

Vorhersage und Umrechnung korrosionsbedingter UEP-Signaturen von Wasserfahrzeugen

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der
Abteilung Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. David Schäfer

aus

Duisburg

Erster Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. Daniel Erni

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch

Dritter Gutachter: Dr. rer. nat. Jens Doose

Tag der mündlichen Prüfung:

15.04.2015



Offen im Denken

Vorhersage und Umrechnung korrosionsbedingter Underwater-Electric-Potential-Signaturen (UEP-Signaturen) von Wasserfahrzeugen im Kontext von Mine Warfare (MIW), Anti-Submarine Warfare (ASW), Mine Countermeasure (MCM) und Integrated Ship Signature Management Systemen (ISSMS)

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der
Abteilung Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. David Schäfer
wohnhaf in Oberhausen
geboren am 03.06.1982 in Duisburg

Datum der Einreichung: 20.10.2014
Tag der mündlichen Prüfung: 15.04.2015

Erster Gutachter und Betreuer der Promotion:

Prof. Dr. sc. techn. Daniel Erni

Fachgebiet Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik (ATE), UDE

Zweiter Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch

Fachgebiet Energietransport und -speicherung (ETS), UDE

Dritter Gutachter:

Dr. rer. nat. Jens Doose

Zentrum für elektromagnetische UW-Signaturen (GF 520), WTD 71, Bundeswehr

Die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen von zwei Projekten in Zusammenarbeit mit der Wehrtechnischen Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) der Bundeswehr erstellt.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Theorie	5
2.1. Signaturen im Kontext maritimer Waffentechnik	5
2.1.1. Unterschiedliche Arten von UW-Signaturen	5
2.1.2. Maßnahmen gegen die Ausnutzung von Signaturen	11
2.1.3. Interaktion von Seeminenabwehr und Minendesign	15
2.1.4. Heutige und zukünftige Bedeutung der UEP-Signatur	15
2.1.5. Der Begriff der optimalen UW-Signatur	17
2.2. Repräsentationsformen von UEP-Signaturen	18
2.2.1. Signatur-Linie	18
2.2.2. Signatur-Fläche	20
2.2.3. Zeit- und Frequenzbereichs-Darstellungen	20
2.2.4. Maximalwerte und Peak-To-Peak-Werte	21
2.3. Feldtheorie des stationären Strömungsfeldes	21
2.3.1. Die Green'sche Funktion	22
2.3.2. Randwertprobleme	25
2.3.3. Superpositionsprinzip	25
2.3.4. Monopol, Dipol und Multipol	26
2.3.5. Spiegelungsmethode für leitfähige Halbräume	29
2.3.6. Multipolentwicklung	31
2.4. Elektrochemie	32
2.4.1. Ladungstransport in Elektrolytlösungen	32
2.4.2. Redoxreaktionen im Gleichgewichtsfall	33
2.4.3. Stromfluss durch die Phasengrenze	35
2.4.4. Korrosion	37
2.4.5. Passive und aktive Korrosionsschutzmaßnahmen	38
2.5. Numerische Berechnung von UEP-Signaturen	38
2.5.1. Finite-Elemente-Methode	39
2.5.2. Elektrische Ersatzschaltung	40
2.5.3. Simulation elektrochemischer Vorgänge	40
2.6. Optimierungsprobleme und -ansätze	42
2.6.1. Lösungsraum und Fitnessfunktion	43
2.6.2. Verschiedene Optimierungsansätze	43

2.6.3.	Die Wahl des am besten geeigneten Optimierers	46
3.	Vergleich zwischen Berechnung, Simulation und Messung	49
3.1.	Elektrochemische Zelle	49
3.1.1.	Iterative Berechnung	50
3.1.2.	Numerische Simulation	52
3.2.	Spannungsgetriebener Dipol	53
3.3.	Quest-Signatur aus den RIMPASSE	54
3.4.	Fazit aus den Vergleichen	60
4.	Signaturadaption mittels Multipol	61
4.1.	Konzept und bisherige Untersuchungen	61
4.1.1.	Modellumgebung für die Multipoladaption	62
4.1.2.	Wahl des Optimierers	62
4.2.	Adaption gemessener Dipolsignaturen	63
4.2.1.	Messplan, Datenaufbereitung und Adaptionansatz	65
4.2.2.	Ergebnisse der Multipoladaption	67
4.3.	Umrechnung auf geänderte Umgebung	73
4.4.	Abgrenzung zwischen UEP-Nah- und Fernfeld	75
4.4.1.	Bisherige Ansätze	76
4.4.2.	Abweichung vom Dipolfeld	76
4.4.3.	Anwendung zur Nah-/Fernfeld-Lokalisierung	78
5.	Echtzeit-Überwachung für ISSM	81
5.1.	Konzept und bisherige Untersuchungen	82
5.2.	Aufbau der Testumgebung	83
5.3.	Distanz-Umrechnung	87
5.4.	Komponentenweise Umrechnung	88
5.5.	Wellenstrom-Umrechnung	93
5.5.1.	Variation der Wasserleitfähigkeit ohne Seeboden	93
5.5.2.	Einfluss des Seebodens	95
5.5.3.	Zufällig generierte Umgebungsbedingungen	96
5.6.	Schleppkörper-Umrechnung	99
5.6.1.	Variation der Wasserleitfähigkeit ohne Seeboden	99
5.6.2.	Variation der Seebodenleitfähigkeit	101
5.6.3.	Variation der Wasserleitfähigkeit mit Seeboden	103
5.6.4.	Zufällig generierte Umgebungsbedingungen	105
5.6.5.	Alternative Umrechnungsvorschrift	107
5.7.	Einfluss von Ungleichmäßigkeiten des Seebodens	109
5.7.1.	Rippelmarken	109
5.7.2.	Vertikal geschichtete Leitfähigkeit	114

6. AEP-Signatur	119
6.1. Analytische Berechnung	119
6.1.1. Spiegelungsmethode für die Wasserlinie	120
6.1.2. Verdoppelung der Signaturstärke bei gleichem Abstand	121
6.2. Numerischer Ansatz	121
6.2.1. Umsetzung in COMSOL	121
6.2.2. Vergleich mit analytischer Berechnung	122
6.2.3. E-Feld und Flächenladung	123
6.2.4. AEP-Simulation eines U-Boot-Modells	124
6.3. Relevanz von AEP im Kontext von ASW	126
7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung	129
8. Ausblicke und weitere Anwendungsmöglichkeiten	133
Literaturverzeichnis	135
Abbildungsverzeichnis	139
Tabellenverzeichnis	145
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	147
Anhang	149
A. Eigene Publikationen und Berichte	149
A.1. Themenbezogen	149
A.2. Sonstige	152
B. Polarisationskennlinien	153
C. Adaption gemessener Dipolsignaturen	154
C.1. Messvorschriften	154
C.2. Ergebnisse der Multipoladaption	157
D. Echtzeit-Überwachung für ISSM	171
D.1. Referenzsignaturen	171
D.2. Veranschaulichung der Korrelation	174

Vorwort

Die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen der Forschungsprojekte „Modellierung elektromagnetischer Signaturen von Wasserfahrzeugen“¹ und „Umrechnung von UEP-Signaturen zwischen verschiedenen Umgebungsbedingungen“² erstellt, welche von der Deutschen Marine³ bei der ATE⁴ in Auftrag gegeben wurden. Sie stellt eine inhaltliche Erweiterung und Konkretisierung der in den Projekten ausgearbeiteten Forschungsergebnisse dar. Um einen thematischen Anschluss zu ermöglichen, wurde entgegen üblicher Praxis entschieden, die Forschungsberichte zu referenzieren, obwohl diese im wissenschaftlichen Sinne als unveröffentlicht gelten. Im Literaturverzeichnis wurde dies jeweils durch den Hinweis „unveröffentlicht“ vermerkt.

Mit dem Themenbereich der Dissertation beschäftigt sich nur eine relativ kleine wissenschaftliche Gemeinschaft, die aufgrund des militärischen Bezugs einige Besonderheiten aufweist. Akteure sind vor allem Vertreter von Forschungseinrichtungen⁵ der Marinen von NATO-Mitgliedstaaten, so wie einige im Auftrag arbeitende Forschungseinrichtungen, Rüstungs- und Softwarekonzerne. Trotz der Verbundenheit über die NATO ist der wissenschaftliche Austausch von einer gewissen „Verschlossenheit“ geprägt, und die Veröffentlichung militärisch anwendbarer Forschungsergebnisse erschwert. Wichtige Plattformen für den Informationsaustausch sind insbesondere nichtöffentliche Treffen wie z.B. Militär-interne Fortbildungen oder Sachstandbesprechungen, das internationale „Electromagnetic Silencing Symposium“ (EMSS) dessen Inhalte teilweise eingestuft/nicht-öffentlich sind und die öffentliche, internationale „Marine Electromagnetics conference“ (MARELEC). Zudem ist das „Centre for Ship Signature Management“ (CSSM) zu nennen, welches eine Art „Arbeitskreis“ der Marine-zugehörigen Forschungseinrichtungen ist und komplett nicht-öffentlich agiert. Es existieren aktuell keine auf UW-Signaturen spezialisierte wissenschaftliche Fachzeitschriften. Die während der Promotion getätigten Veröffentlichungen mussten jeweils einen offiziellen, Bundeswehr-internen Freigabeprozess durchlaufen, bei dem die Inhalte bezüglich ihrer sicherheitsrelevanten Unbedenklichkeit überprüft wurden.

¹Zeitraum: Okt. 2009 - Okt. 2013. Zuwendungsbescheid: E/E7iZ/9U377/7F129.

²Zeitraum: Okt. 2013 - aktuell. Zuwendungsbescheid: E/E7iZ/D0925/4F038.

³Zentrum für elektromagnetische UW-Signaturen (GF 520) der Wehrtechnischen Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung, Bundeswehr.

⁴Fachgebiet Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen.

⁵Z.B. DGA (Frankreich), DRDC (Kanada), FOI (Schweden), NAVSEA (USA), TNO (Niederlande).

1. Einleitung

Wasserfahrzeuge¹ können sich auf verschiedene Art und Weise ihrer Umgebung mitteilen. Im Bereich der Wasser- und Unterwasser-Kriegsführung wird dies intensiv dazu ausgenutzt, feindliche Schiffe und U-Boote (cf. Abbildung 1.1) zu erkennen, wobei die Möglichkeiten sich nicht nur auf das einfache Bemerken der Anwesenheit beschränken, sondern bis zur genauen Ortung und Klassifizierung reichen können. Die messbaren Veränderungen in der Umgebung eines Wasserfahrzeugs werden als *Signatur* bezeichnet, wobei der Begriff ursprünglich im Zusammenhang mit akustischen Messungen bei U-Booten eingeführt wurde [1, S.1]. Im Laufe der Zeit wurde er aber auf andere beeinflussbare Umgebungsparameter erweitert, wie z.B. die Beeinflussung bzw. Erzeugung von Schallwellen, Druck, elektromagnetischen Wellen, magnetischen Feldern oder elektrischen Feldern.



Abbildung 1.1.: Die U31, ein U-Boot der U 212A Klasse. *Quelle:* Von der WTD 71 zur Verfügung gestellt. © KaiKo Photo 2010.

Eine besonders intensive Ausnutzung von Unterwasser-Signaturen (UW-Signaturen) findet im Bereich des *Mine Warfare* (MIW) durch intelligente Seeminen (engl.: *Influence mines*) statt, welche in die Kategorie der Sperrwaffen fallen. Es existieren viele unterschiedliche Typen von Seeminen, die teilweise mit hoch entwickelter Sensortechnik und Mikroprozessoren ausgestattet sind, und ohne die Notwendigkeit einer direkten Berührung auslösen können. Sie liegen z.B. auf dem Seeboden unter Schlamm

¹Oberbegriff für Schiffe und U-Boote.

vergraben oder können durch unregelmäßige Formgebung und bewuchsfördernde Beschichtungen als Steine getarnt sein. Durch die Druckwelle ihrer Detonation sind Seeminen in der Lage schwere Beschädigungen an in der Nähe befindlichen Schiffen oder U-Booten zu verursachen, und diese auch ggf. zu versenken. Um die Gefährdung durch Seeminen möglichst gering zu halten, müssen militärische Wasserfahrzeuge daher besonders schwache bzw. schlecht detektierbare Signaturen aufweisen. Von besonderer Wichtigkeit ist dies für Minenabwehrfahrzeuge, wie z.B. Minenkampfboote, die in Bereichen mit besonders hoher Minengefährdung eingesetzt werden. U-Boote müssen zusätzlich zur Seeminen-Thematik noch aus einem anderen Grund möglichst minimale UW-Signaturen besitzen: Ihre strategische Stärke liegt darin, sich unentdeckt in feindlichem Gebiet bewegen zu können, und somit unvermittelt erscheinen und angreifen zu können. Auf diese Weise ist ein einzelnes U-Boot in der Lage, eine große Anzahl gegnerischer Streitkräfte zu binden, weil diese z.B. zum Schutz von Versorgern im eigenen Gebiet verbleiben müssen. U-Boote sind demnach strategische Waffen, deren Funktion maßgeblich auf dem Prinzip einer schlechten Ortbarkeit beruht. Im *Anti-Submarine Warfare* (ASW) werden die UW-Signaturen teilweise noch fortschrittlicher/intensiver überwacht als beim MIW, weshalb bei U-Booten besonders hohe Anforderungen an die Signatur zu stellen sind.

Wie in vielen militärischen Themenbereichen findet bei der Ausnutzung von UW-Signaturen eine kontinuierliche, sich gegenseitig motivierende Verbesserung von Maßnahmen und Gegenmaßnahmen statt. Je ausgeklügelter die Sensortechnik für Seeminen oder für die U-Boot-Jagt wird, umso aufwändiger muss die Minimierung der Signaturen betrieben werden, was indirekt wiederum die Entwicklung der Minen vorantreibt. Ein besonders großer Aufwand wurde in der Vergangenheit bei der Ausnutzung, und respektive der Minimierung, der akustischen und magnetischen Signatur betrieben, wohingegen die elektrische Signatur weitaus weniger Beachtung fand. Mittlerweile existieren jedoch diverse Minen mit Sensoren zur Messung der elektrischen Signatur, so dass die Thematik notwendigerweise in den Vordergrund rückt.

Der sich ankündigende Bedeutungswandel war die Motivation für das erste Forschungsprojekt (cf. Vorwort), bei dem der Schwerpunkt auf der Aufarbeitung der Grundlagen, einer Kompetenzbildung im Bereich numerischer Simulationen, so wie der Erstellung erster Vorschläge zur Signaturminimierung lag. Im aktuell laufenden Forschungsprojekt und der vorliegenden Dissertation soll es dagegen um die Vorhersage bzw. Umrechnung elektrischer Signaturen auf andere Umgebungsbedingungen gehen. Die Motivation hierfür wurde in [2, S.14] auf den Punkt gebracht indem gezeigt wurde, dass elektrische Signaturen nie alleine vom Wasserfahrzeug stammen, sondern immer aus einer Interaktion mit seiner Umgebung. Dies hat weitreichende Konsequenzen:

- Unter verschiedenen Umgebungsbedingungen gemessene elektrische Signaturen können nicht ohne Weiteres verglichen werden.
- Risikoabschätzungen z.B. bei MCM-Operationen (*Mine Countermeasure*) sind ungenau bzw. nicht möglich (cf. Abbildung 1.2).

- Optimierungsansätze werden beeinträchtigt, ggf. unwirksam, oder bewirken im schlimmsten Fall eine Signaturverstärkung.
- Es ist nicht ohne Weiteres möglich, allgemeingültige Grenz- oder Richtwerte für elektrische Signaturen anzugeben.

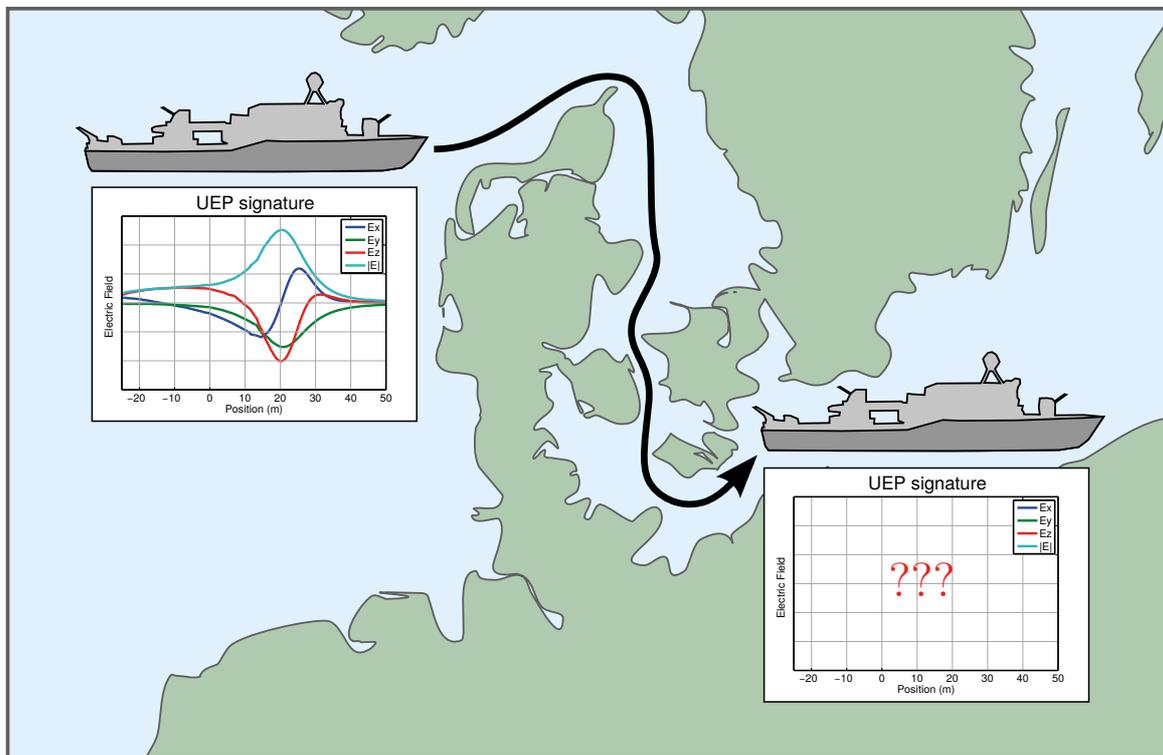


Abbildung 1.2.: MCM-relevante Frage: Welche Signatur ergibt sich unter Einsatz-Umgebungsbedingungen. *Quelle:* Eigene Herstellung, ähnlich [3, S.5].

Zur Lösung dieser Probleme müssen Wege gefunden werden die elektrische Signatur eines Wasserfahrzeugs für konkrete Umgebungsbedingungen vorherzusagen. Hierfür sind verschiedene Ansätze denkbar, die jeweils Vor- und Nachteile mit sich bringen:

1. Vollständige numerische Simulation von Wasserfahrzeug und Umgebung.
2. Messungen an einem maßstabgetreuen Modell.
3. Konvertierung einer unter anderen Umgebungsbedingungen gemessenen Signatur des gleichen Wasserfahrzeugs:
 - a) Mittels vereinfachtem Quellenmodell, welches über einen inversen Modellierungsansatz bestimmt wurde.
 - b) Anhand analytisch hergeleiteter oder auf Erfahrung beruhender Umrechnungsvorschriften.
 - c) Durch Extrapolation auf Basis einer Echtzeit-Evaluation.

Im ersten Forschungsprojekt konnte bereits erfolgreich die Effizienz des Einsatzes vollständiger numerischer Simulationen (Ansatz 1) demonstriert werden, wobei jedoch deutlich wurde, dass die Polarisationskennlinien der Phasengrenzen möglichst genau bekannt sein müssen (cf. [4], Kapitel 2.4). Dynamische Änderungen des Polarisationsverhaltens, wie sie z.B. bei den RIMPASSE² 2011 beobachtet wurden (cf. [5]), stellen in diesem Zusammenhang eine große Herausforderung dar und erschweren zuverlässige Vorhersagen. Für Messungen an maßstabsgetreu verkleinerten Modellen (Ansatz 2) wurden Skalierungsvorschriften hergeleitet (cf. [6]) die eine Reduktion der Wasserleitfähigkeit fordern, und prinzipiell gute Vorhersagen über die elektrische Signatur in Aussicht stellen. Es müssen jedoch unter großem Aufwand die mit der Skalierung einhergehenden Rückwirkungen auf das Polarisationsverhalten vermieden werden, und zudem erscheint der Einsatz von Modellmessungen nicht geeignet für kurzfristige Vorhersagen, wie sie z.B. im Kontext von MCM von Interesse sind. Bezüglich der inversen Modellierung (Ansatz 3a) wurde bereits ein Ansatz mit dem Namen „*Multipoladaptation*“ entwickelt (cf. [7]), der noch ausgiebiger getestet, verbessert und erweitert werden kann. Die analytische Herleitung möglichst einfacher Umrechnungsvorschriften (Ansatz 3b) ist Gegenstand des aktuell laufenden Forschungsprojektes (cf. Vorwort). Die Echtzeit-Evaluation und Weiterverarbeitung von Signaturdaten (Ansatz 3c) wird bereits im Bereich magnetischer Signaturen praktiziert, und sollte in abgewandelter Form auch bei elektrischen Signaturen anwendbar sein.

Die Dissertation ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 mit dem Namen „Grundlagen und Theorie“ wird eine Einführung in den thematischen Kontext der Arbeit gegeben, wobei die militärische Ausgangssituation erklärt und alle später benötigten theoretischen Grundlagen in kompakter Form rekapituliert werden. Kapitel 3 zeigt Vergleiche zwischen berechneten, simulierten und gemessenen Werten, zwecks Überprüfung der zuvor hergeleiteten Modellierung elektrochemischer Vorgänge an den Metall-Elektrolyt-Phasengrenzen. In Kapitel 4 wird die Multipoladaptation mit einem Optimierer auf Basis der Evolutionären Algorithmen dazu verwendet um gemessene elektrische Signaturen eines Dipols zu adaptieren, und es wird eine Definition zur Abgrenzung zwischen UEP-Nah- und Fernfeld hergeleitet. Kapitel 5 beschäftigt sich in Hinblick auf *Integrated Ship Signature Management Systems* (ISSMS) mit diversen Ansätzen zur Echtzeit-Überwachung der eigenen Signatur mittels Wellenstrom-Messungen, Schleppkörper-Messungen und analytischer Berechnungen. Kapitel 6 mit dem Namen „AEP-Signatur“ behandelt prinzipielle Eigenschaften der elektrischen Signatur oberhalb der Wasserlinie. Es folgen die Zusammenfassung (Kapitel 7) und die Ausblicke (Kapitel 8), in denen die Ergebnisse der untersuchten Umrechnungskonzepte rekapituliert werden, und weiterführende Überlegungen angesprochen werden.

²Radar Infrared electro-Magnetic Pressure Acoustic Ship Signature Experiments (cf. Kapitel 3.3).

2. Grundlagen und Theorie

In diesem Kapitel soll eine Einführung in den thematischen Kontext der Dissertation gegeben werden, wobei die militärische Ausgangssituation erklärt und alle später benötigten theoretischen Grundlagen in kompakter Form rekapituliert werden sollen. Die Ausführungen sind dabei etwas umfangreicher als üblich, wodurch der Interdisziplinarität Rechenschaft getragen und ein möglichst guter Einstieg in das Thema ermöglicht werden soll. Zur Vertiefung der verschiedenen Grundlagen sei an dieser Stelle auf weiterführende Fachliteratur aus den Bereichen Signaturen [1] [8] [9], Feldtheorie [10] [11], Elektrochemie [12] [13], Korrosionsschutz [14] [15], Numerische Simulation [16] [17] und Optimierung [18] [19] verwiesen.

2.1. Signaturen im Kontext maritimer Waffentechnik

Wie bereits in der Einleitung erläutert wurde, beschreibt der Begriff *Signatur* im militärischen Kontext die charakteristische Änderung bestimmter Umgebungsbedingungen durch ein Objekt, z.B. ein Flugzeug oder Wasserfahrzeug. Den verschiedenen Arten von beeinflussbaren Umgebungsparametern entsprechend kann zwischen unterschiedlichen Arten von (Teil-) Signaturen ein und desselben Wasserfahrzeugs unterschieden werden, wobei alle Teilsignaturen zusammen als *Gesamtsignatur* bezeichnet werden.

Zunächst sollen die verschiedenen Teilsignaturen vorgestellt werden und es soll erklärt werden wie sie in der Vergangenheit ausgenutzt wurden und welche Gegenmaßnahmen existieren. Des Weiteren soll kurz die Interaktion von Seeminenabwehr und Minendesign angesprochen werden, über die heutige und zukünftige Bedeutung der elektrischen Signatur nachgedacht werden, und es sollen einige grundlegende Überlegungen zum Begriff der optimalen Signatur angestellt werden.

2.1.1. Unterschiedliche Arten von UW-Signaturen

Teilsignaturen müssen stets im Kontext der Gesamtsignatur betrachtet werden, da sich Optimierungsansätze für die verschiedenen Teilsignaturen gegenseitig beeinflussen können. So können beispielsweise Maßnahmen welche die elektrischen Signatureigenschaften eines Schiffes verbessern, gleichzeitig eine Verschlechterung der akustischen Signatur-Eigenschaften bewirken (Stichwort „Propellerbeschichtung“).

Die wichtigsten Teilsignaturen sind:

- Radarsignatur.
- Wärmesignatur bzw. Infrarotsignatur.
- Wahrnehmbarkeit im Bereich des sichtbaren Lichtes.
- Akustische Signatur bzw. akustisches Zielmaß.
- Magnetische Signatur.
- Elektrische Signatur.
- Drucksignatur und Seismik.
- Kielwasser.

Die Teilsignaturen können mitunter noch weiter untergliedert werden, z.B. je nach:

- Frequenzbereich.
- Umgebungsbedingungen (z.B. Tiefwasser/Flachwasser).
- Verursachendem Effekt, bzw. verursachender Komponente.

Zudem ist eine übergeordnete Kategorisierung der Signaturen möglich, wobei eine Definition bzw. Abgrenzung nicht immer einfach bzw. eindeutig ist. Eine mögliche Kategorisierung der Signaturen wird in Tabelle 2.1 dargestellt.

Typ	Unterwasser	Überwasser	Aktiv	Passiv
Radarsignatur	×	✓	×	✓
Wärmesignatur bzw. Infrarotsignatur	×	✓	✓	✓
Wahrnehmbarkeit im Bereich des sichtbaren Lichtes.	×	✓	✓	✓
Akustische Signatur	✓	×	✓	✓
Drucksignatur	✓	×	✓	×
Magnetische Signatur	✓	✓	✓	×
Elektrische Signatur	✓	(✓)	✓	×
Kielwasser	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)

Tabelle 2.1.: Mögliche Kategorisierung von Signaturen nach Unterwasser/Überwasser-Signatur und aktiver/passiver Signatur.

In den folgenden Unterkapiteln sollen einige Teilsignaturen vorgestellt werden, wobei sich die Auswahl auf die wichtigsten UW-Signaturen beschränkt um den Umfang in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

Akustische Signatur bzw. akustisches Zielmaß

Akustische Signale spielen unter Wasser eine wichtige Rolle, weil eine Informationsgewinnung anhand elektromagnetischer Wellen dort üblicherweise nicht möglich ist. In der Praxis sind die Variationen der verwendeten technischen Ansätze zur Ausnutzung von Unterwasser-Schall entsprechend umfangreich und vielseitig, so dass an dieser Stelle nur ein knapper Überblick gegeben werden kann.

Sonar ist die Abkürzung für „sound navigation and ranging“ und steht als Oberbegriff für technische Geräte zur akustischen Navigation und Erkennung von Objekten unter Wasser. Dabei kann wie beim Radar das Prinzip der *Echoortung* angewandt werden, indem gebündelter Wasserschall in verschiedene Richtungen ausgesendet wird, und das zurückkommende Echo mit *Hydrophonen* – also Unterwassermikrofonen – aufgenommen und analysiert wird. Anhand der zeitlichen Verzögerung des Echos und seiner Intensität können Werte wie der Abstand, die Größe oder die Beschaffenheit von Objekten bestimmt bzw. geschätzt werden. Das (akustische) *Zielmaß* beschreibt in diesem Zusammenhang analog zum Radarquerschnitt das richtungsabhängige Reflektionsverhalten von Objekten.

Sonare die hauptsächlich in vertikaler Richtung beobachten (vornehmlich nach unten) werden als *Echolote* bezeichnet, und vor allem im zivilen Bereich z.B. zur Tiefenmessung, sowie zum Auffinden von Fischschwärmen oder gesunkenen Wracks verwendet. Im militärischen Bereich ist dagegen auch eine Beobachtung in horizontaler Richtung von Interesse, wie z.B. bei dem für die U-Boot-Jagd und Minenjagd eingesetzten *Side-Scan Sonar* (SSS).



Abbildung 2.1.: Side-Scan Sonar Aufnahme vom Wrack eines Patrouillenbootes aus dem Zweiten Weltkrieg. *Quelle:* Von der U.S. Navy in [20] gemeinfrei zur Verfügung gestellt (public domain).

Neben dem aktiven Sonar, bei dem der Beobachter Schallsignale aussendet, gibt es auch passive Sonare (bzw. passive Betriebsmodi von Sonaren), bei denen der Beobachter lediglich auf die Umgebungsgeräusche horcht. Dabei kann es sich zum Beispiel um Geräusche der Schraubendrehung, Pumpengeräusche, akustische Unterwasserkommunikation oder sonstige Lärmquellen an Bord anderer Wasserfahrzeuge handeln.

Um auch beim passiven Sonar Informationen über die Richtung zu erhalten, werden Laufzeitunterschiede als Berechnungsgrundlage verwendet, die mit Anordnungen aus teilweise mehreren hundert örtlich versetzten Hydrophonen gemessen werden können. Ein Beispiel für eine derartige Technik ist das sog. *Towed Array Sonar* (TAS), welches zur Jagd auf U-Boote verwendet wird, und bei dem eine Kette von Hydrophonen hinter einem Schiff hinterhergeschleppt wird. Während die Richtungsbestimmung vergleichbar gut funktioniert, kann die Entfernung eines Objektes beim passiven Sonar aufgrund der unbekannt absoluten Signallaufzeit nur sehr aufwändig und relativ ungenau geschätzt werden. Der entscheidende Vorteil eines passiven Sonars liegt darin, dass der Beobachter seine eigene Anwesenheit nicht verrät.

Entsprechend der Unterteilung in passives- und aktives Sonar, muss auch zwischen einer passiven- und aktiven akustischen Signatur unterschieden werden, wobei das passive Sonar auf die aktive akustische Signatur abzielt und umgekehrt. Die akustische Signatur ist hauptsächlich unter Wasser von Bedeutung, da über Wasser andere Verfahren auf Basis elektromagnetischer Wellen in der Regel einen Vorteil bezüglich des Informationsgehalts haben. Zudem treten bei der Ausbreitung von Schall in Luft höhere Verluste auf als bei der Ausbreitung von Wasserschall, weshalb vor allem im niederfrequenten Bereich unter Wasser sehr viel höhere Reichweiten erzielt werden können.

Drucksignatur

Wasserfahrzeuge produzieren während der Fahrt durch die Verdrängung des Wassers eine Drucksignatur, deren prinzipieller Verlauf in Abbildung 2.2 dargestellt ist.

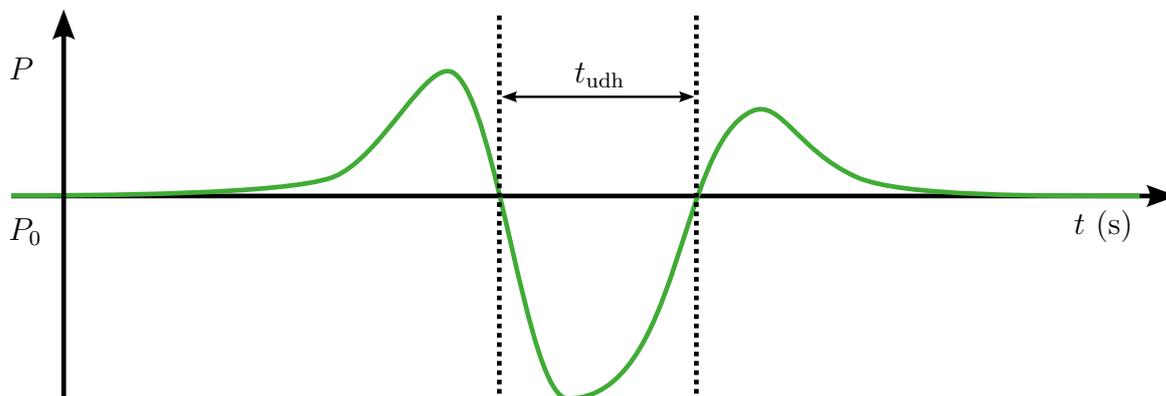


Abbildung 2.2.: Prinzipieller Verlauf einer Drucksignatur mit der Unterdruckhaltezeit t_{udh} . *Quelle:* Eigene Zeichnung, zu Anschauungszwecken generiert.

Die Drucksignatur ermöglicht eine relativ genaue und zuverlässige Bestimmung des Überfahrtszeitpunktes über den Messpunkt, so dass Drucksignale als Trigger für Seeminen verwendet werden können. Zudem kann die sog. *Unterdruckhaltezeit* t_{udh} ausgewertet werden um die Größe des Wasserfahrzeugs zu schätzen. Im MIW ist es üblich

Drucksensoren mit magnetischen und/oder akustischen Sensoren zu kombinieren, wobei die Druckinformationen teilweise nur zur Abwehr von Räumungsversuchen dienen (cf. Unterkapitel 2.1.3). Die Drucksignatur ist eine Unterwasser-Signatur und aktiv, da das ausnutzbare Signal durch das Wasserfahrzeug selbst erzeugt wird.

Magnetische Signatur

Die Ursachen für das Auftreten von Magnetfeldern in der Nähe von Wasserfahrzeugen können grob in vier Kategorien eingeteilt werden [1]:

- Induzierte Magnetisierung der ferromagnetischen Bestandteile von Wasserfahrzeugen durch das Erdmagnetfeld. Die Magnetisierung kann temporär oder remanent sein, wobei Letzteres durch mechanischen Stress begünstigt wird, welcher z.B. während der Bauphase in der Werft, oder aufgrund von Seegang auf die Materialien wirkt.
- Wirbelströme, die aufgrund von Bewegung des Wasserfahrzeugs im Erdmagnetfeld (Rollen, Stampfen, Gieren) induziert werden.
- Elektrische Ströme, die in Geräten wie z.B. Elektromotoren, Pumpen oder in entsprechenden Zuleitungen fließen.
- Korrosionsbedingte elektrische Ströme in der Hülle, die als Rückströme in Zusammenhang mit der elektrischen Signatur auftreten. Der entsprechende Signatur-Anteil wird als *Corrosion Related Magnetic-Signatur* (CRM) bezeichnet.

Bei der Messung magnetischer Signaturen, auch als *Magnetic Anomaly Detection* (MAD) bezeichnet, kommen alle möglichen Magnetometer zum Einsatz, wie z.B. mechanische Sensoren (*Dip-Needle*), Hall-Sensoren, Induktionsspulen, Fluxgate-Magnetometer und mittlerweile auch mobile SQUIDS¹. Dabei ist nicht nur der Betrag des Feldes von Interesse, sondern auch die einzelnen Komponenten und der Gradient der Feldstärke.

Die magnetische Signatur kann nicht nur Unterwasser, sondern auch Überwasser ausgenutzt werden, z.B. von einem Helikopter aus. Sie ist als aktive Signatur anzusehen und ist neben der akustischen Signatur und der Drucksignatur die am häufigsten ausgenutzte, aber auch am besten erforschte und unterdrückte Teilsignatur.

Elektrische Signatur

Die elektrische Signatur, auch als *Underwater Electric Potential-Signatur* (UEP) bezeichnet, stammt von elektrischen Strömen die in der Umgebung von Wasserfahrzeugen durchs Wasser fließen. Ursache sind elektrochemische Reaktionen (Korrosion),

¹engl.: Superconducting Quantum Interference Device.

sowie Schutzströme die von aktiven, elektrischen Korrosionsschutz-Systemen (EKS-Systeme) aufgeprägt werden um der Korrosion des Wasserfahrzeugs entgegenzuwirken. Die UEP-Signatur ist abhängig von der Geometrie des Fahrzeugs, von dessen Materialkomposition und Beschichtungszustand, vom Betriebszustand des EKS-Systems, der Wasserleitfähigkeit und vielen weiteren Umgebungsbedingungen. Sie kann stationär oder zeitabhängig sein, wobei der niederfrequente Anteil von 3 – 30 Hz mit dem Begriff *Extra Low Frequency Electric field* (ELFE) bezeichnet wird. Mögliche Ursachen für das Auftreten niederfrequenter Wechselfelder sind:

- Rotation der Propellerflügel im Sinne eines bewegten Randwertproblems.
- Vibrationen in der Wellenleitung, wobei eine Modulation des Strompfades durch Rumpf, Wellenlager, Welle und Propeller stattfindet.
- Wechselanteil des EKS-Schutzstromes, bedingt durch die Gleichrichter-Elektronik des EKS-Netzteils (engl.: *Ripple signal*).

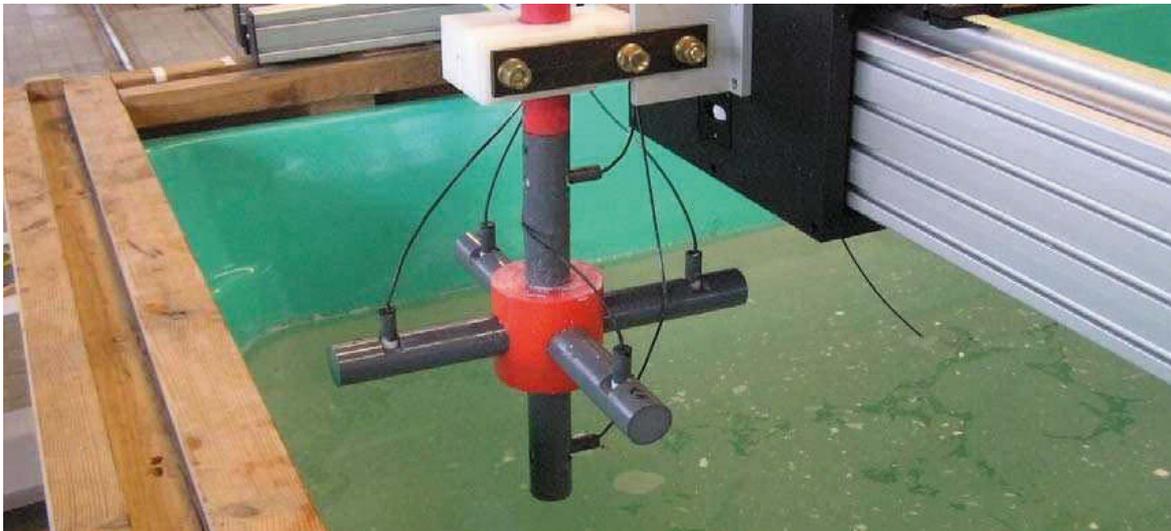


Abbildung 2.3.: UEP-Sensorkreuz mit sechs Ag-AgCl-Messelektroden. Es ist Bestandteil der in Bünsdorf aufgebauten Elektromagnetischen-Modell-Messanlage (EMMA) der WTD 71. *Quelle:* Von der WTD 71 zur Verfügung gestellt.

Sensoren zum Messen von elektrischen Feldern unter Wasser bestehen üblicherweise aus *Messelektroden* (cf. Kapitel 2.4.2), die entsprechend Abbildung 2.3 kreuzförmig an einem Träger angebracht sind. Mit den Messelektroden werden die Unterschiede des elektrischen Potentials im Wasser gemessen, aus denen mit Hilfe des Elektrodenabstandes die drei Komponenten des elektrischen Feldes berechnet werden können.

Die elektrische Signatur ist eine aktive Signatur und wird bislang ausschließlich Unterwasser ausgenutzt. In Kapitel 6 soll jedoch auch der Überwasser-Anteil, die *Above water Electric Potential*-Signatur (AEP), erstmals diskutiert werden.

Kielwasser

Der Begriff *Kielwasser* beschreibt den aufgewühlten und mit kleinsten Luftbläschen durchsetzten Bereich im Wasser, welcher sich hinter einem fahrenden Schiff² bildet. Dieses Phänomen wird von sog. *Kielwassertorpedos* (engl.: *Wake-homing torpedoes*) ausgenutzt, welche die geänderten akustischen Eigenschaften des aufgewühlten Wassers mittels Sonar erkennen können. Sie werden quer hinter dem Ziel ins Kielwasser geschossen und folgen diesem über viele Kilometer bis sie das anvisierte Wasserfahrzeug erreicht haben.

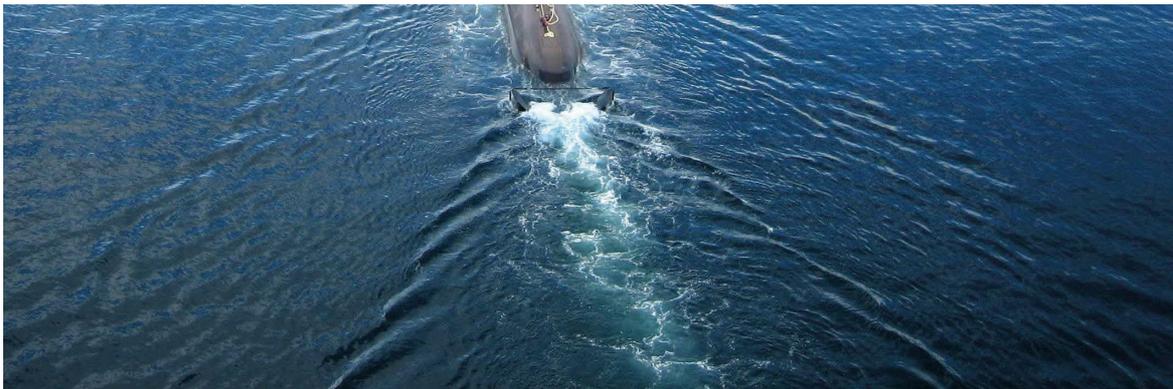


Abbildung 2.4.: Kielwasser und Kelvinwellen hinter einem aufgetauchten U-Boot.
Quelle: Von der WTD 71 zur Verfügung gestellt.

Weil das Kielwasser sowohl über Wasser sichtbar ist, als auch unter Wasser mittels Sonar detektierbar ist, kann es nicht ausschließlich als Überwasser- oder Unterwasser-Signatur angesehen werden. Außerdem kann es keiner der bisher besprochenen Signaturen eindeutig zugeordnet werden, obwohl es sich nicht um eine neue/andersartige beeinflusste Größe handelt. Des weiteren ist es schwierig eine Einteilung bezüglich „aktiv“ oder „passiv“ vorzunehmen, weil das Vorhandensein von Kielwasser einerseits eine aktive Fortbewegung voraussetzt, aber andererseits z.B. mit aktivem Sonar detektiert werden muss.

2.1.2. Maßnahmen gegen die Ausnutzung von Signaturen

Im Folgenden soll eine Auswahl der wichtigsten Gegenmaßnahmen bezüglich der Ausnutzung von UW-Signaturen vorgestellt werden, die sich direkt auf die bauliche Umsetzung der Wasserfahrzeuge auswirken. Um den Umfang in einem vertretbaren Rahmen zu halten, soll auf weiterführende Gegenmaßnahmen, wie Störsysteme, Störkörper und Täuschkörper nicht eingegangen werden.

²Ebenso hinter einem fahrenden und aufgetauchtem U-Boot.

Akustische Signatur bzw. akustisches Zielmaß

Zur Minimierung der aktiven akustischen Signatur werden jegliche Geräuschquellen an Bord so gut wie möglich gedämpft, wofür insbesondere bei U-Booten ein immenser Aufwand betrieben wird. Neben der Verwendung möglichst geräuscharmer Komponenten, werden z.B. bei den deutschen U-Booten der Klasse U 212A alle unvermeidbaren Lärmquellen, wie z.B. die Kraftstoff- oder Kühlkreislaufpumpen, in eine schallisolierte Kammer verlagert, die schwingungsentkoppelt im Inneren des Druckkörpers angebracht ist.

Zur Reduktion der Antriebsgeräusche werden speziell geformte, nicht-kavitierende Propellerflügel und Propellermuttern verwendet, deren Form in der Regel der Geheimhaltung³ unterliegt. Neben der besonderen Formgebung sind die Propeller außerdem aus einer speziellen schalldämpfenden Legierung gefertigt, z.B. aus dem sog. *Sonoston* das ein austenitisches Kristallgefüge mit martensitischen Einschlüssen besitzt. Ein anderer Ansatz ist der sog. *Integrated Motor Propulsor*, welcher z.B. bei den KSS-500A U-Booten der Südkoreanischen Marine verwendet wird, und bei dem es sich um einen im Rumpf integrierten Druckwasserantrieb (Water-jet, Pump-jet) handelt. Es wurde auch mit einem sog. *Magnetohydrodynamischen Antrieb* experimentiert, bei dem ein Stromfluss durchs Wasser zusammen mit einem starken Magnetfeld aufgrund der Lorentzkraft einen Vortrieb erzeugt. Dieser Ansatz wurde jedoch aus Energieeffizienz-Gründen, und der augenscheinlich katastrophalen Rückwirkungen auf die magnetische Signatur, niemals über die Prototypphase hinaus entwickelt.

Drucksignatur und Kielwasser

Es existieren bislang keine brauchbaren Maßnahmen zur Reduktion oder Vermeidung der Drucksignatur oder des Kielwassers, da es sich bei beiden Signaturen um unvermeidliche Phänomene im Rahmen des Betriebs von Wasserfahrzeugen handelt. Eine hydrodynamische Form des Wasserfahrzeugs und langsame Fahrtgeschwindigkeit verringern die beiden Signaturen zwar, jedoch nicht genug um eine Ausnutzung prinzipiell zu verhindern. Allein im ruhenden Zustand sind weder Drucksignatur noch Kielwasser vorhanden, wobei für Kielwasser sogar die Bedingung „seit langem⁴ ruhend“ ergänzt werden muss. Die derzeit einzig denkbare Maßnahme gegen Kielwassertorpedos sind daher Frühwarnsysteme, z.B. in Form von Schleppkörpern, welche ggf. auch entsprechende Abwehrvorrichtungen enthalten könnten.

³Trotz der Sicherheitseinstufung kursieren Fotos der Propeller im Internet, welche von Privatleuten, aber manchmal auch von den Herstellern, aufgenommen und eingestellt wurden.

⁴Bis sich das Wasser beruhigt hat und die Spur aus Luftbläschen nicht mehr zum Wasserfahrzeug zurückverfolgt werden kann.

Magnetische Signatur

Entsprechend der unterschiedlichen Ursachen der magnetischen Signatur, werden verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der unterschiedlichen Komponenten ergriffen. Zur Verringerung der remanenten Magnetisierung ferromagnetischer Bestandteile eines Wasserfahrzeugs wird eine *Entmagnetisierung* (engl.: *Deperming*) durchgeführt, bei der von Außen ein langsam abklingendes magnetisches Wechselfeld mit geringer Frequenz angelegt wird. Während einzelne Komponenten vor dem Einbau noch mit moderat großen Elektromagneten entmagnetisiert werden können, werden zur Entmagnetisierung ganzer Schiffe und U-Boote riesige Einrichtungen wie der Entmagnetisierungsstation in Friedrichsort (Kieler Förde) eingesetzt. Die remanente Magnetisierung kann sich während des Betriebs von Wasserfahrzeugen aufgrund mechanischer Belastung unter Einwirkung des Erdmagnetfelds neu aufbauen, weshalb ggf. eine erneute Entmagnetisierung erforderlich werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung des permanenten Anteils der magnetischen Signatur ist die Verwendung nicht-magnetisierbarer Baumaterialien wie z.B. Fiberglas, Kohlefaser-Verbundwerkstoffe, Kunststoffe, amagnetische Stähle oder auch Holz. Die bereits zuvor erwähnten U-Boote der Klasse U 212A besitzen z.B. einen Rumpf aus nicht-magnetisierbarem, hochlegierten Edelstahl mit der Bezeichnung „WL 1.3964“. Die alternativen Werkstoffe sind teilweise teuer, schwer zu verarbeiten und bringen mitunter Nachteile bezüglich der mechanischen Eigenschaften mit sich, so dass sie überwiegend nur für besonders gefährdete Wasserfahrzeuge wie U-Boote oder Minenkampfboote verwendet werden.

Da die magnetische Signatur mittels Entmagnetisierung und/oder der Verwendung nicht-magnetisierbarer Baumaterialien nur zu einem Teil eliminiert werden kann, werden zusätzlich Kompensationsanlagen eingesetzt, die als *Magnetischer Eigenschutz* (MES, engl.: *Degaussing*⁵) bezeichnet werden. Sie bestehen aus unterschiedlich ausgerichteten Helmholtz-Spulen-Anordnungen (cf. Abbildung 2.5) im Inneren des Wasserfahrzeugs, welche mit angepassten Strömen beschickt werden und das vorhandene Magnetfeld mittels destruktiver Überlagerung reduzieren. Neben dem gewöhnlichen MES (engl.: *Open Loop Degaussing*, OLDG), bei dem die Strom-Konfiguration der MES-Spulen aus im Vorfeld berechneten und fest eingestellten Werten besteht, wird aktuell intensiv am sog. *Störfeldgeregelten Magnetischen Eigenschutz* (S-MES, engl.: *Closed Loop Degaussing*, CLDG) geforscht. Grundidee des S-MES ist eine automatische adaptive MES-Konfiguration auf Basis von Daten innen-liegender Magnetfeld-Sensoren und eines geeigneten Berechnungs-Modells.

Die Maßnahmen zur Reduktion der CRM-Signatur überschneiden sich mit der Reduktion der elektrischen Signatur.

⁵Im Englischen wird der Begriff „Degaussing“ etwas unscharf z.T. auch für Entmagnetisierung verwendet, bzw. als Oberbegriff für Entmagnetisierung und MES.

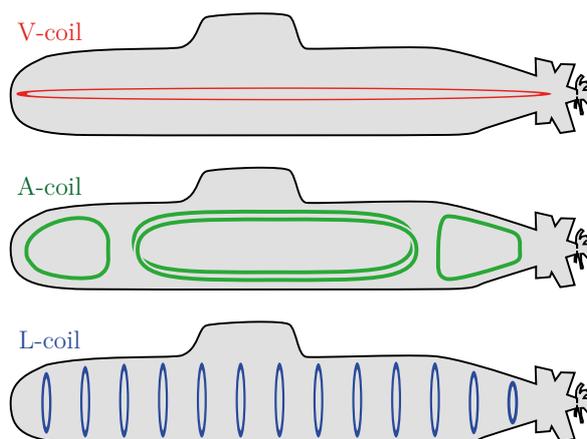


Abbildung 2.5.: Prinzipielle Spulenanordnung einer Kompensationsanlage für den Magnetischen Eigenschutz (MES) mit *Vertical/Main-coil*, *Athward-coil* und *Longitudinal-coil*. Quelle: Eigene Herstellung.

Elektrische Signatur

Zur Verhinderung von Korrosion, der grundlegenden Ursache der elektrischen Signatur, werden Schiffshüllen mit elektrisch isolierenden Anstrichen versehen. Diese und Ähnliche sog. *passive Korrosionsschutzmaßnahmen* dienen primär dem Schutz vor einer korrosionsbedingten Beschädigung, reduzieren jedoch auch prinzipiell den Stromfluss durchs Wasser, und können damit die elektrische Signatur verringern (cf. Kapitel 2.4.4). Im Forschungsbericht [21] konnte jedoch gezeigt werden, dass eine intakte Rumpfbeschichtung durch Begünstigung der Anoden-Propeller-Ströme auch den gegenteiligen Effekt haben kann.

Ein weiterer bekannter Ansatz zur Reduktion der elektrischen Signatur ist der Entwurf einer optimierten EKS-Anodenanordnung und die Ermittlung optimierter Betriebszustände des EKS-Systems. Die Funktionsweise der verschiedenen EKS-Systeme wird in Kapitel 2.4.5 genauer erklärt. Zudem gibt es Ansätze mit zusätzlichen Kompensationselektroden.

Um den niederfrequenten Wechselanteil der elektrischen Signatur zu reduzieren, wird ein Verfahren mit dem Namen (*Active*) *Shaft Grounding* (SG/ASG) eingesetzt. Dabei wird vereinfacht gesagt der zeitabhängige elektrische Widerstand, welcher aufgrund von Vibrationen der Wellenleitung zwischen der Welle und den Lagern entsteht, virtuell kurzgeschlossen. Das SG wurde im Forschungsbericht [22] ausführlich behandelt.

Ein weiterer Ansatz, welcher bisher eher sporadisch verfolgt wurde, ist die Auswahl optimierter Materialkompositionen bei Wasserfahrzeugen. Dies bezieht sich insbesondere auf elektrochemisch geeignete Kombinationen von Materialien für den Rumpf, den Propeller und die Opferanoden.

2.1.3. Interaktion von Seeminenabwehr und Minendesign

Die gängigen Methoden zur *Seeminenabwehr* (engl.: *Mine Countermeasure*, MCM) können in die Minenjagd und das Minenräumen unterteilt werden. Im Sinne der sich stets gegenseitig motivierenden Verbesserung von Maßnahmen und Gegenmaßnahmen (cf. Einleitung) haben sie eine Rückwirkung auf das Design von Seeminen. Die Thematik ist sehr umfangreich und kann an dieser Stelle daher nur kurz vorgestellt werden, wobei für weiterführende Informationen auf [1, S.29ff] verwiesen sei.

Während bei der Minenjagd einzelne Minen geortet und gezielt unschädlich gemacht werden, sollen beim Minenräumen gesamte Gebiete systematisch von Minen gesäubert werden. Die beim Minenräumen angewandten Methoden unterscheiden sich je nach Minentyp bzw. der Art der Verbringung. So können z.B. Ankertauminen mit einem Räumgeschirr von ihrer Vertauung gelöst werden, während höher entwickelte Seeminen durch gezielte Nachahmung einer Signatur aus sicherer Entfernung absichtlich zu einer Zündentscheidung gebracht werden können. Moderne Seeminen besitzen jedoch Algorithmen zur Erkennung von Räumungsversuchen, wodurch sie diese von wirklichen Zielen unterscheiden können und unter gewissen Umständen bewusst nicht auslösen, so z.B. wenn die verschiedenen Teilsignaturen nicht zueinander passen. Dies bietet jedoch wiederum die Möglichkeit Seeminen durch Vortäuschen eines Räumungsversuchs zu blockieren (engl.: *mine-jamming*), indem absichtlich unnatürliche bzw. unplausible Signaturen erzeugt werden. Diese Szenarien des Vortäuschens von Vortäuschungen können beliebig komplex werden.

Zusammenfassend kann über MCM-Maßnahmen gegen die verschiedenen Seeminentypen folgendes gesagt werden: Einfache Seeminen können leichter geräumt werden, während moderne, hoch entwickelte und räumungsresistente Seeminen einfacher blockiert werden können (cf. [1, S.37]).

2.1.4. Heutige und zukünftige Bedeutung der UEP-Signatur

Die möglichen Gegenmaßnahmen und Optimierungsansätze bezüglich der elektrischen Signatur, die in Kapitel 2.1.2 angesprochen wurden, werden in der Praxis bislang nicht überall konsequent umgesetzt. Teilweise wird die Thematik sogar vollständig ignoriert, obwohl bekanntermaßen seit einigen Jahren Seeminen mit entsprechenden Sensoren im Einsatz sind. Verglichen damit wird jedoch ein immenser Aufwand zur Reduktion der akustischen und magnetischen Signatur betrieben. Diese Haltung rechtfertigt sich teilweise dadurch, dass es in der Vergangenheit keine signifikanten Vorfälle unter Beteiligung von UEP-Seeminen gegeben hat, während die von akustischen und magnetischem Seeminen ausgehende Gefahr anhand vieler Ereignisse belegt werden kann. Ein weiterer Grund für die Vernachlässigung der UEP-Problematik ist das Budget, sowie die Tatsache, dass es dringlichere/praxisrelevantere Probleme gibt.

Bezüglich der Bedeutung der verschiedenen UW-Signaturen stellt sich die Frage, weshalb eine Ausnutzung der akustischen und magnetischen Signaturen bislang offenbar attraktiver war als eine Ausnutzung der elektrischen Signaturen, und ob bzw. warum in dieser Hinsicht in Zukunft ein Wandel geschehen könnte. Hierzu werden im Folgenden einige Überlegungen angestellt.

Zuverlässigkeit von UW-Signaturen

Die Zuverlässigkeit ist ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung von UW-Signaturen respektive der Attraktivität ihrer Ausnutzung im MIW und ASW. Aus Sicht eines Minenentwicklers oder eines Entwicklers von ASW-Überwachungstechnik ist es attraktiver eine möglichst beständige, und wahrscheinlich bei allen Zielobjekten vorhandene, (Teil-)Signatur zu überwachen, als eine Signatur die unbeständig ist oder eventuell gar nicht detektierbar ist. In einer unzuverlässigen Signatur können dennoch interessante Informationen enthalten sein, so dass eine Auswertung stattfindet, wobei die Seemine bzw. die Überwachungstechnik derart ausgelegt sein wird, dass ihre Funktionalität unabhängig davon gegeben ist. Eine analoge Aussage macht Holmes in [1] speziell über wirbelstrom-bedingte und korrosionsbedingte Anteile der magnetischen Signatur:

„So from a mine or surveillance system designer’s viewpoint, the generation of eddy currents by a target ship will aid in it’s detection, but are too unreliable to be deliberately exploited as a primary influence field.“ [1, S.14]

„[...] Therefore, exploitation of the alternating magnetic field signature falls into the same category as eddy currents; do not rely on them.“ [1, S.16]

Entsprechend dieser Vorüberlegungen ist eine mögliche Ursache für die bislang geringe Attraktivität der elektrischen Signatur in ihrer vergleichsweise schlechte Zuverlässigkeit zu suchen, denn sie hängt stark von dynamischen Einflussfaktoren wie Beschichtungszustand, Anströmung und Umgebungsbedingungen ab. Zudem sind auch die Sensoren für elektrische Signaturen vergleichsweise unzuverlässig, da sie in der Regel auf Messelektroden basieren und somit eine störungsempfindliche elektrochemische Schnittstelle zur Umgebung besitzen.

Möglichkeiten für einen Bedeutungswandel

Wenn die Bedeutung der elektrischen Signatur momentan auch noch relativ gering zu sein scheint, so liegen die Gründe für einen möglichen zukünftigen Bedeutungswandel bereits auf der Hand: Es könnte eine Art „Ausweichverhalten“ eintreten, sobald die akustische und magnetische Signatur weit genug reduziert wurden und in Folge dessen die Ausnutzung der akustischen und magnetischen Signatur schwerer bzw. unzuverlässiger als die Ausnutzung der elektrischen Signatur geworden ist. Mögliche

Ursache für diesen Wandel wäre die fortwährende Vernachlässigung der Reduktion elektrischer Signaturen bei gleichzeitiger Weiterentwicklung der akustischen und magnetischen Tarntechnik. Dieser Fall birgt die besondere Gefahr, dass bei fehlender magnetischer Signatur, aber vorhandener elektrischer Signatur, konkret auf die Anwesenheit eines U-Bootes oder Minenjagdbootes geschlossen werden kann.

Es gibt jedoch auch Gründe, die einem derartigen Bedeutungswandel entgegenwirken, vor Allem die Tatsache, dass im akustischen und magnetischen Signaturbereich einige Jahrzehnte mehr Erfahrung vorhanden sind. Nicht nur die Hersteller von Wasserfahrzeugen, sondern auch die Entwickler von Überwachungstechnik haben sich auf die Thematik „eingeschossen“, und verlassen sich vornehmlich auf bekannte und gut erprobte Technik.

2.1.5. Der Begriff der optimalen UW-Signatur

Aus Sicht eines Fahrzeugs oder Flugzeugs wird unter dem Begriff „optimale Signatur“ in der Regel eine Signatur verstanden werden, die von feindlicher Seite möglichst schlecht auszunutzen ist. Im Kontext von UW-Signaturen beinhaltet dies oft implizit, dass die Feldwerte der (Teil-)Signatur möglichst klein sein sollen, verglichen mit dem Umgebungsrauschen bzw. anderen zu erwartenden Störeinflüssen. Es wird also ein möglichst kleines Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: *Signal-to-Noise Ratio*, SNR) angestrebt.

Zusätzlich zur betragsmäßigen Reduktion kann auch eine qualitative „Unauffälligkeit“ der Signatur von Vorteil sein, in dem sie beispielsweise nicht unterscheidbar sind bzw. keine ausgeprägte Charakteristik haben. Es ist auch denkbar, dass zeitabhängige Signaturen spektral auf das zu erwartende Umgebungsrauschen angepasst würden, und sich somit beispielsweise in charakteristischen Frequenzbereichen von Energienetzen, Bahnnetzen, der Schumann-Resonanz oder des Wellengangs „verstecken“.

In Unterkapitel 2.1.3 wurde aufgezeigt, dass auch eine auffällige Signatur mit hohem SNR eine mögliche Strategie für eine optimale Signatur sein kann, indem durch das absichtliche Erzeugen einer Signatur räumungsresistente Seeminen blockiert werden (engl.: *mine-jamming*). Diese Taktik kann bei anderen Seeminen jedoch nutzlos sein, wenn diese z.B. mit einem *Schiffszähler* (engl.: *Ship-counter*) ausgestattet sind, und erst nach einer bestimmten Anzahl an Überfahrten auslösen. Eine möglichst große Signatur zu erzeugen ist daher in der Regel keine gute Lösung, insbesondere nicht bei U-Booten, welche unabhängig von der MIW-Problematik unentdeckt bleiben sollen.

Optimale Signaturen erfordern teilweise Kompromisse, so z.B. bezüglich der Geschwindigkeit bei möglichst kleiner akustischer Signatur oder bezüglich der Herstellungskosten bei möglichst optimaler magnetischer Signatur. Es ist daher immer nötig zwischen der optimalen Signatur und den übrigen Anforderungen abzuwägen, und (sofern möglich) je nach Gefahrenlage einen angepassten Betriebszustand zu wählen.

2.2. Repräsentationsformen von UEP-Signaturen

Es existieren verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung von UEP-Signaturen, die sich bezüglich Anschaulichkeit und Praxisbezug unterscheiden. Im Folgenden sollen die gängigsten Repräsentationsformen vorgestellt werden.

2.2.1. Signatur-Linie

Die am häufigsten verwendete Darstellungsform für UEP-Signaturen ist die *Signatur-Linie*, welche aus dem ortsabhängigen Vektor der elektrischen Feldstärke $\vec{E}(x) = (E_x, E_y, E_z)|_x$ besteht, und entsprechend Abbildung 2.6 komponentenweise dargestellt werden kann. Das Koordinatensystem wird üblicherweise derart gewählt, dass die Signatur-Linie parallel zur x -Achse liegt.

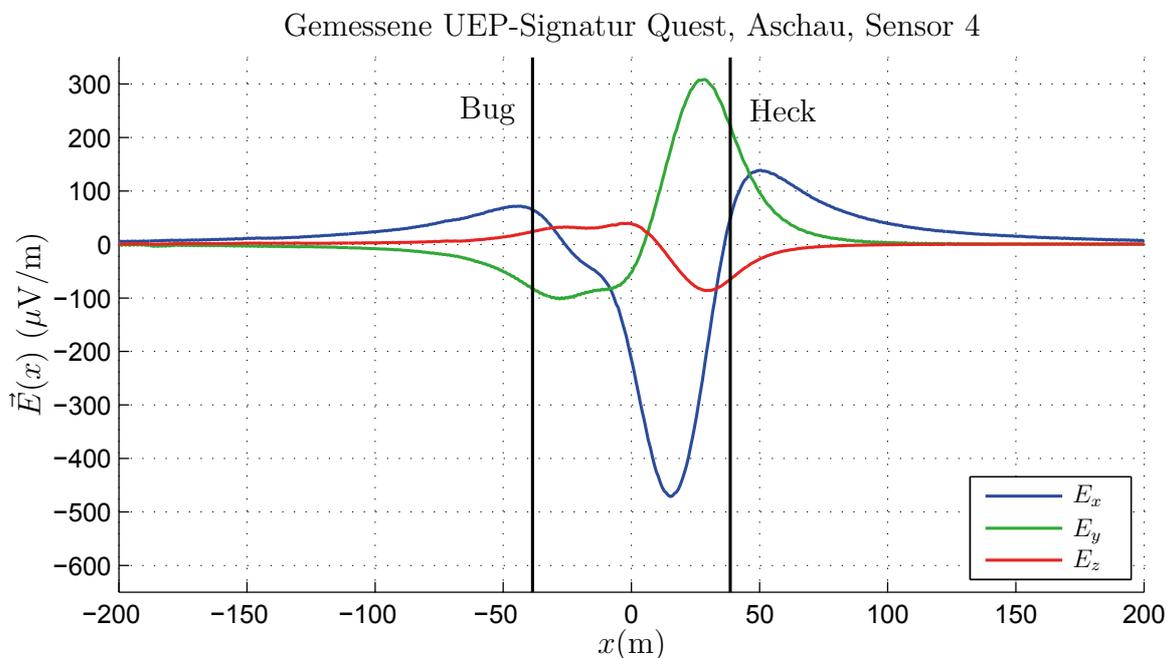


Abbildung 2.6.: Beispiel einer Signatur-Linie des kanadischen Forschungsschiffs CFAV Quest, gemessen während RIMPASSE (cf. Kapitel 3.3., [23]).

Die Signatur-Linie entspricht der Messung von Feldstärken während einer Vorbeifahrt bzw. Überfahrt des Messobjektes über ortsfeste Sensoren, und beinhaltet somit genau die Informationen, welche eine Seemine theoretisch zur Verfügung hätte. Eine identische Signatur ergibt sich in der Regel bei ortsfestem Messobjekt durch simultane Messung entlang einer Linie und anschließender Invertierung der x -Koordinaten (cf. Abbildung 2.7). Sollte die Geschwindigkeit bzw. die Relativposition während der Überfahrt unbekannt sein, so kann es sich anstelle des ortsabhängigen Feldvektors auch um einen zeitabhängigen Feldvektor $\vec{E}(t)$ handeln.

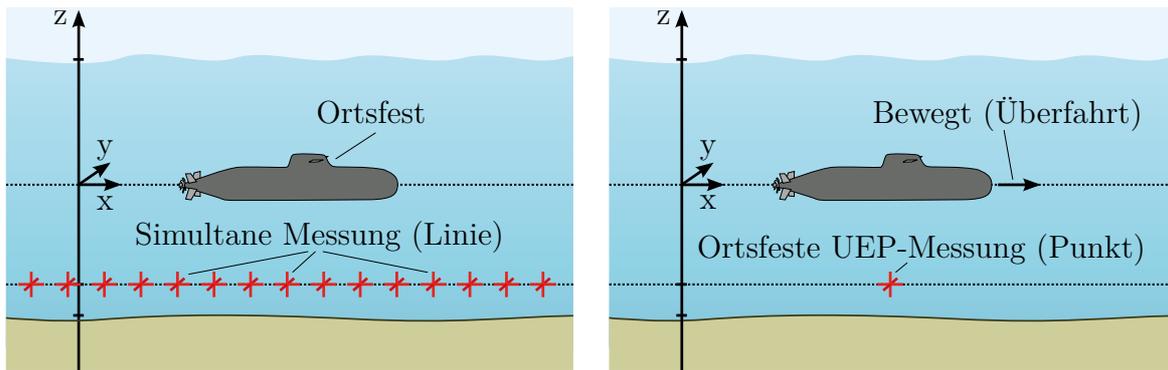


Abbildung 2.7.: Unterschied zwischen ortsfester UEP-Messung (links) und Messung entsprechend einem realen Überfahrtsszenario (rechts). Die gemessenen Signaturen sind bis auf eine Spiegelung an der yz -Ebene gleich, und können durch eine Invertierung der x -Koordinaten ineinander konvertiert werden. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [23].

Statt eines einzelnen Sensorkreuzes wird in der Praxis üblicherweise eine kettenförmige Anordnung von Sensoren verwendet, welche quer zur Überfahrtrichtung in der Nähe des Seebodens platziert wird (cf. Abbildung 2.8). Somit ist es nicht nötig, dass ein einzelner Sensor bei der Überfahrt „getroffen“ wird, sondern es kann nachträglich die Signatur-Linie des Sensors ausgewählt werden, an welchem der Kiel-Überlauf stattgefunden hat. Selbstverständlich können auch die Daten der seitlich versetzten Sensoren von Interesse sein.

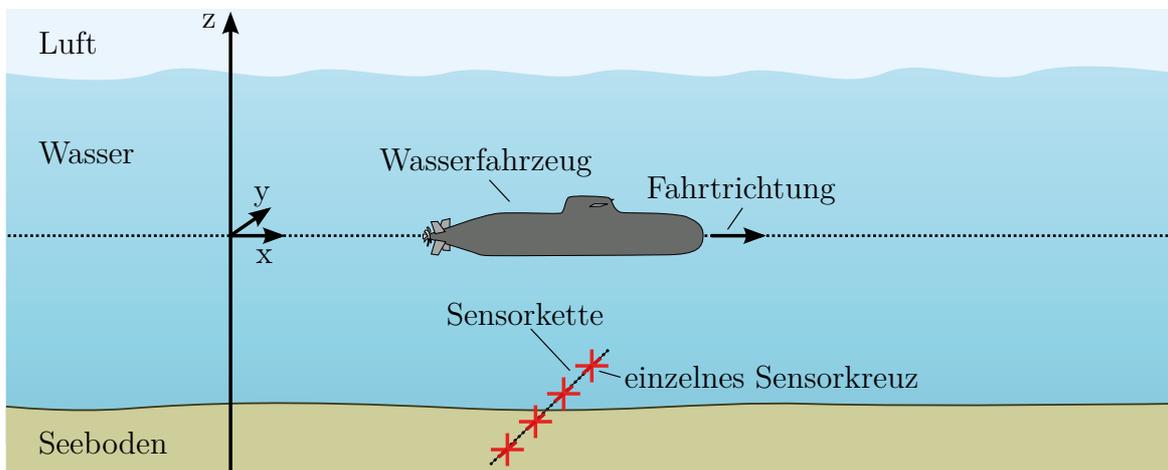


Abbildung 2.8.: Messung einer Signatur-Linie entsprechend einem Überfahrtsszenario. *Quelle:* Eigene Herstellung.

2.2.2. Signatur-Fläche

Eine weitere Darstellungsform für UEP-Signaturen ist die *Signatur-Fläche*, welche als Momentaufnahme der elektrischen Feldstärke $\vec{E}(x, y, z_0)$ entlang einer horizontalen Schnittfläche in einer bestimmten Tiefe z_0 unterhalb des Wasserfahrzeugs verstanden werden kann. Zur anschaulichen Darstellungen einer Signatur-Fläche kann der Betrag der elektrischen Feldstärke entsprechend Abbildung 2.9 farblich dargestellt werden, während die Richtung des Feldes durch ein darüber gelegtes Netz aus Pfeilen mit normalisierter Länge repräsentiert wird.

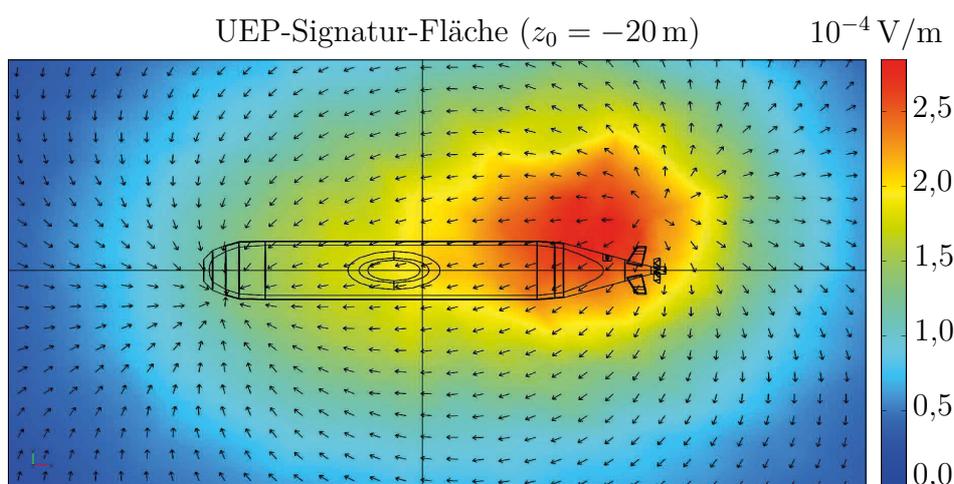


Abbildung 2.9.: Beispiel einer Signatur-Fläche, berechnet mittels Simulation eines U-Bootes. *Quelle:* Eigene Herstellung. Veröffentlicht in [24].

Signatur-Flächen ermöglichen im Vergleich zu Signatur-Linien eine einfachere räumliche Vorstellung der Feldverläufe bzw. Strompfade im Wasser, sind jedoch messtechnisch schwieriger zu ermitteln, und werden daher vornehmlich zur Repräsentation von Simulations-Daten verwendet. Es ist jedoch möglich Signatur-Flächen zu messen, indem z.B. bei der Überfahrt über eine Sensorkette die Signatur-Linien der verschiedenen Sensoren kombiniert werden. Je nach Abstand und Anzahl der einzelnen Sensoren in der Kette ist mit einer relativ groben Ortsauflösung zu rechnen.

2.2.3. Zeit- und Frequenzbereichs-Darstellungen

Die Komponenten und/oder der Betrag von Wechselfeldern können, genau wie zeitunabhängige UEP-Signaturen, mittels Überfahrt über einen Sensor bzw. eine Sensorkette gemessen und als Signatur-Linien dargestellt werden. Neben der Zeitbereichs-Darstellung kann bei Wechselfeldern vor allem eine in den Frequenzbereich transformierte Darstellung der Signaturdaten aufschlussreich sein. Dadurch wird es möglich bestimmte Signaturkomponenten aufzuschlüsseln und bekannte Störanteile, wie etwa Frequenzen des Energieversorgungs- oder Bahnnetzes, zu separieren.

2.2.4. Maximalwerte und Peak-To-Peak-Werte

Zu Vergleichszwecken oder zur Verbesserung der Übersichtlichkeit ist es manchmal sinnvoll UEP-Signaturen auf Zahlenwerte abzubilden, z.B. auf Maximalwerte oder *Peak-To-Peak-Werte* (P2P-Werte), die aus zuvor bestimmten Signatur-Linien oder Signatur-Flächen berechnet werden können. Diese Repräsentationsform ist insbesondere dann aussagekräftig genug, wenn sich die zu vergleichenden Signaturen vom qualitativen Verlauf her nicht maßgeblich unterscheiden, oder nur betragsmäßig von Interesse sind.

Zur Bestimmung der Maximalwerte können entweder die Gesamtfeldstärke \vec{E} oder die einzelnen Komponenten (z.B. E_x) verwendet werden, wobei jeweils die Beträge gebildet werden. Die Berechnung der Peak-To-Peak-Werte ist ausschließlich für die einzelnen Komponenten sinnvoll. Auf Basis einer Signatur-Linie können die Zahlenwerte wie folgt berechnet werden (Überfahrt in x -Richtung):

$$E_{\max} = \max(|\vec{E}(x)|) \quad (2.1)$$

$$E_{y,\max} = \max(|E_y(x)|) \quad (2.2)$$

$$E_{y,p2p} = \max(E_y(x)) - \min(E_y(x)) \quad (2.3)$$

2.3. Feldtheorie des stationären Strömungsfeldes

Die physikalischen Zusammenhänge in der Natur lassen sich anhand sog. *partieller Differentialgleichungen* (PDG) darstellen, durch die beschrieben wird wie bestimmte Größen von der örtlichen und/oder zeitlichen Änderung anderer Größen abhängen. Für elektrische und magnetische Felder sind dies die Maxwell'schen Gleichungen (cf. [10, S.262ff], [25, S.276ff]):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \quad (2.4)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (2.5)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.6)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (2.7)$$

Die einzelnen Gleichungen werden als *Durchflutungsgesetz* (2.12), *Induktionsgesetz* (2.5), *Gauß'sches Gesetz für Magnetfelder* (2.6) und *Gauß'sches Gesetz* (2.7) bezeichnet, und sind in Differentialform nur durch zusätzliche Angabe des Grenzflächen-Verhaltens vollständig [11, S.63]:

$$\vec{n}_{12} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = \vec{0} \quad (2.8)$$

$$\vec{n}_{12} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \sigma \quad (2.9)$$

$$\vec{n}_{12} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_F \quad (2.10)$$

$$\vec{n}_{12} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (2.11)$$

Mit den Sätzen von Stokes und Gauß können die Maxwell'schen Gleichungen von der Differentialform in ihre Integralform umgeformt werden:

$$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A \vec{J} \cdot \vec{n} dA + \frac{d}{dt} \iint_A \vec{D} \cdot \vec{n} dA \quad (2.12)$$

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \cdot \vec{n} dA \quad (2.13)$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (2.14)$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{D} \cdot \vec{n} dA = \iiint_V \varrho dV \quad (2.15)$$

Zur Beschreibung des stationären elektrischen Strömungsfeldes werden das Gauß'sche Gesetz (Gleichung (2.7) bzw. (2.15)) und die folgende Materialbeziehung benötigt:

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \quad (2.16)$$

Im Induktionsgesetz (Gleichung (2.5) bzw. (2.13)) verschwindet bei stationären Problemen die partielle Ableitung nach der Zeit ($\Rightarrow \text{rot } \vec{E} = \vec{0}$), weshalb dem elektrischen Feld ein skalares Potential φ zugeordnet werden kann:

$$\vec{E} = -\text{grad}(\varphi) \quad (2.17)$$

2.3.1. Die Green'sche Funktion

Die homogene Lösung einer Differentialgleichung (DG) bei punktförmiger Anregung und vorgegebenen Randbedingungen wird als *Green'sche Funktion* oder auch als *Fundamentallösung* der DG bezeichnet [26, S.33ff]. Ihr kommt eine spezielle Bedeutung bei der Lösung von Problemen mit räumlich verteilten Anregungen zu, weshalb sie in diesem Kapitel für das stationäre elektrische Strömungsfeld hergeleitet und diskutiert werden soll. Hierfür müssen zunächst die Beziehungen zwischen elektrischen Ladungen, elektrischen Strömen und dem stationären Strömungsfeld rekapituliert werden.

