

Modellbasierte Kalibrierung, Detektion und Kompensation der Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems für minimalinvasive Eingriffe

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Tomasz Bien

geb. am 22.11.1983 in Legnica (Polen)

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Georg Rose

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Dickhaus

Promotionskolloquium am 17.12.2015

Schriftliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberatung in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Magdeburg, 18.05.2015

Tomasz Bien

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Medizinische Telematik und Medizintechnik im Projekt INKA – Intelligente Katheter an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Ich möchte mich bei den zahlreichen Personen, die mich während der Vorbereitung der Arbeit unterstützt haben, herzlich bedanken. Mein besonderer Dank gilt vor allem meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Georg Rose, für seine hervorragende Unterstützung bei der Verfassung dieser Arbeit. Durch seine Anmerkungen hat er wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Dickhaus danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens, sowie zahlreiche Verbesserungsvorschläge. Herrn Prof. Dr. med. Martin Skalej und Frau Priv.-Doz. Dr. med. Elisabeth Eppler danke ich für die medizinischen Diskussionen. Weiterhin danke ich Herrn Hans-Wolfgang Rodiek aus der Institutswerkstatt, Herrn Steffen Söffner, Herrn Dr. Steffen Serowy sowie Herrn Dr. Karl Will für den Entwurf und die Fertigung der in dieser Arbeit verwendeten elektronischen Schaltungen.

Ich danke meiner Frau Monika für ihre herzliche Unterstützung. Sie hat durch ihr Verständnis und ihre Korrekturhilfen zur Fertigstellung der Arbeit beigetragen. Bei meinen Kollegen Johannes Krug, Mengfei Li und Norman Thürmer bedanke ich mich für ihre umfassenden Verbesserungsvorschläge sowie dem gesamten Lehrstuhl für Medizinische Telematik und Medizintechnik und dem INKA-Team für die Unterstützung und freundliche Arbeitsatmosphäre. Auch die studentischen Hilfskräfte und Diplomanden haben im Rahmen ihrer Arbeit zur Einreichung dieser Dissertation beigetragen. Mein besonderer Dank gilt dabei Mandy Kaiser und Carsten Rehse.

Magdeburg, Mai 2015

Tomasz Bien

Kurzfassung

Computerassistierte-Eingriffe, in denen ein chirurgisches Instrument mittels eines Ortungssystems navigiert und relativ zur Patientenanatomie dargestellt wird, sind in der modernen Medizin essentiell. Dank der Verbesserung der Kontrolle des Instrumentes und der Genauigkeit des Eingriffs können während der Behandlung wichtige umgebende Strukturen, wie beispielsweise Nerven, weitestgehend geschont werden. Die elektromagnetischen Trackingsysteme, die auf der Messung elektromagnetischer Felder mit bekannter Verteilung basieren, gewinnen als Navigationstechnologie für die computerassistierte Chirurgie immer weiter an Bedeutung. Jedoch wird die Genauigkeit der bestehenden Ortungssysteme stark durch die elektrisch leitenden und ferromagnetischen Objekte beeinflusst. So bieten heutzutage auf dem Markt zur Verfügung stehende elektromagnetische Trackingsysteme dem Anwender beim Tracking von einer einzelnen Empfangsspule auch keine Informationen dahingehend, ob die Genauigkeit der Positionsbestimmung gewährleistet werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurden das elektromagnetische Trackingsystem und der Einfluss des elektrisch leitenden Störkörpers auf das System modelliert. Anschließend führte das Modell zur Entwicklung der Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers. Diese werden mit Hilfe von Klassifikatoren auf Basis der Frequenzabhängigkeit sowie der Analyse der Einschaltvorgänge detektiert. Ebenso ist es möglich, die ferromagnetischen Störkörper mit beiden Methoden zu detektieren, soweit diese elektrisch leitend sind. Darüber hinaus werden drei Strategien zur Korrektur der Störung präsentiert. Begonnen wird dabei mit der Methode der mathematischen Beschreibung der Frequenzabhängigkeit des Störkörpers. Anschließend wird die Methode auf der Basis der Analyse der Einschaltvorgänge eingeführt. Am Ende des Kapitels folgt schließlich die Vorgehensweise, die mit einer quadratischen Erregerspannung den Einfluss des leitenden Störkörpers reduziert.

Die Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen wurden mit einem selbst entwickelten Ortungssystem getestet, das mit einer neuartigen Methode kalibriert wurde. Dabei erfolgte die experimentelle Evaluierung der Methoden in einer Reihe von Versuchen. Die Messungen wurden mit einem entwickelten Robotersystem aus Kunststoff automatisiert, wobei die Lage der Empfangsspule mit einem optischen Trackingsystem als Referenz kontrolliert wurde. Im Anschluss wurden die Ergebnisse der Detektion und der Kompensation der Störungen in dem vorgeschlagenen Trackingsystem mit dem Einfluss der Störungen auf ein kommerzielles Trackingsystem verglichen.

Der Evaluierung der Methoden folgt eine Anwendung des vorgeschlagenen Demonstrators des Ortungssystems in der Medizin. Hierzu wurde ein Phantomversuch mit einem Prototyp des neurovaskulären elektromagnetisch navigierten Katheters durchgeführt. Dieser Phantomversuch wurde mit Hilfe der Entwicklungsumgebung 3D Slicer und auf Grundlage der präoperativen CT-Aufnahmen realisiert. Die Registrierung der Koordinatensysteme des Trackingsystems und der Aufnahmen erfolgte schließlich als eine rigide Registrierung mit Hilfe einer Registrierplatte.

Inhaltverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung, Stand der Technik und Motivation | 1 |
| 1.1 | Gliederung der Arbeit | 1 |
| 1.2 | Minimalinvasive Chirurgie, interventionelle Radiologie und computerassistierte Eingriffe ... | 2 |
| 1.3 | Elektromagnetisches Trackingsystem..... | 5 |
| 1.4 | Kommerzielle elektromagnetische Trackingsysteme | 11 |
| 1.5 | Elektromagnetisches Trackingsystem in der Medizin | 13 |
| 1.6 | Anforderungen an das elektromagnetische Trackingsystem in den computerassistierten bildgeführten Interventionen..... | 17 |
| 1.7 | Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems..... | 18 |
| 1.8 | Störung des elektromagnetischen Trackingsystems durch leitende und ferromagnetische Gegenstände und elektronische Geräte..... | 19 |
| 1.9 | Detektion und Kompensation der Störungen..... | 23 |
| 1.10 | Motivation der Arbeit | 27 |
| 1.11 | Eigener wissenschaftlicher Ansatz | 28 |
| 2 | Theoretischer Hintergrund..... | 31 |
| 2.1 | Erzeugung und Messung elektromagnetischer Felder | 31 |
| 2.2 | Ortung mit elektromagnetischen Feldern..... | 38 |
| 2.3 | Modellierung des elektromagnetischen Trackingsystems und des Störkörpers | 41 |
| 3 | Kalibrierung des Trackingsystems..... | 57 |
| 3.1 | Einflussfaktoren auf die Genauigkeit des Trackingsystems | 57 |
| 3.2 | Kalibrierung des Trackingsystems..... | 58 |
| 4 | Detektion des leitenden Störkörpers | 61 |
| 4.1 | Detektion mit einem Klassifikator auf der Basis der Frequenzabhängigkeit..... | 61 |
| 4.2 | Detektion mit einem Klassifikator auf der Basis der Einschaltvorgänge | 70 |
| 5 | Korrektur der Störung..... | 75 |
| 5.1 | Korrektur der Störungen mit Hilfe der Frequenzabhängigkeit | 75 |
| 5.2 | Korrektur der Störungen mit Hilfe der Einschaltvorgänge..... | 79 |
| 5.3 | Positionsbestimmung mit Hilfe der quadratischen Erregerspannung | 81 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6 | Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems..... | 86 |
| 6.1 | Experimenteller Aufbau..... | 86 |
| 6.2 | Versuchsaufbau zur Genauigkeitsevaluierung..... | 94 |
| 7 | Experimentelle Evaluierung und Resultate..... | 103 |
| 7.1 | Evaluation des Algorithmus zur Kalibrierung des Demonstrators | 103 |
| 7.2 | Einfluss der Störkörper auf die Genauigkeit des Trackingsystems Aurora | 106 |
| 7.3 | Evaluation und Vergleich der Algorithmen zur Detektion des Störkörpers | 110 |
| 7.4 | Evaluation und Vergleich der Methoden zur Korrektur der Störung..... | 124 |
| 8 | Klinische Evaluierung des elektromagnetischen Ortungssystems | 135 |
| 8.1 | Integration eines Sensors in die radiologischen Instrumente..... | 135 |
| 8.2 | Evaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems mit einem Phantomversuch | 137 |
| 9 | Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick..... | 143 |
| 9.1 | Zusammenfassung | 143 |
| 9.2 | Schlussfolgerungen..... | 146 |
| 9.3 | Ausblick..... | 148 |
| 10 | Anhang | 150 |
| 10.1 | Abkürzungsverzeichnis..... | 159 |
| 10.2 | Abbildungsverzeichnis..... | 159 |
| 10.3 | Tabellenverzeichnis | 163 |
| 11 | Literaturverzeichnis | 165 |
| 12 | Lebenslauf..... | 175 |

1 Einleitung, Stand der Technik und Motivation

1.1 Gliederung der Arbeit

Beginnend mit diesem Kapitel werden die Grundlagen der minimalinvasiven Chirurgie sowie die der computerassistierten Chirurgie erläutert. Außerdem werden die bestehenden Technologien zur klinischen Ortung beschrieben. Im Anschluss daran wird der Stand der Technik zum elektromagnetischen Trackingsystem erläutert. Das Hauptaugenmerk dieser Beschreibung liegt auf dem elektromagnetischen Trackingsystem als eine Ortungstechnologie, der Anwendung dieser Technologie in der Medizin und der Störung des elektromagnetischen Trackingsystems durch elektrisch leitende Störkörper sowie auf den Methoden zur Detektion und Korrektur dieser Störungen.

Im Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen und das Funktionsprinzip des elektromagnetischen Trackingsystems beschrieben. Weiter wird das vorgeschlagene Modell des elektromagnetischen Trackingsystems und des elektrisch leitenden Störkörpers eingeführt.

Im Kapitel 3 werden Faktoren eingeführt, welche Einfluss auf die Genauigkeit des Ortungssystems haben. Ebenso wird der vorgeschlagene Ansatz zur Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems in diesem Kapitel beschrieben.

Das im Unterkapitel 2.3 beschriebene Modell führt anschließend im Kapitel 4 zur Entwicklung der Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers. Diese werden mit Hilfe von Klassifikatoren auf Basis der Frequenzabhängigkeit sowie der Analyse der Einschaltvorgänge detektiert.

Im Kapitel 5 werden drei Strategien zur Korrektur der Störung präsentiert. Es wird mit der Methode der mathematischen Beschreibung der Frequenzabhängigkeit des Störkörpers begonnen. Anschließend wird die Methode auf der Basis der Analyse der Einschaltvorgänge eingeführt und am Ende des Kapitels folgt die Vorgehensweise, die mit einer quadratischen Erregerspannung den Einfluss des leitenden Störkörpers reduziert.

Im Kapitel 6 wird der entwickelte Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems beschrieben. Weiter wird die verwendete Umgebung zur Evaluierung der Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems wiedergegeben.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Methoden werden im Kapitel 7 experimentell evaluiert und miteinander verglichen. Dieses Kapitel beginnt mit der Evaluierung die Genauigkeit des Demonstrators, vor und nach der Kalibrierung. Anschließend werden die vorgeschlagenen Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers in zwei unterschiedlichen Experimenten getestet, gefolgt von der Evaluation der Methoden zur Kompensation des leitenden Störkörpers.

Das Kapitel 8 präsentiert die Anwendung des vorgeschlagenen Demonstrators in der Medizin. Es wurde ein Phantomversuch mit einem vaskulären elektromagnetisch navigierten Katheter durchgeführt.

1.2 Minimalinvasive Chirurgie, interventionelle Radiologie und computerassistierte Eingriffe

Minimalinvasive Chirurgie

„Die minimalinvasive Chirurgie ("Schlüsselloch-Chirurgie") ist ein weitreichender Begriff mit Anwendungen in vielen Gebieten der Medizin. Insbesondere werden über kleinstmögliche Zugänge Operationsmaterial wie auch Geräte zur Visualisierung eingebracht, wobei auch natürliche Zugangswege für Endoskope genutzt werden. Beispiele wären Arthroskopien zur Diagnostik und Therapie von Gelenken, laparoskopische Operationen in der Viszeralchirurgie und Gynäkologie wie auch interventionelle Radiologie, bei der die Visualisierung über bildgebende Verfahren wie Computertomographie (CT), Angiographie und Magnetresonanztomographie (MRT) erfolgt“ [1]. Die Instrumente werden entweder mit Hilfe von endoskopischen Lichtkameras oder mit der medizinischen Bildgebung visualisiert. Der Radiologe kann dadurch die Lage und die Ausrichtung seiner Instrumente relativ zur Patientenanatomie verfolgen. Die Aufteilung der minimalinvasiven Eingriffe wurde schematisch in der Abb. 1.1 dargestellt.

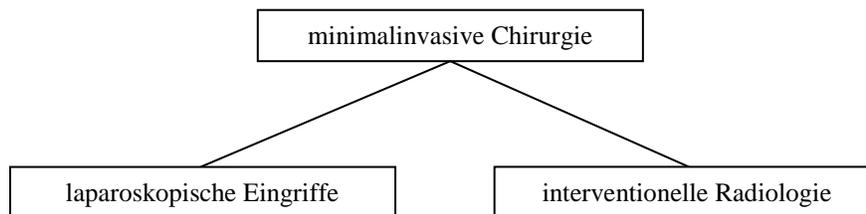


Abb. 1.1 Aufteilung der minimalinvasiven Eingriffe

Die Eingriffe der minimalinvasiven Chirurgie (MIC) sind meist komplexer als die herkömmlichen Interventionen. Die Rekonvaleszenz des Patienten erfolgt allerdings deutlich rascher, was die Hospitalisierungszeiten entsprechend verkürzt. Weiter sind Stress und postoperative Schmerzen, auch bei komplizierteren Eingriffen, reduziert.

Interventionelle Radiologie

Interventionelle Radiologie entstand von der nicht invasiven diagnostischen Radiologie [2–3] und bildet ein breites Spektrum von diagnostischen und therapeutischen minimalinvasiven Eingriffen [2]. In der interventionellen Radiologie werden unter Bildsteuerung therapeutische oder diagnostische Eingriffe vorgenommen. Als Bildgebung werden CT-, MRT-, Ultraschall- oder Angiographie-Aufnahmen verwendet. Die radiologischen Eingriffe werden oftmals auf perkutane und vaskuläre Eingriffe aufgeteilt (siehe Abb. 1.2) [4].

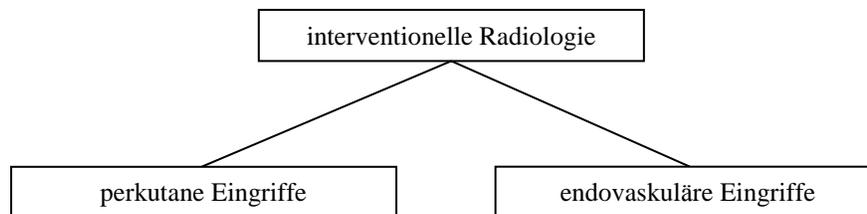


Abb. 1.2 Aufteilung der radiologischen Eingriffe

Die perkutanen Eingriffe sind Eingriffe mit einem steifen Instrument, das durch die Haut und Weichteile eingeführt wird. Es werden typischerweise kleine Nadeln präzise im menschlichen Körper positioniert und z.B. für Biopsien oder Drainagen verwendet [4]. Die endovaskulären Eingriffe sind therapeutische oder diagnostische Interventionen mit einem flexiblen Katheter, der in das vaskuläre System eingeführt wird. Als typische endovaskuläre Eingriffe können die Behandlung von Aneurysmen, ischämischen Schlaganfällen sowie Herzkatheter-Eingriffe betrachtet werden [4].

Computerassistierte Chirurgie

Als erste computerassistierte-Eingriffe (CAS) waren stereotaktische Eingriffe eingeführt. Bei diesen Eingriffen wird ein dreidimensionales Ringsystem (stereotaktischer Rahmen) um den Kopf des Patienten gespannt. Dieses Verfahren ermöglicht neurochirurgische Eingriffe, wie z. B. die Behandlung der cerebralen Bewegungsstörungen [5]. Neue Entwicklungen im Bereich der Computertomografie (CT) und Magnetresonanztomografie (MRT) in der Mitte der achtziger Jahre haben zur Entwicklung der rahmenlosen Stereotaxie geführt. Dieses computerassistierte Operationsverfahren ermöglicht eine präzise Navigation ohne die Notwendigkeit der Fixierung stereotaktischer Rahmen am Kopf des Patienten [6].

Bei den CAS-Eingriffen werden medizinische Instrumente mit Hilfe von zusätzlichen Ortungssystemen intraoperativ innerhalb des menschlichen Körpers navigiert. Der menschliche Körper wird typischerweise als ein 3D Modell auf der Basis der aufgenommenen Bilder visualisiert [7]. Die präoperativ aufgenommenen Patientendaten werden zur Planung der Intervention verwendet. Die Ortungssysteme ermöglichen die Lokalisierung der Instrumente relativ zur Anatomie des Patienten und dadurch einen sicheren bildgeführten Eingriff. Da die Patientenaufnahmen ein anderes Koordinatensystem als das Ortungssystem haben, muss vor dem Eingriff eine Transformationsmatrix bestimmt werden, die Messungen des Ortungssystems in dessen Koordinatensystem ins Koordinatensystem der Patientenaufnahmen transformiert. Dieses Vorgehen wird in der Literatur als Registrierung genannt. Die Registrierung kann entweder manuell auf der Basis anatomischer Merkmale durchgeführt werden [6] oder automatisch mit Hilfe der speziell dafür entwickelten Referenzmarker erfolgen [8].

Die computerassistierte Chirurgie fokussiert im Gegensatz zu den MIC-Eingriffen nicht auf die Minimierung der Verletzung der Haut und der Narbenbildung, sondern auf die Verbesserung der Kontrolle des Instrumentes und die Genauigkeit des Eingriffs [7]. Durch die effiziente und genaue Behandlung können wichtige umgebende Strukturen, wie beispielsweise Nerven, geschont werden. Die

CAS-Eingriffe können im Gegensatz zu den MIC-Eingriffen hoch invasiv sein und zur großen Verletzung der umgebenden Strukturen führen.

Medizinische Ortungssysteme für computerassistierte Chirurgie

Für die Entwicklung der Systeme der bildgeführten CAS-Eingriffe waren die Ortungssysteme essenziell. Als erste Ortungstechnologie wurden mechanische Trackingsysteme für die rahmenlose Stereotaxie eingeführt. Solche Systeme bestehen aus einem Roboterarm, der auf Basis von eigener Bewegung die Lage der Spitze des Roboterarms sehr genau relativ zur eigenen Achse bestimmen kann. Mechanische Trackingsysteme zeigen eine extrem hohe Genauigkeit von bis zu 0.02 mm [9]. Der größte Nachteil dieser Technologie liegt in der notwendigen rigiden Verbindung zwischen dem Roboterarm und dem chirurgischen Instrument. Dadurch kann das System nur zum Tracking rigider Instrumente, wie z. B. einer Biopsienadel, angewendet werden. Außerdem weisen mechanische Ortungssysteme große Probleme bei der gleichzeitigen Verfolgung mehrerer Ziele auf [10].

Optische Ortungssysteme sind die am häufigsten verwendeten Ortungssysteme in den heutigen computerassistierten Interventionen [9]. Es können folgende Technologien optischer Trackingsysteme unterschieden werden:

- **videometrische Trackingsysteme** – basieren auf der Mustererkennung der Videoaufnahme, die mit mindestens einer Kamera aufgenommen wurde. Auf dem Funktionsprinzip basiert das auf dem Markt zur Verfügung stehende Trackingsystem MicronTracker der Firma Claron Technologies Inc. [6].
- **infrarotbasierte Trackingsysteme** – optisches Filter eliminiert sichtbares Licht aus den Aufnahmen der Kamera, was eine zuverlässige und eindeutige Positionsbestimmung der Marker ermöglicht [6]. Es können zwei Arten von infrarotbasierten Trackingsystemen unterschieden werden.
 - **aktive optische Trackingsysteme** – orten die Position und Ausrichtung der sterilisierbaren LED-Dioden. Die Dioden werden sequenziell eingeschaltet und deren Licht wird mit den Infrarotkameras gemessen. Mit Hilfe der Triangulation werden die Lage und die Ausrichtung von mindestens drei LED-Dioden berechnet. Der Nachteil dieser Technologie liegt in der Notwendigkeit der Verbindung der LED-Dioden mit Hilfe einer Leitung mit der Infrarotkamera [6].
 - **passive optische Trackingsysteme** – orten die Position der reflektierenden Marker, welche von dem Trackingsystem angestrahlt werden. Mehrere reflektierende Marker bilden ein Muster, das von mindestens zwei Infrarotkameras aufgenommen wird. Der Vorteil dieser Technologie liegt, im Vergleich zu den aktiven optischen Trackingsystemen, in der drahtlosen Kommunikation zwischen den Markern und der Kamera [6].

Der Vorteil der optischen Trackingsysteme besteht in der hohen Genauigkeit und Robustheit. Zusätzlich ist der Arbeitsbereich bei den optischen Trackingsystemen wesentlich größer als bei anderen Ortungsmethoden [10]. Allerdings brauchen optische Trackingsysteme eine Sichtlinie zwischen der Kamera und dem georteten Marker, was die Anwendung dieser Technologie bei der Ortung der rigid Instrumente begrenzt. Außerdem kann es in der klinischen Praxis zur Interaktion zwischen den optischen Trackingsystemen und anderen Infrarotstrahlquellen kommen, was die Genauigkeit des Ortungssystems reduzieren kann.

Bei vielen computerassistierten Eingriffen müssen die Lage und die Ausrichtung der Spitze eines rigid Instrumentes bestimmt werden, obwohl es keine Sichtlinie zwischen dieser Spitze und der Sendeeinheit des optischen Trackingsystems besteht. In solchen Situationen kann ein anderer Teil des Instrumentes (z.B. Griff) navigiert werden, jedoch verursacht die Umrechnung der Lage des optischen Markers in die Lage der Spitze des Instrumentes einen zusätzlichen Fehler.

Elektromagnetische Trackingsysteme basieren auf der Messung elektromagnetischer Felder mit bekannter Verteilung. Die Felder werden von einem Feldgenerator generiert und von einem Feldsensor gemessen. Mit Hilfe mehrerer Feldmessungen kann das System die Lage und die Ausrichtung des Sensors im Raum bestimmen. Der größte Vorteil dieser Technologie liegt, im Vergleich zu den anderen Ortungsmethoden, in der nicht erforderlichen Sichtlinie zwischen dem chirurgischen Instrument und der Sendereinheit. Diese Technologie wird genauer in den Unterkapiteln 1.3 bis 1.9 und im Kapitel 2 beschrieben.

Die drei oben genannten Technologien sind in der CAS-Chirurgie weit verbreitet. Allerdings gibt es auch zahlreiche andere Ortungsmethoden, deren Akzeptanz nicht verbreitet ist. Ein Beispiel dafür bietet die ShapeTape der Firma Measurand Inc., die auf der Basis der Beugung und Ausdehnungsmessung der Form entlang der gesamten Länge, die Lage und Ausrichtung der Spitze dieser länglichen Struktur bestimmt [11]. Ein ultraschallbasiertes Trackingsystem wird in den heutigen CAS-Eingriffen nicht verwendet, weil die Genauigkeit der Ortung zu niedrig ist und solche Systeme stark von Umgebungsgeräuschen beeinflusst werden [10]. Eine andere Möglichkeit des Trackings bietet die Anwendung von Beschleunigungssensoren und Gyroskopen zur Positionsbestimmung chirurgischer Instrumente [6]. Die Anwendung dieser Technologie in der CAS-Chirurgie würde aber zur Aufsummierung der Fehler bei jeder Bewegung des chirurgischen Instrumentes führen, was hohe Fehler in der Positionsbestimmung bei umfangreichen Eingriffen nach sich ziehen könnte. Das optische und das elektromagnetische Trackingsystem können zusammen auch ein hybrides Trackingsystem bilden [12]. Der Nachteil dieser Technologie liegt in den hohen Kosten beider Systeme. Als eine Art Ortung kann auch die medizinische Bildgebung in der interventionellen Radiologie betrachtet werden, die die Ortung der Instrumente in Echtzeit ermöglicht.

1.3 Elektromagnetisches Trackingsystem

Die AC-elektromagnetischen Trackingsysteme wurden ursprünglich von der Firma Polhemus für militärische Anwendungen entwickelt [13]. Die Firma nutzte drei senkrecht zueinander liegende Sendespulen und dreiaxige Sensoren [13]. Dieses System wurde im Jahr 1976 patentiert [14] und 1979 wissenschaftlich beschrieben [15]. Anschließend wurden DC-Tracking-Systeme mit miniaturisierten Feldsensoren entwickelt [13].

Das elektromagnetische Trackingsystem besteht aus einem Feldgenerator, aus einem oder mehreren Feldsensoren und aus einer Mess- und Recheneinheit. Nachdem die Sendespulen des Feldgenerators mit Strom beaufschlagt wurden, werden die erzeugten quasistatischen elektromagnetischen Felder des Feldgenerators mit Hilfe eines Feldsensors gemessen. Der Sensor besteht aus einer kleinen Spule, in welcher die Felder einen Strom induzieren, welcher gemessen wird. Auf der Basis mehrerer Feldmessungen werden die Lage und die Ausrichtung des Feldsensors im Raum bestimmt. Zur Vereinfachung der Positionsbestimmung kann die Verteilung des elektromagnetischen Feldes mit einer Dipolnäherung abgebildet werden. Eine sphärische Spule bildet eine ideale Feldverteilung des Dipols [16–17].

Jedoch ist die Herstellung einer präzisen sphärischen Spule mit mehreren Schichten und mit hohem magnetischem Moment kompliziert, deswegen werden bei den elektromagnetischen Trackingsystemen überwiegend zylinderförmigen Sendespulen verwendet. Die kurzen Zylinderspulen können die Feldverteilung eines magnetischen Dipols mit einem vernachlässigten Fehler abbilden, insbesondere dann, wenn der Abstand zwischen der Sendespule und dem Feldsensor im Vergleich zu den Abmessungen der Spule groß ist [16].

Die Abbildung der Feldverteilung eines magnetischen Dipols durch eine zylinderförmige Sendespule könnte optimiert werden, wenn das Verhältnis zwischen der Länge und dem Durchmesser der Sendespule entsprechend ausgewählt wird. Dieses Phänomen wurde in [18] erwähnt und in [16] wissenschaftlich beschrieben.

Eine andere Strategie basiert auf der exakten Berechnung der Feldverteilung der Sendespule [19]. Der potenzielle Vorteil dieser Vorgehensweise begründet sich auf der Vermeidung des systematischen Fehlers, der durch die Imitierung der Feldverteilung des magnetischen Dipols entsteht. Es ist aber zu erwarten, dass diese Berechnungsweise zu höheren Messzeiten führen würde.

Damit die Sendespule präzise und wiederholbar hergestellt werden kann, könnte sie auf einer Leiterplatte gedruckt werden [20]. Diese Idee hat wegen der Komplexität der Fertigung einer gedruckten Spule mit mehreren Schichten keine Akzeptanz bei den Herstellern des kommerziellen Trackingsystems gefunden.

Die dipolförmige Feldverteilung kann mit einer Feldverteilung mit höheren magnetischen Momenten z.B. mit einer quadrupolförmigen Feldverteilung ersetzt werden. Der Vorteil bei der Messung eines elektromagnetischen Feldes mit einer quadrupolförmigen Verteilung liegt in der stärkeren Änderung der Amplitude des elektromagnetischen Feldes mit der Änderung des Abstandes zwischen dem Feldsensor und dem Feldgenerator [21–22]. Die starke Änderung des Magnetfeldes im Raum kann zur Verfeinerung der räumlichen Auflösung des Ortungssystems führen.

Für die Anwendung des elektromagnetischen Trackingsystems in der minimalinvasiven Chirurgie ist es wichtig, dass die magnetische Suszeptibilität des menschlichen Körpers mit der Suszeptibilität des Wassers vergleichbar ist [23]. Diese variiert zwischen $-8.86 \cdot 10^{-6}$ für Kortikalis und ~ 0 bei der Leber [23]. Deswegen übt der menschliche Körper keinen wesentlichen Einfluss auf das statische [24] und das niederfrequente [25–27] Magnetfeld des Feldgenerators aus.

Bei den kommerziell verfügbaren elektromagnetischen Trackingsystemen werden die Sendespulen zeitlich versetzt mit Strom eingespeist. Diese Vorgehensweise wird in der Literatur als *time multiplexing* bezeichnet. Mehrere Sendespulen der AC-Trackingsysteme können auch gleichzeitig mit den Signalen

unterschiedlicher Frequenzen betrieben werden [19, 28–31]. Mit Hilfe des Feldsensors wird die Summe der induzierten Signale von allen Sendespulen gemessen. Wegen der unterschiedlichen Frequenzen können die gemessenen Signale bestimmten Sendespulen zugeordnet werden. Diese Vorgehensweise wird in der Literatur als *frequency multiplexing* bezeichnet. Der potenzielle Vorteil dieser Methode liegt in der Möglichkeit der Erhöhung der Messrate des elektromagnetischen Trackingsystems, da die Spannungsmessungen parallel mit mehreren Sendespulen erfolgen. Der Nachteil dieser Vorgehensweise zeigt sich in ihrer Komplexität [19]. Die mit dem Strom eingespeisten Sendespulen induzieren die elektromagnetischen Felder auch in den anderen Sendespulen, was die bekannte Verteilung des elektromagnetischen Feldes verzerrt. Wenn diese Verzerrung nicht in dem Modell der Feldverteilung des elektromagnetischen Trackingsystems berücksichtigt wird, führt dies zu wesentlichen Fehlern bei der Positionsbestimmung.

AC-Trackingsystem

Bei CAS-Eingriffen wird das mit Wechselstrom eingespeiste elektromagnetische Trackingsystem (AC-Trackingsystem) häufig verwendet. Bei dieser Ortungstechnologie fließt in den Sendespulen des Feldgenerators typischerweise ein Wechselstrom mit den Frequenzen von 8 kHz bis 14 kHz [6, 32]. Die elektromagnetischen Felder werden mit einer Empfangsspule gemessen, die als Feldsensor verwendet wird. Die Empfangsspule misst nur das Wechselfeld des Feldgenerators. Das AC-Trackingsystem ist deswegen immun hinsichtlich des DC-magnetischen Felds der Erde.

Die heute üblichen AC-Trackingsysteme messen 40 [33] bis 240 [13] Positionen pro Sekunde. Ein Vergleich der auf dem Markt zur Verfügung stehenden elektromagnetischen Trackingsysteme findet sich in Tab. 1. Zu den Vorteilen dieser Technologie gehören kleine Empfangsspulen, die Sensoren können wegen der kleinen Abmessungen in kleine und flexible chirurgische Instrumente integriert werden. Ein wesentlicher Nachteil dieser Technologie ist die starke Beeinflussung der Genauigkeit durch metallische (elektrisch leitende und ferromagnetische) Störkörper. Die AC-Trackingsysteme werden detailliert im Kapitel 2 beschrieben.

DC-Trackingsystem

Die Entwicklung eines Gleichstroms betriebenen magnetischen Trackingsystems (DC-Trackingsystem) wurde durch die starke Beeinflussung durch metallische Störkörper bei den AC-Trackingsystemen vorangetrieben [34]. Die DC-Trackingsysteme werden weniger durch leitende Objekte beeinflusst [35], weil die Sendespulen des Feldgenerators mit langen Gleichstrompulsen eingespeist werden. Dadurch induzieren diese zwar Wirbelströme in den leitenden Objekten, aber die Wirbelströme nehmen nach einer bestimmten Zeit wesentlich ab [34]. Das elektromagnetische Feld des Feldgenerators wird mit einem Feldsensor gemessen. Durch diese Vorgehensweise wird der Einfluss der Wirbelströme auf die Genauigkeit des DC-magnetischen Trackingsystems wesentlich oder vollständig reduziert [34]. Die Genauigkeit des DC-Trackingsystems wird nicht durch die weniger leitenden Metalle, wie z. B. Stahl und Titan, beeinflusst [34]. Der Einfluss von hochleitenden Metallen, wie z. B. Aluminium, kann auch

reduziert werden, wenn die Abtaste des DC-Trackingsystems reduziert wird [34]. Dadurch wirkt eine hohe Messrate der Störanfälligkeit in der Präsenz der hochleitenden Gegenstände entgegen [36]. Die Genauigkeit der DC-Trackingsysteme wird leider, wie bei den AC-Trackingsystemen, durch ferromagnetische Objekte beeinflusst [34].

Bei den DC-Trackingsystemen werden keine Empfangsspulen, sondern Magnetometer als Feldsensoren verwendet. Der Nachteil dieser Lösung liegt bei der Messung kleiner Magnetfelder im großen Abstand von dem Feldgenerator und in der Überlagerung des Magnetfeldes der Erde mit dem Feld des Feldgenerators. Die Feldgeneratoren der DC-Trackingsysteme sind deswegen wesentlich größer und weisen ein größeres Gewicht als die Feldgeneratoren der AC-Trackingsysteme auf [36]. Das Magnetfeld der Erde ist stark ortsabhängig, deswegen muss es während der Positionsbestimmung gemessen und von dem gemessenen magnetischen Feld des Feldgenerators subtrahiert werden [36].

Als eine andere Lösung dieses Problems wurde ein DC-Trackingsystem mit mehreren Feldsensoren vorgeschlagen [37]. Die räumlich verteilten Sensoren messen nicht den absoluten Betrag, sondern die Änderung des Magnetfeldes des Feldgenerators im Raum. Deswegen muss das Magnetfeld der Erde nicht von dem Magnetfeld des Feldgenerators subtrahiert werden. Das Problem mit der Überlagerung des Magnetfeldes der Erde als auch weniger genaue Feldsensoren haben die Verbreitung dieser Technologie bei dem Tracking minimalinvasiver chirurgischer Instrumente begrenzt.

Transponder- und RFID-Tracking

Für die beiden oben genannten Technologien muss der Feldsensor mit dem Messsystem mit einem Kabel verbunden werden. In vielen computerassistierten Eingriffen ist die Gewährleistung einer Leitungsverbindung unmöglich. Ein Beispiel dafür bietet die Strahlentherapie, in der der Tumor mehrfach mit Gammastrahlung bestrahlt wird. In dieser Therapie muss der Radiologe genau die Lage des Tumors im Patientenkörper in den Koordinaten des Geräts zur Strahlentherapie bestimmen. Hierfür wird ein drahtloser Transponder verwendet. Der Transponder besteht aus einem Resonanzkreis, der die Resonanz in der Frequenz des Feldgenerators besitzt. Der Feldgenerator generiert für eine bestimmte Zeit ein elektromagnetisches Feld (siehe Abb. 1.3). In dieser Zeit wird der Feldgenerator mit dem Resonanzkreis magnetisch gekoppelt. Nachdem das Feld des Feldgenerators ausgeschaltet wird, generiert der Resonanzkreis auf der Basis der gespeicherten Energie ein elektromagnetisches Feld. Die im Feldgenerator beinhalteten Empfangsspulen messen das elektromagnetische Feld des Resonanzkreises [38–39]. Auf der Basis der bekannten Induktivität und der Güte des Resonanzkreises sowie aufgrund der Feldmessungen mit mehreren Empfangsspulen kann das System die Lage des Resonanzkreises bestimmen. Das Messprinzip des Transponder-Trackingsystems Calypso 4D wird in der Abb. 1.3 dargestellt. Das System arbeitet im Frequenzbereich von 200 kHz bis 600 kHz [39], in dem die elektromagnetische Strahlung nicht durch menschliches Gewebe absorbiert wird [38].

