Mobilfunkversorgung in der Deutschen Bucht und Standortplanung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur

07.12.2020

Institut für Nachrichtentechnik, Technische Universität Braunschweig
Schleinitzstr. 22, 38106 Braunschweig

M.Sc. Nils Dreyer, Prof. Dr. Ing. Thomas Kürner
{dreyer, kuerner}@ifn.ing.tu-bs.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 3

2. Eingangsdaten 4

2.1. Standortdaten 4

2.2. Landnutzungskarte 4

2.3. Vorhandene Infrastruktur in der Nordsee 5

3. Ausbreitungsmodell 7

4. Standortplanung 12

4.1. Planungsalgorithmus 12

4.2. Analyse des Bestandsnetzes 13

4.3. Ergebnisse der automatischen Standortplanung 16

5. Fazit und Ausblick 21

6. Literaturverzeichnis 22

1. Einleitung

Das (LTE) Mobilfunknetz weist auf der Nordsee im Raum „Deutsche Bucht“ Funklöcher auf. Der Ort und die Größe dieser Funklöcher basiert zuweilen auf Erfahrungen der dort pendelnden Kapitäne sowie auf Messfahrten und Prädiktionen der Mobilfunkbetreiber. Für eine systematische Analyse im Rahmen des Breitbandausbaus soll abgeschätzt werden, welche Anzahl an neuen Mobilfunkstandorten in der Deutschen Bucht benötigt wird, um hier eine flächendeckende Mobilfunkversorgung zu gewährleisten. Dabei sollte bei der Planung neuer Standorte geprüft werden, inwiefern sich vorhandene Infrastruktur (Leuchttürmen, Windräder, usw.) mit Blick auf ihre Position für die Installation eignet. Dieser Bericht stellt eine erste Analyse vor und ermöglicht eine erste Kostenabschätzung für die flächendeckende Mobilfunkversorgung auf der Nordsee.

Die Abschätzung des Versorgungsaufwandes für diesen Bericht fand in enger Zusammenarbeit mit den Mobilfunkbetreibern statt. Von der Deutschen Telekom sowie von Vodafone wurden hierfür detaillierte Pläne des Bestandsnetzes im Raum Deutsche Bucht geliefert. Mit diesen Datensätzen konnten unabhängige Funkkanalprädiktionen für beide Netzbetreiber durchgeführt werden. Von Telefónica wurden eigene Prädiktionsergebnisse geliefert, die für einen Vergleich herangezogen worden sind.

Im nächsten Kapitel werden die verwendeten Eingangsdaten erläutert. Daran an schließt sich eine Beschreibung des Ausbreitungsmodells, welches für diese Studie verwendet wurde. Die Ergebnisse der Standortplanung befinden sich in Kapitel 4. Hierfür wurde ein Standortplanungsalgorithmus entwickelt, der selbstständig eine Planung durchführen kann.

Anmerkung zu diesem Bericht

Mobilfunk ist eine bidirektionale Funktechnologie: Der Downlink beschreibt die Datenrichtung von der Basisstation hin zum Endgerät. Die umgekehrte Richtung wird als Uplink bezeichnet. Für die Bewertung von Funklöchern bzw. für die Ermittlung möglicher Datenraten wird üblicherweise nur der Downlink betrachtet. Auch dieser Bericht analysiert allein den Downlink und bezeichnet die Basisstation deshalb als Sender (TX) und das mobile Endgerät als Empfänger (RX) – entgegen der Tatsache, dass beide Stationen sowohl Sender als auch Empfänger sind.

2. Eingangsdaten

Die Prädiktion von Funklöchern beruht im Wesentlichen auf dem Bestandsnetz (Standortdaten) sowie einer Landnutzungskarte, die für die Prädiktion der Funkwellenausbreitung benötigt wird. Hiermit kann für jeden Punkt auf der Nordsee entsprechend einer vorgegebenen Auflösung die Empfangsleistung prädiziert werden. Unterschreitet der prädizierte Pegel einen festgelegten Zielwert, wird dieser Ort als „Funkloch“ klassifiziert. Die Prädiktionen in diesem Bericht wurden in einer Auflösung von 100 m x 100 m durchgeführt, was der zur Verfügung stehenden Auflösung der Landnutzungskarte entspricht.

2.1. Standortdaten

Verarbeitet wurden die tatsächlichen Standortdaten der Netzbetreiber Vodafone und Deutsche Telekom im Raum Deutsche Bucht. Gemeldet wurden hierbei die Höhe und die Ausrichtung der Sektoren, wobei nur Standorte für die Flächenversorgung im 800 MHz Frequenzband mit einer Bandbreite von 10 MHz ausgewertet worden sind. Die tatsächlich installierten Antennen, die Neigung und die Sendeleistungen waren nicht bekannt. Es wurde deshalb eine für die Flächenversorgung typische Konfiguration gewählt. Dabei wurde eine Sendeleistung von 46 dBm, eine Antennenneigung von 2° Richtung Boden sowie ein Kathrein 80010306 Antennendiagram mit einem Antennengewinn von 17,5 dB für alle Sektoren angenommen.

Für die weitere Verarbeitung wurden die Standorte der beiden Netzbetreiber als ein einziges Netz betrachtet. Damit soll sichergestellt werden, dass die Förderung des Mobilfunkausbaus das Gesamtnetz betrifft und nicht das Netz eines einzelnen Netzbetreibers. Das dadurch untersuchte Gesamtnetz als Summe aller Netzbetreiber steht einem Endgerät auf drei Arten zu Verfügung:

- Ein Endgerät mit Multi-SIM Unterstützung kann sich direkt mit der stärksten Zelle aller verfügbaren Netzanbieter verbinden.
- Die Netzbetreiber können sich die Standorte aus baulicher Sicht teilen, d.h. Nutzung des Antennenmastes oder des Gebäudes (passives Sharing)
- Die Netzbetreiber können sich das ausgestrahlte Mobilfunknetz teilen und einen Zugriff netzfremder Endgeräte gestatten (aktives Sharing)

2.2. Landnutzungskarte

Die Prädiktion der Empfangsleistungspegel fand nur für Orte auf dem Meer in der Deutschen Bucht innerhalb der 12 Meilenzone statt. Eine Klassifizierung des Ortes fand über eine Landnutzungskarte des CORINE Projektes statt [1]. Die Geodaten aus dem Jahr 2018 sind frei verfügbar. Abbildung 1 zeigt die Deutsche Bucht auf Basis des CORINE Datensatzes.

Die 12 Meilenzone wurde aus dem frei verfügbaren und von der European Environment Agency (EEA) bereitgestelltem Grenzverlauf abgeleitet [2]. Orte außerhalb der 12 Meilenzone (in Abbildung 1 grau markiert) wurden bei der Standortplanung ignoriert.

