

1. Einleitung

Im Zuge der Energiewende wird der Ausbau von erneuerbaren Energien immer weiter vorangetrieben. Im Jahre 2022 lag der elektrische Energiebedarf von Deutschland bei rund 485 TWh, der zu 48,3% aus erneuerbaren Energien gewonnen wurde. Hierbei wurden 25,9% aus Windenergie, 11,4% aus Photovoltaik, 8,2% aus Biomasse und 2,8% aus Wasserkraft und sonstige erneuerbare Energien gewonnen [1].

Bei der Windenergie wurden hierbei rund 25 TWh aus etwa 1.500 Offshore- und rund 100 TWh aus etwa 28.400 Onshore-Anlagen gewonnen [2, 3]. Um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen, muss die installierte Leistung von derzeit (Ende 2022) 58 GW bis 2030 auf 115 GW verdoppelt werden [4]. Somit ist abzusehen, dass in erheblichem Umfang weitere Flächen für die zu installierenden Windenergieanlagen (WEA) benötigt werden.

Die praktisch nutzbaren Flächen sind hierbei allerdings begrenzt. Zum Einen werden möglichst ertragreiche Flächen gesucht, zum Anderen müssen wiederum Schutzabstände zu verschiedenen Funkeinrichtungen wie Radaranlagen und Flugnavigationsanlagen eingehalten werden, die durch WEA potentiell gestört werden könnten. Zu Zeiten als es nur eine geringe Anzahl an WEA gab, wurden großzügige Schutzabstände zu allen Funkeinrichtungen definiert und eingehalten.

Da immer mehr Flächen für WEA benötigt werden, ist dieses Vorgehen jedoch nicht weiter möglich. Praktisch muss somit geprüft werden, in wieweit Schutzabstände zu Funkeinrichtungen eingehalten werden müssen, um auf der einen Seite einen ordnungsgemäßen Betrieb zu garantieren und auf der anderen Seite der Forderung nach mehr WEA gerecht zu werden.

Welche Mindestabstandsanforderungen tatsächlich sinnvoll sind, konnte in der Vergangenheit wissenschaftlich nicht ausreichend beantwortet werden, weshalb in den letzten Jahren eine Vielzahl von wissenschaftlichen Analysen im Bereich der Windenergie in Hinblick auf deren tatsächliche Störung auf verschiedene Funkdienste durchgeführt wurden.

Ende 2013 begann das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (heute Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)) geförderte Projekt „Wechselwirkung Windenergieanlagen und Radar/Navigation“ (WERAN), in dem die Auswirkung von WEA auf diverse Funkeinrichtungen wie Non-Directional Beacon (NDB), Very high frequency Omni-directional Range (VOR), Windprofiler, Wetterradar und Luftverteidigungsradar messtechnisch und teilweise simulative untersucht wurde.

An der Jade Hochschule wurde 2014 das Jade2Pro Programm zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses eingerichtet. In diesem wurden mehrere zehn Promotionsstellen geschaffen [5]. Auf einer dieser Promotionsstellen mit dem Thema „Einfluss von Windenergieanlagen auf die Radarsignale der Luftfahrt und des Wetterdienstes - Luftgestützte Messungen elektromagnetischer Felder“ hat sich der Autor beworben und 2016 seine Arbeit begonnen. In diesem Forschungsprojekt wurde vorrangig die Auswirkung von WEA auf

1. Einleitung

das C-Band (rund 6 GHz) Wetterradar untersucht. Bereits für dieses Projekt wurde eigene Messhardware in Form eines Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Radars entwickelt.

