Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Hochschule Neubrandenburg

Bachelorstudiengang Geoinformatik

Multi-Kriteriums-Standort-Analyse für Radarsysteme für die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen

Bachelorarbeit

vorgelegt von: **Timo Ladwig**

Zur Erlangung des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering“ (B.Eng.)

URN-Nr.: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2020-0141-5

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Wehrenpfennig

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Thomas Herrholz

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelor-Arbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Neubrandenburg, den 03.08.2020

Unterschrift

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema der Standortfindung für Radaranlagen für die Durchführung der **bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung von Windenergieanalagen** (BNK). Neben einer theoretischen Auseinandersetzung mit der Thematik der Multi-Kriteriums-Entscheidungsfindung befasst sie sich im praktischen Teil mit dem Entwerfen einer Methodik für eine Multi-Kriteriums-Standort-Analyse mittels eines Geoinformationssystems (GIS) und das Anwenden dieser Methodik auf ein Projektgebiet.

Abstract

This thesis concerns the subject of finding locations for radar units in the course of implementing **Aircraft Detection Lightning System** (ADLS) during nighttime (German: Bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung, BNK). Besides a theoretical examination with Multi-Criteria-Decision-Finding as its subject, this thesis attends to the matter of developing a practical methodology for a Multi-Criteria-Location-Analysis by using a geo-information-system (GIS) as well as applying this methodology to a given project area.

Danksagung

Ich danke meinem Erstbetreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Wehrenpfennig, für die Hilfe bei der Themenfindung und die Bereitschaft der Erstbetreuung sowie das Begleiten über die gesamte Zeit der Bachelorarbeit hinweg.

Weiterhin danke ich meinem Zweitbetreuer, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Herrholz, für die sehr hilfreichen Gedankenanstöße und seine Mühen während der Bearbeitung sowie dafür, mir das Thema dieser Arbeit überhaupt erst möglich gemacht zu haben.

Meinen Korrektur-Lesenden und Feedback-Gebenden danke ich ebenfalls. *Kathi* für ihre geisteswissenschaftliche Sicht auf die Dinge und die vielen unterhaltsamen sowie hilfreichen Kommentare. Heiko für seinen Blick fürs Detail und die kleinen Fehler. Ebenfalls ein Dank an Paul für sein verlässliches und schnelles Feedback und an Ricardo für das genaue Durchdenken der Arbeit. Danke auch an Helen, die mich immer wieder und früh unterstützt hat.

Mein Dank geht auch an meine Kollegen von Dark Sky, mit denen ich stets gerne zusammengearbeitet habe und die ein tolles Team sind!

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung I

Kurzfassung II

Abstract II

Danksagung III

Inhaltsverzeichnis IV

1 Einführung 1

2 Theorie der Multi-Kriteriums-Entscheidungs-Analysen bzw. Multi-Kriteriums-Standort-Analyse 4

2.1 Einführung 4

2.2 Vorstellung verschiedener Herangehensweisen der Wissenschaft 5

2.3 Fazit zu den unterschiedlichen Herangehensweisen 17

3 Methoden der Multi-Kriteriums-Entscheidungsanalyse 18

3.1 Analytic Hierachy Process (AHP) 18

3.2 Fazit zu AHP 21

4 Methodik zur Anwendung einer Multi-Kriteriums-Standort-Analyse für die Radar-Standortfindung MSkyEye 22

5 Faktoren für die Standortfindung einer BNK-Radaranlage 24

5.1 Datenquellen 26

5.2 Beschreibung der Faktoren 28

6 Projektgebiet Nauen 37

6.1 Gebietsbeschreibung 37

6.2 Digitales Oberflächenmodell 37

6.3 Viewshed 38

6.4 Relevante Masten und Türme 39

6.5 Abgleich mit Radar-Geometrie 41

6.6 Internetverfügbarkeit 43

6.7 Fazit zur Befestigung an vorhandenen Masten und Türmen 44
6.8 Alternativ: Errichtung von Masten 44
6.9 Fazit zur Errichtung von Masten 52
7 Fazit und Ausblick 53
Literaturverzeichnis VI
Abbildungsverzeichnis VII
Tabellenverzeichnis X
Abkürzungsverzeichnis X

1 Einführung

Die Windenergie ist ein Grundpfeiler des Wandels von fossil gewonnener hin zu erneuerbarer, „grüner Energie“ in Deutschland. Windenergieanlagen über 100 m Gesamthöhe müssen von Gesetzes wegen mit einer sog. **Befeuerung** ausgestattet sein. Das heißt, sie müssen herannahende Luftfahrzeuge durch rotfarbiges Blinken vor sich als Luftfahrthindernis warnen. Das nächtliche Befeuerungs-Blinken ganzer Windenergiefelder kann von der lokalen Bevölkerung aufgrund der Helligkeit als störend empfunden werden, was eine Ablehnungshaltung gegenüber diesen erneuerbaren Energien zur Konsequenz haben könnte. Dies wiederum kann zur Folge haben, dass neue Windenergieprojekte schwerer umzusetzen sein werden, da keine weiteren Lichtemissionen von Anwohnern erwünscht sind. Aus diesem Grund soll die **Bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung** von Windenergieanlagen (**BNK)** Abhilfe schaffen, deren Ziel es ist, das nächtliche Blinken abzuschalten und nur bei Herannahen eines Luftfahrzeugs die Befeuerung zu aktivieren.

Es existieren folgende BNK-Systeme zur Erkennung von Luftfahrzeugen auf dem Markt: **Aktiv- und Passivradar** sowie per **Transpondersignalempfänger**. Auf die Entwicklung von BNK hat die Politik ein großes Zutun, da sie durch die Veröffentlichung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen **(AVV)** Einfluss auf zulässige Systeme nimmt. Diese ist bindend für den Markt und bestimmt die zukünftige Entwicklung von BNK enorm. So kann die Veröffentlichung einer neuen AVV durch entsprechende Vorgaben wie bspw. die nötige Detektion von Luftfahrzeugen bis zum Boden die Konsequenz haben, dass die Umsetzung durch Aktivradare schwieriger zu bewerkstelligen ist. Der aktuelle Stand der AVV ist vom 24.04.2020 (AVV, 2020).

Luftfahrtrechtlich sind die entwickelten BNK-Systeme von einer durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) benannten Stelle, wie z. B. der Deutschen Flugsicherung (DFS), zu begutachten und zuzulassen, erst dann dürfen diese eingesetzt werden. Dies passiert im Rahmen einer Baumusterprüfung, in welcher durch den Hersteller nachgewiesen wird, dass die Anforderungen der AVV erfüllt sind.

Grundsätzlich gibt die AVV vor, dass es um jede Windenergieanlage einen sog. **Wirkungsraum** von 4 km zu geben hat, welcher von einem BNK-System vom Boden bis mindestens 600 m Höhe zu erfassen ist. Dies kann ein Radar oder auch eine Kombination aus mehreren Radarsensoren sein. Wird dieser Wirkungsraum von einem Luftfahrzeug betreten, so ist die Nachtkennzeichnung zu aktivieren (siehe Abbildung 1).

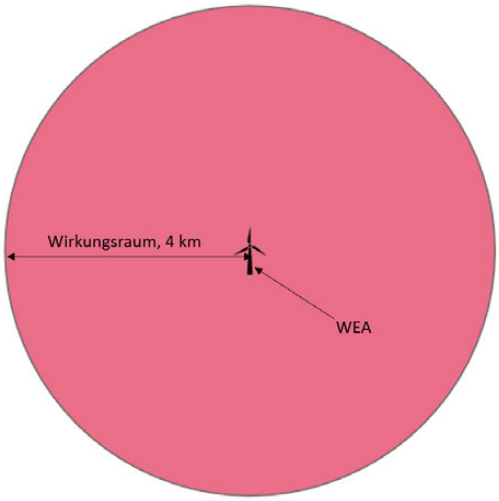

Abbildung 1: Wirkungsraum um eine WEA (Quelle: Dark Sky GmbH)

Die Dark Sky GmbH mit Sitz in Neubrandenburg, Mecklenburg-Vorpommern ist eine der Teilnehmerinnen an dem BNK-Markt und Unterstützerin dieser Bachelorarbeit. Das Portfolio umfasst die Bereitstellung eines BNK-Signals durch Primärradare sowie Transpondersignale. Ein genutztes Radarsystem ist das **Dark Sky Phase Array/MSkyEye**. Dieses hat einen 90°-Öffnungswinkel und kann sowohl an bestehenden als auch eigens dafür errichteten Masten befestigt werden, was es zu einem versatilen Radarsystem macht (siehe nachfolgende Abbildung 2).

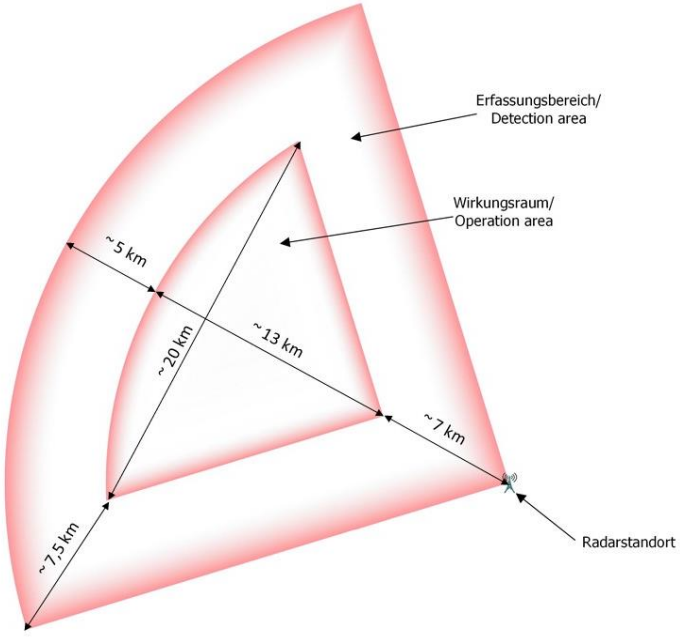

Abbildung 2: Abdeckungsbereich Radar MSkyEye (Quelle: Dark Sky GmbH)

Die Findung eines **Radarstandorts** ist ein essenzieller Prozess und Teil der Signalbereitstellung. Es muss sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus technischer Sicht ein passender Platz gefunden werden, der diverse Faktoren erfüllt. Dazu gehören u. a. die Topografien der Gebiete und damit einhergehend, ob von einem Radarstandort aus alle Windenergieanlagen (WEA) sichtbar sind und ob diese innerhalb der erforderlichen Detektionszonen des Radarkegels liegen. Weiterhin ist die Befestigungsmöglichkeit eines Radars ein essenzieller Standortfaktor, für welchen sowohl vorhandene als auch neu erbaute Masten und Türme genutzt werden können. Diese genannten und weitere Faktoren sind in Kapitel 4 aufgeführt und im Detail beschrieben.

Eine weitverbreitete Möglichkeit, diese Faktoren zu analysieren und damit einen oder mehrere passende Standorte zu finden, ist die sog. **Multi-Kriteriums-Standort-Analyse**. Diese versucht auf Basis mehrerer Kriterien bzw. Faktoren den am besten geeigneten Standort zu ermitteln.

Die Arbeit beginnt mit einer theoretischen Auseinandersetzung mit der vorhandenen Literatur. Dabei werden verschiedene Methoden der Entscheidungsfindung beschrieben und analysiert.

Im Anschluss daran wird eine Methodik sowie Standortfaktoren zur Anwendung einer Multi-Kriteriums-Standort-Analyse für die Radar-Standortfindung beschrieben. Dieses Konzept wird auf ein Projektgebiet angewendet und die Resultate ausgewertet.

Ziel der Arbeit ist es, eine Methodik zur Radar-Standortfindung zu entwerfen und zu testen, welche als grundsätzlich auch auf andere Projektgebiete übertragbar und anwendbar gilt. Dies soll eine operative Sicht auf BNK-Projekte hervorbringen sowie eine Aussage zu deren Machbarkeit liefern. Als unterstützende Software wird das Geoinformationssystem „QGIS“ (https://qgis.org/de/site/, 2020) genutzt, mit welchem raumbezogenen Daten betrachtet, bearbeitet, erfasst und analysiert werden können.

2 Theorie der Multi-Kriteriums-Entscheidungs-Analysen bzw. Multi-Kriteriums-Standort-Analyse

2.1 *Einführung*

Entscheidungen aufgrund verschiedener Einflussfaktoren zu fällen ist ein großes Feld in der Literatur, welche sich hauptsächlich mit der theoretischen und mathematischen bzw. stochastischen Entscheidungsfällung beschäftigt. Dagegen ist die Möglichkeit der Entscheidungsfindung für Standorte unter Zuhilfenahme von Geoinformationssystemen (GIS) in der Literatur weniger präsent. Aus einer Multi-Kriteriums-**Entscheidungs**-Analyse wird dann eine Multi-Kriteriums-**Standort**-Analyse, da der Faktor **Lage** miteinberechnet wird.

Trotzdem ist die grundsätzliche Annäherung an eine Entscheidungsfindung immer gleich. Es geht stets darum, Entscheidungen zu treffen, bei denen mehrere Auswahlmöglichkeiten bestehen (Handlungen, Orte, Objekte, usw.). Dabei basiert die Entscheidung immer auf einem oder mehreren messbaren Kriterien. Durch Kombination, Vergleich, Priorisierung sowie Auswertung dieser Kriterien bzw. Faktoren kann eine Entscheidung getroffen werden (Eastman, 1999) und (Eastman, et al., 2000). Multi-Kriteriums-Entscheidungsfindungs-Ansätze wurden entwickelt, um Entscheidungsträgern beim Prozess der Entscheidung zu unterstützen. Dabei wird immer eine Lösung auf Basis eines Kompromisses zwischen verschiedenen Faktoren gefunden, die auf dem subjektiven Wissen und Empfinden des Trägers beruhen (Ishizaka, et al., 2013).

Grundsätzlich werden in der Arbeit deutsche Begriffe für die Multi-Kriteriums-Entscheidungs-Analyse (MKEA) verwendet. Jedoch ist die dazugehörige Literatur beinahe ausschließlich englischsprachig, weshalb viele Begrifflichkeiten an erster Stelle im Original in diese Arbeit übernommen und im Nachgang bei Bedarf ins Deutsche übersetzt werden, da diese im wissenschaftlichen Kontext geläufig sind und durch entsprechende Definition in vielen Fällen eine klarere Bedeutung als eine deutsche Übersetzung haben. In der Literatur werden oft ähnliche Begriffe für dasselbe verwendet und meinen grundsätzlich die gleiche Thematik. Im Folgenden einige Beispiele davon:

- MCEA: Multi-criteria evaluation analysis
- MCDA: Multi-criteria decision analysis
- MCDM: Multi-criteria decision making

Die Ausarbeitung von (Church, et al., 2009) behandelt die Problematik der MCDA kann als gute Grundlage für die theoretische Auseinandersetzung mit dem Thema gesehen werden. Daher stützt sich diese Abhandlung auf die Beschreibungen und Informationen aus dieser

Quelle, unterstützt durch weitere Bücher, die das Thema Multi-Kriteriums-Entscheidungs-Analyse aus anderen Blickwinkeln betrachten.

Ein Beispiel für einen anderen Ansatz bieten (Linkov, et al., 2012), welche Schritt für Schritt in die Thematik der Standortfindung einführen, die populären MCDA-Methoden vorstellen und anhand von Beispielen darstellen.

Im nächsten Abschnitt wird auf einige dieser Beispiele aus der Wissenschaft eingegangen und weiter vertieft.

2.2 *Vorstellung verschiedener Herangehensweisen der Wissenschaft*

Das folgende Kapitel gibt eine Übersicht über die für die Thematik der Standortfindung von Windenergieanlagen relevanteste Literatur. Diese zeigt, dass die Wissenschaft recht ähnlich mit der Aufgabenstellung umgeht, die Herangehensweisen jedoch unterschiedlich sind.

Alle Herangehensweisen haben gemein, dass sie Umstände oder Faktoren aufnehmen, messen und evaluieren. Nach (Saaty, 2008) geht die Wissenschaft hauptsächlich so vor, dass sie Dinge objektiv misst und die Ergebnisse subjektiv auswertet. Dies erfordert von den Auswertenden Verständnis für das Problem und die Materie, um ein Problem strukturiert zu erfassen und auf dieser Basis ein Urteil zu fällen.

Beim Fällen von Entscheidungen ist dies oft vertauscht, da zuerst subjektive Urteile zur Situation gefällt und aufbauend darauf objektive Prioritätenskalen erarbeitet werden (Eastman, et al., 2000). Priorität ist nach (Saaty, 2008) die Dominanz eines Elements zu einem anderen Element.

Weiterhin können nach (Saaty, 2008) Phänomene physikalisch anhand von einer absoluten Skala beginnend bei null gemessen werden. Diese müssen nach der eigentlichen Abnahme der Werte jedoch noch ausgewertet und analysiert werden. Andererseits sind auch das Messen und Vergleichen anhand einer relativen Skala möglich. Dies setzt Verstehen und Urteilen voraus und ist wesentlich häufiger im Alltag anzutreffen als absolute, physikalische Skalen. Jede Entscheidung, die aufgrund von Erfahrungen, Gefühlen, Einschätzungen usw. getroffen wird, ist eine subjektive und relative (Saaty, 2008).

Für die korrekte Bestimmung von Prioritäten von Werten sind metrische (physikalische) Skalen nicht ausreichend. Es bedarf zusätzlich menschliches Einschätzungsvermögen zur Festlegung ihrer Wichtigkeit, auf dessen Basis eine Anordnung und Priorisierung der Werte festgelegt werden kann (Saaty, 2008).

Wenn Phänomene oder Werte nicht gemessen werden können, müssen diese miteinander oder mit einem Standard verglichen werden. Das geschieht in vielen Bereichen des alltäglichen Lebens oft automatisch und war die grundsätzliche, natürliche Herangehensweise an Problemstellungen, bevor wissenschaftliche Messskalen eingeführt wurden (Saaty, 2008).

Manche Phänomene sind nicht oder schwierig zu messen, beispielsweise politische Effektivität und Akzeptanz sowie Gefühle oder Aussehen. Diese lassen sich in Einzelfällen messen und darstellen, sind jedoch nicht allgemeingültig und übertragbar auf ein größeres System, weil sie auf dem individuellen Wertesystem eines jeden Menschen basieren und teilweise sogar innerhalb eines individuellen Falls von Situation zu Situation variieren (Saaty, 2008).

Als Beispiel dafür schreibt (Saaty, 2008) „[…] I feel angrier at him today than I did yesterday. We cannot, however, make meaningful statements such as, I feel three and one half times angrier than I did yesterday. ". (Frei übersetzt: „[…] ich bin heute wütender auf ihn als ich es gestern war. Allerdings können wir nicht sinnvolle Aussagen treffen wie *ich bin heute dreieinhalb Mal wütender auf ihn als ich es gestern war*.").

Die Folge ist ein Spagat zwischen einerseits messbaren und greifbaren Skalen und Werten (Kilogramm, Zeit, usw.) und andererseits ungreifbaren Faktoren (Saaty, 2008). Es zeigt sich, dass jede Entscheidung einen subjektiven Anteil in sich trägt und daher nie gänzlich objektiv getroffen wird. Dies ist ebenfalls für die vorliegende Aufgabe der Findung eines Standorts relevant, da bei dieser unter Zuhilfenahme von GIS visuelle Entscheidungshilfen zur Verfügung gestellt werden. Die Auswertung und letztendliche Entscheidung für einen Standort hat jedoch der Mensch inne.

Zur Annäherung an das Thema sind im Folgenden zwei Beispiele aus der theoretischen Wissenschaft der Entscheidungsfindung herangezogen worden. Diese beziehen den Faktor „Lage" allerdings nicht mit ein, dienen jedoch dem theoretischen Verständnis für die Entscheidungsfindung.

So unterscheiden (Ishizaka, et al., 2013) in Ihrer Ausarbeitung zwischen vier grundlegenden Arten der Entscheidungsproblematik:

- **Auswahl**: Erarbeitung der besten Option oder Reduzierung auf eine Auswahl von vergleichbar guten Optionen
- **Einsortierung**: Zuordnung von Optionen zu Kategorien
- **Ranking**: Anordnen der Optionen von am besten zu am schlechtesten anhand verschiedener Kriterien
- **Beschreibung**: Optionen beschreiben zum besseren Verständnis dieser

Im Buch von (San Cristóbal Mateo, 2012) schlägt dieser fünf Hauptschritte zur Entscheidungsfindung vor:

1. Definition des Problems, Alternativen entwerfen und Kriterien erarbeiten
2. Den Kriterien Gewichte zuordnen: Gewichte zeigen die relative Wichtigkeit der Kriterien zueinander
3. Evaluationsmatrix: Die Essenz des Problems kann dargestellt werden, abgeleitet aus den komplexen vorherigen Überlegungen und dargestellt in einer Matrix
4. Die passende Multi-Kriteriums-Methode auswählen
5. Rangordnung der Alternativen dadurch festlegen

- Daten und Grad der Unsicherheit sind Schlüsselfaktoren
- Rangordnung der Alternativen bestimmen und beste Alternative darstellen

Die vorigen beiden Arbeiten haben die Vorgehensweise gemein, dass die wichtigsten Komponenten erarbeitet werden, diese miteinander verglichen und einsortiert werden, um sie im Endeffekt in einer Rangfolge einzugliedern.

Die nächsten zwei Unterkapitel 2.2.1 und 2.2.2 befassen sich mit Literatur der Standortwissenschaft und behandeln die gesuchte Thematik. Dabei wird durch (Eastman, 1999) in Kapitel 2.2.1 eine sehr theoretische und mathematische Darstellung präsentiert, welche teilweise als schwierig in die Praxis zu übernehmen gesehen werden kann. Unterkapitel 2.2.2 wiederum beschreibt eine wesentlich praktischere Herangehensweise, welche an vielen Stellen als gut auf die Praxis übertragbar befunden wurde.

2.2.1 Multi-Kriteriums-Standortfindung (Eastman, 1999) und (Eastman, et al., 2000).

In (Eastman, 1999) wird der traditionelle Ansatz *Boolean* und *gewichtete lineare Skalierung* dargestellt.