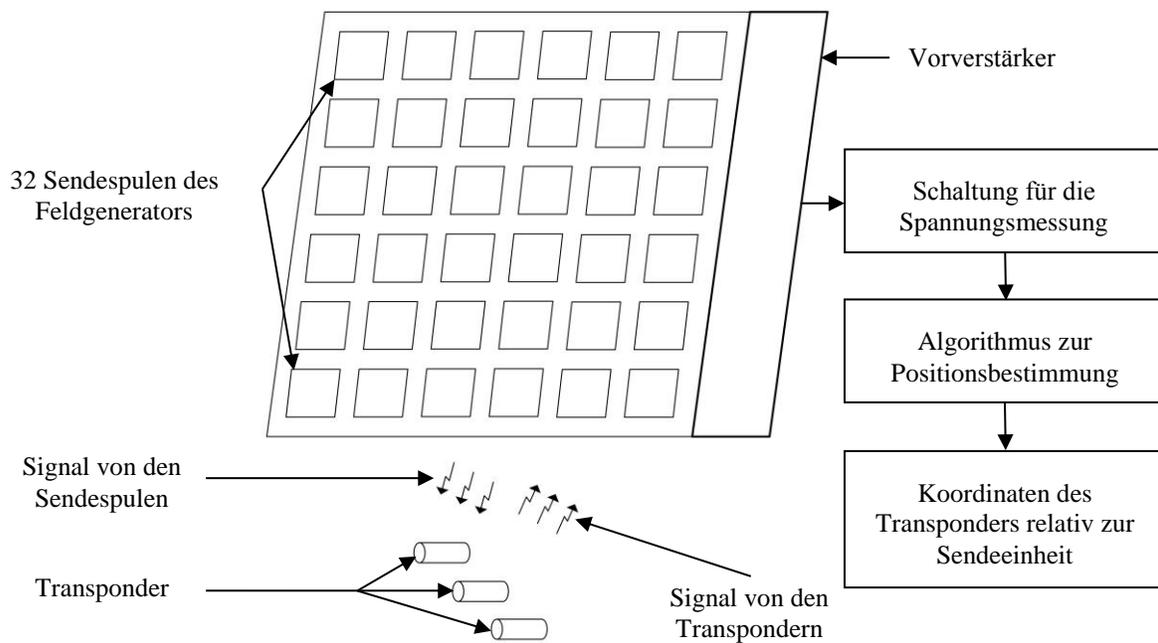


Abb. 1.3 Funktionsprinzip des Ortungssystems Calypso 4D¹

Eine ähnliche Technologie wird für das Tracking von RFID-Markern verwendet. Diese Marker bestehen aus einer Antenne und einem Chip, der die Frequenz des Feldgenerators charakteristisch für den Chip moduliert (siehe Abb. 1.4). Das modulierte Signal wird von den Empfangsantennen gemessen. Solche Systeme können die Position des Transponders mit Hilfe der Signalstärke bestimmen [40] und ihre Funktionsweise ist dadurch ähnlich wie die der oben beschriebenen AC- und DC-Trackingsysteme. Als Alternative bietet sich die Messung der Phasenverschiebung zwischen dem generierten und gemessenen Signal an (engl. *time of flight*) [40–41]. Diese Lösung liefert ein niedrigeres Signal-Rausch-Verhältnis als bei der Messung der Signalstärke [40] und führt zur Verbesserung der Genauigkeit der Ortung der RFID-Marker bis zu einem mittleren Fehler der Positionsbestimmung von 2 mm [40]. Die RFID-Trackingsysteme arbeiten nicht mehr im quasistationären Frequenzbereich und sind deswegen durch die Absorption der elektromagnetischen Wellen im menschlichen Körper beeinflusst [40]. Das Phänomen erschwert die Anwendung dieser Technologie innerhalb des Patientenkörpers.

¹ Abbildung des Autors auf der Basis der Abbildung 2.4 in der Arbeit von Rau [39]

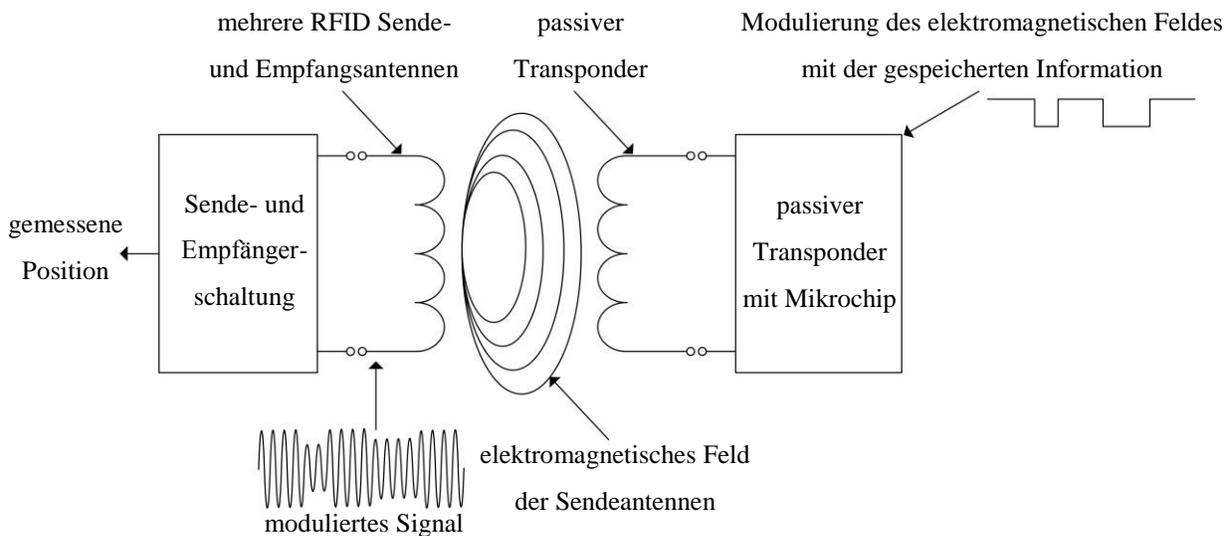


Abb. 1.4 Ortung von RFID-Markern

Tracking von Dauermagneten

Die Navigation der therapeutischen und diagnostischen Instrumente kann auch mit Hilfe der Ortung von Dauermagneten realisiert werden [24]. In diesem Fall wird ein Dauermagnet als eine Quelle des magnetischen Feldes im menschlichen Körper platziert. Das magnetische Feld des Dauermagneten wird außerhalb der Patienten mit Hilfe mehrerer Feldsensoren gemessen. Als Feldsensoren können bei solchen Systemen z. B. die Hallsensoren verwendet werden [42–44].

Der größte Vorteil dieser Technologie liegt in ihrer Einfachheit und Robustheit [42]. Das Tracking von drahtlosen Markern benötigt hohe magnetische Momente bei einem möglichst kleinen Volumen des Markers. Aus diesem Grund stellt ein Einsatz von Dauermagneten die bessere Wahl als eine miniaturisierte Sendespule dar [25]. Jedoch sind die erreichten Genauigkeiten, im Vergleich zu den anderen Technologien, niedrig [43–44], da, wie in vielen anderen Trackingmodalitäten, beim Tracking der Dauermagneten die Amplitude des magnetischen Feldes gemessen wird. Die Änderung des Magnetfeldes des Dauermagneten in der Zeit übt auch einen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung aus. Außerdem sollen die georteten Dauermagneten einerseits möglichst groß sein, weil das magnetische Moment von den Abmessungen des Dauermagneten abhängt und gleichzeitig genügend klein sein, damit die kleinen Dauermagneten in die medizinischen Instrumente implementiert werden können.

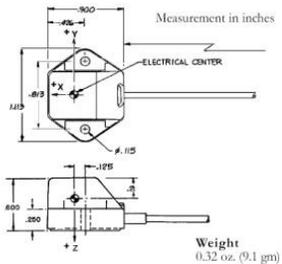
Beim Tracking von Dauermagneten spielen die Feldsensoren eine Schlüsselrolle. Die Feldsensoren müssen eine entsprechend hohe Sensitivität und einen großen Arbeitsbereich aufweisen, damit sie ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis für die gemessenen Feldstärken garantieren können [25]. Die häufig verwendeten Hall-basierten Feldsensoren zeigen ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis und eine schlechte Sensitivität [43]. Ähnlich wie bei dem DC-Tracking messen die Feldsensoren neben dem Magnetfeld des Feldgenerators auch das Magnetfeld der Erde, was beim Modell der Feldverteilung berücksichtigt werden muss.

1.4 Kommerzielle elektromagnetische Trackingsysteme

Die elektromagnetischen Trackingsysteme wurden zwar ursprünglich für militärische Anwendungen entwickelt [13], aber für minimalinvasive Eingriffe adaptiert. Es können zwei unterschiedliche Marktstrategien bei den Herstellern der elektromagnetischen Trackingsysteme festgestellt werden.

Die erste Strategie der Unternehmen basiert auf der Entwicklung eigener elektromagnetischer Trackingsysteme und der Integration dieser Technologie in die eigenen Systeme zur minimalinvasiven Chirurgie. In diesem Fall wird das elektromagnetische Ortungssystem nicht getrennt angeboten, sondern immer mit einer konkreten medizinischen Anwendung verbunden. Der Vorteil dieser Strategie zeigt sich in der Möglichkeit der Anpassung des elektromagnetischen Ortungssystems an die Anforderungen des Systems zur CAS-Chirurgie. Als Beispiel dieser Strategie kann die Firma Calypso mit dem Produkt Calypso 4D erwähnt werden.

Die zweite Strategie basiert auf der Entwicklung der Trackingsysteme, die keine vorgeschriebene Anwendung haben. Zum Abschluss dieser Arbeit waren nur drei Firmen bekannt, die die OEM-Systeme zur elektromagnetischen Ortung herstellen. Die Geräte haben keine vorgeschriebene Anwendung und werden im Bereich der Medizintechnik, Motion Capture, als auch in den kinematischen Studien eingesetzt. Diese Firmen können als Lieferanten der Hersteller der beliebigen Systeme zur CAS-Chirurgie betrachtet werden. Die elektromagnetischen Trackingsysteme werden dann in ein System zur CAS-Chirurgie integriert. Der Vorteil dieser Strategie liegt in einem potenziell größeren Umsatz wegen der hohen Anzahl von Marktnischen, in denen die elektromagnetische Ortungstechnologie eingesetzt werden kann. Zu den Herstellern solcher OEM-Geräte zur elektromagnetischen Ortung gehören die Firmen Northern Digital, Ascension Technology Corporation und Polhemus. In der Tab. 1 werden drei ausgewählte OEM-elektromagnetische Trackingsysteme präsentiert und miteinander verglichen.

| Hersteller | Northern Digital | | Ascension Technology Corporation | | | Polhemus | | | |
|--|---|------|--|-----------------|------|--|-----------------|------|------|
| Produkt | Aurora | | driveBAY [®] 2 | | | Fastrak | | | |
| Funktionsweise | AC | | DC | | | AC | | | |
| Messsysteme und Sensoren | Feldgeneratoren [45]  | | Feldgeneratoren [46]  | | | Feldgenerator [36]  | | | |
| | Sensor [45]  | | Sensoren [46]  | | | Sensor [36]  | | | |
| Arbeitsbereich | würfelförmiger Arbeitsbereich 500 mm x 500 mm x 500 mm | | sphärischer Arbeitsbereich mit einem Radius von 1219 mm | | | würfelförmiger Arbeitsbereich mit der Kantenlänge von 360 mm zu 780 mm abhängig von der Abmessung der Sensoren | | | |
| Abmessungen der kleinsten verfügbaren Sensoren | Zylinderspule Durchmesser – 0.3 mm Länge – 13 mm | | zylinderförmiger Sensor Durchmesser – 0.9 mm Länge – 7.25 mm | | | sechseckiger Sensor Breite – 23 mm Länge – 28 mm | | | |
| RMS-Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung | | 5DOF | 6DOF | | 5DOF | 6DOF | | 5DOF | 6DOF |
| | Position [mm] | 0.70 | 0.48 | Position [mm] | - | 1.40 | Position [mm] | - | 0.76 |
| | Ausrichtung [°] | 0.20 | 0.30 | Ausrichtung [°] | - | 0.50 | Ausrichtung [°] | - | 0.15 |
| Messrate [Hz] | 40 | | 240 | | | 120 | | | |
| Quelle | [45] | | [46–47] | | | [36] | | | |

Tab. 1 OEM-elektromagnetische Trackingsysteme

Das elektromagnetische Trackingsystem der Firma Polhemus weist eine begrenzte Anwendbarkeit bei CAS-Eingriffen auf, weil die Feldsensoren wegen der Größe von über 20 mm in die meisten chirurgischen Instrumente nicht integriert werden können [48].

Die Hersteller des elektromagnetischen Trackingsystems teilen in den Datenblättern meistens die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung (RMS-Fehler) anstatt der absoluten Genauigkeit als ein Maß der Übereinstimmung der gemessenen und

wahren Werten mit [46–47, 49]. Wenn die absolute Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems eingegeben wird, wird dies in Form eines 95-prozentigen Vertrauensbereiches erfolgen [45]. Der RMS-Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung zeigt wesentlich kleinere Werte als der 95-prozentige Vertrauensbereich der Positionsbestimmung und informiert den Anwender nicht über die Häufigkeit, mit der hohe Fehler auftreten können. Die Genauigkeit und die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Positionsbestimmung hängen stark von dem verwendeten Messprotokoll ab. Deswegen lassen sich die Angaben aus den Datenblättern der unterschiedlichen Hersteller nur begrenzt miteinander vergleichen. Die Validierung der Angaben der Hersteller ist auch durch den fehlenden definitiven Standard bei den Methoden der Genauigkeitsevaluierung erschwert [50], obwohl einige Arbeitsgruppen eine standardisierte Methode der Genauigkeitsevaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems einzuführen versuchen [51]. In dieser Arbeit wurde vor allem der RMS-Fehler verwendet, damit die Ergebnisse der durchgeführten Versuche mit kommerziellen Trackingsystemen verglichen werden können.

1.5 Elektromagnetisches Trackingsystem in der Medizin

Elektromagnetisches Tracking für vaskuläre Eingriffe

Die endovaskulären Eingriffe werden unter Kontrolle einer Röntgen-Fluoroskopie oder einer digitalen Subtraktionsangiografie (DSA) durchgeführt. In der DSA werden nacheinander zwei Röntgenaufnahmen des Gefäßsystems aufgenommen. Nach der ersten Aufnahme wird in das Gefäßsystem des Patienten ein Kontrastmittel injiziert und dann erfolgt die zweite Aufnahme. Mit Hilfe der digitalen Subtraktion der beiden Aufnahmen wird das Innenvolumen des Gefäßsystems des Patienten visualisiert. Der Einsatz der DSA als Bildgebungsmodalität verursacht durch die ionisierende Strahlung eine Belastung für die Patienten und Radiologen. Hinzu kommt die Nierenbelastung der Patienten durch das Kontrastmittel. Das Kontrastmittel kann in großen Mengen zum Nierenversagen führen. Eine zusätzliche Ortung des Katheters ohne Röntgendurchleuchtung könnte die Anzahl notwendiger DSA- sowie Röntgen-Aufnahmen reduzieren, was die Belastung durch das Kontrastmittel und durch die ionisierende Strahlung reduzieren würde. Außerdem bieten die DSA und die Röntgen-Fluoroskopie nur eine zweidimensionale Information [52], was es den Radiologen erschwert, die Lage des Katheters relativ zum kardiovaskulären System abzuschätzen [53]. Das elektromagnetische Trackingsystem eignet sich als einzige Ortungstechnologie, wegen der unnötigen Sichtlinie zwischen dem Feldgenerator und dem Feldsensor, für das Tracking flexibler Katheter bei endovaskulären Eingriffen. Es wurden zu diesem Thema mehrere Phantomstudien [53–56], Tierexperimente [57–58] und klinische Studien [59] veröffentlicht.

Die Firma Siemens bietet in der Zusammenarbeit mit der Firma St. Jude ein elektromagnetisches Trackingsystem für computergestützte Eingriffe mit einem elektrophysiologischen Katheter zur Behandlung von Herzrhythmusstörungen an. Das System besteht aus einem Feldgenerator, der in den C-Arm integriert ist, und einem elektrophysiologischen Herzkatheter mit integrierter Empfangsspule des Trackingsystems [60].

Ein ähnliches Trackingsystem wurde in der Vergangenheit von der Firma Mediguide angeboten. Diese Technologie wurde zur elektromagnetischen Ortung des intravaskulären Ultraschallkatheters verwendet. Die Lage des Katheters wurde in Echtzeit gemessen und grafisch mit den Röntgenaufnahmen und mit dem dreidimensionalen Modell der Koronargefäße überlagert [61].

Ein ähnliches System, CARTO 3™, wird von der Firma Biosense Webster angeboten. Das System für minimalinvasive Eingriffe bietet neben dem elektromagnetischen Trackingsystem auch eine Trackingtechnologie, die auf der Messung elektrischer Impedanz zwischen dem Katheter und der Oberfläche des Patientenkörpers basiert [62]. Die Genauigkeit dieses Ortungssystems liegt, laut den publizierten in-vivo-Studien von Sonna, bei 1 mm [63].

Strahlentherapie

Bei der Behandlung von Lebertumoren ist es wichtig, dass das ganze Tumorgewebe zerstört wird. Bei der Nadelpunktion kommt es aber zur Deformation des Gewebes und Verschiebung des Tumors. Hier könnte die Lage des Tumors mit einem auf der sich bewegenden Leber angebrachten elektromagnetisch navigierbaren Marker bestimmt werden [64]. Das zusätzliche Ortungssystem würde dadurch die computerassistierte Behandlung der Lebertumore vereinfachen. Der Nachteil dieser Idee liegt in der erforderlichen Leitungsverbindung zwischen der im Tumor platzierten Spule und dem AC-elektromagnetischen Trackingsystem.

Das Patent von Boksberger schlägt auch die Implantierung einer Sende- oder Empfangsspule in das Tumorgewebe vor [18], was die Ortung des Tumors während der Strahlentherapie vereinfachen sollte.

Die Firma Calypso bietet ein Trackingsystem Caplyso 4D zur Ortung von implantierbaren Transpondern, die bei der Strahlentherapie eine wiederholbare Bestrahlung eines Tumors mit ionisierender Strahlung ermöglichen. In diesem System werden die drahtlosen Transponder mit den integrierten Resonanzkreisen geortet. Der Feldgenerator generiert die elektromagnetischen Felder mit einer Frequenz von 200 – 600 kHz [39]. Das Trackingsystem ermöglicht die Navigation auf einer Fläche von 140 mm x 140 mm mit der maximalen Eindringtiefe von 270 mm [39].

Bronchoskopie

Bei der traditionellen Bronchoskopie navigieren die Ärzte das Bronchoskop nur auf Basis der Sicht durch das Kamerasystem und des anatomischen Wissens. Es besteht keine Möglichkeit der Kopplung der anatomischen Daten (z. B. CT-Daten) mit der Sicht aus dem Bronchoskop. Dies führt zu großen Fehlerquoten, z. B. bei Tumorbiopsien [65]. Die Fehlerquote kann reduziert werden, wenn die Lage und die Ausrichtung der Bronchoskopspitze mit dem elektromagnetischen Trackingsystem gemessen werden [66–67]. Die gemessene Lage und die Ausrichtung der Spitze des Bronchoskops wurden in den Studien von Solomon mit den CT-Daten überlagert und bei 15 Probanden im Rahmen klinischer Studien verwendet [65].

Die Firma superDimension bietet ein System zur elektromagnetisch navigierten Bronchoskopie – iLogic an. Bei diesem System wurde der Feldsensor des elektromagnetischen Trackingsystems an der Spitze des flexiblen Bronchoskops angebracht. Durch die zusätzliche Navigation können mit diesem System neben der Biopsie von Lungenläsionen auch periphere Läsionen selbst untersucht werden, die sich außerhalb des Arbeitsbereiches der konventionellen Bronchoskope befinden [68].

Kapselendoskopie

Bei dem Einsatz der Kapselendoskopie zur Visualisierung des Verdauungstrakts ist eine zusätzliche Ortung des Kapselendoskops von Vorteil, da der Arzt den Videoaufnahmen eine bestimmte Lage und Ausrichtung des Endoskops zuordnen kann. Aus diesem Grund können die Kapselendoskope zusätzlich magnetisch geortet werden [25]. In dieser Anwendung wird die Lage eines Dauermagneten gemessen, der an der Spitze des Endoskops angebracht ist. Ein anderes Beispiel für die Anwendung des Trackings von Dauermagneten bietet die Ortung einer nasogastralen Sonde [69].

Koloskopie

Die Lage und Ausrichtung des Koloskops können während der Untersuchung des Dickdarms mit einer zusätzlichen Navigation bestimmt werden. Dies ermöglicht die Zuordnung von Aufnahmen der Lage und Ausrichtung relativ zur Patientenanatomie [70]. Zu diesem Zweck bietet die Firma Olympus ein System zur elektromagnetisch navigierten Koloskopie „ScopeGuide“ an. Das System visualisiert die Gestalt des Koloskops während der Koloskopie [71].

Arthroplastik

Bei der Implantierung von Gelenkendoprothesen, z.B. Knie- oder Hüftendoprothesen werden häufig computerassistierte Systeme verwendet, die auf optischen Ortungssystemen basieren [71]. In den Studien von Lionberger wurde dieser Ansatz mit dem der elektromagnetischen Navigation verglichen [72].

Ultraschall

Für viele diagnostische und therapeutische Anwendungen, insbesondere im kardiologischen und onkologischen Bereich, ist es von Vorteil, wenn die Angiographien oder die CT-Aufnahmen mit den Ultraschallbildern registriert werden. Nach der Registrierung werden beide Bildgebungsmethoden dem Radiologen gleichzeitig zur Verfügung gestellt. Für diese Aufgabe müssen die Lage und Ausrichtung der Ultraschallsonde geortet werden. Das Tracking könnte zwar mit einem optischen Trackingsystem erfolgen, jedoch müsste stets eine Sichtlinie zwischen der Kamera und der Ultraschallsonde gewährleistet

werden. Dies ist in den praktischen Anwendungen nicht immer möglich, deswegen wird zur Ortung des Ultraschallkopfs ein elektromagnetisches Trackingsystem verwendet [73–74].

Außerdem wird das elektromagnetische Trackingsystem zur Generierung von 3D-Ultraschallaufnahmen benutzt [75]. Für solche Aufnahmen werden während der Bildgebung die Lage und die Ausrichtung des Ultraschallkopfs mit Hilfe des elektromagnetischen Trackingsystems gemessen. Die Berechnung der 3D-Aufnahmen erfolgt auf der Basis der 2D-Ultraschallaufnahmen bei bekannter Lage und Ausrichtung des Ultraschallkopfs.

Die Firma General Electric bietet ein System für bildgeführte Nadelbiopsien mit einem elektromagnetischen Trackingsystem an, das in ein Ultraschallgerät integriert ist. Das in dem System integrierte elektromagnetische Trackingsystem der Firma Ascension Technology Corporation erfüllt zwei Aufgaben gleichzeitig. Es ermöglicht eine präzise Nadelplatzierung im menschlichen Körper und gleichzeitig überlagert es die Ultraschallaufnahmen mit den CT-/MRT-Aufnahmen [76–77]. Das elektromagnetische Trackingsystem mit der speziellen Software der Firma General Electric wird vor allem bei den Biopsien von Läsionen und Tumoren verwendet [77].

Ein ähnliches System wird auch von der Firma Philips angeboten. Der elektromagnetisch navigierbare Ultraschallkopf wird für die Überlagerung der Ultraschallaufnahmen mit den anderen Bildgebungsmodalitäten und für die bildgeführten perkutanen Eingriffe verwendet [78].

Im Produkt SonixGPS™ der Firma Ultrasonix Medical Corporation wird die elektromagnetische Ortung für die ultraschallnavigierten Nadelbiopsien angeboten. In diesem System wird die mit dem elektromagnetischen Trackingsystem gemessene Lage der Biopsie-Nadel mit den Ultraschallaufnahmen überlagert [79].

Computerassistierte Eingriffe mit starren chirurgischen Instrumenten

Bei vielen Eingriffen in der minimalinvasiven Chirurgie muss eine Nadel oder ein starres Instrument präzise an eine bestimmte Stelle im menschlichen Körper platziert werden. Ein Beispiel für eine derartige Anwendung bietet ein Navigationssystem für die interstitielle Brachytherapie [80]. In diesem System werden die Lage und Ausrichtung der Brachytherapienadel mit dem elektromagnetischen Trackingsystem gemessen. Werden die Messungen mit den CT-Daten überlagert, führt dies zu einer genaueren Nadelplatzierung, was die Chancen auf den Erhalt eines gesunden Gewebes und die Zerstörung des Tumors erhöht.

Ein anderes Beispiel für computerassistierte elektromagnetisch navigierte Eingriffe mit starren Instrumenten stellt die laparoskopische Radiofrequenzablation dar. Bei dieser Behandlungsmethode von Weichteiltumoren (vor allem von Lebertumoren) wird eine RF-Nadel in dem Tumor platziert und das Tumorgewebe mit Hilfe des elektrischen Wechselstroms mit hoher Amplitude zwischen mindestens zwei Elektroden thermisch zerstört. Das elektromagnetische Trackingsystem wird in diesem Fall für die präzise Positionierung des Laparoscops genutzt [81].

Wenn die Stelle, wo die Nadel platziert sein muss, sehr fragil ist, muss der Radiologe die Nadel langsam vorschieben und nach jeder Bewegung eine Röntgenaufnahme anfertigen. Ein Beispiel dafür bieten die

perkutanen minimalinvasiven Eingriffe der Wirbelsäule, wie z. B. die Biopsien oder die Vertebroplastien. Das elektromagnetische Trackingsystem wurde bei den Wirbelsäuleneingriffen und -punktionen [82] zusammen mit der CT- oder Röntgenbildgebung verwendet. Bei den Eingriffen wurde die zusätzliche Navigation als eine Ergänzung der röntgenbasierten Bildgebung bei der präzisen Nadelplatzierung herangezogen. Damit konnte der Radiologe die Anzahl notwendiger Röntgenaufnahmen reduzieren und gleichzeitig einen präzisen Eingriff durchführen. Außerdem ermöglicht der computerassistierte Eingriff die Planung des Vorhabens und die Visualisierung der Zugangswege als 3D-Aufnahmen, was den Radiologen den Eingriff erleichtert [83] und die Risiken von Komplikationen reduzieren kann.

Die Firma CAS Innovation AG hat in der Vergangenheit ein elektromagnetisches Trackingsystem für die bildgeführten Nadeleingriffe namens CAPPa angeboten. Das Trackingsystem ermöglicht einen elektromagnetisch navigierbaren Eingriff mit einer Nadel an sehr fragilen Stellen in der Nähe des Rückenmarkes [8, 84]. In der neuen Generation des Systems für bildgeführte Nadeleingriffe CAPPa wird anstatt des elektromagnetischen Trackingsystems ein optisches Ortungssystem verwendet [85].

Die Firma Fiagon GmbH bietet ein elektromagnetisches Trackingsystem für die navigierbare Hals-Nase-Ohren-Eingriffe. Die starren chirurgischen Instrumente können intraoperativ gebogen und an die Patientenanatomie angepasst werden [86].

Die Firma Medtronic Inc. bietet in einem Produkt StealthStation® S7® neben dem optischen Trackingsystem auch unter der Marke AxiEM™ System ein elektromagnetisches Trackingsystem an. Dieses komplexe System zur klinischen Ortung kann in diversen diagnostischen und interventionellen Eingriffen eingesetzt werden [87].

1.6 Anforderungen an das elektromagnetische Trackingsystem in den computerassistierten bildgeführten Interventionen

Ein elektromagnetisches Trackingsystem soll bei unterschiedlichen computerassistierten Eingriffen und in den jeweiligen klinischen Umgebungen verwendet werden können [48]. In den Studien von Wilson wurden mehrere Trackingsysteme in drei unterschiedlichen klinischen Umgebungen getestet [88]. Es waren die Umgebungen für die CT-geführten Interventionen, für die angiografischen Interventionen und für die interventionelle Behandlung von Lungenerkrankungen. Auf Basis der Analyse der Anforderungen an die elektromagnetischen Trackingsysteme haben die Autoren eine Liste der Merkmale eines idealen Trackingsystems vorbereitet. Laut der Studien von Wilson soll das ideale elektromagnetische Trackingsystem folgende Anforderungen erfüllen [88]:

- **Messrate** – 100 Messungen pro Sekunde und eine Latenz von weniger als einer Millisekunde, unabhängig von der Anzahl der navigierten Sensoren
- **Mehrere Sensoren** – Das elektromagnetische Trackingsystem soll gleichzeitig bis zu 30 Sensoren orten, damit mehrere chirurgische Instrumente gleichzeitig navigiert werden können.
- **Arbeitsvolumen** – soll größer als der Operationsraum sein (5 m^3). Der Feldgenerator müsste dadurch nicht im direkten Operationsfeld präsent sein.

- **Kabellosigkeit** – Es wäre gewünscht, dass die Sensoren drahtlos mehrere Stunden funktionieren. Das Trackingsystem würde dadurch den Eingriff nicht beeinträchtigen.
- **Größe** – Die Sensoren mit sechs Freiheitsgraden sollen klein genug sein, damit diese in alle chirurgischen Instrumente integriert werden können.
- **Genauigkeit** – Der RMS-Fehler des Ortungssystems soll kleiner als 1 mm und 0.1° sein.
- **Störungen** – Die Ortungssysteme sollen nicht durch die Umgebung beeinflusst werden, wenn die Umgebung elektrisch leitende und ferromagnetische Materialien oder die elektronischen Geräte beinhaltet.

Laut Nafis soll der Fehler der Positionsbestimmung des gesamten Trackingsystems für die computerassistierten Interventionen nicht mehr als 1.5 mm betragen [13]. Für die Anwendung des elektromagnetischen Trackingsystems in der interventionellen Neuroradiologie, wie beispielsweise Navigation eines Führungsdrahtes sind laut den Studien von Hummel kleine Sensoren und eine Genauigkeit von 3 – 5 mm wünschenswert [89], wobei die Genauigkeit der Systeme zur minimalinvasiven Chirurgie neben dem Fehler der Positionsbestimmung mit dem Ortungssystem auch durch andere Fehlerquellen beeinflusst wird. Diese Arbeit befasst sich mit der Optimierung des elektromagnetischen Trackingsystems in Hinsicht auf die Minimierung der Störungen durch elektrisch leitende Störkörper.

1.7 Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems

In der Literatur werden als Kalibrierung sowohl die Methoden zur Kompensation von statischen Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems [90] als auch die Methoden zur genaueren Bestimmung der Lage, der Stärke und der Ausrichtung des magnetischen Dipols genannt, mit dem die Sendespulen des Feldgenerators des Ortungssystems abgebildet werden können [91]. In dieser Arbeit wird die Berechnung der Lage, der Ausrichtung und des Dipolmomentes des magnetischen Dipols, mit dem die Sendespulen des Feldgenerators modelliert worden sind, als die Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems bezeichnet.

Die Arbeitsgruppe von Hu hat eine Reihe von Publikationen bezüglich des magnetischen Trackingsystems für die Ortung der Kapselendoskope publiziert [24–25]. Das magnetische Trackingsystem von Hu misst die Amplitude des Magnetfeldes eines Dauermagneten, der in das Kapselendoskop integriert ist. Diese Feldmessung erfolgt mit mehreren Feldsensoren, die sich außerhalb des Patientenkörpers befinden. Diese Arbeitsgruppe hat eine Kalibrierungsmethode dieses Ortungssystems veröffentlicht [92]. Mit dieser Methode werden die Sensitivität, die Lage und die Ausrichtung der Feldsensoren berechnet. Der Dauermagnet wird entlang der Zentralachse des Feldsensors schrittweise verschoben. Durch die Messung der Position des Dauermagnets und der Feldstärke wird die Sensitivität des Feldsensors ermittelt. Die Bestimmung der Sensitivität des Feldsensors ermöglicht die Korrektur der Lage sowie Ausrichtung der Sensoren mit Hilfe der gleichen Messdaten. Die Berechnung dieser Parameter erfolgt nacheinander in drei getrennten Schritten.

Ein anderer Algorithmus zur Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems wird in der Publikation von Plotkin beschrieben [91]. In seiner Arbeit verwendet Plotkin ein AC-elektromagnetisches

Trackingsystem mit einer einzelnen Empfangsspule und einem Feldgenerator, der aus 64 Sendespulen besteht [93]. Für die Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems wird die Empfangsspule stückweise um einen konstanten Abstand entlang einer Linie verschoben. Dieser Schritt der Bewegung zwischen zwei ausgewählten Messpunkten stellt neben den Spannungen an der Empfangsspule den einzigen Parameter dar, der bestimmt sein muss.

Es ist zu erwarten, dass die Hersteller der elektromagnetischen Ortungssysteme auch eigene Kalibrierungsmethoden verwenden. Diese Methoden werden aber nicht veröffentlicht und stehen deswegen nicht zur Verfügung.

1.8 Störung des elektromagnetischen Trackingsystems durch leitende und ferromagnetische Gegenstände und elektronische Geräte

Arten der Störung

Elektromagnetische Trackingsysteme werden meistens in Umgebungen benutzt, in denen die Genauigkeit der Ortung durch unterschiedliche Störobjekte beeinträchtigt sein kann. Bereits in früheren Publikationen bezüglich des elektromagnetischen Trackingsystems wurde der Einfluss von leitenden und ferromagnetischen Objekten auf die Genauigkeit des Trackingsystems erwähnt [15]. Die Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems durch leitende und ferromagnetische Materialien werden als das dominante Problem beim Einsatz elektromagnetischer Trackingsysteme in der klinischen Praxis betrachtet [94]. In der minimalinvasiven Chirurgie führen die Operationstische, Bildschirme, Lampen, metallgestützten Wände, C-Arme, Operationsmikroskope und chirurgische Instrumente in der Nähe des Trackingsystems zu zusätzlichen Fehlern der Positionsbestimmung [12, 88, 94–95].

Bei dem elektromagnetischen Trackingsystem werden die Position und die Ausrichtung des Sensors auf der Basis der gemessenen Amplitude des elektromagnetischen Feldes mit bekannter Verteilung berechnet. Die Präsenz von ferromagnetischen Objekten in der Nähe des Feldgenerators bzw. des Sensors zieht eine Verzerrung des elektromagnetischen Feldes nach sich, was zu Fehlern in der Positionsbestimmung führt [12, 15, 96–97]. Es werden dadurch sowohl die AC- als auch DC-Trackingsysteme beeinflusst. Außerdem führt die Platzierung des ferromagnetischen Objektes in der Nähe des Feldgenerators zur magnetischen Kopplung zwischen dem Feldgenerator und dem Störobjekt. Diese Tatsache zieht eine Erhöhung der elektrischen Impedanz der Sendespulen und dadurch eine Senkung der Amplitude des Stromes in den Sendespulen nach sich. Infolgedessen wird die Amplitude des Magnetfeldes reduziert, was die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems beeinträchtigt.