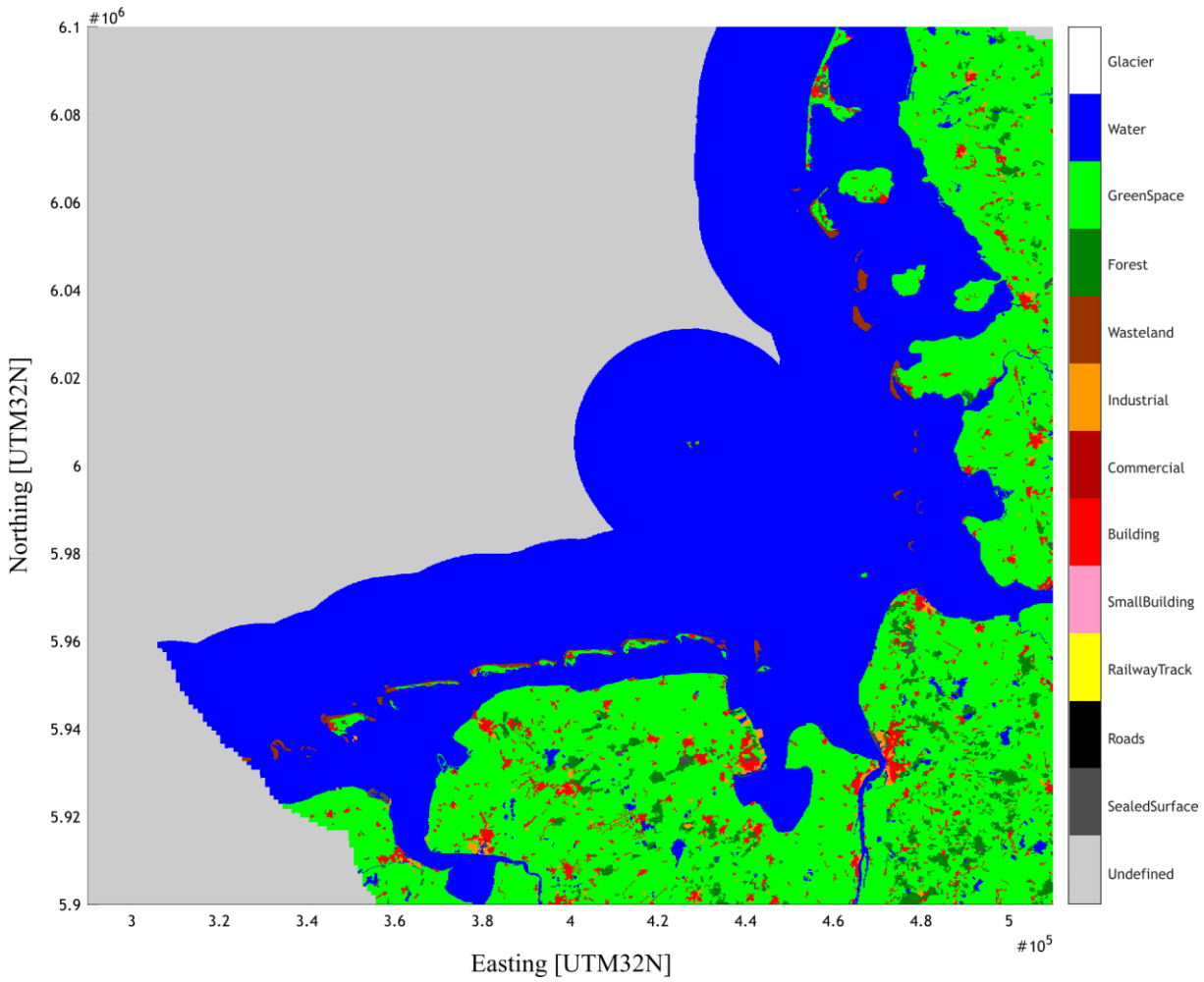


Abbildung 1: Landnutzungskarte, extrahiert aus den CORINE Daten des Bundesumweltamtes

2.3. Vorhandene Infrastruktur in der Nordsee

Der Ort eines neu zu errichtenden Mobilfunkstandortes in der Nordsee hängt wesentlich von der erwarteten zusätzlichen Flächenversorgung ab. In Anbetracht der hohen Kosten eines Neubaus, der neben der Plattform im Meer auch eine Anbindung an das Strom- und Datennetz erfordert, stellt sich für die Planung unweigerlich die Frage, inwiefern auch ein schlechterer Standort mit weniger zusätzlicher Netzabdeckung gegenüber dem optimalen Standort akzeptabel ist, sofern durch die Installation an einer vorhandenen Infrastruktur Kosten gespart werden können. Die genaue Kostenkalkulation (Neubau oder Anbau) war für die in diesem Bericht genannten Vorschläge nicht bekannt. Der später entwickelte Planungsalgorithmus ist jedoch in der Lage, die vorhandene Infrastruktur in der Nordsee gegenüber einer optimalen neuen Standortposition zu bevorzugen. Details hierzu werden in Abschnitt 4.1 erläutert.

Informationen über eine vorhandene Infrastruktur in der Nordsee wurden für diese Studie vom Breitbandzentrum Niedersachen-Bremen (BZNB) geliefert. Die Daten wurden entsprechend ihrer grundsätzlichen Tauglichkeit für das Anbringen eines Mobilfunksenders gefiltert. Als geeignet erscheinen demnach Leuchttürme, Windräder, Umspannwerke und feste maritime Messstationen

(MARNET). Abbildung 2 zeigt die möglichen Standorte, die vom Planungsalgorithmus beachtet worden sind.

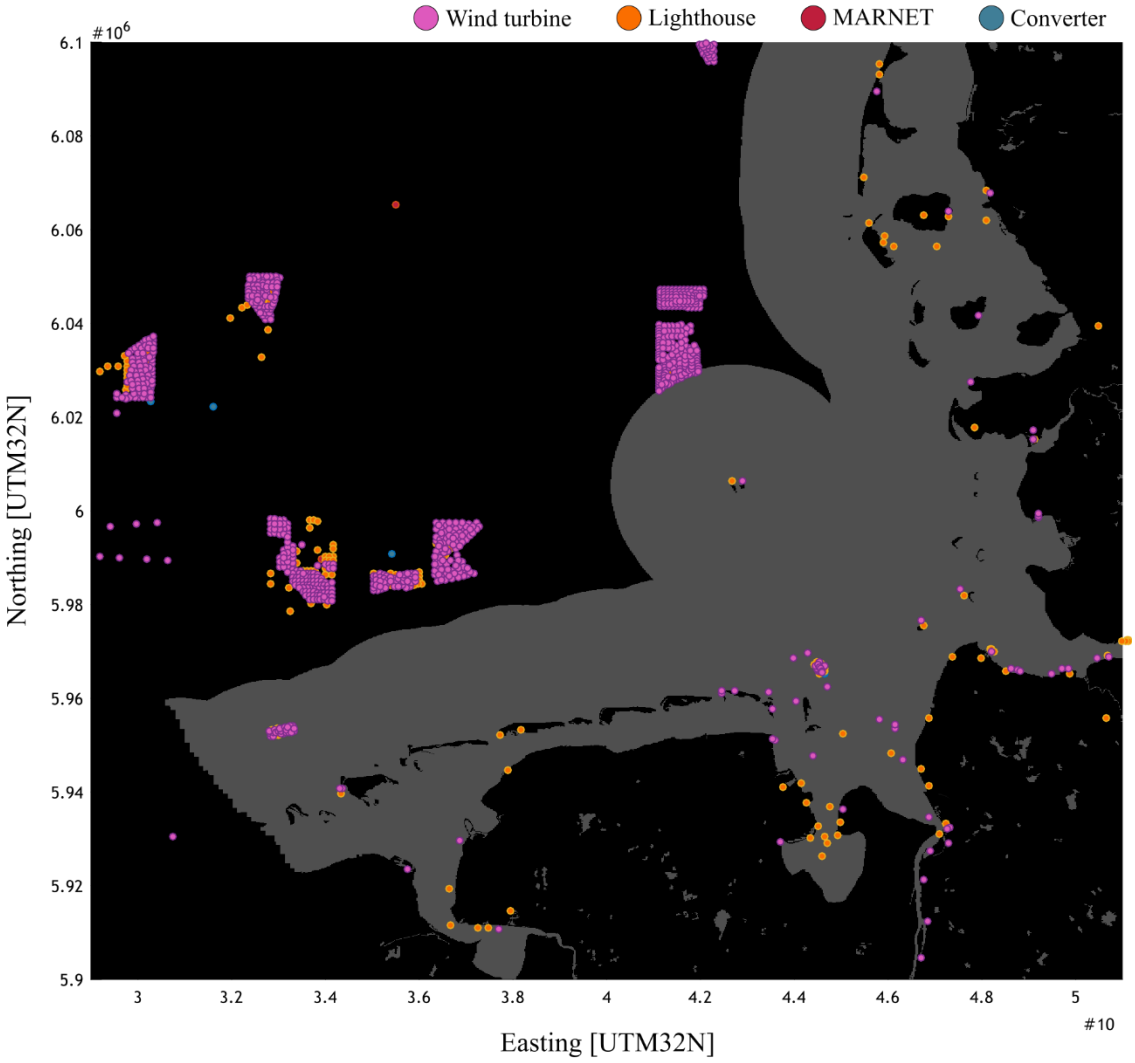


Abbildung 2: Vorhandene Infrastruktur in der Deutschen Bucht, die für die Installation eines Mobilfunkstandortes grundsätzlich geeignet erscheint.