Boolean ist die klassische Herangehensweise mit *true* und *false* bzw. 1 und 0. Dabei kann etwas entweder als *Ja* oder als *Nein* eingestuft sowie mittels „Constraint“ (im Sinne von *muss oder muss nicht berücksichtigt werden)* erweitert werden. Da beispielsweise ein Radar nicht in Gewässern positioniert werden kann, sind diese Gebiete bei der Standortfindung automatisch als *false* bzw. 0 anzusehen

Bei der **gewichteten linearen Skalierung** handelt es sich um eine ansteigende Eignung (weighted linear combination), dargestellt durch Skalen. Dabei ist die Standardisierung auf

eine Skala ein erster Schritt, welcher Daten miteinander vergleichbar macht (Formel ((*1*))), nach (Eastman, 1999). Im Anschluss daran kann die Eignung mithilfe der Zuordnung einer Gewichtung für jeden Faktor ermittelt werden. Zusätzlich kann jeweils noch ein *Constraint* hinzugerechnet werden, der den Constraint-Faktor ausschließt, falls der Constraint 0 ist und entsprechend einschließt, falls der Constraint-Faktor 1 ist. Das Ergebnis ist die *Suitability* oder *Eignung*, bei der alle Faktoren mit ihrer Wichtigkeit/Gewichtung berücksichtigt wurden (Formel (*2*), nach (Eastman, 1999)).

$$X_i = \frac{(x_i - min_i)}{(max_i - min_i)} \quad (1)$$

Hierbei ist

X_i	Kriteriumsergebnis des Faktors *i*
x_i	Originalwert des Faktors *i*
min_i	Mindestwert des Faktors *i*
max_i	Maximalwert des Faktors *i*

$$\text{Suitability/Eignung} = \sum w_i X_i * \prod C_j \quad (2)$$

Hierbei ist

w_i	Gewicht des Faktors *i*
X_i	Kriteriumsergebnis des Faktors *i*
min_i	Constraint *i*

Dabei weisen die Autoren (Eastman, 1999) und (Eastman, et al., 2000) jedoch auf Problematiken dieses Ansatzes hin. So ergeben Boolean und gewichtete lineare Skalierung sehr unterschiedliche Ergebnisse. Weiterhin ist die Lineare Skalierung aller Faktoren nicht immer als sinnvoll zu erachten, oftmals ist eine einzelne Betrachtung der jeweiligen Daten nötig, anstatt alle Daten auf einer gemeinsamen Skala zu besehen. Die Autoren verweisen in diesem Fall auf die nicht-lineare Skalierung in (Eastman, et al., 2000).

Grundsätzlich wird eine weitere Problematik dahingehend beschrieben, dass die Bestimmung und Festlegung der Gewichtungen subjektiv und daher fehleranfällig sind. Dadurch besteht auch das Risiko, dass die Entscheidung aufgrund von falsch eingeschätzten Faktoren und Gewichten falsch bzw. mit negativen Folgen ist (decision risk).

(Eastman, 1999) schlägt als Lösungen *Fuzzy Measures* vor. Dabei erfolgt eine Einteilung in z. B. Wahrscheinlichkeiten und Ansichten, bei welchen der Entscheidungsprozess ein Abwägen zwischen den Entscheidungsalternativen ist und im Endeffekt ein Entscheiden für eine dieser Alternativen vorsieht (Eastman, et al., 2000).

Das Ergebnis ist dann ein *ordered weighted average* (geordnetes gewichtetes Mittel), welches die Kriterien anhand ihres Rangs anstatt ihrer Eigenschaften anordnet und die Gewichtung unabhängig von der Reihenfolge der Kriterien festlegt.

Beispiel:

- angeordnete Gewichte von [0,5 0,3 0,2]
- festgelegte Rangfolge der Faktoren ABC
    - BAC → 0,5*B + 0,3*A + 0,2*C
    - CBA → 0,5*C + 0,3*B + 0,2*A

Die Gewichtungen bleiben gleich angeordnet, obwohl sich die Faktoren in ihrer Reihenfolge ändern können.

Die Autoren unterscheiden weiterhin zwischen zwei Arten von Gewichten, Kriteriums-Gewicht (Criterion weight) und Anordnungs-Gewicht (Order weight). Das Kriteriums-Gewicht ist ein Gewicht, das speziell einem Kriterium zugeordnet ist, während das Anordnungs-Gewicht zeitlich nach dem Kriteriums-Gewicht angewendet wird und für alle Kriterien gilt.

Die Ausführungen von (Eastman, 1999) und (Eastman, et al., 2000) sind wie bereits eingangs erwähnt recht theoretisch und an vielen Stellen deshalb nur schwierig in die Praxis zu übernehmen. Einen in dieser Hinsicht besseren Ansatz beschreibt das kommende Kapitel 2.2.2 von (Church, et al., 2009).

2.2.2 Multi-Kriteriums-Standortfindung nach (Church, et al., 2009)

(Church, et al., 2009) haben die umfangreichste Abhandlung zu MCDA geschrieben:

2.2.2.1 Gesetze der Geografie und der Standort-Wissenschaft

Nach (Church, et al., 2009) ist das Gebiet der „location science“ (Standort-Wissenschaft) geboren aus dem theoretischen wie auch der angewandten Wissenschaft der „location analysis“ (Standort-Analyse).

Die Autoren gehen auf Gesetzmäßigkeiten von Tobler ein und nennen das erste Gesetz der Geografie, welches dieser erarbeitet hat. Dieses lautet: “Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.” („Alles hängt mit allem zusammen, aber nähere Dinge hängen mehr zusammen als entferntere Dinge“) (Church, et al., 2009).

Aufbauend auf diesem Grundsatz haben die Autoren drei Gesetze der Standort-Wissenschaft erarbeitet.

1. „Some locations are better than others for a given purpose“ („Manche Standorte sind besser als andere für einen bestimmten Zweck geeignet“) (Church, et al., 2009)

   Laut den Autoren ein offensichtlicher, jedoch sehr wichtiger Fakt. Dieser hat zur Folge, dass sich die Frage stellt: „Wenn manche Standorte für einen bestimmten Zweck besser sind, welcher ist dann der Beste?“

2. „Spatial context can alter site efficiencies“ („Räumliche Zusammenhänge können die Effektivität von Standorten verändern“) (Church, et al., 2009)

   Die Effektivität eines Standorts für einen bestimmten Zweck hängt ebenfalls von anderen räumlichen Faktoren um diesen Standort herum ab. So ergibt es z. B. für eine Anwaltskanzlei Sinn, sich nahe einem Gericht zu situieren, um möglichst geringe Laufzeiten zu haben und ebenfalls besser von potenziellen Kunden gefunden zu werden. Oder Windenergieanlagen in der Nähe von vorhandener Infrastruktur zu bauen, um baulichen Aufwände zu minimieren (unter Berücksichtigung sonstiger Auflagen).

3. „Sites of an optimal multisite pattern must be selected simultaneously rather than independently, one at a time.“ („Standorte für Mehrfach-Standorte müssen gleichzeitig und nicht unabhängig voneinander ausgewählt werden“) (Church, et al., 2009)

   Dieses Gesetzt tritt ein, wenn mehrere Standorte ineinandergreifen, wie z. B. beim Bau von mehr als einer Windenergieanlage. Dort müssen Luftstromveränderungen, die jede einzelne Anlage hervorruft, geplant und in die Gesamtbetrachtung miteinbezogen werden.

2.2.2.2 Daten und Datenanalyse

Räumliche Daten stellen die Grundlage für eine Standortfindung dar. Diese Daten können entweder über frei verfügbare Quellen bezogen, gekauft oder selbst bzw. durch andere (bezahlte) Quellen erhoben werden. Bearbeitbare und in einem GIS nutzbare Daten kommen entweder im Raster- oder Vektorformat vor. Die Darstellung von räumlichen Daten ist ein wichtiger Schritt zur Sichtbarmachung von Ergebnissen und Sachverhalten.

In der räumlichen Datenanalyse gibt es den Begriff der „Service Zone“, welche folgendermaßen erklärt wird: „A service zone is an identified, or identifiable, area that has some significance to a location-specific entity.“ (Frei übersetzt: „Eine Service-Zone ist ein identifizierter, oder identifizierbarer, Bereich, der eine Signifikanz zu einem standort-spezifischen Gebilde hat“) (Church, et al., 2009).

Unter anderem ist eine Art von Service-Zone das „Viewshed“, welches ein Bereich ist, der von einem oder mehreren Blickpunkten aus gesehen werden kann. In Abbildung 3 ist als Beispiel ein solcher Viewshed aus dem Buch von (Church, et al., 2009) dargestellt, in welchem von einem „Observation Point“ aus alle Areale hervorgehoben sind, welche innerhalb des sichtbaren Gebiets liegen („Visible Area“). Dies hat direkte Relevanz zur vorliegenden Aufgabe der Radarstandortfindung, bei der der Viewshed ebenfalls eine wichtige Rolle spielt.

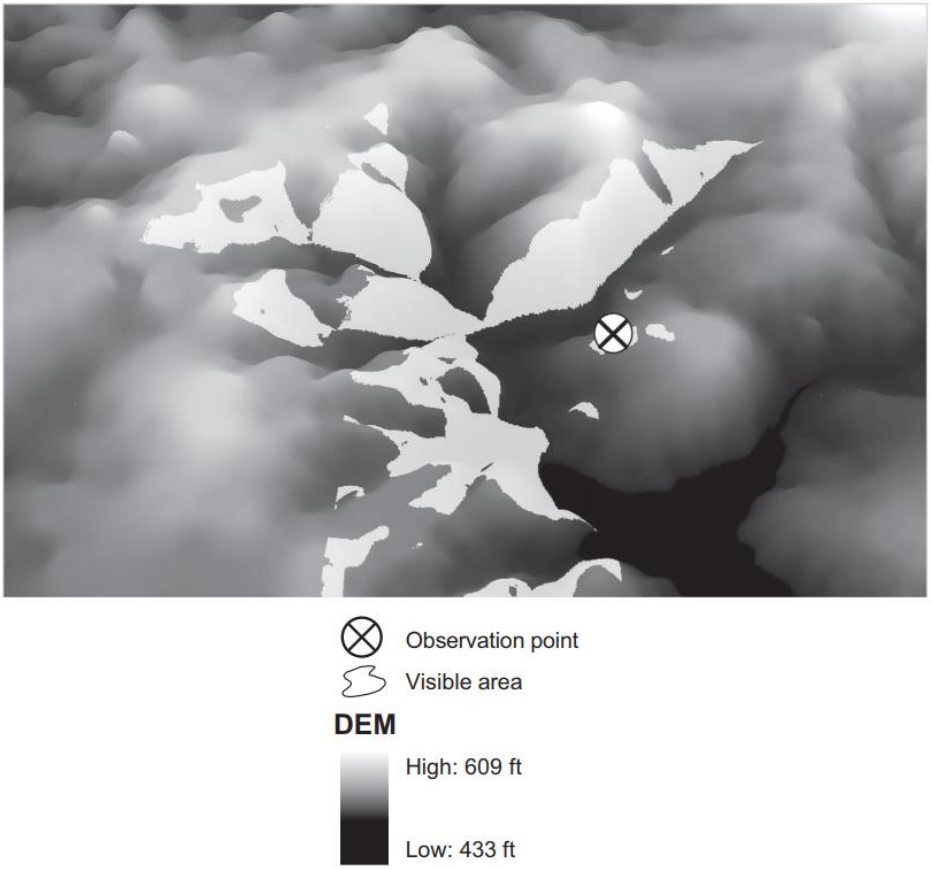

Abbildung 3: Beispiel eines Viewsheds aus (Church, et al., 2009)

2.2.2.3 Eignungsanalyse

Ob ein Gebiet für einen bestimmten Zweck geeignet ist, kann mit einer „suitability analysis“ (Eignungsanalyse) herausgefunden werden, welche nach (Church, et al., 2009) folgendermaßen definiert ist: „Suitability analysis is a process of systematically identifying or rating potential locations with respect to a particular use.“ (Frei übersetzt: „Eine Eignungsanalyse ist ein Prozess, bei dem systematisch potenzielle Standorte in Hinblick auf einen gewissen Zweck identifiziert und eingestuft werden.“).

Ziel der Eignungsbeurteilung ist das Produzieren einer Karte mit Darstellung der Eignung. Um dies zu erreichen, schlagen die Autoren drei Schritte vor, aufbauend auf der in der Abhandlung zitierten Arbeit von McHarg (1969).

1. „Identifizierung der zur Eignungsfindung nötigen Attributen-Layer und Akquirierung der dafür relevanten Daten.“
2. „Erstellung einer Methodik zur Beurteilung der Eignung unter Nutzung der Attributen-Layer“
3. „Anwendung der Beurteilungs-Methodik, um einen zusammengesetzten Eignungswert für jede Raumeinheit zu generieren“

Die Autoren weisen darauf hin, dass diese drei Schritte irreführenderweise sehr einfach erscheinen, es jedoch nicht sind. Besonders Schritt 2 bedarf sehr viel Aufmerksamkeit und ist wichtig, da ansonsten invalide Eignungs-Karten entstehen können.

Dabei unterscheiden die Autoren zwischen relativer Eignung und absoluter Eignung. **Relative Eignung** zeigt den Grad an Eignung eines Standorts im Vergleich zu einem anderen an. Währenddessen gibt die **absolute Eignung** an, ob ein Standort überhaupt geeignet ist. Dies deckt sich mit den Beschreibungen von (Eastman, 1999) und (Eastman, et al., 2000) zum Ansatz mit Boolean und Gewichteter Linearer Skalierung. In folgender Abbildung 4 und dem darauffolgenden Text ist dies anhand eines Beispiels erklärt. Darin ist dargestellt, dass bei der absoluten Eignung zwischen *Suitable* oder *Unsuitable* unterschieden wird. Bei der relativen Eignung gibt es eine Skala von 1 bis 10, die den Grad der Eignung (suitability) darstellt.

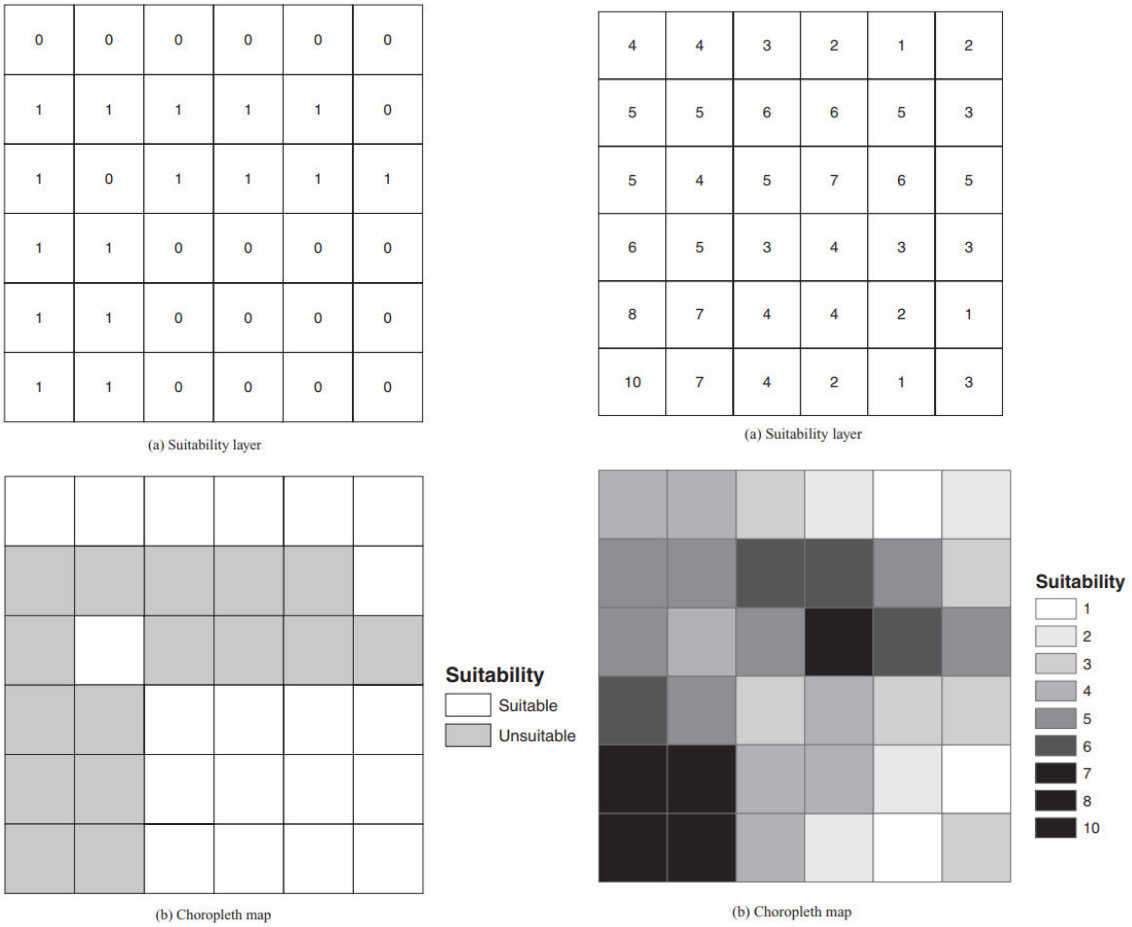

Abbildung 4: Beispiel für absolute und relative Eignung (Church, et al., 2009)

Die **absolute Eignung** kann als ersten Schritt bzw. als Vorauswahl gesehen werden. Bei dieser werden absolut ungeeignete Gebiete bzw. Standorte ausgesondert und nur noch jene behalten, die für das Ziel relevant sind. Dies folgt dem traditionellen Ansatz von Boolean mit 0 und 1.

Die **Relative Eignung** gibt den Grad der Eignung für einen bestimmten Zweck wieder. Es ist somit nicht ja/nein oder 0/1, sondern gestaffelt. Dieser gestaffelten Eignung liegt aus diesem Grund immer eine auf einer Funktion zur Berechnung des **Utility values** aufbauenden Auswertung zugrunde, die sog. **Utility function**. Diese ordnet jedem Wert des Layers eine Gewichtung zu, mit dem dieser multipliziert wird. Diese Gewichtung stellt daher die Wichtigkeit eines Wertes dar.

Grundlegend gilt folgendes:

$$U_{li} = utility\ value\ of\ area\ i\ in\ attribute\ layer\ l$$

$$(U_{li} = Nützlichkeitswert\ des\ Bereichs\ i\ im\ Attributlayer\ l)$$

Der Utility value basiert auf einer Einschätzung, welche getroffen werden muss. So ist z. B. in Abbildung 5 bei einem *Price of land* von 20,000$ der Utility value ungefähr 60. In diesem Beispiel ist es für einen Verkäufer vorteilhaft, wenn der *Price of land* hoch ist. Ein eventueller Käufer des Landabschnitts würde den Utility value und dementsprechend die Kurve genau andersherum ansetzen, da ein niedriger Preis dessen Ziel ist.

Der Utility value gilt dann für jeden Wert in einem Attributlayer, z. B. wie in diesem Fall mit dem Attributlayer Price of land. Dort hat jede Liegenschaft einen eigenen Preis, welcher wiederum als Utility value angegeben werden kann.

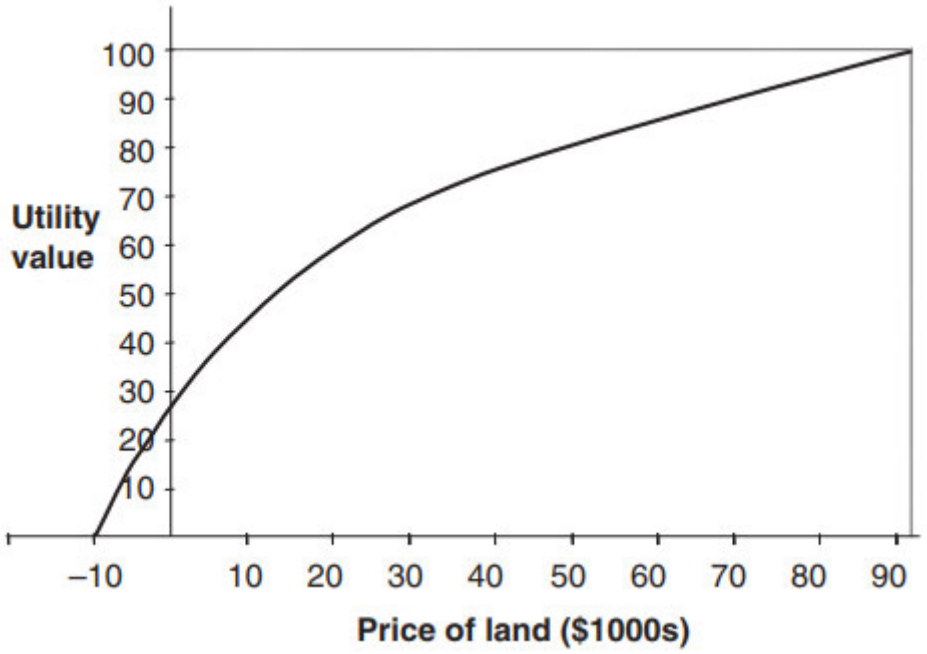

Abbildung 5: Utility value relativ zum Price of Land (Church, et al., 2009)

Wenn für jeden Attributlayer der Utility value festgelegt wurde, kann im nächsten Schritt die relative Eignung festgestellt werden. Nach (Church, et al., 2009) ist die gebräuchlichste Technik dafür die „Weighted linear combination“ (gewichtete lineare Kombination).

Diese zeigt sich in folgender Formel (3) wie folgt:

$$S_i = \sum_l w_l U_{li} \tag{3}$$

Hierbei ist

S_i	Relative Eignung des Bereichs *i*
w_l	Gewichtung für den Attributlayer *l*
x_i	Utility value des Bereichs *i* im Attributlayer *l*

Oftmals bedarf es einer vorhergehenden **Normalisierung,** wodurch die Summe der Gewichte 1 ergibt. Zur Normalisierung schlagen die Autoren eine simple Verhältnisgleichung vor, welche in nachfolgender Formel (4) angegeben ist:

$$\overline{w}_l = {}^{w_l}/_{\sum_l w,} \tag{4}$$

Hierbei ist

$\overline{w}_l$	Normalisierte Gewichtung des Layers *l*
w_l	Gewichtung für den Attributlayer *l*

Das bedeutet, dass das vorhandene Gewicht eines Attributlayers durch die Summe aller Gewichte aller Attributlayer geteilt wird. Das jeweilige Ergebnis der Gewichte pro Attributlayer $\overline{w}_l$ ersetzt dann w_l.

Im Anschluss daran kann der **zusammengesetzte Eignungs-Layer S_i** mittels (3) erstellt werden.

Abbildung 6 zeigt dies beispielhaft mit drei Eingabelayern A, B, C. Dies könnten z. B. die Pixel eines Rasterbildes mit den jeweiligen Farbwerten sein und werden mit dem Wert r_{li} dargestellt. Die entsprechende festgelegte Gewichtung ist anhand der Utility function zu sehen, welche den Pixelwerten 1 bis maximal 5 eine Gewichtung zuordnet. Das Ergebnis dieser Gewichtung sind die Utility value-Layer U_{li}, welche nun mit den bereits normalisierten Gewichtungen (Summe ergibt 1) von $w_A = 0{,}2$, $w_B = 0{,}5$ und $w_C = 0{,}3$ multipliziert werden. Im letzten Schritt

wird der zusammengesetzte Layer S_i errechnet, indem die einzelnen Layer zusammenaddiert werden.

Die Autoren (Church, et al., 2009) weisen darauf hin, dass es noch viele weitere Möglichkeiten zur Erstellung von Funktionen für die Berechnung des Utility values sowie der Berechnung der Eignung gibt, verweisen jedoch auf keine weiteren.

