



Johannes Voppichler, BSc

Neue Methode zur Ortung von Lawinen-Verschütteten-Suchgeräten (LVS)

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing Gebhard Wallinger, BSc
Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bauernfeind
Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird eine neue Methode zur Optimierung von Lawinen-Verschütteten-Suchgeräten (LVS) untersucht. Aktuell werden in LVS drei Spulen zum Empfangen und eine Spule zum Senden der Signale verwendet. Werden allerdings zwei orthogonale Spulen, deren Ströme um 90° phasenverschoben sind, zum Senden der Signale verwendet, so bildet sich an jedem Punkt im Raum ein Magnetfeld aus, welches elliptisch rotiert. Durch Analyse dieser Ellipse lässt sich eine direkte Ortung und Angabe einer relativen Richtung zwischen dem Sender (Lawinenopfer) und Empfänger (suchende Person) durchführen. Dieser Umstand der direkten Richtungsangabe verspricht einen Zeitgewinn bei der Suche nach Lawinenopfern, welche derzeit durch indirekte Führung der suchenden Person entlang einer Feldlinie des Senders sehr viel Zeit in Anspruch nimmt.

Abstract

In this thesis, a new method for optimizing avalanche beacons is being investigated. Currently, three coils are used in avalanche beacons for receiving and one coil for transmitting the signals. If two orthogonal coils whose currents are phase-shifted by 90° are used to transmit the signals, a magnetic field is formed at each point in the space, which rotates elliptically. By analyzing this ellipse, a direct location and indication of a relative direction between the transmitter (avalanche victim) and receiver (searching person) can be performed. This circumstance of the direct indication of direction promises a time gain in the search for avalanche victims, which currently takes a lot of time due to indirect guidance of the searching person along a field line of the transmitter.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen und Grundprinzipien	2
2.1 Faraday'sches Induktionsgesetz.....	2
2.2 Nahfeld eines magnetischen Dipols	3
2.3 Polarisierte Wellen	4
2.4 Europäische Normen für LVS	6
2.4.1 Die Norm EN 300 718.....	6
3 LVS Funktionsweise und Suche	8
3.1 Funktionsweise LVS.....	8
3.1.1 LVS mit einer Antenne.....	8
3.1.2 LVS mit zwei Antennen.....	9
3.1.3 LVS mit drei Antennen.....	10
3.2 LVS Suche	10
3.2.1 Signalsuche.....	11
3.2.2 Grobsuche	12
3.2.3 Feinsuche.....	12
3.2.4 Punktsuche	13
3.3 Probleme bei der Suche mit konventionellen LVS.....	13
4 Methode zur genaueren Ortung von LVS.....	15
4.1 Grundidee.....	15

4.2	Beschreibung des Modells	15
4.3	Berechnung der Parameter	16
5	Das MATLAB-Modell	20
5.1	Die „Partial Element Equivalent Circuit“ (PEEC) Methode.....	20
5.1.1	Grundprinzip.....	20
5.1.2	Diskretisierung.....	22
5.1.3	Berechnung der partiellen Elemente	23
5.1.4	Formulierung der Matrizen	25
5.2	MATLAB-Funktionen	26
5.2.1	Die Funktion FUN_PEEC	27
5.2.2	Die Funktion <i>H_Field</i>	29
5.2.3	Die Funktion <i>E_field</i>	30
5.2.4	Die Funktion <i>createCoil</i>	30
5.2.5	Die Funktionen <i>movecoord</i> und <i>rotcoord</i>	32
5.2.6	Die Funktion <i>mergeCircuits</i>	33
5.3	Erstellung eines Basismodells	33
5.3.1	Modell: 1 Sendespule	33
5.3.2	Modell: 2 orthogonale Sendespulen	36
5.3.3	Modell: 2 Sendespulen und 3 Empfangsspule	44
6	Untersuchung verschiedener Szenarien	48
6.1	Basismodell mit 2 Sende- und 3 Empfangsspulen	49
6.2	Basismodell mit Drehung des Empfängers.....	55
6.3	Basismodell mit 3 Sende und 3 Empfangsspulen.....	63
7	Diskussion und Ausblick	68
	Referenzen	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Ein elektrischer Kreisstrom erzeugt einen magnetischen Dipol. [1].....	3
Abbildung 2.2: Einteilung der verschiedenen Arten der Polarisation. [3]	5
Abbildung 2.3: Parameter für Trägersignal. [4].....	6
Abbildung 3.1: Magnetische Feldlinien eines oszillierenden magnetischen Dipols im Nahfeld. Das Feld induziert eine Spannung in den Spulen A und B. Die längeren Seiten stellen die bewickelten Achsen dar. [6]	9
Abbildung 3.2: Elliptischer Empfangsbereich bei LVS mit zwei unterschiedlichen Antennen. [7]	9
Abbildung 3.3: LVS mit drei Antennen (gelb, rot, grün). [7]	10
Abbildung 3.4: Überlebenskurve für Österreich (feste Linie) und die Schweiz (strichlierte Linie) für ganzheitlich verschüttete Opfer zwischen 2005 und 2013 [8]	11
Abbildung 3.5: Signalsuche mit Suchstreifen [9].....	11
Abbildung 3.6: Grobsuche [9]	12
Abbildung 3.7: Spiralförmiges sondieren [9].....	13
Abbildung 3.8: Ortung bei unterschiedlicher Lage des Senders. [6].....	14
Abbildung 4.1: Elliptisches H-Feld an verschiedenen Punkten im Raum. Erzeugt von zwei orthogonalen Spulen erregt mit 90° phasenverschobenen Strömen. [10]	16
Abbildung 4.2: Beschreibung des H-Feldes im Punkt $S(r, \Psi, \theta)$, im Nahfeld. Die beiden Sendespulen sind ersetzt durch eine einzige Spule welche mechanisch mit ωt rotiert. [10]	17
Abbildung 5.1: Ersatzschaltbild einer Zelle, eines diskretisierten Leiters. [12].....	22
Abbildung 5.2: 1D Diskretisierung eines Stromdurchflossenen Leiters. Die Knoten werden von schwarzen Punkten dargestellt, strichlierte Linien zeigen die Volumen-Zellen und gepunktete Linien die Oberflächen Zellen. [12].....	23
Abbildung 5.3: 3D Diskretisierung eines Leiterstücks mit 18 Knoten. Schwarze Punkte zeigen die Knoten, strichlierte Linien die Volumen-Zellen und gepunktete Linien die Oberflächen-Zellen. Die Pfeile zeigen die Richtung des Stromflusses. [12].....	23
Abbildung 5.4: Drei Leiterstücke mit nummerierten Knoten. [12, p. 51]	25
Abbildung 5.5: Beschriftung der Volumen-Zellen mit α , β und γ . [12, p. 51]	25
Abbildung 5.6: Oberflächen-Zellen nummeriert von 1 bis 6. [12, p. 52]	25
Abbildung 5.7: Mit der Funktion createCoil erzeugte Spule mit 20 Windungen. An der rechten Seite zu sehen die Lücke (gap) in der die Stromquelle liegen soll.	32
Abbildung 5.8: Mit createCoil erzeugte Spule mit den Parametern aus Tabelle 5.1.	34

Abbildung 5.9: Darstellung der Punkte für die eine Feldberechnung durchgeführt wird.	35
Abbildung 5.10: Der Verlauf des H-Feldes am Punkt $(0/0/10)$, dargestellt in den verschiedenen Ebenen. Das H-Feld besitzt praktisch nur eine z-Komponente entlang der z-Achse.	36
Abbildung 5.11: Geometrische Anordnung zweier Sendespulen deren Achsen auf der x- bzw. y-Achse liegen.	37
Abbildung 5.12: Darstellung der Punkte für die eine Feldberechnung durchgeführt wird.	38
Abbildung 5.13: Lissajous Figur von \mathbf{H} , am P_1 aus Abbildung 5.12, dargestellt in den drei Ebenen.	38
Abbildung 5.14: Lissajous Figur von \mathbf{H} , am P_2 aus Abbildung 5.12, dargestellt in den drei Ebenen.	38
Abbildung 5.15: Lissajous Figur von \mathbf{H} , am P_3 aus Abbildung 5.12, dargestellt in den drei Ebenen.	39
Abbildung 5.16: Graph von \mathbf{H} am Punkt $(1/0/1)$ dargestellt in den drei Ebenen. Wie erwartet zeigen sich hier Ellipsen welche zur Berechnung der Richtungsinformation herangezogen werden können.	40
Abbildung 5.17: Darstellung der Punkte (rot) welche untersucht werden sollen.	41
Abbildung 5.18: Graphische Darstellung der ermittelten Parameter r , ψ und θ bei einem konstantem Abstand r (1 m), konstantem Winkel θ (0°) und variablem Winkel ψ ($0^\circ-90^\circ$).	43
Abbildung 5.19: Graphische Darstellung des ermittelten Winkel θ bei einem konstantem Abstand r (1 m), konstantem Winkel θ (0°) und variablem Winkel ψ ($0^\circ-90^\circ$).	44
Abbildung 5.20: Geometrie des Modells mit 2 Sende- und 3 Empfangsspulen. Die Sendespulen liegen im Ursprung. Die Empfangsspulen wurden auf den Punkt $(0.02/0.02/0.02)$ verschoben. (Rot = Sendespulen; Grün = Empfangsspulen)	45
Abbildung 5.21: Graphische Darstellung der ermittelten Parameter r , ψ und θ bei einem konstantem Abstand r (1 m), konstantem Winkel θ (0°) und variablem Winkel ψ ($0^\circ-90^\circ$). Die Parameter wurden berechnet über die induzierten Spannungen in den Empfangsspulen.	47
Abbildung 6.1: Darstellung der Punkte welche untersucht werden.	49
Abbildung 6.2: 3D-Darstellung der Vektoren \mathbf{p} für die untersuchten Punkte mit einem Abstand von 1 m	51
Abbildung 6.3: 3D-Darstellung der Vektoren \mathbf{p} für die untersuchten Punkte mit einem Abstand von 10 m	51
Abbildung 6.4: 3D-Darstellung der Vektoren \mathbf{p} für die untersuchten Punkte mit einem Abstand von 30 m	52
Abbildung 6.5: Suchverlauf ausgehend von Punkt P_4 bis zu einem Abstand kleiner als 2 m zum Sender.	54
Abbildung 6.6: Suchverlauf ausgehend von Punkt P_{12} bis zu einem Abstand kleiner als 2 m zum Sender.	55
Abbildung 6.7: Die Koordinatensysteme des Senders S und des Empfängers E.	56

Abbildung 6.8: Darstellung von \mathbf{H}_{max} und \mathbf{H}_{min}	58
Abbildung 6.9: Darstellung von Sender S und Empfänger E im Achsensystem des Senders.....	59
Abbildung 6.10: Darstellung von Sender S und Empfänger E im Achsensystem des Empfängers. .	59
Abbildung 6.11: Darstellung der Vektoren \mathbf{e}'_x , \mathbf{e}'_y und \mathbf{e}'_z sowie \mathbf{H}_{min} und \mathbf{H}_{max} im Koordinatensystem des Empfängers KS_E	60
Abbildung 6.12: Vergleich der ermittelten Ergebnisse von \mathbf{e}'_x , \mathbf{e}'_y und \mathbf{e}'_z	61
Abbildung 6.13: Darstellung des Ergebnisses der Berechnung im Koordinatensystem KS_E . Mit dem Vektor \mathbf{p}' der vom Empfänger auf den Sender zeigen soll und des Vektors \mathbf{r}_A der die Abweichung des Ergebnisses angibt. (Empfänger rotiert um 45° um die z-Achse und um 45° um die x-Achse). 62	62
Abbildung 6.14: Darstellung des Ergebnisses der Berechnung im Koordinatensystem KS_E . Mit dem Vektor \mathbf{p}' der vom Empfänger auf den Sender zeigen soll und des Vektors \mathbf{r}_A der die Abweichung des Ergebnisses angibt. (Empfänger rotiert um 45° um die z-Achse und um 90° um die x-Achse)	62
Abbildung 6.15: Darstellung des Ergebnisses der Berechnung im Koordinatensystem KS_E . Mit dem Vektor \mathbf{p}' der vom Empfänger auf den Sender zeigen soll und des Vektors \mathbf{r}_A der die Abweichung des Ergebnisses angibt. (Empfänger rotiert um 45° um die z-Achse und um 90° um die x-Achse)	62
Abbildung 6.16: Ortungsabweichung r_A in Abhängigkeit vom Winkel ψ	63
Abbildung 6.17: Darstellung der Abweichung in Prozent des Abstandes bei konstantem Abstand $r = 1\text{ m}$, konstantem Azimutwinkel $\theta = 0^\circ$ und variablem Winkel ψ von 0° - 90°	65
Abbildung 6.18: Darstellung der Abweichung in Prozent des Abstandes bei konstantem Abstand $r = 1\text{ m}$, konstantem Azimutwinkel $\theta = 45^\circ$ und variablem Winkel ψ von 0° - 90°	66
Abbildung 6.19: Darstellung der Abweichung in Prozent des Abstandes bei konstantem Abstand $r = 1\text{ m}$, konstantem Azimutwinkel $\theta = 45^\circ$ und variablem Winkel ψ von 0° - 90° . Es wird jeweils der beste, ermittelte Abstand r_A dargestellt.	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Parameter für die Erzeugung einer Spule im MATLAB-Modell	34
Tabelle 5.2: Vergleich des H-Feldes zwischen numerisch und analytisch ermittelten Werten....	35
Tabelle 6.1: Reihe von Punkte welche untersucht werden.	48
Tabelle 6.2: Ermittelte Parameter r , ψ und θ für verschiedene Punkte.	50
Tabelle 6.3: Bestimmung des Abstandes der ermittelten Position zur tatsächlichen Position des Senders.....	53

1 Einleitung

Bei Lawinen-Verschütteten-Suchgeräten (LVS) wird die suchende Person entlang der magnetischen Feldlinien, über einen Bogen, zum Verschütteten geführt. Dadurch ergibt sich ein Umweg und ein Zeitverlust bei der Suche, was die Überlebenschancen des Verschütteten verringert. In dieser Arbeit wird eine Methode untersucht welche die Suche optimieren kann.

LVS haben drei orthogonale Spulen eingebaut. Im Empfangsmodus fungieren alle drei Spulen als Empfänger. Im Sendemodus fungiert allerdings nur eine Spule als Sender. Bei der Methode, welche hier untersucht wird, sollen alle drei Spulen abwechselnd als Sender fungieren.

Ziel der Untersuchung ist es, herauszufinden ob durch die Verwendung von drei Sendespulen eine direkte Ortung mit genauer Richtungsangabe möglich ist. Hierzu werden jeweils die Signale von zwei Sendespulen miteinander kombiniert, wobei eines der beiden Signale um 90° phasenverschoben wird. Dadurch ergibt sich für einen beliebigen Punkt im Raum ein elliptisch rotierendes Magnetfeld. Diese Ellipse wird ausgewertet und daraus auf die Richtung und den Abstand zum Sender geschlossen. Mittels PEEC-Methode werden verschiedenste Szenarien mit unterschiedlichen Abständen und unterschiedlicher Lage von Sender und Empfänger zueinander untersucht. Es wird überprüft welche Abweichungen sich bei der Ortung ergeben und ob sich die Methode grundsätzlich anwenden lässt.

2 Grundlagen und Grundprinzipien

In diesem Kapitel werden elektrotechnische, sowie allgemeine Grundlagen beschrieben, welche im weiteren Verlauf der Arbeit benötigt werden.

2.1 Faraday'sches Induktionsgesetz

Es sollen ein zeitlich veränderliches Magnetfeld $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$, sowie eine ortsfeste Kurve C gegeben sein. C beschreibt die Bahn einer elektrischen Leiterschleife welche die Fläche A umfasst. Für den die Fläche A durchsetzenden magnetischen Fluss ϕ gilt:

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \int_A \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{A}. \quad (2.1)$$

Tritt eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses ϕ durch die Fläche A auf, so wird eine Spannung U_{emf} , elektromotorische Kraft (emf), induziert. Dieser Spannung zufolge tritt ein elektrisches Feld \mathbf{E} auf:

$$U_{emf} = \oint \mathbf{E} d\mathbf{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \phi. \quad (2.2)$$

Wird auf (2.2) der Satz von Stokes angewandt und (2.1) in (2.2) eingesetzt, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{s} = \int_A \text{rot} \mathbf{E} d\mathbf{A} = -\int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{A}. \quad (2.3)$$

Somit lässt sich das Induktionsgesetz schreiben zu:

$$U_{emf} = -\int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{A}. \quad (2.4)$$

Es wird also durch einen veränderlichen magnetischen Fluss über die Fläche einer Leiterschleife eine Spannung induziert. Dies kann auf zwei Art und Weisen geschehen. Entweder kann sich die resultierende Fläche der Leiterschleife zeitlich verändern, oder aber das Magnetfeld. Der erste Fall tritt beispielsweise auf, wenn eine Leiterschleife in einem stationären Magnetfeld um ihre eigene Achse gedreht wird. Hierbei ändert sich die resultierende Fläche, welche vom Magnetfeld durchsetzt wird. Die zweite Möglichkeit um eine Spannung zu induzieren ist, wenn die Leiterschleife nicht bewegt wird, sich aber das Magnetfeld zeitlich ändert. Dies wäre der Fall, wenn ein Magnetfeld durch eine Spule erzeugt wird, welche mit einem sinusförmigen Strom erregt wird. Das Magnetfeld

wird sich dadurch ebenso sinusförmig ändern und eine sinusförmige Spannung in der Leiterschleife induzieren [1].

2.2 Nahfeld eines magnetischen Dipols

Für die Untersuchungen im späteren Verlauf der Arbeit spielt das Nahfeld eines oszillierenden magnetischen Dipols eine wichtige Rolle. Dieses soll hier kurz beschrieben werden.

Ein magnetischer Dipol kann durch eine stromdurchflossene Leiterschleife, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, erzeugt werden.

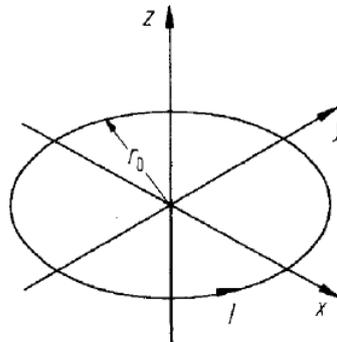


Abbildung 2.1: Ein elektrischer Kreisstrom erzeugt einen magnetischen Dipol. [1]

Wird der stationäre bzw. auch der quasistationäre Fall betrachtet, so ergibt sich die erste Maxwell-Gleichung zu:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (2.5)$$

Ausgehend von (2.5) kann das H-Feld an beliebigen Punkten im Raum berechnet werden. In Kugelkoordinaten (r, φ, θ) ergeben sich laut [1] folgende analytischen Lösungen:

$$H_R = \frac{2m \cos \theta}{4\mu_0\pi r^3}, \quad (2.6)$$

$$H_\theta = \frac{m \sin \theta}{4\mu_0\pi r^3}, \quad (2.7)$$

$$H_\varphi = 0. \quad (2.8)$$

Diese Beziehungen gelten für eine elektrisch kurze kreisrunde Schleife, welche im Koordinatensprung liegt. Das magnetische Dipolmoment m ist gegeben durch:

$$m = \mu_0 NIA. \quad (2.9)$$

Dabei ist I der Strom in der Leiterschleife, A die Fläche welche von der Schleife umfasst wird und N die Anzahl der Windungen.

Wird die Leiterschleife mit einem Wechselstrom gespeist, so fungiert sie als Loop-Antenne. Für die Feldbeschreibung von Antennen im Allgemeinen ist es wichtig zwischen, Nah- und Fernfeld zu unterscheiden. In dieser Arbeit wird ausschließlich das Nahfeld betrachtet. Nahfeld-Verhältnisse sind laut [2] verallgemeinert gegeben für einen Abstand kleiner als $\lambda/2\pi$, wobei λ die Wellenlänge ist. Im Allgemeinen ist auch zu beachten, dass die geometrischen Abmessungen der Antenne klein, im Verhältnis zur Wellenlänge λ , sein müssen. Das Nahfeld ist gekennzeichnet durch quasistationäre Verhältnisse, damit bleibt (2.5) weiterhin gültig. Laut [2] gilt für Loop-Antennen, dass im Nahfeld das H-Feld gegenüber dem E-Feld dominiert.

Die Leiterschleife soll nun mit einem Wechselstrom der Form $i = I \sin(\omega t)$ gespeist werden. Daraus resultiert ein oszillierender magnetischer Dipol. Wird ausgehend von der Frequenz des Stromes das Nahfeld betrachtet, so können (2.6) und (2.7) umgeschrieben werden zu:

$$H_R = \frac{2m \cos \theta}{4\mu_0 \pi r^3} \sin \omega t, \quad (2.10)$$

$$H_\theta = \frac{m \sin \theta}{4\mu_0 \pi r^3} \sin \omega t. \quad (2.11)$$

2.3 Polarisierte Wellen

Ausgehend von Abbildung 2.1 soll das H-Feld auf der y-Achse betrachtet werden. Es wird wieder eine Leiterschleife bzw. eine Spule betrachtet welche vom Strom $i = I \sin(\omega t)$ durchflossen wird. Ausgehend von (2.10) und (2.11) kann das H-Feld entlang der y-Achse berechnet werden. In Kugelkoordinaten gilt für alle Punkte auf der y-Achse $\theta = 90^\circ$. Daraus ergibt sich, dass bei einer kreisrunden Leiterschleife in der xy-Ebene, das H-Feld auf der y-Achse nur aus einer z-Komponente besteht:

$$\mathbf{H}(y, t) = -\frac{m}{4\mu_0 \pi r^3} \sin \omega t \mathbf{e}_z. \quad (2.12)$$

Man spricht hier von einer linearen Polarisation, da der Vektor $\mathbf{H}(y, t) = H_z(y, t) \mathbf{e}_z$ an jedem Punkt in dieselbe Richtung zeigt.

Es wird nun eine zweite Spule hinzugefügt, deren Fläche in der yz-Ebene liegt. Diese wird mit einem Strom erregt, welcher um 90° phasenverschoben ist, also $i = \cos(\omega t)$. Wieder soll das H-Feld auf der y-Achse betrachtet werden. Dieses ergibt sich nun zu:

$$\mathbf{H}(y, t) = -\frac{m}{4\mu_0\pi r^3} \cos \omega t \mathbf{e}_x - \frac{m}{4\mu_0\pi r^3} \sin \omega t \mathbf{e}_z, \quad (2.13)$$

$$\mathbf{H}(y, t) = A \cos \omega t \mathbf{e}_x - B \sin \omega t \mathbf{e}_z. \quad (2.14)$$

Wird (2.14) betrachtet, so ist zu erkennen, dass $A = B$ ist. Daher beschreibt das H-Feld an jedem Punkt auf der y -Achse einen Kreis. Es ist zirkular polarisiert.

Als weitere Form der Polarisation gibt es noch die elliptische Polarisation. Dabei sind die Parameter A und B in (2.14) unterschiedlich groß. Dies ist der Fall, wenn das H-Feld auf der z -Achse betrachtet wird:

$$\mathbf{H}(z, t) = -\frac{m}{4\mu_0\pi r^3} \cos \omega t \mathbf{e}_x + \frac{2m}{4\mu_0\pi r^3} \sin \omega t \mathbf{e}_z. \quad (2.15)$$

Durch die unterschiedlichen Amplituden der x - und y -Komponenten wird dieses Feld elliptisch rotieren. Für nähere Informationen zu polarisierten Wellen wird auf [2] verwiesen.

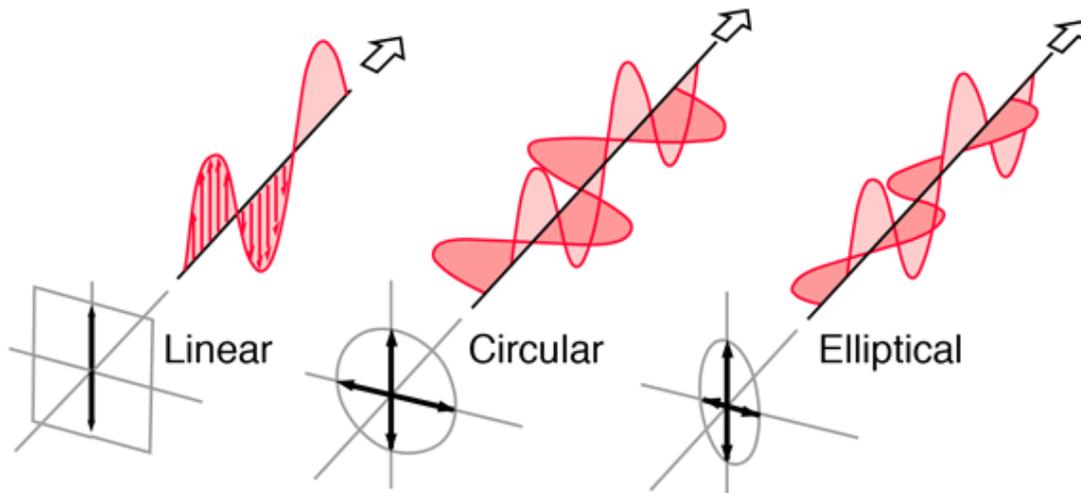


Abbildung 2.2: Einteilung der verschiedenen Arten der Polarisation. [3]

In Abbildung 2.2 werden die verschiedenen Arten der Polarisation dargestellt. Ganz links die lineare Polarisation, wobei die Feldkomponenten nur in eine Richtung zeigen. Dann die zirkuläre Polarisation, wobei die Feldlinien an jedem Punkt auf einem Kreis rotieren. Dieser Fall ergibt sich aus zwei orthogonal aufeinanderliegenden, linear polarisierten Wellen mit derselben Amplitude, welche zueinander um 90° phasenverschoben sind. Die elliptische Polarisation bildet ein elliptisch rotierendes Feld aus. Sie entsteht durch zwei linear polarisierte Wellen mit unterschiedlicher Amplitude, welche eine Phasenverschiebung ungleich null aufweisen.

2.4 Europäische Normen für LVS

Für Lawinen-Verschütteten-Suchgeräte (LVS) gelten in Europa die Normen des Europäischen Instituts für Telekommunikationsnormen. Für den Betrieb von LVS ist dabei die Norm EN 300 718 maßgebend. Im Folgenden wird auf die Punkte, welche für diese Arbeit interessant sind kurz eingegangen.

2.4.1 Die Norm EN 300 718

Der erste Teil der Norm EN 300 718 befasst sich mit den technischen Charakteristiken und den Methoden zur Messung von Signalen von LVS, welche mit einer Frequenz von 457 kHz arbeiten. LVS werden definiert als tragbare Funkssysteme zur Lokalisierung von Lawinenverschütteten.