Im Projekt WERAN zeigte sich, dass insbesondere im Bereich der Flugnavigation weitere Untersuchungen durchgeführt werden müssen, wodurch das Folgeprojekt WERAN plus beantragt und bewilligt wurde. Auch dieses Projekt wird vom BMWi (heute BMWK) gefördert. In diesem Projekt wurde insbesondere das VOR System mathematisch, simulativ und messtechnisch untersucht um verbesserte Modellierungen zur Störabschätzung neu zu errichtender WEA zu entwickeln. Im Rahmen dieser Dissertation wurde insbesondere die Messtechnik, die im Rahmen des Jade2Pro Projekts entwickelt wurde, für die Bedürfnisse der VOR Vermessung erweitert. Die finale hochpräzise Messhardware wird hierbei im Forschungsflugzeug Jade One der Jade Hochschule eingesetzt.

1.1. Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Diese Arbeit befasst sich mit der luftgestützten messtechnischen Untersuchung von VOR Anlagen und unterteilt sich hierbei in sieben Kapitel sowie einem Anhang.

Im 1. Kapitel steht die Einleitung. Weiterhin wird der wissenschaftliche Stand der Technik hinsichtlich verwandter Untersuchungen mit Fokus auf Drehfunkfeuer und WEA betrachtet.

Im 2. Kapitel werden die Funktionsweise sowie die mathematische Signalbeschreibung von VOR Anlagen diskutiert. Hierbei wurden sowohl das Conventional VOR (CVOR) als auch das Doppler VOR (DVOR) beschrieben.

Im 3. Kapitel wird die Hardwareentwicklung diskutiert. Hierbei liegt insbesondere der Fokus auf den Themen Frequenzstabilität, Phasenrauschen und Dynamik. Herzstück der Hardware ist ein hochpräziser Global Positioning System Disciplined Oscillator (GPSDO).

Im 4. Kapitel werden Messflugmanöver sowie die daraus resultierenden Ergebnisse diskutiert. Die Messflugmanöver sind an die Manöver der regulären Flugvermessung angelehnt. Vorrangig werden Orbitalflüge analysiert.

Im 5. Kapitel wird eine Methode zur Verbesserung der AM-Phase (Referenzphase) beim DVOR vorgestellt. Die Verbesserung resultiert aus einer Frequenzteilung.

Im 6. Kapitel wird die Signalaufbereitung zur Vorbereitung für die Doppler-Kreuzpeilung diskutiert. Zu der Signalaufbereitung gehören eine Frequenzkorrektur mit den Signalen der Bodenstation, sowie eine Entfernungskorrektur.

Im 7. Kapitel wird die eigentliche Doppler-Kreuzpeilung diskutiert, die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt wurde. Hierbei wird insbesondere die FM-Demodulation durch Korrelation betrachtet. Final wird die Erstellung einer Clutter-Map erläutert. Als Ausblick wird die Weiterverarbeitung der Streuobjekte in einer analytischen Formel erläutert, um später Aussagen über neu zu errichtende Bauwerke zu treffen.

Im Anhang werden einige Zwischenrechnungen ausgeführt, sowie detailreiche Abbildungen in voller Seitengröße dargestellt.

1.2. Stand der Technik

Im Zuge der Energiewende müssen eine Vielzahl neuer WEA errichtet werden. Gleichzeitig sind die nutzbaren Flächen limitiert. Insbesondere beim Betrieb von Radar- und terrestrischen Flugnavigationseinrichtungen besteht die Befürchtung, dass WEA den ordnungsgemäßen Betrieb stören könnten, weshalb Schutzabstände von mehreren 10 km festgelegt wurden. Gleichzeitig sind die hierdurch blockierten Flächen potentiell lukrative Gebiete für WEA.

Um den sicheren Betrieb der o.g. Einrichtung auf der einen Seite sicher zu stellen und gleichzeitig auf den anderen Seite, Gebiete möglichst effizient für WEA nutzen zu können, wurden bereits in der Vergangenheit Untersuchungen mit verschiedensten Methodiken durchgeführt.

1.2.1. Gutachten und Stellungnahmen

Die Erforderlichkeit von fundierten wissenschaftlichen Analysen ist bereits daran zu erkennen, dass es eine Vielzahl von Gutachten und Stellungnahmen gibt, die sich mit dem Konflikt zwischen WEA und Radar- bzw. Flugnavigationseinrichtungen beschäftigt. Exemplarisch werden hierzu folgende Gutachten und Stellungnahmen betrachtet [6–10].