Die elektrische Stromstärke I beschreibt die Änderung von elektrischer Ladung pro Zeiteinheit, also den Durchfluss oder den Zu-/Abfluss von Ladungen:

$$I = -\frac{dQ}{dt} \quad (2.18)$$

Um das Strömungsfeld in einem leitfähigen Medium zu beschreiben, wird die Stromstärke auf eine Querschnittsfläche senkrecht zum Ladungstransport bezogen, wodurch sich die elektrische Stromdichte \vec{J} ergibt. Durch Integration der Stromdichte \vec{J} über eine beliebige Fläche A erhält man entsprechend die gesamte elektrische Stromstärke I , welche durch diese Fläche fließt:

$$I = \iint_A \vec{J} \cdot \vec{n} \, dA \quad (2.19)$$

Das Gesetz der Ladungserhaltung besagt, dass elektrische Ladungen weder erzeugt noch vernichtet werden können, so dass die Integration einer stationären Stromdichteverteilung über einer geschlossenen Fläche immer Null ergibt:

$$\oiint_{\partial V} \vec{J} \cdot \vec{n} \, dA = 0 \quad (2.20)$$

Dabei kennzeichnet ∂V die Berandung eines beliebigen Volumens V . In einem Gedankenexperiment kann bei der geschlossenen Fläche ∂V jedoch ein Flächenelement ausgespart werden (cf. Gleichung (2.21)), durch welches eine Zuleitung ins Innere des Volumens gelegt wird. Auf diese Weise ist es möglich konzentrierte Stromquellen bzw. Stromsenken zu beschreiben, ohne das Gesetz der Ladungserhaltung zu verletzen:

$$\oiint_{\partial V} \vec{J} \cdot \vec{n} \, dA = I \quad (2.21)$$

Die Näherung ist dabei beliebig genau, weil das ausgesparte Flächenelement beliebig klein sein kann. Wird der eingepreßte Strom I zu einer Stromquellen-Dichte ρ verallgemeinert (nicht zu verwechseln mit der Raumladungsdichte ϱ), so ergibt sich das „Gauß'sches Gesetz für das stationäre Strömungsfeld“, welches analog zu Gleichung (2.15) ist:

$$\oiint_{\partial V} \vec{J} \cdot \vec{n} \, dA = \iiint_V \rho \, dV \quad (2.22)$$

Die Differentialform von Gleichung (2.22) inklusive der Beschreibung des Grenzflächen-Verhaltens lautet (Umformung mittels Satz von Gauß):

$$\operatorname{div} \vec{J} = \rho \quad (2.23)$$

$$\vec{n}_{12} \cdot (\vec{J}_2 - \vec{J}_1) = \varsigma \quad (2.24)$$

Dabei steht ς für eine Flächen-Stromquellen-Dichte, die im Folgenden jedoch keine Bedeutung hat ($\varsigma = 0$). Gleichung (2.23) kann durch Einsetzen von (2.16) und (2.17) in die gesuchte PDG für das elektrische Potential überführt werden:

$$\operatorname{div}(\kappa \cdot (-\operatorname{grad}(\varphi))) = \rho \quad (2.25)$$

Für ein unendlich ausgedehntes, leitfähiges, homogenes und isotropes Medium kann die Leitfähigkeit κ vor die Divergenz gezogen werden. Es folgt die Poisson-Gleichung für das stationäre Strömungsfeld:

$$-\kappa \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad}(\varphi)) = \rho \quad (2.26)$$

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\kappa} \quad (2.27)$$

An dieser Stelle fällt bereits deutlich die Analogie zwischen Elektrostatik und stationärem Strömungsfeld auf, die in Tabelle 2.2 durch Gegenüberstellung der entsprechenden Größen nochmals verdeutlicht werden soll. Die für die Green'sche Funktion benö-

Elektrostatik	\Leftrightarrow	Stationäres Strömungsfeld
Elektrisches Feld (\vec{E})	\Leftrightarrow	Elektrisches Feld (\vec{E})
Elektrische Flussdichte (\vec{D})	\Leftrightarrow	Stromdichte (\vec{J})
Permittivität (ϵ)	\Leftrightarrow	Leitfähigkeit (κ)
Punktladung (Q)	\Leftrightarrow	Punkt-Stromquelle (I)
Raumladungsdichte (ρ)	\Leftrightarrow	Stromquellen-Dichte (ρ)
Flächenladungsdichte (σ)	\Leftrightarrow	Flächen-Stromquellen-Dichte (ς)

Tabelle 2.2.: Analogie zwischen Elektrostatik und dem stationären Strömungsfeld.

tigte punktförmige Anregung entspricht beim stationären Strömungsfeld einer Punkt-Stromquelle mit dem aufgeprägten Strom I_Q . Für den homogenen und isotropen Fall kann die Stromdichteverteilung einer Punkt-Stromquelle aus Symmetriegründen nur eine radiale Abhängigkeit besitzen. Durch Division des aufgeprägten Stromes durch die Oberfläche einer Kugel mit dem Radius r folgt:

$$J(r) = \frac{I_Q}{4\pi r^2} \quad (2.28)$$

Mit dem Ohm'schen Gesetz aus Gleichung (2.16) ergibt sich daraus der Betrag des elektrischen Feldes:

$$E(r) = \frac{I_Q}{4\pi\kappa r^2} \quad (2.29)$$

Entsprechend der Beziehung in Gleichung (2.17) folgt für das elektrische Potential:

$$\varphi(r) = - \int E(r') \, dr' + C \quad (2.30)$$

$$= \frac{I_Q}{4\pi\kappa r} + C \quad (2.31)$$

Durch das zu Null Setzen der Integrationskonstante C wird die Randbedingung für $r \rightarrow \infty$ festgelegt:

$$\varphi(\infty) = 0 \quad (2.32)$$

Mit dem Ortsvektor bzw. Aufpunkt \vec{r} und dem Quellpunkt $\vec{\xi}$ (Position der Punktstromquelle) kann eine allgemeinere Formulierung hergeleitet werden:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{I_Q}{4\pi\kappa} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{\xi}|} \quad (2.33)$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich die Green'sche Funktion:

$$G(\vec{r}, \vec{\xi}) = \frac{\kappa}{I_Q} \varphi(\vec{r}) \quad (2.34)$$

$$= \frac{1}{4\pi |\vec{r} - \vec{\xi}|} \quad (2.35)$$

Unter Voraussetzung der gleichen Randbedingungen für $r \rightarrow \infty$, ist sie identisch mit der zur Elektrostatik gehörenden Green'schen Funktion.

2.3.2. Randwertprobleme

Konkrete Probleme zur Berechnung des stationären Strömungsfeldes gehören zur Klasse der *Randwertprobleme* und beinhalten neben der PDG (cf. Gleichung (2.22)) bestimmte Randbedingungen an den Grenzen $\partial\Omega$ des Definitionsbereichs Ω . Als wichtigste Randbedingung sind die *Dirichlet-Randbedingung*⁶ und die *Von-Neumann-Randbedingung*⁷ zu nennen, die ein bestimmtes Potential φ_{rb} bzw. eine bestimmte Normal-Stromdichte ς_{rb} auf dem Rand vorgeben:

$$\text{Dirichlet:} \quad \varphi(\vec{r}) \stackrel{!}{=} \varphi_{rb}(\vec{r}) \quad \forall \vec{r} \in \partial\Omega \quad (2.36)$$

$$\text{Von-Neumann:} \quad \vec{n} \cdot \vec{J}(\vec{r}) \stackrel{!}{=} \varsigma_{rb}(\vec{r}) \quad \forall \vec{r} \in \partial\Omega \quad (2.37)$$

2.3.3. Superpositionsprinzip

Die Poisson-Gleichung für das stationäre Strömungsfeld (cf. Gleichung (2.27)) ist eine lineare PDG, weshalb das Potential mehrerer Anregungen durch Überlagerung der einzelnen *Elementarpotentiale* berechnet werden kann. Für eine beliebige ortsabhängige Stromquellen-Dichte $\rho(\vec{\xi})$ folgt mit Hilfe der Green'schen Funktion:

$$\varphi(\vec{r}) = \iiint_V \frac{\rho(\vec{\xi})}{\kappa} \cdot G(\vec{r}, \vec{\xi}) \, dV_{\vec{\xi}} \quad (2.38)$$

$$= \iiint_V d\varphi(\vec{r}, \vec{\xi}) \quad (2.39)$$

⁶Auch *essentielle Randbedingung* genannt.

⁷Auch *Neumann'sche-Randbedingung* oder *natürliche Randbedingung* genannt.

Handelt es sich bei der Stromquellen-Dichte um eine Verteilung aus diskreten Punkt-Stromquellen, kann das Integral in eine Summe überführt werden:

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{\kappa} \cdot G(\vec{r}, \vec{\xi}_i) \quad (2.40)$$

$$= \sum_{i=1}^N \varphi_i(\vec{r}, \vec{\xi}_i) \quad (2.41)$$

$$= \frac{1}{4\pi\kappa} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{|\vec{r} - \vec{\xi}_i|} \quad (2.42)$$

2.3.4. Monopol, Dipol und Multipol

Unter dem Begriff *Monopol* ist im Allgemeinen ein alleinstehender Pol zu verstehen, also z.B. eine punktförmige Anregung. Im Kontext des stationären Strömungsfeldes entspricht der Monopol einer Punkt-Stromquelle, wie sie in den vorhergehenden Kapiteln bereits angesprochen wurde. Abbildung 2.10 zeigt die Äquipotential- und Feldlinien eines solchen Monopols, der sich in einem leitfähigen, homogenen und isotropen Medium befindet.

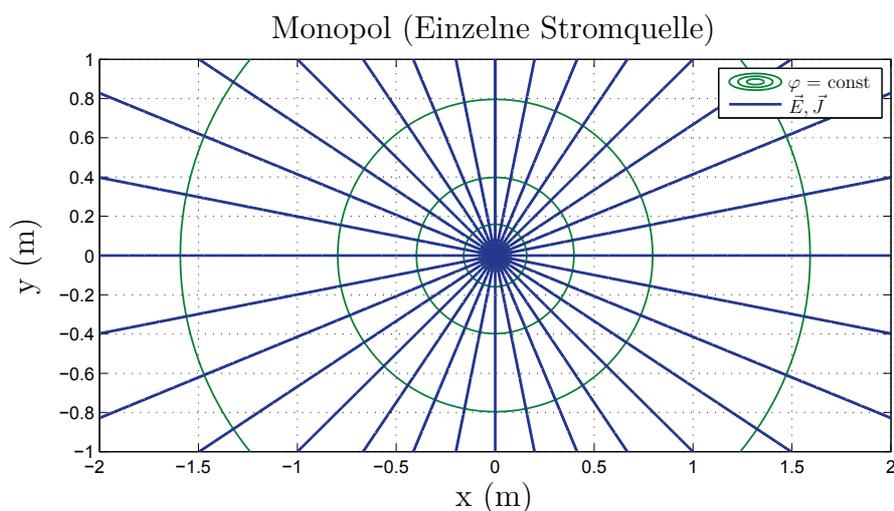


Abbildung 2.10.: Feldverteilung eines Monopols (einzelle Stromquelle). *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [7, S.4].

Bei zwei nebeneinander liegenden Monopolen, die betragsmäßig gleich groß sind jedoch unterschiedliche Vorzeichen haben, spricht man von einem *Dipol*. Eine charakteristische Größe von Dipolen ist ihr *physikalisches Dipolmoment*, wobei $|I_Q|$ der Betrag der Quellenströme und \vec{l} der Verbindungsvektor zwischen den Quellen ist (Richtungssinn von Senke zu Quelle):

$$\vec{p} = |I_Q| \cdot \vec{l} \quad (2.43)$$

In Abbildung 2.11 ist die Feldverteilung eines Dipols, welche nach dem Superpositionsprinzip aus Gleichung (2.42) berechnet wurde, anhand von Äquipotential- und Feldlinien dargestellt.

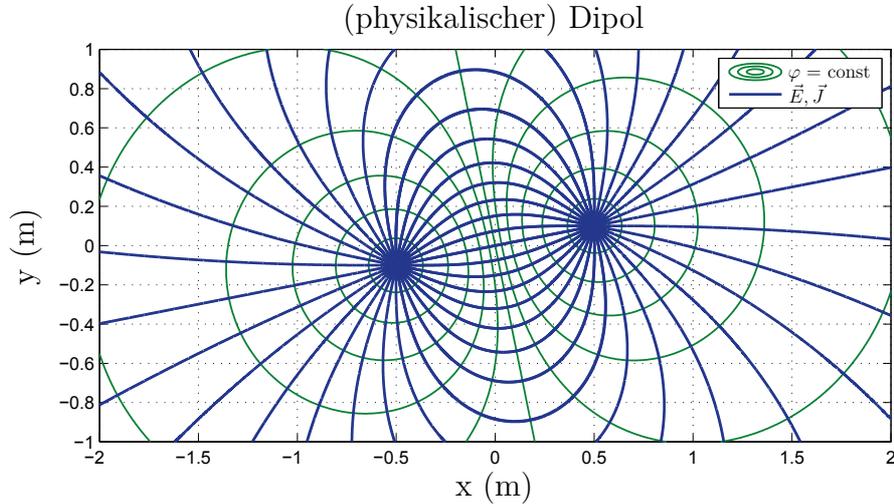


Abbildung 2.11.: Feldverteilung eines physikalischen Dipols (zwei Stromquellen). *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [7, S.4].

Schiebt man die beiden Quellen eines physikalischen Dipols sukzessive immer näher zusammen, und stellt durch Anpassung der Quellenströme ein Gleichbleiben des Dipolmoments sicher, so erhält man einen sog. *mathematischen Dipol*:

$$\vec{p} = \lim_{\substack{I_Q \rightarrow \infty \\ l \rightarrow 0}} |I_Q| \cdot \vec{l} \quad (2.44)$$

Anders als zuvor beim physikalischen Dipol sind nun alle Anregungen auf einen einzigen Punkt konzentriert. Durch Grenzwertbildung kann die in Abbildung 2.12 dargestellte Feldverteilung als geschlossener Ausdruck hergeleitet werden (detailliertere Erklärung siehe: [10, S.57ff]):

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\kappa r^3} \cdot (\vec{p} \cdot \vec{r}) \quad (2.45)$$

$$= \frac{1}{4\pi\kappa r^2} \cdot (\vec{p} \cdot \vec{e}_r) \quad (2.46)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\kappa r^3} \cdot \left(3(\vec{p} \cdot \vec{r}) \frac{\vec{r}}{r^2} - \vec{p} \right) \quad (2.47)$$

Befindet sich der Aufpunkt/Beobachtungspunkt weit genug von den Quellen entfernt, so weisen ein physikalischer Dipol und sein entsprechender mathematischer Dipol die gleiche Feldverteilung auf (cf. Abbildung 2.11 und 2.12).

Unter einem *Multipol* ist eine beliebige Anordnung von Monopolen zu verstehen, deren Feldverteilung wie beim Dipol mittels Superpositionsprinzip berechnet werden kann.

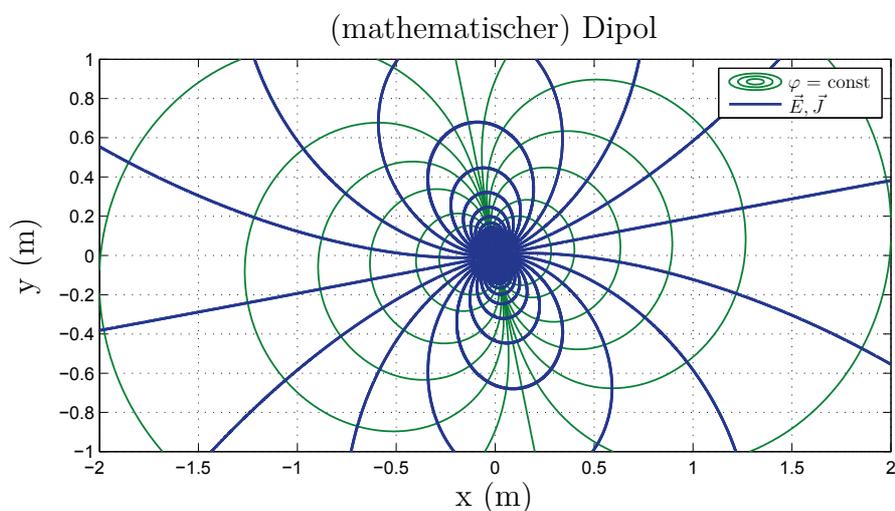


Abbildung 2.12.: Feldverteilung eines mathematischen Dipols mit demselben Dipolmoment wie der physikalische Dipol in Abbildung 2.11. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [7, S.5].

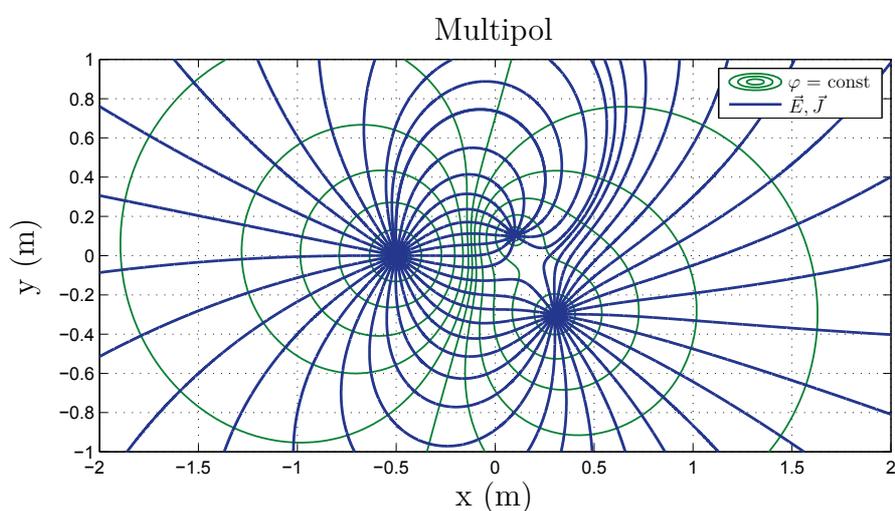


Abbildung 2.13.: Feldverteilung eines Multipols mit drei Stromquellen. Zwecks Anschaulichkeit wurden alle Stromquellen in der xy -Ebene platziert. Es wurden die Quellenströme $+1\text{ A}$, $-0,3\text{ A}$ und $-0,7\text{ A}$ aufgeprägt (Von links nach rechts). *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [7, S.6].

Entsprechend dieser weit gefassten Definition stellen Monopole und Dipole ebenfalls Spezialfälle eines Multipols dar. In Abbildung 2.13 wurde die Feldverteilung für einen Multipol mit drei Stromquellen dargestellt, wobei sich alle Quellen zwecks Anschaulichkeit in der xy -Ebene befinden.

2.3.5. Spiegelungsmethode für leitfähige Halbräume

Die *Spiegelungsmethode* ist ein Verfahren, mit dem eine bestimmte Kategorie von Randwertproblemen analytisch gelöst werden kann. Sie eignet sich vorwiegend zur Berechnung von Anordnungen mit geometrisch einfachen Materialgrenzen, wie z.B. bei Halbräumen, Kugeln oder Zylindern, und kann bei komplexeren Anordnungen oft nicht angewandt werden. Aufgrund der bereits aufgezeigten Analogie (cf. Tabelle 2.2) können die aus der Elektrostatik bekannten Ansätze (cf. [11, S.110ff], [27]) auf das stationäre Strömungsfeld übertragen werden, was im Folgenden für eine einzelne Punkt-Stromquelle vor einem unendlich ausgedehnten leitfähigen Halbraum geschehen soll. Dank des Superpositionsprinzips (cf. Unterkapitel 2.3.3) ist der Ansatz auf beliebig komplizierte Quellenverteilungen übertragbar, und kann somit für realistische UEP-Signaturen angewandt werden. Die Berechnung der Feldverteilung für die beiden Halbräume erfolgt separat im Sinne einer Fallunterscheidung. Abbildung 2.14 zeigt den Aufbau zur Feldberechnung im ersten Halbraum, bestehend aus der vor der Grenzfläche der Halbräume positionierten Stromquelle I (Halbraum 1) und ihrer mit gleichem Abstand zur Grenzfläche gegenüberstehenden Spiegel-Quelle I' (Halbraum 2).

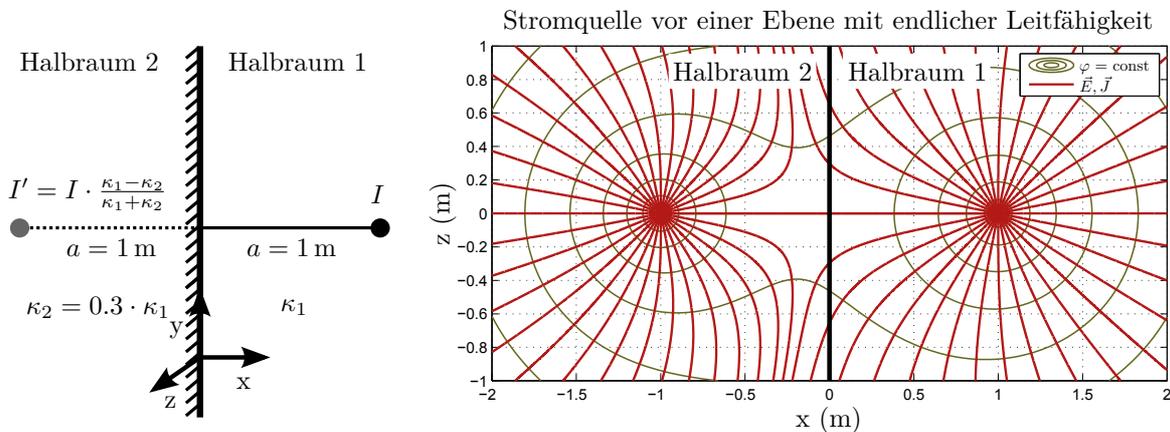


Abbildung 2.14.: Feldverteilung einer Stromquelle vor einem unendlich ausgedehnten leitfähigen Halbraum ($\kappa_2 = 0.3 \cdot \kappa_1$). Die gefundene Lösung gilt nur für Halbraum 1. *Quelle*: Eigene Herstellung. Verwendet in ähnlicher Form in [28, S.6].

Die Stromstärke der Spiegel-Quelle berechnet sich zu (Herleitung siehe [11, S.117ff]):

$$I' = I \cdot \frac{\kappa_1 - \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2} \quad (2.48)$$

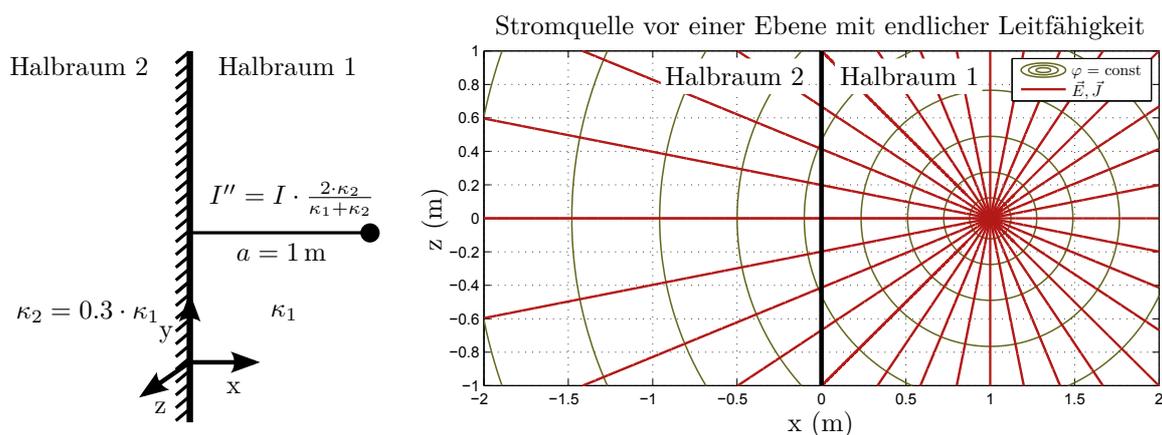


Abbildung 2.15.: Feldverteilung einer Stromquelle vor einem unendlich ausgedehnten leitfähigen Halbraum ($\kappa_2 = 0.3 \cdot \kappa_1$). Die gefundene Lösung gilt nur für Halbraum 2. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Zur Berechnung der Feldverteilung in Halbraum 2 muss die Quellenkonfiguration gemäß Abbildung 2.15, bestehend aus einer einzelnen Stromquelle I'' an der Position der Original-Stromquelle, verwendet werden:

$$I'' = I \cdot \frac{2 \cdot \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2} \quad (2.49)$$

Setzt man die Teil-Lösungen für die beiden Halbräume zusammen, so erhält man die in Abbildung 2.16 dargestellte Feldverteilung für den gesamten Raum.

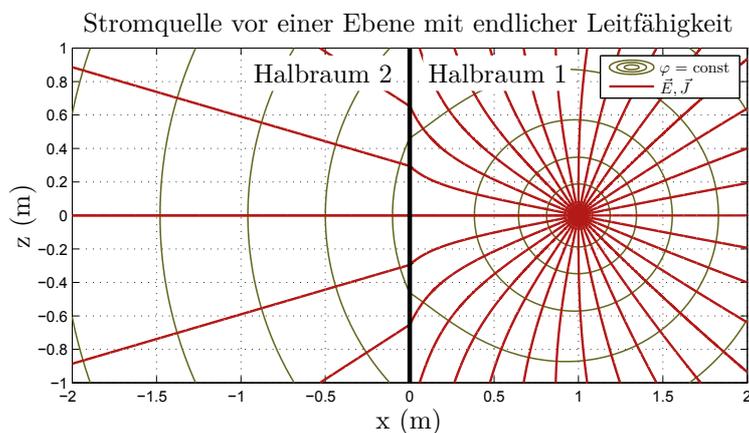


Abbildung 2.16.: Feldverteilung einer Stromquelle vor einem unendlich ausgedehnten leitfähigen Halbraum ($\kappa_2 = 0.3 \cdot \kappa_1$). Die dargestellte Lösung gilt für beide Halbräume. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Durch Substitution mit einem Faktor a kann gezeigt werden, dass die qualitative

Feldverteilung ausschließlich vom Verhältnis der beiden Leitfähigkeiten abhängt:

$$a = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \quad (2.50)$$

$$I' = I \cdot \frac{1-a}{1+a} \quad (2.51)$$

$$I'' = I \cdot \frac{2a}{1+a} \quad (2.52)$$

2.3.6. Multipolentwicklung

Für den allgemeinen Ausdruck des elektrischen Potentials eines Multipols aus Gleichung (2.42) kann mit Hilfe einer Reihenentwicklung eine sog. *Multipolentwicklung* durchgeführt werden. Dies soll im Folgenden für Stromquellen-Multipole hergeleitet werden, wobei analog zur Herleitung für elektrostatische Multipole aus [29, S.63ff] vorgegangen wird. Zunächst wird der Ausdruck $|\vec{r} - \vec{r}_i|$, also der Abstand zwischen Aufpunkt und i-ter Quelle, mit dem Kosinussatz berechnet:

$$|\vec{r} - \vec{r}_i|^2 = r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos \gamma \quad (2.53)$$

$$= r^2(1 + \epsilon) \quad (2.54)$$

$$\gamma = \angle(\vec{r}, \vec{r}_i) \quad (2.55)$$

$$\epsilon = \frac{r_i}{r} \left(\frac{r_i}{r} - 2 \cos \gamma \right) \quad (2.56)$$

Im Fall $\epsilon < 1$ bzw. $r > r_i$ kann eine Reihenentwicklung durchgeführt werden:

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} = \frac{1}{r} \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon}} \quad (2.57)$$

$$= \frac{1}{r} \left(1 - \frac{1}{2}\epsilon + \frac{3}{8}\epsilon^2 - \frac{5}{16}\epsilon^3 \pm \dots \right) \quad (2.58)$$

$$= \frac{1}{r} \left(1 + \frac{r_i}{r} \cos \gamma + \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 \frac{1}{2} (3 \cos^2 \gamma - 1) + \dots \right) \quad (2.59)$$

$$= \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_i}{r} \right)^n P_n(\cos \gamma) \quad (2.60)$$

Die Terme P_n sind *Legendre'sche Polynome* n'ter Ordnung. Es folgt:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\kappa} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} \quad (2.61)$$

$$= \frac{1}{4\pi\kappa} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} r^{-(n+1)} \sum_{i=1}^N I_i r_i^n P_n(\cos \gamma) \quad (2.62)$$

Der Summand für $n = 0$ repräsentiert den *Monopolanteil* des Multipols:

$$\varphi_{n=0}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\kappa r} \cdot \sum_{i=1}^N I_i \quad (2.63)$$

$$= \frac{I_G}{4\pi\kappa r} \quad (2.64)$$

mit dem vom Multipol gelieferten Gesamt- bzw. Netto-Strom I_G . Der Summand für $n = 1$ in Gleichung (2.62) steht für den *Dipolanteil*, welcher später bezüglich des UEP-Fernfeldes von Interesse sein wird (cf. Kapitel 4.4 und 5.3):

$$\varphi_{n=1}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\kappa r} \cdot \sum_{i=1}^N I_i \frac{r_i}{r} P_1(\cos\gamma) \quad (2.65)$$

$$= \frac{1}{4\pi\kappa r^2} \cdot \sum_{i=1}^N I_i \vec{r}_i \cdot \vec{e}_r \quad (2.66)$$

$$= \frac{\vec{p} \cdot \vec{e}_r}{4\pi\kappa r^2} \quad (2.67)$$

Dabei stellt \vec{p} das Gesamt-Dipolmoment (cf. Gleichung (2.46)) des Multipols dar.

2.4. Elektrochemie

Die Ursache von UEP-Signaturen liegt in Korrosionsvorgängen, umgangssprachlich als „Rosten“ bezeichnet, und geht somit auf elektrochemische Reaktionen zurück. Dabei spielen auch Maßnahmen zum aktiven Korrosionsschutz eine Rolle, bei denen die elektrochemischen Vorgänge gezielt beeinflusst werden wobei auch eine Rückwirkung auf die Signatur stattfindet. Die Elektrochemie und die in Kapitel 2.3 behandelte Feldtheorie des stationären Strömungsfeldes bilden zusammen die wichtigsten Mechanismen, welche für die numerische Berechnung von UEP-Signaturen berücksichtigt werden müssen. Die folgenden Unterkapitel stellen im Wesentlichen eine komprimierte Form der im Forschungsbericht [4] erarbeiteten Grundlagen zur Elektrochemie dar, und sollen eine kurze Vorstellung aller wichtigen Begrifflichkeiten leisten.

2.4.1. Ladungstransport in Elektrolytlösungen

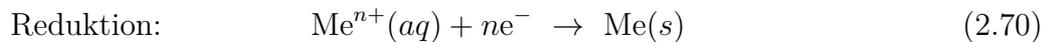
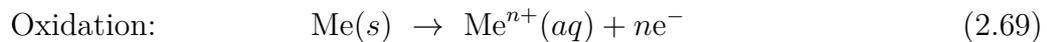
Elektrolyte, wie z.B. Natriumchlorid (Kochsalz), dissoziieren in Wasser in positiv geladene *Kationen* und negativ geladene *Anionen*, und erzeugen dadurch eine sog. *Elektrolytlösung*. Der Ladungstransport in solchen Elektrolytlösungen basiert auf einer gerichteten Bewegung der Ionen, wodurch er entsprechend dem ersten Faraday'schen Gesetz zwangsweise mit einem Massetransport gekoppelt ist [12, S.7]:

$$m = m_{\ddot{a}} \cdot Q = m_{\ddot{a}} \cdot I \cdot t \quad (2.68)$$

m = Masse, $m_{\text{ä}}$ = elektrochemisches Äquivalent, Q = elektrische Ladung, I = elektrische Stromstärke, t = Zeit. Da in Elektronenleitern (auch *Leiter erster Art* genannt) diese Kopplung zwischen Ladungs- und Massentransport vernachlässigt werden kann, muss beim Übergang zwischen Elektronen- und Ionen-Leitern (auch *Leiter zweiter Art* genannt) ein Umsatz von Masse erfolgen.

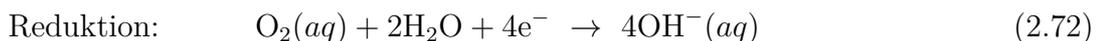
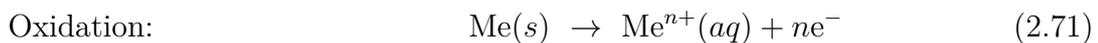
2.4.2. Redoxreaktionen im Gleichgewichtsfall

An der Phasengrenze zwischen einem Metall und einer Elektrolytlösung können folgende Teilreaktionen ablaufen:



Voraussetzung ist, dass Me^{n+} Kationen in der Lösung enthalten sind. Bei der Oxidation gehen Metall-Ionen unter Abgabe von Elektronen in Lösung, die im Metall hinterlassen werden und eine negative Flächenladung ausbilden. Bei der Reduktion werden von den Kationen gemäß Gleichung (2.70) Elektronen aus dem Metall aufgenommen, wonach sie sich als elementares Metall an der Elektrode absetzen können. Die Kombination der beiden elektrochemischen Reaktionen werden als *Redoxreaktion* bezeichnet. Abhängig von der Art des Metalls, der Ionenkonzentration in der Lösung, der Temperatur und vielen anderen Parametern laufen die beiden Teilreaktionen unterschiedlich schnell ab. Es bildet sich eine sog. *Doppelschicht* aus, die aus der negativen Flächenladung im Metall und einer diffusen Schicht positiv geladener ionaler Überschussladungen in der Elektrolytlösung besteht. Die daraus resultierende elektrische Polarisierung der Phasengrenze führt aufgrund der Coulomb-Kräfte dazu, dass die Teilreaktionen mit zunehmender Polarisierung gehemmt werden, und sich ein stationärer Gleichgewichtszustand einstellt. Makroskopisch gesehen findet in Folge dessen kein Ladungstransport mehr durch die Grenzschicht statt, und es bildet sich die konstante Potentialdifferenz $\Delta\varphi_0$ zwischen Metall und Elektrolytlösung aus, die sog. *Galvani-Spannung*.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass es sich bei der zuvor beschriebenen Redoxreaktion lediglich um ein vereinfachtes Beispiel zur Veranschaulichung der prinzipiellen Abläufe handelt. Reale Korrosionsprozesse beinhalten üblicherweise kompliziertere Vorgänge, bei denen nachgelagerte Reaktionen im Lösungsinnen beteiligt sind, wie z.B. bei der häufig vorkommenden *Sauerstoffkorrosion*:



Messung des Gleichgewichtspotentials

Die Galvani-Spannung $\Delta\varphi_0$ kann nicht direkt bestimmt werden, da sich zwischen der Elektrolytlösung und dem Messgerät zwangsläufig eine weitere Phasengrenze ausbil-

det, welche einen unmittelbaren Abgriff des Elektrolytpotentials φ_L verhindert. Aus diesem Grund wird eine *Referenzelektrode* verwendet, die selber eine möglichst konstante Galvani-Spannung $\Delta\varphi_r$ aufweist. Die Messung wird, wie in Abbildung 2.17 zu sehen, durchgeführt und liefert das sog. *Gleichgewichtspotential*, welches als Galvani-Spannung der zu vermessenden Phasengrenze bezogen auf die Galvani-Spannung der Referenzelektrode zu verstehen ist (Maschenumlauf M_1):

$$U^* = \Delta\varphi_0 - \Delta\varphi_r \quad (2.73)$$

Entsprechend muss bei Angabe des Gleichgewichtspotentials immer auch die bei der Messung verwendete Referenzelektrode genannt werden, so z.B.: „ $U^* = -650 \text{ mV vs. Ag/AgCl}$ “.

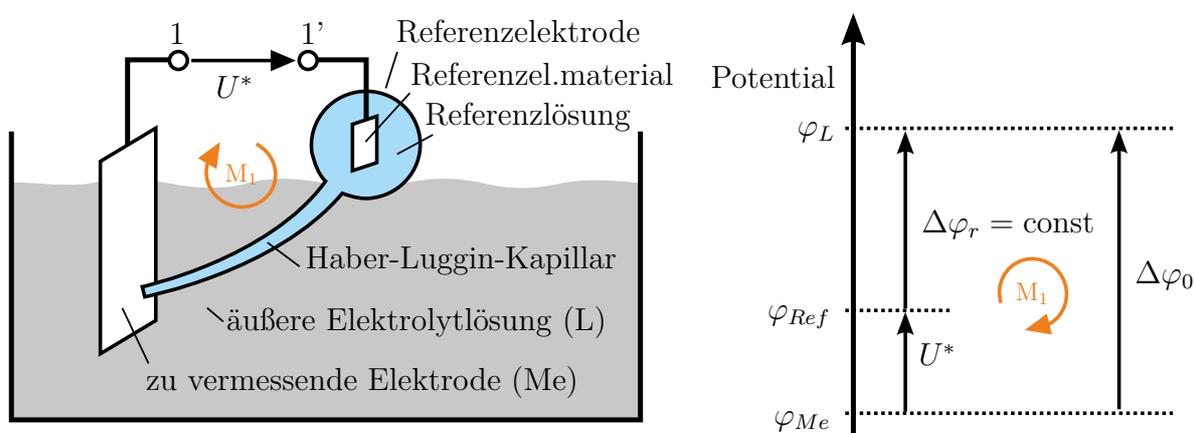


Abbildung 2.17.: Messung des Gleichgewichtspotentials (links) mit Potentialschema (rechts). φ_L = Elektrolytpotential, φ_{Ref} = Referenzelektrodenpotential (Klemme 1'), φ_{Me} = Metallpotential (Klemme 1). *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [4].

Ein spezielles Gleichgewichtspotential, das sog. *Standardpotential*, *Standard-Redoxpotential* oder *Normalpotential*, ergibt sich bei der Messung gegen eine sog. *Normal-Wasserstoff-Elektrode* (NHE) unter Standardbedingungen. Eine tabellarische Auftragung der Normalpotentiale für verschiedene Redox-Partner wird als *Elektrochemische Spannungsreihe* bezeichnet (z.B. [12, S.93 Tab.3.2]).

Berechnung des Gleichgewichtspotentials

Sind Standardpotential, Temperatur und Beschaffenheit der Elektrolytlösung bekannt, so kann das Gleichgewichtspotential für Nicht-Standardbedingungen mit Hilfe der sog. *Nernst-Gleichung* berechnet werden:

$$U^* = U_0^* + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left(\frac{c_{Me}^{n+}}{1 \text{ mol/l}} \right) \quad (2.74)$$

U^* = Gleichgewichtspotential, U_0^* = Standardpotential, R = universelle Gaskonstante, T = Temperatur, n = Wertigkeit der Metallionen, F = Faraday-Konstante, c_{Me}^{n+} = Konzentration des Metallionen in der Lösung.

2.4.3. Stromfluss durch die Phasengrenze

Der in Unterkapitel 2.4.2 beschriebene Gleichgewichtsfall wird gestört, sobald im zeitlichen Mittel ein gerichteter Transport elektrischer Ladungen durch die Phasengrenze erfolgt. Dieser Strom kann entweder eine externe Quelle aufgeprägt werden (z.B. bei einer *Elektrolyse-Zelle*), oder nach dem Prinzip der *Galvanischen Zelle* von selber ablaufen. Letzteres ist z.B. der Fall, wenn zwei unterschiedlich edle Metalle elektrisch leitend verbunden in eine Elektrolytlösung eingebracht werden. Während sie durch den Zusammenschluss metallseitig das gleiche Potential aufweisen, sorgen die unterschiedlichen Galvani-Spannungen im Moment des Einbringens für einem Spannungsabfall über der Elektrolytlösung, welcher in einem elektrischen Strom resultiert.

Polarisationskennlinien

Unabhängig davon ob der Strom durch die Phasengrenze aufgeprägt ist oder aufgrund natürlicher Prozesse fließt, verändert er die Polarisation der Doppelschicht und somit die Potentialdifferenz zwischen Metall und Elektrolytlösung. Es kann eine sog. *Polarisationskurve* gemessen werden, welche die Normalkomponente der Stromdichte $\vec{J} \cdot \vec{n}$ auf der Elektrodenoberfläche als Funktion des Elektrolytpotentials U (Potential vs. Referenzelektrode) darstellt. Abbildung 2.18 zeigt einen möglichen Messaufbau.

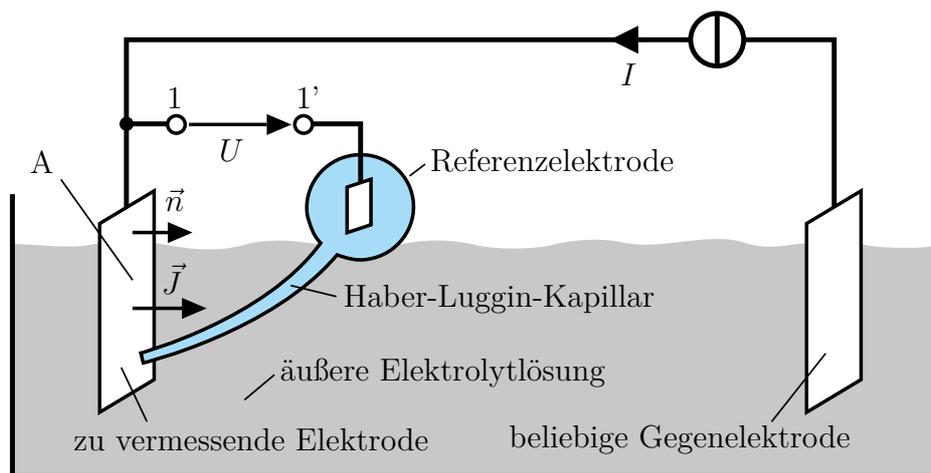


Abbildung 2.18.: Aufbau einer *galvanostatischen Messung*. *Quelle*: Eigene Herstellung. Verwendet in [4].

In Abbildung 2.19 ist eine gemessene Polarisationskennlinie zu sehen. Die strombedingte Abweichung des Potentials vom Gleichgewichtspotential wird als *Überspannung* η bezeichnet:

$$\eta = U - U^* \quad (2.75)$$

$$= \Delta\varphi - \Delta\varphi^* \quad (2.76)$$

Ist η positiv, so befindet sich die Phasengrenze in einem *anodischen* Arbeitspunkt, wobei der Strom vom Metall in die Lösung fließt. Ist die Überspannung hingegen negativ, so befindet sich die Phasengrenze in einem *kathodischen* Arbeitspunkt und der Strom fließt von der Lösung ins Metall.

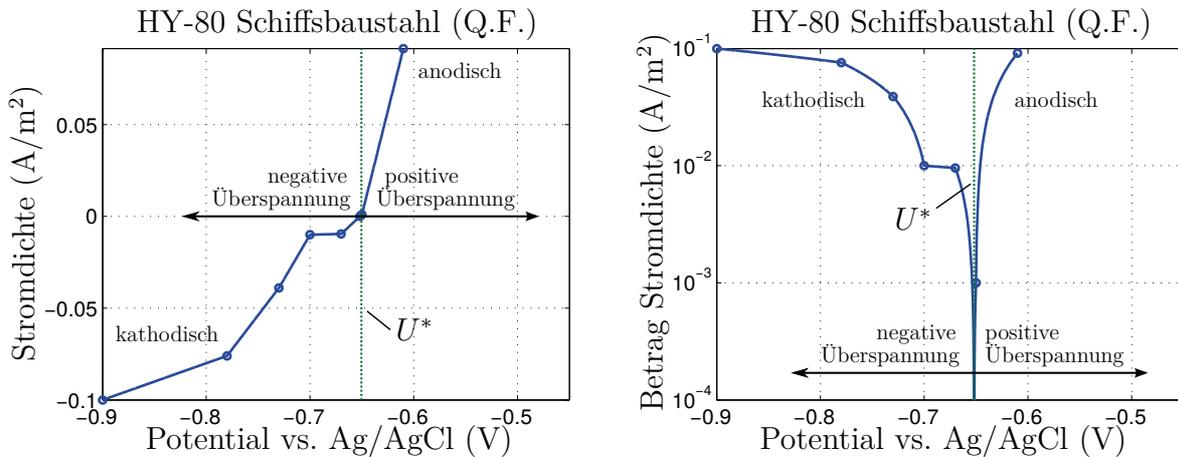


Abbildung 2.19.: Stromdichte-Potential-Kennlinie von „HY-80 Schiffsbau Stahl Q.F.“ in Meerwasser in der linearen (links) und in der typischen halb-logarithmischen Darstellung (rechts) nach Hack [30, S.21]. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [4].

Für die Polarisationskennlinien existieren analytische Beschreibungen, welche die elektrochemischen Vorgänge in unterschiedlich genauer Näherung berücksichtigen. Eine vergleichsweise umfassende Beschreibung liefert die sog. *Butler-Volmer-Gleichung*:

$$J = J_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{\alpha n F}{RT} \cdot \eta\right) - \exp\left(-\frac{(1 - \alpha) n F}{RT} \cdot \eta\right) \right] \quad (2.77)$$

J = Stromdichte auf der Elektrodenoberfläche, J_0 = Austauschstromdichte, α = Durchtrittsfaktor, n = Wertigkeit der Metallionen, F = Faraday-Konstante, R = universelle Gaskonstante, T = Temperatur, η = Überspannung. Durch wahlweise Vernachlässigung des anodischen oder kathodischen Astes ergeben sich die Tafel-Gleichungen:

$$\eta = \frac{RT}{\alpha n F} \cdot \ln\left(\frac{J}{J_0}\right) \quad (\text{anodisch}) \quad (2.78)$$

$$\eta = -\frac{RT}{(1 - \alpha) n F} \cdot \ln\left(-\frac{J}{J_0}\right) \quad (\text{kathodisch}) \quad (2.79)$$

Ist die Überspannung betragsmäßig klein, so kann mittels abgebrochener Reihenentwicklung der Butler-Volmer-Gleichung eine lineare Näherung des Polarisationsverhaltens gefunden werden:

$$J = J_0 \cdot \frac{nF}{RT} \cdot \eta \quad (2.80)$$

$$\Leftrightarrow \eta = \frac{RT}{nFJ_0} \cdot J \quad (2.81)$$

$$\Leftrightarrow \eta = R_D \cdot J \quad (2.82)$$

$$\Rightarrow R_D = \frac{RT}{nFJ_0} \quad (2.83)$$

Dabei ist der Proportionalitätsfaktor R_D der sog. *Durchtrittswiderstand* mit der Einheit eines Widerstandsflächenbelags.

Polarisationswiderstand

Im Sinne des Ohm'schen Gesetzes können Polarisationskennlinien auch als das Vorhandensein eines potentialabhängigen Widerstandsflächenbelags interpretiert werden, der als *Polarisationswiderstand* R_p bezeichnet wird. Laut Käsche [15, S.63] existieren für R_p drei verschiedene Definitions- bzw. Interpretationsmöglichkeiten:

$$\text{Differenziell:} \quad R_p(U_1) \equiv \left. \frac{dU}{dJ} \right|_{U=U_1} \quad (2.84)$$

$$\text{Differential:} \quad R_p(U_1) \equiv \left. \frac{\Delta U}{\Delta J} \right|_{U=U_1} \quad (2.85)$$

$$\text{Integral:} \quad R_p(U_1) \equiv \left. \frac{U - U^*}{J} \right|_{U=U_1} = \left. \frac{\eta}{J} \right|_{U=U_1} \quad (2.86)$$

2.4.4. Korrosion

Ein Stromfluss vom Metall in die Elektrolytlösung führt zu einem anodischen Arbeitspunkt der Phasengrenze und hat in der Regel die Auflösung des Metalls zur Folge. Diese *Korrosion* genannte Beschädigung der Elektrode resultiert direkt aus dem Faraday'schen Gesetz (cf. Gleichung (2.68)), da durch das Abfließen der Kationen gleichermaßen positive Ladung und Elektrodensubstanz abtransportiert wird. Korrosion tritt in der Praxis üblicherweise nach dem Prinzip der Galvanischen Zelle auf, z.B. bedingt durch unvorteilhafte Materialkomposition, Oberflächenstörungen (z.B. Anlauffarben beim Schweißen), Materialinhomogenitäten oder Konzentrationsunterschiede in der Elektrolytlösung.

2.4.5. Passive und aktive Korrosionsschutzmaßnahmen

Da Korrosion aus dem Faraday'schen Gesetz resultiert, kann ein Schutz durch Unterdrückung bzw. Verlagerung der anodischen Ströme erreicht werden. Bei sog. passiven Korrosionsschutzmaßnahmen wird dies z.B. durch elektrisch isolierende Anstriche erreicht, die auf das zu schützende Objekt aufgebracht werden. Einige Werkstoffe lassen sich alternativ mittels Anodisierung vor Korrosion schützen, indem durch das Aufprägen eines anodischen Stromes eine stabile Passivierungsschicht auf ihrer Oberfläche erzeugt wird. In bestimmten Fällen kann der Korrosionsschutz auch durch Galvanisierung mit einem edleren Werkstoffen erreicht werden. Während die Beschichtung des Rumpfes bei Wasserfahrzeugen ein üblicher Vorgang ist, werden Propeller in der Regel nicht beschichtet, weil dort die mechanische Beanspruchung zu stark ist und die Beschichtung zu akustischen Problemen führen kann („Singende Schraube“). Aktuell wird an optimierten Propellerbeschichtungen geforscht, welche die oben genannten Probleme nicht bzw. hinreichend reduziert aufweisen.

Passive Korrosionsschutzmaßnahmen wie z.B. Anstriche reichen in der Regel nicht aus, weil sie mit der Zeit Schaden nehmen und durchlässig werden. Daher werden zudem *Kathodische Korrosionsschutz-Systeme* (KKS-Systeme) eingesetzt, bei denen kathodische Ströme auf das zu schützende Objekt aufgeprägt werden. Man unterscheidet *Sacrificial Anodes Corrosion Protection* (SACP), bei dem *Opferanoden* aus unedlen Materialien zum Einsatz kommen, und *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP), bei dem ein Netzteil und *inerte Fremdstromanoden* verwendet werden. Bei der Deutschen Marine wird für aktiven Korrosionsschutz mit Fremdstromanoden der Begriff *Elektrischer Korrosionsschutz* (EKS) verwendet, der in der Regel als Synonym für ICCP zu verstehen ist. Es existiert des Weiteren ein ausgefallenerer Ansatz für anodischen Korrosionsschutz, der ebenfalls zu EKS gezählt wird.

2.5. Numerische Berechnung von UEP-Signaturen

In den beiden vorhergehenden Unterkapiteln 2.3 und 2.4 zur Feldtheorie des stationären Strömungsfeldes bzw. zur Elektrochemie wurden bereits die nötigen Grundlagen für die numerische Berechnung von UEP-Signaturen rekapituliert. Als Simulationsverfahren bieten sich die *Randelementmethode* (engl.: *boundary element method*, BEM) oder die *Finite-Elemente-Methode* (FEM) an, da mit ihnen die abgerundeten Geometrien der Wasserfahrzeuge gut diskretisiert werden können. Obwohl die *Finite-Differenzen-Methode* (FDM) ebenfalls in der Lage ist die Poisson'sche PDG (cf. Gleichung (2.27)) effizient zu lösen, ist sie aufgrund des sog. Staircasing-Effekts weniger gut zur Simulation von UEP geeignet.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde das FEM-Tool „COMSOL Multiphysics“ mit dem „AC/DC Module“ [31] und dem „Batteries & Fuel Cells Module“ [32] verwendet. Daher soll zunächst kurz das Konzept und die mathematischen Grundlagen

der Finite-Elemente-Methode thematisiert werden, gefolgt von einer Vorstellung verschiedener Ersatzschaltungskonzepte zur Simulation der elektrochemischen Vorgänge an den Phasengrenzen.

2.5.1. Finite-Elemente-Methode

Die Diskretisierung besteht bei der FEM aus einem Netz (*Mesh*) passgenau aneinander liegender Elemente, üblicherweise Dreiecke (2D) bzw. Tetraeder (3D), die den gesamten Raumbereich des Simulationsgebietes abdecken. Somit ist sie für Probleme mit ortsabhängigen Materialeigenschaften besser geeignet als die BEM, bei der lediglich die Grenzflächen zwischen Gebieten mit unterschiedlichen Materialparametern diskretisiert werden. Im Gegenzug besitzt die FEM jedoch einen höheren Ressourcenbedarf bezüglich Arbeitsspeicher und Rechenleistung.

Starke und schwache Formulierung

Randwertprobleme liegen in der Regel zunächst in ihrer sog. *starken Formulierung* vor, welche aus der PDG und den natürlichen und essentiellen Randbedingungen besteht (cf. Kapitel 2.3.2). Die starke Formulierung stellt bestimmte Anforderungen an die *Lösungsfunktion*⁸ welche bei der Realisierung der numerischen Berechnung hinderlich sind. Bei der FEM wird das Randwertproblem daher zunächst in seine sog. *schwache Formulierung* überführt, die weniger strenge Anforderungen an die Lösungsfunktion stellt. So muss die Lösungsfunktion der schwachen Formulierung der Poisson-Gleichung nur einmal differenzierbar sein, während bei der starken Formulierung die zweifache Differenzierbarkeit gefordert ist.

Galerkin-Methode

Nach der Überführung in die schwache Formulierung kann die *Galerkin-Methode* angewandt werden, bei der Ansatz- und Testfunktion gleich gewählt und durch eine Summe gewichteter *Basisfunktionen* diskretisiert werden. Dann werden die Testfunktion sukzessive gleich den verschiedenen Basisfunktionen gewählt, so dass sich je Basisfunktion eine lineare Gleichung und insgesamt ein lineares Gleichungssystem ergibt:

$$[A] \cdot \vec{u} = \vec{b} \quad (2.87)$$

Gemäß FEM-Terminologie⁹ ist $[A]$ die *Steifigkeitsmatrix*, \vec{u} der *Verschiebungsvektor* und \vec{b} der *Lastvektor*. Die Steifigkeitsmatrix $[A]$ beinhaltet Informationen über die

⁸Beim stationären Strömungsfeld-Problems ist die Lösungsfunktion die Potentialverteilung.

⁹Die Begriffswahl erklärt sich durch den historischen Ursprung der FEM als Simulationsmethode für mechanische Probleme.

Materialverteilung und die geometrischen Relationen der Mesh-Knoten. Durch die Wahl der Testfunktion entsprechend der Galerkin Methode sind nur die Elemente im Bereich ihrer Hauptdiagonalen ungleich Null, so dass $[A]$ dünn besetzt ist. Im Lastvektor \vec{b} sind die Anregungsinformationen enthalten. Der Verschiebungsvektor \vec{u} stellt die zu berechnende Lösung des Gleichungssystems dar, im Falle des stationären Strömungsfeld-Problems also die Potentialwerte an den Mesh-Knoten.

Lösung des linearen Gleichungssystems

Das lineare Gleichungssystem aus Gleichung (2.87) kann numerisch mittels iterativer Verfahren gelöst werden. In COMSOL stehen hierfür diverse *Solver* zur Verfügung, die jeweils einen Kompromiss aus Konvergenzgeschwindigkeit und Stabilität darstellen. Als Abbruchkriterium muss ein geeigneter Wert für die maximale relative Änderung zwischen zwei Iterationsschritten gewählt werden.

2.5.2. Elektrische Ersatzschaltung

Damit die elektrochemischen Vorgänge an den Phasengrenzen simulativ berücksichtigt werden können, muss das in Unterkapitel 2.4.3 beschriebene Polarisationsverhalten zunächst in geeigneter Weise modelliert werden. Als erster Schritt bietet sich hierfür eine Beschreibung mittels Ersatzschaltung an, wobei alternativ eine gesteuerte Stromquelle, gesteuerte Spannungsquelle oder eine Spannungsquelle mit gesteuertem Widerstand verwendet werden können (cf. Abbildung 2.20 bis 2.22). Die gesteuerte Spannungsquelle in Abbildung 2.21 hat den Nachteil, dass mit ihr keine Passivierungseffekte beschrieben werden können für die $U \neq f(J)$ gilt. Die beiden anderen Ersatzschaltungen sind gleichwertige Beschreibungen, die lediglich unterschiedliche Sichtweisen bzw. Interpretationsansätze widerspiegeln.

2.5.3. Simulation elektrochemischer Vorgänge

Das Polarisationsverhalten der Phasengrenzen kann in numerischen Simulationen ausgehend von den zuvor behandelten Ersatzschaltungen berücksichtigt werden. Am besten eignet sich dabei die Beschreibung mittels potentialgesteuerter Stromquelle (cf. Abbildung 2.20), weil diese recht einfach auf eine Neumann'sche Randbedingung abgebildet werden kann. Sie entspricht der Normalkomponente der Stromdichte an der Phasengrenze, die in Abhängigkeit vom Elektrolyt-Potential entsprechend der nichtlinearen Polarisationskennlinie aufgeprägt wird. Für die Implementierung in COMSOL Multiphysics muss lediglich eine Interpolationsfunktion (je Polarisationskennlinie) angelegt werden, die mittels tabellarischen Stromdichte-Potential-Messwerten definiert wird. Diese wird dann bei der Neumann'schen Randbedingung namens *Normal Current Density* als Eingabe für die Normal-Stromdichte verwendet.

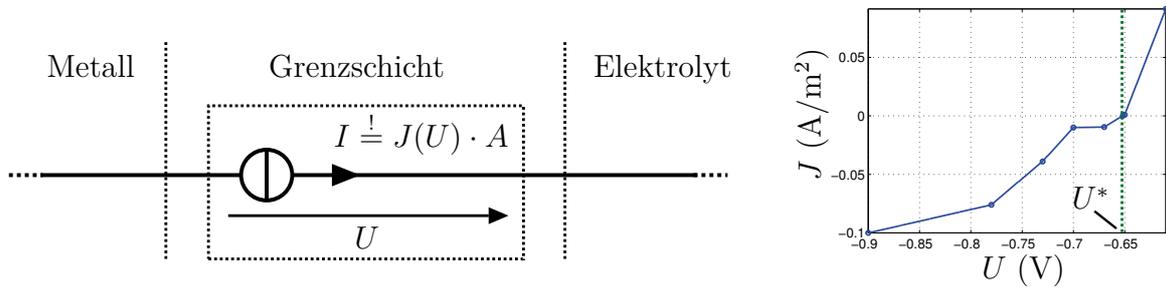


Abbildung 2.20.: Ersatzschaltung mit potentialgesteuerter Stromquelle. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [4].

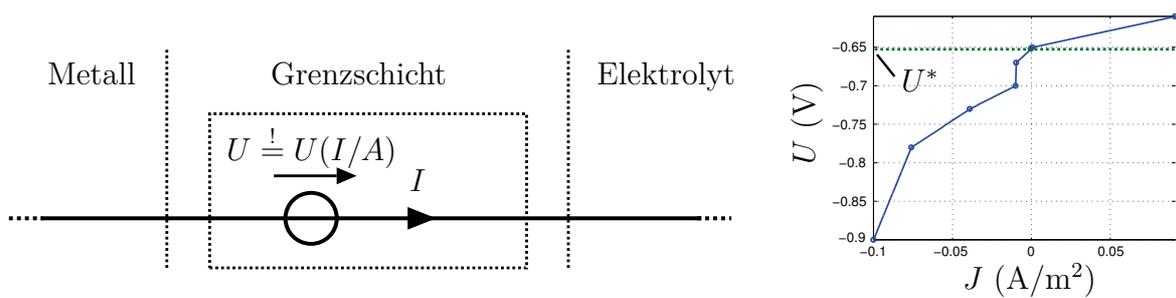


Abbildung 2.21.: Ersatzschaltung mit stromdichtegesteuerter Urspannungsquelle. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [4].

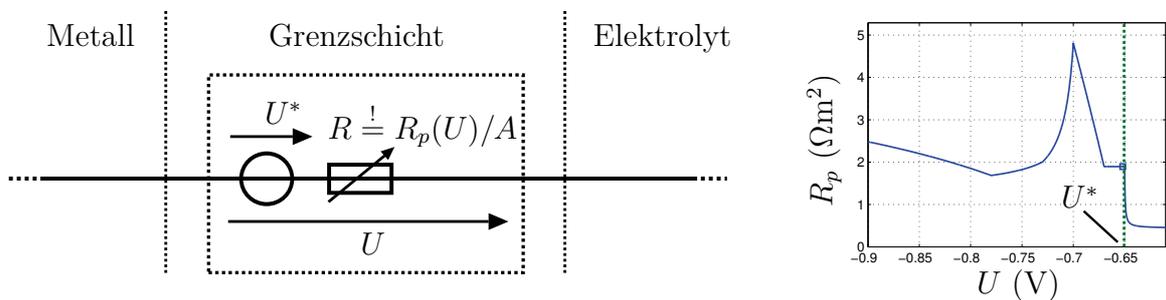


Abbildung 2.22.: Ersatzschaltung mit Urspannungsquelle und potentialgesteuertem Widerstand. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [4].

Bezugspunkt des elektrischen Potentials

Bei der Definition der Randbedingung innerhalb einer numerischen Simulation ist Vorsicht bezüglich des Bezugspunkt des elektrischen Potentials geboten. So liegen Polarisationskennlinien analog zur Messung (cf. Abbildung 2.18) üblicherweise im Sinne von „Potential des Metalls bezogen auf die Referenzelektrode“ vor. In der Simulation ist die Sichtweise jedoch genau umgekehrt, weshalb das Potential bei der Interpolation der Kennlinie invertiert werden muss. Eine detaillierte und vollständige Anleitung zur richtigen Implementation hinsichtlich der zuvor genannten Umstände wurde im Forschungsbericht [33] gegeben.

Berechnung des Rückstromes im Elektronenleiter

Die zuvor beschriebenen Schritte ermöglichen zunächst lediglich die Simulation des elektrischen Strömungsfeldes in der Elektrolytlösung, was für die Simulation der UEP-Signatur jedoch bereits völlig ausreichend ist. Um dennoch zusätzlich den Rückstrom im Metall zu simulieren, muss eine zweite numerische Simulation über die Stromdichte an der Phasengrenze angekoppelt werden. Weil der absolute Potentialunterschied an der Phasengrenze unbekannt ist (cf. Kapitel 2.4.2) muss hierfür ein weiteres, unabhängiges Potential eingeführt werden. Die metallseitig auftretenden Potentialunterschiede können zur Verbesserung der Genauigkeit wiederum in der Elektrolyt-seitigen Simulation verwendet werden, indem sie bei den Polarisationskennlinien als Offset des Arguments verwendet werden. Wegen der deutlich höheren Leitfähigkeit des Metalls gegenüber der Elektrolytlösung sind die metallseitigen Potentialunterschiede jedoch so klein, dass sie vernachlässigt werden können, sofern nur die UEP-Signatur von Interesse ist. Dies konnte in [34] gezeigt werden.

Korrosionsbedingte magnetische Signatur

Ausgehend von der simulierten Stromverteilung in der Elektrolytlösung und im Elektronenleiter, sowie der ersten Maxwell'schen Gleichung (2.12) können die *Corrosion Related Magnetic fields* (CRM) simuliert werden. Die damit einhergehende korrosionsbedingte magnetische Signatur wurde in [34] behandelt und muss zur Umrechnung der UEP-Signatur nicht weiter thematisiert werden.

2.6. Optimierungsprobleme und -ansätze

Die Lösung von Optimierungsproblemen ist ein wichtiger und interessanter Aufgabenbereich der Ingenieurwissenschaften, und so existieren viele unterschiedliche Ansätze,

die jeweils ihre Vor- und Nachteile mit sich bringen. Um den richtigen Ansatz auszuwählen und adäquat anwenden zu können, muss das Thema zunächst in allgemeiner Form angegangen werden.

2.6.1. Lösungsraum und Fitnessfunktion

Als *Lösungsraum* oder *Problemraum* wird eine Menge Ω bezeichnet, die aus der Gesamtheit aller möglichen Lösungen eines Problems besteht. Eine beliebige Lösung $\vec{x} \in \Omega$ gliedert sich wiederum in n *Entscheidungsvariablen* (x_1 bis x_n), die als Einflussparameter bei der Suche nach dem Optimum verstanden werden können. $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ beschreibt einen Lösungsraum mit Lösungen die kontinuierliche Entscheidungsvariablen beinhalten. Die *Fitnessfunktion*, *Fitness* oder *Zielfunktion* bewertet die Qualität der Lösungen, z.B. durch Zuordnung einer reellen Zahl ($f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$), und ermöglicht so einen Vergleich der Lösungen untereinander oder mit einem Sollwert. Es wird zwischen *Maximierungsproblemen*¹⁰ und *Minimierungsproblemen* unterschieden, je nachdem ob die Fitnessfunktion für die gesuchte optimale Lösung $\vec{x} = \vec{\sigma}$ maximal oder minimal werden soll. Ein Optimierungsproblem bei dem nach der optimalen Lösung $\vec{\sigma}$ gesucht wird bezeichnet man als *Suchproblem*, während bei einem *eigentlichen Optimierungsproblem* stattdessen $f(\vec{\sigma})$ von Interesse ist.

2.6.2. Verschiedene Optimierungsansätze

Im Folgenden sollen einige wichtige Optimierungsansätze erwähnt werden, denen aufgrund ihrer Einfachheit, Leistung oder sonstiger Merkmale eine besondere Bedeutung zukommt.

Direkte Lösung

Die beste Option, die aber so gut wie nie möglich ist, stellt die direkte Lösung des Optimierungsproblems dar, z.B. mittels analytischer Berechnung. So lässt sich das folgende Maximierungsproblem direkt mittels Differentialrechnung lösen:

$$f(\vec{x}) = f(x_1) = f(x) = -x^2 \quad (2.88)$$

$$f'(x) = -x \stackrel{!}{=} 0 \quad (2.89)$$

$$\Leftrightarrow x = 0 \quad (2.90)$$

In der Regel stellen Optimierungsprobleme jedoch sog. *inverse Problemstellungen* dar, bei denen die unbekannt optimale Lösung $\vec{\sigma}$ anhand der gewünschten Auswirkung

¹⁰Sofern nicht anders angegeben wird im Folgenden immer von einem Maximierungsproblem ausgegangen.

$f(\vec{o}) = \max(f(\vec{x}), \vec{x} \in \Omega)$ angenähert werden muss. Dies geschieht nicht mittels Berechnung vordefinierter Ausdrücke (wie beim *Vorwärtslöser*), sondern durch mehr oder weniger intelligentes Ausprobieren verschiedener möglicher Lösungen.

Random Search

Beim *Random Search* werden zufällig Lösungen generiert, ohne dass eine intelligente Suchheuristik zum Einsatz kommt. Entsprechend ist dieser Optimierungsansatz ineffizient und konvergiert vergleichsweise langsam. Als Abbruchkriterium dient entweder eine fest vorgegebene Anzahl Iterationen, also eine gewisse Anzahl Suchschritte bzw. ausprobierter Lösungen, oder ein Fitness-Sollwert. Der Random Search stellt einen robusten, globalen Suchalgorithmus dar. Aufgrund seiner schlechten Effizienz beschränkt sich die praktische Anwendung in der Regel darauf, als Referenz für die Leistungsfähigkeit anderer Optimierungsansätze zu dienen.

Gradientensucher, Hillclimbing und Downhill-Simplex

Ein klassischer *Gradientensucher* startet bei einer zufällig generierten Ausgangslösung \vec{x}_0 und modifiziert diese unter Verwendung einer gewissen Schrittweite in Richtung der größten Steigung der Fitness.

$$\vec{x}_{a+1} = \vec{x}_a \pm k \cdot \text{grad}(f(\vec{x}_a)) \quad (2.91)$$

Eine analytische Gradientenbildung ist oft nicht möglich, z.B. wenn die Fitnessfunktion auf diskreten Messdaten basiert, so dass der Gradient stattdessen durch numerische, partielle Differentiation approximiert werden muss. Eine algorithmisch einfachere Variante ist das *Hillclimbing*, bei dem anstelle der Gradientenbildung eine zufällige Mutation der Ausgangslösung durchgeführt wird. Hat die resultierende Lösung eine größere Fitness, so wird sie als Ausgangswert für den nächsten Iterationsschritt verwendet und ansonsten verworfen. Ein weiteres Verfahren ist der *Downhill-Simplex*, bei dem $n + 1$ Lösungen generiert werden, von denen je Suchschritt eine Lösung neu an den Restlichen ausgerichtet wird. Das $n + 1$ -Eck „tastet“ sich unter Auswertung von vergleichsweise wenigen Fitnesswerten durch den Suchraum ins nächstgelegene lokale Optimum.

Die lokalen Suchverfahren Gradientensucher, Hillclimbing und Downhill-Simplex sind in der Regel effizienter als der globale Random Search, funktionieren daher nicht besonders gut bei sog. *multimodalen* Problemen, bei denen sie Gefahr laufen vorzeitig in ein lokales Extrema zu konvergieren.

Evolutionäre Algorithmen

Die *Evolutionären Algorithmen* (EA) sind eine Klasse von Optimierungsansätzen die nach dem Vorbild der natürlichen Evolution arbeiten. Es existieren verschiedene Varianten, von denen am populärsten die *Genetischen Algorithmen* (GA), die *Genetische Programmierung* (GP), die *Evolutionstrategien* (ES) und die *Evolutionäre Programmierung* (EP) sind. Der Ablauf eines EA sieht in der Regel wie folgt aus:

1. Definition der Fitnessfunktion, Abgrenzung des Lösungsraumes und Aufbau der Lösungsvektoren (Daten-Repräsentation der Individuen).
2. Startpopulation generieren.
3. Bewertung jedes Individuums (einzelne Lösung) anhand der Fitnessfunktion.
4. Nachkommen durch Mutation und Reproduktion mehrerer Individuen bilden.
5. Fitness der Nachkommen bestimmen.
6. Lösungen selektieren. Tendentiell werden Individuen mit einer größeren Fitness bevorzugt in die nächste Generation übernommen.
7. Wiederholung der Schritte vier bis sechs, bis ein bestimmtes Abbruchkriterium erreicht wurde.

Im Rahmen der Dissertation wurden Evolutionstrategien (ES) eingesetzt, in deren Zusammenhang folgende Bezeichnungen üblich sind:

- μ : Die Populationsgröße, also die Anzahl der Individuen einer Generation.
- λ : Anzahl der Kinder/Nachkommen, die aus den (Eltern-)Individuen der vorhergehenden Generation erzeugt werden.
- σ : Standardabweichung zur Steuerung der Mutationsschrittweiten. Kann entsprechend der „1/5-Regel“ von Rechenberg selbstadaptiv implementiert sein (cf. [18, S.159ff]).
- *Plus-Strategie*: Eltern und Kinder werden zunächst zu einer Menge von $(\mu + \lambda)$ Individuen vereint, aus welcher dann μ Individuen in die nachfolgende Generation übernommen werden.
- *Komma-Strategie*: Die μ Individuen für die nachfolgende Generation werden nur aus der Menge der λ Kinder ausgesucht (Bedingung $\mu < \lambda$), während die Eltern stets verworfen werden.

Im Vergleich zu den lokalen Suchverfahren haben EA eine bessere Chance das globale Optimum eines multimodalen Problems zu finden, wobei es dafür, wie bei allen Optimierungsansätzen, keine Garantie gibt. Für eine gute Leistung ist die Wahl geeigneter *Strategieparameter* sehr wichtig, wozu insbesondere die Selektionsregeln, das Abbruchkriterium, die Mutationsschrittweite, die Populationsgröße, die Anzahl der Kinder und

die Vorgehensweise bei ihrer Erzeugung zählt. Dabei muss ein guter Kompromiss zwischen *explorativen* und *exploitativen* Eigenschaften des Algorithmus gefunden werden, also der Fähigkeit vorzeitiger Konvergenz zu entgehen und andererseits gefundene Lösung optimal zu verwerten.

Simulated Annealing

Das *Simulated Annealing* (SA) empfindet die natürlichen Vorgänge bei Abkühlungsprozessen nach, welche tendenziell in einem geordneten Zustand minimaler Energie enden. Beim SA wird zunächst eine Startpopulation generiert, deren Individuen zu Beginn des Interationsprozesses mit großen Schrittweiten zufällig mutiert werden. Die Mutationen werden vornehmlich nur dann übernommen, falls sie zu einer Verbesserung der Fitness führen. In Anlehnung an eine Abkühlung des Systems wird die Mutationschrittweite dann sukzessive verkleinert, wodurch es den Individuen immer schwerer fällt die Umgebung des nächstgelegenen lokalen Extremums zu verlassen. Bei einem multimodalen Problem befinden sich die Lösungen am Ende in verschiedenen lokalen Extrema, von denen das Beste ausgewählt werden kann.

Das SA steht in direkter Konkurrenz zu den EA und hat gegenüber Gradientenverfahren ebenfalls eine bessere Chance das globale Optimum eines multimodalen Problems zu ermitteln. Auch hier ist die Wahl geeigneter Strategieparameter entscheidend.

2.6.3. Die Wahl des am besten geeigneten Optimierers

Das Thema „Optimierung“ erfordert aufgrund seiner Komplexität immer eine angepasste Herangehensweise an das jeweilige Problem, weshalb es prinzipiell keinen „besten Optimierer“ geben kann. In Wolpert et al. [35] existiert zu dieser Behauptung ein Beweis mit der Bezeichnung „No free Lunch Theorem“. Stattdessen können Optimierungsansätze in sog. *starke Methoden* und *schwache Methoden* unterteilt werden (cf. Abbildung 2.23), die sich bezüglich ihrer problemabhängigen Leistungsfähigkeit unterscheiden. So erzielen starke Methoden eine hohe Leistung bei einer abgegrenzten Problemkategorie und versagen in allen übrigen Kategorien, wohingegen schwache Methoden für ein breites Problemspektrum eine durchschnittliche Leistung aufweisen. Lokale Verfahren stellen beispielsweise eine starke Methode bezüglich unimodaler¹¹ Problemstellungen dar, weil sie zügig konvergieren und das Optimum zuverlässig finden können. Bei bestimmten Optimierungsansätzen ist es möglich die Position der maximalen Leistungsfähigkeit im Raum der möglichen Problemstellungen durch Änderung der Strategieparameter zu verschieben.

¹¹Bei unimodalen Problemen existiert nur ein Extrema, welches das globale Optimum darstellt.

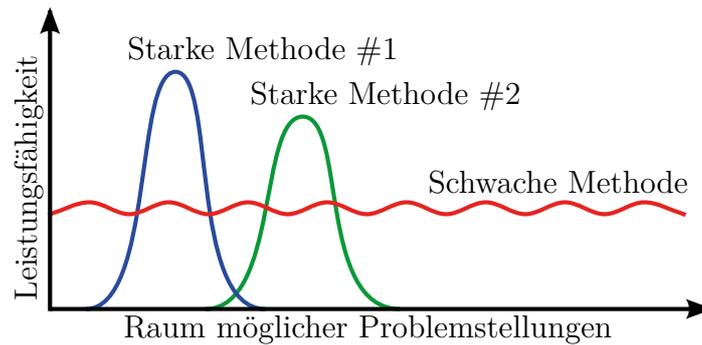


Abbildung 2.23.: Vergleich zwischen starken und schwachen Methoden, z.B. zwischen unterschiedlichen Optimierungsansätzen. *Quelle:* Angelehnt an Nissen [18, Bild 1-6, S.19]

Ein weiteres Kategorisierungsmerkmal ist die sog. *Epistasie*, welche die Korrelation der einzelnen Merkmale untereinander unterscheidet. Bei Problemen mit niedriger Epistasie führt die Änderung eines Merkmals in eine gewisse Richtung immer zur qualitativ gleichen Fitness-Änderung, während es bei Problemen mit hoher Epistasie von den Werten der anderen Merkmale abhängt.

3. Vergleich zwischen Berechnung, Simulation und Messung

In diesem ersten Hauptkapitel sollen die Grundlagen aus den Kapiteln 2.3, 2.4 und 2.5 angewandt werden um das elektrochemische Verhalten an Metall-Elektrolyt-Phasengrenzen mittels iterativer Berechnung und numerischer Simulation zu modellieren. Im Sinne einer Validierung der Ansätze und ihrer Implementierung sollen dabei Vergleiche zwischen iterativ berechneten und simulierten Werten, sowie gemessenen Werten und simulierten Werten durchgeführt werden. Die verwendeten Beispiele wurden teilweise bereits in den Forschungsberichten [4], [33] und [23] untersucht.

3.1. Elektrochemische Zelle

Zunächst soll eine möglichst einfach aufgebaute elektrochemische Zelle gemäß Abbildung 3.1 betrachtet werden, die aus einer mit Wasser gefüllten Box besteht. Zwei gegenüberliegende Seitenflächen bilden die Elektroden, welche wahlweise kurzgeschlossen oder an eine Quellenspannung U_z gelegt werden können, während die restlichen Wände der Box elektrisch isolierend sind. Der elektrische Leitwert des Wassers innerhalb der Box berechnet sich zu:

$$G_w = \kappa_w \cdot \frac{A}{d} \quad (3.1)$$

Aufgrund der Symmetrie ist die Stromdichteverteilung im Wasser homogen, und es gilt unabhängig vom Ort:

$$\vec{J} = \vec{J}_1 = -\vec{J}_2 \quad (3.2)$$

Mit dem Ohm'schen Gesetz erhält man die Beziehung:

$$|\vec{J}| = \frac{U_w \cdot G_w}{A} \quad (3.3)$$

$$= \frac{U_w \cdot \kappa_w}{d} \quad (3.4)$$

An den Phasengrenzen der beiden Elektroden treten die Galvani-Spannungen $\Delta\varphi_1$ und $\Delta\varphi_2$ auf, die mit einer Referenzelektrode als U_1 und U_2 gemessen werden können:

$$U_{1/2} = \Delta\varphi_{1/2} - \Delta\varphi_r \quad (3.5)$$

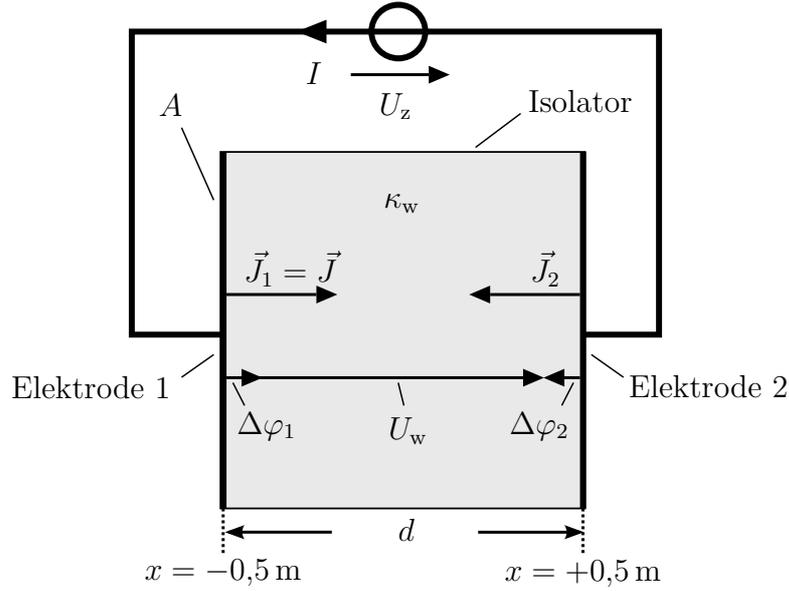


Abbildung 3.1.: Elektrische Eigenschaften und relevante elektrische Größen der elektrochemischen Zelle. *Quelle:* Eigene Herstellung. In ähnlicher Form verwendet in [4].

Dabei ist $\Delta\varphi_r$ die nicht bestimmbare Galvani-Spannung der Referenzelektrode. Die über dem Wasser abfallende Spannung U_w ist demnach nicht wie auf den ersten Blick zu vermuten gleich der von außen an den Elektroden angelegten Spannung U_z , sondern es ergibt sich folgender Maschenumlauf:

$$0 = U_w + \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 - U_z \quad (3.6)$$

$$\Leftrightarrow 0 = U_w + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_r - \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_r - U_z \quad (3.7)$$

$$\Leftrightarrow 0 = U_w + U_1 - U_2 - U_z \quad (3.8)$$

$$\Leftrightarrow U_w = U_z - U_1 + U_2 \quad (3.9)$$

Gemäß Gleichung (3.4) ist U_w proportional zur Stromdichte \vec{J} , die wiederum über die nichtlinearen Polarisationskennlinien mit $U_{1/2}$ verknüpft ist. Der Zustand der Zelle kann daher nicht direkt mittels geschlossenem Ausdruck bestimmt werden, sondern muss iterativ berechnet bzw. numerisch simuliert werden.

