

BACHELORTHESIS  
Mareike Rahe

# Berechnung der Ausbreitung von RADAR-Signalen mit Matlab

---

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK  
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Computer Science and Engineering  
Department of Information and Electrical Engineering

Mareike Rahe

# Berechnung der Ausbreitung von RADAR-Signalen mit Matlab

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Pawel Buczek  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Ralf Wendel

Eingereicht am: 28.01.2022

**Mareike Rahe**

**Thema der Arbeit**

Berechnung der Ausbreitung von RADAR-Signalen mit Matlab

**Stichworte**

RADAR, Matlab, Ausbreitung

**Kurzzusammenfassung**

Radaranlagen, in diesem Fall Wetterradaranlagen, arbeiten häufig auf den gleichen Frequenzen. Ziel dieser Arbeit, ist es den möglichen Einfluss dieser Radaranlagen aufeinander abzuschätzen. Dafür soll die Ausbreitung der Radarsignale berechnet werden. Für die Berechnung der Feldstärke wird ein MATLAB-Script erstellt. Die benötigten Daten der Radaranlage werden aus einer hinterlegten Excel-Datei eingelesen. Die Ergebnisse der Berechnung werden mit unterschiedlich gefärbten Punkten auf einer Karte dargestellt. Die Eigenschaften der den Sender umgebenden Topografie werden in die Berechnung miteinbezogen. Die nötigen Daten werden den Geländedaten der genutzten Karte entnommen. Für die Bedienung des MATLAB-Scripts wurde eine einfache Benutzeroberfläche erstellt. Die im Verlauf dieser Bachelorthesis erzielten Berechnungsergebnisse unter Freiraumbedingungen entsprechen den Erwartungen, das Prinzip wurde erfolgreich demonstriert. In der Fortführung des Projektes sollte die Genauigkeit der Berechnung weiter verbessert werden. Das Einbeziehen von genaueren Daten zur Topografie, das verwendenn höher aufgelöster Daten zur Topografie und hinterlegten Antennendaten verbessert die Berechnungsergebnisse.

**Mareike Rahe**

**Title of Thesis**

Calculation the Propagation of RADAR Signals with Matlab

**Keywords**

RADAR, Matlab, Propagation

---

## **Abstract**

Radar systems, in this case weather radar systems, often operate on the same frequencies. The aim of this work is to estimate the possible influence of these radar systems on each other. For this purpose, the propagation of the radar signals is to be calculated. A MATLAB script is created for the calculation of the field strength. The required data of the radar installation are read in from a stored Excel file. The results of the calculation are displayed on a map with differently coloured points. The properties of the topography surrounding the transmitter are included in the calculation. The necessary data is taken from the terrain data of the map used. A simple user interface was created to operate the MATLAB script. The calculation results achieved in the course of this Bachelor's thesis under free space conditions correspond to the expectations, and the principle was successfully demonstrated. In the continuation of the project, the accuracy of the calculation should be further improved. The inclusion of more precise data on the topography, the use of higher resolution data on the topography and stored antenna data improves the calculation results.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	x
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>2</b>
2.1 Maxwell-Gleichungen . . . . .	2
2.1.1 Die elektromagnetischen Wellengleichungen . . . . .	7
2.2 Fresnelzone . . . . .	7
2.3 Dämpfungsmodell X-Band . . . . .	9
2.4 Einfluss der Topographie auf die Feldstärke . . . . .	10
2.5 Radargleichung . . . . .	11
2.6 Puls- und Dauerstrichradar . . . . .	12
2.6.1 Dauerstrichradar . . . . .	14
2.7 Antennentechnik . . . . .	14
2.7.1 Antennenfeldzonen . . . . .	15
2.7.2 Antennendiagramm . . . . .	15
2.7.3 Polarisation . . . . .	16
2.7.4 Richtwirkung einer Antenne . . . . .	17
2.7.5 Antennengewinn . . . . .	17
2.7.6 Allgemeine Eigenschaften . . . . .	17
2.7.7 Parabolantenne . . . . .	18
2.7.8 Phased Array Antennen . . . . .	18
2.7.9 <i>Cosec</i> <sup>2</sup> -Antenne . . . . .	20
2.7.10 Radome . . . . .	20
2.8 Störungen von Radaranlagen durch Radaranlagen . . . . .	21

2.9	Koordinaten . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Verschiedene RADAR-Anlagen im X-Band</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>Zielsetzung der Thesis</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Umsetzung</b>	<b>24</b>
5.1	Verwendete Arbeitsmittel . . . . .	24
5.1.1	MATLAB . . . . .	24
5.1.2	MATLAB Mapping-Toolbox . . . . .	24
5.2	GUIDE . . . . .	25
5.3	Umsetzung . . . . .	25
5.3.1	Kartendaten . . . . .	26
5.3.2	Auslesen der Höhendaten . . . . .	28
5.3.3	Laden der Daten . . . . .	28
5.3.4	Grafische Benutzeroberfläche . . . . .	29
5.3.5	Berechnung . . . . .	32
5.3.6	Bedienung des Programms . . . . .	35
5.4	Test der erstellten Software . . . . .	39
5.4.1	Test des Einlesens der Daten . . . . .	39
5.4.2	Test der Koordinaten und der Darstellung des Standortes . . . . .	40
5.4.3	Test der Berechnung . . . . .	41
5.4.4	Abgleich der reduzierten Feldstärke mit einer geografischen Karte . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Vergleich zweier Radaranlagen</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>Möglichkeiten der Weiterführung des Projektes</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Fazit</b>	<b>51</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>52</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>54</b>
A.1	MATLAB-Code ohne Topografischendaten . . . . .	54
A.2	MATLAB-Code mit Topografischendaten . . . . .	62
A.3	Radardaten . . . . .	73

**Selbstständigkeitserklärung**

**81**

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung der Fresnelzone einer Richtfunkstrecke [23]	8
2.2	Messung der Umlaufzeit eines Radars [13].	13
2.3	Messung des Pulses und der Pause eines Radarignals [13].	14
2.4	Beispiele für unterschiedliche Formen der Antennendiagramme (vertikal) [7].	16
5.1	GUIDE, Editor zum erstellen einer GUI	25
5.2	Eingebundene Deutschlandkarte	26
5.3	Entwurf einer grafischen Benutzeroberfläche, Basisfunktionen für das Grund- programm	30
5.4	Entwurf einer grafischen Benutzeroberfläche, Erweiterte Funktionen	31
5.5	Neue grafische Benutzeroberfläche	32
5.6	Anzeige der Punkte in der Karte	34
5.7	Ergebnis der zweiten Berechnung mit den ungefärbten Punkten	35
5.8	Grafische Benutzeroberfläche nach dem öffnen	36
5.9	Anzeige des Senderstandortes als roter *	37
5.10	Ergebnis der Berechnung	38
5.11	Zweite grafische Benutzeroberfläche	38
5.12	Standort wird in Berlin angezeigt	40
5.13	Standort wird in Hamburg angezeigt	41
5.14	Standort wird in München angezeigt	41
5.15	Ergebnis der zweiten Berechnung mit den ungefärbten Punkten	43
6.1	Aachen, Berechnung ohne Topografie	44
6.2	Berechnung mit der Geografie	45
6.3	Berechnung mit einbeziehung der Geografie	46
6.4	Vergrößerung der Entfernung der zu berechnenden Wete	46



# Tabellenverzeichnis

3.1	Radar-Anwendungen [3]	22
5.1	Eigenschaften des Rasterreferenzobjektes	27
5.2	Test des Einlesens der Daten	39
5.3	Koordinatenliste	40
5.4	Test der Freiraumausbreitung	42
5.5	Test der Freiraumausbreitung	42

# Abkürzungsverzeichnis

<b>BNK</b>	bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung
<b>CW</b>	Continuous Wave
<b>DBF</b>	Digitales Beamforming
<b>FM</b>	Frequenzmodulation
<b>GIS</b>	Geoinformationssystem
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>GUIDE</b>	Graphical User Interface Enviroment
<b>MATLAB</b>	MATrix LABoratory
<b>MTI-Radar</b>	Moving Target Indication Radar
<b>RADAR</b>	Radio Detection and Ranging
<b>WFS</b>	Web Feature Service
<b>WGS 84</b>	World Geodetic System 84
<b>WMS</b>	Web Map Service

# 1 Einleitung

In dieser Bachelorarbeit wird die Ausbreitung von Radarsignalen und die Möglichkeit der ihrer Berechnung mit MATrix LABoratory (MATLAB). Eine genaue Bestimmung der Auswirkungen einer Radaranlage auf eine benachbarte Radaranlage ist in der theoretischen Planung nur begrenzt möglich, da zur Zeit keine geeignete Software zur Verfügung steht. Da die Radaranlagen auf den gleichen bzw. ähnlichen Frequenzen arbeiten, ist es möglich, dass sich zwei benachbarte Radare stören. Ziel dieser Arbeit ist es, dieses Risiko zu minimieren und die Frequenzuteilung zu erleichtern. Auf der Basis von MATLAB soll die Ausbreitung der Radarsignale unter Berücksichtigung der geografischen Gegebenheiten berechnet werden. Auf diese Weise lässt sich der Standort für die Wetterradaranlagen besser beurteilen. Zur Berechnung der Feldstärke wird die Freiraumausbreitung genutzt, dabei soll untersucht werden, ob die erste Fresnelzone verletzt wird. Auf diese Punkte wird in der Theorie genauer eingegangen. Radio Detection and Ranging (RADAR) ist eine Form des Ortungsfunk. Die Grundlage der Radartechnik bildet die Reflexion elektromagnetischer Wellen an metallischen und dielektrischen Körpern. Klassisch sendet eine sich drehende Antenne einen kurzen Puls aus, der an einem Objekt reflektiert wird. Die Reflexion, das Echo, wird von dem Radar wieder empfangen. Aus der Laufzeit des Signals und der Empfangsrichtung wird die Position des Objektes bestimmt. Das Radarprinzip beruht im Wesentlichen auf der gradlinigen Ausbreitung und der konstanten Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen, sowie der Antennen die Wellen bündeln und der Reflexion an Objekten in Ausbreitungsrichtung[5]. Diese Bachelorthesis beschäftigt sich mit Festfrequenzradaren und es werden nur Radaranlagen berücksichtigt die auf einer einzelnen Frequenz arbeiten. Radaranlagen die mehrere Frequenzen nutzen werden nicht betrachtet. Weiterführend können die Ergebnisse zur Betrachtung von Radaren mit wechselnden Frequenzen genutzt werden. Es sollen hauptsächlich Radaranlagen im X-Band und nur aktive Primärradaranlagen die monostatisch aufgebaut sind, betrachtet werden. Im Verlauf dieser Arbeit wird auf die theoretischen Grundlagen der Radartechnik eingegangen, beginnend mit den Maxwell-Gleichungen. Anschließend wird auf die praktische Umsetzung in ein MATLAB-Script eingegangen.

## 2 Theorie

In diesem Kapitel soll auf die theoretischen Grundlagen dieser Bachelorthesis eingegangen werden. Zunächst werden die allgemeinen physikalischen Grundlagen erläutert, sowie der Radartechnik und der Antennentechnik. Gefolgt von der Erläuterung des Potentials von Störungen durch fremde Radaranlagen. Anschließend werden die Grundlagen der Standortbestimmung erläutert.

### 2.1 Maxwell-Gleichungen

Die Maxwell-Gleichungen sind benannt nach dem schottischen Physiker James Clark Maxwell (1831-1879). Sie bilden zusammen mit der Lorentzkraft die Grundlagen der Elektrotechnik.

Die vier Maxwell-Gleichungen in der differentiellen Darstellungsform :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

[4]

In diesen kommen die wichtigen physikalischen Größen  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  vor.  $\vec{E}$  bezeichnet das elektrische Feld, dieses leitet sich aus dem Coulomb-Gesetz,  $F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qq}{r^2}$  her. Das Coulomb-Gesetz beschreibt die Wirkung zwischen einer großen Ladung Q und einer kleinen Ladung q, wenn auf beiden Seiten die kleine Ladung mit  $\frac{1}{q}$  gekürzt wird ergibt

sich  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$ . Das E-Feld hat eine Richtungswirkung und ist somit eine vektorielle Größe

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x(x, y, z) \\ E_y(x, y, z) \\ E_z(x, y, z) \end{pmatrix}$$

Bewegt sich eine Ladung  $q$  in einem Magnetfeld, wirkt eine Kraft auf diese. Die Kraft  $F_m$  nimmt proportional zur Geschwindigkeit  $v$  und zur Ladung  $q$  zu, daraus folgt  $F_m \sim qv$ . Die magnetische Flußdichte  $B$  wird eingeführt um das Magnetfeld zu beschreiben.  $B$  ist orthogonal zur Geschwindigkeit  $v$ , somit ergibt sich:

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$B$  ist eine vektorielle Größe und wird durch folgenden Vektor  $B$  beschrieben:

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_x(x, y, z) \\ B_y(x, y, z) \\ B_z(x, y, z) \end{pmatrix}$$

[4]

Neben der oben erwähnten differentiellen Darstellungsform gibt es noch die integrale Darstellungsform:

$$\begin{aligned} \oint_A \vec{E} d\vec{A} &= \frac{\vec{Q}}{\epsilon_0} \\ \oint_A \vec{B} d\vec{a} &= 0 \\ \oint_L \vec{E} d\vec{l} &= -\frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B} d\vec{a} \\ \oint \vec{B} d\vec{l} &= \mu_0 \vec{I} + \mu\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{E} d\vec{a} \end{aligned}$$

Die beiden Darstellungsformen lassen sich ineinander mit dem Gauß-Integraltheorem und dem Stokes-Integraltheorem umwandeln[4].

**Das Gauß-Integraltheorem**

$$\int_V (\nabla \cdot \vec{F}) dv = \oint_A \vec{F} \cdot d\vec{a}$$

Die linke Seite der Gleichung beschreibt die Summe der Quellen und Senken eines Volumens. Auf der rechten Seite wird der Gesamtfluss des Vektorfeldes durch die Oberfläche des Volumens beschrieben. Für die Kraft  $\vec{F}$  ist wahlweise  $\vec{E}$  oder  $\vec{B}$  einzusetzen[4].

**Das Stokes-Integraltheorem**

$$\int_A (\nabla \times \vec{F}) \cdot d\vec{a} = \oint_L \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

Auf der rechten Seite der Gleichung wird die Rotation der Kraft  $F$  an jedem einzelnen Punkt in der Fläche aufsummiert. Auf der linken Seite der Gleichung wird die Rotation des Vektorfeldes um die eingeschlossene Fläche beschrieben[4].

**1. Maxwell-Gleichung**

Die erste Maxwell-Gleichung lautet:

$$\oint_A \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{\vec{Q}}{\epsilon_0}$$

Diese besagt, dass der elektrische Fluss  $\Phi_E$  durch das Volumen  $A$  der Ladung  $Q$  in der Fläche entspricht. Mit dem Gaußschen-Integraltheorem ergibt sich  $\int_V (\nabla \cdot \vec{E}) dV = \frac{\vec{Q}}{\epsilon_0}$ . Da die Ladungsdichte  $\rho = \frac{Q}{V}$  ist, lässt sich die linke Seite mit  $\frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$  ersetzen. Dies ergibt die differentielle Darstellungsform

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

## 2. Maxwell-Gleichung

Die zweite Maxwell-Gleichung lautet:

$$\oint_A \vec{B} dA = 0$$

Diese besagt, dass der magnetische Fluss  $\Phi_m$  durch eine geschlossene Fläche immer 0 beträgt. Die Gleichung kann ebenfalls als  $\int_V \nabla \cdot \vec{B} dv = 0$  geschrieben werden. Daraus ergibt sich:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Es kann also keine magnetischen Monopole geben. Sollten irgendwann magnetische Monopole nachgewiesen werden, müsste die zweite Maxwell-Gleichung angepasst werden.

## 3. Maxwell-Gleichung

Die dritte Maxwell-Gleichung lautet:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Die dritte Maxwell-Gleichung ist die allgemeinste Form des Induktionsgesetzes. Die linke Seite der Gleichung summiert alle Teile des E-Feldes entlang einer Linie, die Spannung  $U_e$  entspricht dem E-Feld. Die rechte Seite beschreibt das Magnetfeld  $B$  in der Fläche  $A$  oder auch den magnetischen Fluss  $\Phi_m$  durch  $A$ . Das Ganze ist abgeleitet nach  $t$ . Es wird also die zeitliche Änderung des Magnetfeldes beschrieben. Kommt es zu keiner Änderung, gilt  $U_e = 0$ . Das Minuszeichen gibt an, dass die Änderung des magnetischen Flusses sich umgekehrt zur Änderung der Spannung verhält. Je stärker  $\Phi_m$  desto stärker das E-Feld (elektrisches Wirbelfeld).

Mit dem Stokes-Integraltheorem kann die Integrale-Form in die differentielle überführen:

$$\int_A (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{A} = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{L}$$

Daraus folgt

$$\int_A (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{A} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\int_A \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

und damit die differentielle Form:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Kurz gesagt beschreibt die 3. Gleichung, dass ein sich änderndes Magnetfeld B ein elektrisches Wirbelfeld erzeugt und andersherum. Das Ganze erfolgt unter Beachtung der Energieerhaltung.

#### 4. Maxwell-Gleichung

Die vierte Maxwell-Gleichung lautet:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{E} \cdot d\vec{a}$$

Diese hat auf der linken Seite der Gleichung ein Linienintegral der magnetischen Feldstärke bzw. kann diese durch die magnetische Spannung  $U_m$  ersetzt werden. Auf der rechten Seite der Gleichung werden die magnetische Feldkonstante und der elektrische Strom addiert mit einem sich über die Zeit ändernden elektrischen Fluss.

Mit dem Stokes-Integraltheorem und der Stromdichte

$$(j = \frac{I}{A} \Rightarrow \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A})$$

lässt sich die Gleichung umformen zu:

$$\int_A (\nabla \cdot \vec{B}) \cdot d\vec{A} = \int_A ((\mu \vec{j} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \cdot d\vec{A})$$

Dies führt zur differentiellen Form:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Diese Gleichung sagt aus, dass elektrische Ströme und sich ändernde elektrische Felder Magnetfelder erzeugen[4].