Die Präsenz von elektrisch leitenden Objekten im Arbeitsvolumen des elektromagnetischen Trackingsystems führt zur Induktion von Wirbelströmen in diesen Störkörpern. Die Wirbelströme induzieren sekundäre elektromagnetische Felder, die die elektromagnetischen Felder des Feldgenerators überlagern [15, 22, 96, 98]. Die resultierende Feldverteilung lässt sich schwer analytisch bestimmen [95–96]. Diese Überlagerung des elektromagnetischen Feldes des Feldgenerators führt zu den hohen Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem [99].

Neben den leitenden und ferromagnetischen Objekten haben die elektronischen Geräte [95, 100], welche bei den minimalinvasiven Eingriffen verwendet werden, als auch die Leitungen der Stromversorgung [12] einen Einfluss auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems. Sogar die interne Mess- und Recheneinheit des Trackingsystems kann die Genauigkeit der Ortung beeinflussen [95].

Methoden der Evaluierung des Einflusses des Störkörpers

Der Einfluss des Störkörpers auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems kann mit Hilfe einer zusätzlichen Genauigkeitsevaluierung mit Störobjekt gemessen werden [51]. Die Ergebnisse der Evaluierung dieses Einflusses hängen stark von dem verwendeten Messprotokoll ab. Deswegen versuchen einige Arbeitsgruppen ein standardisiertes Protokoll für die Genauigkeitsevaluierung einzuführen [51]. Bei der Evaluierung der Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems werden die gemessene Position und die Ausrichtung mit einer „echten“ Position des Sensors verglichen. Als Referenz zur Genauigkeitsevaluierung kann entweder ein anderes Ortungssystem oder in bestimmten Situationen ein mechanisch bestimmter Abstand zwischen mehreren Positionen des Sensors genutzt werden.

In vielen Arbeiten wird zur Evaluierung der Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems ein Messraster verwendet [51, 94, 101–102]. Hierbei handelt es sich um eine Platte mit mehreren Löchern, die einen definierten Abstand zueinander haben. Nachdem der Sensor in einem der Löcher platziert wird, werden die Lage und die Ausrichtung des Sensors mit dem elektromagnetischen Trackingsystem gemessen. Auf der Basis mehrerer Messungen und des bekannten Abstands zwischen den Löchern kann die Genauigkeit des Trackingsystems berechnet werden. Der größte Vorteil dieser Lösung liegt in der Einfachheit. Zur Genauigkeitsevaluierung wird lediglich eine Platte aus nicht leitenden und nicht ferromagnetischen Materialien mit mehreren Löchern benötigt. Damit die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems statistisch ausgewertet werden kann, sind viele Messdaten vonnöten. Bei dieser Anforderung ist der größte Nachteil dieser Vorgehensweise deutlich. Die Evaluierung des Trackingsystems mit einem Messraster wird durch den Anwender rein manuell durchgeführt. Der Anwender müsste nach jeder Messung die Position des Sensors protokollieren und den Abstand zwischen den Löchern mit dem gemessenen Abstand zwischen den Positionsbestimmungen vergleichen. Die hohe Anzahl an erforderlichen Messungen ist daher mit einem sehr großen Aufwand verbunden. Weiter besteht das Risiko eines menschlichen Fehlers während der Durchführung des Experimentes. Ein Messraster ermöglicht außerdem nur eine zweidimensionale Genauigkeitsevaluierung, weil die Löcher des Messrasters entlang einer Fläche verteilt sind. Für eine dreidimensionale Genauigkeitsevaluierung werden mehrere Messraster benötigt. Die Lage und die Ausrichtung des Feldgenerators relativ zum Messraster üben auch einen Einfluss auf die Wiederholbarkeit der Genauigkeitsevaluierung aus. Der Feldgenerator wird laut der zur Verfügung stehenden Literatur an keiner Stelle befestigt [94] und dessen Position und die Ausrichtung relativ zum Messraster lassen sich nachträglich nicht bestimmen. Die Löcher des Messrasters sind nur in eine Richtung ausgerichtet. Dies verursacht einen statistischen Bias bei der Auswertung der Ergebnisse der Genauigkeitsevaluierung, weil die Sendespulen des Feldgenerators nicht einheitlich ausgerichtet sind. Es führt zur starken Abhängigkeit

der gemessenen Genauigkeit von der Ausrichtung des Feldsensors [13], was die Relevanz der berechneten Genauigkeit für die klinische Praxis, wo der Sensor zufällig ausgerichtet wird, in Frage stellt.

In einem anderen Ansatz wird die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe eines weiteren Ortungssystems evaluiert [9]. Die Position und die Ausrichtung des Feldsensors werden durch das andere Ortungssystem gemessen und mit dem elektromagnetischen Trackingsystem registriert. Als zusätzliches Tracking wird zum Beispiel das optische Tracking verwendet [9, 103–104], da hier die Genauigkeit wesentlich besser, als die erwartete Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems ist. Die Genauigkeit des optischen Trackingsystems wird auch nicht durch elektrisch leitende und ferromagnetische Objekte beeinflusst, solange diese Objekte die Sichtlinie zwischen der Sende- und Empfangseinheit des optischen Trackingsystems nicht beeinträchtigen. Die durch das optische Trackingsystem gemessene Position wird als Referenz für die Evaluierung der Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems verwendet.

Die Datenaufnahme bei der Evaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe des anderen Trackingsystems kann mit einem Robotersystem automatisiert werden. Solch ein Messaufbau kann mehrere Hundert Messungen mit beiden Ortungssystemen ohne wesentlichen Aufwand umsetzen. Der Roboter kann in einem dreidimensionalen Volumen die Genauigkeit des Trackingsystems evaluieren, dadurch wird auch der Abstand zwischen dem Sensor und dem Feldgenerator im Vergleich mit der Genauigkeitsevaluierung mit einem Messraster besser berücksichtigt. Zu den Nachteilen dieser Vorgehensweise gehört sicherlich ein wesentlich größerer Aufwand bei der Entwicklung eines solchen Robotersystems im Vergleich zu der Entwicklung eines Messrasters. Neben einem kostspieligen zusätzlichen optischen Trackingsystem wird auch ein spezielles Robotersystem benötigt. Als Robotersystem darf kein herkömmlicher Industrieroboter verwendet werden, weil das elektromagnetische Trackingsystem durch leitende und ferromagnetische Objekte beeinflusst wird. Deswegen sollte der Roboter entweder aus einem nicht ferromagnetischen Dielektrikum bestehen oder der Roboterarm sollte sehr lang und gleichzeitig nicht leitend oder ferromagnetisch sein [13]. Bei einem sehr langen Roboterarm ist der Antrieb des Roboters weit genug von dem Arbeitsvolumen des elektromagnetischen Trackingsystems entfernt und übt keinen messbaren Einfluss auf die Genauigkeit des Ortungssystems aus [104]. Zu den Nachteilen dieser Vorgehensweise gehören auch der zusätzliche Fehler der Positionsbestimmung des optischen Trackingsystems und der Fehler, der durch die Registrierung der Koordinatensysteme des optischen und elektromagnetischen Trackingsystems verursacht wird.

Als eine dritte Variante wird in der Literatur die Evaluierung des Trackingsystems nur mit Hilfe einer flachen und glatten Fläche vorgeschlagen [13]. Die Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems wird entlang dieser flachen Fläche zufällig bewegt. Die Lage des Sensors wird dabei mit Hilfe des elektromagnetischen Trackingsystems gemessen. Durch die mechanische Bewegung des Sensors entlang einer Fläche wird sich der Sensor immer auf dieser Oberfläche befinden. Die mit dem elektromagnetischen Trackingsystem gemessene Abweichung von dieser Position wird als Messfehler betrachtet.

Einfluss des Störkörpers auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems

Bei elektromagnetischen Trackingsystemen kann in statische und dynamische Fehler unterschieden werden [105]. Die Quellen statischer Fehler, wie z. B. der Operationstisch, ändern ihre Position nicht im Verlauf der Zeit. Die Störobjekte, die dynamische Fehler verursachen, ändern ihre Lage und Ausrichtung relativ zum Feldgenerator während des Eingriffes.

Es wurden viele Studien mit der Evaluierung der kommerziellen elektromagnetischen Trackingsysteme in der klinischen Praxis veröffentlicht [13, 102, 89]. Viele davon fokussieren auf leitende und ferromagnetische Objekte, die in der klinischen Praxis einen Einfluss auf die Genauigkeit des Trackingsystems nehmen können. In der Studie von Hummel [89] wurde der Einfluss der folgenden leitenden und ferromagnetischen Objekte aus der klinischen Praxis auf die Genauigkeit des Trackingsystems Aurora untersucht:

- **geschlossene Drahtschleifen** – Geschlossene Drahtschleifen mit einem Durchmesser von 160 mm in der Nähe des elektromagnetischen Trackingsystems verursachen laut der Studie von Hummel einen Fehler der Positionsbestimmung von mehr als 10 mm [89]. Die geschlossene Drahtschleife mit einem Durchmesser von 30 mm bewirkt im Gegensatz dazu einen vernachlässigbar kleinen Fehler [89].
- **Schleifen des Führungsdrahtes** – Die Führungsdrähte sind elektrisch isoliert, deswegen bilden sie keine geschlossenen Schleifen, in denen Wirbelströme fließen können [89]. Dadurch kann der resultierende Einfluss der nicht geschlossenen Schleifen des Führungsdrahts auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems als vernachlässigbar klein betrachtet werden [89].
- **Ultraschallkopf** – In der Studie von Hummel wurde der Einfluss des Ultraschallkopfs C4-2 Ultramark 9 der Firma Advanced Technology Laboratories auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems untersucht. Der Einfluss hängt stark von der Ausrichtung des Ultraschallkopfs ab. Jedoch kann der Fehler der Positionsbestimmung bis zu 10 mm erreichen [89]. Der Ultraschallkopf des gleichen Herstellers hat in der Studie von Schicho einen zusätzlichen Fehler der Positionsbestimmung von 5.1 mm verursacht [106].
- **C-Arm** – Der mobile C-Arm Siremobil 2000 (Siemens/Deutschland) übt einen großen Einfluss auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems aus. Der maximale Fehler der Positionsbestimmung in der Nähe des C-Arms betrug in der Studie von Hummel 80 mm [89]. In der Studie von Yaniv wurde der Einfluss des C-Arms Siemens Axiom Artis dFA (Siemens/Deutschland) auf die Genauigkeit der elektromagnetischen Trackingsysteme Aurora von NDI untersucht [48]. Während der Aufnahme der CT-Daten hat der C-Arm einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit des Trackingsystems mit einem Fehler von 5 mm gehabt [48]. Es wurde in dieser Studie erwähnt, dass der Fehler nicht durch die während der Bildgebung generierten elektromagnetischen Felder verursacht wurde, sondern durch die leitenden und ferromagnetischen Materialien des C-Arms.
- **Operationstisch** – Laut den Studien von Poulin verursacht ein Operationstisch einen Fehler der Positionsbestimmung von 5.7 mm bei dem Trackingsystem MotionStar (Polhemus/USA) [95]. In den Studien von Nafis wurde der Einfluss mehrerer Operationstische auf die Genauigkeit der

elektromagnetischen Trackingsysteme untersucht. Der Operationstisch in der Nähe des Trackingsystems Aurora der Firma NDI verursacht einen Fehler der Positionsbestimmung von 9 mm [107].

- **optisches Trackingsystem** – Die Marker des optischen Trackingsystems Polaris der Firma Northern Digital Inc. und Flashpoint der Firma Image Guided Technologies Inc. sind in ein Gehäuse aus Aluminium integriert und üben einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems aus (Fehler der Positionsbestimmung größer als 12 mm) [89].
- **Endoskop** – Laut der Studie von Hummel hat das Endoskop UM 96 der Firma Olympus keinen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems (Fehler der Positionsbestimmung kleiner als 5 mm) [89]. Die Studien von Yaniv bestätigen diese Aussage. Der gemessene Einfluss des Endoskops Pentax EB-1530T2 der Firma Pentax Ricoh Imaging auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems Aurora ist laut dieser Studie nicht relevant [48].
- **Nadelhalter** – Der Einfluss des Nadelhalters wurde in den Studien von Hummel als klein beurteilt (Fehler der Positionsbestimmung kleiner als 5 mm) [89].

1.9 Detektion und Kompensation der Störungen

Der Einfluss eines leitenden Störkörpers auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems nimmt mit dritter Potenz des Abstands zwischen dem Störkörper und dem Feldsensor, beziehungsweise zwischen dem Störkörper und dem Feldgenerator ab [36, 108]. Die Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems können eliminiert werden, wenn die Quelle der Störung in einem angemessenen Abstand von dem Trackingsystem platziert wird [13]. Es ist aber in der klinischen Praxis häufig ohne Änderung des klinischen Workflows nicht möglich.

Methoden zur Detektion der Störungen

Eine zuverlässige Positionsbestimmung ist essential für die klinische Anwendung des elektromagnetischen Trackingsystems. Wenn die Genauigkeit des Ortungssystems wegen der leitenden und ferromagnetischen Objekte nicht gewährleistet werden kann, wäre es von Vorteil eine eventuelle Störung durch eine Fehlermeldung des elektromagnetischen Trackingsystems anzuzeigen [13]. Dadurch wäre sich der Radiologe während eines Eingriffes dessen bewusst, dass die Genauigkeit des Trackingsystems aktuell eingeschränkt ist.

Die einfachste Methode der Störkörperdetektion basiert auf der Messung der Position mit zwei Empfangsspulen mit jeweils fünf Freiheitsgraden. Die gegenseitige Position und die Ausrichtung der Empfangsspulen sind bekannt. Wenn der Unterschied zwischen den mit dem elektromagnetischen Trackingsystem gemessenen gegenseitigen Positionen und Ausrichtungen der Empfangsspulen um ein

bestimmtes Niveau die bekannten Werte überschreitet, wird angenommen, dass das Ortungssystem gestört ist [12, 105].

Eine zusätzliche Empfangsspule kann auch in dem Arbeitsvolumen des elektromagnetischen Trackingsystems als eine Detektionsspule platziert werden [109–111]. Wenn sich bei konstanter Lage und Ausrichtung der zusätzlichen Empfangsspule relativ zum Feldgenerator die Spannung an dieser Spule ändert, ist es ein Indiz dafür, dass das elektromagnetische Trackingsystem gestört ist.

Im Patent von Kirsch werden nach der Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem für die berechnete Lage und die Ausrichtung des Sensors die Magnetfeldstärken simuliert und mit den gemessenen Werten verglichen. Überschreitet die Differenz einen Schwellenwert, gibt das System eine Fehlermeldung an [112].

Die andere Idee basiert auf der Messung der Änderung der Phasenverschiebung zwischen dem Strom in der Sendespule und der Spannung in der Empfangsspule. Wenn die Änderung der Phasenverschiebung ein bestimmtes Niveau überschreitet, wird angenommen, dass das elektromagnetische Trackingsystem gestört ist [113–114].

Laut dem Patent von Nieminen nimmt der Einfluss der Wirbelströme auf das Signal auf dem Sensor mit sinkender Frequenz ab, was die Detektion der Störkörper ermöglichen könnte [114].

Wenn die Sendespule mit einem leitenden oder ferromagnetischen Trackingsystem magnetisch gekoppelt ist, steigt durch diese magnetische Kopplung die Impedanz der Sendespule. Bei gleicher Amplitude der Spannung, die an der Sendespule angelegt ist, sinkt mit der zunehmenden Impedanz die Amplitude des Wechselstromes in der Sendespule. Wenn die Amplitude des Stromes in mehreren gleichartigen Sendespulen gemessen und verglichen wird, kann auf der Basis dieses Vergleiches die Störung des elektromagnetischen Trackingsystems detektiert werden [115].

Methoden zur Minimierung und Kompensation der Störungen

Es wurden in der Literatur mehrere Methoden zur Kompensation von statischen Störungen beschrieben. Im Übersichtspaper von Kindratenko findet sich ein Vergleich dieser Methoden [90], die prinzipiell auf der mathematischen Beschreibung der Feldverzerrung mit einem Modell basieren. In den meisten Methoden soll zuerst die Feldverteilung inklusive der Störung gemessen werden, danach wird der Einfluss der Störung in Form einer Korrekturmatrix gespeichert, die mit der gemessenen Position durch das elektromagnetische Trackingsystem und die Ausrichtung multipliziert wird. Der Vorteil dieser Technologie liegt in den guten Ergebnissen, solange die Position und die Ausrichtung des Ortungssystems relativ zum Störobjekt nicht geändert werden. Die potenziellen Anwender dieser Technologie müssen aber damit rechnen, dass die Modellierung der Feldverzerrung mit extrem vielen Messungen verbunden ist. Wenn die Kompensation der statischen Störungen in einem Messvolumen von 50 cm x 50 cm x 50 cm mit jeweils einem Schritt von 2.5 cm aufgenommen wird, wird die Berechnung der Korrekturmatrix 8000 Messwerte benötigen. Der Einsatz der großen Matrix bietet auch keine genaue Lösung, sondern erfordert eine Approximation bis zum nächsten Referenzpunkt für den die Korrekturmatrix berechnet wurde. Als eventuelle Alternative bietet sich die lineare Interpolation zwischen den gemessenen Messwerten an [116].

Gleichzeitig wird jede Änderung der Position und der Ausrichtung des Feldgenerators relativ zur Quelle der Störung eine erneute Kalibrierung des Trackingsystems erfordern [109].

Im Patent von Jones wird die Messung des elektromagnetischen Feldes der Sendespulen während der Kalibrierung nur an den Grenzen des Arbeitsvolumens vorgeschlagen [117]. Damit wäre die Anzahl der nötigen Messungen wesentlich reduziert.

Allerdings können die meisten Kalibrierungstechniken den Einfluss der dynamischen Störungen, z. B. durch die chirurgischen Instrumente oder durch die beweglichen Systeme zur medizinischen Bildgebung, nicht kompensieren. Als eine Ausnahme davon kann ein Ortungssystem mit mehreren Empfangsspulen betrachtet werden, die in einer konstanten Lage und Ausrichtung zueinander fixiert sind. Die intraoperative Datenaufnahme mit diesen Empfangsspulen ermöglicht die Charakterisierung und Kompensation der dynamischen Störungen [118]. Bei einer dynamischen Störung können die Messungen auch gemittelt werden [104] (z. B. mit dem Kalman-Filter [105, 119]).

Das Prinzip des elektromagnetischen Trackingsystems kann ebenso umgekehrt werden. Anstatt aus mehreren Sendespulen außerhalb von Patienten und einer Empfangsspule innerhalb des menschlichen Körpers kann das System laut dem Patent von Roggers auch aus einer miniaturisierten Sendespule, die in ein chirurgisches Instrument integriert ist, und mehreren Empfangsspulen außerhalb des menschlichen Körpers bestehen [120]. Die niedrige Leitfähigkeit des menschlichen Körpers verursacht keinen messbaren Einfluss auf die Genauigkeit des Trackingsystems. Dadurch befinden sich die potenziell leitenden Objekte im größeren Abstand von der Sendespule und der Einfluss des Störobjektes auf die Genauigkeit des Ortungssystems fällt dadurch gering aus. Allerdings hängt das magnetische Moment der Sendespule von deren Abmessungen ab. Deswegen beschränkt ein kleinerer magnetischer Moment, der durch die Sendespule mit geringeren Abmessungen generiert wird, das Arbeitsvolumen des Ortungssystems.

Mit sinkender Frequenz nimmt die Amplitude, der durch leitende Objekte verursachten parasitären elektromagnetischen Felder, ab. Das elektromagnetische Tracking mit einer niederfrequenten Erregung mit der Frequenz von 25 Hz bis 30 Hz soll laut dem Patent von Anderson den Einfluss der leitenden Objekte auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems reduzieren [121]. Der potenzielle Nachteil dieser Methode liegt in der sehr kleinen Amplitude der induzierten Spannung auf der Empfangsspule und dadurch in einem kleinen Arbeitsbereich des Ortungssystems.

Ein statischer Störkörper mit bekannter Lage und Ausrichtung (z.B. der Operationstisch oder der C-Arm) kann symmetrisch zwischen zwei Sendespulen platziert werden. Wenn das elektromagnetische Feld der zwei Sendespulen mit einem Feldsensor gemessen wird, wird die gemessene Störung mit den beiden Sendespulen die gleiche Amplitude, aber ein anderes Vorzeichen aufweisen. Dadurch wird laut dem Patent von Anderson der Einfluss dieser Störung auf die Genauigkeit kompensiert [122].

Die andere Strategie zur Reduktion des Einflusses der Störung basiert auf der Abschirmung einer Seite des Feldgenerators [34, 99, 123]. Die Abschirmung verzerrt zwar das elektromagnetische Feld des Feldgenerators, aber die Feldverzerrung bleibt konstant über die Zeit. Nach der Abschirmung werden die statischen Störungen, die z. B. durch den Operationstisch verursacht sind, keinen Einfluss auf die Genauigkeit des Trackingsystems nehmen, weil die untere Seite des Feldgenerators abgeschirmt ist. Diese Technologie wurde bereits in die Produkte der Firma Ascension [98] und NDI [102] integriert.

Damit die leitenden chirurgischen Instrumente einen kleineren Einfluss auf die Genauigkeit des Trackingsystems haben, können diese laut dem Patent von Shalgi aus elektrisch voneinander isolierten Blechscheiben aufgebaut werden [124]. Die gleiche Vorgehensweise wird bei der Herstellung der Kerne von Transformatoren genutzt, wo ebenfalls das Volumen, in dem die Wirbelströme fließen können, begrenzt sein muss. Die Reduktion des Volumens führt zur Reduktion der sekundären elektromagnetischen Felder und dadurch zur Reduktion des Einflusses der leitenden Störkörper auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems.

Die Firma Ascension Technology Corporation bietet den Kunden eine Unterstützung bei der Suche nach einer geeigneten Stelle für die Platzierung des elektromagnetischen Trackingsystems an. Sie hilft bei der Identifikation von metallischen Objekten im Boden, in den Wänden und in der Decke der Räumlichkeiten, in denen das elektromagnetische Trackingsystem verwendet werden soll [34].

In drei Patenten schlagen die Autoren die Modellierung des leitenden Störobjektes mit einem Tiefpassfilter vor [109, 125–126]. Die Koeffizienten des Tiefpassfilters werden im Frequenzbereich geschätzt, was zur Berechnung der Amplitude des sekundären parasitären elektromagnetischen Feldes auf der Empfangsspule führt. Das berechnete elektromagnetische Feld des Störkörpers zieht eine Korrektur des gemessenen elektromagnetischen Feldes nach sich, was die Verbesserung der Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems in der Präsenz des leitenden Störkörpers bewirkt. Im Patent von Nieminen wird das ungestörte Signal auf der Basis der Änderung der Phasenverschiebung des Signals an dem Sensor in der Präsenz des leitenden Störkörpers geschätzt [114]. In dem Patent von Rotier wird der Feldgenerator mit zwei Frequenzen eingespeist [28]. Die berechneten Ausrichtungen des Sensors werden für diese zwei Frequenzen der Erregerspannung mit einem Polynom mathematisch beschrieben, der zur Frequenz gleich Null extrapoliert wird. Die dadurch berechnete Ausrichtung des Sensors wird als nicht gestört angenommen.

Die andere Idee basiert auf der Befestigung des Feldgenerators an der Quelle der Störung. Nach der Kalibrierung des Trackingsystems bleiben die Position und die Ausrichtung des Störobjektes konstant relativ zum Feldgenerator. Dadurch werden laut dem Patent von Govari die statischen Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems durch den Störkörper mit Hilfe einer Kalibrierung kompensiert [127].

Die Störunterdrückung kann auch auf Basis der Messungen mit den redundanten Sendespulen erfolgen. Das elektromagnetische Trackingsystem misst die Spannungen einer größeren Anzahl an Sendespulen, als es für die Positionsbestimmung erforderlich ist. Die Redundanz führt laut den Patenten von Bar-Tal und Govari zur Verbesserung der Positionsbestimmung bei gestörtem Tracking, weil das Ortungssystem die weniger gestörten Spannungen auswählen kann [128–129]. In der Arbeit von Plotkin wird beispielsweise ein prototypischer Aufbau eines elektromagnetischen Trackingsystems mit einer einzelnen Empfangsspule und 64 Sendespulen präsentiert [93].

Die magnetische Kopplung der Sendespulen eines elektromagnetischen Trackingsystems mit großen elektrisch leitenden Objekten verursacht die Erhöhung der Reaktanz der Sendespulen, die den zeitlichen Stromverlauf in der Sendespule ändert. In dem Patent von Dumoulin wird eine Methode zur Kompensation dieses Phänomens beschrieben. Die Änderung der Amplitude des Stromes in der Sendespule wird laut dem Patent von Dumoulin durch das Trackingsystem kompensiert, was zur

Reduktion des Einflusses der großen leitenden Objekte auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems führen soll [130].

1.10 Motivation der Arbeit

Das elektromagnetische Trackingsystem stellt die einzige Ortungstechnologie dar, die keine Sichtlinie zwischen dem Ortungssystem und dem chirurgischen Instrument benötigt. Deswegen eignet sich diese Technologie besonders gut zum Tracking flexibler Instrumente. Allerdings haben die kommerziell verfügbaren elektromagnetischen Trackingsysteme wegen der Störungen durch leitende und ferromagnetische Objekte große Probleme mit der Akzeptanz in der minimalinvasiven Chirurgie. Wenn die Störungen detektiert werden, basiert es, wie im Trackingsystem Aurora, auf der Positionsbestimmung mit zwei rigide zueinander liegenden Empfangsspulen [105]. Es wird daraus ein Qualitätswert berechnet, der eine Störung signalisiert. Dieser Qualitätswert, der auf der Messung der Änderung des gemessenen Winkels zwischen zwei Empfangsspulen basiert, detektiert aber nicht alle wesentliche Störungen des Trackingsystems. Verursacht eine Störung die Änderung des gemessenen Winkels der beiden Spulen in gleiche Richtung, wird keine Störung detektiert. Außerdem haben zwei rigide zueinander liegende Empfangsspulen einen größeren Durchmesser als eine einzelne Spule, was die Verwendung dieser Sensoren in vielen medizinischen Anwendungen beschränkt. Der Anwender eines elektromagnetischen Trackingsystems mit einer einzelnen Empfangsspule ist sich dessen nicht bewusst, ob die Genauigkeit der Positionsbestimmung gewährleistet sein kann.

Elektromagnetisches Tracking von elektrisch leitenden Werkzeugen in jeder Umgebung mit bekannter Genauigkeit würde sowohl die Akzeptanz dieser Technologie erhöhen, als auch neue Anwendungen ermöglichen [13]. Die Störung des elektromagnetischen Trackingsystems durch leitende und ferromagnetische Objekte bildet das größte ungelöste Problem für die Akzeptanz dieser Ortungstechnologie in der klinischen Praxis [51, 94, 131]. Deswegen wurden in dieser Arbeit die Modellierung, die Detektion und die Kompensation des Einflusses von leitenden Störkörpern auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems in den Vordergrund gestellt.

Die kommerziell verfügbaren elektromagnetischen Trackingsysteme können aus der Sicht des Nutzers als Black-Box-Systeme betrachtet werden. Sie messen die generierten elektromagnetischen Felder und berechnen auf deren Basis die Position und die Ausrichtung des Sensors. Der Anwender hat keinen Zugang zur genauen Beschreibung der Algorithmen hinsichtlich der Positionsbestimmung. Er kann auch nicht die Signalform ändern, mit der die Sendespulen des Trackingsystems betrieben werden. Deswegen war für das vollständige Verständnis und die Behebung der Probleme, bezogen auf den Einfluss der leitenden Objekte auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems, die Entwicklung eines eigenen Trackingsystemdemonstrators im Rahmen dieser Arbeit notwendig. Diese Entwicklung wird im Kapitel 6 im Detail beschrieben.

Das gemeinsame Merkmal der bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten bezüglich der Stördetektion und der Störungsunterdrückung für das elektromagnetische Trackingsystem besteht darin, dass die Methoden auf der Positionsbestimmung mit den kommerziellen Ortungssystemen basieren. Es wurden meistens mathematische und statistische Methoden zur Detektion und Korrektur von Störungen entwickelt. Diese

Maßnahmen basieren auf einer hohen Anzahl an Positionsbestimmungen. Die bisherigen Arbeiten fokussierten vor allem die statischen Fehler. Es sind keine wissenschaftlichen Arbeiten bekannt, in denen die Methoden zur Detektion und Kompensation der dynamischen Fehler der Positionsbestimmung einer einzelnen Empfangsspule bei dem elektromagnetischen Ortungssystem vorgeschlagen und experimentell evaluiert wurden.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine andere Vorgehensweise präferiert. Zur Detektion und Kompensation der Störungen mit dem elektromagnetischen Trackingsystem werden nicht mehrere gemessene Positionsbestimmungen verwendet. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Vorgehensweise basiert auf dem Modell des elektromagnetischen Trackingsystems und der elektrisch leitenden Störkörper. Dieses Modell führt zur Entwicklung der Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen. Die berechnete Position des Sensors kann als eine Funktion der durch das elektromagnetische Trackingsystem gemessenen Feldstärke betrachtet werden. Die Untersuchung des Einflusses der Störung nicht auf die berechnete Position des Sensors, sondern auf die gemessene Spannung an der Empfangsspule führt zum besseren Verständnis dieser Problematik. In dieser Arbeit werden außerdem nicht nur statische, sondern auch dynamische Fehler detektiert und kompensiert.

1.11 Eigener wissenschaftlicher Ansatz

Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems

Für die Evaluierung der entwickelten Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen war ein funktionsfähiger Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems notwendig. Die leitenden und ferromagnetischen Störkörper, die in den minimalinvasiven Eingriffen auftreten können, verursachen einen zusätzlichen Fehler der Positionsbestimmung von 5.1 mm bis 80 mm (siehe Unterkapitel 1.8). Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung mit dem neuen elektromagnetischen Trackingsystem ohne zusätzliche Störungen sollte wesentlich kleiner sein (siehe Kapitel 3), damit der erwartete Fehler durch die leitenden und ferromagnetischen Störkörper von der Ungenauigkeit des Ortungssystems leicht unterschieden werden kann. Aus diesem Grund wurde eine Methode zur Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems entwickelt und mit dem entwickelten Trackingsystemdemonstrator evaluiert.

Modellierung des Trackingsystems und des Störobjektes

Im Rahmen dieser Arbeit wurden das elektromagnetische Trackingsystem und das leitende Störobjekt modelliert (siehe Unterkapitel 2.3). Das Modell in Form eines Ersatzschaltbildes und einer Übertragungsfunktion führt zum besseren Verständnis der Funktionsweise des elektromagnetischen Trackingsystems und der Störungen durch leitende Objekte. Die vorgeschlagenen Modelle wurden messtechnisch mit dem entwickelten Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems evaluiert und haben zur Entwicklung der Methoden, bezogen auf die Detektion und Kompensation der Störungen

durch die leitenden Störkörper, geführt. Die entwickelten Modelle sind essenziell für das Verständnis dieser Methoden.

Methoden zur Detektion der Störungen durch leitende Objekte

Als Nächstes wurden auf der Basis des Modells des Trackingsystems und des leitenden Störkörpers zwei Methoden zur Detektion der Störungen von leitenden Objekten entwickelt.

- **Detektion mit einem Klassifikator auf der Basis der Frequenzabhängigkeit** – Die Methode basiert auf dem Unterschied in der Frequenzabhängigkeit der Störung durch die leitenden Störkörper und der Frequenzabhängigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems.
- **Detektion mit einem Klassifikator auf der Basis der Einschaltvorgänge** – Die Methode basiert auf unterschiedlichen Einschaltvorgängen zwischen dem gestörten und ungestörten elektromagnetischen Trackingsystem.

Die beiden Methoden wurden mit Hilfe des Demonstrators des elektromagnetischen Trackingsystems umgesetzt, quantitativ evaluiert und miteinander verglichen.

Methoden zur Kompensation der Störung durch die elektrisch leitenden Störkörper

Das vorgeschlagene Modell hat auch zur Entwicklung der Methoden zur Kompensation der Störungen durch die leitenden Störkörper geführt (siehe Kapitel 5). Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Methoden vorgeschlagen.

- **Kompensation der Störungen mit der Modellierung der Frequenzabhängigkeit des Störkörpers** – Diese Methode basiert auf der unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit des elektrisch leitenden Störkörpers und des elektromagnetischen Trackingsystems. Auf der Basis mehrerer Spannungsmessungen mit unterschiedlichen Frequenzen und des Modelles des Störkörpers kann die Amplitude der Spannung auf der Empfangsspule für eine niederfrequente Erregung der Sendespule korrigiert werden. Diese durch die Modellierung korrigierte Spannung wird zur Berechnung des Grades der Störung verwendet und anschließend zur Korrektur der gestörten Spannungen führen.
- **Kompensation der Störungen mit Hilfe der Schaltvorgänge** – In den Einschalt- und Ausschaltvorgängen des durch die elektrisch leitenden Körper gestörten elektromagnetischen Trackingsystems finden sich Informationen über die Eigenschaften des Störkörpers. Auf der Basis der Messung und der Analyse der Einschaltvorgänge können die Parameter des Modells des leitenden Störkörpers berechnet werden, was zur Korrektur des Signals führt.

- **Kompensation der Störungen mit Hilfe der quadratischen Erregerspannung** – Auf der Basis des entwickelten Modells des leitenden Störkörpers konnte eine spezielle Signalform entwickelt werden, die die Trennung des gestörten und ungestörten Signals im Zeitbereich ermöglicht. Diese Vorgehensweise benötigt keine Abschätzung des Koeffizienten des Modells.

Die drei vorgeschlagenen Methoden wurden mit Hilfe des entwickelten Trackingsystemdemonstrators umgesetzt, evaluiert und miteinander verglichen.

2 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Ortung mit elektromagnetischen Feldern gegeben. Das Hauptaugenmerk des Unterkapitels 2.1 liegt bei der Erzeugung und Messung elektromagnetischer Felder. Anschließend werden im Unterkapitel 2.2 die theoretischen Grundlagen des elektromagnetischen Trackingsystems dargestellt. Im Unterkapitel 2.3 wird das in dieser Arbeit vorgeschlagene Modell des elektromagnetischen Trackingsystems und des elektrisch leitenden Störkörpers eingeführt.

2.1 Erzeugung und Messung elektromagnetischer Felder

Elektromagnetisches Feld einer Zylinderspule

Die Ortung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem basiert auf der Messung der elektromagnetischen Felder mit einer bekannten Verteilung. Als Quelle des elektromagnetischen Feldes wurde in dieser Arbeit eine zylinderförmige Luftspule verwendet. Eine zylinderförmige Empfangsspule wird als Feldsensor verwendet (siehe Abb. 2.1).