Als Modulationsart für die übertragenen Signale wird der Typ A1A vorgeschrieben. Dies entspricht Morsetelegrafie mit einem getasteten Träger. Es handelt sich um ein gepulstes Signal, wobei folgende Parameter vorgeschrieben werden (siehe Abbildung 2.3):

- Ein-Zeit: mindestens 70 ms
- Aus-Zeit: mindestens 400 ms
- Periode: $1000 \text{ ms} \pm 300 \text{ ms}$

Die Frequenz des Signals, darf von den vorgegebenen 457 kHz maximal 80 Hz abweichen.

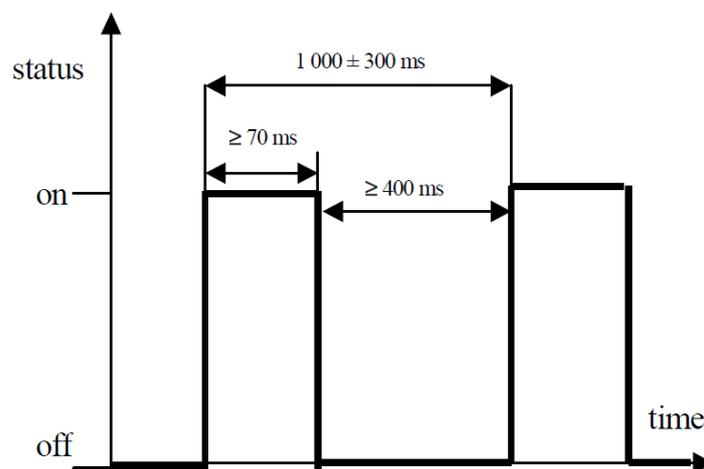


Figure 1

Abbildung 2.3: Parameter für Trägersignal. [4]

Bei der Suche nach Verschütteten sollen aus möglichst großer Entfernung Signale empfangen werden. Daher wird von der Norm eine Mindestfeldstärke H_{min} für das Magnetfeld vorgegeben. Diese

bezieht sich auf eine Entfernung von 10 m zum Sender, gemessen in Richtung der Achse der Sendespule. Die so gemessene Feldstärke des H_{min} des Magnetfeldes, muss größer als $-6\text{ dB}\mu\text{A/m}$ ($0,5\text{ }\mu\text{A/m}$) und kleiner als $7\text{ dB}\mu\text{A/m}$ ($2,23\text{ }\mu\text{A/m}$) sein.

Analog zur Sendeleistung wird auch vorgeschrieben, ab welcher magnetischen Feldstärke H der Empfänger Signale empfangen muss. Hierbei gilt, dass der Empfänger bei einer Feldstärke von minimal 80 nA/m anschlagen muss. Laut Norm können bei günstiger Lage Signale in einer Entfernung von etwa 60 m empfangen werden.

Auf weitere Aspekte der Norm wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Für nähere Informationen wird auf [4] und [5] verwiesen.

3 LVS Funktionsweise und Suche

3.1 Funktionsweise LVS

3.1.1 LVS mit einer Antenne

Die einfachste Art eines LVS besteht aus einer einzigen Spule mit Ferritkern. Diese Spule kann je nach eingestelltem Modus als Sender oder Empfänger agieren. Agiert das LVS als Sender, wird die Spule mit einem Strom bei einer Frequenz von 457 kHz erregt. Die Spule kann als magnetischer Dipol betrachtet werden. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, kann bis zu einem Abstand von $\lambda/2\pi$, für den Fall von elektrisch kurzen Antennen, von einem Nahfeld ausgegangen werden. Bei einer Frequenz von 457 kHz ergibt sich eine Wellenlänge von 656 m und somit ein Nahfeld bis zu einer Entfernung von etwa 104 m . Über einen Abstand von 100 m wird von einem LVS kein Signal mehr empfangen. Somit gelten für LVS Nahfeldverhältnisse.

Bei der Ortung mittels LVS fungiert ein Gerät als Sender und ein weiteres (oder mehrere) als Empfänger. Die Sendespule erzeugt dabei ein Magnetfeld mit einer Frequenz von 457 kHz welches in der Empfangsspule eine Spannung induziert. Diese Spannung wurde früher analog in ein akustisches Signal umgewandelt. Moderne LVS funktionieren nur noch digital. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die gegenseitige Lage von Empfänger und Sender zueinander entscheidend ist für die Stärke des empfangenen Signals. Abbildung 3.1 zeigt den Sender im Zentrum, welcher genau in der Achse von $C-D$ liegt. Die Empfangsspule A zeigt genau in Richtung der Feldlinien, wird also vom an diesem Punkt maximalen Magnetfeld durchströmt. Dementsprechend wird in der Spule auch die maximale Spannung induziert, welche an diesem Punkt möglich ist. Die Empfangsspule B hingegen liegt senkrecht zu den Feldlinien. Keine Feldlinien verlaufen durch die Fläche der Spule und somit wird auch keine Spannung induziert. Dies ist der große Nachteil von 1-Antennen-Systemen. Während der gesamten Suche muss das LVS so gedreht werden, dass das größtmögliche Signal empfangen wird. Dadurch kommt es zu einem Zeitverlust bei der Suche.

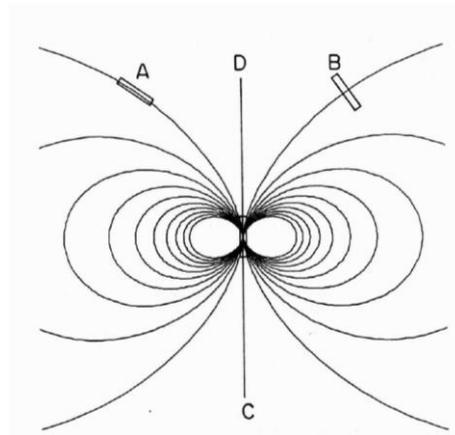


Abbildung 3.1: Magnetische Feldlinien eines oszillierenden magnetischen Dipols im Nahfeld. Das Feld induziert eine Spannung in den Spulen A und B. Die längeren Seiten stellen die bewickelten Achsen dar. [6]

3.1.2 LVS mit zwei Antennen

Seit Mitte der 90er Jahre, gibt es im deutschsprachigen Raum LVS-Geräte mit zwei Antennen. Im Sendebetrieb ändert sich dabei nichts. Nur eine der beiden Antennen sendet ein Signal aus. Der Unterschied zu 1-Antennen-Geräten ergibt sich im Empfangsbetrieb. Hier können beide Antennen, welche orthogonal zueinander liegen ein Signal empfangen. Somit kann der Fall B in Abbildung 3.1 vermieden werden. Es wird immer ein Signal empfangen, außer wenn beide Empfangsspulen senkrecht zu den Feldlinien liegen, was aber sehr unwahrscheinlich ist. Üblicherweise werden zwei unterschiedliche Spulen verwendet, und bei der Signalauswertung unterschiedlich bewertet. In Abbildung 3.2 soll die blaue Spule stärker bewickelt sein als die Grüne und hat somit einen größeren Empfangsbereich. Laut [7] ergibt sich dadurch ein elliptischer Empfangsbereich.

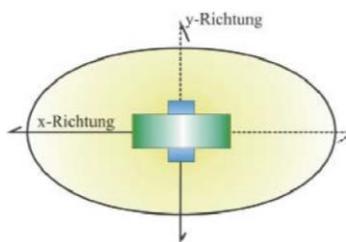


Abbildung 3.2: Elliptischer Empfangsbereich bei LVS mit zwei unterschiedlichen Antennen. [7]

2-Antennen-Geräte können bei der Suche die Richtung der Feldlinien anzeigen, und den Suchenden so möglichst schnell zum Verschüttenden führen. Diese Richtungsanzeige kann aber je nach Lage des Empfängers zu den Feldlinien abweichen.

3.1.3 LVS mit drei Antennen

Seit 2003 sind LVS mit drei Antennen am Markt. Weiterhin ist für den Sendebetrieb nur eine Antenne zuständig. Im Suchmodus werden alle drei orthogonal zueinander liegenden Antennen verwendet, um eine größtmögliche Amplitude des empfangenen Signals zu garantieren. Durch digitale Signalverarbeitung kann die Richtung der magnetischen Feldlinien genau bestimmt werden. Dazu muss der Empfänger nicht mehr gedreht werden, um die Richtung der Feldlinien zu bestimmen. Dies ist in jeder Lage möglich.

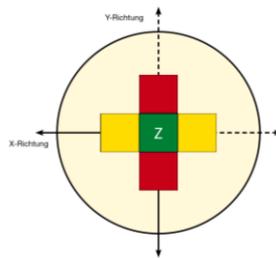


Abbildung 3.3: LVS mit drei Antennen (gelb, rot, grün). [7]

Für den Fall von Mehrfachverschütteten gibt das LVS dem Suchenden mithilfe von digitaler Signalverarbeitung immer das stärkste Empfangssignal an. Signale von weiteren Verschütteten werden im Hintergrund bearbeitet und somit ausgeblendet. Das Ausblenden eines bereits Geborgenen kann ebenso manuell erfolgen, was die weitere Suche nach Verschütteten wesentlich erleichtert.

3.2 LVS Suche

Die Überlebenschance eines ganzheitlich Lawinenverschütteten sinkt bereits in den ersten Minuten rapide ab. Schon nach 7 Minuten der Verschüttung überleben nur etwa 87% der Verschütteten. Nach 25 Minuten überleben nur noch etwa 44% und nach 40 Minuten nur noch rund 18%. Abbildung 3.4 zeigt eine graphische Darstellung der Überlebenschancen von ganzheitlich verschütteten Lawinenopfern. Es wird deutlich, dass eine effiziente Suche von Lawinenverschütteten die Überlebenschancen deutlich erhöhen kann [8].

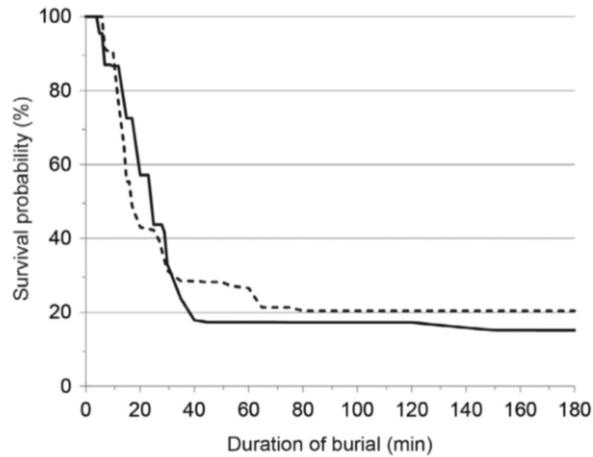


Abbildung 3.4: Überlebenskurve für Österreich (feste Linie) und die Schweiz (strichlierte Linie) für ganzheitlich verschüttete Opfer zwischen 2005 und 2013 [8]

Wird eine Person, welche ein LVS trägt von einer Lawine komplett verschüttet muss schnellstmöglich mit der Suche begonnen werden. Dazu werden die LVS der nicht Verschütteten vom Sende- in den Empfangsmodus geschaltet und mit der Suche begonnen. Die Suche wird in die Phasen Signalsuche, Grobsuche, Feinsuche und Punktsuche unterteilt. Diese Stadien der Suche werden im Folgenden allgemein Beschrieben um eine Vorstellung des Suchszenarios zu vermitteln.

3.2.1 Signalsuche

Die Signalsuche ist die erste Phase der Suche und startet direkt nach dem Lawinenabgang. Jedes LVS gibt bei einem empfangenen Signal akustische Signale ab. Daher wird bei der Signalsuche das LVS direkt ans Ohr gehalten und der Lawinenkegel abgesucht, bis ein akustisches Signal ertönt. Die Suche muss dabei systematisch erfolgen. Es werden sogenannte Suchstreifen abgegangen. Je nachdem ob es nur einen oder mehrere Suchende gibt, gibt es hierfür mehrere Möglichkeiten, wie in Abbildung 3.5 dargestellt.

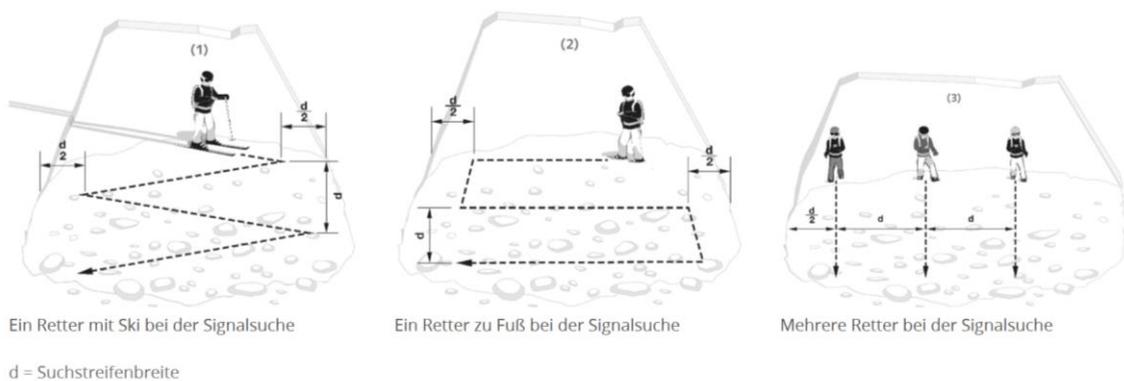


Abbildung 3.5: Signalsuche mit Suchstreifen [9]

Für die Suchbreitenstreife d werden etwa 30 m empfohlen. Dadurch wird gewährleistet, dass nicht an einem Verschütteten vorbeigegangen wird, ohne ein Signal zu empfangen.

3.2.2 Grobsuche

Nach Empfang eines ersten Signals beginnt die Grobsuche. Hierfür wird das LVS vom Ohr genommen. Auf dem Display wird mit Pfeilen eine Richtung angezeigt. Zusätzlich gibt es noch eine Entfernungsanzeige. Der Suchende bewegt sich entlang der angezeigten Pfeile und beobachtet, ob die Entfernung geringer wird. Ist dies nicht der Fall, dreht sich der Suchende um 180° .

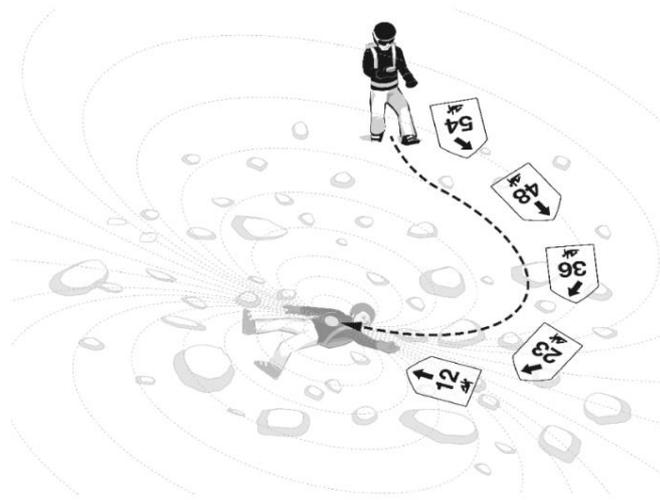


Abbildung 3.6: Grobsuche [9]

Der Suchende wird gemäß Abbildung 3.6 entlang der magnetischen Feldlinien in Richtung des Verschütteten geführt. Die Grobsuche wird solange fortgeführt, bis die Entfernung weniger als 5 m beträgt.

3.2.3 Feinsuche

Bei der Feinsuche wird nur noch mit langsamen Bewegungen gesucht. Es wird weiterhin den Pfeilen gefolgt, welche am Display des LVS angezeigt werden. Sobald die Pfeile vom LVS ausgeblendet werden, wird der Punkt mit der geringsten Entfernungsanzeige durch ein Kreuzchen ermittelt. Das LVS wird parallel zur Schneeoberfläche gehalten und nicht mehr gedreht. Der Punkt, an dem die kleinste Entfernung angezeigt wird, wird mit einem Handschuh oder ähnlichem markiert.

3.2.4 Punktsuche

Um die exakte Position des Verschütteten zu ermitteln wird mit einer Sonde im Schnee sondiert. Dabei wird die Sonde möglichst in einem 90° Winkel zur Schneeoberfläche in den Schnee gesteckt. Das Sondieren startet vom Punkt, mit der geringsten ermittelten Entfernung. Es wird, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, spiralförmig nach außen sondiert bis es zu einem Treffer kommt. Wird der Verschüttete von der Sonde getroffen, so wird das durch ein leichtes Federn der Sonde sofort wahrgenommen. Anschließend wird mit der Ausgrabung begonnen.



Abbildung 3.7: Spiralförmiges sondieren [9]

3.3 Probleme bei der Suche mit konventionellen LVS

Wie in Abbildung 3.6 ersichtlich wird der Suchende bei der Grobsuche entlang der Feldlinien geleitet, da er immer dem Maximum des Signals folgen wird. Der Suchende wird also in den meisten Fällen nicht direkt zum Opfer geführt, sondern über einen Bogen. Der längere Weg kann die Zeit der Suche erhöhen und somit die Überlebenschancen des Opfers verringern. Es wäre also wünschenswert, den direkten Weg zum Opfer angezeigt zu bekommen, um so die Suchzeit zu minimieren.

Wird ein Blick auf die Feinsuche geworfen, so können sich dort leichte Abweichungen ergeben. Wie in Abbildung 3.8 zu erkennen ist, muss das Signalmaximum an der Schneeoberfläche nicht direkt über dem Sender liegen. Bei 1- und 2-Antennen Geräten können sich auch mehrere Maxima ergeben. Moderne 3-Antennen-Geräte zeigen nur ein Maximum an, da bei 3-Antennen-Geräten die

räumliche Lage der Feldlinien ermittelt wird. Liegt der Sender schräg unter der Schneeoberfläche, so liegt die höchste Dichte der Feldlinien und somit die maximale Feldstärke nicht genau über dem Sender, sondern leicht daneben. Durch diese Abweichungen kommt es zu einem Zeitverlust beim späteren Sondieren.

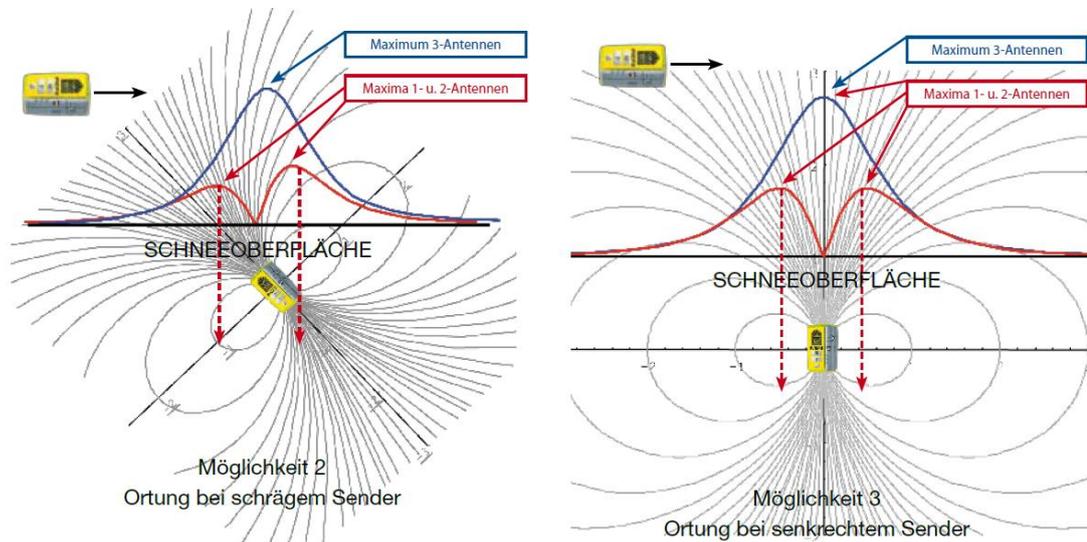


Abbildung 3.8: Ortung bei unterschiedlicher Lage des Senders. [6]

Diese Probleme könnten durch eine alternative Methode gelöst werden, welche im weiteren Verlauf der Arbeit beschrieben und untersucht wird.

4 Methode zur genaueren Ortung von LVS

In [10] wird eine neue Methode zur magnetischen Ortung beschrieben. Im Folgenden wird diese Methode, welche für LVS anwendbar ist, näher beschrieben.

4.1 Grundidee

Das Modell zur magnetischen Ortung geht von zwei Sendespulen aus. Diese liegen orthogonal zueinander. Die beiden Spulen werden jeweils mit Strömen erregt, welche zueinander um 90° phasenverschoben sind. Wird nur das Nahfeld betrachtet, so ergibt sich an jedem Punkt im Raum ein elliptisches H-Feld. Die Ellipse ist gekennzeichnet durch das H-Feld der Hauptachse H_{max} und jenes der Nebenachse H_{min} . Daraus lässt sich auf die genaue Position schließen.

4.2 Beschreibung des Modells

Ausgehend von Abbildung 4.1 liegt der Sender im Ursprung eines dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems. Die Position des Sensors ist in Kugelkoordinaten mit der Distanz r , zum Sender, dem Azimutwinkel θ und dem Polarwinkel ψ gegeben.

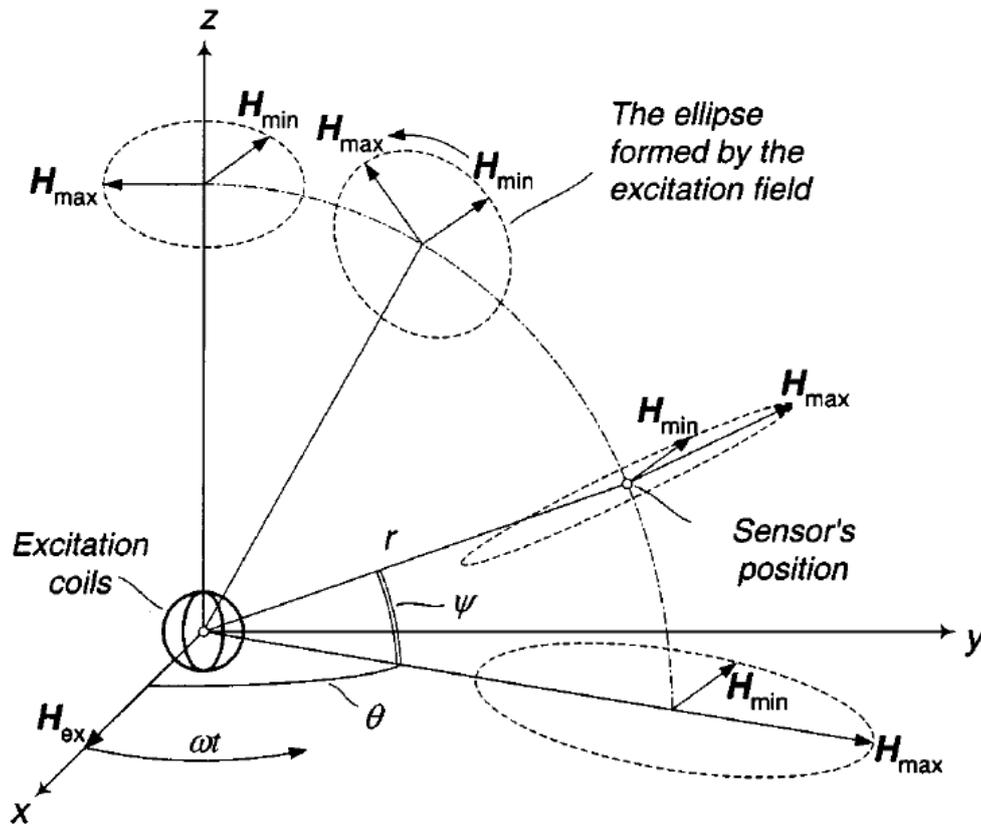


Abbildung 4.1: Elliptisches H-Feld an verschiedenen Punkten im Raum. Erzeugt von zwei orthogonalen Spulen erregt mit 90° phasenverschobenen Strömen. [10]

Der Sender besteht aus zwei Spulen, welche orthogonal zueinander liegen. Eine Spule liegt auf der x-Achse und wird mit dem Strom $i_x = I \cos(\omega t)$ erregt. Die zweite Spule liegt auf der y-Achse und wird mit dem Strom $i_y = I \sin(\omega t)$ erregt. Die Ströme sind somit um 90° phasenverschoben. Die beiden Spulen entsprechen einem magnetischen Dipol (bzw. einer mit Gleichstrom erregten Spule), welcher mechanisch mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotiert.

4.3 Berechnung der Parameter

Das H-Feld an einem Punkt im Raum kann, wie in Abbildung 4.2 gezeigt, in eine tangentielle Komponente H_t und eine radiale Komponente H_r aufgeteilt werden.