In [6] wird die potentielle Störwirkung von neu zu errichtenden WEA, in der Nähe des DVOR MIC in Michaelsdorf bei Rügen diskutiert. Dieses Gutachten stellt die bisherige Herangehensweise zur Winkelfehlerabschätzung neuer WEA, basierend auf stark vereinfachten Simulationen und einem stark vereinfachten Empfängermodell zur Abschätzung des Winkelfehlers massiv in Frage. Bereits hier zeigt sich, dass Messungen in der Praxis nötig sind, um den wahren resultierenden Winkelfehler abschätzen zu können.

In [7] werden Ergänzungen zu [6] diskutiert. Hier wird insbesondere auf die praktische Signalaufbereitung, die durch einen VOR-Decoder erfolgen, eingegangen. Hierzu wurden mit einem Messempfänger aufgezeichnete Signale exemplarisch mit schmalbandigen Filtern (2 Hz Bandbreite) prozessiert. Hier zeigt sich beispielsweise, dass die FM Komponente um rund 20 dB robuster gegenüber Rauschen und Umgebungseinflüssen ist als die AM-Komponente. Es zeigt sich, dass die Systemparameter der verwendeten Filter einen erheblichen Einfluss auf den Winkelfehler haben. Außerdem hat sich gezeigt, dass Bewuchs in unmittelbarer Nähe zum DVOR einen erheblichen Einfluss auf den Winkelfehler hat.

In [8] wird die von der Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) angewandte Methodeik zur Prognose möglicher Störungen durch WEA an DVOR in Frage gestellt. Es wird beispielsweise kritisiert, dass nur die FM-Komponente zur Winkelfehlerabschätzung genutzt wird und nicht das komplette vom DVOR abgestrahlte Signal. Auch wird kritisiert, dass beispielsweise Einschwingzeiten von realen VOR-Empfängern nicht mit berücksichtigt werden. In diesem Gutachten wird auf Forschungsarbeiten verwiesen, die mit skalierten Modellen arbeiten. Skaliert bedeutet, dass die Umgebung, das DVOR und WEA in der Größe, in einem gewissen Maßstab, kleiner skaliert werden. Außerdem wird die Frequenz in gleichem Maße hochskaliert, um übertragbare Ergebnisse zu erzielen. Somit kann auf kleinem Raum eine messtechnische Untersuchung eines Szenarios durchgeführt werden. Auch hier zeigt sich, dass praktische Messungen erforderlich sind.

In [9] wird die Störwirkung von Sieben zu errichtenden Gebäuden auf militärische Radare und zivile Luftfahrnavigationseinrichtungen wie DVOR untersucht. Die zu errichtenden Gebäude haben eine Höhe von bis zu 90 m. In diesem Gutachten wird die Störwirkung

1. Einleitung

mittels numerischer Simulationen untersucht und bewertet. Die zu errichtenden Gebäude haben eine Entfernung von knapp 10 km zum DVOR TXL¹ und eine Entfernung von 18 km zum DVOR BBI. Laut diesem Gutachten sind Störungen der Navigationssysteme DVOR TXL (Berlin Tegel) und DVOR BBI (Berlin-Brandenburg) nicht zu erwarten. Als Grund wird insbesondere die große Entfernung von knapp 10 km bzw. 18 km angeführt.