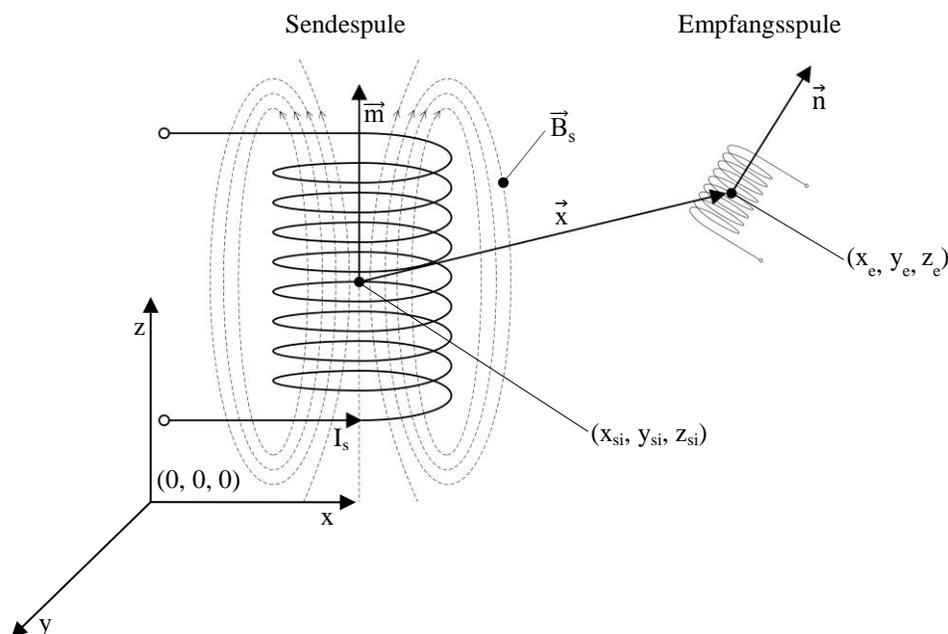


Abb. 2.1 Messung des elektromagnetischen Feldes einer Sendespule

| | |
|----------------------------|---|
| \vec{m} : | magnetisches Dipolmoment der Sendespule |
| \vec{B}_s : | magnetische Flussdichte der Sendespule |
| (x_e, y_e, z_e) | Lage der Empfangsspule |
| (x_{si}, y_{si}, z_{si}) | Lage der Sendespule |
| \vec{x} : | die Lage im Raum, in der die magnetische Flussdichte gemessen wird, relativ zu der Sendespule |
| \vec{n} : | magnetische Achse der Empfangsspule |
| I_s : | Strom der Sendespule |

Die elektromagnetische Flussdichte innerhalb einer langen zylinderförmigen Luftspule ist näherungsweise homogen und kann wie folgt formuliert werden [132].

$$B_s = \mu_0 \cdot H_s = \mu_0 \cdot I_s \cdot \frac{N_s}{l_s} \quad (2.1)$$

| | |
|-----------|--|
| μ_0 : | magnetische Feldkonstante |
| H_s : | magnetische Feldstärke innerhalb einer langen zylinderförmigen Luftspule |
| N_s : | Anzahl der Wicklungen |
| l_s : | Länge der Spule |

Der magnetische Fluss, der den Querschnitt der Spule durchgeht, kann als ein Flächenintegral der magnetischen Flussdichte über die Querschnittsfläche der Spule berechnet werden [133].

$$\Phi_s = \int_{A_s} B_s \, dA_s = \mu_0 \cdot I_s \cdot \frac{N_s}{l_s} \cdot A_s \quad (2.2)$$

| | |
|------------|---|
| Φ_s : | magnetischer Fluss durch die Sendespule |
| A_s : | Querschnittsfläche der Sendespule |

Die Induktivität solcher Spule kann wie folgt definiert werden [132].

$$L_s = \frac{N_s \cdot \Phi_s}{I_L} = \frac{N_s^2 \cdot \mu_0 \cdot A_s}{I_s} \quad (2.3)$$

L_s : Induktivität der Sendespule

Das magnetische Feld außerhalb einer zylindrischen Sendespule kann exakt mit einem analytischen Ausdruck beschrieben werden. Im ersten Schritt wird dafür ein Ausdruck für die magnetische Flussdichte einer stromdurchflossenen kreisförmigen Leiterschleife eingeführt (siehe Abb. 2.2).

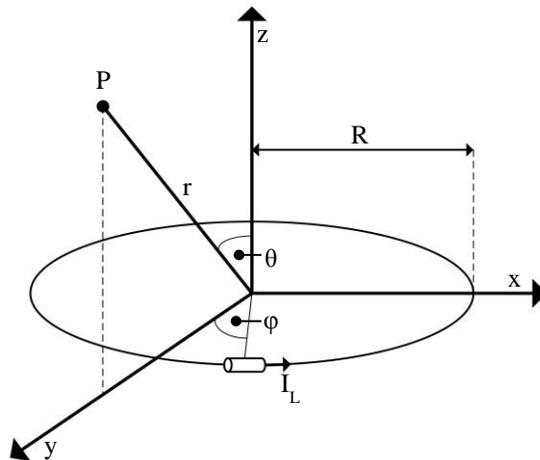


Abb. 2.2 kreisförmige Leiterschleife durchgeflossen durch Strom I_L ²

Das Vektorpotential dieser Leiterschleife in einem beliebigen Punkt im Raum wird wie folgt in Kugelkoordinaten definiert [133–134]:

$$\begin{aligned} A(r, \theta) &= \frac{\mu_0 \cdot I_L \cdot R}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\varphi') \, d\varphi'}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi')}} = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{4 \cdot R \cdot I_L}{\sqrt{R^2 + r^2 + 2 \cdot R \cdot r \cdot \sin(\theta)}} \cdot \left[\frac{(2 - k^2) \cdot K(k^2) - 2 \cdot E(k^2)}{k^2} \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

$A(r, \theta)$: Vektorpotential der Leiterschleife

μ_0 : magnetische Feldkonstante

I_L : Strom in der Leiterschleife

² Abbildung des Autors auf der Basis der Abbildung 5.5 in [133]

- R: Radius der Leiterschleife
 (r, φ, θ): beliebiger Punkt im Raum in Kugelkoordinaten
 k²: Argument des elliptischen Integrals (siehe Gleichung (2.5))
 K(k²): elliptisches Integral 1. Ordnung des Argumentes k²
 E(k²): elliptisches Integral 2. Ordnung des Argumentes k²

$$k^2 = \frac{4 \cdot R \cdot r \cdot \sin(\theta)}{R^2 + r^2 + 2 \cdot R \cdot r \cdot \sin(\theta)} \quad (2.5)$$

Die magnetische Flussdichte der Leiterschleife lässt sich aus dem eingeführten Vektorpotential wie folgt berechnen.

$$\vec{B}(r, \theta) = \nabla \times \vec{A}(r, \theta) \quad (2.6)$$

Der analytische Ausdruck für die Verteilung der magnetischen Flussdichte einer Leiterschleife in einem beliebigen Raumpunkt wurde in der Arbeit von Simpson im kartesischen Koordinatensystem eingeführt [134]:

$$B_x = \frac{C \cdot x \cdot z}{2 \cdot \alpha^2 \cdot \beta \cdot \rho^2} \cdot [(R^2 + r^2) \cdot E(k^2) - \alpha^2 \cdot K(k^2)]$$

$$B_y = \frac{C \cdot y \cdot z}{2 \cdot \alpha^2 \cdot \beta \cdot \rho^2} \cdot [(R^2 + r^2) \cdot E(k^2) - \alpha^2 \cdot K(k^2)] = \frac{y}{x} \cdot B_x$$

$$B_z = \frac{C}{2 \cdot \alpha^2 \cdot \beta} \cdot [(R^2 - r^2) \cdot E(k^2) + \alpha^2 \cdot K(k^2)]$$

$$C = \frac{\mu_0 \cdot I_L}{\pi} \quad (2.7)$$

$$\alpha^2 = R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot \rho$$

$$\beta^2 = R^2 + r^2 + 2 \cdot R \cdot \rho$$

$$\rho^2 = x^2 + y^2$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$k^2 = 1 - \frac{\alpha^2}{\beta^2}$$

B_x, B_y, B_z: magnetische Flussdichte der Leiterschleife im kartesischen Koordinatensystem

C, α, β, ρ, r: Koeffizienten der Gleichung

Die elektromagnetische Feldverteilung einer Sendespule (siehe Abb. 2.1) kann mit der Superposition der Felder von mehreren räumlich verteilten Leiterschleifen bestimmt werden [16, 134]. Diese Formulierung der Feldverteilung ist zwar genau, auch in der direkten Nähe der Sendespule, aber die numerische Lösung der elliptischen Integrale 1. und 2. Ordnung erhöht die Zeit der Positionsbestimmung [16].

Die Feldverteilung einer Spule kann auch mit einem Dipol abgebildet werden. Dieses Modell bietet eine genaue Abbildung der Feldverteilung außerhalb einer realen kurzen Zylinderspule, insbesondere im großen Abstand im Vergleich zu den Abmessungen der Spule [16]. Der Fehler in der Abbildung der Feldverteilung so einer Spule mit einem magnetischen Dipol kann laut der Studie von Paperno im Abstand von vier Radien der Sendespule lediglich 0.28% betragen, vorausgesetzt das Verhältnis zwischen dem Radius und der Länge der Spule liegt bei 1.72 zu 1 [16]. Die Positions- und Ausrichtungsbestimmung auf Basis der Dipolverteilung ist im Vergleich zu der analytischen Bestimmung der Feldverteilung einer Zylinderspule weniger rechenintensiv [16]. Die räumliche Verteilung der magnetischen Flussdichte \vec{B} eines magnetischen Dipols kann wie folgt beschrieben werden [133]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \left(\frac{3 \cdot \vec{x} \cdot (\vec{m} \cdot \vec{x})}{|\vec{x}|^5} - \frac{\vec{m}}{|\vec{x}|^3} \right) \quad (2.8)$$

Das magnetische Dipolmoment \vec{m} einer Sendespule wird wie folgt in Kugelkoordinaten beschrieben [133]:

$$\vec{m} = N_s \cdot I_s \cdot \vec{A}_s = N_s \cdot I_s \cdot |\vec{A}_s| \cdot \begin{pmatrix} \sin(\theta_s) \cdot \cos(\varphi_s) \\ \sin(\theta_s) \cdot \sin(\varphi_s) \\ \cos(\theta_s) \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

θ_s : Polarwinkel des magnetischen Dipols der Sendespule

φ_s : Azimutwinkel des magnetischen Dipols der Sendespule

Die Position der Empfangsspule im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems wird durch den Vektor \vec{x} beschrieben (siehe Abb. 2.1).

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_{si} - x_e \\ y_{si} - y_e \\ z_{si} - z_e \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Messung des elektromagnetischen Feldes einer Sendespule

Die mit dem Wechselstrom eingespeiste Sendespule generiert das elektromagnetische Wechselfeld, das in dieser Arbeit mit Hilfe einer Empfangsspule gemessen wird. Die Feldmessung beruht auf der Induktion der Spannung an der Empfangsspule, die zur zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte proportional ist. Die Induktion der Spannung an der Empfangsspule wird schematisch in der Abb. 2.3 dargestellt.

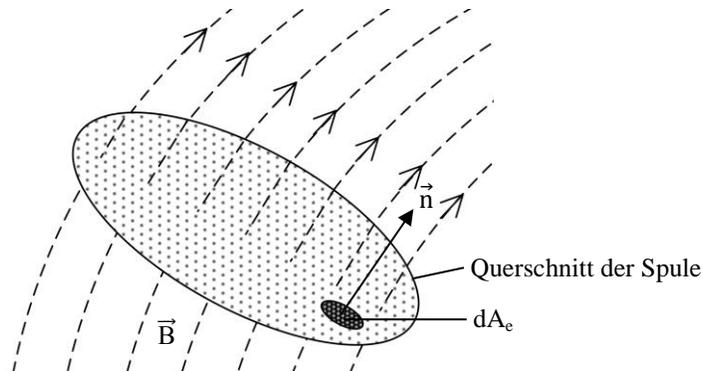


Abb. 2.3 Induktion der Spannung an der Empfangsspule

Der, durch die Spule umfasste, magnetische Fluss wird in der Gleichung (2.11) eingeführt [133].

$$\phi_e = \int_{A_e} (\vec{B}_e(\vec{x}, t) \cdot \vec{n}) dA_e \quad (2.11)$$

ϕ_e : magnetischer Fluss durch die Empfangsspule

A_e : Querschnittsfläche der Empfangsspule

$\vec{B}_e(\vec{x}, t)$: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte in der Empfangsspule \vec{x}

\vec{n} : Einheitsvektor mit der Ausrichtung der Querschnittsfläche der Empfangsspule

Die Empfangsspule misst das Integral der magnetischen Flussdichte über die Querschnittsfläche der Spule A_e , wobei zur Berechnung der Lage und der Ausrichtung des Sensors die magnetische Flussdichte in einem Punkt benötigt wird [18]. Aus diesem Grund sollen die Empfangsspulen einen möglichst kleinen Durchmesser aufweisen, damit der Einfluss der Inhomogenität des elektromagnetischen Feldes auf die Genauigkeit der Ortung begrenzt wird.

Die Querschnittsfläche der Empfangsspule soll, damit die Verteilung magnetischer Flussdichte als homogen angenommen werden kann, im Vergleich mit dem Messvolumen des Trackingsystems klein sein. Die Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems soll gleichzeitig eine hohe Induktivität zeigen. Diese beiden Ziele lassen sich vereinbaren, wenn eine miniaturisierte Empfangsspule des

elektromagnetischen Trackingsystems mehrere Wicklungen und gleichzeitig einen permeablen Kern besitzt.

Der Einheitsvektor \vec{n} beschreibt die magnetische Achse der Empfangsspule (siehe Abb. 2.1). Die magnetische Flussdichte des magnetischen Dipols wird nur entlang dieser Achse mit der Empfangsspule gemessen.

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} \sin(\theta_e) \cdot \cos(\varphi_e) \\ \sin(\theta_e) \cdot \sin(\varphi_e) \\ \cos(\theta_e) \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

θ_e : Polarwinkel der Empfangsspule

φ_e : Azimutwinkel der Empfangsspule

Die Spannung an der Empfangsspule ist proportional zur Änderung des magnetischen Flusses in der Spule und der Anzahl der Wicklungen [132].

$$U_e = - N_e \cdot \frac{d\Phi_e}{dt} = - N_e \cdot \frac{d}{dt} \int_{A_e} (\vec{B}_e(\vec{x}, t) \cdot \vec{n}) dA_e \quad (2.13)$$

U_e : Amplitude der Spannung an der Empfangsspule

N_e : Anzahl der Wicklungen der Empfangsspule

Bei einer sinusförmigen Erregung der Sendespule ist auch der zeitliche Verlauf der magnetischen Flussdichte sinusförmig. Die Amplitude der Spannung an der Empfangsspule wird wie folgt formuliert:

$$\vec{B}_e(\vec{x}, t) = B_e(\vec{x}) \cdot \sin(\omega t) = \mu_0 \cdot \mu_e \cdot \vec{H}_e(\vec{x}) \cdot \sin(\omega t) \quad (2.14)$$

$$U_e = - N_e \cdot \frac{d}{dt} \int_A (\vec{B}_e(\vec{x}, t) \cdot \vec{n}) dA_e = N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_e(\vec{x}) \cdot \cos(\omega t) \quad (2.15)$$

$B(\vec{x})$: Amplitude des zeitlichen Verlaufs der magnetischen Flussdichte in der Empfangsspule

ω : Kreisfrequenz des Stromes in der Sendespule

μ_e : relative Permeabilität des Kerns der Empfangsspule

$\vec{H}_e(\vec{x})$: Magnetfeld im Mittelpunkt der Empfangsspule \vec{x}

2.2 Ortung mit elektromagnetischen Feldern

Der hier beschriebene Algorithmus zur Positionsbestimmung wurde auf der Basis von früheren Publikationen, z. B. den Arbeiten von Plotkin [91, 93] am Lehrstuhl für Medizinische Telematik und Medizintechnik im Rahmen einer studentischen Arbeit entwickelt und implementiert [111]. Die mit der Empfangsspule gemessenen elektromagnetischen Felder der Sendespule führen zur Berechnung der Lage und Ausrichtung der Empfangsspule. Die Verteilung des elektromagnetischen Feldes der Sendespulen wurde in dieser Arbeit mit Hilfe der Verteilung des elektromagnetischen Feldes eines magnetischen Dipols approximiert. Diese vereinfachte Vorgehensweise wurde schon in der Arbeit von Raab aus dem Jahr 1979 vorgeschlagen [15]. Diese Approximation ist einfach für die Implementierung und bietet eine gute Abbildung des magnetischen Feldes einer Spule, insbesondere bei großen Abständen zwischen der Sende- und Empfangsspule [16].

An der Empfangsspule induziert sich eine zur Änderung der magnetischen Flussdichte proportionale Spannung, die mit einem Verstärker verstärkt und einem Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler) gemessen wird (siehe Gleichung (2.16)).

$$U_{egi} = - G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{ei}(\vec{x}) \quad (2.16)$$

U_{egi} : Amplitude der Spannung an der Empfangsspule nach der Verstärkung mit einem Verstärker

G : Verstärkung des Verstärkers

Die Berechnung der Lage und der Ausrichtung der Empfangsspule im Raum basiert auf dem Vergleich der berechneten U_{egi} mit der gemessenen Amplitude der Spannung U_{mi} auf der Empfangsspule. Der Unterschied zwischen der Amplitude der beiden Spannungen wird wie folgt definiert:

$$r_i(\mathbf{x}) = U_{mi} - U_{egi} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ \theta_e \\ \varphi_e \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$r_i(\mathbf{x})$: Unterschied zwischen der gemessenen und der berechneten Amplitude der Spannungsamplitude auf der Empfangsspule

U_{mi} : gemessene Spannungsamplitude auf der Empfangsspule

\mathbf{x} : Freiheitsgrade des Ortungssystems

Die Lage und die Ausrichtung der Empfangsspule werden als Freiheitsgrade im Rahmen des Optimierungsverfahrens betrachtet. Die Lage der Empfangsspule wird mit drei Freiheitsgraden und die Ausrichtung der Empfangsspule mit zwei Freiheitsgraden beschrieben. Aus diesem Grund müssen die Spannungen mit Hilfe der Empfangsspule von mindestens fünf Sendespulen mit unterschiedlichen Lagen und Ausrichtungen gemessen werden. Die fünf gemessenen Spannungen auf der Empfangsspule von fünf unterschiedlichen Sendespulen bilden fünf Gleichungen. Die Lage und die Ausrichtung der Empfangsspule werden mit Hilfe der Minimierung dieses Gleichungssystems berechnet.

Die Nutzung von mehr als fünf Gleichungen führt zur Überbestimmung des Gleichungssystems, was die Genauigkeit der Positionsbestimmung erhöht. In dem entwickelten Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems wird die Minimierung von acht anstatt von fünf Gleichungen durchgeführt. Das minimierte Gleichungssystem wird wie folgt definiert:

$$\begin{cases} r_1(\mathbf{x}) = U_{m1} - (-G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{e1}(\vec{x})) \\ r_2(\mathbf{x}) = U_{m1} - (-G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{e2}(\vec{x})) \\ r_3(\mathbf{x}) = U_{m3} - (-G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{e3}(\vec{x})) \\ r_4(\mathbf{x}) = U_{m4} - (-G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{e4}(\vec{x})) \\ r_5(\mathbf{x}) = U_{m5} - (-G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{e5}(\vec{x})) \\ r_6(\mathbf{x}) = U_{m6} - (-G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{e6}(\vec{x})) \\ r_7(\mathbf{x}) = U_{m7} - (-G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{e7}(\vec{x})) \\ r_8(\mathbf{x}) = U_{m8} - (-G \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot B_{e8}(\vec{x})) \end{cases} \quad (2.19)$$

Die Freiheitsgrade des Gleichungssystems (2.19) werden im Sinne der Minimierung der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Es stellt ein Verfahren dar, welches die Minimierung des Unterschiedes zwischen einem Modell und den Messwerten ermöglicht [135]. Dies setzt folgende Form der minimierten Funktion voraus [136].

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^m (r_i(\mathbf{x}))^2 \quad (2.20)$$

$f(\mathbf{x})$ Summe der Fehlerquadrate

m : Anzahl der Gleichungen

Zur Minimierung der Summe der Fehlerquadrate wurde der *Levenberg-Marquardt* Algorithmus verwendet. In diesem Algorithmus werden im ersten Schritt die Jacobi-Matrix von $r_i(\mathbf{x})$ und der Gradient, sowie die Hesse-Matrix von $f(\mathbf{x})$ bestimmt [136–137]:

$$J(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial r_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_m(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial r_m(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\nabla f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m r_i(\mathbf{x}) \cdot \nabla r_i(\mathbf{x}) = J(\mathbf{x})^T \cdot \mathbf{r}_i(\mathbf{x}) \quad (2.22)$$

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}) = J(\mathbf{x})^T \cdot J(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^k r_i(\mathbf{x}) \cdot \nabla^2 r_i(\mathbf{x}) \quad (2.23)$$

$J(\mathbf{x})$: Jacobi-Matrix des Unterschiedes zwischen der gemessenen und der berechneten Spannungsamplitude auf der Empfangsspule

n : Anzahl der Freiheitsgrade

$\nabla f(\mathbf{x})$: Gradient der Summe der Fehlerquadrate

$\nabla r_i(\mathbf{x})$: Gradient des Unterschiedes zwischen der gemessenen und der berechneten Spannungsamplitude auf der Empfangsspule

$\nabla^2 f(\mathbf{x})$: Hesse-Matrix der Summe der Fehlerquadrate

$\nabla^2 r_i(\mathbf{x})$: Hesse-Matrix des Unterschiedes zwischen der gemessenen und der berechneten Spannungsamplitude auf der Empfangsspule

Bei der Minimierung der Fehlerquadrate kann die Hesse-Matrix wie folgt approximiert werden [136].

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}) \approx J(\mathbf{x})^T \cdot J(\mathbf{x}) \quad (2.24)$$

Die Freiheitsgrade des Gleichungssystems (2.19) werden folgendermaßen bestimmt [136, 138].

$$\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{x}_j - (H + \lambda \cdot \text{diag}[H])^{-1} \cdot \nabla f(\mathbf{x}_j) = \mathbf{x}_j - \left(J(\mathbf{x}_j)^T \cdot J(\mathbf{x}_j) + \lambda \cdot \text{diag}[J(\mathbf{x}_j)^T \cdot J(\mathbf{x}_j)] \right)^{-1} \cdot J(\mathbf{x}_j)^T \cdot \mathbf{r}(\mathbf{x}_j) \quad (2.25)$$

$$\text{diag}[J(\mathbf{x}_j)^T \cdot J(\mathbf{x}_j)] = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

H : Hesse-Matrix evaluiert im Punkt \mathbf{x}_j

λ : Dämpfungsfaktor

diag[H]: Diagonale der Hesse-Matrix

Die iterative Bestimmung der Freiheitsgrade beginnt mit einem großen Wert von λ . Dabei verhält sich der Algorithmus ähnlich dem Gradientenverfahren. Da die Hesse-Matrix proportional zur Krümmung der Funktion ist, wird diese im *Levenberg-Marquardt* Algorithmus zur Skalierung des Gradienten verwendet. Dies resultiert mit einem großen Schritt in Richtung eines kleinen Gradienten [136]. Nach jeder Iteration, die zu keiner Minderung vom $f(\mathbf{x}_{j+1})$ führt, wird λ verkleinert. Bei kleinen Werten von λ wirkt der *Levenberg-Marquardt* Algorithmus ähnlich dem *Gauss-Newton* Algorithmus [139]. Wegen der Robustheit und der schnelleren Konvertierungszeiten wurde der *Levenberg-Marquardt* Algorithmus zur Positionsbestimmung bereits in mehreren Entwicklungen der elektromagnetischen Ortung verwendet [25, 93].

In vielen computergestützten Eingriffen muss die Spitze eines rigiden Instrumentes visualisiert werden, wobei der Sensor des elektromagnetischen Trackingsystems nicht an der Spitze angebracht ist. In solchen Fällen kann ein Offsetvektor zwischen der Lage des Sensors und der Lage der Spitze berechnet werden (engl. *tool tip calibration*). Die Lage der Spitze eines Instrumentes, die in der Symmetrieachse des Sensors liegt, kann mit fünf Freiheitsgraden eindeutig bestimmt werden. Jedoch ist für die eindeutige Bestimmung der Lage der Spitze eines Instrumentes, die nicht in der Symmetrieachse des Sensors liegt, die Bestimmung der Position und Ausrichtung mit sechs Freiheitsgraden notwendig, weil diese auch die Rotation des Sensors um die eigene Symmetrieachse berücksichtigt.

Das entwickelte Trackingsystem berechnet die Lage und Ausrichtung des Sensors mit fünf Freiheitsgraden. Die Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit sechs Freiheitsgraden ist mit einer einzelnen axialsymmetrischen Empfangsspule als Feldsensor nicht möglich. Zur zusätzlichen Berechnung der Rotation um die eigene Symmetrieachse wurde ein Feldsensor benötigt, der entweder die elektromagnetische Flussdichte der Sendespule als einen dreidimensionalen Vektor misst oder aus zwei Empfangsspulen besteht. Die zweite Lösung wird von der Firma NDI für das Trackingsystem Aurora angeboten. Der Sensor für die Positionsbestimmung mit sechs Freiheitsgraden besteht aus zwei unter einem Winkel zueinander liegenden Empfangsspulen [105].

2.3 Modellierung des elektromagnetischen Trackingsystems und des Störkörpers

Die in dieser Arbeit präsentierten Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen durch elektrisch leitende Objekte basieren auf dem Modell des elektromagnetischen Trackingsystems und dem Modell des elektrisch leitenden Störkörpers. Die Modelle beschreiben die Abhängigkeit des Signals an den Anschlüssen der Empfangsspule von dem Signal an den Anschlüssen der Sendespule des elektromagnetischen Trackingsystems. Die beiden Modelle wurden in Form eines Ersatzschaltbildes und einer Übertragungsfunktion formuliert und experimentell validiert.

Das in dieser Arbeit verwendete Modell der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems und das Modell des Störkörpers wurden von dem Autor veröffentlicht [140–143].

Ersatzschaltbild des elektromagnetischen Trackingsystems

Der entwickelte Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems besteht aus acht Sendespulen und einer Empfangsspule. Die Sendespulen des Feldgenerators (siehe Kapitel 6) werden nacheinander mit Strom eingespeist. Wenn eine der Sendespulen mit Strom versorgt wird, werden die anderen Sendespulen hochohmig geschaltet. Deswegen wird in dieser Arbeit angenommen, dass die mit dem Strom eingespeiste Sendespule keine messbare Spannung in die nicht verwendeten Sendespulen induziert. Aus diesem Grund wird die Signalübertragung im elektromagnetischen Trackingsystem als eine einzelne Sendespule modelliert, die mit einer Empfangsspule magnetisch gekoppelt ist.

Die Signalübertragung in die magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule weist eine Ähnlichkeit zu einem Lufttransformator mit sehr niedrigem Wirkungsgrad auf. Die primäre Seite dieses Systems, d. h. die Sendespule, wird an eine Spannungsquelle angeschlossen. Die mit Wechselstrom durchflossene Sendespule generiert ein magnetisches Feld, das die Spannung an der Empfangsspule induziert. Die sekundäre Seite dieses Systems, d. h. die Empfangsspule, wird an ein Messsystem angeschlossen. Wegen des hohen Innenwiderstandes des AD-Wandlers dieses Messsystems ($10\text{ G}\Omega$ [144] – siehe Kapitel 6) können die magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems als ein Lufttransformator im Leerlauf betrachtet werden. Die Amplitude des Stroms in der Empfangsspule I_2 (siehe Abb. 2.4) ist deswegen vernachlässigbar klein.

In der Abb. 2.4 ist das Ersatzschaltbild der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule dargestellt.

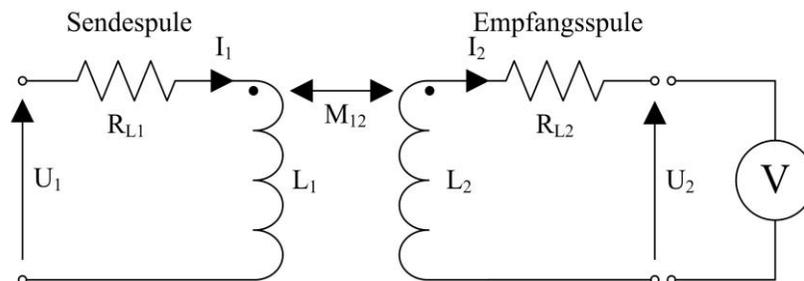


Abb. 2.4 Ersatzschaltbild der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule³

- U_1 : Spannung an der Sendespule
- U_2 : Spannung an der Empfangsspule
- I_1 : Strom in der Sendespule

³ Eine ähnliche Abbildung wurde von dem Autor in den Publikationen des Autors [141, 143] verwendet.

| | |
|------------|---|
| I_2 : | Strom in der Empfangsspule |
| R_{L1} : | Widerstand der Sendespule |
| R_{L2} : | Widerstand der Empfangsspule |
| L_1 : | Induktivität der Sendespule |
| L_2 : | Induktivität der Empfangsspule |
| M_{12} : | Gegeninduktivität zwischen der Sende- und Empfangsspule |

In dem vorgeschlagenen Ersatzschaltbild hängt der Strom der Sendespule I_1 von der Spannung an der Sendespule U_1 , von dem Widerstand R_{L1} und von der Induktivität L_1 der Sendespule ab. Der Einfluss der Reaktanz der magnetischen Kopplung auf die Impedanz der Sendespule wird als vernachlässigbar klein angenommen und nicht in dem Modell berücksichtigt, weil dieser Einfluss proportional zum vernachlässigbar kleinen Strom in der Empfangsspule ist. Die Spannung an der Empfangsspule U_2 hängt neben der Gegeninduktivität M_{12} , von der Amplitude und dem zeitlichen Verlauf des Stromes in der Sendespule I_1 ab. Die Gegeninduktivität zwischen der Sende- und Empfangsspule M_{12} hängt von der jeweiligen Lage und der Ausrichtung der Empfangsspule relativ zur Sendespule ab. Die Abmessungen, der Aufbau und die Anzahl der Wicklungen in der Sendespule üben einen Einfluss auf die Induktivität L_1 und den Widerstand R_{L1} der Sendespule aus. Es wird in dieser Arbeit angenommen, dass sich diese Größen in der Zeit nicht ändern. Die Induktivität L_2 und der Widerstand R_{L2} der Empfangsspule zeigen keinen messbaren Einfluss auf die Spannung an der Empfangsspule, weil die Impedanz der Empfangsspule vernachlässigbar im Vergleich zu dem Innenwiderstand des AD-Wandlers ($10\text{ G}\Omega$) ist. Aus diesem Grund kann der Spannungsabfall an der Impedanz der Empfangsspule vernachlässigt werden.

Übertragungsfunktion des elektromagnetischen Trackingsystems

Die magnetisch gekoppelte Sende- und Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems können als ein lineares zeitinvariantes System betrachtet werden. Auf der Basis des Ersatzschaltbildes der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule wird eine Übertragungsfunktion $G_{12}(s)$ zwischen der Spannung an der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule eingeführt (2.27) – (2.31). Die vorgeschlagene Übertragungsfunktion wird bei der Beschreibung der Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen durch die elektrisch leitenden Störkörper verwendet, die in den Kapiteln 4 und 5 präsentiert wurden.

$$U_1(s) = R_{L1} \cdot I_1(s) + L_1 s \cdot I_1(s)$$

$$I_1(s) = \frac{U_1(s)}{R_{L1} + L_1 s} \tag{2.27}$$

$$U_2(s) = M_{12} \cdot s \cdot I_1(s)$$

$$U_2(s) = M_{12} \cdot s \cdot \frac{U_1(s)}{R_{L1} + L_1 s}$$

$$M'_{12} = \frac{M_{12}}{L_1} \tag{2.28}$$

$$\tau_1 = \frac{L_1}{R_{L1}} \tag{2.29}$$

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_1} \tag{2.30}$$

$$G_{12}(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{M'_{12} \cdot s}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)} \tag{2.31}$$

$U_1(s)$: Laplace-Transformation der Spannung an der Sendespule

$I_1(s)$: Laplace-Transformation des Stromes in der Sendespule

$U_2(s)$: Laplace-Transformation der Spannung an der Empfangsspule

M'_{12} : normierte Gegeninduktivität zwischen der Sende- und Empfangsspule

τ_1 : Zeitkonstante der Sendespule

f_1 : Grenzfrequenz der Sendespule

$G_{12}(s)$: Übertragungsfunktion zwischen der Spannung an der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule

Die Übertragungsfunktion $G_{12}(s)$ im Laplace-Bereich (2.31) beinhaltet im Zähler eine Multiplikation mit dem komplexen Frequenzparameter s . Diese Multiplikation im Zeitbereich entspricht einer Ableitung nach der Zeit. Deswegen ist die Spannung an der Empfangsspule U_2 proportional zur Zeitableitung der Spannung an der Sendespule U_1 . Das elektromagnetische Trackingsystem kann wegen der Übertragungsfunktion als ein Hochpassfilter erster Ordnung betrachtet werden. Die niederfrequenten Signale werden in dem Trackingsystem gedämpft. Signale mit einer hohen Frequenz werden verstärkt, da bei höheren Frequenzen die Reaktanz eine dominierende Rolle in der Impedanz der Sendespule spielt. Die Impedanz nimmt näherungsweise proportional mit steigender Frequenz der Erregerspannung zu. Diese steigende Impedanz bei der konstanten Amplitude der Erregerspannung führt zum Abfall der Amplitude des Stromes in der Sendespule, der umgekehrt proportional zur Frequenz ist. Infolgedessen führt die steigende Frequenz der Erregerspannung ab der Grenzfrequenz des Systems zur nicht wesentlichen Zunahme der Spannung an der Empfangsspule U_2 , die auch proportional zur Ableitung des Stromes in der Sendespule nach der Zeit ist.

Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems

Die Validierung der Übertragungsfunktion könnte mit der Analyse der Impulsantwort des Systems erfolgen. Dafür sollte das System mit einem Dirac-Impuls $\delta(t)$ eingespeist werden. Die gemessene Antwort des Systems würde die Information über die Übertragungsfunktion des modellierten Systems beinhalten. Die modellierte Antwort des Systems wird im Laplace-Bereich in der Gleichung (2.32) präsentiert. Die Impulsantwort des Systems wird dann mit Hilfe der invertierten Laplace-Transformation in den Zeitbereich transformiert (siehe Gleichungen (2.33) – (2.34)).

$$U_2(s) = G_{12}(s) \cdot U_1(s) = G_{12}(s) \cdot U_d \cdot 1(s) \quad (2.32)$$

$$U_2(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G_{12}(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{U_d \cdot M'_{12} \cdot s}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)}\right\} \quad (2.33)$$

$$U_2(t) = U_d \cdot \left(M'_{12} \cdot \delta(t) - \frac{M'_{12}}{\tau_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \quad (2.34)$$

- U_d : Stärke des Dirac-Impulses definiert als die Fläche des Impulses (in dieser Arbeit ist U_d gleich 1 Volt · Sekunde)
- $1(s)$: Dirac-Impuls im Laplace-Bereich
- $\delta(t)$: Dirac-Impuls im Zeitbereich

Die Generierung eines Pulses mit einer unendlichen Amplitude und einer unendlich kleinen Pulsdauer (d. h. die Generierung eines Dirac-Impulses $\delta(t)$) ist messtechnisch unmöglich. Die Abbildung des Dirac-Impulses mit einem rechteckigen Verlauf und einer endlich hohen Amplitude sowie einer endlich kleinen Zeitdauer der Spannung führt zu einem zusätzlichen Fehler der Abbildung [145]. Deswegen wird die Validierung der Übertragungsfunktion in dieser Arbeit nicht mit Hilfe der Analyse der Impulsantwort erfolgen.