### 2.1.1 Die elektromagnetischen Wellengleichungen

Die elektromagnetischen Wellengleichungen beschreiben die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum. Die Gleichungen lassen sich aus den Maxwell-Gleichungen herleiten. Für verlustfreie Medien lautet die Wellengleichung;

$$(\nabla^2 - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2})\vec{E} = 0$$

bzw.

$$(\nabla^2 - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2})\vec{B} = 0$$

Diese lassen sich aus der 3. und 4. Maxwell-Gleichung herleiten. Vorausgesetzt wird ein homogenes Medium mit  $\nabla \cdot \varepsilon = 0$  und  $\nabla \cdot \mu = 0$ . Der Rotationsoperator wird auf die dritte Gleichung angewandt. Dies ergibt:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right)$$

Anschließend wird  $\nabla \times \vec{B}$  durch  $\mu j + \mu\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  ersetzt (siehe 4. Maxwell-Gleichung). Angenommen die Stromdichte  $J$  wird nur von den Leitungselektronen gebildet,  $J = kE$ , so wird mit der Beziehung  $\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \Delta \vec{A}$  im Zwischenergebnis die Telegrafengleichung gebildet.

$$\Delta^2 \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu k \frac{\partial E}{\partial t} = 0$$

$$\Delta^2 \vec{B} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} - \mu k \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

Diese kann mit  $k = 0$  zur Wellengleichung weiter vereinfacht werden, wenn ein verlustfreies Medium vorliegt [7].

## 2.2 Fresnelzone

Die Fresnelzone ist benannt nach dem französischen Physiker und Ingenieur Augustin Jean Fresnel (1788 - 1827). Sie beschreibt einen bestimmten räumlichen Bereich zwischen der Sende- und der Empfangsantenne. In Abbildung 2.1 ist die Fresnelzone schematisch dargestellt. In diesem Bereich können Hindernisse die Funkübertragung, auch bei direkter

Sichtverbindung der Antennen stören. Die Fresnelzone wird als Rotationsellipsoid zwischen den Antennen beschrieben. Der Radius  $r$  ist abhängig von der Entfernung zwischen den Antennen und der Frequenz.

$$r = \sqrt[2]{\frac{n \cdot \lambda \cdot d1 \cdot d2}{D}}$$

Mit  $n$  wird die Nummer der Fresnelzone angegeben ( $n = 1$  entspricht der ersten Fresnelzone,  $n = 2$  der zweiten usw.). Häufig wird nur die erste Fresnelzone berücksichtigt, da hier der Hauptteil der Energie übertragen wird.  $D$  ist der Anstand zwischen den Antennen.  $d1$  und  $d2$  geben die Teilabstände an,  $D$  ist die Summe aus  $d1$  und  $d2$ . Die Teilabstände  $d1$  und  $d2$  sind jeweils der einzelne Abstand von jeweils einer Antenne zum zu berechnenden Punkt zwischen den Antennen. Mit der folgenden Formel wird der maximale Radius der Fresnelzone berechnet:

$$b_{max} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot D}{2}}$$

Dieser liegt in der Mitte zwischen den Sendern.

Angenommen wird, dass der Aufbau so erfolgt, dass die Fresnelzone keinen Einfluss auf die Radaranlage hat. Als Beispiel dient eine Wetterradaranlage. Dieses arbeitet auf der Frequenz 9210 MHz, ist in 36,5 m Höhe aufgebaut und hat eine Elevation von  $0^\circ$ - $90^\circ$ . Bei einem Objekt in einer Entfernung von 100 km ist der Radius der Fresnelzone fast 40m, bei 200 km ca. 56 m groß. Abhängig von den geographischen Gegebenheiten hat die Fresnelzone einen Einfluss auf die Empfangseigenschaften des Radars. Wenn die Elevation so geändert wird, dass die Antenne 'Richtung Himmel ausgerichtet wird', sinkt der Einfluss der Erdoberfläche[23].

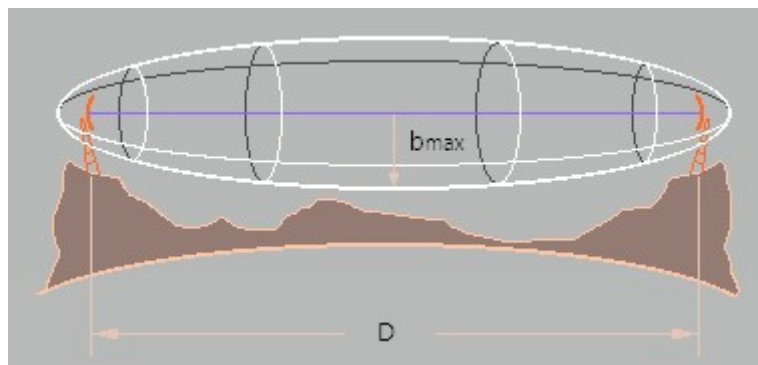


Abbildung 2.1: Darstellung der Fresnelzone einer Richtfunkstrecke [23]

## 2.3 Dämpfungsmodell X-Band

X-Band bezeichnet einen bestimmten Frequenzbereich im Microwellenbereich, der der Radar-Ortung (z. B. Wetterradar und Schiffsortung) bzw. der Kommunikation mit Satelliten dient.

Heutzutage wird damit meist der Bereich von 8 GHz bis 12 GHz bezeichnet[1].

Für dieses Frequenzband ist kein spezifisches Dämpfungsmodell verfügbar.

Somit muss auf das Freiraumdämpfungsmaß zurückgegriffen werden, diese wird folgendermaßen hergeleitet.

Die Leistungsdichte  $S$ , einer elektromagnetischen Strahlung, bezogen auf die Kugeloberfläche ergibt:

$$S = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Die Empfangsleistung  $P_t$  wird abhängig von mit der Wirkfläche der Antenne  $A_w$  und der Leistungsdichte, bezogen auf den isotropen Rundstrahler, berechnet:

$$P_t = SA_w$$

in die Gleichung wird

$$A_w = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

eingesetzt. Die Wirkfläche der Antenne ist wiederum abhängig von der Wellenlänge  $\lambda$ . Das Verhältnis aus Sendeleistung und Empfangsleistung bildet die Freiraumdämpfung  $F$  in Abhängigkeit von der Frequenz,  $f = \frac{c}{\lambda}$ .

$$P_t = \frac{P}{4\pi r^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 P$$

$$F = \frac{P}{P_t = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2}$$

$$F = \left(\frac{4\pi r f}{c}\right)^2$$

Das Freiraumdämpfungsmaß ( $F$  in dB) leitet sich aus der Freiraumdämpfung ab. Die Umrechnung in dB erfolgt dabei nach der Formel:

$$F_{dB} = 20 \log_{10} \left( r f \frac{4\pi}{c} \right)$$

Daraus folgt, dass bei jeder Verdoppelung von  $r$  6dB hinzukommen[6].

## 2.4 Einfluss der Topographie auf die Feldstärke

Im Freiraum lässt sich die Feldstärke mit

$$E = \sqrt{\frac{P \cdot Z_0 \cdot G_i}{4 \cdot r^2 \pi}} \frac{1}{d}$$

ermitteln. Dabei ist:

$$P = \text{Senderleistung}$$

$$Z_0 = 120\pi$$

$$G_i = \text{Antennengewinn}$$

$$d = \text{Entfernung}$$

Vereinfacht ergibt sich

$$E = \sqrt{30} \frac{\sqrt{EIRP}}{d}$$

$\sqrt{30}$  aus  $\sqrt{\frac{377}{4\pi}}$ , EIRP ist gleich  $P \cdot G_i$ .

Da sich die Radarantenne dreht muss die Feldstärke 360° um den Standort berechnet werden. Einige Radarsysteme variieren in der Elevation, dies muss in der Formel berücksichtigt werden.

Bei der Berechnung wird erstmal vom 'Worst-Case' einer Elevation von 0° ausgegangen. In dem Bereich des X-Bandes gibt es keine Bodenwelle, sondern das Signal breitet sich allein über die Raumwelle aus. Die Raumwelle breitet sich quasioptisch aus, wenn die Fresnelzone nicht verletzt wird. In diesem Fall kann mit der Freiraumdämpfung gearbeitet werden[10].

## 2.5 Radargleichung

Mit der Radargleichung lässt sich die Reichweite eines Radars berechnen. Auch zum Radarentwurf wird diese Gleichung genutzt. Die Reichweite  $R_{[max]}$  wird in Abhängigkeit von verschiedenen Kennwerten wie dem Radarsendesignal und der Abtaststrategie sowie der Frequenz bzw. Wellenlänge, den Radar-Subsystemen: Sender, Antenne (Antennengewinn  $G$ ), Empfänger (Rauschtemperatur  $T_{[R]}$ ) und Signalprozessor beschrieben. Ebenso sind die Eigenschaften des aufzunehmenden Ziels, Rückstreufäche  $\sigma$  und Entfernung  $R_{[z]}$  zu berücksichtigen. Die Radarumgebung hat ebenfalls Einfluss.

Die Herleitung der Radargleichung fängt mit der gleichmäßigen Verteilung der Leistung einer elektromagnetischen Welle über einer Kugeloberfläche mit dem Radius  $R$  an:

$$S_{i.k} = \frac{P_s}{A_{Kugel}} = \frac{P_s}{4\pi(R_{sz})^2}$$

Der Antennengewinn wird eingezogen:  $S_s = G_s S_{i.k} = \frac{P_s G_s}{4\pi(R_{sz})^2}$ .

Die vom Radar abgestrahlte Leistung wird am Ziel reflektiert und zurückgeworfen. Also wird die Rückstreufäche  $\sigma$  einbezogen, dies ergibt folgende Formel:

$$P_z = S_s \sigma = \frac{P_s G_s}{4\pi(R_{sz})^2} \cdot \sigma$$

Mit der Entfernung zum Ziel  $R_{ze}$  wird die Leistungsdichte am Empfänger ( $S_e$ ) mit  $S_e = P_z \frac{1}{4\pi(R_{sz})^2} = \frac{P_s G_s}{4\pi(R_{sz})^2} \sigma \frac{1}{4\pi R_{ze}^2}$  berechnet, mit der Antennenwirkfläche  $A_{w,e} = \frac{G_e(\lambda)^2}{4\pi}$ . Die Leistung hinter der Empfangsantenne bestimmt:

$$P_e = S_e A_{w,e} = \frac{P_s G_s}{4\pi(R_{sz})^2} \sigma \frac{A_{w,e}}{4\pi(R_{ze})^2}$$

Für monostatische Radare ergibt sich also

$$P_e = \frac{P_s G_s G_e \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 (R_{sz})^2 (R_{ze})^2} \text{ mit } R_{sz} = R_{ze} = R_z$$

Die Systemverluste  $L$  ( $L+L1+L2+L3$ ) müssen einbezogen werden. Dabei beschreibt  $L1$  die Geräte- und Systemauslegung,  $L2$  Signalverarbeitung und  $L3$  Zielcharakteristik.  $P_e = \frac{P_s G_s \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^3 L}$ . Gelten muss das  $P_e \geq P_{MDS}$  ist.  $P_{MDS}$  ist das kleinste detektierbare Signal.

Daraus ergibt sich für R folgende Gleichung:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s}{P_{MDS}} \frac{G^2 \sigma \lambda}{(4\pi)^3}}$$

Diese Formel gibt die Freiraumreichweite des Radars an. Die Dämpfung der Erdatmosphäre und die Erdkrümmung wurden nicht berücksichtigt.

Aus der Formel ergibt sich, dass für eine Verdoppelung der Reichweite eine Versechzehnfachung der Sendeleistung nötig ist.

Der Wert  $P_{MDS}$  errechnet sich mit der Boltzmannkonstante  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} Ws/k$ , der Rauschtemperatur  $T_R$ , der Empfängerbandbreite B und dem Detektionsfaktor  $Di(n)$ .  
 $P_{MDS} = k \cdot T_R B Di(n)$ .

Der Detektionsfaktor  $Di(n)$  hängt von den verwendeten Radarverfahren ab. Vereinfacht kann er mit dem SNR (Signal-Rausch-Abstand) gleichgesetzt werden [12], [5].

Für ein Beispielradar mit:

$$f = 9410 MHz$$

$$\hat{P} = 25 kW$$

$$L = 3,7 dB$$

$$G = 38,6 dBi$$

einer angenommenen Empfangsempfindlichkeit  $P_{MDS}$  von -105 dBm und einem Objekt mit einer Rückstreulfläche  $\sigma = 10 m^2$  ergibt sich:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{25000W}{0,316pW} \frac{7244,35^2 * 10 * 0,032^2}{(2 * \pi)^3 * 2,34}} \approx 31 km$$

## 2.6 Puls- und Dauerstrichradar

Hauptsächlich lassen sich Radaranlagen in zwei Kategorien: Puls- und Dauerstrichradare unterteilen. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln kurz beschrieben.

## Pulsradar

Beim Pulsradar (auch Impulsradar) handelt es sich um die "klassische" Form eines Radars. Ein Puls wird mit der Dauer  $\tau_p$ , mit dem Pulsabstand  $T_p$  und der Pulsfolgefrequenz  $f_p = \frac{1}{T_p}$  abgestrahlt. Die Leistung des Signals muss also über den Tastgrad  $\eta = \frac{\tau_p}{T_p}$  gemittelt werden.

$$\bar{P}_s = \eta \hat{P}_s$$

Die ursprüngliche Technik wurde modifiziert, um sich bewegende Ziele von statischen unterscheiden zu können. Beim Puls-Doppler-Radar bzw. Moving Target Indication Radar (MTI-Radar) wird zusätzlich die Frequenzverschiebung oder die Phasenverschiebung ausgewertet [5].

In der Abbildung 2.2 ist die Messung der Umlaufzeit einer Radaranlage dargestellt. Die Umlaufzeit ist die Zeit, die ein Radar für eine Umdrehung benötigt.

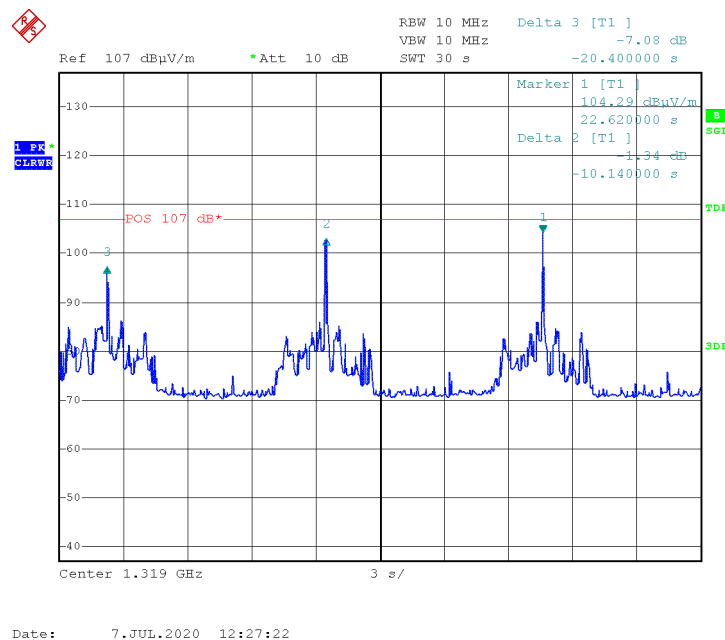


Abbildung 2.2: Messung der Umlaufzeit eines Radars [13].

In Abbildung 2.3 ist die Messung der Pulslänge und der Pausenlänge dargestellt.

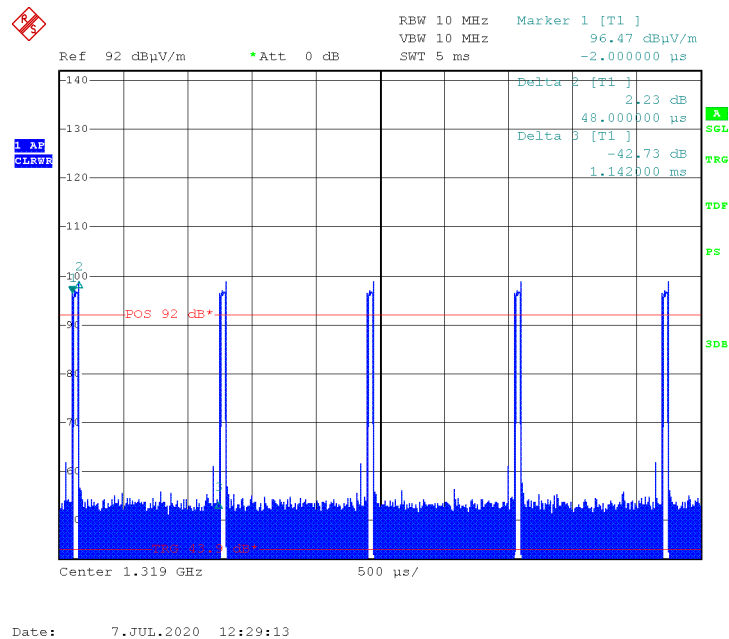


Abbildung 2.3: Messung des Pulses und der Pause eines Radarignals [13].

### 2.6.1 Dauerstrichradar

Beim Dauerstrichradar auch Continuous Wave (CW) wird durchgehend ein Sinussignal mit konstanter Amplitude abgestrahlt. Um Ziele zu erkennen, wird die Phasenverschiebung ausgewertet. Auch von diesem Radarprinzip gibt es mehrere Varianten. Beim Doppler-CW-Radar wird die Frequenzverschiebung ausgewertet. Frequenzmodulation (FM) wird beim FM-CW-Radar genutzt, hier wird der Träger zusätzlich Frequenzmoduliert. Auch Systeme mit mehreren Trägern können genutzt werden [5].

## 2.7 Antennentechnik

Eine Antenne entnimmt einem elektromagnetischen Feld Energie oder strahlt Energie in Form von elektromagnetischen Wellen ab. Sie stellt den Übergang von der leitungsgebundenen Ausbreitung zur Freiraumausbreitung dar.



### 2.7.1 Antennenfeldzonen

Üblicherweise wird eine Unterscheidung in drei Zonen vorgenommen. Im Nahfeld muss eine getrennte Betrachtung der elektrischen- und des magnetischen Feldes vorgenommen werden, da die beiden Komponenten nicht orthogonal zueinander stehen. Im Fernfeld stehen das elektrische- und das magnetische Feld orthogonal zu einander, somit ist ein Umrechnen zwischen beiden Komponenten möglich. Zwischen Nahfeld und Fernfeld existiert ein Übergangsfeld.

Die Übergänge zwischen den Feldern sind fließend und weichen je nach Definition voneinander ab. Die Definition der Bundesnetzagentur gibt das reaktive Nahfeld von der Antenne bis  $\frac{\lambda}{2\pi}$  an. Das strahlende Nahfeld (Übergangsfeld) wird von  $\frac{\lambda}{2\pi}$  bis  $4\lambda$ , und das Fernfeld ab  $4\lambda$  definiert.

Alternativ kann das Fernfeld für große Antennen ( $D > \lambda$ ,  $D =$  größte Ausdehnung der Antenne) mit  $r = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$  berechnet werden. Für kleine Antennen mit  $r = \frac{1}{4\pi} \cdot \lambda$  [9].