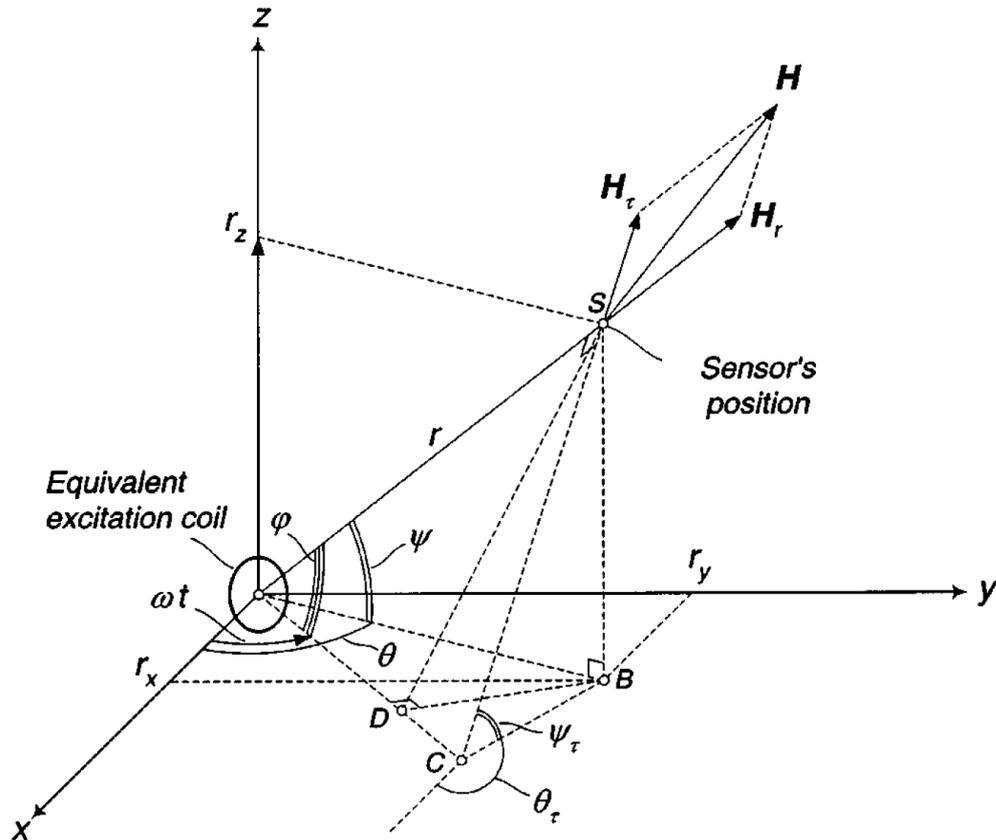


Abbildung 4.2: Beschreibung des H-Feldes im Punkt $S(r, \Psi, \theta)$, im Nahfeld. Die beiden Sendespulen sind ersetzt durch eine einzige Spule welche mechanisch mit ωt rotiert. [10]

Da die beiden Sendespulen durch einen mit ωt rotierenden magnetischen Dipol ersetzt werden können, werden zur Berechnung des H-Feldes im Raum (2.6) und (2.7) für das Nahfeld eines magnetischen Dipols eingesetzt. Wenn diese Gleichungen auf die Geometrie in Abbildung 4.2 angewandt so ergeben sich laut [10] die Gleichungen (4.1) und (4.2). Damit lässt sich das H-Feld im Raum berechnen. Dabei ist r der Abstand zum Sender, M das magnetische Dipolmoment und φ der Winkel zwischen der gedachten Linie von ωt auf der xy -Ebene und der Linie von Sender zu Empfänger, wie in Abbildung 4.2 dargestellt. Der Betrag des resultierenden H-Feldes kann aus den Beträgen H_r und H_t nach (4.4) berechnet werden, wobei M das magnetische Dipolmoment ist. M ergibt sich nach (4.3) aus dem Produkt der Anzahl der Windungen N der Spulen, dem Strom I und der Fläche A der Spulen.

$$H_r = \frac{M}{2\pi r^3} \cos \varphi \quad (4.1)$$

$$H_t = \frac{M}{4\pi r^3} \sin \varphi \quad (4.2)$$

$$M = NIA \quad (4.3)$$

$$H = \sqrt{H_r^2 + H_t^2} \quad (4.4)$$

Als nächstes sollen die Parameter H_{min} und H_{max} des elliptisch rotierenden H-Feldes bestimmt werden. Minima und Maxima können durch Ableitung von (4.4) nach φ bestimmt werden. Laut [10] ergeben sich folgende Ergebnisse, wobei das Maximum bei $\varphi = \Psi$ und das Minimum bei $\varphi = \pi/2$ auftritt:

$$H_{min} = \frac{M}{4\pi r^3}, \quad (4.5)$$

$$H_{max} = H_{min} \sqrt{3 \cos^2 \psi + 1}. \quad (4.6)$$

Allein aus den Parametern H_{min} und H_{max} können die Parameter r und Ψ für die Ortung des Senders bestimmt werden. Die Distanz r kann auf einfachste Weise durch Umformung von (4.5) bestimmt werden und ist somit allein von H_{min} und den Parametern des Senders abhängig, welche in M einfließen. Für die Bestimmung von Ψ wird analog (4.6) umgeformt. Der Winkel ist somit neben M und H_{min} auch noch von H_{max} abhängig. Somit wird gezeigt, dass r und Ψ aus den Parametern der Ellipse des H-Feldes bestimmt werden können. Die Ergebnisse werden in (4.7) und (4.8) gezeigt.

$$r = \sqrt[3]{\frac{M}{4\pi H_{min}}} \quad (4.7)$$

$$\psi = \arccos \sqrt{\frac{H_{max}^2}{3H_{min}^2} - \frac{1}{3}} \quad (4.8)$$

Der letzte fehlende Parameter, der für die Ortung benötigt wird, ist der Azimutwinkel. Laut [10] wird dieser aus einem Vergleich der Phase des Stromes der Sendespulen und jener des H-Feldes bestimmt. Im Falle der LVS-Ortung ist diese Phase jedoch nicht bekannt. Im Zuge der Untersuchung dieser Methode auf die Anwendbarkeit auf LVS-Ortung wurde eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Azimuts gefunden. Wird der Sender als rotierender Dipol betrachtet, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, so tritt das Maximum des H-Feldes für Ψ gleich φ auf. Das bedeutet, dass die Achse des Dipols in Richtung der Projektion des Empfängers S auf die xy-Ebene zeigt (Punkt B in Abbildung 4.2). Daraus lässt sich schließen, dass auch die xy-Komponente des H-Feldes zu diesem Zeitpunkt in dieselbe Richtung zeigen. Somit lässt sich aus der xy-Komponente von \mathbf{H}_{max} der Winkel ψ bestimmen.

In einer realen Anwendung besteht der Empfänger aus drei orthogonalen Spulen, analog zu den zwei Sendespulen. In diesen Spulen wird eine Spannung induziert welche proportional zum H-Feld ist. Somit lässt sich aus den induzierten Spannungen der Vektor \mathbf{H} und somit auch H_{max} und H_{min} bestimmen. Sind diese Werte bekannt, können daraus alle nötigen Parameter für die LVS-Ortung

ermittelt werden. Die hier gezeigte Methode bildet die Grundlage für die Untersuchungen bezüglich der LVS-Ortung in den folgenden Kapiteln.

5 Das MATLAB-Modell

In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Funktionen des MATLAB-Modells beschrieben, mit dem die in Kapitel 4 erläuterte Methode untersucht werden soll. Das Modell umfasst die geometrische Anordnung der Sende- und Empfangsspulen sowie die Erregerströme. Daraus werden das H-Feld im Raum sowie die induzierten Spannungen in den Empfangsspulen errechnet. Für die Berechnung wird die PEEC-Methode angewandt.

5.1 Die „Partial Element Equivalent Circuit“ (PEEC) Methode

Um einen möglichst geringen Simulations- und Rechenaufwand zu haben, wird für die Untersuchung die PEEC-Methode herangezogen. Das Grundprinzip, die Art der Diskretisierung und die Aufstellung des Gleichungssystems wird in den folgenden Unterkapiteln kurz beschrieben.

5.1.1 Grundprinzip

Albert E. Ruehli beschrieb die PEEC-Methode zur Lösung elektromagnetischer Feldprobleme in [11] zum ersten Mal. In einem System bestehend aus mehreren leitenden Elementen sind die Stromdichten in den Elementen sowie die Oberflächenladungen als unbekannt anzusehen. Das Problem soll in einem weiten leeren Raum liegen und mit integralen Gleichungen dargestellt werden. Würde das Ganze in differenzieller Form gelöst werden, so müsste auch der gesamte leere Raum in Form von Knoten beschrieben werden.

Ausgangspunkt für die PEEC-Methode ist der Ausdruck der elektrischen Feldstärke an einem Punkt \mathbf{r} über das Skalar- und Vektorpotential, ϕ bzw. \mathbf{A} . Gleichung (5.1) kann aus den Maxwell Gleichungen hergeleitet werden.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -j\omega\mu\mathbf{A}(\mathbf{r}') - \nabla\phi(\mathbf{r}') \quad (5.1)$$

Liegt \mathbf{r} an der Oberfläche eines Leiters und wird auf die Potentiale die Green'sche Funktion angewandt so ergibt sich laut [12] die elektrische Feldstärke zu:

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r})}{\sigma} + j\omega\mu \int_{v'} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dv' + \frac{\nabla}{\varepsilon_0} \int_{v'} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') q(\mathbf{r}') dv', \quad (5.2)$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-j\beta|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}. \quad (5.3)$$

Dabei ist \mathbf{E}^i ein extern anliegendes elektrisches Feld, \mathbf{J} die Stromdichte, σ die elektrische Leitfähigkeit des Leiters und q die Ladungsdichte. Der Integralkern bzw. die Green'sche Funktion G erfüllt dabei die Randbedingungen, welche zur Lösung der Differentialgleichung nötig sind. Diese integrale Gleichung und die Unterteilung der Leiter in partielle Elemente bilden die Basis der PEEC-Methode.

Wird ein elektromagnetisches Feldproblem mit der PEEC-Methode untersucht, so werden die leitenden Elemente diskretisiert. Die Leiter werden dabei in kleine Zellen aufgeteilt. In diesen Zellen gelten ein konstanter Stromfluss und ein konstantes Potential. Dazu werden Knoten eingefügt, die die Volumen-Zellen miteinander verbinden. Diese Volumen-Zellen dienen der Abbildung des Stromflusses. Für die Ladungsverteilung, also zum Berechnen der Potentiale, werden Oberflächen-Zellen eingefügt. Diese teilen die Volumen-Zellen genau in der Mitte auf.

Die geometrische Anordnung der Volumen-Zellen wird genutzt für die Berechnung der partiellen Induktivitäten. Für alle Volumen-Zellen wird eine Selbstinduktivität und eine Gegeninduktivität zu den anderen Zellen berechnet. Analog dazu wird die Anordnung der Oberflächen-Zellen genutzt, um die partiellen Koeffizienten des Potentials zu berechnen. Diese bilden die kapazitive Kopplung zwischen den Zellen ab. Alle Knoten sind auch mit einem Null-Knoten über eine Kapazität $C_{\alpha\alpha}$ die sogenannte Pseudo-Kapazität, verbunden, wobei α den jeweiligen Knoten angibt. In die PEEC-Berechnungen wird diese Pseudo-Kapazität über den partiellen Selbstkoeffizienten für das Potential $P_{\alpha\alpha} = 1/C_{\alpha\alpha}$ eingebunden. Die Leitungsverluste werden eingebunden, indem der ohmsche Spannungsabfall in den Volumen-Zellen in Richtung des Stromflusses berechnet wird.

Auf diese Art und Weise können die Zellen zwischen den Knoten mit einer einfachen Ersatzschaltung, wie in Abbildung 5.1, dargestellt werden.

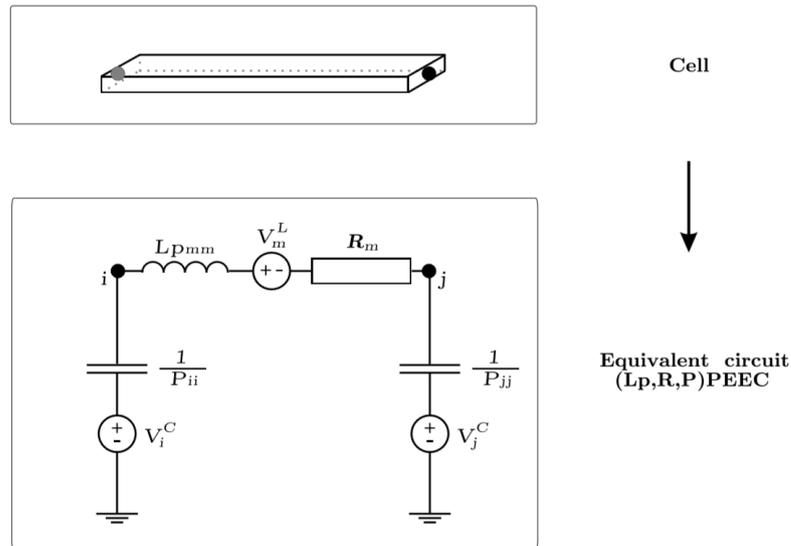


Abbildung 5.1: Ersatzschaltbild einer Zelle, eines diskretisierten Leiters. [12]

Der Längsweig zwischen den Knoten i und j beschreibt die Koeffizienten der Volumen Zelle. Berücksichtigt wird die Selbstinduktivität L_{pmm} und der ohmsche Widerstand R_m der Zelle m . Die Spannungsquelle V_m^L berücksichtigt die Gegeninduktivität, also die magnetische Kopplung, zu den anderen Volumen-Zellen.

Die Querzweige beschreiben die Koeffizienten der Oberflächen-Zelle des jeweiligen Knoten. P_{ii} ist der Koeffizient für die Kapazität gegenüber dem Null-Knoten. Die Spannung V_i^C berücksichtigt die Kapazitive Kopplung mit den anderen Oberflächen Zellen.

Auf diese Weise kann ein dreidimensionales elektromagnetisches Feldproblem über eine äquivalente Ersatzschaltung beschrieben werden. Es werden die Ströme I in den einzelnen Elementen berechnet. Dabei ist $I = |\mathbf{J}| a$ und a die Fläche der Elemente normal zum Stromfluss. Weiters werden die Potentiale berechnet, welche an den Knoten anliegen, die die einzelnen Elemente miteinander verbinden.

5.1.2 Diskretisierung

Als erster Schritt bei einer PEEC-Berechnung ist eine geeignete Diskretisierung der Elemente zu wählen. Dabei sollen die Zellen so klein gewählt werden, dass man von einem konstanten Stromfluss innerhalb der Zellen ausgehen kann. Bei zu feiner Diskretisierung steigt allerdings auch der Rechenaufwand deutlich an.

Als einfachstes Beispiel wird der eindimensionale Fall betrachtet. Abbildung 5.2 zeigt einen Stromdurchflossenen Leiter. Es werden vier Knoten festgelegt. Daraus ergeben sich drei Volumen-Zellen und vier Oberflächen-Zellen.

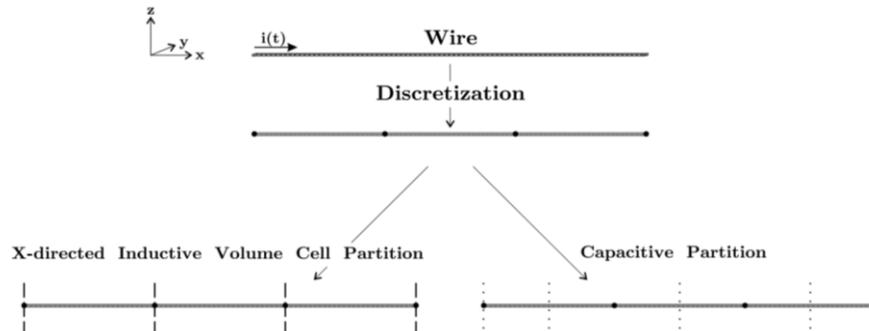


Abbildung 5.2: 1D Diskretisierung eines Stromdurchflossenen Leiters. Die Knoten werden von schwarzen Punkten dargestellt, strichlierte Linien zeigen die Volumen-Zellen und gepunktete Linien die Oberflächen-Zellen. [12]

Das Ganze kann analog auf den dreidimensionalen Fall angewandt werden. Abbildung 5.3 zeigt ein Leiterstück mit 18 Knoten. Es ergeben sich 12 Volumen-Zellen und 18 Oberflächen-Zellen.

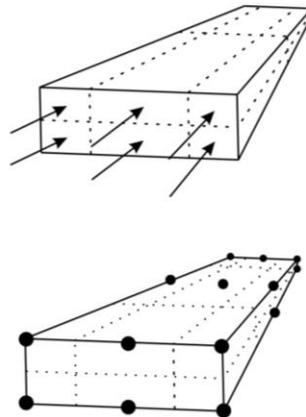


Abbildung 5.3: 3D Diskretisierung eines Leiterstücks mit 18 Knoten. Schwarze Punkte zeigen die Knoten, strichlierte Linien die Volumen-Zellen und gepunktete Linien die Oberflächen-Zellen. Die Pfeile zeigen die Richtung des Stromflusses. [12]

5.1.3 Berechnung der partiellen Elemente

Im nächsten Schritt werden die partiellen Elemente berechnet, welche für die äquivalente Ersatzschaltung benötigt werden. Diese ergeben sich aus:

- Partiiellen Induktivitäten
- Partiiellen Koeffizienten für das Potential
- Volumen-Zellen Widerstände

Partielle Induktivitäten

Die partiellen Induktivitäten L_p werden nach (5.4) berechnet [12].

$$Lp_{\alpha\beta} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{1}{a_\alpha a_\beta} \int_{v_\alpha} \int_{v_\beta} \frac{1}{R} dv_\alpha dv_\beta \quad (5.4)$$

Dabei sind α und β zwei Volumen-Zellen. Bei $\beta = \alpha$ entspricht $Lp_{\alpha\alpha}$ der partiellen Selbstinduktivität der Volumen-Zelle α . a_α und a_β entsprechen der Fläche der Volumen-Zellen α und β , welche normal zur Richtung des Stromflusses liegt. Die Parameter v_α und v_β entsprechen dem Volumen der jeweiligen Zelle und R ist die Distanz zwischen dem Mittelpunkt der Zellen α und β . Gleichung (5.4) kann numerisch gelöst werden. Für verschiedene Geometrien, wie einen Quader, gibt es vereinfachte Formeln für die Gegen- und Selbstinduktivität, welche den Rechenaufwand verringern können. Auf diese soll hier nicht weiter eingegangen werden. Es wird auf [12] verwiesen.

Partielle Koeffizienten des Potentials

Der Berechnung der Koeffizienten des Potentials p_{ij} liegt (5.5) zugrunde [12].

$$p_{ij} = \frac{1}{S_i S_j} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{1}{R} dS_j dS_i \quad (5.5)$$

Dabei entsprechen i und j den Knoten und somit auch einer Oberflächen-Zelle. Für $j = i$ ergibt p_{ii} den partiellen Selbstkoeffizienten für das Potential der Oberflächen-Zelle i . In allen anderen Fällen ist p_{ij} der partielle Gegenkoeffizient für das Potential zwischen den Oberflächen-Zellen i und j und beschreibt die kapazitive Kopplung zwischen den Zellen. S_i und S_j sind die Oberflächen der Oberflächen-Zellen i und j . R beschreibt wieder die Distanz zwischen Mittelpunkten der Zellen i und j . Analog zur partiellen Induktivität gibt es auch hier vereinfachte Formeln für spezielle Geometrien, welche angewandt werden können.

Partieller Ohm'scher Widerstand

Der partielle Widerstand einer Volumen-Zelle kann auf einfachste Weise nach (5.6) berechnet werden [12].

$$R_\gamma = \frac{l_\gamma}{a_\gamma \sigma_\gamma} \quad (5.6)$$

Dabei ist l_γ die Länge der Volumen-Zelle in Richtung des Stromflusses, a_γ die Fläche der Zelle normal zur Stromrichtung und σ_γ die elektrische Leitfähigkeit des Materials der Zelle.

5.1.4 Formulierung der Matrizen

Die im vorherigen Abschnitt berechneten partiellen Elemente werden in Matrizen gespeichert. Diese dienen der Formulierung des Gleichungssystems und deren Lösung. Zur Beschreibung der Formulierung der Matrizen soll von einem einfachen zweidimensionalen Beispiel ausgegangen werden. Es besteht aus drei Leiterstücken wie in Abbildung 5.4 gezeigt.

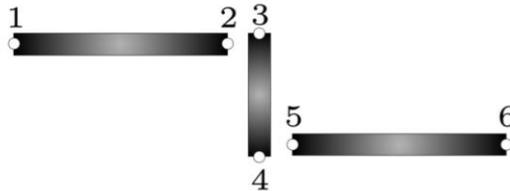


Abbildung 5.4: Drei Leiterstücke mit nummerierten Knoten. [12]

Es ergeben sich die Volumen-Zellen wie in Abbildung 5.5 dargestellt.



Abbildung 5.5: Beschriftung der Volumen-Zellen mit α , β und γ . [12]

Aus (5.4) lassen sich die Elemente der partiellen Induktivitäten Matrix L berechnen.

$$L = \begin{bmatrix} L_{\alpha\alpha} & L_{\alpha\beta} & L_{\alpha\gamma} \\ L_{\beta\alpha} & L_{\beta\beta} & L_{\beta\gamma} \\ L_{\gamma\alpha} & L_{\gamma\beta} & L_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Bei n Volumen Zellen ist die L -Matrix eine symmetrische $n \times n$ -Matrix.

Die Matrix P für die partiellen Koeffizienten des Potentials lässt sich aus den Oberflächen-Zellen und Gleichung (5.5) aufstellen.

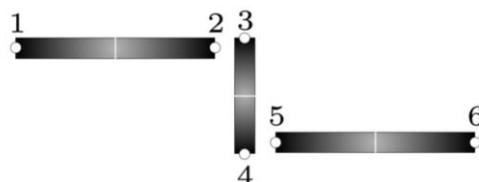


Abbildung 5.6: Oberflächen-Zellen nummeriert von 1 bis 6. [12]

Die Oberflächen-Zellen werden, wie in Abbildung 5.6 gezeigt, nach den Knoten beschriftet und die Koeffizienten der Matrix berechnet.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Bei n Knoten ergibt sich eine $n \times n$ -Matrix.

Die Koeffizienten der Widerstandsmatrix R lassen sich über (5.6) bestimmen. Da es keine resistive Kopplung zwischen den Zellen gibt handelt es sich um eine Diagonalmatrix.

$$R = \begin{bmatrix} R_{\alpha\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & R_{\beta\beta} & 0 \\ 0 & 0 & R_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Es wird noch eine weitere Matrix benötigt, die angibt welche Knoten miteinander verbunden sind. Hierfür wird die Verbindungs-Matrix A eingeführt. Aus Abbildung 5.4 ist zu erkennen, dass jeweils die Knoten 1 und 2, 3 und 4, sowie 5 und 6 miteinander verbunden sind. Die Matrix A definiert auch die Stromrichtung in jeder Volumen-Zelle. Jede Zeile der Matrix entspricht dabei einem Knoten. Die Zeilen der Matrix entsprechen den Volumen-Zellen und die Spalten den Knoten. Eine -1 bedeutet, dass der Strom vom jeweiligen Knoten in Richtung der Zelle kommt. Eine 1 bedeutet, dass der Strom von der Zelle in Richtung des Knotens fließt. Für das hier diskutierte Beispiel könnte sich folgende Matrix ergeben:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

Dabei fließt der Strom von Knoten 1 nach 2, von 3 nach 4 und von 5 nach 6.

Aus diesen Matrizen lassen sich über verschiedene Methoden die Ströme und Spannungen der Zellen im Frequenzbereich berechnen. Es wird von rein sinusförmigen Größen ausgegangen, daher ist eine anschließende Transformation in den Zeitbereich problemlos möglich. Die verschiedenen Methoden zur Aufstellung und Lösung des Gleichungssystems werden in [12] beschrieben.

5.2 MATLAB-Funktionen

Im MATLAB Modell können verschiedene Parameter für die Erstellung eines elektromagnetischen Feldproblems festgelegt werden. Für die Berechnungen mittels PEEC-Methode wurde vom Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik ein Softwarepaket zur Verfügung gestellt, welches die MATLAB-Funktionen *FUN_PEEC*, *H_field* und *E_field* enthält. Diese Funktionen wurden bei den Untersuchungen ohne Änderungen übernommen.

5.2.1 Die Funktion FUN_PEEC

Die Funktion FUN_PEEC dient der Berechnung sämtlicher Spannungen und Ströme im Modell mittels PEEC-Methode. Es werden verschiedene Parameter übergeben:

Load

In der Matrix *Load* werden die verschiedenen Lasten des Modells festgelegt. Jede Last hat die Parameter *node_start*, *node_end*, *R*, *L* und *C_inv*. Dabei geben *node_start* und *node_end* die Knoten an zwischen denen die Last liegt. *R* gibt den Ohm'schen Widerstand, *L* die Induktivität und *C_inv* den Kehrwert der Kapazität der Last an.

Current_Source

In der Matrix *Current_Source* werden die Stromquellen des Modells festgelegt. Für jede Stromquelle wird ein Knoten und ein Strom in komplexer Schreibweise der Form $i = (a+jb) I$ oder $i = I e^{j\varphi}$ festgelegt. Liegt eine Stromquelle zwischen den Knoten *a* und *b*, so müssen zwei Stromquellen angegeben werden. Der Strom startet an der Stromquelle am Knoten *a* mit $i = I e^{j\varphi}$, und fließt über die Stromquelle am Knoten *b* mit $i = -I e^{j\varphi}$ zurück.

Matrix P0

Die Matrix *P0* gibt die Koordinaten aller Knoten im Modell an. Gibt es *n* Knoten im Modell, so handelt es sich um eine $n \times 3$ -Matrix. Die drei Spalten geben die x-, y- und z-Koordinaten an. Die *n* Zeilen stehen für die *n* Knoten im Modell. Mithilfe der Matrix *P0* können die Abstände und die Lage der einzelnen Elemente zueinander bestimmt werden. Dies wird für die Berechnung der partiellen Elemente benötigt. In (5.11) wird der Aufbau der Matrix gezeigt.

$$P0 = \begin{array}{l} \text{Knoten 1} \\ \text{Knoten 2} \\ \vdots \\ \text{Knoten } (n-1) \\ \text{Knoten } n \end{array} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n-1} & y_{n-1} & z_{n-1} \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Matrix G

Die Matrix *G* entspricht der Verbindungsmatrix, welche in Kapitel 5.1.4 bereits beschrieben wurde.

Matrix Rho

Die Matrix *Rho* gibt den spezifischen Widerstand der verwendeten Materialien an. Da in diesem Modell nur Kupfer verwendet wird, handelt es sich um eine $I \times I$ Matrix, welche den spezifischen Widerstand von Kupfer enthält.

Matrix Material_type

Die Matrix *Material_type* definiert für jede Volumen-Zelle im Modell den spezifischen Widerstand. Bei m Volumen-Zellen handelt es sich um eine $m \times I$ Matrix. Jede Zeile steht für eine Volumen-Zelle. Steht eine 1 in der Matrix, so wird für die jeweilige Zelle das erste Element der Matrix *Rho* als spezifischer Widerstand verwendet. In (5.12) wird eine Matrix gezeigt, bei der für jede Volumen-Zelle jener spezifische Widerstand verwendet wird, der in der Matrix *Rho* an erster Stelle steht.

$$\begin{array}{r}
 \text{Zelle 1} \\
 \text{Zelle 2} \\
 \vdots \\
 \text{Zelle } (m - 1) \\
 \text{Zelle } m
 \end{array}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 \\
 1 \\
 \vdots \\
 1 \\
 1
 \end{bmatrix}
 \quad (5.12)$$

Matrix Radius

In der Matrix *Radius* wird der Radius der Leiter angegeben. In dieser Funktion werden ausschließlich zylindrische Leiterstücke verwendet. Für diese Zylinder kann hier der Radius definiert werden. Analog zur Matrix *Material_type* wird der Radius für jede Volumen-Zelle angegeben. Es handelt sich bei m Volumen-Zellen um eine $m \times I$ Matrix.

