

1 Einleitung

Navigationssysteme übertragen Information von einem Sender, der auch stationär sein kann, zu einem beweglichen Empfänger. Im Gegensatz zu Telekommunikationssystemen, wo es nur auf eine Mindestqualität der Übertragungsverbindung ankommt, sind bei Navigationssystemen zusätzlich die Auflösung und Genauigkeit am Empfangsort entscheidend.

Die Navigationsinformation kann durch verschiedene Störeinflüsse verfälscht werden. Zum einen muss der Sender die Navigationssignale korrekt generieren und abstrahlen und der Empfänger diese entsprechend verarbeiten. Diese Funktionsfähigkeit der Anlagen wird durch regelmäßige Wartung sichergestellt und kann daher mit spezifizierten Fehlertoleranzen gut kontrolliert werden.

Zum anderen darf das Signal auf der Übertragungstrecke nicht unzulässig beeinflusst werden. Die Charakterisierung des Übertragungsverhaltens ist eine kompliziertere Fragestellung, und die vorliegende Arbeit widmet sich genau dieser Problematik. Dazu wird ein geeignetes Messsystem entwickelt, um eine effiziente Untersuchung der Übertragungstrecke zu ermöglichen. Solche Messsysteme werden als Channel Sounder bezeichnet. Dabei ist nicht nur das Maß der Übertragung, also die Kanaldämpfung, zu bestimmen, sondern darüber hinaus alle weiteren Parametereinflüsse auf die Navigationsinformation. Die Mehrwegeausbreitung ist hierbei eine wesentliche Fehlerquelle, da in diesem Fall Navigationsinformation zum Empfänger gelangt, die für diesen gar nicht bestimmt ist. Ein Beispielszenario hierfür ist in der Avionik beim Instrumentenlandesystem (ILS) bekannt, nämlich wenn Flugzeuge auf Rollbahnen ungewollte Streuobjekte darstellen.

Ein weiteres, sehr relevantes Beispiel ist durch den zunehmenden Ausbau der landbasierten Windenergieerzeugung gegeben. Die Windenergieanlagen führen durch das Reflexionsvermögen ihrer drehenden Blätter zu zeitvarianten, unerwünschten Multipfadausbreitungen von Navigationssignalen. Insbesondere ist der Einfluss auf das Drehfunkfeuersystem (VHF Omnidirectional Radio Range: VOR) für die Streckennavigation von Flugzeugen ungenügend analysiert.

Hierbei sind auch zeitvariante Effekte zu betrachten, da diese zusätzliche Frequenzkomponenten im Spektrum durch Amplitudenmodulation und Doppler-Effekt hervorrufen können. Da das Nutzsignal auch Modulationen verwendet, entsteht eine Kombination aus den gewollten und ungewollten Modulationen, die in Folge von Resonanzeffekten ggf. auch zu sehr großen Fehlern führen können.

Im Vordergrund der Untersuchung stehen deshalb die beiden schon genannten Navigationssysteme der Luftfahrt: das ILS und das VOR. Beide benutzen einen ähnlichen Frequenzbereich um 110 MHz. Da reale Messungen zu aufwändig und/oder unmöglich sind, falls die Störobjekte noch nicht existieren, wird auf eine skalierte Messumgebung im Maßstab 1:144 zurückgegriffen [Geise 2010]. Ein Beispiel für noch nicht existierende Störobjekte sind geplante Windenergieanlagen. Der Fokus liegt dabei insbesondere für das VOR nicht auf einer integralen Erfassung des gesamten Streuszenarios, sondern auf der isolierten Betrachtung eines Streuobjektes wie einer Windenergieanlage.

Eine Anforderung an den entwickelten Channel Sounder ist ein kompakter und leichter Aufbau, so dass eine einfache Positionsveränderung des Empfängers innerhalb verschiedener skalierten Szenarien ermöglicht wird. Weitere damit verbundene Anforderungen sind eine Spannungsversorgung durch Akkus und der Verzicht auf Kabelverbindungen zwischen Sender und Empfänger. Der Channel Sounder wird auf die nachzubildenden Navigationssysteme optimiert. Das bedeutet, dass es nur erforderlich ist, die Übertragungseigenschaften des Kanals zu bestimmen, die für eine Beurteilung der Verfälschungen der Navigationsinformation durch die Streuobjekte notwendig sind. Dabei wird berücksichtigt, dass sowohl das ILS als auch das VOR nur eine geringe Bandbreite besitzen. Daher kann die Vermessung des Übertragungskanals mit einer einzigen, unmodulierten Frequenz (Continuous

Wave: CW) erfolgen, sodass der Hardwareaufwand für Sender und Empfänger erheblich verringert wird.