### 2.7.2 Antennendiagramm

Ein Antennendiagramm beschreibt die Empfangs- und Sendecharakteristika einer Antenne in grafischer Form. Hierfür gilt in der Regel für die Horizontale die Abhängigkeit vom Azimutwinkel  $\phi$  und für die Vertikale die Abhängigkeit von der Elevation  $\vartheta$ . In Abbildung 2.4 ist ein Beispiel für ein Antennendiagramm abgebildet.

Die Hauptkeule (bei einigen Bauformen auch mehr als eine) ist das Maximum im Antennendiagramm. Hier wird die meiste Energie abgestrahlt bzw. empfangen.  $\Delta\vartheta$  (bzw.  $\Delta\phi$ ) beschreibt die Halbwertbreite der Hauptkeule. In diesem Winkelbereich sinkt die Strahlungsdichte um nicht mehr als die Hälfte. Die Nebenzipfel oder Nebenkeulen sind die kleineren Erhebungen. Diese sollen in der Regel möglichst klein sein. Die Nebenzipfel-dämpfung beschreibt den Abstand zwischen Hauptkeule und den stärksten Nebenkeulen. An den Nullstellen soll theoretisch nichts abgestrahlt werden [7].

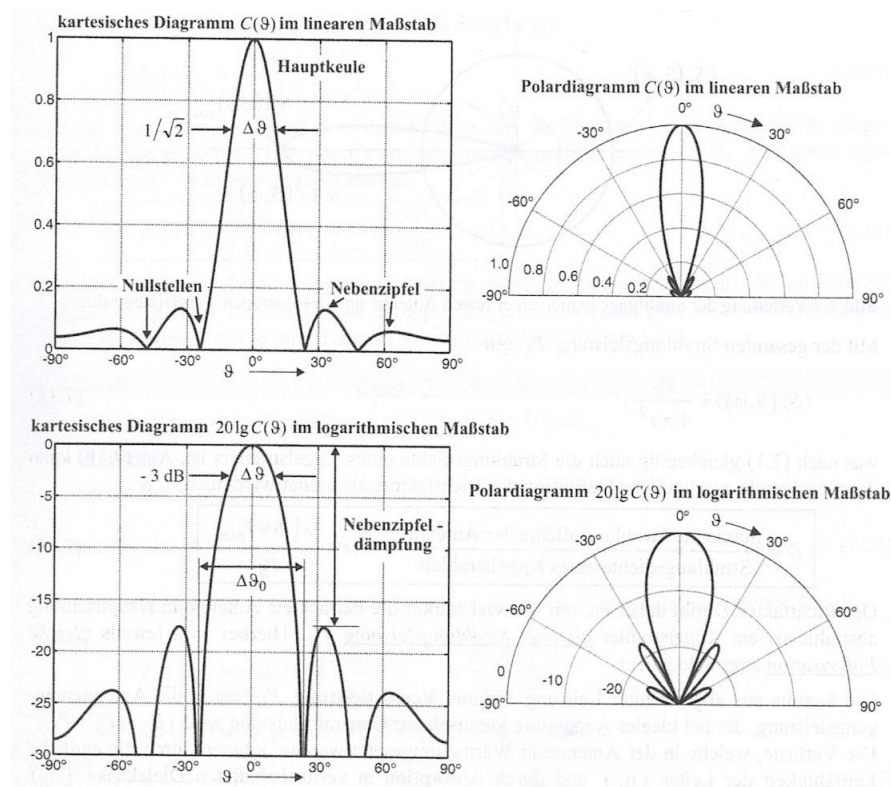


Abbildung 2.4: Beispiele für unterschiedliche Formen der Antennendiagramme (vertikal) [7].

### 2.7.3 Polarisation

Die Polarisation einer Antenne wird allgemein nach der Ausrichtung des elektrischen Vektors des Wellenfeldes in der Hauptstrahlrichtung angegeben. Eine lineare Polarisation liegt vor, wenn der Endpunkt des Vektors auf einer Geraden schwingt. Die Ausbreitungsebene ändert sich nicht. Bewegt sich die Welle horizontal (die Erde als Bezugspunkt), so ist die Antenne horizontal polarisiert. Bei einer vertikalen Polarisation bewegt sich die Welle vertikal zur Erdoberfläche.

Bei einer zirkularen Polarisation bewegt sich der Endpunkt des elektrischen Vektors im Kreis, entweder rechts- oder linksdrehend [5].

### 2.7.4 Richtwirkung einer Antenne

Die Richtwirkung  $D$  einer Antenne ist das Verhältnis aus der Leistungsdichte  $S$  der realen Antenne in Hauptstrahlrichtung zu der eines isotropen Rundstrahlers  $S_i$  (oder eines Dipols).

$$D = \frac{S}{S_i}$$

Die Richtantenne konzentriert ihre abgestrahlte Leistung auf einen kleinen Teil der Kugeloberfläche [7].

Das Vor-Rück-Verhältnis einer Antenne beschreibt den Empfangsunterschied zwischen der Hauptkeule und der rückwärtigen Empfangskeule.

### 2.7.5 Antennengewinn

Durch die Bündelung der Strahlungsintensität scheint die Antenne für den Empfänger in der Hauptstrahlrichtung mit einer höheren Sendeleistung zu senden. Der Antennengewinn  $G$  ergibt sich aus der Richtwirkung und dem Wirkungsgrad einer Antenne.

$$G = \eta \cdot D$$

Ein Teil der in eine Antenne eingespeisten Leistung geht an den ohmschen Widerständen der Antenne verloren. Aus diesen Verlusten ergibt sich der Wirkungsgrad.

Mit  $P_S$  = abgestrahlte Leistung,  $P_G$  = Generatorleistung und  $P_V$  = Verlustleistung.

$$\eta = \frac{P_S}{P_G} = \frac{P_S}{P_S + P_V}$$

[22], [7]

### 2.7.6 Allgemeine Eigenschaften

Im Allgemeinen werden folgende Anforderungen an eine Radarantenne gestellt. Die Antenne soll eine möglichst schmale Hauptkeule haben für eine möglichst hohe richtwirkung. Ein klasisches Radar benötigt eine Antenne die mechanisch schnell drehbar ist. Für eine hohe Präzision sollte die Antenne eine hohe Genauigkeit im Abstrahlwinkel haben.

Aperturantennen sind in der Radartechnik verbreitet. Ist die Öffnung der Antenne sehr groß gegenüber der Wellenlänge, geht die von einem Primärstrahler ausgehende Welle in einen Kugelstrahler über. Der Eindruck einer punktförmigen Quelle entsteht [5].

### 2.7.7 Parabolantenne

Eine Parabolantenne (auch Schüssel genannt) ist ein Hohlspiegel der die einfallende Wellenfront in einem Brennpunkt vor dem Reflektor bündelt. Der Empfänger ist entsprechend in diesem Brennpunkt positioniert. In Senderichtung arbeitet das gleiche Prinzip andersherum. An der Oberfläche des Reflektors werden alle Strahlen mit einem Phasensprung von  $180^\circ$  parallel zur Antennenachse reflektiert. Eine ebene Wellenfront wird geformt.

Der runde Reflektor ist ein Ausschnitt aus einem Rotationsparaboloiden. Dieser ist meist eine Metallkonstruktion, häufig aus einem Gitternetz. Dabei müssen die Löcher im Gitter kleiner als  $\frac{\lambda}{10}$  sein.

Neben der oben beschriebenen Form kann auch eine Form verwendet werden, die nur einer einfachen Parabel folgt. Diese Bauform wird unter folgenden Voraussetzungen verwendet wenn im Höhenwinkel keine Veränderung der Abstrahlcharakteristik benötigt wird oder wenn kein Brennpunkt, sondern eine Brennnlinie gefordert wird.

Alternativ kann die Einspeisung auch durch den Spiegel erfolgen (Cassegrain-Prinzip). Im Brennpunkt wird ein hyperbolischer Hilfsreflektor angebracht. Die Halbwertbreite kann mit

$$\phi_{HW} \sim 72^\circ \frac{\lambda}{D}$$

bestimmt werden [5].

### 2.7.8 Phased Array Antennen

Eine Phased Array Antenne ist eine Gruppenantenne deren einzelne Elemente mit Signalen in unterschiedlicher Phasenlage zu speisen ist. Vor den jeweiligen Elementen ist ein Phasenschieber installiert, um die Phasenlagen zu erzeugen. So kann das Antennendiagramm elektronisch geschwenkt werden. Diese Antenne beruht auf dem Prinzip der Interferenz. Eine phasenabhängige Überlagerung von mehreren Strahlungsquellen wird

genutzt. Als einzelne Antennen können Dipole, Kreuzdipole, Schlitzstrahler, Spiralantennen, Wendelantennen und Trichterstrahler (Aufzählung nicht abschließend) eingesetzt werden. Mit steigender Auslenkung nimmt die Breite der Hauptkeule zu und der Antennengewinn nimmt ab.

Aus diesem Grund werden entweder mehrere Antennenflächen versetzt zueinander oder eine Antennenfläche dreh- und schwenkbar aufgebaut, um eine größere Fläche überwachen zu können [22].

Für ein schwenken um  $\vartheta$  ist eine Phasendifferenz  $\Delta\phi$  zwischen den benachbarten Antennenelementen nötig. Mit  $d$  als Abstand zwischen den Elementen und  $\Delta R = d \cdot \sin(\vartheta)$  ergibt sich:

$$\Delta\phi = 2 \cdot \phi \frac{\Delta R}{\lambda} = 2 \cdot \phi \frac{d \cdot \sin(\vartheta)}{\lambda}$$

Eine Erweiterung um  $N$  Antennenelemente ist hiermit problemlos möglich. Der Zusammenhang zwischen  $\vartheta$  und  $\Delta\phi$  ist im Bereich  $|\Delta\phi| < \frac{\phi d}{\lambda}$  näherungsweise linear. Der Abstand  $d$  ist groß zu wählen, um einen hohen Gewinn und eine niedrige Halbwertbreite zu erzielen. Die obere Grenze für  $d$  wird mit  $d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin\vartheta_{max}}$  bestimmt.

Der Abstand  $d$  zwischen den Antennenelementen darf nicht zu groß ( $d > \lambda$ ) sein, da sonst sekundäre Hauptkeulen im Antennendiagramm auftreten. Im Allgemeinen wird  $d$  nicht größer als  $0,65\lambda$  gewählt.

Die Vorteile einer Phased-Array-Antenne sind die schnelle Schwenkbarkeit, die Möglichkeit Störer auszublenden und der Multifunktionsbetrieb (das gleichzeitige verfolgen mehrerer Ziele).

Aus der Formel

$$\vartheta = \arcsin \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi d}$$

ergibt sich, dass der Schwenkwinkel frequenzabhängig ist. Bei Signalen mit größerer Bandbreite variiert der Schwenkwinkel innerhalb des Signals. Zur weiteren Absenkung der Nebenkeulen kann eine "Fensterung" vorgenommen werden. Die Amplitudenbelegung der einzelnen Antennenelemente wird angepasst. Dadurch entstehen im Antennendiagramm Filterfenster, wie sie im Fach "Digitale-Signalverarbeitung" gelehrt werden. Die Absenkung der Nebenkeulen führt gleichzeitig zu einem geringeren Gewinn und einer Auweitung der Hauptkeule.

Wenn die empfangenen Daten nicht mit einem zentralen Empfänger verarbeitet werden, sondern an jedes Element ein eigener Empfänger angeschlossen wird, ist ein Digitales Beamforming (DBF) möglich. Dadurch ist eine weitergehende Bearbeitung der Eingangssignale möglich, wie zum Beispiel das Erzeugen von adaptiven Nullstellen um Störer

auszublenzen [5].

### 2.7.9 Cosec<sup>2</sup>-Antenne

Die Cosec<sup>2</sup>-Antenne weist ein Antennendiagramm auf, das teilweise dem Kossecans abhängig vom Winkel folgt. Der Kossecans ist das Verhältnis von Hypothense zu Gegenkathete. Das vertikale Antennendiagramm der folgenden Funktion:

$$G(\epsilon) = G[\epsilon_{HSR} \frac{\text{cosec}^2 2\epsilon}{\text{cosec}^2 \epsilon_{HSR}} \text{ mit } \epsilon_{HSR} \leq \epsilon \leq \epsilon_{max}$$

,  $\epsilon_{max}$  gibt die Grenze der Cosec<sup>2</sup>-Charakteristik und  $\epsilon_{HSR}$  die Hauptstrahlrichtung an:

$$\epsilon_{HSR} = \arcsin \frac{h_m}{R_m}$$

Das Diagramm zwischen  $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{HSR}$  hat die für Radar-Antennen typische Fächerform. Durch die Verformung des Antennendiagramms wird die Antennenwirkfläche verkleinert auf:

$$A'_{w,e} = \frac{A_{w,e}}{2 - \epsilon_{HSR} \cdot \cotan \epsilon_{max}}$$

[5]

### 2.7.10 Radome

Radome werden beispielsweise zum Schutz vor Wettereinflüssen verwendet. Dabei handelt es sich um eine Abdeckung der Antennen.

Das Material und die Formgebung werden so gewählt, dass die Beeinflussung der Antenne möglichst gering ist.

Typischerweise werden Radome aus glasfaserverstärktem Kunststoff in Ausnahmefällen (Flugkörper) aus Keramik gefertigt.

Diese werden entweder mit massiven und möglichst dünnen (im Vergleich zur Wellenlänge) Wänden oder aus dickeren Elementen in einer Wabenstruktur aufgebaut.

Das Radom nimmt Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften des Radars. Richtungsfehler können erzeugt werden. Im Antennendiagramm können die Nebenkeulen erzeugt oder verstärkt werden. Auch ein Einfluss auf die Polarisation des Radarsignals ist möglich. Der Empfang des Radarsignals wird durch das Radom gedämpft. [5]

## 2.8 Störungen von Radaranlagen durch Radaranlagen

Das im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelte Projekt wird soll helfen das Störpotenzial von Radaranlagen auf andere Radaranlagen abschätzen zu können.

Bei Radaranlagen handelt es sich um ungewollte aktive Störquellen. Aktiv, da ein Signal abgestrahlt wird und ungewollt, da der Betriebszweck nicht in der Störung liegt.

Eine Störung durch andere Radaranlagen gilt, aufgrund der starken Bündelung, der schmalen Frequenzbandbreite und des gepulsten Signals als unwahrscheinlich [5].

Durch die genannten Eigenschaften wird es unwahrscheinlich das sich zwei Radaranlagen gegenseitig empfangen und damit Stören. Die Radaranlagen müssten auf der gleichen Frequenzarbeiten und im richtigen (falschen) Zeitpunkt so ausgerichtet sein, dass das Fremdsignal empfangen wird. Sollte der Fall aber unwahrscheinlicher Weise auftreten ließe sich das nur mit Aufwand beheben. Möglich wäre zum Beispiel der Frequenzwechsel einer Radaranlage. Somit sollte die Störwahrscheinlichkeit nochweiter reduziert werden.

## 2.9 Koordinaten

In der Frequenzuteilung ist der Standort in WGS84-Koordinaten, World Geodetic System 84 (WGS 84), angegeben. Genau genommen bezeichnet WGS84 das Referenzellipsoid, also die Annäherung an die reale Erdform. Die Erdkugel wird in 180-Breitengrade ( $+90^\circ$  Nord,  $-90^\circ$  Süd) und 360-Längengrade ( $180^\circ$ -West,  $180^\circ$ -Ost) aufgeteilt. So kann jeder Punkt auf der Erde durch zwei Koordinaten eindeutig beschrieben werden.

Die geografische Breite beschreibt den Winkel, der sich zwischen Erdmittelpunkt dem gesuchten Punkt P und dem Äquator aufspannt. Punkte auf dem Äquator haben immer die Breite 0, während der Nordpol 90 Grad und der Südpol -90 Grad geografische Breite haben. Die Kurve, die durch Punkte gleicher Breite führt, wird als Breitenkreis bezeichnet. Die geografische Länge bezeichnet den Winkel, der sich zwischen Erdmittelpunkt, dem gesuchten Punkt P und dem Nullmeridian (der Längengrad durch Greenwich in England) ergibt. Ein Meridian oder Längengrad führt durch Nordpol, Südpol und alle Punkte gleicher Länge. Ein Grad entspricht 60 Minuten, eine Minute wieder 60 Sekunden.

Zum Anzeigen und Berechnen der Koordinaten in Matlab, wird die dezimale Schreibweise genutzt [8].

### 3 Verschiedene RADAR-Anlagen im X-Band

In diesem Kapitel erfolgt eine kurze Aufführung der unterschiedlichen RADAR-Anwendungen im X-Band.

Tabelle 3.1: Radar-Anwendungen [3]

Frequenzbereich in MHz	Anwendung
8825 - 9500	Land-Radar Anwendungen zur Beobachtung des Schiffsverkehrs
8800 - 9000	Radare für die bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung (BNK) von Windenergieanlagen
9200 - 9500	Radare für die BNK von Windenergieanlagen
9300 - 9500	Radare zur Ortung von kondensiertem Wasserdampf oder zur Verfolgung von Wetterbalons

Zusätzlich sind in diesem Bereich Vogelschlagradare für Windkraftanlagen geplant.



## 4 Zielsetzung der Thesis

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es ein Werkzeug zu entwickeln mit dem sich die Ausbreitung der Signale von Wetterradaranlagen beurteilen lässt. Dieses Werkzeug soll dabei helfen den Einfluss einer Radaranlage auf eine andere Radaranlage zu beurteilen. Von den Zuständigen für die Frequenzzuteilung von Radardaten, wird ein Geoinformationssystem (GIS) zur Beurteilung der potentiellen Standorte genutzt. Da diese Software (Hersteller und Markennamen werden bewusst nicht genannt) nicht alle Anforderungen erfüllt, soll geprüft werden, ob diese durch die MATLAB-Mapping-Toolbox abgelöst werden kann. Bemängelt werden unter anderem die Geschwindigkeit beim Anzeigen von Kartendaten und das keine Möglichkeit besteht Berechnungen zur Ausbreitung von Funksignalen direkt in der Software vorzunehmen.

Folglich soll in dieser Bachelor Thesis untersucht werden, ob es möglich ist, die Kartendaten in einem erforderlichen Format zu laden. Des Weiteren sollen erster grundlegende Berechnungen durchgeführt werden. Gegebenenfalls soll das Projekt später in eine professionelle Weiterentwicklung durch ein Entwicklerteam überführt werden. Konkret soll die Ausbreitung der Signale von Wetterradaranlagen berechnet werden, sowohl im Freiraum wie auch unter Einbeziehung der Topografie.