3.1.1. Iterative Berechnung

In Listing 3.1 kann der Ablauf einer iterativen Berechnung der Zustände in der elektrochemischen Zelle mit Stahl-Elektroden bei $U_z = 200 \text{ mV}$ nachvollzogen werden. Zu Beginn (Iteration 00) wird davon ausgegangen, dass die Stromdichte J beim Anlegen der Zellenspannung U_z gleich Null ist, so dass die Spannungen $U_{1/2}$ den Gleichgewichtspotentialen der beiden Elektroden entsprechen. Diese ermöglichen nun (Iteration 01)

über Gleichung (3.9) die Berechnung der Spannung U_w , welche in Gleichung (3.4) eingesetzt die Stromdichte für den folgenden Iterationsschritt (Iteration 02) liefert. Für die neue Stromdichte werden die von den Gleichgewichtspotentialen abweichenden Spannungen $U_{1/2}$ aus den Polarisationskennlinien interpoliert, und der Vorgang wird wiederholt bis das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Im konkreten Fall unterschreitet die relative Änderung der Stromdichte nach 14 Iterationen den festgelegten Grenzwert von 10^{-6} , nachdem die Stromdichte in den Wert $J = 0,2963 \text{ A/m}^2$ konvergiert ist.

```

1  el1=Bare Steel Orazem Curve
2  el2=Bare Steel Orazem Curve
3  A=1m^2, d=1m, kw=3S/m, Gw=3S, Uz=0.2V, sor=0.36
4
5  00: J=0.0000 ->
6  01: U1=-0.7208 U2=-0.7208 -> Uw=0.2000 -> J=0.6000 ->
7  02: U1=-0.6874 U2=-0.7658 -> Uw=0.1216 -> J=0.3648 ->
8  03: U1=-0.6804 U2=-0.7740 -> Uw=0.1064 -> J=0.3191 ->
9  04: U1=-0.6780 U2=-0.7767 -> Uw=0.1013 -> J=0.3039 ->
10 05: U1=-0.6773 U2=-0.7776 -> Uw=0.0996 -> J=0.2989 ->
11 06: U1=-0.6770 U2=-0.7779 -> Uw=0.0991 -> J=0.2972 ->
12 07: U1=-0.6769 U2=-0.7780 -> Uw=0.0989 -> J=0.2966 ->
13 08: U1=-0.6769 U2=-0.7781 -> Uw=0.0988 -> J=0.2964 ->
14 09: U1=-0.6769 U2=-0.7781 -> Uw=0.0988 -> J=0.2964 ->
15 10: U1=-0.6769 U2=-0.7781 -> Uw=0.0988 -> J=0.2963 ->
16 11: U1=-0.6769 U2=-0.7781 -> Uw=0.0988 -> J=0.2963 ->
17 12: U1=-0.6769 U2=-0.7781 -> Uw=0.0988 -> J=0.2963 ->
18 13: U1=-0.6769 U2=-0.7781 -> Uw=0.0988 -> J=0.2963 ->
19 14: U1=-0.6769 U2=-0.7781 -> Uw=0.0988 -> J=0.2963 ->
20 Konvergenzkriterium erfuehlt (dJ/J < 1e-06).
21
22 Ergebnisse:
23 U1 = -0.6768719429 V
24 U2 = -0.7780956451 V
25 Uw = 0.09877629777 V
26 J = 0.2963287152 A/m^2
27 I = J * A = 0.2963288933 A
28
29 Validierung (Maschenumlauf):
30 Uw + U1 - U2 - Uz = 5.5511e-17 V

```

Listing 3.1: Ausgabe des MATLAB Skriptes, bei der iterativen Berechnung der elektrochemischen Zelle aus Abbildung 3.1.

Abgesehen von einem geringen Fehler von $5,5511 \cdot 10^{-17} \text{ V}$ erfüllt die gefundene Lösung den Maschenumlauf in Gleichung (3.9), und liefert die in Abbildung 3.2 dargestellten Elektroden-Arbeitspunkte.

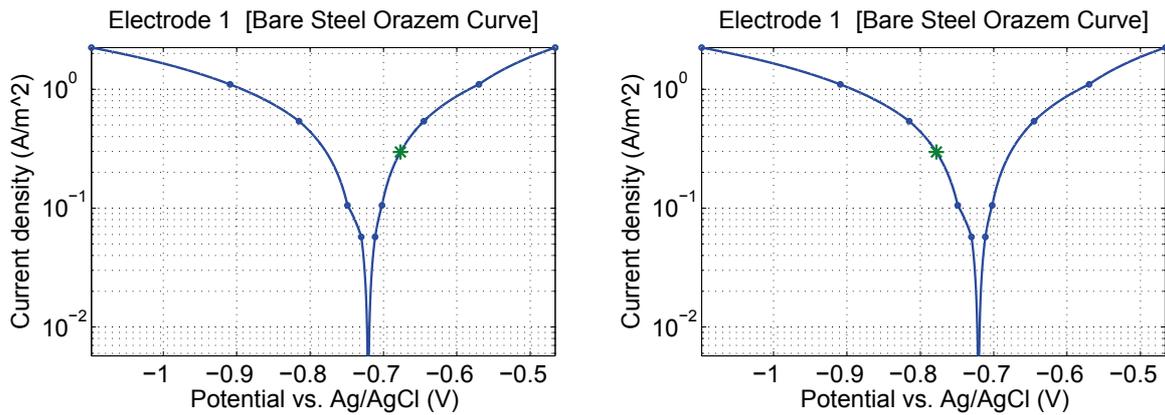


Abbildung 3.2.: Arbeitspunkte (grüne Sternchen) der beiden Stahl-Elektroden der elektrochemischen Zelle bei $U_z = 200$ mV. *Quelle:* Eigene Herstellung.

3.1.2. Numerische Simulation

Die zuvor iterativ berechnete elektrochemische Zelle wurde zudem mittels FEM simuliert um die Ergebnisse mit den Daten aus der Berechnung zu vergleichen. Dabei kamen die in Kapitel 2.5 beschriebenen Ansätze zur numerischen Simulation zum Einsatz. Abbildung 3.3 visualisiert die Potentialverteilung in der Zelle, wobei das Be-

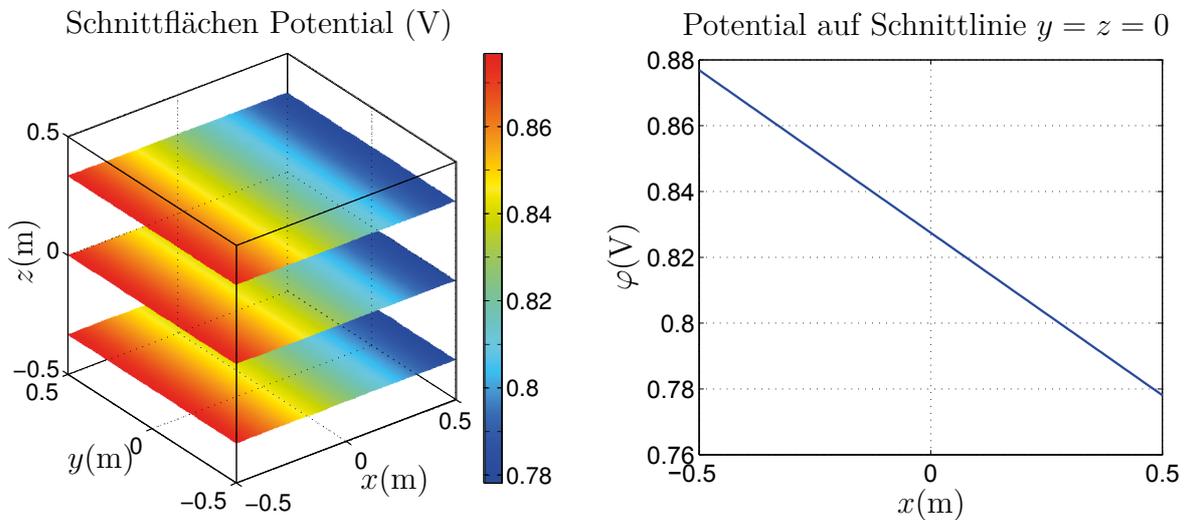


Abbildung 3.3.: Simulierte Potentialverteilung in der elektrochemischen Zelle aus Abbildung 3.1. *Quelle:* Eigene Herstellung.

zugspotential (0 V metallseitig) auf Elektrode 2 gelegt wurde. Es ergibt sich:

$$\varphi(-0,5 \text{ m}) = 0,8769 \text{ V} \quad (3.10)$$

$$\varphi(+0,5 \text{ m}) = 0,7781 \text{ V} \quad (3.11)$$

$$I = 0,2963 \text{ A} \quad (3.12)$$

Unter Berücksichtigung des Bezugspunktes (0 V metall. El.2) des Potentials (cf. Kapitel 2.5.2) entspricht dies genau den iterativ berechneten Werten:

$$U_1 = -\varphi(-0,5 \text{ m}) + U_z \quad (3.13)$$

$$= -0,6769 \text{ V} \quad (3.14)$$

$$U_2 = -\varphi(+0,5 \text{ m}) \quad (3.15)$$

$$= -0,7781 \text{ V} \quad (3.16)$$

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.17)$$

$$= 0,2963 \text{ A/m}^2 \quad (3.18)$$

3.2. Spannungsgetriebener Dipol

Anhand einer Dipolanordnung, die in der Elektromagnetischen-Modell-Messanlage (EMMA) der WTD 71 bezüglich ihres Strom-Spannungs-Verhaltens untersucht wurde, soll ein erster Vergleich zwischen numerischer Simulation und Messung durchgeführt werden. Abbildung 3.4 zeigt die Geometrie des mit zylindrischen Zinkanoden versehenen Dipols im Wassertank.

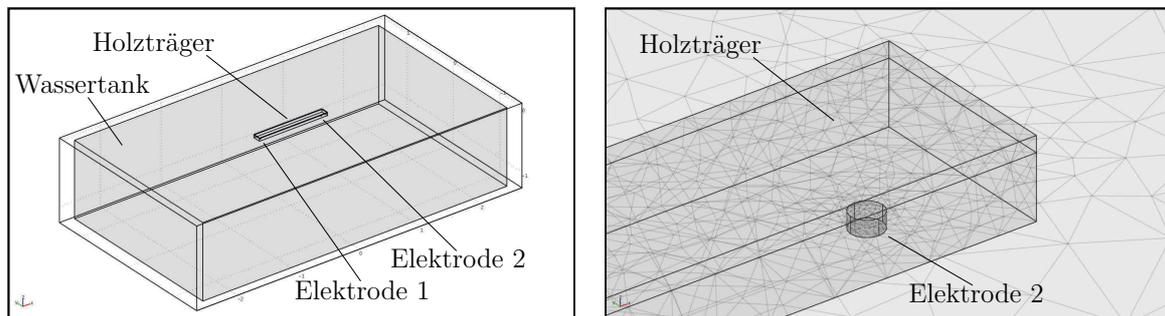


Abbildung 3.4.: Geometrie des Dipols im Wassertank (links) und Ausschnitt der Diskretisierung (rechts). *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [4].

Bei der Messung wurden die Strom-Spannungs-Kennlinien für verschiedene Zustände der Elektroden ermittelt: Soeben erst ins Wasser eingebrachte Elektroden (neu), zuvor ausgelagerte Elektroden die bereits korrodiert waren (alt) und mittels Drahtbürste gereinigte alte Elektroden (alt gereinigt). Simuliert wurde einmal nur das stationäre Strömungsfeld ohne Modellierung der elektrochemischen Vorgänge (primär) und einmal unter Berücksichtigung gemessener Polarisationskennlinien an den Phasengrenzen (sekundär). Die verwendeten Polarisationskennlinien wurden nicht selber ermittelt, sondern es wurde auf Literaturwerte aus [30] zurückgegriffen.

Zunächst fällt auf, dass die gemessenen Kurven deutlich voneinander abweichen, was auf eine signifikante Änderung des Polarisationsverhaltens je nach Zustand der Elek-

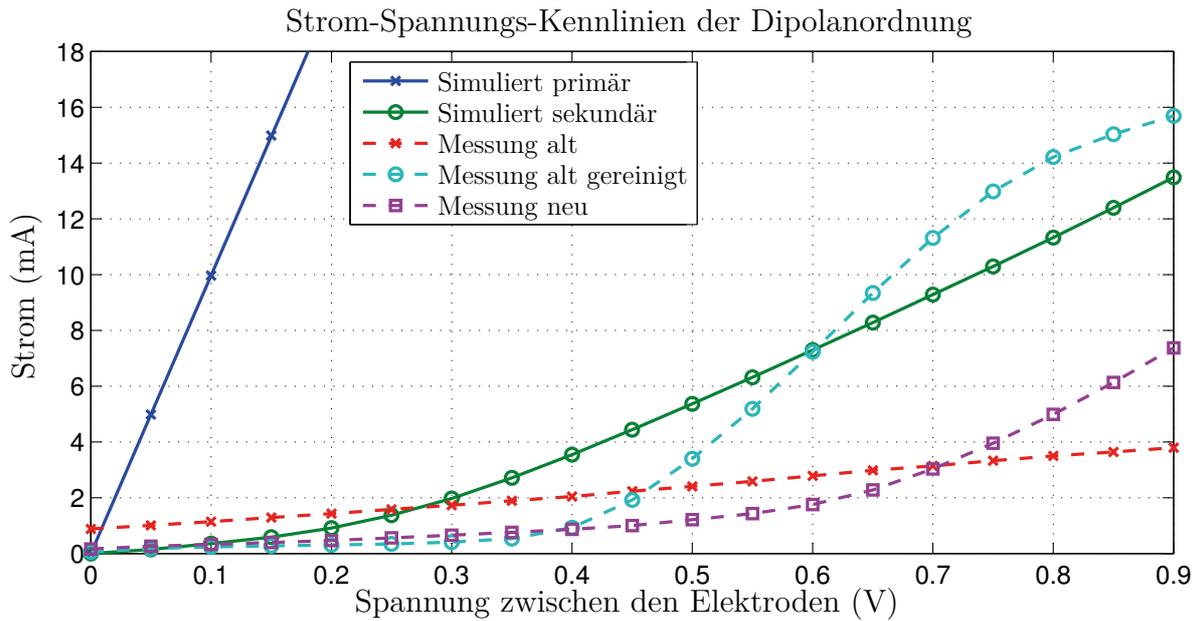


Abbildung 3.5.: Simulationen und Messungen des Strom-Spannungs-Verhaltens der Dipolanordnung aus Abbildung 3.4, in verdünntem Meerwasser mit der Leitfähigkeit $\kappa_w = 2.724 \text{ S/m}$. Quelle: Eigene Herstellung. Verwendet in [4].

troden hindeutet. Ein Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Daten zeigt, dass das gemessene Verhalten nicht alleine durch die Simulation des stationären Strömungsfeldes (primär) reproduziert werden kann. Durch Verwendung von Polarisationskennlinien zur Modellierung der Phasengrenzen (sekundär) kann eine akzeptable Näherung erreicht werden, was in diesem Fall aber lediglich bedeutet, dass die simulierte Kurve nicht stärker von den Messwerten abweicht als es diese untereinander tun. Die Ergebnisse bekräftigen nochmal die Aussage (cf. Kapitel 1), dass die Polarisationskennlinien der Phasengrenzen für eine realistische numerische Simulation genau bekannt sein müssen.

3.3. Quest-Signatur aus den RIMPASSE

Anhand der Signatur des kanadischen Forschungsschiffes CFAV Quest (cf. Abbildung 3.6) soll ein weiterer Vergleich zwischen numerischer Simulation und Messung durchgeführt werden. Die Quest wurde während der sog. *Radar Infrared electro-Magnetic Pressure Acoustic Ship Signature Experiments* (RIMPASSE) im Jahr 2011 an den Messeinrichtungen verschiedener Nato-Marinen bezüglich ihrer UEP-Signatur vermessen. Für den Vergleich sollen Daten aus der Messung „Run 14“ in Aschau verwendet werden, bei denen die Quest eine siebenteilige UEP-Sensorkette auf dem in Abbildung 3.7 dargestellten Kurs überfuhr.



Abbildung 3.6.: Das kanadische Forschungsschiff CFAV Quest, welches im Rahmen der RIMPASSE bezüglich seiner Signaturen vermessen wurde. Quelle: http://tugfa.xblogspot.com.blogspot.de/2010_11_01_archive.html Verwendung mit freundlicher Genehmigung des Urhebers Mac Mackay.

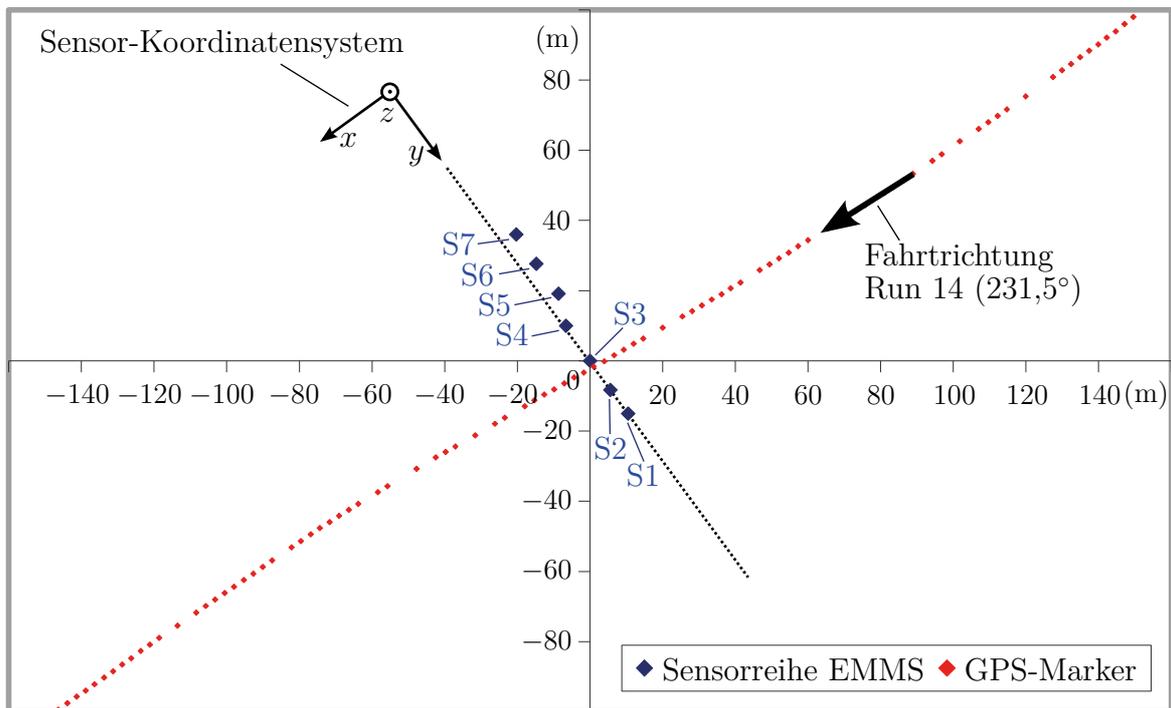


Abbildung 3.7.: Kurs der Quest während „Run 14“ der RIMPASSE über die UEP-Sensorreihe der Elektro-Magnetischen Messtelle (EMMS) in Aschau. Quelle: Eigene Herstellung. Verwendet in [23].

3. Vergleich zwischen Berechnung, Simulation und Messung

Abbildung 3.8 und 3.9 zeigen die Geometrie des Simulations-Modells und die verwendeten Randbedingungen. Die als *Infinite Elements* gekennzeichneten außen liegenden Boxen realisieren eine offene Randbedingung, welche einer seitlichen Fortsetzung des Wassers und Seebodens entspricht. Zusätzlich zum Simulationsaufbau aus [23] wurden nun auch die Ruder der Quest modelliert, wobei der Wellenabstand korrigiert¹ werden musste. Aufgrund der geometrischen Änderungen und der Implementierung einer verbesserten Stromdichte-Integration war eine leichte Anpassung² der Vorfaktoren für die Propeller-Polarisationskennlinien nötig, um die vom ASG-System gemessenen korrosionsbedingten Wellenströme von 1,79 A bzw. 1,97 A zu reproduzieren.

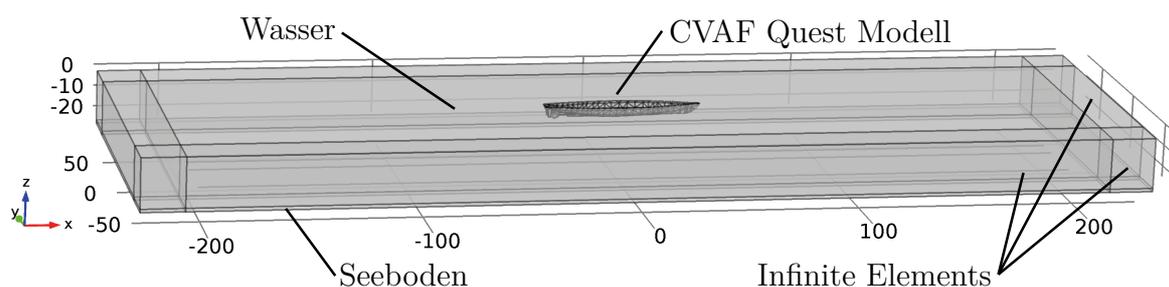


Abbildung 3.8.: COMSOL-Geometrie für die Simulation der Quest. Der Aufbau ist eine Nachbildung der Messung „Run 14“ in der EMMS Aschau (cf. Abbildung 3.7). *Quelle:* Eigene Herstellung.

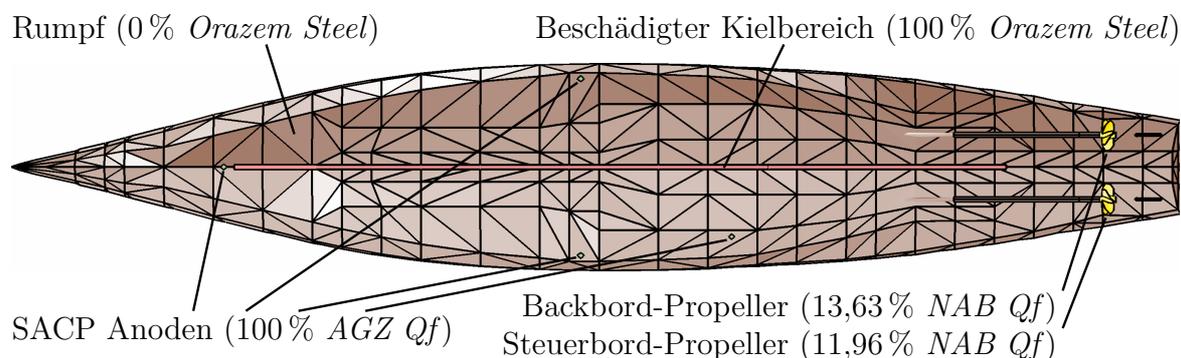


Abbildung 3.9.: Randbedingungen beim Quest-Modell. Die Zahlenwerte in Klammern geben an, wie viel Prozent der aus der Kennlinie abzulesenden Stromdichte als Anregung auf die Oberfläche aufgeprägt wurden (wegen unterschiedlicher Zustände der Grenzflächen). *Quelle:* Eigene Herstellung.

Im Gegensatz zur Simulation überfuhr die Quest die Sensoren bei der Messung nicht in perfekter x -Richtung sondern mit einer leichten Kursabweichung von α zur x -Achse, so dass die simulierten Signaturdaten mittels Koordinatentransformation auf die Messsi-

¹Der Wellenabstand wurde leicht verringert. Die Positionierung der Wellen und Ruder erfolgte nach Augenmaß, da genaue Informationen über die Geometrie leider nicht vorlagen.

²Im Vergleich zu den in [23] verwendeten Vorfaktoren 12,4 % (Backbord) und 10,8 % (Steuerbord).

tuation umgerechnet werden mussten:

$$E_x = +E'_x \cdot \cos(\alpha) + E'_y \cdot \sin(\alpha) \quad (3.19)$$

$$E_y = -E'_x \cdot \sin(\alpha) + E'_y \cdot \cos(\alpha) \quad (3.20)$$

Die Messdaten wurden zudem 180° um die x -Achse rotiert³, um sie in das übliche Koordinatensystem mit nach oben gerichteter z -Achse zu transformieren. Die *Signaturabweichung* (abw) zwischen gemessener (E_i^m) und simulierter (E_i^s) UEP-Signatur wurde wie folgt berechnet und in jeder Signatur-Grafik entsprechend angegeben:

$$abw = \frac{\sum_{i=\{x,y,z\}} \int_{x_a}^{x_e} |E_i^s - E_i^m| dx}{\sum_{i=\{x,y,z\}} \int_{x_a}^{x_e} |E_i^m| dx} \quad (3.21)$$

Neben den bereits untersuchten Daten für Sensor 2 und 4 (cf. [23]) wurde die UEP-Signatur auch für den direkt überfahrenen Sensor 3 und den am weitesten querab liegenden Sensor 7 ausgewertet (cf. Abbildung 3.7).

Abbildung 3.10 bis 3.13 stellen die gemessene und simulierte UEP-Signatur für die verschiedenen Sensoren direkt gegenüber. Durch die zusätzliche Modellierung der Rudergeometrie konnte für Sensor 2 und 4 keine signifikante Verbesserung bezüglich der Annäherung an die Messwerte erreicht werden (cf. Abbildungen 3.10 und 3.12 im Vergleich mit [23, Abbildung 12.13 und 12.14]). Die gemessenen und simulierten Daten sind weiterhin in einer akzeptablen, jedoch nicht optimalen, Übereinstimmung. Bei Abbildung 3.11 fällt auf, dass am Kielsensor (Sensor 3) eine deutlich ausgeprägtere E_y^m -Komponente gemessen wurde, was auf eine stärkere Asymmetrie⁴ der gemessenen Signatur hinweist. Diese wird in der Simulation trotz der einseitig angebrachten Anode und der ungleichen Propeller-Randbedingungen scheinbar noch nicht korrekt nachgebildet. Der schulterförmige Verlauf der gemessenen E_x und E_y Komponenten im Bugbereich lässt zudem das Vorhandensein eines weiteren, kleineren Dipols vermuten, z.B. hervorgerufen durch typische Beschädigungen der Bugbeschichtung. Abbildung 3.13 zeigt, dass bei dem am weitesten entfernt liegenden Sensor 7 die beste Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erreicht wurde. Das Fernfeld⁵ der simulierten Anordnung scheint demnach gut mit dem realen Fernfeld übereinzustimmen, während es im Nahfeld noch Verbesserungspotential gibt. Ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen aus [5] legt nahe, dass für eine bessere Modellierung des Nahfeldes detailgetreuere Geometrien verwendet werden müssten. Insbesondere die unbekanntes Anoden-Oberflächen und geschätzten Positionen der Wellen und Propeller dürften hier relevant sein, während die unbekanntes Propelleroberfläche aufgrund der eingestellten Ströme keinen großen Einfluss haben dürfte.

³Entspricht einer Invertierung der E_y - und E_z -Komponente.

⁴Asymmetrisch bezüglich der x - z -Ebene.

⁵Gemeint ist die UEP-Feldverteilung fern des Wasserfahrzeugs. Siehe auch Kapitel 4.4.

3. Vergleich zwischen Berechnung, Simulation und Messung

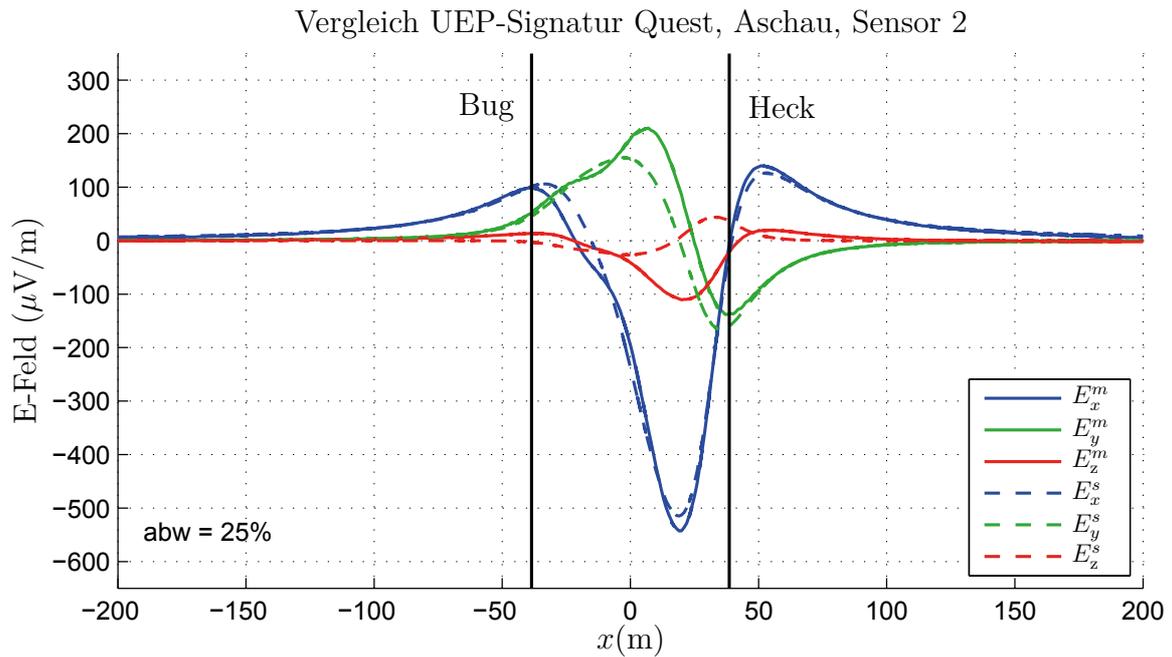


Abbildung 3.10.: Gemessene (durchgezogen) und simulierte (gestrichelt) UEP-Signatur der Quest während „Run 14“ über Sensor 2 der EMMS in Aschau. *Quelle:* Eigene Herstellung.

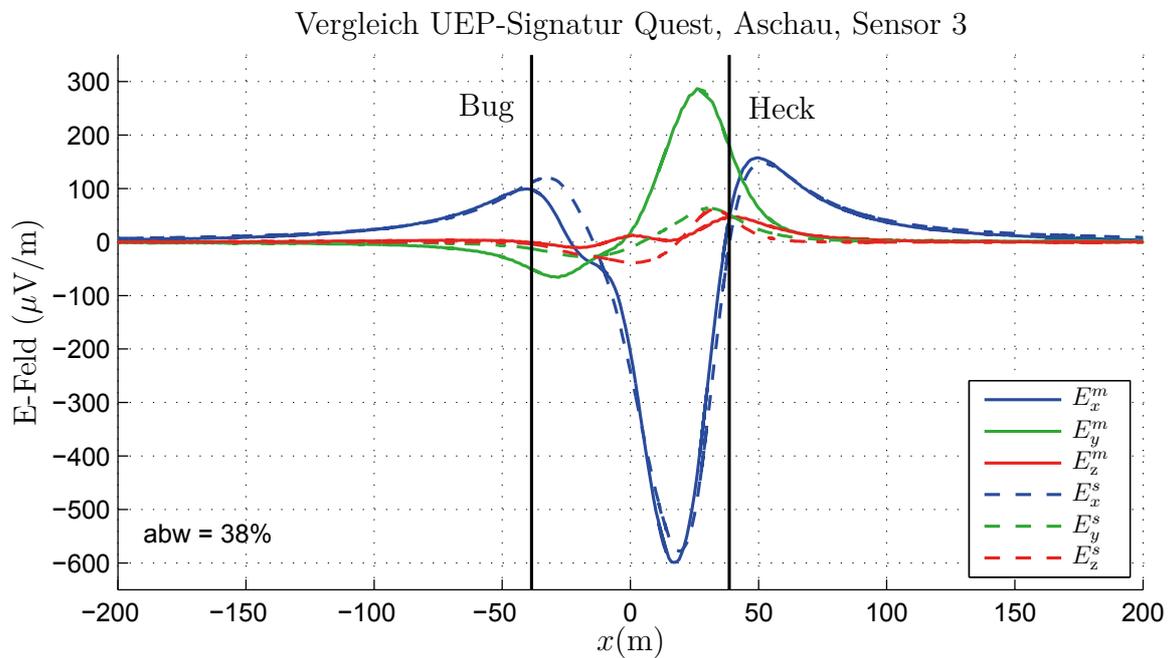


Abbildung 3.11.: Gemessene und simulierte UEP-Signatur der Quest während „Run 14“ über Sensor 3 der EMMS in Aschau. *Quelle:* Eigene Herstellung.

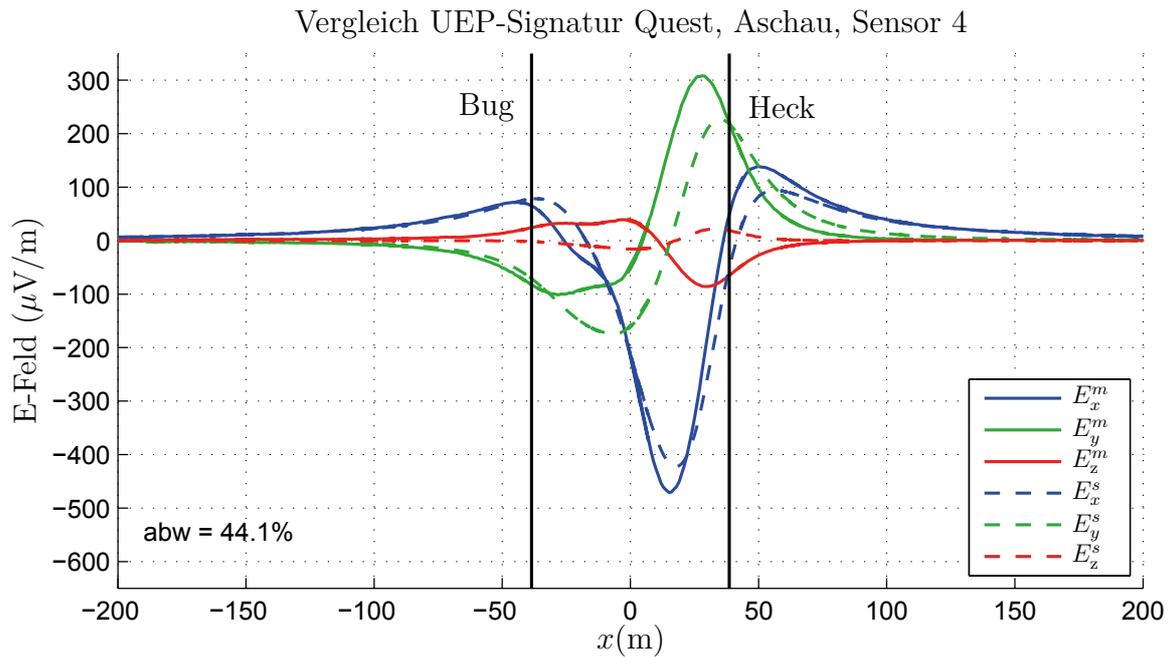


Abbildung 3.12.: Gemessene und simulierte UEP-Signatur der Quest während „Run 14“ über Sensor 4 der EMMS in Aschau. *Quelle:* Eigene Herstellung.

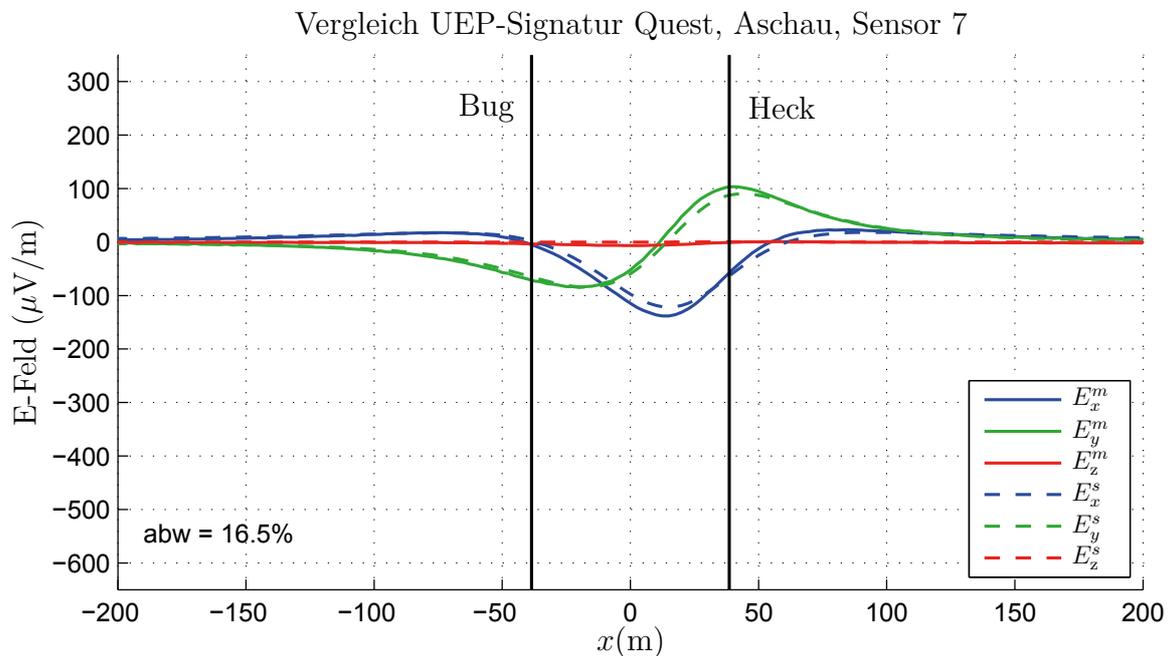


Abbildung 3.13.: Gemessene und simulierte UEP-Signatur der Quest während „Run 14“ über Sensor 7 der EMMS in Aschau. *Quelle:* Eigene Herstellung.

3.4. Fazit aus den Vergleichen

Es konnte gezeigt werden, dass numerische Simulationen unter Verwendung nicht-linearer Polarisationskennlinien prinzipiell gut geeignet sind, um das elektrochemische Verhalten an Phasengrenzen zwischen Metall und Elektrolytlösung nachzubilden und die damit zusammenhängenden UEP-Signaturen von Wasserfahrzeugen zu berechnen. Quantitativ richtige Ergebnisse sind jedoch nur dann zu erwarten, wenn bei den Simulationen die tatsächlich vorherrschenden Polarisationskennlinien verwendet und die Geometrien ausreichend genau modelliert wurden. Vereinfachte Geometrien und Standard-Polarisationskennlinien⁶ ermöglichen dagegen weiterhin die Untersuchung prinzipieller Zusammenhänge und umgehen gleichzeitig die Problematik, dass die tatsächlichen Signaturen von Wasserfahrzeugen der Deutschen Marine der Geheimhaltung unterliegen und nicht veröffentlicht werden dürfen.

⁶Gemeint sind Polarisationskennlinien die nicht individuell gemessen, sondern aus Datenbanken oder Veröffentlichungen wie z.B. [30] entnommen wurden.

4. Signaturadaption mittels Multipol

Die Ähnlichkeit der Feldverteilung realer UEP-Signaturen mit der Feldverteilung eines Dipols ermutigt zu dem Versuch UEP-Signaturen von Wasserfahrzeugen durch Multipole zu approximieren. In [7] wurden zu diesem Thema bereits umfangreiche Forschungsarbeiten geleistet, wobei für den Ansatz der Begriff *Multipoladaption* eingeführt wurde. Dieses Kapitel soll an die bisherigen Untersuchungen anschließen und die Funktionalität der Multipoladaption anhand gemessener UEP-Signaturen demonstrieren. Zunächst soll eine kurze Einführung in das Konzept und die bisherigen Untersuchungen gegeben werden.

4.1. Konzept und bisherige Untersuchungen

Abbildung 4.1 skizziert die prinzipielle Idee der Multipoladaption: Einem Optimierer wird eine gemessene UEP-Signatur vorgegeben, zu der er im Sinne einer inversen Problemstellung (cf. Kapitel 2.6) eine Verteilung von Punktstromquellen finden soll, die eine möglichst ähnliche UEP-Signatur produziert. Bei der zu adaptierenden UEP-Signatur kann es sich anstelle von Messwerten auch um eine zu Testzwecken berechnete Signatur eines Multipols handeln.

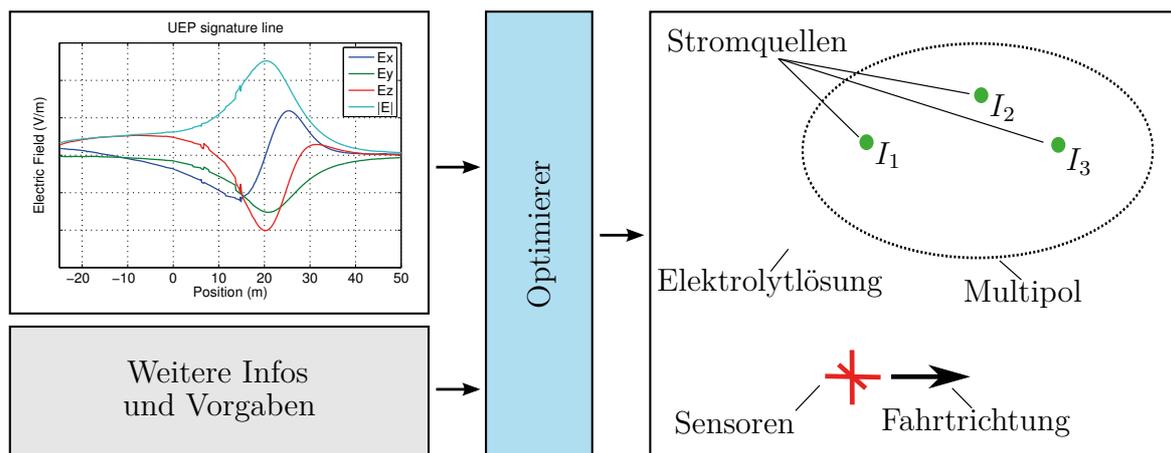


Abbildung 4.1.: Prinzipieller Ablauf der Multipoladaption. *Quelle:* Eigene Herstellung.

dung 4.3). Die Konvergenzgeschwindigkeit konnte erheblich verbessert werden, indem durch das Einbringen weiterer Informationen die effektive Anzahl der Freiheitsgrade reduziert wurde. Zum Einen wurde bei den adaptierten Multipolen ein Verschwinden des Monopol-Moments erzwungen, da dieses auch für reale UEP-Quellenanordnungen immer zutrifft. Des Weiteren wurde ausgenutzt, dass die Flächen unter den Funktionen $E_x(x)$, $E_y(x)$ und $E_z(x)$ bei der adaptierten Signatur genauso groß wie bei der vorgegebenen Signatur sein müssen, was durch eine entsprechende Skalierung der adaptierten Quellenströme herbeigeführt werden kann. Dies führt insgesamt zu folgender Umrechnung:

$$I_j^{\text{neu}} = \left(\frac{\sum_{i=\{x,y,z\}} \int_{x_a}^{x_e} |E_i^a| dx}{\sum_{i=\{x,y,z\}} \int_{x_a}^{x_e} |E_i^v| dx} \right) \cdot I_j^{\text{alt}} - \left(\sum_{i=1}^N \frac{I_i}{N} \right) \quad \forall j \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (4.1)$$

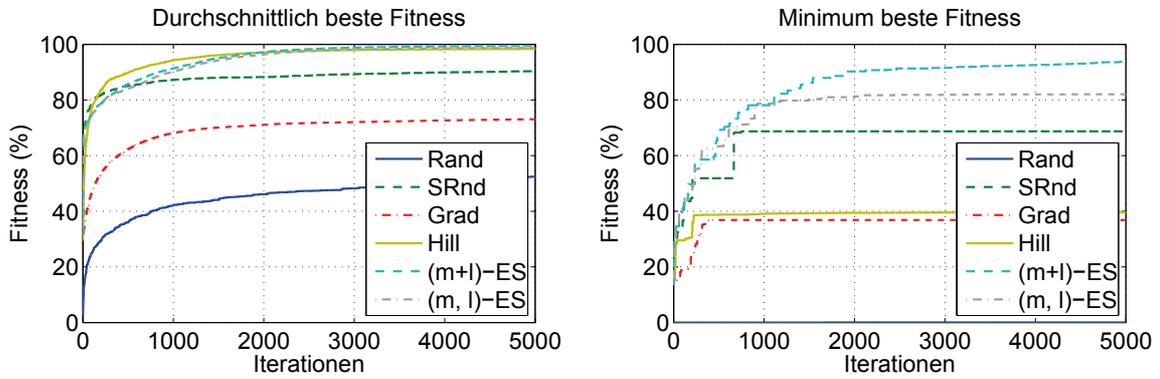


Abbildung 4.3.: Nahfeld-Adaption eines vorgegebenen Dipols durch einen Dipol (Adaption 2-2). Es wurden 100 zufällig generierte Multipole untersucht. Neben der durchschnittlichen Leistungsfähigkeit (links) ist rechts das Worst-Case-Szenario dargestellt. *Smart random search* (SRnd) bezeichnet einen Random search unter Anwendung von Gleichung (4.1). *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [7].

Es konnte gezeigt werden, dass hohe Fitnesswerte mit niedrigen Fernfeld-Abweichungen korrelieren, so dass für einen gut adaptierten Multipol auch jenseits der Signatur-Linie eine gute Übereinstimmung mit der realen Signatur erreicht wird.

4.2. Adaption gemessener Dipolsignaturen

Wie bereits erwähnt, wurden in [7] zu Testzwecken keine gemessenen UEP-Signaturen sondern analytisch berechnete Signaturen als Vorgabe für die Multipoladaption verwendet. Im Folgenden soll untersucht werden, ob die Multipoladaption bei gemessenen Signaturen ebenso erfolgreich wie bei den analytisch generierten Test-Signaturen funktioniert. Hierfür wurde die in Abbildung 4.4 dargestellte Dipolanordnung konstruiert,

4. Signaturadaption mittels Multipol

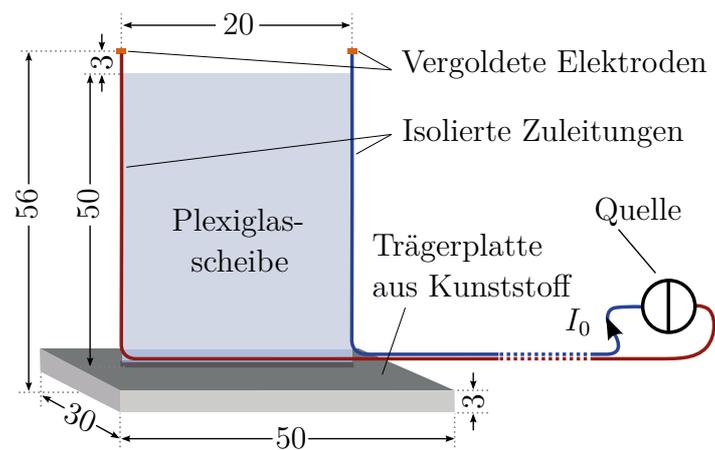


Abbildung 4.4.: Aufbau von Dipol und Halterung zur Positionierung im Messbecken.
Quelle: Eigene Herstellung.

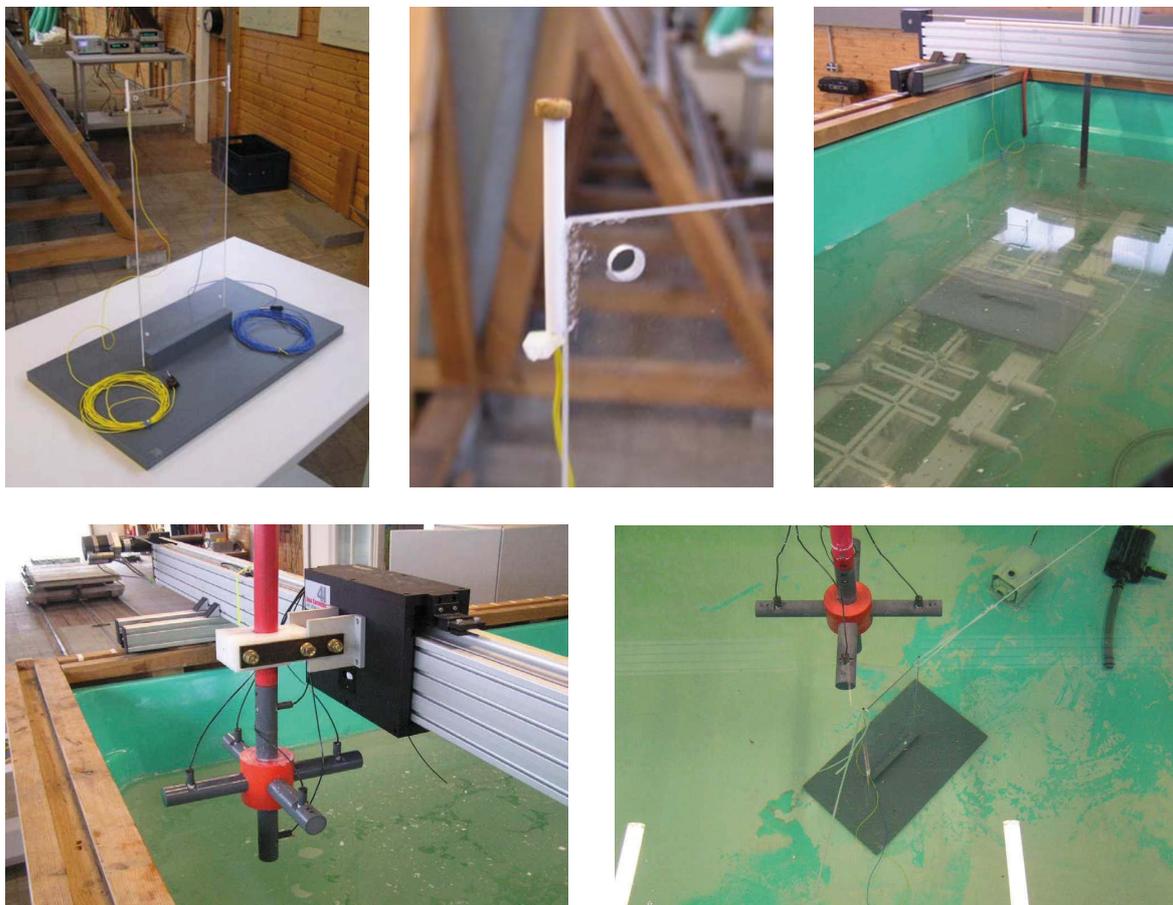


Abbildung 4.5.: Von oben links im Uhrzeigersinn: Dipol vor dem Einsetzen, vergoldete Elektrode, Dipol im Messbecken der EMMA, Schnappschuss während der Überfahrtsmessung und UEP-Sensorkreuz. *Quelle:* Von der WTD 71 zur Verfügung gestellt.

gebaut und in der aus Kapitel 3.2 bekannten Elektromagnetischen-Modell-Messanlage (EMMA) bezüglich ihrer UEP-Signatur vermessen (cf. Abbildung 4.5). Dabei wurde ein elektrischer Dipol in diversen Ausrichtungen (z.B. x -Dipol, y -Dipol, usw.) ortsfest im Becken platziert und von einem auf Schienen geführten UEP-Sensorkreuz überfahren, welches die elektrischen Feldkomponenten in allen drei Raumrichtungen misst.

4.2.1. Messplan, Datenaufbereitung und Adoptionsansatz

Abbildung 4.6 veranschaulicht die verschiedenen Mess-Szenarien, zu denen sich im Anhang C zusätzlich eine umfassende tabellarische Übersicht mit Informationen zu jedem einzelnen Testlauf befindet. Für das erste Szenario, den direkten Überlauf über einen x -Dipol, wurden zusätzliche Testläufe absolviert, die zeigen sollten, ob die gemessene Signatur beständig ist und welches die am besten geeigneten Werte für die Überfahrts-geschwindigkeit und Abtastrate sind. Um zu überprüfen, ob sich das Polarisationsverhalten des Elektrodenmaterials dynamisch ändert, wurden einige Messungen mit einer Spannungsanregung anstelle der sonst verwendeten Stromanregung durchgeführt, wobei vor der Messung bei eingeschaltetem Dipol zwischen 10 min und 30 min gewartet wurde. Die regelmäßig durchgeführten Messungen ohne Anregung (Einspeisung 0 V) sollten eine Überprüfung des Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: *Signal-to-Noise Ratio*, SNR) ermöglichen. Bei einigen Szenarien des Messplans wurde die Dipolposition¹ bewusst nicht vorgegeben, sondern sollte stattdessen von den Mitarbeitern der WTD 71, welche mit der Versuchsdurchführung betraut waren, im Sinne von Blindversuchen gewählt werden. Eine genaue Auswertung war letztendlich leider nicht möglich, da die Positionierung des Dipols während der Blindversuche nicht bzw. offensichtlich fehlerhaft dokumentiert wurde.

Bei den Messungen wurden die drei E-Feld-Komponenten und eine Ortsmarke für die x -Position aufgezeichnet, und die Daten wurden vor der Durchführung der Multipoladaption in diversen Schritten aufbereitet:

1. Einlesen der CSV-Datensätze (Textfiles im *Comma-Separated-Values*-Format) und Konvertierung in eine Matrix.
2. Sortierung der Daten zum Erzeugen einer monotonen x -Abfolge (Daten der Positionserfassung sind teilweise durcheinander).
3. Pairing der Referenzelektroden, also Eliminierung des Sprungs in den gemessenen Feldstärken beim Anfahren des Messkreuzes (cf. Unterkapitel 4.2.2).
4. Korrektur der Daten bezüglich vertauschter Sensoranschlüsse bei einem Teil der Messungen.
5. Umrechnung der x -Werte auf ein Koordinatensystem mit Ursprung in der Beckenmitte.

¹Neben der Position teilweise auch die Dipolorientierung.

4. Signaturadaption mittels Multipol

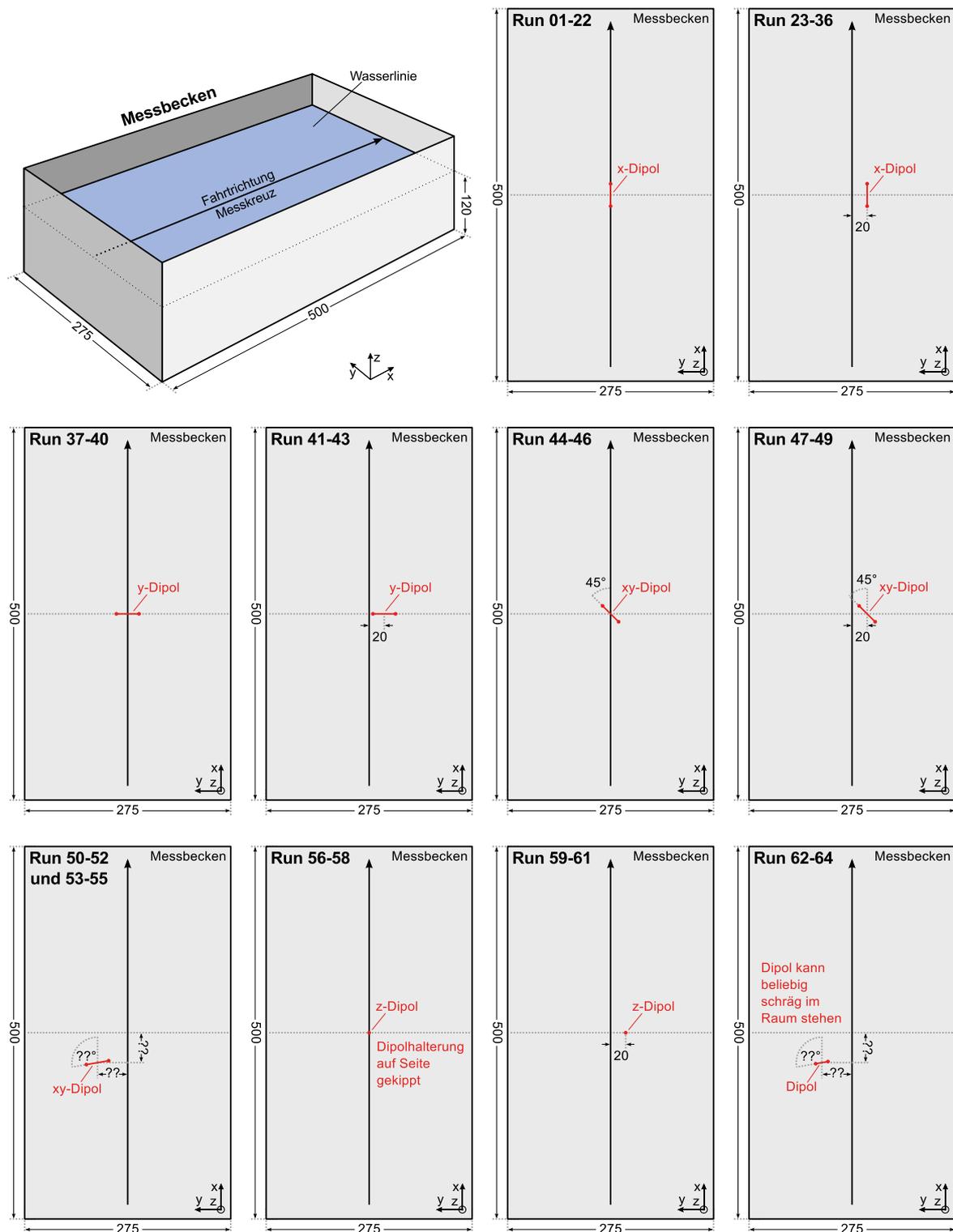


Abbildung 4.6.: Skizzen der untersuchten Szenarien zur Adaption eines unterschiedlich ausgerichteten Dipols. *Quelle:* Eigene Herstellung.

6. Interpolation der Daten auf eine äquidistante x -Abfolge.

Als Optimierer wurde eine (20+140)-ES (cf. Unterkapitel 2.6.2) mit einer festen Anzahl von 10000 Iterationsschritten verwendet, welche bei 460 Signatur-Stützstellen ca. 50 s je Adaption benötigte. Es wurden keine Annahmen über die Dipol-Position gemacht, so dass die Begrenzungsbox (cf. Abbildung 4.2) immer das gesamte Messbecken umfasste. Die seitlichen Beckenwände wurden in der Modellumgebung nicht nachgebildet, da sich sowohl die Sensoren als auch die Anregung in der Mitte des Beckens befanden und die Wände somit einen vernachlässigbar kleinen Einfluss hatten. Um die Adaptionleistung zu verbessern wurden die Feldstärken in der Modellumgebung exakt wie bei der Messung bestimmt, also anhand der Potentialunterschiede an den Positionen der Mess-Elektroden (cf. UEP-Sensorkreuz in Abbildung 4.5).

4.2.2. Ergebnisse der Multipoladaption

Die besten Ergebnisse lieferte eine langsame Überfahrt mit 0,1 m/s bei einer Abtastrate von 20 Hz, weshalb diese Einstellungen für die späteren Messläufe (Run 37-64) vorwiegend verwendet wurden. Schnellere Überfahrtsgeschwindigkeiten erhöhten den Sprung in den gemessenen Feldstärken beim Anfahren des Messkreuzes, der wahrscheinlich durch die Anströmung der Messelektroden und der damit verbundenen Änderung des Polarisationsverhaltens bedingt war. Bei einer höheren Abtastrate von 2 kHz wurde lediglich mehr hochfrequentes Rauschen aufgezeichnet, während keine bessere Erfassung der relativ glatten Signaturverläufe erzielt werden konnte.

In den Testläufen mit Spannungsanregung (Run 15-22) blieb der Gesamtstrom zunächst relativ konstant und es ergab sich eine qualitativ vergleichbare Signatur wie bei der Stromanregung. Bei den Messungen, denen unterschiedliche Wartezeiten in eingeschaltetem Zustand vorausgingen (Run 17-20), konnte jedoch eine kontinuierliche Abnahme des Stromes von Messung zu Messung beobachtet werden (cf. Tabelle 4.1). Gleichzeitig war eine Auflösung der ursprünglich goldbeschichteten Elektroden zu beobachten, die nach Run 22 derart beschädigt waren, dass sie ersetzt werden mussten. Wie schon bei der Ausarbeitung des Messplans vermutet und berücksichtigt wurde, ist eine Stromanregung besser für den Adaptionversuch geeignet, da hier ein Gleichbleiben des Dipolmomentes durch Nachregelung der treibenden Spannung sichergestellt wird.

	Run 15	Run 17	Run 18	Run 19	Run 20
Stromaufnahme	4,22 mA	4,03 mA	3,00 mA	2,17 mA	2,15 mA
Zeit seit Run 15	-	> 10 min	> 20 min	> 30 min	> 60 min

Tabelle 4.1.: Zeitliche Änderung der Stromaufnahme bei Dipol mit einer 2 V Spannungsanregung. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Durch die wiederholten Messungen bei ausgeschalteter Anregung (Run 06, 08, 11, usw. cf. Kapitel C.1 im Anhang C) konnte auch das Rauschverhalten der UEP-Sensoren dokumentiert werden. Dieses änderte sich im Laufe der Messungen jedoch nicht wesentlich, und bestand aus einem niederfrequenten Rauschen das von einem höherfrequenten Anteil mit einer Amplitude bis von ca. $5 \cdot 10^{-6}$ V/m überlagert wurde (cf. Abbildung 4.7). Der Optimierer schaffte es erstaunlicherweise den niederfrequenten Rauschteil mittels weit außerhalb liegender Elektroden zu adaptieren.

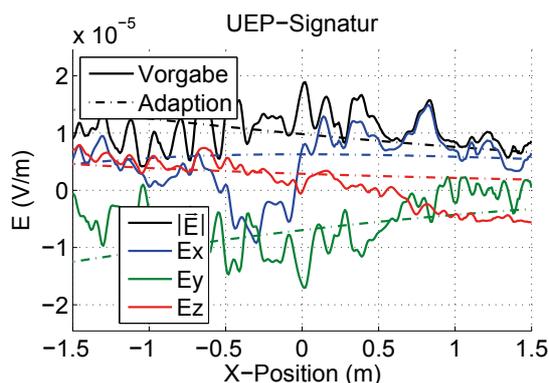


Abbildung 4.7.: Run 06. Adaption bei Überlauf ohne Anregung. Der Optimierer schafft es erstaunlicherweise das niederfrequente Rauschen zu adaptieren ($abw = 66,4\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Multipoladaption für die verschiedenen Dipol-Ausrichtungen diskutiert werden, wobei jeweils die Signaturabweichung (abw , cf. Gleichung (3.21)) und falls möglich die *Fernfeldabweichung* (ffa) angegeben wird. Letztere wurde in [7] wie folgt als Qualitätsmaß für die Multipoladaption eingeführt:

$$ffa = \frac{|\vec{p}_a - \vec{p}_v|}{|\vec{p}_v|} \quad (4.2)$$

Dabei sind \vec{p}_a und \vec{p}_v die mittels Multipolentwicklung (cf. Kapitel 2.3.6) berechneten Dipolmomente des adaptierten bzw. vorgegebenen Multipols.

Run 01-36. Adaption x-Dipol

Die Multipoladaption des x -Dipols liefert für den direkten (cf. Abbildung 4.8) und den seitlichen (cf. Abbildung 4.9) Überlauf gute Ergebnisse. Die UEP-Signaturen der verschiedenen Testläufe werden nahezu perfekt nachgebildet, während der Schwerpunkt der Elektrodenpositionen und die Dipolmomente ebenfalls zufriedenstellend angenähert werden. Für die Adaption des x -Dipols liegt die Signaturabweichung zwischen 13% und 23% und die Fernfeldabweichung zwischen 6% und 25%. Eine Ausnahme bilden Run 12 und 18, bei denen jedoch offensichtlich fehlerhaft gemessene E_y -Werte vorliegen (cf. Abbildung 7 im Anhang C).

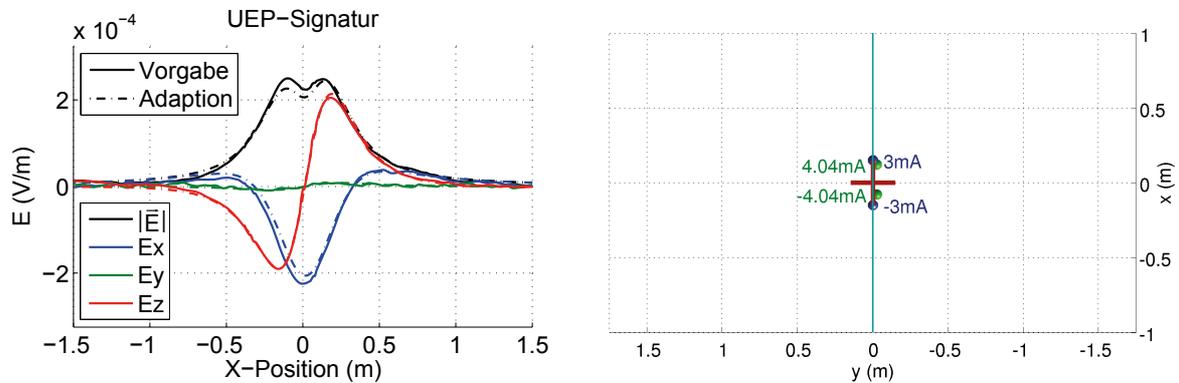


Abbildung 4.8.: Run 05. Adaption des gemessenen x -Dipols bei direktem Überlauf. Weitere Grafiken in Abbildung 5 im Anhang C ($abw = 17,6\%$, $ffa = 10,7\%$). Wie schon in Abbildung 4.2 angegeben, kennzeichnen die blauen Punkte die vorgegebenen bzw. tatsächlichen Quellen während die grünen Punkte die Positionen der adaptierten Quellen angibt. Das rote Kreuz kennzeichnet den UEP-Sensor bei $x = 0$. *Quelle:* Eigene Herstellung.

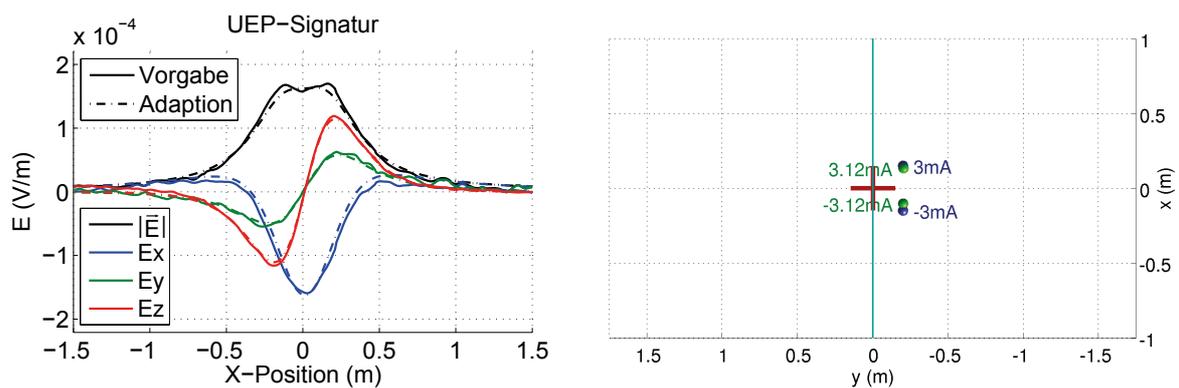


Abbildung 4.9.: Run 27. Adaption des gemessenen x -Dipols bei seitlichem Überlauf. Weitere Grafiken in Abbildung 6 im Anhang C ($abw = 17,8\%$, $ffa = 18,0\%$). *Quelle:* Eigene Herstellung.

Run 37-43. Adaption y-Dipol

Die UEP-Signaturen des y-Dipoles werden gut adaptiert (cf. Abbildung 4.10 und 4.11), während die adaptierten Elektrodenpositionen mitunter stark vom Original abweichen, und teilweise sogar oberhalb des Messkreuzes liegen. Beim direkten Überlauf müssen theoretisch alle Komponenten außer der E_y -Komponente Null sein, was in Abbildung 4.10 jedoch offensichtlich nicht der Fall ist. Daher kann gefolgert werden, dass der Dipol bei der Messung nicht perfekt in y -Richtung des Messkreuzes ausgerichtet gewesen sein muss – eine Ungenauigkeit die vor allem die Werte für die Fernfeldabweichung negativ beeinflusst. Es kann zudem überlegt werden, dass bei symmetrischen Anordnungen mit vergleichbarem Charakter (xz -Symmetrieebene) die Elektrodenpositionen durch den Multipoladaptionsansatz prinzipiell nicht eindeutig bestimmt werden können. Die Signaturabweichung bei der Adaption des y-Dipols liegt zwischen 11 % und 15 %, und die Fernfeldabweichung zwischen 8 % und 38 %.

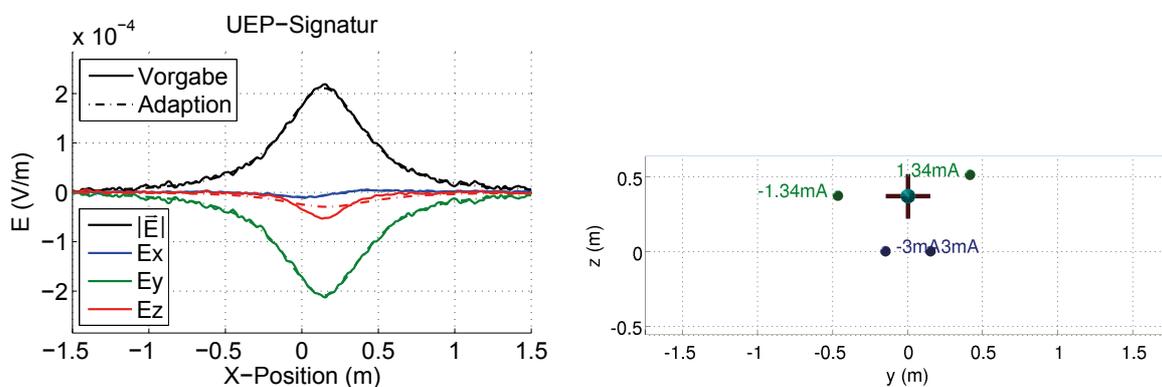


Abbildung 4.10.: Run 37. Adaption des gemessenen y-Dipols bei direktem Überlauf. Weitere Grafiken in Abbildung 8 im Anhang C ($abw = 12,5\%$, $ffa = 37,8\%$). *Quelle:* Eigene Herstellung.

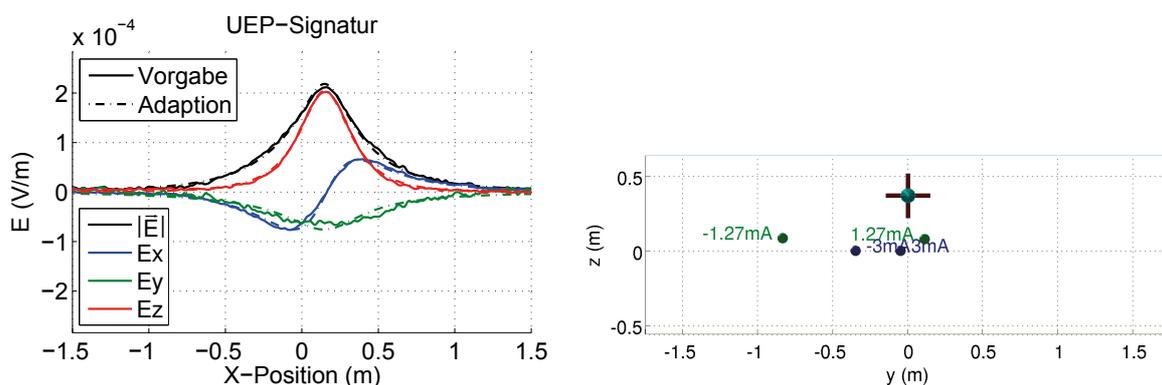


Abbildung 4.11.: Run 41. Adaption des gemessenen y-Dipols bei seitlichem Überlauf. Weitere Grafiken in Abbildung 9 im Anhang C ($abw = 13,4\%$, $ffa = 36,8\%$). *Quelle:* Eigene Herstellung.

Run 44-49. Adaption xy-Dipol

Sowohl die UEP-Signatur, als auch die Elektrodenpositionen werden für den direkten und den seitlichen Überlauf über den xy-Dipol gut adaptiert (cf. Abbildung 4.12 und 4.13). Die Signaturabweichung liegt zwischen 12 % und 28 %, und die Fernfeldabweichung zwischen 18 % und 24 %.

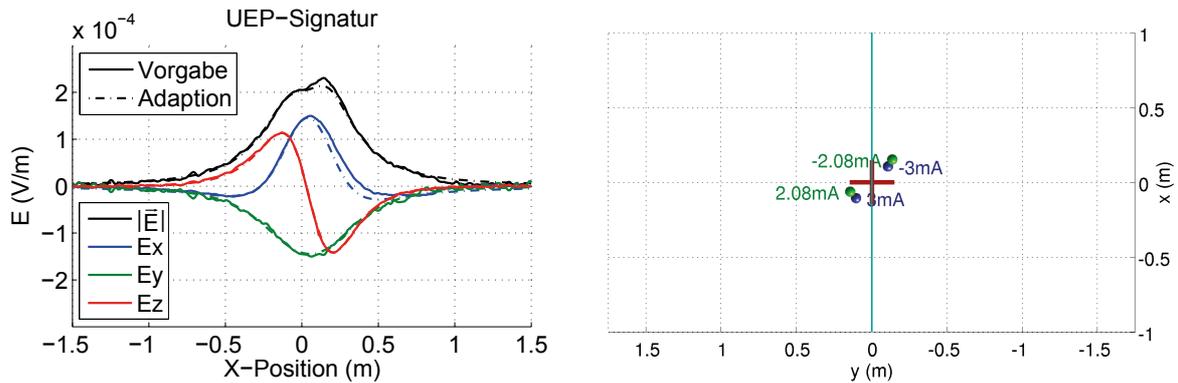


Abbildung 4.12.: Run 45. Adaption des gemessenen xy-Dipols bei direktem Überlauf. Weitere Grafiken in Abbildung 10 im Anhang C ($abw = 12,3\%$, $ffa = 22,0\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

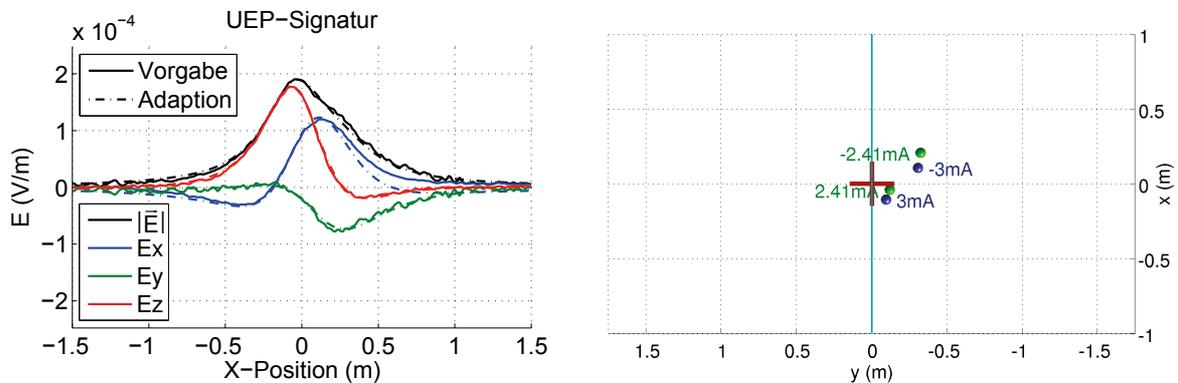


Abbildung 4.13.: Run 47. Adaption des gemessenen xy-Dipols bei seitlichem Überlauf. Weitere Grafiken in Abbildung 11 im Anhang C ($abw = 21,8\%$, $ffa = 18,0\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

Run 56-61. Adaption z-Dipol

Zunächst muss festgestellt werden, dass bei den Messungen zum z-Dipol aufgrund der geringeren Signaturstärke offensichtlich ein kleineres SNR als bei den anderen Dipol-Ausrichtungen vorliegt, so dass ein fairer Vergleich der Adaptionsqualitäten nicht unbedingt gegeben ist. Für den direkten und den seitlichen Überlauf über den z-Dipol liefert

die Multipoladaption nur bei Run 57 bzw. 59 einigermaßen befriedigende Ergebnisse, bei denen die Signaturabweichung zwischen 25 % und 37 % und die Fernfeldabweichung zwischen 52 % und 54 % liegt (cf. Abbildung 4.14 und 4.15).

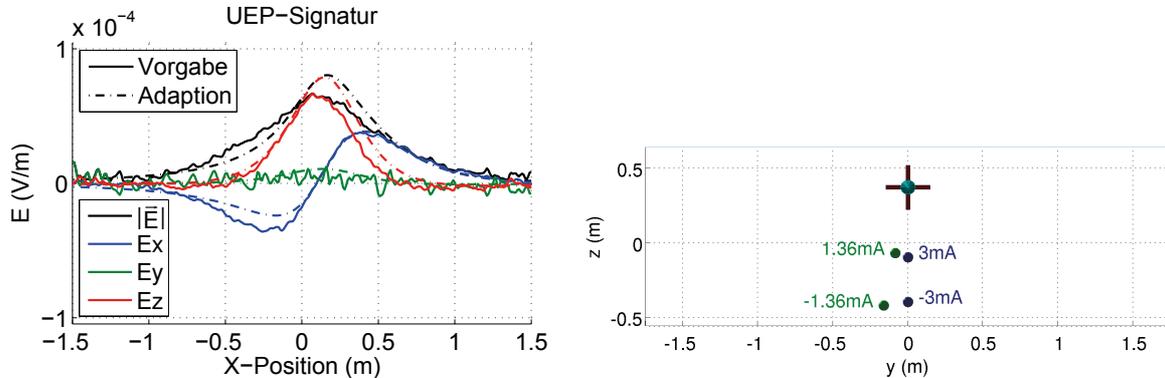


Abbildung 4.14.: Run 57. Adaption des gemessenen z-Dipols bei direktem Überlauf. Weitere Grafiken in Abbildung 15 im Anhang C ($abw = 36,5\%$, $ffa = 53,3\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

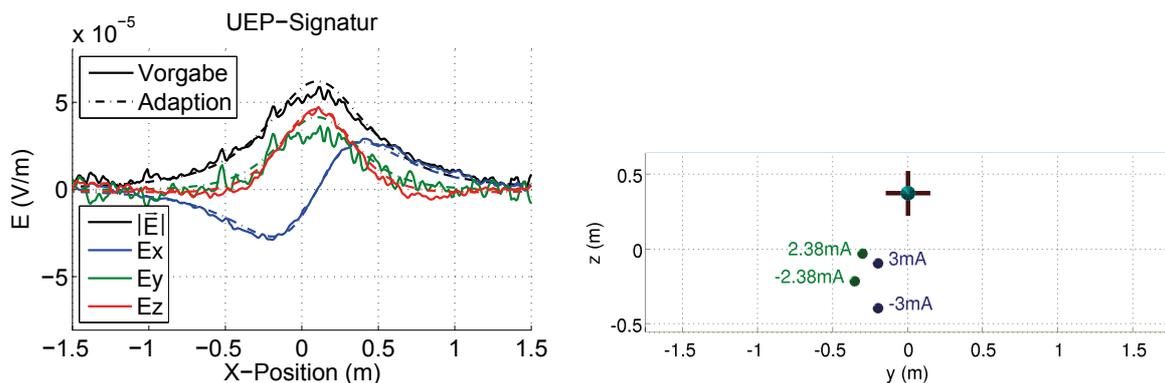


Abbildung 4.15.: Run 59. Adaption des gemessenen z-Dipols bei seitlichem Überlauf. Weitere Grafiken in Abbildung 16 im Anhang C ($abw = 25,9\%$, $ffa = 52,9\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

Bei Run 56 (cf. Abbildung 4.16) und 60 (nicht dargestellt) findet der Optimierer hingegen nur die obere Elektrode, an der das Messkreuz am nächsten vorbeifährt, während die zweite adaptierte Elektrode weit nach außen gelegt wird. Es wird in diesem Fall also faktisch mit einem Monopol adaptiert, wodurch die Fernfeldabweichung auf Werte von bis zu 380,0 % ansteigt.