Die beiden genannten Navigationssysteme besitzen sendeseitig eine richtungsabhängige Navigationsinformation. Daher ist es erforderlich, bei der Vermessung des Übertragungskanals unterschiedliche Raumrichtungen getrennt zu erfassen, z. B. eine in Ausbreitungsrichtung zu einem Streuobjekt wie einer skalierten Windenergieanlage. Eine weitere Ausbreitungsrichtung ist für den direkten Pfad zum Empfänger vorzusehen. Aus dem Verhältnis der Empfangsleistungen und ggf. weiteren Eigenschaften der Empfangssignale, wie z. B. Amplitudenmodulationen, verursacht durch eine sich drehende Windenergieanlage, lassen sich Rückschlüsse auf die Verfälschung der Navigationsinformation ziehen.

Die Vermessung der Kanaleigenschaften für unterschiedliche Ausbreitungswege erfolgt nacheinander. Durch Hinzufügen von Pausen in einem charakteristischen Puls-Pausen-Muster wird eine empfangsseitige Zuordnung der aktiven Sendeantenne ohne die Übertragung von zusätzlichen Synchronisationssignalen ermöglicht. Damit entfällt der Aufwand zur Bereitstellung und empfangsseitigen Verarbeitung dieser Synchronisationssignale. Für diese Zuordnung allein aus dem Verlauf des Empfangssignals werden entsprechende Auswertungsalgorithmen dargestellt. Eine Herausforderung ist dabei, eine Zuordnung auch dann zu ermöglichen, wenn die Signale von einigen Sendeantennen zeitweise nicht empfangen werden.

Strukturierung der Arbeit

In Kapitel 2 werden zunächst die Anforderungen an den neu entwickelten Channel Sounder von den zu bestimmenden Charakteristika des Übertragungsweges abgeleitet. Diese werden mit dem Stand der Technik bei anderen Channel Soundern verglichen, um danach das Grundkonzept des neu entwickelten Channel Sounders zu beschreiben. Eine der Anforderungen ist es, Doppler-Verschiebungen in Folge von bewegten Objekten zu messen. Ergänzend wird daher unter Berücksichtigung der zwei Ausbreitungswege vom Störobjekt zum Sender und Empfänger eine grundlegende analytische Bestimmung der Doppler-Verschiebungen dargestellt.

Im dritten Kapitel erfolgt die Betrachtung von zwei Algorithmen zur Zuordnung der Signalanteile vom Empfangssignal zu den verschiedenen Sendeantennen. Dargestellt werden auch die Vor- und Nachteile insbesondere unter nichtidealen Empfangsbedingungen.

Das vierte Kapitel behandelt das grundsätzliche Hardwarekonzept des entwickelten Channel Sounders. Da Sender und Empfänger nicht miteinander synchronisiert sind, ist eine unterschiedliche Drift der Lokaloszillatoren kritisch. Daher wird die Auswirkung des Drifteffektes auf die Genauigkeit von Messungen der Doppler-Verschiebung betrachtet und Maßnahmen zur Verringerung der Drift untersucht. Außerdem werden Fragestellungen wie die Auswirkung von nicht ideal entkoppelten Hochfrequenzschaltern sowie die Aufstellung eines Linkbudgets dargestellt.

Kapitel 5 betrachtet das skalierte Instrumentenlandesystem als Anwendungsbeispiel für den Channel Sounder für ein statisches Mehrwegeszenario. Dabei werden Fragestellungen wie eine exakte Antennenausrichtung und die Herauskalibrierung von Umgebungseffekten näher untersucht.

Im sechsten Kapitel wird ein zeitvarianter Übertragungskanal, verursacht durch eine sich drehende Windenergieanlage, analysiert. Der Schwerpunkt der Untersuchung ist die Auswirkung der durch die Drehung bedingten Modulation im Übertragungskanal auf den Winkelfehler des VOR. Dazu werden die mit CW vermessenen zeitvarianten Kanaleigenschaften auf die amplitudenmodulierte Komponente des VOR rechnerisch beaufschlagt unter Berücksichtigung realer Empfängereigenschaften. Zusätzlich erfolgt eine messtechnische Validierung.

Die Ergebnisse werden in Kapitel 7 inklusive eines Ausblicks auf weiteren Forschungsbedarf zusammengefasst.

In Abbildung 1 werden die entscheidenden Teilfragestellungen beim Entwurf des Channel Sounders strukturiert mit den dazugehörigen Lösungsmöglichkeiten aufgelistet.