In der Umsetzung wurden unterschiedliche Kartendaten geladen, mit jeweils anderen Vor- und Nachteilen, die in den folgenden Kapiteln weiter erläutert werden. Die Reduktion der Feldstärkewerte mit der Verdeckung der Fresnelzone wurde gewählt, da diese sich mit relativ wenig Aufwand umsetzen lässt.

Das Programm MATLAB wurde als Basis ausgewählt, da es verschiedene Vorteile bietet. Es ist auf verschiedenen Hard - und Software Basen lauffähig, somit ist das Programm automatisch auf jedem System ausführbar auf dem MATLAB läuft. Es bietet die Möglichkeit einer leichten Erweiterbarkeit bei einem möglichst modularen Aufbau. Außerdem lässt sich mit MATLAB leicht eine einfache grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface (GUI)) erstellen. Zusätzlich lassen sich mit MATLAB große Datenmengen automatisiert verarbeiten.

# 5 Umsetzung

In diesem Kapitel wird die praktische Umsetzung des Themas der Bachelorthesis betrachtet.

## 5.1 Verwendete Arbeitsmittel

### 5.1.1 MATLAB

MATLAB, wurde von Cleve Moler und Jack Little in den 1970er Jahren entwickelt. Der Vertrieb erfolgt durch die Firma "The Math Works, Inc". MATLAB ist ein Tool zur Berechnung und Simulation komplexer mathematischer und technischer Probleme, sowie deren graphischer Darstellung [21].

### 5.1.2 MATLAB Mapping-Toolbox

Mit der MATLAB Mapping-Toolbox ist es möglich, geografische Daten zu transformieren und Kartendaten zu erstellen. Geografische Daten lassen sich verwalten. Die MATLAB Mapping-Toolbox ermöglicht es, viele Dateiformate zu importieren und viele Web-Map-Server einzubinden.

Die Daten lassen sich individuell verarbeiten und anpassen. Dadurch ist eine Zusammenführung unterschiedlicher Quellen ist möglich.

## 5.2 GUIDE

Graphical User Interface Environment (GUIDE) bietet eine Möglichkeit um für MATLAB-Programme eine GUI zu erstellen [21].

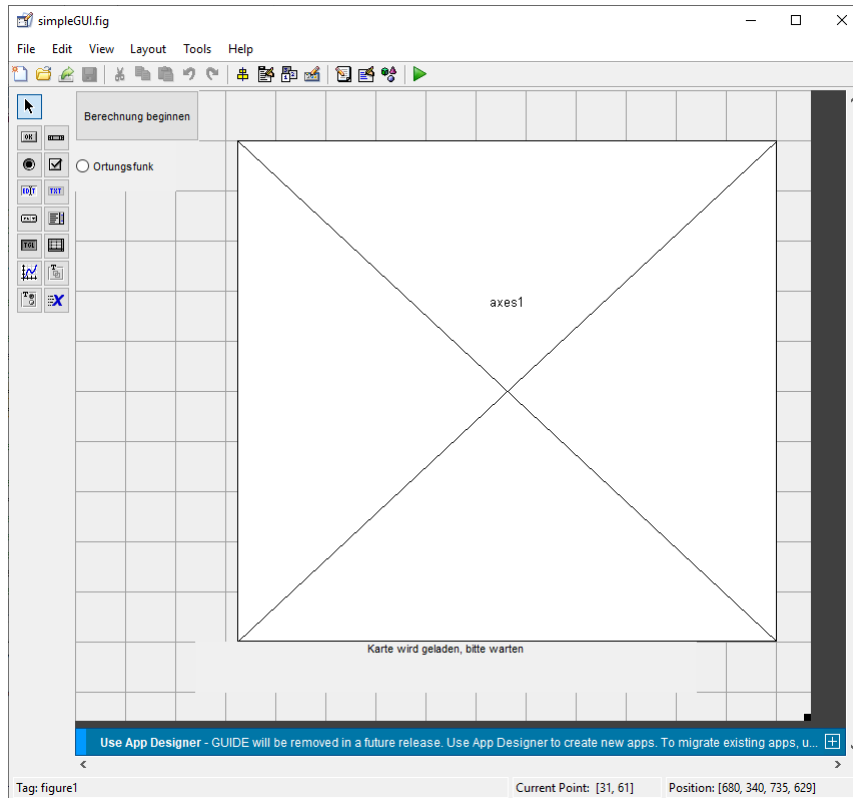


Abbildung 5.1: GUIDE, Editor zum erstellen einer GUI

## 5.3 Umsetzung

Ein Matlab-Script wurde geschrieben um die Berechnung der Feldstärkewerte durchzuführen und die Ergebnisse der Berechnung auf einer Karte anzuzeigen.

### 5.3.1 Kartendaten

Die Kartendaten wurden per Web Map Service (WMS) eingebunden. Ein WMS ist eine standardisierte Schnittstelle, über die Karten eines Anbieters digital zur Verfügung gestellt werden.

Der Server antwortet auf Anfragen, indem er Kartenbilder und Sachinformationen in unterschiedlichen Formaten zur Verfügung stellt [11].

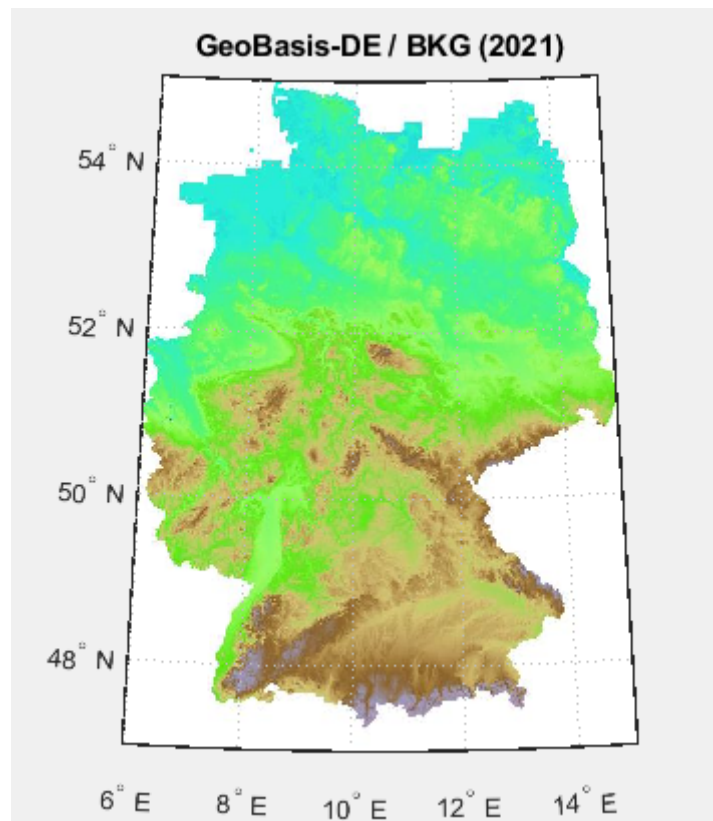


Abbildung 5.2: Eingebundene Deutschlandkarte

Eingebunden wurde eine Deutschlandkarte vom Geoportal des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie. Die Karte kann kostenfrei von jedermann genutzt werden [2].

Anders als ein WMS das Georasterdaten übergibt arbeitet Web Feature Service (WFS) mit Vektordaten. Diese können von MATLAB leider nicht verarbeitet werden [18].

Die fehlende Unterstützung von WFS schränkt die Auswahl der verfügbaren offenen Quellen für Geodaten ein.

Die Karte wird mit dem Befehl 'wmsupdate' abgerufen und mit '[A,R] = wmsread' wird mit A eine Rasterkarte zurückgegeben, in R wird ein sogenanntes 'raster reference objekt' gespeichert dieses setzt A in bezug zu WGS 84 - Koordinaten. Zum abrufen der Karte muss die Host-Adresse mit dem genauen Pfad und dem Layernamen im Script hinterlegt werden. Das R der abgerufenen Karte ist folgendermaßen aufgebaut:

Tabelle 5.1: Eigenschaften des Rasterreferenzobjektes

Properties	Beschreibung
LatitudeLimits [47 55]	Begrenzende Breitengrade des geographischen Kartenausschnitts
LongitudeLimits: [6 15]	Begrenzende Längengrade des geographischen Kartenausschnitts
RasterSize: [500 500]	Rastergröße, Anzahl der Spalten und Zeilen des Rasters welche dem Kartenausschnitt gehört
RasterInterpretation: 'cells'	Gibt vor wie das Raster zu lesen ist
ColumnsStartFrom: 'north'	Gibt den Startpunkt der Spalten vor
RowsStartFrom: 'west'	Gibt den Startpunkt der Zeilen vor
CellExtentInLatitude: 0.016	Auflösung (Breitengrad pro Zelle)
CellExtentInLongitude: 0.018	Auflösung (Längengrad pro Zelle)
RasterExtentInLatitude: 8	Anzahl der Breitengrade
RasterExtentInLongitude: 9	Anzahl der Längengrade
XIntrinsicLimits: [0.5 500.5]	Rastergrenzen in intrinsischen x-Koordinaten
YIntrinsicLimits: [0.5 500.5]	Rastergrenzen in intrinsischen y-Koordinaten
CoordinateSystemType: 'geographic'	Art des Koordinatensystems
GeographicCRS: [1x1 geocrs]	Koordinatenreferenzsystem
AngleUnit: 'degree'	Einheit für Messungen abhängig vom Winkel

Mit denen in A und R hinterlegten Daten lässt sich die Karte mit dem Befehl 'geoshow(A,R)' anzeigen, mit 'usamap' werden die Achsbeschriftungen hinzugefügt. Auf diese Karte lassen sich die Standortdaten und die Berechnungsergebnisse projizieren. Da aber

keine Möglichkeit gefunden wurde, die Geländedaten aus dieser Karte auszulesen wurde eine erweiterte Form des Programms mit alternativen Kartendaten erstellt.

Als Basis wurde die Matlab-Weltkarte als genutzt. Dies hat den Vorteil, das die Karte unabhängig von den Webmapservern genutzt werden kann. Der Kartenausschnitt wurde auf Deutschland begrenzt und zur besseren Orientierung wurden große Flüsse und Städte eingeblendet.

Die Höhendaten wurden mit dem MAT-File 'topo60c' ermittelt. Das Mat-File muss extra eingebunden werden ('load topo60c') und enthält 'Digital Elevation Data', also globale Geländedaten in einer 180-zu-360-Matrix. Jede Zeile repräsentiert einen Breitengrad und jede Spalte einen Längengrad. Jedes Element der Matrix enthält die durchschnittliche Elevation in Metern für eine Region der Erde in einem 1 mal 1 Grad-Gebiet. Der Aufbau der Daten ist identisch mit der WMS-Karte, nur dass statt Farbinformationen die Elevation in der Matrix gespeichert ist [20], [17]. Für die Darstellung der Karte wird die 'worldmap' auf den Bereich 'Germany' eingegrenzt, mit dem Befehl 'geoshow' werden weitere Elemente wie große Städte und Flüsse eingeblendet. Auf die Karte lassen sich auch die Ergebnisse der im weiteren Text erläuterten Programmteile.

### 5.3.2 Auslesen der Höhendaten

Aus dem im vorherigen Kapitel erwähnten 'Digital Elevation Data' lassen sich für einzelne Koordinaten die relativen Höhen auslesen.

Mit dem Matlab-Befehl '[row,col] = geographicToDiscrete(topo60cR,lat,long)' werden die zu den Koordinaten gehörenden Spalten und Zeilen der 'Digital Elevation Data' -Matrix ermittelt [20], [19].

Anschließend werden die Daten mit 'indx = sub2ind(size(topo60c),row,col)' von 'Spalten' und 'Zeilen' in einen fortlaufenden linearen Index gewandelt [15].

Damit lässt sich mit 'heights = topo60c(indx)' die relative Höhe an einem bestimmten Punkt ausgeben [16].

Diese ermittelten Höhen lassen sich in den weiteren Programmteilen nutzen.

### 5.3.3 Laden der Daten

Die Zuteilungsdaten der Radaranlagen werden aus einer Excel-Datei geladen. Zu beachten ist, dass die verwendete Funktion nur unter Windows mit Microsoft Excel funktioniert. Die Excel-Tabelle wird mit dem Befehl '[num, txt, raw] = xlsread()' eingelesen.

Dabei enthält `num` ein Array mit den numerischen Daten, `txt` enthält die Textbestandteile und `raw` die Daten aus `num` und `txt`. Die für die Berechnung benötigten Daten können einzeln ausgelesen werden. Z. B. `'EIRP = raw3,55'` liest den Wert aus der 3. Zeile und der 55. Spalte. In einige Zellen enthalten sowohl numerische wie auch textliche Bestandteile. Diese müssen für eine Weiterverarbeitung getrennt werden. Mit dem Befehl `'strsplit'` werden die Bestandteile der Zelle getrennt und nur der numerische Teil für die Weiterverarbeitung gespeichert.

### 5.3.4 Grafische Benutzeroberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche (eng. graphical user interface, GUI) wurde mit GUIDE erstellt. Beim Öffnen des Programms wird die Deutschlandkarte geladen. Über die Seitenleiste kann der Funkdienst ausgewählt werden. Über ein Textfeld werden Statusdaten und Fehlermeldungen ausgegeben.

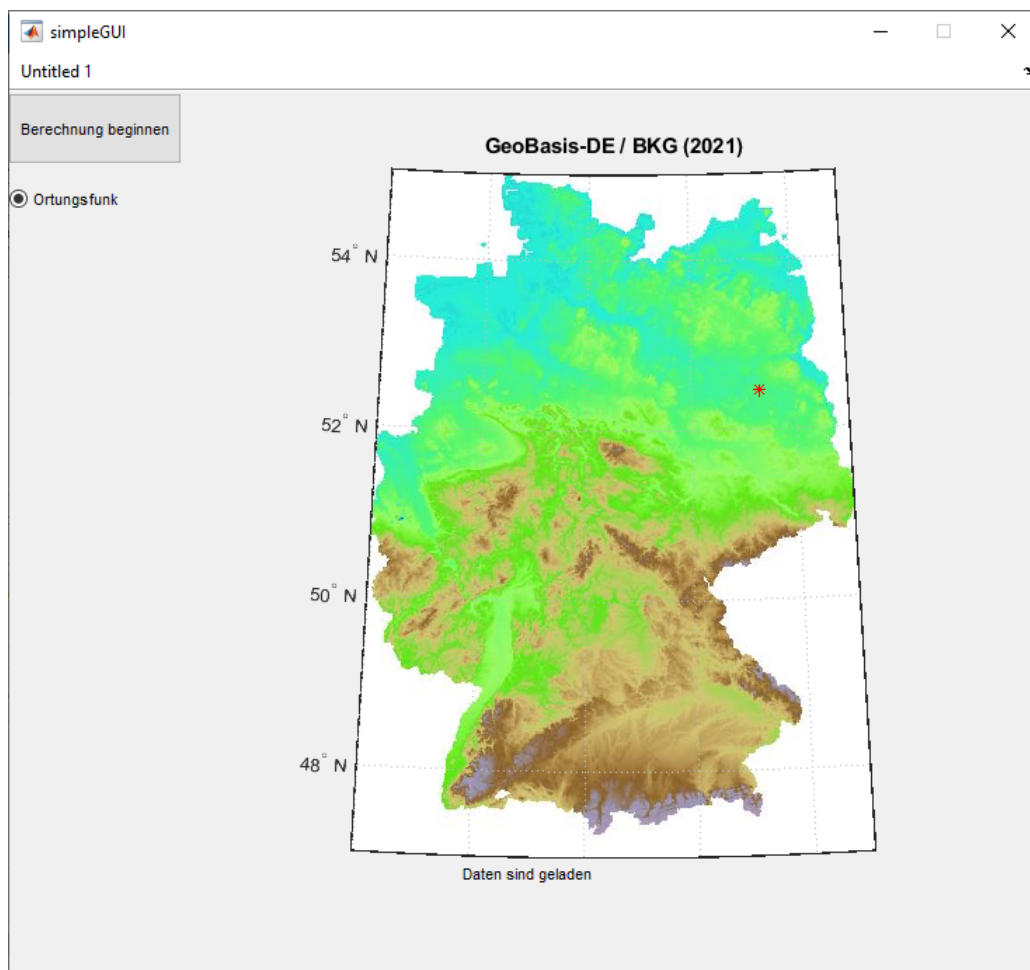


Abbildung 5.3: Entwurf einer grafischen Benutzeroberfläche, Basisfunktionen für das Grundprogramm

Die erweiterte GUI ist ein Vorgriff auf das Kapitel 'Fortführen des Projektes'. Die Seitenleiste kann auf weitere Funkdienste erweitert werden. Über ein Edit-Text-Feld sollen Koordinaten eingegeben werden können. So kann ein potenzieller Senderstandort genauer beurteilt werden.



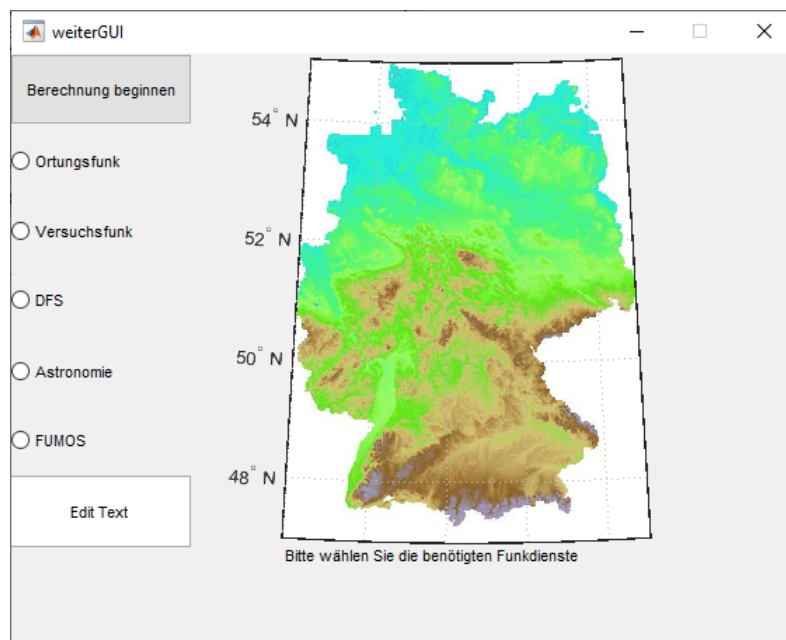


Abbildung 5.4: Entwurf einer grafischen Benutzeroberfläche, Erweiterte Funktionen

Da in der Entwicklung auf weitere Kartendaten zurückgegriffen wird, ist eine zweite GUI erstellt worden.

Für die neue GUI werden andere Kartendaten eingebunden und eine weitere Schaltfläche zum durchführen einer genaueren Berechnung eingefügt.