In [10] wird die von der DFS angewandte Prognosemethode DFSPM kritisch hinterfragt. Es wird darauf verwiesen, dass bei der Bewertung durch die DFSPM massive Vereinfachungen getroffen werden. Diese Vereinfachungen äußern sich laut [10] durch Vernachlässigung und Vereinfachung fundamentaler Parameter. Ferner wird darauf verwiesen, dass die DFSPM, bedingt durch die massiven Vereinfachungen, für Gutachten hinsichtlich neu zu errichtender WEA ungeeignet ist. Es wird darauf verwiesen, dass Windparks in Deutschland bedingt durch die DFSPM Bewertung nicht genehmigt werden, wohingegen vergleichbare Windparks international genehmigt werden und operationell im Einsatz sind, ohne dass es zu unzulässigen Beeinflussungen der DVOR Navigation kommt.

1.2.2. Elektromagnetische Feldsimulationen

Um die wahre Störwirkung von WEA zu untersuchen, werden in [11–14] Untersuchungen basierend auf elektromagnetischen Feldsimulationen durchgeführt. Vorteil gegenüber Messungen ist, dass neu zu errichtende Bauwerke bereits vor der Errichtung untersucht werden können. Da die Simulationen auf den elektromagnetischen Feldausbreitungsmodellen basieren, liegen die Ergebnisse dicht an den realen Messungen. In der Praxis entstehen Einschränkungen nur dadurch, dass wahre Materialparameter wie Leitfähigkeit, Permeabilität und Primitivität nur unzureichend bekannt sind und dass in der Regel nur ein räumlich begrenztes Gebiet simuliert werden kann.

In [11] wird anhand eines exemplarischen Streuszenarios gezeigt, wie sich der Winkelfehler im Raum ausbreitet. Hierbei wird stets angenommen, dass sich der VOR-Empfänger nicht bewegt, sodass nur der statische Winkelfehler berücksichtigt wird.

In [12] werden die Simulationsergebnisse genutzt, um den Winkelfehler anhand verschiedener mathematischer Modelle zu addieren. Hier zeigt sich beispielsweise, dass eine lineare Addition der Winkelfehler zu einer massiven Überschätzung des Gesamtwinkelfehlers führt. Wird hingegen eine quadratische Addition der Winkelfehlerbeiträge durchgeführt, so entspricht der Gesamtwinkelfehler wesentlich genauer dem Gesamtwinkelfehler, basierend auf Messungen.

In [13] wird der Effekt realer Umgebung diskutiert. In der Praxis ist hier insbesondere das Problem, dass ein Gebiet bezogen auf die Wellenlänge mehrere tausend Wellenlängen groß ist, wodurch enorm viel Speicher und Rechenzeit benötigt wird, sodass Vereinfachungen durchgeführt werden müssen. Gleichzeitig dürfen diese Vereinfachungen wiederum nicht dazu führen, dass das Endergebnis unzulässig stark verfälscht werden. Auch zeigt sich, dass reale Umgebungseinflüsse mit modelliert werden müssen, um realitätsgetreue Ergebnisse zu erlangen. Zur Validierung dieser Ergebnisse sind immer Messungen in realer Umgebung erforderlich.

¹Dieses DVOR ist nicht mehr in Betrieb.

1.2.3. Mathematische Beschreibung

Um die Störwirkung mehrerer einzelner Streuobjekte zusammenfassen zu können, ist eine mathematische Beschreibung zur Überlagerung der einzelnen Winkelfehlerbeiträge erforderlich, um den Gesamtwinkelfehler zu erhalten. Hierzu wurden in [15–17] Modellierungen entwickelt und untersucht.

Eine sehr umfangreiche Untersuchung wird in [16] durchgeführt. Hier wird eine makroskopische Beschreibung von WEA diskutiert, sowie die in [17] vorgeschlagene Formel zur Winkelfehlerberechnung untersucht. Ferner werden Charakteristiken realer VOR-Empfänger analysiert. Hier zeigt sich, dass die Filter eines realen VOR-Empfängers einen erheblichen Einfluss auf den gemessenen Winkelfehler haben.