Die messtechnische Validierung des Modells findet mit zwei unterschiedlichen Methoden statt. Im ersten Schritt wird die Sprungantwort des Systems gemessen und mit der simulierten Sprungantwort verglichen. Im zweiten Schritt wird der Frequenzgang des Systems analysiert und mit dem simulierten Frequenzgang in Beziehung gesetzt [145]. Der theoretische Verlauf der Sprungantwort der Übertragungsfunktion der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule wird in den Gleichungen (2.35) – (2.37) präsentiert:

$$U_2(s) = G_{12}(s) \cdot U_1(s) = G_{12}(s) \cdot \frac{U_e}{s} = \frac{G_{12}(s)}{s} \quad (2.35)$$

$$U_2(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{G_{12}(s)}{s} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{M'_{12} \cdot s}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s \right)} \cdot \frac{U_e}{s} \right\} \quad (2.36)$$

$$U_2(t) = U_e \cdot M'_{12} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (2.37)$$

U_e : Amplitude der Einheitssprungfunktion (in dieser Arbeit ist U_e gleich 1 Volt)

$\frac{1}{s}$ Einheitssprungfunktion im Laplace-Bereich

Neben den zwei magnetisch gekoppelten Spulen übt auch der Verstärker der Empfangsspule einen Einfluss auf die resultierende Sprungantwort aus. Der Einfluss des Verstärkers kann als ein Einfluss eines Tiefpassfilters mit einer Grenzfrequenz von 2400 Hz betrachtet werden [146]. Die Zeitkonstante des Verstärkers τ_v kann auch in der resultierenden Sprungantwort beobachtet werden (siehe Abb. 2.5). Wegen der Komplexität der Antwort des Systems und der kleinen Zeitkonstante (0.06 ms) wird der Einfluss des Verstärkers in der berechneten Übertragungsfunktion des Systems nicht berücksichtigt.

Im nächsten Teil dieses Unterkapitels wird ein Modell der Störung durch die elektrisch leitenden Störkörper eingeführt. Die Sprungantwort dieses Modells beinhaltet eine Zeitkonstante des Störkörpers τ_{ST} , die wesentlich größer als die Zeitkonstante der Sendespule (τ_1) und die Zeitkonstante des Verstärkers τ_v ist. Damit die Zeitkonstante des Störkörpers von den Zeitkonstanten der Sendespule und des Verstärkers leichter unterschieden werden kann, sollte sie möglichst stark von den beiden Zeitkonstanten abweichen. Deswegen wurde an jeder Sendespule ein zusätzlicher Widerstand von 10 Ω in Reihe angeschlossen. Dies führt zur Minderung der Zeitkonstante der Sendespule und erhöht den Unterschied zwischen den bekannten Zeitkonstanten der Sendespule bzw. des Verstärkers und der Zeitkonstante des Störkörpers. Mit Hilfe dieses zusätzlichen Widerstandes wird die Zeitkonstante der Sendespulen von 0.234 ms auf 0.084 ms reduziert. Diese Vorgehensweise vereinfacht die Unterscheidung zwischen dem elektromagnetischen Trackingssystem und der Antwort des Störkörpers.

In der Abb. 2.5a wird der gemessene rechteckige Verlauf der Spannung an den Anschlüssen der Sendespule gezeigt. Die gemessene und simulierte Sprungantwort der magnetisch gekoppelten Send- und Empfangsspule (siehe Gleichung (2.37)) ist in der Abb. 2.5b dargestellt. Die gemessene und die simulierte Sprungantwort der magnetisch gekoppelten Send- und Empfangsspule mit einem zusätzlichen Widerstand von 10 Ω wird in der Abb. 2.5c wiedergegeben. Die Koeffizienten der Gleichung (2.37) wurden mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate an die gemessenen Verläufe angepasst.

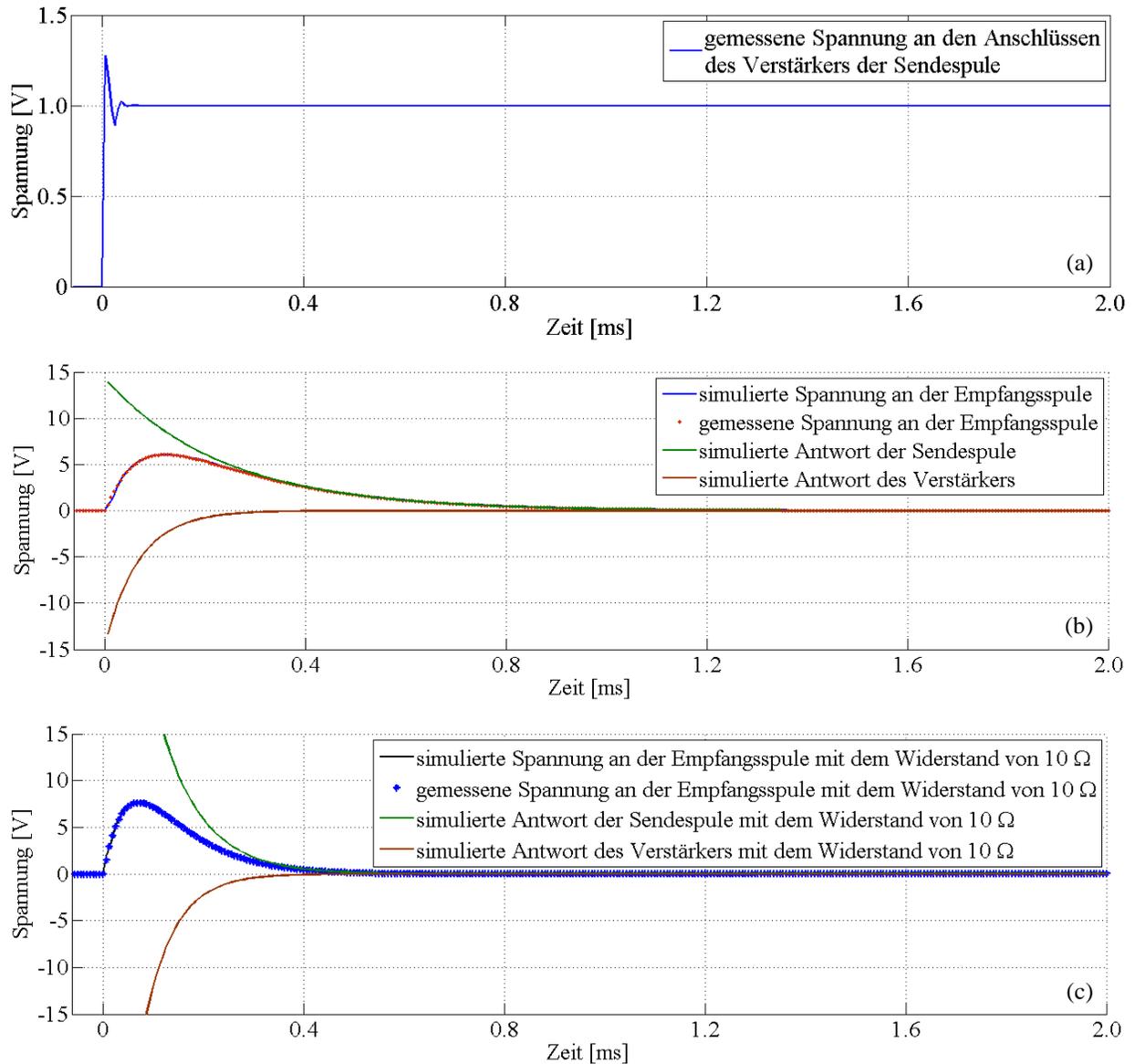


Abb. 2.5 Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe einer Sprungantwort: a) gemessenes rechteckiges Signal an den Anschlüssen des Verstärkers der Sendespule, b) gemessene und simulierte Antwort des Trackingsystems, c) gemessene und simulierte Antwort des Trackingsystems mit einem zusätzlichen Widerstand von 10Ω

Als zweite Methode zur Evaluierung der Übertragungsfunktion wird der simulierte Frequenzgang des Systems mit dem gemessenen verglichen [145]. Diese Methode analysiert die Amplitude (Amplitudenfrequenzgang) und die Phasenverschiebung zwischen dem Ein- und Ausgang des Systems (Phasenfrequenzgang) als Funktion der Frequenz der sinusförmigen Erregung am Eingang des Systems. Die Sendespule des elektromagnetischen Trackingsystems wird mit einer sinusförmigen Erregung eingespeist, deren Frequenz schrittweise geändert wird. Der gemessene Amplituden- und Phasenfrequenzgang wird mit einem theoretischen Verlauf des Frequenzgangs des Systems verglichen, der in den Gleichungen (2.38) – (2.40) mathematisch beschrieben wird:

$$U_2(s) = G_{12}(s) \cdot U_1(s) = \frac{s \cdot M'_{12}}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)} \cdot \frac{U_s \cdot \omega}{(\omega^2 + s^2)} = \frac{U_s \cdot \omega \cdot s \cdot M'_{12}}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot (\omega^2 + s^2)} \quad (2.38)$$

$$U_2(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ G_{12}(s) \cdot \frac{U_s \cdot \omega}{(\omega^2 + s^2)} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{U_s \cdot \omega \cdot s \cdot M'_{12}}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot (\omega^2 + s^2)} \right\} \quad (2.39)$$

$$U_2(t) = \frac{U_s \cdot M'_{12} \cdot \omega \cdot \tau_1 \cdot \left(\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \omega \cdot \tau_1 \cdot \sin(\omega t) \right)}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1)} \quad (2.40)$$

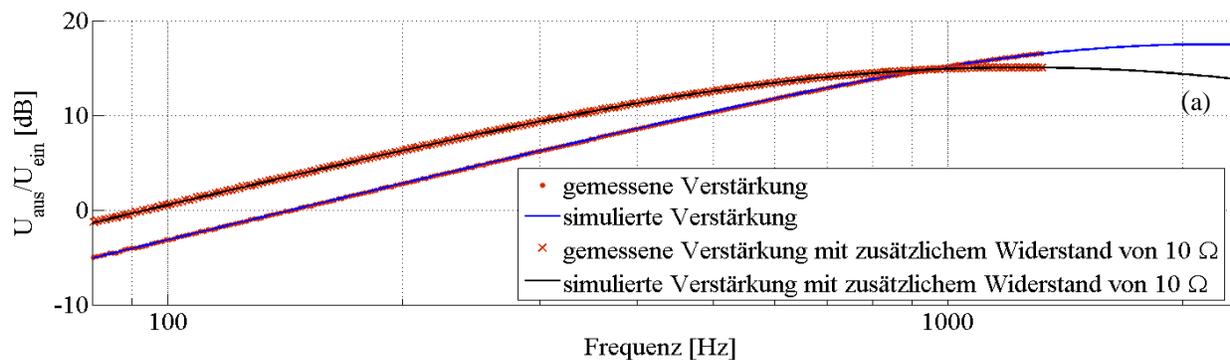
U_s : Amplitude der sinusförmigen Erregung (in dieser Arbeit ist U_s gleich 1 Volt)

ω : Kreisfrequenz der Erregerspannung

Die Antwort des Systems auf eine sinusförmige Erregung beinhaltet neben der stationären Antwort auch die nichtstationären Schwingungen (siehe Gleichung (2.40)). Diese Einschaltvorgänge werden nicht in dem Frequenzgang des Systems berücksichtigt (siehe Gleichung (2.41)).

$$U_2 = \frac{U_s \cdot M'_{12} \cdot \omega \cdot \tau_1 \cdot (\cos(\omega t) + \omega \cdot \tau_1 \cdot \sin(\omega t))}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1)} \quad (2.41)$$

Der gemessene und der simulierte Frequenzgang der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



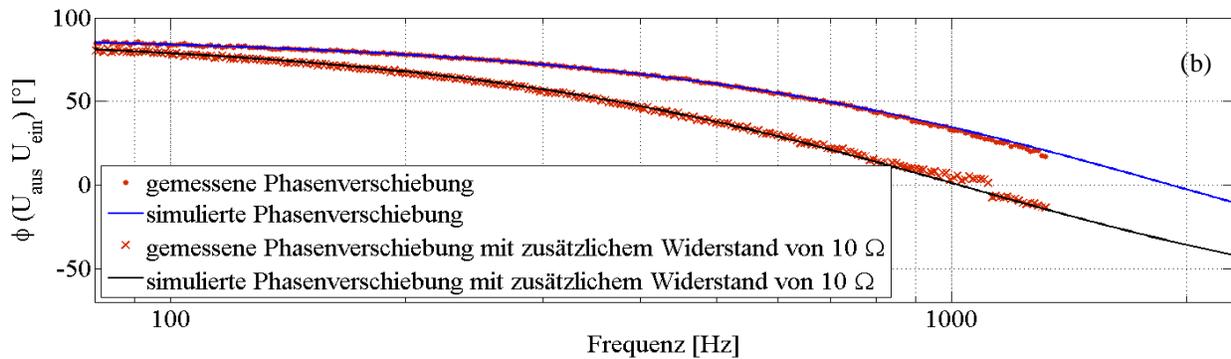


Abb. 2.6 Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe des Frequenzganges: a) gemessener und simulierter Amplitudenfrequenzgang an der Empfangsspule mit und ohne den zusätzlichen Widerstand von 10Ω , b) gemessener und simulierter Phasenfrequenzgang an der Empfangsspule mit und ohne den zusätzlichen Widerstand von 10Ω

Ersatzschaltbild des Störkörpers

Das Ersatzschaltbild der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems wird in diesem Unterkapitel um ein Ersatzschaltbild des leitenden Störkörpers erweitert. Der leitende Störkörper wird als ein RL-Kreis modelliert. Die Spannung an den Anschlüssen der Sendespule verursacht einen Stromfluss in der Sendespule. Der fließende Wechselstrom in der Sendespule generiert das elektromagnetische Feld, das die Wirbelströme in den elektrisch leitenden Störkörper induziert. Die Wirbelströme im Störkörper generieren ein sekundäres elektromagnetisches Feld, das an der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems gemessen wird. Diese indirekte Induktion der Spannung von der Sendespule über einen Störkörper an der Empfangsspule wird im Ersatzschaltbild in Abb. 2.7 präsentiert.

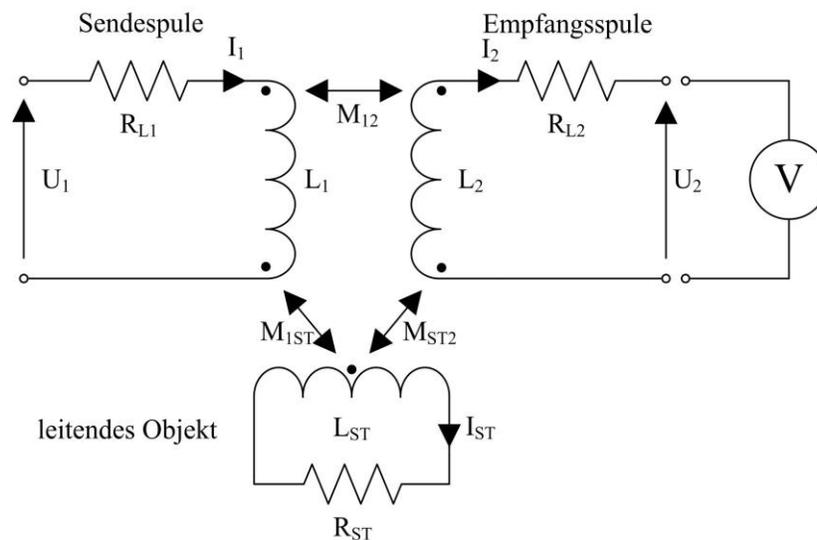


Abb. 2.7 Ersatzschaltbild der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule mit einem zusätzlichen elektrisch leitenden Störkörper.⁴

⁴ Eine ähnliche Abbildung wurde in den Publikationen des Autors [141, 143] verwendet.

| | |
|-------------|---|
| M_{1ST} : | Gegeninduktivität zwischen der Sendespule und dem Störkörper |
| M_{ST2} : | Gegeninduktivität zwischen dem Störkörper und der Empfangsspule |
| I_{ST} : | Strom im RL-Kreis, der die Wirbelströme im Störkörper modelliert |
| L_{ST} : | Induktivität des RL-Kreises, mit dem der Störkörper modelliert wird |
| R_{ST} : | Widerstand des RL-Kreises, mit dem der Störkörper modelliert wird |

Übertragungsfunktion des Störkörpers

Auf Basis des Ersatzschaltbildes des elektrisch leitenden Störkörpers wird eine Übertragungsfunktion G_{1-ST-2} formuliert (Gleichungen (2.42) – (2.45)), die das Verhältnis zwischen der Spannung an der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule beschreibt, die über einen Störkörper induziert wurde.

$$\begin{aligned}
 U_1(s) &= R_{L1} \cdot I_1(s) + L_1 s \cdot I_1(s) \\
 I_1(s) &= \frac{U_1(s)}{R_{L1} + L_1 s} \\
 U_{ST}(s) &= M_{1ST} \cdot s \cdot I_1(s) \\
 U_{ST}(s) &= M_{1ST} \cdot s \cdot \frac{U_1(s)}{R_{L1} + L_1 s} \\
 U_{ST}(s) &= R_{ST} \cdot I_{ST}(s) + L_{ST} s \cdot I_{ST}(s) \\
 I_{ST}(s) &= \frac{U_{ST}(s)}{R_{ST} + L_{ST} s} \\
 U_{1-ST-2}(s) &= M_{ST2} \cdot s \cdot I_{ST}(s) \\
 U_{1-ST-2}(s) &= M_{ST2} \cdot s \cdot \frac{U_{ST}(s)}{R_{ST} + L_{ST} s} = U_1(s) \cdot \frac{M_{ST2} \cdot s \cdot M_{1ST} \cdot s}{(R_{ST} + L_{ST} s) \cdot (R_{L1} + L_1 s)}
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

$$M'_{1-ST-2} = \frac{M_{1ST}}{L_1} \cdot \frac{M_{ST2}}{L_{ST}} \tag{2.43}$$

$$\tau_{ST} = \frac{L_{ST}}{R_{ST}} \tag{2.44}$$

$$G_{1-ST-2}(s) = \frac{U_{1-ST-2}(s)}{U_1(s)} = \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \tag{2.45}$$

| | |
|-----------------|---|
| U_{ST} : | Spannung am RL-Kreis, mit dem der Störkörper modelliert wird |
| U_{1-ST-2} : | Spannung an der Empfangsspule, die vom Störkörper induziert wurde |
| M'_{1-ST-2} : | normierte Gegeninduktivität zwischen der Sendespule und der Empfangsspule, bei der indirekten Induktion über einen Störkörper |
| τ_{ST} : | Zeitkonstante des Störkörpers |

$G_{1-ST-2}(s)$: Übertragungsfunktion zwischen der Spannung an der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule bei der indirekten Induktion über einen Störkörper

Die Übertragungsfunktion $G_{1-ST-2}(s)$ im Laplace-Bereich beinhaltet im Zähler eine Multiplikation mit dem Quadrat des komplexen Frequenzparameters s^2 . Diese Multiplikation entspricht im Zeitbereich einer doppelten Ableitung nach der Zeit. Deswegen ist die Spannung an der Empfangsspule U_2 , die indirekt über einen Störkörper an der Empfangsspule induziert worden ist, proportional zur doppelten zeitlichen Ableitung der Spannung an der Sendespule U_1 . Diese Übertragungsfunktion kann als ein Hochpassfilter zweiter Ordnung betrachtet werden. Die Induktivität L_{ST} , der Widerstand R_{ST} und dadurch auch die Zeitkonstante des Störkörpers τ_{ST} hängen von den Abmessungen, der elektrischen Leitfähigkeit und der Gestalt des Störkörpers ab und können dadurch nicht als konstant betrachtet werden. Die Gegeninduktivität zwischen der Sendespule, dem Störkörper und der Empfangsspule M'_{1-ST-2} hängt von der jeweiligen Lage und Ausrichtung der Empfangsspule und des Störkörpers relativ zur Sendespule ab.

Die Spannung, die indirekt über den Störkörper an der Empfangsspule induziert wurde, überlagert sich additiv mit der Spannung, die direkt von der Sendespule an der Empfangsspule induziert wurde (siehe Gleichung (2.46)).

$$G_G(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} + \frac{U_{1-ST-2}(s)}{U_1(s)} = \frac{M'_{12} \cdot s}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)} + \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \quad (2.46)$$

Die Spannung U_{1-ST-2} , die von dem Störkörper an der Empfangsspule induziert wurde, wird immer zusammen mit der Spannung U_2 gemessen, die direkt von der Sendespule an der Empfangsspule induziert wurde. Für die Validierung des Modells des Störkörpers muss die Antwort des Störkörpers von der Antwort der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule getrennt werden.

Dafür könnte die Empfangsspule senkrecht zur Sendespule platziert werden. An der Empfangsspule würde ohne zusätzliche Störungen keine messbare Spannung induziert, weil der Vektor der magnetischen Flussdichte senkrecht zur Zentralachse der Empfangsspule ausgerichtet ist (siehe Gleichung (2.19)). Falls im nächsten Schritt ein zusätzlicher Störkörper in die Nähe der Empfangsspule platziert wird, würde der von dem Störkörper generierte Vektor der magnetischen Flussdichte eine andere Ausrichtung aufweisen. Dadurch könnte mit der Empfangsspule nur die Antwort des Störkörpers gemessen werden.

Die in dieser Arbeit verwendete Vorgehensweise basiert auf der Aufnahme des Signals bei einer konstanten Lage und Ausrichtung der Empfangsspule relativ zu den Sendespulen in zwei getrennten Experimenten. Im ersten Versuch wird kein zusätzlicher Störkörper in der Nähe der Empfangsspule platziert, während dies im zweiten Versuch getan wird. Die direkt von der Sendespule induzierte Spannung und die Spannung, die indirekt über den Störkörper an der Empfangsspule induziert wurde, überlagern sich additiv (siehe Gleichung (2.46)). Deswegen entspricht der Unterschied zwischen den Messungen in den beiden Experimenten der Antwort des Störkörpers.

Validierung des Modells des Störkörpers

Das Modell des Störkörpers wird, ähnlich wie das Modell der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule, mit zwei Methoden validiert. Im ersten Schritt wird die Sprungantwort des Störkörpers untersucht. Der theoretische Verlauf der Sprungantwort, die von dem Störkörper induziert wurde, wird mit den Gleichungen (2.47)–(2.49) beschrieben.

$$U_{1-ST-2}(s) = G_{1-ST-2}(s) \cdot U_1(s) = G_{1-ST-2}(s) \cdot \frac{U_e}{s} = \frac{U_e \cdot G_{1-ST-2}(s)}{s} \quad (2.47)$$

$$U_{1-ST-2}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{U_e \cdot G_{1-ST-2}(s)}{s} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \cdot \frac{U_e}{s} \right\} \quad (2.48)$$

$$U_{1-ST-2}(t) = U_e \cdot \left(\frac{M'_{1-ST-2} \cdot \tau_1}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}} - \frac{M'_{1-ST-2} \cdot \tau_{ST}}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (2.49)$$

Das entwickelte elektromagnetische Trackingsystem wird mit einem rechteckigen Eingangssignal gespeist und die resultierende Spannung an der Empfangsspule wird sowohl mit Präsenz des Störkörpers als auch ohne Präsenz des Störkörpers gemessen. Der Versuch wird mit einem zusätzlichen Widerstand von 10 Ω durchgeführt, der an die Sendespule in Reihe angeschlossen ist. Als Störkörper werden in diesem Versuch zylinderförmige Aluminium- und Messingscheiben mit einem Durchmesser von 0.1 m und der Höhe von 0.03 m verwendet. Die elektrische Leitfähigkeit dieser nicht ferromagnetischen Metalle beträgt $15 \cdot 10^6$ S/m für Messing (CuZn40Pb2) [177] und $35.5 \cdot 10^6$ S/m für Aluminium [178]. Diese hochleitenden Platten modellieren typische chirurgische Instrumente, wie z. B. Hammer, Trokar, Endoskop oder Ultraschallkopf, die in den radiologischen Eingriffen verwendet werden. Aus dem weniger elektrisch leitenden Stahl wird eine große Anzahl von Instrumenten gefertigt. Außerdem wird das kommerziell verfügbare Ortungssystem Aurora, laut den Angaben des Herstellers, nur gering durch die wenig leitenden Metalle, wie z. B. Cobalt-Chrom-Legierung, Stahl (DIN 1.4441), Titan (TiA16V4) und Edelstahl Serie 300 und stark durch hochleitendes Aluminium, gestört [147]. Die verwendeten Scheiben können deswegen als ein Worst-Case-Szenario für die Störung des elektromagnetischen Trackingsystems durch die medizinischen nichtferromagnetischen Werkzeuge betrachtet werden.

Der Unterschied zwischen den Messungen mit und ohne Störkörper wird in der Abb. 2.8 zusammen mit dem simulierten theoretischen Verlauf der Spannung an der Empfangsspule gezeigt. Die Zeitkonstanten sowie die normierte Gegeninduktivität M'_{1-ST-2} wurden mit einem Fitting-Verfahren als Koeffizienten des Modells mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet.

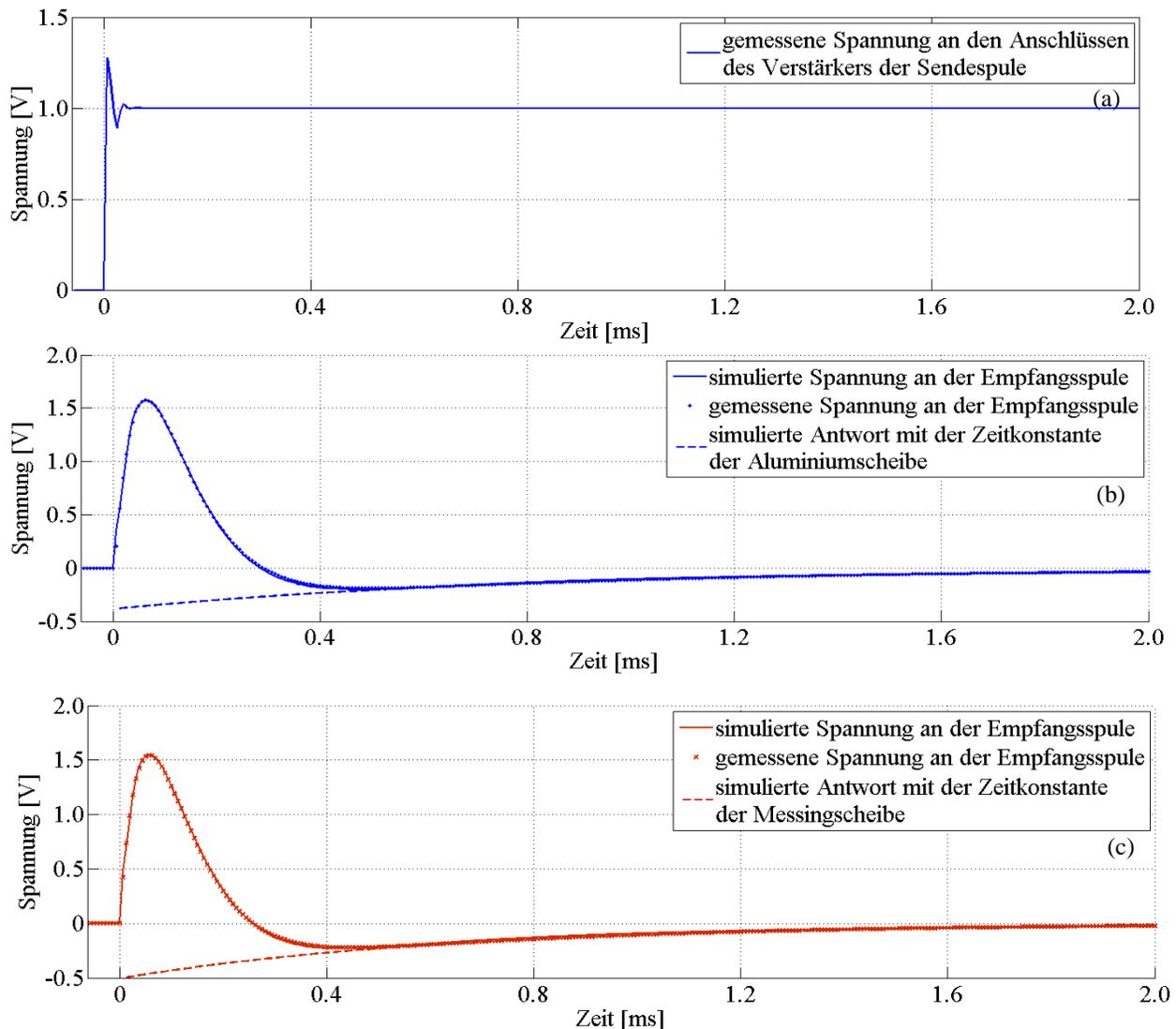


Abb. 2.8 Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe einer Sprungantwort: a) gemessenes rechteckiges Signal an den Anschlüssen des Verstärkers der Sendespule, b) gemessene und simulierte Antwort einer Messingscheibe, c) gemessene und simulierte Antwort einer Aluminiumscheibe

Wenn die Abb. 2.8b und die Abb. 2.8c mit der Abb. 2.5c verglichen werden, wird deutlich, dass die Zeitkonstante des Störkörpers ($\tau_{ST} = 0.857$ ms mit der Aluminiumscheibe und $\tau_{ST} = 0.810$ ms mit der Messingscheibe) wesentlich größer als die Zeitkonstanten der Sendespule ($\tau_1 = 0.083$ ms) und des Verstärkers ($\tau_v = 0.060$ ms) ist.

Im zweiten Versuch wird der Frequenzgang des Störkörpers analysiert und mit dem simulierten theoretischen Verlauf verglichen. Der theoretische Verlauf des Frequenzgangs wird mit den Gleichungen (2.50) – (2.52) beschrieben.

$$U_2(s) = G_{1-ST-2}(s) \cdot U_1(s) = \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \cdot \frac{U_s \cdot \omega}{(\omega^2 + s^2)} = \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2 \cdot U_s \cdot \omega}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right) \cdot (\omega^2 + s^2)} \quad (2.50)$$

$$U_2(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ G_{1-ST-2}(s) \cdot \frac{U_s \cdot \omega}{(\omega^2 + s^2)} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2 \cdot U_s \cdot \omega}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right) \cdot (\omega^2 + s^2)} \right\} \quad (2.51)$$

$$U_2(t) =$$

$$\frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega^3 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST}^2 \cdot \cos(\omega t) - U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot \sin(\omega t)}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} + \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST}}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\tau_1 - \tau_{ST})} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (2.52)$$

$$\frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega^3 \cdot \tau_1^2 \cdot \tau_{ST} \cdot \cos(\omega t) + U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega^4 \cdot \tau_1^2 \cdot \tau_{ST}^2 \cdot \sin(\omega t)}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} - \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST}}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\tau_1 - \tau_{ST})} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}}$$

Die Antwort auf eine sinusförmige Erregung beinhaltet neben der stationären Antwort auch transiente Einschaltvorgänge. Bei der Berechnung des simulierten theoretischen Verlaufs des Frequenzganges des Systems werden die Einschaltvorgänge nicht berücksichtigt (siehe Gleichung (2.53)).

$$U_2(t) = \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega^3 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST}^2 \cdot \cos(\omega t) - U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot \sin(\omega t)}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} + \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega^3 \cdot \tau_1^2 \cdot \tau_{ST} \cdot \cos(\omega t) + U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega^4 \cdot \tau_1^2 \cdot \tau_{ST}^2 \cdot \sin(\omega t)}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} \quad (2.53)$$

In diesem Versuch wird, wie bei der Analyse der Sprungantwort, der Unterschied zwischen der Spannungsmessung ohne Störung und der Spannungsmessung mit Präsenz des Störkörpers analysiert. In der Abb. 2.9 finden sich die simulierten und gemessenen Frequenzgänge der Aluminium- und Messingscheibe, die als Störkörper verwendet wurden.

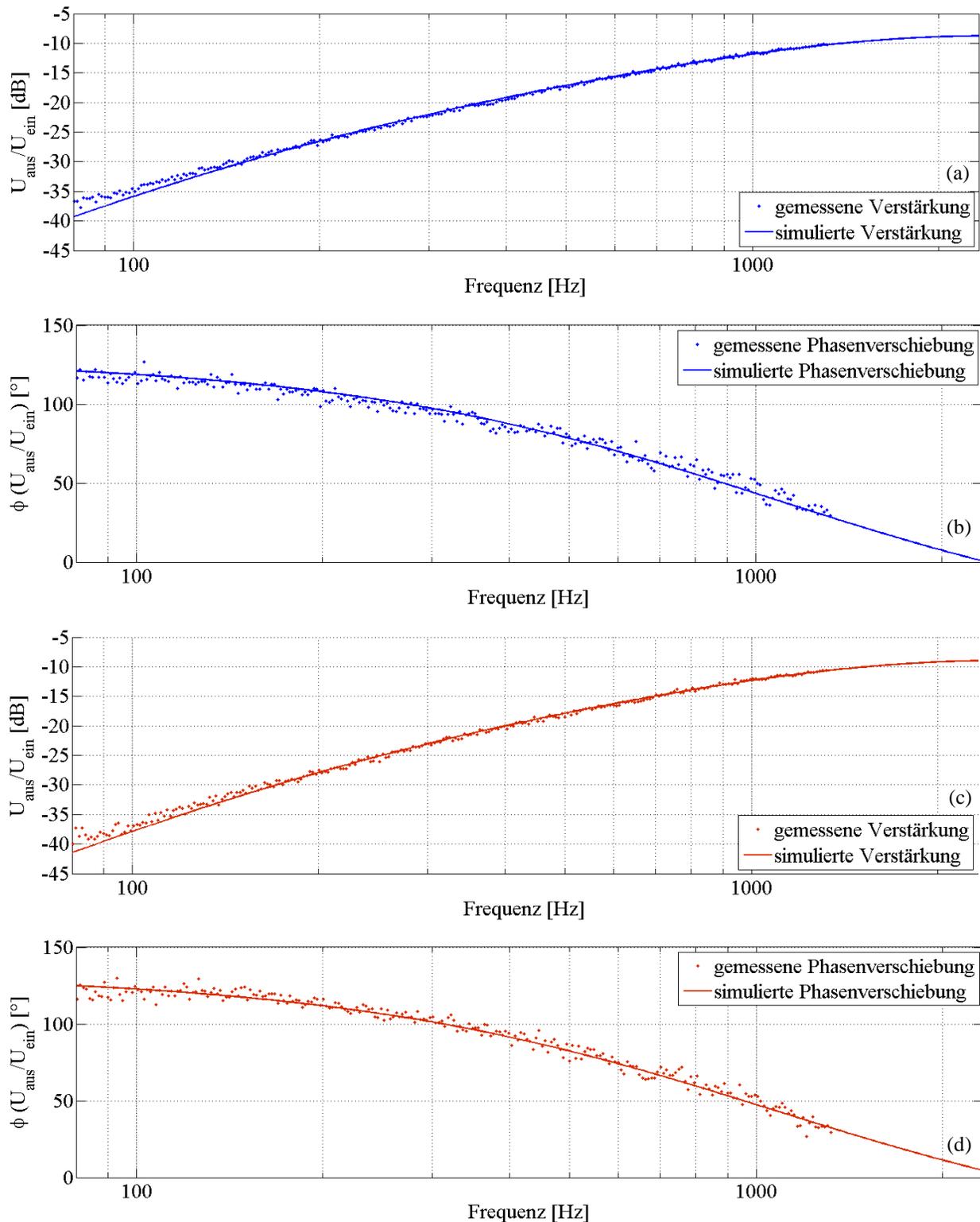


Abb. 2.9 Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe der Analyse des Frequenzgangs, a) Amplitudenfrequenzgang der Aluminiumscheibe, b) Phasenfrequenzgang der Aluminiumscheibe, c) Amplitudenfrequenzgang der Messingscheibe, d) Phasenfrequenzgang der Messingscheibe

Die magnetische Kopplung zwischen dem Störkörper und der Sendespule kann auch einen Einfluss auf die Impedanz der Sendespule ausüben und infolgedessen den Strom in der Sendespule vermindern. Insbesondere große Störkörper in der direkten Nähe des Feldgenerators werden einen Einfluss auf den Strom in der Sendespule nehmen. Ein Beispiel für einen großen Störkörper in der Nähe des Feldgenerators des elektromagnetischen Trackingsystems bietet ein Bett des Patienten, das direkt unter dem Feldgenerator platziert wird. Das vorgeschlagene Modell des Störkörpers berücksichtigt nicht das Entgegenwirken, jedoch den Einfluss des Störkörpers auf den Strom in der Sendespule und kann laut der Literatur durch die zusätzliche Abschirmung vermindert werden.