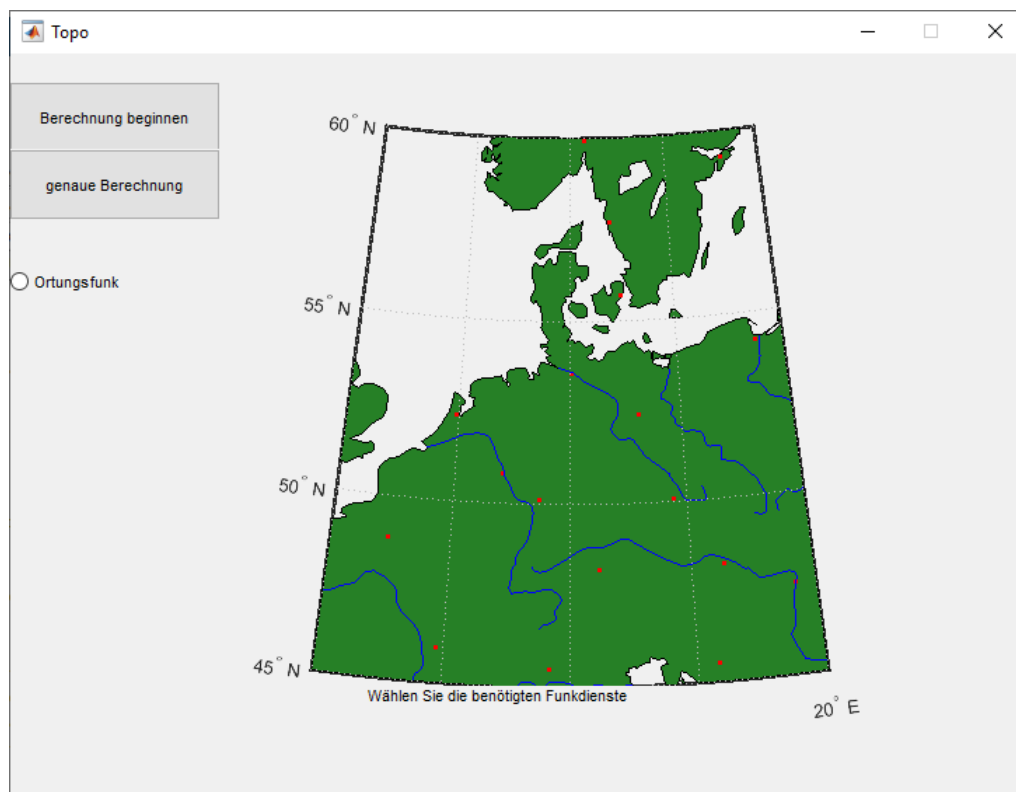


Abbildung 5.5: Neue grafische Benutzeroberfläche

### 5.3.5 Berechnung

Die zur Berechnung notwendigen Daten werden aus der Excel-Datei ausgelesen und an die Funktion zur Berechnung übergeben. Mit  $E = \sqrt[3]{30} * (\sqrt{EIRP}/d)$  wird die Feldstärke in verschiedenen Entfernungen (d) zum Sender berechnet. Die zu diesen Punkten gehörenden Koordinaten müssen bestimmt werden. Dazu wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Erdoberfläche eben ist. Dadurch lässt sich die Berechnung mit dem Satz des Pythagoras durchführen. Zur Demonstration folgt ein Rechenbeispiel mit einem vereinfachten MATLAB-Programm.

```

1 %Standort Koordinaten
2 lon1 = 8.41321;
3 lat1 = 49.9917;
4 %Entfernung
5 c = 1.5929
6 %Winkel

```

```
7 a = 67.26;
8
9 %berechne Gegenkatete
10 dy = sin(a)*c
11 %berechne Ankatete
12 dx = cos(a)*c
13 %Zielkoordinaten
14 lon2 = -(dx/71500) + lon1
15 lat2 = -(dy/111300) + lat1
```

Die Berechnung ergibt die Zielkoordinaten 8.4132 und 49.9917. Die Hypothenuse  $c$  gibt die Entfernung zum Sender an, der Winkel  $a$  die Richtung vom Sender. Die Konstante 111300 ist dabei der Abstand zwischen zwei Breitenkreisen in m und 71500 der durchschnittliche Abstand in m zwischen zwei Längengraden in unseren Breiten [8].

Über If-else-Befehle (Wenn-Dann-Funktion), erfolgt die Abfrage ob die Feldstärkewerte in einem bestimmten Werte-Bereich liegen. Die Punkte je nach errechneter Feldstärke in unterschiedlichen Farben eingefärbt.

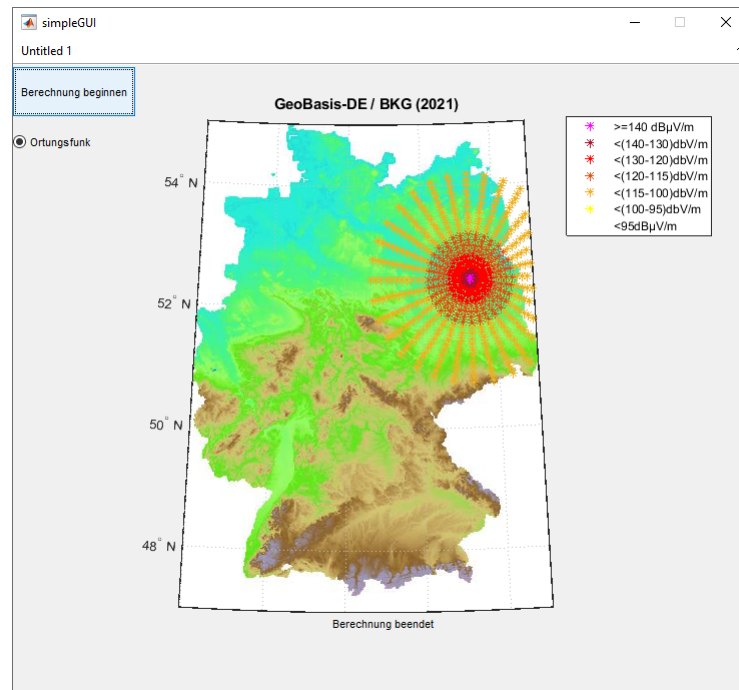


Abbildung 5.6: Anzeige der Punkte in der Karte

Im Anschluss kann eine erweiterte Berechnung unter Einbeziehung der Topografie durchgeführt werden. Die Ausdehnung der Fresnelzone an den errechneten Punkten wird bestimmt. Dazu wird die Wellenlänge aus der Frequenz bestimmt mit  $\lambda = \frac{f}{c}$ . Diese wird in die folgende Formel eingesetzt. Zusammen mit  $n=1$  (für die erste Fresnelzone) und für  $d1$  und  $d2$  die den Punkt umfassenden Werte,  $r = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot d1 \cdot d2}{D}}$ . Dann wird in einer If-Else-Funktion die Antennenhöhe abzüglich der Fresnelzone mit den ausgelesenen Höhenwerten abgeglichen. Je nach Verletzung der Fresnelzone werden die Feldstärkewerte reduziert und die geplotteten Werte neu eingefärbt.

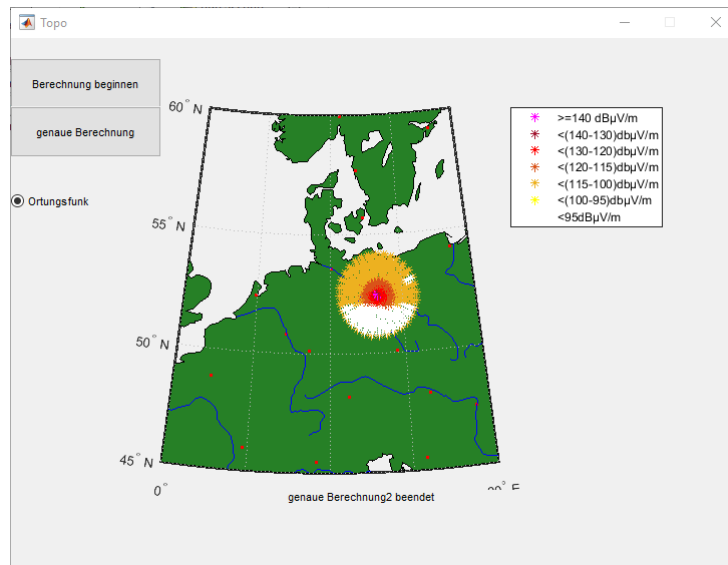


Abbildung 5.7: Ergebnis der zweiten Berechnung mit den umgefärbten Punkten

### 5.3.6 Bedienung des Programms

Es ist zu beachten, dass die Excel-Tabelle muss im gleichen Verzeichnis wie das MATLAB-Script liegen muss. Der Name der Datei muss dem im Script in Zeile 209 verwendeten übereinstimmen und die Tabelle muss der gleichen Formatierung wie dem Beispieldatensatz aus dem Anhang haben. Wird das Script ausgeführt, öffnet sich die Benutzeroberfläche, die Deutschlandkarte wird geladen.

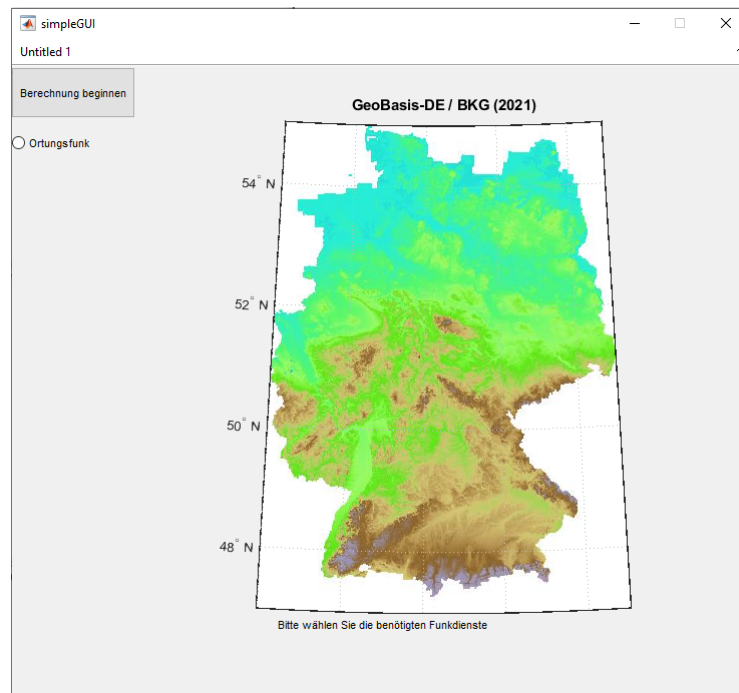


Abbildung 5.8: Grafische Benutzeroberfläche nach dem öffnen

Nach dem Laden der entsprechenden Daten kann mit dem Betätigen der Schaltfläche: 'Berechnung beginnen' die Ermittlung der Feldstärkewerte gestartet werden.

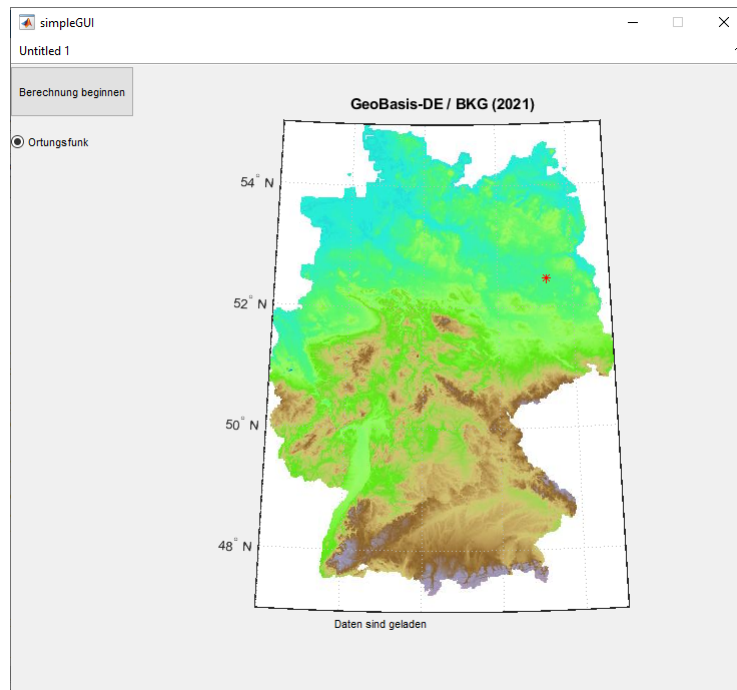


Abbildung 5.9: Anzeige des Senderstandortes als roter \*

Jetzt müssen die gewünschten Funkdienste in der Seitenleiste ausgewählt werden. Zurzeit steht nur der Ortungsfunk zur Auswahl. Der 'Ladevorgang' mit Enter aktiviert. Der Standort des Senders wird nun auf der Karte angezeigt. Die zweite GUI wurde um eine zweite Schaltfläche 'genaue Berechnung' erweitert. Diese stößt eine zweite Feldstärkeberechnung mit Berücksichtigung der Geografie an. Erst muss der Funkdienst über die Seitenleiste ausgewählt werden, als nächstes die Schaltfläche 'Berechnung beginnen' und zum Abschluss kann die 'Schaltfläche 'genaue Berechnung' betätigt werden.

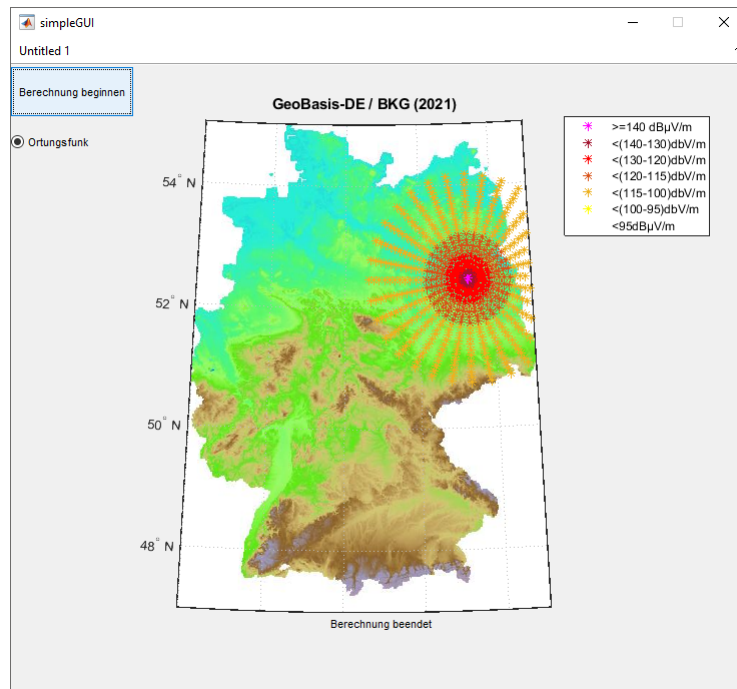


Abbildung 5.10: Ergebnis der Berechnung

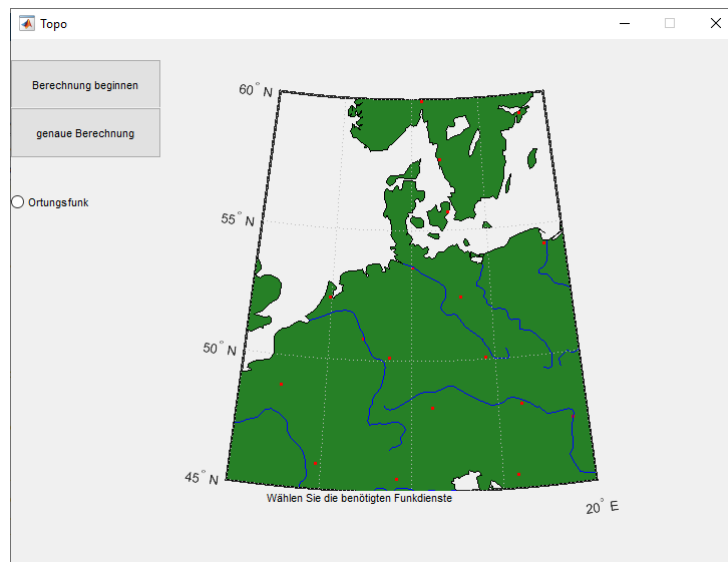


Abbildung 5.11: Zweite grafische Benutzeroberfläche



## 5.4 Test der erstellten Software

In diesem Abschnitt wird dargelegt wie die korrekte Funktion des entwickelten MATLAB-Script verifiziert wird. Es werden in verschiedenen Schritten das Einlesen der Daten, die Darstellung des Standortes auf der Karte und die Berechnung der Feldstärken überprüft. Auch werden die Punkte der reduzierten Feldstärke mit den geografischen Karten abgeglichen. In den folgenden Unterkapiteln werden diese Teiltests jetzt nach und nach abgearbeitet.

### 5.4.1 Test des Einlesens der Daten

Um zu Überprüfen ob die Daten aus der Excel-Tabelle richtig eingelesen werden, werden die entsprechenden Variablen ausgegeben. Anschließend werden diese Werte manuell mit den Werten aus der Tabelle (siehe Anhang A.3 Radardaten) abgeglichen.

Tabelle 5.2: Test des Einlesens der Daten

Eingelesene Werte	Inhalt	korrekt / nicht korrekt
lat: 52.4586	Breitengrad in Dezimalschreibweise	korrekt
long: 13.3106	Längengrad in Dezimalschreibweise	korrekt
EIRP: 78.8794	Strahlungsleistung in kW	korrekt
f: 9410	Frequenz in MHz	korrekt
High NN:66.500	Höhe über Normal Null in Metern	korrekt
High: 89.5000	Höhe über Normal Null addiert mit der Antennenhöhe über Grund	korrekt

### 5.4.2 Test der Koordinaten und der Darstellung des Standortes

In diesem Unterkapitel geht es um die Genauigkeit der Standortanzeige, um diese zu verifizieren, werden verschiedene Koordinaten in das Programm geladen. Die nngezeigten Punkte werden manuell mit einer Karte (zum Beispiel Google-Maps) abgeglichen, um zu Verifizieren ob die Darstellung korrekt ist.