3. Ausbreitungsmodell

Für Prädiktionen auf dem Festland kommen üblicherweise empirische Modelle wie das Okumura-Hata Modell zum Einsatz, die eine feste Empfängerhöhe nahe dem Boden von typischerweise 1,5 m annehmen. Dieses verarbeitet die Landnutzung (Wald, Stadt, Land, See usw.) sowie die Höhe von Sender und Empfänger. Eine wesentliche Einflussgröße stellt hierbei die Dämpfung durch Hindernisse dar. Die Prädiktion auf dem Meer unterliegt demgegenüber grundsätzlich anderen Ausbreitungsbedingungen. Unter Vernachlässigung des Wellengangs herrschen auf dem Meer quasi optimale Freiraumbedingungen, die zu sehr weiten Reichweiten und somit zu sehr großen Mobilfunkzellen führen.

Die Prädiktion der Empfangsleistung wurde mit dem Sphärischen Zweistrahlmodell durchgeführt. Dieses stellt gegenüber dem klassischen Zweistrahlmodell eine Erweiterung dar. Neben der Möglichkeit beliebige Empfängerhöhen zu betrachten kann das Modell den Einfluss der Erdkrümmung korrekt erfassen. Dies sind wesentliche Unterschiede gegenüber den üblicherweise eingesetzten Ausbreitungsmodellen. Es ist deshalb möglich, dass sich die berechneten Versorgungskarten von den Versorgungskarten der betrachteten Mobilfunkanbieter unterscheiden. Ein Abgleich des Modells mit Messdaten im tatsächlichen Netz fand nicht statt, eine Validierung der Untersuchungsergebnisse ist vom Auftraggeber allerdings noch geplant.

Abbildung 3 (a) zeigt das klassische Zweistrahlmodell. Die Leistung eines empfangenen Signals an einem Empfänger (RX), ausgehend von einem Sender (TX), hängt dabei von der Überlagerung einer direkten Signalkomponente und einer vom Boden reflektierten Signalkomponente ab. Dabei hängt die individuelle Empfangsleistung beider Strahlen im wesentlich von der Distanz *d* ab. Die Reflexion am Boden führt zu einem Phasensprung von 90° am vom Boden reflektierten Signal. Entfernt sich der Empfänger nun vom Sender, gleichen sich die Längen der Strecken beider Strahlen zunehmend an wobei der Phasensprung zu einer Auslöschung (destruktive Interferenz) führt. Der Punkt, ab dem es ausschließlich zu destruktiver Interferenz kommt wird als „Breakpoint“ bezeichnet.

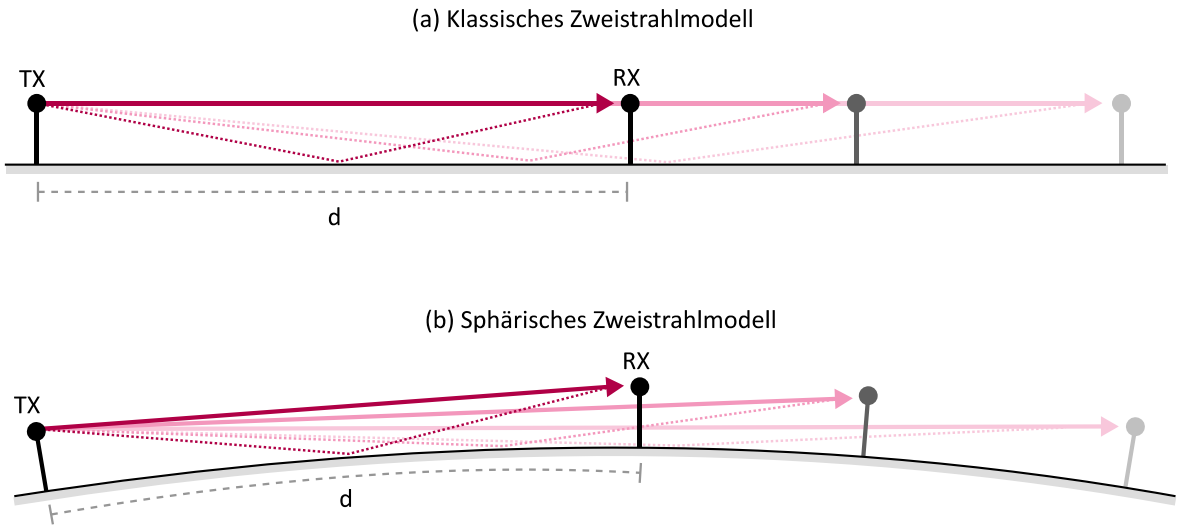


Abbildung 3: (a) Das klassische Zweistrahlmodell basiert auf einem direkten sowie auf einem vom Boden reflektieren Strahl. Der Boden wird hierbei als unendlich ausgedehnte Ebene angenommen. (b) Das Sphärische Zweistrahlmodell beachtet die Erdkrümmung, nach Projektion der Sender- und Empfängerposition in den dreidimensionalen Raum und unter Beachtung des Erdradius.

Für weite Distanzen liefert das Zweistrahlmodell keine realistischen Lösungen. Dies liegt daran, dass es durch die Erdkrümmung wesentlich früher (d.h. für viel kleiner Distanzen *d*) zu destruktiver Interferenz kommt. Abbildung 3 (b) zeigt das Modell unter Beachtung der Erdkrümmung.

Ein Vergleich für die prädizierte Empfangsleistung in Abhängigkeit der Distanz *d* zeigt Abbildung 4. Für dieses Beispiel wurde eine Sender- und Empfängerhöhe von 20 m über Grund angenommen. Bis zu einer Distanz von etwa $d = 11\ km$ prädizieren beide Modelle etwa dieselbe Dämpfung. Bei dieser Distanz hat die Erdkrümmung (für die gewählte Sender- und Empfängerhöhe) keinen nennenswerten Einfluss. Dies ändert sich, wenn der Empfänger sich dem Sichtbarkeitshorizont nähert. In diesem Beispiel besteht ab einer Distanz von etwa $d = 32\ km$ keine direkte Sichtverbindung mehr, da der Empfänger hinter dem Horizont verschwindet. Jedoch nehmen die Dämpfungswerte durch die destruktive Interferenz der Ausbreitungswege schon deutlich früher sehr große Werte an, die eine Kommunikation unmöglich machen.

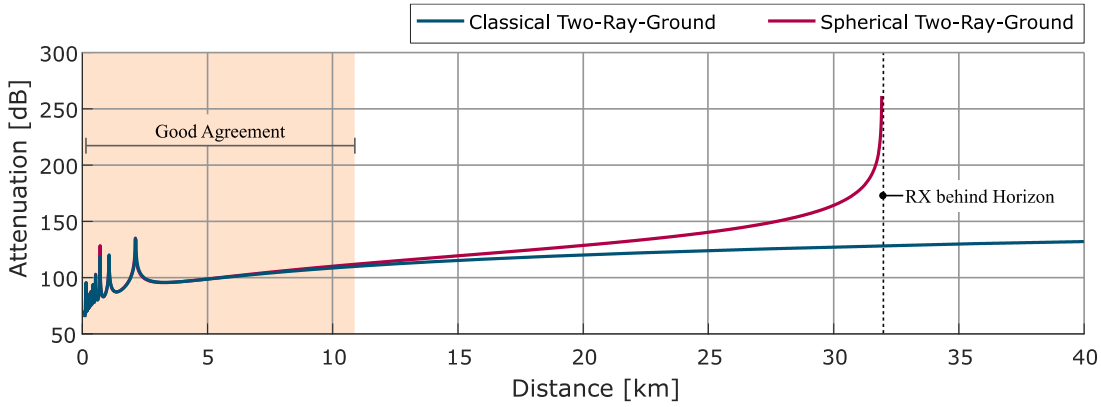


Abbildung 4:Die prädizierte Empfangsleistung in Abhängigkeit der Distanz d für das klassische sowie für das sphärische Zweistrahlmodell.

Die Reichweite einer Zelle hängt wesentlich von der Sender- (h_{TX}) und der Empfängerhöhe (h_{RX}) ab. Beides hat Einfluss auf die Breakpoint-Distanz, ab der nur noch destruktive Interferenz beobachtet werden kann. Die Zellreichweite kann durch Vergrößerung beider Höhen stark vergrößert werden.

Für den Planungsalgorithmus ist die zu erwartende Funkreichweite eines neuen Standortes essentiell. Dabei müssen die Höhe des Empfängers sowie die Höhe des neuen Sendestandortes vorgebeben werden. Für die Zellreichweite muss außerdem ein Empfangsleistungspegel vorgegeben werden, der erreicht werden muss, damit der Ort als versorgt angesehen werden kann.