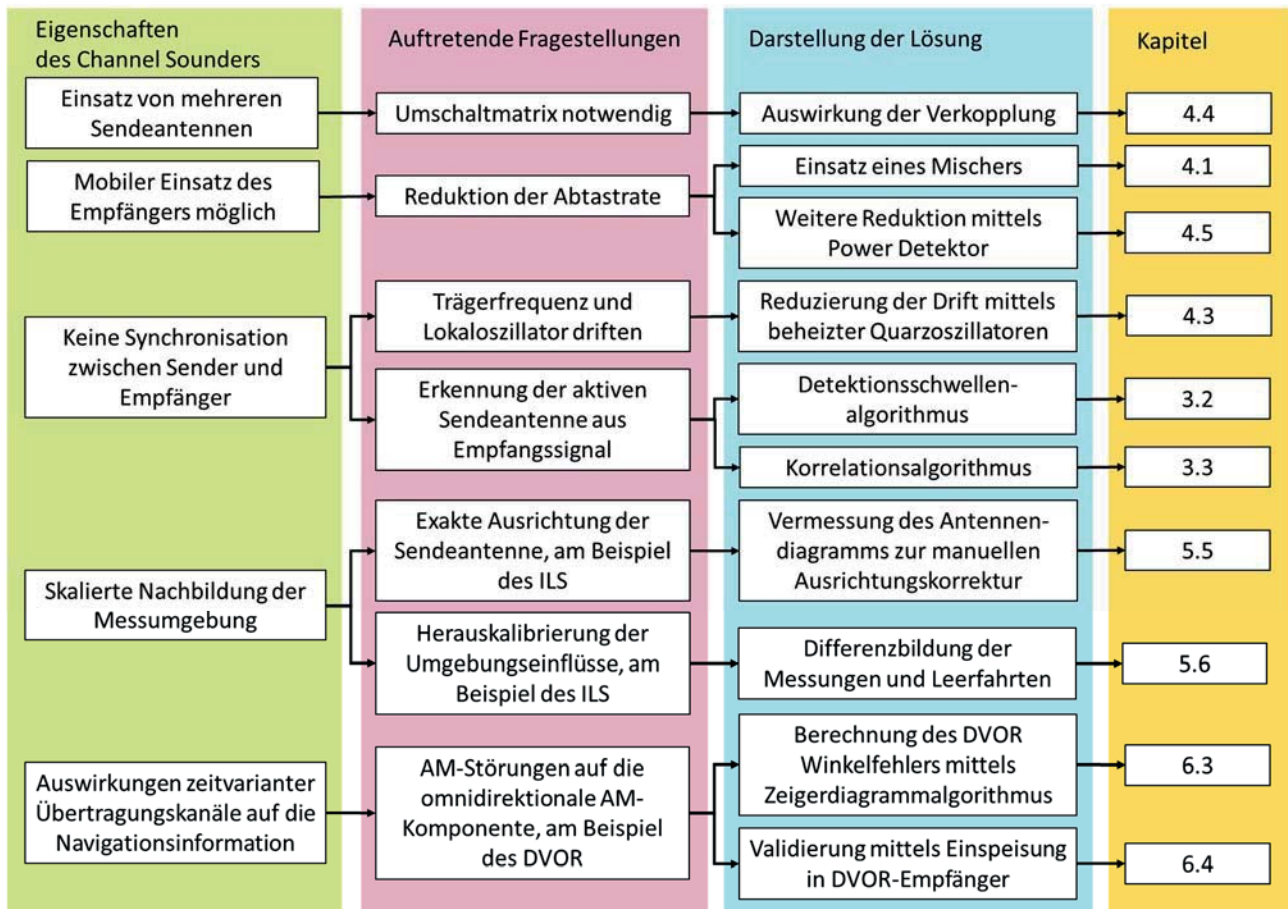


Abbildung 1: Strukturierung der Untersuchungen bzgl. des Channel Sounders.



2 Grundlagen

2.1 Channel Sounding

2.1.1 Ziel des Channel Soundings

Für eine erfolgreiche drahtlose Übertragung von Informationen zwischen zwei Kommunikationspartnern ist es notwendig, die Übertragungseigenschaften des Funkkanals zu charakterisieren, damit der Erfolg der Kommunikation bewertet werden kann. Hierzu dient ein sogenannter Channel Sounder, der an den verwendeten Frequenzbereich und die Art der Übertragung des Nutzsignals angepasst sein muss. Verschiedene Kanaleigenschaften können dabei betrachtet werden. Beispiele hierfür sind Kanalkapazität, Leistungsübertragungsbilanz oder Energieverzögerungsprofil.

Für die Luftfahrt ist eine genaue Positionsbestimmung von essentieller Bedeutung. Um die Position eines Luftfahrzeugs auch bei schlechten Sichtbedingungen verlässlich zu ermöglichen, werden funkbasierte Navigationssysteme eingesetzt.

Bei Navigationssystemen wertet der Empfänger ein von seiner Position und/oder Ausrichtung abhängiges Signal aus. Dabei müssen zwei Arten von Systemen unterschieden werden.

Zum einen gibt es omnidirektionale Sender, die unabhängig von der Raumrichtung das gleiche Signal abstrahlen. Ein Beispiel hierfür ist das Luftverkehrsnavigationssystem Non Directional Beacon (NDB), welches ein omnidirektionales, vertikal polarisiertes Navigationssignal abstrahlt. Das Gewinnen der Ortungsinformation erfolgt mit dem Radiokompass, der eine direktive Empfangsantenne besitzt. Eine drehbare Rahmenantenne wird dabei so lange rotiert, bis die minimale Empfangsleistung erreicht wird. Senkrecht zur Flächennormalen der Antenne befindet sich dann das NDB. Mit zwei dieser Systeme ist eine Positionsbestimmung mit der Methode der Kreuzpeilung möglich [Mansfeld 1994, S. 152–159]. Eine Ausnahme ist dabei der Fall, wenn der Empfänger sich auf der Geraden befindet, die durch beide Sendeanlagen geht.