Tabelle 5.3: Koordinatenliste

Koordinaten	Ort	korrekt / nicht korrekt
52.4586 13.3106	Berlin	korrekt
53.5503 9.9997	Hamburg	korrekt
48.13743 11.575449	München	korrekt

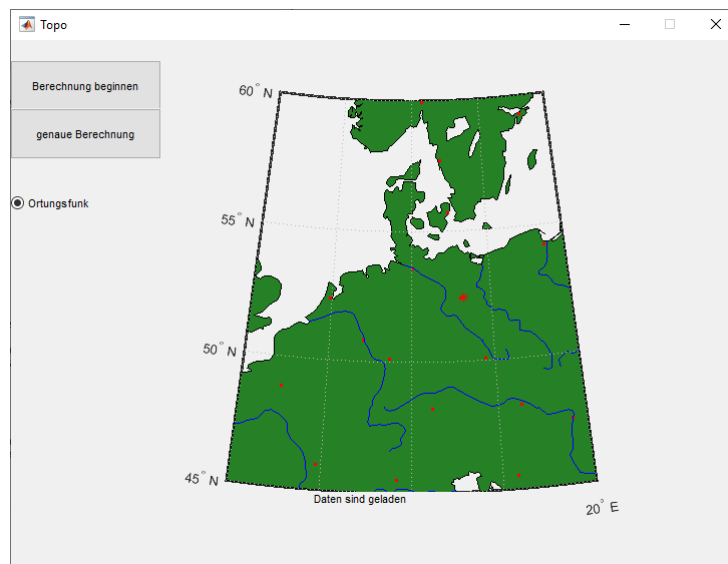


Abbildung 5.12: Standort wird in Berlin angezeigt

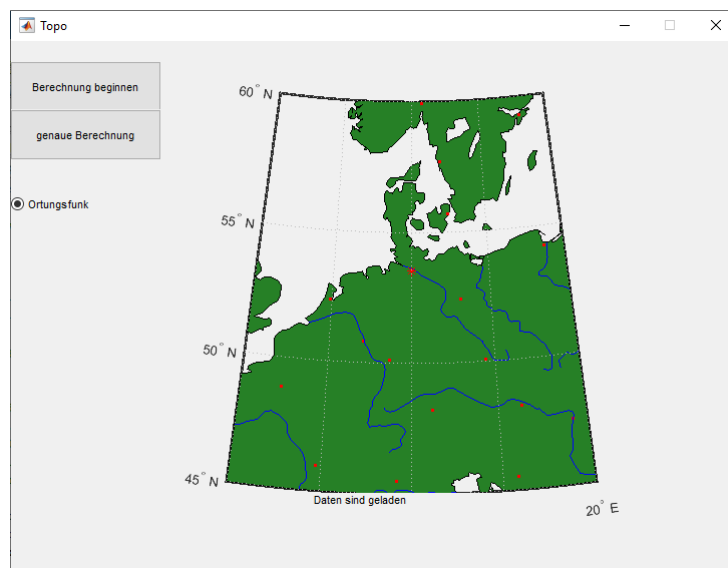


Abbildung 5.13: Standort wird in Hamburg angezeigt

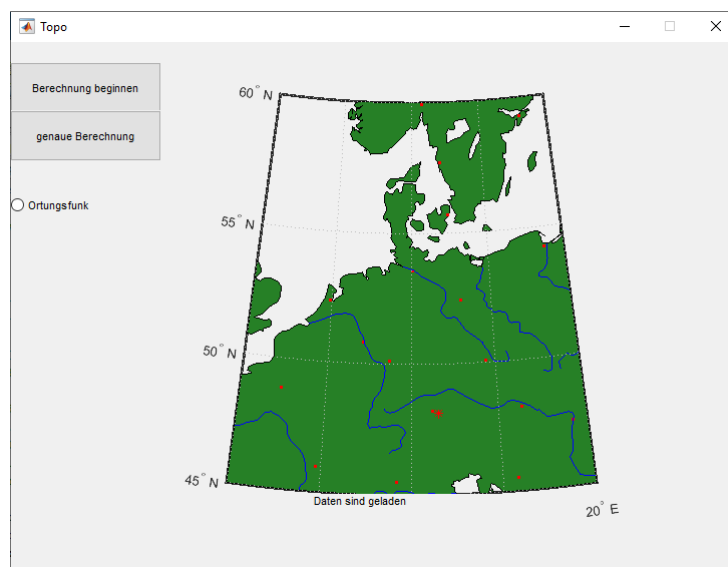


Abbildung 5.14: Standort wird in München angezeigt

### 5.4.3 Test der Berechnung

Die mit Matlab berechneten Feldstärkewerte werden ausgegeben. Von diesen Ausgegebenen Werten werden die ersten vier Werte zu überprüfen. Die Werte wurden mit den

Ergebnissen der Rhode & Schwarz Estimator-Handy App abgeglichen (Version 2.0.0.1). Der Verlauf der Feldstärkewerte das mit steigender Entfernung die Wertunterschiede

Tabelle 5.4: Test der Freiraumausbreitung

Entfernung in Metern	Wert in dB $\mu$ V/m	korrekt / nicht korrekt
1000	153,6	korrekt
11000	132,8	korrekt
21000	127,2	korrekt
31000	123,8	korrekt

immer kleiner werden und das bei einer anähernden verdoppelung der Entfernung eine Absenkung um fast 6 dB (entfernung von 11000 m bis 21000 m) stattfindet entspricht den Erwartungen. Die Radien der Fresnelzone werden für die "genaue Berechnungim MATLAB-Script mit folgenden Werten Berechnet: Der Maximale Radius wurde mit

Tabelle 5.5: Test der Freiraumausbreitung

Entfernung in Metern	Radius der Fresnelzone in Metern	korrekt / nicht korrekt
1000	3,9861	korrekt
11000	13,6126	korrekt
21000	21,6363	nicht Überprüft
31000	26,8039	nicht Überprüft
41000	33,4898	nicht Überprüft
51000	35,6981	nicht Überprüft
61000	37,3449	nicht Überprüft
71000	38,5021	nicht Überprüft
81000	39,2133	nicht Überprüft
91000	39,5024	nicht Überprüft
101000	39,3787	nicht Überprüft
111000	38,8384	nicht Überprüft
121000	37,8636	nicht Überprüft
131000	36,4194	nicht Überprüft
141000	34,4468	nicht Überprüft
151000	31,8478	nicht Überprüft
161000	28,4513	nicht Überprüft
171000	23,9199	nicht Überprüft
181000	17,3878	korrekt

39,524 m berechnet und liegt somit innerhalb der Werte.

#### 5.4.4 Abgleich der reduzierten Feldstärke mit einer geografischen Karte

Die in der "genauen Berechnung" mit dem MATLAB-Script erstellte Darstellung wird mit einer geografischen Karte abgeglichen. Dies ergibt, dass im Süden und Nord-Osten, an ausgeweiteten Gebieten sich geografische Erhöhungen befinden. Die Ergebnisse der Berechnung also grundsätzlich Sinn ergeben.

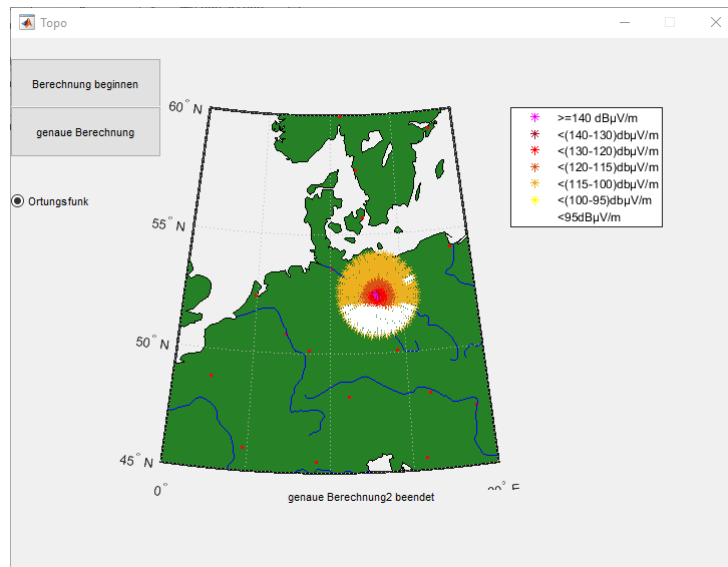


Abbildung 5.15: Ergebnis der zweiten Berechnung mit den umgefärbten Punkten

## 6 Vergleich zweier Radaranlagen

Das MATLAB-Script wurde mit einem Radar in Berlin erprobt, jetzt wurde zum Vergleich eine fast identische Radaranlage in Aachen betrachtet. Bei der Radaranlage in Aachen weicht nur die Aufbauhöhe ab, 18,9 m über Grund im Vergleich zu 36,5 m über Grund. Die Frequenz ist mit 9410 MHz identisch, ebenso wie die EIRP mit 78 MW. Die Berechnung ohne Einbeziehung der Geografie entspricht folgerichtig den Ergebnissen der Berliner Radaranlage.

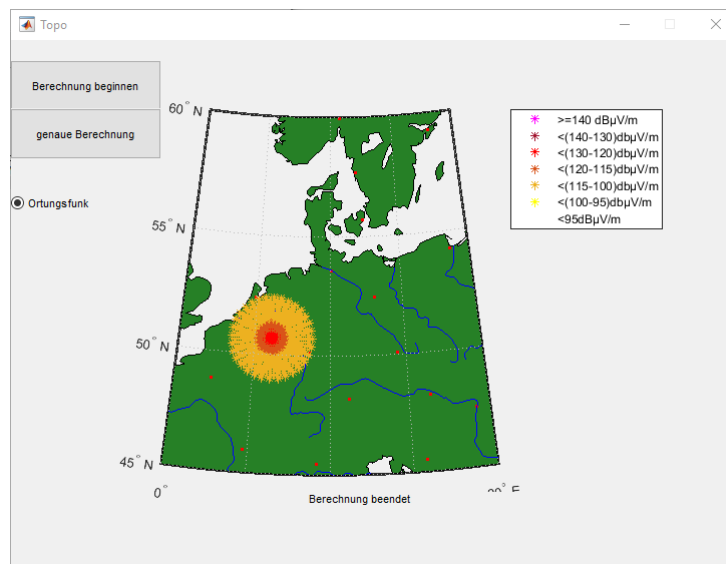


Abbildung 6.1: Aachen, Berechnung ohne Topografie

Bei der weiteren Berechnung mit Einbeziehung der Topografie hat diese wider erwarten keinen Einfluss. Eine Betrachtung der von MATLAB genutzten Höhendaten ergab, dass der Standort höher liegt als die Umgebung. Somit wird die Fresnelzone nicht verletzt.

Obwohl beide Radaranlagen auf den gleichen Frequenzen arbeiten, sind keine Interferenzen bekannt. Der Abstand zwischen Aachen und Berlin ist hinreichen groß mit ca.

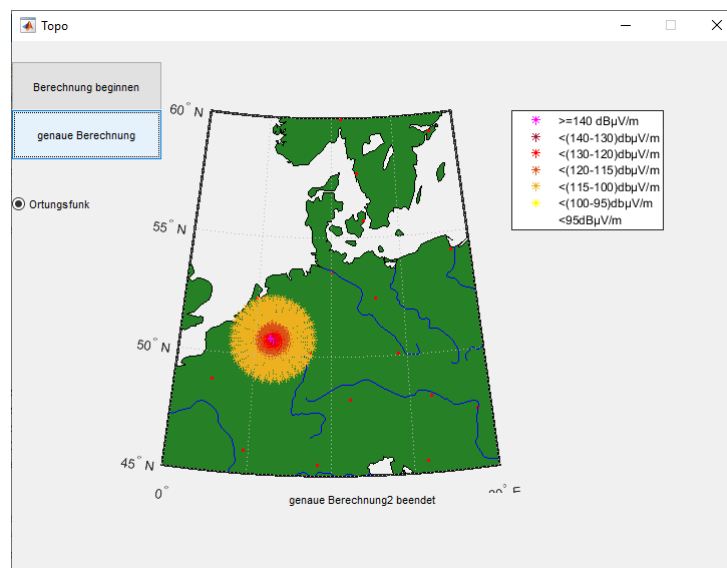


Abbildung 6.2: Berechnung mit der Geografie

542 km, zudem befindet sich der Harz zwischen beiden Standorten. Dazu kommt, dass die Radaranlagen sich im richtigen Moment "Anschauen" müssten. Dies bedeutet, dass die Antennen so ausgerichtet sein müssen, dass sie sich gegenseitig empfangen. Dies ist unwahrscheinlich, da die Antennen sich drehen und in der Elevation variieren.

In einem weiteren Schritt wurde der Berechnungsradius auf 600 km erhöht. Das Gebirge schirmt die Signale in Richtung Berlin nicht ab. Es wird eine Feldstärke zwischen 95 - und 100 dBµV/m im Raum Berlin errechnet. Das deckt sich mit den Ergebnissen der Rhode & Schwarz Estimator-Software. Die gibt eine Feldstärke von 97,501 dBµV/m für diese Entfernung an und eine Empfangsleistung von -80,6 dBm. Da bei einem guten Radarempfänger von einer Empfindlichkeit von -100 bis 110 dBm ausgegangen wird, könnte es theoretisch zu Störungen kommen. Bekannt aber ist das es zu keinen Störungen zwischen den Radaranlagen kommt. So müssen entweder noch weitere Unbekannte (zum Beispiel Bebauung oder Erhebungen die in dem verwendeten Daten nicht vorhanden sind) berücksichtigt werden oder die Ausrichtung der Radaranlagen zueinander blendet die Signale der jeweils anderen aus.

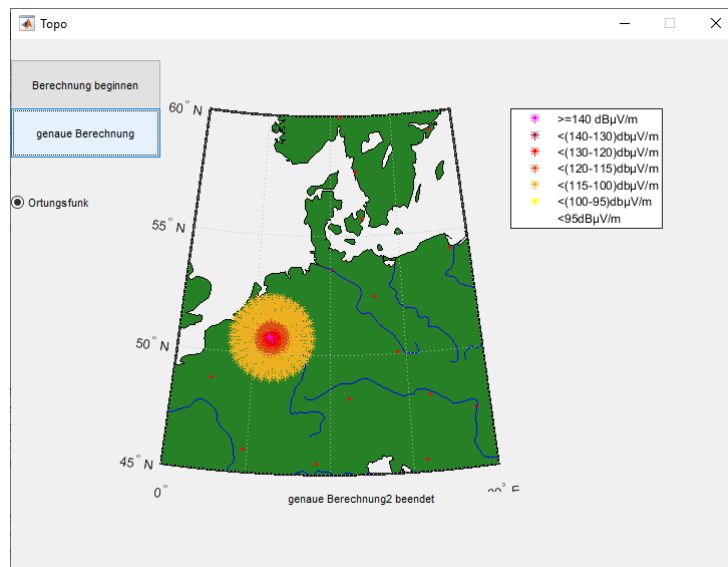


Abbildung 6.3: Berechnung mit einbeziehung der Geografie

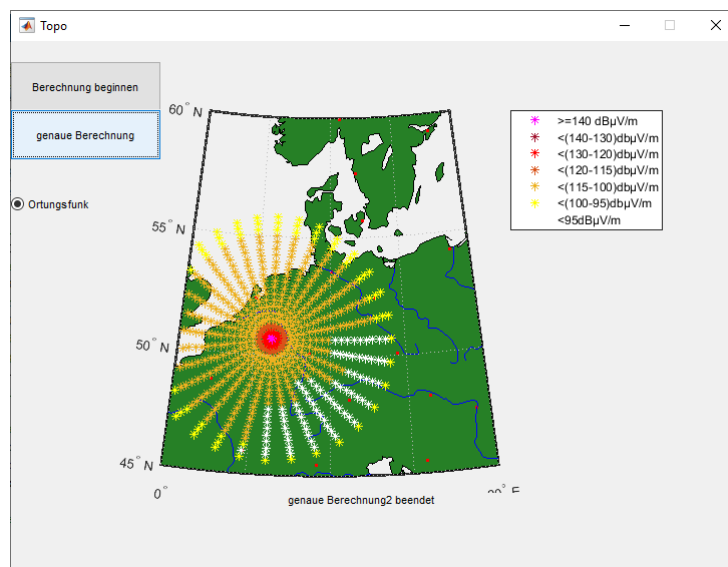


Abbildung 6.4: Vergrößerung der Entfernung der zu berechnenden Wete



## 7 Diskussion

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein Programm erstellt das die Auswirkungen einer Wetterradaranlagen auf eine andere Wetterradaranlage untersucht. Mit den Ergebnissen dieses Programms soll die Frequenzuteilung von Radaranlagen erleichtert werden, da es hilft abzuschätzen ob es zu gegenseitigen Störungen kommt. Die theoretischen Grundlagen der Ausbreitung von Funksignalen im X-Band werden dazu betrachtet und mit Beachtung dieser Grundlagen wird ein MATLAB-Script erstellt. Mit diesem Programm soll in Zukunft das bisher genutzte GIS-Programm abgelöst werden, die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit zielen darauf ab, zu erfahren inwieweit die MATLAB-Mapping-Toolbox dafür geeignet ist.

Die Karte vom Webserver lässt sich wie in der Dokumentation beschrieben einlesen [14]. Durch die Nutzung einer Webkarte werden automatisch Aktualisierungen der Kartendaten berücksichtigt und es stehen potentiell viele unterschiedliche, teils ohne Lizenzierung nutzbare Karten zur Verfügung. Ein Nachteil der Nutzung einer Webkarte ist, dass eine Internetverbindung bestehen muss. Auch könnten bei einer Aktualisierung der Karte vom Herausgeber unerwünschte Änderungen an der Karte auftreten (zum Beispiel Änderungen am Farbschema oder das Hinzufügen von nicht gewünschten Daten). Da eine Verarbeitung der Höhendaten der verwendeten Webkarte nicht möglich ist, werden in einer zweiten Version des MATLAB-Script andere Daten eingebunden. Mit diesen lassen sich Berechnungen unter Einbeziehung der Höhendaten vornehmen.

Die Ergebnisse der Berechnung im Freiraum entsprechen den Erwartungen, die Feldstärke fällt proportional mit dem Quadrat des Abstands zum Sender. Bei den Ergebnissen der Berechnung unter Berücksichtigung des Geländes ist zu beachten, dass keine Quellen vorliegen die zuverlässige Daten zur Feldstärkereduktion bei einer teilweisen Verdeckung der Fresnelzone treffen. Die verwendeten Werte zur Reduktion der Feldstärkewerte dienen nur zur Demonstration des Prinzips. Mit den für die Fresnelzone angenommenen Daten lässt sich aber feststellen, dass bei geografischen Erhebungen es zu einer Reduktion der Feldstärke kommt. Somit wurde das grundlegende Prinzip erfolgreich demonstriert. Sollte die Quellenlage sich verbessern, ist es kein Problem das Programm entsprechend

anzupassen.