Nach Evaluierung der gegebenen Standortdaten im Gebiet der Deutschen Bucht wurde eine Standorthöhe von $h_{TX} = 25\ m$ angenommen. Die Höhe des Empfängers wurde auf $h_{RX} = 5\ m$ festgelegt mit dem Ziel auch kleinere Bote zu versorgen[1]. Tabelle 1 zeigt den erwarteten Zellradius in Abhängigkeit der Empfängerhöhe und des minimalen Empfangsleistungspegel für eine feste Standorthöhe von 25 m. Tabelle 2 zeigt eine ähnliche Analyse, diesmal mit variabler Standorthöhe und fester Empfängerhöhe von 5 m.

Eine hinreichende LTE-Versorgung für mobile Breitbandanwendungen wird bei einen Pegel von ca. -105 dBm erreicht. Für die Schifffahrt wird eine Indoor-Dämpfung durch die Kabine von 20 dB

[1] Für Empfänger mit einer Höhe größer 5 m ist in jedem Fall eine bessere Versorgung zu erwarten. Die Evaluationshöhe von 5 m stellt demnach die Mindesthöhe dar, ab der die geplante Versorgung sichergestellt werden kann.

angenommen. Daraus leitet sich ein minimaler (Außen-) Prädiktionspegel von -85 dBm ab. Der sich daraus ergebende Zellradius von 20,96 km eines neuen Standortes ist in der Tabelle grün hervorgehoben.

Tabelle 1: Zellradius in Abhängigkeit der minimalen Empfangsleistung und der Empfängerhöhe für eine feste Standorthöhe von h_{TX} = 25m

Höhe RX (TX = 25m)	Minimale Empfangsleistung [dBm]	Zellradius [km]
5 m	-75	17,83
	-85	20,96
	-95	22,98
	-105	24,19
10 m	-75	21,4
	-85	24,49
	-95	26,42
	-105	27,58
15 m	-75	24,02
	-85	27,08
	-95	29,0
	-105	30,14
20 m	-75	26,14
	-85	29,23
	-95	31,15
	-105	32,29

Tabelle 2: Zellradius in Abhängigkeit der minimalen Empfangsleistung und der Standorthöhe für eine feste Empfängerhöhe von h_{RX} = 5m

Höhe TX (RX = 5m)	Minimale Empfangsleistung [dBm]	Zellradius [km]
15 m	-75	14,4
	-85	17,24
	-95	19,11
	-105	20,25
20 m	-75	16,24
	-85	19,22
	-95	21,16
	-105	22,34
25 m	-75	17,83
	-85	20,96
	-95	22,98
	-105	24,19
30 m	-75	19,27
	-85	22,53
	-95	24,61
	-105	25,86
40 m	-75	21,82
	-85	25,32
	-95	27,52
	-105	28,82

Eine weitere Analyse zeigt Abbildung 5. Unter Annahme des minimalen Empfangspegels von -85 dBm kann der Zellradius in Abhängigkeit der Basisstations- und der Mobilfunkgerätehöhe bestimmt werden. Das in dieser Studie gewählte Tupel (25 m / 5 m) ist in der Abbildung markiert. Da die Zellreichweite stark von der Basisstationshöhe abhängt, sollte bei der späteren Standortplanung die tatsächliche Höhe des neuen Standortes mit beachtet werden um die Netzabdeckung besser abschätzen zu können.

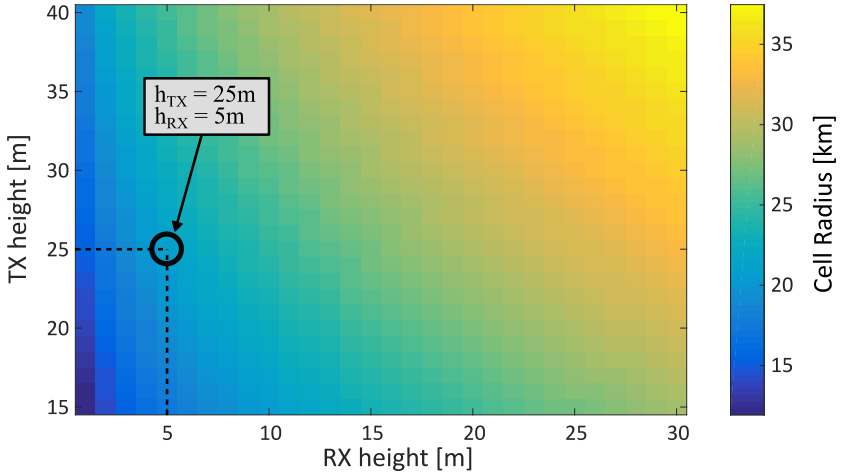


Abbildung 5: Zellradius in Abhängigkeit der Sender- und Empfängerhöhe für einen festen minimalen Empfangspegel von -85 dBm

4. Standortplanung

Die Standortplanung wurde mit einem automatischen Planungsalgorithmus durchgeführt um die für eine Flächenversorgung benötigte minimale Anzahl neuer Standort zu ermittelt. Der Algorithmus und seine Randparameter werden im nächsten Abschnitt erläutert. Nach einer Analyse des Bestandsnetzes folgen zwei Vorschläge zur Platzierung neuer Basisstationen - mit und ohne Nutzung vorhandener Infrastruktur.

4.1. Planungsalgorithmus

Die automatische Standortplanung basiert auf einem iterativen Prozess. Dabei werden so lange neue Basisstationen platziert, bis der Bau einer weiteren Station nicht mehr als gewinnbringend angesehen wird.

Definition des Flächengewinn
Der „Gewinn“ eines neuen Standorts bezeichnet den Zugewinn an zuvor nicht versorgter Fläche (Flächengewinn) durch den Bau dieser Station. „Nicht gewinnbringend“ bedeutet, dass durch den Neubau dieses Standortes ein zuvor festgelegter minimaler Flächengewinn nicht erreicht wird.

Für diese Studie wurde der minimale Flächengewinn eines Standortes auf 1% der absoluten Zellfläche festgelegt. Das bedeutet: mindestens 1% der Fläche, die ein neuer Standort versorgt, muss zuvor unversorgt sein, damit sich der Neubau lohnt. Bei einem ermittelten Zellradius von 20,96 km (h_{TX} = 25m, h_{RX} = 5 m, P_{min} = -85 dBm) beträgt die maximale Zellfläche 1380 km^2. Der geforderte Flächengewinn beträgt demnach 13,8 km^2. Der Bau eines Standortes zur Versorgung von Funklöchern kleiner als diese Größe erscheint nicht angemessen.

Eine Erhöhung des minimalen Flächengewinns senkt zwar die Anzahl neuer Standorte, führt aber auch zu einer größeren nicht versorgten Fläche im Raum Deutsche Bucht insgesamt. Entgegen dem kann eine Absenkung des geforderten Flächengewinns - bspw. mit dem Ziel einer 100% Flächenversorgung - zu einer unverhältnismäßig hohen Anzahl neuer Standorte führen. Der Algorithmus wählt zu jedem Zeitpunkt den Standort mit dem höchsten Flächengewinn und beendet die Standortplanung, sobald ein weiterer Standort den minimalen Flächengewinn nicht erfüllt.

Es ist außerdem möglich, vorhandene Infrastruktur im Planungsprozess zu beachten. In diesem Fall sucht der Algorithmus nach vorhandenen Bauplätzen innerhalb des Versorgungsradius des nächsten optimalen Standortes. Dabei wird für jeden vorhandenen Bauplatz der Flächengewinn berechnet und mit dem Flächengewinn des optimalen Standortes verglichen. Der Algorithmus zieht dabei einen vorhandenen Bauplatz gegenüber dem optimalen Standort vor, wenn der vorhandene Bauplatz mindestens einen festgelegten Anteil des optimalen Flächengewinns erfüllt. Der Anteil des optimalen Flächengewinns ist einstellbar und regelt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein vorhandener Standort gegenüber einem Neubau vorgezogen wird. Für diese Studie wurde er auf 20% festgelegt, d.h. eine benachbarte vorhandene Infrastruktur wird einem Neubau vorgezogen, wenn der Flächengewinn durch den vorhandenen Bauplatz mindestens 20% des optimalen Standortes entspricht.