Liegt mindestens ein indirekter Pfad, beispielsweise über ein Streuobjekt, zusätzlich zum direkten Pfad vor, wird von Mehrwegeausbreitung gesprochen. Bei einer solchen Mehrwegeausbreitung erreicht das Signal vom indirekten Pfad den Empfänger mit einer Winkelabweichung von α_2 (grüner Fall in Abbildung 2). Mit der Überlagerung aus dem direkten Pfad ergibt sich so ein Winkelfehler bzgl. der Positionsbestimmung.

Zum anderen gibt es Navigationssysteme, bei denen der Sender eine vom Empfangsort abhängige Information sendet. Zu dieser Kategorie gehören das Instrumentenlandesystem (ILS) und das Drehfunkfeuersystem (VHF Omnidirectional Radio Range: VOR). Diese senden Signale mit unterschiedlichen Informationen in verschiedene Raumrichtungen, um Empfängern eine entsprechende Navigationsinformation zu übermitteln. Diese Systeme sind ebenfalls für Mehrwegeausbreitung anfällig, da der Empfänger dann neben dem Signal des direkten Pfades das Signal des indirekten Pfades empfängt. Letzteres Signal wird mit einem Winkelunterschied von α_1 , verglichen mit dem direkten Pfad, abgestrahlt. Damit enthält das indirekte die zu einer anderen Raumrichtung gehörende Navigationsinformation (in Abbildung 2 mit Navigationsinformation 2 bezeichnet). Die Überlagerung dieses Signals mit dem des direkten Pfades (Navigationsinformation 1) führt daher empfangsseitig ebenfalls zu einer Verfälschung der Navigationsinformation gegenüber einer idealen Übertragung. Diese Übertragung im Fall der Mehrwegeausbreitung kann daher als MISO (MISO steht für „Multiple Input Single Output“, d. h. mehrere Eingänge in das System und ein Ausgang) charakterisiert werden.

Sowohl das ILS als auch das VOR verwenden analoge Modulationen zur Übertragung der Navigationsinformation. Analoge Modulationen können insbesondere durch bewegliche Streuobjekte gestört werden, da dies zu einer zeitvarianten Kanaldämpfung und ggf. zu Doppler-Verschiebungen der Übertragungsfrequenzen führt. Ein Beispiel für so ein Streuobjekt ist eine sich drehende Windenergieanlage. Grund ist, dass diese Bewegung somit zu einer zusätzlichen Modulation des Signals führt und so weitere Seitenbänder erzeugt werden. Diese zusätzlichen Seitenbänder können sich mit den Seitenbändern der analogen Modulation des Navigationssignals überlagern. Nach der empfangsseitigen Demodulation kann daher eine fehlerbehaftete Navigationsinformation entstehen. Für eine theoretische Betrachtung bzgl. der AM des VOR sei auf Kapitel 6 verwiesen. Diese Art der Verfälschung kann selbst bei gleichen Ausbreitungsrichtungen, also $\alpha_1 = 0$, vorkommen, beispielsweise, wenn eine sich drehende Windenergieanlage auf der direkten Verbindung zwischen Sender und Empfänger positioniert ist. Aus diesen Gründen ist es erforderlich, dass der Channel Sounder auch für die Charakterisierung derartiger zeitvarianter Übertragungskanäle geeignet ist.

Daher ist das Ziel eines Channel Sounders bei der Untersuchung von Ausbreitungsbedingungen, solche Mehrwegeszenarien zu erkennen und hinsichtlich kritischer Verfälschungen der Navigationsinformation zu untersuchen. Dabei werden die Eigenschaften bestimmt, die sie vom direkten Ausbreitungsweg unterscheiden.