Zusätzlich zu den oben genannten Matrizen wird die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ übergeben.

Der Output der Funktion besteht aus den beiden Matrizen X_I und X_V , welche komplexe Größen der Ströme und Spannungen enthalten:

 X_I

Die Matrix X_I enthält die Ströme der Volumen-Zellen. Bei m Volumen-Zellen ergibt dies eine $m \times I$ Matrix, wobei jede Zeile den komplexen Strom i der jeweiligen Volumen-Zelle enthält.

$$X_I = \begin{bmatrix} i \text{ Zelle } 1 \\ i \text{ Zelle } 2 \\ \vdots \\ i \text{ Zelle } (m-1) \\ i \text{ Zelle } m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_{m-1} \\ i_m \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

X_V

Die Matrix X_V enthält die Potentiale, welche an den Oberflächen-Zellen und somit an den Knoten anliegen. Ein Modell mit n Knoten ergibt eine $I \times n$ Matrix. Jede Spalte bildet das komplexe Potential V des zugehörigen Knoten ab.

$$X_V = \begin{bmatrix} K1 & K2 & \dots & K(n-1) & Kn \\ V_1 & V_2 & \dots & V_{n-1} & V_n \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Somit können mithilfe der Funktion `FUN_PEEC` sämtliche Ströme und Spannungen der diskretisierten Elemente berechnet werden.

5.2.2 Die Funktion H_Field

Mit der Funktion H_Field wird die magnetische Feldstärke H an einem Punkt im Raum berechnet. Dabei wird für jede Volumen-Zelle, also jedes kleine zylindrische Leiterstück, das daraus resultierende H-Feld am gewünschten Punkt berechnet. Folgende Parameter werden übergeben:

X_I

Es wird die Matrix X_I aus Kapitel 5.2.1 übergeben. Diese gibt den Wert des Stromes für jede Volumen-Zelle, welcher zuvor mittels PEEC-Methode berechnet wurde, an.

$coords_start$ und $coords_end$

Die beiden Matrizen $coords_start$ und $coords_end$ geben für jede Volumenzelle die x-, y- und z-Koordinaten des Start- und Endpunkts an. Bei m Volumen-Zellen ergibt dies eine $m \times 3$ Matrix. Die beiden Matrizen lassen sich aus der Matrix $P0$ und der Matrix G ermitteln. Für jede Volumen-Zelle werden die zugehörigen Knoten aus der Matrix G ermittelt. Die Koordinaten dieser Knoten werden aus der Matrix $P0$ ermittelt und dann in $coords_start$ bzw. $coords_end$ geschrieben.

comp_point_x, *comp_point_y* und *comp_point_z*

Hier werden die x-, y- und z-Koordinate des Punkts angegeben, für welchen das H-Feld berechnet werden soll.

near

Der Parameter *near* gibt an ob es sich um eine Berechnung im Nah- oder Fernfeld handelt. Eine 1 steht für das Nahfeld, eine 0 für das Fernfeld.

Zusätzlich wird die Kreisfrequenz ω übergeben.

Der Output der Funktion besteht aus den drei Werten H_x , H_y und H_z . Diese Parameter geben die x-, y- und z-Komponente der magnetischen Feldstärke H am Punkt an, welcher über *comp_point* definiert wurde. Die Berechnungen werden im Frequenzbereich durchgeführt. Somit wird das H-Feld in komplexer Schreibweise zurückgegeben.

5.2.3 Die Funktion *E_field*

Die Funktion *E_Field* berechnet analog zur Funktion *H_Field* aus Kapitel 5.2.2 die elektrische Feldstärke E an einem Punkt im Raum. Es werden dieselben Parameter übergeben. Formeln für das H-Feld werden durch solche für das E-Feld ersetzt. Als Output werden die x-, y- und z-Komponenten E_x , E_y und E_z für die elektrische Feldstärke E zurückgegeben.

5.2.4 Die Funktion *createCoil*

Die Funktion *createCoil* erzeugt die geometrische Anordnung einer Spule und definiert gegebenenfalls eine Stromquelle für diese. Es werden sämtliche Matrizen zurückgegeben, welche für die PEEC-Berechnung benötigt werden (Matrix.PO, Matrix.G, Matrix.rho, Matrix.Material_type und Matrix.radius). Die folgenden Parameter werden übergeben und definieren die Eigenschaften der Spule:

loop_radius

Mit *loop_radius* wird der Radius der Spule festgelegt.

wire_radius

Die erzeugte Spule besteht aus vielen kleinen, zylindrischen Leiterstücken. Mit dem Parameter *wire_radius* wird der Radius dieser Leiter angegeben.

Wdg

Mit dem Parameter *Wdg* wird die Anzahl der Windungen der Spule definiert.

N_loop

N_loop definiert die Anzahl der Leiterstücke pro Windung. Je größer *N_loop* gewählt wird, umso genauer entsprechen die Windungen einem Kreis und umso genauer werden die Berechnungen. Mit der Größe von *N_loop* steigt aber auch der Rechenaufwand bei der PEEC-Methode und der Berechnung der Felder an.

excitation

Mit dem Parameter *excitation* wird der Strom definiert, mit welchem die Spule erregt wird. Dieser wird in komplexer Schreibweise angegeben.

gap

Anfang und Endpunkt der Spule werden mit zwei geraden Leiterstücken abgeschlossen, welche sich annähern. Mit dem Parameter *gap* wird die Größe der Lücke definiert, welche sich zwischen den beiden Leiterstücken ergibt. In dieser Lücke liegt die Stromquelle.

rho

Der spezifische Widerstand der Leiter wird mit dem Parameter *rho* definiert.

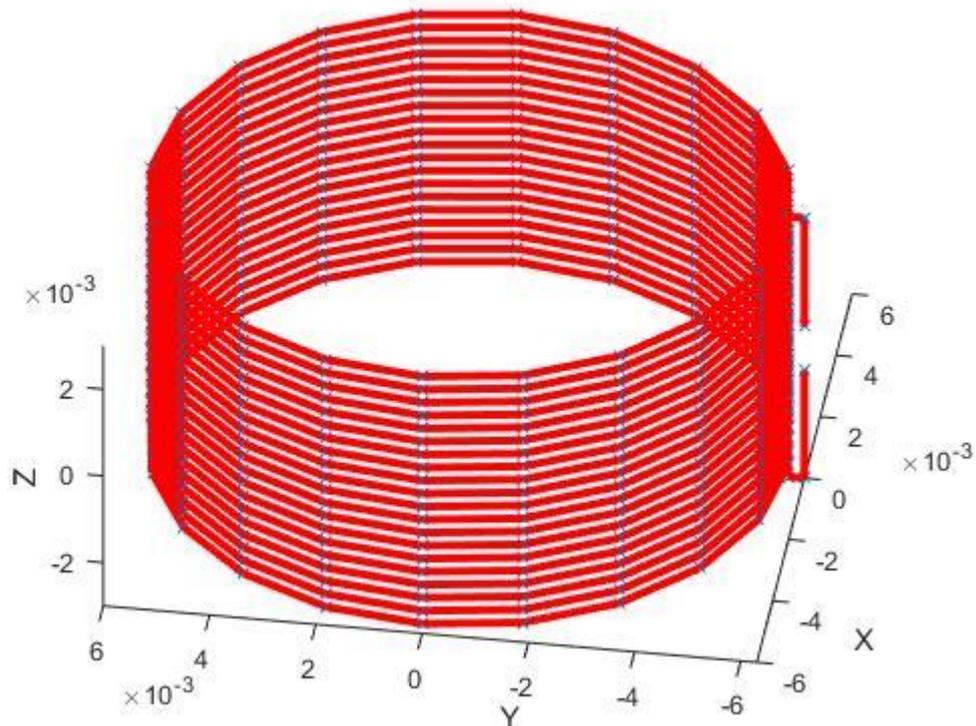


Abbildung 5.7: Mit der Funktion `createCoil` erzeugte Spule mit 20 Windungen. An der rechten Seite zu sehen die Lücke (gap) in der die Stromquelle liegen soll.

In Abbildung 5.7 wird die geometrische Anordnung einer mit der Funktion `createCoil` erzeugte Spule gezeigt. Die Spule besteht aus 20 Windungen mit $N_{loop} = 20$. Das bedeutet, dass jede Windung aus 20 Leiterstücken besteht. Der Parameter `gap` wurde mit $0,001\text{ m}$ groß genug gewählt um die Lücke, in der die Stromquelle sitzt, auf der Abbildung deutlich erkennbar zu machen. Die Geometrie der Leiter der Stromquelle wird nicht mitmodelliert. Es wird nur deren Stromwert und die Knoten, mit denen sie verbunden ist, angegeben. Die Anzahl der Knoten n ergibt sich zu $N_{loop} \cdot Wdg + 4$, da noch vier Knoten in der Zuleitung vorhanden sind. Es sind $n-1$ Volumen-Zellen vorhanden.

5.2.5 Die Funktionen `movecoord` und `rotcoord`

Eine mit der Funktion `createCoil` erzeugte Spule liegt in der xy -Ebene. Die Spule kann mit der Funktion `movecoord` im Raum verschoben und mit `rotcoord` um die x -, y - oder z -Achse gedreht werden. Somit kann die Spule an jedem Punkt im Raum mit jeder beliebigen Lage positioniert werden.

5.2.6 Die Funktion mergeCircuits

Werden zwei Spulen im System benötigt, so werden diese zunächst getrennt mit der Funktion *createCoil* erzeugt und an die gewünschte Position im Raum verschoben. Daraus ergeben sich zwei getrennte Systeme mit jeweils zwei Matrizen für die PEEC-Methode. Also zweimal *Matrix.PO*, zweimal *Matrix.G*, usw.. Der Funktion *mergeCircuits* werden die Matrizen beider Systeme übergeben. Diese fügt jeweils zwei Matrizen passend zusammen. In (5.15) und (5.16) wird gezeigt, wie das Zusammenfügen im Falle der Matrix *PO* bzw. *G* funktioniert.

$$PO: \begin{bmatrix} x_{a1} & y_{a1} & z_{a1} \\ x_{a2} & y_{a2} & z_{a2} \\ x_{a3} & y_{a3} & z_{a3} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_{b1} & y_{b1} & z_{b1} \\ x_{b2} & y_{b2} & z_{b2} \\ x_{b3} & y_{b3} & z_{b3} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_{a1} & y_{a1} & z_{a1} \\ x_{a2} & y_{a2} & z_{a2} \\ x_{a3} & y_{a3} & z_{a3} \\ x_{b1} & y_{b1} & z_{b1} \\ x_{b2} & y_{b2} & z_{b2} \\ x_{b3} & y_{b3} & z_{b3} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$G: \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Werden mehr als zwei Spulen benötigt, so werden zunächst die ersten zwei Spulen miteinander kombiniert. Das erhaltene Ergebnis wird mit der dritten Spule kombiniert. Dies wird solange fortgesetzt, bis alle Spulen in einem System zusammengefasst sind.

5.3 Erstellung eines Basismodells

Mithilfe der oben genannten Funktionen soll Schritt für Schritt ein Modell erarbeitet werden, welches für die Untersuchung der Methode aus Kapitel 4 verwendet werden kann. Das erste Modell beginnt mit Untersuchungen an einer einzigen Spule und wird dann stetig erweitert.

5.3.1 Modell: 1 Sendespule

Es wird mit *createCoil* eine Spule mit den Parametern aus Tabelle 5.1 erzeugt. Die dadurch erzeugte Spule, welche in Abbildung 5.8 dargestellt ist, hat im Vergleich zur Spule aus Abbildung 5.7 ein viel kleineres gap.

<i>loop_radius</i>	$6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
<i>wire_radius</i>	$5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
<i>Wdg</i>	20
<i>N_loop</i>	20
<i>rho</i>	$1,7 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
<i>excitation</i>	1 A
<i>f</i>	$457 \cdot 10^3 \text{ Hz}$
<i>gap</i>	$1 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

Tabelle 5.1: Parameter für die Erzeugung einer Spule im MATLAB-Modell

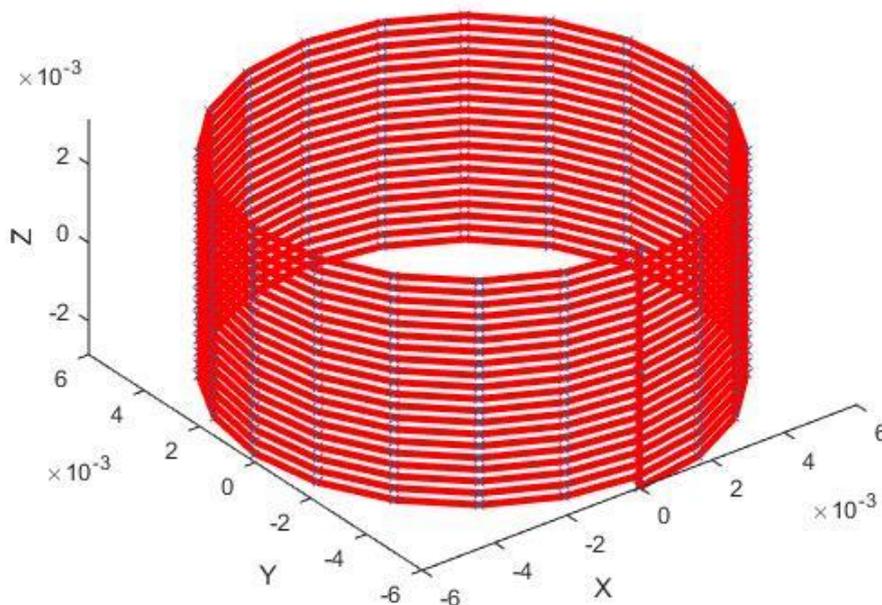


Abbildung 5.8: Mit createCoil erzeugte Spule mit den Parametern aus Tabelle 5.1.

Mit der Funktion H_field wird die magnetische Feldstärke H an Punkten auf der x- bzw. z-Achse, wie in Abbildung 5.9 dargestellt, berechnet. Es wird überprüft, ob die Ergebnisse mit jenen aus (2.6) und (2.7) übereinstimmen.

Die Punkte auf der z-Achse ergeben einen Winkel von $\theta = 0^\circ$. Laut (2.7) wird $H_\theta = 0$. Die einzige Komponente des H-Feldes bleibt H_r und kann über (2.6) berechnet werden. H_r zeigt in z-Richtung und entspricht somit H_z .

Für Berechnungen auf der x-Achse gilt $\theta = 90^\circ$. Somit wird H_r laut (2.6) zu null. H_θ kann über (2.7) berechnet werden und entspricht dem Betrag von H_z .

Es ist zu beachten, dass für die Berechnungen nach (2.6) und (2.7) die längliche Ausdehnung der Spule nicht berücksichtigt wurde, bei der Simulation mit MATLAB hingegen schon.

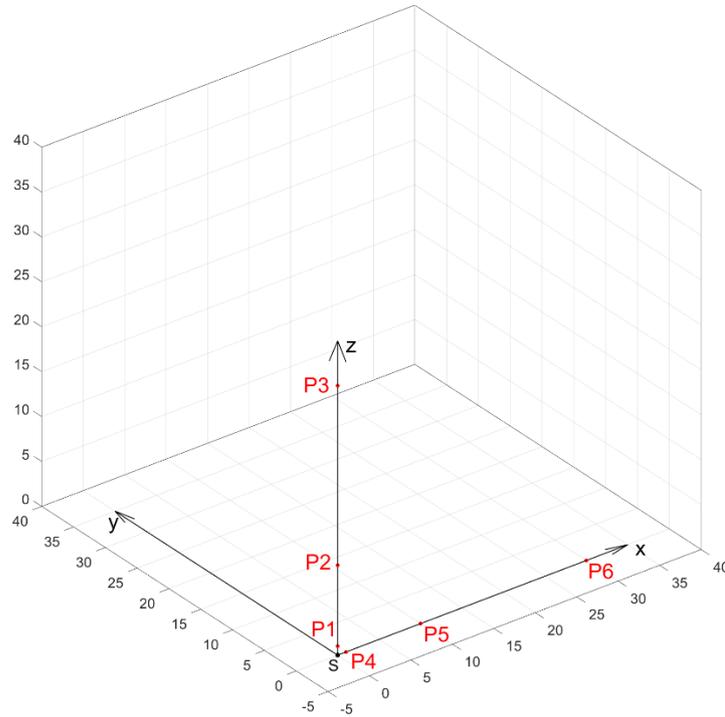


Abbildung 5.9: Darstellung der Punkte für die eine Feldberechnung durchgeführt wird.

	MATLAB-Berechnungen mit PEEC-Methode			Berechnung über (2.6) und (2.7)			
	$[x,y,z]$ in m	$[r,\Theta]$ in m	H_x in A/m	H_y in A/m	H_z in A/m	H_r in A/m	H_Θ in A/m
P_1	$[0,0,1]$	$[1,0]$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$2,36 \cdot 10^{-6}$	$3,54 \cdot 10^{-4}$	$3,60 \cdot 10^{-4}$	0
P_2	$[0,0,10]$	$[10,0]$	$3,35 \cdot 10^{-9}$	$2,37 \cdot 10^{-9}$	$3,56 \cdot 10^{-7}$	$3,60 \cdot 10^{-7}$	0
P_3	$[0,0,30]$	$[30,0]$	$2,23 \cdot 10^{-10}$	$2,72 \cdot 10^{-10}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-8}$	0
P_4	$[1,0,0]$	$[1,90]$	$5,66 \cdot 10^{-6}$	$4,46 \cdot 10^{-6}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$	0	$1,80 \cdot 10^{-4}$
P_5	$[10,0,0]$	$[10,90]$	$5,76 \cdot 10^{-9}$	$4,48 \cdot 10^{-8}$	$1,76 \cdot 10^{-7}$	0	$1,80 \cdot 10^{-7}$
P_6	$[30,0,0]$	$[30,90]$	$2,21 \cdot 10^{-10}$	$5,15 \cdot 10^{-9}$	$6,31 \cdot 10^{-9}$	0	$6,67 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 5.2: Vergleich des H-Feldes zwischen numerisch und analytisch ermittelten Werten.

Werden die Ergebnisse in Tabelle 5.2 betrachtet, so zeigt sich, dass die Werte welche mit der PEEC-Methode ermittelt wurden relativ gut mit jenen aus der theoretischen Berechnung übereinstimmen. Es ergeben sich Abweichungen, welche kleiner als 6% sind. Zur Überprüfung wurde der Punkt P_2 mit einer doppelt so feinen Diskretisierung berechnet. Der Fehler wurde dadurch auf 0,04% gesenkt. Um den Rechenaufwand nicht zu groß werden zu lassen, soll die ursprüngliche Diskretisierung beibehalten werden.

Die Spule soll noch an die, von der Norm vorgegebene, Mindestfeldstärke angepasst werden. Wie in Kapitel 6 beschrieben, schreibt die Norm EN 700 318 eine Mindestfeldstärke für das H-Feld von $0,5\mu A/m$. Diese Feldstärke wird in einem Abstand von 10m zur Spule gemessen und zwar an jener Stelle, an der das H-Feld am stärksten ist. Dies ist entlang der Achse der Spule der Fall und entspricht für die Spule in Abbildung 5.8 dem Punkt P_2 aus Abbildung 5.9. Für diesen Punkt wurde eine Feldstärke von $0,356\mu A/m$ ermittelt. Um die Feldstärke zu erhöhen gibt es drei Möglichkeiten. Ein Ferritkern kann in die Spule eingebaut werden. Dies ist mit der PEEC-Methode aber nicht möglich. Es kann die Windungszahl erhöht werden, dies würde aber den Rechenaufwand erhöhen. Als letzte Möglichkeit kann der Strom in der Spule erhöht werden. Das erscheint für dieses Modell am sinnvollsten. Wird der Strom in der Spule von $1 A$ auf $1,5 A$ erhöht, so ergibt sich die Feldstärke am Punkt $(0/0/10)$ zu $0,533\mu A/m$ und erfüllt die Norm.

In Abbildung 5.10 wird der Verlauf des H-Feldes räumlich dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die x- bzw. y-Komponenten im Verhältnis zur z-Komponente sehr klein sind. Dies entspricht den Ausführungen in Kapitel 2.3. Die Feldstärke entspricht der Norm, somit sollen die Parameter dieser Spule für die weiteren Modellierungen verwendet werden.

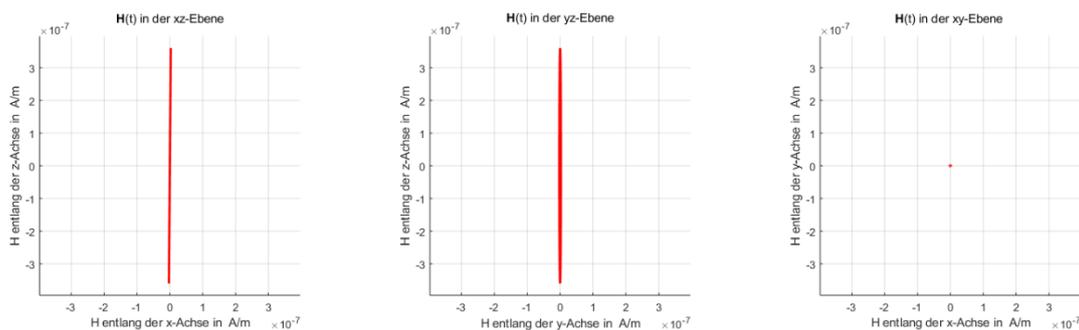


Abbildung 5.10: Der Verlauf des H-Feldes am Punkt $(0/0/10)$, dargestellt in den verschiedenen Ebenen. Das H-Feld besitzt praktisch nur eine z-Komponente entlang der z-Achse.

5.3.2 Modell: 2 orthogonale Sendespulen

Um den LVS Sender vollständig abbilden zu können, wird noch eine zweite Spule benötigt. Diese soll orthogonal zur Ersten liegen und mit einem um 90° phasenverschobenen Strom mit derselben Amplitude erregt werden. Dazu werden zwei Spulen mit den Parametern aus Kapitel 5.3.1 erstellt und entsprechend verschoben und gedreht, sodass die Achsen der Spulen auf der x- bzw. y-Achse liegen. Spule 1 liegt auf der x-Achse und wird mit dem Strom $i_x = I \sin(\omega t)$ erregt. Spule 2 hingegen liegt auf der y-Achse und wird mit $i_y = I \cos(\omega t)$ erregt. Die Ströme müssen in komplexer Schreibweise übergeben werden und entsprechen so $i_x = e^{j \cdot 0^\circ}$ und $i_y = e^{j \cdot 90^\circ}$.

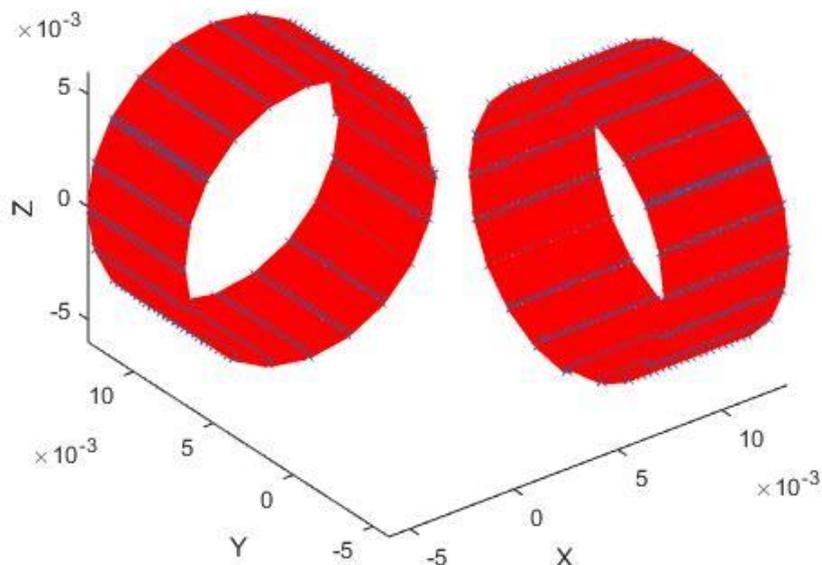


Abbildung 5.11: Geometrische Anordnung zweier Sendespulen deren Achsen auf der x- bzw. y-Achse liegen.

In Abbildung 5.11 wird die geometrische Anordnung der zwei Sendespulen gezeigt. Es ist zu erwähnen, dass die beiden Spulen um 1 cm aus dem Ursprung geschoben wurden, damit sich diese nicht berühren. Wie in Kapitel 2.3 besprochen, sollte sich bei dieser Anordnung an jedem Punkt auf der z-Achse ein Kreis für das H-Feld in der xy-Ebene ausbilden. Werden aber beliebige Punkte im Raum gewählt, so bildet sich eine Ellipse in der xy-Ebene aus. Es sei hier angemerkt, dass in den weiteren Ebenen xz oder yz ebenso Ellipsen zu sehen sind. Als illustrative Beispiele werden Punkte an den drei Achsen gewählt und untersucht. Die drei untersuchten Punkte $P_1 = (0/0/1)$, $P_2 = (1/0/0)$ und $P_3 = (0/1/0)$ sind in Abbildung 5.12 dargestellt.

In Abbildung 5.13 wird die Lissajous Figur des H-Feldes am Punkt P_1 gezeigt. Wie zu erwarten dreht sich das H-Feld kreisförmig in der xy-Ebene. Die z-Komponenten des H-Feldes sind klein, im Verhältnis zu den x- und y-Komponenten.

5 Das MATLAB-Modell

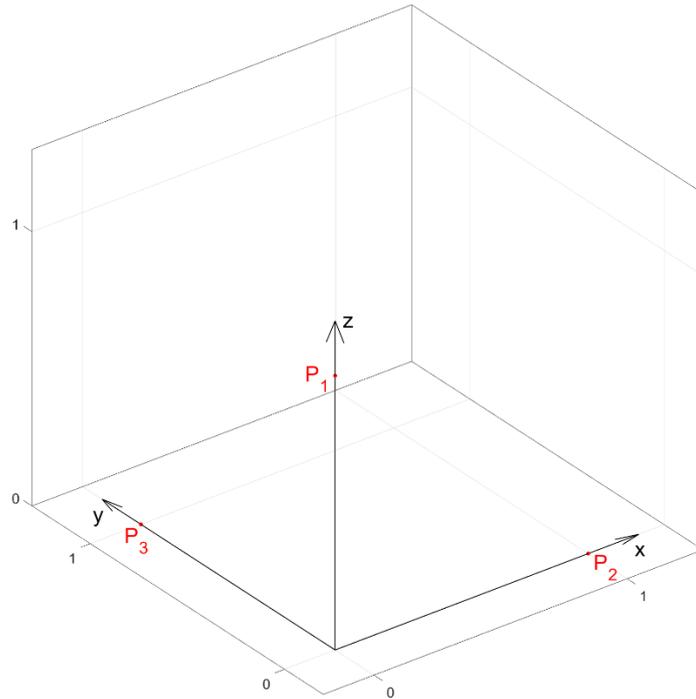


Abbildung 5.12: Darstellung der Punkte für die eine Feldberechnung durchgeführt wird.