Alle verwendeten Konfigurationsparameter für die automatische Standortplanung sind in Tabelle 3 aufgelistet. Abhängigkeiten zwischen den Parametern sind in der „Abhängig von“ Spalte notiert.

Tabelle 3: Simulationsannahmen und -abhängigkeiten

Nr.	Größe	Abhängig von	Wert
1.1	Angestrebte minimale (Indoor) Empfangsleistung	-	-105 dBm
1.2	Angenommene Outdoor-zu-Indoor-Dämpfung auf einem Schiff	-	20 dB
1.3	Minimale (Outdoor) Empfangsleistung	1.1, 1.2	-85 dBm
2.1	Frequenzband	-	800 MHz
2.2	Standorthöhe	-	25 m
2.3	Empfängerhöhe	-	5 m
3.1	Zellradius	1.3, 2.1, 2.2, 2.3	20,96 km
3.2	Maximal versorgte Zellfläche	3.1	1380 km^2
3.3	Minimaler Flächengewinn bezogen auf die maximale Zellfläche	-	1%
3.4	Minimaler Flächengewinn eines neuen Standortes	3.2, 3 3	13,8 km^2
3.5	Mindestanteil Flächengewinn bei Wahl vorhandener Infrastruktur gegenüber dem optimalen Standort	-	20%

4.2. Analyse des Bestandsnetzes

Die Analyse des Bestandsnetzes basiert auf einem Zusammenschluss des Telekom-Netzes mit dem Vodafone-Netz. Das Netz wird auf diese Art als Einheit betrachtet was der Idee des Roaming-Gedankens folgt, wonach eine Nutzung beider Netze (im Sinne der stärksten Zelle) möglich ist. Interferenzen sind hierbei nicht entscheidend. Ob ein Ort als versorgt gilt, hängt allein vom Erreichen des Mindestpegels ab.

Abbildung 6 zeigt eine Analyse des Bestandsnetzes für vier verschiedene Empfängerhöhen (5 m, 10 m, 15 m und 20 m) sowie für zwei verschiedene Mindestempfangspegel (-85 dBm und -95 dBm). Gebiete, die den Mindestpegel nicht erfüllen, sind orange eingefärbt. Dabei wird deutlich, dass beide Planungsparameter - die Empfängerhöhe und der Mindestpegel - einen wesentlichen Einfluss auf das Vorhandsein von Funklöchern und somit auf den Prozess der Netzplanung insgesamt haben. Im Folgenden wird die Netzplanung für die ausgewählte Empfängerhöhe von 5 m mit einem Mindestpegel von -85 dBm durchgeführt. Eine detailliertere Karte mit den vorhandenen Funklöchern zeigt Abbildung 7. Die meisten Funklöcher existieren demnach am Rand der 12 Meilenzone, die das Versorgungsgebiet begrenzt. Darüber hinaus existieren drei „Löcher“ innerhalb des Versorgungsgebietes, wovon sich jeweils eines zentral südlich und östlich von Helgoland und eines nördlich von Juist befindet.

Die Gesamtfläche des mit Mobilfunk zu versorgenden Seegebietes in der Deutschen Bucht erstreckt sich auf eine Fläche von 14.183 km^2. Dies ist, durch die Fokussierung auf Wasserflächen innerhalb der 12 Meilenzone, ein Bruchteil der häufig angegebenen Größe von insgesamt 77.000 km^2 (bzw. 30.000 km^2 für das Wattenmeer), welche die Gesamtgröße der deutschen Bucht beschreibt [3]. Hiervon werden bereits 12.919 km^2 von einem theoretischen Verbundnetz aus Vodafone und Telekom mit Mobilfunk versorgt, während sich die Größe des nicht-versorgten Gebietes auf eine Fläche von 1263,8 km^2 (8,9% des Versorgungsgebietes) erstreckt.

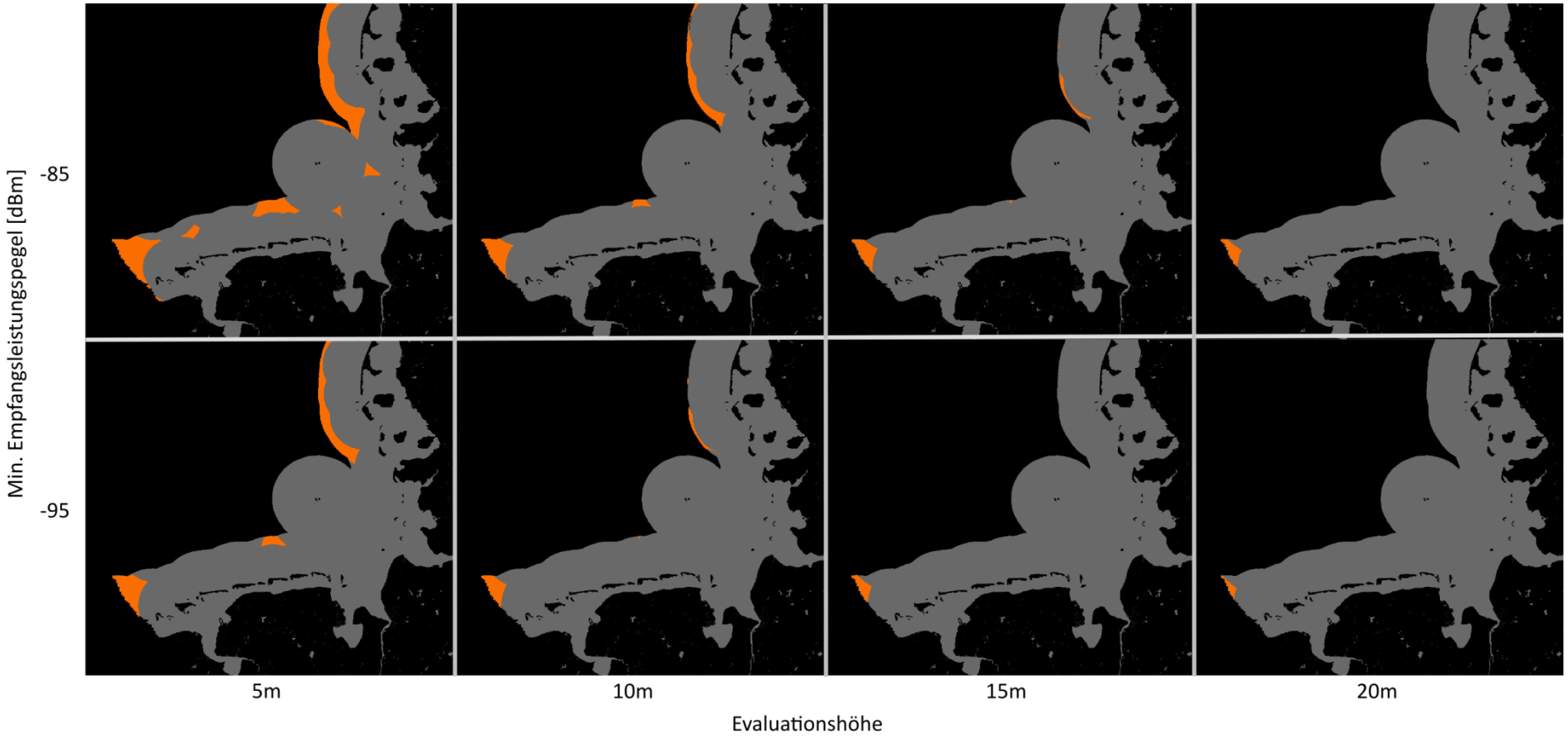


Abbildung 6: Analyse des Bestandsnetzes in Abhängigkeit der Empfängerhöhe (Evaluationhöhe) und des minimalen (Outdoor)-Empfangsleistungspegels. Nicht-versorgte Gebiete sind orange hervorgehoben.