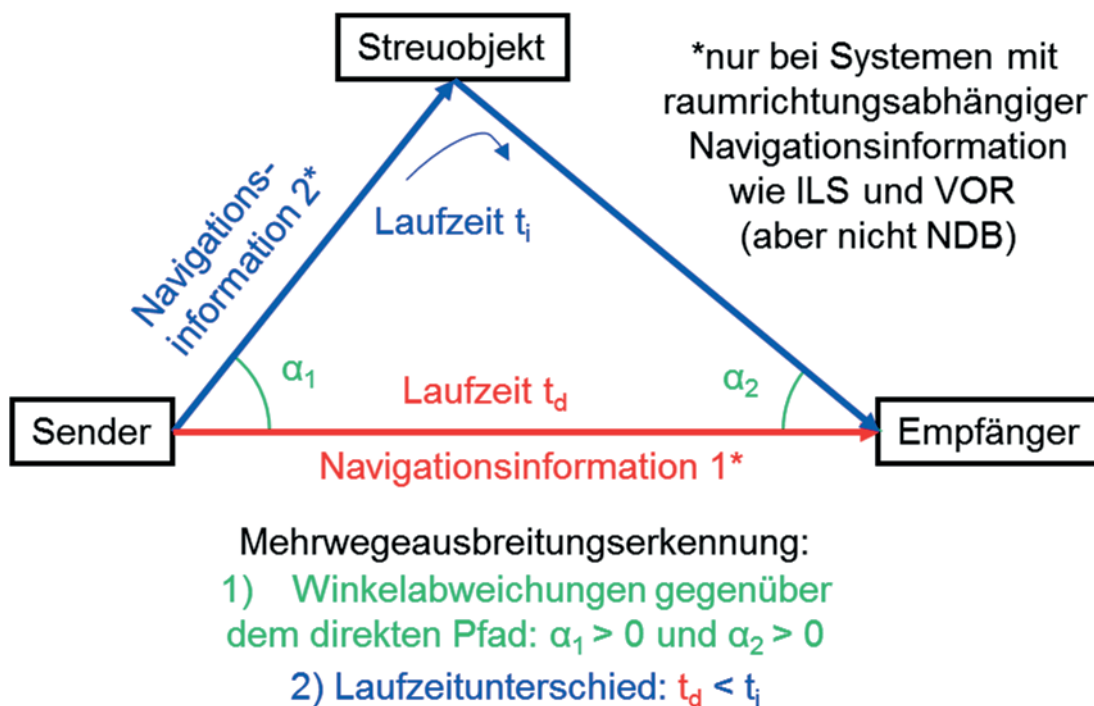


Abbildung 2: Charakterisierung der Mehrwegeausbreitung.

Eine veränderte Eigenschaft ist die verlängerte Signallaufzeit von t_i im Vergleich zu t_d des direkten Ausbreitungspfades. Gemeinsam bei den hier untersuchten Navigationssystemen ILS und VOR ist, dass beide eine vergleichbar langsame analoge Modulation benutzen, um die Navigationsinformation zu übertragen. Bzgl. des ILS sind es Amplitudenmodulationen (AM) von 90 Hz und 150 Hz. Für das VOR werden sowohl eine Amplituden- als auch eine Frequenzmodulation eingesetzt, die beide eine Modulationsfrequenz von 30 Hz besitzen. Die entsprechenden Wellenlängen sind für das ILS 3300 km bzw. 2000 km und für das VOR 10000 km. Die durch Mehrwegeausbreitung auftretenden



Signalumwege von einigen 100 m beim ILS und einigen Kilometern beim VOR sind um Größenordnungen kleiner als die Wellenlänge der Modulationsfrequenz, womit die Laufzeitunterschiede bzgl. der Modulation nicht relevant sind.

Bzgl. der Trägerfrequenz ist der Laufzeitunterschied allerdings zu berücksichtigen, da hier die Wellenlänge im 1:1-Maßstab 2,7 m (skaliert 1,9 cm) beträgt. Aufgrund der unterschiedlichen Längen der Ausbreitungspfade kommt es zu Interferenzen im empfangenen Signal, also im ungünstigsten Fall zu einer destruktiven Interferenz aller Ausbreitungswege an der Empfangsantenne. In einem dynamischen Szenario reichen schon Bewegungen kleiner als eine Wellenlänge aus, um diese Interferenz zu verändern, dieser Effekt wird als Fading bezeichnet. In der skalierten Messumgebung beim VOR werden die verschiedenen Ausbreitungswege getrennt vermessen und das Fading anhand der Messergebnisse rechnerisch berücksichtigt (Kapitel 6). Für das ILS wird das Antennendiagramm im skalierten Maßstab nachgebildet. Somit wird das Fading automatisch mitberücksichtigt. Daher ist es für das Channel Sounding bzgl. der beiden Navigationssysteme nicht erforderlich, Laufzeitunterschiede zu bestimmen.

Die in dieser Arbeit betrachteten Navigationssysteme ILS und VOR besitzen omnidirektionale Empfangsantennen, daher ist es nicht notwendig, die unterschiedlichen Empfangsrichtungen getrennt zu betrachten, d. h. die Untersuchung der Abhängigkeit bzgl. α_2 durch den Channel Sounder ist nicht erforderlich. Als Empfangsantenne wird eine Antenne gewählt, die das Signal aller zu berücksichtigenden Ausbreitungswege vergleichbar empfängt.

Das ILS besitzt allerdings Sendeantennen, die zwei unterschiedlich ausgerichtete Signale aussenden. Auch beim VOR ist die Navigationsinformation vom Sendewinkel abhängig. Diese Eigenschaft ist daher auch durch den Channel Sounder zu berücksichtigen, es ist also die Abhängigkeit des Empfangssignals von der Senderichtung α_1 zu charakterisieren.

Die Anforderungen an den Channel Sounder für die Vermessung der genannten Navigationssysteme umfassen die zeitvariante Bestimmung der Kanaldämpfung sowie die Ermittlung auftretender Doppler-Verschiebungen. Eine getrennte Charakterisierung für unterschiedliche Senderichtungen ist zu ermöglichen.