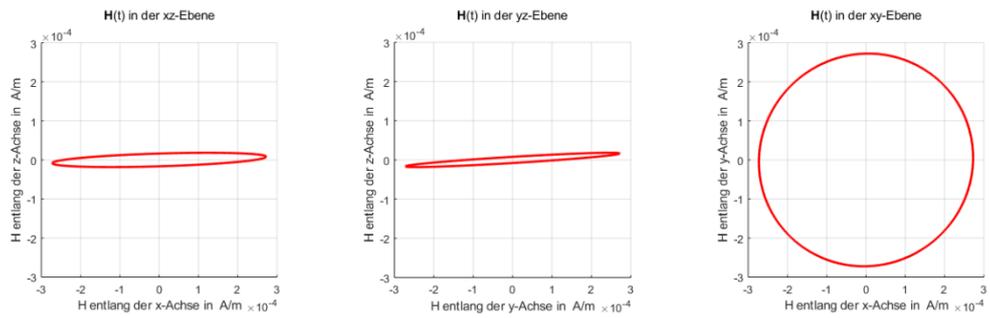


Abbildung 5.13: Lissajous Figur von H , am P_1 aus Abbildung 5.12, dargestellt in den drei Ebenen.

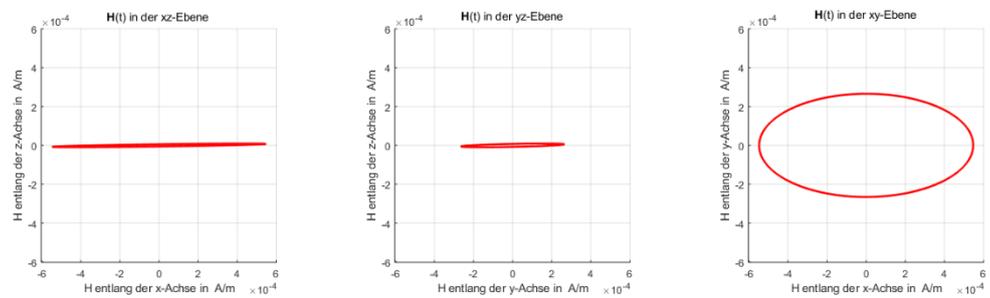


Abbildung 5.14: Lissajous Figur von H , am P_2 aus Abbildung 5.12, dargestellt in den drei Ebenen.

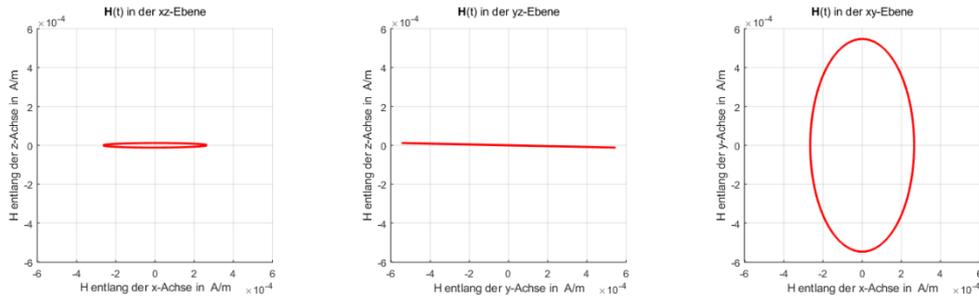


Abbildung 5.15: Lissajous Figur von \mathbf{H} , am P_3 aus Abbildung 5.12, dargestellt in den drei Ebenen.

Wird das \mathbf{H} -Feld an den Punkten P_2 und P_3 betrachtet (Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15), so rotiert das \mathbf{H} -Feld elliptisch und stimmt gut mit den Ausführungen aus Kapitel 2.3 überein, da die Hauptachse der Ellipse jeweils in Richtung des Senders zeigt. Der Punkt P_2 liegt auf der x -Achse und somit liegt die Hauptachse der Ellipse ebenfalls auf der x -Achse. Der Punkt P_3 hingegen liegt auf der y -Achse. Dort liegt die Hauptachse der Ellipse auf der y -Achse. Aus (2.10) und (2.11) geht hervor, dass für alle Punkte auf der xy -Ebene die Hauptachse der Ellipse doppelt so lang sein muss als die Nebenachse. Werden Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 betrachtet, so ist zu erkennen, dass dies gut übereinstimmt.

Es soll überprüft werden, ob sich aus dem resultierenden Magnetfeld dieses Modells auf die Position des Senders schließen lässt. Es wird das Kugelkoordinatensystem verwendet, welches bereits in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Zur Vereinfachung werden nur Punkte jenes Quadranten gewählt, in dem x , y und z positive Werte annehmen. Die kartesischen Koordinaten können wie folgt in Kugelkoordinaten umgerechnet werden:

$$\theta = \arctan \frac{y}{x}, \quad (5.17)$$

$$\psi = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (5.18)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (5.19)$$

Es wird nun die Berechnung am Punkt $(1/0/1)$ gezeigt. Der Abstand r , sowie die Winkel θ und ψ können aus (5.17), (5.18) und (5.19) berechnet werden:

$$\theta = \arctan \frac{0}{1} = 0 = 0^\circ, \quad (5.20)$$

$$\psi = \arctan \frac{1}{\sqrt{1^2}} = 0,785 = 45^\circ, \quad (5.21)$$

$$r = \sqrt{(1\text{m})^2 + (1\text{m})^2} = 1,414 \text{ m}. \quad (5.22)$$

Für dieses Beispiel wird der Graph des H -Feldes in Abbildung 5.16 dargestellt. In den verschiedenen Ebenen zeigen sich, wie erwartet, entsprechende Ellipsen des H -Feldes. Ausgehend von diesen Ellipsen kann nun auf die Richtungsinformation des Senders mit den zwei Sendespulen zurück geschlossen werden.

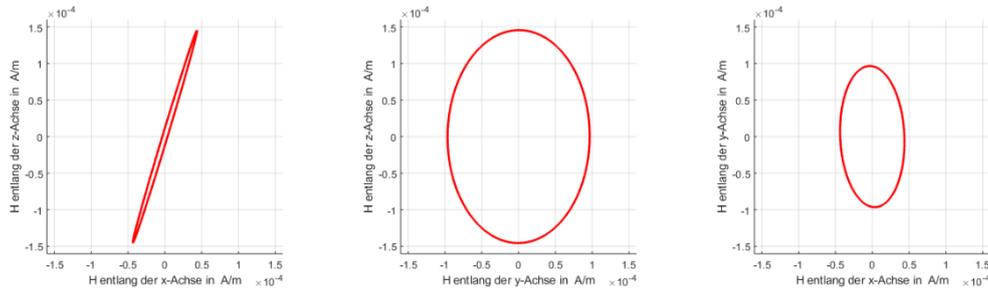


Abbildung 5.16: Graph von \mathbf{H} am Punkt $(1/0/1)$ dargestellt in den drei Ebenen. Wie erwartet zeigen sich hier Ellipsen welche zur Berechnung der Richtungsinformation herangezogen werden können.

Aus der Ellipse wird das Maximum H_{max} der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} am Punkt $(1/0/1)$, sowie das Minimum H_{min} ermittelt:

$$H_{max} = 151,0 \frac{\mu A}{m}, \quad (5.23)$$

$$H_{min} = 96,58 \frac{\mu A}{m}. \quad (5.24)$$

Aus den in Kapitel 4.3 angeführten Gleichungen (4.7) und (4.8) lassen sich der Abstand r , sowie der Winkel ψ berechnen:

$$r = \sqrt[3]{\frac{20 \cdot 1,5A \cdot (6 \cdot 10^{-3}m)^2 \cdot \pi}{4 \cdot \pi \cdot 96,58 \frac{\mu A}{m}}} = 1,409m, \quad (5.25)$$

$$\psi = \arctan \sqrt{\frac{(151 \frac{\mu A}{m})^2}{3 \cdot (96,58 \frac{\mu A}{m})^3} - \frac{1}{3}} = 0,7933 = 45,45^\circ. \quad (5.26)$$

Damit konnten die Parameter r und ψ sehr genau bestimmt werden. Die Abweichungen werden im weiteren Verlauf noch genauer untersucht. Zur Bestimmung des Azimutwinkel θ werden die x- und y-Komponente des Vektors \mathbf{H}_{max} herangezogen:

$$\mathbf{H}_{max} = 43,63 \frac{\mu A}{m} \mathbf{e}_x - 0,2109 \frac{\mu A}{m} \mathbf{e}_y + 145,6 \frac{\mu A}{m} \mathbf{e}_z, \quad (5.27)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{H_{max,y}}{H_{max,x}} \right) = \arctan \left(\frac{0,2109 \frac{\mu A}{m}}{43,63 \frac{\mu A}{m}} \right) = -0,0048 = -0,277^\circ. \quad (5.28)$$

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, zeigt der Vektor \mathbf{H}_{max} , wenn er auf die xy -Ebene projiziert wird, genau in Richtung des Senders. Somit kann θ mit (5.28) ermittelt werden. Auch hier ist die Abweichung zum realen Wert gering.

Um die Ergebnisse besser bewerten zu können, sollen noch weitere Punkte im Raum untersucht werden. Die Koordinaten der Punkte werden in Kugelkoordinaten angegeben. Die Distanz r beträgt konstant einen Meter, der Azimutwinkel θ ist ebenfalls konstant und beträgt 0° . Der Polarwinkel ψ ist variabel, $\psi = 0^\circ, 1^\circ, \dots, 90^\circ$. Die Punkte die untersucht werden sind in Abbildung 5.17 in rot dargestellt.

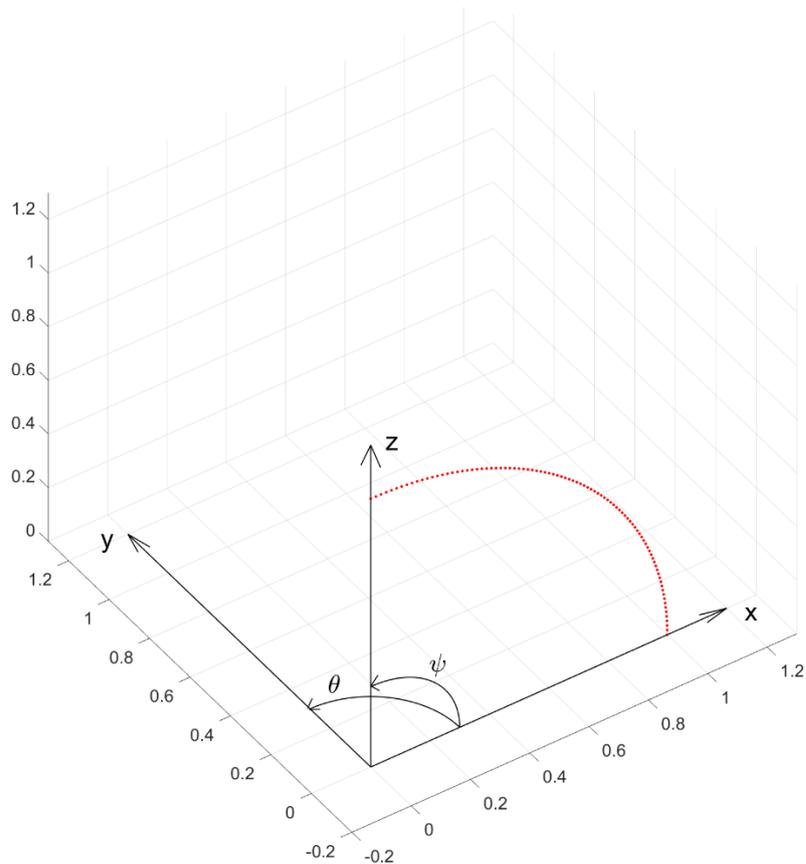


Abbildung 5.17: Darstellung der Punkte (rot) welche untersucht werden sollen.

In Abbildung 5.18 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für den Abstand r sehr gute Ergebnisse erhalten werden. Die Abweichungen betragen weniger als ein Prozent. Auch für den Polarwinkel ψ wurden zufriedenstellende Ergebnisse erhalten. Größere Abweichungen sind lediglich bei Winkeln ψ kleiner als 30° oder größer als 85° vorhanden. Dieser Fall kann aber im späteren Verlauf durch die Verwendung von drei Sendespulen größtenteils ausgeschlossen werden.

Die problematischsten Ergebnisse wurden beim Azimutwinkel θ erhalten. Dort gibt es zwei Bereiche, in denen große Abweichungen vorhanden sind. Zum einen ist es der Bereich bei Winkeln ψ

größer als 80° Grad. Diese Punkte liegen ziemlich genau über dem Sender. Dort wirken sich auch kleinste Abweichungen des ermittelten H-Feldes sehr stark auf das Ergebnis aus. Den Extremfall bildet der Winkel $\psi=90^\circ$. Dieser Punkt liegt genau über dem Sender. Das H-Feld bildet dort keine Ellipse aus, sondern einen Kreis. Dadurch ist der Vektor \mathbf{H}_{max} nicht eindeutig definiert und der Winkel θ kann nicht ermittelt werden. Diese Abweichungen fallen bei der Ortung aber kaum ins Gewicht. Der Winkel θ beeinflusst nämlich nur die x- und y-Komponenten der Punkte. Für Punkte nahe der z-Achse sind diese aber klein, im Vergleich zur z-Komponente.

Der nächste kritische Bereich für die Ermittlung von θ ist jener, in dem ψ zwischen 50° und 60° Grad liegt. In diesem Bereich zeigt der Vektor \mathbf{H}_{max} stark in z-Richtung. Die x- und y-Komponenten von \mathbf{H}_{max} sind sehr klein und dadurch kommt es zu großen Abweichungen, da diese Komponenten für die Ermittlung von θ herangezogen werden. Um diesen Fall auszuschließen wird im Folgenden versucht, den Winkel θ nicht mehr über die x- und y-Komponenten von \mathbf{H}_{max} zu ermitteln, sondern über jene von \mathbf{H}_{min} . Der Vektor \mathbf{H}_{min} liegt orthogonal zum Vektor \mathbf{H}_{max} . Somit kann durch die Projektion von \mathbf{H}_{min} auf die xy-Ebene eine Senkrechte gelegt werden. Diese Senkrechte zeigt in Richtung des Senders, wodurch θ ermittelt werden kann. Die so ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 5.19 dargestellt.

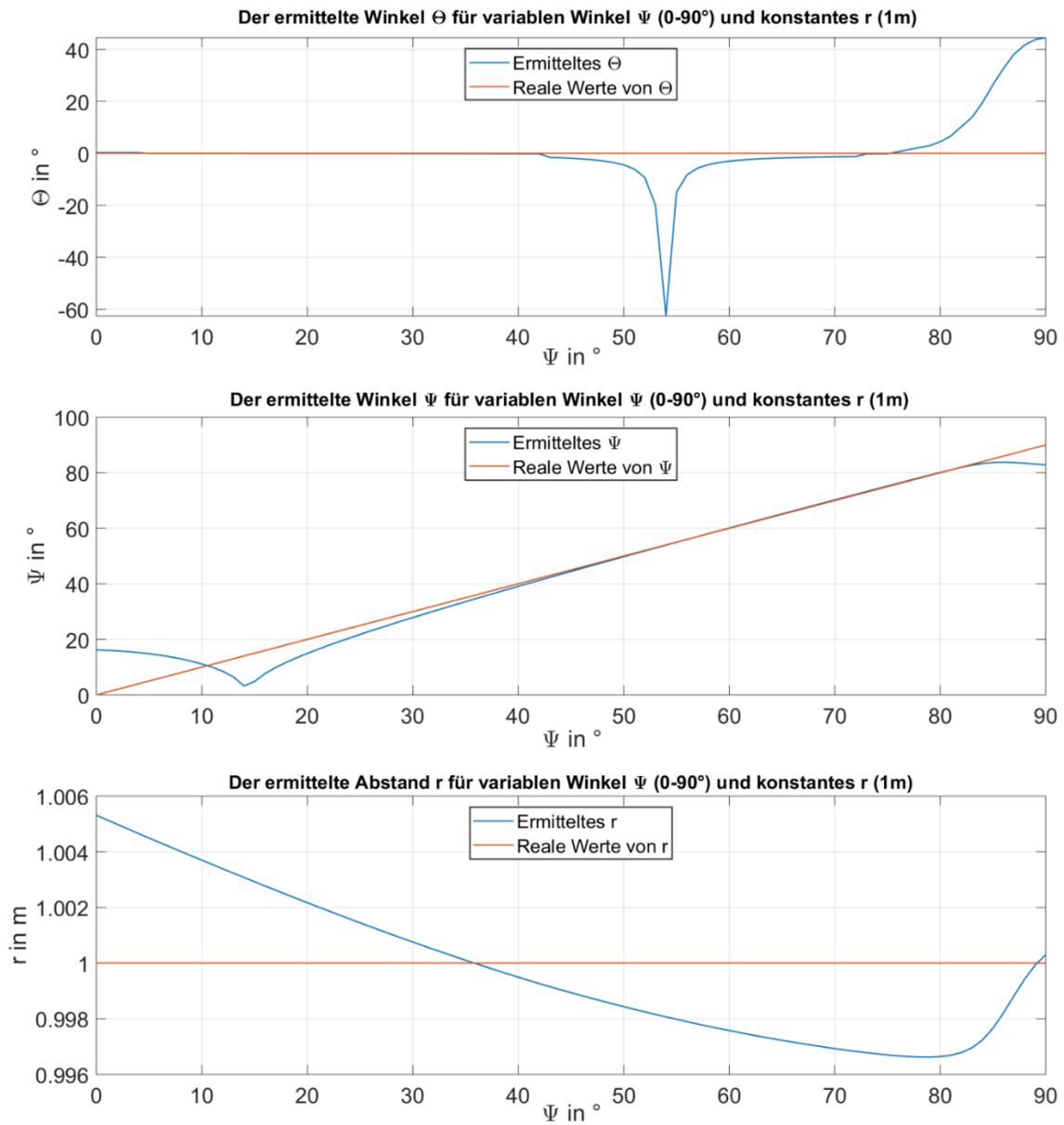


Abbildung 5.18: Graphische Darstellung der ermittelten Parameter r , ψ und θ bei einem konstantem Abstand r (1 m), konstantem Winkel θ (0°) und variablem Winkel ψ (0° - 90°).

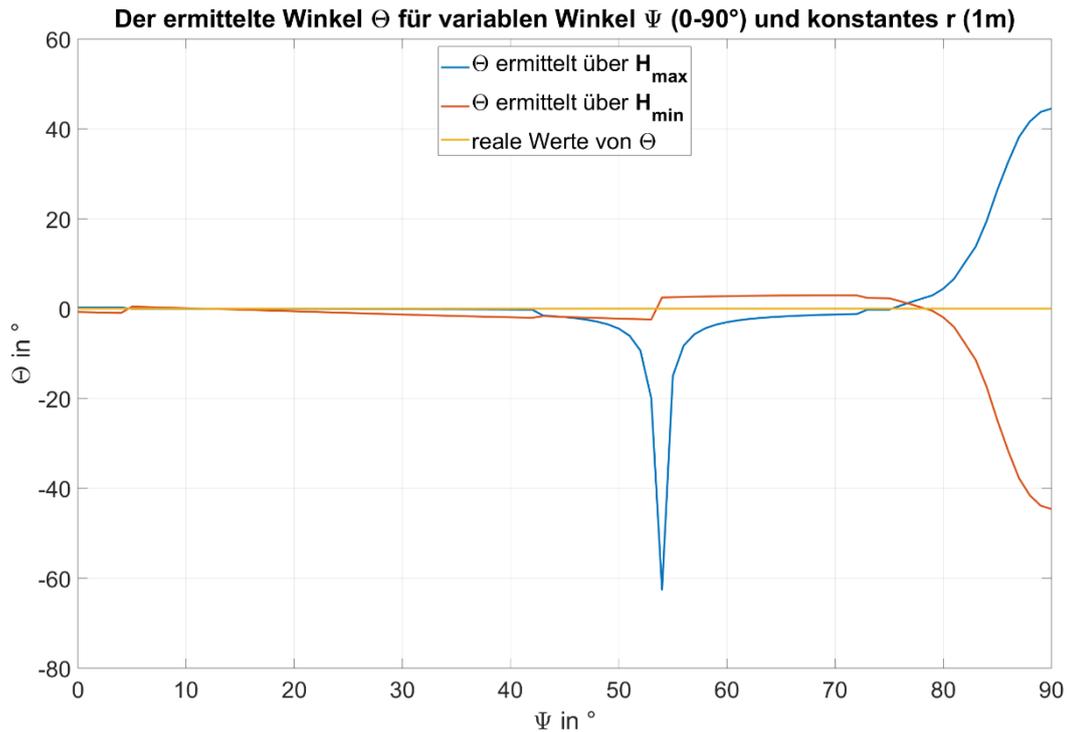


Abbildung 5.19: Graphische Darstellung des ermittelten Winkel θ bei einem konstantem Abstand r (1m), konstantem Winkel θ (0°) und variablem Winkel ψ (0° - 90°).

Es ist zu erkennen, dass der kritische Bereich zwischen $\psi = 50^\circ$ und $\psi = 60^\circ$, bei Ermittlung des Winkels θ über die Parameter von H_{min} viel bessere Ergebnisse liefert.

5.3.3 Modell: 2 Sendespulen und 3 Empfangsspule

Um das Modell zu vervollständigen, werden die drei benötigten Empfangsspulen hinzugefügt. Diese liegen orthogonal zueinander. Deren Achsen zeigen in x-, y-, bzw. z-Richtung. Die Spulen besitzen dieselben Parameter wie die Sendespulen. An Stelle der Stromquelle wird ein Widerstand von $R = 50 \Omega$ eingefügt. Dieser wird verwendet um die induzierten Spannungen in den Spulen zu ermitteln. In Abbildung 5.20 wird die geometrische Anordnung der Spulen gezeigt.

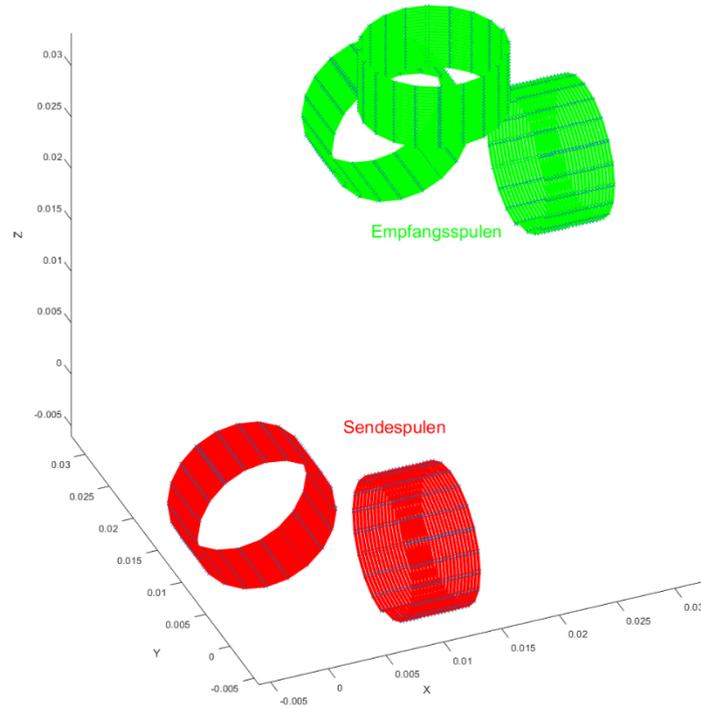


Abbildung 5.20: Geometrie des Modells mit 2 Sende- und 3 Empfangsspulen. Die Sendespulen liegen im Ursprung. Die Empfangsspulen wurden auf den Punkt (0.02/0.02/0.02) verschoben. (Rot = Sendespulen; Grün = Empfangsspulen)

Ziel ist es, aus den drei Empfangsspulen den Vektor der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} am jeweiligen Punkt zu bestimmen. Dazu werden zunächst die induzierten Spannungen u_{emf} in den Empfangsspulen ermittelt. Dies geschieht über den Strom i_R , welcher über den Abschlusswiderstand R der Empfangsspulen fließt:

$$u_{emf} = R \cdot i_R. \quad (5.29)$$

Um den Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung und dem H-Feld ermitteln zu können, muss das H-Feld in die drei Komponenten \mathbf{H}_x , \mathbf{H}_y und \mathbf{H}_z zerlegt werden. Als Beispiel soll die Empfangsspule betrachtet werden, welche in Richtung der x-Achse zeigt und von \mathbf{H}_x durchsetzt wird. Der Zusammenhang zwischen Spannung und H-Feld ergibt sich aus dem Induktionsgesetz (2.4) und wird ermittelt, indem (5.30) in (2.4) eingesetzt und aufgelöst wird:

$$\mathbf{B}_x = B_x \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \mathbf{e}_x = \mu_0 \cdot H_x \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \mathbf{e}_x, \quad (5.30)$$

$$u_{emf} = -\mu_0 \cdot \omega \cdot A \cdot N \cdot H_x \cdot \cos(\omega t + \varphi). \quad (5.31)$$

In (5.30) und (5.31) wird die magnetische Flussdichte B bzw. auch die magnetische Feldstärke H über die Fläche der Spule als konstant angenommen. Dies ist näherungsweise gültig, sofern der Durchmesser der Empfangsspule klein ist, im Verhältnis zum Abstand zum Sender.

Es besteht also ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Amplitude der Spannung u_{emf} und der Amplitude der magnetischen Feldstärke H_x , wobei N die Anzahl der Windungen, A die Fläche der Spule, ω die Kreisfrequenz und μ_0 die magnetische Feldkonstante ist. Ausgehend von (5.31) kann der Betrag der magnetischen Feldstärke wie folgt berechnet werden:

$$K = \frac{R}{N \cdot A \cdot \omega \cdot \mu_0}, \quad (5.32)$$

$$H_x = K \cdot I_{R,x}, \quad (5.33)$$

$$H_y = K \cdot I_{R,y}, \quad (5.34)$$

$$H_z = K \cdot I_{R,z}. \quad (5.35)$$

Dabei ist K der Proportionalitätsfaktor und I_R der Strom über den Widerstand R der jeweiligen Spule. Für K ergibt sich ein Wert von 6140 m^{-1} . Da die Spulen im Modell leicht räumlich versetzt sind, und auch eine gewisse längliche Ausdehnung haben, kommt es hier zu leichten Abweichungen. Deshalb wurden verschiedene Punkte im Raum mit einem Abstand von 1 m bis 20 m untersucht. Für jeden Punkt wurde K ermittelt und im Anschluss der Mittelwert der K -Werte gebildet. Daraus ergibt sich K zu 6427 m^{-1} . Dadurch wurde gezeigt, dass das Modell gut mit den theoretisch ermittelten Werten übereinstimmt.