Die Adaption des z-Dipols zeigt, dass bei der Multipoladaption prinzipiell Probleme für solche Nahfeld-Szenarien zu erwarten sind, bei denen ein Teil der Quellen deutlich näher an den Sensoren liegt als der Rest. Die gemessene UEP-Signatur wird unter diesen Bedingungen maßgeblich durch die nächstgelegenen Quellen geprägt und erscheint

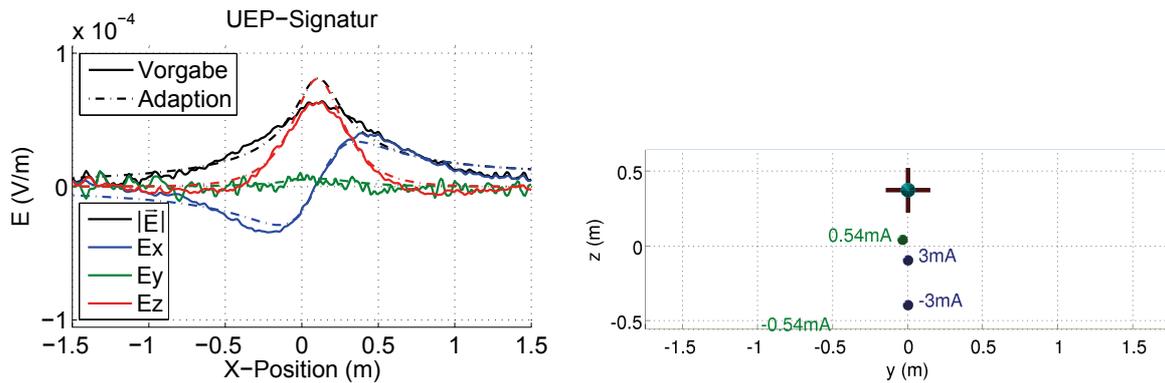


Abbildung 4.16.: Run 56. Fehlerhafte Adaption des z-Dipols bei direktem Überlauf. Es wird nur die obere Elektrode gefunden während die andere weit außerhalb liegt, so dass faktisch mit einem Monopol adaptiert wird. Weitere Grafiken in Abbildung 14 im Anhang C ($abw = 38,8\%$, $ffa = 284,0\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

dem Optimierer fälschlicherweise als Signatur eines Multipols geringerer² Ordnung. Run 57 und 59 zeigen jedoch, dass der Optimierer trotzdem nicht zwangsläufig versagen muss. Es ist mitunter lediglich mehr Vorwissen erforderlich, so dass die Strategieparameter und Anfangsbedingungen³ angepasst werden können, bis der Optimierer einen plausiblen Multipol liefert.

Run 50-55 und 62-64. Adaption unbekannter Dipole

Bei Run 50 bis 55 werden die UEP-Signaturen mit einer Signaturabweichung zwischen 13% und 27% gut adaptiert (cf. Abbildung 4.17 und 4.18), während bei Run 62 bis 64 aufgrund des sehr schlechten SNR keine brauchbaren Ergebnisse zu erwarten sind (cf. Abbildung 4.19 und 4.20). Ob die adaptierten Quellen vom Optimierer korrekt positioniert wurden kann aus bereits genannten Gründen leider nicht mehr nachvollzogen werden. Die Ergebnisse für Run 50 bis 55 erscheinen jedoch plausibel, da die Quellen entsprechend der Vorgabe des Messplans in der xy-Ebene liegen und den richtigen Abstand haben (beides näherungsweise).

4.3. Umrechnung auf geänderte Umgebung

Nachdem aus einer UEP-Signatur-Linie mittels Multipoladaption die dazugehörige Quellenanordnung zurückgerechnet wurde, lässt sich diese zur Berechnung der UEP-Signatur für beliebige Umgebungsbedingungen verwenden. Für geometrisch einfache

²Im Fall von Run 56 und 60 als Monopol- anstatt als Dipol.

³Manchmal reicht die manuelle Änderung der Initialisierung (Seed) für den Zufallsgenerator.

4. Signaturadaption mittels Multipol

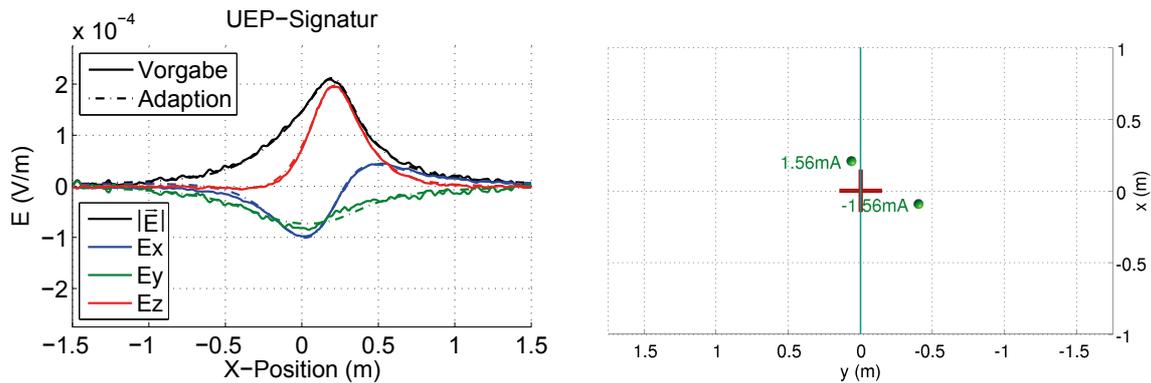


Abbildung 4.17.: Run 51. Adaption des gemessenen unbekanntes xy-Dipols bei unbekanntem Überlauf (#1). Weitere Grafiken in Abbildung 12 im Anhang C ($abw = 13,4\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

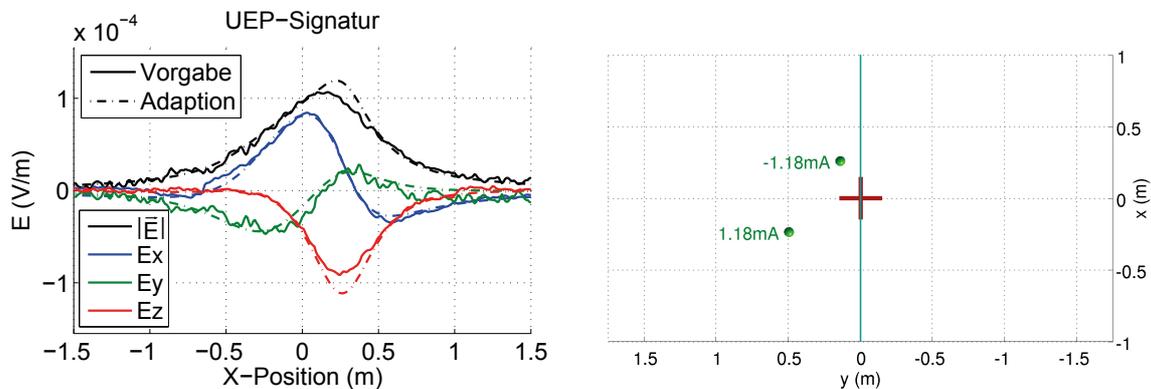


Abbildung 4.18.: Run 53. Adaption des gemessenen unbekanntes xy-Dipols bei unbekanntem Überlauf (#2). Weitere Grafiken in Abbildung 13 im Anhang C ($abw = 24,0\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

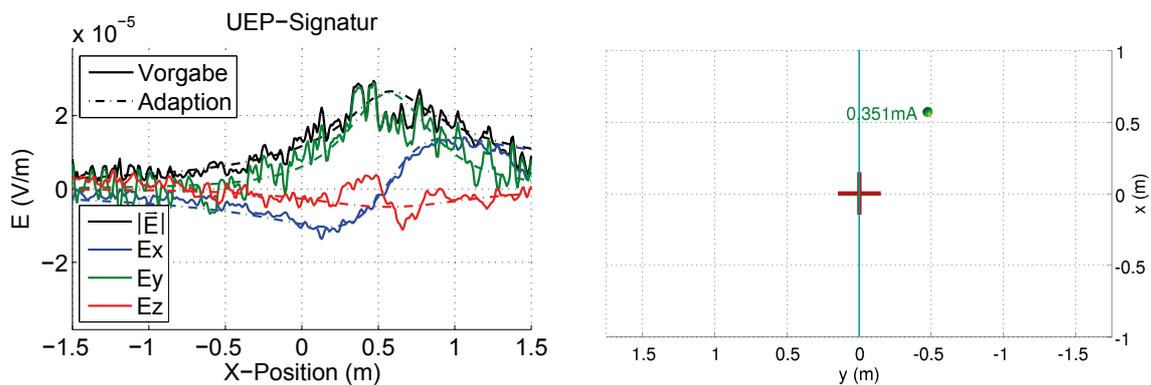


Abbildung 4.19.: Run 63. Adaption des gemessenen unbekanntes Dipols bei unbekanntem Überlauf (#1). Weitere Grafiken in Abbildung 17 im Anhang C ($abw = 41,6\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

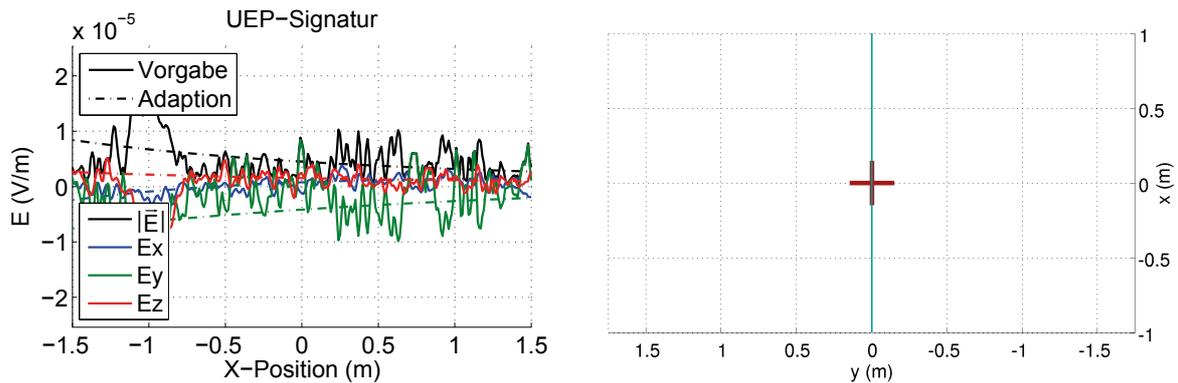


Abbildung 4.20.: Run 64. Adaption des gemessenen unbekanntes Dipols bei unbekanntem Überlauf (#2). Weitere Grafiken in Abbildung 18 im Anhang C ($abw = 100,3\%$). Quelle: Eigene Herstellung.

Ziel-Umgebungen mit plan und parallel verlaufendem Seeboden und Wasserlinie ist dieses in gleicher Weise wie bei der Modellumgebung (cf. Abbildung 4.2) mittels Spiegelungsmethode möglich (cf. Unterkapitel 2.3.5). Ebenso sind aber auch numerische Simulationen mit asymmetrischen Umgebungsgeometrien möglich (z.B. Seeboden-Unebenheiten, Hafentwände, etc.). Voraussetzung ist natürlich, dass sich durch die veränderten Umgebungsbedingungen die Quellenverteilung nicht maßgeblich ändert, also keine bemerkenswerte Änderung des Polarisationsverhaltens oder der Arbeitspunkte der Phasengrenzen auftritt, wie es insbesondere bei einer Änderung der Wasserleitfähigkeit vorkommt (cf. [5]).

4.4. Abgrenzung zwischen UEP-Nah- und Fernfeld

Neben der Umrechnung auf andere Umgebungsbedingungen bietet der Ansatz der Multipoladaption noch weitere interessante Möglichkeiten um Informationen über die adaptierten Signaturen zu gewinnen. Wie bereits in [7] beschrieben, lässt sich durch die Aufteilung der UEP-Signatur in die verschiedenen Multipolordnungen auf das Abklingverhalten schließen. So klingen die Multipol-Anteile höherer Ordnung⁴ schneller ab als die Anteile niedrigerer Ordnung, wie beim Ausdruck für das elektrische Potential (cf. Gleichung (2.62)) anhand des Faktors $r^{-(n+1)}$ nachvollzogen werden kann. Das Fernfeld eines Multipols wird daher stets durch den Anteil der geringsten Multipolordnung bestimmt, welcher bei UEP-Signaturen in der Regel der Dipolanteil ist (cf. Gleichung (2.67)). Das elektrische Potential im UEP-Fernfeld klingt demnach proportional zu $1/r^2$ ab, und die Amplitude der elektrischen Feldstärke (Signaturstärke) entsprechend proportional zu $1/r^3$.

⁴Die Multipolordnung n entspricht der Ordnung des entsprechenden Legendre'schen Polynoms der Reihenentwicklung in Gleichung (2.62).

4.4.1. Bisherige Ansätze

Während die Frage der Charakteristik des UEP-Fernfeldes zufriedenstellend geklärt zu sein scheint, hat sich bislang kein belastbares Kriterium für die räumliche Abgrenzung zwischen UEP-Nah- und Fernfeld etabliert. Für Strahlungsfelder elektromagnetischer Wellen existiert bereits eine Vielzahl üblicher Definitionen (cf. [36]), von denen jedoch keine direkt auf UEP übertragen werden kann. Weil die Feldwerte in der unmittelbaren Nähe eines UEP-Multipols vor allem durch die nächstgelegenen Quellen bestimmt werden (cf. Adaption z-Dipol in Kapitel 4.2.2), wurde in [7, S.9] überlegt, dass ein sinnvolles Kriterium zur Unterscheidung zwischen Nah- und Fernfeld den maximalen Abstand der einzelnen Quellen zueinander beinhalten sollte. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Holmes in [9, S.1] für magnetische Signaturen, indem er das Nahfeld als das Gebiet beschreibt, in dem der Abstand des Beobachtungspunktes zum Wasserfahrzeug „deutlich kleiner“ als dessen Länge ist. Diese Abgrenzung ist in der Praxis auch für UEP anwendbar, stellt jedoch eher eine grobe Schätzung dar, welche z.B. für den Fall, dass Anoden und Kathoden nicht über die gesamte Länge des Wasserfahrzeugs verteilt sind, einen zu großen Nahfeldbereich ergibt. Im Folgenden soll daher eine genauere Definitionsmöglichkeit für die Abgrenzung zwischen UEP-Nah- und Fernfeld auf Basis der Multipolentwicklung hergeleitet werden.

4.4.2. Abweichung vom Dipolfeld

Wie bereits erwähnt, ist an einem Beobachtungspunkt mit ausreichend großem Abstand zum Multipol die Gesamtfeldstärke \vec{E}_G näherungsweise gleich der Feldstärke \vec{E}_D des Dipolanteils, da die übrigen Anteile soweit abgeklungen sind, dass sie vernachlässigt werden können. Bei sukzessiver Annäherung des Beobachtungspunktes an den Multipol liefern die Anteile höherer Ordnungen einen immer größeren Beitrag, so dass das Gesamtfeld immer stärker vom Feld des Dipolanteils abweicht. Abbildung 4.21 und 4.22 veranschaulichen dies anhand von Konturlinien⁵ der elektrischen Feldstärke am Beispiel des aus Kapitel 2.3.4 bekannten physikalischen Dipols und Multipols. Wie erwartet decken sich die Konturlinien von Gesamtfeld und Dipolanteil in der Nähe der Quellen deutlich schlechter als in den weiter entfernt liegenden Bereichen.

Anhand der zuvor beschriebenen Überlegungen lässt sich nun ein Maß für die Abweichung des Gesamtfeldes von seinem Dipolanteil definieren:

$$dab(\vec{r}) = \frac{|\vec{E}_G - \vec{E}_D|}{|\vec{E}_D|} \quad (4.3)$$

Diese im Folgenden als *Dipolabweichung* ($dab(\vec{r})$) bezeichnete Größe ordnet jedem Ort einen Prozentwert zu, der als relative Abweichung des Gesamtfeldes von seinem Dipolanteil verstanden werden kann. Anders formuliert beschreibt $dab(\vec{r})$ den Fehler

⁵Es handelt sich eigentlich um Konturflächen, die im Querschnitt jedoch Konturlinien ergeben.

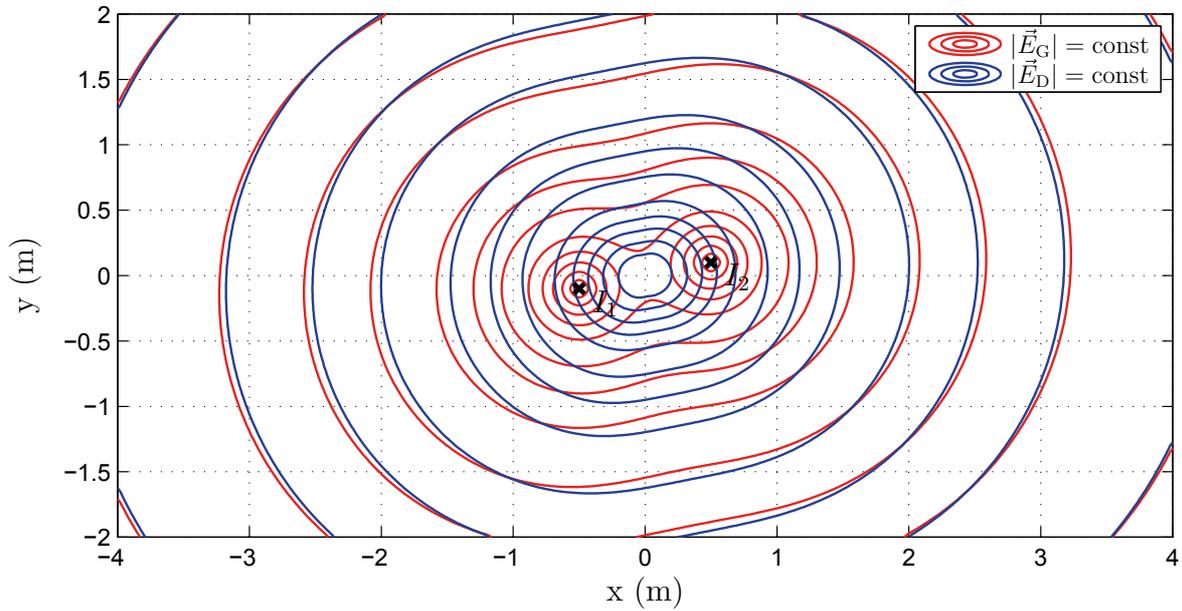


Abbildung 4.21.: Konturlinien der elektrischen Feldstärke für das Gesamtfeld (rot) und seinen Dipolanteil (blau). Bei der Quellenverteilung handelt es sich um den aus Abbildung 2.11 bekannten physikalischen Dipol. *Quelle:* Eigene Herstellung.

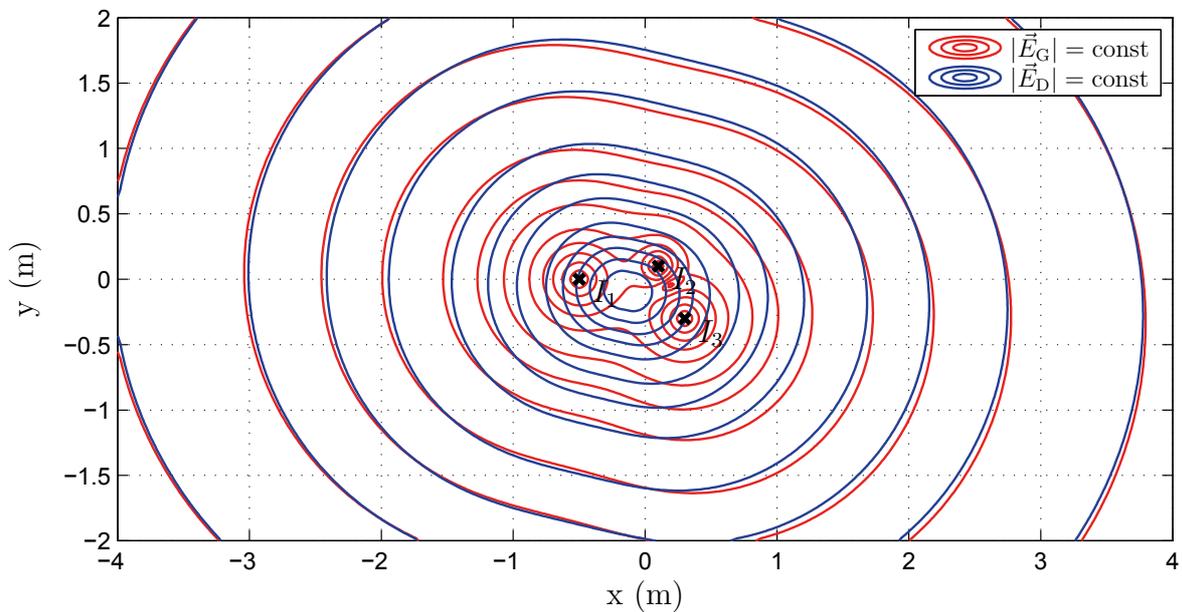


Abbildung 4.22.: Konturlinien der elektrischen Feldstärke für das Gesamtfeld (rot) des Multipols aus Abbildung 2.13 und seinen Dipolanteil (blau). *Quelle:* Eigene Herstellung.

bei der Annahme, dass der Ort \vec{r} dem Fernfeldbereich zuzuordnen ist und liefert somit eine quantitative Beschreibung für den Unterschied zwischen tatsächlich vorliegender Feldcharakteristik und Fernfeldcharakteristik. Abbildung 4.23 und 4.24 visualisieren die Dipolabweichung für die bekannten Beispiel-Multipole in der xy -Ebene.

Bei der Bestimmung der Dipolabweichung ist in der Regel noch eine Umrechnung nötig, die bisher nicht angesprochen wurde. In Abbildung 4.22 ist zu erkennen, dass der Mittelpunkt \vec{p}_D des Dipolfeldes (Position des mathematischen Dipols) auf den Schwerpunkt der Multipol-Quellenverteilung gesetzt wurde:

$$\vec{p}_D = \sum_{i=1}^N \frac{|I_i|}{I_m} \vec{r}_i \quad (4.4)$$

Dabei steht I_m für die durchschnittliche Quellengröße:

$$I_m = \sum_{i=1}^N \frac{|I_i|}{N} \quad (4.5)$$

Dies sorgt dafür, dass eine Verschiebung des Multipols nicht in einer qualitativen Änderung der Dipolabweichung resultiert, sondern dass die Dipolabweichung ebenfalls lediglich verschoben wird. In der Praxis könnte es stattdessen sinnvoll sein \vec{p}_D in die geometrische Mitte des Wasserfahrzeugs zu setzen und diese somit als Mittelpunkt des Fernfeldes zu definieren.

4.4.3. Anwendung zur Nah-/Fernfeld-Lokalisierung

Eine örtliche Abgrenzung zwischen Nah- und Fernfeld lässt sich einfach anhand eines konstanten Grenzwertes für die Dipolabweichung festlegen, bei dem es sich anschaulich gesehen um eine Konturlinie der Dipolabweichung handelt. Orte an denen der Grenzwert überschritten wird gehören zum Nahfeld, während Orte an denen er unterschritten wird dem Fernfeld zuzuordnen sind. In Abbildung 4.25 und 4.26 ist die Aufteilung in Nah- und Fernfeld für verschiedene Grenzwerte dargestellt.

Welcher konkrete Zahlenwert als Grenzwert ausgewählt werden sollte, muss im jeweiligen Anwendungsfall in Hinblick auf die tolerierbare Abweichung der Feldcharakteristik entschieden werden. Der Unterteilung auf Basis der Länge des Wasserfahrzeugs (cf. Unterkapitel 4.4.1) kann anhand der Lage der Konturlinien und dem Abstand der beiden Quellen in Abbildung 4.25 beispielsweise ein Grenzwert von ungefähr 20% zugeordnet werden. Abhängig von der Quellenverteilung auf der Hülle kann der Wert aber auch deutlich kleiner ausfallen, z.B. wenn sich die Quellen am Heck des Wasserfahrzeugs konzentrieren. Da sich die Nah-/Fernfeld-Abgrenzung mittels Dipolabweichung dagegen stets auf die tatsächliche Quellenverteilung bezieht, liefert sie hinsichtlich der Feldcharakteristik eine genauere und zuverlässigere Unterteilung. Natürlich ist sie im Gegenzug deutlich aufwändiger, da zunächst das Fernfeld-Dipolmoment des Wasserfahrzeugs bestimmt werden muss (z.B. mittels Messung der Signatur und anschließender Multipoladaption).

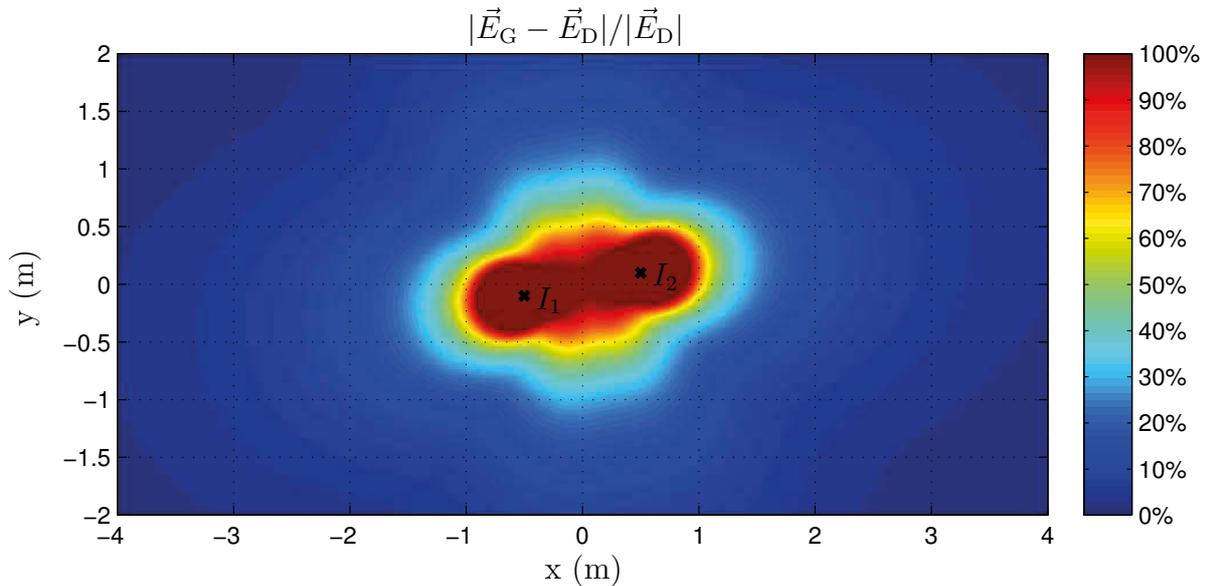


Abbildung 4.23.: Dipolabweichung, also die relative Abweichung des Gesamtfeldes von seinem Dipolanteil, für den aus Abbildung 2.11 bekannten physikalischen Dipol. *Quelle:* Eigene Herstellung.

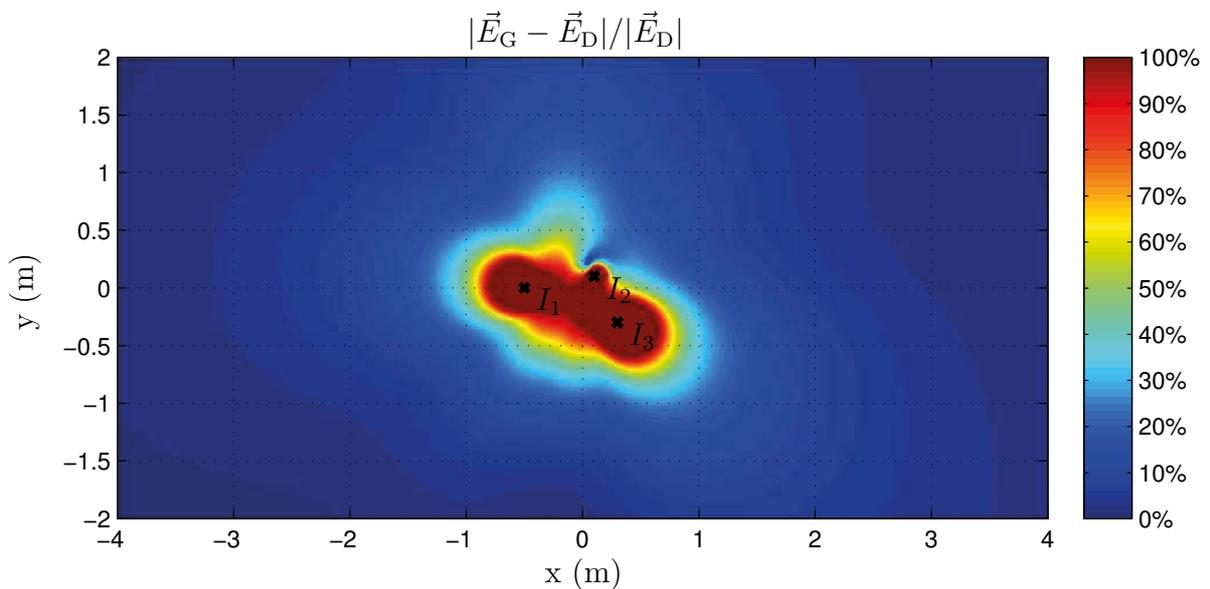


Abbildung 4.24.: Dipolabweichung für den aus Abbildung 2.13 bekannten Multipol. *Quelle:* Eigene Herstellung.

4. Signaturadaption mittels Multipol

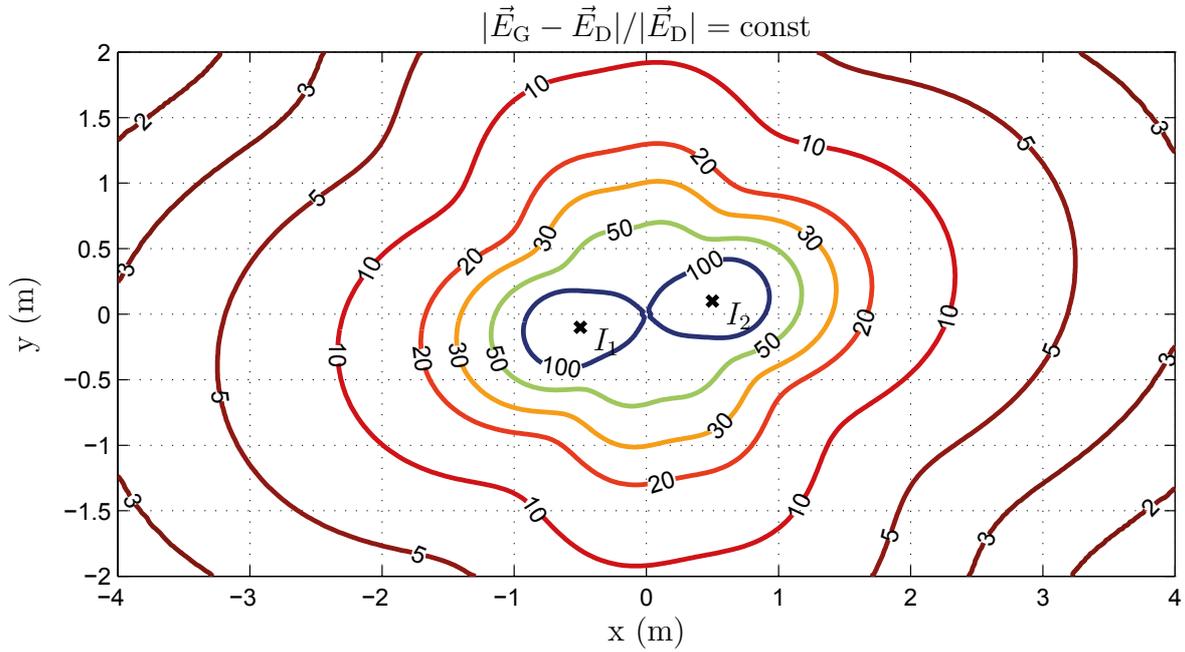


Abbildung 4.25.: Konturlinien der Dipolabweichung aus Abbildung 4.23 als Grenzwerte (in %) für die Nah-/Fernfeld-Unterteilung. *Quelle:* Eigene Herstellung.

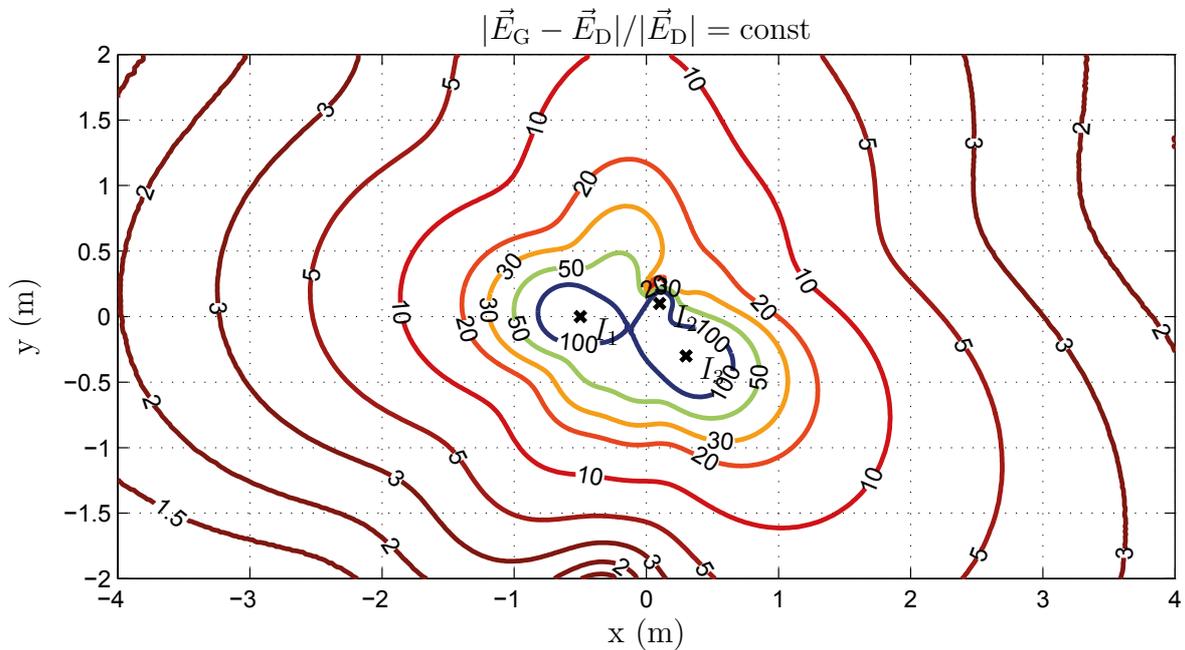


Abbildung 4.26.: Konturlinien der Dipolabweichung aus Abbildung 4.24 als Grenzwerte (in %) für die Nah-/Fernfeld-Unterteilung. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5. Echtzeit-Überwachung für ISSM

Im Sinne einer konsequenten Weiterentwicklung des S-MES-Ansatzes¹ werden von der NATO² aktuell ISSM-Systeme (engl.: Integrated Ship Signature Management Systems) entworfen, mit denen neben der magnetischen Signatur auch die übrigen Teilsignaturen kontrolliert werden können. Eine wichtige konzeptuelle Grundlage des Signatur-Managements ist die Möglichkeit zur Echtzeit-Überwachung der eigenen Signatur, wobei insbesondere von Interesse ist, welche Signatur ein evtl. vorhandener gegnerischer Sensor in der aktuellen Situation sehen würde.

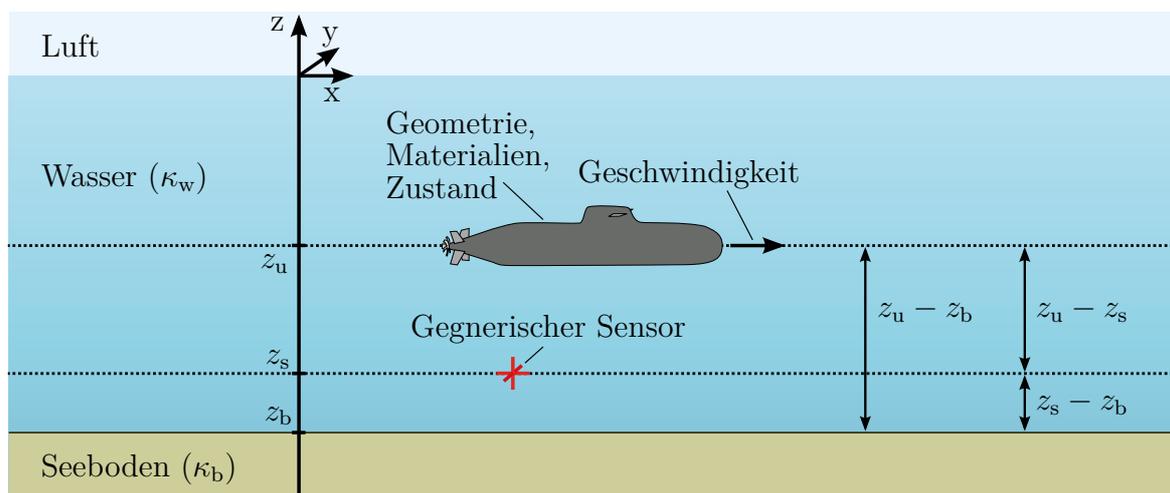


Abbildung 5.1.: Überblick aller wichtigen Größen die Einfluss auf die UEP-Signatur haben. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Um diese Frage hinsichtlich UEP zu beantworten ist es in der Regel nicht möglich bzw. praktikabel, kontinuierlich Messungen an den vermutlichen Positionen der gegnerischen Sensoren durchzuführen. Im Folgenden sollen daher alternative Ansätze zur Schätzung der UEP-Signatur an den entsprechenden Positionen vorgestellt werden, die sich bezüglich der Umrechnungs-Möglichkeiten und der verwendeten bzw. benötigten Informationen unterscheiden. Abbildung 5.1 gibt in diesem Zusammenhang einen Überblick aller wichtigen Größen die Einfluss auf die UEP-Signatur haben, und auf die im weiteren Verlauf des Kapitels Bezug genommen wird.

¹Störfeldgeregelter Magnetischer Eigenschutz, engl.: Closed Loop Degaussing, cf. Kapitel 2.1.2.

²Insbesondere durch das „Centre for Ship Signature Management“ (CSSM).

5.1. Konzept und bisherige Untersuchungen

Die im Folgenden untersuchten Umrechnungsansätze haben die Gemeinsamkeit, dass sie eine im Vorfeld gemessene *Referenzsignatur* (cf. Abbildung 19 bis 24 in Anhang D) auf die gegenwärtigen Umgebungsbedingungen umrechnen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Umgebungsbedingungen der Referenzmessung bekannt sind und die aktuellen Werte für Wasserleitfähigkeit κ_w und Wassertiefe z_b kurzfristig bestimmt werden können. Auch die Sensortiefe z_s soll in Hinblick auf Bodenminen als bekannt angenommen werden ($z_s \approx z_b$), während die Seebodenleitfähigkeit κ_b , sofern nicht explizit angemerkt, als unbekannt angenommen werden soll. Der getauchte Zustand wird nicht betrachtet, so dass für die Tauchtiefe jederzeit $z_u = 0$ gilt. Die Umrechnung soll ohne umfangreiche numerische Simulationen auskommen und somit eine unmittelbare Schätzung der aktuellen Signaturstärke erlauben.

In den Forschungsberichten [37] und [38] wurden bereits zwei entsprechende Ansätze namens *Wellenstrom-Umrechnung* und *komponentenweise Umrechnung* vorgestellt, die zunächst rekapituliert werden sollen. Dabei soll die Wellenstrom-Umrechnung mit einem als „Distanz-Umrechnung“ bezeichneten Ansatz kombiniert werden. Abschließend folgt eine alternative Signatur-Umrechnung auf Basis von Messungen mit einem Schleppkörper (cf. Unterkapitel 5.6), die eine innovative Erweiterung des laufenden Forschungsprojektes und somit den wichtigsten Teil dieses Kapitels darstellt. Zwecks Vergleich der unterschiedlichen Ansätze (bzw. Ansatz-Kombinationen) soll die Signatur eines Schiffsmodells auf eine zufällig variierte Umgebung (zufälliges κ_w , κ_b , z_s) umgerechnet und dabei die Umrechnungsqualität gegenübergestellt werden. Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über die prinzipielle Anwendbarkeit der zuvor genannten Umrechnungsansätze.

Umzurechnende Größe/Eigenschaft	Umrechnungs-Ansatz:			
	Distanz	Kompon.weise	Wellenstrom	Schleppkörper
Wasserleitfähigkeit κ_w	×	×	✓	✓
Seebodenleitfähigk. κ_b	×	✓	×	✓
Sensortiefe z_s	✓	×	×	×

Tabelle 5.1.: Übersicht über die prinzipiellen Anwendbarkeit der verschiedenen Umrechnungsansätze.

Wie schon im Forschungsbericht [37] wird zur Qualitätsbewertung der Umrechnungen jeweils der Fehler err angegeben, welcher anhand der tatsächlichen (numerisch simulierten) und umgerechneten maximalen Feldstärke ($E_{\max,t}$ bzw. $E_{\max,u}$, cf. Kapitel 2.2.4) wie folgt berechnet wurde:

$$err = \left| \frac{E_{\max,t} - E_{\max,u}}{E_{\max,t}} \right| \quad (5.1)$$

5.2. Aufbau der Testumgebung

Abbildung 5.2 zeigt die COMSOL-Geometrie der Testumgebung, welche zur Überprüfung der Umrechnungsansätze entworfen wurde. Sie besteht aus dem aus Forschungsbericht [37] bekannten vereinfachten Modell eines Minenjagdbootes welches sich in einer Wasser-Box über einer parallel zur Wasserlinie verlaufenden Seeboden-Box befindet. Seitlich und an der Unterseite der Wasser- bzw. Seeboden-Box wird mittels Infinite Elements eine mathematische Fortführung der Geometrie simuliert.

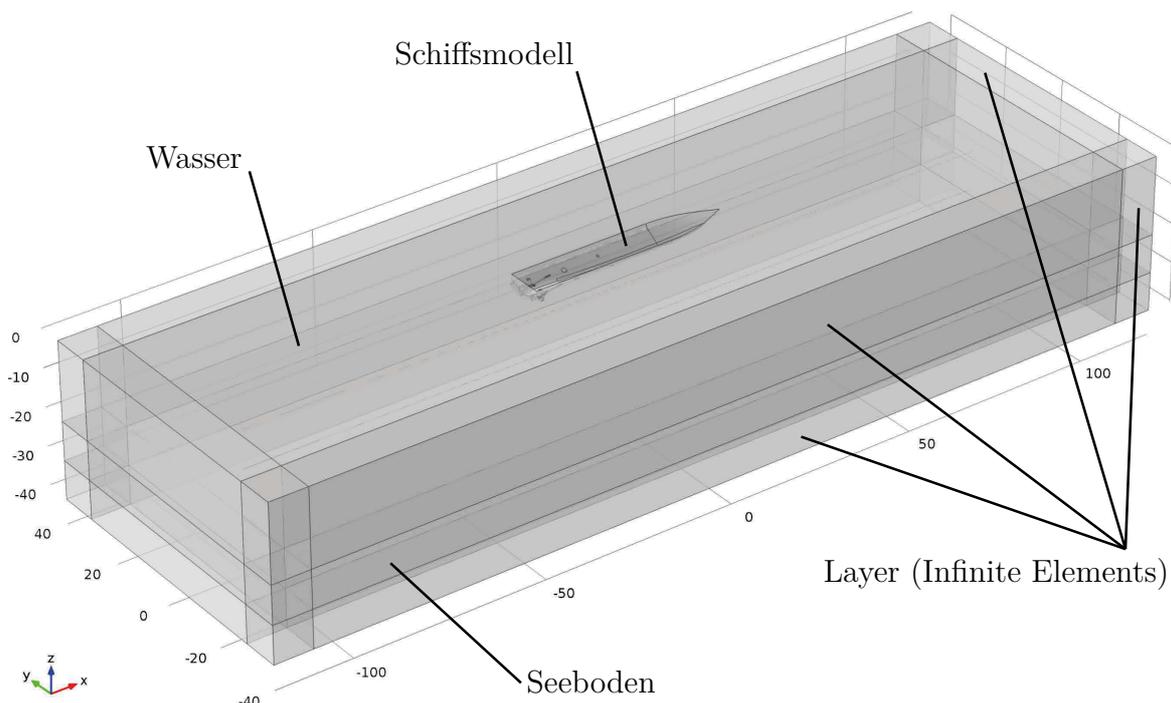


Abbildung 5.2.: COMSOL-Geometrie für die Simulation des Schiffsmodells, welches mit 54.4m die gleiche Länge wie die Minenjagdboote der Klasse MJ 333 hat. Sensortiefe z_s und Seebodentiefe z_b variieren je nach Szenario (cf. Tabelle 5.3). *Quelle:* Eigene Herstellung.

In Abbildung 5.3 ist das FEM-Mesh für das Schiffsmodell dargestellt bei dem eine Maximalgröße von 5 m und ein Wachstumsfaktor von 1,5 gewählt wurden. An den Propellern und den Anoden wurde die Diskretisierung wie dargestellt verfeinert. Entlang der Signatur-Linie, welche unterhalb des Kiels und 0,5 m über dem Seeboden verläuft, wurde die Mesh-Maximalgröße auf 1 m reduziert (nicht dargestellt).

Abbildung 5.4 visualisiert die beim Schiffsmodell verwendeten Randbedingungen welche ähnlich wie beim Quest-Modell (cf. Abbildung 3.9) gewählt wurden. Die Vorfaktoren der Polarisationskennlinien für Rumpf und Kielbereich wurden in den verschiedenen Szenarien (cf. Tabelle 5.2 und 5.3) variiert um den Einfluss des Beschichtungszustandes auf die Qualität der Umrechnungen zu untersuchen.

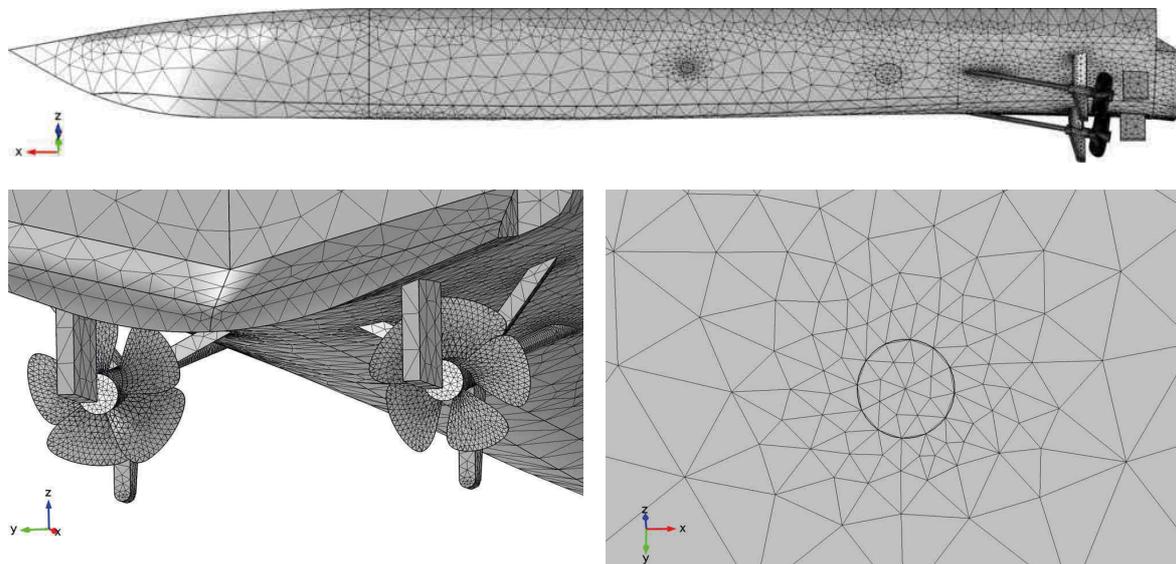


Abbildung 5.3.: FEM-Mesh für das Schiffsmodell. Von oben im Uhrzeigersinn: Schiffsrumpf, SACP-Anode und die beiden Propeller. Die Mesh-Maximalgröße beträgt 5 m bei einem Wachstumsfaktor von 1,5. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [37].

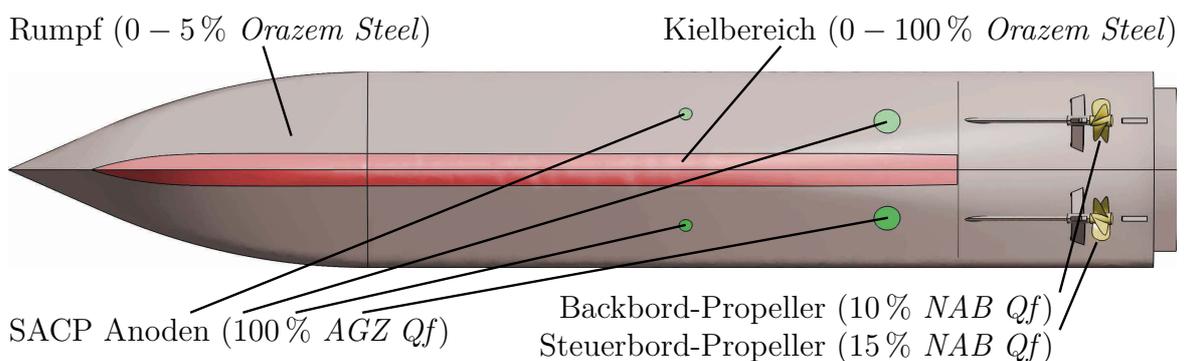


Abbildung 5.4.: Randbedingungen beim Schiffsmodell. Die Zahlenwerte in Klammern geben an, wie viel Prozent der aus der Kennlinie abzulesenden Stromdichte als Anregung auf die Oberfläche aufgeprägt wurden (wegen unterschiedlicher Zustände der Grenzflächen). Für den Rumpf und Kielbereich sind diese Vorfaktoren je nach Szenario unterschiedlich. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in ähnlicher Form in [37].

Szenario	Umrechnungsansatz	Leitfähigkeit		Beschichtung	
		Wasser	Seeboden	Rumpf	Kiel
dt1	Distanz	$\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$	intakt	intakt
kb1	Komponentenweise	$\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_b = var$	intakt	intakt
kb2	Komponentenweise	$\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_b = var$	intakt	intakt
ww1	Wellenstrom	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = \kappa_w$ (kein Seeb.)	intakt	intakt
ww2	Wellenstrom	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = \kappa_w$ (kein Seeb.)	intakt	defekt
ww3	Wellenstrom	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = \kappa_w$ (kein Seeb.)	defekt	defekt
wg1	Wellenstrom	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$	intakt	intakt
wb1	Wellenstrom	$\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_b = var$	intakt	intakt
wz1	Wellenstr. + Distanz	$\kappa_w = rand$	$\kappa_b = rand$	intakt	intakt
wz2	Wellenstr. + Distanz	$\kappa_w = rand$	$\kappa_b = rand$	intakt	defekt
wz3	Wellenstr. + Distanz	$\kappa_w = rand$	$\kappa_b = rand$	defekt	defekt
tw1	Schleppkörper	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = \kappa_w$ (kein Seeb.)	intakt	intakt
tw2	Schleppkörper	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = \kappa_w$ (kein Seeb.)	intakt	defekt
tw3	Schleppkörper	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = \kappa_w$ (kein Seeb.)	defekt	defekt
tb1	Schleppkörper	$\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_b = var$	intakt	intakt
tb2	Schleppkörper	$\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_b = var$	intakt	defekt
tb3	Schleppkörper	$\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_b = var$	defekt	defekt
tg1	Schleppkörper	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$	intakt	intakt
tg2	Schleppkörper	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$	intakt	defekt
tg3	Schleppkörper	$\kappa_w = var$	$\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$	defekt	defekt
tz1	Schleppk. + Distanz	$\kappa_w = rand$	$\kappa_b = rand$	intakt	intakt
tz2	Schleppk. + Distanz	$\kappa_w = rand$	$\kappa_b = rand$	intakt	defekt
tz3	Schleppk. + Distanz	$\kappa_w = rand$	$\kappa_b = rand$	defekt	defekt

Tabelle 5.2.: Übersicht der Werte von κ_w , κ_b und der Beschichtungszustände für die in den folgenden Unterkapiteln untersuchten Szenarien. Die Angaben *var* und *rand* bezeichnen eine systematische Variation bzw. zufällige Wahl der jeweiligen Größe. Eine ergänzende Übersicht findet sich in Tabelle 5.3.

Szenario	Tiefe		Leitfähigkeit bei Referenzmessung	
	Sensor	Seeboden	Wasser	Seeboden
dt1	$z_s = var$	$z_b = z_s - 0,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
kb1	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
kb2	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = \kappa_{w,ref}$ (kein Seeb.)
ww1	$z_s = -23 \text{ m}$	kein Seeboden	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = \kappa_{w,ref}$ (kein Seeb.)
ww2	$z_s = -23 \text{ m}$	kein Seeboden	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = \kappa_{w,ref}$ (kein Seeb.)
ww3	$z_s = -23 \text{ m}$	kein Seeboden	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = \kappa_{w,ref}$ (kein Seeb.)
wg1	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
wb1	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
wz1	$z_s = rand$	$z_b = z_s - 0,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
wz2	$z_s = rand$	$z_b = z_s - 0,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
wz3	$z_s = rand$	$z_b = z_s - 0,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tw1	$z_s = -23 \text{ m}$	kein Seeboden	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = \kappa_{w,ref}$ (kein Seeb.)
tw2	$z_s = -23 \text{ m}$	kein Seeboden	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = \kappa_{w,ref}$ (kein Seeb.)
tw3	$z_s = -23 \text{ m}$	kein Seeboden	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = \kappa_{w,ref}$ (kein Seeb.)
tb1	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tb2	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tb3	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tg1	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tg2	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tg3	$z_s = -23 \text{ m}$	$z_b = -23,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tz1	$z_s = rand$	$z_b = z_s - 0,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tz2	$z_s = rand$	$z_b = z_s - 0,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$
tz3	$z_s = rand$	$z_b = z_s - 0,5 \text{ m}$	$\kappa_{w,ref} = 2,8 \text{ S/m}$	$\kappa_{b,ref} = 0,73 \text{ S/m}$

Tabelle 5.3.: Übersicht der Werte von z_s , z_b , $\kappa_{w,ref}$ und $\kappa_{b,ref}$ für die in den folgenden Unterkapiteln untersuchten Szenarien. Die Angaben *var* und *rand* bezeichnen eine systematische Variation bzw. zufällige Wahl der jeweiligen Größe. Eine ergänzende Übersicht findet sich in Tabelle 5.2.

5.3. Distanz-Umrechnung

Durch die vereinfachte Annahme einer Dipol-Charakteristik lässt sich die UEP-Signatur anhand des bekannten Abklingverhaltens des Dipol-E-Feldes ($\sim 1/r^3$) von einer bekannten Sensortiefe $z_{s,\text{ref}}$ auf beliebige Sensortiefen z_s umrechnen (cf. [2]):

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{z_{s,\text{ref}}}{z_s} \right)^3 \quad (5.2)$$

Dieser Ansatz verspricht für das UEP-Fernfeld gute Ergebnisse, da sich dort aufgrund des fehlenden Monopol-Anteils der Dipolanteil durchsetzt (cf. Kapitel 4.4). Abbildung 5.5 (Szenario „dt1“) zeigt den Vergleich zwischen tatsächlicher (simulierter) Signatur und Distanz-Umrechnung anhand der E_{max} -Werte (Signaturstärke) für eine systematisch variierte Sensortiefe z_s . Dabei wurde eine intakte Rumpfbeschichtung modelliert und es wurden die konstanten Werte $\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$ und $\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$ für die Wasser- bzw. Seebodenleitfähigkeit eingestellt. Durch die Wahl von $z_{s,\text{ref}} = -23 \text{ m}$ entsprechen die Referenz-Umgebungsbedingungen den Gegebenheiten der EMMS-Aschau, welche sich bei einer praktischen Umsetzung³ der Umrechnungsansätze für die Messung der Referenzsignatur anbieten würde. Selbstverständlich wäre theoretisch die Verwendung beliebiger anderer Referenz-Umgebungsbedingungen möglich.

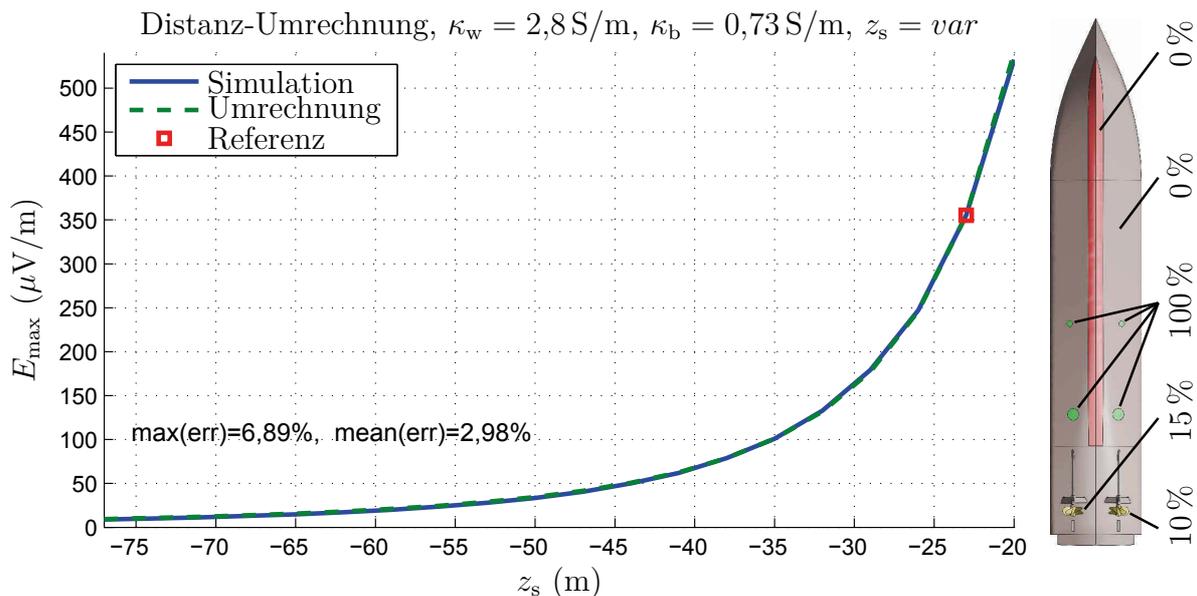


Abbildung 5.5.: Szenario „dt1“. Die Umrechnung unter Annahme einer $1/r^3$ -Abhängigkeit gibt nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke ($E_{\text{max,t}}$) wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Der direkte Vergleich zwischen Umrechnung und Simulation zeigt, dass die Distanz-Umrechnung im gesamten Bereich von $z_s = -77 \text{ m}$ bis $z_s = -20 \text{ m}$ nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke ($E_{\text{max,t}}$) wiedergibt.

³Hierzu existieren seitens der WTD 71 aktuell leider noch keine konkreten Pläne.

5.4. Komponentenweise Umrechnung

Der prinzipielle Einfluss des Seebodens auf die UEP-Signatur kann anhand der Abbildungen 5.6 bis 5.9 nachvollzogen werden. Die dort gezeigten, simulierten Beispiel-Signaturen wurden unter nahezu gleichen Bedingungen ermittelt, mit dem einzigen Unterschied, dass die Seebodenleitfähigkeit im einen Fall auf $\kappa_b = 2,8 \text{ S/m}$ ($\kappa_b = \kappa_w \Rightarrow$ freies Wasser) und im anderen Fall auf $\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$ (Aschau-Bedingungen) eingestellt wurde. Wie zu erkennen ist, werden die einzelnen E-Feld-Komponenten durch die Gegenwart des Seebodens unterschiedlich verstärkt, wobei sich ihr qualitativer Verlauf jedoch kaum ändert.

Entsprechend dieser Erkenntnis wurde die komponentenweise Umrechnung entwickelt (cf. [38]), bei der eine getrennte Umrechnung (Verstärkung bzw. Skalierung) der orthogonal und parallel zum Seeboden verlaufenden Signatur-Komponenten durchgeführt wird. Sie basiert auf dem Konzept der Orthogonal- und Parallelverstärkung (cf. [28]), gemäß dem die Verstärkungsfaktoren $v_{||}$ und v_{\perp} folgenderweise berechnet werden:

$$v_{||} = 2 \frac{\kappa_w}{\kappa_w + \kappa_b} \quad (5.3)$$

$$v_{\perp} = 2 \frac{\kappa_b}{\kappa_w + \kappa_b} \quad (5.4)$$

Wird eine Referenzsignatur aus einer Messung in freiem Wasser verwendet, so lautet die Vorschrift für die komponentenweise Umrechnung einfach wie folgt:

$$E_x = v_{||} \cdot E_{x,\text{ref}} \quad (5.5)$$

$$E_y = v_{||} \cdot E_{y,\text{ref}} \quad (5.6)$$

$$E_z = v_{\perp} \cdot E_{z,\text{ref}} \quad (5.7)$$

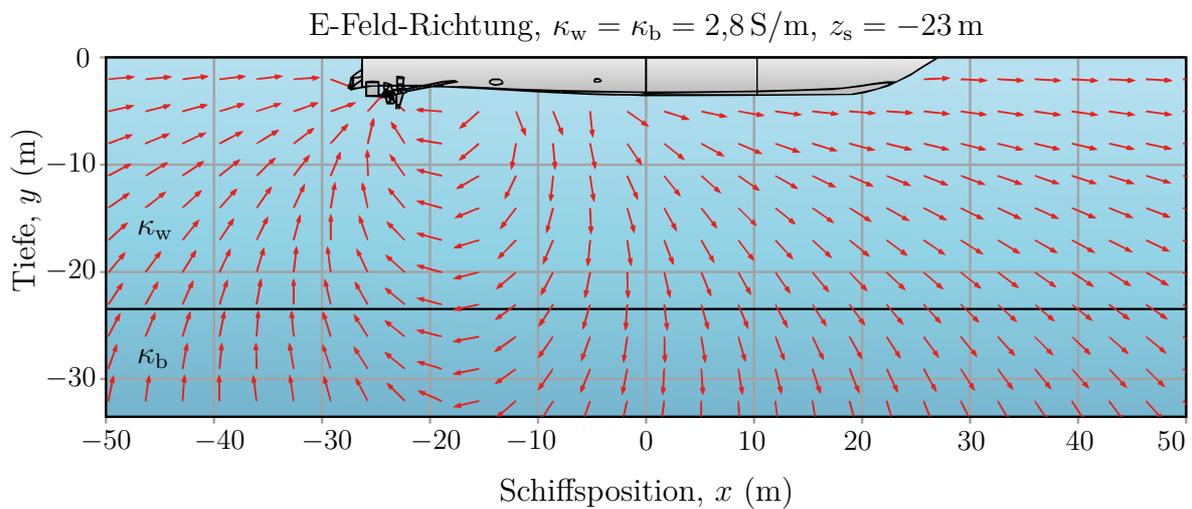
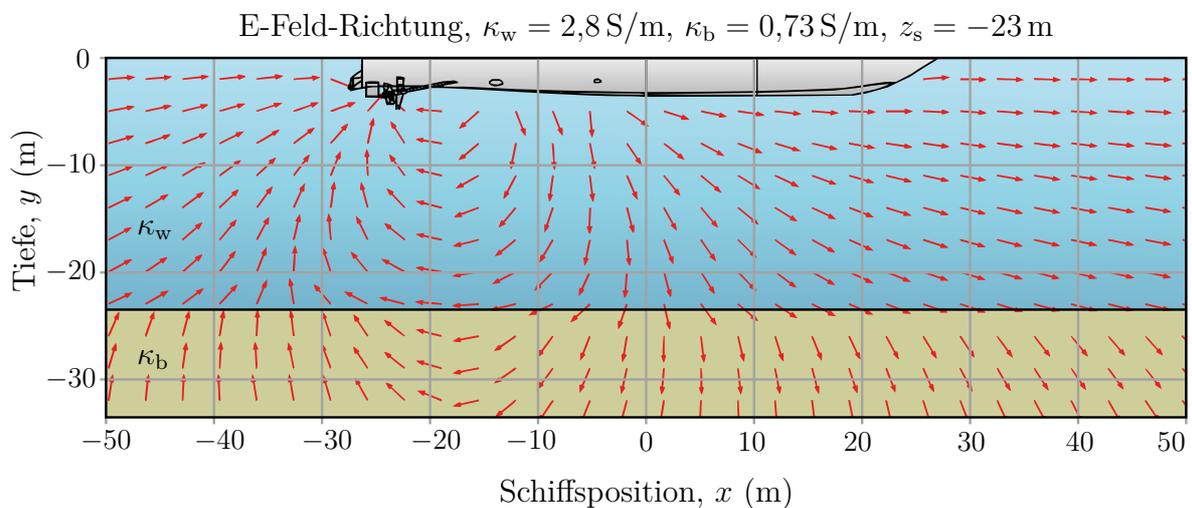
Abbildung 5.10 veranschaulicht die Umrechnung anhand eines konkreten Beispiels. Da bei der Referenzmessung im Allgemeinen der Seebodens gegenwärtig ist, muss dessen Einfluss bei der Umrechnung ebenfalls berücksichtigt werden, wofür analog zu Gleichung (5.3) und (5.4) die Verstärkungsfaktoren $v_{||,\text{ref}}$ und $v_{\perp,\text{ref}}$ berechnet werden müssen. Mit ihnen ergibt sich die allgemeine Vorschrift für die komponentenweise Umrechnung:

$$E_x = v_{||} \cdot \frac{E_{x,\text{ref}}}{v_{||,\text{ref}}} \quad (5.8)$$

$$E_y = v_{||} \cdot \frac{E_{y,\text{ref}}}{v_{||,\text{ref}}} \quad (5.9)$$

$$E_z = v_{\perp} \cdot \frac{E_{z,\text{ref}}}{v_{\perp,\text{ref}}} \quad (5.10)$$

Die Umrechnung gilt entsprechend der Herleitung der Orthogonal- und Parallelverstärkung $v_{||}$ und v_{\perp} (cf. [28]) nur für die Felder direkt oberhalb des Seebodens. Näherungsweise beschreibt der Ansatz jedoch auch die Verhältnisse in geringem Abstand

Abbildung 5.6.: E-Feld-Richtung im freien Wasser. *Quelle:* Eigene Herstellung.Abbildung 5.7.: E-Feld-Richtung in Gegenwart des Seebodens (Aschau-Bedingungen, $z_b = -23,5 \text{ m}$). Im Bereich der Sensortiefe $z_s = -23 \text{ m}$ (0,5 m oberhalb des Seebodens) besitzt das E-Feld eine vergleichsweise starke horizontale Komponente, neigt also tendenziell dazu parallel zum Seeboden zu verlaufen. *Quelle:* Eigene Herstellung.

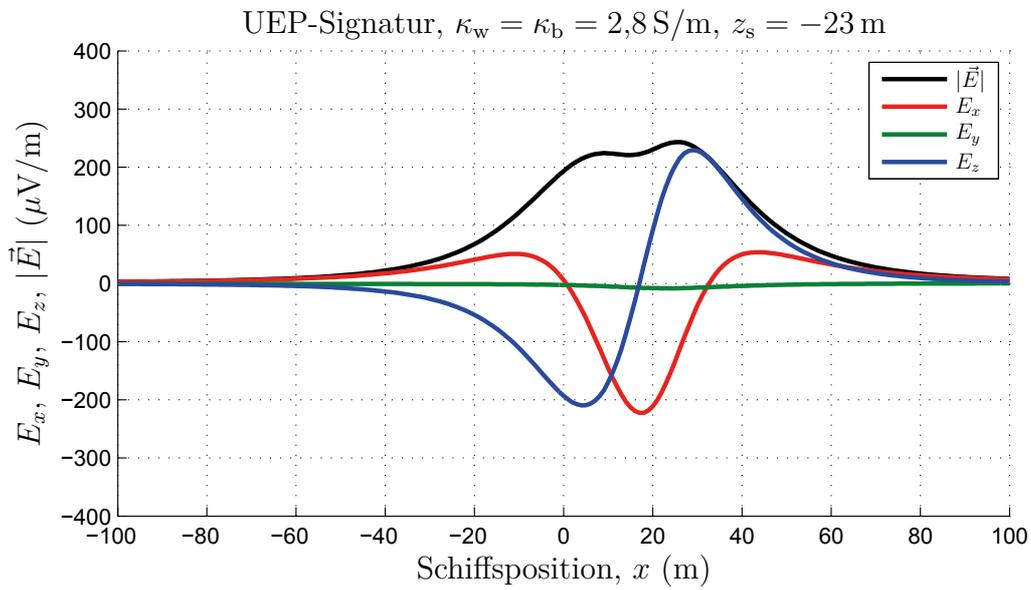


Abbildung 5.8.: UEP-Signatur im freien Wasser. *Quelle:* Eigene Herstellung.

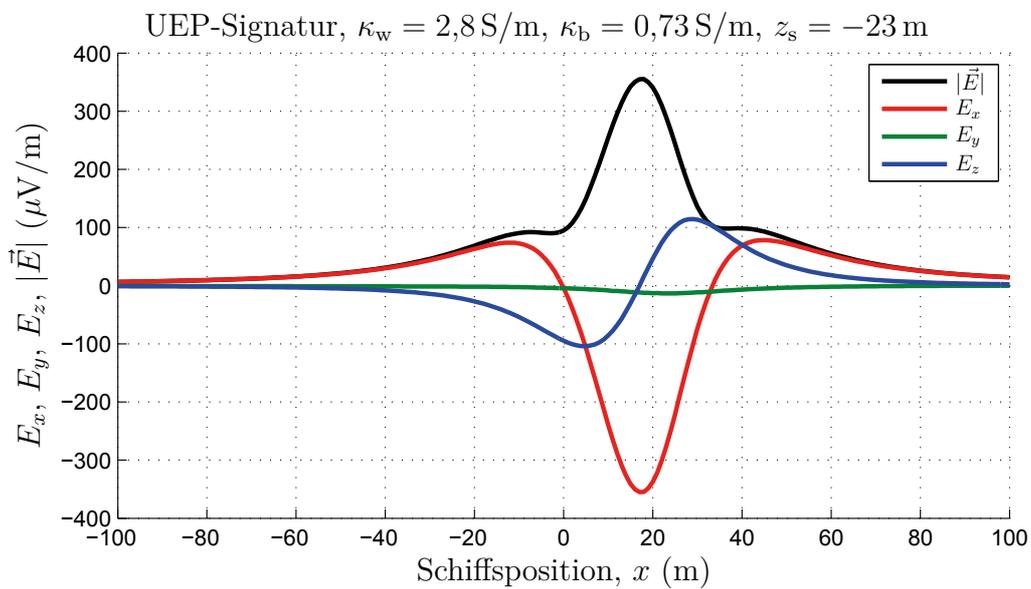


Abbildung 5.9.: UEP-Signatur in Gegenwart des Seebodens (Aschau-Bedingungen, $z_b = -23,5 \text{ m}$). *Quelle:* Eigene Herstellung.

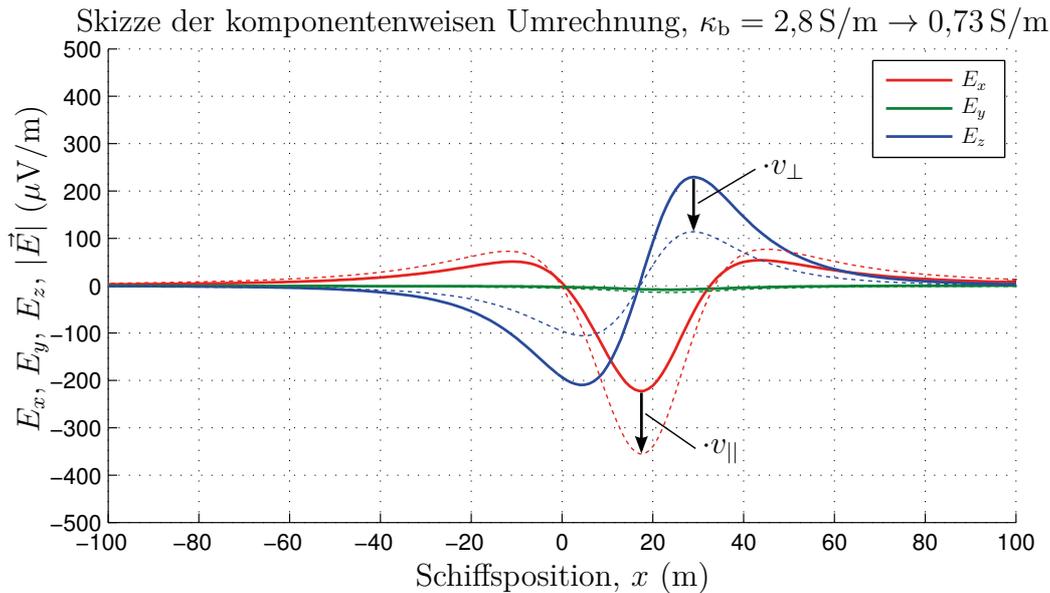


Abbildung 5.10.: Veranschaulichung der komponentenweisen Signatur-Umrechnung von $\kappa_b = 2,8 \text{ S/m}$ nach $\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$. Die Parallel- und Orthogonalverstärkung betragen in dem Fall $v_{\perp} = 0,414$ und $v_{\parallel} = 1,586$. *Quelle:* Eigene Herstellung, verwendet in [38].

oberhalb des Seebodens, wo die UEP-Sensoren bei MIW-Szenarien oftmals positioniert sind.

Wie in Abbildung 5.11 (Szenario „kb1“) zu erkennen ist, gibt die komponentenweise Umrechnung die tatsächliche Signaturstärke in brauchbarer Näherung wieder, wobei es nur im Bereich höherer Seebodenleitfähigkeiten ($\kappa_b > 1,7 \text{ S/m}$) zu einer nennenswerten Abweichung kommt.

Diese Abweichung tritt nicht auf, wenn eine Referenzsignatur aus einer Messung im freien Wasser verwendet wird (cf. Abbildung 5.12, Szenario „kb2“). Grund hierfür ist die einfachere Umrechnungsvorschrift entsprechend Gleichung (5.5) bis (5.7), die weniger fehlerbehaftet ist als die allgemeine Umrechnungsvorschrift entsprechend Gleichung (5.8) bis (5.10).

Ein Nachteil der komponentenweisen Umrechnung ist, dass zur Bestimmung der Verstärkungsfaktoren v_{\parallel} und v_{\perp} die gegenwärtige Seebodenleitfähigkeit κ_b benötigt wird, welche unter realen Einsatzbedingungen nicht unmittelbar gemessen werden kann. Der Ansatzes kann deshalb nur angewandt werden, sofern die Seebodenleitfähigkeit für das Einsatzgebiet im Vorhinein kartografiert wurde, was mit großem Aufwand verbunden ist und nicht in jedem Fall möglich sein dürfte. Entsprechend erfüllt die komponentenweisen Umrechnung die Anforderungen der Konzeptbeschreibung (cf. Unterkapitel 5.1) nicht zufriedenstellend, und wird daher im Folgenden nicht zur Kombination mit anderen Umrechnungsansätzen verwendet.

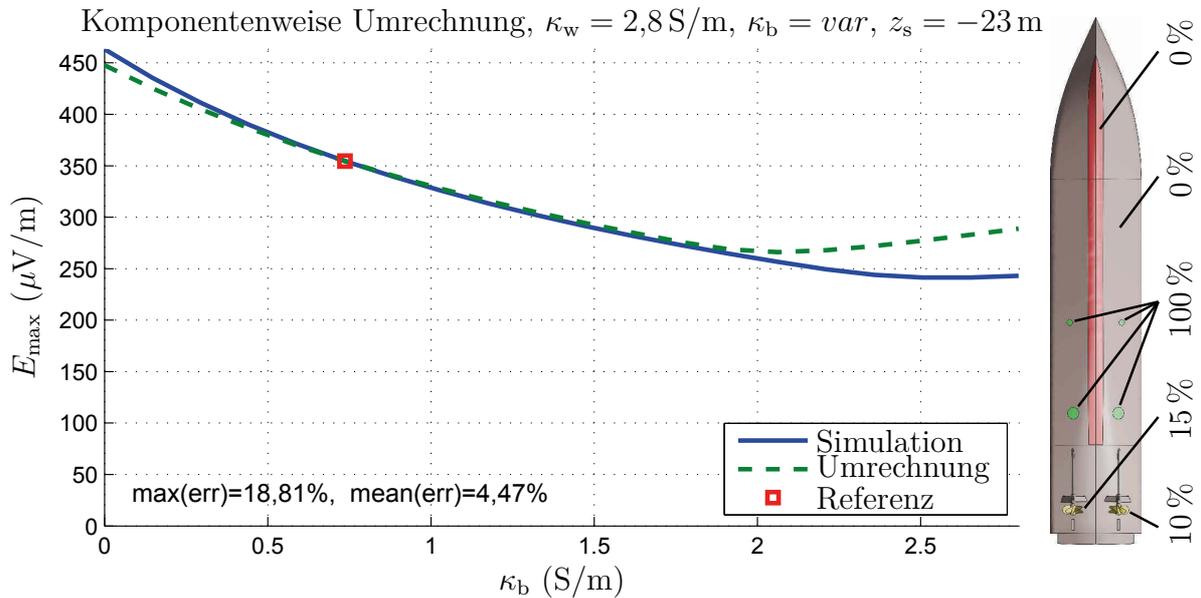


Abbildung 5.11.: Szenario „kb1“. Die Umrechnung stellt eine brauchbare Näherung der tatsächlichen Signatur dar. *Quelle:* Eigene Herstellung.