Zunächst werden verschiedene bekannte Konzepte für Channel Sounder vorgestellt, um anschließend auf den speziell für die Anforderungen bzgl. der Vermessung des ILS und des VOR angepassten Channel Sounder einzugehen.

Für den Übertragungskanal lassen sich typischerweise fünf Parameter angeben [Wen et al. 2016]. Erster Parameter ist die aus der Systemtheorie bekannte Impulsantwort. Eng damit verwandt, und aus der Impulsantwort berechenbar, ist das Leistungsverzögerungsprofil (Power Delay Profile). Dieses ist eine Auftragung der empfangenen Energie bzgl. gleichzeitig emittierter Sendeenergie über die Zeit. Diese beiden Parameter stellen damit eine differenziertere Betrachtung als die Kanaldämpfung dar. Als dritter und vierter Parameter sind die Abstrahlungs- und Empfangswinkel zu nennen, also α_1 und α_2 . Als letzter Parameter wird die Doppler-Verschiebung bestimmt.

Um diese fünf Parameter zu ermitteln, wird beispielsweise ein pseudozufälliges Rauschsignal im zu untersuchenden Frequenzbereich gesendet. Als Alternative ist ein sogenannter Chirp, d. h. ein Signal, bei dem die Frequenz linear über die Zeit verändert wird, ebenfalls möglich. Um dieses Signal zu generieren, kann ein Arbitrary Waveform Generator (AWG) verwendet werden, dessen Ausgangssignal anschließend von einem Vektorsignalgenerator in den zu untersuchenden Frequenzbereich hochtransformiert wird [Wen et al. 2016]. Empfangsseitig wird das detektierte Signal mit einer Kopie des Sendesignals verglichen. Dieses geschieht entweder über einen breitbandigen Korrelator oder über einen gleitenden Korrelator (Sliding Correlator). Letzterer

verwendet statt einer exakten Kopie ein geringfügig langsamer abgetastetes Signal und ermöglicht so eine weniger rechenintensive Bestimmung der Übertragungseigenschaften. Im Fall von zeitvarianten Kanälen sind jedoch zusätzliche Korrekturrechnungen notwendig [Pirkl und Durgin 2008].

In jedem Fall ist eine hochgenaue Synchronisation erforderlich. Diese kann entweder durch kabelgebundene Einspeisung einer gemeinsamen Referenz in Sender und Empfänger oder über GPS erfolgen [Molisch 2011, S. 155–156]. Eine Alternative für eine mobilere Messtechnik ist sende- und empfangsseitig jeweils einen hochgenauen Rubidium-Oszillator einzusetzen, die zu Messbeginn miteinander synchronisiert werden [Wen et al. 2016].

Um die Kanaleigenschaften in Abhängigkeit der Abstrahlungs- und Empfangswinkel zu bestimmen, sind sowohl sende- wie auch empfangsseitig Antennenarrays erforderlich. Die Ansteuerung der einzelnen Antennen des Arrays kann dabei entweder nacheinander oder bei entsprechend erhöhtem Hardwareaufwand auch parallel erfolgen. Entscheidend ist es, die empfangenen Signalanteile einer Sendeanenne des Arrays zuzuordnen. Bei der sequentiellen Ansteuerung kann dieses über die Zeit erfolgen. Bei der parallelen Ansteuerung ist eine Unterscheidung im Frequenzbereich oder im Falle des pseudozufälligen Rauschens durch eine entsprechend unterschiedliche Kodierung möglich [Laurenson und Grant 2006]. Auf Empfängerseite ist es kein Problem, mehrere Antennen parallel zu betreiben, da einfach mehrere Empfängerstrukturen parallel aufgebaut und betrieben werden können. Ein Multiplexverfahren empfangsseitig dient lediglich dazu, den Hardwareaufwand im Vergleich zu einem parallelen Aufbau mehrerer Empfangseinheiten zu reduzieren. Die Kombination aus mehreren Sende- und Empfangsantennen wird als Multiple Input Multiple Output (MIMO)-Architektur bezeichnet.

Sowohl bei der parallelen als auch der sequentiellen Ansteuerung ist die Bestimmung von Dopplerverschiebungen möglich. Im letzteren Fall, um hinreichend hohe Doppler-Frequenzverschiebungen detektieren zu können, wird eine entsprechend schnelle Wiederholung der Ansteuerungssequenz gefordert. Dazu sind jedoch kurze Umschaltzeiten im ms- oder μ s-Bereich notwendig. Als weitere Bedingung müssen die einzelnen Antennenpaare mindestens so lange wie die maximale Kanalverzögerung ununterbrochen aktiv sein, was dazu führen kann, dass beide Anforderungen nicht vereinbar sind [Laurenson und Grant 2006]. Die maximal messbare Doppler-Verschiebung ist dabei $1/T$, wobei T die Zykluszeit ist, also die Zeitdauer für die Vermessung jeder Kombination aus Sende- und Empfangsantennen.