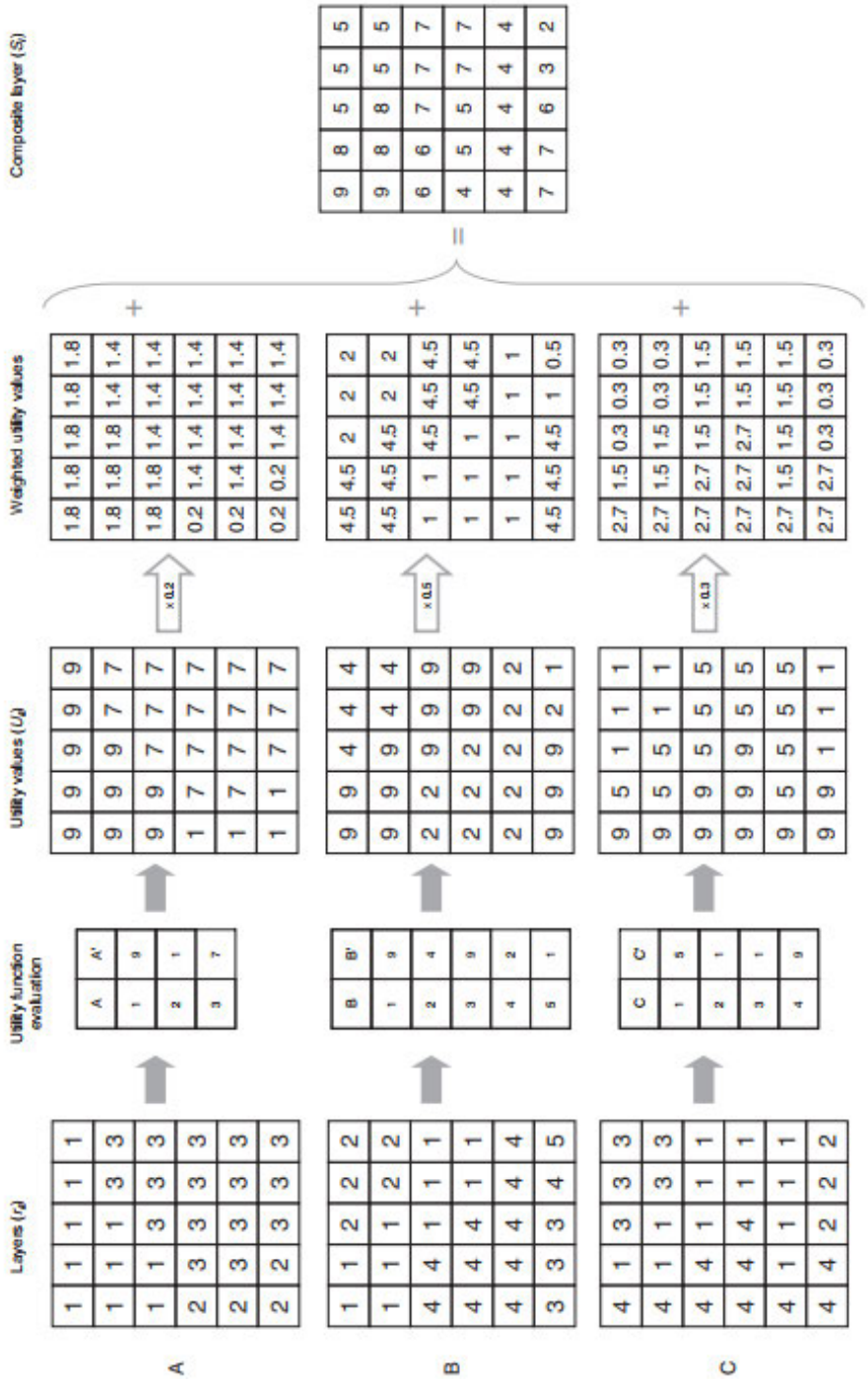

Abbildung 6: Beispiel für Erarbeitung einer relativen Eignung (nach (Church, et al., 2009))

2.2.2.4 Gewichtungen

Gewichtungen sind relevant, um die relative Wichtigkeit der einzelnen Faktoren untereinander auszudrücken und mit diesen in korrekter Weise zu rechnen.

Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, die Gewichtungen auf subjektiver Basis zu ermitteln und festzulegen. Dies kann jedoch zu Fehlern und Fehleinschätzungen führen, da, wie im vorigen Kapitel beschrieben, diese subjektiven Entscheidungen von Menschen durchgeführt wurden und somit nicht objektiv sind.

Daher schlagen die Autoren in (Church, et al., 2009) eine technischere Herangehensweise namens „Analytic hierachy process (AHP)“ vor. Auf diese wird im folgenden Kapitel 3 weiter eingegangen und diskutiert, ob diese für die vorliegende Aufgabe ein relevanter Ansatz ist.

2.3 *Fazit zu den unterschiedlichen Herangehensweisen*

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, sind in der Literatur unterschiedliche Herangehensweisen an die Multi-Kriteriums-Standort-Entscheidungen zu finden. In dieser Arbeit wird die Herangehensweise von (Church, et al., 2009) verwendet, da diese am umfangreichsten und klarsten strukturiert ist und die Aufgabe der Standortfindung anhand mehrerer Kriterien unter Zuhilfenahme von geografischen Gesichtspunkten und GIS am ehesten abdeckt. Außerdem ist die Veröffentlichung im Vergleich zu den Alternativen neuer und daher näher an der aktuellen Entwicklung.

3 Methoden der Multi-Kriteriums-Entscheidungsanalyse

Nach der Vorstellung verschiedener Autoren und Herangehensweisen im vorigen Kapitel wird im Folgenden eine dieser Methoden der Multi-Kriteriums-Entscheidungsfindung im Detail vorgestellt. Diese heißt **Analytic Hierarchy Process (AHP)** und ist nach (Church, et al., 2009) die verbreitetste und prominenteste Methode im Bereich der Entscheidungsfindungswissenschaften.

3.1 *Analytic Hierachy Process (AHP)*

AHP wurde von Saaty 1980 zur Entscheidungsfindung entwickelt (Church, et al., 2009). Der Prozess besteht aus drei Hauptschritten:

1. Ein Problem in eine Hierarchie von Elementen zerlegen
2. Diese Elemente gleicher Hierarchie paarweise miteinander vergleichen (pairwise comparison)
3. Die hierarchische Rangfolge erarbeiten und auf die relevanten Daten anwenden

Laut (Saaty, 2008) wird und wurde AHP von vielen Firmen und Regierungen benutzt, beispielsweise:

- IBM: Qualitätssteigerungsstrategie für das Design des AS/400 Computers
- Neuer Standort für die durch ein Erdbeben zerstörte türkische Stadt Adapazari
- Standortsuche für eine Ölbohrplattform im Nordatlantik
- Korrekte Voraussage des Gewinners eines American-Football-Superbowls

Der in diesem Rahmen benutzte Begriff der **Pairwise Comparison** (auch genannt: Pairwise comparison matrices (PCMs) (Kou, et al., 2016)) kommt aus dem Bereich der Entscheidungsfindung und wurde 1927 von Thurstone entwickelt. Es stellt ein solides Werkzeug dar, auf dessen Basis Entscheidungen getroffen werden können. Vorteile sind die Einfachheit im Umgang damit, weil grundsätzlich immer nur zwei Kriterien miteinander aufgewogen und verglichen werden und damit der gesunde Menschenverstand angesprochen wird (Koczkodaj, 1993). Nach (Saaty, 2008) ist das direkte Vergleichen von Objekten ein fundamentaler mathematischer Prozess zum Ableiten von Messungen.

(Linkov, et al., 2012) zitieren, dass *Pairwise Comparisons* gut anwendbar sind, weil „[…] Menschen besser dafür geeignet sind, relative Entscheidungen zu treffen anstatt finite“ (Anm.: „finite“ kann zur Erklärung an dieser Stelle mit dem Wort „absolute“ gleichgesetzt werden).

3.1.1 Beispiel zu AHP

In diesem Abschnitt werden die Beispiele von (Church, et al., 2009) übernommen. Dort geht es um die Auswahl eines Gebiets zum Habitatsschutz. Zuerst müssen relevante Faktoren erarbeitet werden. In diesem Beispiel sind es die folgenden drei:

- Sumpfgebiete (wetlands)
- Artenvielfalt (species richness)
- Straßendichte (als Indikator für den Entwicklungsstand des Gebiets) (road density)

Daraufhin findet ein paarweises Vergleichen der Daten statt. Als Grundlage dazu werden die von Saaty entwickelten Verhältnisse herangezogen, wie sie in Abbildung 7 zu sehen sind. Ein Verhältnis von 1 bedeutet gleichgewichtig, während ein Verhältnis von 9 eine wesentliche Dominanz eines Werts über einen anderen darstellt. Dabei wird die Dominanz des in der linken Spalte stehenden Elements über das in der obenstehenden Reihe dargestellt. Betrachtet werden dabei zwei Fragestellungen:

1. Welches der beiden Elemente ist wichtiger/dominanter in Bezug auf eine bestimmte Frage?
2. Wie viel wichtiger/dominanter ist dieses Element im Vergleich zum anderen?

Intensity of Importance	*Definition*	*Explanation*
1	Equal Importance	Two activities contribute equally to the objective
2	Weak or slight	
3	Moderate importance	Experience and judgment slightly favor one activity over another
4	Moderate plus	
5	Strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
6	Strong plus	
7	Very strong or demonstrated importance	An activity is favored very strongly over another; its dominance demonstrated in practice
8	Very,very strong	
9	Extreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
1.1–1.9	When activities are very close a decimal is added to 1 to show their difference as appropriate	A better alternative way to assigning the small decimals is to compare two close activities with other widely contrasting ones, favoring the larger one a little over the smaller one when using the 1–9 values.
Reciprocals of above	If activity *i* has one of the above nonzero numbers assigned to it when compared with activity *j*, then *j* has the reciprocal value when compared with *i*	A logical assumption
Measurements from ratio scales		When it is desired to use such numbers in physical applications. Alternatively, often one estimates the ratios of such magnitudes by using judgment

Abbildung 7: Tabelle aus (Saaty, 2008) zur Fundamentalen Skala mit absoluten Werten

Für das angeführte Beispiel des Habitatsschutz sieht die Pairwise Comparison-Tabelle der Autoren (Church, et al., 2009) dann folgendermaßen aus:

	Wetlands	Species Richness	Road Density
Wetlands	1	1/5	1/2
Species richness	5	1	3
Road density	2	1/3	1

Abbildung 8: Tabelle von (Church, et al., 2009) mit dem Ergebnis der Pairwise Comparison

Dort ist beispielsweise in (1,2) zu sehen, dass Artenvielfalt 5-mal so wichtig wie das Vorhandensein von Sumpfgebieten ist. Im Reziproken bei (2,1) ausgedrückt ist die Existenz von Sumpfgebieten nur um ein Fünftel so wichtig wie die Artenvielfalt.

Nach Erstellung dieser Verhältnistabelle kann im nächsten Schritt die Gewichtung der Faktoren bestimmt werden. Dies passiert über die Berechnung des „principal right-hand eigenvector values“. In (5) ist die grundsätzliche Berechnung dazu dargestellt und in (6) das Ergebnis mit den vorher in Abbildung 6 definierten Pairwise Comparison-Werte (Formeln nach (Church, et al., 2009)). Der Einfachheit halber wurde von den Autoren k=1 gewählt. Bei genaueren Berechnungen soll k so lange erhöht werden, bis der Unterschied der Ergebnisse vernachlässigbar gering ist.

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \lim_{k\to\infty} \frac{\begin{bmatrix} a_{ij} & \cdots & a_{nj} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}}{[1 \quad \cdots \quad 1] \begin{bmatrix} a_{ij} & \cdots & a_{nj} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}} \tag{5}$$

Hierbei ist

w_n	Gewichtungen der Faktoren
a_{ij}	Pairwise Comparison-Werte aus Tabelle
k	Wert zur iterativen Verbesserung der Ergebnisse

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \lim_{k\to\infty} \frac{\begin{bmatrix} 1 & 0{,}2 & 0{,}5 \\ 5 & 1 & 3 \\ 2 & 0{,}333 & 1 \end{bmatrix}^1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0{,}2 & 0{,}5 \\ 5 & 1 & 3 \\ 2 & 0{,}333 & 1 \end{bmatrix}^1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}} \quad (6)$$

Das Ergebnis ist folgendes:

	Importance Weights
Wetlands	.121
Species richness	.648
Road density	.229

Abbildung 9: Ergebnis der Gewichtungen nach (Church, et al., 2009)

Die erarbeiteten Gewichte können nun in Formel (3) (S. 15) eingefügt werden, wodurch wie bei Abbildung 6 (S. 16) beschrieben der endgültige zusammengesetzte Layer S_i errechnet werden kann.

3.2 *Fazit zu AHP*

AHP stellt eine solide Herangehensweise für einen Multi-Kriteriums-Entscheidungsprozess dar. Durch den Pairwise Comparison-Ansatz wird auf jeden Faktor eingegangen und die Prioritäten im Detail herausgearbeitet.

Für die Arbeit mit MCDA kann die Software *DECERNS* genutzt werden. Diese ist kostenlos herunterladbar und erleichtert die Schritte, die bei den diversen Methoden angewendet werden. Sie nimmt beispielsweise das händische Ausrechnen der Eigenvalue-Matrix ab. (http://decerns.com/, 2020)

4 Methodik zur Anwendung einer Multi-Kriteriums-Standort-Analyse für die Radar-Standortfindung MSkyEye

Nach der theoretischen Auseinandersetzung mit dem Thema Entscheidungsfindung wird nun auf die vorliegende Aufgabenstellung der Radar-Standortfindung eingegangen.

Im Allgemeinen erfolgt die Methodik über das Heranziehen und Vergleichen diverser absoluter oder relativer Faktoren. Welcher Art diese Faktoren sind hängt vom vorliegenden Projektgebiet und der nötigen Detailtiefe ab, mit der die Standortplanung durchgeführt werden soll.

Die vorliegende Arbeit und deren Methodik versteht sich als grundsätzliche Herangehensweise für die Standortbestimmung einer Radaranlage zum Herstellen eines BNK-Betriebs. Es ist möglich, dass beim Anwenden dieser Methodik auf andere Projektgebiete weitere Faktoren zutage treten, die im aktuellen Umfang nicht erfasst sind. Diese gilt es dann in die bestehende Methodik zu integrieren und diese somit zu erweitern und zu verfeinern.

Durch das in Kapitel *6 Projektgebiet Nauen* bearbeitete Gebiet konnte eine Methodik erarbeitet werden, die allgemeingültige Aussagen zulässt und somit auf anderen Gebiete übertragbar ist. Es wurde mithilfe von QGIS und den gewonnenen Daten in iterativen Abläufen nach Wegen gesucht, einen Standort für Radare zu finden. Dabei ging es in erster Linie darum, Vorhandenes zu beachten und zu nutzen. Konkret bedeutet dies, dass die Sichtbarkeit jeder Windenergieanlage (WEA) anhand der vorhandenen Topografie gegeben sein muss. Dies ist bestimmender Faktor in dieser Arbeit und hat große Auswirkung auf die Resultate. Weiterhin ist die Befestigung des Radars ein relevanter Punkt, da es aus wirtschaftlicher Sicht erstrebenswert ist, das Radar an einer bestehenden Struktur zu befestigen, statt eine neue zu erbauen. Weiterhin sind Einflüsse wie Internetverfügbarkeit sowie die Abdeckungs-Geometrie des Radars zu beachten. Details zu den verschiedenen Faktoren sind in Kapitel 5 zu finden. In nachfolgender Abbildung 10 ist die Methodik der Standortfindung grafisch dargestellt.

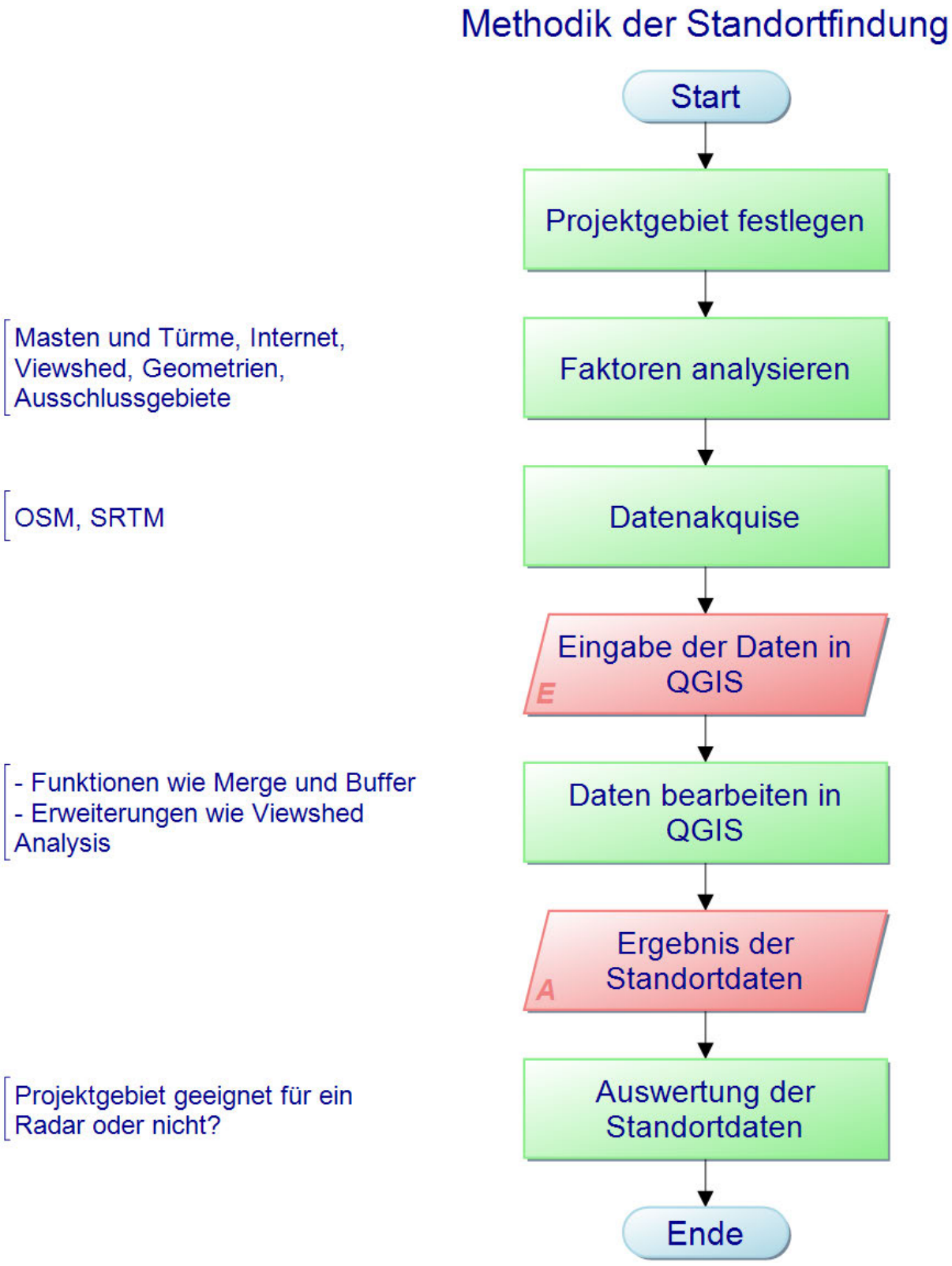

Abbildung 10: Methodik der Standortfindung als Schema, linksseitige Kommentare dienen dem Verständnis (erzeugt mittels PapDesigner (Quelle: (http://friedrich-folkmann.de/papdesigner/Hauptseite.html, 2020))

5 Faktoren für die Standortfindung einer BNK-Radaranlage

Nach einem Überblick zur Methodik im vorigen Kapitel 4 werden in diesem Kapitel zuerst die Faktoren selbst benannt sowie die Datenquellen aufgeführt und beschrieben. Im Anschluss daran wird in Kapitel 5.2 genauer auf die einzelnen Faktoren eingegangen.

Die aufgeführten Faktoren sollen die Grundlage für die Standortfindung einer Radaranlage für den BNK-Betrieb bilden und kommen hauptsächlich durch bisherige Erfahrungen im Arbeitsalltag der Dark Sky GmbH sowie der Bearbeitung des Projektgebiets Nauen zustande. Weitere Faktoren können abhängig vom Projektgebiet von Relevanz sein.

Im ersten Schritt werden zur Übersicht alle Faktoren in Tabelle 1 dargestellt. Die Datenquelle *intern* bedeutet, dass diese Daten von der Dark Sky GmbH bezogen wurden.

Tabelle 1: Faktoren für die Standortfindung einer BNK-Radaranlage

Name	**Beschreibung**	**Boolean:**	**Datenquelle**
Mast und Türme	Befestigung des Radars	Ja	Intern + OSM
Internet	Radar muss Internetverbindung haben	Ja	Breitbandatlas (BMVI)
Viewshed	Jede WEA muss vom Standort aus sichtbar sein	Ja	Erzeugt in QGIS aus SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)
Geometrie des Radars: 7 km< x< 20 km Buffer um WEA	Simuliert die Geometrie des Radars	Ja	Intern
Deutschlandkarte	Begrenzt den Standort auf Deutschland	Ja	OSM
Sperrgebiet Militär	Ausschlussgebiet	Nein	OSM
Sperrgebiet Radarteleskope	Ausschlussgebiet	Nein	Bundesnetzagentur

Für den Fall, dass keine im Projektgebiet vorhandenen Masten bzw. Türme für die Befestigung eines Radars passen, kann die Neuerrichtung eines Masts in Betracht gezogen werden. Dazu gilt es weitere Standortfaktoren zu berücksichtigen, die in folgender Tabelle 2 aufgeführt sind:

Tabelle 2: Zusätzliche Faktoren zur Standortfindung, falls ein Mast als Radarbefestigung errichtet werden muss

Name	**Beschreibung**	**Absolut: Ja/Nein**	**Datenquelle**
Wiesen und Äcker	Bauland für Mast	Ja	OSM
Hangneigung < 10°	Zu große Hangneigung schließt das Gebiet wegen Unwirtschaftlichkeit aus	Ja	Erzeugt in QGIS aus SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)
Entfernung zu Straßen < 200 m	Eine zu große Entfernung zu Straßen ist unwirtschaftlich, da dies eine Neuerrichtung einer Straße miteinbezieht	Ja	OSM

Die oben aufgeführten Faktoren verstehen sich als grundsätzliche, um eine Neuerrichtung ein- oder ausschließen zu können. Weitere Faktoren und die dazugehörigen Daten, welche nicht frei erhältlich sind, könnten die Methodik verfeinern, wie z. B. mit dem geplanten Radar in Konflikt kommende Radarhindernisse und Strahlungsquellen. In diesem Fall gilt dann eine Überprüfung der Notwendigkeit, ob der Einkauf solcher Daten für das Projekt als sinnvoll zu erachten ist.

5.1 *Datenquellen*

5.1.1 OSM

OSM (Open Street Map) stellt eine breitgefächerte und freie Plattform dar, um lagebezogene Daten zu erhalten.

Der Download von OSM-Daten erfolgt entweder direkt über die Webseite (https://www.openstreetmap.org/, 2020) oder über eine Drittseite wie z. B. Overpass (http://overpass-turbo.eu/, 2020). Der Vorteil bei Overpass zu der OSM-Seite ist, dass größere Datenmengen auf einmal heruntergeladen und nach speziellen, attributsbeschreibenden **Tags** gesucht werden kann.

Diese Tags wurden über eine Website namens *TagFinder* bezogen. Bei dieser kann sowohl auf Deutsch als auch auf Englisch nach einem Begriff gesucht werden (http://tagfinder.herokuapp.com/, 2020).