1.2.4. Skalierte Modelle

Ein weiterer Ansatz besteht darin, Messtechnisch ein in der Größe skaliertes Modell von DVOR, WEA und weiterer Umgebung zu verwenden. Derartige Untersuchungen werden in [18–20] durchgeführt. Vorteil dieser Methodik ist, dass Untersuchungen in kleinem Maßstab durchgeführt werden können, ohne dass kostenintensive Messflugzeuge in realer Messumgebung benötigt werden. Auch können leicht Änderungen an dem vorhandenen Szenario durchgeführt werden.

Somit können relativ einfach verschiedene Messszenarien nachgebildet werden. Auch können leicht Extremsituationen wie bspw. eine WEA in 50 m Entfernung (bezogen auf das reale Szenario) zum DVOR untersucht werden. Solche Untersuchungen sind in der Praxis am realen Objekt wirtschaftlich bedingt praktisch nicht möglich.

Die Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen skaliertem und realem Szenario steht und fällt damit, inwieweit das reale Szenario detailgetreu nachgebildet wird.

1.2.5. Messung mit Drohnen

Bei den zuvor beschriebenen Analyseansätzen wird sowohl die Umgebung als auch die Streuobjekte selbst mitunter stark vereinfacht. In der Praxis stellt sich die Frage, inwieweit die Vereinfachungen zulässig sind, ohne dass die Ergebnisse unzulässig stark von den Ergebnissen der Messungen an realen Anlagen abweichen.

In [21, 22] werden Messungen mit Drohnen durchgeführt und die Ergebnisse analysiert. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass Messungen in realer Umgebungen durchgeführt werden. Auch sind die Betriebskosten verglichen zu einem Vermessungsflugzeug relativ gering. Zudem können Messungen an festen Positionen durchgeführt werden, da die Messdrohne an einem festen Punkt im Raum „geparkt“ werden kann. Auch können Messungen in unmittelbarer Nähe zu WEA (wenige 10 m) durchgeführt werden, was mit Flugzeugen nicht möglich ist.

Nachteil dieser Methode ist, dass bedingt durch die geringe Flugzeit von 10 min bis 15 min nur Messungen in einem räumlich kleinen Gebt (bis ca. 1 km) durchgeführt werden können.

1.2.6. Messungen mit der Forschungsflugzeug der Jade Hochschule

Die im Rahmen dieser Dissertation vorgestellten Messungen und Messverfahren basieren auf den Messungen, die mit dem Forschungsflugzeug Jade One der Jade Hochschule durchgeführt wurden. Als bahnbrechende Neuerung wird das Doppler-Kreuzpeilverfahren in Kapitel 7 vorgestellt. Mit diesem Verfahren ist es erstmals möglich, anhand des vom DVOR ausgesendeten Signals Streuobjekte zu orten und zu klassifizieren.

2. Grundlagen

In der Flugnavigation wird u.a. das VOR-System genutzt. VOR basiert auf einer richtungsabhängigen Funkübertragung. Anhand des Empfangssignals kann der Flugzeugempfänger die Richtung ausgehend vom VOR bestimmen. In diesem Kapitel wird die Funktionsweise basierend auf systemtheoretischen Überlegungen erläutert, sowie die technische Spezifikation von VOR Sendern aufgelistet.

2.1. Funktionsweise eines VOR

In der Luftfahrt wird VOR zur Navigation eingesetzt. Dieses System arbeitet im Very High Frequency (VHF) Bereich zwischen 108 MHz und 117,975 MHz [23]. Sendeseitig wird ein Signal erzeugt, anhand dessen ein VOR-Empfänger in der Lage ist, die Richtung (Radial) aus Sicht des VOR-Senders zu bestimmen. Da zunächst keine Entfernungsinformation im VOR-Signal enthalten ist, kann anhand eines einzigen VOR-Senders die Position zunächst nicht bestimmt werden, weshalb häufig Distance Measuring Equipment (DME) an VOR-Sendestandorten mit installiert ist, welches basierend auf Laufzeitmessungen die Entfernung zwischen VOR-Sender und Flugzeug bestimmen kann. Sollte kein DME am VOR-Sendestandort installiert sein, so wird mindestens ein zweiter VOR-Sender benötigt, um anhand einer Kreuzpeilung die Position zu bestimmen.