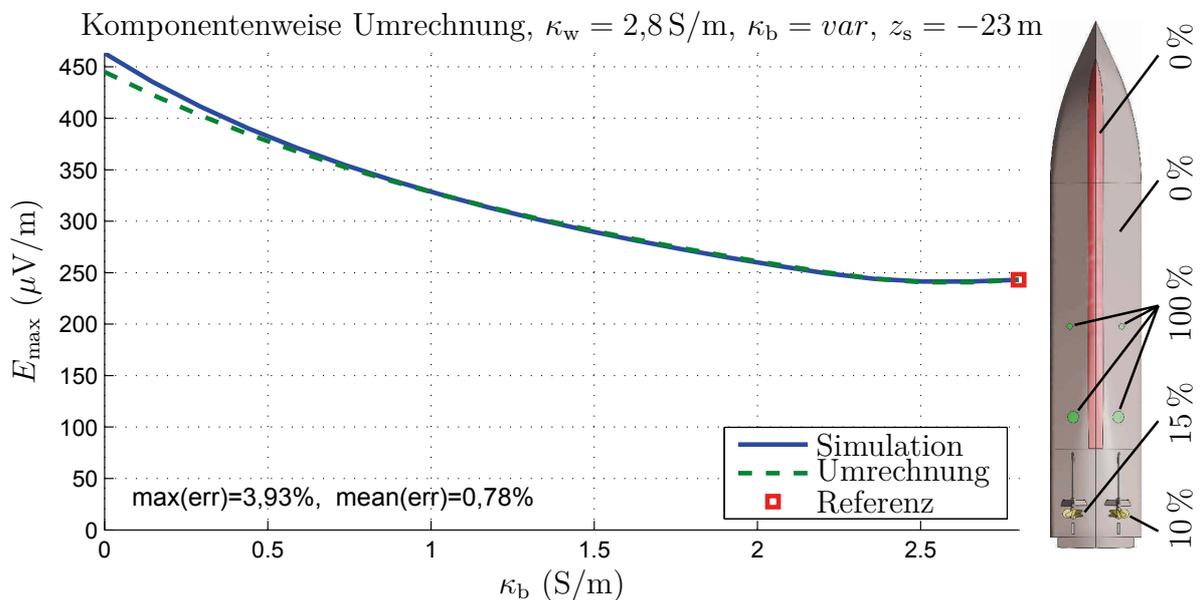


Abbildung 5.12.: Szenario „kb2“. Durch Verwendung von freiem Wasser als Referenz ($\kappa_{b,\text{ref}} = \kappa_{w,\text{ref}} = 2,8 \text{ S/m}$) vereinfacht sich die Umrechnungsvorschrift, wodurch die Umrechnungsqualität deutlich verbessert wird. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.5. Wellenstrom-Umrechnung

Bei der Wellenstrom-Umrechnung wird im Sinne eines vereinfachten Modells von einem proportionalen Zusammenhang zwischen dem Wellenstrom I_w und der UEP-Stromdichte \vec{J} ausgegangen (cf [37, 39]). Mit den Werten $I_{w,ref}$ und \vec{J}_{ref} aus der Referenzmessung ergibt sich folgende Umrechnungsvorschrift:

$$\vec{J} = \frac{I_w}{I_{w,ref}} \cdot \vec{J}_{ref} \quad (5.11)$$

$$\Rightarrow \vec{E} = \frac{I_w}{I_{w,ref}} \cdot \frac{\kappa_{w,ref}}{\kappa_w} \cdot \vec{E}_{ref} \quad (5.12)$$

5.5.1. Variation der Wasserleitfähigkeit ohne Seeboden

Abbildung 5.13, 5.14 und 5.15 (Szenario „ww1“, „ww2“ und „ww3“) zeigen den Vergleich zwischen Wellenstrom-Umrechnungen und tatsächlicher Signaturstärke für verschiedene Beschichtungszustände bei systematischer Variation der Wasserleitfähigkeit.

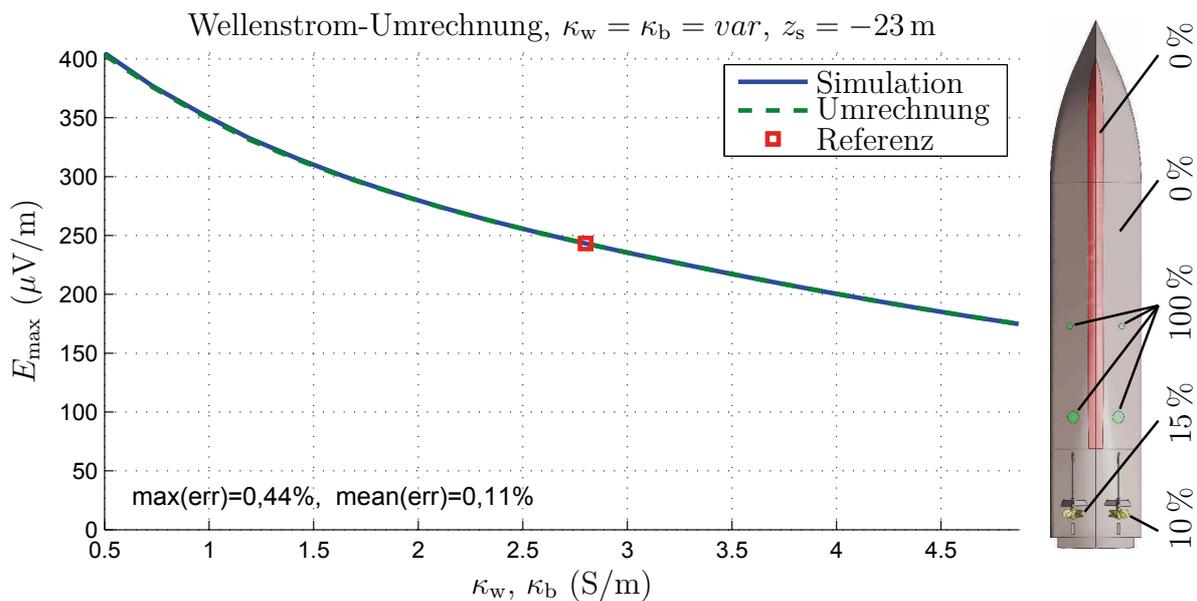


Abbildung 5.13.: Szenario „ww1“. Die Umrechnung gibt nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Während die Wellenstrom-Umrechnung bei intakter Beschichtung (Szenario „ww1“) nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke wiedergibt, liefert sie bei zunehmender Beschädigungen der Rumpfbeschichtung (Szenario „ww2“ und „ww3“) immer schlechtere Ergebnisse. Grund hierfür ist die schwächere Korrelation zwischen Signaturstärke

und Wellenstrom (cf. Abbildung 29 in Anhang D) aufgrund von Strömen zwischen Anoden und Rumpf, welche einen Beitrag zur UEP-Signatur liefern, der nicht anhand des Wellenstroms bestimmt werden kann.

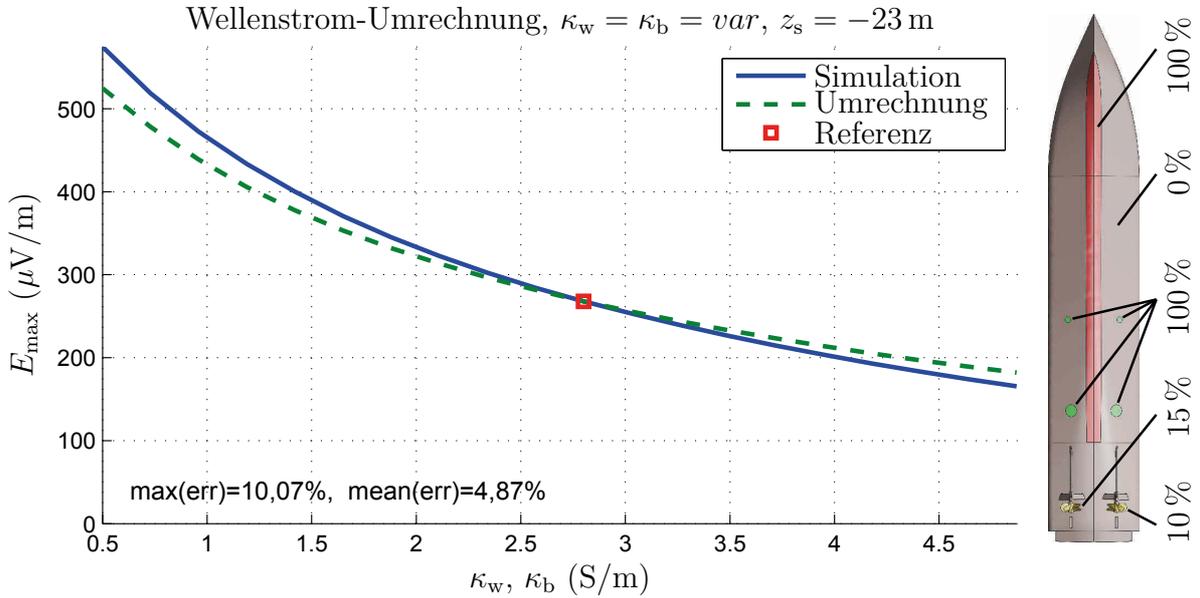


Abbildung 5.14.: Szenario „ww2“. Die Umrechnung gibt in guter Näherung die wirkliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

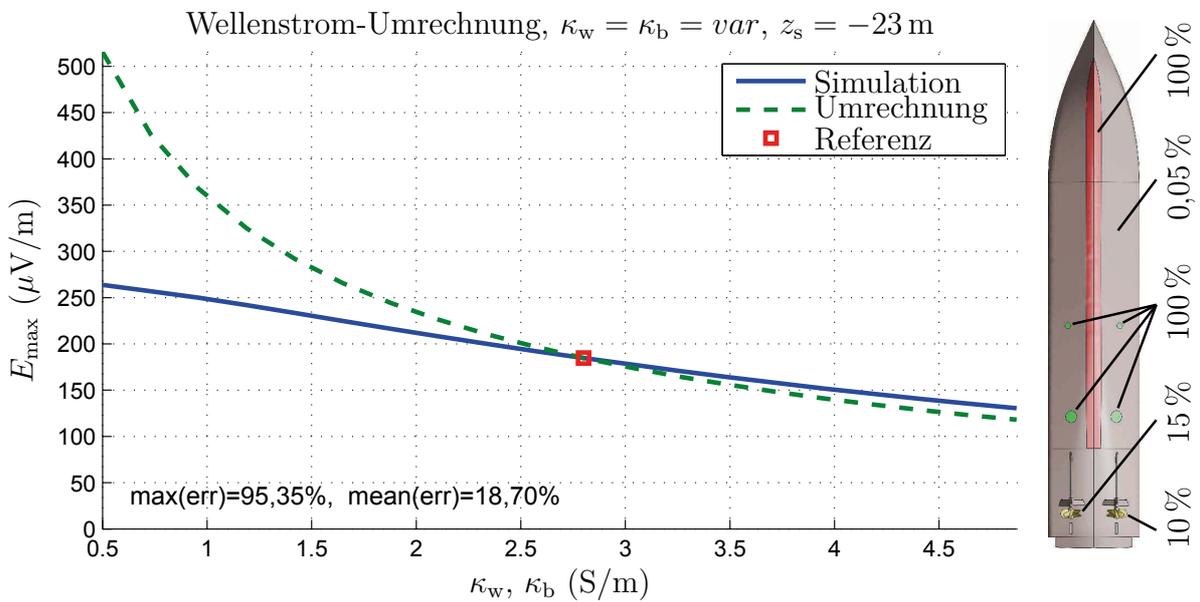


Abbildung 5.15.: Szenario „ww3“. Die Umrechnung liefert nur noch in der Nähe des Referenzpunktes gute Ergebnisse. Wellenstrom und Signatur sind nicht mehr ausreichend korreliert. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.5.2. Einfluss des Seebodens

Abbildung 5.16 (Szenario „wg1“) verdeutlicht, dass die Gegenwart des Seebodens ($z_b = z_s - 0,5 \text{ m} = -23,5 \text{ m}$, $\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$) trotz intakter Rumpfbeschichtung zu einer vergleichsweise schlechten Qualität der Wellenstrom-Umrechnung führen kann. Durch die Variation der Wasserleitfähigkeit ändert sich fortwährend das Verhältnis κ_b/κ_w , was zu einer qualitativen Änderung der UEP-Feldverteilung führt (cf. Gleichung (2.50) bis (2.52)). Diese Änderung ist nahe dem Seeboden deutlich stärker ausgeprägt als in direkter Nähe des Wasserfahrzeugs und hat kaum Einfluss auf den Wellenstrom.

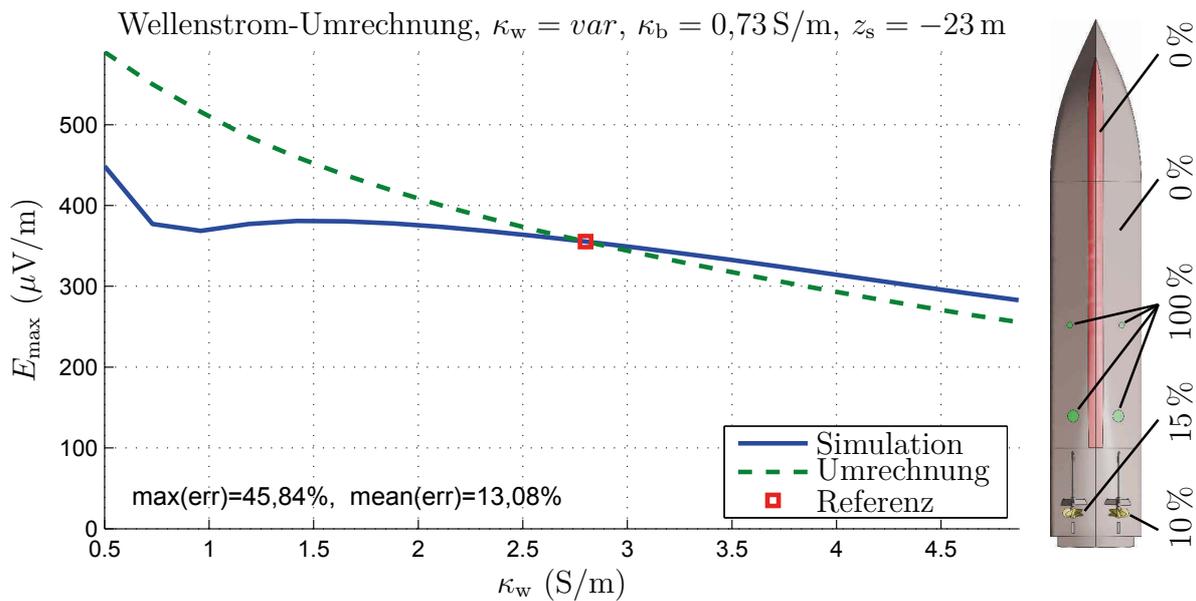


Abbildung 5.16.: Szenario „wg1“. Der Einfluss der konstanten Seebodenleitfähigkeit verschlechtert die Umrechnung. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Da der zuvor beschriebene Zusammenhang beim Szenario „wg1“ vom Einfluss der Wasserleitfähigkeit auf die Signatur überlagert wird, soll in Abbildung 5.17 (Szenario „wb1“) nochmals das Verhalten bei systematischer Variation der Seebodenleitfähigkeit und konstanter Wasserleitfähigkeit demonstriert werden. Auch hier ändert sich das Verhältnis κ_b/κ_w und folglich die UEP-Feldverteilung, während der Wellenstrom aufgrund des konstanten κ_w nahezu gleich bleibt (cf. Abbildung 33 in Anhang D). Eine Umrechnung der Signatur mittels Wellenstrom ist in diesem Fall offensichtlich nicht möglich. Wenn der Einfluss des Seebodens auf die Signatur berücksichtigt werden soll, ist es also unumgänglich die Wellenstrom-Umrechnung mit einem weiteren Umrechnungsansatz zu kombinieren. Sofern die aktuelle Seebodenleitfähigkeit bekannt ist, kann hierfür die in Unterkapitel 5.4 beschriebene komponentenweise Umrechnung verwendet werden.

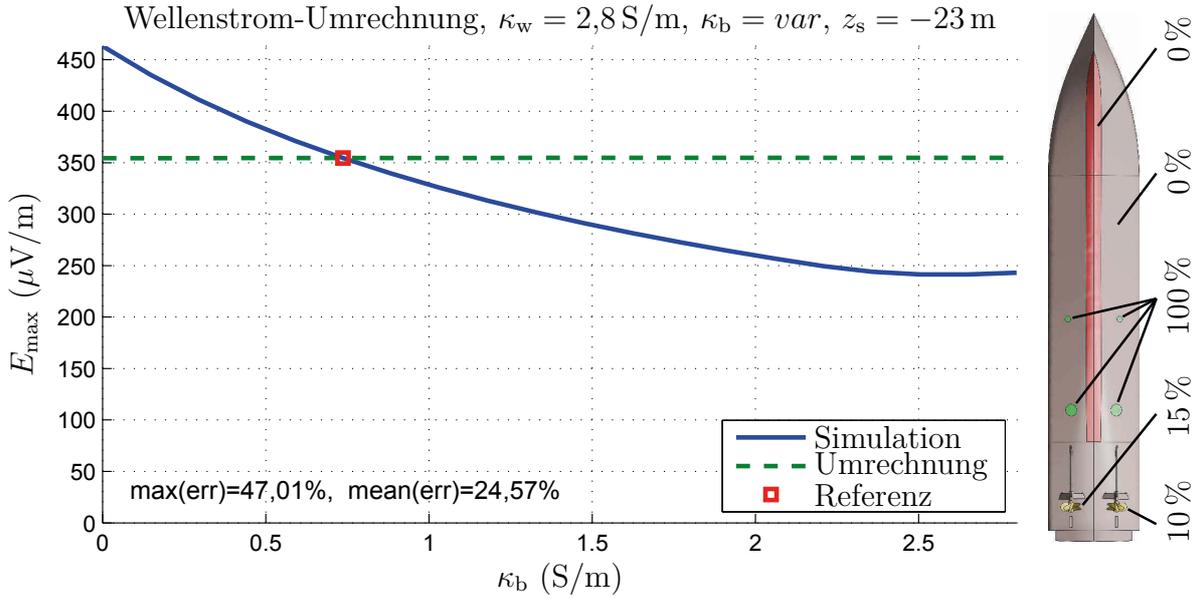


Abbildung 5.17.: Szenario „wb1“. Der Einfluss der Seebodenleitfähigkeit kann nicht mittels Wellenstrom umgerechnet werden. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.5.3. Zufällig generierte Umgebungsbedingungen

Die Wellenstrom-Umrechnung wurde abschliessend mit der Distanz-Umrechnung kombiniert und je Szenario auf 100 zufällig generierte Umgebungen angewandt. Dabei erfolgte die Wahl der drei variierten Umgebungsparameter gleichverteilt in den folgenden Intervallen:

$$\kappa_w \in [0,5; 4,5] \text{ S/m} \quad (5.13)$$

$$\kappa_b \in [0; 1] \cdot \kappa_w \quad (5.14)$$

$$z_s \in [-77; -20] \text{ m} \quad (5.15)$$

Als Umrechnungsvorschrift wurde eine Kombination aus Gleichung (5.2) und (5.12) verwendet:

$$\vec{E} = \frac{I_w}{I_{w,\text{ref}}} \cdot \frac{\kappa_{w,\text{ref}}}{\kappa_w} \cdot \left(\frac{z_{s,\text{ref}}}{z_s} \right)^3 \cdot \vec{E}_{\text{ref}} \quad (5.16)$$

Eine Kombination mit der komponentenweisen Umrechnung wurde aus den in Unterkapitel 5.4 genannten Gründen nicht durchgeführt, weshalb die kombinierte Umrechnungsvorschrift (cf. Gleichung (5.16)) nicht in der Lage ist den Einfluss der Seebodenleitfähigkeit umzurechnen. In Folge dessen ist die Umrechnung vergleichsweise ungenau, für eine grobe Schätzung jedoch offenbar immer noch zu gebrauchen (cf. Abbildung 5.18, Szenario „wz1“).

Anders als erwartet, ist die Umrechnungsqualität bei defekter Kielbeschichtung (cf. Abbildung 5.13, Szenario „ww2“) geringfügig besser als bei intakter Beschichtung,

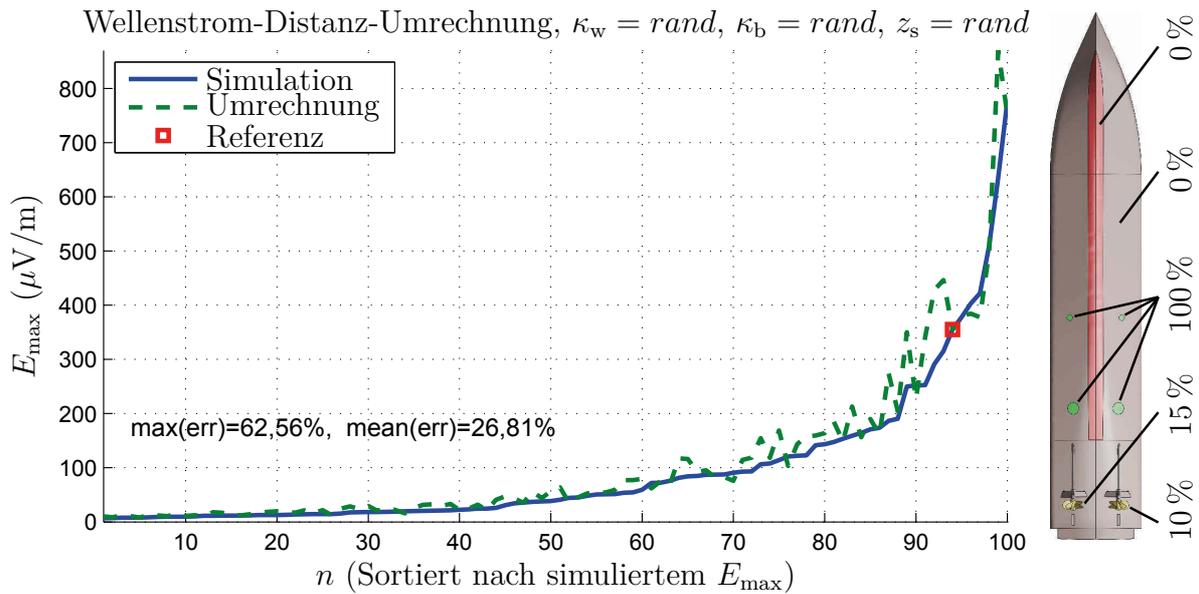


Abbildung 5.18.: Szenario „wz1“. Die Umrechnung ist vergleichsweise ungenau, für eine grobe Schätzung jedoch immer noch brauchbar. *Quelle:* Eigene Herstellung.

wofür leider keine belastbare Erklärung gefunden werden konnte. Untersuchungen mit 100 anderen zufällig generierten⁴ Umgebungsparametern (nicht weiter dokumentiert) zeigten das selbe Verhalten, weshalb ein statistisches Problem⁵ vermutlich nicht als Ursache in Frage kommt.

Bei einer zusätzlichen Beschädigung der restlichen Rumpfbeschichtung (cf. Abbildung 5.20, Szenario „wz3“) ist die Qualität der Umrechnung wie erwartet deutlich schlechter als im Falle einer intakten Beschichtung. Grund hierfür ist die bereits in Szenario „ww3“ (cf. Abbildung 5.15) beobachtete unzureichende Korrelation zwischen Wellenstrom und Signaturstärke.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die untersuchten Umgebungen in Abbildung 5.18 und 5.19 zur Verbesserung der Übersichtlichkeit nach den tatsächlichen $E_{\max,t}$ -Werten sortiert wurden.

⁴Mit einer anderen Initialisierung (Seed) des Zufallsgenerators in den selben Intervallen aus Gleichung (5.13), (5.14) und (5.15) generiert.

⁵Ein zu kleiner Stichprobenumfang.

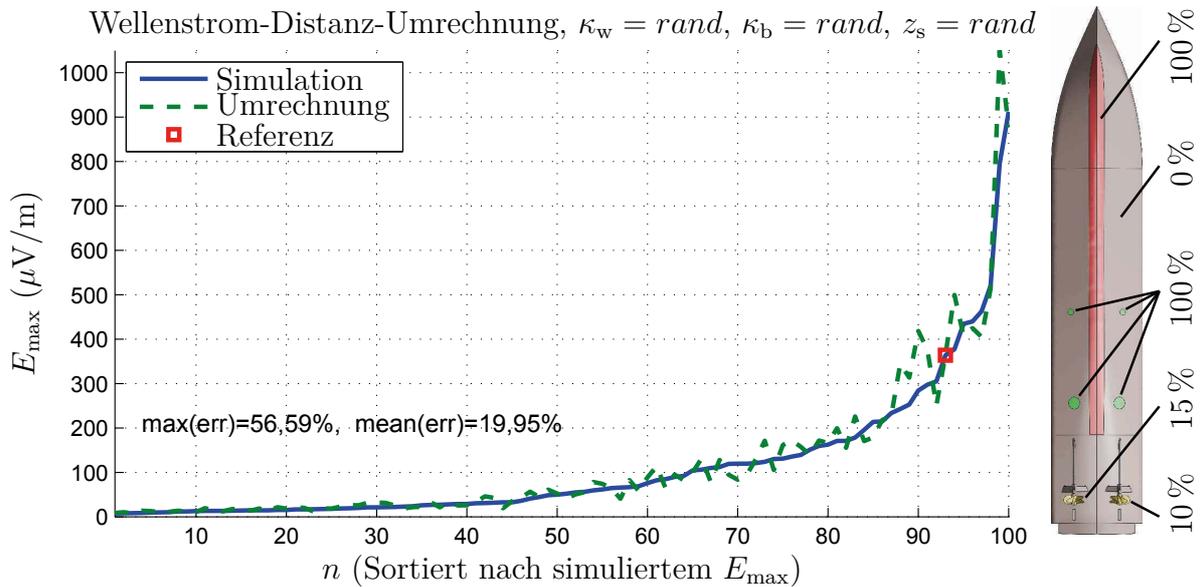


Abbildung 5.19.: Szenario „wz2“. Die Qualität der Umrechnung ist geringfügig besser als in Szenario „wz1“. *Quelle:* Eigene Herstellung.

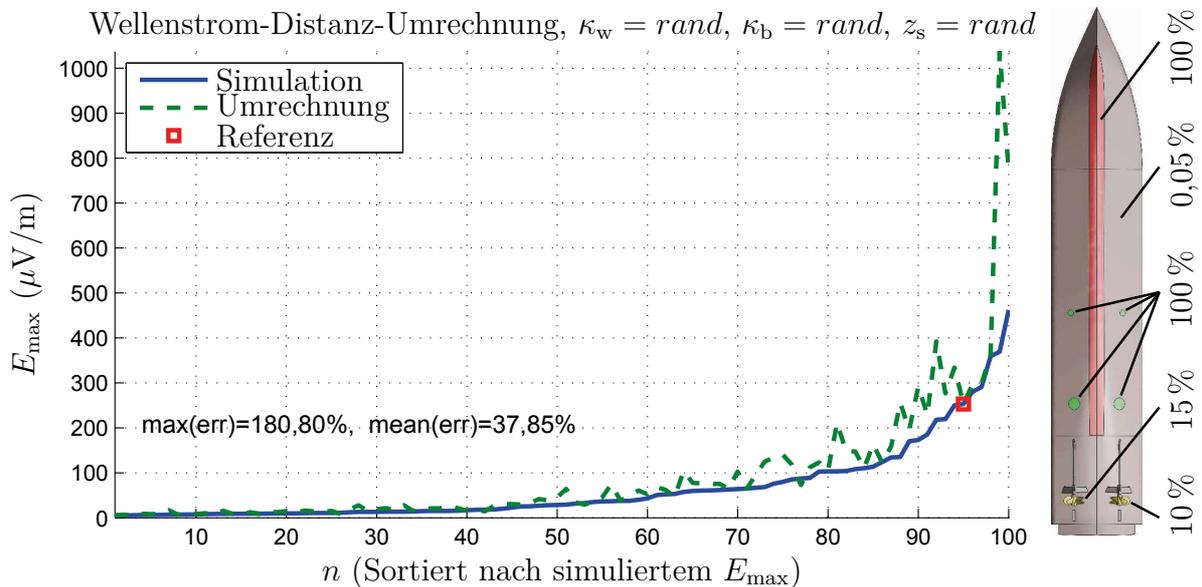


Abbildung 5.20.: Szenario „wz3“. Die Qualität der Umrechnung ist nochmal schlechter als in Szenario „wz1“, was am Einfluss der Beschichtungszustände auf die Korrelation zwischen Wellenstrom und Signatur liegt (cf. Szenario „ww3“). *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.6. Schleppkörper-Umrechnung

Bei der *Schleppkörper-Umrechnung* wird ausgenutzt, dass ein Zusammenhang zwischen der UEP-Signatur in Bodennähe und der elektrischen Feldstärke hinter dem Wasserfahrzeug besteht. Zur Umsetzung des Ansatzes muss ein Schleppkörper (engl.: *towfish*) ausgebracht werden, der sowohl bei der Aufnahme der Referenzsignatur als auch während der Umrechnung kontinuierlich Messdaten liefert. Dabei sollten die Schleppkörpertiefe z_t und der horizontale Abstand x_{th} (cf. Abbildung 5.21) zwischen Schleppkörper und Heck möglichst konstant gehalten werden. Es wird folgende Umrechnungsvorschrift für die einzelnen Komponenten des elektrischen Feldes angesetzt:

$$E_i = \frac{E_i^t}{E_i^{t,ref}} \cdot E_i^{ref} \quad \forall i \in \{x, y, z\} \quad (5.17)$$

E_i und E_i^{ref} sind dabei die E-Feld-Komponenten der aktuellen Signatur bzw. der Referenzsignatur, und E_i^t und $E_i^{t,ref}$ stehen für die vom Schleppkörper gemessenen E-Feld-Komponenten zum aktuellen Zeitpunkt bzw. während der Referenzmessung.

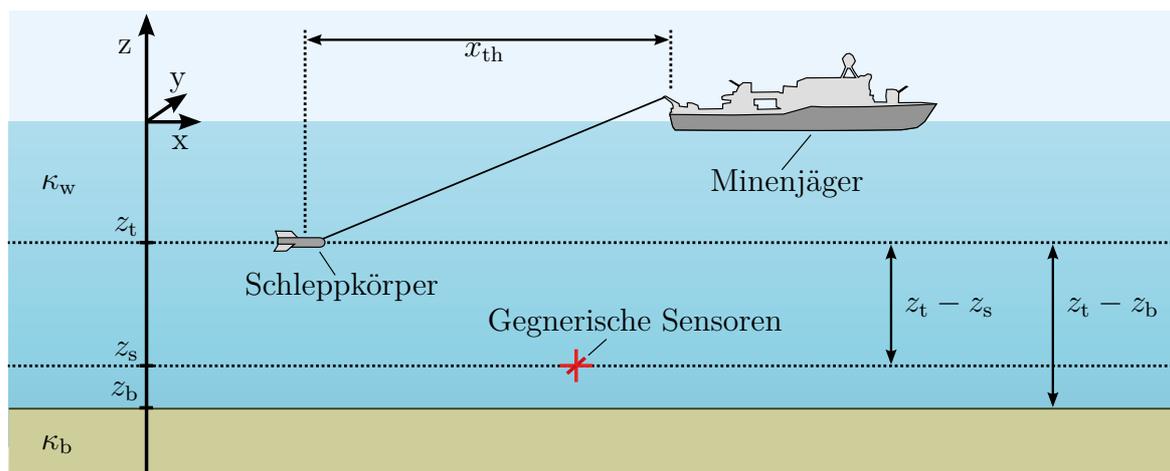


Abbildung 5.21.: Skizze der Echtzeit-Selbstüberwachung mittels Schleppkörper. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.6.1. Variation der Wasserleitfähigkeit ohne Seeboden

Die Schleppkörper-Umrechnung wurde zunächst für offenes Wasser und eine systematische Variation der Wasserleitfähigkeit getestet (analog zu „ww1“ bis „ww3“). In den Abbildungen 5.22 und 5.23 (Szenario „tw1“ und „tw2“) ist zu erkennen, dass die Umrechnung sowohl bei intakter Rumpfbeschichtung, als auch bei defekter Kielbeschichtung, nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke wiedergibt. Bei defekter Rumpfbeschichtung (cf. Abbildung 5.24, Szenario „tw3“) kommt es im Bereich niedriger Wasserleitfähigkeiten hingegen zu einer nennenswerten Abweichung, die auch in

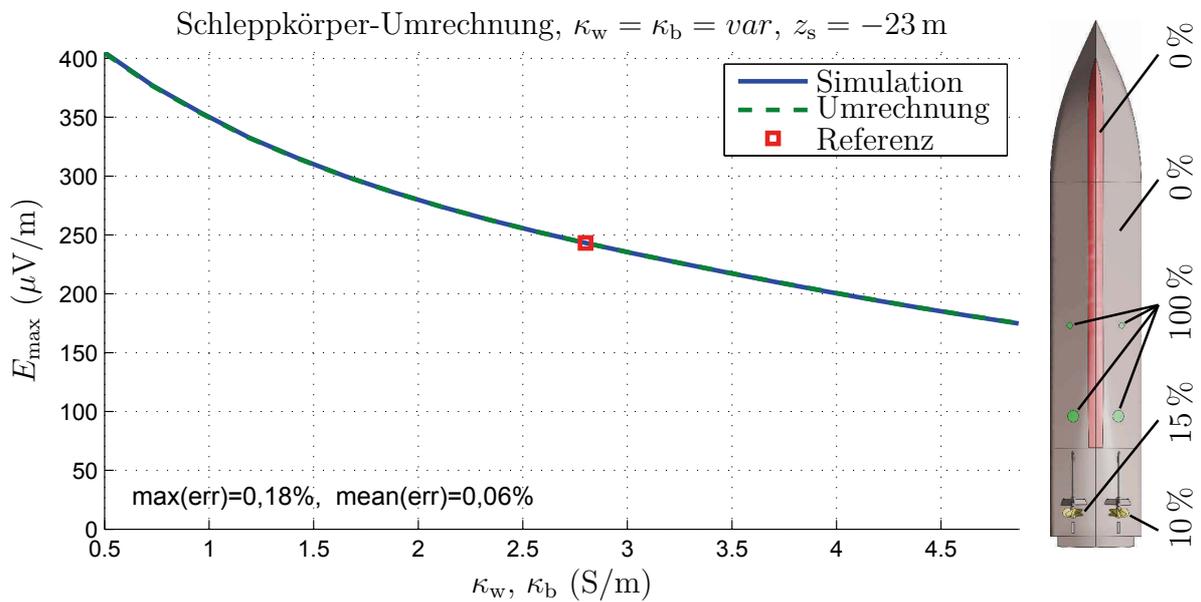


Abbildung 5.22.: Szenario „tw1“. Die Umrechnung gibt nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

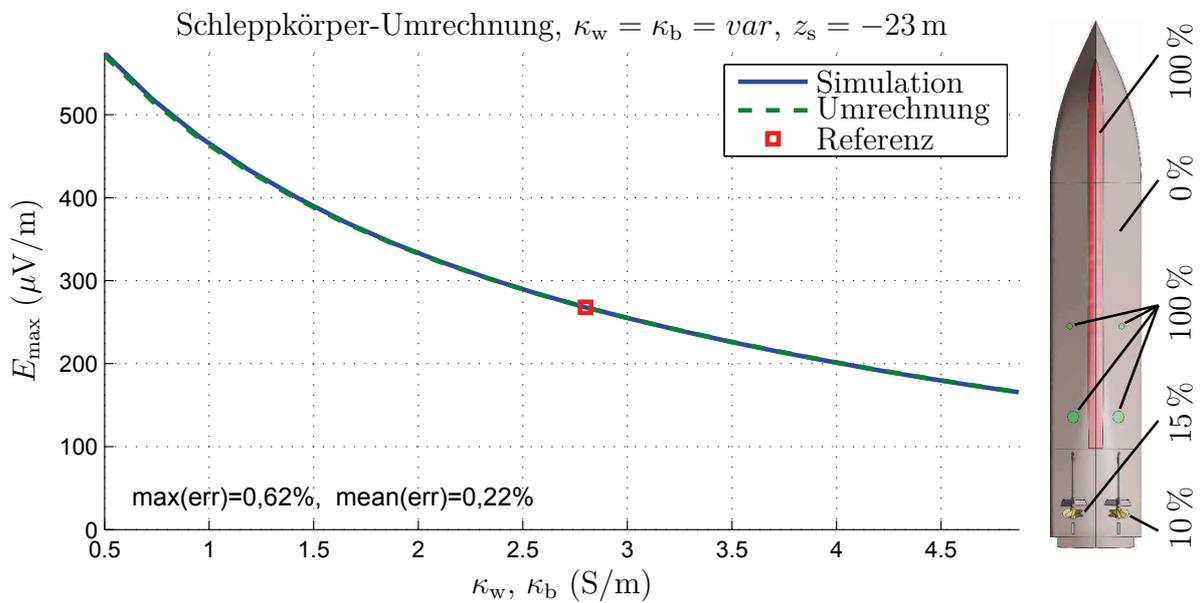


Abbildung 5.23.: Szenario „tw2“. Die Umrechnung gibt nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

den E-Feld-Daten des Schleppkörpers zu erkennen ist (cf. Abbildung 39 in Anhang D). Ursache hierfür ist eine qualitative Änderungen der UEP-Feldverteilung, hervorgerufen durch Änderungen der Polarisationskennlinien-Arbeitspunkte, was sich im Szenario „tw3“ aufgrund der Beteiligung der gesamten Rumpffläche deutlich stärker auswirkt als in den Szenarien „tw1“ und „tw2“.

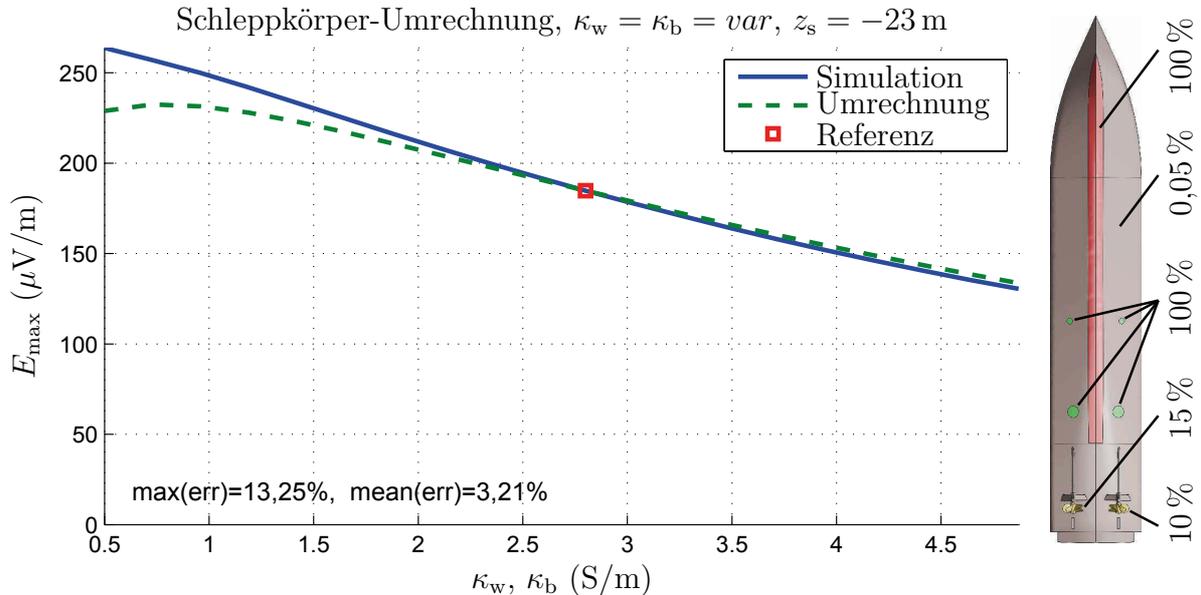


Abbildung 5.24.: Szenario „tw3“. Die Umrechnung gibt in guter Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. Die größten Abweichungen treten im Bereich niedriger Wasserleitfähigkeiten auf. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.6.2. Variation der Seebodenleitfähigkeit

Abbildung 5.25 bis 5.27 (Szenario „tb1“ bis „tb3“) zeigen, dass die Schleppkörper-Umrechnung im Gegensatz zur Wellenstrom-Umrechnung in der Lage ist, den Einfluss der unbekanntnen Seebodenleitfähigkeit κ_b zu erfassen und die Änderung der UEP-Signatur in brauchbarer Näherung zu berechnen. Die Variation von κ_b wirkt sich am Schleppkörper aufgrund der größeren Entfernung zum Seeboden weniger stark aus als an der Position der Sensoren, weshalb die Schleppkörper-Umrechnung dazu tendiert die Änderung der Signatur zu „unterschätzen“, also von einem geringeren Anstieg bzw. Abfall der Signatur im Vergleich zur Referenzmessung auszugehen.

Interessanterweise steigt die tatsächliche Signaturstärke im Gegensatz zur Umrechnung im Bereich $\kappa_b \rightarrow \kappa_w = 2,8\text{S}/\text{m}$ bei allen Beschichtungszuständen leicht an. Grund hierfür sind wiederum qualitative Unterschiede in der UEP-Feldverteilung, diesmal jedoch hervorgerufen durch die unterschiedliche Parallel- und Orthogonalverstärkung (cf. Gleichung (5.3) und (5.4)), bzw. deren Abhängigkeit von der sich ändernden Seebodenleitfähigkeit. Am Beispiel von Szenario „tb2“ kann dies durch den Vergleich

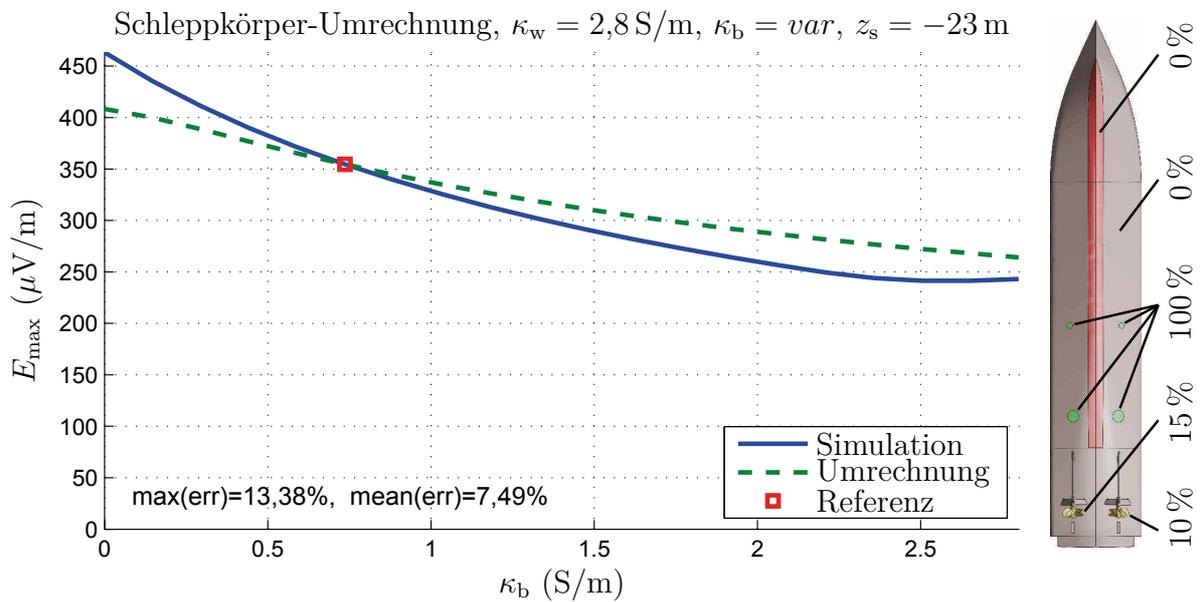


Abbildung 5.25.: Szenario „tb1“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

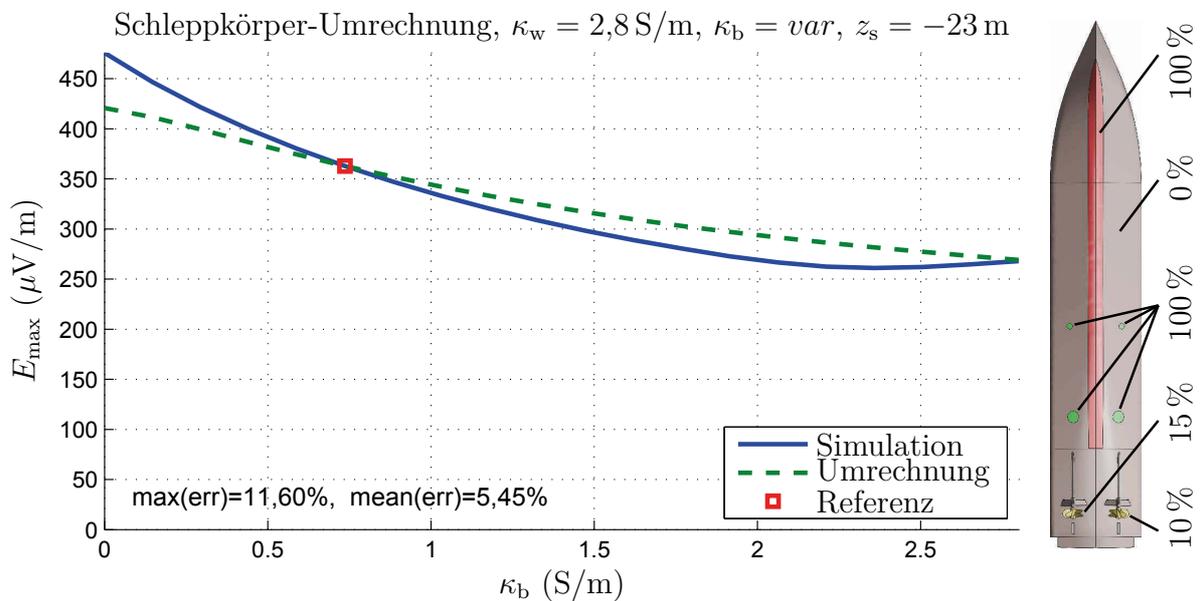


Abbildung 5.26.: Szenario „tb2“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

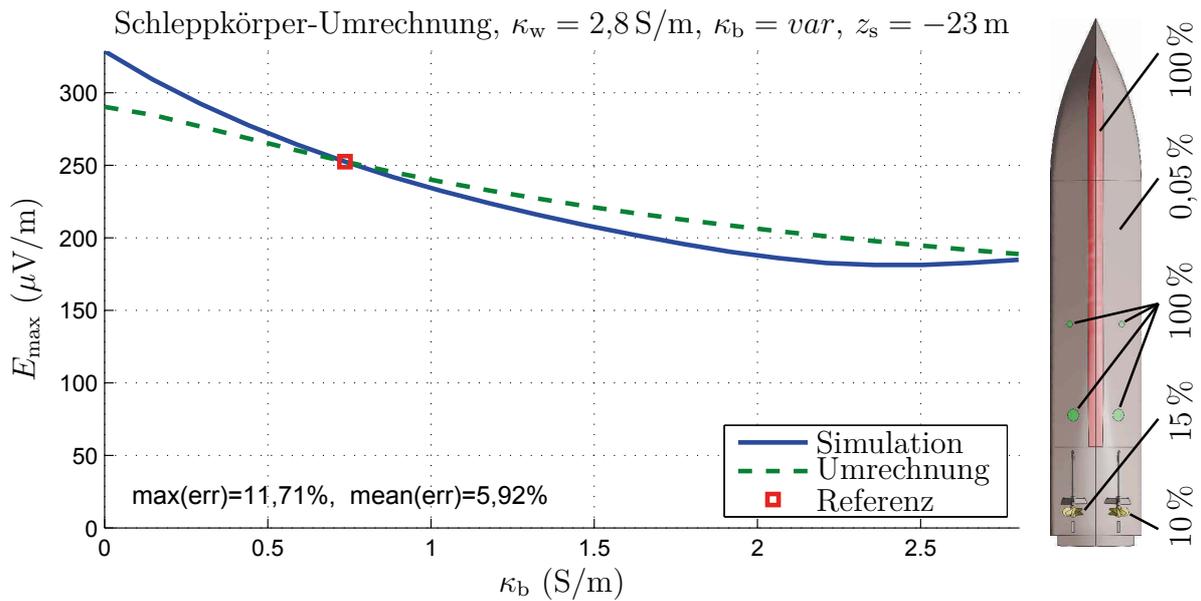


Abbildung 5.27.: Szenario „tb3“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

zwischen Abbildung 20 und Abbildung 23 in Anhang D nachvollzogen werden, welche die simulierte UEP-Signatur bei $\kappa_b = \kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$ und die Referenzsignatur bei $\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$ darstellen. Dem Vergleich dieser beiden Signaturen nach ist die Ursache für den Anstieg der Signaturstärke die geringere Abschwächung der E_z -Komponente durch den Seeboden, sobald die Seebodenleitfähigkeit in den Bereich der Wasserleitfähigkeit kommt. Dies wird zwar offensichtlich auch durch die Schleppkörper-Messung erfasst (cf. Abbildung 44 in Anhang D), wirkt sich bei der Umrechnung aber scheinbar nicht stark genug aus. Anzumerken ist noch, dass der hier beschriebene Fehler die Qualität der Umrechnung in den konkret untersuchten Fällen sogar verbessert, da er dem Fehler durch „Unterschätzung“ entgegenwirkt.

5.6.3. Variation der Wasserleitfähigkeit mit Seeboden

Bei einer Variation der Wasserleitfähigkeit in Gegenwart des Seebodens mit konstanter Leitfähigkeit ist, wie beim zuvor untersuchten Szenario „wg1“, eine qualitative Änderung der UEP-Feldverteilung zu erwarten und zwar sowohl aufgrund einer Änderung der Polarisationskennlinien-Arbeitspunkte, als auch durch eine sich ändernde Parallel- und Orthogonalverstärkung. Abbildung 5.28, 5.29 und 5.30 (Szenario „tg1“, „tg2“ und „tg3“) zeigen, dass die Schleppkörper-Umrechnung dennoch für alle untersuchten Beschichtungszustände brauchbare Ergebnisse liefert. Die größten Unterschiede zwischen Umrechnung und tatsächlicher Signaturstärke treten erwartungsgemäß bei niedriger Wasserleitfähigkeit auf, da hier die größte relative Abweichung zu den Referenz-Umgebungsbedingungen vorliegt. Auf das sonderbare Verhalten der Signaturstärke im

Bereich $\kappa_w < \kappa_b$ soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da diese Kombination von Umgebungsbedingungen selten⁶ sein dürfte.

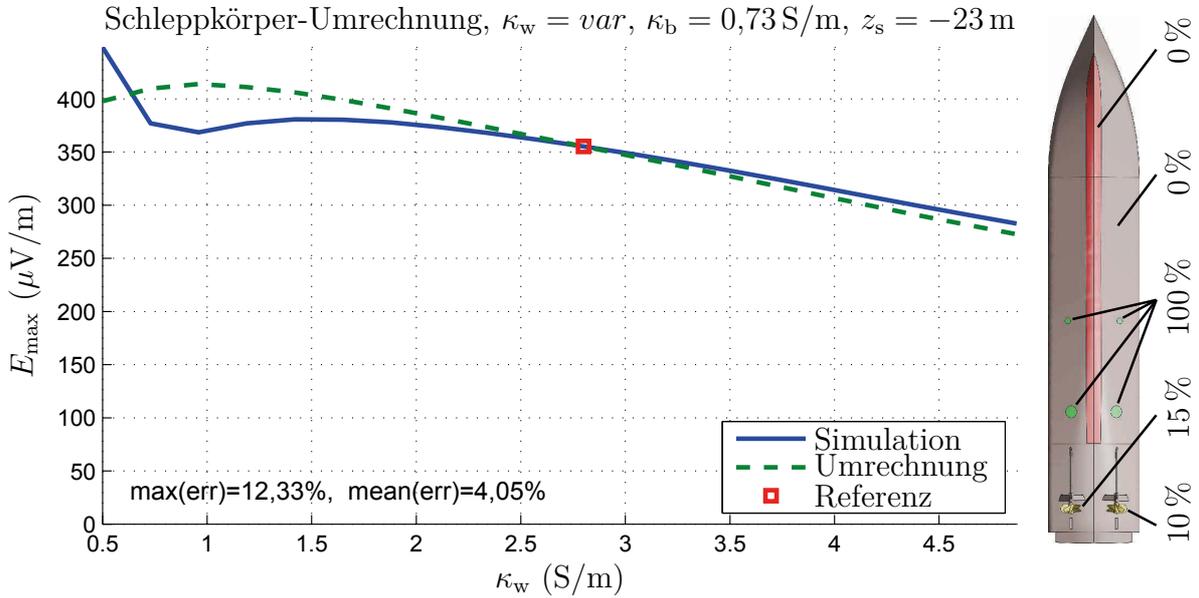


Abbildung 5.28.: Szenario „tg1“. Die Umrechnung gibt in guter Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

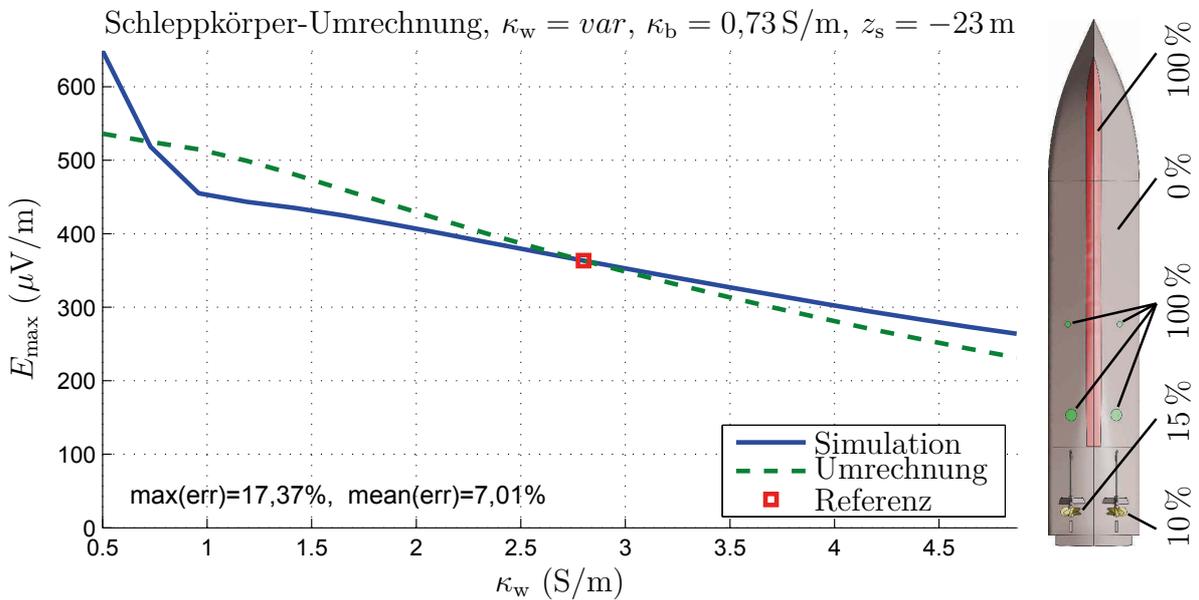


Abbildung 5.29.: Szenario „tg2“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

⁶Eine denkbare Ausnahme wären Strömungsänderungen im Bereich von Flussmündungen. Hierzu wären abseits der Umrechnungs-Thematik jedoch zunächst grundlegende Untersuchungen nötig.

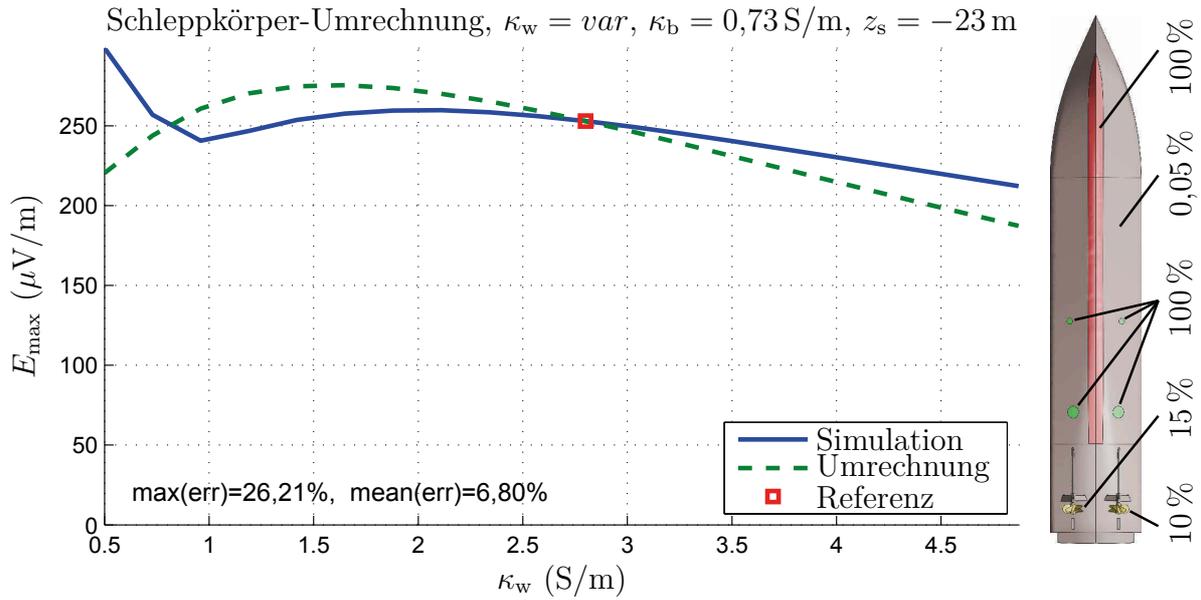


Abbildung 5.30.: Szenario „tg3“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.6.4. Zufällig generierte Umgebungsbedingungen

Um einen aussagekräftigen Vergleich durchführen zu können, wurde die Schleppkörper-Umrechnung auf die gleichen 100 (je Szenario) zufällig generierten Umgebungen angewandt, wie schon die Wellenstrom-Umrechnung in Unterkapitel 5.5.3. Analog zur dortigen Vorgehensweise ergibt sich die Umrechnungsvorschrift aus einer Kombination von Gleichung (5.2) und Gleichung (5.17):

$$E_i = \frac{E_i^t}{E_i^{t,\text{ref}}} \cdot \left(\frac{z_{s,\text{ref}}}{z_s} \right)^3 \cdot E_i^{\text{ref}} \quad \forall i \in \{x, y, z\} \quad (5.18)$$

Wie in den Abbildungen 5.31, 5.32 und 5.33 (Szenario „tz1“, „tz2“ und „tz3“) zu erkennen ist, liefert die Schleppkörper-Umrechnung für alle untersuchten Beschichtungszustände brauchbare Ergebnisse. Ein direkter Vergleich mit den Szenarien „wz1“, „wz2“ und „wz3“ zeigt, dass die Umrechnungsqualität besser als bei der Wellenstromrechnung ist, da mittels Schleppkörper auch die Einflüsse des Seebodens und der Anoden-Rumpfströme erfasst werden.

Ein Nachteil der Schleppkörper-Umrechnung gegenüber der Wellenstrom-Umrechnung ist jedoch der deutlich größere Aufwand bei der praktischen Umsetzung. Zudem könnten Abweichungen von x_{th} und z_t , sowie dynamisches Verhalten der UEP-Sensoren des Schleppkörpers (cf. Kapitel 4.2.2), die Qualität negativ beeinflussen, wohingegen es bei der Messung des Wellenstroms vergleichsweise wenige Unwägbarkeiten gibt.

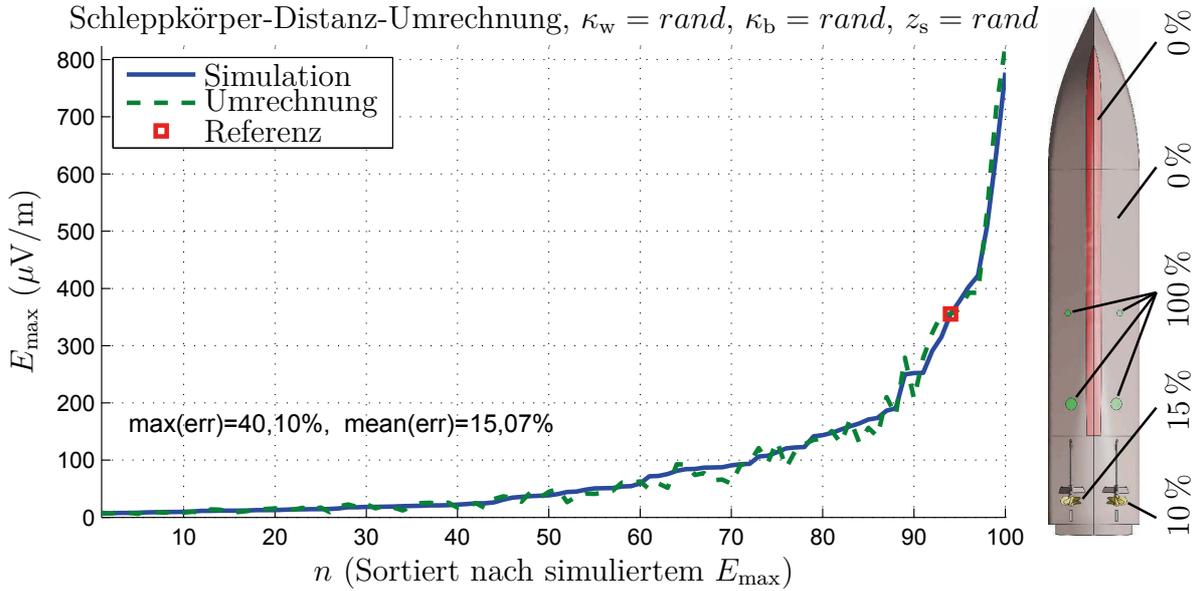


Abbildung 5.31.: Szenario „tz1“. Die Schleppkörper-Umrechnung liefert bessere Ergebnisse als die Wellenstrom-Umrechnung in Szenario „wz1“ und gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

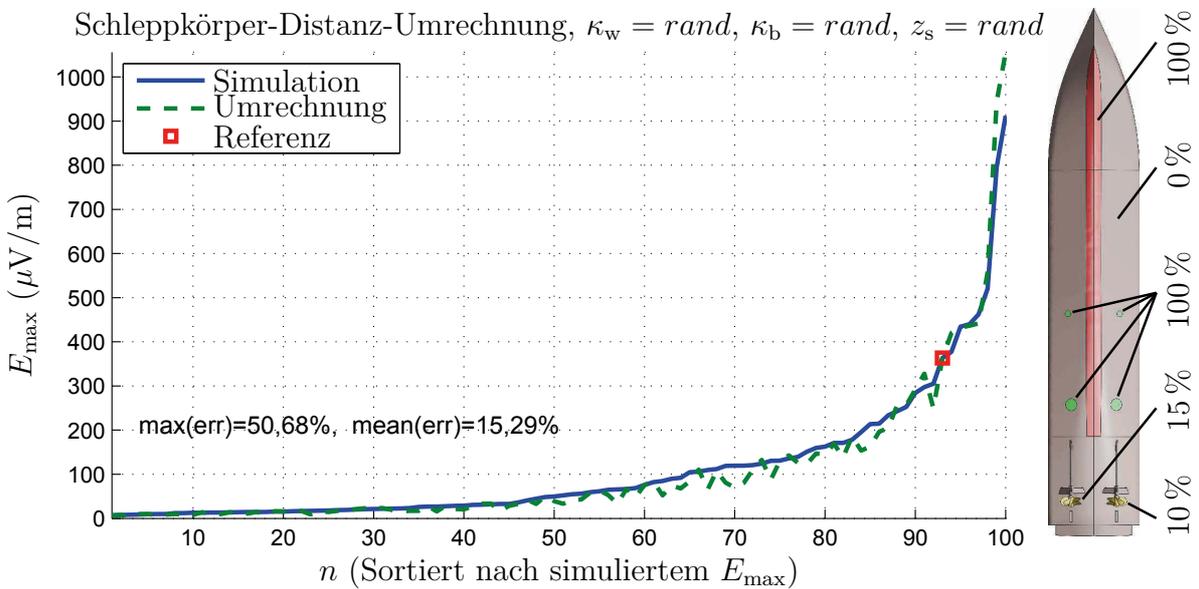


Abbildung 5.32.: Szenario „tz2“. Die Umrechnung gibt die tatsächliche Signaturstärke auch bei defekter Kielbesichtung in brauchbarer Näherung wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

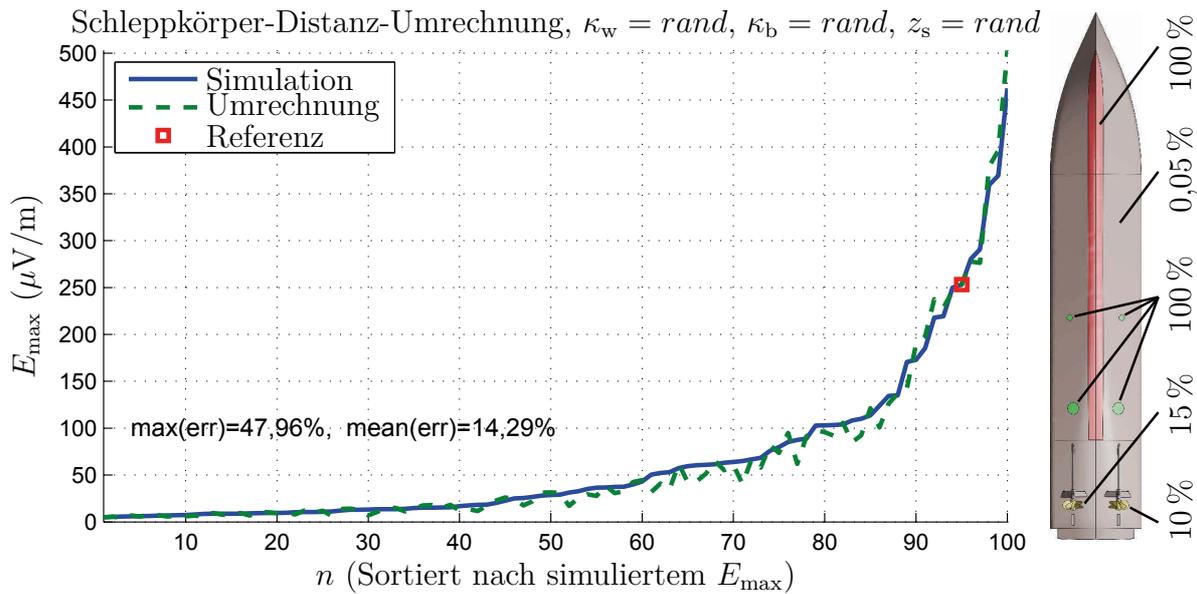


Abbildung 5.33.: Szenario „tz3“. Die Umrechnung gibt die tatsächliche Signaturstärke auch bei defekter Rumpfbeschichtung in brauchbarer Näherung wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.6.5. Alternative Umrechnungsvorschrift

Für alle Schleppkörper-Szenarien wurde noch eine vereinfachte Umrechnungsvorschrift unter Verwendung der Beträge anstelle der einzelnen E-Feld-Komponenten getestet:

$$\vec{E} = \frac{E^t}{E^{t,\text{ref}}} \cdot \vec{E}_{\text{ref}} \quad (5.19)$$

Tabelle 5.4 zeigt, dass dieser Ansatz vergleichbar gute Ergebnisse liefert. Die betragsweise Umrechnung hat zudem praktische Vorteile: Beim Betrachten der UEP-Feldverteilung in Abbildung 5.34 fällt auf, dass das E-Feld ab einem gewissen Abstand vom Wasserfahrzeug näherungsweise horizontal verläuft, also parallel zur Wasserlinie und zum Seeboden (cf. Abbildung 5.34). An der Schleppkörperposition dominiert⁷ daher die E_x^t -Komponente, weshalb bei realen Messungen von E_y^t und E_z^t ein kleineres SNR als für E_x^t zu erwarten ist. Bei der komponentenweisen Umrechnung könnte das zu einem Qualitätsverlust führen, während bei der betragsweisen Umrechnung diesbezüglich keine Probleme zu erwarten sind. Ein weiterer praktischer Vorteil der betragsweisen Umrechnung ist, dass wegen $|\vec{E}^t| \approx E_x^t$ nur noch ein einzelnes, horizontal orientiertes Referenzelektroden-Paar anstelle eines Drei-Achsen-Sensors im Schleppkörper verbaut werden muss.

⁷Siehe auch Abbildungen 35, 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49 und 51 in Anhang D.

Szenario	max(<i>err</i>)		mean(<i>err</i>)	
	Komp.	Betr.	Komp.	Betr.
tw1	0,18%	0,07%	0,06%	0,01%
tw2	0,62%	1,57%	0,22%	0,59%
tw3	13,25%	10,20%	3,21%	2,02%
tb1	13,38%	15,67%	7,49%	8,66%
tb2	11,60%	12,18%	5,45%	6,27%
tb3	11,71%	12,38%	5,92%	6,77%
tg1	12,33%	14,31%	4,05%	4,46%
tg2	17,37%	17,83%	7,01%	7,44%
tg3	26,21%	25,69%	6,80%	7,02%
tz1	40,10%	39,33%	15,07%	15,54%
tz2	50,68%	50,09%	15,29%	15,27%
tz3	47,96%	47,43%	14,29%	14,45%

Tabelle 5.4.: Gegenüberstellung der komponentenweisen (cf. Gleichung (5.17)) und betragsweisen (cf. Gleichung (5.19)) Vorschrift für die Schleppkörper-Umrechnung. Die Farben kennzeichnen den jeweils besseren (grün) und schlechteren (rot) Wert. Beide Ansätze liefern vergleichbar gute Ergebnisse. *Quelle:* Eigene Herstellung.

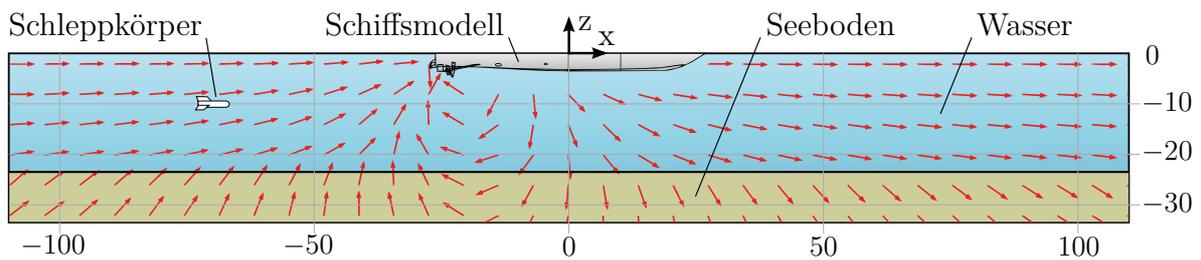


Abbildung 5.34.: Richtung des E-Feldes bzw. der Stromdichte für Aschau-Bedingungen ($\kappa_w = 2,8 \text{ S/m}$, $\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$, $z_b = -23,5 \text{ m}$). An der Schleppkörperposition ($x_{th} = 50 \text{ m}$, $z_t = -10 \text{ m}$) dominiert die E_x -Komponente. *Quelle:* Eigene Herstellung.

5.7. Einfluss von Ungleichmäßigkeiten des Seebodens

Um die Variationsmöglichkeiten bei der Untersuchung der Umrechnungsansätze in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wurde in der verwendeten Testumgebung (cf. Abbildung 5.2) stets ein gleichmäßiger Seeboden mit ebener Oberfläche und homogener Leitfähigkeit modelliert. Als Ergänzung sollen im Folgenden einige (von den Umrechnungsansätzen weitestgehend unabhängige) Untersuchungen zum prinzipiellen Einfluss von Ungleichmäßigkeiten des Seebodens auf die UEP-Signatur durchgeführt werden. Sie orientieren sich nahe an den Ergebnissen des Forschungsberichts [38].

5.7.1. Rippelmarken

Abbildung 5.35 zeigt durch Ebbe freigelegte *Rippel* im Sand, die durch Verwirbelungen des am Seeboden vorbeiströmenden Wassers produziert wurden. Solche Rippelmarken weisen typischerweise Amplituden von 5 cm bis 6 cm bei Wellenlängen von 30 cm bis 60 cm auf, können unter bestimmten Bedingungen jedoch auch Wellenlängen bis zu 5 m erreichen (genannt *Megarippel*).



Abbildung 5.35.: Durch Ebbe freigelegte Rippelmarken im Sand. *Quelle:* Grundform des Fotos in [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beach_near_Carloway_in_summer_2012_\(2\).JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beach_near_Carloway_in_summer_2012_(2).JPG) von Nutzer *Chmee2* unter CC Lizenz bzw. GFDL zur Verfügung gestellt.

Der Einfluss der Rippel auf die UEP-Signatur wurde mittels verschiedener COMSOL-Simulationen der in Abbildung 5.36 skizzierten Testumgebung untersucht, wobei die Signatur eines x -Dipols über einem sinusförmig gewellten Seeboden untersucht wurde. Die Seebodentiefe z_b wurde zu Vergleichszwecken derart definiert, dass sie stets die Tiefe direkt unterhalb des Sensors angibt, weshalb eine Variation des Rippel-Nullphasenwinkels β die mittlere Seebodentiefe ändert (z_d , z_s und z_b sind konstant).

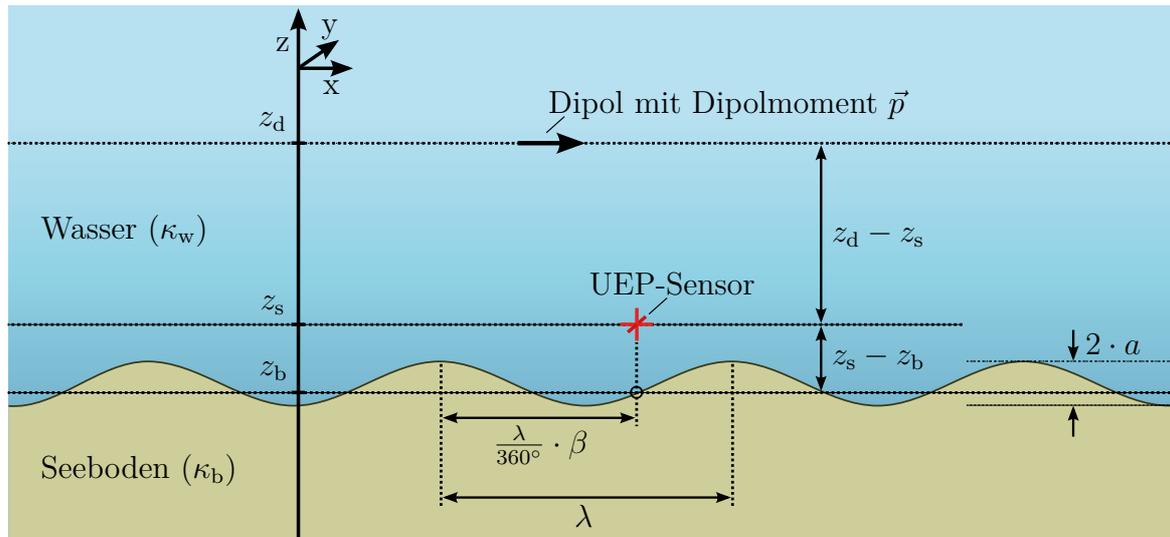


Abbildung 5.36.: Skizze der Testanordnung, anhand welcher der Einfluss von Rippelmarken auf die UEP-Signatur untersucht wurde. Tabelle 5.5 gibt eine kurze Beschreibung der oben gezeigten Größen und listet ihre Standardwerte auf. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [38].

Beschreibung	Größe	Standardwert	Bemerkung
Dipolmoment	\vec{p}	$1 \text{ Am} \cdot \vec{e}_x$	
Dipoltiefe	z_d	-10 m	Dipol- z -Position.
Sensortiefe	z_s	$-19,5 \text{ m}$	
Seebodentiefe	z_b	-20 m	
Wasserleitfähigkeit	κ_w	$2,8 \text{ S/m}$	Aschau-Bedingungen.
Seebodenleitfähigkeit	κ_b	$0,73 \text{ S/m}$	Aschau-Bedingungen.
Rippel-Amplitude	a	$0,5 \text{ m}$	
Rippel-Wellenlänge	λ	5 m	
Rippel-Ausrichtung (ist in Abbildung 5.36 nicht dargestellt)	α	0°	Bei $\alpha = 0^\circ$ liegen die Rippel-Fronten orthogonal zur Überfahrtsrichtung des Dipols. Bei $\alpha = 90^\circ$ fährt er parallel zu ihnen.
Rippel-Nullphasenwinkel	β	0°	Bei $\beta = 0^\circ$ befindet sich der Sensor direkt über einem Rippel-Berg, und bei $\beta = 180^\circ$ über einem Rippel-Tal.

Tabelle 5.5.: Aufstellung aller wichtigen Größen der Testanordnung. Sofern nicht explizit angegeben, wurden in den folgenden Szenarien die angegebenen Standardwerte verwendet. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [38].

Rippel-Ausrichtung

Wie bereits in Tabelle 5.5 beschrieben wurde, gibt α die Rippel-Ausrichtung relativ zur Überfahrtsrichtung des Dipols an. Abbildung 5.37 (Szenario „r1“) veranschaulicht, dass die Rippel-Ausrichtung offenbar nur einen geringen Einfluss auf die Stärke der UEP-Signatur hat. Die leicht erhöhte Signaturstärke bei $\alpha = 0^\circ$ kann anschaulich durch eine durch $\kappa_w > \kappa_b$ hervorgerufene „Überströmung“ der Rippel erklärt werden (cf. Abbildung 5.38).

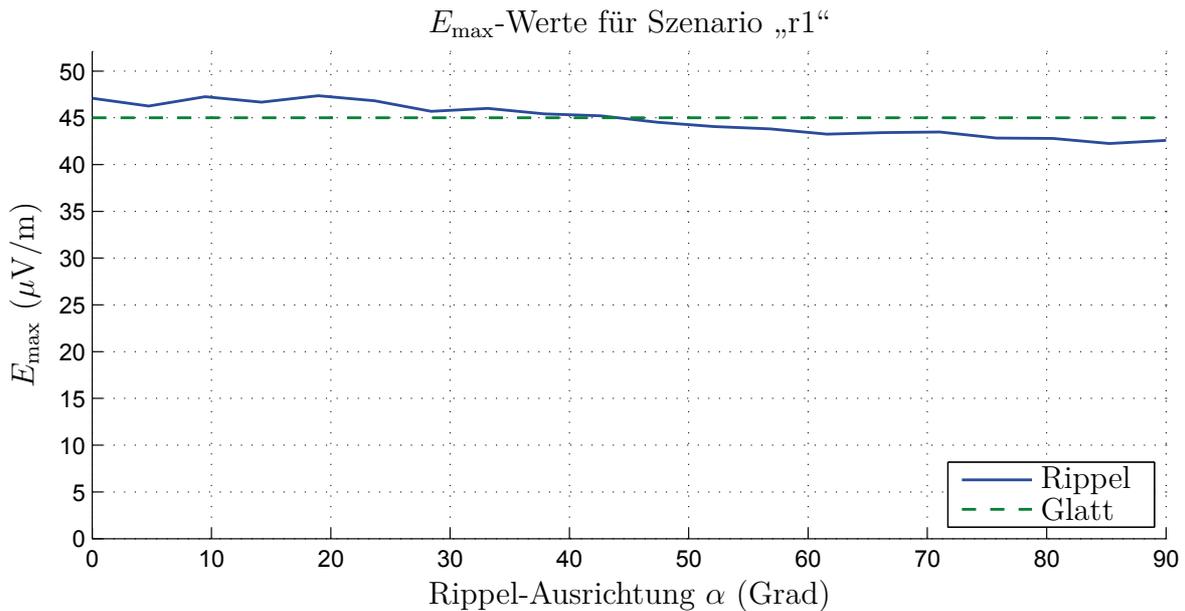


Abbildung 5.37.: Szenario „r1“. Die Abhängigkeit der Signaturstärke von der Rippel-Ausrichtung ist gering. Zu Vergleichszwecken wurde auch die Signaturstärke bei glattem Seeboden mit ansonsten gleichen Eigenschaften dargestellt. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [38].

Sensorposition auf Rippeln

Durch eine Variation des Rippel-Nullphasenwinkels β kann die Sensorposition auf den Rippelmarken beeinflusst werden. Befindet sich der Sensor auf einem Rippel-Berg ($\beta \approx 0^\circ$), so wird die Signatur im Vergleich zum glatten Seeboden verstärkt, befindet er sich in einem Rippel-Tal ($\beta \approx 180^\circ$), so wird sie abgeschwächt (cf. Abbildung 5.39, Szenario „r2“). Diese Abhängigkeit kann wieder anhand der Überströmung der Rippel erklärt werden: Die horizontalen Ströme fließen tendenziell über die Rippel hinweg anstatt durch sie hindurch, wobei die Rippel-Täler von den benachbarten Rippel-Bergen „abgeschattet“ werden.