Werden (5.30) und (5.31) betrachtet, ist zu erkennen, dass es zwischen der Spannung und der magnetischen Feldstärke zu einer Phasenverschiebung von $\pi/2$ kommt. Auch hier wurden verschiedene Punkte im Raum untersucht und so eine mittlere Phasenverschiebung von $1,781 = 1,14 \cdot \pi/2$ ermittelt. Es kommt also auch hier zu einer leichten Abweichung von den theoretischen Berechnungen. Diese Abweichung spielt für die Berechnungen aber keine Rolle, da sich H_{min} und H_{max} nicht ändern, wenn alle drei Komponenten H_x , H_y und H_z mit demselben Winkel phasenverschoben werden.

Wie in Kapitel 5.3.2 sollen für dieses Modell verschiedene Punkte im Raum untersucht werden. Es werden die Punkte aus Abbildung 5.17 untersucht ($r = 1 \text{ m}$, $\theta = 0^\circ$, $\psi = \text{variabel}$). Die Parameter r , ψ und θ werden über die induzierten Spannungen ermittelt und die Ergebnisse analysiert.

In Abbildung 5.21 werden die Ergebnisse dargestellt. Dabei zeigen sich ähnliche Resultate wie in Abbildung 5.18, wo die Parameter ausgehend vom H-Feld ermittelt wurden. Somit konnte gezeigt werden, dass dieses Modell mit den drei Empfangsspulen für die Ortung des Senders verwendet werden kann. Genauere Untersuchungen werden im folgenden Kapitel angestellt.

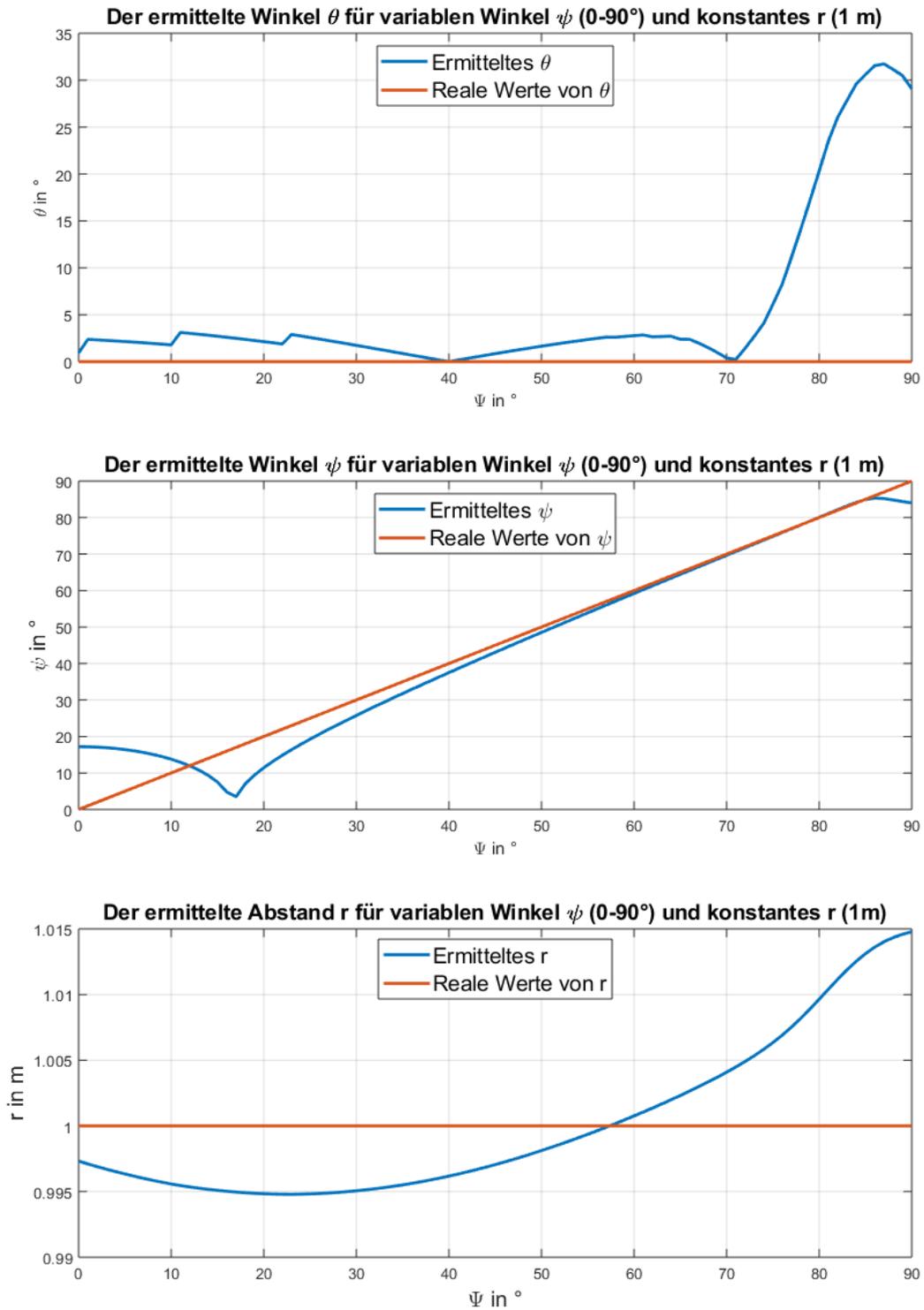


Abbildung 5.21: Graphische Darstellung der ermittelten Parameter r , ψ und θ bei einem konstantem Abstand r (1 m), konstantem Winkel θ (0°) und variablem Winkel ψ (0°-90°). Die Parameter wurden berechnet über die induzierten Spannungen in den Empfangsspulen.

6 Untersuchung verschiedener Szenarien

In diesem Kapitel werden verschiedene Szenarien ausgehend vom Basismodell aus Kapitel 5.3.3 untersucht. Es sollen nur Punkte untersucht werden, welche in jenem Quadranten liegen, in dem x , y und z positive Werte annehmen. In Kugelkoordinaten bedeutet dies einen Azimutwinkel θ von 0° bis 90° und einen Polarwinkel ψ von 0° bis 90° . Zur Untersuchung wird eine repräsentative Reihe von Punkten gewählt, welche auch jene einschließt, bei denen große Abweichungen zu erwarten sind. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die untersuchten Punkte:

<i>Nr.</i>	<i>r in m</i>	<i>θ in $^\circ$</i>	<i>ψ in $^\circ$</i>	<i>x in m</i>	<i>y in m</i>	<i>z in m</i>
<i>P₁</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>P₂</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>P₃</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>P₄</i>	<i>1</i>	<i>90</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>
<i>P₅</i>	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>	<i>0</i>
<i>P₆</i>	<i>30</i>	<i>90</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>30</i>	<i>0</i>
<i>P₇</i>	<i>1</i>	<i>n. def.</i>	<i>90</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>P₈</i>	<i>10</i>	<i>n. def.</i>	<i>90</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>
<i>P₉</i>	<i>30</i>	<i>n. def.</i>	<i>90</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>30</i>
<i>P₁₀</i>	<i>1</i>	<i>45</i>	<i>45</i>	<i>0,5</i>	<i>0,5</i>	<i>0,71</i>
<i>P₁₁</i>	<i>10</i>	<i>45</i>	<i>45</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>7,07</i>
<i>P₁₂</i>	<i>30</i>	<i>45</i>	<i>45</i>	<i>15</i>	<i>15</i>	<i>21,21</i>

Tabelle 6.1: Reihe von Punkte welche untersucht werden.

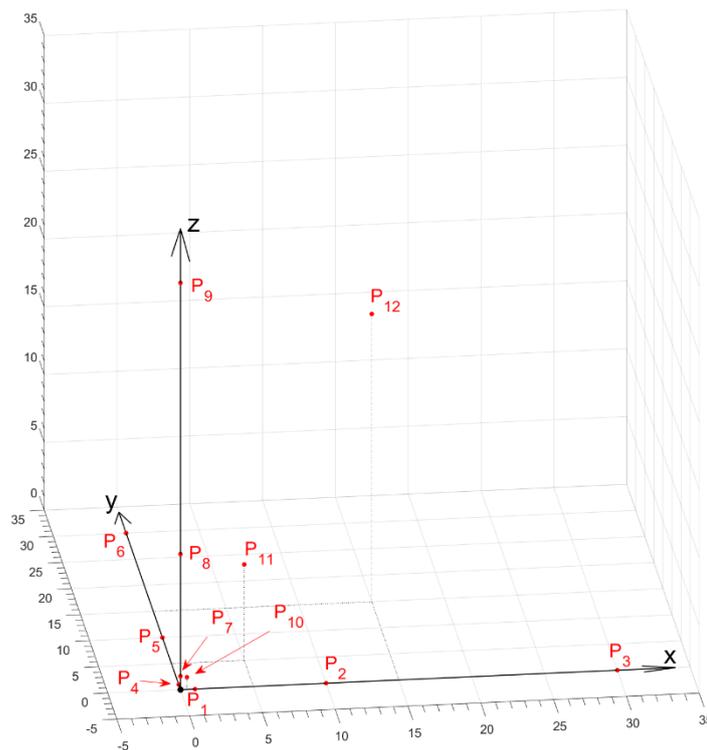


Abbildung 6.1: Darstellung der Punkte welche untersucht werden.

6.1 Basismodell mit 2 Sende- und 3 Empfangsspulen

Im ersten Szenario werden die in Tabelle 6.1 angegebenen Punkte am Basismodell aus Kapitel 5.3.3 untersucht. Die zwei Sendespulen liegen im Ursprung des Koordinatensystems auf der x - bzw. y -Achse. Die Sendespulen zeigen jeweils in x , y und z Richtung und liegen versetzt im Raum. In diesem Szenario kommt es zu keiner relativen Drehung zwischen den Empfangsspulen und den Sendespulen.

In Tabelle 6.2 werden die ermittelten Ergebnisse mit zugehörigen Abweichungen dargestellt. Die größten Abweichungen sind bei der Bestimmung des Winkels ψ aufgetreten. Wie bereits in Abbildung 5.21 ist die Berechnung von θ ungenau, sofern der betrachtete Punkt nahe jener Ebene liegt, welche von den beiden Sendespulen aufgespannt wird. Dieses Problem kann nur durch eine dritte Sendespule gelöst werden.

Nr.	<i>r in m</i>			ψ in $^\circ$			Theta in $^\circ$		
	<i>real</i>	<i>ermittelt</i>	<i>Abw. in %</i>	<i>real</i>	<i>ermittelt</i>	<i>Abw. in $^\circ$</i>	<i>real</i>	<i>ermittelt</i>	<i>Abw. in $^\circ$</i>
P_1	1	1,00	0,27	0	17,21	17,21	0	0,94	0,94
P_2	10	9,99	0,15	0	10,92	10,92	0	0,36	0,36
P_3	30	30,29	0,97	0	26,98	26,98	0	0,92	0,92
P_4	1	1,02	1,67	0	15,25	15,25	90	86,94	3,06
P_5	10	10,18	1,78	0	9,27	9,27	90	88,47	1,53
P_6	30	30,91	3,04	0	26,21	26,21	90	87,58	2,42
P_7	1	1,01	1,48	90	84,00	6,00	<i>n. def.</i>	29,07	
P_8	10	10,16	1,63	90	84,30	5,70	<i>n. def.</i>	28,40	
P_9	30	30,84	2,81	90	84,32	5,68	<i>n. def.</i>	28,67	
P_{10}	1	1,01	1,28	45	46,80	1,80	45	45,03	0,03
P_{11}	10	10,14	1,41	45	43,53	1,47	45	44,75	0,25
P_{12}	30	30,77	2,58	45	37,32	7,68	45	45,36	0,36

Tabelle 6.2: Ermittelte Parameter r , ψ und θ für verschiedene Punkte.

Für die Ortung soll nun ein Vektor \mathbf{p} bestimmt werden, welcher von den Empfangsspulen zu den Sendespulen zeigt. Die Parameter des Vektors werden wie folgt bestimmt:

$$\mathbf{p} = p_x \cdot \mathbf{e}_x + p_y \cdot \mathbf{e}_y + p_z \cdot \mathbf{e}_z, \quad (6.1)$$

$$p_x = -r \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta, \quad (6.2)$$

$$p_y = -r \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta, \quad (6.3)$$

$$p_z = -r \cdot \sin \psi. \quad (6.4)$$

Die Abbildung 6.2 zeigt eine dreidimensionale Darstellung der Vektoren \mathbf{p} , bei der Positionierung der Sender an den Punkten P_1 , P_4 , P_7 und P_{10} . Es handelt sich dabei um jene untersuchten Punkte die einen Abstand von 1 m zum Sender haben. Im Idealfall sollten die Vektoren genau auf den Ursprung des Koordinatensystems, also die Position des Senders, zeigen. Es ist zu erkennen, dass die Punkte P_1 und P_4 die schlechtesten Ergebnisse liefern, da dort die Abweichung des Polarwinkels ψ am Größten ist. Die Ergebnisse für die Punkte mit einem Abstand von 10 m bzw. 30 m werden in Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 dargestellt. In diesen Fällen werden ähnliche Ergebnisse wie für die Punkte P_1 , P_4 , P_7 und P_{10} erzielt.

6 Untersuchung verschiedener Szenarien

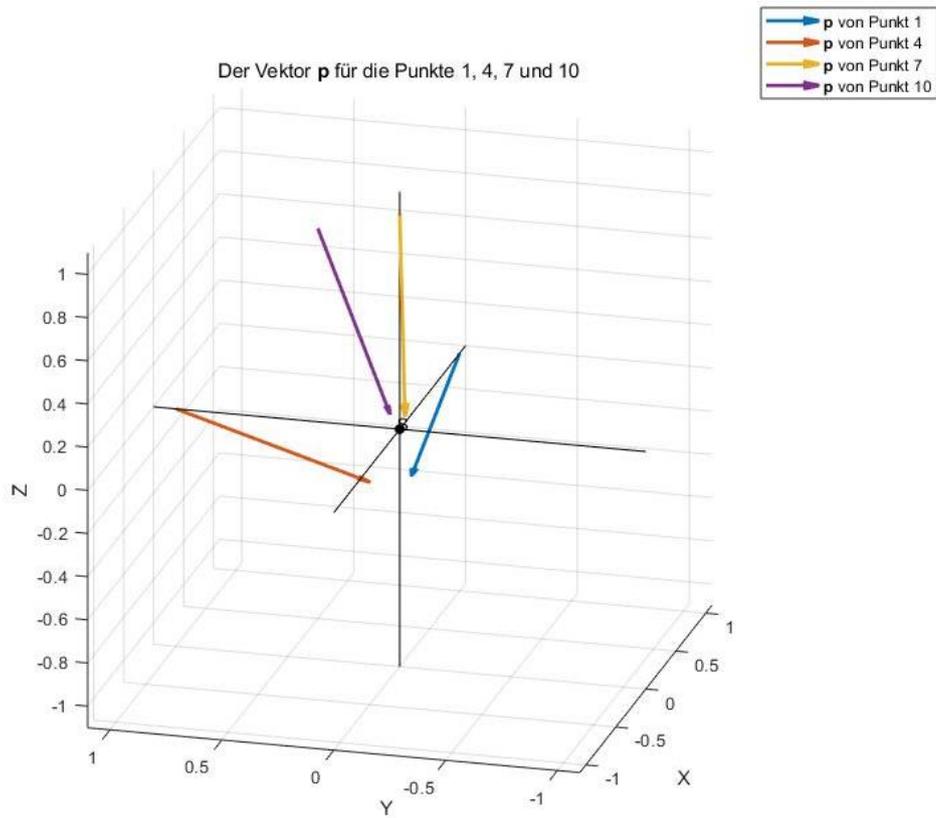


Abbildung 6.2: 3D-Darstellung der Vektoren \mathbf{p} für die untersuchten Punkte mit einem Abstand von 1m.

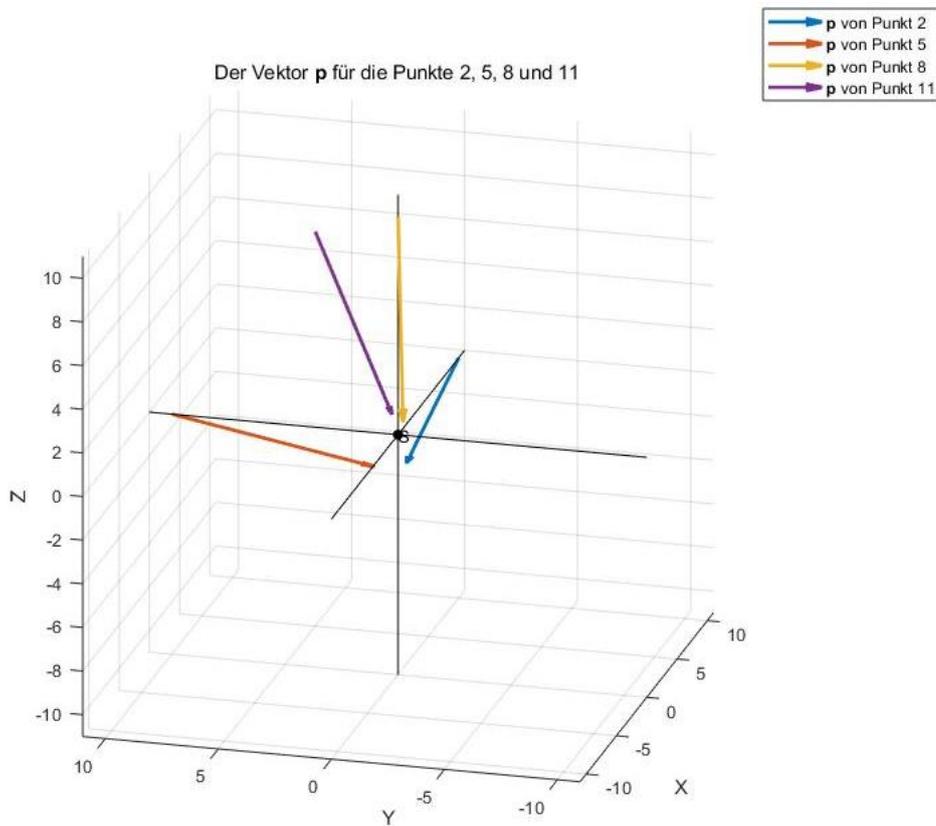


Abbildung 6.3: 3D-Darstellung der Vektoren \mathbf{p} für die untersuchten Punkte mit einem Abstand von 10m.

6 Untersuchung verschiedener Szenarien

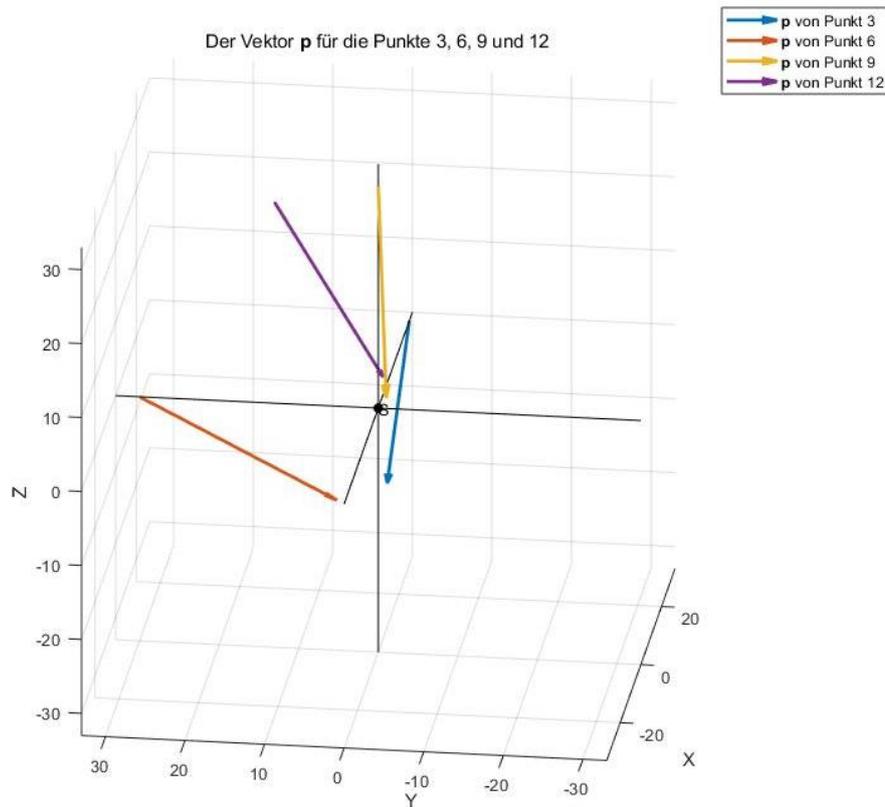


Abbildung 6.4: 3D-Darstellung der Vektoren \mathbf{p} für die untersuchten Punkte mit einem Abstand von 30m.

Um die Genauigkeit besser bewerten zu können, wird der Abstand r_A bestimmt. Dies ist die Distanz vom Endpunkt des Vektors \mathbf{p} zum Sender. Somit wird bestimmt, um wie viele Meter der Sender verfehlt wird. Tabelle 6.3 zeigt die Ergebnisse. Vor allem bei den Punkten P_1 - P_6 sind große Abweichungen zu verzeichnen, da diese in der xy -Ebene liegen, wo $\psi = 0^\circ$ ist und die größten Abweichungen zu verzeichnen sind. Im Gegensatz dazu ist zu erkennen, dass in Fällen mit $\psi = 45^\circ$ der Fehler des relativen Abstandes sehr gering ist.

Nr.	r in m	θ in $^\circ$	ψ in $^\circ$	r_A in m	r_A/r in %
P_1	1	0	0	0,30	29,92
P_2	10	0	0	1,90	19,03
P_3	30	0	0	14,07	46,91
P_4	1	90	0	0,27	27,32
P_5	10	90	0	1,66	16,62
P_6	30	90	0	13,89	46,32
P_7	1	n.def.	90	0,11	10,65
P_8	10	n.def.	90	1,02	10,16
P_9	30	n.def.	90	3,13	10,43
P_{10}	1	45	45	0,03	3,41
P_{11}	10	45	45	0,30	2,96
P_{12}	30	45	45	4,15	13,82

Tabelle 6.3: Bestimmung des Abstandes der ermittelten Position zur tatsächlichen Position des Senders.

Es soll noch betrachtet werden, wie die Suche ablaufen würde. Hierzu wird von einem Startpunkt ausgegangen. Der Empfänger wird jeweils um $1m$ in Richtung des Vektors \boldsymbol{p} verschoben. Anschließend wird \boldsymbol{p} neu berechnet und der Empfänger wieder um $1m$ in Richtung des neuen Vektors \boldsymbol{p} verschoben. Dies wird solange fortgesetzt, bis der Abstand zum Sender kleiner als $2m$ ist, also schon sehr nahe am Verschütteten. In diesem Bereich muss bei einem tief Verschütteten schon mit der Ausgrabung begonnen werden.

Im ersten Beispiel soll von Punkt P_3 aus Tabelle 6.1 gestartet werden. Dieser Punkt zeigte bei der Untersuchung die größten Abweichungen. In Abbildung 6.5 ist der Verlauf dargestellt. Es wurden insgesamt 31 Schritte zu je $1m$ benötigt, um einen Abstand kleiner als $2m$ zum Sender zu erreichen. Im Idealfall wären hierfür 28 Schritte nötig, da der Abstand zu Beginn $30m$ beträgt. Somit läuft die Suche auch bei diesem ungünstigen Punkt gut ab, ohne allzu große Umwege gehen zu müssen.

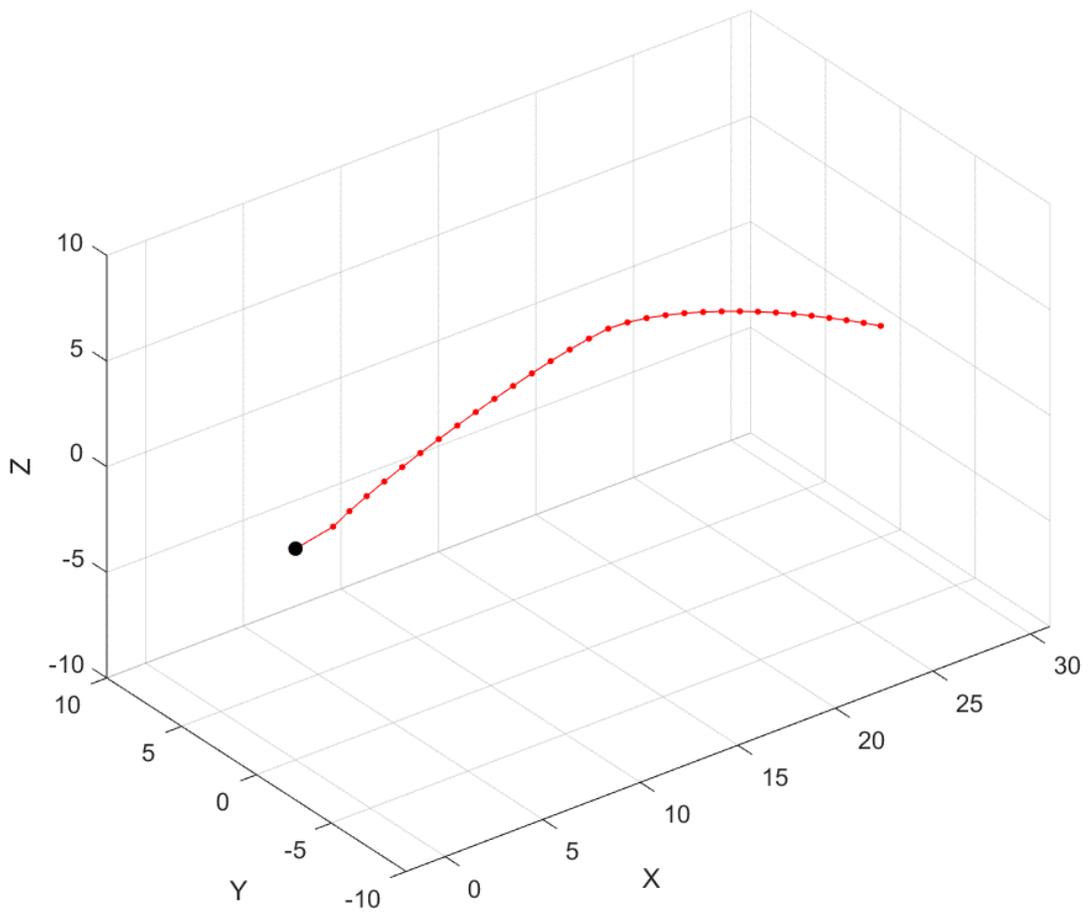


Abbildung 6.5: Suchverlauf ausgehend von Punkt P_4 bis zu einem Abstand kleiner als 2 m zum Sender.