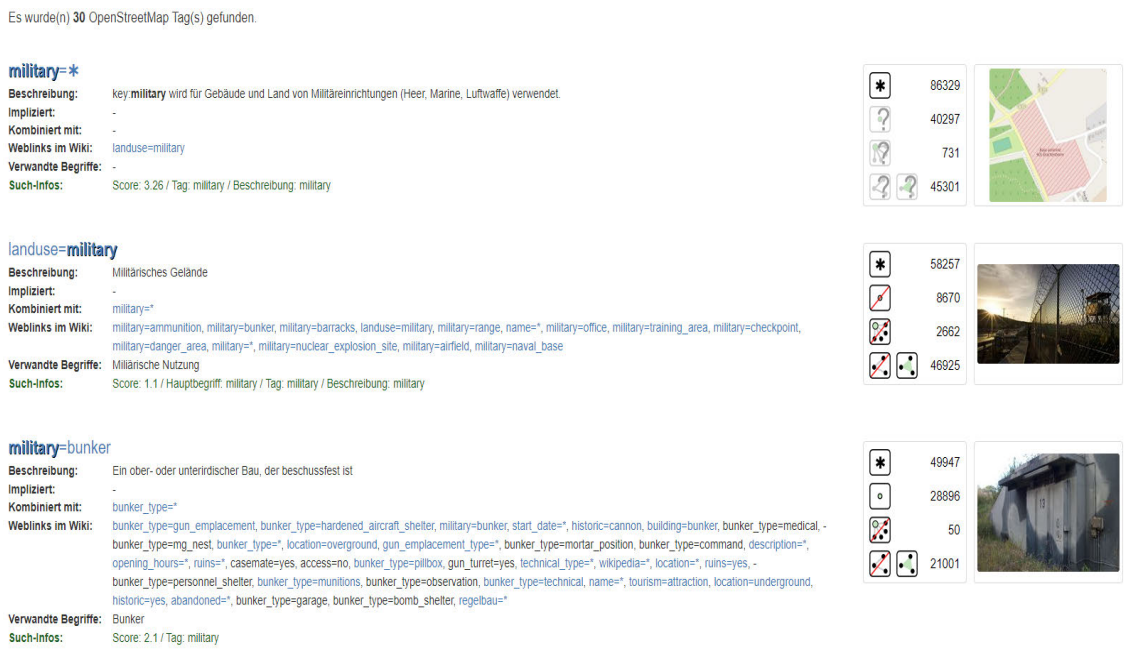

Abbildung 11 TagFinder, hier am Beispiel mit dem Stichwort „military“ (Quelle: (http://tagfinder.herokuapp.com/, 2020))

Im Anschluss an erfolgreich gefundene Tags können diese über die Website Overpass eingetragen und danach gesucht werden. Diese bietet eine komfortable Oberfläche und Möglichkeit zum Download von OSM-Daten. Als Bounding Box wurde das Projektgebiet Nauen [bbox: 52.4040,12.5360,52.7836,13.3092] genutzt.

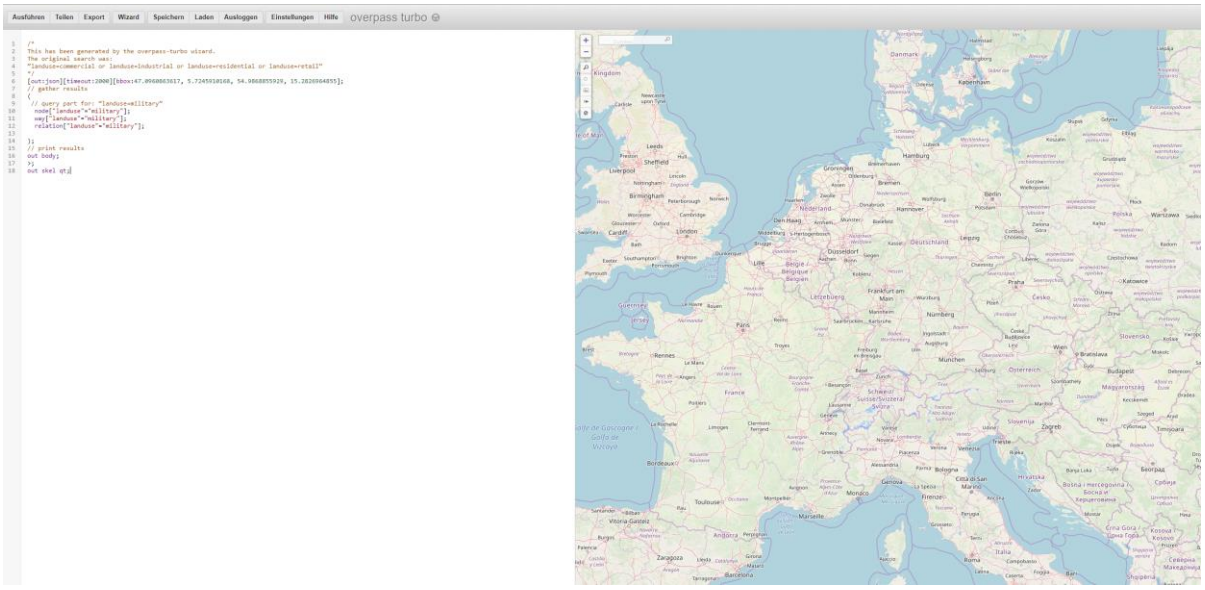

Abbildung 12: Oberfläche von Overpass (Quelle: (http://overpass-turbo.eu/, 2020))

5.1.2 SRTM

Die SRTM-Daten (Shuttle Radar Topography Mission) sind mit einer Auflösung von 30 m sehr genaue Höhendaten. Bezogen werden können diese direkt über die Webseite der NASA oder wie in dem Fall dieser Arbeit über eine Drittseite (https://dwtkns.com/srtm30m/, 2020). Diese lässt komfortabel die einzelnen gewünschten Kacheln auswählen und herunterladen.

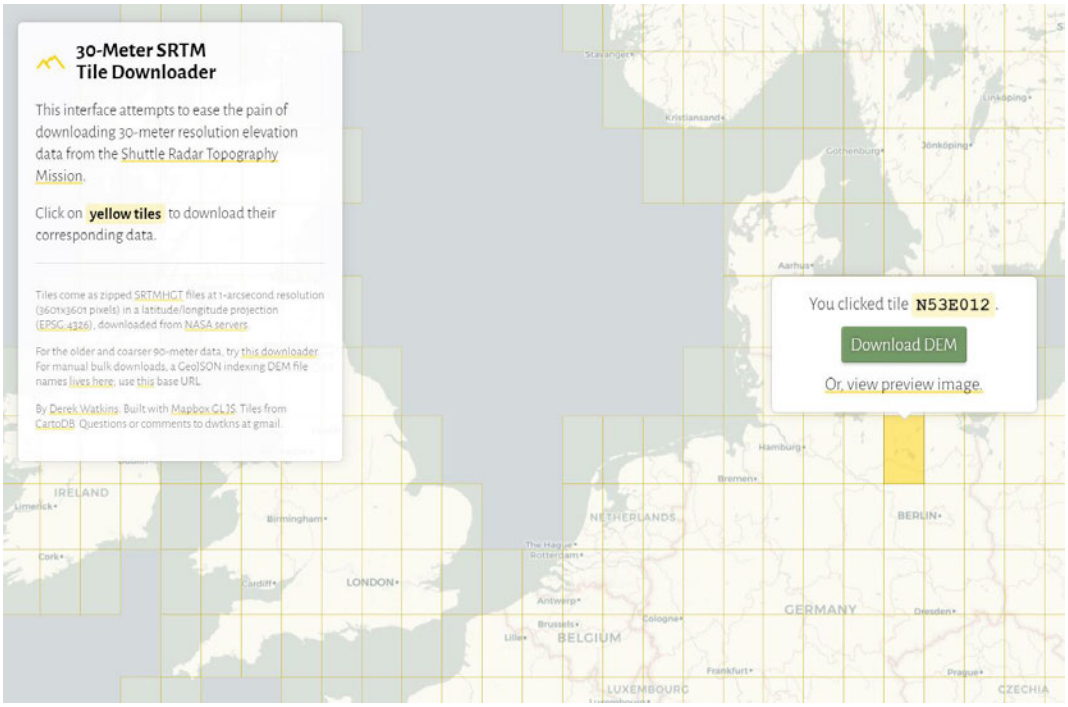

Abbildung 13: Download der SRTM-Daten über eine Drittseite (Quelle: (https://dwtkns.com/srtm30m/, 2020))

5.2 *Beschreibung der Faktoren*

Im Folgenden werden die einzelnen Faktoren näher beschrieben und der Hintergrund zu den jeweiligen beleuchtet.

5.2.1 Masten und Türme

Grundsätzlich ist es aus wirtschaftlicher Sicht wünschenswert, bereits vorhandene Masten oder Türme als Radarbefestigungsplatz zu wählen, anstatt neue zu errichten. Vorhandene Masten sind damit das Grundgerüst der Standortplanung. Deshalb wurde ein umfangreicher Masten- und Türme-Layer erzeugt, worauf im Folgenden näher eingegangen wird.

Vergleich der Daten zu OSM-Masten und internen Masten

Es liegen interne Daten der Dark Sky GmbH zu Funkmasten vor. Diese sind jedoch aus unterschiedlichen Quellen und heterogen, weshalb im Zuge dieser Arbeit überprüft wurde, ob OSM-Daten ergiebiger und aktueller sind. Zuerst wurden OSM-Daten analysiert, indem die Tags Man_made=tower [17633] und Man_made=mast [16150] bezogen und in einem Layer zusammengefasst wurden. In Klammer geschrieben ist die Anzahl der Objekte. Diese beiden Tags dienten als Grundlage für einen Masten- und Türme-Layer.

Bereinigung von Duplikaten

Aufgrund der Philosophie des Taggings in OSM sind einige Punkte sowohl als Tower als auch als Mast gekennzeichnet, weshalb Duplikate in beiden Datensätzen vorkommen. Um die Datenmenge zu verringern und Redundanzen zu vermeiden, wurde in QGIS nach einem Zusammenführen der beiden Datensätze (*Merge*) das Toolbox-Tool *v.clean* von *GRASS* benutzt. Dieses lieferte jedoch keine Erfolge bzw. fand keine Duplikate heraus.

Daher wurde auf ein QGIS-Plugin zurückgegriffen: MMQGIS. Dieses kann mit der Funktion *Modify-> Delete Duplicate Geometries* ebenfalls doppelte Geometrien entfernen.

Mit diesem Plugin war das Entfernen von Duplikaten erfolgreich. Es konnten ca. 300 Duplikate entfernt werden, siehe die Differenz der in Klammern geschrieben Zahlen in Abbildung 14.

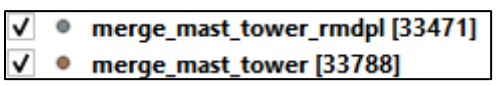

Abbildung 14: Layer mit Duplikaten und entfernte Duplikate

Im nächsten Schritt wurde der erzeugte OSM-Layer mit den internen, bisher genutzten Daten von Dark Sky GmbH abgeglichen. Es handelt sich um folgende interne Daten:

- Funkmasten OSM [11455]
- Telxius Portfolio [2373]
- Vodafone Portfolio [4403]
- DFMG Deutsche Funkturm GmbH [8877]

Ergebnis des Vergleichs der Daten

- **Funkmasten OSM** sind identisch mit Man_made=tower und Man_made=mast. Dieser Datensatz benötigt also keine weitere Berücksichtigung.
- **Telxius Portfolio** sind teilweise identisch, teilweise aber auch nicht im OSM-Datensatz vorhanden. Daher wird dieses gemerged und im Anschluss wieder bereinigt.
- **Vodafone Portfolio** beinhaltet ebenfalls sowohl Duplikate als auch noch nicht aufgenommene Daten. Wird ebenfalls gemerged.
- **DFMG Deutsche Funkturm GmbH** halten ebenso Duplikate vor, weshalb gemerged wird.

Nach dem Entfernen der Duplikate liegt eine fertige Masten_Türme-Datei vor, die etwa 49000 Punkte beinhaltet. Per Verschneidung in QGIS werden die Punkte der Bounding Box auf Deutschland zugeschnitten.

Das Ergebnis besteht dann aus knapp 40000 Objekten, dargestellt in Abbildung 15..

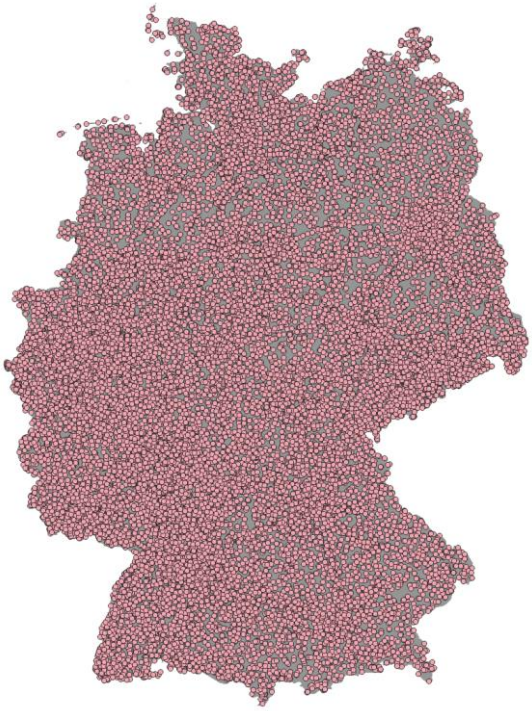

Abbildung 15: Gesamter Layer der Masten und Türme in Deutschland (Quelle: OSM)

5.2.1.1 Neuerrichtung eines Masts

Für den Fall, dass kein vorhandener Mast oder Turm als Radarstandort dienen kann, kann die Neuerrichtung eines Masts in Erwägung gezogen werden. Dann greifen die in Tabelle 2 auf Seite 25 genannten Faktoren *Äcker und Wiesen, Nähe zu Straßen* und *Neigung < 10°.*

5.2.1.1.1 Äcker und Wiesen

Für die Neuerrichtung eines Masts wurden freistehende, zum Teil ungenutzte Grünflächen gesucht. Dies lässt sich über die OSM-Tags *landuse=meadow* und *landuse=farmland* realisieren, diese beschreiben Wiesen und landwirtschaftlich genutztes Ackerland. Da sich landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie ausgedehntes Grünland in Form von Wiesen nicht unmittelbar in der Nähe von Städten, Ballungsräumen sowie innerhalb von Naturschutzgebieten befinden, ist durch diese Auswahl an OSM-Tags ebenfalls automatisch der Anwohnerschutz aufgrund von Radarstrahlung sichergestellt wie auch die Gefahr von Verschattung durch Gebäude o.ä. beseitigt.

Oft kann mit lokalen Landbesitzern oder Landwirten ein Vertrag über die Errichtung eines Masts auf dem entsprechenden Land geschlossen werden. Es ist in diesem Fall weiterhin zu beachten, dass auf dem ausgesuchten Land ein Mast errichtet werden darf, was im Einzelfall dann mit den entsprechenden staatlichen Organen zu klären ist.

5.2.1.1.2 Nähe zu Straßen

Bei Errichtung eines Masts muss auf Straßen im Umkreis geachtet werden, da ansonsten große und teure Baumaßnahmen zur Errichtung einer Straße bzw. die Unmöglichkeit der Erreichung des zukünftigen Maststandorts anzunehmen sind. Es kann jedoch nicht im direkten Umfeld einer Straße aus genehmigungsrechtlichen Gründen gebaut werden. Deshalb wurde im ersten Schritt eine Entfernung von 200 m zu Straßen festgelegt. Ebenfalls kann selbstverständlich nicht auf Straßen selbst gebaut werden, sondern nur daneben.

Per OSM wurden alle Straßen mit dem Key “Highway” bezogen und im Anschluss folgende Tags entfernt. Dies hat den Hintergrund, dass diese Tags nicht für die Standortsuche relevant sind, weil in diesen Bereichen nicht gebaut werden kann. Alle anderen Tags wurden als relevant eingestuft.

- abandoned (nicht mehr genutzt)
- bridleway (Reitweg)
- corridor (Flur in einem Gebäude)
- construction (im Bau befindliche Straßen)
- footway (Fußgängerweg)
- living_street (Verkehrsberuhigter Bereich)
- pedestrian (Fußgängerzonen)
- platform (Bushaltestelle)
- cycleway (Fahrradwege)
- steps (Treppen)

5.2.1.1.3 Neigung < 10°

Über einer Neigung von 10° zu bauen, steigert die Kosten der Errichtung weiter und macht das Projekt weniger wirtschaftlich. Daher wird nur Fläche in Betracht gezogen, die weniger als 10° Neigung aufweisen.

Die Erstellung einer Neigungskarte erfolgt in QGIS über die gleichnamige Funktion auf Basis des DSM (Digital Surface Model). Alle Bereiche, welche über 10° liegen, können als nicht bebaubar angenommen werden.

5.2.2 Internet

Es müssen viele Komponenten in der Kette der Kommunikation von Radar bis zur WEA-Befeuerung bedient werden, daher ist aus technischer Sicht für einen reibungslosen Betrieb der Radare mindestens eine 50 Mbit/s-Leitung nötig.

Über OSM können keine direkten Angaben zur Verfügbarkeit von Internet gefunden werden. Daher wurde als alternative Datenquelle der **Breitbandatlas des Bundes** genutzt. Dieser gibt den Internetausbau in Deutschland wieder. Nach Kontaktaufnahme mit dem Breitbandatlas und Analyse der Nutzungsbedingungen ergab sich der Umstand, dass die Daten ausschließlich zur nicht-kommerziellen Nutzung herangezogen werden dürfen. Da dies der Geschäftstätigkeit und dem kommerziellen Ziel von Dark Sky GmbH widerspricht, wurde mit dem *BMVI* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) und der zugehörigen *atene KOM GmbH* abgesprochen, die zugesendeten Daten lediglich für diese Bachelorarbeit zu verwenden und diese wiederum nicht von Dark Sky verwenden zu lassen, um rechtliche Konsequenzen zu umgehen. Dabei war die Prämisse, explizit auf diesen Umstand der nicht-kommerziellen Nutzung hier in der Arbeit hinzuweisen. Dies wurde akzeptiert und die Datenanfrage wurde angenommen.

Die erhaltenen Daten geben Aufschluss über die Verfügbarkeit der verschiedenen DSL-Geschwindigkeiten in Deutschland, wie in den nachfolgenden Abbildung 16 und Abbildung 17 zu sehen ist. Dabei ist die Angabe zur Verfügbarkeit eine prozentuale Angabe zu den angeschlossenen Haushalten.

Erkennbar ist, dass selbst die Abdeckung von 1 Mbit/s an vielen Stellen Deutschlands nicht gegeben ist und sich hauptsächlich auf Ballungsräume konzentriert. Beim Blick auf die Abdeckung mit 50 Mbit/s sind lediglich dicht besiedelte Gebiete wie beispielsweise Berlin, Hamburg und Städte in Nordrhein-Westfalen abgedeckt.

Für die Arbeit sind die Daten nicht aussagekräftig genug, um damit planen zu können. Eine prozentuale Angabe an angeschlossenen Haushalten in einer Region lässt keine Aussage über eine tatsächliche, punktgenaue Planung eines Standorts zu. Die Daten können lediglich als unterstützender Faktor genommen werden, um im Einzelnen mit Internetanbietern in der Region Kontakt aufzunehmen und herauszufinden, ob Internetverfügbarkeit am Standort vorliegt.

Beispielsweise bietet die Telekom einen Webservice an, mittels dem anhand der eigegebenen Adresse die Internetverfügbarkeit getestet werden kann (https://www.telekom.de/zuhause/dsl-vdsl-und-lte-verfuegbarkeit).

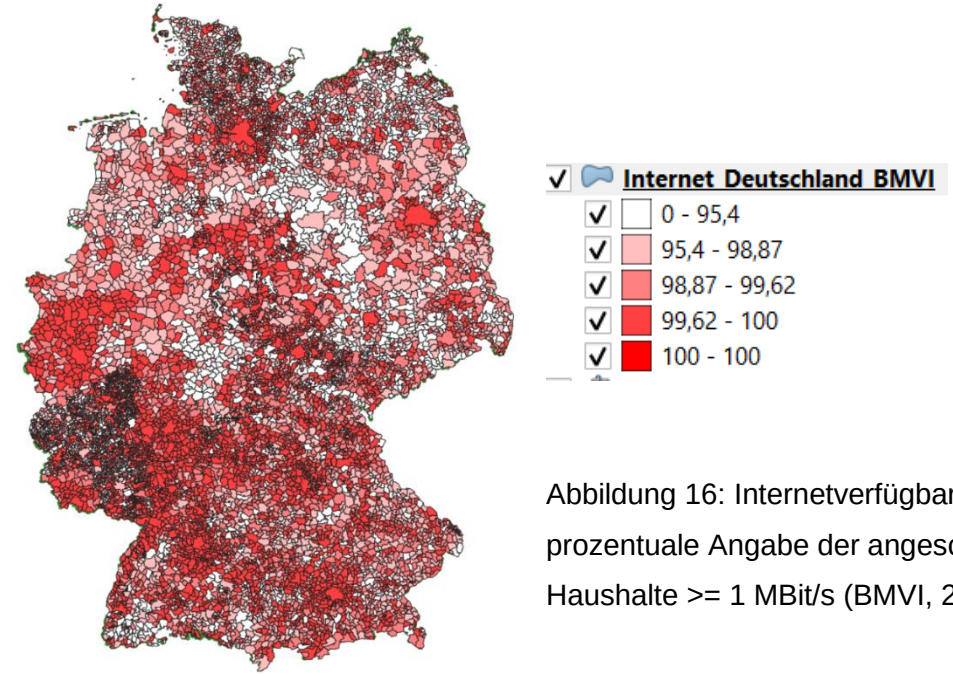

Abbildung 16: Internetverfügbarkeit: prozentuale Angabe der angeschlossenen Haushalte >= 1 MBit/s (BMVI, 2020)

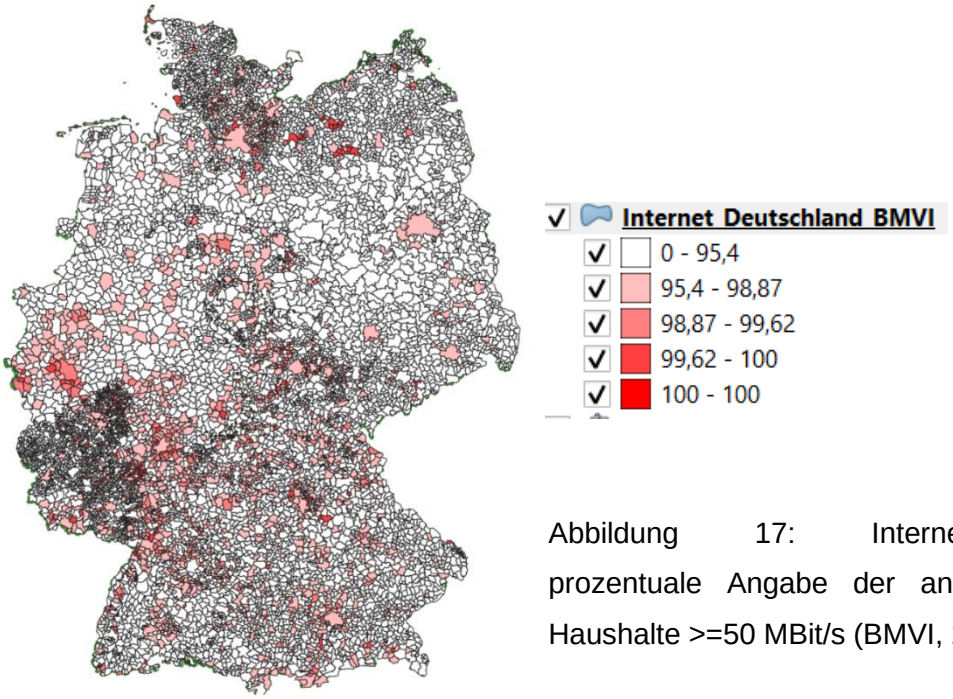

Abbildung 17: Internetverfügbarkeit: prozentuale Angabe der angeschlossenen Haushalte >=50 MBit/s (BMVI, 2020)

5.2.3 Viewshed auf Basis eines Digitalen Oberflächenmodells

Der Viewshed ist die Sichtbarkeit von einem Standort zu einem anderen. Im Falle dieser Arbeit bedeutet dies, dass alle WEA sowie deren Wirkungsraum von 4 km Radius von einem potenziellen Radar-Standort aus erfasst werden müssen. Nur so kann eine hundertprozentige Abdeckung gewährleistet werden. An dieser Stelle sei die nötige Detektion bis zum Boden erwähnt, welches die neueste Version der AVV (Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen, vgl. Einführung Seite 1) fordert. Der Gedanke der BNK ist es, in erster Linie den Luftraum über den WEA und somit herannahende Luftfahrzeuge zu erfassen. Verschattungen durch die Topografie machen deshalb eine Detektion bis zum Boden mittels eines Radars schwierig umsetzbar, weshalb sich diese Vorgabe als problematisch und dem Einsatz von Radartechnologie entgegenwirkend darstellt.