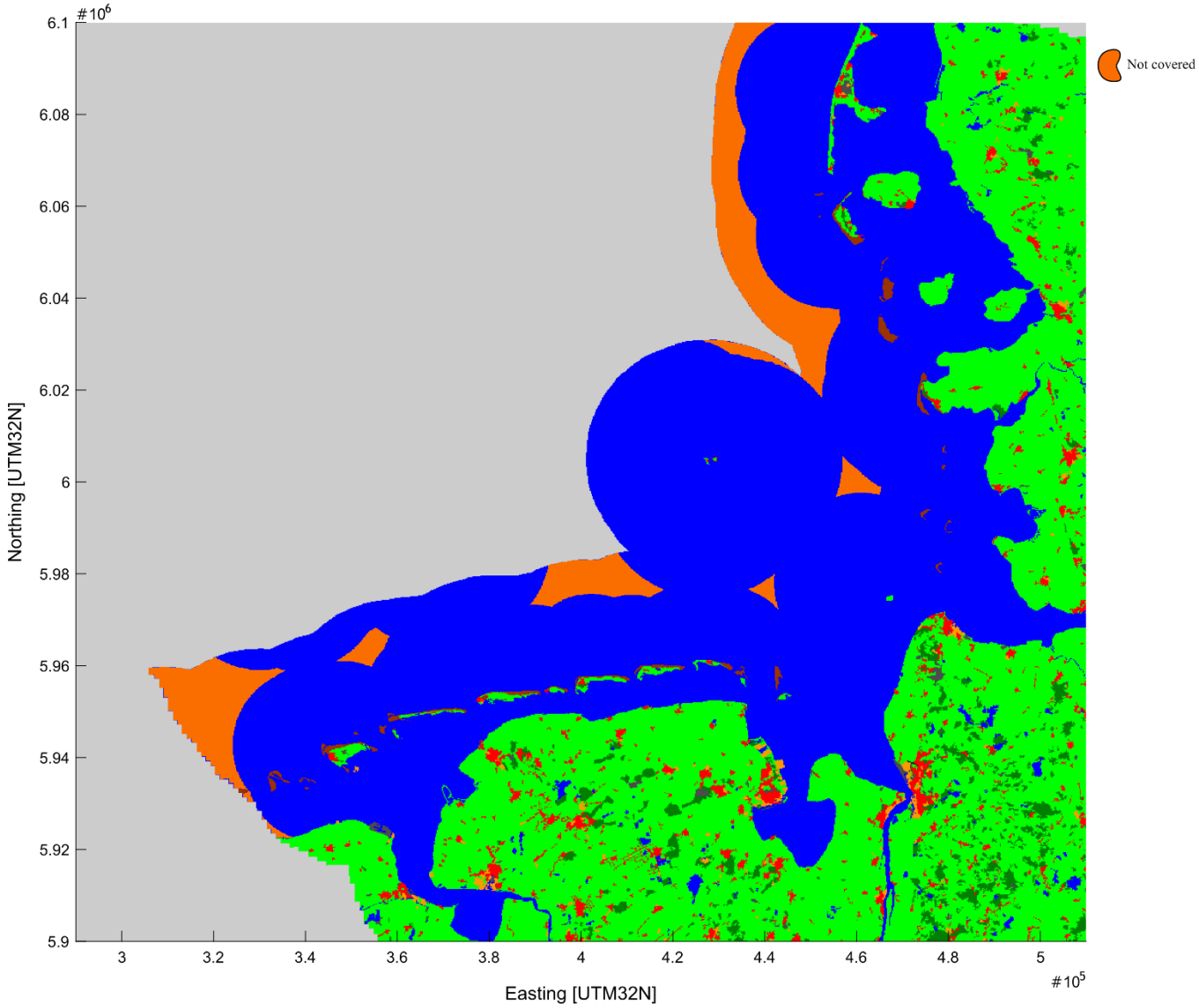


Abbildung 7: Funklöcher im Bestandsnetz

4.3. Ergebnisse der automatischen Standortplanung

Bei der automatischen Standortplanung[2] wurden zwei Planungsideen verfolgt, basierend auf den Konfigurationsparametern in Tabelle 3 mit einer angenommenen Standorthöhe von 25 m. Ein dritter Vorschlag zeigt eine weiter Variante unter Annahme einer Standorthöhe von 40 m:

Vorschlag 1 minimiert die Anzahl der Standorte durch Verzicht auf vorhandene Infrastruktur unter Wahl der optimalen Lösung.

Vorschlag 2 bindet vorhandene Infrastruktur entsprechend der Planungskriterien ein, die in Abschnitt 4.1 beschrieben worden sind.

Vorschlag 3 zeigt die Ergebnisse wie Vorschlag 2, aber mit einer angenommenen Standorthöhe von 40 m statt 25 m

Die Idee, die Funklöcher ausschließlich mit vorhandenen Bauplätzen zu versorgen, wurde ebenso verfolgt. Wegen der zahlreichen Gebiete, die sich mit vorhandener Infrastruktur jedoch nicht versorgen lassen, spielt dieser Vorschlag keine weitere Rolle für diesen Bericht.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 (Vorschlag 1) und Abbildung 9 (Vorschlag 2) gezeigt. Vorschlag 1 basiert auf insgesamt sechs neuen Plattformen. Vorschlag 2 benötigt insgesamt sieben Standorte, wovon drei Standorte an vorhandenen Bauplätzen installiert werden können. Die Nummerierung der vorgeschlagenen Standorte in Abbildung 8 und Abbildung 9 folgt dabei einer Sortierung nach Flächengewinn. Die ermittelten Standortdaten zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Ermittelte Standortpositionen

Vorschlag 1				Vorschlag 2			
Nr.	Latitude [°]	Longitude [°]	Fl. Gewinn [km^2]	Nr.	Latitude [°]	Longitude [°]	Fl. Gewinn [km^2]
1	54,5329702	8,0944004	391,90	1	54,5329702	8,0944004	391,90
2	54,8699779	7,9793386	213,11	2	54,8699779	7,9793386	213,11
3	53,9276235	7,4374215	181,75	3	53,9276235	7,4374215	181,75
4	53,8216031	6,5312701	83,45	4*	53,7033711	6,5094097	60,73
5	54,2028127	8,1767566	59,96	5	54,2028127	8,1767566	59,96
6	53,9067969	7,8172517	18,64	6*	53,9630142	6,7744773	22,72
				7*	53,8226429	8,1811892	18,64