In Abbildung 6.6 wird zum Vergleich die Suche ausgehend von Punkt P_{12} gezeigt. Dort wird ein Schritt weniger benötigt, um den gewünschten Abstand zum Sender zu erreichen. Somit zeigt sich, dass dieses Modell für die LVS-Ortung geeignet ist.

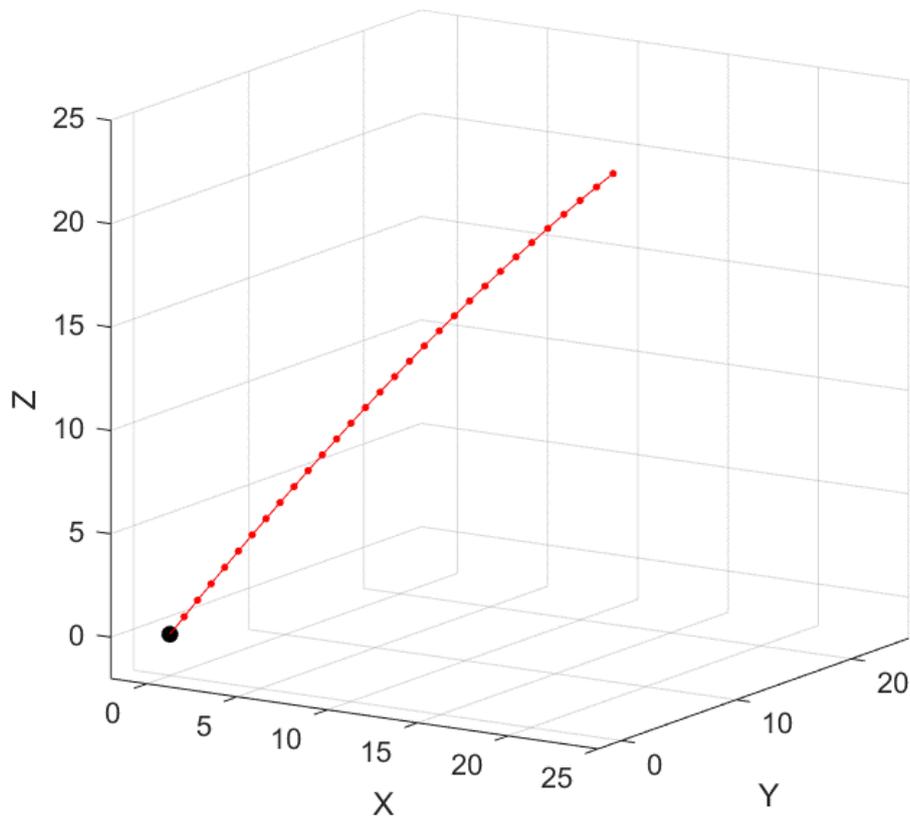


Abbildung 6.6: Suchverlauf ausgehend von Punkt P_{I2} bis zu einem Abstand kleiner als 2 m zum Sender.

6.2 Basismodell mit Drehung des Empfängers

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass Sende- und Empfangsspulen in dieselbe Richtung zeigen. In der Realität wird dies aber kaum der Fall sein. In diesem Kapitel soll der Empfänger relativ zum Sender gedreht werden. Neben den Parametern r , θ und ψ muss auch die Lage der Empfangsspulen relativ zu den Sendespulen ermittelt werden. In [10] wurde hierfür eine Methode angewandt, bei der das Signal des Senders gegeben sein muss. Dies lässt sich aber auf das LVS System nicht anwenden und somit wurde hierfür eine neue Methode entwickelt.

Zunächst werden zwei Koordinatensysteme eingeführt. Das erste Koordinatensystem KS_S wird vom Sender aufgespannt. Die z-Achse soll dabei orthogonal zu den Achsen der beiden Sendespulen sein. Da der Sender als rotierender Dipol betrachtet werden kann, kann die Richtung der x-Achse in der Rotationsebene des Dipols frei gewählt werden. Die Richtung der x-Achse wird so gewählt, dass sie in Richtung der xy-Projektion des Empfängers zeigt. Dadurch ergibt sich der Azimutwinkel θ zu null und muss nicht berechnet werden. Das zweite Koordinatensystem KS_E wird von den drei

Empfangsspulen aufgespannt. In Abbildung 6.7 werden diese beiden Koordinatensysteme gezeigt. Dabei liegt der Ursprung des Koordinatensystems KS_E am Punkt $(1/0/1)$ des Koordinatensystems KS_S . Das Koordinatensystem KS_E wurde im Vergleich zu KS_S gedreht. Die drei Empfangsspulen liegen auf den Achsen x_E , y_E und z_E . Die zwei Achsen der Sendespulen liegen auf der $x_S y_S$ -Ebene.

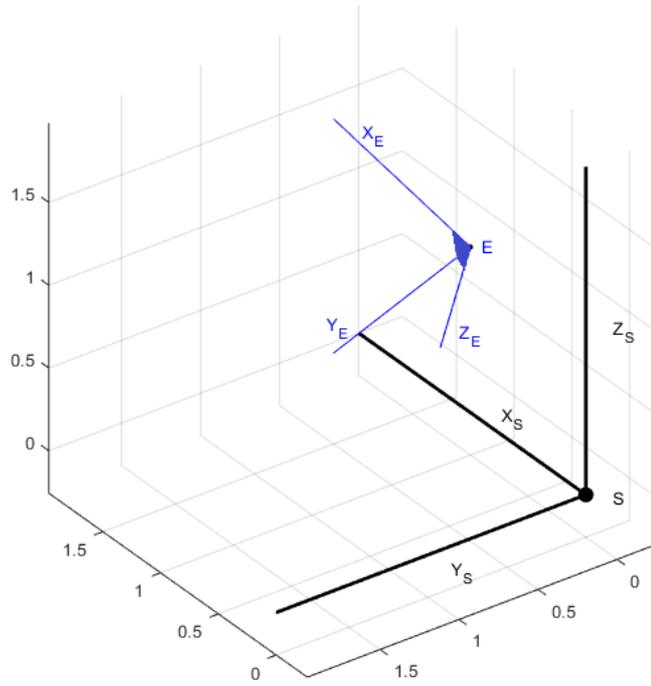


Abbildung 6.7: Die Koordinatensysteme des Senders S und des Empfängers E.

Für die Ortung des Senders werden die nötigen Parameter r , θ und ψ ermittelt. Der Abstand r und der Polarwinkel ψ lassen sich wie im vorhergehenden Kapitel über (4.7) und (4.8) bestimmen. Hierbei spielt die Lage des Empfängers keine Rolle, da beide Gleichungen nur von H_{max} und H_{min} abhängig sind. Der Azimutwinkel θ muss nicht berechnet werden und beträgt durch die geeignete Wahl des Koordinatensystems KS_S immer null. Die so ermittelten Parameter beziehen sich auf das Koordinatensystem des Senders. Die Lage dieses Koordinatensystems ist allerdings nicht bekannt. Somit muss für eine erfolgreiche Ortung die Lage der beiden Koordinatensysteme KS_S und KS_E zueinander ermittelt werden.

Laut [10] gelten bei einem Winkel $\theta = 0^\circ$ für die x-, y- und z-Komponenten von H_{min} und H_{max} im Koordinatensystem KS_S folgende Gleichungen:

$$\mathbf{H}_{max,S} = H_{min}(3\cos^2\psi - 1)\mathbf{e}_x + 1,5 H_{min} \sin 2\psi \mathbf{e}_z, \quad (6.5)$$

$$\mathbf{H}_{min,S} = H_{min}\mathbf{e}_y. \quad (6.6)$$

Die Gleichungen beziehen sich natürlich auf das Koordinatensystem des Senders. Es lässt sich erkennen, dass der Vektor \mathbf{H}_{min} nur eine y-Komponente aufweist. Die Koordinaten dieses Vektors

lassen sich im Koordinatensystem des Empfängers KS_E durch Auswertung der induzierten Spannungen in den Empfangsspulen ermitteln. Dort ergibt sich \mathbf{H}_{min} zu:

$$\mathbf{H}_{min,E} = H_{min,x,E} \mathbf{e}_x + H_{min,y,E} \mathbf{e}_y + H_{min,z,E} \mathbf{e}_z. \quad (6.7)$$

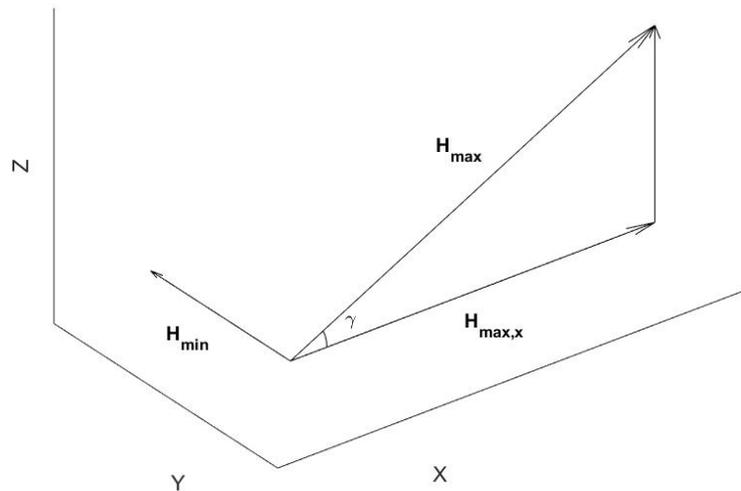
Die Komponenten $H_{min,x,E}$, $H_{min,y,E}$ und $H_{min,z,E}$, ergeben sich aus den induzierten Spannungen in den drei Empfangsspulen. Der Vektor $\mathbf{H}_{min,E}$ zeigt in y -Richtung des Koordinatensystems KS_S . Damit kann der Vektor \mathbf{e}_y des Koordinatensystems KS_S im Koordinatensystem KS_E geschrieben werden zu:

$$\mathbf{e}'_y = \frac{\mathbf{H}_{min,E}}{|\mathbf{H}_{min,E}|}. \quad (6.8)$$

Somit ist \mathbf{e}'_y der Einheitsvektor der y -Achse des Koordinatensystems KS_S , dargestellt im Koordinatensystem KS_E . Analog dazu sind die Vektoren \mathbf{e}'_x und \mathbf{e}'_z die Einheitsvektoren der x - bzw. z -Achse in KS_S , dargestellt in KS_E . Zur Ermittlung dieser Vektoren wird hierbei der Vektor \mathbf{H}_{max} herangezogen. In Abbildung 6.8 werden beispielhafte Vektoren \mathbf{H}_{min} und \mathbf{H}_{max} im Koordinatensystem KS_S dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Vektor \mathbf{H}_{max} um den Winkel γ um die y -Achse gedreht werden muss um in x -Richtung zu zeigen. Der Winkel γ kann aus den x - und z -Komponenten von $\mathbf{H}_{max,S}$ aus (6.5) ermittelt werden:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{1,5 H_{min} \sin 2\psi}{H_{min}(3\cos^2\psi - 1)}\right). \quad (6.9)$$

Die Lage von \mathbf{H}_{min} und \mathbf{H}_{max} zueinander gilt natürlich auch im Koordinatensystem KS_E . Somit wird dort der Vektor \mathbf{H}_{max} um den Winkel γ um den Vektor \mathbf{H}_{min} rotiert. Wird der erhaltene Vektor normiert, ergibt sich daraus \mathbf{e}'_x . Der fehlende Vektor \mathbf{e}'_z ergibt sich aus dem Kreuzprodukt von \mathbf{e}'_x und \mathbf{e}'_y . Mit den Vektoren \mathbf{e}'_x , \mathbf{e}'_y und \mathbf{e}'_z kann das Koordinatensystems KS_S im Koordinatensystem KS_E dargestellt werden.

Abbildung 6.8: Darstellung von H_{max} und H_{min} .

Zur Lösung des Problems muss der Vektor \mathbf{p} der im Koordinatensystem KS_S dargestellt ist, in das Koordinatensystem KS_E übertragen werden. Dies ist mithilfe der Vektoren \mathbf{e}'_x , \mathbf{e}'_y und \mathbf{e}'_z auf einfachste Weise möglich:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$\mathbf{p}' = p_x \cdot \mathbf{e}'_x + p_y \cdot \mathbf{e}'_y + p_z \cdot \mathbf{e}'_z \quad (6.11)$$

Dabei stellt \mathbf{p}' den Vektor \mathbf{p} im Koordinatensystem KS_E dar. Somit kann der Sender im Koordinatensystem des Empfängers geortet werden.

An einem Beispiel soll die Berechnung aufgezeigt werden. Der Sender soll im Ursprung des Koordinatensystems liegen. Der Empfänger liegt am Punkt $(10/0/10)$ und wird zunächst um 45° um die z-Achse gedreht und anschließend um 45° um die x-Achse. Die Lage des Senders und Empfängers zueinander ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 6.9 zeigt dabei die Darstellung im Achsensystem des Senders KS_S . Abbildung 6.10 hingegen zeigt die Darstellung im Achsensystem des Empfängers KS_E .

6 Untersuchung verschiedener Szenarien

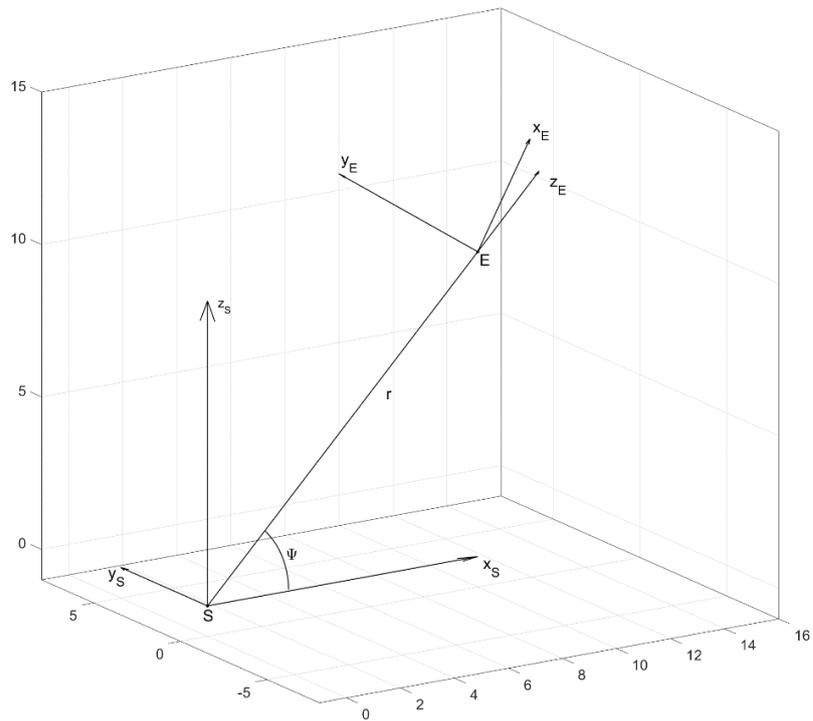


Abbildung 6.9: Darstellung von Sender S und Empfänger E im Achsensystem des Senders.

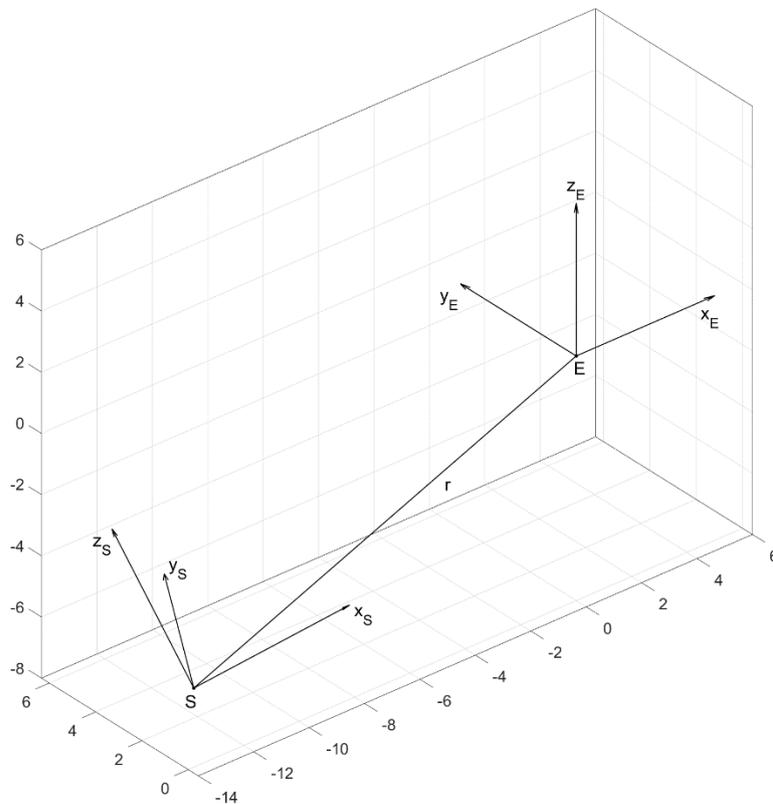


Abbildung 6.10: Darstellung von Sender S und Empfänger E im Achsensystem des Empfängers.

Die Parameter r und ψ werden, wie in Kapitel 5 beschrieben, berechnet und ergeben sich zu $r = 14,49 \text{ m}$ und $\psi = 43,20^\circ$ was einer Abweichung von $0,35 \text{ m}$ und $1,8^\circ$ entspricht. Es werden die Vektoren e'_x , e'_y und e'_z , wie bereits in diesem Kapitel beschrieben, ermittelt.

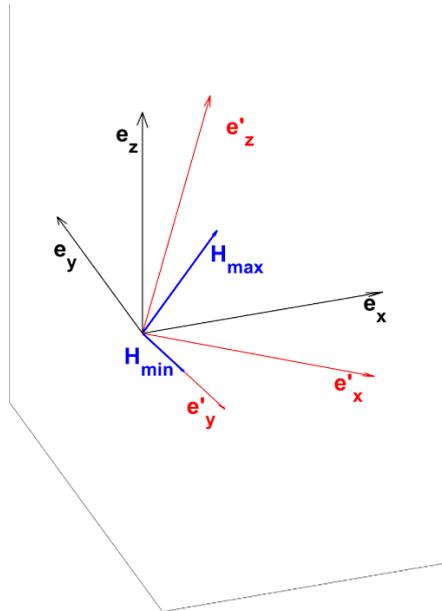
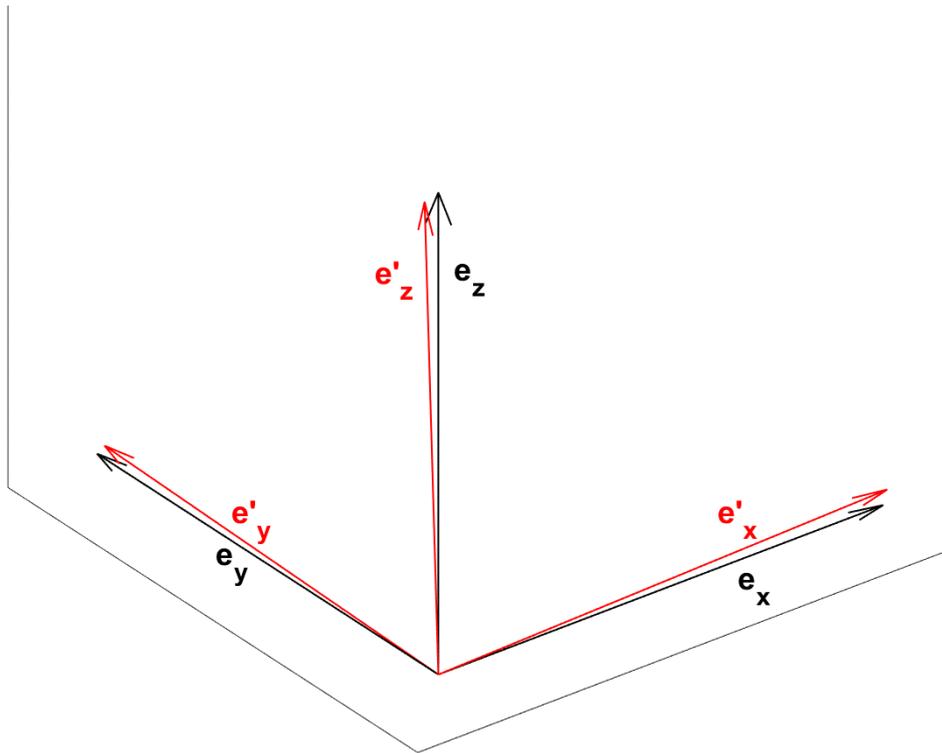


Abbildung 6.11: Darstellung der Vektoren e'_x , e'_y und e'_z sowie H_{\min} und H_{\max} im Koordinatensystem des Empfängers KS_E .
 Abbildung 6.11 zeigt eine Darstellung der Vektoren e'_x , e'_y und e'_z im Koordinatensystem KS_E . Zur Überprüfung der Genauigkeit der berechneten Vektoren werden die Einheitsvektoren e'_x , e'_y und e'_z wie zuvor der Empfänger um 45° jeweils um die z -Achse und die x -Achse gedreht. Aus Abbildung 6.12 ist zu erkennen, dass eine akzeptable Ungenauigkeit für die beschriebene Koordinatentransformation erreicht wird und eine gute Übereinstimmung vorliegt.

Abbildung 6.12: Vergleich der ermittelten Ergebnisse von e'_x , e'_y und e'_z .

Aus dem ermittelten Abstand r und dem Polarwinkel ψ lässt sich der Vektor \mathbf{p} und damit auch \mathbf{p}' bestimmen. Für dieses Beispiel wurde folgendes Ergebnis erzielt:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} -10,564 \\ 0 \\ -9,922 \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{p}' = \begin{bmatrix} -12,233 \\ 2,151 \\ -7,468 \end{bmatrix}$$

Das erhaltene Ergebnis wird in Abbildung 6.13 dargestellt. Dabei stellt der Vektor \mathbf{r}_A die Abweichung vom Ermittelten Punkt des Senders zum tatsächlichen Punkt dar. Für die hier durchgeführten Berechnungen ergibt der Betrag von \mathbf{r}_A einen Wert von $0,436 \text{ m}$. Dies entspricht $3,08\%$ des Abstandes zwischen Sender und Empfänger und kann als durchaus gutes Ergebnis angesehen werden.

Um das Verfahren weiter zu überprüfen, wird der Empfänger um weiter 45° um die x-Achse gedreht. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Für den Betrag von \mathbf{r}_A ergibt sich ein Wert von $0,483 \text{ m}$ und entspricht $3,42\%$ des Abstandes zwischen Sender und Empfänger.

6 Untersuchung verschiedener Szenarien

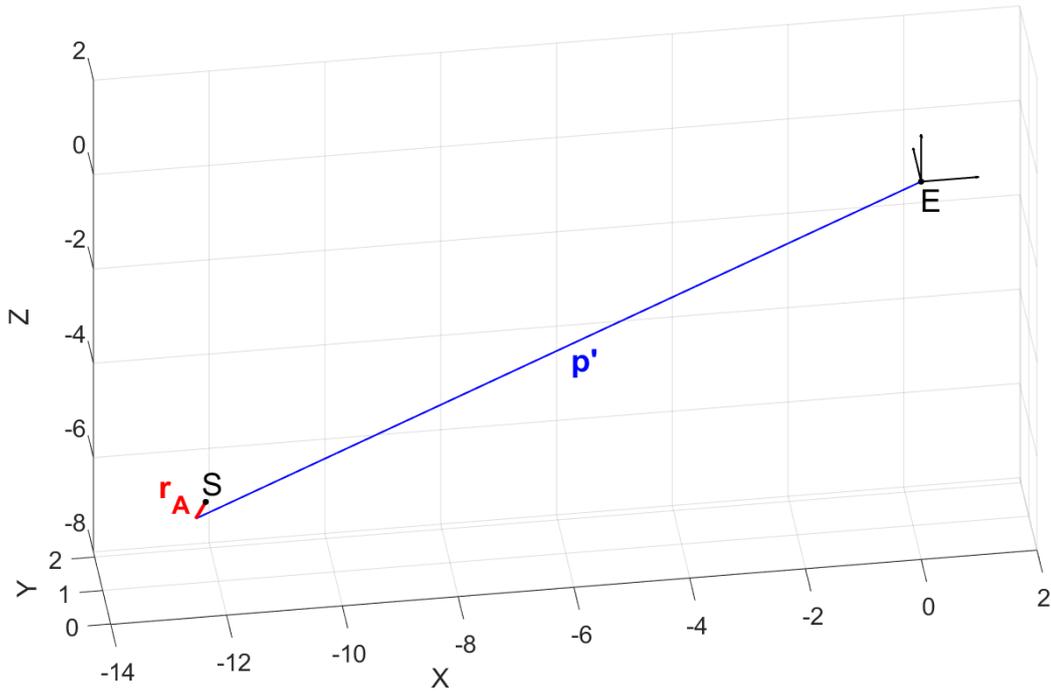


Abbildung 6.13: Darstellung des Ergebnisses der Berechnung im Koordinatensystem KS_E . Mit dem Vektor p' der vom Empfänger auf den Sender zeigen soll und des Vektors r_A der die Abweichung des Ergebnisses angibt. (Empfänger rotiert um 45° um die z-Achse und um 45° um die x-Achse)

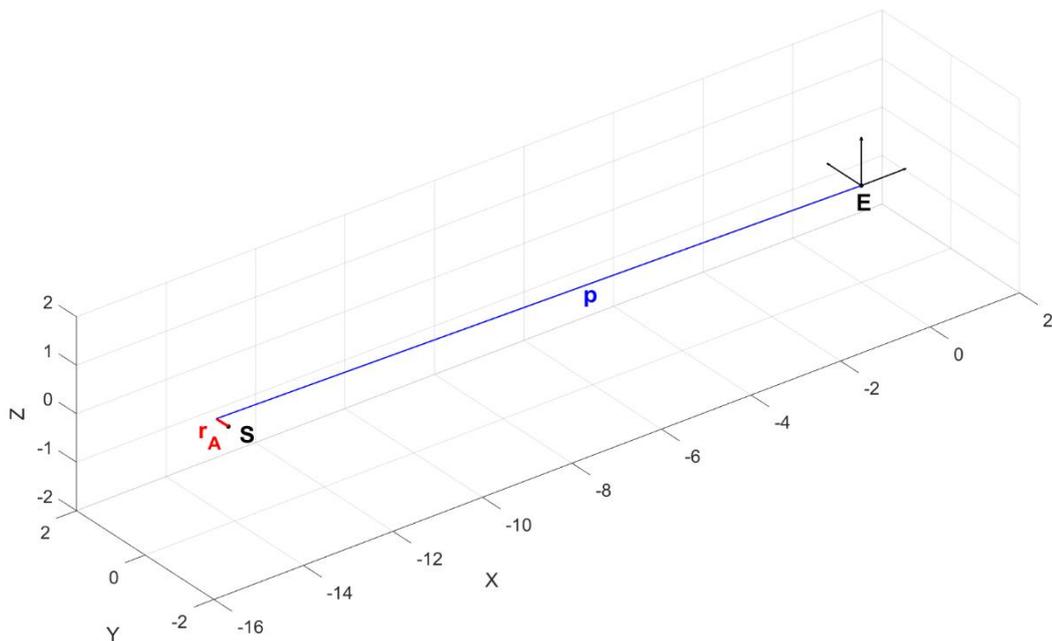


Abbildung 6.14: Darstellung des Ergebnisses der Berechnung im Koordinatensystem KS_E . Mit dem Vektor p der vom Empfänger auf den Sender zeigen soll und des Vektors r_A der die Abweichung des Ergebnisses angibt. (Empfänger rotiert um 45° um die z-Achse und um 90° um die x-Achse)

Es sollen verschiedene Punkte im Raum untersucht werden, wobei die relative Lage von Sender und Empfänger zueinander aus dem vorhergehenden Beispiel beibehalten wird. Hierfür wird der Abstand r konstant 10 m gewählt. Der Winkel ψ wird in $\Delta\psi=1^\circ$ Schritten von $\psi = 0^\circ$ auf $\psi = 90^\circ$ erhöht. Für jeden Punkt wird die Abweichung r_A ermittelt und im Diagramm in Abbildung 6.16 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es in zwei Bereichen eine große Abweichung gibt. Nämlich für ψ kleiner als 15° und größer als 80° . Um solche Punkte zu vermeiden wird im Folgenden eine dritte Sendespule eingeführt.