Die Grundlage für die Erstellung des Viewsheds ist ein Digitales Oberflächenmodell (DSM) im Rasterformat, aus dessen Höhen die Sichtbarkeit errechnet wird. Die Nutzung eines Viewshed-Ansatzes ist dahingehend nützlich, dass automatisch die Höhe als Faktor darin inbegriffen ist und keine gesonderte Betrachtung der Höhe als einschließende oder ausschließende Größe für einen Standort betrachtet werden muss.

Zur Erstellung eines Viewsheds wird in QGIS das Plugin *Visibility Analysis* genutzt. Vorteilhaft an diesem Plugin ist, dass mehrere *Observer-Points* gewählt werden können, in diesem Fall sind das die WEA.

Grundsätzlich wurde in dieser Arbeit von folgenden Werten beim Viewshed ausgegangen werden:

- Observer-Point-Höhe (WEA) = 100 m (durchschnittliche bzw. minimale WEA-Höhe, bei der BNK-Pflicht besteht)
- Target-Point-Höhe (Radar) = 30 m (durchschnittliche, favorisierte Radarhöhe)

Als Ergebnis wird eine Rasterkarte mit Werten zwischen 0 und der maximalen Anzahl der Viewpoints erhalten. Dies gibt an, wie viele Viewpoints den jeweiligen Standort sehen. Im Falle dieser Arbeit sind nur die maximalen Werte bzw. Bereiche interessant, da diese eine hundertprozentige Abdeckung darstellen. Im Abschnitt 6.3 Viewshed ist dies detaillierter erklärt.

5.2.4 Geometrie des Radars und der WEA

Das Abdeckungsgebiet des Radars MSkyEye, für welches der Standort gesucht wird, hat im zweidimensionalen die Form eines Viertel-Kreisausschnitts (90°-Öffnungswinkel) und im dreidimensionalen die eines Kegels. Der innere Bereich wird als *Wirkungsraum* bezeichnet und stellt die eigentliche Abdeckung dar, innerhalb welcher die WEA und der akkumulierte Wirkungsraum der WEA liegen müssen. Der äußere *Erfassungsbereich* dient als Pufferzone zur Erkennung und Verarbeitung von herannahenden Luftfahrzeugen (siehe Abbildung 18).

Die Anordnung bzw. Geometrie der WEA ist von Projektgebiet zu Projektgebiet unterschiedlich, was neben der Topografie die größte Herausforderung bei der Standortsuche ist. Grundsätzlich hat jedes WEA einen eigenen Wirkungsraum von 4 km Radius, innerhalb welchem eine BNK-Abdeckung sichergestellt werden muss (siehe Abbildung 19). Dieser akkumulierte Wirkungsraum aller WEA stellen den Bereich dar, welcher wiederum vom Wirkungsraum des Radars eingeschlossen werden muss, um eine komplette Abdeckung zu gewährleisten (siehe Abbildung 20). Aufgrund der Form eines Viertel-Kreisausschnitts sind manche Konstellationen an WEA-Anordnungen vorteilhafter gegenüber anderen. Dies ist jedoch stets im Einzelfall des Projektgebiets zu beurteilen. Siehe dazu das nächste Kapitel *6 Projektgebiet Nauen*.

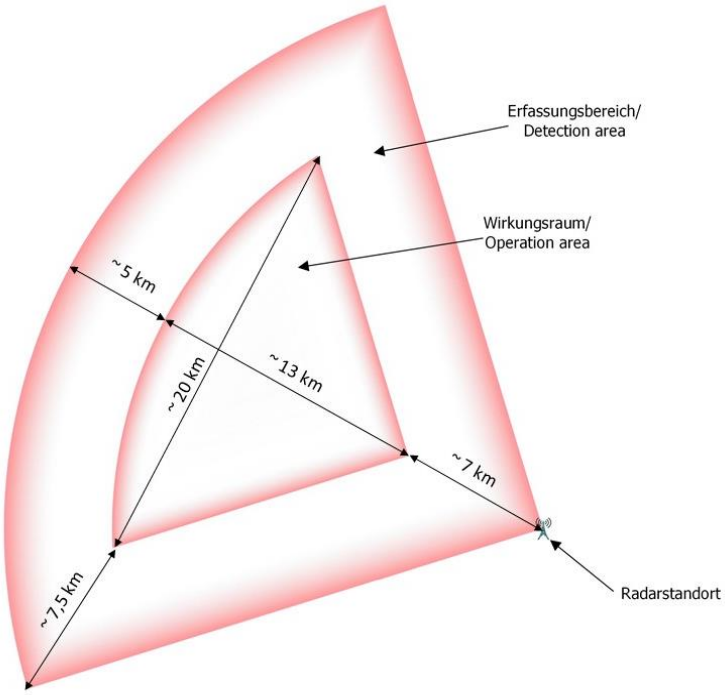

Abbildung 18: Abdeckungsbereich Radar MSkyEye (Quelle: Dark Sky GmbH)

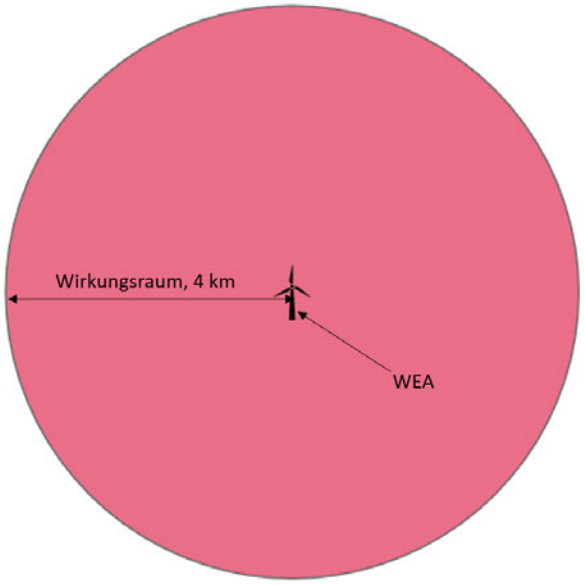

Abbildung 19: Wirkungsraum um eine WEA (Quelle: Dark Sky GmbH)

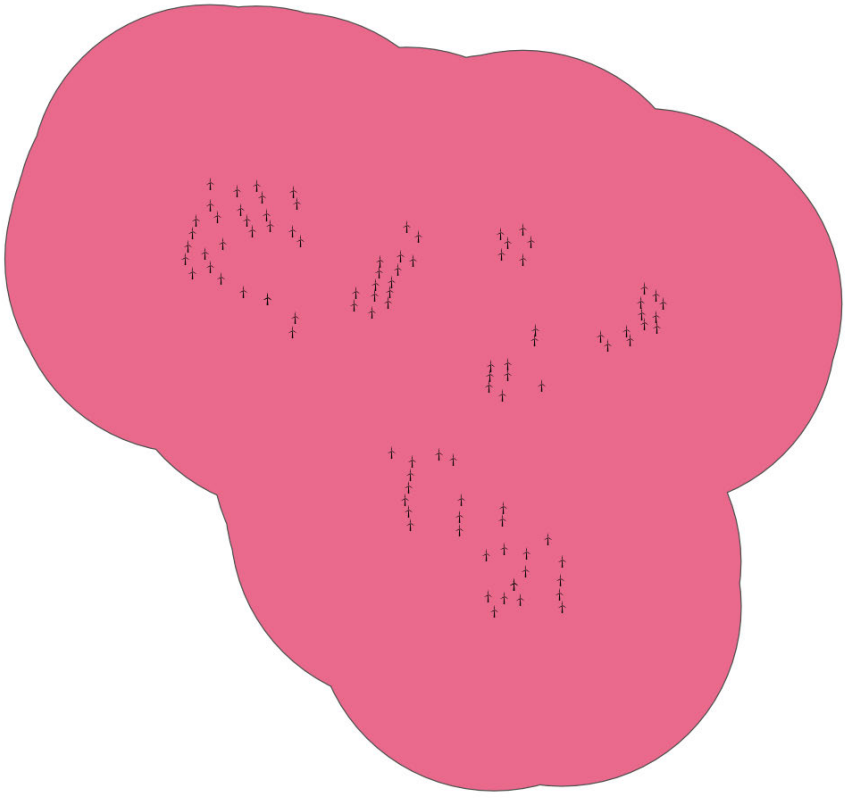

Abbildung 20: Akkumulierter Wirkungsraum aller WEA eines Projektgebiets (Quelle: Dark Sky GmbH)

5.2.5 Ausschlussgebiete

Für die vorliegende Aufgabe gibt es aus bisheriger Erfahrung Ausschlussgebiete, in denen kein Radar befestigt werden darf. Das sind zum einen Forschungs-Radarteleskope, welche einen 50 km-Bannradius um sich herumhaben. Zum anderen handelt es sich um militärische Flächen, innerhalb welcher ein Bau ausgeschlossen ist.

In Deutschland existieren insgesamt drei Radarteleskope. In diesem Bereich dürfen Radare nicht angebracht und in Betrieb genommen werden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Gleiches gilt für militärische Gebiete, welche oft abseits größerer Siedlungen liegen und daher auch potenzielle Radarstandorte überschneiden könnten (Abbildung 21).

Weitere Ausschlussgebiete sind u. a. bereits vorhandene Strahlungsquellen bzw. Frequenzgenehmigungen, welche mit neu zu erbauenden Radaren interferieren könnten. Dazu gibt es jedoch keine Datengrundlage und ist jeweils im Einzelfall bei der Bundesnetzagentur zu erfragen und abzugleichen. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, einen für diese Methodik allgemein geltenden Datensatz zu erstellen.

Abbildung 22: Radarteleskope als Ausschlussgebiete in Deutschland (50 km Radius) (Quelle: intern)

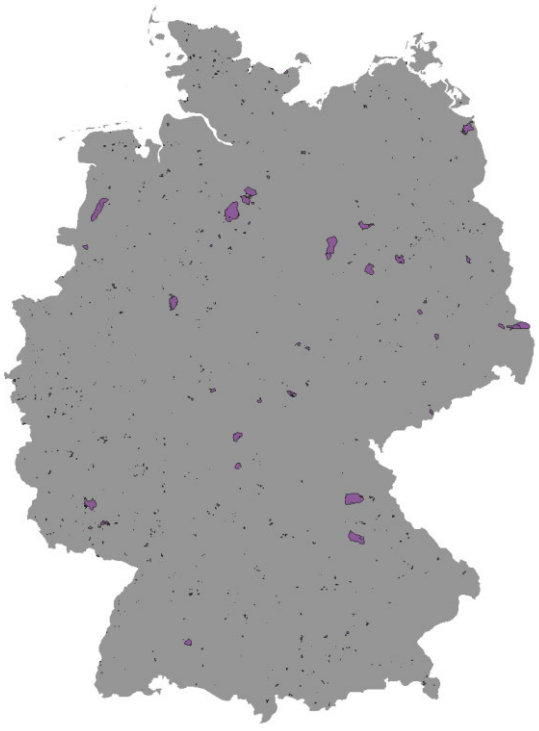

Abbildung 21: Militärische Gebiete in Deutschland (Quelle: OSM)

6 Projektgebiet Nauen

6.1 *Gebietsbeschreibung*

Das vorliegende Projektgebiet Nauen dient als Probegebiet für das entwickelte Multi-Kriteriums-Standort-Findungs-Konzept und liegt westlich von Berlin in Brandenburg. Dort soll mittels eines MSkyEye-Radars die BNK-Abdeckung verwirklicht werden. Aufgrund seiner Relevanz als potenzielles Projektgebiet der Dark Sky GmbH sowie der großen Anzahl von 100 WEA auf engem Raum eignet es sich gut für die Anwendung der entwickelten Methodik.

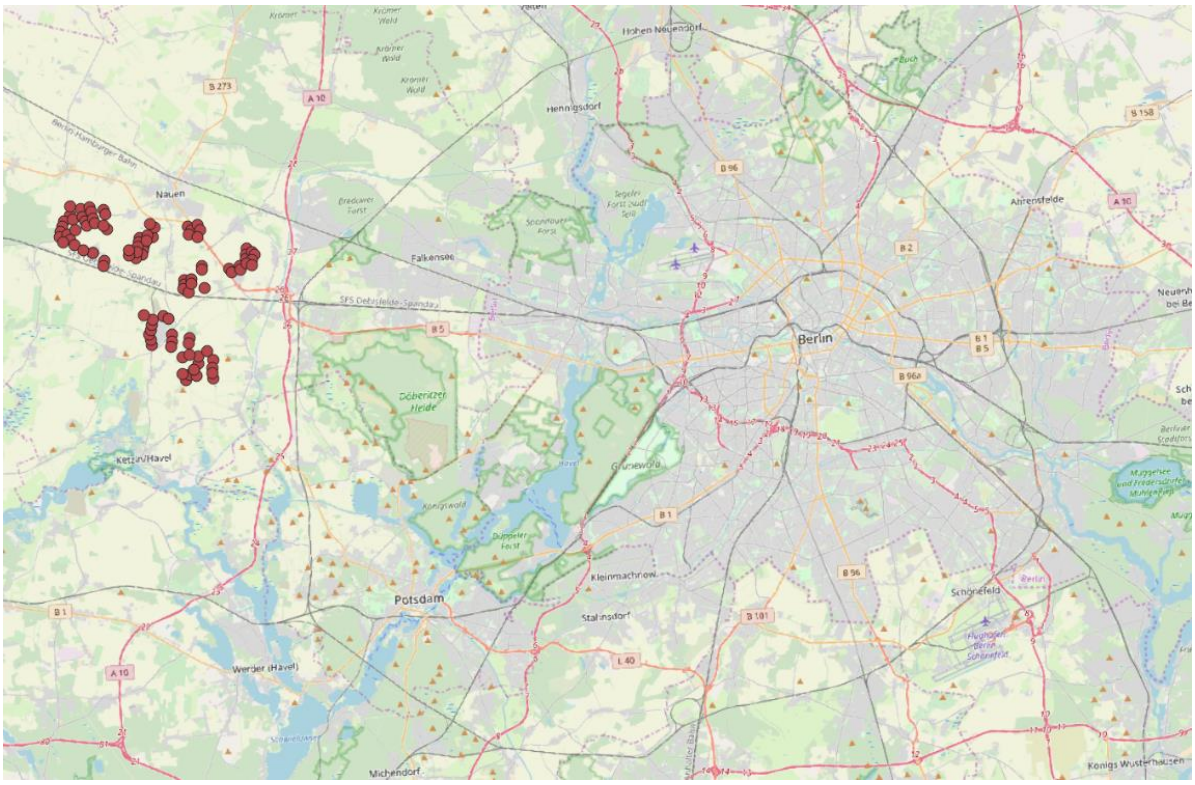

Abbildung 23: Projektgebiet Nauen (rot: WEA im Projektgebiet)

6.2 *Digitales Oberflächenmodell*

Das digitale Oberflächenmodell (Digital Surface Model, DSM) ist in Abbildung 24 dargestellt. Das Projektgebiet befindet sich in einer Höhe zwischen 19 m und 95 m. Es ist erkennbar, dass weite Teile des Gebiets tief liegen, während die WEA, zugunsten von mehr Wind, eher höher liegen (grüner Bereich).

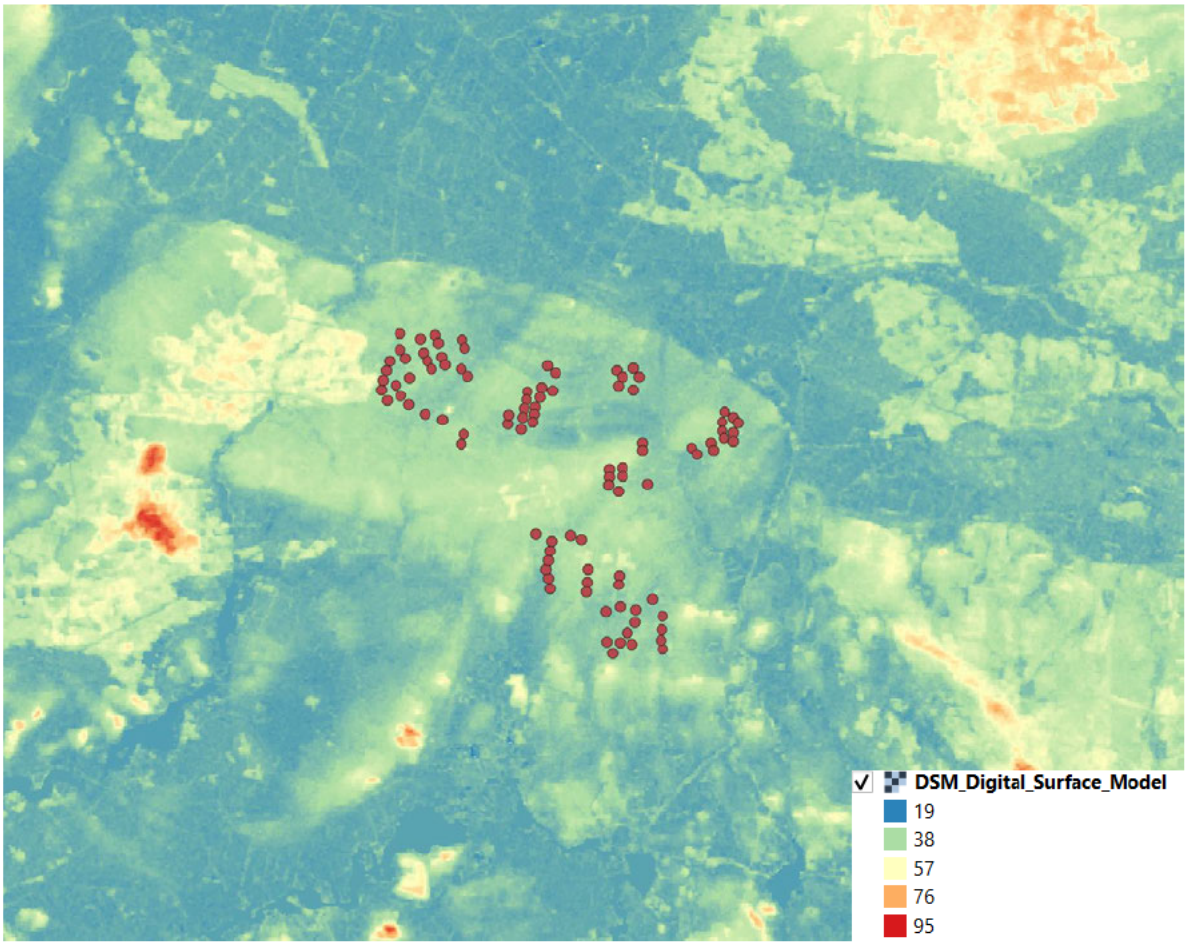

Abbildung 24: Projektgebiet Nauen im DSM (rot: WEA im Projektgebiet)

6.3 *Viewshed*

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, wurde von einer WEA-Höhe von 100 m und einer Mast- und Turmhöhe zur Radarbefestigung von 30 m ausgegangen. Der Viewshed gibt an, welche Bereiche von wie vielen Anlagen gesehen wird. Dies indiziert im Umkehrschluss auch, von wo aus wie viele der 100 Anlagen zu sehen sind, denn Sichtverbindung geht in beide Richtungen.

In Abbildung 25 sind in blau jene Bereiche zu sehen, welche von 100% der Anlagen gesehen werden. Es ist erkennbar, dass nur vereinzelte Gebiete nicht von allen Anlagen sichtbar sind, der Großteil der Fläche jedoch gut einsehbar ist. Orange gekennzeichnet sind die 100 WEA des Projektgebiets Nauen und in grün alle Masten und Türme, welche einen hundertprozentigen Viewshed-Wert haben.

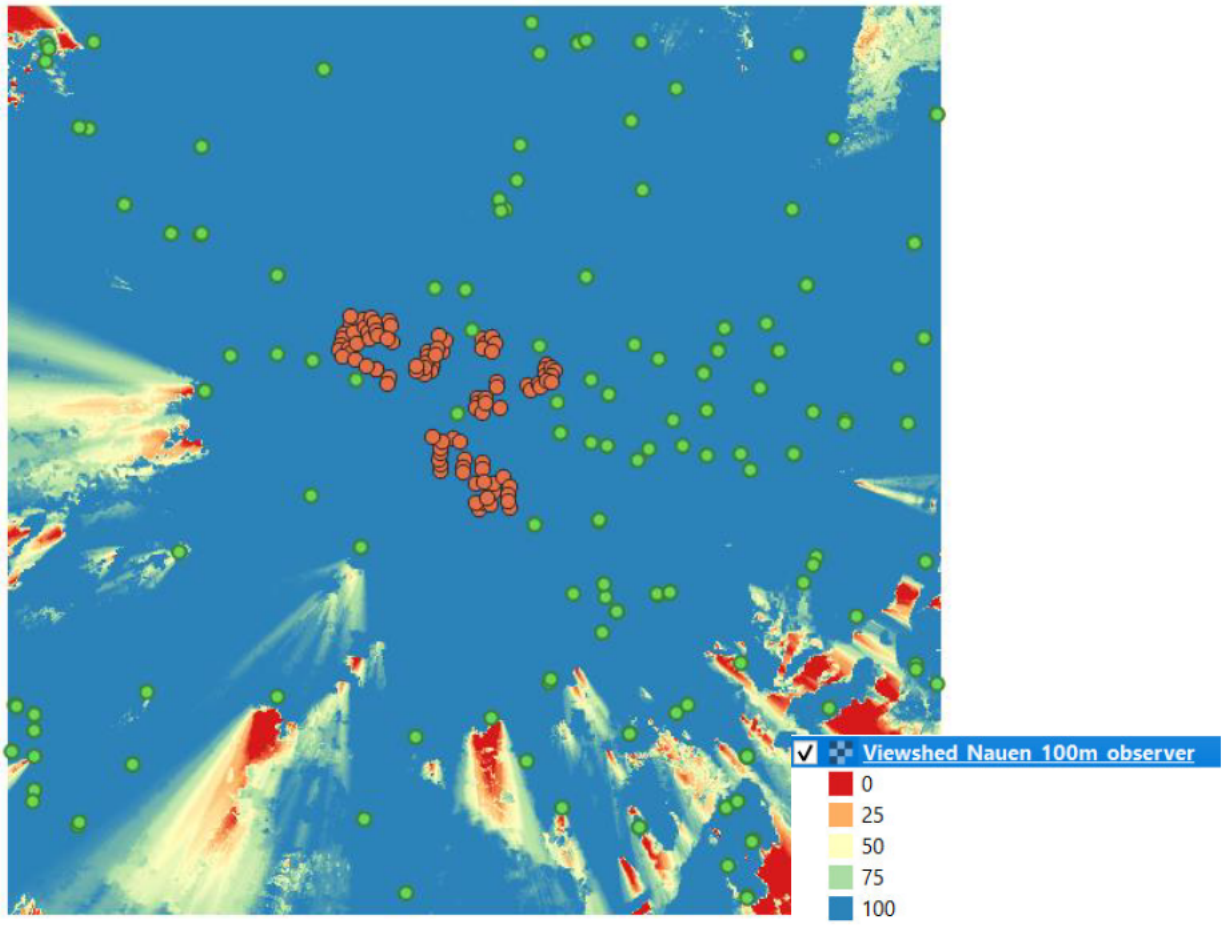

Abbildung 25: Viewshed des Projektgebiets Nauen; blau: 100% Sichtbarkeit, rot: 0% Sichtbarkeit. Die Farben geben an, wie viele der 100 WEA (orange) das jeweilige Pixel sehen. Grün gekennzeichnet sind potenzielle Radarstandorte.