**Nutzung vorhandener Infrastruktur*

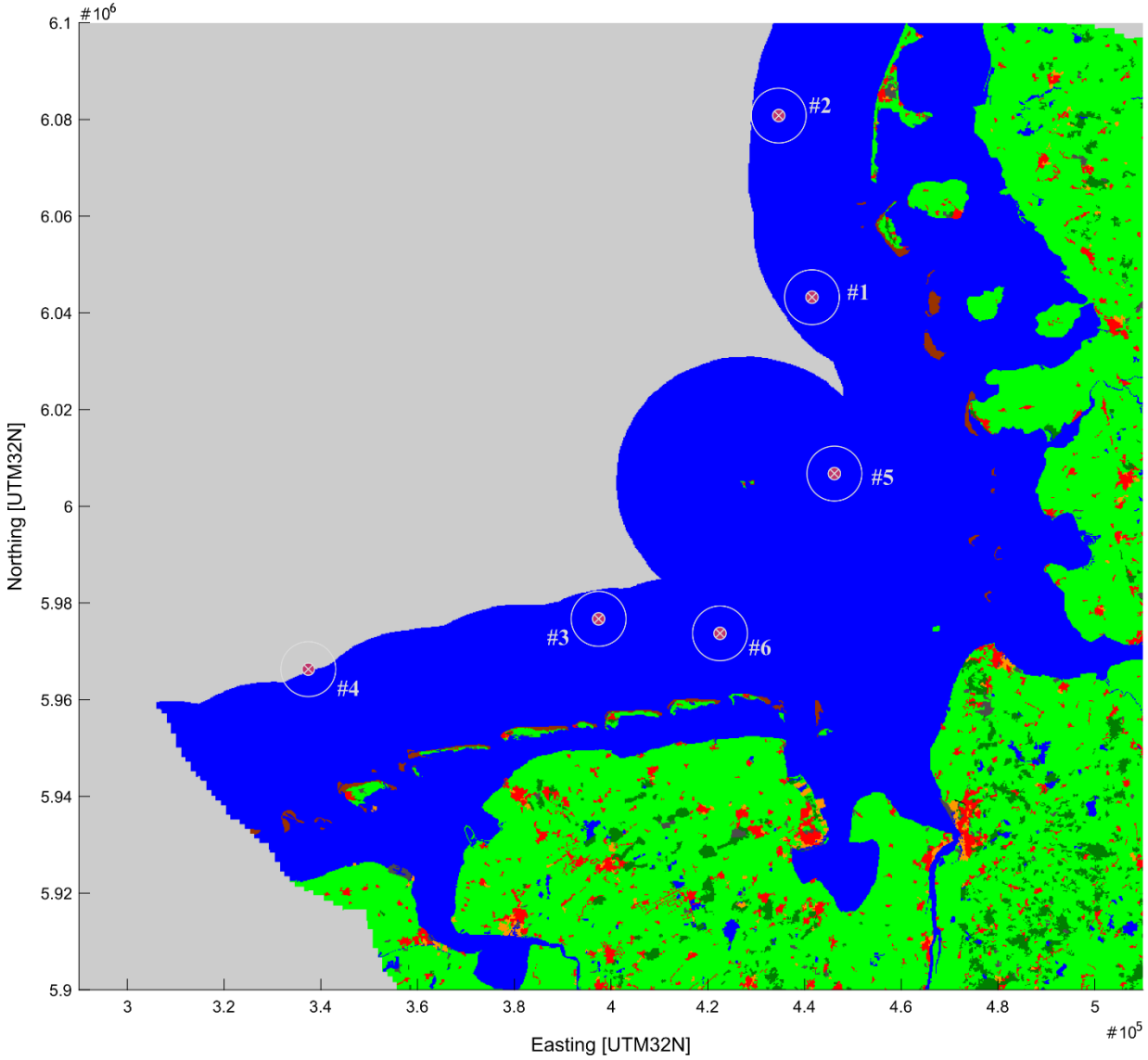
Vorschlag 3 (Abbildung 10) nimmt eine Standorthöhe von 40 m an und bezieht vorhandene Infrastruktur in die Planung mit ein. Die benötigte Standortanzahl kann hierdurch weiter auf fünf verringert werden, da je Standort eine größere Fläche abgedeckt werden kann. Hiervon müssen drei Standorte neu errichtet werden. Der Fall ohne Einbeziehung vorhandene Infrastruktur wurde ebenso untersucht. Dies führte jedoch zu demselben Ergebnis, dass fünf Standorte benötigt würden. Auch die Größe des nicht versorgten Gebietes bliebe ähnlich. Auf eine weitere Detailanalyse ohne Betrachtung der bestehenden Infrastruktur wurde deshalb verzichtet.

[2] Bei der automatischen Planung wurde der exakte Grenzverlauf, insbesondere der Grenzverlauf in Richtung Niederlande, nur grob angenähert. Dies sollte, neben der ebenso nicht betrachteten Koordination grenznaher Standorte mit Nachbarländern, in einer Detailplanung beachtet werden.

Tabelle 5: Ermittelte Standortpositionen (Vorschlag 3)

Vorschlag 3			
Nr.	Latitude [°]	Longitude [°]	Fl. Gewinn [km^2]
1	54,5940281	8,0868552	449,06
2	53,9239470	7,7360534	193,29
3*	54,9670463	7,7847417	143,16
4*	53,7033711	6,5094097	82,19
5	54,1811709	8,1664607	72,95
Verbleibendes nicht versorgtes Gebet: 8,17km^2			

**Nutzung vorhandener Infrastruktur*

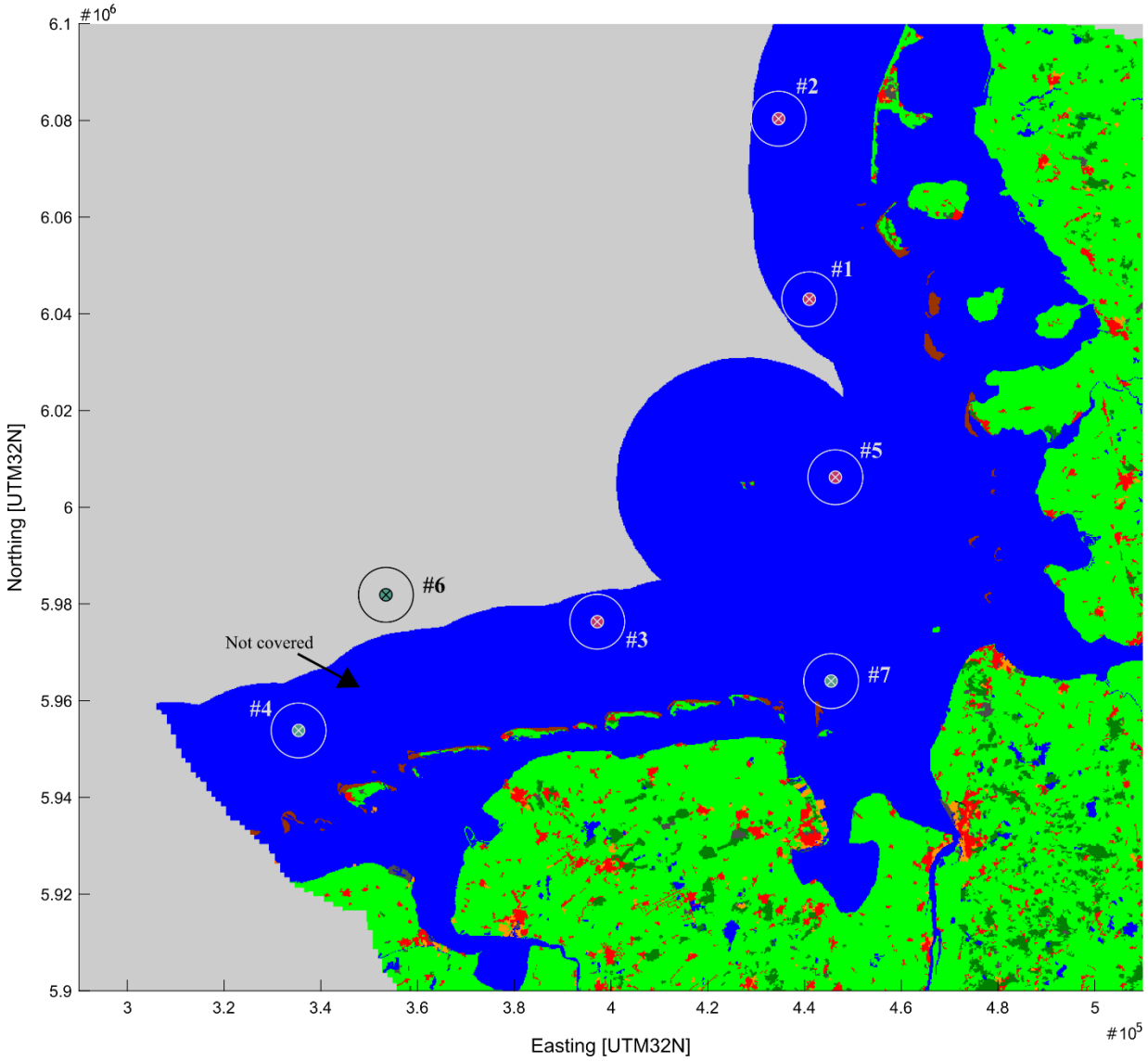


No.	Lat.	Long.	Coverage Gain [km²]
1	54,53297020	8,09440048	391.9
2	54,86997797	7,97933868	213.11
3	53,92762353	7,43742157	181.75
4	53,82160314	6,53127010	83.45
5	54,20281279	8,17675668	59.96
6	53,90679699	7,81725175	18.64