Alternativ zu diesen im Zeitbereich operierenden Channel Soudern wird in [Balde et al. 2016] ein Channel Sounder im Frequenzbereich mit Hilfe eines Netzwerkanalysators dargestellt. Dieser ist jedoch nur für rein statische Übertragungsumgebungen geeignet und kommt daher nicht in Betracht.

Prinzipiell würde ein mehrkanaliger Channel Sounder mit pseudozufälligem Rauschen, wie z. B. in [Wen et al. 2016] beschrieben, es ermöglichen, die skalierten Navigationssysteme zu vermessen. Allerdings hat ein derartiger Channel Sounder wesentliche Nachteile: Zum einen sind das hohe Gewicht und Bauvolumen anzuführen, da der Channel Sounder aus mehreren schweren Messgeräten besteht, die in einem Rack montiert sind. Zum anderen sind, bedingt durch die Korrelation des pseudozufälligen Rauschens, komplizierte Rechenoperationen durchzuführen, die somit zu hohen Anforderungen bzgl. der erforderlichen Rechenleistung führen. Die Vielzahl an benötigten Präzisionsmessgeräten führt zu erheblichen Hardwarekosten.

Daher ist die grundlegende Idee für die vorliegende Arbeit, nur die Charakteristiken des Übertragungskanal zu vermessen, die für die Beurteilung der Verfälschung der hier benutzten Navigationsinformation tatsächlich benötigt werden. Im folgenden Kapitel 2.1.2 wird daher ein simpler Channel Sounder vorgestellt, der den Übertragungskanal zwischen einer Sende- und



Empfangsantenne vermisst. Dieser wird in Kapitel 2.1.4 auf mehrere Sendeantennen erweitert, um so die Charakterisierung unterschiedlicher Senderichtungen zu ermöglichen, wie sie für die skalierte Vermessung des ILS und des VOR benötigt werden. Bzgl. des Aufbaus wird dabei ein leichtes, tragbares und akkubetriebenes Konzept verfolgt, sodass eine problemlose Umplatzierung des Senders und des Empfängers für die zügige Vermessung verschiedener Streuszenarien ermöglicht wird und sogar eine Drohnen-basierte Messung erlaubt.

2.1.2 Funktionsprinzip des schmalbandigen SISO Channel Sounders

Der hier vorgestellte Channel Sounder untersucht schmalbandige Kanäle, für die keine Varianz der Kanaleigenschaften bzgl. der Frequenz innerhalb des Kanals angenommen wird. Diese Bedingung gilt insbesondere für die untersuchten Navigationssysteme ILS und VOR, da diese (bei einer Trägerfrequenz von 110 MHz) nur eine Bandbreite von 300 Hz bzw. 20 kHz besitzen [Mansfeld 1994, S. 291–300 bzw. S. 180–185]. Dadurch wird ermöglicht, nur eine repräsentative CW-Sendefrequenz zu benutzen. Durch den Verzicht auf die Messung der Zeitverzögerung wird keine Synchronisation zwischen Sender und Empfänger benötigt. Der entscheidende Vorteil ist, dass es für einen Kanal bestehend aus einem Sender, der Übertragungsstrecke und einem Empfänger gemäß den zuvor aufgestellten Anforderungen an die Charakterisierung des Übertragungskanals genügt, ausschließlich die Kanaldämpfung zeitabhängig zu bestimmen. Dieses Szenario wird daher als Single Input Single Output (SISO) bezeichnet.

Da nur CW gesendet wird, ermöglicht das Verfahren darüber hinaus die Bestimmung von Dopplereffekten. Andere empfangsseitig gemessene Frequenzanteile in der Nähe der gesendeten CW-Frequenz werden somit von sich bewegenden Störobjekten verursacht. Voraussetzung ist, dass der Empfang von Fremdsignalen ausgeschlossen werden kann. Da kontinuierlich gesendet wird, ist eine Trigger-Synchronisation nicht erforderlich.

Aufgrund der Schmalbandigkeit des Signals ist der Einsatz eines Mischers problemlos möglich, ohne dass Informationen bzgl. des Kanals verlorengehen. Somit wird das Signal auf eine Zwischenfrequenz heruntergemischt und die Frequenzauflösungsanforderungen an den Detektor sind reduziert. Damit wird eine Langzeitmessung des Kanals ermöglicht, sodass die Anforderung der empfangsseitigen Synchronisation auf einen Messbeginn und ein Messende entfällt.

Sowohl auf Senderseite als auch auf Empfängerseite kommen Oszillatoren zum Einsatz. Dabei generiert der spannungsgesteuerte Oszillator (Voltage Controlled Oscillator: VCO), integriert in z. B. eine Phase-Locked-Loop (PLL) und ggf. mit weiteren Komponenten wie Frequenzverdoppler, das Signal in der benötigten Frequenz für das Channel Sounding. Empfangsseitig ist ein Lokaloszillator für den Mischer erforderlich.