6.4 *Relevante Masten und Türme*

Im nächsten Schritt wird mittels Buffer relevante Masten und Türme herausgefiltert. Einerseits bedingt der Wirkungsraum von 4 km um jede WEA einen Ausschluss potenzieller Radarstandorte, während der tatsächliche Wirkungsraum des Radars diese einschließt (vgl. Kapitel 5.2.4 auf Seite 34).

Um alle relevanten Masten und Türme zu ermitteln, wird vom äußeren, alle Masten und Türme einschließenden Wirkungsraum-Buffer des Radars der innere, ausschließende Wirkungsraum-Buffer der WEA geometrisch abgezogen. Zuvor wird um den inneren Wirkungsraum-Buffer der WEA ein 7 km-Buffer erzeugt, welcher den nötigen Mindestabstand des Radars vom zu erfassenden Bereich darstellt. Dies ist in Abbildung 26 aufgezeigt. Der verbleibende Buffer und alle relevanten Masten und Türme sind in Abbildung 27 zu sehen.

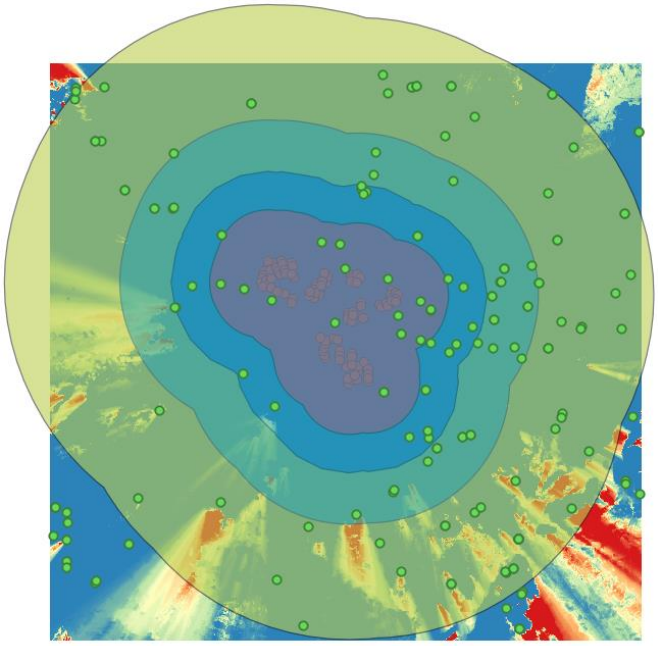

Abbildung 26: Buffer-Bereiche im Projektgebiet Nauen; von innen nach außen: rosé: Wirkungsraum von 4 km der WEA, türkis: 7 km-Mindestabstand des Radars vom zu erfassenden Bereich (keine Masten und Türme innerhalb dieser beiden Buffer), grün: Wirkungsraum des Radars (nur innerhalb dessen sind Masten und Türme relevant)

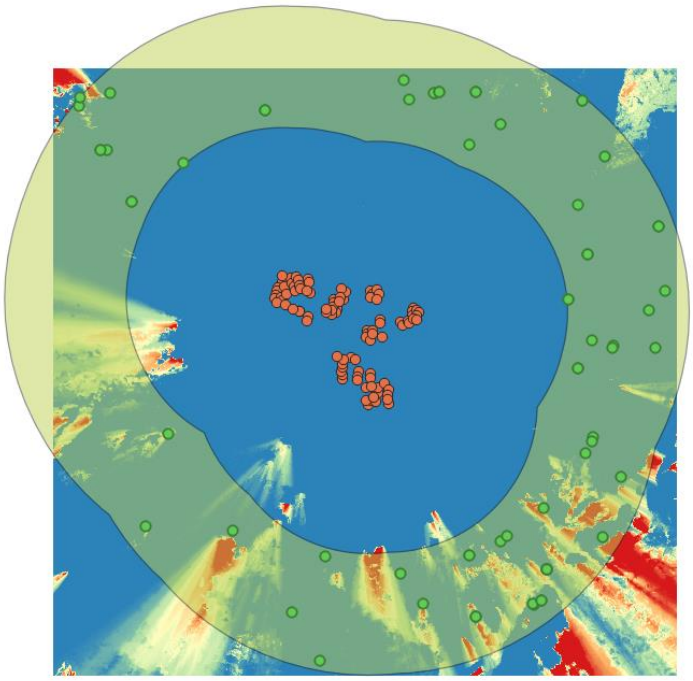

Abbildung 27: Buffer, innerhalb dessen relevante Masten und Türme im Projektgebiet Nauen stehen (grüne Punkte: relevante Masten und Türme)

6.5 *Abgleich mit Radar-Geometrie*

Nachdem relevante Radarstandorte in Form von Masten und Türmen im vorigen Kapitel herauskristallisiert wurden, können passende Standorte anhand der Radargeometrie gesucht werden. Der Wirkungsraum des Radars in Verbindung mit dem akkumulierten Wirkungsraum der WEA lässt keine Abdeckung durch nur ein Radar zu. Eine händisch gefundene Kombination, mit der eine Abdeckung des akkumulierten Wirkungsraums der WEA realisierbar ist, ist mittels drei Radaren zu bewerkstelligen und in Abbildung 28 zu sehen.

Dieser händische Prozess der Suche nach Radarstandorten mittels Abgleiches mit der Radar-Geometrie ist in Abbildung 29 beschrieben.

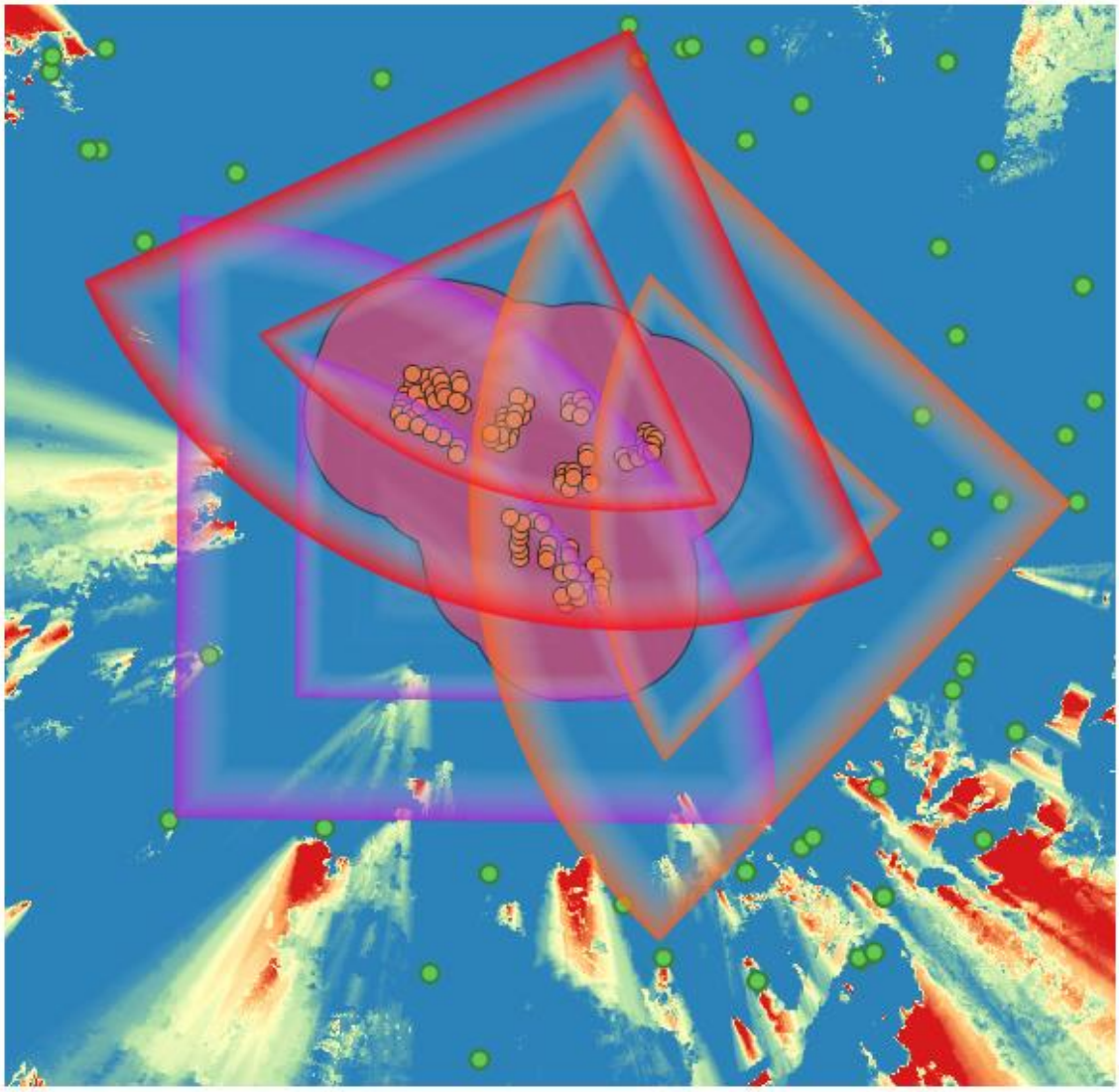

Abbildung 28: Eine händisch gefundene Abdeckung mittels Befestigung an vorhandenen Masten und Türmen im Projektgebiet Nauen, realisiert durch drei Radare

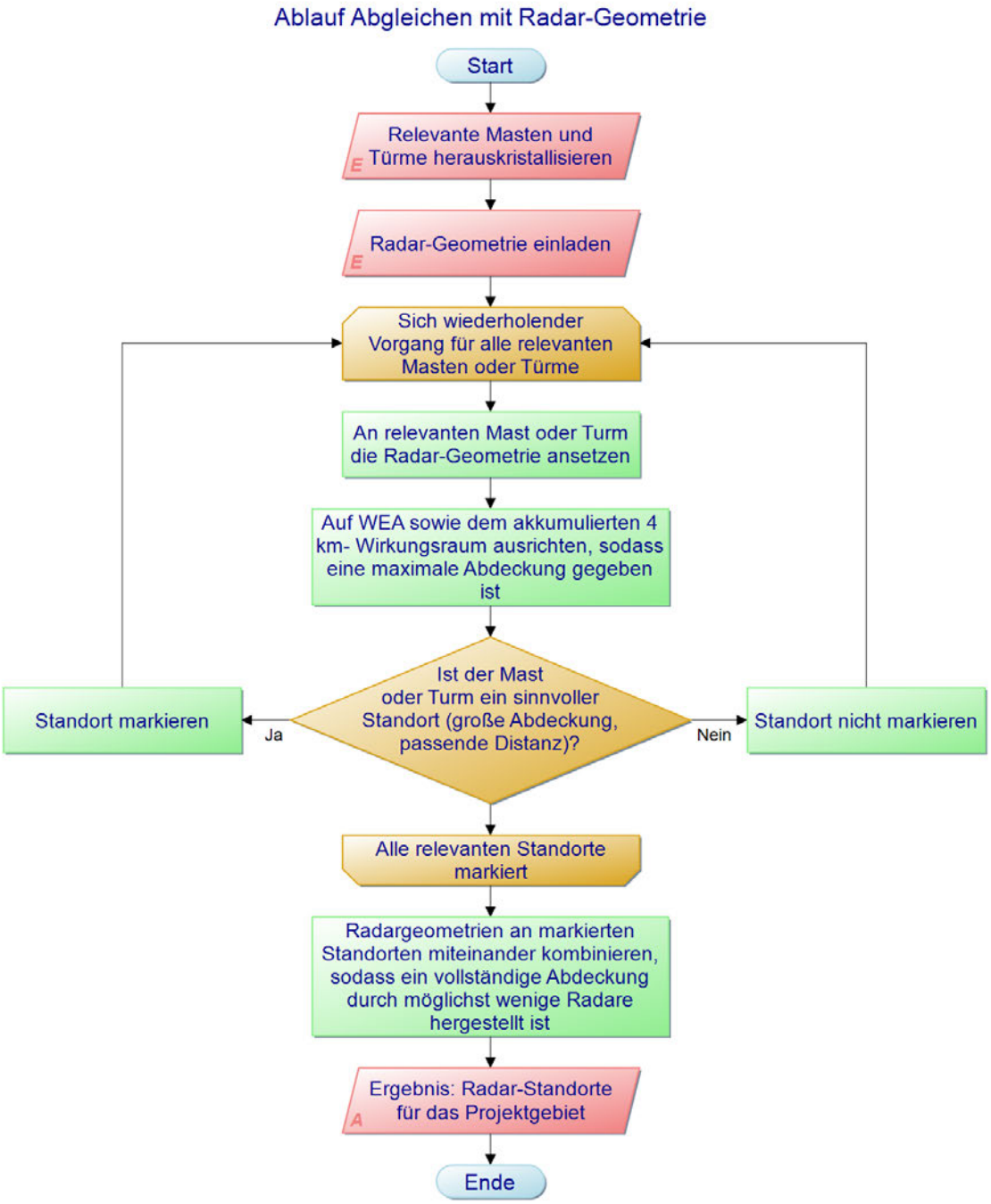

Abbildung 29: Ablauf des Abgleichs mit der Radar-Geometrie zur Standortfindung (erzeugt mittels PapDesigner (Quelle: (http://friedrich-folkmann.de/papdesigner/Hauptseite.html, 2020))

6.6 *Internetverfügbarkeit*

Wie bereits in Kapitel *5.2.2 Internet* beschrieben, reichen die Daten des Breitbandatlas‘ nicht für eine genaue Analyse der Internetverfügbarkeit aus, lassen jedoch eine grobe Einschätzung zu, da sie eine prozentuale Angabe zur Verfügbarkeit von Internetgeschwindigkeiten in Gebieten geben.

In Abbildung 30 ist sichtbar, dass der südöstliche, in Berlin gelegene Standort einen Anschluss von 50 Mbit/s sehr realistisch macht und bei 97,59% liegt. Der nördlich gelegene Standort in Kremmen bietet eine prozentuale Internetgeschwindigkeit von 63,1, während der südwestliche Radarstandort mit 83,7 % aufwartet.

Bei der Konkretisierung der Standorte ist mit den einzelnen Internetanbietern vor Ort Kontakt aufzunehmen, wie bspw. der Telekom als einem der größten Telekommunikationsanbietern in Deutschland. Dies hat den Hintergrund, dass für jeden Standort überprüft werden muss, welche Möglichkeiten des Internetanschlusses gegeben sind.

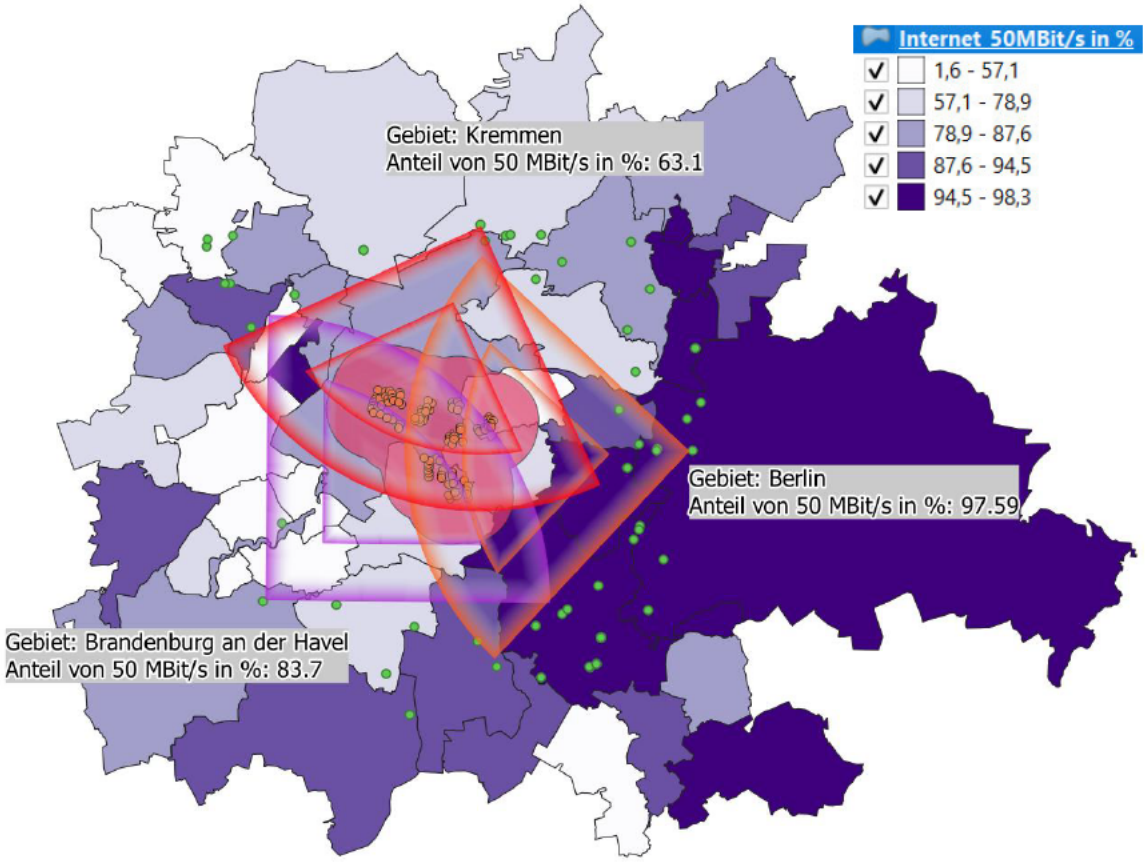

Abbildung 30: Internetverfügbarkeit von 50 MBit/s im Projektgebiet Nauen

6.7 *Fazit zur Befestigung an vorhandenen Masten und Türmen*

In den vorigen Unterkapiteln wurde die Herangehensweise der Standortsuche zur Befestigung eines Radars im Projektgebiet Nauen anhand vorhandener Masten und Türme vorgestellt. Es kann als Ergebnis festgehalten werden, dass Standorte gefunden wurden und das Projekt mittels drei Radaren mit einer fast hundertprozentigen Abdeckung umgesetzt werden kann. Der akkumulierte Wirkungsraum der WEA ist an seinen äußeren Rändern vollständig durch die Radare überwacht, mittig verbleibt eine Lücke. Ein Einflug eines Luftfahrzeugs in diese Lücke senkrecht von oben oder unten wäre das einzige Szenario, in welchem die Radarüberwachung versagen würde.

Eine wirtschaftliche Betrachtung der Umsetzung mit drei Radaren ist positiv: Der Break-Even-Point für jedes einzelne Radarsystem MSkyEye / Dark Sky Phase Array liegt bei 30 abzudeckenden WEA. In der Summe sind also 3 x 30 abzudeckende WEA nötig, um rentabel zu sein. Im Projektgebiet stehen 100 abgedeckte WEA, was in der Differenz ein Plus von 10 abgedeckten WEA ergibt.

6.8 *Alternativ: Errichtung von Masten*

Es wird überprüft, ob die Abdeckung des Projektgebiets mit zwei anstelle von drei Radaren möglich ist, was per Neuerrichtung von Masten realisierbar sein könnte. Die Errichtung eines Masts ist eine kosten- und aufwandsintensive Arbeit, weshalb die endgültige Entscheidung darüber neben der technischen Durchführbarkeit auch von einer wirtschaftlichen Betrachtung abhängt. Die im Folgenden aufgeführte Standortbestimmung für einen Mast ist also lediglich ein Baustein im Entscheidungsprozess, nimmt jedoch zumindest die Frage ab, ob überhaupt eine Abdeckung im Projektgebiet mit diesem Radartyp möglich ist.

Die zusätzlichen Standortfaktoren für die Errichtung eines Masts sind im Kapitel 5.2.1.1 auf Seite 30 erklärt.

Neigung < 10°

Das Projektgebiet ist an vielen Stellen flach, wodurch hauptsächlich geringe Neigungen vorkommen, wie in Abbildung 31 ist zu sehen ist. Die vereinzelten roten Stellen zeigen Bereiche, deren Neigung größer als 10° und somit ungeeignet für die Errichtung eines Masts ist. Größtenteils stellt jedoch die Neigung in diesem Projektgebiet kein Hindernis dar.

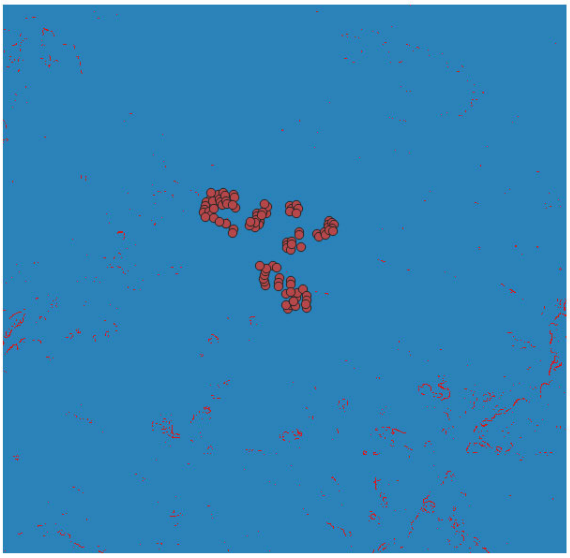

Abbildung 31: Neigung im Projektgebiet Nauen (blau <=10°, rot >10°; rote Punkte: WEA)

Wiesen/Äcker

Abbildung 32 lässt erkennen, dass im Projektgebiet Nauen reichlich Wiesen und Äcker vorhanden sind, auf denen gebaut werden kann. Die Erklärung dieses Faktors ist in Kapitel 5.2.1.1.1 auf Seite 30 zu finden.

Abbildung 32: Äcker und Wiesen im Projektgebiet Nauen

Militärische Sperrgebiete oder Radarteleskope

In diesem Gebiet sind keine militärischen Gebiete oder Radarteleskope auf Äckern und Wiesen vorhanden. Deshalb müssen diese nicht weiter beachtet werden.