Die Berechnung der Feldstärkewerte beginnt erst in einem Kilometer Abstand zum Sender, eine Betrachtung der näheren Umgebung etwa zum Personenschutz ist somit nicht möglich. Zur Betrachtung der nächsten Sender Umgebung sollte ein genaues Antennendiagramm berücksichtigt werden, um zum Beispiel die Abstrahlung nach unten betrachten zu können. In den zur Verfügung stehenden Daten ist nur die Halbwertbreite der Hauptkeule angegeben, weitere Daten zur Antenne liegen nicht vor. In einer Entfernung von einem Kilometer und mehr hat das Antennendiagramm keine Auswirkung. Auf den aktuellen Stand und Verwendungszweck des MATLAB hat das Fehlen des Antennendiagramms also keine Bedeutung. Die angezeigten Feldstärkewerte beziehen sich nur auf die Spitzenwerte der Leistung des Pulses, da die über das Puls-Pause-Verhältnis gemittelte Leistung für die Beurteilung des Störpotenzials der Radaranlage keine Rolle spielt (Worst-Case-Betrachtung). Ebenfalls wird die sich ändernde Elevation der Radarantenne nicht betrachtet, da die horizontale Ausrichtung das größte Störpotential hat. Die Freiraumausbreitung wird gewählt, da in dem Frequenzbereich keine Ausbreitung über die Bodenwelle stattfindet und keine Reflexionen an der Ionosphäre auftreten. Ebenfalls existiert kein gesondertes Modell zur Wellenausbreitung in diesem Frequenzbereich. Nur mit der Freiraumausbreitung kann die Topografie nicht miteinbezogen werden, aus diesem Grund wird in dem zweiten Berechnungsschritt die Fresnelzone mit einbezogen. Wie in dem Kapitel schon angedeutet bestehen noch einige Möglichkeiten das Projekt zu verbessern und fortzuführen. Auf diese Möglichkeiten wird im nächsten Kapitel eingegangen.

## 8 Möglichkeiten der Weiterführung des Projektes

In das Programm sollen weitere Funkdienste eingebunden werden, wie zum Beispiel die Anlagen der Deutschen Flugsicherung oder Anlagen für die Radio Astronomie. Dazu ist die GUI um eine Auswahlmöglichkeit für die verschiedenen Funkdienst zu erweitern. Die Einleseroutine muss ebenfalls geändert werden, um größere Datenmengen einlesen zu können. Des Weiteren soll eine Funktion ergänzt werden, bei der Koordinaten eingegeben werden. Das Programm soll dann alle bestehenden Radarstandorte in der näheren Umgebung ausgeben, der genaue Radius ist noch festzulegen, gegebenenfalls ist auch hier eine Auswahloption einzufügen. Somit ist eine Erweiterung des Projektes auf weitere Frequenzbereiche und Radararten möglich.

Eine weitere mögliche Verbesserung ist die Einführung eines Schnellberechnungsmodus. in dem Fall wird nicht mehr jeder Punkt einzeln berechnet, sondern nur die Entfernung ab der, der Feldstärkepegel um jeweils 10 dB geringer wird. Dies spart Ressourcen und führt zu einem schnelleren Ergebnis. Der Programmcode sollte bei einer Fortführung des Projektes auf Geschwindigkeit optimiert werden, wenn möglich wäre es empfehlenswert die for-Schleifen zu eliminieren.

Die Kartendaten sind zu ergänzen um weitere Funktionen zu ermöglichen. Für eine Zoom-Funktion sind weitere Karten-Layer in höheren Auflösungen hinzuzufügen. Auch das Einbinden von Sonderkarten mit zum Beispiel Standorten von Luftverkehrseinrichtungen wären möglich. Diese Karten müssten eventuell käuflich erworben werden.

Sollten weiter Anwendungsfälle hinzugefügt werden wie etwa das Betrachten der näheren Sender Umgebung muss die verwendete Antenne berücksichtigt werden. Da auf die Feldstärken in näherer Umgebung das Antennendiagramm Einfluss hat. Die Berechnung kann noch um die über das Tastverhältnis gemittelte Feldstärke ergänzt werden, um Betrachtungen zum Personenschutz durch zuführen.

Wenn möglich sollten bessere Daten zu der Feldstärkereduktion durch die Verdeckung der Frenelzone ermittelt werden. Mit der Durchführung von Messreihen lassen sich die

Berechnungsergebnisse des Programms validieren. Hierfür werden an vorher festgelegten Orten die Feldstärken des abgestrahlten Radarsignals messen und mit den vom Programm berechneten Werten abgeglichen. Für eine Fortführung des Projektes bestehen also reichlich Möglichkeiten.

## 9 Fazit

Da in der heutigen Zeit immer mehr Frequenzspektrum, immer intensiver für die unterschiedlichsten Funkdienste genutzt wird, kommt der effizienten Frequenzzuteilung eine immer größere Bedeutung zu, da die begehrte endliche Ressource Spektrum immer effizienter genutzt werden soll. Zur Erleichterung der Frequenzzuteilung von Radaranlagen im X-Band wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit ein MATLAB-Script erstellt.

Dazu wurden die Grundlagen zur Ausbreitung von Radarsignalen in diesem Frequenzbereich betrachtet. Auch die Grundlage der Antennentechnik wurde mit einbezogen um die Erkenntnisse aus der Theorie in diesem Projekt nutzen zu können. Zur Darstellung mussten geeignete Kartendaten gesucht und eingebunden werden um die Ergebnisse der Berechnung auf diesen Karten abbilden zu können.

Es wurde erfolgreich ein MATLAB-Script erstellt mit dem sich die Freiraumausbreitung der Radarsignale berechnen und darstellen lässt. Die Freiraumfeldstärke wird in bestimmten Abständen zum Sender berechnet. Mit Einbeziehung der Geografie der Senderumgebung ist die Berechnung eingeschränkt erfolgreich. Zum Erzielen dieses Ergebnisses wurde mit unterschiedlichen Kartenquellen gearbeitet.

Somit kann das MATLAB-Script als Orientierung bei der Frequenzzuteilung genutzt werden und noch wichtiger, kann das bisher genutzte Programm ersetzt werden? Ja, die MATLAB-Mapping-Toolbox ist geeignet das bisher genutzte Programm abzulösen. Denn die gewünschten Karten können eingebunden werden und die benötigten Berechnungen mit MATLAB durchgeführt werden.

Wetterradare sind wichtig für die Vorhersage von Niederschlägen. Der Wert einer akkuraten Wettervorhersage wurde im Jahr 2021 noch einmal durch Unwetterkatastrophen und mangelhafte Warnungen verdeutlicht. Somit wäre eine weitere Verbesserung des Projektes durch genauere Daten zur Verdeckung des Fresnelzone äußerst wünschenswert, zum Beispiel durch eine Vornahme von entsprechenden Messreihen.

# Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Werner Baumberger. Hochfrequenztechnik - eine einföhrung, Herbstsemester 2009 / 2010.
- [2] BKG Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Digitales geländemodell gitterweite 200 m.
- [3] Bundesnetzagentur. Verwaltungsvorschrift für frequenzzuteilung für radare und navigationssysteme, vvradnav, 2021.
- [4] Alexander Fufaev. 4 maxwell-gleichungen im vakuum.
- [5] Jürgen Göbel. *Radartechnik*. VDE Verlag, jan 2011.
- [6] Lörcher Herter. *Hochfrequenztechnik 2*. Hanser Verlag, 2004.
- [7] Klaus W. Kark. *Antennen und Strahlungsfelder Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [8] Martin Kompf. Entfernungsberechnung.
- [9] Alois Krischke. *Rothammels Antennenbuch*. DARC Verlag, 2014.
- [10] Kummer. *Grundlagen der drahtlosen Kommunikation*. Hans Kummer, Selbstverlag, 2020.
- [11] LGLN Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen. Wie funktioniert ein webmapservice (wms)?
- [12] Albrecht Ludloff. *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung mit 22 Tabellen*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [13] Daniel Schürer Mareike Rahe. Messung einer radaranlage, 2020.
- [14] Mathworks. Compositing and animating web map service (wms) meteorological layers.

- [15] Mathworks. Convert subscripts to linear indices.
- [16] Mathworks. Latitudes and longitudes of nonzero data grid elements.
- [17] Mathworks. Raster geodata.
- [18] Mathworks. Retrieve data from web map server.
- [19] Mathworks. Transform geographic to discrete coordinates.
- [20] Mathworks. Unprojecting a digital elevation model (dem).
- [21] Ulrich Stein. *Programmieren mit Matlab, Programmiersprache, Grafische Benutzeroberflächen, Anwendungen*. Carl-Hanser-Verlag, München, 2015.
- [22] E. Stirner. *Antennen Band 2: Praxis*. Hüthig-Verlag.
- [23] Christian Wolff. Fresnel-zone.

# A Anhang

## A.1 MATLAB-Code ohne Topografischedaten

```
1
2
3
4 function varargout = simpleGUI(varargin)
5 % simpleGUI MATLAB code for simpleGUI.fig
6 %     simpleGUI, by itself, creates a new simpleGUI or raises
7 %     the existing
8 %     singleton*.
9 %     H = simpleGUI returns the handle to a new simpleGUI or
10 %    the handle to
11 %    the existing singleton*.
12 %    simpleGUI('CALLBACK', hObject, eventData, handles, ...) calls
13 %    the local
14 %    function named CALLBACK in simpleGUI.M with the given
15 %    input arguments.
16 %    simpleGUI('Property', 'Value', ...) creates a new simpleGUI
17 %    or raises the
18 %    existing singleton*. Starting from the left, property
19 %    value pairs are
20 %    applied to the GUI before simpleGUI_OpeningFcn gets
21 %    called. An
22 %    unrecognized property name or invalid value makes
23 %    property application
```



```
19 %      stop. All inputs are passed to simpleGUI_OpeningFcn via
      varargin.
20 %
21 %      *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI
      allows only one
22 %      instance to run (singleton)".
23 %
24 % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
25
26 % Edit the above text to modify the response to help simpleGUI
27
28 % Last Modified by GUIDE v2.5 04-Aug-2021 16:16:35
29
30 % Begin initialization code - DO NOT EDIT
31 gui_Singleton = 1;
32 gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
33                   'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
34                   'gui_OpeningFcn', @simpleGUI_OpeningFcn, ...
35                   'gui_OutputFcn', @simpleGUI_OutputFcn, ...
36                   'gui_LayoutFcn', [] , ...
37                   'gui_Callback', []);
38 if nargin && ischar(varargin{1})
39     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
40 end
41
42 if nargout
43     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:})
      ;
44 else
45     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
46 end
47 % End initialization code - DO NOT EDIT
48
49
50 % ---- Executes just before simpleGUI is made visible.
```

```
51 function simpleGUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
    varargin)
52 % This function has no output args, see OutputFcn.
53 % hObject    handle to figure
54 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of
    MATLAB
55 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
56 % varargin   command line arguments to simpleGUI (see VARARGIN)
57
58 % Choose default command line output for simpleGUI
59 handles.output = hObject;
60 %Beschriftung Button
61 set(handles.pushbutton2, 'String', 'Berechnung beginnen');
62 %Ausgabe Status
63 set(handles.text6, 'String', 'Karte wird geladen, bitte warten')
    ;
64 % Laden der Karte mit WMS(Web Map Service)
65 host = 'sgx.geodatenzentrum.de';
66 path = '/wms_dgm200_inspire?';
67 serverURL = ['https://' host path];
68 requestURL = [serverURL 'service=wms&version=1.3.0&request=
    GetMap&layers= EL.GridCoverage &styles=&CRS=EPSG:25832&bbox
    =500000,5700000,559000,5759000&width=500&height=500&format=
    image/png'];
69 layerName = 'EL.GridCoverage';
70 layer = WMSLayer('ServerURL', serverURL, 'LayerName', layerName);
71
72 layer = wmsupdate(layer);
73 layer.Lonlim = [0 360];
74
75 lonlim = [6 15];
76 latlim = [47 55];
77 height = 500;
78 width = 500;
79 [A,R] = wmsread(layer, 'Latlim', latlim, 'Lonlim', lonlim, '
    ImageHeight', height, 'ImageWidth', width)
```

```
80
81 %figure
82 %h1 = figure;
83 usamap(A,R)
84 geoshow(A,R)
85 title('GeoBasis-DE / BKG (2021)')
86 %http://www.bkg.bund.de
87 % print(h1, '-dpng', 'Map.png')
88 % h=imshow('Map.png')
89
90 % hp = impixelinfo;
91 %set(hp, 'Position', [5 1 300 20])
92 %http://www.bkg.bund.de
93 % fid=fopen('dgm200_gk3.txt', 'r');
94 % weiter = 1;
95 % while ( weiter )
96 %     tline = fgetl(fid)
97 %     if ( tline == -1)
98
99
100 %         weiter = 0;
101 %     end
102 % end
103 % fclose(fid);
104 %Ausgabe Status
105 set(handles.text6, 'String', 'Bitte wählen Sie die benötigten
        Funkdienste');
106 % Update handles structure
107 guidata(hObject, handles);
108
109 % UIWAIT makes simpleGUI wait for user response (see UIRESUME)
110 % uiwait(handles.figure1);
111
112
113 % --- Outputs from this function are returned to the command
        line.
```

```
114 function varargout = simpleGUI_OutputFcn(hObject, eventdata,
    handles)
115 % varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT
    );
116 % hObject handle to figure
117 % eventdata reserved – to be defined in a future version of
    MATLAB
118 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
119
120 % Get default command line output from handles structure
121
122 varargout{1} = handles.output;
123
124 % --- Executes on button press in pushbutton1.
125 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
126 % hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)
127
128
129
130
131 % eventdata reserved – to be defined in a future version of
    MATLAB
132 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
133 % Achtung funktioniert nur mit Excel und Windows
134 %[num, txt, raw] = xlsread(Mappe1.xlsx);
135 %raw
136 % Tabellen Daten in Variablen
137
138 %Ausgabe Status
139 set(handles.text6, 'String', 'Beginne Berechnung');
140 % Übernahme der eingelesenen Koordinaten
141 lon1 = handles.long
142 lat1 = handles.lat
143
144 %Schleife für die Koordinaten rund um den Standort
145 for a = 0:pi/16:2*pi;
```

```
146 %Schleife für die Entfernung zum Standort
147 for d=1000:10000:200000;
148 % Annahme einer flachen Erde, Berechnung der Koordinaten über
      dem Satz des
149 % Pythagoras
150 % Berechnung Gegenkathete
151 dy = sin(a).*d;
152 % Berechnung Ankathete
153 dx = cos(a).*d;
154 % ent. log. der Eingelesenen EIRP
155 nEIRP = 10^(handles.EIRP/10);
156 % Berechnung der Feldstärke in V/m
157 E = sqrt(30)*sqrt(nEIRP)/d;
158 % Feldstärke in dBµV/m
159 e = 20*log10(E*1000000);
160 % Berechnung der Koordinaten
161 % 111300 m, Entfernung Breitengrad
162 lat2 = -(dy./111300) + lat1
163 % 71500 m, Entfernung Längengrad
164 lon2 = -(dx./71500) + lon1
165
166 % färben der Punkte nach Werten
167 if e>= 140
168     plotm(lat2,lon2,'m*')
169 elseif e<140 && e>=130
170     plotm(lat2,lon2,'*', 'color',[0.6350 0.0780 0.1840])
171 elseif e<130 && e>=120
172     plotm(lat2,lon2,'r*')
173 elseif e<120 && e>=115
174     plotm(lat2,lon2,'*', 'color',[0.8500 0.3250 0.0980])
175 elseif e<115 && e>=100
176     plotm(lat2,lon2,'*', 'color',[0.9290 0.6940 0.1250])
177 elseif e<100 && e>=95
178     plotm(lat2,lon2,'y*')
179
180 else
```

```
181     plotm(lat2,lon2,'w*')
182 end
183
184 % Legende
185 p1 = plot(NaN, 'm*');
186 p2 = plot(NaN, '*','color',[0.6350 0.0780 0.1840]);
187 p3 = plot(NaN, 'r*');
188 p4 = plot(NaN, '*','color',[0.8500 0.3250 0.0980]);
189 p5 = plot(NaN, '*','color',[0.9290 0.6940 0.1250]);
190 p6 = plot(NaN, 'y*');
191 p7 = plot(NaN, 'w*');
192
193
194
195 legend([p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7], '>=140 dB  $\mu$  V/m', '<(140-130)dbV/m',
        '<(130-120)dbV/m', '<(120-115)dbV/m', '<(115-100)dbV/m',
        '<(100-95)dbV/m', '<95dB  $\mu$  V/m', 'Location', 'bestoutside');
196
197 end
198 end
199 % Ausgabe Status
200 set(handles.text6, 'String', 'Berechnung beendet');
201 guidata(hObject, handles);
202
203
204
205
206 % — Executes on button press in radiobutton2.
207 function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
208 % hObject handle to radiobutton2 (see GCBO)
209 % eventdata reserved - to be defined in a future version of
        MATLAB
210 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
211
212 % Hint: get(hObject, 'Value') returns toggle state of
        radiobutton2
```

```
213 % Ausgabe Status
214 set(handles.text6, 'String', 'Daten werden geladen');
215
216 %tline=fgetl(fid);
217
218 % Einlesen Tabelle , funktiniert nur mit Windows und MS Office
219 [num, txt, raw] =xlsread('Mappe1.xlsx');
220 %Nord_Stunde = raw{3,31};
221 %Nord_Minute = raw{3,32};
222 %Nord_Sekunde = raw{3,33};
223 %Ost_Stunde = raw{3,34};
224 %Ost_Minute = raw{3,35};
225 %Ost_Sekunde = raw{3,36};
226 Hoehe_NN = raw{3,38};
227 %Hoehe_Grund = raw{3,39};
228 f = raw{3,45};
229 %dreidB = raw{3,46};
230 %vierzigdB = raw{3,47};
231 EIRP = raw{3,55};
232 %Oeffnungswinkel_H = raw{3,58};
233 %Oeffnungswinkel_V = raw{3,59};
234 %Tastgrad = raw{3,63};
235 %minPuls = raw{3, 64};
236 %PRF = raw{3,65};
237 long = raw{3,72};
238 lat = raw{3, 73};
239 handles.lat=lat;
240 handles.long=long;
241 % citylongs = long; citylats = lat;
242 %handles.tline = tline;
243 handles.EIRP = EIRP;
244
245 % Ausgabe Status
246 set(handles.text6, 'String', 'Daten sind geladen');
247 plotm(lat, long, 'r*')
248 guidata(hObject, handles);
```