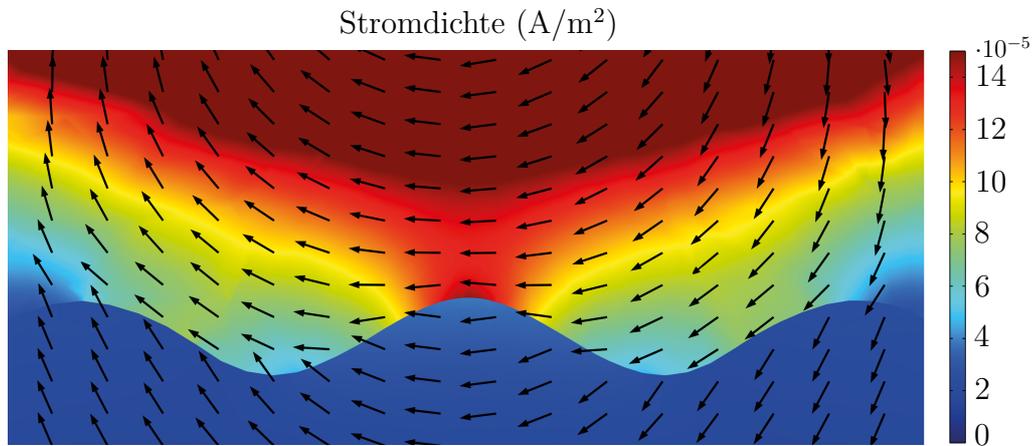


Abbildung 5.38.: Die geringere Leitfähigkeit des Seebodens bewirkt, anschaulich gesehen, dass die horizontalen Ströme tendenziell über die Rippel hinwegfließen anstatt durch sie hindurch. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [38].

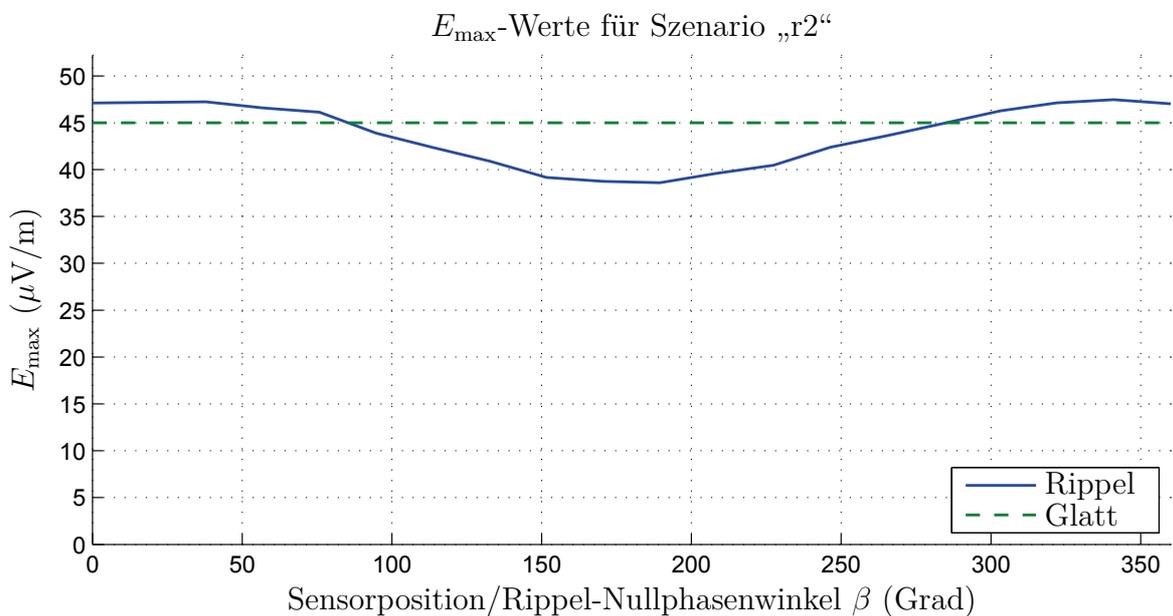


Abbildung 5.39.: Szenario „r2“. Ein UEP-Sensor auf einem Rippel-Berg misst eine stärkere Signatur als ein Sensor in einem Rippel-Tal. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [38].

Rippel-Größe

Aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften können Rippel keine beliebigen Kombinationen von Wellenlänge und Amplitude aufweisen, weshalb der Einfluss der beiden Größen in kombinierter Form anstatt in zwei separaten Szenarien untersucht wurde. Dabei wurde die Rippel-Größe sukzessive skaliert, genauer gesagt wurde eine systematische Variation der Wellenlänge bei gleichzeitiger Änderung der Amplitude entsprechend folgender Abhängigkeit durchgeführt:

$$a = \frac{1}{10} \cdot \lambda \quad (5.20)$$

Abbildung 5.40 (Szenario „r3“) zeigt, dass kleinere Rippel wie erwartet einen noch geringeren Einfluss auf die UEP-Signaturstärke haben als Megarippel.

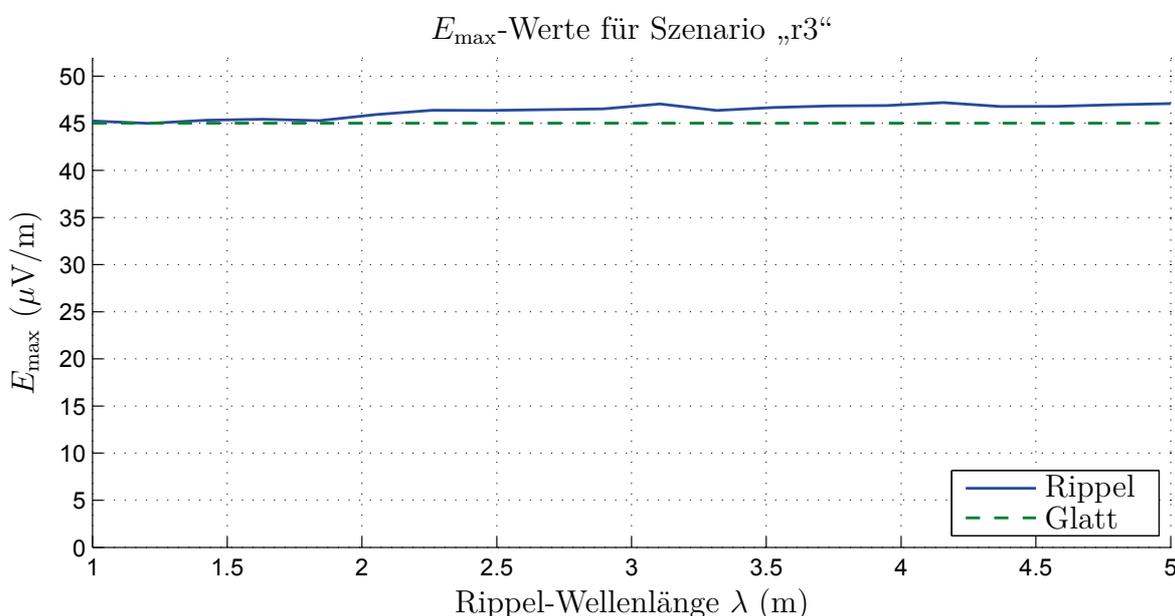


Abbildung 5.40.: Szenario „r3“. Kleinere Rippel haben wie erwartet einen noch geringeren Einfluss auf die UEP-Signaturstärke als Megarippel. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [38].

Fazit zum Einfluss der Rippel

Insgesamt ist der Einfluss der Rippel auf die UEP-Signatur als relativ gering zu bewerten, weshalb auch keine maßgebliche Auswirkung auf die Umrechnungsansätze zu erwarten ist. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass bei den Untersuchungen zur Rippel-Ausrichtung und Sensorposition jeweils Megarippel mit Abmessungen an der Obergrenze der zu erwartenden Rippel-Größe modelliert wurden (cf. Tabelle 5.5), und der Einfluss von Rippeln normaler Größe nochmals geringer ausfällt (cf. Abbildung 5.40).

5.7.2. Vertikal geschichtete Leitfähigkeit

Abbildung 5.41 skizziert eine vertikale Schichtung des Seebodens, mit Unterteilung in eine Sedimentschicht (z.B. Sand) und eine darunterliegende Gesteinsschicht. Für ein derartiges Dreimedienproblem (Wasser, Sediment, Gestein) findet sich in [27] eine allgemeine, analytische Herleitung auf Basis der Spiegelungsmethode. Zum besseren Verständnis soll zunächst das aus dem Grundlagenkapitel 2.3.5 bekannte Zweimedienproblem (Wasser, homogener Seeboden) unter Verwendung der in [27] eingeführten Bezeichnungen rekapituliert werden.

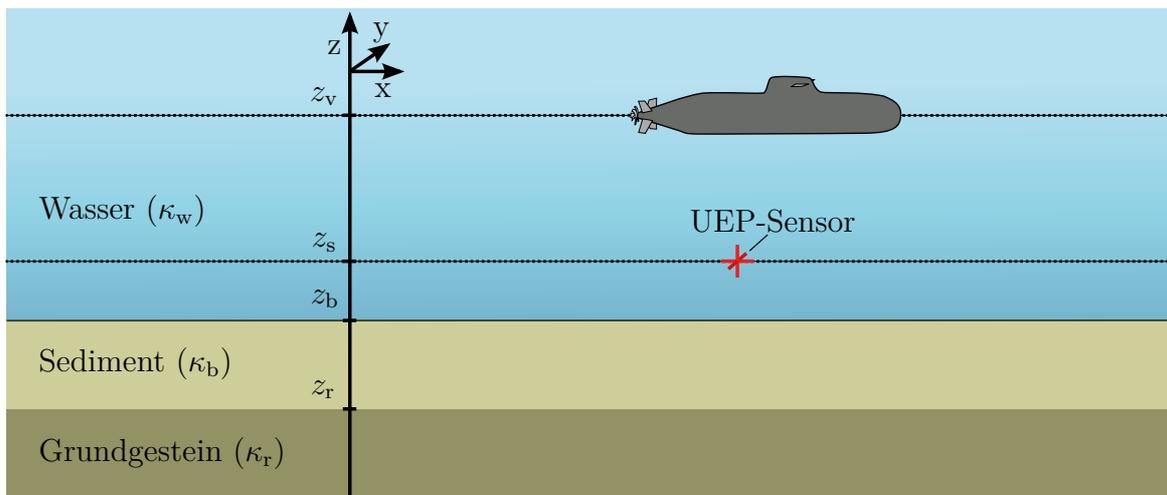


Abbildung 5.41.: Vertikal geschichteter Seeboden mit einer Sedimentschicht und einer Gesteinsschicht, genauer gesagt dem Halbraum des Grundgesteins. *Quelle:* Eigene Herstellung. Verwendet in [38].

Zweimedienproblem

Abbildung 5.42 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Zweimedienproblems mit punktförmiger Anregung q , welche beim stationären Strömungsfeld einer Punktstromquelle entspricht (cf. Unterkapitel 2.3.1).

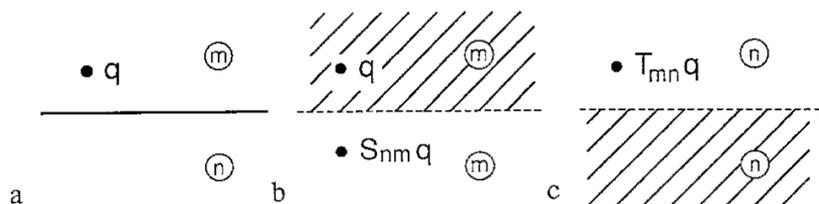


Abbildung 5.42.: **a** Zweimedienproblem, **b** Lösung für oberen Raumbereich, **c** Lösung für unteren Raumbereich. *Quelle:* [27, Bild 2].

Die Vorfaktoren S_{nm} und T_{mn} für die Spiegel- und Ersatzquelle werden in [27] wie folgt angegeben:

$$S_{nm} = \frac{\kappa_m - \kappa_n}{\kappa_m + \kappa_n} \quad (5.21)$$

$$T_{mn} = \frac{2 \cdot \kappa_n}{\kappa_m + \kappa_n} \quad (5.22)$$

Ein Vergleich mit Gleichung (2.48) und (2.49) zeigt, dass S_{nm} und T_{mn} den dort verwendeten Faktoren entsprechen:

$$I' = I \cdot \frac{\kappa_w - \kappa_b}{\kappa_w + \kappa_b} = I \cdot S_{wb} \quad (5.23)$$

$$I'' = I \cdot \frac{2 \cdot \kappa_b}{\kappa_w + \kappa_b} = I \cdot T_{wb} \quad (5.24)$$

Dreimedienproblem

Im Vergleich zur Berechnung des Zweimedienproblems wird die Berechnung des Dreimedienproblems aufgrund der zusätzlichen Materialgrenze deutlich komplizierter, weil unendliche Reihen von Spiegel- bzw. Ersatzladungen entsprechend Abbildung 5.43 benötigt werden, um die Randbedingungen an beiden Materialgrenzen zu erfüllen.

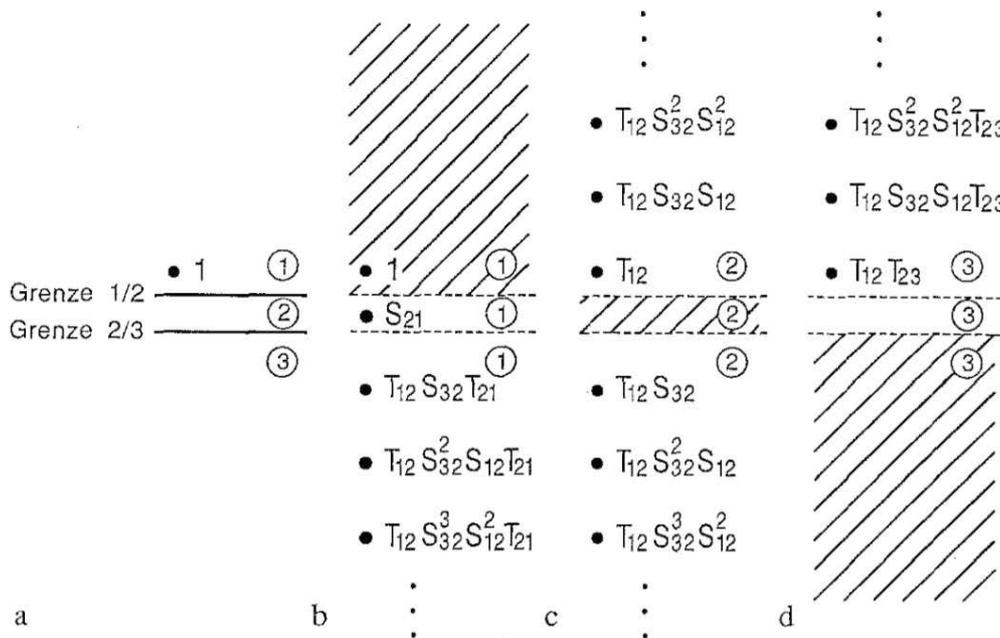


Abbildung 5.43.: **a** Dreimedienproblem, **b** Lösung für oberen Raumbereich, **c** Lösung für mittleren Raumbereich, **d** Lösung für unteren Raumbereich. Quelle: [27, Bild 3].

Effektive, homogene Seebodenleitfähigkeit

Bei der Herleitung der komponentenweisen Umrechnung (cf. Unterkapitel 5.4) wurde explizit von einem Zweimedienproblem ausgegangen, weshalb es wünschenswert wäre, ein Dreimedienproblem mit geschichtetem Seeboden durch ein Zweimedienproblem mit effektiver, homogener Seebodenleitfähigkeit approximieren zu können. Die prinzipiell unterschiedliche Verteilung der Quellen (cf. Abbildung 5.42 und 5.43) verdeutlicht jedoch, dass beim Dreimedienproblem im Allgemeinen eine qualitativ andere Feldverteilung als beim Zweimedienproblem vorliegt. Unter gewissen Bedingungen ist eine entsprechende Approximation aber dennoch möglich/sinnvoll, wobei es sich bei näherer Betrachtung ausschließlich um Spezialfälle handelt, bei denen effektiv bereits ein Zweimedienproblem vorliegt. Dazu zählt der Fall, dass sich die Leitfähigkeiten zweier benachbarter Schichten nur geringfügig unterscheiden, wie es zum Beispiel bei einem Dreimedienproblem mit $\kappa_1 = 2,8 \text{ S/m}$, $\kappa_2 = 0,73 \text{ S/m}$ und $\kappa_3 = 0,63 \text{ S/m}$ gegeben ist. Eine Auswertung der Vorfaktoren für die ersten drei Spiegelquellen zur Berechnung der Feldverteilung in Halbraum 1 (cf. Abbildung 5.43.b) ergibt:

$$S_{21} = \frac{\kappa_1 - \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2} = 0,586 \quad (5.25)$$

$$T_{12} \cdot S_{32} \cdot T_{21} = \frac{2 \cdot \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2} \cdot \frac{\kappa_2 - \kappa_3}{\kappa_2 + \kappa_3} \cdot \frac{2 \cdot \kappa_1}{\kappa_2 + \kappa_1} = 0,048 \quad (5.26)$$

$$T_{12} \cdot S_{32}^2 \cdot S_{12} \cdot T_{21} = \frac{2 \cdot \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2} \cdot \left(\frac{\kappa_2 - \kappa_3}{\kappa_2 + \kappa_3} \right)^2 \cdot \frac{\kappa_2 - \kappa_1}{\kappa_2 + \kappa_1} \cdot \frac{2 \cdot \kappa_1}{\kappa_2 + \kappa_1} \approx -0,002 \quad (5.27)$$

Die Spiegelquellen höherer Ordnung (Gleichung (5.26) und (5.27)) sind in diesem Beispiel betragsmäßig mehr als eine Größenordnung kleiner als die erste Spiegelquelle (Gleichung (5.25)), weshalb sie nur einen geringen Einfluss auf die Feldverteilung im oberen Halbraum haben. In Folge dessen entspricht die Feldverteilung näherungsweise der eines Zweimedienproblems mit $\kappa_1 = 2,8 \text{ S/m}$ und $\kappa_2 = 0,73 \text{ S/m}$.

Die Approximation eines Dreimedienproblems mittels Zweimedienproblem ist ebenfalls möglich, wenn die mittlere Schicht (Raumbereich 2) im Vergleich zum Abstand der Original-Quelle von der Materialgrenze $1/2$ verhältnismäßig dick oder aber relativ dünn ist. Der letztere Spezialfall wurde im Forschungsbericht [38] hinsichtlich einer dünnen Sedimentschicht auf Grundgestein ausführlich untersucht. Im Falle einer vergleichsweise dicken mittleren Schicht liegen Original-Quelle und erste Spiegelquelle deutlich näher an der Materialgrenze $1/2$ als die Spiegelquellen höherer Ordnung, welche entsprechend wieder nur einen geringen Einfluss auf die Feldverteilung im oberen Halbraum haben und entsprechend vernachlässigt werden können.

Mehrmedienproblem und diffuse Schichtung

Probleme mit mehr als drei Schichten lassen sich analog zu der Vorgehensweise beim Dreimedienproblem lösen, also durch eine systematische Mehrfachspiegelung der Spiegelquellen und Ersatzquellen. Dabei wird die Berechnung durch das Hinzukommen

weiterer Grenzflächen, und entsprechend weiterer unendlicher Reihen von Stromquellen, zunehmend komplexer (cf. Berechnung Viermedienproblem in [27]). Die Feldverteilung für einen Seeboden mit diffuser⁸ Schichtung stellt keine neue Problemkategorie dar, da sie prinzipiell durch ein diskretes Mehrmedienproblem mit einer großen Anzahl Schichten beschrieben werden kann.

Fazit zum Einfluss geschichteter Seebodenleitfähigkeit

Es konnte gezeigt werden, dass es nur unter bestimmten Bedingungen möglich ist, ein Dreimedienproblem mit geschichtetem Seeboden durch ein Zweimedienproblem mit homogenem Seeboden zu approximieren (cf. auch [38]). Dies wirkt sich insbesondere negativ auf die komponentenweise Umrechnung (cf. Unterkapitel 5.4) aus, bei deren analytischer Herleitung explizit von einem Zweimedienproblem ausgegangen wurde. Bei der Schleppkörper-Umrechnung ist hingegen keine maßgeblich schlechtere Umrechnungsqualität zu erwarten, da sich der Einfluss der geschichteten Seebodenleitfähigkeit mit gleicher Tendenz auf die UEP-Felder an der Position des Sensors (in Bodennähe) und des Schleppkörpers auswirkt. Wellenstrom- und Distanz-Umrechnung sind von Ungleichmäßigkeiten nicht betroffen, da diese Umrechnungsansätze generell nicht in der Lage sind den Einfluss des Seebodens zu erfassen.

⁸Also z.B. mit einer in der Tiefe stetig abnehmenden Leitfähigkeit.

6. AEP-Signatur

In diesem Kapitel soll der prinzipielle Zusammenhang zwischen der UEP-Signatur und den damit einhergehenden elektrischen Überwasser-Feldern untersucht werden, welche im Folgenden als „Above water Electric Potential“-Signatur (AEP) bezeichnet werden (cf. Abbildung 6.1). Neben der Herleitung eines analytischen und numerischen Ansatzes zur Berechnung von AEP soll auch die Relevanz im Kontext von ASW diskutiert werden. Das Thema ist Gegenstand einer Konferenzveröffentlichung [40] und eines bislang unveröffentlichten Journal-Artikels [41].

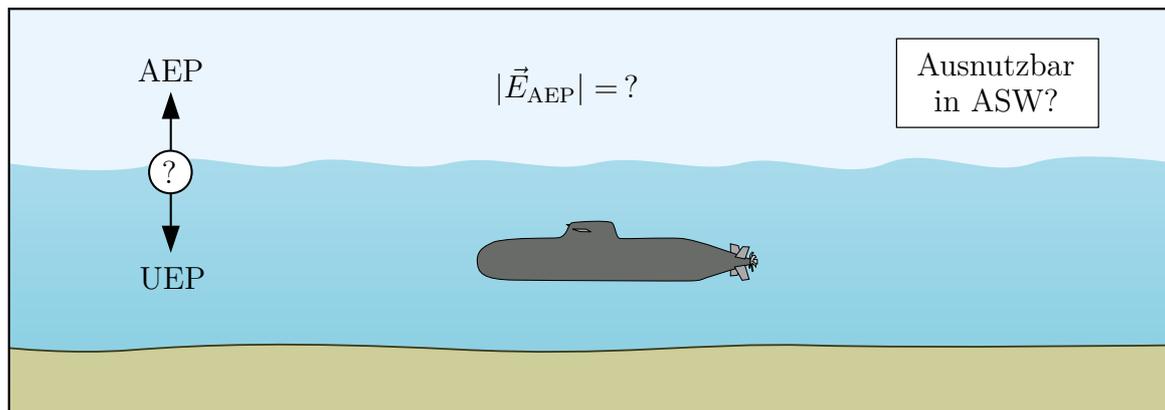


Abbildung 6.1.: Überblick der drei zentralen Fragen bezüglich AEP: Wie hängen UEP und AEP zusammen, wie groß sind typische AEP-Feldstärken und kann AEP im ASW ausgenutzt werden? *Quelle:* Eigene Herstellung, ähnlich [40, Fig.1].

6.1. Analytische Berechnung

Die Beziehung zwischen UEP und AEP soll zunächst analytisch untersucht werden, wobei offensichtlich ist, dass die letztendlich interessantesten AEP-Signaturen von U-Booten aufgrund der Komplexität der anregenden Geometrie und wegen der beteiligten elektrochemischen Reaktionen an den Phasengrenzen nicht analytisch, sondern nur numerisch berechnet werden können. Es ist dennoch sinnvoll, den Sachverhalt in einem ersten Schritt anhand einfacher analytischer Berechnungen nachzuvollziehen und

somit Einblick in die prinzipiellen Zusammenhänge zu erlangen. Wie schon bei der iterativen Berechnung der elektrochemischen Zelle in Kapitel 3.1.1, ergeben sich dadurch außerdem erste Vergleichsmöglichkeiten zur Überprüfung der später angestrebten numerischen Simulationen.

6.1.1. Spiegelungsmethode für die Wasserlinie

Das Minimal-Szenario für AEP beinhaltet eine punktförmige Stromquelle I in einen wassergefüllten Halbraum, welcher über eine ebene Wasserlinie an einen luftgefüllten Halbraum angrenzt. Die Berechnung kann im Sinne eines Spezialfalls der in Kapitel 2.3.5 vorgestellten Spiegelungsmethode für leitfähige Halbräume durchgeführt werden. Im konkreten Fall sind κ_1 und κ_2 aus Gleichung (2.48) und (2.49) die Leitfähigkeiten des Wassers bzw. der Luft, wobei Letztere in guter Näherung als Null angenommen werden kann:

$$\kappa_1 = \kappa_w \quad (6.1)$$

$$\kappa_2 = \kappa_a = 0 \quad (6.2)$$

Für die beiden Spiegel-Stromquellen I' und I'' ergibt sich somit:

$$I' = \frac{\kappa_w - \kappa_a}{\kappa_w + \kappa_a} \cdot I \quad (6.3)$$

$$= I \quad (6.4)$$

$$I'' = \frac{2 \cdot \kappa_a}{\kappa_w + \kappa_a} \cdot I \quad (6.5)$$

$$= 0 \quad (6.6)$$

Die Potentialverteilung unterhalb der Wasserlinie (UEP) kann wie gewohnt mittels Superpositionsprinzip berechnet werden (cf. Gleichung (2.42)):

$$\varphi_w(\vec{r}) = \frac{I}{4\pi\kappa_w |\vec{r} - \vec{\xi}|} + \frac{I'}{4\pi\kappa_w |\vec{r} - \vec{\xi}'|} \quad (6.7)$$

$$= \frac{I}{4\pi\kappa_w} \cdot \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{\xi}|} + \frac{1}{|\vec{r} - \vec{\xi}'|} \right) \quad (6.8)$$

Dabei sind $\vec{\xi}$ und $\vec{\xi}'$ die Ortsvektoren der realen Quelle I bzw. der (gleichgroßen) Spiegel-Quelle I' . Um die Potentialverteilung oberhalb der Wasserlinie (AEP) zu berechnen, darf der Strom I'' nicht einfach entsprechend Gleichung (6.6) zu Null gesetzt werden, sondern es muss mit Gleichung (6.5) substituiert werden, so dass der resultie-

rende Bruch mit κ_a ($\kappa_a = 0$, cf. Gleichung (6.2)) gekürzt werden kann:

$$\varphi_a(\vec{r}) = \frac{I''}{4\pi\kappa_a |\vec{r} - \vec{\xi}|} \quad (6.9)$$

$$= \frac{2 \cdot \kappa_a}{\kappa_w + \kappa_a} \cdot \frac{I}{4\pi\kappa_a |\vec{r} - \vec{\xi}|} \quad (6.10)$$

$$= \frac{2I}{4\pi\kappa_w |\vec{r} - \vec{\xi}|} \quad (6.11)$$

6.1.2. Verdoppelung der Signaturstärke bei gleichem Abstand

Gleichung (6.11) enthält ein interessantes Ergebnis: Die AEP-Feldverteilung ist die gleiche, als wäre der komplette Raum mit Wasser gefüllt und der anregende Strom verdoppelt worden. Anders ausgedrückt ist für einen fixen Abstand $d = |\vec{r} - \vec{\xi}|$ des Aufpunktes \vec{r} zur Quelle I die AEP-Signatur doppelt so groß wie die UEP-Signatur. Diese Interpretation gilt jedoch nur näherungsweise für den Fall, dass der Einfluss der Wasserlinie am UEP-Aufpunkt vernachlässigbar ist, also $|\vec{r} - \vec{\xi}| \ll |\vec{r} - \vec{\xi}'|$ gilt und infolgedessen der I' -Term in Gleichung (6.7) vernachlässigt werden darf. So lässt sich etwa folgern, dass eine direkt oberhalb einer Quelle gemessene AEP-Signatur ungefähr doppelt so groß ist wie die direkt unterhalb, im gleichen Abstand zur Quelle, gemessene UEP-Signatur. Dies soll in den Unterkapiteln 6.2.3 und 6.2.4 noch anhand von zwei konkreten Beispielen überprüft werden.

6.2. Numerischer Ansatz

Der entscheidende Ansatz für die numerische Simulation von AEP ist die Stetigkeit des elektrischen Potentials an der Wasserlinie, welche auch bei der Herleitung der Spiegelungsmethode eine wichtige Rolle spielt. Die Bedingung kann relativ einfach umgesetzt werden, indem die Simulation des stationären Strömungsfeldes (UEP) im Sinne eines „multiphysikalischen“ Ansatzes über die Potentialverteilung an der Wasserlinie an eine elektrostatische Simulation (AEP) gekoppelt wird.

6.2.1. Umsetzung in COMSOL

Die im Folgenden präsentierte numerische AEP-Simulation wurde mit dem FEM-Tool COMSOL Multiphysics (AC/DC Module) durchgeführt (cf. Kapitel 2.5). In einem ersten Schritt wurde das stationäre Strömungsfeld (UEP) unter Verwendung des „Electric

currents“ Physics-Modes simuliert, wobei an der Wasserlinie die Von-Neumann-Randbedingung $\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$ (cf. Gleichung (2.37)) eingestellt wurde. Danach wurde die Potentialverteilung an der Wasserlinie evaluiert und mittels Dirichlet-Randbedingung (cf. Gleichung (2.36)) als Anregung für eine zweite Simulation im „Electrostatics“ Physics-Mode verwendet. Zur Umsetzung einer offenen Randbedingung¹ wurden sog. *Infinite Elements* an den übrigen Außenrändern der Simulationsgebiete hinzugefügt. Da für die Simulation von UEP wie bisher der „Electric currents“ Physics-Mode verwendet wird, können ohne weiteres alle etablierten UEP-Anregungsformen verwendet werden, also nicht nur Punktstromquellen, sondern auch Phasengrenzen mit nichtlinearen Polarisationskennlinien (cf. Unterkapitel 2.5.3).

6.2.2. Vergleich mit analytischer Berechnung

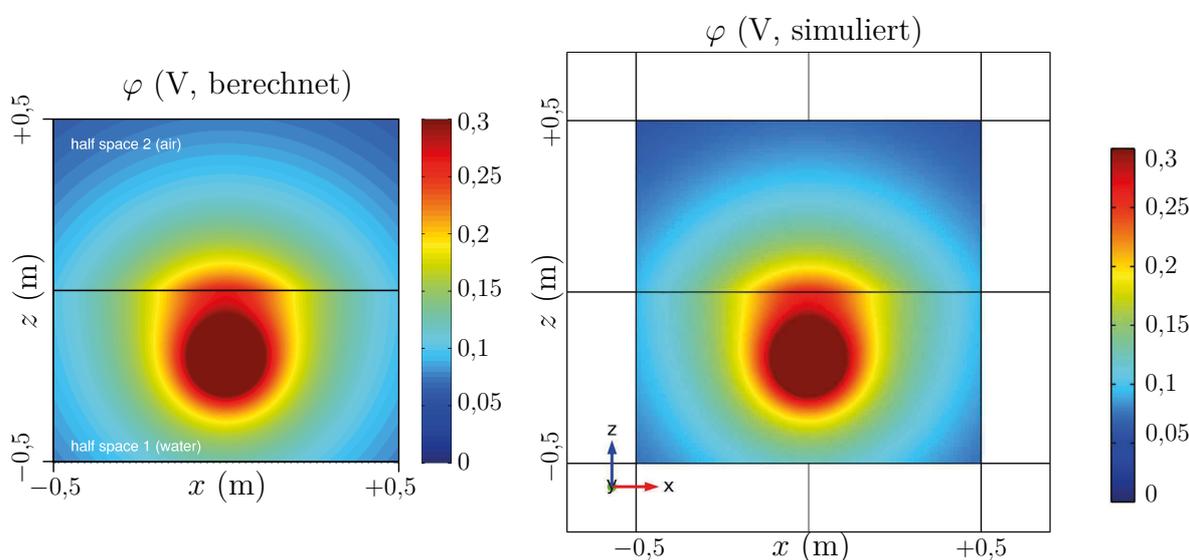


Abbildung 6.2.: Analytisch berechnete (links) und numerisch simulierte (rechts) Potentialverteilung einer Punktstromquelle ($I = 1$ A) die sich in einer Tiefe von $z_q = -0,2$ m unterhalb der Wasserlinie befindet. Die boxenförmigen Erweiterungen der Außenränder sind die Infinite Elements, im Querschnitt als weiße Rechtecke erkennbar (rechte Seite). *Quelle:* Eigene Herstellung, verwendet in [41].

Abbildung 6.2 zeigt die Potentialverteilung einer Punktstromquelle, die zu Vergleichszwecken sowohl analytisch berechnet, als auch numerisch simuliert wurde. Die Darstellung des relativen Fehlers in Abbildung 6.3 verdeutlicht, dass die Ergebnisse der beiden Ansätze wie erwartet eine gute Übereinstimmung aufweisen. Der vergleichsweise hohe Fehler von bis zu 4% im Bereich der Außenränder ist der numerischen Näherung bei der Umsetzung der offenen Randbedingung geschuldet und kann durch

¹Unendlich weit ausgedehnter Wasser- und Luft-Halbraum.

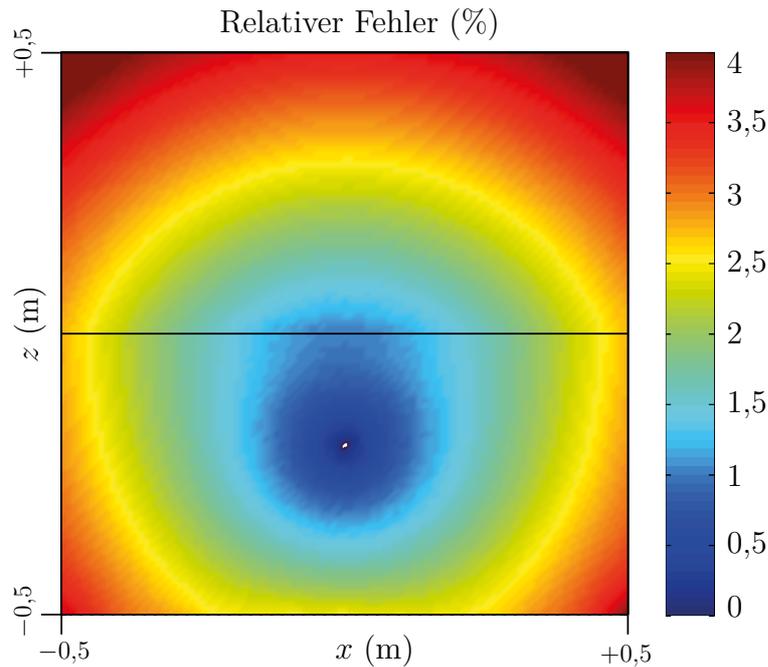


Abbildung 6.3.: Relativer Fehler, berechnet als Absolutwert der Differenz von berechnetem und simuliertem Potential geteilt durch ihren Mittelwert. *Quelle:* Eigene Herstellung, verwendet in [41].

eine Vergrößerung der Infinite Elements oder eine Verfeinerung ihrer Diskretisierung reduziert werden.

6.2.3. E-Feld und Flächenladung

Abbildung 6.4 zeigt den numerisch berechneten Betrag der elektrischen Feldstärke für die aus dem vorhergehenden Unterkapitel bekannte Punktstromquelle. Die entsprechend Gleichung (6.11) zu erwartende ungefähre Verdoppelung der AEP-Felder ist in der Grafik zu erahnen. Eine Auswertung der Feldstärken an zwei von der Quelle gleich weit entfernten Aufpunkten $\vec{r}_u = (0, 0, -0.5) \text{ m}$ und $\vec{r}_a = (0, 0, +0.1) \text{ m}$ ergibt die Feldstärken $|\vec{E}(\vec{r}_u)| = 0,849 \text{ V/m}$ und $|\vec{E}(\vec{r}_a)| = 0,489 \text{ V/m}$, was einem Verhältnis von $a = 1,74$ entspricht.

In Abbildung 6.5 ist die Flächenladungsdichte σ_{wl} an der Wasserlinie dargestellt, die als die eigentliche Ursache für das Auftreten von AEP interpretiert werden kann. Sie lässt sich über die Stetigkeitsbedingung für die elektrische Flussdichte berechnen:

$$\sigma_{wl} = \vec{n}_{12} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \quad (6.12)$$

$$= D_{z2} - D_{z1} \quad (6.13)$$

$$= D_{z2} \quad (6.14)$$

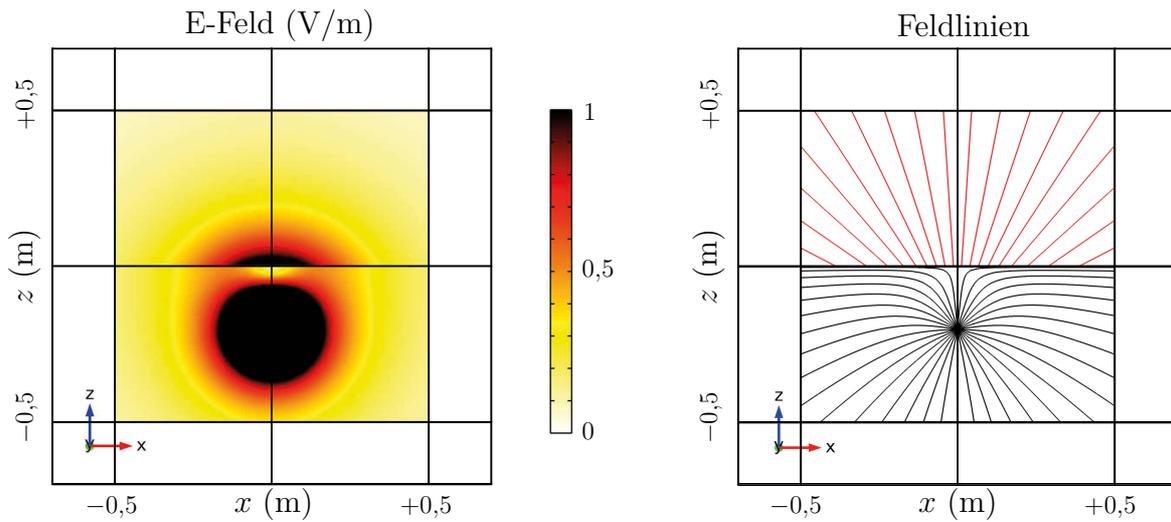


Abbildung 6.4.: Numerisch simuliertes E-Feld einer Punktstromquelle ($I = 1 \text{ A}$, $z_q = -0,2 \text{ m}$) als Betrag (links) und Feldlinien (rechts). *Quelle:* Eigene Herstellung, verwendet in [41].

Die Normalkomponente D_{z1} wird aufgrund der Von-Neumann-Randbedingung zu Null, was auch an dem tangentialen Verlauf des Feldes unterhalb der Wasserlinie erkennbar ist (cf. Abbildung 6.4, rechts).

6.2.4. AEP-Simulation eines U-Boot-Modells

Zur Demonstration der praktischen Anwendbarkeit des numerischen Ansatzes wurde die AEP-Feldverteilung für das in Abbildung 6.6 dargestellte U-Boot-Modell simuliert. Das elektrochemische Verhalten der Phasengrenzen wurde dabei wie gewohnt (Kapitel 3 und 5) entsprechend gemessener Polarisationskennlinien berücksichtigt, wobei zur Vorbeugung von Komplikationen bei der Freigabe durch die Bundeswehr nicht die tatsächlich verbauten Materialien modelliert wurden.

Die Auswertung der maximalen Signaturstärke entlang der AEP- und UEP-Signaturlinie (cf. Abbildung 6.7), welche beide im gleichen vertikalen Abstand zum U-Boot verlaufen, ergibt ein Verhältnis von $E_{\max, \text{AEP}}/E_{\max, \text{UEP}} = 1,89$. Dies entspricht in guter Näherung der gemäß Gleichung (6.11) erwarteten Verdoppelung.

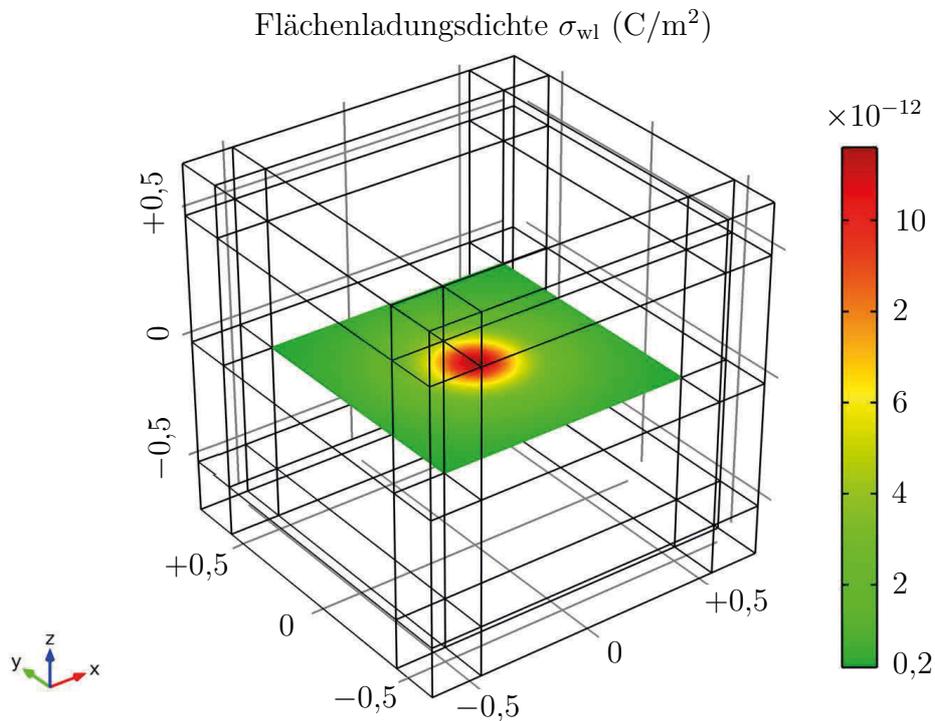


Abbildung 6.5.: Numerisch simulierte Flächenladungsdichte σ_{wl} an der Wasserlinie für eine Punktstromquelle ($I = 1$ A, $z_q = -0,2$ m). *Quelle:* Eigene Herstellung, verwendet in [41].

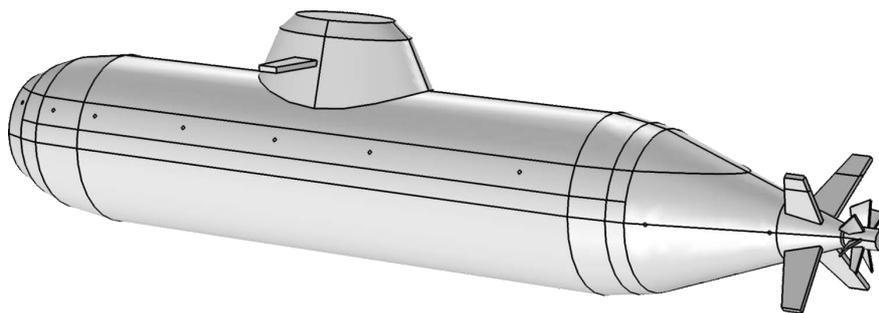


Abbildung 6.6.: COMSOL-Geometrie des numerischen U-Boot-Modells, welches der deutschen U 212A Klasse nachempfunden ist. *Quelle:* Eigene Herstellung.

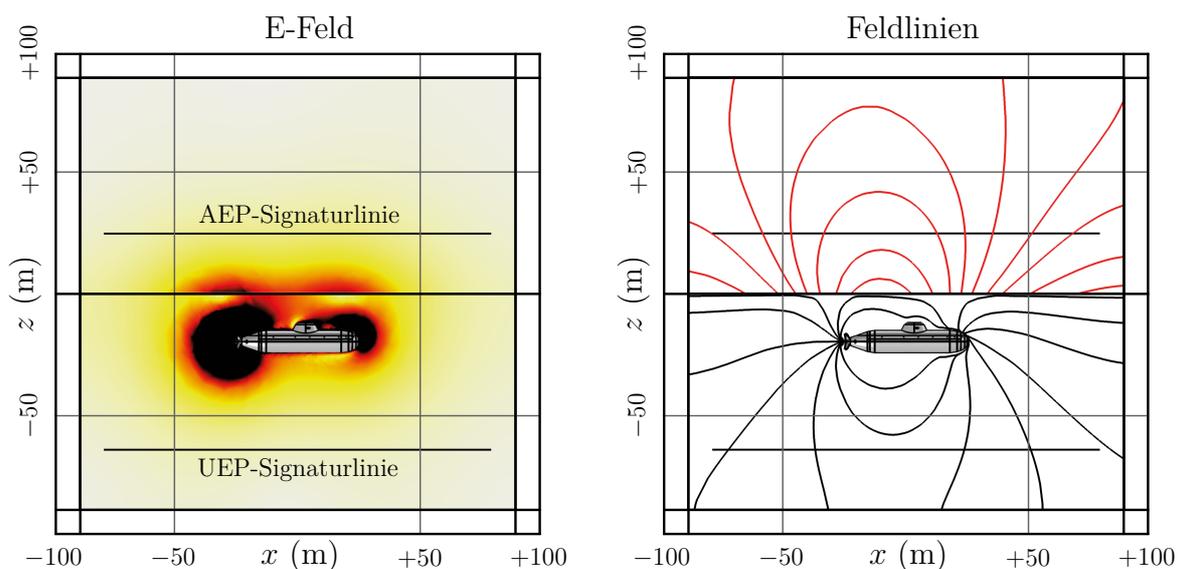


Abbildung 6.7.: Numerisch simuliertes E-Feld eines U-Boot-Modells als Betrag (links) und Feldlinien (rechts). *Quelle:* Eigene Herstellung.

6.3. Relevanz von AEP im Kontext von ASW

Im Bereich ASW ist die luftgestützte MAD², die typischerweise mittels Helikopter durchgeführt wird, bereits eine etablierte Methode zur Detektion getauchter U-Boote [42]. Ob ein analoges Verfahren unter Ausnutzung von AEP möglich ist hängt vor allem von der Empfindlichkeit der in Luft verwendbaren E-Feld-Sensoren und dem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) ab, bezogen auf die zu erwartenden AEP-Feldstärken. Tabelle 6.1 gibt hierzu einen groben Überblick.

	Bemerkung	Feldstärke
Sensor	Kleinste Empfindlichkeit eines handelsüblichen Rotationsvoltmeters (Luft-Sensoren ohne galvanische Kontaktierung zur Messung elektrostatischer Felder) laut Herstellerangaben [43, S.4].	$> 0,3 \text{ V/m}$.
Umgebung	Angaben aus [44], [45, Table 1].	$> 10 \text{ V/m}$
AEP	Signatur 20 m oberhalb vom U-Boot, geschätzt anhand typischer Werte für UEP.	$< 0,002 \text{ V/m}$

Tabelle 6.1.: Überblick über Sensorempfindlichkeit und Feldstärken zur Bewertung der Machbarkeit luftgestützter Ausnutzung von AEP. *Quelle:* Eigene Herstellung.

²Magnetic Anomaly Detection (cf. Kapitel 2.1.1).

Die zu erwartenden AEP-Feldstärken sind offenbar mehr als zwei Größenordnungen kleiner als die Empfindlichkeit entsprechender Sensoren und die Umgebungsfeldstärken, so dass eine erfolgreiche Ausnutzung von AEP ohne Weiteres nicht möglich scheint.

Es wäre jedoch denkbar statt eines elektrostatischen Sensors ein Gradiometer, also einen Wechselfeld-Sensor, zu verwenden und anstelle der absoluten E-Feld-Werte die aus dem Überflug resultierenden ELFE³ zu messen. Ein solcher auf dem Influenz-Prinzip basierender Sensor, im einfachsten Fall ein Plattenkondensator, kommt ohne bewegliche Komponenten aus und könnte die erforderliche Empfindlichkeit von $\approx 10 \mu\text{V/m}$ problemlos erzielen. Damit der Ansatz funktioniert müsste zudem das AEP-Signal vom Umgebungsrauschen separiert werden können, was im Fall statischer Umgebungsfelder automatisch durch die Verwendung des Gradiometers geschieht. Dabei ist der Größenordnungsunterschied nicht unbedingt ein Ausschlusskriterium, wie die erfolgreiche Durchführung von MAD beweist, bei der die detektierbare magnetische Signatur ebenfalls Größenordnungen kleiner als das Erdmagnetfeldes ist. Ob die Messung von Überwasser-ELFE real umsetzbar ist kann an dieser Stelle nicht abschließend gefolgert werden, da in der Praxis auch Effekte wie Spritzwasser oder Aufladung der Sensor-Außenflächen durch Reibung mit der Luft eine Rolle spielen.

³Extra Low Frequency Electric field (cf. Kapitel 2.1.1).

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In der vorliegenden Dissertation konnten verschiedene Ansätze zur Vorhersage bzw. Umrechnungen der elektrischen Signatur von Wasserfahrzeugen vorgestellt werden. Die untersuchten Konzepte beinhalten sowohl Berechnungen anhand vollständiger numerischer Simulationen, als auch die Konvertierung einer unter anderen Umgebungsbedingungen gemessenen UEP-Signatur mittels inverser Modellierung (Quellenmodell) anhand analytischer Umrechnungsvorschriften und auf Basis aktueller Messwerte (Echtzeit-Umrechnung).

Im ersten Hauptkapitel (Kapitel 3) wurde zunächst ausführliche Vergleiche zwischen iterativ berechneten, gemessenen und simulierten Werten durchgeführt, wobei eine elektrochemische Zelle, ein spannungsgetriebener Dipol und UEP-Signaturen des kanadischen Forschungsschiffes CFAV Quest untersucht wurden. Auf diese Weise konnte demonstriert werden, dass numerische Simulationen unter Verwendung nichtlinearer Polarisationskennlinien (cf. Unterkapitel 2.5.3) prinzipiell gut geeignet sind, um das elektrochemische Verhalten der Phasengrenzen zwischen Metall und Elektrolytlösung nachzubilden und die damit zusammenhängenden UEP-Signaturen von Wasserfahrzeugen zu berechnen. Sofern quantitativ richtige Ergebnisse gewonnen werden sollen, müssen jedoch die tatsächlich vorherrschenden Polarisationskennlinien verwendet und die Geometrien ausreichend genau modelliert werden (cf. auch Forschungsbericht [4]). Die am Ende des Kapitels durchgeführten Simulationen der Quest ergänzen die Ergebnisse des Forschungsberichts [23] durch zusätzliche Modellierung der Rudergeometrie und die Betrachtung weiterer Signatur-Linien (Sensoren S3 und S7, cf. Abbildung 3.7).

In Kapitel 4 wurde die Multipoladaption in Weiterführung der bisherigen Untersuchungen (cf. Forschungsbericht [7]) dazu verwendet, gemessene Dipol-Signaturen nachzubilden und die Quellenverteilung der Dipole zu bestimmen. Dabei konnte differenziert dargelegt werden, unter welchen Bedingungen der inverse Modellierungsansatz auf Basis evolutionärer Algorithmen gute Ergebnisse liefert und wann er nicht in der Lage ist die Quellenverteilung korrekt bzw. eindeutig zu adaptieren. So kann es bei Anordnungen mit xz-Symmetrieebene dazu kommen, dass zwar die Signatur korrekt nachgebildet wird, nicht jedoch die Quellenverteilung (cf. y -Dipol, direkter Überlauf). In Fällen bei denen sich eine der Quellen deutlich näher am Sensor befindet wird deren Position

besser adaptiert als die der weiter entfernt liegenden Quelle (cf. z -Dipol). Bei den Szenarien ohne die zuvor genannten Besonderheiten lieferte die Multipoladaptation in der Regel jedoch gute Ergebnisse.

Kapitel 5 stellt einen Umrechnungsansatz auf Basis von Schleppkörpermessungen vor, der zur kurzfristigen Bestimmung der eigenen UEP-Signatur im Rahmen von ISSM¹ eingesetzt werden kann. Grundsätzliche Idee ist dabei die Umrechnung einer zuvor gemessenen Referenzsignatur auf die aktuellen Umgebungsbedingungen. Als thematischer Einstieg wurden zunächst die in den Forschungsberichten [46] und [22] vorgestellten Ansätze zur komponentenweisen Umrechnung und Wellenstrom-Umrechnung rekapituliert, wobei Letztere mit einem als Distanz-Umrechnung bezeichneten Ansatz kombiniert wurde. Anhand numerischer Simulationen eines Minenjagdboot-Modells mit systematisch und zufällig variierten Umgebungsbedingungen konnte gezeigt werden, dass die Schleppkörper-Umrechnung prinzipiell bessere Ergebnisse als die Wellenstrom-Umrechnung liefert, da sie auch den Einfluss der Seebodenleitfähigkeit und der Anoden-Rumpf-Ströme erfasst. Die Wellenstrom-Umrechnung ist für eine grobe Schätzung jedoch ebenfalls zu gebrauchen und dürfte in der Praxis einfacher zu realisieren sein. Um die praktische Umsetzbarkeit der Schleppkörper-Umrechnung zu verbessern, wurde eine vereinfachte Umrechnungsvorschrift unter Verwendung der Beträge anstelle der einzelnen E-Feld-Komponenten getestet, die sich als vergleichbar gut herausstellte. Am Ende des Kapitels wurde ergänzend der Einfluss von Ungleichmäßigkeiten des Seebodens auf die UEP-Signatur untersucht und deren Relevanz für die Umrechnungsansätze diskutiert.

In Kapitel 6 wurde der prinzipielle Zusammenhang zwischen UEP-Signaturen und den damit einhergehenden elektrischen Feldern oberhalb der Wasserlinie (AEP-Signatur) untersucht. Dabei wurde zunächst die analytische Berechnung von AEP hergeleitet und anschließend alle nötigen Schritte für eine numerische Simulation aufgezeigt. Mit Gleichung (6.11) konnte ein erstaunlich einfacher Zusammenhang gefunden werden, welcher besagt, dass die AEP-Signaturstärke näherungsweise doppelt so groß ist wie die UEP-Feldstärke im gleichen Abstand zur Quelle. Anhand numerischer Simulationen einer Punktstromquelle und eines U-Boot-Modells, bei welchem das elektrochemische Verhalten der Phasengrenzen modelliert wurde, konnte diese theoretisch zu erwartende Verdopplung bestätigt werden. Abschließend wurde die Relevanz von AEP im Kontext von ASW² diskutiert, wobei gezeigt werden konnte warum eine Ausnutzung von AEP analog zur luftgestützten MAD³ ohne Weiteres nicht möglich erscheint. Die im Rahmen der Dissertation durchgeführten Untersuchungen erlauben diesbezüglich jedoch kein abschließendes Urteil, da z.B. ein Ansatz zur Ausnutzung von Überwasser-ELFE⁴ denkbar wäre.

¹Integrated Ship Signature Management.

²Anti-Submarine Warfare.

³Magnetic Anomaly Detection.

⁴Extra Low Frequency Electric fields.

Die Innovationen der Dissertation lassen sich in Stichpunkten wie folgt zusammenfassen:

- Numerische Simulation von UEP-Signaturen des kanadischen Forschungsschiffes CFAV Quest mit COMSOL Multiphysics, inklusive Modellierung der Rudergeometrie.
- Multipoladaption gemessener UEP-Signaturen für einen speziell entworfenen und selbst hergestellten Dipol.
- Differenzierte Darlegung, in welchen Fällen die Multipoladaption in der Lage ist die Quellenverteilungen und/oder die UEP-Signatur korrekt zu adaptieren.
- Entwicklung eines möglichst kurzfristig anwendbaren Umrechnungsansatzes auf Basis von Messungen mit einem Schleppkörper (Schleppkörper-Umrechnung).
- Entwicklung der Distanz-Umrechnung. Kombination der Distanz-Umrechnung mit der Wellenstrom-Umrechnung.
- Direkter Vergleich zwischen Schleppkörper-Umrechnung und Wellenstrom-Umrechnung bezüglich der Umrechnungsqualität, wobei sich die Schleppkörper-Umrechnung als leistungsfähiger herausstellte.
- Ausführliche Untersuchung des Zusammenhangs zwischen UEP-Signaturen und den damit einhergehenden elektrischen Feldern oberhalb der Wasserlinie (AEP-Signatur⁵).
- Herleitung aller nötigen Grundlagen zur analytischen Berechnung und numerischen Simulation von AEP im Sinne eines multiphysikalischen Ansatzes.
- Abschätzung der Relevanz von AEP im Kontext von ASW.

Die zuvor genannten Forschungsergebnisse der Dissertation stellen eine umfangreiche Erweiterung und Ergänzung der vom Autor parallel zur Promotion bearbeiteten Forschungsprojekte dar. Zu den dort gewonnenen Ergebnissen zählen insbesondere:

- Erarbeitung und Dokumentation numerischer Simulationen von UEP unter Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen (cf. [4]).
- Eingehende Untersuchungen zu folgenden Themen:
 - Einfluss von leitfähigem Trägermaterial bei Dipol-Modellen (cf. [47]).
 - Schutzstrom-Modulation durch vibrierende Wellenlager (cf. [22]).
 - Nahfeld-Modulation durch die Propeller-Drehung (cf. [46]).
 - Einfluss der Orientierung eines Dipols in Gegenwart des Seebodens (cf. [28]).

⁵Above water Electric Potential.

- Entwicklung der Multipoladaption mit ausführlicher Untersuchung verschiedener Optimierungsansätze. Evaluation der Leistungsfähigkeit anhand einer analytischen Testumgebung (cf. [7]).
- Rückstromberechnung durch die Hülle und damit verbundene CRM⁶ (cf. [34]).
- Dokumentation der Skalierungsvorschriften für die Messung der UEP-Signatur von maßstabsgetreuen Modellen (cf. [6]).
- Konkrete Vorschläge zur Reduktion von UEP und ELFE mittels optimierter EKS-Konfiguration (cf. [21]).
- Entwicklung der Wellenstrom-Umrechnung, basierend auf Messungen des Wellenstroms durch das ASG⁷-System (cf. [37]).
- Herleitung einer Umrechnungsvorschrift für eine vertikal geschichtete Leitfähigkeit des Wassers, wie sie aufgrund von Unterschieden des Salzgehalts in der Ostsee vorkommt (cf. [37]).
- Entwicklung der komponentenweisen Umrechnung auf Grundlage des Konzeptes der Parallel- und Orthogonalverstärkung (cf. [38]).
- Untersuchungen zum Einfluss einer ungleichmäßigen Seebodenoberfläche (Rippel) auf die UEP-Messung mit bodennahen Sensoren entsprechend einem MIW⁸-Szenario (cf. [38]).
- Untersuchungen zum Einfluss diskret und diffus geschichteter Seebodenleitfähigkeit inklusive Überlegungen zu einer effektiven, homogenen Seebodenleitfähigkeit (cf. [38]).

⁶Corrosion Related Magnetic fields

⁷Active Shaft Grounding

⁸Mine Warfare

8. Ausblicke und weitere Anwendungsmöglichkeiten

Die vorgestellten Konzepte zur Umrechnung bzw. Vorhersage von UEP-Signaturen bieten Lösungsansätze für die Probleme, die aufgrund der Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen auftreten (cf. Einleitung). Im Folgenden soll ein Ausblick auf denkbare bzw. teilweise bereits eingeleitete, weiterführende Forschungsaktivitäten und praktische Anwendungsmöglichkeiten gegeben werden.

Der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten UEP-Signaturen der Quest in Kapitel 3 unterstreicht die Notwendigkeit realistischer Polarisationskennlinien und ausreichend genau modellierter Geometrien für zukünftige Simulationen, sofern quantitativ richtige Ergebnisse gefordert sind. Um nicht wie bisher auf die Wellenströme als zusätzliche Informationsquelle bezüglich des Propeller-Polarisationsverhaltens zurückgreifen zu müssen, wäre eine umfangreiche Datenbank mit Polarisationskennlinien für alle relevanten Metall-Seewasser-Kombinationen nötig. Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Vorhersagen mittels numerischer Simulationen sollten weitere praktische Erfahrungen aus Vergleichen mit Messungen gesammelt werden, wobei insbesondere Wege für die Bereitstellung nicht-geheimer UEP-Signaturdaten gefunden werden müssen. Letztere sollten ein möglichst breites Spektrum an relevanten Kombinationen von Umgebungsbedingungen, Fahrzeugklasse und Beschichtungszustand abdecken, wobei besonders auf eine gewissenhafte Dokumentation dieser Parameter geachtet werden muss. In diesem Zusammenhang wäre es von großem Vorteil, wenn die aktuellen Überlegungen bezüglich einer Wiederholung der RIMPASSE realisiert werden könnten.

Ende 2013 wurde im Rahmen einer Sachstandbesprechung vereinbart, dass die Multipoladaption (Kapitel 4) in das Programm *M-MCM Simulation*, welches im Auftrag der Deutschen Marine von der Firma *MTG Marinetechnik GmbH* entwickelt wird, integriert werden soll. Bei dem Programm handelt es sich um eine umfangreiche Trainingssoftware mit der die Abläufe beim Räumen intelligenter Seeminen unter Berücksichtigung aller relevanten Teilsignaturen trainiert und optimiert werden können. Die Implementierung der Multipoladaption stellt eine Verbesserung der bislang eingesetzten Signatur-Modelle für UEP in Aussicht.

In Anbetracht der erfolgreich demonstrierten theoretischen Machbarkeit der Wellenstrom- und Schleppkörper-Umrechnung (Kapitel 5) könnte in einem nächsten Schritt die praktische Umsetzung getestet werden. Es gibt bereits Bestrebungen das Konzept

der Signatur-Umrechnung mittels Wellenstrom im Rahmen des CSSM¹ kooperativ zu bearbeiten, wozu die Ergebnisse der Arbeit vermutlich einen wertvollen Beitrag leisten können. Als weiterführende theoretische Untersuchung zur Schleppkörper-Umrechnung könnte überprüft werden, wie stark sich Abweichungen der Schleppkörper-Tiefe z_t und des horizontalen Abstands x_{th} auf die Qualität der Umrechnung auswirken. Die noch ausstehende Arbeitspakete des aktuellen Forschungsprojekt stellen als zusätzliche Umrechnungsvorschrift eine Erweiterung der Distanz-Umrechnung bezüglich der Tauchtiefe bei U-Booten in Aussicht und beinhalten zudem umfangreiche Untersuchungen zur Kombination der verschiedenen Umrechnungsansätze.

Bezüglich AEP (Kapitel 6) könnte die Ausnutzung von Überwasser-ELFE² noch eingehender untersucht werden. Weitere theoretische Untersuchungen dürften an dieser Stelle jedoch nicht ausreichen, da abschließend nur anhand praktischer Versuche geklärt werden kann ob eine Ausnutzung von AEP bzw. Überwasser-ELFE technisch realisierbar ist.

Abschließend soll noch die mögliche Anwendbarkeit der Umrechnungsansätze bei einer Revision der Nato-Vorschrift AMP-14 thematisiert werden. Die Vorschrift trägt die Bezeichnung „Protection of vessels from electromagnetic mines“ und gibt den Bündnispartnern Grenzwerte für die UEP-Signatur vor, die unter Ostsee-Bedingungen teilweise nur schwer umgesetzt werden können. Daher besteht von Seiten der Deutschen Marine Interesse an einer Überarbeitung der bestehenden Vorgaben zwecks Berücksichtigung der Umgebungseinflüsse, wobei Umrechnungsvorschriften eine bessere Alternative zu einzelnen Richtwerten oder umfangreichen Fallunterscheidungen sein könnten. Besondere Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung eines solchen Vorhabens sind der langwierige Revisionsprozess und der Umstand, dass die AMP-14 einer hohen Geheimhaltungsstufe unterliegt, weshalb an dieser Stelle keine konkreteren Verbesserungsvorschläge angeführt werden können.

¹Centre for Ship Signature Management.

²Extra Low Frequency Electric fields.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Holmes, *Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures*. Morgan and Claypool Publishers, 2006, Vol. 1.
- [2] D. Schaefer, M. Pichlmaier, J. Doose, A. Rennings, und D. Erni, „Comparability of UEP Signatures Measured under Varying Environmental Conditions,” in *8th International Marine Electromagnetics Conference (MARELEC 2013)*, Hamburg, Germany, July 16-19 2013, Electromagnetic Surveillance Session.
- [3] —, „Umrechnung von UEP-Signaturen zwischen verschiedenen Umgebungsbedingungen,” in *Sachstandbesprechung M-MCM (FV 2.4.)*, Eckernförde, Germany, Oct. 24 2013.
- [4] D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Elektrisches Modell für das Kontaktpotential (WP#3),” Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2010, unveröffentlicht.
- [5] Y. Wang, „Evaluation of Factors Affecting the Measurement of Underwater Electric Potential Fields during Sea Trials,” in *MARELEC Conference, Hamburg*, 2013.
- [6] D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Skalierungsverhalten von elektrischen Signaturen im Kontext maßstabsgetreuer Modelle (WP#E),” Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2012, unveröffentlicht.
- [7] —, „Adaption einer vorgegebenen UEP-Signatur mittels Multipolanordnung (WP#C),” Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2012, unveröffentlicht.
- [8] J. Holmes, *Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures*. Morgan and Claypool Publishers, 2006, Vol. 1.
- [9] —, *Modeling a Ship's Magnetic Field Signatures*. Morgan and Claypool Publishers, 2006, Vol. 1.
- [10] D. Erni, N. Koster, und A. Rennings, „Theoretische Elektrotechnik I + II,” Universität Duisburg-Essen, 2009.

- [11] I. Wolff, *Grundlagen und Anwendungen der Maxwellschen Theorie I + II*. Verlagsbuchhandlung Dr. Wolff GmbH, 2005, Vol. 4.
- [12] C. H. Hamann und W. Vielstich, *Elektrochemie*, 4. Aufl. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
- [13] G. Kickelbick, *Chemie für Ingenieure*. Pearson Studium, 2008.
- [14] W. Baeckmann, W. Schwenk, und W. Prinz, *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*. Gulf Professional Publishing, 1997, Vol. 3.
- [15] H. Kaesche, *Die Korrosion der Metalle*. Springer-Verlag, 1990.
- [16] T. Jenni, „Einführung in die Finite-Elemente-Methode,” Mentorierte fachwissenschaftliche Arbeit mit pädagogischem Fokus, April 2011, Departement Physik, ETH Zürich.
- [17] O. C. Zienkiewicz, *The Finite Element Method*, 5. Aufl., R. L. Taylor, Hrsg. Butterworth-Heinemann, 2000, Vol. 1.
- [18] V. Nissen, *Einführung in Evolutionäre Algorithmen.: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. Vieweg, 1997.
- [19] H. Pohlheim, *Evolutionäre Algorithmen*. Springer, 1999.
- [20] W. Foundation, „Wikimedia Commons, public domain media file repository,” August 2012. [Online]. Available: <http://commons.wikimedia.org>
- [21] D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Numerische Strukturoptimierung zur Minimierung der elektrischen Signatur (WP#9),” Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2013, unveröffentlicht.
- [22] —, „Studie zur Strommodulation durch das vibrierende Wellenlager (WP#1),” Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2010, unveröffentlicht.
- [23] —, „Vergleich gemessener und simulierter UEP-Signaturen der Quest (WP#F),” Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2013, unveröffentlicht.
- [24] D. Schaefer, S. Zion, J. Doose, A. Rennings, und D. Erni, „Numerical Simulation of UEP signatures with propeller-induced ULF modulations in maritime ICCP systems,” in *7th International Marine Electromagnetics Conference (MARELEC 2011)*, La Jolla, San Diego, CA, USA, June 20-23 2011, poster 4.3.
- [25] J. Jackson, *Klassische Elektrodynamik*, 4. Aufl., K. Müller, Hrsg. Walter de Gruyter, 2006.

- [26] J. Fetzer, M. Haas, und S. Kurz, *Numerische Berechnung elektromagnetischer Felder*, Serie Kontakt u. Studium. expert-Verlag, 2002.
- [27] J. Scheible, „Die Lösung des Viermedienproblems ebener Schichten,” *Archiv für Elektrotechnik*, Vol. 75, S. 9–17, 1991.
- [28] D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Einfluss der Orientierung eines Dipols auf seine UEP Signatur (WP#B),” *Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik*, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2011, unveröffentlicht.
- [29] H. Henke, *Elektromagnetische Felder: Theorie und Anwendung*. Springer, 2004, Vol. 3.
- [30] H. P. Hack, „Atlas of Polarization Diagrams for Naval Materials in Seawater,” Carderock Division Naval Surface Warfare Center, Forschungsbericht, 1995.
- [31] COMSOL Group, „COMSOL Multiphysics (FEM) - AC/DC Module,” <http://www.comsol.com/products/acdc/>, June 2013.
- [32] —, „COMSOL Multiphysics (FEM) - Batteries & Fuel Cells Module,” <http://www.comsol.com/batteries-fuel-cells-module>, June 2013.
- [33] D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Kleine Vergleichsstudie zur statischen Berechnung von elektrischen Signaturen (WP#4),” *Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik*, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2011, unveröffentlicht.
- [34] V. Gerhardt, S. Röttgen, D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Rückstromberechnung durch den Elektronenleiter und korrosionsbedingtes Magnetfeld (WP#D),” *Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik*, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2013, unveröffentlicht.
- [35] D. H. Wolpert und W. G. Macready, „No Free Lunch Theorems for Search,” The Santa Fe Institute, Forschungsbericht, 1995.
- [36] C. Capps, „Near field or far field? (Artikel),” *EDN*, 1999.
- [37] D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Leitfähigkeit des Wassers (WP#1),” *Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik*, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht zweites Projekt, 2014, unveröffentlicht.
- [38] —, „Leitfähigkeit des Seebodens (WP#2),” *Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik*, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht zweites Projekt, 2014, unveröffentlicht.

- [39] D. Schaefer, J. Doose, M. Pichlmaier, A. Rennings, und D. Erni, „Conversion of UEP Signatures between Different Environmental Conditions using Shaft Currents,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering (in preparation, accepted)*, 2015, unveröffentlicht.
- [40] D. Schaefer, M. Pichlmaier, J. Doose, A. Rennings, und D. Erni, „Above Water Electric Potential Signatures and their Relevance in the Context of ASW,” in *8th International Marine Electromagnetics Conference (MARELEC 2013)*, Hamburg, Germany, July 16-19 2013, Planet Quest Session.
- [41] D. Schaefer, J. Doose, A. Rennings, und D. Erni, „Above Water Electric Potential Signatures of Submerged Naval Vessels,” *Journal publication in preparation*, 2015, unveröffentlicht.
- [42] M. Hirota, T. Furuse, K. Ebana, H. Kubo, K. Tsushima, T. Inaba, A. Shima, M. Fujinuma, und N. Tojyo, „Magnetic Detection of a Surface Ship by an Airborne LTS SQUID MAD,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 2, S. 884–887, 2001.
- [43] C. S. Incorporated, *CS110 Electric Field Meter*, Januar 2014, Revision: 4/12. [Online]. Available: <http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs110.pdf>
- [44] NASA, „Field Campaigns and Ground Validation - Lightning Detection Instruments - Airborne Electric Field Mill,” Januar 2014. [Online]. Available: <http://thunder.msfc.nasa.gov/validation/validation.html#AEFM>
- [45] W. A. Hoppel und S. G. Gathman, „Experimental Determination of the Eddy Diffusion Coefficient Over the Open Ocean from Atmospheric Electric Measurements,” *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 2, S. 248–254, 1972.
- [46] D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Studie zur Strommodulation durch die Bewegung der Propellerflügel (WP#2),” Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2010, unveröffentlicht.
- [47] —, „Dipolfelder in elektrolytischen Lösungen (WP#A),” Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2010, unveröffentlicht.
- [48] S. Carson und M. Orazem, „Time-dependent polarization behaviour of pipeline grade steel in low ionic strength environments,” *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 29, S. 703–717, 1999.