Für die Bewertung von Doppler-Verschiebungen muss der Hauptträger detektiert werden, da eine Doppler-Verschiebung immer einen Frequenzunterschied zum Träger darstellt. Dieses ist gewährleistet, wenn Sender und Empfänger zueinander in Ruhe sind und sich nur das Streuobjekt bewegt. Außerdem müssen hinreichend viele statische Störobjekte vorhanden sein oder eine Übertragung über den direkten Ausbreitungspfad, beispielsweise über eine Nebenkeule der Antenne, überwiegen. Bei Vorliegen entsprechender Voraussetzungen erfolgt die Bestimmung der Trägerfrequenz aus dem Maximum des Spektrums. Ansonsten muss der Channel Sounder auf mehrere Kanäle erweitert werden (Kapitel 2.1.4), von denen mindestens ein Ausbreitungspfad den Hauptträger zur Verfügung stellt.

Eine Ermittlung der Trägerfrequenz aus den Angaben der Datenblätter der verwendeten Bauteile ist zwar im Idealfall möglich, jedoch kommt es aufgrund der Bauteiltoleranzen zu einer Abweichung der Trägerfrequenz vom Sollwert. Bei Einsatz eines Mischprozesses hat auch die empfangsseitige

Oszillatordrift Einfluss, sodass die empfangene Frequenz nicht dem Sollwert entspricht. Beispielsweise reichen bei einer Untersuchungsfrequenz von 16 GHz typische relative Fehler von einigen Millionsteln, um einen absoluten Fehler zu erzeugen, der Größenordnungen über den interessierenden Doppler-Verschiebungen von einigen Hertz liegt.

Da die Oszillatoren des Senders und des Empfängers nicht gekoppelt sind, können diese durch z. B. thermische Einflüsse driften, also über die Zeit ihre Frequenz ändern. Dann ist eine ständige Neubestimmung der Trägerfrequenz notwendig. Dabei spielt nicht die Driftrate der einzelnen Oszillatorfrequenzen eine Rolle, sondern nur der Unterschied zwischen den beiden Driftraten. Für eine nähere Betrachtung mit entsprechenden Messreihen sei auf Kapitel 4.3 verwiesen. Um die Doppler-Verschiebungen bewerten zu können, ist daher eine Berücksichtigung dieser Driftrate erforderlich. Diese Anforderungen haben Einfluss auf die Dimensionierung des Zeitschemas und die erzielbare Frequenzauflösung (Kapitel 2.1.5).

2.1.3 Abschätzung von Doppler-Verschiebungen

Die empfängerseitige Frequenzmischung der gesendeten Frequenz f_{HF} mit einem Lokaloszillator der Frequenz f_{LO} ermöglicht es, die zu detektierende Frequenz auf die Differenz $f_{ZF} = f_{HF} - f_{LO}$ abzusenden. Dadurch wird empfängerseitig eine wesentlich niedrigere Abtastrate von mindestens $2 \cdot f_{ZF}$ statt $2 \cdot f_{HF}$ benötigt. Die Frequenzanteile verursacht durch Doppler-Verschiebungen bleiben dabei unverändert:

$$(f_{HF} \pm f_D) - f_{LO} = (f_{HF} - f_{LO}) \pm f_D = f_{ZF} \pm f_D \quad (2.1)$$

Die Voraussetzung ist, dass die Zwischenfrequenz größer ist als die maximal im System vorhandene Doppler-Verschiebung. Für jeden bewegten Signalpfad kann sie durch Anwendung der elementaren Formel [Stöcker 1998, S. 279] berechnet werden:

$$f_{HF} + f_D = f_{HF} \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \Leftrightarrow f_D = f_{HF} \left(\sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Dabei ist v die relative Geschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger, positiv gezählt für Annäherung, und c die Lichtgeschwindigkeit. Für Pfade, die ein Streuobjekt beinhalten, ist diese Gleichung zweimal anzuwenden:

$$f_{HF} + f_D = f_{HF} \sqrt{\frac{c+v_{TS}}{c-v_{TS}}} \sqrt{\frac{c+v_{SR}}{c-v_{SR}}} \Leftrightarrow f_D = f_{HF} \left(\sqrt{\frac{c+v_{TS}}{c-v_{TS}}} \sqrt{\frac{c+v_{SR}}{c-v_{SR}}} - 1 \right), \quad (2.3)$$

dabei sind v_{TS} die relative Geschwindigkeitskomponente zwischen Sender und Streuobjekt bzw. v_{SR} die zwischen Streuobjekt und Empfänger. Im Fall von stationären Sendern und Empfängern und einem bewegten Streuobjekt ist die Berechnung einer oberen Abschätzung der Doppler-Verschiebung unabhängig von der Geometrie gegeben durch [Neubauer et al. 2014]

$$f_D = f_{HF} \left(\frac{c+v}{c-v} - 1 \right), \quad (2.4)$$

wobei v die Geschwindigkeit des Streuobjekts ist. Besitzt das Streuobjekt mehrere Geschwindigkeiten, ist die Maximalgeschwindigkeit zu nehmen. Ein Beispiel hierfür ist eine rotierende Windenergieanlage, bei der die Absolutgeschwindigkeit vom Radius abhängt. Dieser Fall