Poposed Basestation on Existing Platform

Poposed Basestation on New Platform

Abbildung 8: Standortvorschlag 1: Keine Einbeziehung vorhandener Infrastruktur

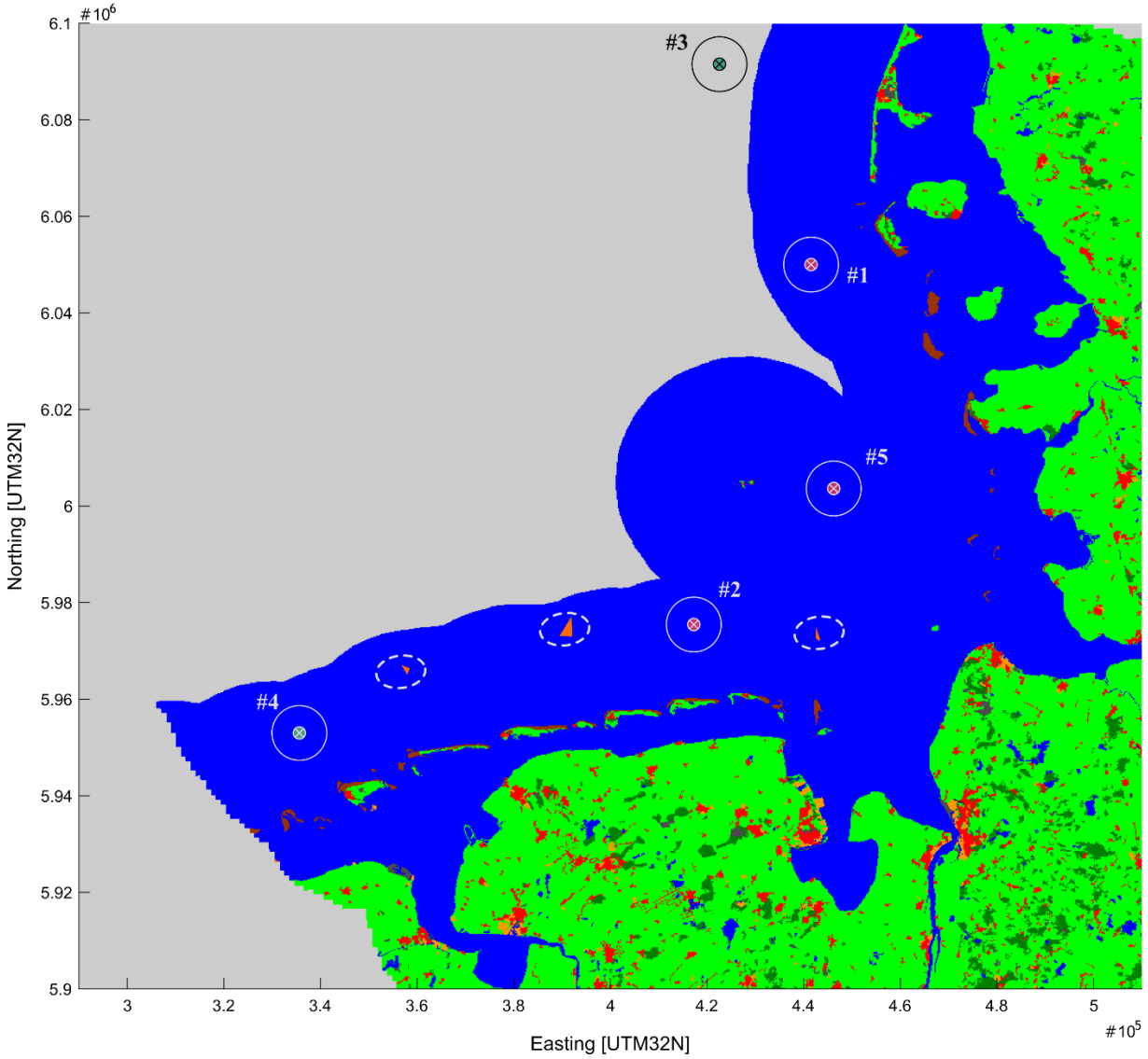


No.	Lat.	Long.	Coverage Gain [km²]
1	54,5329702	8,0944004	391.9
2	54,8699779	7,9793386	213.11
3	53,9276235	7,4374215	181.75
4	53,7033711	6,5094097	60.73
5	54,2028127	8,1767566	59.96
6	53,9630142	6,7744773	22.72
7	53,8226429	8,1811892	18.64

Poposed Basestation on Existing Platform

Poposed Basestation on New Platform

Abbildung 9: Standortvorschlag 2: Einbeziehung vorhandener Infrastruktur



No.	Lat.	Long.	Coverage Gain [km^2]
1	54,5940281	8,0868552	449.06
2	53,9239470	7,7360534	193.29
3	54,9670463	7,7847417	143.16
4	53,7033711	6,5094097	82.19
5	54,1811709	8,1664607	72.95

Poposed Basestation on Existing Platform

Poposed Basestation on New Platform

Not covered

Abbildung 10: Standortvorschlag 3: Einbeziehung vorhandener Infrastruktur mit einer Standorthöhe von 40 m

5. Fazit und Ausblick

Für die Mobilfunkversorgung in der Deutschen Bucht wurden in diesem Bericht mehrere Vorschläge erarbeitet. Diese basieren auf Informationen über das theoretische Bestandsnetz von den Netzbetreibern Vodafone und Telekom sowie auf frei verfügbare Topologiekarten. Unter Einbeziehung vorhandener Bauplätze wurde die Zahl von sieben neuen Standorten ermittelt, um eine flächendeckende Mobilfunkversorgung in der Deutschen Bucht zu erzielen.

Die abgeschätzte Reichweite eines neuen Standortes, die die Grundlage für die Ermittlung der Standortzahl bildet, hängt im Wesentlichen von vier Parametern ab: Von der Senderhöhe, der Empfängerhöhe, dem angestrebten Mindestpegel sowie von der erwarteten Outdoor-zu-Indoor Dämpfung an Bord eines Schiffes. Während die minimale Empfängerhöhe (hier: 5 m) und der minimale Pegel (hier: -105 dBm) fest vorgegeben werden können, ist die Installationshöhe eines neuen Standortes sowie die Outdoor-zu-Indoor Dämpfung inkl. weiteren äußeren Einflüssen wie dem Wellengang, nicht bekannt. Abbildung 5 hat gezeigt, dass die Wahl der Evaluationshöhe sowie die tatsächlichen Standorthöhe einen großen Einfluss auf die Versorgungsreichweite hat. Der angestrebte Empfangsleistungspegel bestimmt zudem die Qualität des Netzes. Eine Änderung dieser Anforderung, wie Abbildung 6 zeigt, führt zu einer neuen Bewertung des Bestandsnetzes. So sind für eine Empfängerhöhe von 20 m und einem Outdoor-Mindestpegel von -95 dBm in einem Verbundnetz aus Vodafone und Telekom keine gravierenden Funklöcher erkennbar. Erst bei einer Empfängerhöhe von 5 m und einem Outdoor-Mindestpegel von -85 dBm zeigen sich Versorgungslücken südöstlich von Helgoland.

Unter den genannten Annahmen wurden drei Standortvorschläge erarbeitet, die eine flächendeckende Mobilfunkversorgung gewährleisten können. Vorschlag 1 und 2 basieren auf einer angenommenen Standorthöhe von 25 m wobei vorhandene Infrastruktur nicht beachtet (1) oder aber in den Planungsprozess mit einbezogen wurde (2). Letzteres würde mit sieben neuen Standorten einen Standort mehr benötigen, wobei jedoch der Neubau von drei Plattformen eingespart werden könnte. Die geringste Standortzahl wurde mit einer Senderhöhe von 40 m erreicht (Vorschlag 3). Hier werden fünf neue Standorte benötigt, von denen nur drei die Errichtung eines neuen Fundamentes in der Nordsee erfordern würden, während die übrigen beiden Standorte an bereits vorhandener Infrastruktur installiert werden könnten.

Wegen ihrem großen Einfluss sollte die tatsächliche Senderhöhe in Abhängigkeit des Installationsortes in einem späteren Planungsprozess unbedingt beachtet werden. Außerdem könnten zukünftige Messkampagnen zur Stützung des sphärischen Ausbreitungsmodells oder zur Untersuchung des Wellengangeinflusses auf die Ausbreitungsdämpfung durchgeführt werden. In einer weiteren Untersuchung wäre es zudem denkbar, einen kostenoptimierten Vorschlag zu erarbeiten, der unter Kenntnis der Installationskosten (Nutzung vorhandener Infrastruktur) und den Kosten eines Neubaus die günstigste Lösung bestimmt, welche nicht unbedingt der Lösung mit der geringsten Standortzahl entsprechen muss.

6. Literaturverzeichnis

[1] Umweltbundesamt, „CORINE Land Cover (CLC) Stand: 2018," [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de.

[2] EEA, „European Environment Agency (EEA)," [Online]. Available: https://www.eea.europa.eu/. [Zugriff am 17 09 2020].

[3] T. Höpner, „Der ökologische Zustand der Deutschen Bucht und des Wattenmeeres," Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, Oldenburg, 1989.