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Die U31. Ein U-Boot der U 212A Klasse.	1
1.2.	Wie ist die elektrische Signatur unter Einsatz-Umgebungsbedingungen. . .	3
2.1.	Side-Scan Sonar Aufnahme eines Wracks.	7
2.2.	Prinzipieller Verlauf einer Drucksignatur.	8
2.3.	UEP-Sensorkreuz mit sechs Ag-AgCl-Messelektroden.	10
2.4.	Kielwasser hinter einem aufgetauchten U-Boot.	11
2.5.	Prinzipielle Spulenanordnung einer MES-Anlage.	14
2.6.	Beispiel einer Signatur-Linie.	18
2.7.	Unterschied zwischen ortsfester UEP-Messung und Überfahrtsszenario. . .	19
2.8.	Messung einer Signatur-Linie entsprechend einem Überfahrtsszenario. . . .	19
2.9.	Beispiel einer Signatur-Fläche.	20
2.10.	Feldverteilung eines Monopols.	26
2.11.	Feldverteilung eines physikalischen Dipols.	27
2.12.	Feldverteilung eines mathematischen Dipols.	28
2.13.	Feldverteilung eines Multipols mit drei Stromquellen.	28
2.14.	Feldverteilung einer Stromquelle vor einem leitfähigen Halbraum #1. . . .	29
2.15.	Feldverteilung einer Stromquelle vor einem leitfähigen Halbraum #2. . . .	30
2.16.	Feldverteilung einer Stromquelle vor einem leitfähigen Halbraum #3. . . .	30
2.17.	Messung des Gleichgewichtspotentials mit Potentialschema.	34
2.18.	Aufbau einer sog. galvanostatischen Messung.	35
2.19.	Stromdichte-Potential-Kennlinie von „HY-80 Schiffsbaustahl Q.F.“.	36
2.20.	Ersatzschaltung mit gesteuerter Stromquelle.	41
2.21.	Ersatzschaltung mit gesteuerter Urspannungsquelle.	41
2.22.	Ersatzschaltung mit Urspannungsquelle und gesteuertem Widerstand. . .	41
2.23.	Vergleich zwischen starken und schwachen Methoden.	47
3.1.	Elektrochemische Zelle.	50
3.2.	Arbeitspunkte der Elektroden.	52
3.3.	Simulierte Potentialverteilung in der elektrochemischen Zelle.	52
3.4.	Geometrie und Diskretisierung des Dipols im Wassertank.	53
3.5.	Strom-Spannungs-Verhaltens der Dipolanordnung.	54
3.6.	Das kanadische Forschungsschiff CFAV Quest.	55
3.7.	Kurs der Quest während „Run 14“ über die EMMS in Aschau.	55
3.8.	COMSOL-Geometrie für die Simulation der Quest.	56
3.9.	Randbedingungen beim Quest-Modell.	56

3.10.	Gemessene und simulierte UEP-Signatur der Quest, „Run 14“, Sensor 2.	58
3.11.	Gemessene und simulierte UEP-Signatur der Quest, „Run 14“, Sensor 3.	58
3.12.	Gemessene und simulierte UEP-Signatur der Quest, „Run 14“, Sensor 4.	59
3.13.	Gemessene und simulierte UEP-Signatur der Quest, „Run 14“, Sensor 7.	59
4.1.	Prinzipieller Ablauf der Multipoladaption.	61
4.2.	Skizze der Modellumgebung für die Multipoladaption.	62
4.3.	Nahfeld-Adaption eines Dipols durch einen Dipol (Adaption 2-2).	63
4.4.	Aufbau von Dipol und Halterung zur Positionierung im Messbecken.	64
4.5.	Fotos vom Dipol, UEP-Sensorkreuz und der Messung.	64
4.6.	Skizzen der untersuchten Szenarien zur Adaption eines Dipols.	66
4.7.	Run 06. Adaption bei Überlauf ohne Anregung.	68
4.8.	Run 05. Adaption x-Dipol bei direktem Überlauf.	69
4.9.	Run 27. Adaption x-Dipol bei seitlichem Überlauf.	69
4.10.	Run 37. Adaption y-Dipol bei direktem Überlauf.	70
4.11.	Run 41. Adaption y-Dipol bei seitlichem Überlauf.	70
4.12.	Run 45. Adaption xy-Dipol bei direktem Überlauf.	71
4.13.	Run 47. Adaption xy-Dipol bei seitlichem Überlauf.	71
4.14.	Run 57. Adaption z-Dipol bei direktem Überlauf.	72
4.15.	Run 59. Adaption z-Dipol bei seitlichem Überlauf.	72
4.16.	Run 56. Fehlerhafte Adaption des z-Dipols bei direktem Überlauf.	73
4.17.	Run 51. Unbekannter xy-Dipol bei unbekanntem Überlauf (#1).	74
4.18.	Run 53. Unbekannter xy-Dipol bei unbekanntem Überlauf (#2).	74
4.19.	Run 63. Unbekannter Dipol bei unbekanntem Überlauf (#1).	74
4.20.	Run 64. Unbekannter Dipol bei unbekanntem Überlauf (#2).	75
4.21.	E-Feld-Konturlinien für den Dipol aus Abbildung 2.11.	77
4.22.	E-Feld-Konturlinien für den Multipol aus Abbildung 2.13.	77
4.23.	Dipolabweichung für den aus Abbildung 2.11 bekannten Dipol.	79
4.24.	Dipolabweichung für den aus Abbildung 2.13 bekannten Multipol.	79
4.25.	Konturlinien der Dipolabweichung aus Abbildung 4.23.	80
4.26.	Konturlinien der Dipolabweichung aus Abbildung 4.24.	80
5.1.	Überblick aller wichtigen UEP-Einflussgrößen.	81
5.2.	COMSOL-Geometrie für die Simulation des Schiffmodells.	83
5.3.	FEM-Mesh für das Schiffmodell.	84
5.4.	Randbedingungen beim Schiffmodell.	84
5.5.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „dt1“.	87
5.6.	E-Feld-Richtung für intakte Rumpfbeschichtung im freien Wasser.	89
5.7.	E-Feld-Richtung für intakte Rumpf. unter Aschau-Bedingungen.	89
5.8.	UEP-Signatur für intakte Rumpfbeschichtung im freien Wasser.	90
5.9.	UEP-Signatur für intakte Rumpf. unter Aschau-Bedingungen.	90
5.10.	Veranschaulichung der komponentenweisen Signatur-Umrechnung.	91
5.11.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „kb1“.	92
5.12.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „kb2“.	92

5.13.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „ww1“.	93
5.14.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „ww2“.	94
5.15.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „ww3“.	94
5.16.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „wg1“.	95
5.17.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „wb1“.	96
5.18.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „wz1“.	97
5.19.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „wz2“.	98
5.20.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „wz3“.	98
5.21.	Skizze Echtzeit-Selbstüberwachung mit Schleppkörper.	99
5.22.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tw1“.	100
5.23.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tw2“.	100
5.24.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tw3“.	101
5.25.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tb1“.	102
5.26.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tb2“.	102
5.27.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tb3“.	103
5.28.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tg1“.	104
5.29.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tg2“.	104
5.30.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tg3“.	105
5.31.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tz1“.	106
5.32.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tz2“.	106
5.33.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tz3“.	107
5.34.	E-Feld-Richtung für das Aschau-Bedingungen.	108
5.35.	Foto von Rippelmarken im Sand.	109
5.36.	Skizze der Anordnung zum Test des Rippelmarken-Einflusses.	110
5.37.	Simulierte E_{\max} -Werte für Szenario „r1“.	111
5.38.	Strömungsfeld über Rippel.	112
5.39.	Simulierte E_{\max} -Werte für Szenario „r2“.	112
5.40.	Simulierte E_{\max} -Werte für Szenario „r3“.	113
5.41.	Skizze geschichteten Seebodens mit Sediment- und Gesteinsschicht.	114
5.42.	Skizze Zweimedienproblem nach Scheible.	114
5.43.	Skizze Dreimedienproblem nach Scheible.	115
6.1.	Überblick der drei zentralen Fragen bezüglich AEP.	119
6.2.	Berechnete und simulierte Potentialverteilung einer Punktstromquelle.	122
6.3.	Relativer Fehler zwischen Berechnung und Simulation.	123
6.4.	Numerisch simuliertes E-Feld einer Punktstromquelle	124
6.5.	Numerisch simulierte Flächenladungsdichte an der Wasserlinie	125
6.6.	COMSOL-Geometrie des numerischen U-Boot-Modells.	125
6.7.	Numerisch simuliertes E-Feld einer U-Boot-Modells	126
1.	Urkunde zum „Best Poster Award“ der COMSOL Conference 2011.	151
2.	Polarisationskennlinie von „Bare Steel Orazem Q.F.“	153
3.	Polarisationskennlinie von „Anode Grade Zinc Q.F.“	153
4.	Polarisationskennlinie von „Nickel-Aluminum Bronze Q.F.“	153

5.	Run 05. Adaption x-Dipol bei direktem Überlauf.	157
6.	Run 27. Adaption x-Dipol bei seitlichem Überlauf.	158
7.	Run 12. Adaption des fehlerhaft gemessenen x-Dipols.	159
8.	Run 37. Adaption y-Dipol bei direktem Überlauf.	160
9.	Run 41. Adaption y-Dipol bei seitlichem Überlauf.	161
10.	Run 45. Adaption xy-Dipol bei direktem Überlauf.	162
11.	Run 47. Adaption xy-Dipol bei seitlichem Überlauf.	163
12.	Run 51. Unbekannter xy-Dipol bei unbekanntem Überlauf (#1).	164
13.	Run 53. Unbekannter xy-Dipol bei unbekanntem Überlauf (#2).	165
14.	Run 56. Fehlerhafte Adaption des z-Dipols bei direktem Überlauf.	166
15.	Run 57. Gemessener z-Dipol bei direktem Überlauf.	167
16.	Run 59. Gemessener z-Dipol bei seitlichem Überlauf.	168
17.	Run 63. Unbekannter Dipol bei unbekanntem Überlauf (#1).	169
18.	Run 64. Unbekannter Dipol bei unbekanntem Überlauf (#2).	170
19.	Referenzsignatur für intakte Rumpfbeschichtung im freien Wasser.	171
20.	Referenzsignatur für defekte Kielbeschichtung im freien Wasser.	171
21.	Referenzsignatur für defekte Rumpfbeschichtung im freien Wasser.	172
22.	Referenzsignatur für intakte Rumpf. mit Seeboden.	172
23.	Referenzsignatur für defekte Kielb. mit Seeboden.	173
24.	Referenzsignatur für defekte Rumpfb. mit Seeboden.	173
25.	Wellenströme für Szenario „ww1“.	174
26.	Simulierte und umgerechnete J_{\max} -Werte für Szenario „ww1“.	174
27.	Wellenströme für Szenario „ww2“.	175
28.	Simulierte und umgerechnete J_{\max} -Werte für Szenario „ww2“.	175
29.	Wellenströme für Szenario „ww3“.	176
30.	Simulierte und umgerechnete J_{\max} -Werte für Szenario „ww3“.	176
31.	Wellenströme für Szenario „wgl“.	177
32.	Simulierte und umgerechnete J_{\max} -Werte für Szenario „wgl“.	177
33.	Wellenströme für Szenario „wb1“.	178
34.	Simulierte und umgerechnete J_{\max} -Werte für Szenario „wb1“.	178
35.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tw1“.	179
36.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tw1“.	179
37.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tw2“.	180
38.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tw2“.	180
39.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tw3“.	181
40.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tw3“.	181
41.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tb1“.	182
42.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tb1“.	182
43.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tb2“.	183
44.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tb2“.	183
45.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tb3“.	184
46.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tb3“.	184
47.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tg1“.	185
48.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tg1“.	185

49.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tg2“	186
50.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tg2“	186
51.	E-Feld am Schleppkörper für Szenario „tg3“	187
52.	Simulierte und umgerechnete E_{\max} -Werte für Szenario „tg3“	187

Tabellenverzeichnis

2.1. Kategorisierung von Signaturen.	6
2.2. Analogie zwischen Elektrostatik und dem stationären Strömungsfeld.	24
4.1. Änderung der Stromaufnahme bei Spannungsanregung.	67
5.1. Übersicht über die verschiedenen Umrechnungsansätze.	82
5.2. Übersicht #1 der untersuchten Szenarien zur Signaturumrechnung.	85
5.3. Übersicht #2 der untersuchten Szenarien zur Signaturumrechnung.	86
5.4. Gegenüberstellung der Vorschriften für die Schleppkörper-Umrechnung.	108
5.5. Aufstellung aller wichtigen Größen der Rippelmarken-Testanordnung.	110
6.1. Überblick über Sensorempfindlichkeit und Feldstärken.	126
1. Messvorschrift zur Adaption des x-Dipols bei direktem Überlauf.	154
2. Messvorschrift zur Adaption des x-Dipols bei seitlichem Überlauf.	155
3. Messvorschrift zur Adaption des y-Dipols bei direktem Überlauf.	155
4. Messvorschrift zur Adaption des y-Dipols bei seitlichem Überlauf.	155
5. Messvorschrift zur Adaption des xy-Dipols bei direktem Überlauf.	155
6. Messvorschrift zur Adaption des xy-Dipols bei seitlichem Überlauf.	156
7. Messvorschrift zur Adaption zwei unbekannter xy-Dipole.	156
8. Messvorschrift zur Adaption des z-Dipols bei direktem Überlauf.	156
9. Messvorschrift zur Adaption des z-Dipols bei seitlichem Überlauf.	156
10. Messvorschrift zur Adaption des unbekanntes Dipols.	156

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AEP	Above-water Electric Potential
ASW	Anti-Submarine Warfare
ATE	Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik
CLDG	Closed Loop Degaussing
CRM	Corrosion Related Magnetism
CSSM	Centre for Ship Signature Management
CSV	Comma-separated values
DG	Differentialgleichung
EA	Evolutionärer Algorithmus
EKS	Elektrischer Korrosionsschutz
ELFE	Extra Low Frequency Electric field
EMMA	Elektromagnetische-Modell-Messanlage
ES	Evolutionsstrategien
GA	Genetischer Algorithmus
ICCP	Impressed Current Cathodic Protection
ISSM	Integrated Ship Signature Management
ISSMS	Integrated Ship Signature Management System
KKS	Kathodischer Korrosionsschutz
MAD	Magnetic Anomaly Detection
MCM	Mine Countermeasure
MES	Magnetischer Eigenschutz
MIW	Mine Warfare
NATO	North Atlantic Treaty Organization
OLDG	Open Loop Degaussing
PDG	Partielle Differentialgleichung

Abkürzung	Bedeutung
SA	Simulated Annealing
SACP	Sacrificial Anode Cathodic Protection
S-MES	Störfeldgeregelter Magnetischer Eigenschutz
SNR	Signal-to-Noise Ratio
Sonar	Sound navigation and ranging
SQUID	Superconducting QUantum Interference Device
SSS	Side-Scan Sonar
TAS	Towed Array Sonar
UDE	Universität Duisburg-Essen
UEP	Underwater Electric Potential
UW-Signatur	Unterwasser-Signatur
WTD 71	Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung

Symbole

Symbol	Physikalische Größe	Einheit	Bezeichnung
φ	Elektrisches Potential	$V = \text{kg m}^2\text{s}^{-3}\text{A}^{-1}$	Volt
I	Elektrische Stromstärke	A	Ampere
R	Elektrischer Widerstand	$\Omega = \text{VA}^{-1}$	Ohm
G	Elektrischer Leitwert	$S = \Omega^{-1} = \text{AV}^{-1}$	Siemens
κ	Elektrische Leitfähigkeit	Sm^{-1}	-
Q, q	Elektrische Ladung	$C = \text{As}$	Coulomb
\vec{E}	Elektrische Feldstärke	Vm^{-1}	-
\vec{D}	Elektrische Flussdichte	$\text{Cm}^{-2} = \text{Asm}^{-2}$	-
\vec{J}	Elektrische Stromdichte	Am^{-2}	-
\vec{p}	Dipolmoment mit Stromanregung	Am	-
\vec{B}	Magnetische Flussdichte	$\text{T} = \text{Vsm}^{-2}$	Tesla
\vec{H}	Magnetische Feldstärke	Am^{-1}	-
ϱ	Raumladungsdichte	$\text{Cm}^{-3} = \text{Asm}^{-3}$	-
σ	Flächenladungsdichte	$\text{Cm}^{-2} = \text{Asm}^{-2}$	-
ρ	Stromquellen-Dichte	Am^{-3}	-
ς	Flächen-Stromquellen-Dichte	Am^{-2}	-
\vec{J}_F	Flächenstromdichte	Am^{-1}	-

Anhang

A. Eigene Publikationen und Berichte

A.1. Themenbezogen

- D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Dipolfelder in elektrolytischen Lösungen (WP#A),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2010, unveröffentlicht.
- , „Studie zur Strommodulation durch das vibrierende Wellenlager (WP#1),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2010, unveröffentlicht.
- , „Studie zur Strommodulation durch die Bewegung der Propellerflügel (WP#2),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2010, unveröffentlicht.
- , „Elektrisches Modell für das Kontaktpotential (WP#3),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2010, unveröffentlicht.
- , „Kleine Vergleichsstudie zur statischen Berechnung von elektrischen Signaturen (WP#4),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2011, unveröffentlicht.
- , „Einfluss der Orientierung eines Dipols auf seine UEP Signatur (WP#B),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2011, unveröffentlicht.
- , „Adaption einer vorgegebenen UEP-Signatur mittels Multipolanordnung (WP#C),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2012, unveröffentlicht.
- V. Gerhardt, S. Röttgen, D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Rückstromberechnung durch den Elektronenleiter und korrosionsbedingtes Magnetfeld (WP#D),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2013, unveröffentlicht.

- D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Skalierungsverhalten von elektrischen Signaturen im Kontext maßstabsgetreuer Modelle (WP#E),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2012, unveröffentlicht.
- , „Numerische Strukturoptimierung zur Minimierung der elektrischen Signatur (WP#9),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2013, unveröffentlicht.
- , „Vergleich gemessener und simulierter UEP-Signaturen der Quest (WP#F),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2013, unveröffentlicht.
- D. Schaefer, V. Gerhardt, S. Röttgen, A. Rennings, und D. Erni, „Modellierung elektromagnetischer Signaturen von Wasserfahrzeugen,“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht erstes Projekt, 2013, unveröffentlicht.
- D. Schaefer, A. Rennings, und D. Erni, „Leitfähigkeit des Wassers (WP#1),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht zweites Projekt, 2014, unveröffentlicht.
- , „Leitfähigkeit des Seebodens (WP#2),“ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Universität Duisburg-Essen, Forschungsbericht zweites Projekt, 2014, unveröffentlicht.
- D. Schaefer, S. Zion, J. Doose, A. Rennings, und D. Erni, „Numerical Simulation of UEP signatures with propeller-induced ULF modulations in maritime ICCP systems,“ in *7th International Marine Electromagnetics Conference (MARELEC 2011)*, La Jolla, San Diego, CA, USA, June 20-23 2011, poster 4.3.
- D. Schaefer, J. Doose, A. Rennings, und D. Erni, „Numerical Analysis of Propeller-induced Low-frequency Modulations in Underwater Electric Potential Signatures of Naval Vessels in The Context of Corrosion Protection Systems (oral and poster presentation),“ in *COMSOL Conference 2011*, Stuttgart, Germany, 2011, Session - Electromagnetics: static & inductive, best poster award.
- , „Simulation elektrischer Felder,“ in *Fachfortbildung „Signatursystem Schiff“ (F/HT/GT/O-S:STSE/Sig 01/11)*, Marineoperationsschule (MOS) Bremerhaven, Bundesakademie für Wehrverwaltung und Wehrtechnik Mannheim-Berlin, Bremerhaven, Germany, Nov. 9-11 2011, eingeladener Vortrag.
- , „Conceptual Analysis of UEP and ELFE in the Context of CP systems,“ in *Electromagnetic Silencing Symposium 2012 (EMSS 2012)*. Naval Base, Eckernförde, Germany: Centre for Ship Signature Management (CSSM), May 22-24 2012, eingeladener Vortrag, Paper Nr.9.

- D. Schaefer, M. Pichlmaier, J. Doose, A. Rennings, und D. Erni, „Comparability of UEP Signatures Measured under Varying Environmental Conditions,” in *8th International Marine Electromagnetics Conference (MARELEC 2013)*, Hamburg, Germany, July 16-19 2013, Electromagnetic Surveillance Session.
- , „Above Water Electric Potential Signatures and their Relevance in the Context of ASW,” in *8th International Marine Electromagnetics Conference (MARELEC 2013)*, Hamburg, Germany, July 16-19 2013, Planet Quest Session.
- , „Umrechnung von UEP-Signaturen zwischen verschiedenen Umgebungsbedingungen,” in *Sachstandbesprechung M-MCM (FV 2.4.)*, Eckernförde, Germany, Oct. 24 2013.
- D. Schaefer, J. Doose, A. Rennings, und D. Erni, „Above Water Electric Potential Signatures of Submerged Naval Vessels,” *Journal publication in preparation*, 2015, unveröffentlicht.
- D. Schaefer, J. Doose, M. Pichlmaier, A. Rennings, und D. Erni, „Conversion of UEP Signatures between Different Environmental Conditions using Shaft Currents,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering (in preparation, accepted)*, 2015, unveröffentlicht.



Abbildung 1.: Urkunde zum „Best Poster Award“ der COMSOL Conference 2011. Die Auszeichnung als Bestes von 90 Postern erfolgte per Abstimmung durch die Konferenzteilnehmer.

A.2. Sonstige

- N. Benson, M. Engel, D. Lupascu, D. Schaefer, D. Erni, und R. Schmechel, „Reduced Coulomb interaction in organic semiconductors: Tailoring the effective system permittivity,” E-MRS 2012 Spring Meeting Conference Paper, 2012.
- M. Engel, D. Schaefer, D. Erni, N. Benson, und R. Schmechel, „Reduced Coulomb interaction in organic solar cells by the introduction of inorganic high-k nanostructured materials,” *Physica Status Solidi A*, Vol. 1, Nr. 9, S. 1712–1718, 2013.
- N. Benson, M. Engel, D. Schaefer, J. Kern, E. Herzig, C. Deibel, P. Müller-Buschbaum, D. Erni, und R. Schmechel, „Enhanced power conversion efficiencies for organic solar cells by reducing the Coulomb interaction,” in *MRS Spring Meeting*, 2014.
- N. Benson, M. Engel, D. Schaefer, D. Erni, J. Kern, C. Deibel, E. Herzig, P. Müller-Buschbaum, und R. Schmechel, „Reduced Coulomb interaction in organic solar cells by the introduction of high-k SrTiO₃ nanoparticles,” in *Hengstberger Symposium on Organic Electronics*, University of Heidelberg, May 16-18 2014.

B. Polarisationskennlinien

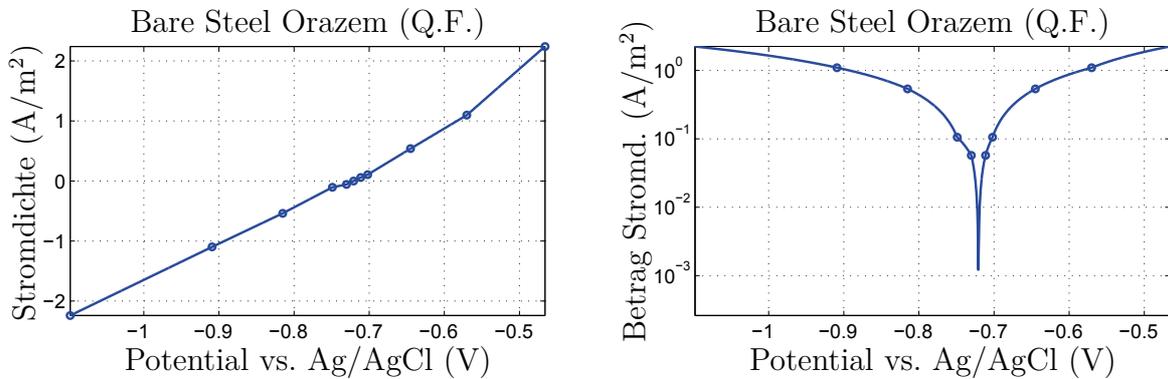


Abbildung 2.: Polarisationskennlinie von „Bare Steel Orazem Q.F.“. *Quelle:* Eigene Herstellung nach Daten aus [48].

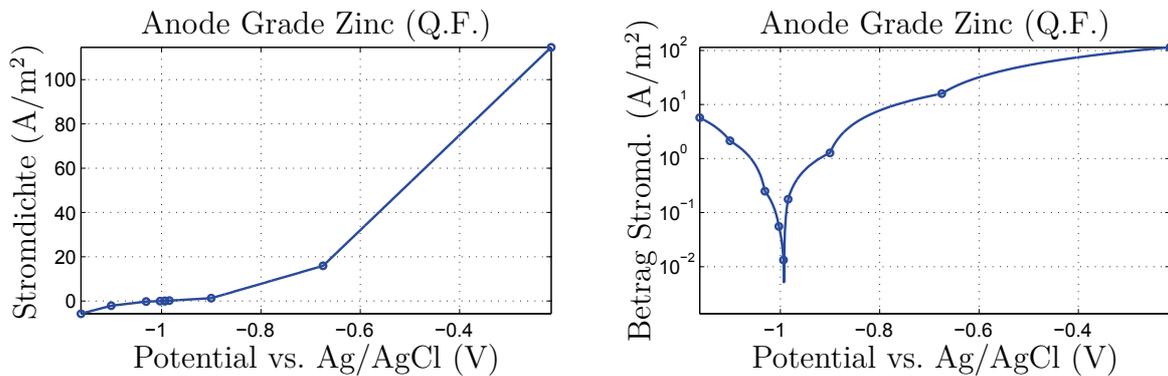


Abbildung 3.: Polarisationskennlinie von „Anode Grade Zinc Q.F.“. *Quelle:* Eigene Herstellung nach Daten aus [30, S.107].

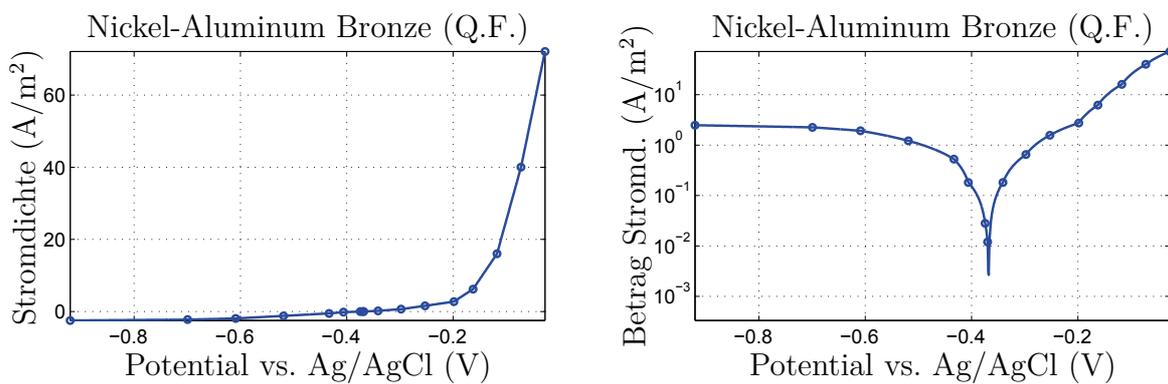


Abbildung 4.: Polarisationskennlinie von „Nickel-Aluminum Bronze Q.F.“. *Quelle:* Eigene Herstellung nach Daten aus [30, S.61].

C. Adaption gemessener Dipolsignaturen

C.1. Messvorschriften

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 01	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 02	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 03	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 04	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 05	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 06	0,2 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 07	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 08	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 09	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 10	0,4 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 11	0,4 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 12	0,5 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 13	0,5 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 14	0,5 m/s	3 mA	2000 Hz	-
Run 15	0,2 m/s	2 V	20 Hz	Stromaufnahme ca 3 mA
Run 16	0,2 m/s	2 V	2000 Hz	-
Run 17	0,2 m/s	2 V	20 Hz	Vor Messung 10 min warten
Run 18	0,2 m/s	2 V	20 Hz	Vor Messung 10 min warten
Run 19	0,2 m/s	2 V	20 Hz	Vor Messung 10 min warten
Run 20	0,2 m/s	2 V	20 Hz	Vor Messung 30 min warten
Run 21	0,2 m/s	0 V	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 22	0,2 m/s	2 V	2000 Hz	-

Tabelle 1.: Messvorschrift zur Adaption des x-Dipols bei direktem Überlauf. Anhand der vergleichsweise umfangreichen Testläufe für dieses erste Szenario wurde überprüft, ob die gemessene Signatur beständig ist und welches die besten Werte für die Überfahrtsgeschwindigkeit und Abtastrate sind. Die besten Ergebnisse lieferte eine langsame Überfahrt mit 0,1 m/s bei einer Abtastrate von 20 Hz, weshalb diese Einstellungen für die späteren Messläufe vorwiegend verwendet wurden. Die Messungen ohne Anregung dienten zur Überprüfung des Rauschverhaltens.

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 23	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 24	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 25	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 26	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 27	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 28	0,2 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 29	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 30	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 31	0,2 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 32	0,4 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 33	0,4 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 34	0,5 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 35	0,5 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 36	0,5 m/s	3 mA	2000 Hz	-

Tabelle 2.: Messvorschrift zur Adaption des x-Dipols bei seitlichem Überlauf.

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 37	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 38	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 39	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 40	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet

Tabelle 3.: Messvorschrift zur Adaption des y-Dipols bei direktem Überlauf.

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 41	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 42	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 43	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet

Tabelle 4.: Messvorschrift zur Adaption des y-Dipols bei seitlichem Überlauf.

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 44	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 45	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 46	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet

Tabelle 5.: Messvorschrift zur Adaption des xy-Dipols bei direktem Überlauf.

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 47	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 48	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 49	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet

Tabelle 6.: Messvorschrift zur Adaption des xy-Dipols bei seitlichem Überlauf.

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 50	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	Erster Blindversuch
Run 51	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 52	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet
Run 53	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	Zweiter Blindversuch
Run 54	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 55	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet

Tabelle 7.: Messvorschrift zur Adaption von zwei xy-Dipolen (Blindversuche).

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 56	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 57	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 58	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet

Tabelle 8.: Messvorschrift zur Adaption des z-Dipols bei direktem Überlauf.

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 59	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 60	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 61	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet

Tabelle 9.: Messvorschrift zur Adaption des z-Dipols bei seitlichem Überlauf.

Name	Geschw.	Einspeisung	Abtastrate	Bemerkung
Run 62	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 63	0,1 m/s	3 mA	20 Hz	-
Run 64	0,1 m/s	0 mA	20 Hz	Ausgeschaltet

Tabelle 10.: Messvorschrift zur Adaption des unbekanntnen Dipols (Blindversuch).

C.2. Ergebnisse der Multipoladaption

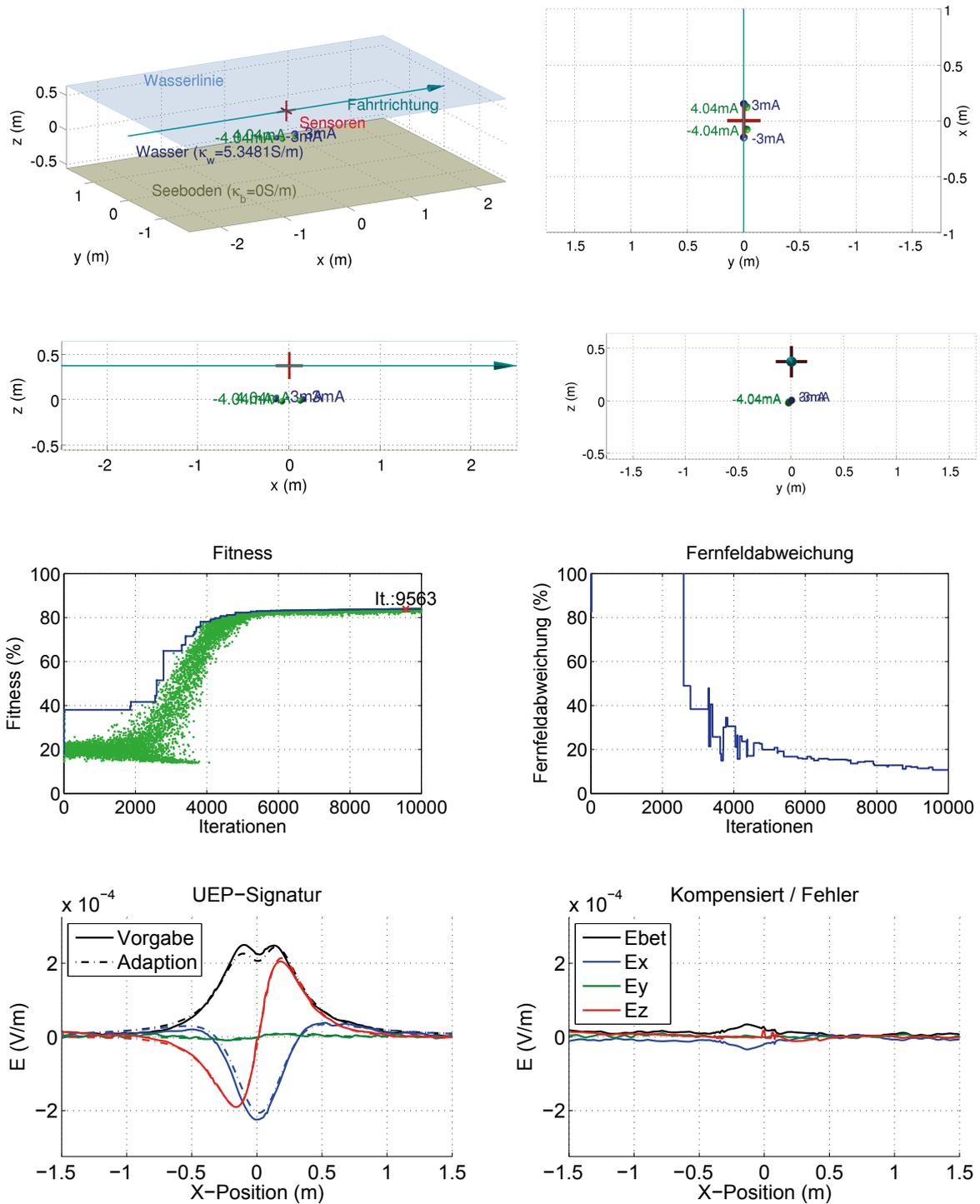


Abbildung 5.: Run 05. Adaption des gemessenen x-Dipols bei direktem Überlauf ($abw = 17,6\%$, $ffa = 10,7\%$).

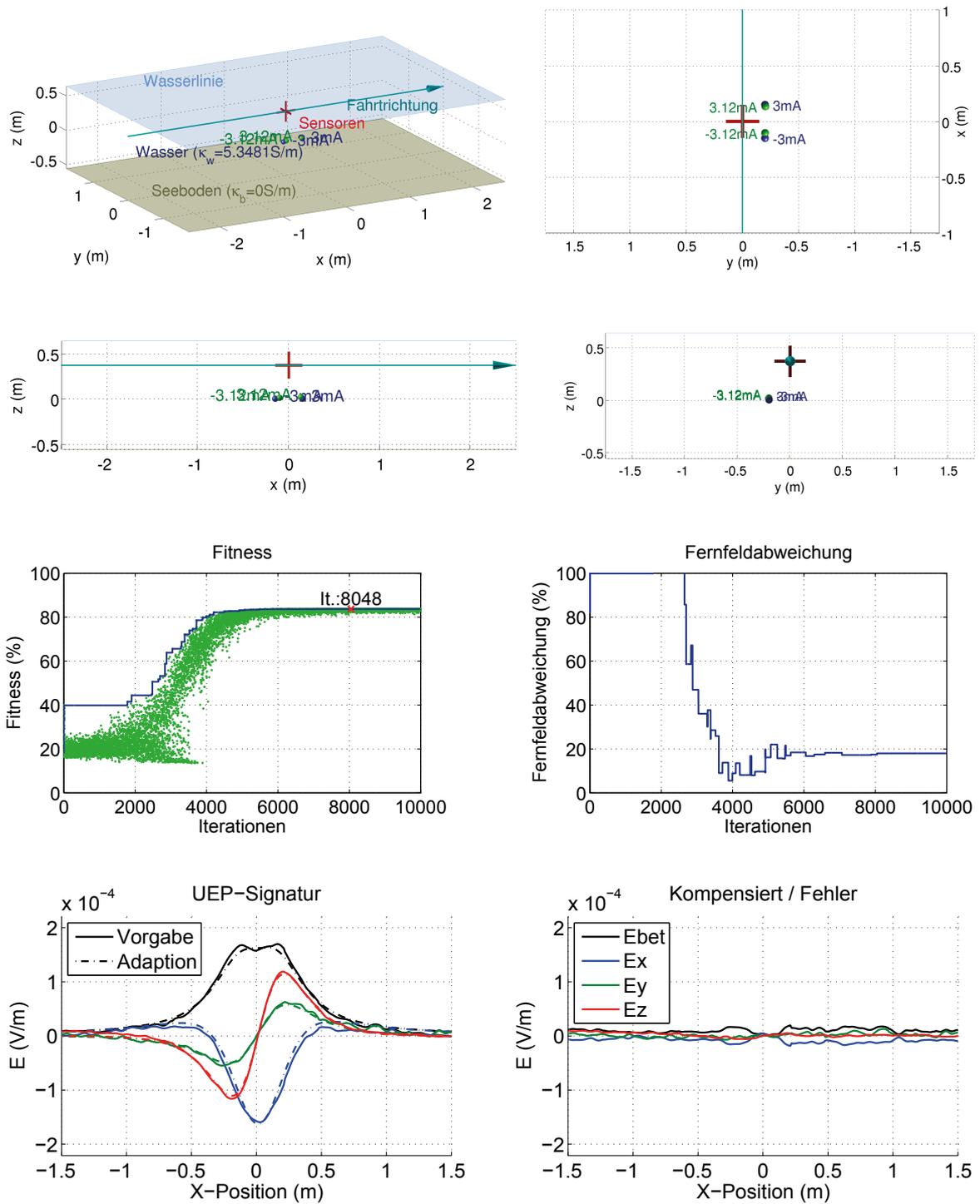


Abbildung 6.: Run 27. Adaption des gemessenen x-Dipols bei seitlichem Überlauf ($abw = 17,8\%$, $ffa = 18,0\%$).

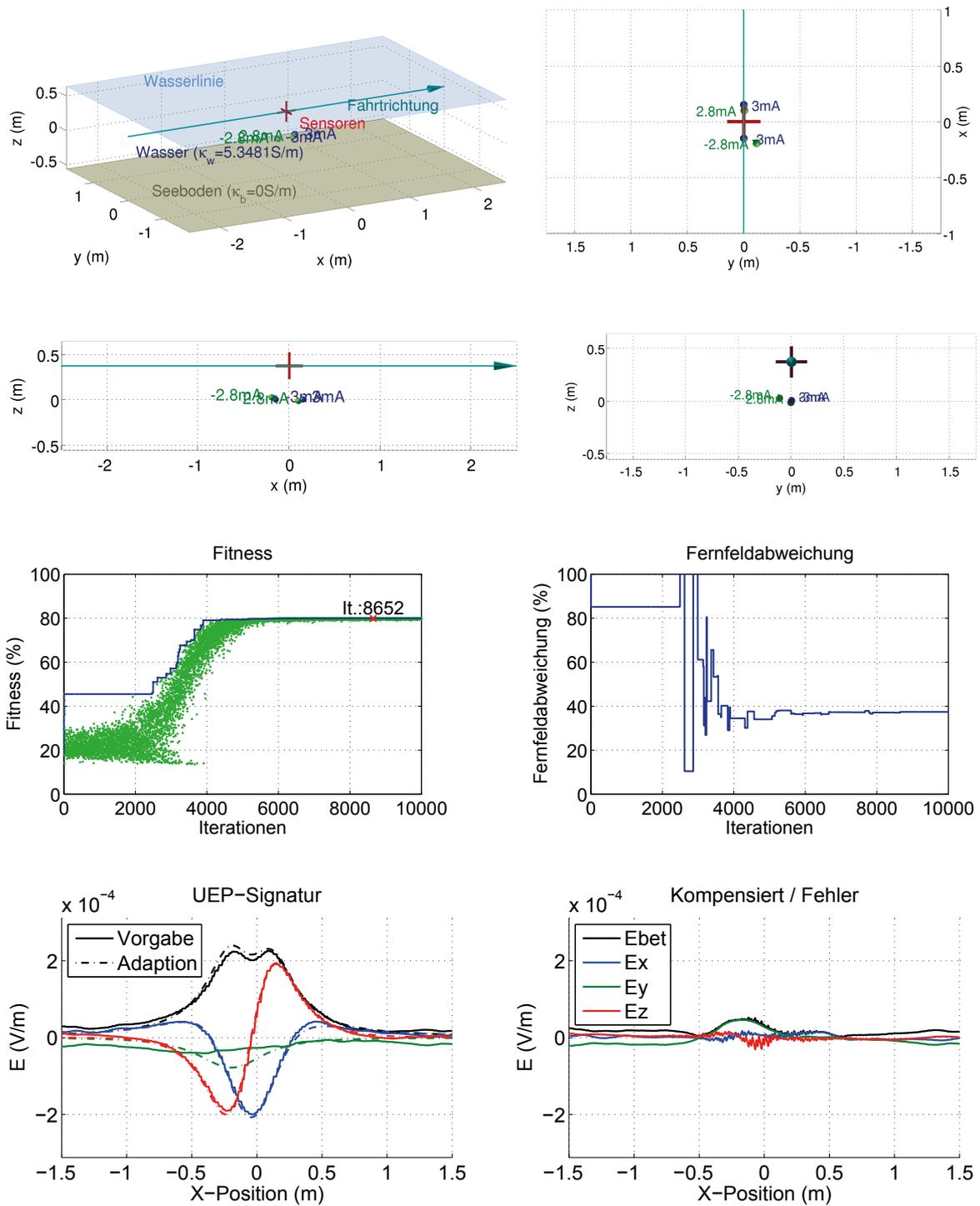


Abbildung 7.: Run 12. Adaption des x-Dipols mit fehlerhaft gemessener E_y -Komponente ($abw = 22,4\%$, $ffa = 37,4\%$).

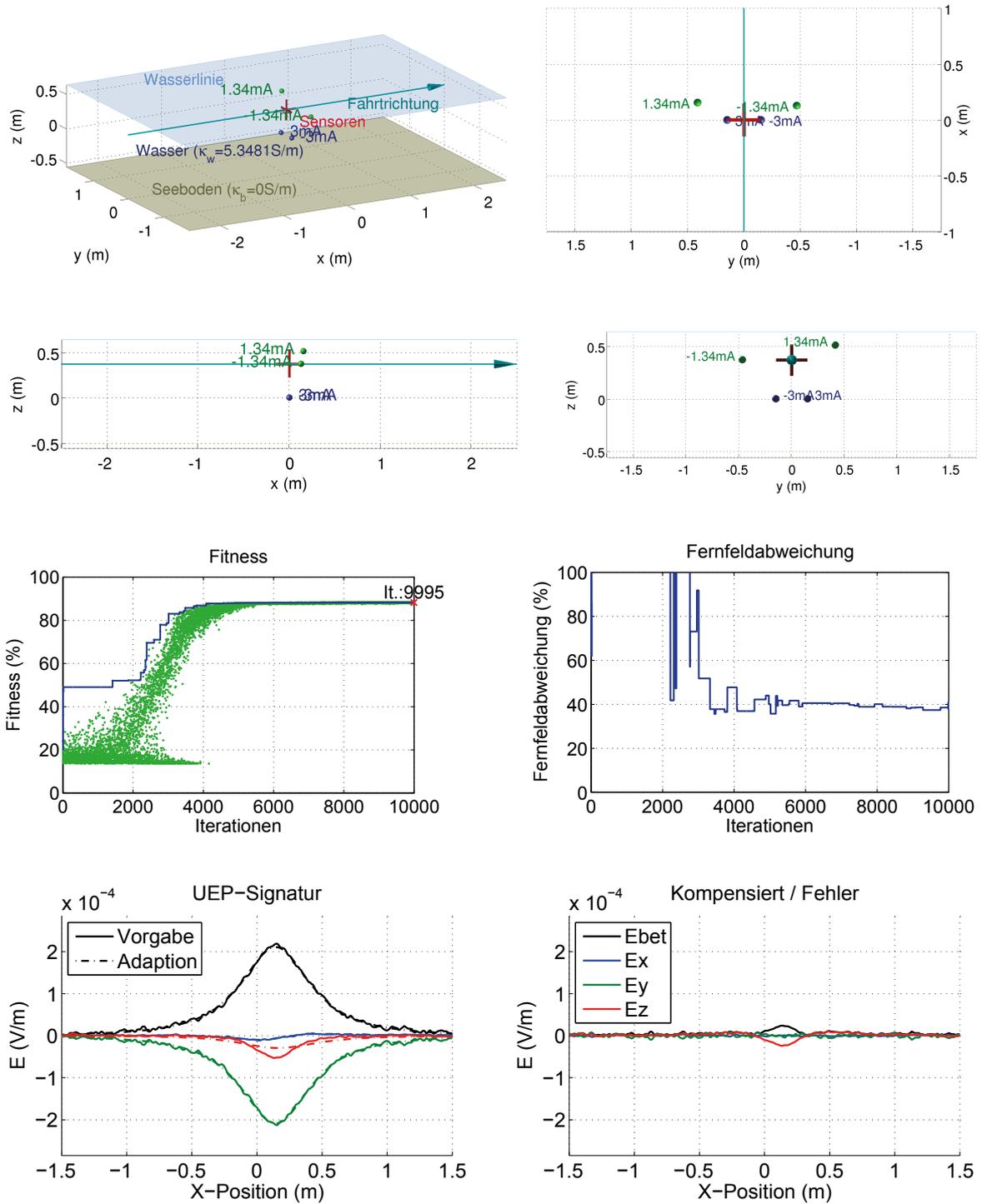


Abbildung 8.: Run 37. Adaption des gemessenen y -Dipols bei direktem Überlauf ($abw = 12,5\%$, $ffa = 37,8\%$).

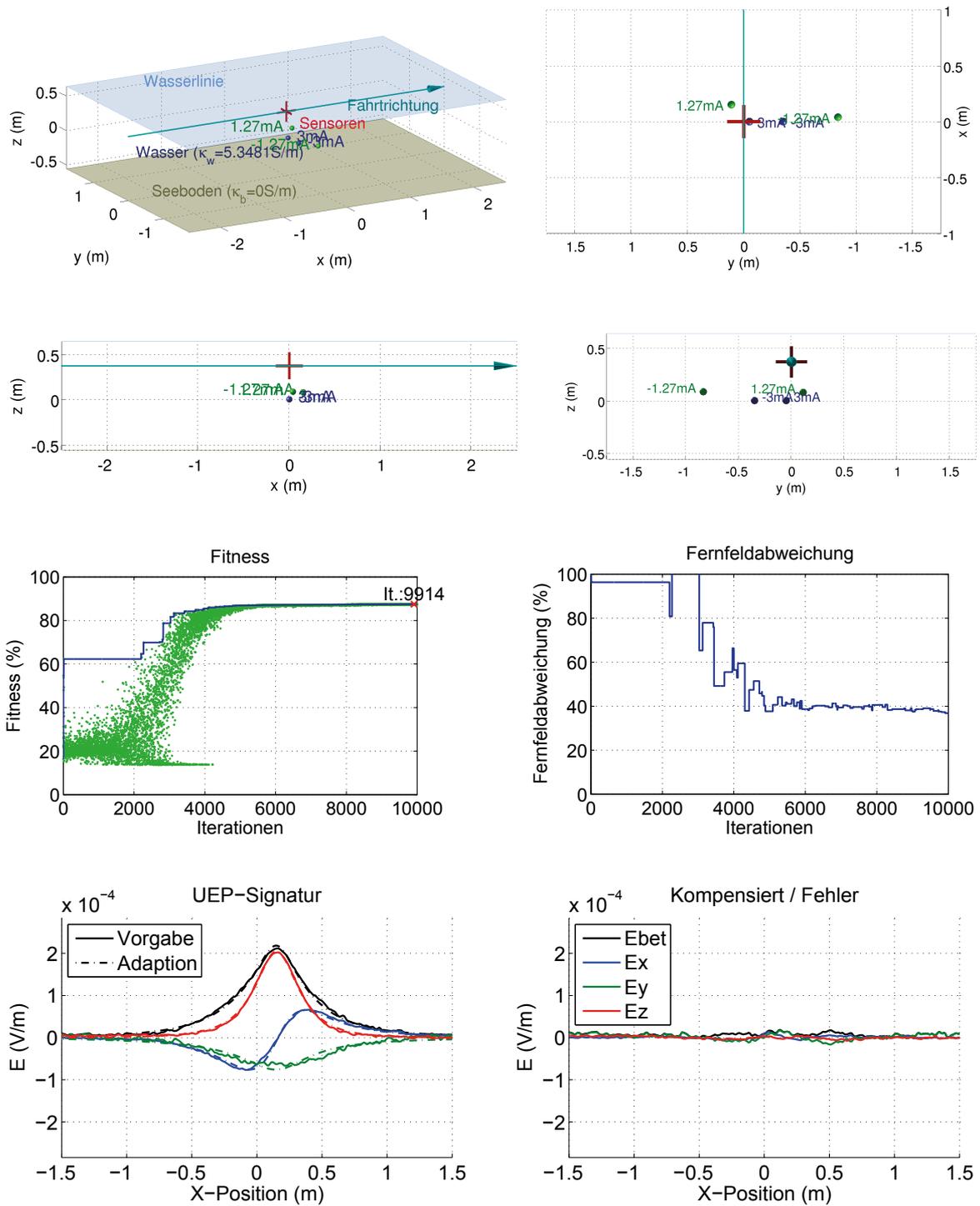


Abbildung 9.: Run 41. Adaption des gemessenen y-Dipols bei seitlichem Überlauf ($abw = 13,4\%$, $ffa = 36,8\%$).

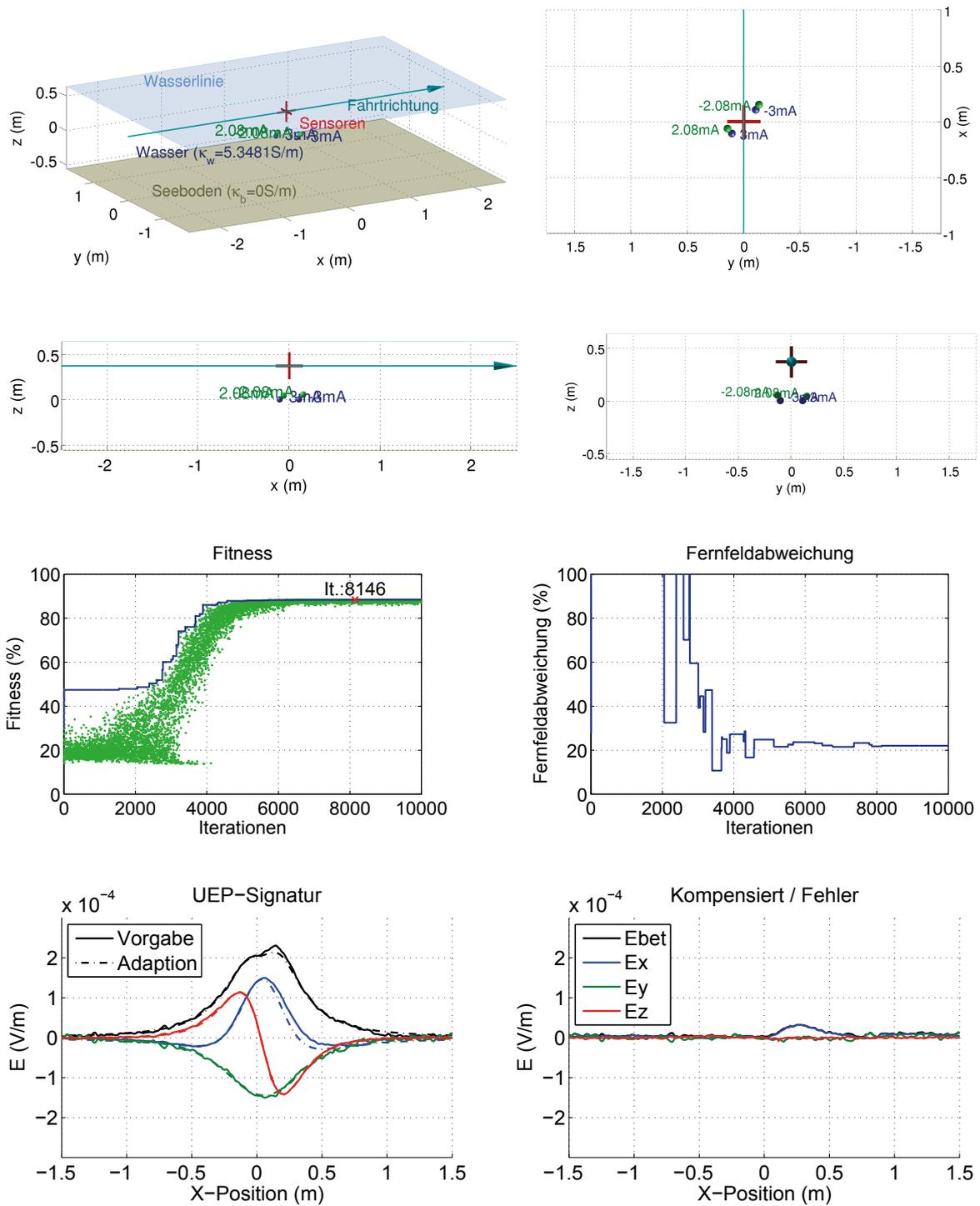


Abbildung 10.: Run 45. Adaption des gemessenen xy -Dipols bei direktem Überlauf ($abw = 12,3\%$, $f fa = 22,0\%$).

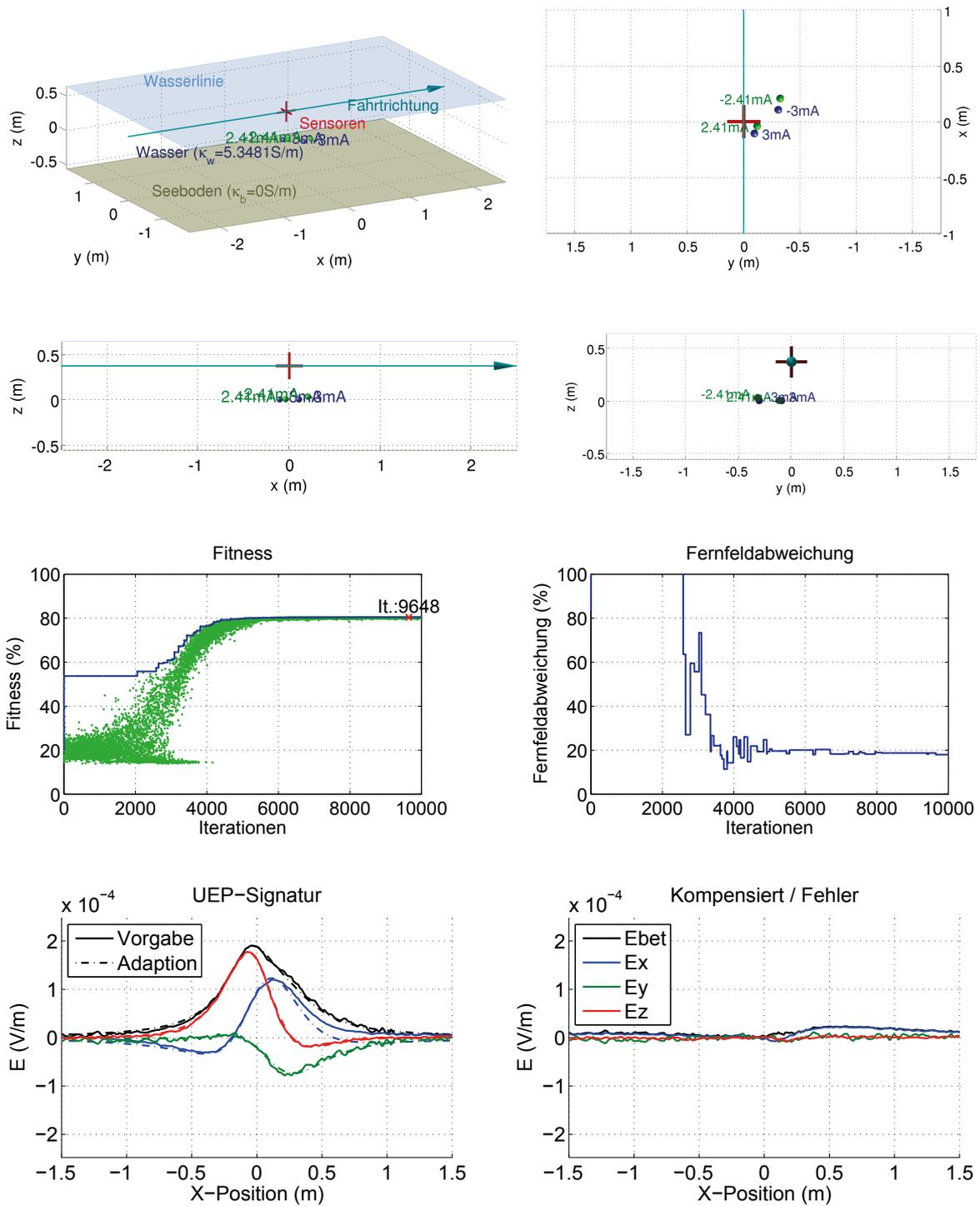


Abbildung 11.: Run 47. Adaption des gemessenen xy -Dipols bei seitlichem Überlauf ($abw = 21,8\%$, $ffa = 18,0\%$).

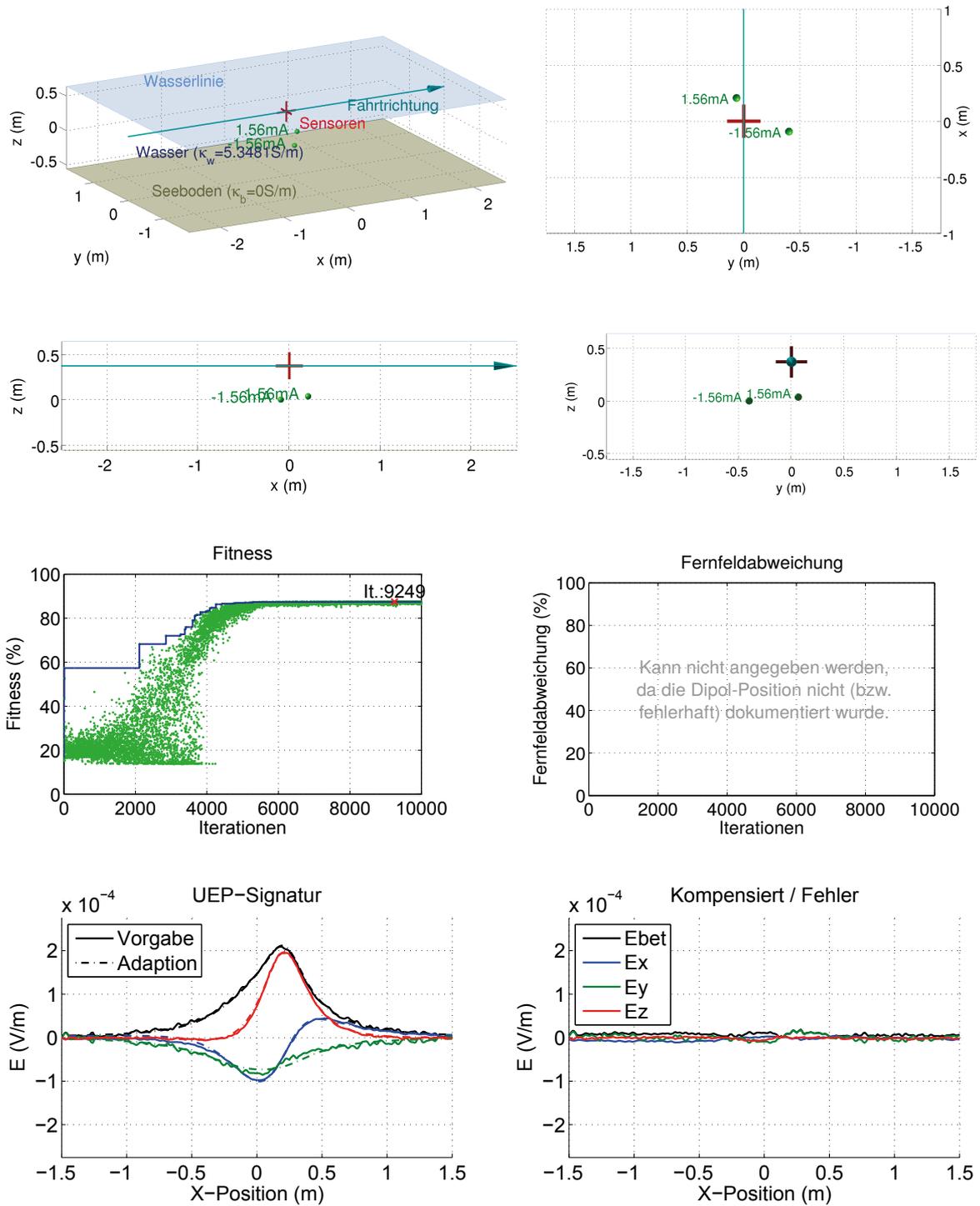


Abbildung 12.: Run 51. Adaption des gemessenen unbekanntes xy-Dipols bei unbekanntem Überlauf (#1) ($abw = 13,4\%$).

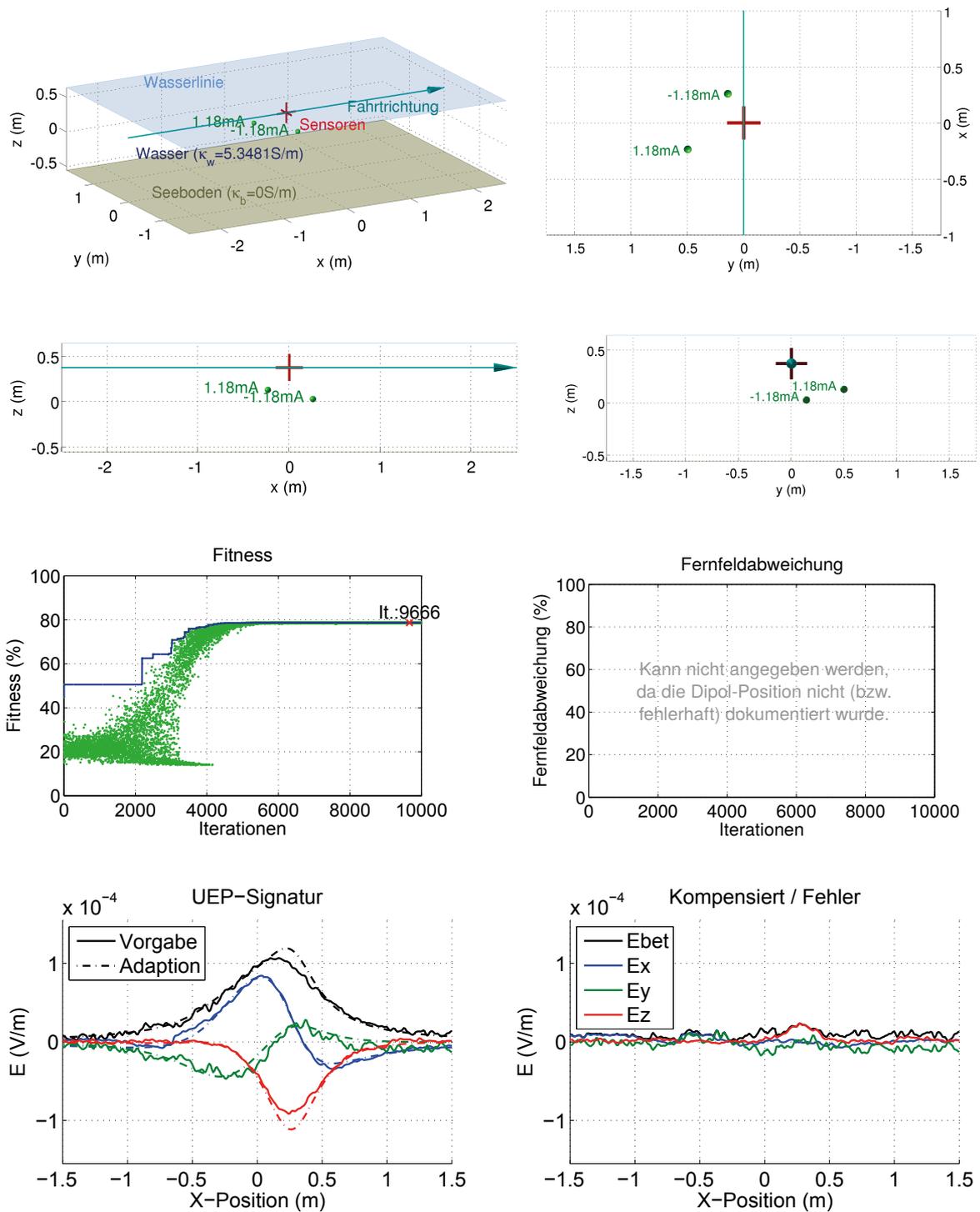


Abbildung 13.: Run 53. Adaption des gemessenen unbekanntem xy-Dipols bei unbekanntem Überlauf (#2) ($abw = 24,0\%$).

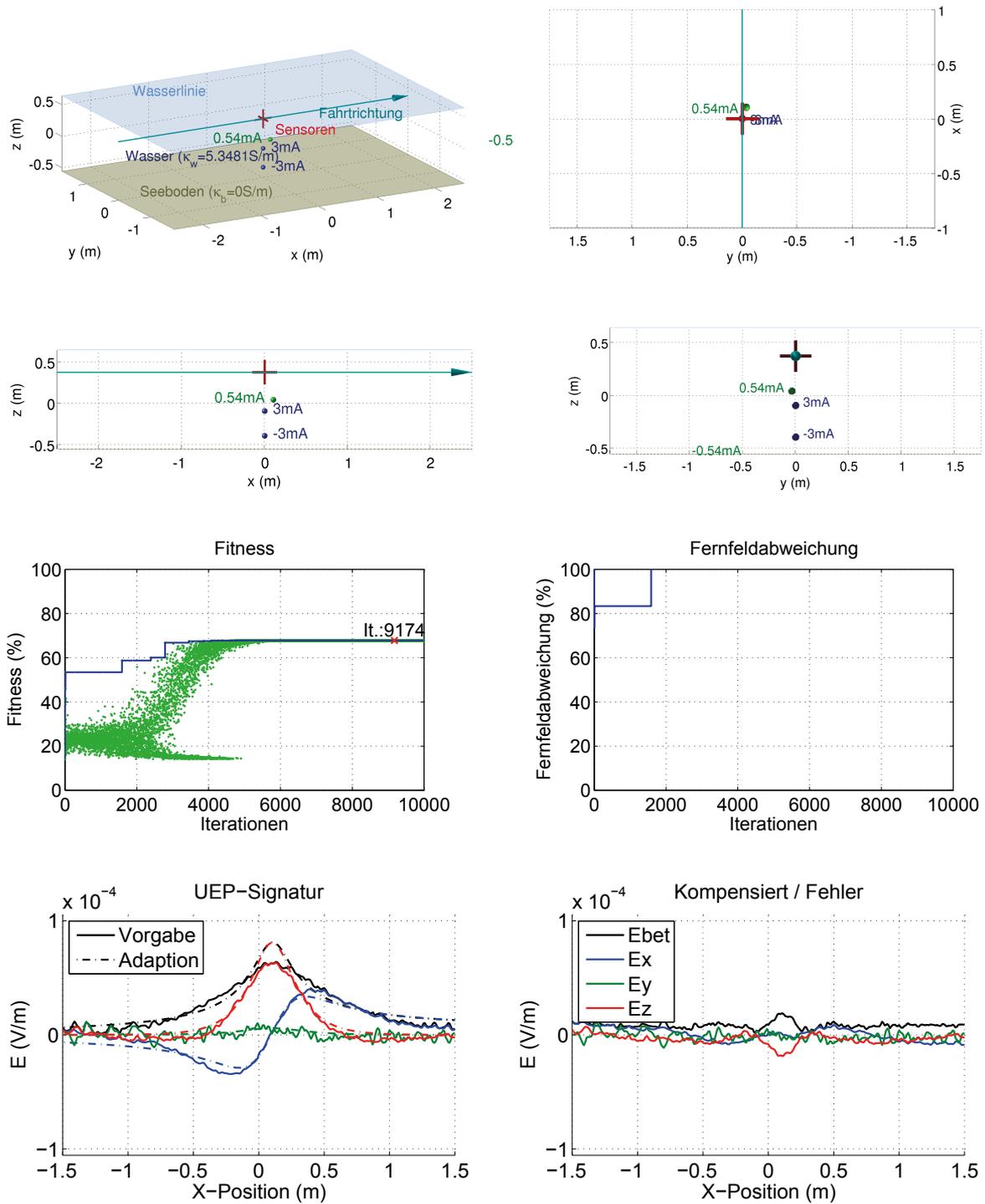


Abbildung 14.: Run 56. Fehlerhafte Adaption des z-Dipols bei direktem Überlauf. Es wird nur die obere Elektrode gefunden während die andere weit außerhalb liegt, so dass faktisch mit einem Monopol adaptiert wird ($abw = 38,8\%$, $ffa = 284,0\%$).

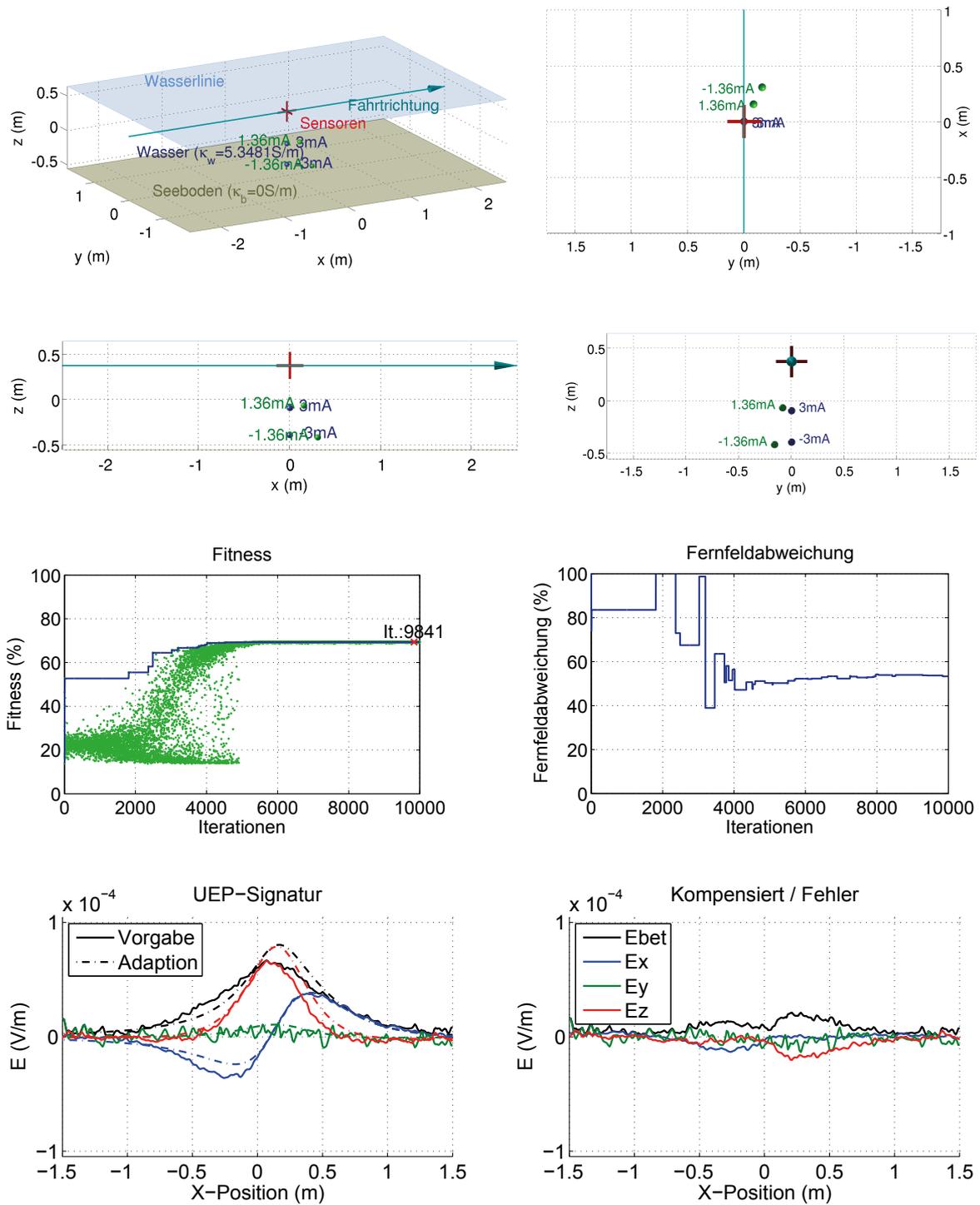


Abbildung 15.: Run 57. Adaption des gemessenen z -Dipols bei direktem Überlauf ($abw = 36,5\%$, $ffa = 53,3\%$).

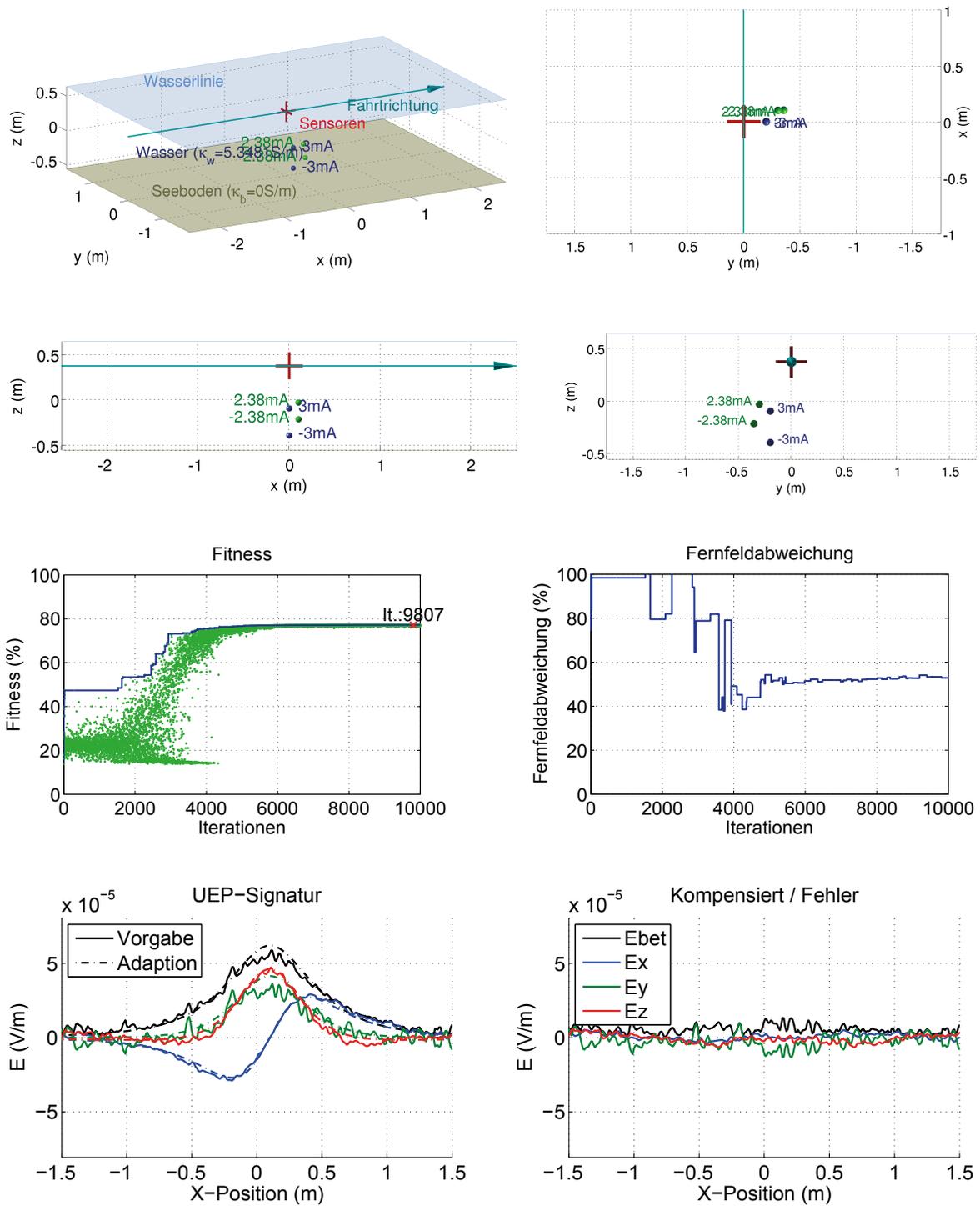


Abbildung 16.: Run 59. Adaption des gemessenen z-Dipols bei seitlichem Überlauf ($abw = 25,9\%$, $ffa = 52,9\%$).

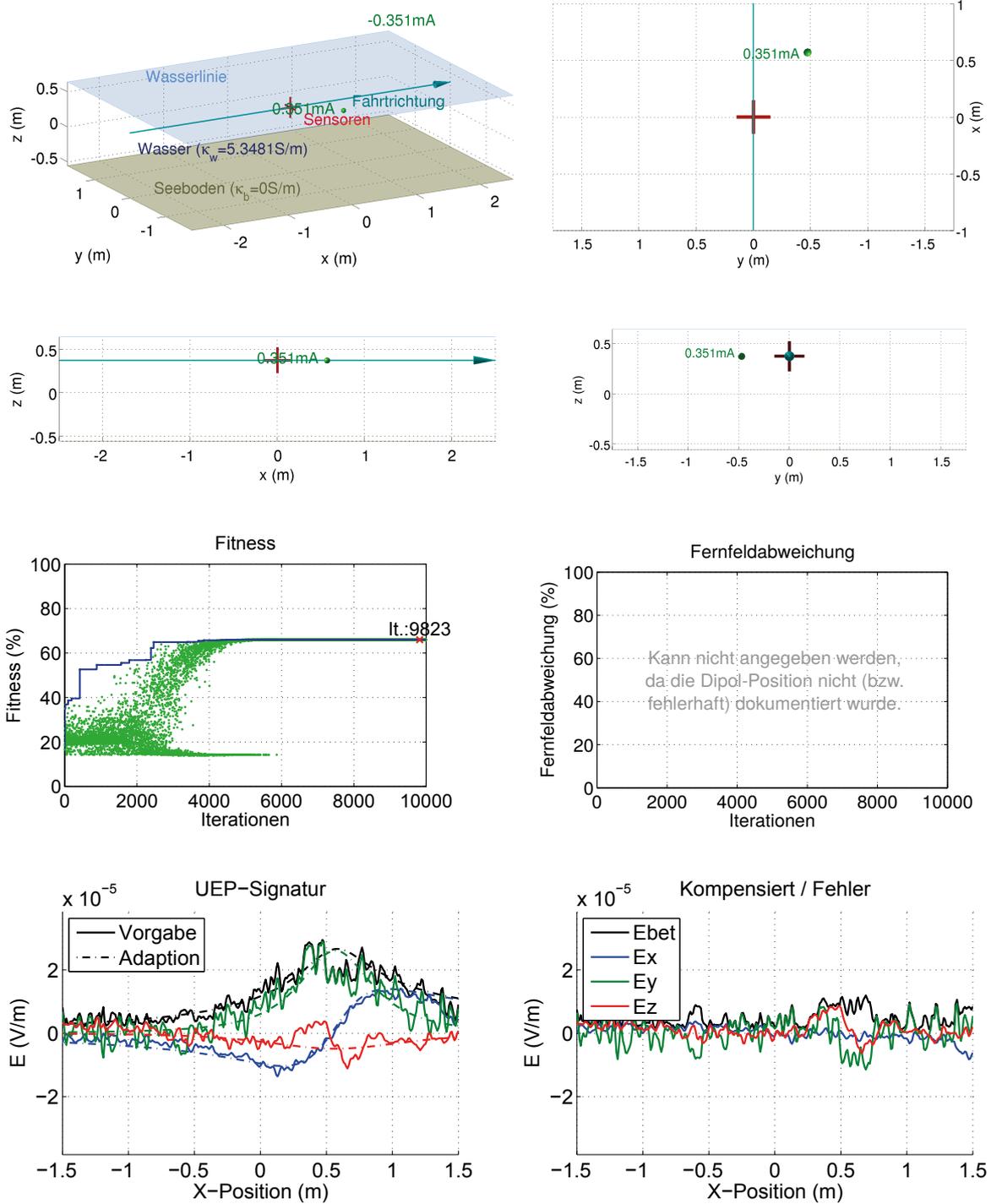


Abbildung 17.: Run 63. Adaption des gemessenen unbekanntem Dipols bei unbekanntem Überlauf (#1 ($abw = 41,6\%$)).

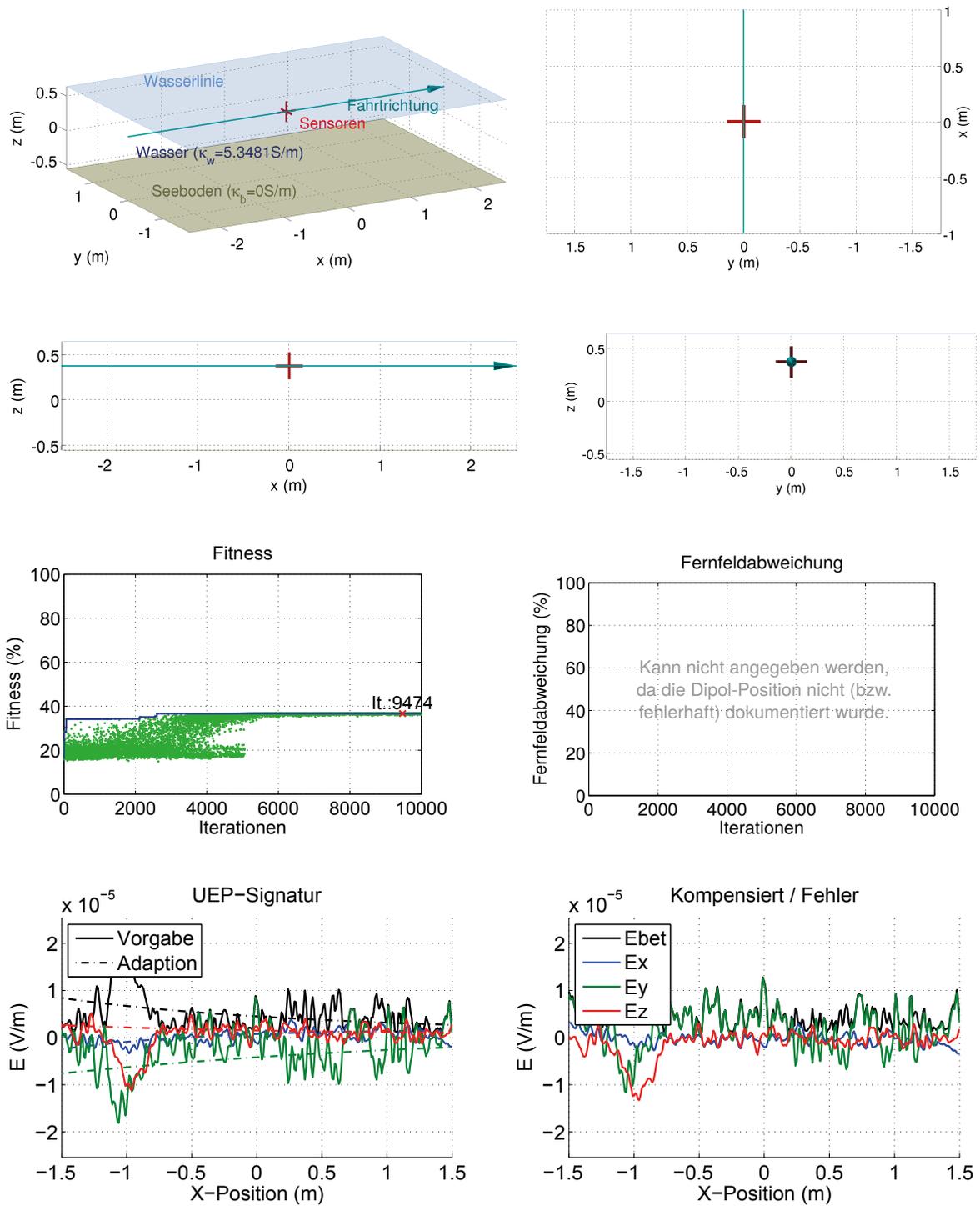


Abbildung 18.: Run 64. Adaption des gemessenen unbekanntes Dipols bei unbekanntem Überlauf (#2) ($abw = 100,3\%$).

D. Echtzeit-Überwachung für ISSM

D.1. Referenzsignaturen

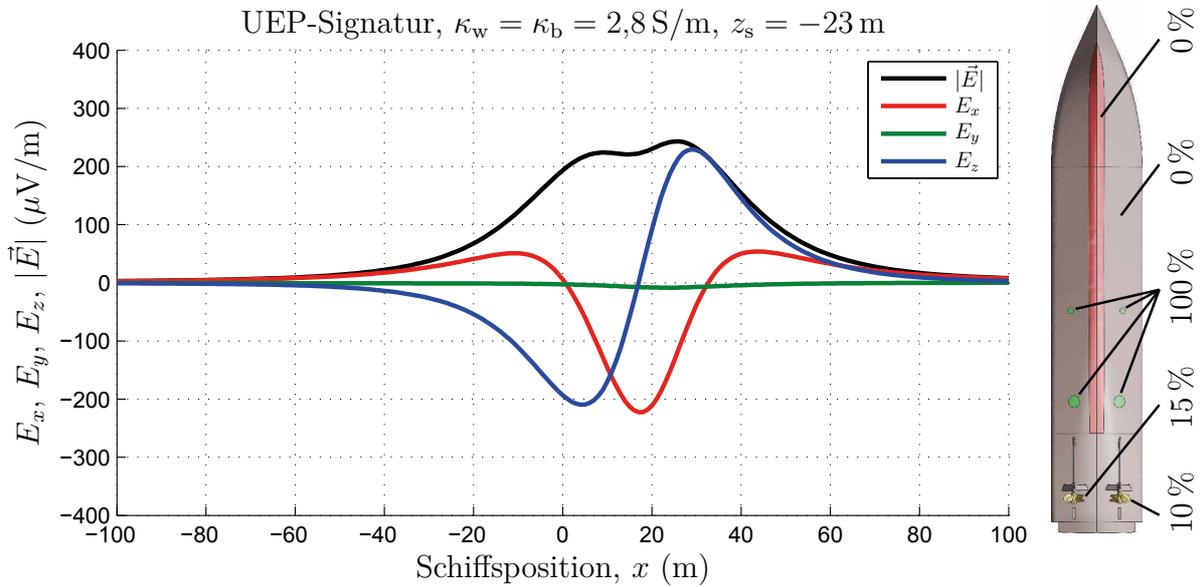


Abbildung 19.: Referenzsignatur für intakte Rumpfbeschichtung im freien Wasser. *Quelle:* Eigene Herstellung.