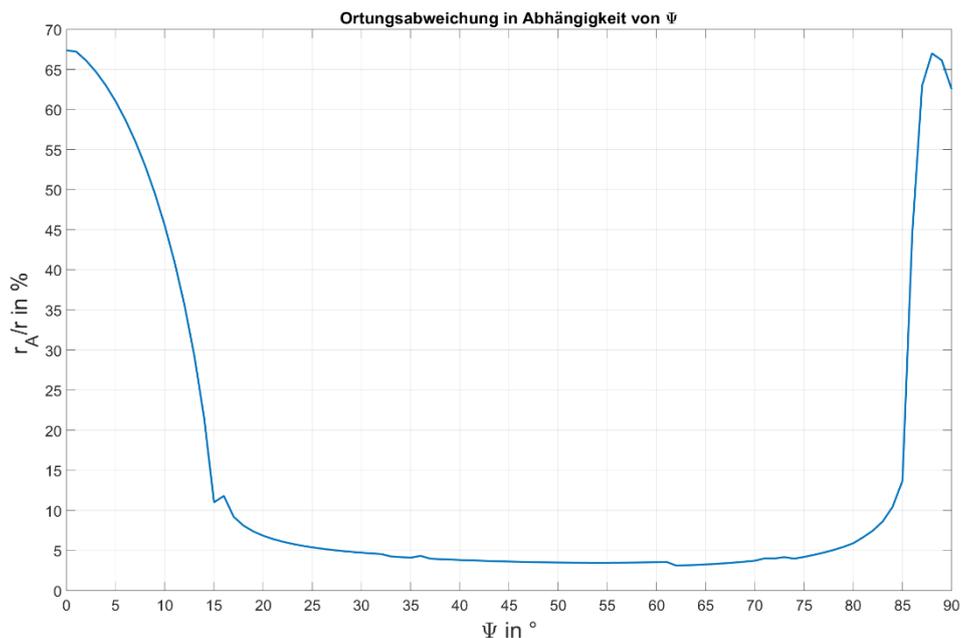


Abbildung 6.16: Ortungsabweichung r_A in Abhängigkeit vom Winkel ψ .

6.3 Basismodell mit 3 Sende und 3 Empfangsspulen

In diesem Kapitel wird eine dritte Sendespule eingeführt, welche orthogonal zu den beiden anderen liegt. Senden die drei Spulen abwechselnd ein Signal, so können für die Ortung jeweils zwei Signale miteinander kombiniert werden. Es kann also gewählt werden ob Spule 1 und 2, Spule 2 und 3, oder Spule 1 und 3 als Sender fungieren und den rotierenden Dipol darstellen.

Zur Vereinfachung sollen die drei Sendespulen dieselbe Lage haben wie die Empfangsspulen. Die drei Sendespulen welche in x-, y- bzw. z-Richtung zeigen, sollen S_x , S_y und S_z genannt werden. Die Empfangsspulen analog dazu E_x , E_y und E_z .

Die drei Sendespulen senden abwechselnd. Dabei werden in den Empfangsspulen folgende Spannungen induziert:

$$\begin{aligned}
u_{x,x} &= U_{x,x} * \sin(\omega t + \varphi_{x,x}), \\
u_{x,y} &= U_{x,y} * \sin(\omega t + \varphi_{x,y}), \\
u_{x,z} &= U_{x,z} * \sin(\omega t + \varphi_{x,z}), \\
u_{y,x} &= U_{y,x} * \sin(\omega t + \varphi_{y,x}), \\
u_{y,y} &= U_{y,y} * \sin(\omega t + \varphi_{y,y}), \\
u_{y,z} &= U_{y,z} * \sin(\omega t + \varphi_{y,z}), \\
u_{z,x} &= U_{z,x} * \sin(\omega t + \varphi_{z,x}), \\
u_{z,y} &= U_{z,y} * \sin(\omega t + \varphi_{z,y}), \\
u_{z,z} &= U_{z,z} * \sin(\omega t + \varphi_{z,z}).
\end{aligned}$$

Die Spannung $u_{x,y}$ gibt die Spannung an, welche in der Spule E_x induziert wird, wenn die Spule S_y sendet. Sollen nun zum Beispiel die Spulen S_x und S_z den rotierenden Dipol darstellen, so werden die empfangenen Signale wie folgt kombiniert:

$$u_x = u_{x,x} + U_{x,z} * \sin\left(\omega t + \varphi_{x,y} - \frac{\pi}{2}\right), \quad (6.12)$$

$$u_y = u_{y,x} + U_{y,z} * \sin\left(\omega t + \varphi_{y,x} - \frac{\pi}{2}\right), \quad (6.13)$$

$$u_z = u_{z,x} + U_{z,z} * \sin\left(\omega t + \varphi_{z,x} - \frac{\pi}{2}\right). \quad (6.14)$$

Dabei sind die Spannungen u_x , u_y und u_z jene Spannungen die in den Empfangsspulen E_x , E_y und E_z induziert werden, wenn S_x und S_y gleichzeitig mit einer gegenseitigen Phasenverschiebung von 90° senden würden. Auf diese Weise werden einmal die Spulen S_x und S_y , einmal S_x und S_z und einmal S_z und S_y miteinander kombiniert und die Berechnungen an verschiedenen Punkten durchgeführt. Um eine gute Aussage über die Genauigkeit der Berechnungen treffen zu können, werden die Berechnungen wie in Kapitel 6.2, mit Transformation der Koordinatensysteme durchgeführt. Damit werden auch die Abweichungen, welche durch die Transformation entstehen, mit einbezogen.

Die zu untersuchenden Punkte werden in Kugelkoordinaten angegeben und haben einen konstanten Abstand $r = 10m$ und einen konstanten Azimutwinkel θ . Der Polarwinkel ψ startet bei $\psi = 0^\circ$ und wird in $\Delta\psi = 1^\circ$ -Schritten bis auf $\psi = 90^\circ$ erhöht. In kartesischen Koordinaten schauen die Punkte wie folgt aus:

$$x(i) = r \cdot \cos(\psi(i)), \quad (6.15)$$

$$y(i) = 0, \quad (6.16)$$

$$z(i) = r \cdot \cos(\psi(i)). \quad (6.17)$$

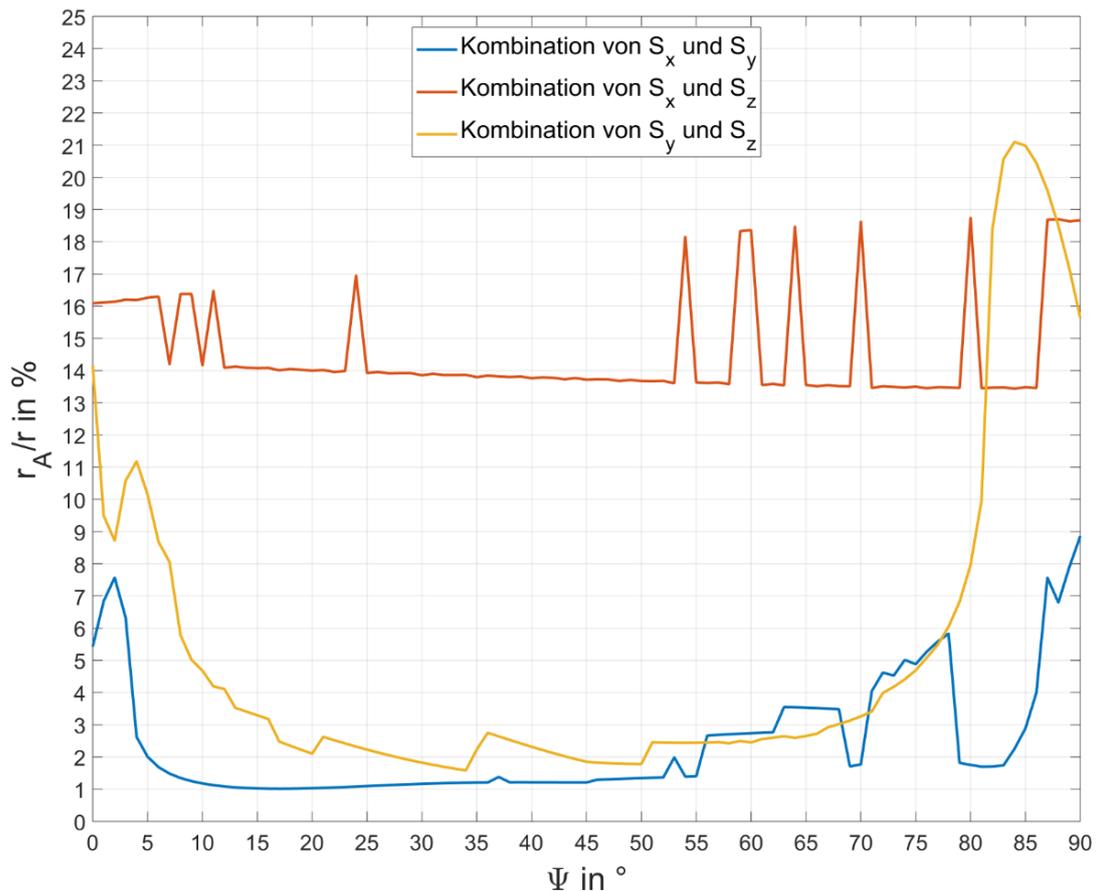


Abbildung 6.17: Darstellung der Abweichung in Prozent des Abstandes bei konstantem Abstand $r = 1 \text{ m}$, konstantem Azimutwinkel $\theta = 0^\circ$ und variablem Winkel ψ von 0° - 90° .

In Abbildung 6.17 werden die Ergebnisse für alle drei möglichen Kombinationen der Sendespulen gezeigt. Die Kombination von S_x und S_y sowie S_y und S_z zeigen ähnliche Ergebnisse.

Wird die Kombination von S_x und S_y betrachtet, so entspricht der Winkel ψ_{xy} aus Sicht des Koordinatensystems des Senders KS_S dem Winkel ψ des Koordinatensystems des Empfängers. Wie zu erwarten ergeben sich die größten Abweichungen für kleine ψ in der Gegend von 0° und für große ψ in der Gegend von 90° .

Werden S_y und S_z miteinander kombiniert, so startet der Winkel ψ_{yz} in diesem Beispiel, aus Sicht des Koordinatensystems KS_S bei 90° und sinkt in 1° -Schritten bis auf 0° . Deshalb ergibt sich hier ein ähnliches Ergebnis. In den Randbereichen bei $\psi = 0^\circ$ und $\psi = 90^\circ$ treten die größten Abweichungen auf.

Bei einer Kombination von S_x und S_z , ist der Winkel ψ_{xz} im Koordinatensystem KS_S , für dieses Beispiel konstant gleich 0° . Daher ist hier die Abweichung konstant sehr hoch und liegt im Bereich von etwa 15%.

Wird Abbildung 6.17 betrachtet, so liegen die Punkte bei $\psi = 0^\circ$ und $\psi = 90^\circ$ genau auf einer der Achsen der Sendespulen. Für solche Punkte werden die schlechtesten Ergebnisse erzielt, da es so bei jeder der drei möglichen Kombinationen der Sendespulen zu großen Abweichungen kommt.

Zum Vergleich soll noch einmal derselbe Fall betrachtet werden. Allerdings wird der Azimutwinkel für die untersuchten Punkte statt $\theta = 0^\circ$ auf $\theta = 45^\circ$ gesetzt. In Kartesischen Koordinaten ergeben sich nun folgende Punkte:

$$x(i) = r \cdot \cos(\psi(i)) \cos \theta = r \cdot \cos(\psi(i)) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (6.18)$$

$$y(i) = r \cdot \cos(\psi(i)) \sin \theta = r \cdot \cos(\psi(i)) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (6.19)$$

$$z(i) = r \cdot \cos(\psi(i)). \quad (6.20)$$

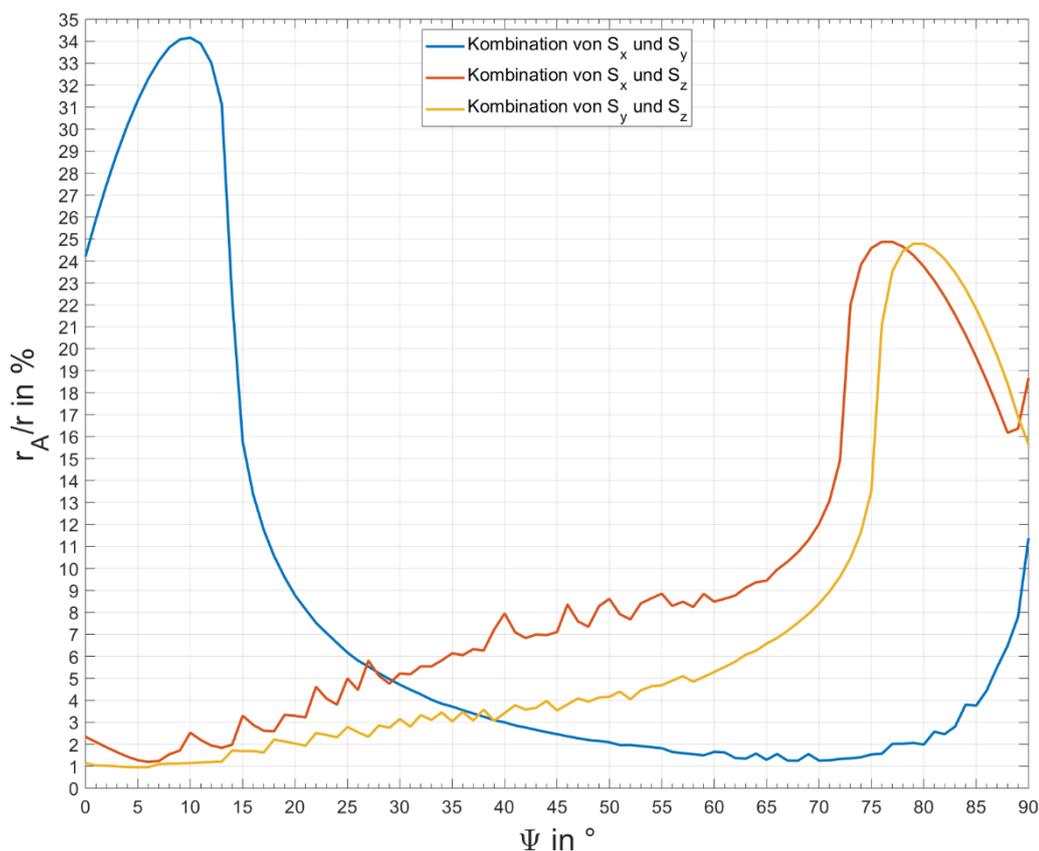


Abbildung 6.18: Darstellung der Abweichung in Prozent des Abstandes bei konstantem Abstand $r = 1 \text{ m}$, konstantem Azimutwinkel $\theta = 45^\circ$ und variablem Winkel ψ von 0° - 90° .

In Abbildung 6.18 werden die Ergebnisse der Untersuchung gezeigt. Hier liegt nur mehr der Punkt bei $\psi = 90^\circ$ auf der Achse einer Sendespule, nämlich auf der z-Achse. Für hier ψ ergeben die

Kombinationen aus S_x und S_z sowie S_y und S_z die besten Ergebnisse. Für größere ψ erzielt die Kombination aus S_x und S_y die besten Resultate.

Für die Ortung wird nun jeweils auf jene Kombination von Empfangsspulen zurückgegriffen bei der das ermittelte ψ am nächsten an 45° liegt. Also möglichst weit entfernt von den kritischen Punkten bei 0° und 90° . In Abbildung 6.19 wird das so erzielte Ergebnis dargestellt. Dadurch werden sehr gute Ergebnisse erzielt.

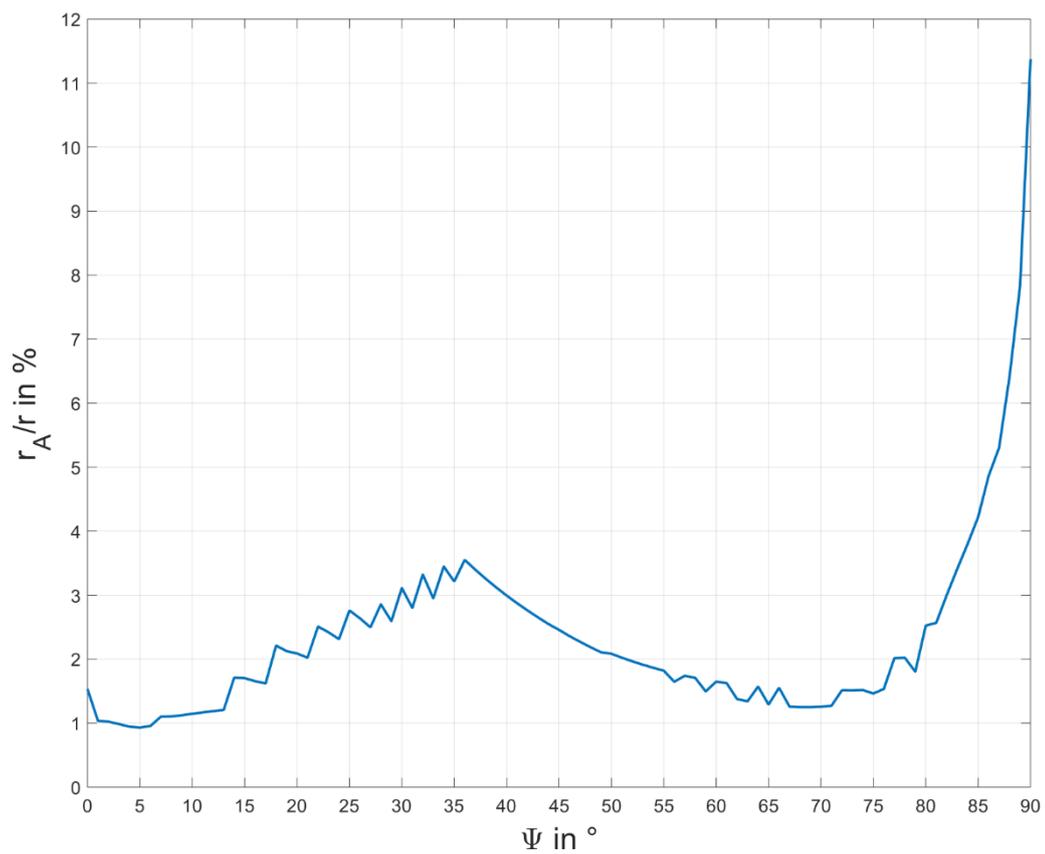


Abbildung 6.19: Darstellung der Abweichung in Prozent des Abstandes bei konstantem Abstand $r = 1\text{ m}$, konstantem Azimutwinkel $\theta = 45^\circ$ und variablem Winkel ψ von 0° - 90° . Es wird jeweils der beste, ermittelte Abstand r_A dargestellt.

7 Diskussion und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine neue Methode zur LVS-Ortung untersucht. Hierfür wurde das H-Feld von zwei orthogonalen Sendespulen mit 90° phasenverschobenen Strömen analysiert und ausgewertet. Dadurch lässt sich eine direkte Ortung mit genauer Richtungsangabe durchführen. Bei der Arbeit handelt es sich um eine erste Untersuchung über die grundsätzliche Anwendbarkeit dieser Methode auf LVS. Die Untersuchung hat gezeigt, dass sich diese Methode durchaus erfolgversprechend ist.

Für die Analyse der Szenarien aus Kapitel 6 wurde je ein vereinfachtes Modell der Spulen herangezogen. Dies betrifft das Weglassen eines Spulenkerns (Ferritkern) und die Wahl der Anzahl der Windungen je Spule. Letzteres wurde so gewählt, dass eine akzeptable Berechnungszeit ermöglicht wurde. Diese Einschränkung hat keine Auswirkungen auf die getätigten Untersuchungen, da eine Anpassung der Feldstärke gemäß der Norm für LVS mittels Stromvorgabe getätigt wurde. Geschuldet der nicht vorhandenen Informationen bezüglich Spulenaufbau und Spulenanordnung von handelsüblichen LVS wurden diese entsprechend gewählt. Dieser Umstand wirft aber andererseits die Fragestellung nach einer optimalen Spulenkonfiguration, in Kombination mit gezeigter Methode für LVS auf. Dies wäre eine weitere Fragestellung welche in Folgearbeiten erörtert werden kann.

Bei der Untersuchung haben sich zwei Probleme gezeigt. Die ermittelte Richtungsangabe ist nicht eindeutig. Es wird ein Vektor ermittelt der vom Empfänger zum Sender zeigt, allerdings kann nicht ermittelt werden in welche Richtung dieser Vektor zeigt. Dieses Problem scheint nicht lösbar zu sein. In der Praxis würde die Suche dann so ausschauen, dass sich die suchende Person in Richtung des angezeigten Vektors bewegt. Sollte sich der Abstand zum Sender dabei erhöhen, muss sich die Person um 180° drehen und in der anderen Richtung weitersuchen. Dadurch sollte sich der Abstand dann stetig verkleinern und die suchende Person wird in Richtung des Verschütteten geführt. Ein weiteres Problem ist eine relativ große Richtungsabweichung, falls der Empfänger genau auf einer der Achsen der drei Sendespulen liegt. Auf die Suche hat das aber keinen allzu großen Einfluss, da die suchende Person durch die abweichende Richtung leicht von den Achsen weggeführt wird und sich die Richtungsangabe dadurch verbessert.

Als nächster Schritt für die Untersuchung müsste ein reales Modell aufgebaut werden. An diesem Modell sollte die Methode weiter untersucht werden. Es sollte möglichst mit Spulen aufgebaut werden, wie sie bereits in aktuellen LVS Anwendung finden. Sollte das Modell gute Ergebnisse liefern müsste noch überprüft werden, wie sich ein aktuelles LVS im Empfangsmodus verhält, wenn

alle drei Spulen eines LVS im Sendemodus ein Signal senden. Es könnte nämlich sein, dass das LVS so drei Verschüttete anzeigt, da alle drei Spulen senden. Anschließend stünde dem Bau eines Prototyps nichts mehr im Wege.

Referenzen

- [1] G. Lehner, Elektromagnetische Feldtheorie, Heidelberg: Springer, 2010.
- [2] S. J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, 2016.
- [3] R. Nave, „Hyperphysics,“ [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>. [Zugriff am 24 02 2019].
- [4] ETSI, „EN 300 718-1,“ 2018.
- [5] ETSI, „EN 300 718-2,“ 2018.
- [6] Lind, David A.; Smythe, W. R., „Avalanche Beacons - Working principles, specifications and comparative properties,“ *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Aspen*, pp. 48-53, 1984.
- [7] G. Krenn, „LVS - Basiswissen,“ *Naturfreund*, Nr. 1, pp. 13-18, 2012.
- [8] E. Procter, G. Strapazon, T. Dal Cappello, B. Zweifel, A. Würtele, A. Renner, M. Falk, H. Brugger, „Burial duration, depth and air pocket explain avalanche survival patterns in Austria and Switzerland,“ 2016.
- [9] Pieps GmbH, „www.pieps.com,“ [Online]. Available: <https://www.pieps.com/de/inhalt/suchphasen-v1>. [Zugriff am 14 02 2019].
- [10] E. Paperno, I. Sasada und E. Leonovich, „A New Method for Magnetic Position and Orientation Tracking,“ *IEEE Transactions on Magnetics*, Bd. 37, Nr. 4, pp. 1938-1940, 07 2001.
- [11] A. E. Ruehli, „Equivalent Circuit Models for Three-Dimensional Multiconductor Systems,“ *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Bd. 22, Nr. 3, pp. 216-221, 1974.
- [12] J. Ekman, „Electromagnetic Modeling Using the Partial Element Equivalent Circuit Method,“ 2003.
- [13] D. McClung, P. Schärer, *The Avalanche Handbook*, Seattle: The Mountaineers Books, 2006.

- [14] J. Ekman, G. Antonini und A. Orlandi, „3D PEEC Capacitance Calculations,“ *Proceedings of the IEEE International Symposium on EMC*, pp. 164-177, 2003.