie verschiedene Beschädigungsgrade nachgewiesen werden. Dadurch konnte gezeigt werden, dass eine Strukturüberwachung mittels elektromagnetischer Wellen möglich ist und Geräte für diesen Einsatz entwickelt werden können.

## 4. Veröffentlichungen

Die wichtigsten Projektergebnisse wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht:

Rao, M. and Memmolo, V. and Moll, J. and Krozer, V., Structural Health Monitoring of Aerospace Structures using Guided Electromagnetic Waves in a Dielectric Waveguide at Ka-Band, EWSHM 2024, 2024

Memmolo, V. and Moll, J. and Moix-Bonet, M. and Lugovtsova, Y. and Schmidt, D. and Krozer, V. and Müller, I., Towards reliability assessment of ultra-wideband microwave leakage monitoring in detecting stringer debondings in composite airframes, EWSHM 2024, 2024

Moritz Mälzer, Jonas Simon, Carsten Günner, Daniel del Rio Velilla, Manuel Rao, Sebastian Beck, Vittorio Memmolo, Jochen Moll, Viktor Krozer, Structural Health Monitoring of Aerial Vehicles using Guided Electromagnetic Waves in K-band: Initial Damage Detection Results from Drone Flight Testing, 4SMARTS, 2024

Rao, M. E.; Maetz, T. & Moll, J., Numerical Analysis of Dispersion Compensation for Guided Electromagnetic Waves in Rectangular Microwave Waveguides, 16th European Conference on Antennas and Propagation, NDT & E International, 2024

Memmolo, V.; Moll, J.; Moix Bonet, M.; Schmidt, D. & Krozer, V. Ultra-wideband microwave leakage monitoring for stringer debonding detectionin carbon composite fuselage structures, NDT & E International, 2024

Memmolo, V.; Moll, J. & Krozer, V., Debonding Detection in Aerospace Stiffened Composite Structures using Ultrawideband Electromagnetic Tunneling, 14th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2023

Memmolo, V.; Fox, L.; Moll, J. & Krozer, V., Structural Health Monitoring of Metallic Tubes inducing Guided Electromagnetic Waves, 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2023

Fox, L.; Moll, J. & Krozer, V., Monitoring of Pipelines using Microwave Structural Health Monitoring, 10th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2022

A.Neumann: AeroSense – Hochfrequenzsensorik für die Zustandsüberwachung von Strukturkomponenten, ILA, Berlin, 2022