Abstand zu Straßen < 200 m

Das Projektgebiet ist durchzogen von Straßen. Die Nähe zu Berlin im Osten mit einem großen Verkehrsnetz ist gut sichtbar. Nach Westen gehend ist eine Ausdünnung der Straßen-Infrastruktur erkennbar. Abbildung 33 stellt das Straßennetz mit allen relevanten Straßen dar, während Abbildung 34 diese Straßen mit einem Puffer von 200 m zeigt. In Kapitel 5.2.1.1.2 auf Seite 30 ist der Faktor der Nähe zu Straßen erläutert.

Abbildung 33: Relevante Straßen im Projektgebiet Nauen

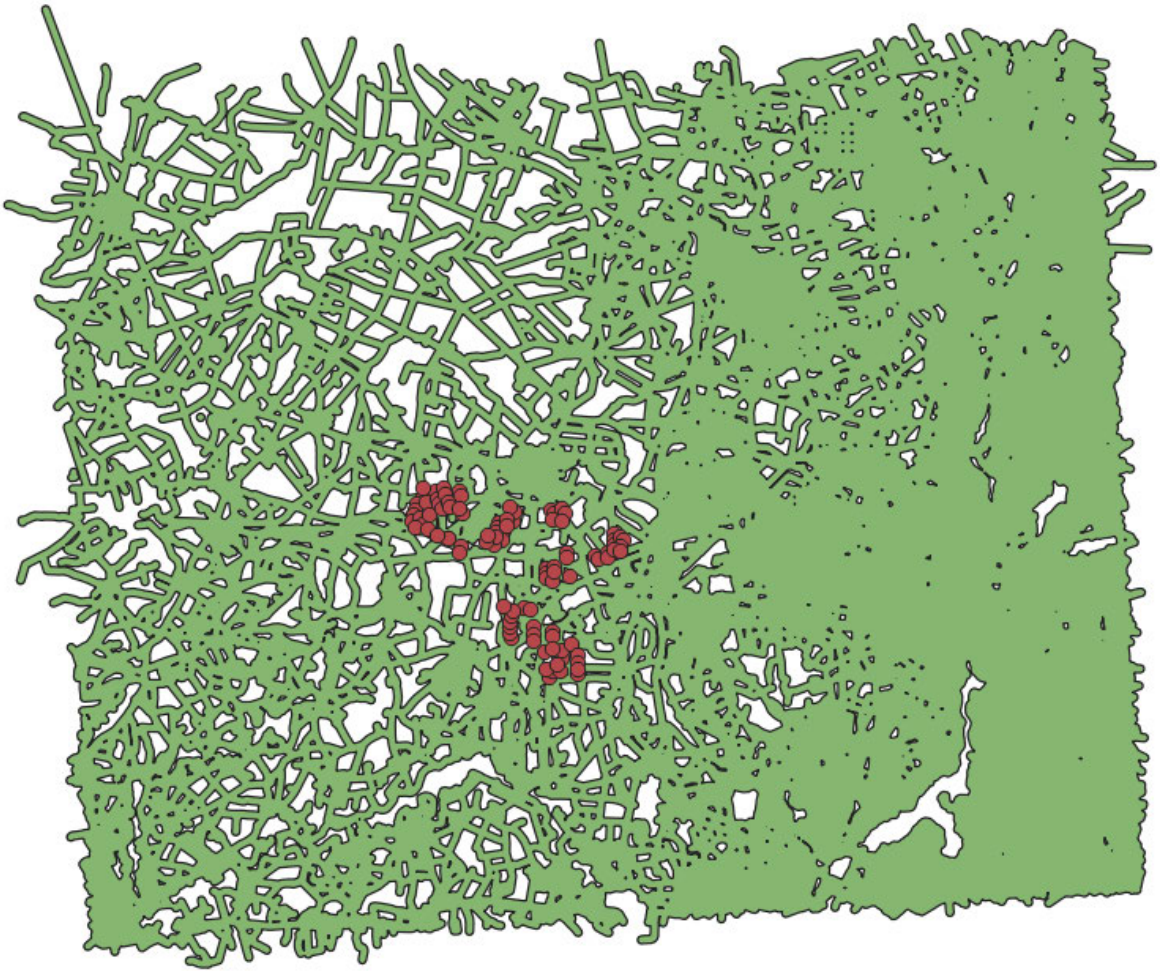

Abbildung 34: Relevante Straßen im Projektgebiet Nauen gepuffert mit 200 m

6.8.1 Verschneidung von Wiesen/Äcker mit Straßen-Buffer

Von den im Projektgebiet liegenden Äckern und Wiesen werden per Verschneidung mit den gepufferten Straßen die für eine Neuerrichtung eines Masts relevanten Gebiete herausgefunden, da diese sowohl das Kriterium der Nähe der Nähe sowie das der Lage auf einem Acker oder einer Wieso erfüllen. Das Ergebnis ist in Abbildung 35 zu sehen. Es ist darauf hinzuweisen, dass auf den Straßen selbst logischerweise nicht gebaut werden kann.

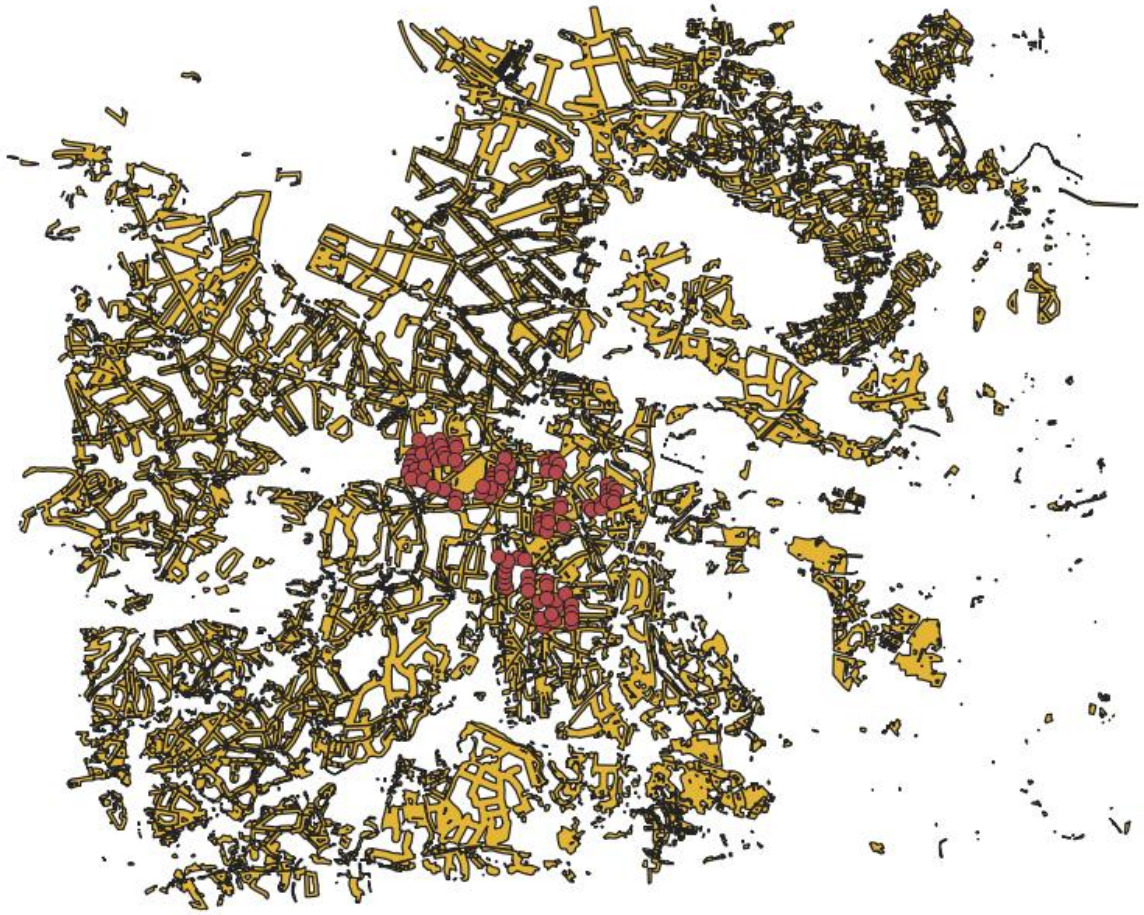

Abbildung 35: Verschneidung von Wiesen/Äcker mit Straßen-Buffer von 200 m, Ergebnis sind potenzielle Baugebiete für Radar-Masten im Projektgebiet Nauen, rot: WEA im Projektgebiet

6.8.2 Zuordnung von Viewshed-Werten auf die Verschneidung von Wiesen/Äcker mit 200 m-Straßen-Buffer

Durch die Verschneidung, die im vorigen Kapitel 6.8.1 beschrieben wurde, ist das Gebiet auf weniger Flächen eingegrenzt und kann im letzten Schritt einer Zuordnung der Viewshed-Werte unterzogen werden. Im Anschluss daran werden manuell Standorte gesucht. Diese Suche geschieht durch händisches Überlagern der Radargeometrie mit den relevanten Gebieten.

In Abbildung 36 sind alle relevanten Flächen für den Bau eines Radar-Masts aufgeführt. Diese beinhalten nur noch die Bereiche, die eine hundertprozentige Viewshed-Abdeckung innehaben. Wie es zu diesen Flächen kam, wird im vorigen Kapitel beschrieben.

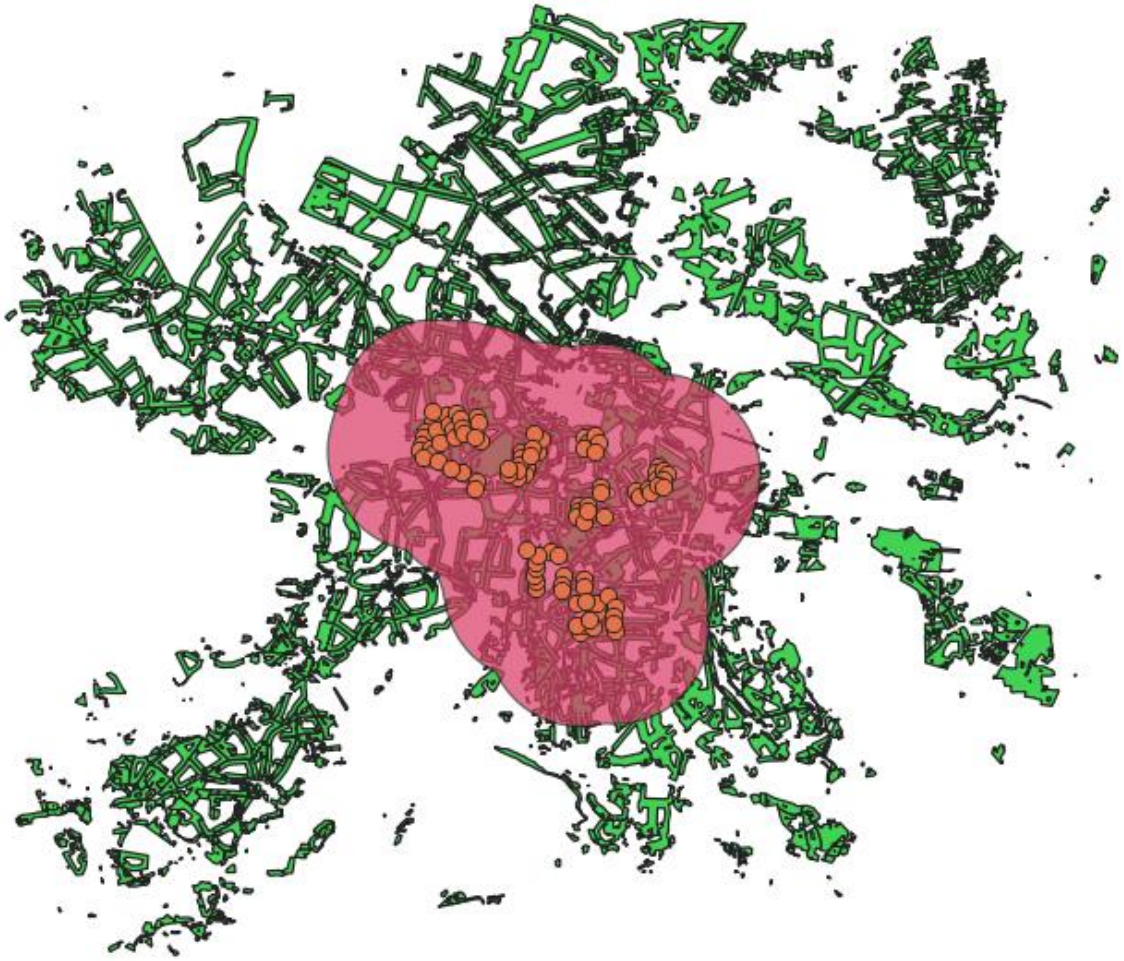

Abbildung 36: Alle Flächen mit einer hundertprozentigen Viewshed-Abdeckung im Projektgebiet Nauen und somit potenzielle Standorte für die Neuerrichtung von Radar-Masten; orange: WEA im Projektgebiet Nauen, rosa Buffer: akkumulierter Wirkungsraum der WEA

6.8.3 Abgleich mit Radar-Geometrie

Die händische Suche nach Radarstandorten verläuft ähnlich wie die in Kapitel 6.5. Der Unterschied sind die zahlenmäßig höheren Kombinationsmöglichkeiten, die aufgrund der größeren potenziellen Freiflächen zustande kommen. Entsprechend liegt der erste Schritt bei der Standortfindung nicht auf den Befestigungsorten selbst, sondern in der Findung von größtmöglichen Überlagerungen vom Radar-Wirkungsraum mit dem akkumulierten WEA-Wirkungsraum. Sind diese gefunden, können in der Nähe befindliche Freiflächen oder Masten bzw. Türme als Standort herangezogen werden. Der Ablauf ist in Abbildung 37 beschrieben.

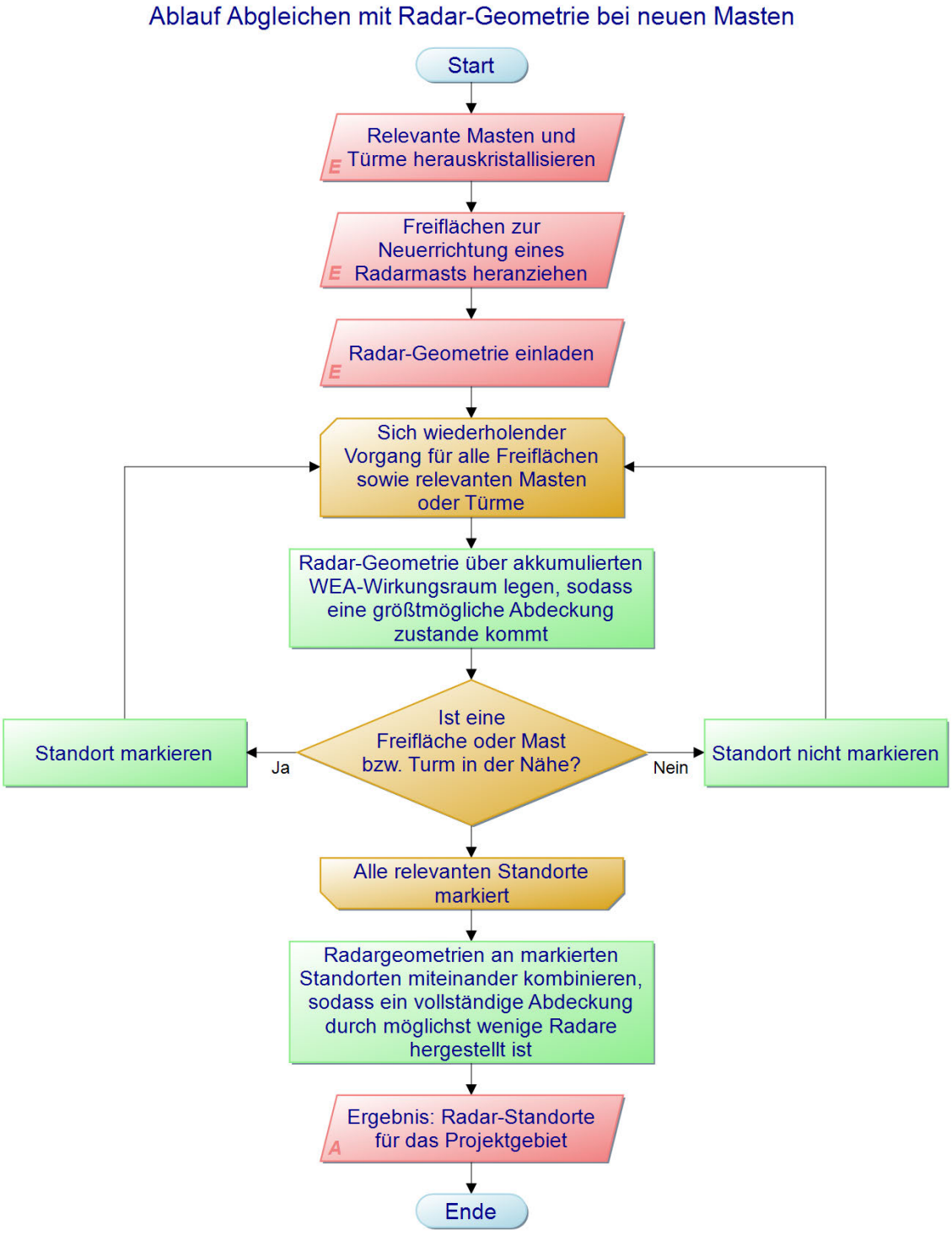

Abbildung 37: Ablauf des Abgleichs mit der Radar-Geometrie zur Standortfindung mit zusätzlicher Möglichkeit der Errichtung eines neuen Masts (erzeugt mittels PapDesigner (Quelle: (http://friedrich-folkmann.de/papdesigner/Hauptseite.html, 2020))

Eine passende gefundene Möglichkeit ist die Kombination aus zwei neu errichteten Masten und einem bereits vorhandenen Masten mit drei Radaren. Vorteilhaft bei dieser Variante ist eine vollständige Abdeckung des akkumulierten Wirkungsraums der WEA, ebenfalls im Innern, was bei der Verwendung von bereits bestehenden Masten bzw. Türmen zur Befestigung nicht der Fall war (beschrieben in Kapitel 6.7 auf Seite 44). Dem gegenüber steht jedoch die höhere wirtschaftliche Belastung durch den Masten-Neubau. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Projekt bereits durch einen neu zu errichtenden Masten und weiterhin drei verwendete Radare nicht rentabel ist. In Abbildung 38 ist diese Kombination dargestellt. Eine Möglichkeit der Abdeckung mit nur zwei Radaren wurde nicht gefunden.

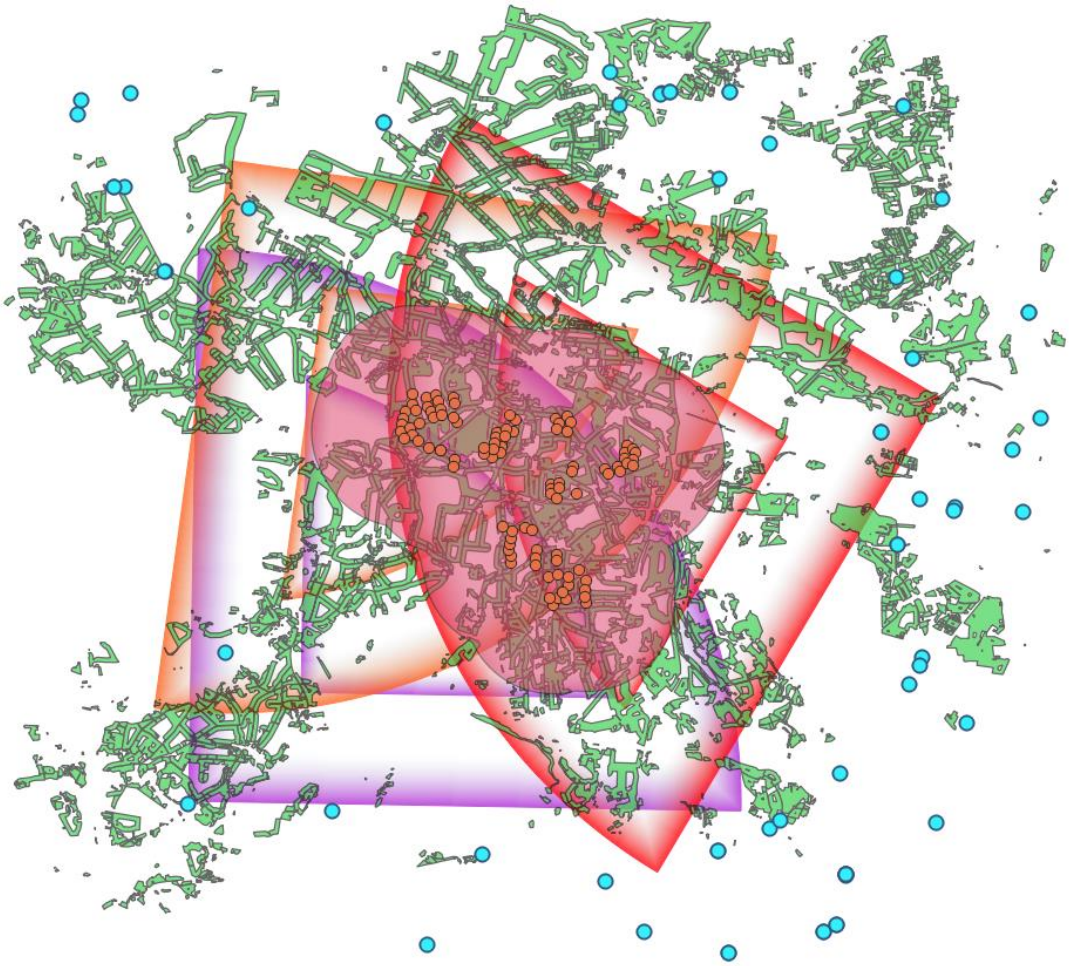

Abbildung 38: Eine Variante der Kombination aus zwei neu errichteten Masten im Nordwesten und Osten sowie einem bestehenden Mast bzw. Turm im Südwesten im Projektgebiet Nauen; türkis: bestehende Masten bzw. Türme; grün: mögliche Baustandorte für einen neu zu errichtenden Mast

6.9 *Fazit zur Errichtung von Masten*

Im bearbeiteten Projektgebiet Nauen wurde eine Lösung in Form einer Kombination aus der Nutzung eines bestehenden Masten bzw. Turms und der Neuerrichtung von zwei Masten gefunden. Dies bringt eine hundertprozentige und lückenlose Abdeckung mit sich, allerdings auf Kosten der Wirtschaftlichkeit und höchstwahrscheinlich Rentabilität des Projekts.

Es wäre in diesem Fall abzuklären, ob dieses Szenario des Masten-Neubaus Sinn ergibt oder ob die im vorigen Kapitel 6.7 auf Seite 44 beschriebene Konstellation der Nutzung von drei vorhandenen Masten bzw. Türmen ausreicht.

In anderen Projektgebieten könnte der Neubau von Masten jedoch größere Relevanz haben, sei es aufgrund der Abwesenheit von vorhandenen oder aufgrund von herausfordernder Topografie. Aus diesem Grund sollte die Möglichkeit der Neuerrichtung von Radar-Masten als Alternative zur Nutzung von vorhandenen Masten und Türmen im Hinterkopf behalten werden.