In dem Frequenzgang der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule und in dem Frequenzgang des Störkörpers können neben deren Übertragungsfunktion auch die Tiefpassfiltereigenschaften des Verstärkers erkannt werden. Diese Tiefpassfiltereigenschaften verhindern die Evaluierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems und des elektrisch leitenden Störkörpers bei einer Frequenz der Erregerspannung, die mit der Grenzfrequenz des Verstärkers (2400 Hz) vergleichbar ist. Wegen des Einflusses des Verstärkers weichen der Amplitude- und Phasenfrequenzgang der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspulen von dem Hochpassfilter erster Ordnung ab (siehe Abb. 2.6).

3 Kalibrierung des Trackingsystems

Für die Evaluierung der entwickelten Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen durch die elektrisch leitenden Störkörper war ein genauer Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems notwendig. Die Fehler der Positionsbestimmung, die durch die Ungenauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems verursacht werden, sollen wesentlich kleiner sein als der Einfluss der leitenden Störkörper. So kann der Fehler der Positionsbestimmung durch die leitenden Störkörper von der Ungenauigkeit des Ortungssystems unterschieden werden. Laut den im Kapitel 1 beschriebenen Literaturstudien könnte der Einfluss der leitenden Störkörper auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems einen zusätzlichen Fehler der Positionsbestimmung zwischen 5.1 mm (Ultraschallkopf [106]) und 80 mm (C-Arm [89]) verursachen. Es wird in dieser Arbeit angenommen, dass der mittlere Fehler der Positionsbestimmung ohne zusätzliche Störung kleiner als die Hälfte des erwarteten Einflusses der leitenden Störkörper sein soll (RMS-Fehler der Positionsbestimmung kleiner als 2.6 mm). Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, nach der manuellen Bestimmung der Lage und Ausrichtung der Sendespulen, beträgt 7.3 mm (siehe Unterkapitel 7.1). Dieser Fehler ist vergleichbar mit dem Einfluss der leitenden Störkörper und erschwert die Unterscheidung zwischen dem Fehler der Positionsbestimmung aufgrund der Ungenauigkeit des Ortungssystems und dem Einfluss der leitenden Störkörper. Deswegen reicht die erzielte Genauigkeit des Ortungssystems nach der manuellen Bestimmung der Lage und Ausrichtung der Sendespulen für die Evaluierung der Methoden zur Detektion und Korrektur der Störung durch elektrisch leitende Störkörper nicht aus. Die quantitative Evaluierung des Algorithmus zur Kalibrierung erfolgt im Unterkapitel 7.1 mit Hilfe des entwickelten Demonstrators des elektromagnetischen Trackingsystems.

3.1 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit des Trackingsystems

Für eine genaue Bestimmung der Lage und Ausrichtung des Feldsensors im Raum müssen die Eigenschaften des magnetischen Dipols, mit dem die Sendespulen des Feldgenerators modelliert worden sind, sehr präzise bestimmt werden. Die Ausrichtung des magnetischen Dipols stimmt zwar näherungsweise mit der Ausrichtung der Sendespulen überein, aber die eventuelle Abweichung zusammen mit der niedrigen Genauigkeit bei der geometrischen Bestimmung der Lage und der Ausrichtung der Sendespulen führen zu einer wesentlichen Ungenauigkeit bei der Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem. Der durch die fehlende Kalibrierung verursachte Fehler ist insbesondere bei einem großen Abstand zwischen dem Feldsensor und Feldgenerator von großer Bedeutung.

Wenn das elektromagnetische Feld des elektromagnetischen Trackingsystems nicht zusätzlich gestört wird, wird die Genauigkeit der Positionsbestimmung durch folgende Einflussfaktoren beeinträchtigt:

- **Spannungsmessung** – Ungenauigkeit bei der Messung der Spannung
 - **AD/DA-Karte** – Ungenauigkeit bei der Messung der Spannung auf der Empfangsspule ΔU_{mi}
 - **Verstärker** – Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Verstärkung und die thermische Drift der Verstärker
 - der Sendespule ΔG_{si}
 - der Empfangsspule ΔG_e
- **Sendespule** – Ungenauigkeit der Bestimmung:
 - des Stromes in der Sendespule ΔI_{si} (berechnet auf Basis des elektrischen Widerstandes und der Induktivität)
 - der Fläche ΔA_{si} (berechnet auf Basis des Durchmessers)
 - der Anzahl der Wicklungen ΔN_{si} der Sendespule
 - der Lage des magnetischen Dipols im Koordinatensystem des Ortungssystems
 - der Ausrichtung des magnetischen Dipols im Koordinatensystem des Ortungssystems
- **Empfangsspule** – Ungenauigkeit der Bestimmung:
 - der Fläche der Empfangsspule ΔA_e (berechnet auf der Basis des Durchmessers)
 - der Permeabilität des Kernes $\Delta \mu_e$
 - der Anzahl der Wicklungen ΔN_e

3.2 Kalibrierung des Trackingsystems

Die Fehler in der Bestimmung der Lage (Δx_{si} , Δy_{si} , Δz_{si}) und Ausrichtung ($\Delta \varphi_{si}$, $\Delta \theta_{si}$) der magnetischen Dipole, mit welchen die Sendespulen modelliert wurden, können mit fünf Koeffizienten mathematisch beschrieben werden (siehe Gleichungen (3.1)-(3.3)).

$$\vec{B}_e = \frac{\mu_0 \cdot |\vec{m}|}{4 \cdot \pi} \left(\frac{3 \cdot \vec{x}' \cdot (\vec{m} \cdot \vec{x}')}{|\vec{m}| \cdot |\vec{x}'|^5} - \frac{\vec{m}}{|\vec{m}| \cdot |\vec{x}'|^3} \right) \quad (3.1)$$

$$\vec{m}' = N_s' \cdot I_s' \cdot \vec{A}_s' = (N_s \cdot \Delta N_s) \cdot (I_s \cdot \Delta I_s) \cdot (A_{si} \cdot \Delta A_{si}) \cdot \begin{pmatrix} \sin(\theta_s + \Delta \theta_s) \cdot \cos(\varphi_s + \Delta \varphi_s) \\ \sin(\theta_s + \Delta \theta_s) \cdot \sin(\varphi_s + \Delta \varphi_s) \\ \cos(\varphi_s + \Delta \varphi_s) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\vec{x}_e' = \begin{pmatrix} x_{si} + \Delta x_{si} - x_e \\ y_{si} + \Delta y_{si} - y_e \\ z_{si} + \Delta z_{si} - z_e \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$\Delta \varphi_{si}$, $\Delta \theta_{si}$: Fehler der Bestimmung der Ausrichtung des magnetischen Dipols, der die Sendespule i abbildet

$\Delta x_{si}, \Delta y_{si}, \Delta z_{si}$: Fehler der Bestimmung der Lage des magnetischen Dipols, der die Sendespule i abbildet

Die Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem basiert auf der Minimierung des Unterschiedes zwischen der berechneten und der gemessenen Amplitude der Spannung auf der Empfangsspule (siehe Kapitel 2). Sowohl die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Eigenschaften der Sende- und Empfangsspule als auch die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Verstärkung der beiden Verstärker üben einen Einfluss auf die gemessene Amplitude der Spannung auf der Empfangsspule aus. Bei der Berechnung der Spannung auf der Empfangsspule werden die in der Einführung beschriebenen Einflussfaktoren miteinander multipliziert, bevor sie zur Berechnung der simulierten Spannung verwendet werden (siehe Gleichung (2.16)). Deswegen können alle diese Fehlerquellen mit Hilfe eines einzelnen Koeffizienten berücksichtigt werden (siehe Gleichungen (3.4)-(3.6)):

$$U_{ge} = - \Delta G_e \cdot \Delta N_e \cdot \Delta A_e \cdot G_e \cdot N_e \cdot \omega \cdot A_e \cdot \left(\vec{B}_e \cdot \vec{n} \right) \quad (3.4)$$

$$\Delta V_{gei} = \Delta G_e \cdot \Delta N_e \cdot \Delta A_e \cdot \Delta G_{si} \cdot \Delta N_s \cdot \Delta I_s \cdot \Delta A_{si} \quad (3.5)$$

$$U_{ge} = - \Delta V_{ge} \cdot G_e \cdot N_e \cdot A_e \cdot \omega \cdot N_s \cdot I_s \cdot A_{si} \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left(\left(\frac{3 \cdot \vec{x} \cdot (\vec{m} \cdot \vec{x})}{|\vec{m}| \cdot |\vec{x}|^5} - \frac{\vec{m}}{|\vec{m}| \cdot |\vec{x}|^3} \right) \cdot \vec{n} \right) \quad (3.6)$$

ΔV_{ge} : Fehler der Spannungsamplitude

Wegen der Darstellung von sieben einzelnen Fehlerquellen als ein Produkt in der Gleichung (3.5) kann die Kalibrierung des Trackingsystems für jede einzelne Sendespule als eine Bestimmung von sechs Unbekannten betrachtet werden ($\Delta V_{gei}, \Delta \varphi_{si}, \Delta \theta_{si}, \Delta x_{si}, \Delta y_{si}, \Delta z_{si}$). Der entwickelte Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems beinhaltet acht Sendespulen, was zu 48 Freiheitsgraden im gesamten Ortungssystem führt. Diese 48 Unbekannten werden mit Hilfe des *Pattern Search* Algorithmus berechnet [148]. Dabei dient dieser Algorithmus zur Minimierung der Funktion mehrerer Variablen. Zu den festgelegten Anfangswerten wird jeweils ein konstanter Schritt addiert und subtrahiert. Resultiert die Änderung der Argumente mit einem niedrigeren Funktionswert, werden diese Argumente für die weitere Iteration übernommen. Falls die Änderung der Argumente nicht mit einem niedrigeren Funktionswert resultiert, wird die Länge des Schrittes verkleinert. Die iterative Minimierung der Funktion wird so lange durchgeführt, bis der Funktionswert für die gefundenen Argumente einen vorausgesetzten Wert erreicht. Eine detaillierte Beschreibung dieses Algorithmus befindet sich in der Publikation von Hooke [148].

Im Rahmen der Kalibrierung des Demonstrators des elektromagnetischen Trackingsystems wird der Betrag der Summe der Unterschiede zwischen der gemessenen und der simulierten Spannung minimiert:

$$\min_{\substack{\Delta V_{\text{gei}}, \Delta \varphi_{\text{si}}, \\ \Delta \varphi_{\text{si}}, \Delta x_{\text{si}}, \\ \Delta y_{\text{si}}, \Delta z_{\text{si}}}} \left(\sum_{j=1}^{\bar{M}} \left| \frac{U_{\text{mi}}(j) - U_{\text{gei}}(j)}{U_{\text{gei}}(j)} \right|^2 \right) \quad (3.7)$$

Das Gleichungssystem wird mit Hilfe der 500 unterschiedlichen Positionsbestimmungen gelöst. Der Einfluss der Ungenauigkeit bei der Spannungsmessung und der Fehler der Lagebestimmung mit dem optischen Trackingsystem weisen einen zufälligen Charakter auf. Durch die Überbestimmung des Gleichungssystems wird der Einfluss der zufälligen Fehler gemittelt.

Um den Einfluss der Positionsbestimmungen auf die Kalibrierung des Ortungssystems, die in großem Abstand von dem Feldgenerator aufgenommen wurden, zu erhöhen, wird die Differenz zusätzlich durch die simulierte Spannung U_{gei} dividiert (relativer Fehler). An den Messpunkten wird in der Regel eine sehr kleine Spannung an der Empfangsspule gemessen. Nach der Gewichtung werden sowohl die Messungen im großen Abstand zwischen der Empfangsspule und dem Feldgenerator als auch die Messungen in der direkten Nähe des Feldgenerators einen gleichen Einfluss auf die Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems nehmen. Die Evaluierung dieser Kalibrierungsmethode erfolgt im Unterkapitel 7.1.

4 Detektion des leitenden Störkörpers

Entsprechend den Anforderungen für elektromagnetische Trackingsysteme in der klinischen Praxis aus den Studien von Wilson [88] sollten die idealen Ortungssysteme nicht durch leitende metallische Objekte gestört werden. Die heutzutage auf dem Markt zur Verfügung stehenden elektromagnetischen Trackingsysteme mit einer einzelnen Empfangsspule werden aber nicht nur durch elektrisch leitende Gegenstände gestört, sondern bieten dem Anwender auch keine Informationen dahingehend, ob die Genauigkeit der Positionsbestimmung gewährleistet werden kann [105]. Der Radiologe, welcher die Trackingsysteme für minimalinvasive Eingriffe nutzt, ist sich nicht dessen bewusst, ob die Genauigkeit des klinischen Ortungssystems durch die leitenden Störkörper beeinflusst ist.

In diesem Kapitel werden zwei im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methoden zur Detektion der Störung der Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems durch die elektrisch leitenden Gegenstände beschrieben. Die beiden Methoden basieren auf den unterschiedlichen Übertragungsfunktionen bei der direkten (ohne Störkörper) und indirekten Induktion (vom Störkörper) der Spannung an der Empfangsspule (siehe Unterkapitel 2.3).

4.1 Detektion mit einem Klassifikator auf der Basis der Frequenzabhängigkeit

Die erste vorgeschlagene Methode zur Detektion des Störkörpers basiert auf der unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit zwischen dem gestörten und ungestörten elektromagnetischen Trackingsystem. Zur Veranschaulichung des Einflusses des Störkörpers auf die Spannung an der Empfangsspule werden ein Amplituden- und Phasenfrequenzgang mit Präsenz des Störkörpers in der direkten Nähe der Empfangsspule aufgenommen. Die Messungen wurden in drei getrennten Versuchen gewonnen:

- ohne zusätzlichen Störkörper in der Nähe der Empfangsspule
- mit der Aluminiumscheibe in der direkten Nähe der Empfangsspule
- mit der Messingscheibe in der direkten Nähe der Empfangsspule

Die gemessenen Amplituden- und Phasenfrequenzgänge werden in der Abb. 4.1 dargestellt.

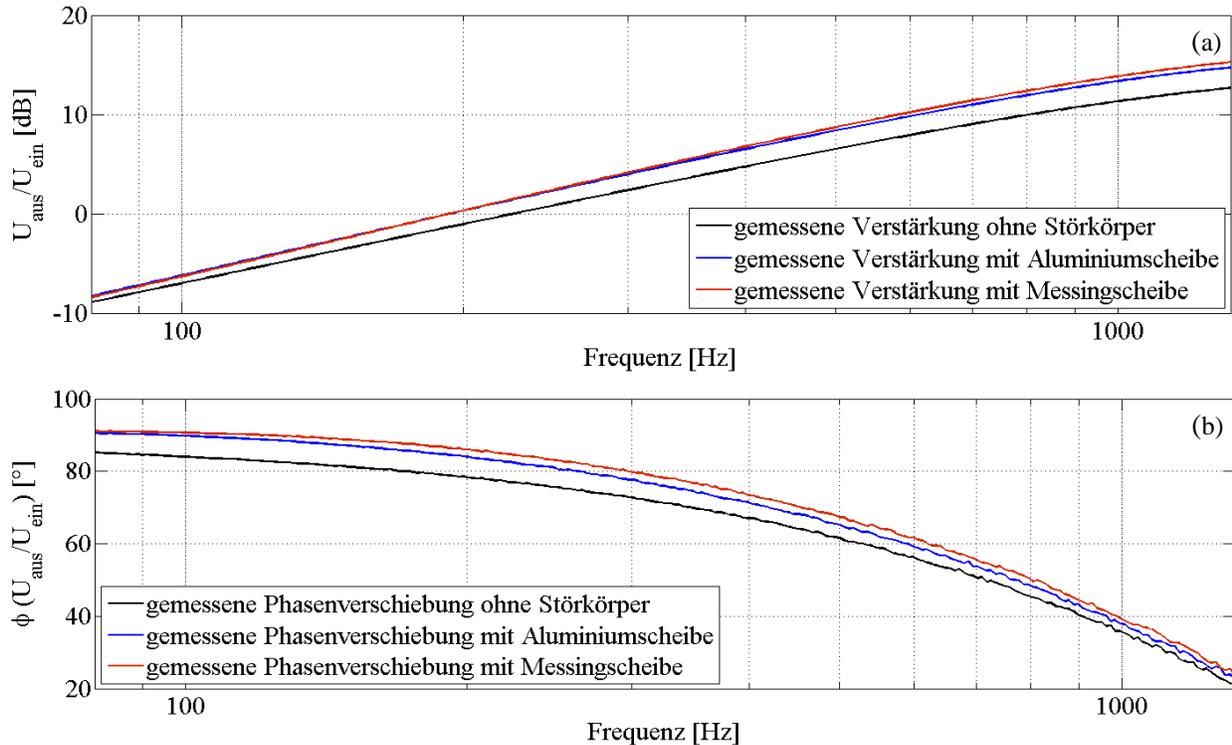


Abb. 4.1 Gemessene Frequenzgänge des elektromagnetischen Trackingsystems zwischen den Anschlüssen der Sende- und Empfangsspule mit und ohne Störkörper: a) Amplitudenfrequenzgänge, b) Phasenfrequenzgänge

Normierung

Der Frequenzgang des Störkörpers wird immer zusammen mit dem Frequenzgang der elektromagnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule gemessen (siehe Gleichung (2.46)), was die Unterscheidung zwischen den beiden Frequenzgängen erschwert. Die Eliminierung der Frequenzabhängigkeit der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule ermöglicht die Detektion des leitenden Störkörpers auf Basis seiner Frequenzantwort.

Die Eliminierung der Frequenzabhängigkeit des ungestörten Amplitudenfrequenzganges der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule könnte mit Hilfe der Multiplikation der resultierenden Übertragungsfunktion $G_G(s)$ mit einer speziellen Signalform erfolgen, die im Laplace-Bereich aus einem Produkt der invertierten Übertragungsfunktion des ungestörten Trackingsystems und der transformierten sinusförmigen Erregerspannung besteht (siehe Gleichung (4.1)). Diese Multiplikation würde im Zeitbereich der Einspeisung der Sendespule mit einer Erregerspannung entsprechen, bei der die Amplitude der Erregung mit steigender Frequenz abnimmt (siehe Gleichung (4.2)). Die Übertragungsfunktion zwischen der Sende- und Empfangsspule ist bis auf die Gegeninduktivität bekannt, da die Zeitkonstante dieses Systems nur von der Induktivität und dem Widerstand der Sendespule abhängt. Die Eliminierung der Frequenzabhängigkeit der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule würde dadurch die Unterscheidung der Frequenzabhängigkeit des elektrisch leitenden Störkörpers von der gemessenen gesamten Frequenzantwort vereinfachen (siehe Gleichung (4.3)).

$$\begin{aligned}
 U_{2N}(s) &= G_G(s) \cdot U_1'(s) = G_G(s) \cdot U_1(s) \cdot \frac{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)}{s} = \left(\frac{M'_{12} \cdot s}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)} + \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \right) \cdot \frac{U_s \cdot \omega}{(\omega^2 + s^2)} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)}{s} \\
 &= \left(M'_{12} + \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s}{\left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \right) \cdot \frac{U_s \cdot \omega}{(\omega^2 + s^2)}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$U_1'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{U_s \cdot \omega}{(\omega^2 + s^2)} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)}{s} \right\} = U_s \cdot \left(\sin(\omega t) - \frac{\cos(\omega t) - 1}{(\omega \cdot \tau_1)} \right) \tag{4.2}$$

$$U_{2N}(t) = \mathcal{L}^{-1}\{U_{2N}(s)\} = U_s \cdot M'_{12} \cdot \sin(\omega t) + \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega \cdot \tau_{ST} \cdot (\cos(\omega t) + \omega \cdot \tau_{ST} \cdot \sin(\omega t))}{(\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} \tag{4.3}$$

Die Faltung des sinusförmigen Eingangssignals mit der invertierten Übertragungsfunktion des Systems würde jedoch im Zeitbereich eine Begrenzung, der an der Sendespule angelegten Spannung, bei den höheren Frequenzen erfordern (siehe Gleichung (4.2)), was die proportionale Reduktion der Spannung an der Empfangsspule ergeben würde. Die Amplitude der Spannung an der Empfangsspule ohne Störung wäre damit gleich für alle Frequenzen der Erregerspannung, allerdings würden diese sehr klein sein. Der Abfall der Amplitude der Spannung an der Sendespule würde umgekehrt proportional zur steigenden Frequenz der Erregerspannung sein. Die deswegen verursachten kleinen Amplituden der Spannung an der Empfangsspule würden durch das verwendete Messsystem mit einem erheblich größeren Messfehler gemessen. Der infolgedessen erhöhte Fehler der Spannungsmessung würde die Zuverlässigkeit der Detektion des elektrisch leitenden Störkörpers reduzieren. Deswegen wurde die Faltung des Eingangssignals mit der invertierten Übertragungsfunktion der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule in dieser Arbeit durch ein Normierungsverfahren ersetzt.

Im Rahmen des verwendeten Normierungsverfahrens wurde ein Amplitudenfrequenzgang für jede Sendespule des Trackingsystems ohne die Präsenz des zusätzlichen Störkörpers aufgenommen. Die Aufnahme des Amplitudenfrequenzganges erfolgte in 300 logarithmisch verteilten Schritten für die Frequenzen zwischen 80 Hz und 2320 Hz. Im Rahmen des Normierungsverfahrens wird die Amplitude der Spannung bei der höchsten aufgenommenen Frequenz von 2320 Hz durch 300 aufgenommene Spannungsamplituden nacheinander dividiert. Als Ergebnis der Division, wird ein Koeffizient K_i in der Funktion der Frequenz berechnet (siehe Abb. 4.2b), der die Frequenzabhängigkeit des Amplitudenfrequenzganges der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule des Trackingsystems kompensieren wird.

$$K_i = \frac{U_{f \max}}{U_i} \tag{4.4}$$

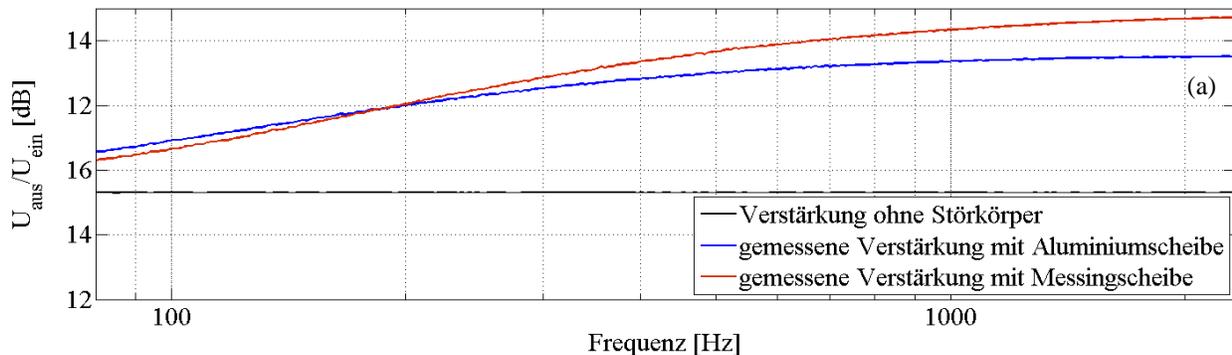
- K_i : Koeffizient der Normierung für die i -te Frequenz der Erregungsspannung
- i : Nummer der Spannungsmessung des in 300 Schritten aufgenommenen Amplitudenfrequenzganges
- $U_{f \max}$: Spannung auf der Empfangsspule bei der Erregerspannung mit einer Frequenz von 2320 Hz
- U_i : Spannung auf der Empfangsspule für die i -te Frequenz der Erregerspannung

Wenn der Amplitudenfrequenzgang der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule mit diesem Koeffizient multipliziert wird, wird der Amplitudenfrequenzgang ohne Präsenz des leitenden Störkörpers den gleichen Betrag bei allen Frequenzen der Erregerspannung aufweisen. Diese normierte Amplitude der Spannung wird unabhängig von der Frequenz den gleichen Wert wie bei der Frequenz der Erregerspannung von 2320 Hz aufweisen.

$$U_{Ni} = K_i \cdot U_i \tag{4.5}$$

U_{Ni} : normierte Spannung auf der Empfangsspule für die i -te Frequenz der Erregerspannung

Der Vorteil dieses Normierungsverfahrens im Vergleich zu der Erregung der Sendespulen mit der Signalform aus der Gleichung (4.2) liegt in der Möglichkeit der Einspeisung der Sendespule mit den gleichen Amplituden unabhängig von der Frequenz der Erregerspannung. Aus diesem Grund werden vor allem bei höheren Frequenzen wesentlich größere Amplituden der Spannung an der Empfangsspule gemessen, was wegen der Verwendung des größeren Teils des Messbereiches des Messsystems zur Verbesserung der Genauigkeit der Spannungsmessung führen würde. Wenn die Frequenzabhängigkeit der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule mit diesem Koeffizienten eliminiert wird, wird das elektromagnetische Trackingsystem nur die Frequenzabhängigkeit des Störkörpers aufweisen. Der gemessene Amplitudenfrequenzgang nach der Normierung wird in der Abb. 4.2a wiedergegeben.



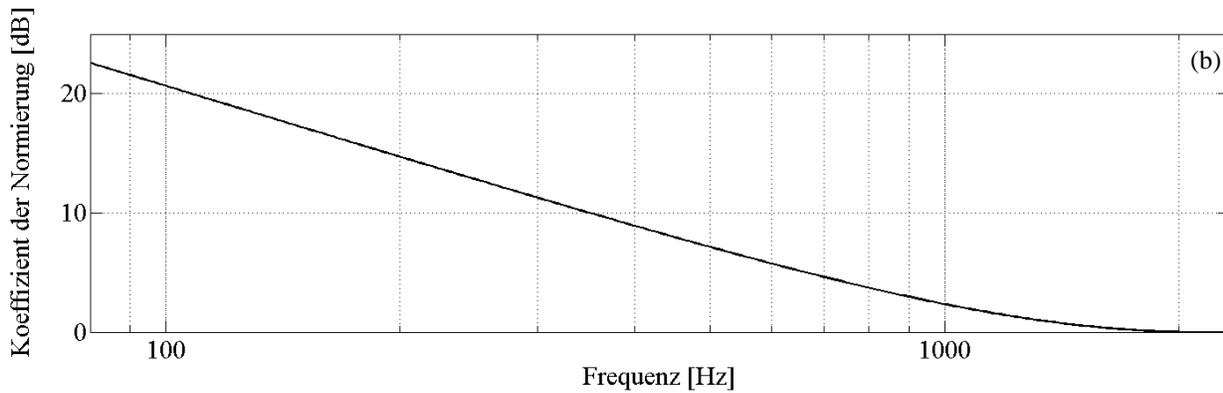


Abb. 4.2 Normierung der Spannung an der Empfangsspule: a) Amplitudenfrequenzgänge des elektromagnetischen Trackingsystems nach der Normierung, b) Koeffizienten der Normierung K_i zur Kompensation der Frequenzabhängigkeit des Amplitudenfrequenzganges der elektromagnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspulen

Nach der Normierung des Amplitudenfrequenzganges weist das elektromagnetische Trackingsystem bei Präsenz des leitenden Störkörpers die Eigenschaften der Summe eines Hochpassfilters erster Ordnung und einer konstanten Verstärkung auf. Anhand des Amplitudenfrequenzganges kann die Grenzfrequenz des resultierenden Hochpassfilters in dem durchgeführten Experiment geschätzt werden ($F_{gA} = 185$ Hz für die Aluminiumscheibe und $F_{gM} = 196$ Hz für die Messingscheibe). Der Amplitudenfrequenzgang ändert sich vor allem im niedrigen Frequenzbereich. Bei höheren Frequenzen der Erregerspannung wird der Verstärker an der Empfangsspule die Eigenschaften eines Tiefpassfilters haben. Gleichzeitig werden bei den niedrigen Frequenzen sehr kleine Amplituden der Spannung an der Empfangsspule gemessen, was zum großen Fehler in der Spannungsmessung führt. Deswegen wird die Frequenzabhängigkeit des Störkörpers im Frequenzbereich zwischen 80 Hz und 1200 Hz analysiert (siehe Abb. 4.3).

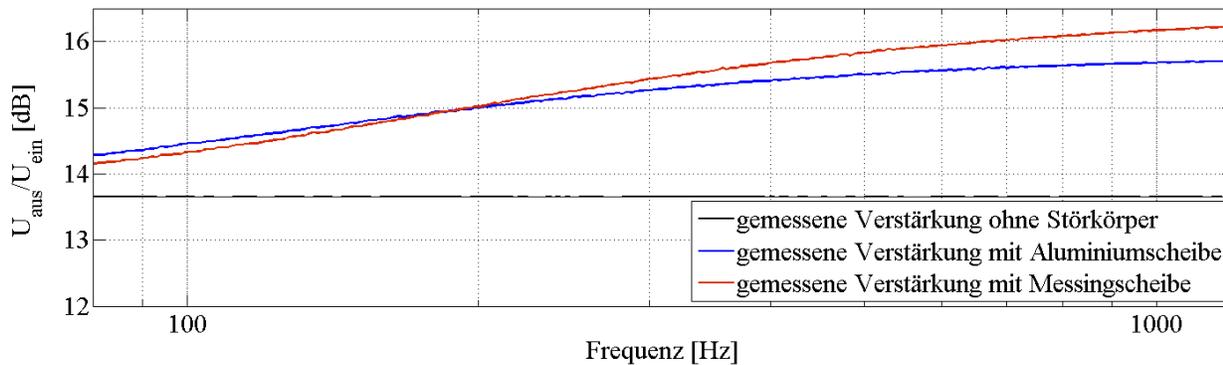


Abb. 4.3 Normierter Amplitudenfrequenzgang des elektromagnetischen Trackingsystems mit Präsenz des leitenden Störkörpers

Die Detektion des leitenden Störkörpers auf Basis der Aufnahme des vollen Frequenzganges wäre in der klinischen Praxis zu zeitintensiv, was die Detektion des Störkörpers in Echtzeit verhindern würde. Deswegen wird die Detektion des leitenden Störkörpers in dieser Arbeit nur auf der Basis des Vergleiches der normierten Amplitude der Spannung an der Empfangsspule bei zwei unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung durchgeführt. In dieser Arbeit wird die Frequenz von 80 Hz und 1200 Hz ausgewählt.

Die Frequenz von 80 Hz ermöglicht eine einfache Ausfilterung der parasitären Netzfrequenz (50 Hz) und gleichzeitig bietet ein akzeptables Signal-Rausch-Verhältnis. Die Frequenz von 1200 Hz entspricht der Hälfte der Grenzfrequenz des verwendeten Verstärkers der Empfangsspule [146]. In diesem Frequenzbereich weist der Amplitudenfrequenzgang des untersuchten Störkörpers 60 % der gesamten Änderung auf.

Das elektromagnetische Trackingsystem wird mit den beiden Erregerspannungen sequenziell eingespeist. Die Sendespulen könnten mit beiden Erregerspannungen parallel eingespeist werden, jedoch müssten die angelegten Amplituden der Spannung halbiert werden, was eine übermäßige Erwärmung der Sendespulen verhindern würde. Die reduzierte Amplitude der Spannung an den Sendespulen würde vor allem bei den Spannungsmessungen mit der Erregerfrequenz von 80 Hz zur Verschlechterung der Genauigkeit führen.

Die größere Amplitude der Erregerspannung an der Sendespule bei sequenzieller Einspeisung der Sendespule mit beiden Frequenzen zieht eine Vergrößerung des Arbeitsvolumens nach sich, indem die leitenden Störkörper detektiert werden können. In der Abb. 4.4 werden die gemessenen Spannungen an der Empfangsspule mit Aluminiumscheibe in direkter Nähe und ohne leitenden Störkörper gezeigt. Die acht Sendespulen wurden nacheinander mit einer Erregerfrequenz von 80 Hz und 1200 Hz eingespeist und die gemessenen Spannungen normiert.

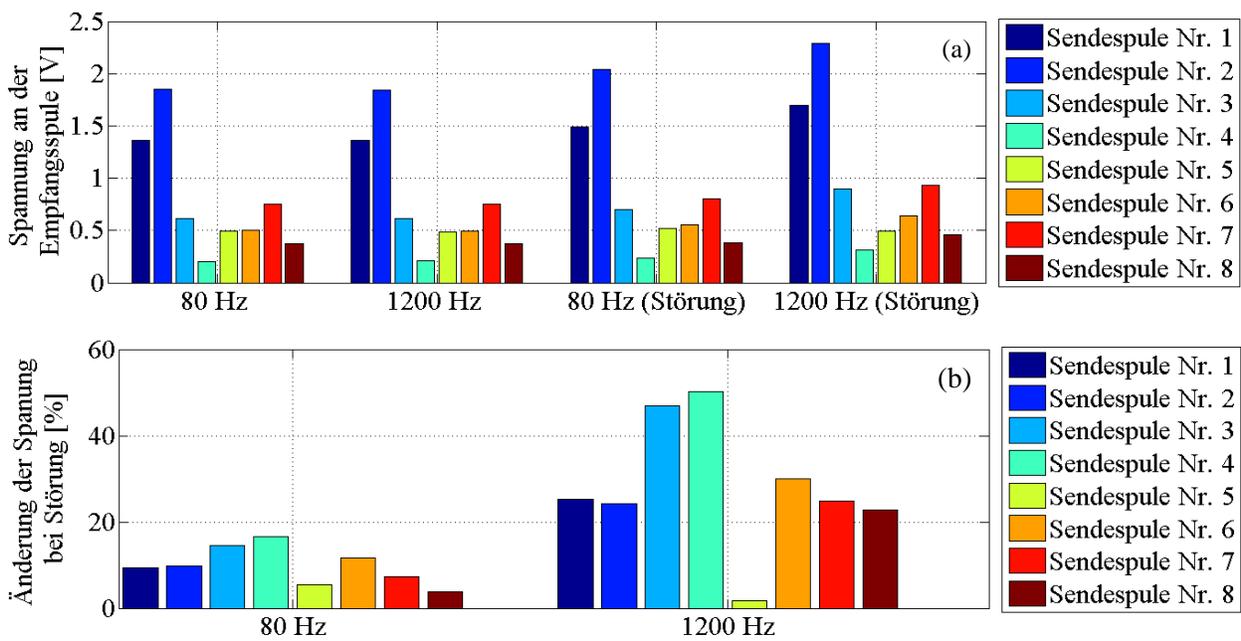


Abb. 4.4 Gemessene Amplitude der Spannung an der Empfangsspule von acht Sendespulen mit Aluminiumscheibe in direkter Nähe und ohne leitenden Störkörper bei zwei unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung (80 Hz und 1200 Hz), a) gemessene Amplituden der Spannung, b) Unterschied zwischen den gestörten und ungestörten Messwerten von acht Sendespulen bei zwei unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung

Der Einfluss des leitenden Störkörpers auf die normierten Amplituden der Spannung an der Empfangsspule wandelt sich mit Änderung der Frequenz der Erregerspannung. Dieser Unterschied für die Aluminiumscheibe kann in der Abb. 4.4b beobachtet werden. Der Vergleich der Amplituden der

Spannung bei zwei unterschiedlichen Frequenzen ermöglicht die Detektion des Störkörpers. Damit dieses Phänomen als Entscheidungskriterium verwendet werden kann, wird in dieser Arbeit ein Koeffizient der Störung K_{DF} eingeführt, der den Unterschied zwischen den normierten Amplituden der Spannung an der Empfangsspule bei der Frequenz von 1200 Hz und 80 Hz quantitativ vergleicht.

$$K_{DF} = \frac{U_{N1200} - U_{N80}}{U_{N1200}} \quad (4.6)$$

U_{N1200} : normierte Spannung an der Empfangsspule bei einer Frequenz von 1200 Hz (siehe Gleichung (4.5))

U_{N80} : normierte Spannung an der Empfangsspule bei einer Frequenz von 80 Hz (siehe Gleichung (4.5))

Der Koeffizient der Störung K_{DF} kann sowohl positive, als auch negative Werte annehmen. Positive Werte des Koeffizienten bedeuten laut dem entwickelten Modell, dass die Gegeninduktivitäten M'_{12} und M'_{1-ST-2} gleiche Vorzeichen besitzen (siehe Gleichung (4.3)). Die Division der Differenz der normierten Spannungen mit der normierten Spannung für 1200 Hz ermöglicht die Abschätzung des Grades der Störung unabhängig von der Amplitude der gemessenen Spannung. Diese Skalierung ist vor allem bei der Positionsbestimmung bei großem Abstand zwischen der Empfangsspule und dem Feldgenerator von hoher Bedeutung. Die mit Hilfe der Normierung eliminierte Frequenzabhängigkeit der magnetisch gekoppelten Send- und Empfangsspule sollte zur Nullstellung des Koeffizienten der Störung K_{DF} in Abwesenheit des leitenden Störkörpers führen. Jedoch sowohl wegen der Ungenauigkeit der Spannungsmessung als auch wegen anderer Messfehler (siehe Kapitel 3) ist der Koeffizient K_{DF} auch ohne Präsenz des Störkörpers von Null verschieden.