Um anhand der Aussendung eines VOR-Senders die radiale Information bestimmen zu können, ist eine geeignete Modulation erforderlich. Bei VOR-Sendern wird zwischen Conventional Very high frequency Omni-directional Range (CVOR) und Doppler Very high frequency Omni-directional Range (DVOR) unterschieden. Erstgenanntes ist eine ältere Bauart, die immer mehr durch die weiterentwickelte Variante DVOR abgelöst wird. Der entscheidende Unterschied für den VOR Nutzer ist, dass DVOR-Anlagen bauartbedingt genauere radiale Richtungsinformationen liefern. Technisch gesehen sind DVOR-Anlagen dafür allerdings aufwendiger als CVOR-Anlagen.

2.1.1. Signalstruktur eines VOR

Die Aussendung von CVOR-Sendern lässt sich gemäß Gleichung 2.1 und jene von DVOR-Sendern gemäß Gleichung 2.3 beschreiben. In beiden Gleichungen beschreiben die Terme A_{VOR} die Amplitude und damit die Sendeleistung und f_t die Trägerfrequenz des VOR. Diese Parameter genügen den Werten aus Tabelle 2.1. CVOR und DVOR unterscheiden sich nur in ihrem Basisbandsignal gemäß Gleichung 2.2 für das CVOR bzw. gemäß Gleichung 2.4 für das DVOR.

Beide Basisbänder sind so strukturiert, dass sie sendeseitig einer Amplitudenmodulation mit Träger entsprechen, die empfangsseitig mit einem Hüllkurvendetektor (inkohärente Demodulation) demoduliert werden kann. Für die inkohärente Demodulierbarkeit muss allerdings sichergestellt werden, dass der AM-Modulationsgrad $m_{VOR,max} < 100\%$ ist, was dadurch

2. Grundlagen

sichergestellt wird, dass zu jedem Zeitpunkt $x_{B,CVOR}(t, \Theta) > 0$ bzw. $x_{B,DVOR}(t, \Theta) > 0$ ist.

CVOR Signalstruktur

$$x_{CVOR}(t, \Theta) = A_{VOR} \cdot \cos(2\pi f_t t) x_{B,CVOR}(t, \Theta) \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} x_{B,CVOR}(t, \Theta) = & 1 \\ & + 0,3 \cos(\underbrace{2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t - \Theta}_{\phi_{C,AM}(t)}) \\ & + 0,3 \cos(2\pi 1020 \text{ Hz} \cdot t) f_{Morse}(t) \\ & + 0,3 \cos(2\pi 9960 \text{ Hz} \cdot t + \eta \cdot \sin(\underbrace{2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t}_{\phi_{C,FM}(t)})) \end{aligned} \quad (2.2)$$

DVOR Signalstruktur

$$x_{DVOR}(t, \Theta) = A_{VOR} \cdot \cos(2\pi f_t t) x_{B,DVOR}(t, \Theta) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} x_{B,DVOR}(t, \Theta) = & 1 \\ & + 0,3 \cos(\underbrace{2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t}_{\phi_{D,AM}(t)}) \\ & + 0,3 \cos(2\pi 1020 \text{ Hz} \cdot t) f_{Morse}(t) \\ & + 0,3 \cos(2\pi 9960 \text{ Hz} \cdot t + \eta \cdot \sin(\underbrace{2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t + \Theta}_{\phi_{D,FM}(t)})) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Die vier Summanden in Gleichung 2.2 bzw. Gleichung 2.4 sind wie folgt zu interpretieren. Die erste Eins beschreibt den Träger, der zweite Term beschreibt eine 30 Hz AM-Modulation, der dritte beschreibt die Kennung (Identifier) des VOR, die häufig in Morse-telegraphie ausgesendet¹ wird, und der vierte Term beschreibt einen FM-modulierten Hilfsträger, der mit ± 9960 Hz zu f_t seinerseits ebenfalls mit 30 Hz moduliert ist. Die Faktoren von 0,3 vor den jeweiligen Cosinus-Termen sind so gewählt, dass sie zusammen mit der ersten Eins gemäß Gleichung 2.5 einen maximalen AM-Modulationsgrad von $m_{VOR,max} = 0,9$ ergeben. Das Morsesignal $f_{Morse}(t)$ schaltet hierbei zwischen Null und Eins um, sodass die gewünschte Morsesequenz ausgesendet wird. Zur besseren Interpretierbarkeit ist das Betragsspektrum eines VOR nochmals graphisch in Abbildung 2.1 dargestellt. Durch die AM-Modulation treten alle Signalkomponenten symmetrisch zur Trägerfrequenz auf.