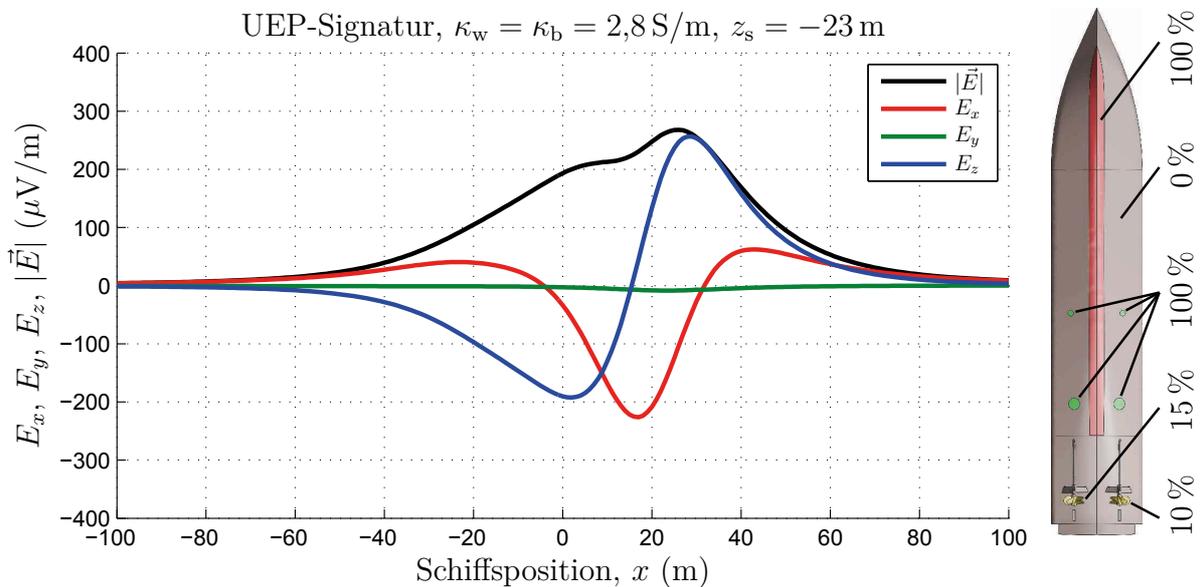


Abbildung 20.: Referenzsignatur für defekte Kielbeschichtung im freien Wasser. *Quelle:* Eigene Herstellung.

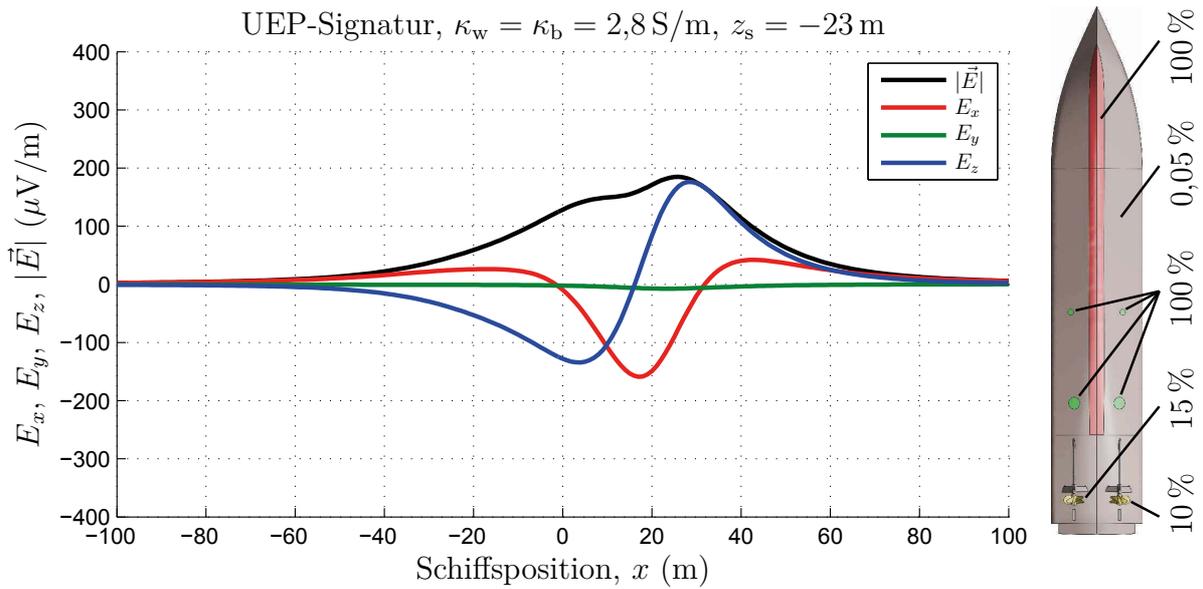


Abbildung 21.: Referenzsignatur für defekte Rumpfbeschichtung im freien Wasser.
Quelle: Eigene Herstellung.

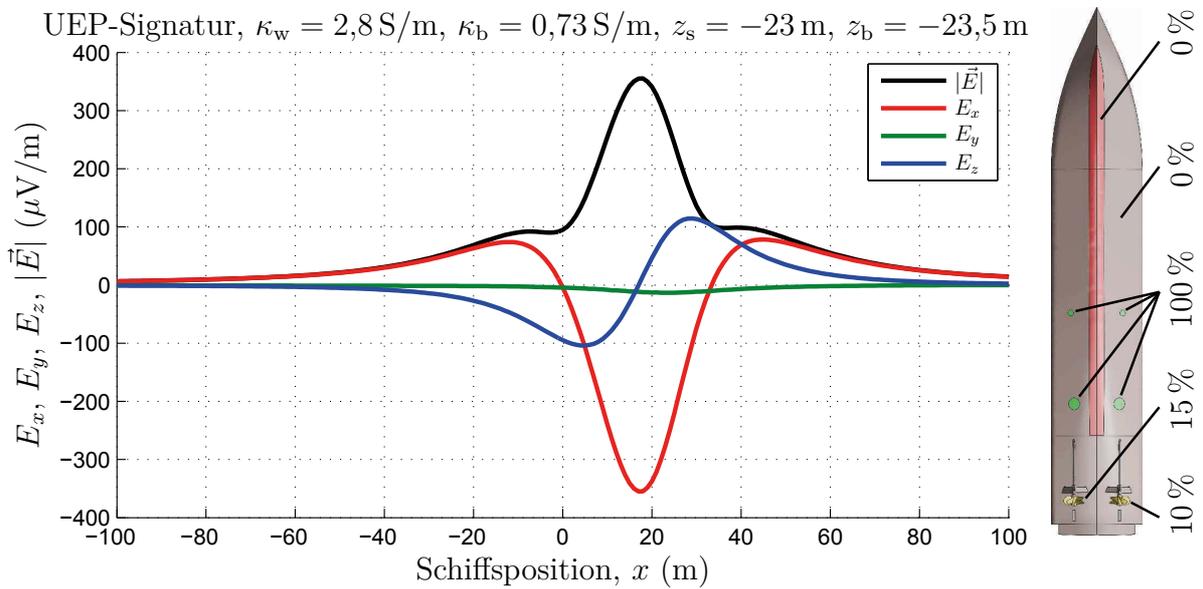


Abbildung 22.: Referenzsignatur für intakte Rumpfbeschichtung in Gegenwart des Seebodens (Aschau-Bedingungen). *Quelle:* Eigene Herstellung.

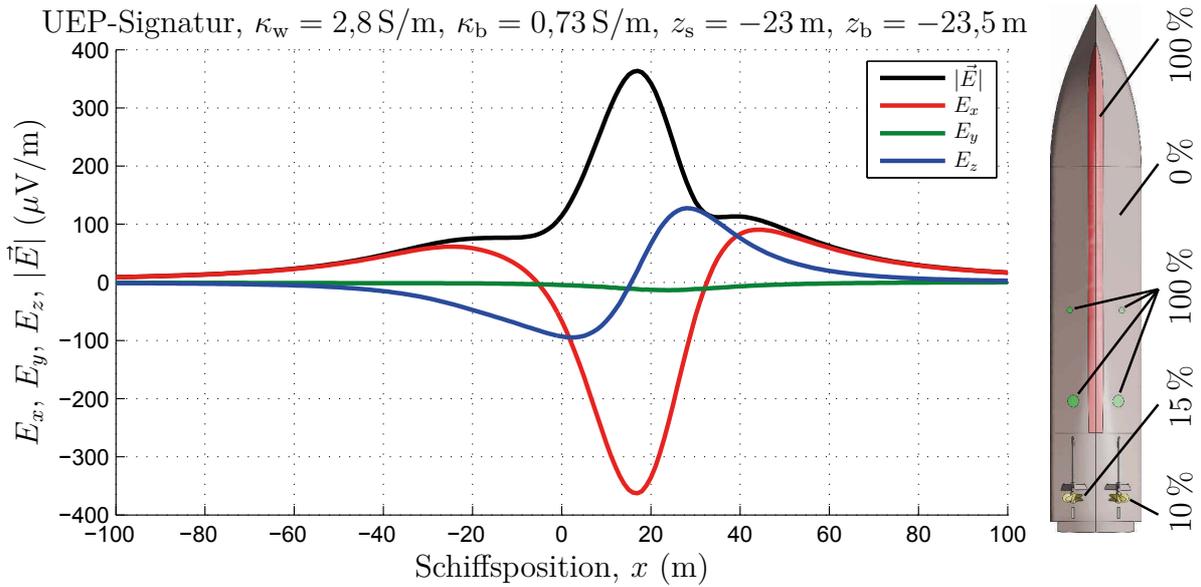


Abbildung 23.: Referenzsignatur für defekte Kielbeschichtung in Gegenwart des Seebodens (Aschau-Bedingungen). *Quelle:* Eigene Herstellung.

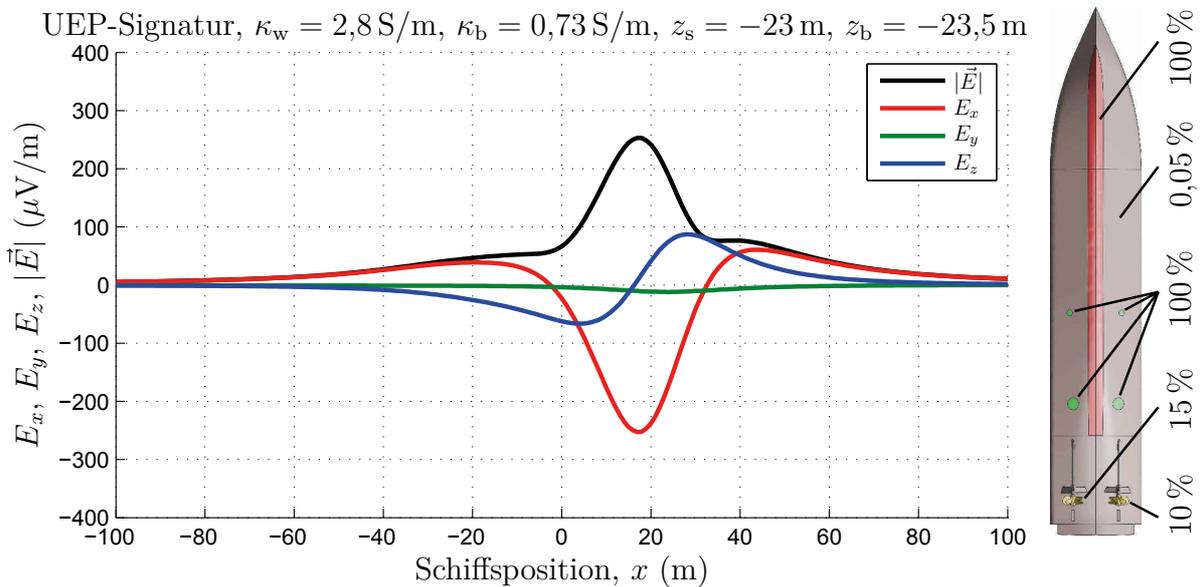


Abbildung 24.: Referenzsignatur für defekte Rumpfbeschichtung in Gegenwart des Seebodens (Aschau-Bedingungen). *Quelle:* Eigene Herstellung.

D.2. Veranschaulichung der Korrelation

Wellenströme und Jmax für Szenario „ww1“

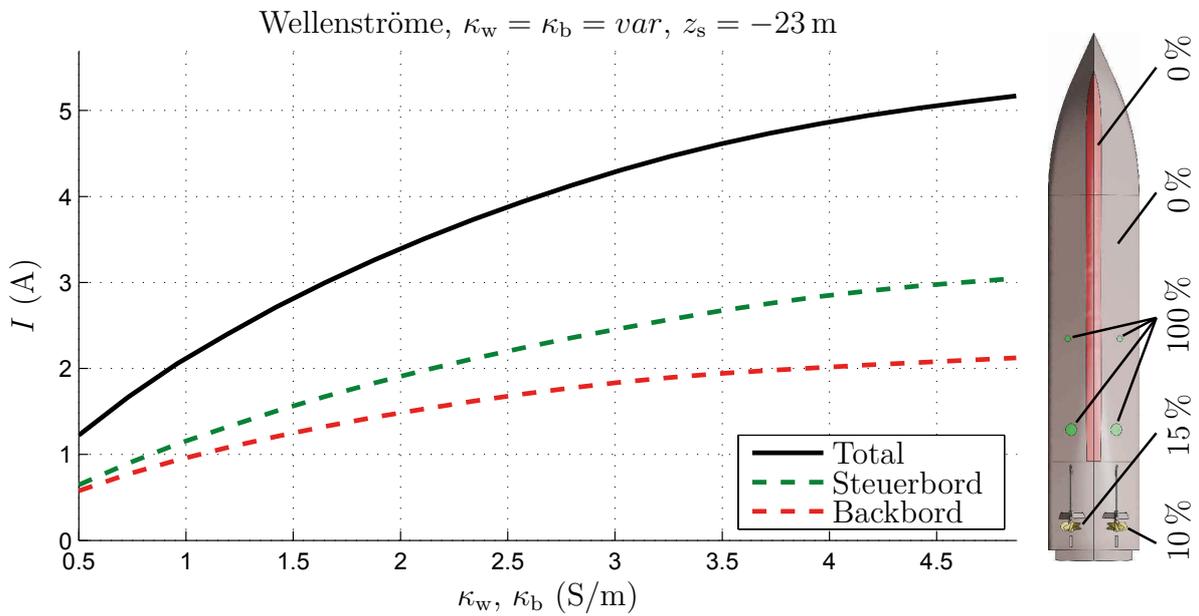


Abbildung 25.: Szenario „ww1“. Simulierte Wellenströme. *Quelle:* Eigene Herstellung.

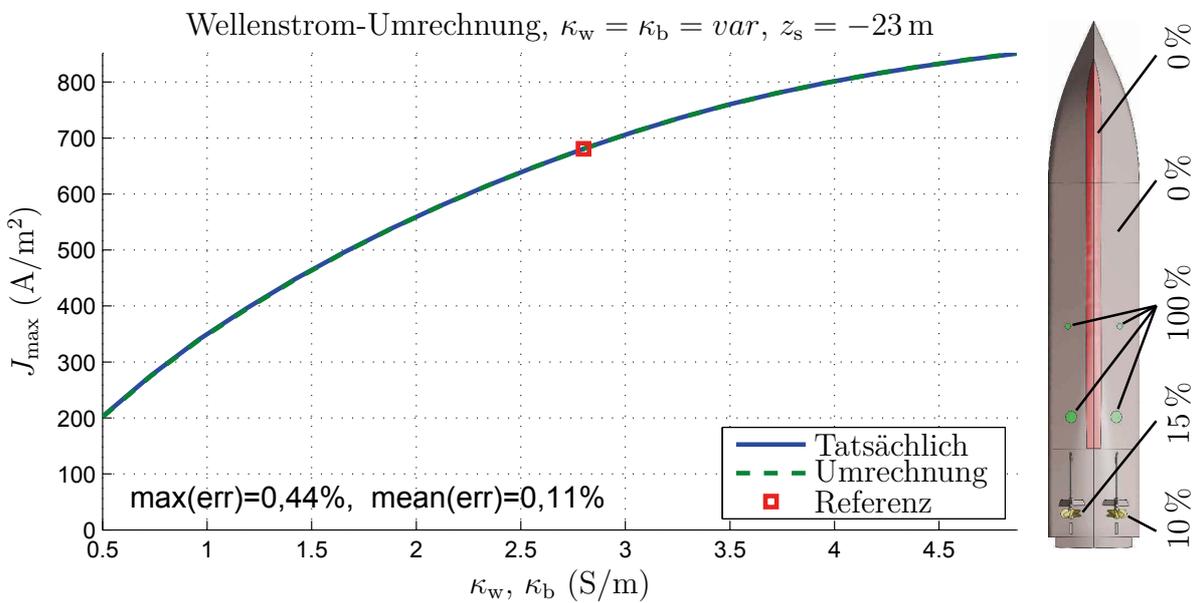


Abbildung 26.: Szenario „ww1“. Die Umrechnung gibt nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Wellenströme und Jmax für Szenario „ww2“

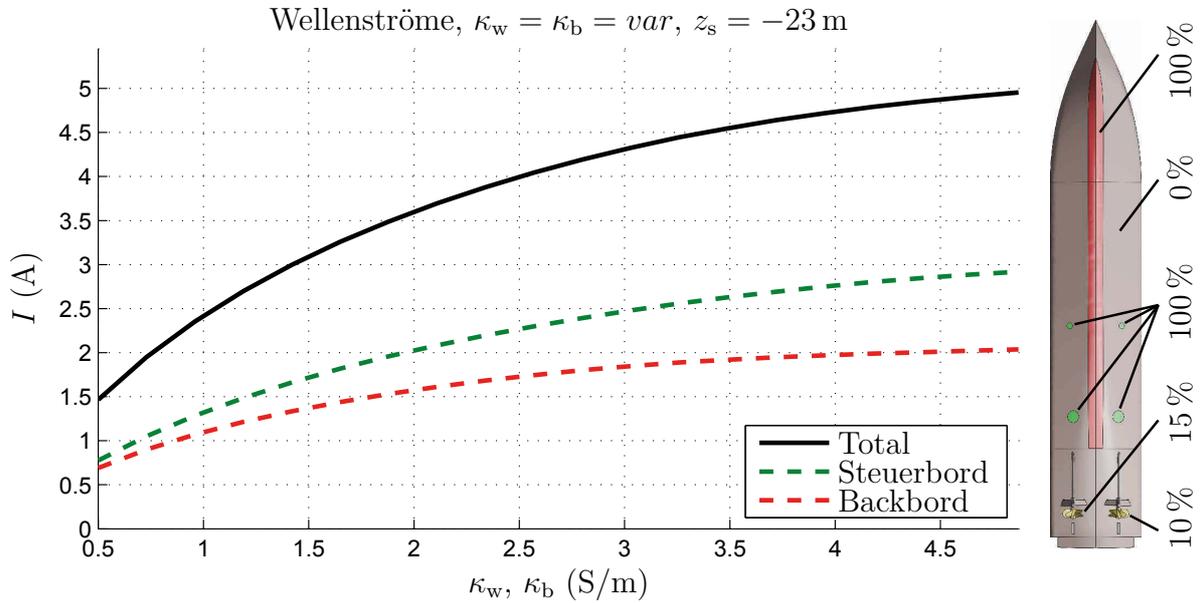


Abbildung 27.: Szenario „ww2“. Simulierte Wellenströme. *Quelle:* Eigene Herstellung.

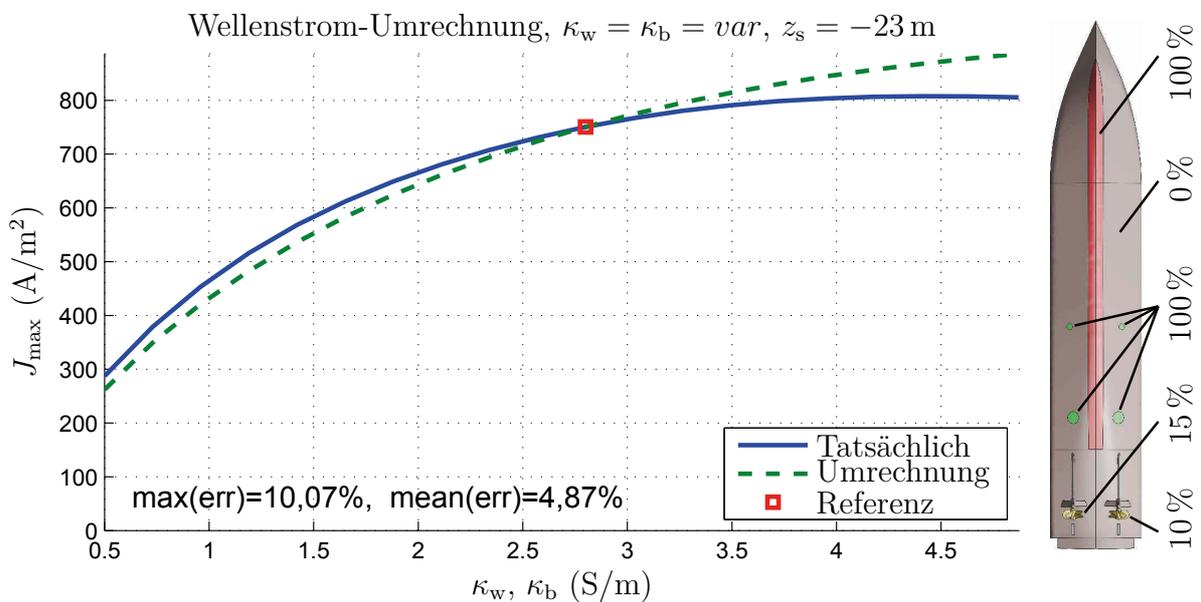


Abbildung 28.: Szenario „ww2“. Die Umrechnung gibt in guter Näherung die wirkliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Wellenströme und Jmax für Szenario „ww3“

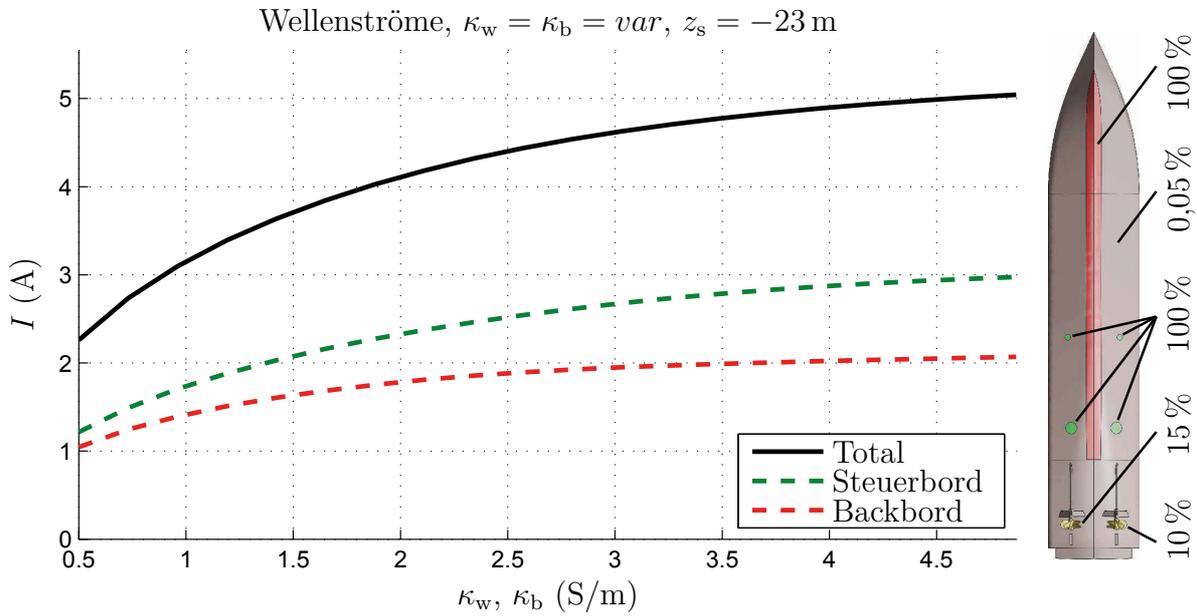


Abbildung 29.: Szenario „ww3“. Simulierte Wellenströme. *Quelle:* Eigene Herstellung.

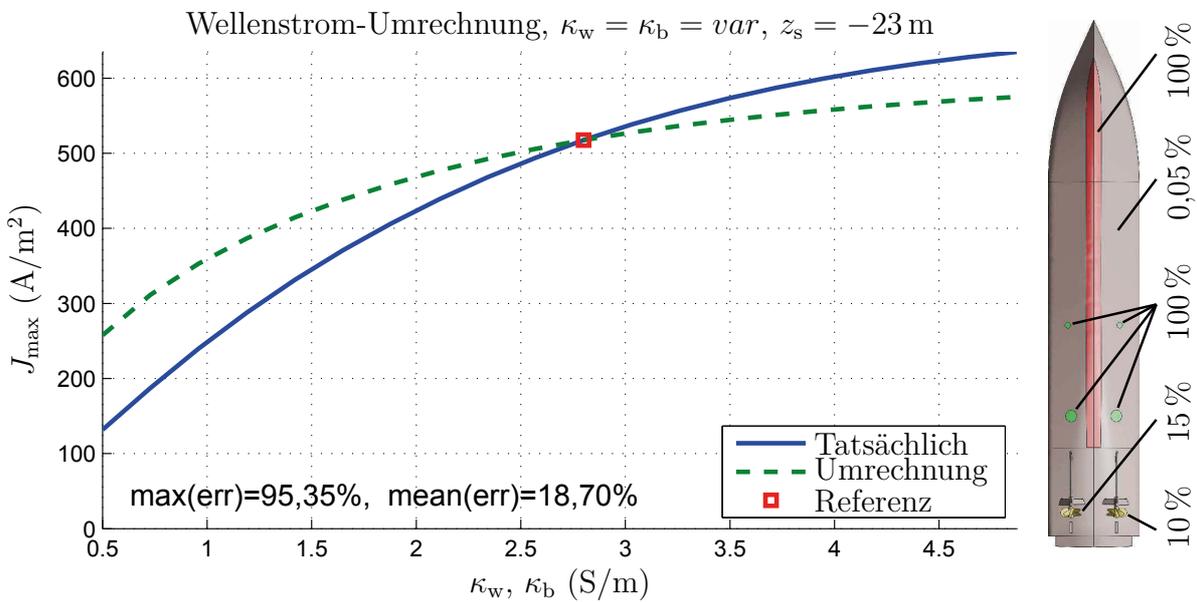


Abbildung 30.: Szenario „ww3“. Die Umrechnung liefert nur noch in der Nähe des Referenzpunktes brauchbare Ergebnisse. Wellenstrom und Signatur sind nicht mehr ausreichend korreliert. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Wellenströme und Jmax für Szenario „wg1“

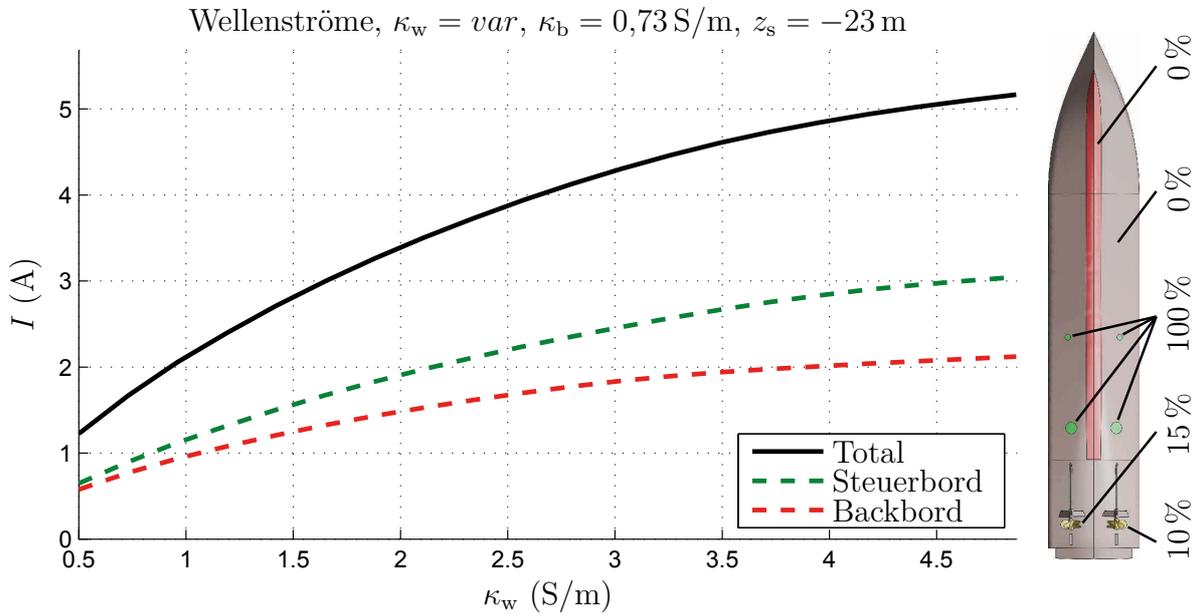


Abbildung 31.: Szenario „wg1“. Simulierte Wellenströme. *Quelle:* Eigene Herstellung.

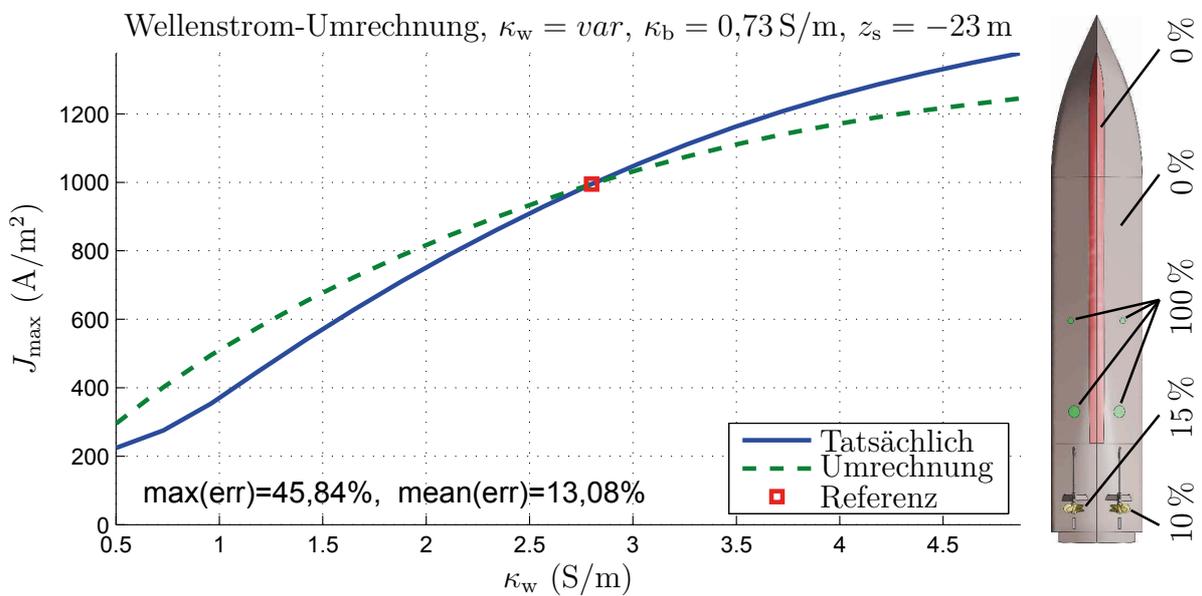


Abbildung 32.: Szenario „wg1“. Der Einfluss der konstanten Seebodenleitfähigkeit $\kappa_b = 0,73 \text{ S/m}$ verschlechtert die Umrechnung. *Quelle:* Eigene Herstellung.

Wellenströme und Jmax für Szenario „wb1“

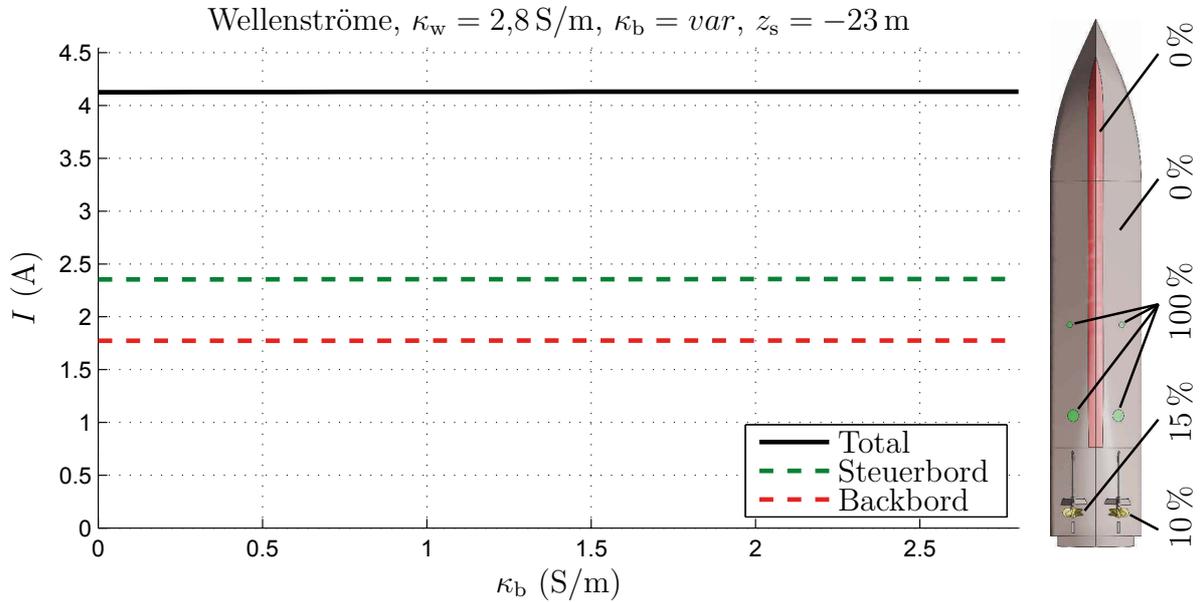


Abbildung 33.: Szenario „wb1“. Simulierte Wellenströme. *Quelle:* Eigene Herstellung.

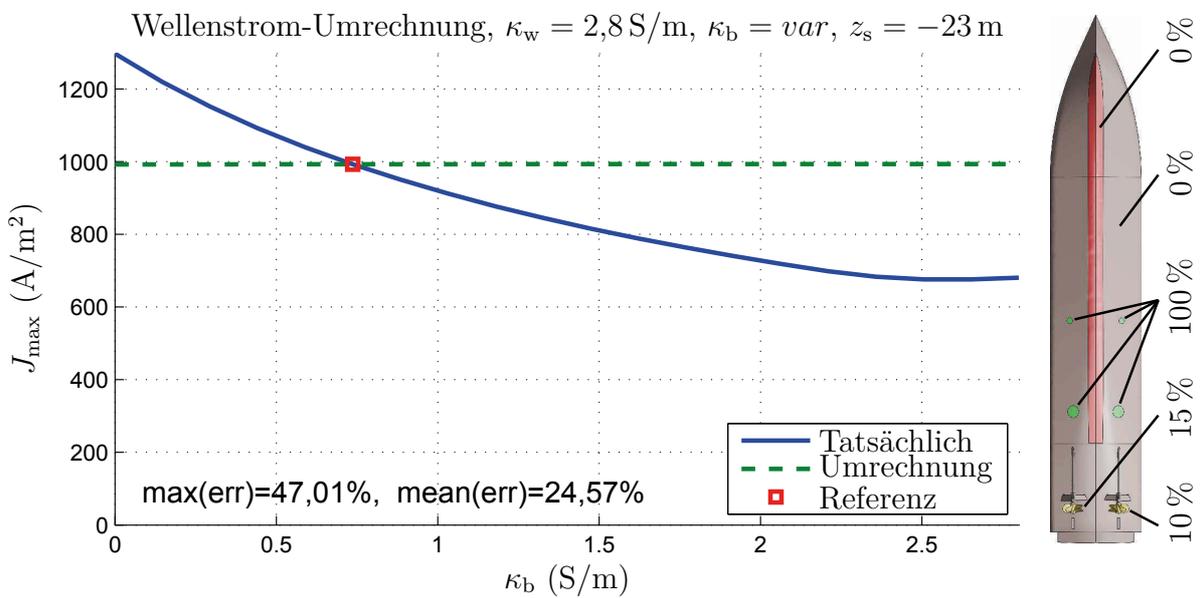


Abbildung 34.: Szenario „wb1“. Der Einfluss der Seebodenleitfähigkeit kann nicht mittels Wellenstrom umgerechnet werden. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und Emax für Szenario „tw1“

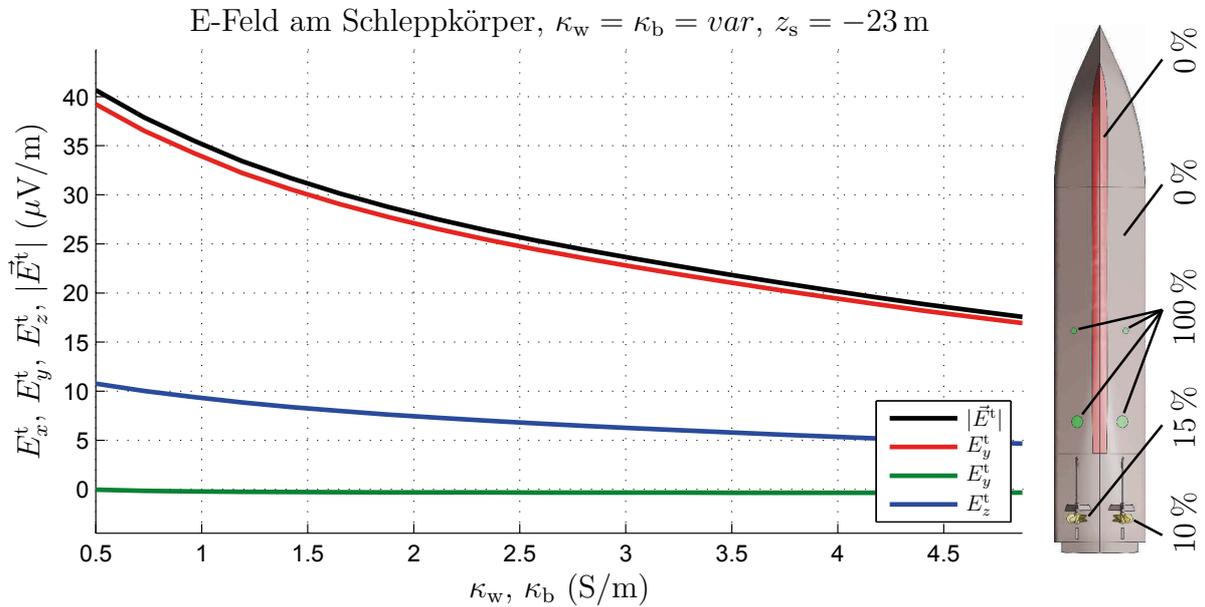


Abbildung 35.: Szenario „tw1“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

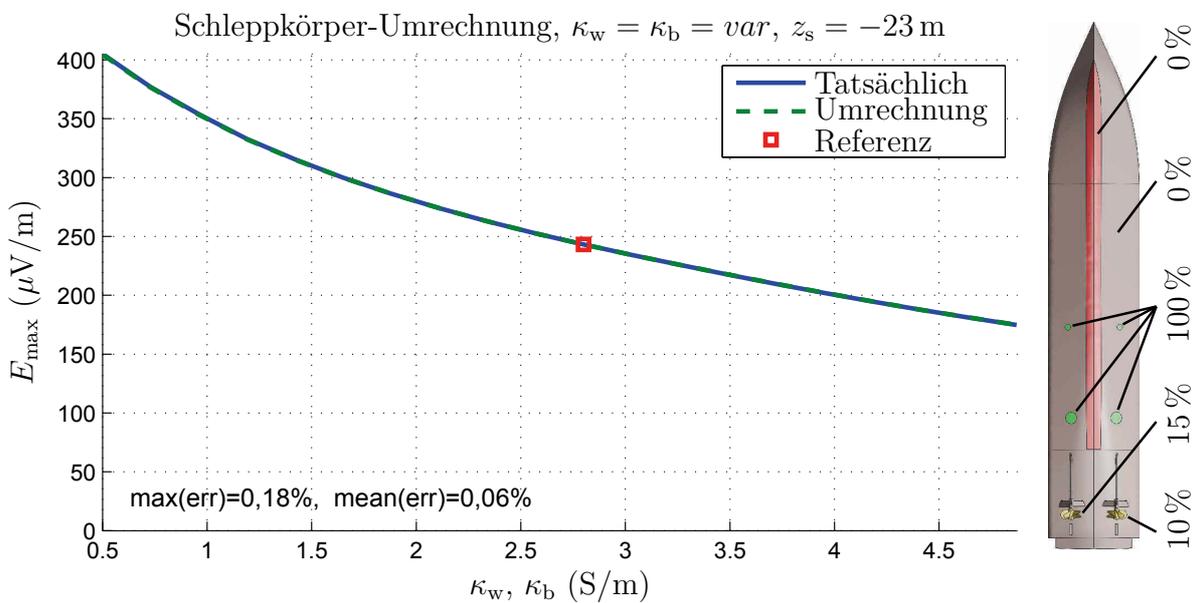


Abbildung 36.: Szenario „tw1“. Die Umrechnung gibt nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und Emax für Szenario „tw2“

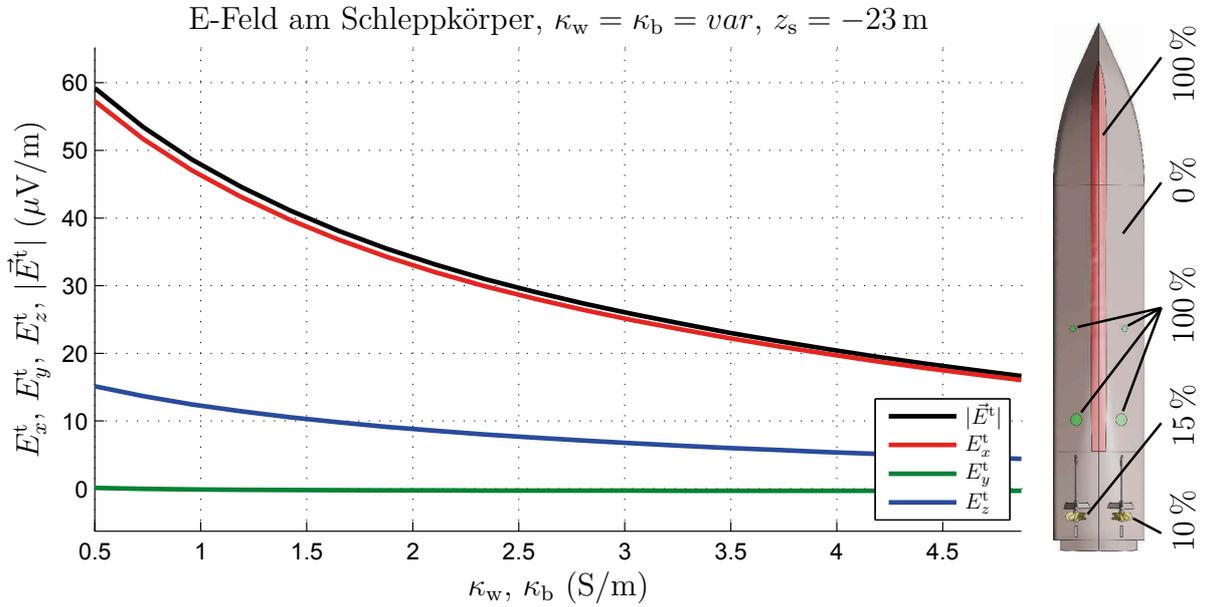


Abbildung 37.: Szenario „tw2“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

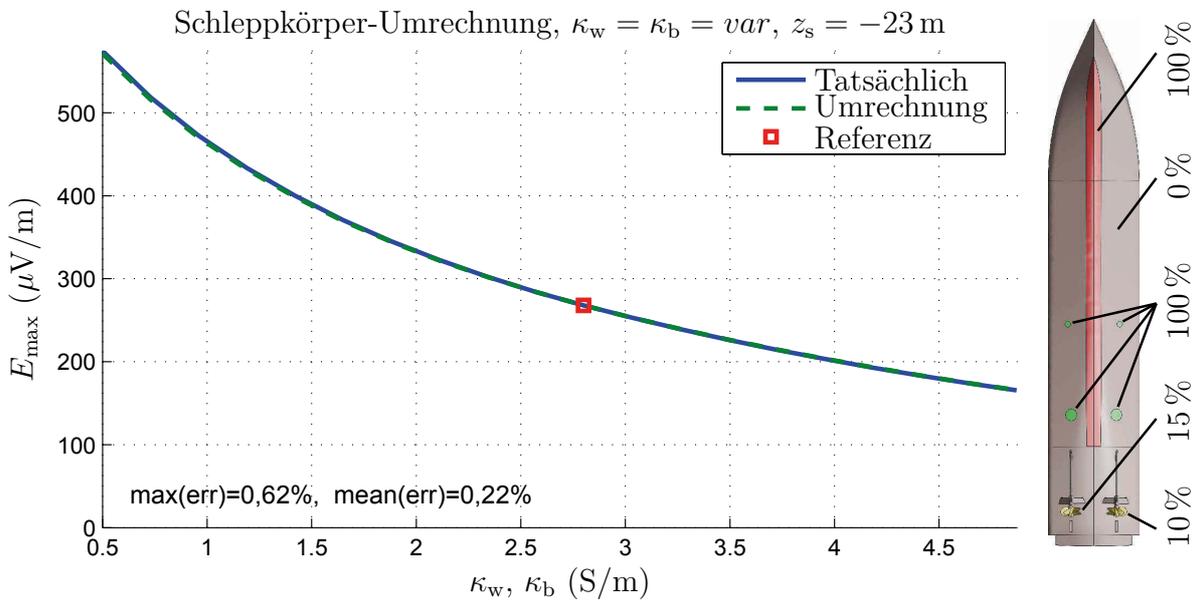


Abbildung 38.: Szenario „tw2“. Die Umrechnung gibt nahezu perfekt die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und Emax für Szenario „tw3“

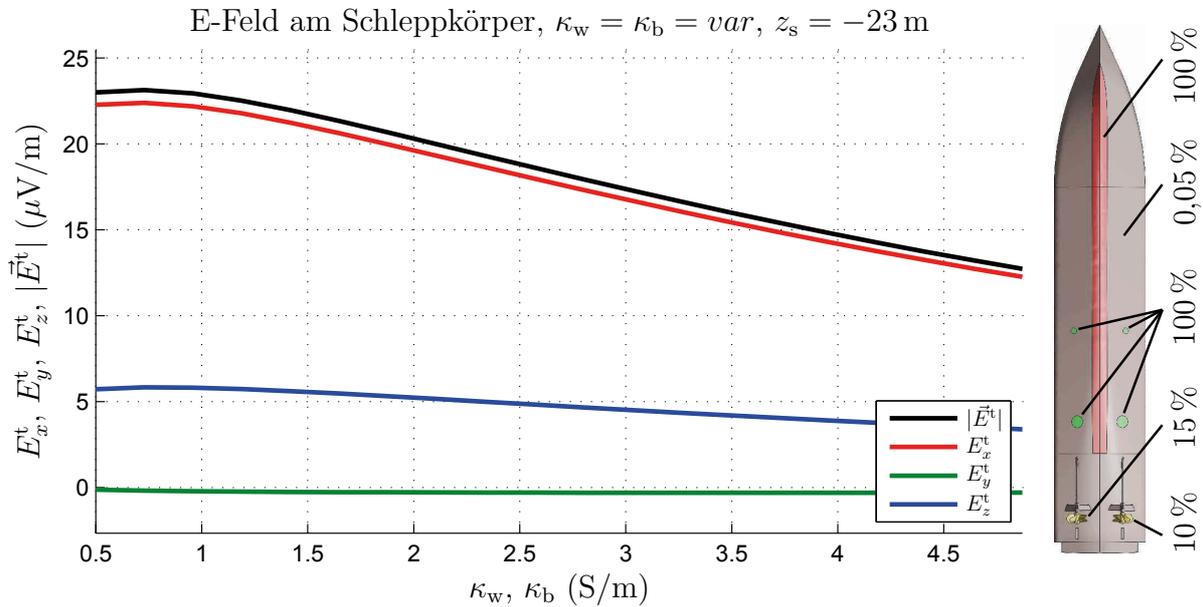


Abbildung 39.: Szenario „tw3“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

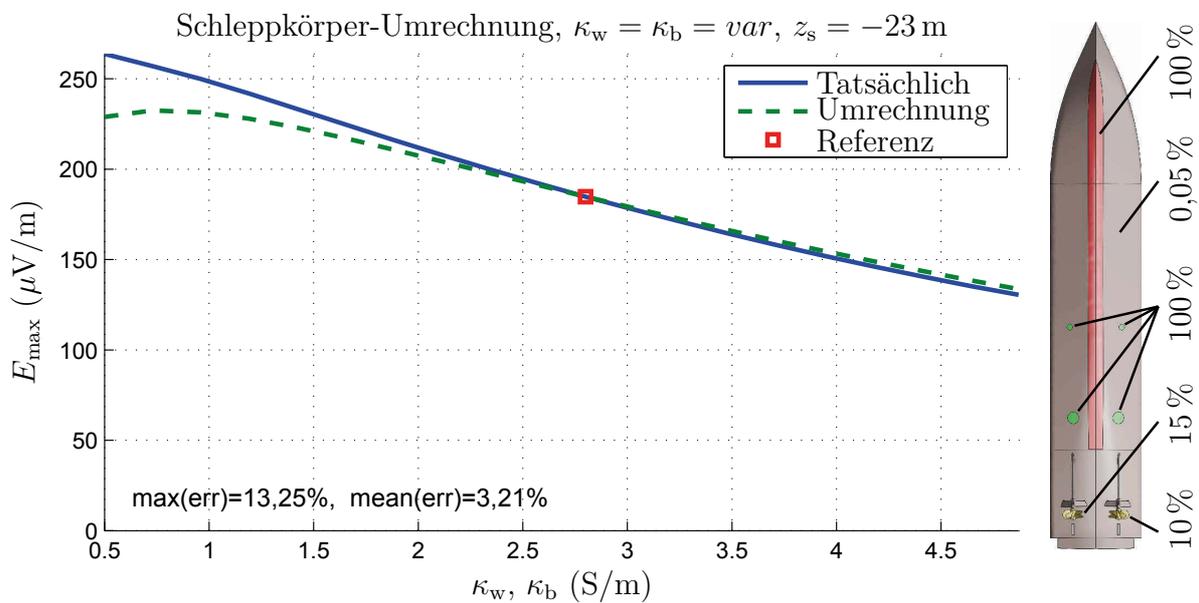


Abbildung 40.: Szenario „tw3“. Die Umrechnung gibt in guter Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und E_{max} für Szenario „tb1“

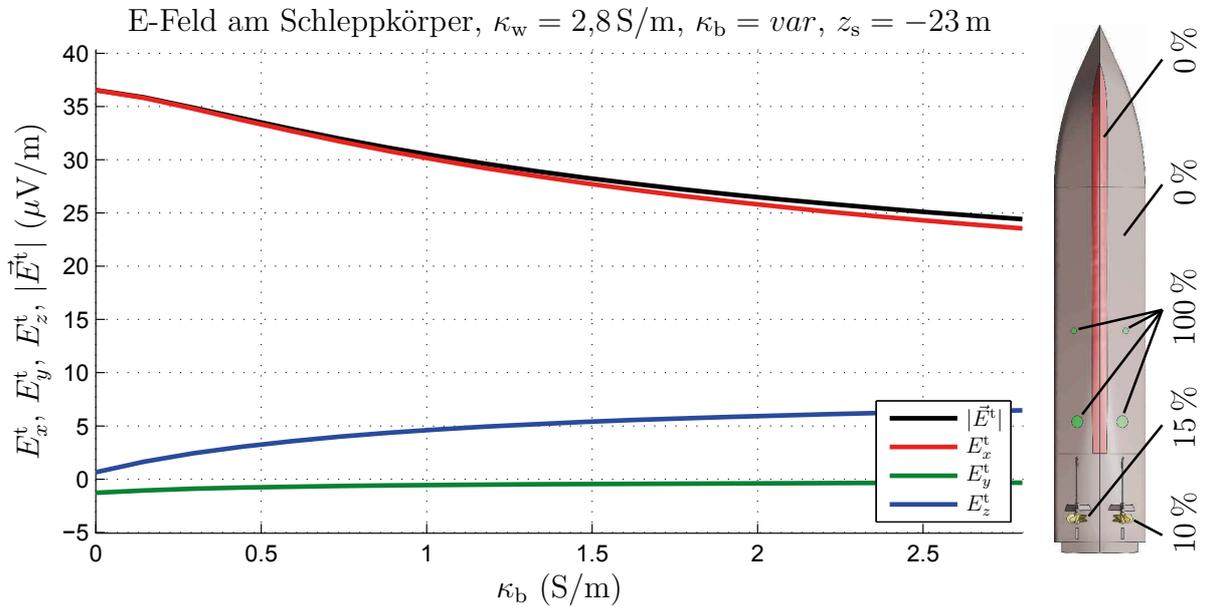


Abbildung 41.: Szenario „tb1“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

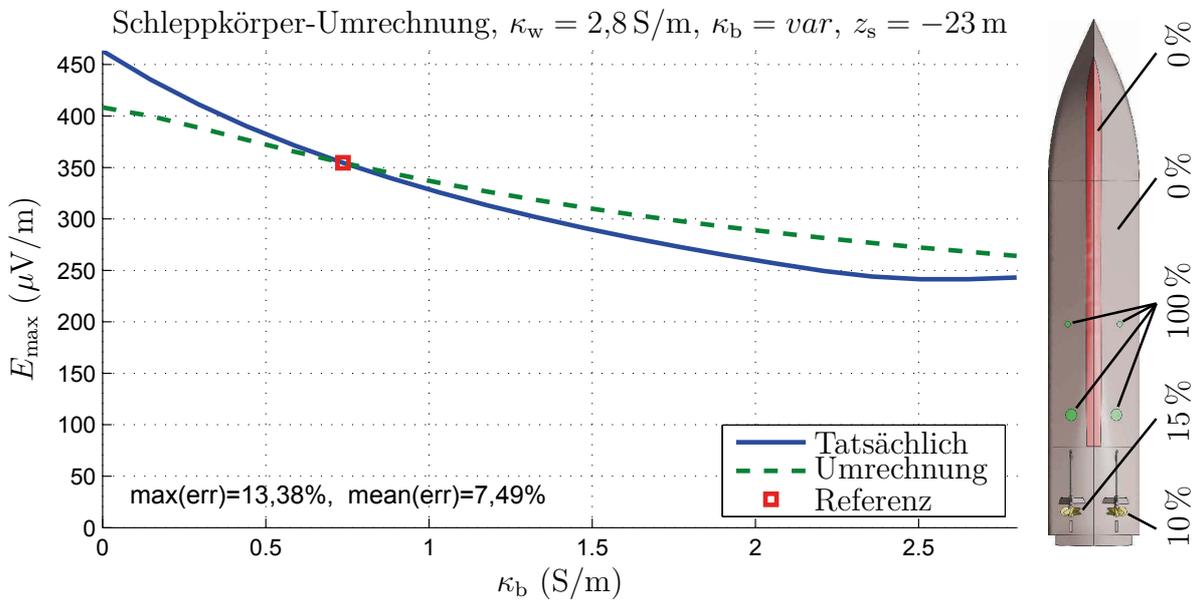


Abbildung 42.: Szenario „tb1“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und E_{max} für Szenario „tb2“

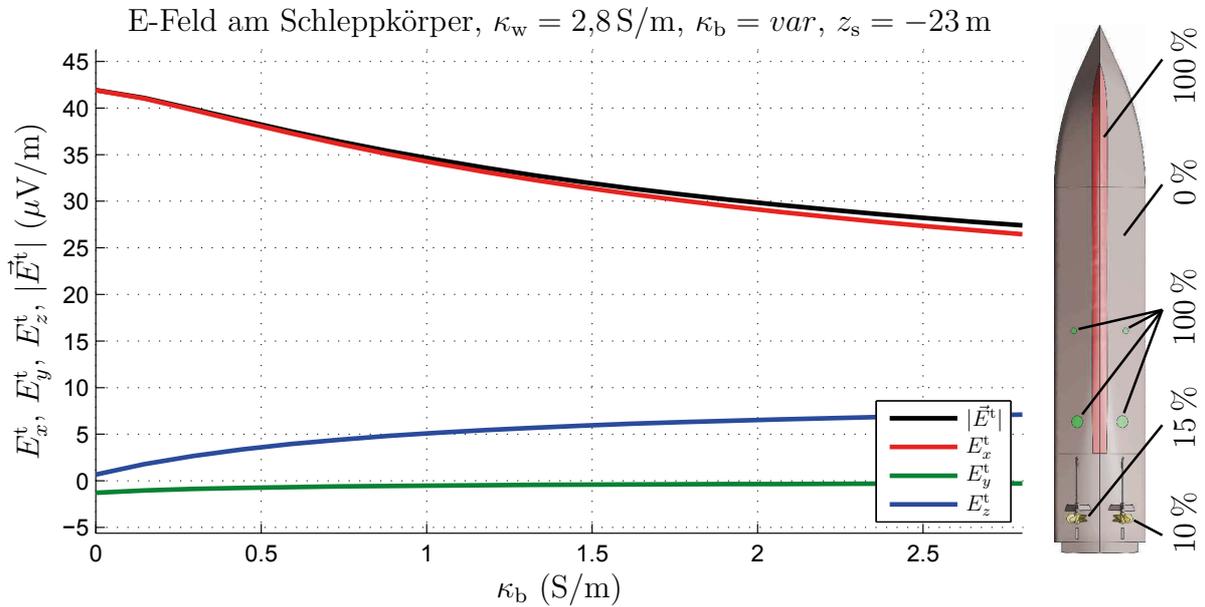


Abbildung 43.: Szenario „tb2“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

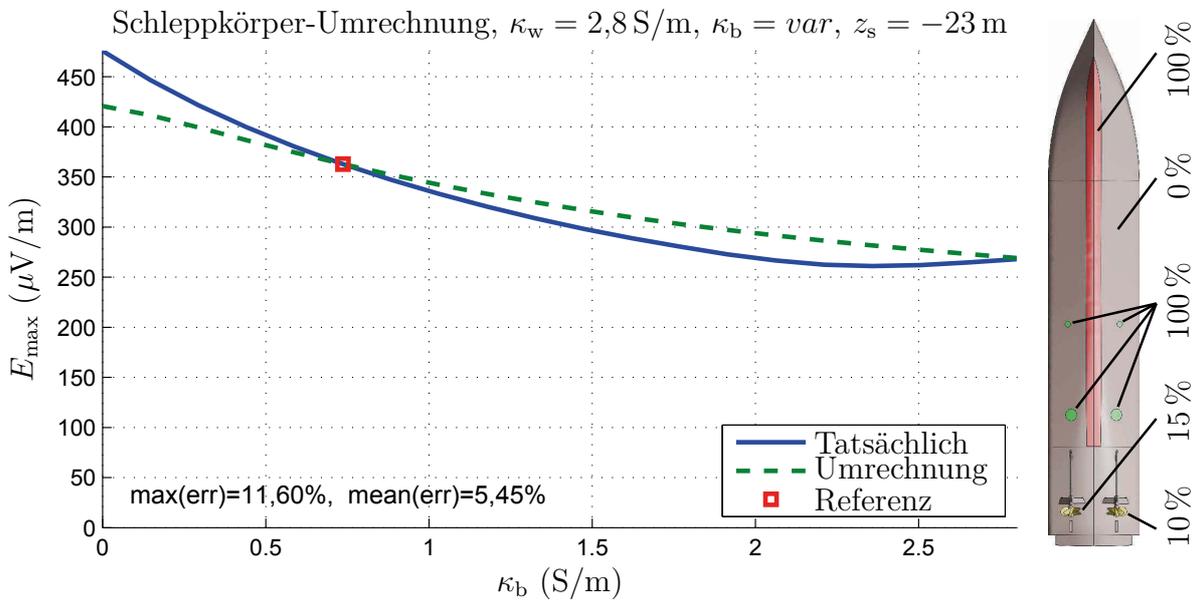


Abbildung 44.: Szenario „tb2“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und E_{max} für Szenario „tb3“

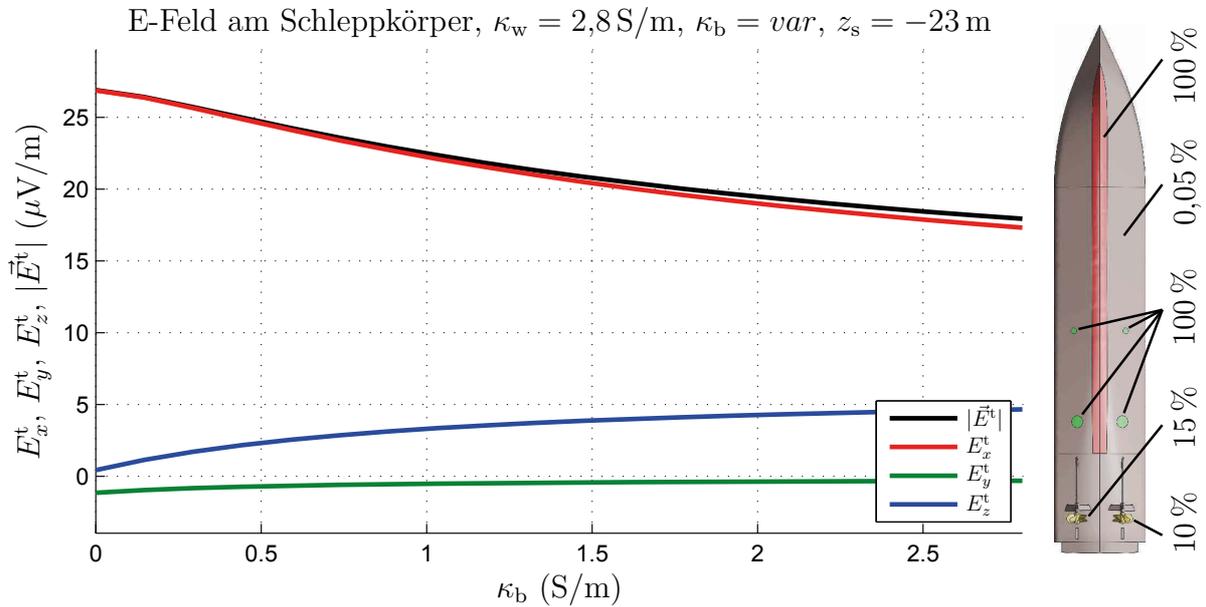


Abbildung 45.: Szenario „tb3“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

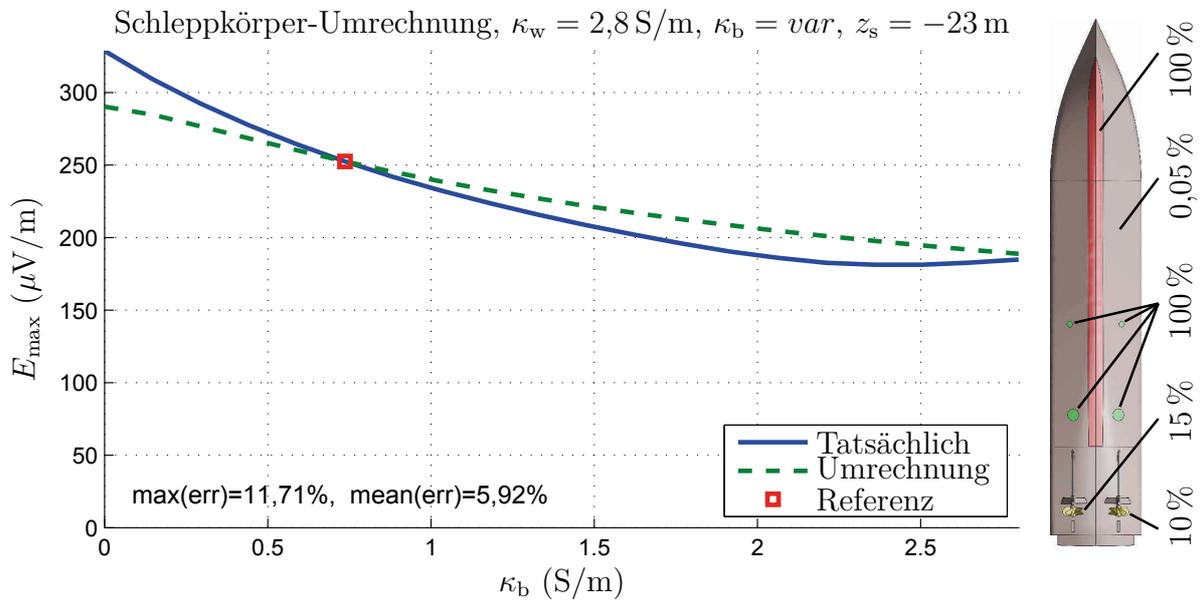


Abbildung 46.: Szenario „tb3“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und Emax für Szenario „tg1“

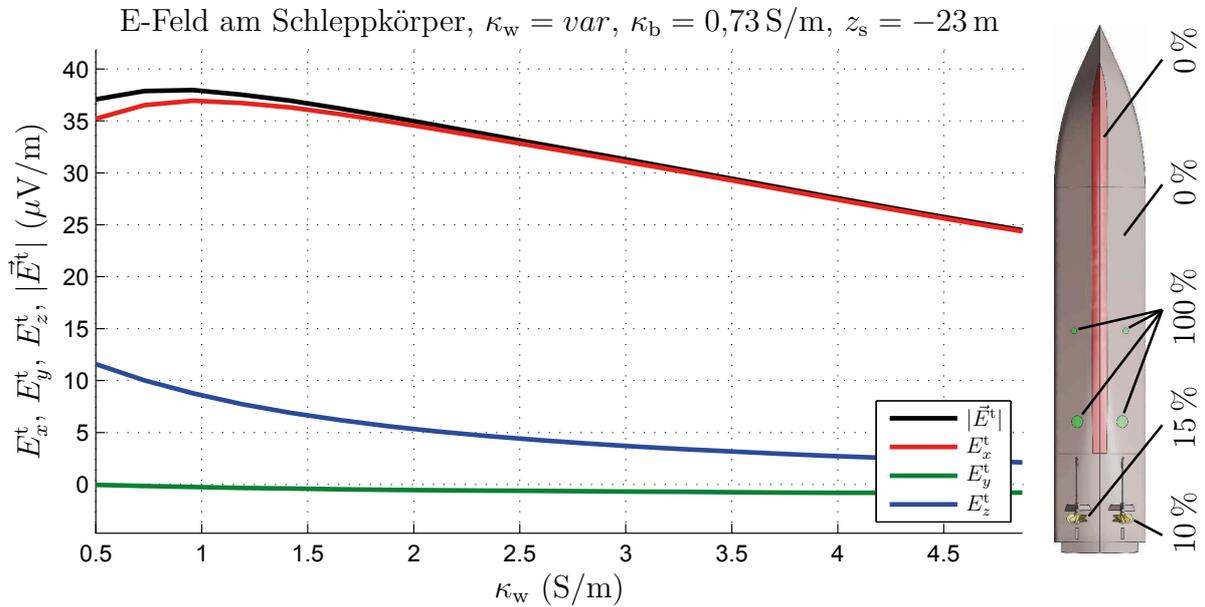


Abbildung 47.: Szenario „tg1“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

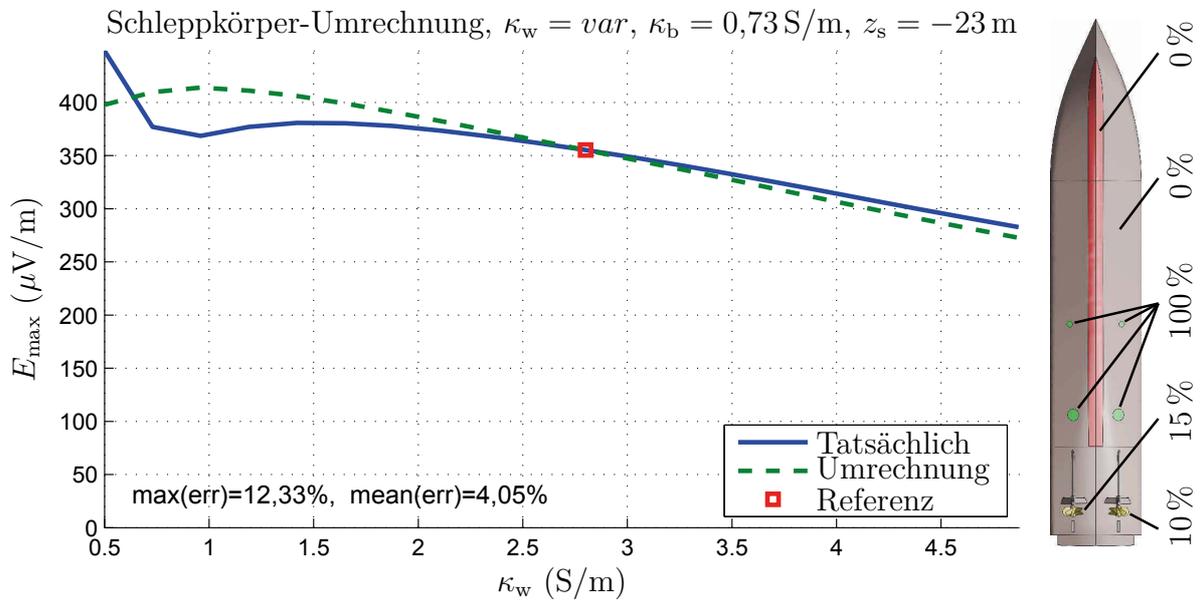


Abbildung 48.: Szenario „tg1“. Die Umrechnung gibt in guter Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und E_{max} für Szenario „tg2“

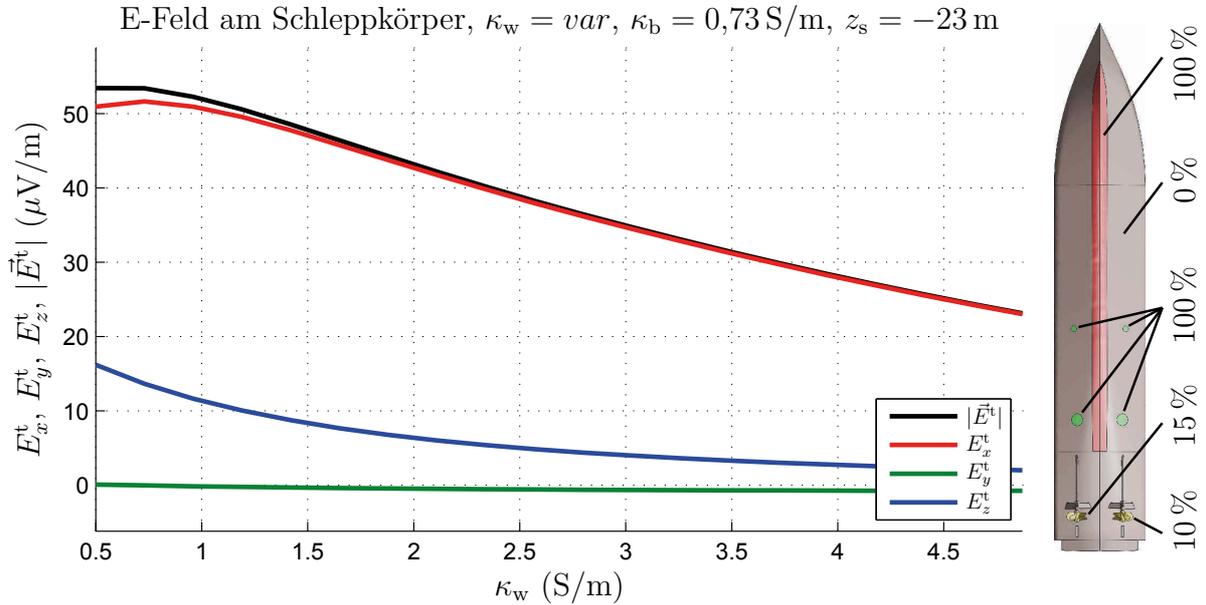


Abbildung 49.: Szenario „tg2“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

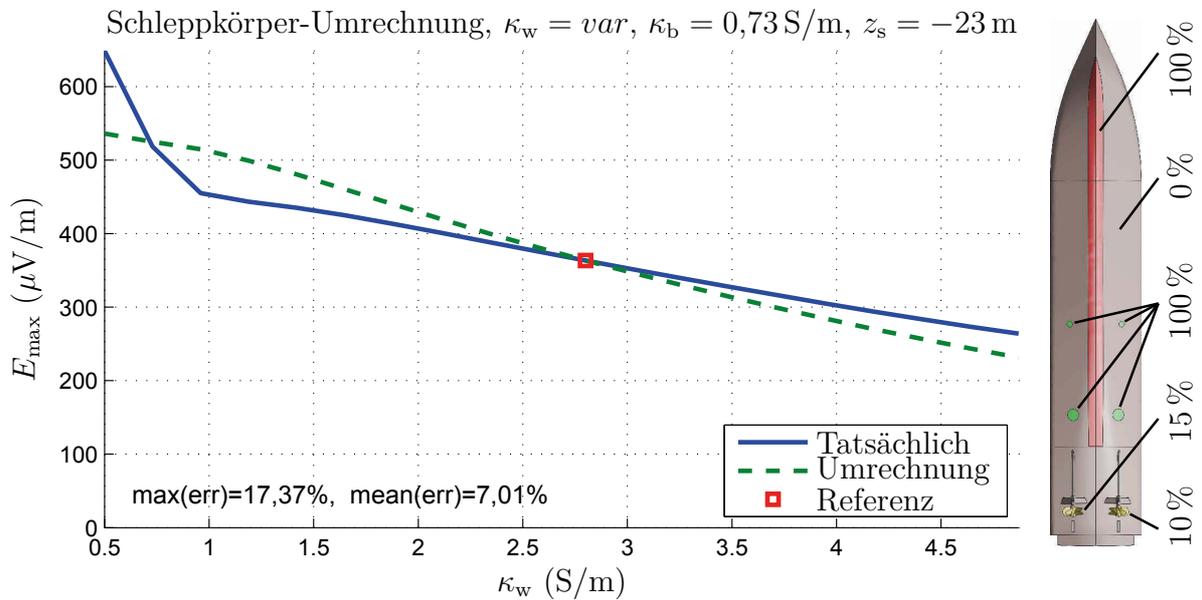


Abbildung 50.: Szenario „tg2“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

E-Feld am Schleppkörper und E_{max} für Szenario „tg3“

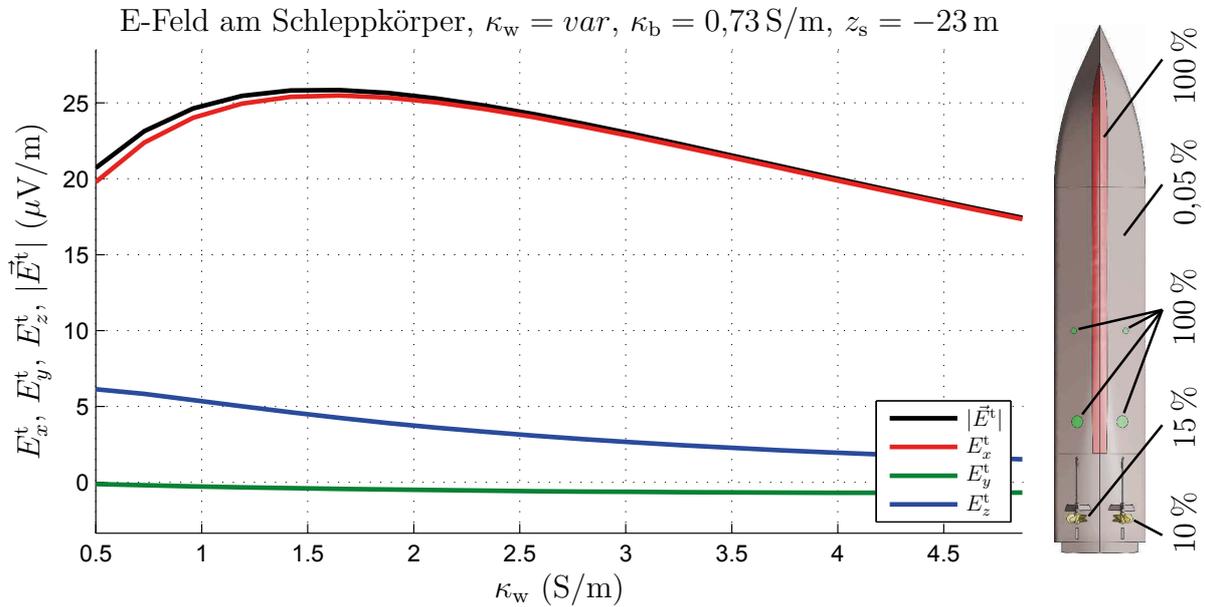


Abbildung 51.: Szenario „tg3“. Vom Schleppkörper ermitteltes E-Feld. *Quelle:* Eigene Herstellung.

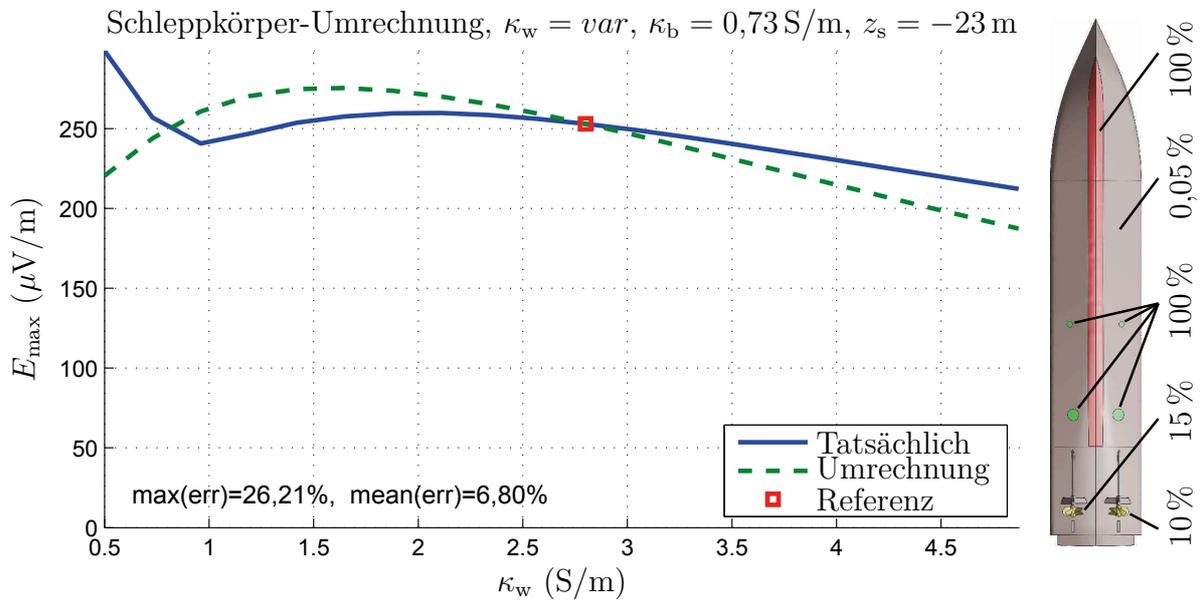


Abbildung 52.: Szenario „tg3“. Die Umrechnung gibt in brauchbarer Näherung die tatsächliche Signaturstärke wieder. *Quelle:* Eigene Herstellung.