7 Fazit und Ausblick

Zu Beginn der Arbeit in Kapitel 1 wurde das Ziel gesteckt, ein Konzept für die Radar-Standortfindung zu entwickeln und zu testen, was in den vorigen Kapiteln erfolgreich durchgeführt wurde. In den anschließenden Kapiteln 2 und 3 wurde eine theoretische Auseinandersetzung mit dem Thema beschrieben. Im Anschluss daran erläuterten die Kapitel 4 und 5 eine Methodik sowie Standort-Faktoren und Quellen, welche im nächsten Schritt auf das Projektgebiet Nauen angewendet wurden, was in Kapitel 6 dargestellt ist.

Das Ergebnis aus Kapitel 6 ist, dass für das vorliegende Projektgebiet Nauen eine Radarlösung mit drei Radaren mittels Befestigung an vorhandenen Masten und Türmen realistisch ist. Anhand eines erzeugten Viewsheds auf Basis eines Digitalen Oberflächenmodells wurde festgestellt, welche Bereiche innerhalb des Projektgebiets vollständig sichtbar sind. Daraufhin konnte mithilfe von Abstandsbuffern Maste und Türme herauskristallisiert werden, welche sich für eine Befestigung eignen. Der abzudeckende akkumulierte Wirkungsraum der WEA wurde im Anschluss daran mit der Radar-Geometrie des verwendeten Radars MSkyEye / Dark Sky Phase Array überlagert, wodurch sich relevante Masten und Türme feststellen ließen, die auf diese geometrischen Gegebenheiten passten. Im letzten Schritt wurde anhand von Daten des BMVI zur Internetverfügbarkeit eine grundsätzliche Überprüfung vorgenommen, ob die geplanten Radar-Standorte mit einer nötigen Geschwindigkeit von 50 Mbit/s an das Internet angeschlossen werden können. Somit konnte eine fast vollständige Abdeckung sowohl der WEA als auch des akkumulierten Wirkungsraums von 4 km um die WEA herausgearbeitet werden, welche lediglich in der Mitte des akkumulierten WEA-Wirkungsraums eine Lücke offenlässt. Ausführlich beschrieben ist dies ab Seite 37.

Eine weitere Lösung ist eine Kombination aus der Befestigung an vorhandenen Masten bzw. Türmen und der Neuerrichtung von diesen. Dies hat beim vorliegenden Projektgebiet den Vorteil, dass eine vollständige Abdeckung des akkumulierten WEA-Wirkungsraums möglich ist und die im vorigen Absatz angesprochene Lücke nicht auftritt. Nachteilig sind jedoch die hohen wirtschaftlichen Belastungen, die ein solcher Neubau eines oder mehrerer Masten mit sich bringt und die Rentabilität eines Projekts stark einschränkt. Diese Variante ist ab Seite 44 beschrieben.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik zur Radar-Standortfindung für die bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen ebenfalls auf andere Projekte anwendbar ist. Die herangezogenen

Faktoren stellen eine Grundlage für die Standortfindung dar und können je nach vorliegendem Projektgebiet erweitert und angepasst werden. In diesem bearbeitenden Gebiet hatte sich herauskristallisiert, dass die Nutzung absoluter Faktoren aufgrund topografischer Gegebenheiten sowie einer kleinen Anzahl von vorhandenen Masten und Türmen ausreicht, um ein repräsentatives und realistisches Ergebnis zu erzielen. Abweichenden Konditionen in anderen Projektgebieten könnten den Einsatz von relativen Faktoren nötig machen. Dies wäre der Fall bei einer wesentlich höheren oder geringeren Dichte an vorhandenen Masten bzw. Türmen und reichlich möglichem Bauland, was eine große Anzahl an potenziellen Standorten zur Folge hat. Relative Faktoren könnten dann bspw. die Nähe zu Straßen, Baukosten und erreichbare Internetgeschwindigkeiten sein.

Die Radargeometrie sowie die Topografie sind bestimmende Kräfte in diesem Prozess der Standortfindung. Jede Topografie stellt andere Herausforderungen an die Projektplanung, um eine kreative BNK-Lösung zu erarbeiten. Weiterhin sind vorhandene Masten und Türme im Projektgebiet von großem Vorteil, da diese die Neuerrichtung eines Masts zur Radarbefestigung umgehen. Die Radargeometrie im Zusammenspiel mit dem akkumulierten Wirkungsraum der WEA haben ebenfalls einen großen Einfluss auf mögliche Radarlösungen, genauso wie das nötige vorhandene kabelgebundene Internet von mindestens 50 Mbit/s.

Zur Verbesserung der Herangehensweise bzw. der Methodik könnte der Ansatz des Viewsheds weiter verfeinert werden. So könnte überarbeitet werden, von welchen tatsächlichen Befestigungshöhen des Radars auszugehen ist und von welchen tatsächlichen Höhen die WEA sichtbar sein müssen. Aktuell fordert die AVV eine Detektion von Luftfahrzeugen vom Boden, was in der Praxis als schwer oder nicht durchführbar anzusehen ist. In Abbildung 39 ist zu sehen, dass bei einer Detektion vom Boden maximal 64 der 100 WEA bei einer Radarhöhe von 30 m gesehen werden können, was 64% entspricht. Selbst in dem dargestellten flachen norddeutschen Projektgebiet Nauen ist die Detektion bis zum Boden augenscheinlich nicht umsetzbar. Es ist also in Bereichen mit größeren Höhenunterschieden mit noch geringerer Umsetzungswahrscheinlichkeit zu rechnen.

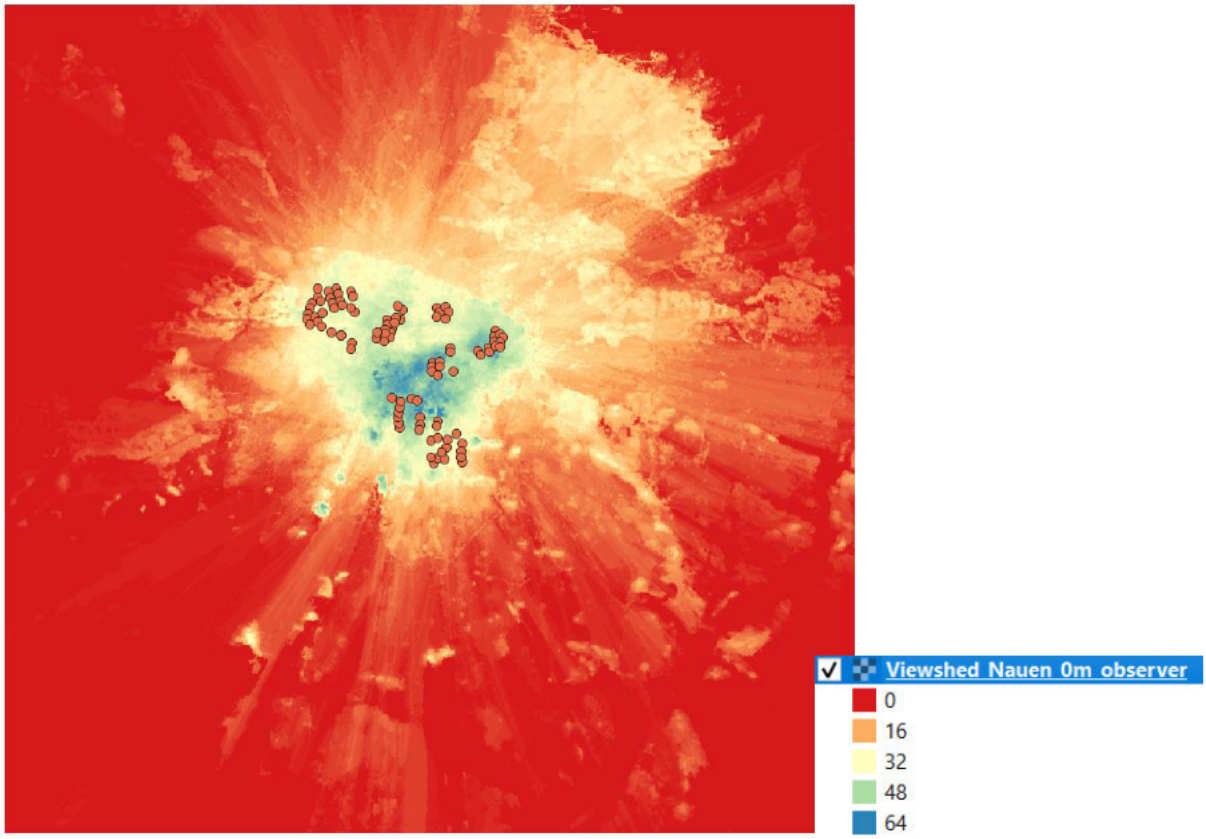

Abbildung 39: Viewshed mit einer Detektionshöhe ab dem Boden; orange: WEA im Projektgebiet

Für zukünftige Projekte ist die Entwicklung eines Plugins für QGIS in Erwägung zu ziehen, die das händische Suchen vereinfacht bzw. übernimmt. Dieses Plugin würde eine vorgegebene Geometrie 1 als Eingabe nehmen und diese mit einer anderen, vorher definierten Geometrie 2 (Punkte, Linien, Flächen) abgleichen, sodass eine Überschneidung hergestellt wird. Dabei können als Bedingungen/Constraint eindeutige Punkte/Linien/Flächen festgelegt werden, die von einem/r bestimmten Punkt/Linie/Fläche der Geometrie bedeckt werden müssen.

Praktisch anhand der Radarstandortsuche dargestellt wäre die vorgegebene Geometrie 1 der Wirkungsraum des Radars, während die andere Geometrie 2 die WEA bzw. der akkumulierte Wirkungsraum um die WEA wäre. Die Bedingungen/Constraints wiederum wären die potenziellen Radarstandorte in Form von Masten oder Türmen oder auch Freiflächen, auf denen ein neuer Mast errichtet werden kann.

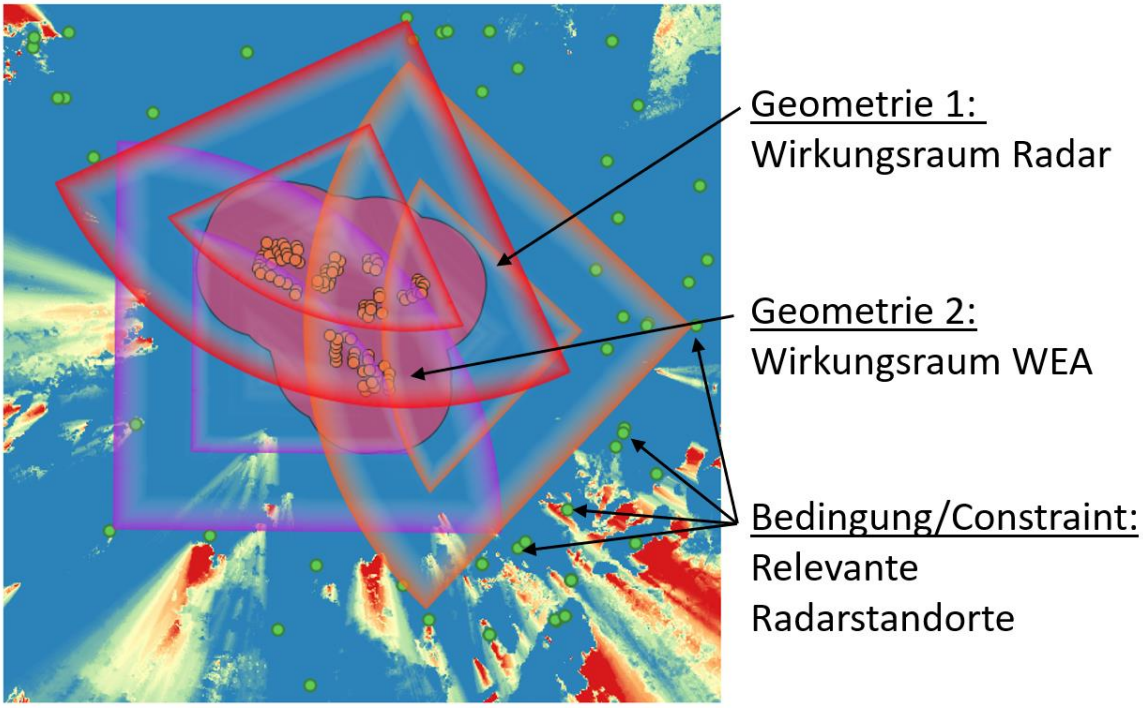

Abbildung 40: Plugin-Idee für QGIS zur vereinfachten Findung von sich überschneidenden Geometrien, hier für die Radar-Standortfindung

Es ist allgemein zu sagen, dass BNK noch am Anfang steht und es keine am Markt erprobten und etablierten Technologien gibt. Alles Angewandte ist im Groben als ein Erstversuch zu sehen und es kann auf keine „Best-Practice“ zurückgegriffen werden.

Die aktuelle politische Lage drängt die Firmen in die Verwendung von Transponderlösungen, anstatt weiterhin auf Aktiv- oder Passivradare zu setzen. Ob diese Technologie erfolgsversprechend ist, lässt sich nach ersten Erfahrungen beurteilen. Über den Zeitraum der Erstellung dieser Arbeit (Frühjahr bis Sommer 2020) ist ein großer politischer Wandel in der BNK-Branche eingetreten, was viele Unklarheiten und Planungsunsicherheit mit sich brachte. Es ist aus diesem Grund aus aktueller Sicht davon auszugehen, dass zukünftig über die bestehenden Projekte hinaus keine Radartechnologie für BNK zum Einsatz kommen wird. Alternativ kann deshalb auf die BNK-Transponderlösung der Dark Sky GmbH zurückgegriffen werden.

Für aktuelle Projekte und bereits bestehende Verträge mit Radartechnologie hat diese erstellte Methodik jedoch weiterhin ihren Wert und kann ebenfalls als Grundlage für die Erstellung von Transponder-Projekten in abgewandelter Form eingesetzt werden. Dort werden andere Faktoren zum Einsatz kommen, die grundsätzlichen Ansätze der Standortfindung bleiben jedoch gleich.

Literaturverzeichnis

AVV. 2020. verwaltungsvorschriften-im-internet.de. *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen.* [Online] 2020. [Zitat vom: 25. Juli 2020.] http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_24042020_LF15.htm.

BMVI. 2020. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. [Online] 2020. https://www.bmvi.de/DE/Home/home.html.

Church, R.L. und Murray, A.T. 2009. *Business Site Selection, Location Analysis, and GIS.* 2009.

Dark Sky GmbH. 2020. [Online] 2020. [Zitat vom: 25. 07 2020.] https://www.dark-sky.com/.

Eastman, J.R. 1999. *Multi-criteria evaluation and GIS.* 1999.

Eastman, J.R. und Jiang, H. 2000. *Application of fuzzy measures in multi-criteria.* 2000.

http://decerns.com/. 2020. DECERNS. [Online] 2020. [Zitat vom: 25. 07 2020.] http://decerns.com/.

http://friedrich-folkmann.de/papdesigner/Hauptseite.html. 2020. PapDesigner. [Online] 2020. [Zitat vom: 25. 07 2020.] http://friedrich-folkmann.de/papdesigner/Hauptseite.html.

http://overpass-turbo.eu/. 2020. Overpass-Turbo. [Online] 2020. [Zitat vom: 25. 07 2020.] http://overpass-turbo.eu/.

http://tagfinder.herokuapp.com/. 2020. Tagfinder. [Online] 2020. [Zitat vom: 25. 07 2020.] http://tagfinder.herokuapp.com/.

https://dwtkns.com/srtm30m/. 2020. SRTM. [Online] 2020. [Zitat vom: 25. 07 2020.] https://dwtkns.com/srtm30m/.

https://qgis.org/de/site/. 2020. QGIS. [Online] 2020. [Zitat vom: 25. 07 2020.] https://qgis.org/de/site/.

https://www.openstreetmap.org/. 2020. Open Street Map (OSM). [Online] 2020. [Zitat vom: 25. 07 2020.] https://www.openstreetmap.org/.

Ishizaka, Alessio und Nemery, Philippe. 2013. *Multi-Criteria Decision Analysis.* 2013.

Koczkodaj, W. W. 1993. *A New Definition of Consistency of Pairwise Comparisons.* 1993.

Kou, Gang, et al. 2016. *pairwise comparison matrix in multiple criteria.* 2016.

Linkov, Igor und Moberg, Emily. 2012. *Multi-Criteria Decision Analysis, Environmental Applications and Case Studies.* 2012.

Saaty, Thomas L. 2008. *Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making.* 2008.

San Cristóbal Mateo, José Ramón. 2012. *Multi-Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry.* 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkungsraum um eine WEA (Quelle: Dark Sky GmbH) 2

Abbildung 2: Abdeckungsbereich Radar MSkyEye (Quelle: Dark Sky GmbH) 2

Abbildung 3: Beispiel eines Viewsheds aus (Church, et al., 2009) 11

Abbildung 4: Beispiel für absolute und relative Eignung (Church, et al., 2009) 13

Abbildung 5: Utility value relativ zum Price of Land (Church, et al., 2009) 14

Abbildung 6: Beispiel für Erarbeitung einer relativen Eignung (nach (Church, et al., 2009)) .16

Abbildung 7: Tabelle aus (Saaty, 2008) zur Fundamentalen Skala mit absoluten Werten 19

Abbildung 8: Tabelle von (Church, et al., 2009) mit dem Ergebnis der Pairwise Comparison 20

Abbildung 9: Ergebnis der Gewichtungen nach (Church, et al., 2009) 21

Abbildung 10: Methodik der Standortfindung als Schema, linksseitige Kommentare dienen dem Verständnis (erzeugt mittels PapDesigner (Quelle: (http://friedrich-folkmann.de/papdesigner/Hauptseite.html, 2020)) 23

Abbildung 11 TagFinder, hier am Beispiel mit dem Stichwort „military“ (Quelle: (http://tagfinder.herokuapp.com/, 2020)) 26

Abbildung 12: Oberfläche von Overpass (Quelle: (http://overpass-turbo.eu/, 2020)) 27

Abbildung 13: Download der SRTM-Daten über eine Drittseite (Quelle: (https://dwtkns.com/srtm30m/, 2020)) 27

Abbildung 14: Layer mit Duplikaten und entfernte Duplikate.....28

Abbildung 15: Gesamter Layer der Masten und Türme in Deutschland (Quelle: OSM).....29

Abbildung 18: Internetverfügbarkeit: prozentuale Angabe der angeschlossenen Haushalte >= 1 MBit/s (BMVI, 2020).....32

Abbildung 19: Internetverfügbarkeit: prozentuale Angabe der angeschlossenen Haushalte >=50 MBit/s (BMVI, 2020).....32

Abbildung 18: Abdeckungsbereich Radar MSkyEye (Quelle: Dark Sky GmbH) 34

Abbildung 19: Wirkungsraum um eine WEA (Quelle: Dark Sky GmbH) 35

Abbildung 20: Akkumulierter Wirkungsraum aller WEA eines Projektgebiets (Quelle: Dark Sky GmbH).....35

Abbildung 24: Militärische Gebiete in Deutschland (Quelle: OSM).....36

Abbildung 23: Radarteleskope als Ausschlussgebiete in Deutschland (50 km Radius) (Quelle: intern).....36

Abbildung 23: Projektgebiet Nauen (rot: WEA im Projektgebiet).....37

Abbildung 24: Projektgebiet Nauen im DSM (rot: WEA im Projektgebiet).....38

Abbildung 25: Viewshed des Projektgebiets Nauen; blau: 100% Sichtbarkeit, rot: 0% Sichtbarkeit. Die Farben geben an, wie viele der 100 WEA (orange) das jeweilige Pixel sehen. Grün gekennzeichnet sind potenzielle Radarstandorte. 39

Abbildung 26: Buffer-Bereiche im Projektgebiet Nauen; von innen nach außen: rosé: Wirkungsraum von 4 km der WEA, türkis: 7 km-Mindestabstand des Radars vom zu erfassenden Bereich (keine Masten und Türme innerhalb dieser beiden Buffer), grün: Wirkungsraum des Radars (nur innerhalb dessen sind Masten und Türme relevant)....40

Abbildung 27: Buffer, innerhalb dessen relevante Masten und Türme im Projektgebiet Nauen stehen (grüne Punkte: relevante Masten und Türme) 40

Abbildung 28: Eine händisch gefundene Abdeckung mittels Befestigung an vorhandenen Masten und Türmen im Projektgebiet Nauen, realisiert durch drei Radare 41

Abbildung 29: Ablauf des Abgleichs mit der Radar-Geometrie zur Standortfindung (erzeugt mittels PapDesigner (Quelle: (http://friedrich-folkmann.de/papdesigner/Hauptseite.html, 2020)).....42

Abbildung 30: Internetverfügbarkeit von 50 MBit/s im Projektgebiet Nauen.....43

Abbildung 31: Neigung im Projektgebiet Nauen (blau <=10°, rot >10°; rote Punkte: WEA)...45

Abbildung 32: Äcker und Wiesen im Projektgebiet Nauen.....45

Abbildung 33: Relevante Straßen im Projektgebiet Nauen 46

Abbildung 34: Relevante Straßen im Projektgebiet Nauen gepuffert mit 200 m.....47

Abbildung 35: Verschneidung von Wiesen/Äcker mit Straßen-Buffer von 200 m, Ergebnis sind potenzielle Baugebiete für Radar-Masten im Projektgebiet Nauen, rot: WEA im Projektgebiet.....48

Abbildung 36: Alle Flächen mit einer hundertprozentigen Viewshed-Abdeckung im Projektgebiet Nauen und somit potenzielle Standorte für die Neuerrichtung von Radar-Masten; orange: WEA im Projektgebiet Nauen, rosa Buffer: akkumulierter Wirkungsraum der WEA.....49

Abbildung 37: Ablauf des Abgleichs mit der Radar-Geometrie zur Standortfindung mit zusätzlicher Möglichkeit der Errichtung eines neuen Masts (erzeugt mittels PapDesigner (Quelle: (http://friedrich-folkmann.de/papdesigner/Hauptseite.html, 2020)) 50

Abbildung 38: Eine Variante der Kombination aus zwei neu errichteten Masten im Nordwesten und Osten sowie einem bestehenden Mast bzw. Turm im Südwesten im Projektgebiet Nauen; türkis: bestehende Masten bzw. Türme; grün: mögliche Baustandorte für einen neu zu errichtenden Mast 51

Abbildung 39: Viewshed mit einer Detektionshöhe ab dem Boden; orange: WEA im Projektgebiet.....55

Abbildung 40: Plugin-Idee für QGIS zur vereinfachten Findung von sich überschneidenden Geometrien, hier für die Radar-Standortfindung 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Faktoren für die Standortfindung einer BNK-Radaranlage 24

Tabelle 2: Zusätzliche Faktoren zur Standortfindung, falls ein Mast als Radarbefestigung errichtet werden muss 25

Abkürzungsverzeichnis

WEA	Windenergieanlage
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen
GIS	Geoinformationssystem
BNK	Bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung (von Windenergieanlagen)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
MCDM	Multi-criteria decision making
MCDA	Multi-criteria decision analysis
MCEA	Multi-criteria evaluation analysis
MKEA	Multi-Kriteriums-Entscheidungs-Analyse