¹Einige VOR-Anlagen senden ihre Kennung als Sprachsignal, hier wird der Bereich von $f_t \pm (300$ bis $3300)$ Hz genutzt.

$$\begin{aligned}
A_{VOR,max} &= 1 + 3 \cdot 0,3 = 1,9 \\
A_{VOR,min} &= 1 - 3 \cdot 0,3 = 0,1 \\
m_{VOR,max} &= \frac{A_{VOR,max} - A_{VOR,min}}{A_{VOR,max} + A_{VOR,min}} = \frac{1,9 - 0,1}{1,9 + 0,1} = \underline{0,9}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Tabelle 2.1.: Systemparameter von VOR-Sendern [23].

Parameter	Wert
Frequenzbereich	108 MHz bis 117,975 MHz
Modulation	Amplitudenmodulation mit frequenzmoduliertem Hilfsträger
Polarisation	Horizontal
Sendeleistung	ca. 100 W
Reichweite	25 NM bis 130 NM (rund 45 km bis 240 km)

2.1.2. Radialbestimmung anhand der Aussendung eines VOR

Für die Flugnavigation sind 30 Hz AM-Komponente und 30 Hz FM-Komponente, die auf den 9960 Hz Hilfsträger aufmoduliert ist, relevant. Unabhängig von der Art des VOR wird immer eine Komponente omnidirektional (in alle Raumrichtungen gleich) und die jeweils andere abhängig vom Radial Θ abgestrahlt. Die Richtungsabhängigkeit der jeweiligen 30 Hz Komponente äußert sich in einem radialabhängigen Phasenoffset. Beim CVOR ist die Radialinformation Θ gemäß Gleichung 2.2 in die 30 Hz AM-Komponente kodiert, während sie beim DVOR gemäß Gleichung 2.4 in die 30 Hz FM-Komponente kodiert ist. Bei der richtungsabhängigen 30 Hz Komponente haben CVOR und DVOR verschiedene Vorzeichen im Θ Term. Dieser Unterschied im Vorzeichen wurde explizit so gewählt, damit die Richtungsinformation von CVOR und DVOR auf gleiche Art und Weise ausgewertet werden kann. Zur Radialbestimmung wertet ein VOR-Empfänger immer die Phasendifferenz FM-Phase - AM-Phase aus. Gemäß Gleichung 2.6 liefert diese Operation in beiden Fällen die Radialinformation Θ .

$$\begin{aligned}
\phi_{C,FM}(t) - \phi_{C,AM}(t) &= (2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t) - (2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t - \Theta) = \Theta \\
\phi_{D,FM}(t) - \phi_{D,AM}(t) &= (2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t + \Theta) - (2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t) = \Theta
\end{aligned} \tag{2.6}$$