## A.2 MATLAB-Code mit Topografischendaten

```
1
2
3
4 function varargout = Topo(varargin)
5 % TOPO MATLAB code for Topo.fig
6 %     TOPO, by itself, creates a new TOPO or raises the
7 %     existing
8 %     singleton*.
9 %     H = TOPO returns the handle to a new TOPO or the handle
10 %    to
11 %    the existing singleton*.
12 %    TOPO('CALLBACK', hObject, eventData, handles, ...) calls the
13 %    local
14 %    function named CALLBACK in TOPO.M with the given input
15 %    arguments.
16 %    TOPO('Property', 'Value', ...) creates a new TOPO or raises
17 %    the
18 %    existing singleton*. Starting from the left, property
19 %    value pairs are
20 %    applied to the GUI before Topo_OpeningFcn gets called.
21 %    An
22 %    unrecognized property name or invalid value makes
23 %    property application
24 %    stop. All inputs are passed to Topo_OpeningFcn via
25 %    varargin.
26 %
27 %    *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI
28 %    allows only one
29 %    instance to run (singleton)".
30 %
31 % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
```



```
25
26 % Edit the above text to modify the response to help Topo
27
28 % Last Modified by GUIDE v2.5 17-Aug-2021 16:12:28
29
30 % Begin initialization code – DO NOT EDIT
31 gui_Singleton = 1;
32 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
33                   'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
34                   'gui_OpeningFcn', @Topo_OpeningFcn, ...
35                   'gui_OutputFcn',  @Topo_OutputFcn, ...
36                   'gui_LayoutFcn',  [] , ...
37                   'gui_Callback',   []);
38 if nargin && ischar(varargin{1})
39     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
40 end
41
42 if nargout
43     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:})
44     ;
45 else
46     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
47 end
48 % End initialization code – DO NOT EDIT
49
50 % — Executes just before Topo is made visible.
51 function Topo_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
52 % This function has no output args, see OutputFcn.
53 % hObject    handle to figure
54 % eventdata reserved – to be defined in a future version of
55 %             MATLAB
56 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
57 % varargin   command line arguments to Topo (see VARARGIN)
58
59 % Choose default command line output for Topo
```

```
59 handles.output = hObject;
60 % Karte laden, Region 'Germany, große Städte und Flüsse
61 worldmap('Germany')
62 land = shaperead('landareas.shp', 'UseGeoCoords', true);
63 geoshow(land, 'FaceColor', [0.15 0.5 0.15])
64 cities = shaperead('worldcities', 'UseGeoCoords', true);
65 geoshow(cities, 'Marker', '.', 'Color', 'red')
66 geoshow('worldrivers.shp', 'Color', 'blue')
67 set(handles.text3, 'String', 'Wählen Sie die benötigten
    Funkdienste');
68 % Update handles structure
69 guidata(hObject, handles);
70
71 % UIWAIT makes Topo wait for user response (see UIRESUME)
72 % uiwait(handles.figure1);
73
74
75 % --- Outputs from this function are returned to the command
    line.
76 function varargout = Topo_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
77 % varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT
    );
78 % hObject handle to figure
79 % eventdata reserved - to be defined in a future version of
    MATLAB
80 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
81
82 % Get default command line output from handles structure
83 varargout{1} = handles.output;
84
85
86 % --- Executes on button press in pushbutton1.
87 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
88 % hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
89 % eventdata reserved - to be defined in a future version of
    MATLAB
```

```
90 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
91
92
93 % --- Executes on button press in radiobutton1.
94 function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
95 % hObject      handle to radiobutton1 (see GCBO)
96 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of
      MATLAB
97 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
98
99 % Hint: get(hObject, 'Value') returns toggle state of
      radiobutton1
100 set(handles.text3, 'String', 'Daten werden geladen');
101
102 % Lade elevation rasta data
103 load topo60c
104 % Einlesen Tabelle, funktiniert nur mit Windows und MS Office
105 [num, txt, raw] =xlsread('Mappe1.xlsx');
106 %Nord_Stunde = raw{3,31};
107 %Nord_Minute = raw{3,32};
108 %Nord_Sekunde = raw{3,33};
109 %Ost_Stunde = raw{3,34};
110 %Ost_Minute = raw{3,35};
111 %Ost_Sekunde = raw{3,36};
112 Hoehe_NN = raw{3,38};
113 Hoehe_Grund = raw{3,39};
114 f = raw{3,45};
115 F = strsplit(f);
116 f1 = F(1);
117 Frequenz = str2double(f1); %Lade Zahlenwert ohne Einheit
118 %dreidB = raw{3,46};
119 %vierzigdB = raw{3,47};
120 EIRP = raw{3,55};
121 %Oeffnungswinkel_H = raw{3,58};
122 %Oeffnungswinkel_V = raw{3,59};
123 %Tastgrad = raw{3,63};
```

```
124 %minPuls = raw{3, 64};
125 %PRF = raw{3,65};
126 long = raw{3,72};
127 lat = raw{3, 73};
128
129 % Übergabe zwischen den Funktionen
130 handles.lat=lat;
131 handles.long=long;
132 % citylongs = long; citylats = lat;
133 %handles.tline = tline;
134 handles.EIRP = EIRP;
135 [row,col] = geographicToDiscrete(topo60cR,lat,long)
136 indx = sub2ind(size(topo60c),row,col)
137 heights = topo60c(indx)
138 handles.f = Frequenz;
139 handles.High_NN = Hoehe_NN;
140 handles.High = Hoehe_Grund+heights;
141 % Ausgabe Status
142 set(handles.text3, 'String', 'Daten sind geladen');
143 plotm(lat,long,'r*')
144
145 guidata(hObject, handles);
146
147
148 % --- Executes on button press in pushbutton2.
149 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
150 % hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
151 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of
    MATLAB
152 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
153
154 % Übernahme der eingelesenen Koordinaten
155 lon1 = handles.long
156 lat1 = handles.lat
157 % Festlegen der Variablen zur Berechnung
158 Ende_Kreis = 2*pi;
```

```
159 Schritt_Kreis = pi/16;
160 Entfernung_Max = 200000;
161 Entfernung_Schrittweite = 10000;
162 Anzahl_K = Ende_Kreis / Schritt_Kreis
163 Anzahl_E = Entfernung_Max / Entfernung_Schrittweite
164 Entfernung = [ 1000 11000 21000 31000 41000 51000 61000 71000
      81000 91000 101000 111000 121000 131000 141000 151000 161000
      171000 181000 191000];
165 % Lade elevation rasta data
166 load topo60c
167 % Initialisieren der Arrays
168 H =[Anzahl_K; Anzahl_E];
169 W =[Anzahl_K; Anzahl_E];
170 LonA = [Anzahl_K; Anzahl_E];
171 LatA = [Anzahl_K; Anzahl_E];
172 % Festlegen Zählvariablen
173 Kr=1;
174 En=1;
175
176 %Schleife für die Entfernung zum Standort
177 for d=1000:Entfernung_Schrittweite:Entfernung_Max
178 %Schleife für die Koordinaten rund um den Standort
179 for a = 0:Schritt_Kreis:Ende_Kreis
180
181 % Annahme einer flachen Erde, Berechnung der Koordinaten über
      dem Satz des
182 % Pythagoras
183 % Berechnung Gegenkathete
184 dy = sin(a).*d;
185 % Berechnung Ankathete
186 dx = cos(a).*d;
187 % ent. log. der Eingelesenen EIRP
188 nEIRP = 10^(handles.EIRP/10);
189 % Berechnung der Feldstärke in V/m
190 E = sqrt(30)*sqrt(nEIRP)/d;
191 % Feldstärke in dB µV/m
```

```
192 e = 20*log10(E*1000000);
193 % Berechnung der Koordinaten
194 % 111300 m, Entfernung Breitengrad
195 lat2 = -(dy./111300) + lat1;
196 % 71500 m, Entfernung Längengrad
197 lon2 = -(dx./71500) + lon1;
198 %Ausgabe der geografischenhöhe an dem Berechnetenpunkt
199 [row,col] = geographicToDiscrete(topo60cR,lat2,lon2);
200 indx = sub2ind(size(topo60c),row,col);
201 heights = topo60c(indx);
202
203 % Zwischenspeichern der berechneten Werte
204 H(Kr,En) = heights;
205 W(Kr,En)= e;
206 LonA(Kr,En) = lon2;
207 LatA(Kr,En) = lat2;
208
209 % färben der Punkte nach Werten
210 if e>= 140
211     plotm(lat2,lon2,'m*')
212 elseif e<140 && e>=130
213     plotm(lat2,lon2,'*', 'color',[0.6350 0.0780 0.1840])
214 elseif e<130 && e>=120
215     plotm(lat2,lon2,'r*')
216 elseif e<120 && e>=115
217     plotm(lat2,lon2,'*', 'color',[0.8500 0.3250 0.0980])
218 elseif e<115 && e>=100
219     plotm(lat2,lon2,'*', 'color',[0.9290 0.6940 0.1250])
220 elseif e<100 && e>=95
221     plotm(lat2,lon2,'y*')
222
223 else
224     plotm(lat2,lon2,'w*')
225 end
226
227 % Legende
```

```
228 p1 = plot(NaN, 'm*');
229 p2 = plot(NaN, '*', 'color', [0.6350 0.0780 0.1840]);
230 p3 = plot(NaN, 'r*');
231 p4 = plot(NaN, '*', 'color', [0.8500 0.3250 0.0980]);
232 p5 = plot(NaN, '*', 'color', [0.9290 0.6940 0.1250]);
233 p6 = plot(NaN, 'y*');
234 p7 = plot(NaN, 'w*');
235
236
237
238 legend([p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7], '>=140 dB  $\mu$  V/m', '<(140-130)db  $\mu$  V
    /m', '<(130-120)db  $\mu$  V/m', '<(120-115)db  $\mu$  V/m', '<(115-100)db  $\mu$  V
    /m', '<(100-95)db  $\mu$  V/m', '<95dB  $\mu$  V/m', 'Location', 'bestoutside
    ');
239
240 En=En+1;
241 end
242
243 En=1;
244 Kr=Kr+1;
245 end
246 % Ausgabe Status
247 % Übergabe der Werte an die nächste Funktion
248 handles.Anzahl_K = Anzahl_K;
249 handles.Anzahl_E = Anzahl_E;
250 handles.Topo = H;
251 handles.Werte = W;
252 handles.LonA = LonA;
253 handles.LatA = LatA;
254 handles.Entfernung = Entfernung;
255 handles.Schrittweite = Entfernung_Schrittweite;
256 set(handles.text3, 'String', 'Berechnung beendet');
257 guidata(hObject, handles);
258
259
260 % --- Executes on button press in pushbutton3.
```

```
261 function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
262 % hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
263 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of
           MATLAB
264 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
265
266 %Lade geo-Daten
267 load topo60c
268 %Lichtgeschwindigkeit
269 c = 299792458
270 % Übernahme der Werte
271 lat2 = handles.LatA;
272 lon2 = handles.LonA;
273 Anzahl_K = handles.Anzahl_K;
274 Anzahl_E = handles.Anzahl_E;
275 Schritt = handles.Schrittweite;
276 Entfernung = handles.Entfernung;
277 Hoehe_Quelle = handles.High;
278 topo = handles.Topo;
279 Werte = handles.Werte;
280 % Berechnung der Wellenlänge
281 lambda = c/(handles.f*1000000);
282 % Schieben der Entfernung
283 Entfernung = Entfernung + Schritt/2
284 %initialisiere Vektor
285 Entfernung2 = zeros(1,length(Entfernung)+1)
286 % neuer Startwert
287 Entfernung2(1) = 500
288
289 % Schreiben des neuen Entfernungsvektors
290 for k=1:1:20
291 Entfernung2(k+1) = Entfernung(k)
292 end
293
294 % initialisiere Vektor
295 r = zeros(1,19);
```



```
296 % Berechne Fresnelzone
297 for z=1:1:20
298 r(z) = sqrt((lambda.*Entfernung2(z).*(196000-Entfernung2(z)))
        ./196000)
299 end
300
301 for x=1:1:Anzahl_E
302 for y=1:1:19
303
304 % Werte Reduktion
305 if (Hoehe_Quelle - r(x)) < (0.8 * topo(y,x))
306     Werte(y,x) = (0 * Werte(y,x));
307 elseif (Hoehe_Quelle - r(x)) < (0.5 * topo(y,x))
308     Werte(y,x) = (Werte(y,x)-3);
309 else
310     Werte(y,x) = Werte(y,x);
311 end
312
313 %Plotten neuer Werte
314 if Werte(y,x)>= 140
315     plotm(lat2(y,x),lon2(y,x),'m*')
316 elseif Werte(y,x)<140 && Werte(y,x)>=130
317     plotm(lat2(y,x),lon2(y,x),'*', 'color', [0.6350 0.0780
        0.1840])
318 elseif Werte(y,x)<130 && Werte(y,x)>=120
319     plotm(lat2(y,x),lon2(y,x),'r*')
320 elseif Werte(y,x)<120 && Werte(y,x)>=115
321     plotm(lat2(y,x),lon2(y,x),'*', 'color', [0.8500 0.3250
        0.0980])
322 elseif Werte(y,x)<115 && Werte(y,x)>=100
323     plotm(lat2(y,x),lon2(y,x),'*', 'color', [0.9290 0.6940
        0.1250])
324 elseif Werte(y,x)<100 && Werte(y,x)>=95
325     plotm(lat2(y,x),lon2(y,x),'y*')
326
327 else
```

```
328     plotm(lat2(y,x),lon2(y,x),'w*')
329 end
330 % Legende
331 p1 = plot(NaN, 'm*');
332 p2 = plot(NaN, '*', 'color', [0.6350 0.0780 0.1840]);
333 p3 = plot(NaN, 'r*');
334 p4 = plot(NaN, '*', 'color', [0.8500 0.3250 0.0980]);
335 p5 = plot(NaN, '*', 'color', [0.9290 0.6940 0.1250]);
336 p6 = plot(NaN, 'y*');
337 p7 = plot(NaN, 'w*');
338
339
340
341 legend([p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7], '>=140 dB  $\mu$ V/m', '<(140-130)db  $\mu$ V
    /m', '<(130-120)db  $\mu$ V/m', '<(120-115)db  $\mu$ V/m', '<(115-100)db  $\mu$ V
    /m', '<(100-95)db  $\mu$ V/m', '<95dB  $\mu$ V/m', 'Location', 'bestoutside
    ');
342
343 end
344 end
345 %Ausgabe Status
346 set(handles.text3, 'String', 'genaue Berechnung2 beendet');
347 guidata(hObject, handles);
```

### A.3 Radardaten

ZutNr	Status	Referenz	PostIn	letzteAend	ersteZut	BefrBeginn	BefrEnde	DateNARFA	ResNARFA
Zuteilungsnummer	Status zeigt an, ob die Zuteilung bereits aktiv ist, oder noch in der Bearbeitung ist	Notiz als Zuordnung vor Vergabe einer Zuteilungsnummer	Posteingangsdatum	Datum der letzten Änderung	Datum der Erstzuteilung	Befristungsbeginn	Befristungsende	Absendung der NARFA-Daten	Status - NARFA x = wartend 1 = erlaubt 0 = eingeschränkt
31430464	zuteilt		19.02.2019	08.04.2019	08.04.2019	08.04.2019	30.04.2029	04.04.2019	1

NARFANr	Date0StaKo	Date1StaKo	FristStako	StateStaKo	Date2StaKo	StaKoNr	ZI	ZI_HR_Nr	ZI_Amtsger
<b>NARFA- Nummer</b>	<b>Absendung der StaKo- Daten</b>	<b>Weiterleitung der StaKo- Daten durch 224</b>	<b>Automatische Berechnung der 10 Wochen für die StaKo ab Versendung durch 224</b>	<b>Status - StaKo x = wartend 1 = erlaubt 0 = eingeschränk t</b>	<b>Datum der Zustimmung der StaKo</b>	<b>StaKo-Nummer</b>	<b>Zuteilungsinh aber</b>	<b>Handesregist er-Nr.</b>	<b>Amtsgericht</b>
	04.04.2019	11.04.2019	20.06.2019	1	06.06.2019	19Z000038-1		n/a	n/a

ZI_Geb	ZI_StrHnr	ZI_PLZ	ZI_Ort	ES	ZI_Tel1	ZI_Tel2	ZI_eMail	Nutzung	Verwendung	WSG84_N°
Geburtsdatum	Str. und Haus-Nr.	PLZ	Ort	Lieferanschrift (Empfänger Schriftverkehr)				Nichtnavigat orischer Ortungsfunk ....		
n/a								zur Wetterbeobach	Radar zur Erforschung urbaner Finflüsse auf	52

WSG84_N'	WSG84_N''	WSG84_E°	WSG84_E'	WSG84_E''	WSG84_ges	MSL	AntHoehe	EigGrstck	StOrStrHNr	StandorPLZ
						Höhe Grund über NN [m]	Höhe Antenne über Grund [m]	Grundstücks eigentümer	Standort: Str. + Haus- Nr.	Standort: PLZ
27	31	13	18	38	52°N27'31" 013°E18'38"	66,5	36,5			12165

Standort	StOrtZus	Frequenz	BB_3dB	BB_40dB	FrToleranz	TypAntenne	TypTx	P_Tx_kW	P_Tx_dB
Standort	Standortzusatz		-3 dB- Bandbreite	-40 dB- Bandbreite	long term fading	Herstellerbez eichnung der Antenne	Herstellerbez eichnung des Senders	Senderausgangs- leistung [kW]	Senderausgangs- leistung [dBW]
		9410 MHz	4 MHz	100 MHz	± 30 MHz	GAM-12- WRA9.4SP-DP	NGSM 65825H	25	43,98

Verl_dB	Gewinn_dBi	EIRP_dBW	EIRP_kW	EIRP_round	hOeffnung	vOeffnung	Polari	Sendart	MinT_ModK	Tastgrad
Zuführungsv erluste [dB]	Gewinn der Antenne [dBi]	EIRP [dBW]	EIRP [kW]	EIRP [Darstellung]	Öffnungswink el horizontal	Öffnungswink el vertikal	Polarisation	Modulationsa rt	minimale Anstiegsdauer der Modulationsh üllkurve [ns]	[%]
3,7	38,6	78,88	77.257,39	78 MW	2,02°	1,94°	zirkular	P0N	10,6	0,045



minPuls	PRF	Azimut	Elevation	ArtAntenne	Sonstiges	Auflagen	PMD	XCOORD	YCOORD
[ $\mu$ s]	Pulswiederhol- frequenz (pulse repetition frequency) [kHz]	Azimut [°]	Elevation [°]				Überprüfung durch PMD	Geokoordinate Länge (WGS84, dezimal)	Geokoordinate Breite (WGS84, dezimal)
0,25	1,8	0° - 360°	0° - 90°	Richtantenn e (drehend)	n/a	4, 5, 6	n/a	13,31055556	52,45861111

DatumV	Comment
Ablauf-/ Verzichtsdat um	

- Änderung  
des  
Standorts

## **Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

---

Ort

Datum

Unterschrift im Original