Deswegen wurde für diese Methode ein Schwellwert des Koeffizienten K_{DF} ausgewählt, ab welchem das elektromagnetische Trackingsystem als gestört angenommen wird. Die Lernphase dieser Methode erfolgt mit 45 zusätzlichen Messungen ohne die Präsenz des zusätzlichen Störkörpers. Diese 45 Spannungsmessungen werden mit Hilfe des im Kapitel 6 beschriebenen Robotersystems aufgenommen, wobei die Lage der Empfangsspule mit dem optischen Trackingsystem gemessen wird. In der Lernphase werden nur die Spannungsmessungen berücksichtigt, bei denen die Amplitude der gemessenen normierten Spannung bei der Erregerfrequenz von 1200 Hz größer als 0.1 V ist. Das Messvolumen bildet einen Würfel in der direkten Nähe der Aluminiumscheibe mit der Kantenlänge von 0.2 m (siehe Abb. 4.5b). Anschließend wurden 45 Messungen mit der Aluminiumscheibe in der Nähe der Empfangsspule aufgenommen, damit die Werte des Koeffizienten K_{DF} mit der Präsenz des leitenden Störkörpers berechnet werden können.

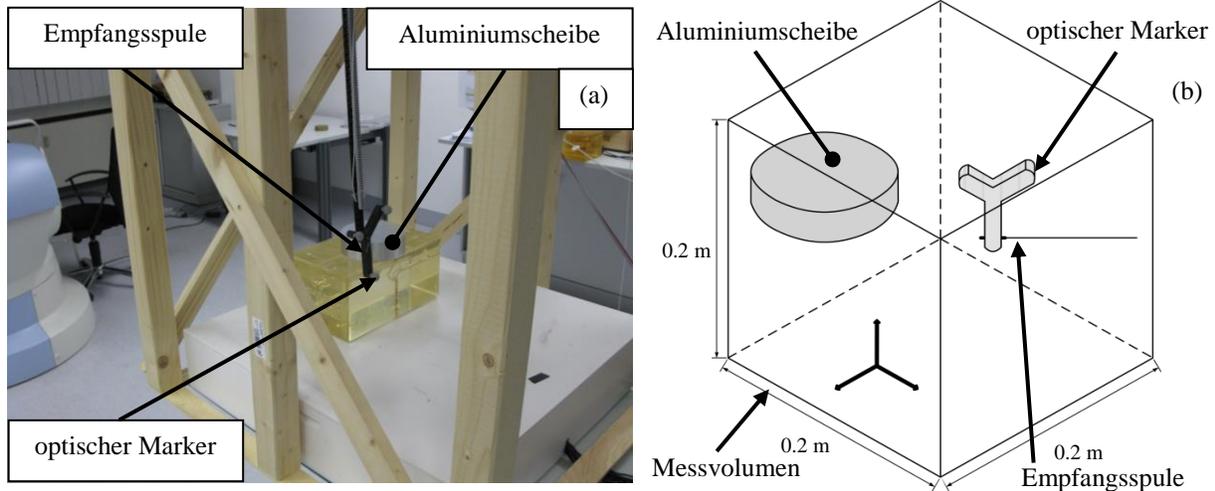


Abb. 4.5 Versuchsaufbau zur Festlegung des Entscheidungskriteriums zur Detektion des leitenden Störkörpers mit dem elektromagnetischen Trackingsystem auf der Basis der Spannungsmessungen mit zwei Frequenzen der Erregerspannung, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus

Das Histogramm von 360 gemessenen Koeffizienten der Störung K_{DF} (45 Messungen x 8 Sendespulen) im Szenario ohne zusätzliche Störungen wird in der Abb. 4.6a präsentiert. Das Histogramm der 360 gemessenen Koeffizienten der Störung K_{DF} mit der Präsenz der Aluminiumscheibe wird in der Abb. 4.6b wiedergegeben. Die in der Abb. 4.6b gezeigte Verteilungsdichte des Koeffizienten K_{DF} beinhaltet neben den stark gestörten Messwerten, auch die Messwerte, bei denen der Einfluss des Störkörpers auf die Spannung an der Empfangsspule vernachlässigbar ist. In der Abb. 4.6a und Abb. 4.6b wird neben dem experimentell berechneten Histogramm der Probe auch die geschätzte theoretische Verteilungsdichte wiedergegeben. Die geschätzte Verteilungsdichte wurde als Normalverteilung modelliert und auf Basis der Standardabweichung und des Mittelwertes in der Probe folgendermaßen bestimmt [179].

$$\bar{K}_{DF} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{DF i}}{n} \quad (4.7)$$

$$\sigma_{K_{DF}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{DF i} - \bar{K}_{DF})^2}{n}} \quad (4.8)$$

$$f(K_{DF}) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(K_{DF i} - \bar{K}_{DF})^2}{2 \cdot (\sigma_{K_{DF}})^2}\right) \quad (4.9)$$

\bar{K}_{DF} : Mittelwert der Koeffizienten K_{DF} in der Probe

$\sigma_{K_{DF}}$: Standardabweichung der Koeffizienten K_{DF} in der Probe

$f(K_{DF})$: Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung

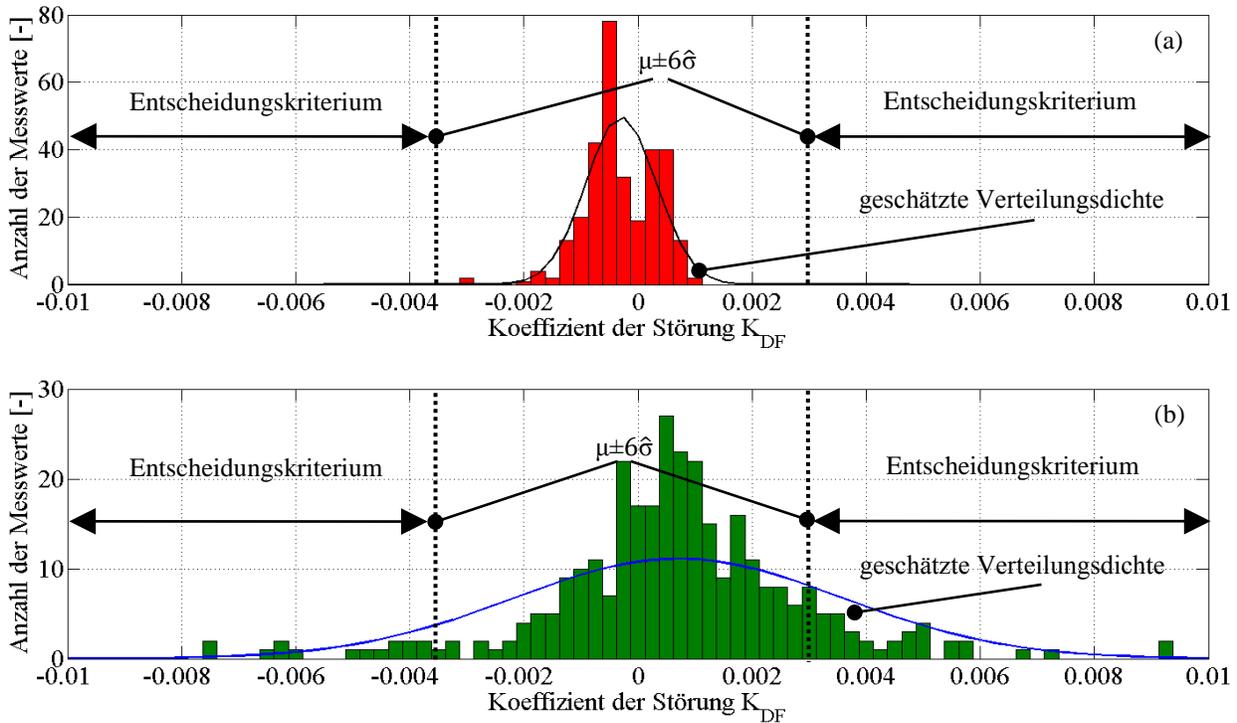


Abb. 4.6 Histogramm des Koeffizienten der Störung K_{DF} bei der Spannungsmessung mit zwei Frequenzen der Erregerspannung, a) ohne leitenden Störkörper, b) mit Aluminiumscheibe

Dem Koeffizient der Störung K_{DF} können vier unterschiedliche Zustände zugeordnet werden:

- richtig positiv
- falsch positiv (Fehler 1. Art)
- falsch negativ (Fehler 2. Art)
- richtig negativ

Eine Fehlermeldung, wenn das elektromagnetische Trackingsystem nicht gestört ist (falsch positiv – Fehler 1. Art), könnte eine radiologische Intervention beeinträchtigen. Deswegen wird angenommen, dass eine Fehlermeldung ohne Störkörper möglichst vermieden werden soll. Eine Positionsbestimmung wird als gestört angenommen, wenn sich der Koeffizient der Störung K_{DF} außerhalb des Vertrauensbereiches befindet. Dieser Vertrauensbereich besteht aus dem gemessenen Mittelwert dieses Klassifikators ohne Störung und der ± 6 -fachen geschätzten Standardabweichung des Koeffizienten der Störung σ_{DF} ohne Störkörper. Ein breiter Vertrauensbereich macht eine falsch positive Fehlermeldung auch im Falle eines hohen Messfehlers bei der Spannungsbestimmung unwahrscheinlich. Alle Messwerte, bei denen sich der Koeffizient der Störung K_{DF} außerhalb des Vertrauensbereiches befindet, werden als gestört angenommen (siehe Abb. 4.6b). Bei jeder Positionsbestimmung werden acht Spannungen mit der Empfangsspule gemessen, die von acht unterschiedlichen Sendespulen des Feldgenerators induziert worden sind. Der Koeffizient der Störung K_{DF} wird für die Spannung von jeder der acht Sendespulen getrennt berechnet. Verursacht nun die Spannung einer Sendespule eine Fehlermeldung, wird das Ortungssystem als gestört betrachtet.

Die Bewertung dieses Klassifikators erfolgt im Unterkapitel 7.3. Es werden die Sensitivität (Richtig-Positiv-Rate) und die Spezifität (Richtig-Negativ-Rate) der Detektion bewertet. Diese Größen werden folgend definiert [149]:

$$\text{Sensitivität} = \frac{\text{Anzahl der richtig positiven Werte}}{\text{Anzahl der richtig positiven Werte} + \text{Anzahl der falsch negativen Werte}} \quad (4.10)$$

$$\text{Spezifität} = \frac{\text{Anzahl der richtig negativen Werte}}{\text{Anzahl der richtig negativen Werte} + \text{Anzahl der falsch positiven Werte}} \quad (4.11)$$

Die Sensitivität und Spezifität werden in Abhängigkeit von den Fehlern der Positionsbestimmung im Unterkapitel 7.4 dargestellt.

4.2 Detektion mit einem Klassifikator auf der Basis der Einschaltvorgänge

Die zweite vorgeschlagene Methode zur Detektion des leitenden Störkörpers mit einem elektromagnetischen Trackingsystem basiert auch auf der unterschiedlichen Übertragungsfunktion des gestörten und des ungestörten Trackingsystems. Bei dieser Methode wird aber nicht die unterschiedliche Frequenzabhängigkeit des leitenden Störkörpers, sondern der unterschiedliche Verlauf der Einschaltvorgänge zur Detektion des elektrisch leitenden Störkörpers verwendet.

Die Sprungantwort des elektromagnetischen Trackingsystems bei Präsenz des elektrisch leitenden Störkörpers in der Nähe der Empfangsspule besteht aus der Summe der Sprungantworten der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems als auch aus der Sprungantwort des leitenden Störkörpers. Der theoretische Verlauf der resultierenden Summe der Sprungantworten U_{2G} wird in den Gleichungen (4.12) – (4.14) präsentiert.

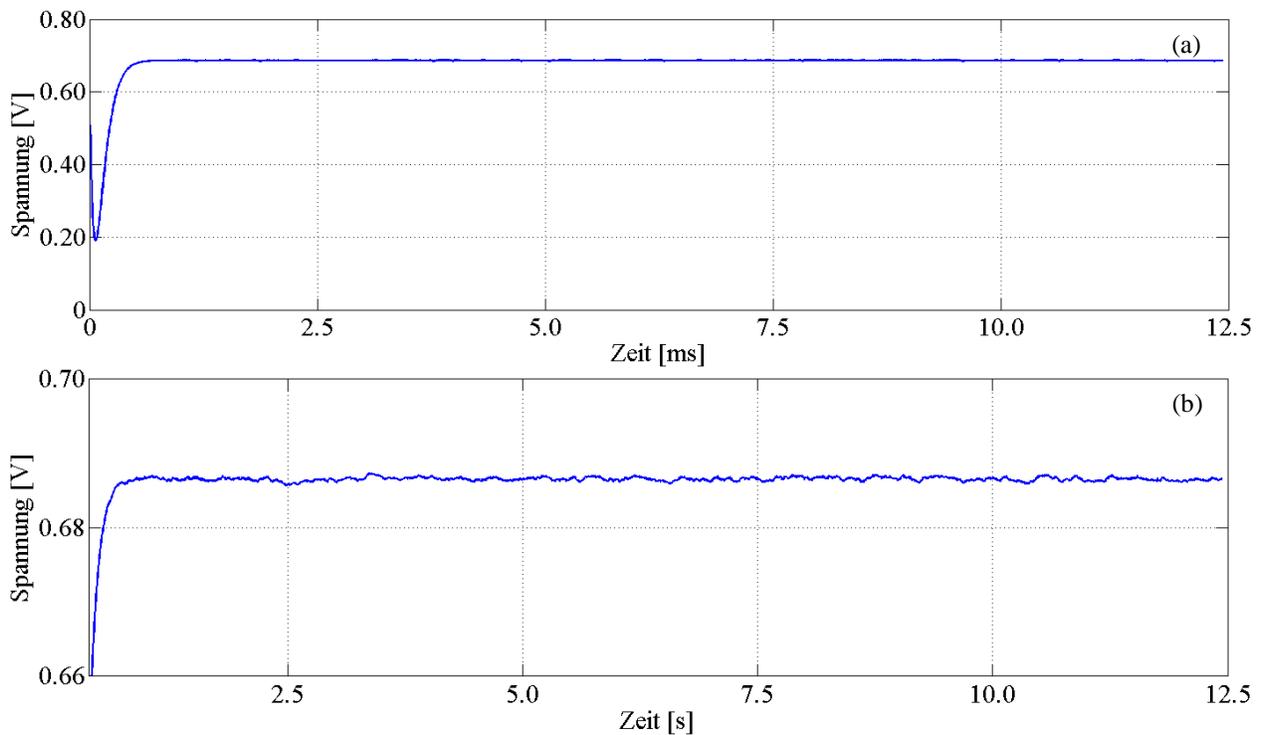
$$U_{2G}(s) = U_1(s) \cdot G_G(s) = \frac{U_e}{s} \cdot \left(\frac{M'_{12} \cdot s}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)} + \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \right) \quad (4.12)$$

$$U_{2G}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{G_G(s)}{s} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{U_e}{s} \cdot \frac{M'_{12} \cdot s}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)} + \frac{M'_{1-ST-2} \cdot s^2}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \right\} \quad (4.13)$$

$$U_{2G}(t) = U_2(t) + U_{1-ST-2}(t) = U_e \cdot \left(M'_{12} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{M'_{1-ST-2} \cdot \tau_1}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}} - \frac{M'_{1-ST-2} \cdot \tau_{ST}}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (4.14)$$

Die resultierende Sprungantwort an der Empfangsspule bei Präsenz des leitenden Störkörpers U_{2G} beinhaltet neben der Zeitkonstante der Sendespule τ_1 auch die Zeitkonstante des leitenden Störkörpers τ_{ST} .

Die Zeitkonstante des Störkörpers, anders als die Zeitkonstante der Sendespule, ist nicht bekannt und hängt von den Abmessungen, von der Leitfähigkeit und von der Lage des Störkörpers relativ zur Sende- und Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems ab. Die Zeitkonstanten des hochleitenden Störkörpers (Aluminium- und Messingscheibe) sind laut den durchgeführten Experimenten von den bekannten Zeitkonstanten der Sendespule verschieden. Die hochleitenden Störkörper weisen eine wesentlich größere Zeitkonstante als die verwendete Sendespule auf. Die Schaltung eines Widerstands in Reihe mit den Sendespulen ermöglicht eine weitere Minderung der Zeitkonstante (siehe Kapitel 2.3). In diesem Aufbau wird die Zeitkonstante der Spule mit einem zusätzlichen Widerstand von $10\ \Omega$ auf $0.083\ \text{ms}$ reduziert. Deswegen wird in dieser Arbeit die Spannung des Störkörpers $U_{1\text{-ST-2}}$ erst nach dem Abfall der Sprungantwort der Sendespule U_2 zu Null gemessen. Die exponentiell abfallende Spannung von der Sendespule wird nach 8-facher Zeitkonstante der Sendespule gemessen, wenn die Amplitude der Spannung nur $0.03\ \%$ des Anfangswerts zeigt. Es wird in dieser Arbeit angenommen, dass das Signal der Sendespule ab diesem Moment vernachlässigbar klein ist. Ab diesem Moment wird an der Empfangsspule fast ausschließlich die Sprungantwort des elektrisch leitenden Störkörpers gemessen. Der Vergleich der gemessenen Sprungantwort mit und ohne Präsenz der Aluminiumscheibe ist in der Abb. 4.7 dargestellt.



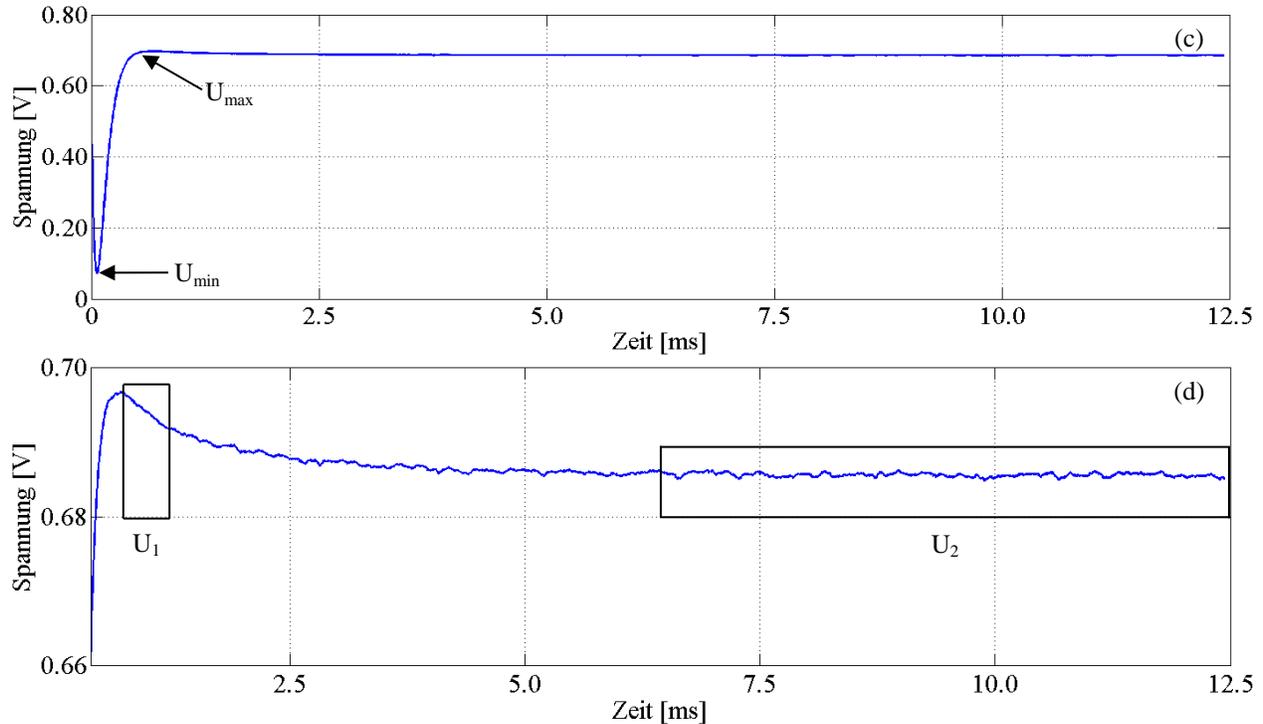


Abb. 4.7 Vergleich der gemessenen Sprungantwort des elektromagnetischen Trackingsystems, a) Sprungantwort ohne Präsenz des leitenden Störkörpers mit der Antwort der Sendespule und des Verstärkers, b) Sprungantwort ohne Präsenz des leitenden Störkörpers und ohne Antwort der Sendespule und des Verstärkers, c) Sprungantwort mit Präsenz der Aluminiumscheibe mit der Antwort der Sendespule und des Verstärkers, d) Sprungantwort mit Präsenz der Aluminiumscheibe ohne die Antwort der Sendespule und des Verstärkers

Damit der Verlauf der Antwort des Störkörpers quantitativ evaluiert werden kann, wird ein Koeffizient der Störung auf Basis der Analyse der Sprungantwort des Störkörpers K_{DE} eingeführt. Der Koeffizient K_{DE} wird durch den Unterschied zwischen der maximalen und minimalen Spannung an der Empfangsspule dividiert, weil diese Normierung die Verwendung dieses Koeffizienten unabhängig vom Abstand zwischen der Empfangsspule und dem Feldgenerator macht.

$$K_{DE} = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (4.15)$$

U_{S1} : Mittelwert der Spannungsamplitude zwischen dem Zeitpunkt der 8-fachen und der 16-fachen Zeitkonstante der Sendespule – 0.7 bis 1.4 ms für das entwickelte elektromagnetische Trackingsystem (siehe Abb. 4.7d)

U_{S2} : Mittelwert der Spannung zwischen dem Zeitpunkt der 75-fachen und der 150-fachen Zeitkonstante der Sendespule – 6.25 bis 12.5 ms für das entwickelte elektromagnetische Trackingsystem (siehe Abb. 4.7d)

U_{\max} : maximaler Wert der Sprungantwort (siehe Abb. 4.7c)

U_{\min} : minimaler Wert der Sprungantwort (siehe Abb. 4.7c)

Ähnlich wie in dem vorherigen Unterkapitel wird ein Entscheidungskriterium in Form eines Schwellenwertes eingeführt. Dies erfolgt mit dem Koeffizienten K_{DE} , der den Grad der Störung des elektromagnetischen Trackingsystems beschreibt. Das Lernen dieses Algorithmus findet mit Hilfe von 45 Messungen ohne Präsenz des Störkörpers in der Nähe der Empfangsspule statt. Die Messungen wurden in einem Experiment durchgeführt, welches bereits in der Abb. 4.5 schematisch dargestellt und im Unterkapitel 4.1 beschrieben wurde. Das Histogramm des Koeffizienten der Störung K_{DE} ohne Präsenz des leitenden Störkörpers wird in der Abb. 4.8a wiedergegeben. Es wurden zusätzlich 45 Messungen mit der Präsenz der Aluminiumscheibe in der Nähe der Empfangsspule aufgenommen. Die Verteilungsdichte des Koeffizienten der Störung K_{DE} mit der Präsenz der Aluminiumscheibe in der Nähe der Empfangsspule wird in der Abb. 4.8b gezeigt.

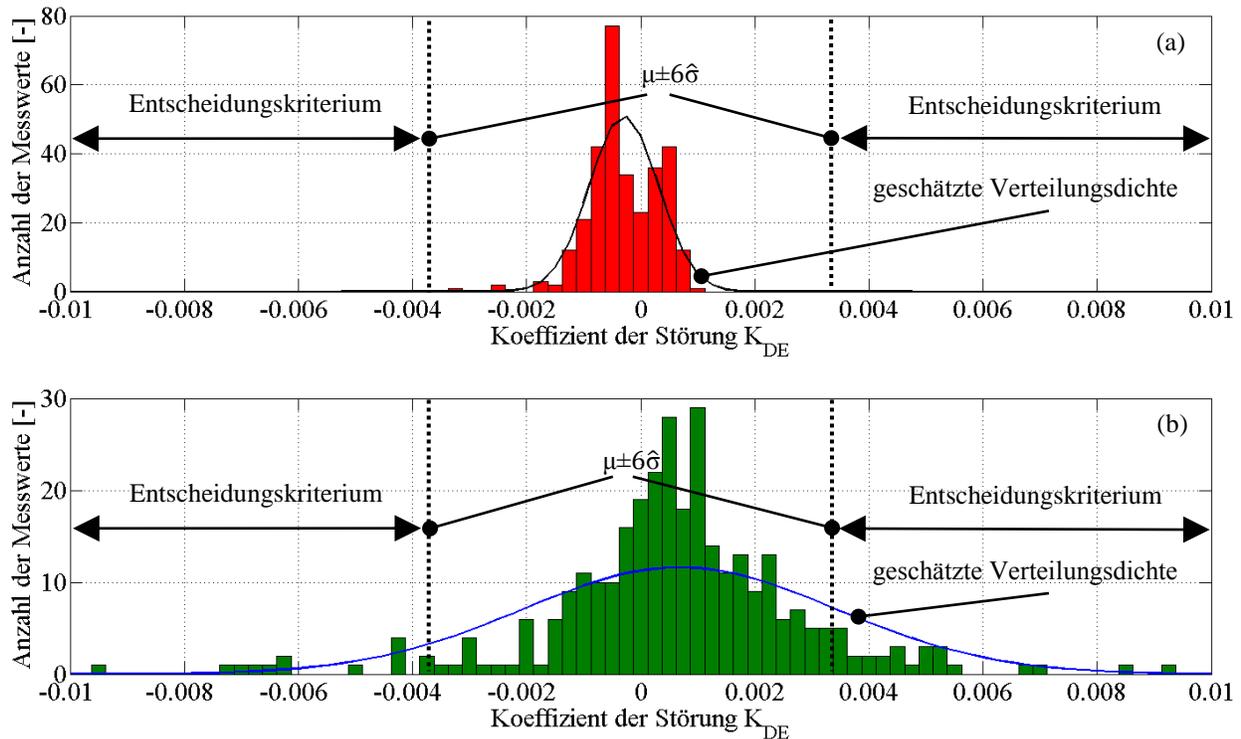


Abb. 4.8 Histogramm des Koeffizienten der Störung K_{DE} wird mit Hilfe der Auswertung der Einschaltvorgänge, a) ohne Präsenz des leitenden Störkörpers, b) mit Präsenz der Aluminiumscheibe dargestellt

Der Algorithmus sollte keine Fehlermeldung signalisieren, wenn das elektromagnetische Trackingsystem nicht gestört ist (Fehler 1. Art). Deswegen wird das elektromagnetische Trackingsystem als gestört angenommen, wenn sich der Koeffizient der Störung K_{DE} außerhalb des Vertrauensbereiches befindet. Der Vertrauensbereich besteht aus dem Mittelwert dieses Klassifikators ohne Störung \pm die geschätzte 6-fache Standardabweichung des Koeffizienten. Der Koeffizient der Störung K_{DE} wird für die Spannungsmessungen von jeder Sendespule getrennt berechnet. Wenn die Spannungsmessungen von

mindestens einer Sendespule eine Fehlermeldung aufweisen, wird die Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem als gestört betrachtet.

5 Korrektur der Störung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Methoden zur Korrektur der Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems durch leitenden Störkörper entwickelt. Die Methoden basieren auf Unterschieden in der Übertragungsfunktion zwischen dem gestörten und dem ungestörten elektromagnetischen Trackingsystem (siehe Kapitel 2.3). Diese Methoden wurden in diesem Kapitel beschrieben und im Unterkapitel 7.4 quantitativ evaluiert und miteinander verglichen.

5.1 Korrektur der Störungen mit Hilfe der Frequenzabhängigkeit

Die erste Methode zur Korrektur von Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems durch leitende Störkörper wird als Fortsetzung der Methode zur Detektion des leitenden Störkörpers auf Basis der Frequenzabhängigkeit betrachtet (siehe Unterkapitel 4.1). Sie basiert auf der unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit des gestörten und ungestörten elektromagnetischen Trackingsystems. Für die Erregung der Sendespulen muss ein passender Frequenzbereich ausgewählt werden. Es müssen bei dieser Auswahl zwei gegensätzliche Phänomene berücksichtigt werden. Die vom Störkörper auf der Empfangsspule induzierte Spannung sinkt mit abnehmender Frequenz der Erregerspannung (siehe Abb. 4.2). Gleichzeitig sinkt jedoch, mit abnehmender Frequenz der Erregerspannung auch die Amplitude der Spannung, die direkt von der Sendespule an der Empfangsspule induziert worden ist (siehe Abb. 4.1a). Die kleineren Amplituden der Spannungen an der Empfangsspule werden mit einer geringeren Genauigkeit gemessen, was auch die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem ohne leitenden Störkörper stark beeinträchtigt. Der in dieser Arbeit ausgewählte Frequenzbereich soll außerdem eine einfache Filterung der Netzfrequenz (50 Hz) ermöglichen und gleichzeitig nicht die Grenzfrequenz des Verstärkers der Empfangsspule überschreiten. Die in diesem Kapitel vorgeschlagene Methode zur Korrektur der Störungen wird diese Randbedingungen berücksichtigen.

Die Sendespule des elektromagnetischen Trackingsystems wird sequenziell mit 15 unterschiedlichen Erregerfrequenzen eingespeist. Hierfür werden 15 linear verteilte Frequenzen für die Erregerspannung zwischen 80 Hz und 1200 Hz in 80 Hz Schritten ausgewählt. Die zeitlich versetzte Einspeisung jeder Sendespule mit den 15 unterschiedlichen Erregerfrequenzen ermöglicht die Verwendung hoher Amplituden der Erregerspannung ohne die übermäßige Erwärmung der Sendespulen. Die Einspeisung der Sendespule mit 15 Frequenzen parallel mit der gleichzeitigen Filterung der Einzelsignale mit 15 Bandpassfiltern würde zwar im Vergleich mit der verwendeten Vorgehensweise schnellere Messungen ermöglichen, doch müssten die Amplituden der Spannung an den Sendespulen stark reduziert werden, um eine übermäßige Erwärmung zu vermeiden. Niedrige Amplituden der Spannungen an den Sendespulen würden zur Minderung der Zuverlässigkeit dieser Vorgehensweise führen.

Nach der Normierung der Spannung an der Empfangsspule nach der im Unterkapitel 4.1 beschriebenen Methode wird die Frequenzabhängigkeit der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule für bestimmte Frequenzen der Erregerspannung eliminiert. Ohne zusätzliche Störkörper weist das System für die ausgewählten Frequenzen für die Erregerspannung keine Frequenzabhängigkeit auf. Jedoch wird das

System mit Präsenz des leitenden Störkörpers aus dem Gleichgewicht gebracht und die an der Empfangsspule gemessene Spannung weist eine Frequenzabhängigkeit auf. Die 15 Eingangsspannungen mit den unterschiedlichen Frequenzen ermöglichen die mathematische Beschreibung der Frequenzabhängigkeit des Störkörpers und gleichzeitig eine vergleichbar schnelle Korrektur der Störung. Die Frequenzabhängigkeit des Störkörpers nach der Normierung der Spannung wird mathematisch wie folgt beschrieben:

$$\begin{aligned}
 U_{1-ST-2}(t) &= \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega \cdot \tau_{ST} \cdot (\cos(\omega t) + \omega \cdot \tau_{ST} \cdot \sin(\omega t))}{(\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} = \\
 &= \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega \cdot \tau_{ST} \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau_{ST}^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_{1-ST-2})}{(\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} = \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \omega \cdot \tau_{ST} \cdot \sin(\omega t + \varphi_{1-ST-2})}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau_{ST}^2}} \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

φ_{1-ST-2} : Phasenverschiebung zwischen der Spannung an der Empfangsspule mit Störkörper und der Spannung an der Sendespule

Die Phasenverschiebung zwischen der Spannung an der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule könnte auch zur Korrektur der Störung durch die leitenden Störkörper verwendet werden. Jedoch erfolgt die Bestimmung der Phasenverschiebung mit einem wesentlich größeren Fehler als die Bestimmung der Amplitude der Spannung an der Empfangsspule. Deswegen wird für die Korrektur der Störung in dieser Arbeit nur die Frequenzabhängigkeit des Amplitudenfrequenzganges und nicht die des Phasenfrequenzganges verwendet. In den Gleichungen (5.2) und (5.3) werden der theoretische Verlauf der Amplitude der Spannung an der Empfangsspule und der Phasenverschiebung zwischen der Spannung an der Empfangsspule und der Sendespule als Funktion der Frequenz beschrieben.

$$U_{1-ST-2}(f) = \frac{U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_{ST}}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot \tau_{ST}^2}} \quad (5.2)$$

$$\varphi_{1-ST-2}(f) = \arctan\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_{ST}}\right) \quad (5.3)$$

Die zwei Unbekannten der Gleichung (5.2), die normierte Gegeninduktivität M'_{1-ST-2} und die Zeitkonstante des Störkörpers τ_{ST} , werden mit Hilfe des Fittings dieser Gleichung an dem gemessenen Verlauf der Amplituden bestimmt. In der Abb. 5.1 befinden sich die gemessenen Amplituden der Spannung an der Empfangsspule nach der Normierung mit der Gleichung (4.5) an den 15 Messpunkten zusammen mit einem angepassten theoretischen Verlauf der Amplitude der Spannung an der Empfangsspule mit in direkter Nähe liegender Aluminiumscheibe (siehe Gleichung (5.3)). Das Fitting des

theoretischen Verlaufs der Spannung an die gemessenen Amplituden erfolgt anhand der Methode der kleinsten Quadrate. Es wird dafür die Matlab-Funktion *fit* verwendet [150].