2.1.3. Diskretes Linienspektrum mit 30 Hz Grundfrequenz

Der Modulationsindex des FM-modulierten Hilfsträgers beträgt $\eta = 16$, woraus sich unter Berücksichtigung der 30 Hz Modulationsfrequenz ein Frequenzhub von ± 480 Hz ergibt. Alle Komponenten des Basisbands sind ganzzahlige Vielfache von 30 Hz ($1020 \text{ Hz} = 34 \cdot 30 \text{ Hz}$ und $9960 \text{ Hz} = 332 \cdot 30 \text{ Hz}$), weshalb sich eine Grundperiodendauer von $T_{P,VOR} = (30 \text{ Hz})^{-1}$ ergibt². Jedes periodische Signal lässt sich als Fourierreihe darstellen. Somit lässt sich auch

²Diese Annahme gilt empfangsseitig strenggenommen nur dann, wenn sich der Empfangsort über die Zeit nicht ändert und $f_{Morse}(t)$ konstant ist.

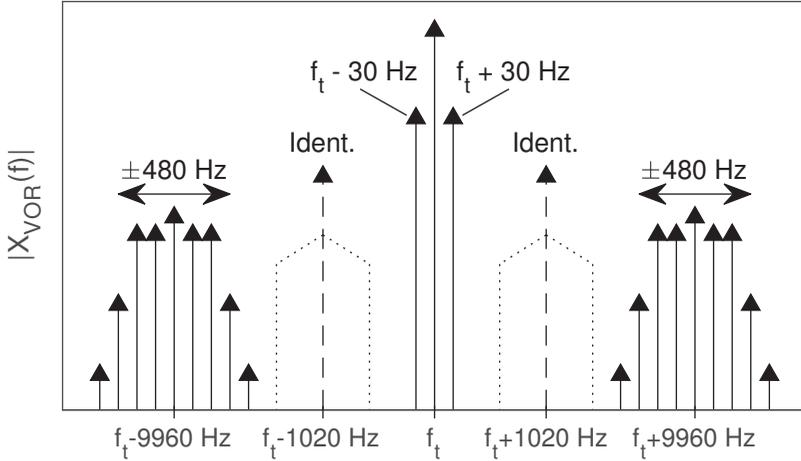


Abbildung 2.1.: Betragsspektrum eines VOR-Signals (Darstellung angelehnt an [23], nicht maßstabsgerecht)

das gesamte Basisbandspektrum eines VOR, mit einer Grundschiwingung von 30 Hz, als Fourierreihe darstellen.

FM-Komponente als Besselspektrum

Für die FM-Komponente eines DVOR ergeben sich die diskreten Frequenzlinien gemäß Gleichung 2.7. $J_k(\eta)$ sind hierbei Besselfunktionen erster Art. Mathematisch erstreckt sich diese Reihe von $-\infty$ bis $+\infty$, praktisch kann diese Reihe jedoch nach endlich vielen Elementen abgebrochen werden. Sollen beispielsweise nur Terme berücksichtigt werden, für die $20\lg|J_k(\eta)| \geq -60$ dB gelten, so erstreckt sich diese Reihe nur noch von $k = -23$ bis $+23$.

$$\begin{aligned} \cos(2\pi 9960 \text{ Hz} \cdot t + \eta \cdot \sin(2\pi 30 \text{ Hz} \cdot t + \Theta)) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\eta) \cos(2\pi 30 \text{ Hz}(332 + k)t + k \cdot \Theta) \\ &\approx \sum_{k=-23}^{+23} J_k(\eta) \cos(2\pi 30 \text{ Hz}(332 + k)t + k \cdot \Theta) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Die Darstellung eines VOR-Signals als diskretes Linienspektrum ist für die Analyse in Kapitel 7 insbesondere für das DVOR entscheidend, weshalb jenes hier näher untersucht wird. Ferner werden Morsesequenz bzw. Audiomodulation für die hier vorgestellten Untersuchungen nicht benötigt. Somit lässt sich das DVOR Basisbandspektrum gemäß Gleichung 2.4 vereinfachen zu Gleichung 2.8. In der zweiten Zeile von Gleichung 2.8 ist zudem das Basisbandsignal als Summe von Kosinustermen ausgedrückt, wobei jeder Kosinusterm einer