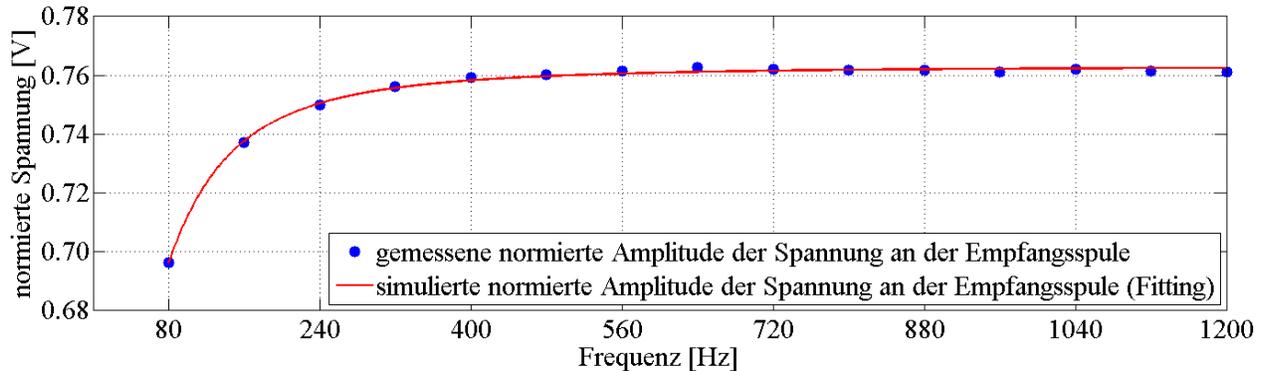


Abb. 5.1 Gemessene und simulierte Amplitude der Spannung an der Empfangsspule nach der Normierung mit in direkter Nähe liegender Aluminiumscheibe

Der resultierende theoretische Verlauf der Spannungsamplitude an der Empfangsspule als Funktion der Frequenz könnte bis zu einer Frequenz von Null Hz extrapoliert werden. Die Extrapolation der Gleichung (5.2) nach der Abschätzung der Unbekannten würde die Berechnung der abgeschätzten ungestörten normierten Spannung an der Empfangsspule trotz des leitenden Störkörpers in der Nähe der Empfangsspule ermöglichen. Jedoch könnte laut den durchgeführten Experimenten die Extrapolation der angepassten Kurve zur Frequenz gleich Null einen sehr hohen Fehler in der Positions- und Ausrichtungsbestimmung wegen der fehlerhaften Abschätzung der Koeffizienten M'_{1-ST-2} und τ_{ST} verursachen. Die Ortung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem wäre in dieser Situation nicht stabil, weil die mit einem gewissen Fehler berechneten Koeffizienten zu falschen Spannungsamplituden und demzufolge zu falschen Positionsbestimmungen führen würden.

Deswegen wird in dieser Arbeit der angepasste theoretische Verlauf der normierten Spannung nicht (siehe Gleichung (5.2)) zur Frequenz gleich Null extrapoliert, sondern für die Frequenz der Erregerspannung von 80 Hz berechnet. Die Ortung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem basiert auf der Messung der Amplitude der an der Empfangsspule induzierten Spannung. Die Spannungsmessungen für 80 Hz resultieren für die verwendeten Sendespulen in einer 11.4-fach niedrigeren Amplitude der Spannung als bei 1200 Hz. Die niedrige Amplitude der Spannung an der Empfangsspule führt zu einem erheblichen Fehler der Spannungsmessung, insbesondere im großen Abstand zwischen der Mitte des Koordinatensystems (Feldgenerator) und der Empfangsspule.

Die mit Hilfe dieses Verfahrens berechnete normierte Amplitude der Spannung an der Empfangsspule bei der Erregerspannung von 80 Hz wird durch die geschätzte Amplitude der Spannung an der Empfangsspule bei der Erregerspannung von 1000 Hz dividiert, da das Ortungssystem für diese Frequenz der Erregerspannung kalibriert wurde. Die Amplitude der Spannung bei der Erregerfrequenz von 1000 Hz wird als ein Mittelwert zwischen den Spannungen an der Empfangsspule bei der Erregerspannung von 960 Hz und 1040 Hz bestimmt. Der resultierende Koeffizient K_{KF} beschreibt den Grad der Änderung der gemessenen Amplitude der Spannung in der Präsenz des leitenden Störkörpers.

$$K_{KF} = \frac{U_{NV80}}{U_{N1000}} \quad (5.4)$$

U_{NV80} : Amplitude der Spannung an der Empfangsspule berechnet mit der Gleichung (5.2) für die Frequenz von 80 Hz

Der Koeffizient K_{KF} wird mit der Spannung an der Empfangsspule bei einer Frequenz der Erregerspannung von 1000 Hz U_{1000} multipliziert (siehe Gleichung (5.5)). Die verwendete Spannung U_{1000} wurde nicht zusätzlich normiert.

$$U_{K1000} = U_{1000} \cdot K_{KF} = U_{1000} \cdot \frac{U_{NV80}}{U_{N1000}} \quad (5.5)$$

U_{1000} : gemessene Spannungsamplitude an der Empfangsspule bei einer Frequenz von 1000 Hz

U_{K1000} : korrigierte Spannungsamplitude an der Empfangsspule bei einer Frequenz von 1000 Hz

Die dadurch korrigierte Amplitude der Spannung an der Empfangsspule wird zur Positionsbestimmung verwendet. Die acht im Rahmen der Positionsbestimmung gemessenen Spannungen der acht Sendespulen können durch die Präsenz des Störkörpers unterschiedlich beeinflusst werden. Der Grad der Störung hängt von der Lage und der Ausrichtung des Störkörpers relativ zu den Sendespulen des Feldgenerators und zur Empfangsspule ab. Die Lösung des Algorithmus zur Positionsbestimmung (siehe Seite 39) mit den gestörten Spannungen ergibt einen zusätzlichen Fehler der Minimierung, weil die gestörten Spannungen dem Modell der Feldverteilung nicht entsprechen und trotz des Optimierungsverfahrens keine genaue Lösung ermöglichen. Der Algorithmus zur Detektion mit dem Klassifikator auf Basis der Frequenzabhängigkeit zeigt einen wesentlichen Fehler 2. Art und daher werden leichte Störungen häufig nicht als Störung erkannt (siehe Unterkapitel 7.3). Deswegen könnte der Algorithmus zur Positionsbestimmung bei einer einzelnen korrigierten Spannung, anstatt der Positionsbestimmung mit einem großen Fehler der Konvertierung, bei einer falschen Lage und Ausrichtung des Sensors konvertieren. Der Fehler der Positionsbestimmung würde dadurch zunehmen, weil der Algorithmus mit einer einzelnen korrigierten Spannung und mehreren gestörten Spannungen optimiert sein müsste. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Korrektur auf der Basis mehrerer Frequenzen durchgeführt, wenn mindestens die Spannungen von fünf verwendeten Sendespulen als gestört angenommen werden. Die Anzahl von fünf Spulen wurde ausgewählt, weil dadurch die korrigierten Spannungen eine Mehrheit bilden und im Optimierungsverfahren eine dominierende Rolle spielen.

5.2 Korrektur der Störungen mit Hilfe der Einschaltvorgänge

Die im Unterkapitel 2.3 beschriebene Sprungantwort des elektromagnetischen Trackingsystems beinhaltet neben den Informationen über die Übertragungsfunktion der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule auch die Informationen über die Übertragungsfunktion des leitenden Störkörpers. In diesem Kapitel wird eine Methode zur Korrektur der Störungen durch die leitenden Störkörper beschrieben, die auf der Modellierung des Störkörpers und der Berechnung der von dem Störkörper induzierten Spannung basiert. Diese Methode wird als die Fortsetzung der Methode zur Detektion des leitenden Störkörpers auf der Basis der Einschaltvorgänge aus dem Unterkapitel 4.2 betrachtet. Die Sprungantwort des leitenden Störkörpers kann wie folgt mathematisch beschrieben werden (siehe Kapitel 2.3):

$$U_{1-ST-2}(t) = U_e \cdot \left(\frac{M'_{1-ST-2} \cdot \tau_1}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}} - \frac{M'_{1-ST-2} \cdot \tau_{ST}}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (5.6)$$

In dieser Arbeit wird nur ein Teil der Sprungantwort des Störkörpers mit der Zeitkonstante τ_{ST} aus Gleichung (5.6) verwendet. Die Zeitkonstante des Störkörpers ist wesentlich größer als die Zeitkonstante der Sendespule τ_1 , die noch zusätzlich mit einem Widerstand von 10Ω gedämpft wurde. Wegen der größeren Zeitkonstante werden die Koeffizienten der Sprungantwort an der Empfangsspule erst nach dem Ablauf der Einschaltvorgänge der Sendespule mathematisch beschrieben. Der theoretische Verlauf der Einschaltvorgänge des Störkörpers $U'_{1-ST-2}(t)$ wird an den Verlauf der gemessenen Spannung an der Empfangsspule mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate angepasst (siehe Abb. 5.2). Bei diesem Fitting der Gleichung (5.7) an den gemessenen Verlauf werden die Koeffizienten M'_{1-ST-2} und τ_{ST} bestimmt.

$$U'_{1-ST-2}(t) = U_e \cdot \frac{M'_{1-ST-2} \cdot \tau_1}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}} \quad (5.7)$$

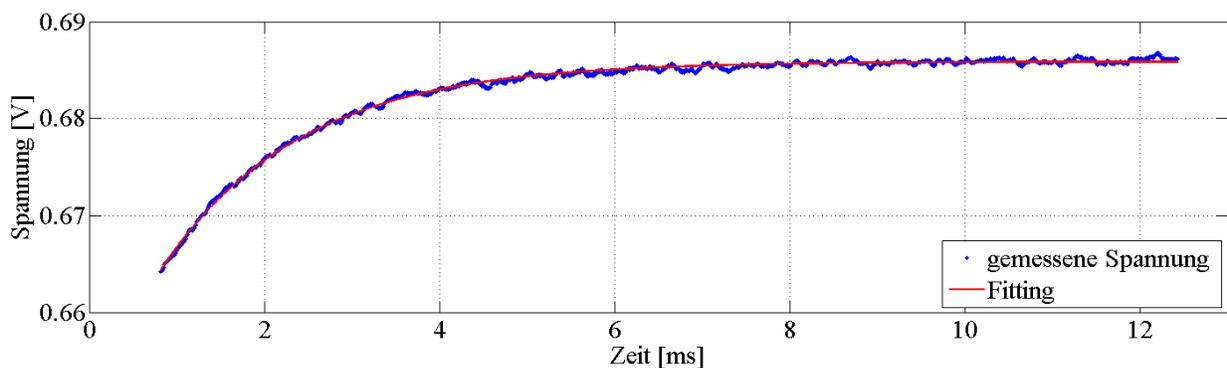


Abb. 5.2 Gemessene und gefittete Sprungantwort der Aluminiumscheibe an der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems nach Ablauf der Sprungantwort der Sendespule (nach der 8-fachen Zeitkonstante der Sendespule).

Die Konstanten M'_{1-ST-2} und τ_{ST} ermöglichen die Modellierung der Spannung an der Empfangsspule, die von dem Störkörper induziert worden ist. Die Konstanten werden zur Modellierung der sinusförmigen Spannung vom Störkörper bei der Erregerfrequenz von 1000 Hz verwendet. Die Gleichung (5.8) modelliert die Antwort des Störkörpers an der Empfangsspule bei sinusförmiger Erregung.

$$U_{1-ST-2}(t) = U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \frac{\omega \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\tau_1 - \tau_{ST})} - U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \frac{\omega \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}}}{(\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1) \cdot (\tau_1 - \tau_{ST})} \quad (5.8)$$

$$+ U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot (\omega \cdot \tau_1 \cdot \cos(\omega t) - \sin(\omega t)) + \omega \cdot \tau_{ST} \cdot \cos(\omega t) + \omega^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot \sin(\omega t)}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)}$$

Die an der Empfangsspule induzierten transienten Einschaltvorgänge werden zur Positionsbestimmung nicht verwendet. Die stationäre Antwort des Störkörpers auf eine sinusförmige Erregung wird mit der Gleichung (5.9) beschrieben.

$$U_{1-ST-2}(t) = U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot (\omega \cdot \tau_1 \cdot \cos(\omega t) - \sin(\omega t)) + \omega \cdot \tau_{ST} \cdot \cos(\omega t) + \omega^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot \sin(\omega t)}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} \quad (5.9)$$

Die gemessene Sprungantwort wird mit der Spannungsmessung der sinusförmigen Erregung bei 1000 Hz ergänzt. Die Spannungsmessung der sinusförmigen Erregung erfolgt direkt nach der Messung der Sprungantwort. Es wird auf das Einspeisen der Sendespule mit der Summe eines Einheitssprungs und einer sinusförmigen Erregung und anschließend auf die Trennung der beiden Antworten im Frequenzbereich verzichtet, da dies eine Minderung der Amplitude der Spannung an der Sendespule erforderlich machen würde. Dabei wird angenommen, dass Lage und Ausrichtung der Empfangsspule relativ zur Sendespule und zum Störkörper nicht geändert wurden. Die mit dem Fitting der Sprungantwort berechneten Koeffizienten M'_{1-ST-2} und τ_{ST} ermöglichen zusammen mit den bekannten Größen U_s , ω und τ_1 die Modellierung der Antwort des Störkörpers auf eine sinusförmige Erregung. Laut dem vorgeschlagenen Modell überlagert sich die Antwort des Störkörpers additiv mit der Antwort der Sendespule. Die modellierte sinusförmige Spannung des Störkörpers wird von der gesamten gemessenen Spannung subtrahiert. Der Unterschied zwischen der gesamten gemessenen Spannung und der auf der Basis der Auswertung der Sprungantwort simulierten Spannung vom Störkörper resultiert in einer ungestörten Spannung. Der Unterschied der beiden Spannungen ergibt die Spannung $U_2(t)$, die direkt von der Sendespule in der Empfangsspule induziert wurde (siehe Gleichungen (5.10) und (5.11)).

$$U_G(t) = U_2(t) + U_{1-ST-2}(t) \quad (5.10)$$

$$U_2(t) = U_G(t) - U_{1-ST-2}(t) =$$

$$= U_G(t) - U_s \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot (\omega \cdot \tau_1 \cdot \cos(\omega t) - \sin(\omega t)) + \omega \cdot \tau_{ST} \cdot \cos(\omega t) + \omega^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_{ST} \cdot \sin(\omega t)}{(\omega^2 \cdot \tau_1^2 + 1) \cdot (\omega^2 \cdot \tau_{ST}^2 + 1)} \quad (5.11)$$

| | |
|-------------------|---|
| $U_G(t)$: | gesamte gemessene Spannung an der Empfangsspule |
| $U_2(t)$: | direkt von der Sendespule induzierte Spannung |
| $U_{1-ST-2}(t)$: | modellierter Spannung vom Störkörper |

Die daraus resultierende, korrigierte Spannung $U_2(t)$ wird zur Lösung des Algorithmus zur Positionsbestimmung verwendet. Ähnlich wie in der Methode aus dem Unterkapitel 5.1 werden die korrigierten Spannungen zur Positionsbestimmung herangezogen, wenn die Spannungen von mindestens fünf Sendespulen als gestört detektiert werden. Zur Detektion der Störung wird der Algorithmus auf Basis der Analyse der Einschaltvorgänge verwendet (siehe Unterkapitel 4.2).

5.3 Positionsbestimmung mit Hilfe der quadratischen Erregerspannung

Die Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems auf eine sinusförmige Erregung ohne leitenden Störkörper wurde im Unterkapitel 2.3 in der Gleichung (2.40) beschrieben. Die Antwort besteht aus der Summe der Sinus- und Cosinusfunktion mit einem zusätzlichen exponentiell abnehmenden Einschaltvorgang. Nach Ablauf des transienten Einschaltvorganges kann die Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems zu einem einzelnen sinusförmigen Verlauf reduziert werden. Die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen an der Sendespule und der Empfangsspule hängt von der Impedanz der Sendespule und der Frequenz der Erregerspannung ab. Die Antwort des gestörten elektromagnetischen Trackingsystems auf eine sinusförmige Erregung der Sendespule wird im Unterkapitel 2.3 in der Gleichung (2.52) mathematisch beschrieben. Die Antwort besteht aus einer Summe mehrerer Sinus- und Cosinusfunktionen und den exponentiell abnehmenden Einschaltvorgängen. Nach dem Ablauf der Einschaltvorgänge beinhaltet die Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems die Summe der Sinus- und Cosinusfunktionen, die zu einem einzelnen Sinusverlauf reduziert werden können. Die Phasenverschiebung zwischen der sinusförmigen Erregerspannung an der Sendespule und der sinusförmigen Antwort an der Empfangsspule hängt von der Impedanz der Sendespule, den Eigenschaften des Störkörpers und von der Frequenz der Erregerspannung ab. Die resultierende Summe der Antwort der Sendespule und des Störkörpers auf eine sinusförmige Erregerspannung besteht aus einer Summe von zwei sinusförmigen Spannungsverläufen mit gleicher Frequenz. Die beiden sinusförmigen Verläufe unterscheiden sich nur in der Amplitude und in der Phasenverschiebung zwischen den Spannungen an Sendespule und an Empfangsspule. Deswegen kann die Spannung vom Störkörper nicht von der gesamten gemessenen Spannung getrennt oder ausgefiltert werden.

Die in diesem Unterkapitel beschriebene Methode zur Korrektur des elektromagnetischen Trackingsystems basiert auf dem Unterschied zwischen der Übertragungsfunktion des ungestörten und des gestörten elektromagnetischen Trackingsystems. Die Spannung, die direkt von der Sendespule an der Empfangsspule induziert worden ist, wird laut der Übertragungsfunktion im Laplace-Bereich mit dem komplexen Frequenzparameter s multipliziert (siehe Gleichung (2.31)). Diese Multiplikation im Laplace-Bereich entspricht einer Ableitung nach der Zeit im Zeit-Bereich. Das Signal, das über einen Störkörper indirekt an einer Empfangsspule induziert worden ist, wird im Laplace-Bereich mit der zweiten Potenz des

komplexen Frequenzparameters s^2 multipliziert (siehe Gleichung (2.45)). Diese Multiplikation entspricht einer doppelten Ableitung nach der Zeit im Zeit-Bereich. Dieser Unterschied ermöglicht die Trennung zwischen den gestörten und ungestörten Spannungen, wenn die Sendespule des elektromagnetischen Trackingsystems mit einer bestimmten Spannungsform eingespeist wird. In dieser Arbeit wird dafür ein quadratischer Verlauf der Spannung an der Sendespule verwendet.

$$U_Q(t) = U_Q \cdot t^2 \quad (5.12)$$

U_Q : Steigung der quadratischen Erregung

$U_Q(t)$: quadratische Erregungsspannung an der Sendespule

Die Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems ohne leitenden Störkörper wird bei einer quadratischen Erregerspannung im Laplace-Bereich mit Gleichung (5.13) und im Zeitbereich mit Gleichung (5.14) beschrieben.

$$U_{1-2Q}(s) = U_Q(s) \cdot G_{1-2}(s) = \frac{2 \cdot U_Q}{s^3} \cdot \frac{s \cdot M'_{12}}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)} = \frac{2 \cdot U_Q \cdot s \cdot M'_{12}}{s^3 \cdot \left(\frac{1}{\tau_1} + s\right)} \quad (5.13)$$

$$U_{1-2Q}(t) = 2 \cdot U_Q \cdot \tau_1 \cdot M'_{12} \cdot \left(t - \tau_1 + \tau_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \quad (5.14)$$

In den Gleichungen (5.15) und (5.16) werden die Antworten eines leitenden Störkörpers auf eine quadratische Erregerspannung im Laplace- und im Zeitbereich präsentiert.

$$U_{1-ST-2Q}(s) = U_Q(s) \cdot G_{1-ST-2}(s) = \frac{2 \cdot U_Q}{s^3} \cdot \frac{s^2 \cdot M'_{1-ST-2}}{\left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} = \frac{2 \cdot U_Q \cdot s^2 \cdot M'_{1-ST-2}}{s^3 \cdot \left(\frac{1}{\tau_1} + s\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{ST}} + s\right)} \quad (5.15)$$

$$U_{1-ST-2Q}(t) = 2 \cdot U_Q \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \left(\tau_1 \cdot \tau_{ST} + \frac{\tau_1 \cdot \tau_{ST}^2}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}} - \frac{\tau_1^2 \cdot \tau_{ST}}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \quad (5.16)$$

Die Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems ohne zusätzliche Störungen auf eine quadratische Erregerspannung im Zeitbereich (siehe Gleichung (5.14)) beinhaltet einen dreieckigen, einen rechteckigen und einen durch die Einschaltvorgänge exponentiell abnehmenden Spannungsverlauf. Die Antwort des leitenden Störkörpers auf eine quadratische Erregerspannung (siehe Gleichung (5.16)) im Zeitbereich umfasst einen rechteckigen und einen durch die Einschaltvorgänge exponentiell abnehmenden Spannungsverlauf. Der in der Antwort des leitenden Störkörpers fehlende dreieckige Verlauf der Spannung unterscheidet die beiden Antworten auf eine quadratische Erregung der Sendespulen. Dieser

Unterschied wird durch die doppelte Ableitung des Eingangssignals verursacht, wenn die Spannung vom Störkörper an der Empfangsspule induziert wird. Das Signal, das direkt von der Sendespule an die Empfangsspule induziert worden ist, wird laut dem Modell nur einmalig abgeleitet.

Der dreieckige Verlauf der Spannung an der Empfangsspule beinhaltet die Informationen über die gegenseitige Kopplung zwischen der Sende- und Empfangsspule, was die Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem ohne den Einfluss des leitenden Störkörpers ermöglicht. Jedoch überlagern sich die exponentiell abnehmenden Einschaltvorgänge mit der dreieckigen Antwort, was die Berechnung der Kopplung zwischen der Sende- und Empfangsspule verhindert. Die Einschaltvorgänge fallen mit der Zeit ab. Wenn aber der dreieckige Verlauf der Spannung erst nach dem Abfall der Einschaltvorgänge aufgenommen wird, würde sich die Periodendauer verlängern. Die längere Periodendauer führt zu einem langsamen Anstieg der Spannung an der Sendespule. Deswegen resultiert eine längere Periodendauer mit einer deutlich kleineren Amplitude der Spannung an der Empfangsspule, was das Arbeitsvolumen des elektromagnetischen Trackingsystems verkleinern würde.

In dieser Arbeit werden die Einschaltvorgänge der Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems auf einer quadratischen Erregerspannung eliminiert. Die Eliminierung der Einschaltvorgänge basiert auf der zusätzlichen Messung der Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems auf eine rechteckige Erregung der Sendespule (siehe Abb. 5.3c und Abb. 5.3d). Die Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems und des leitenden Störkörpers auf eine rechteckige Erregung mit der Amplitude U_R wird in den folgenden Gleichungen beschrieben.

$$U_{1-2R}(s) = U_R \cdot M'_{1-2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (5.17)$$

$$U_{1-ST-2R}(s) = U_R \cdot M'_{1-ST-2} \cdot \left(\frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{\tau_{ST}}{\tau_1 - \tau_{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}} \right) \quad (5.18)$$

U_R : Amplitude des Einheitssprungs

Diese Sprungantwort des elektromagnetischen Trackingsystems und des Störkörpers beinhaltet nur die transienten Einschaltvorgänge und fällt mit der Zeit exponentiell ab (siehe Abb. 5.3d). Die Sprungantwort des gesamten Systems ermöglicht die Modellierung der transienten Antwort des Systems auf eine quadratische Erregung. Die Sendespule des elektromagnetischen Trackingsystems wird, direkt mit einer vernachlässigbar kleinen Verzögerung nach der Erregung mit der quadratischen Spannung, mit einer rechteckigen Spannung erregt. Es wird dabei angenommen, dass die gegenseitige Lage und Ausrichtung des leitenden Störkörpers der Sende- und Empfangsspule während der beiden Messungen konstant bleiben. Eine doppelte Ableitung der quadratischen Erregung resultiert mit einer Sprungantwort. Eine doppelte Integration der Sprungantwort des elektromagnetischen Trackingsystems resultiert in der transienten Antwort auf eine quadratische Erregung, wenn die Konstanten der Integration subtrahiert werden. In dieser Arbeit erfolgt die numerische Integration mit der Mittelpunktsregel. Dabei werden die gemessenen Spannungsamplituden jeweils mit dem Abtastintervall multipliziert und aufsummiert. Neben dem zeitlichen Verlauf der Spannung beinhaltet die dadurch erzeugte Zeitreihe zusätzlich eine Konstante in Form der Summe aller Messwerte multipliziert mit dem Abtastintervall. Diese Konstante entspricht

dem letzten Wert der kumulativen Summe und wird von deren Verlauf subtrahiert. Die Berechnung des numerisch integrierten Signals erfolgt zwischen Null und der Abklingzeit des Störkörpers ΔT_{ST} . In den durchgeführten Versuchen wird ein ΔT_{ST} gleich 12.5ms und eine Abtastrate von 160 000 kS verwendet. Die theoretischen Verläufe der doppelt integrierten Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems und des Störkörpers mit subtrahierten Konstanten finden sich in der Gleichung (5.19) und (5.20).

$$\int_0^{\Delta T_{ST}} \int_0^{\Delta T_{ST}} U_{1-2R}(t) dt^2 = U_R \cdot M'_{1-2} \cdot \tau_1^2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (5.19)$$

$$\int_0^{\Delta T_{ST}} \int_0^{\Delta T_{ST}} U_{1-ST-2R}(t) dt^2 = U_R \cdot M'_{1-2} \cdot \left(\frac{1}{\tau_1 \cdot (\tau_1 - \tau_{ST})} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{1}{\tau_{ST} \cdot (\tau_1 - \tau_{ST})} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ST}}} \right) \quad (5.20)$$

Die dadurch künstlich erzeugten Einschaltvorgänge der Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems auf eine quadratische Erregung der Sendespulen (siehe Abb. 5.3e) werden von der gemessenen Antwort der quadratischen Erregerspannung subtrahiert (siehe Abb. 5.3f).

Die Berechnung der Lage und der Ausrichtung der Empfangsspule mit dem elektromagnetischen Trackingsystem bei einer quadratischen Erregung der Sendespulen kann mit Hilfe der Berechnung der Gegeninduktivität zwischen der Sende- und Empfangsspule erfolgen. Zur Berechnung der Gegeninduktivität wird im ersten Schritt der Anstieg des dreieckigen Verlaufes der Spannung an der Empfangsspule (siehe Abb. 5.3f) mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt⁵. Die Gegeninduktivität zwischen der Sende- und Empfangsspule wird auf Basis der bekannten Zeitkonstante der Sendespule, der Amplitude der Erregerspannung an der Sendespule und des bestimmten Anstiegs der dreieckigen Spannung an der Empfangsspule berechnet (siehe Gleichungen (5.21) und (5.22)). Die Gegeninduktivität wird zur Modellierung einer äquivalenten Amplitude der sinusförmigen Spannung auf der Basis der Gleichung (5.23) herangezogen, mit der die Positionsbestimmung durchgeführt wird. Laut dem Modell der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule und des elektrisch leitenden Störkörpers werden die Positionsbestimmungen mit der quadratischen Erregerspannung nicht durch die Präsenz des leitenden Störkörpers beeinflusst.

$$U_{1-2Q} = 2 \cdot U_Q \cdot \tau_1 \cdot M'_{12} \quad (5.21)$$

$$M'_{12} = \frac{U_{1-2Q}}{2 \cdot U_Q \cdot \tau_1} \quad (5.22)$$

$$U_2 = \frac{U_s \cdot M'_{12} \cdot \omega \cdot \tau_1 \cdot (\cos(\omega t) + \omega \cdot \tau_1 \cdot \sin(\omega t))}{(\omega^2 \cdot \tau_1 + 1)} = \frac{U_{1-2Q}}{2 \cdot U_Q} \cdot \frac{U_s \cdot \omega \cdot (\cos(\omega t) + \omega \cdot \tau_1 \cdot \sin(\omega t))}{(\omega^2 \cdot \tau_1 + 1)} \quad (5.23)$$

⁵ Die Berechnung des Anstiegs erfolgt mit der Matlab-Funktion *fit* [150].

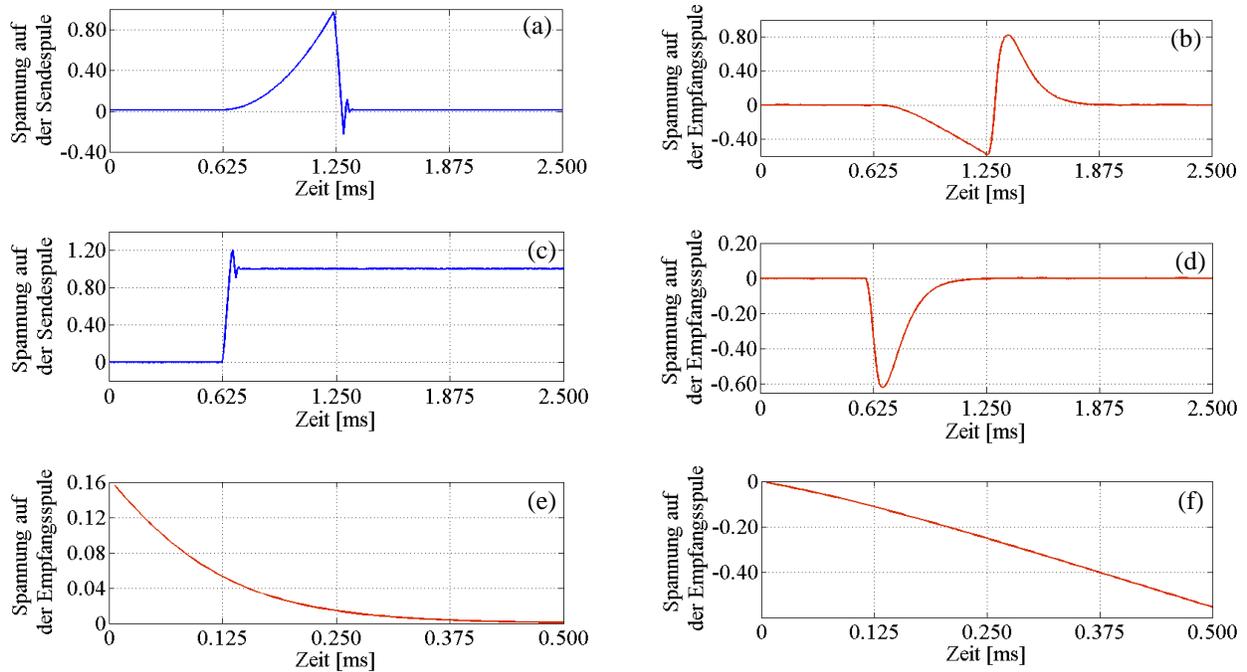


Abb. 5.3 Extraktion des stationären Zustands der Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems auf eine quadratische Erregerspannung, (a) gemessener quadratischer Verlauf der Spannung an der Sendespule, (b) gemessene Antwort des Trackingsystems an der Empfangsspule auf eine quadratische Erregung, (c) gemessener rechteckiger Verlauf der Spannung an der Sendespule, (d) gemessene Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems an der Empfangsspule auf eine rechteckige Erregung, (e) künstlich erzeugte transiente Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems an der Empfangsspule auf eine quadratische Erregung mit Hilfe der doppelten Integration der Antwort des Trackingsystems auf eine rechteckige Erregung, (f) korrigierte Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems an der Empfangsspule auf eine quadratische Erregung mit den subtrahierten Einschaltvorgängen⁶

⁶ Eine ähnliche Abbildung wurde in der Publikation des Autors [143] verwendet.

6 Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Demonstrator des AC-elektromagnetischen Trackingsystems entwickelt. Die elektromagnetischen Felder werden mit einem Feldgenerator, der aus acht zylindrischen Sendespulen besteht, generiert. Die Sendespulen des Feldgenerators werden sequenziell mit einer sinusförmigen Spannung eingespeist und generieren das quasistatische elektromagnetische Feld. Die sinusförmige Erregung der Sendespulen wird mit Hilfe einer Messkarte generiert und mit einem Leistungsverstärker erhöht. Das mit Hilfe des Feldgenerators generierte elektromagnetische Feld wird mit einer Empfangsspule gemessen. Die auf der Empfangsspule induzierte Spannung wird mit einem Instrumentenverstärker verstärkt und anschließend mit Hilfe einer Messkarte gemessen. Auf Basis der Spannung, die auf der Empfangsspule induziert wurde, werden das elektromagnetische Feld der Sendespulen des Feldgenerators und infolgedessen die Position und die Ausrichtung der Empfangsspule berechnet.

6.1 Experimenteller Aufbau

Messsystem

Das in der Arbeit verwendete Messsystem NI PXI-6281 [144] wird sowohl zur Messung des Signals auf der Empfangsspule als auch zur Ansteuerung des Leistungsverstärkers der Sendespulen sowie zur Erzeugung des Signals für die Sendespulen verwendet. Der AD/DA-Wandler ist ein Bestandteil einer PC-basierten NI PXI-Plattform für Prüf-, Mess-, Steuer- und Regelanwendungen. Das Signal, mit dem der Feldgenerator des elektromagnetischen Trackingsystems betrieben wird, wird mit Hilfe eines Digital-Analog-Wandlers (DA-Wandler) erzeugt und an den Leistungsverstärker der Sendespulen angelegt (siehe Abb. 6.1). Mit Hilfe des digitalen Ausgangs des Messsystems wird die Sendespule ausgewählt, die jeweils mit dem Strom versorgt wird. Die mit dem Instrumentenverstärker verstärkte Spannung an der Empfangsspule wird mit einem AD-Wandler des Messsystems gemessen. Die Verbindung des Messsystems mit den beiden Verstärkern wird in Abb. 6.1 wiedergegeben.

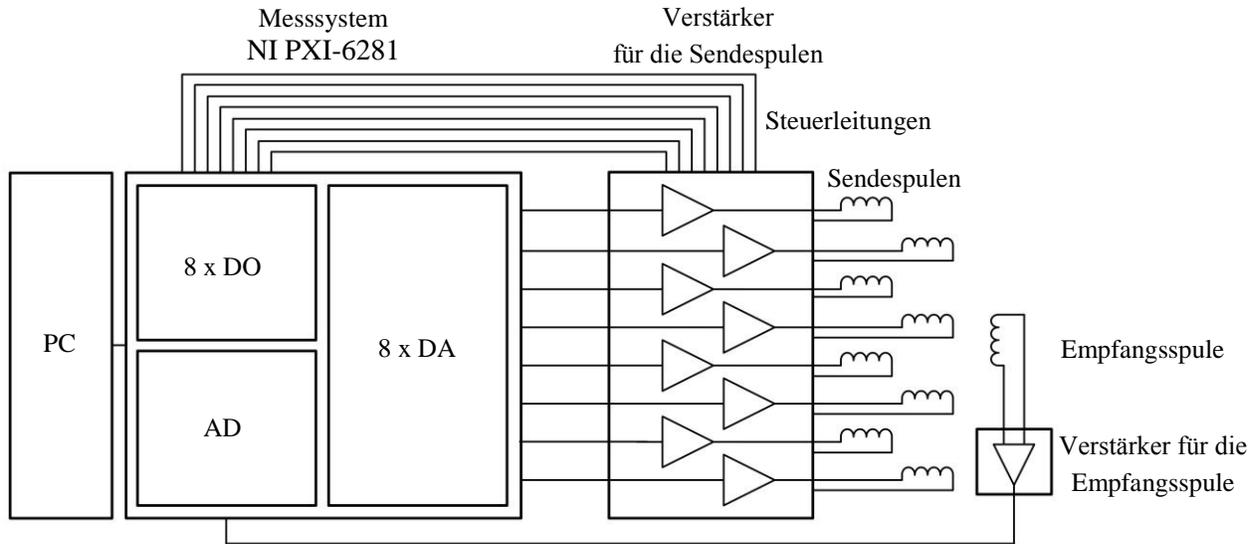


Abb. 6.1 Messsystem zur Ansteuerung der Sendespulen und der Messung der Spannung an der Empfangsspule

Die mit dem AD-Wandler digitalisierte Spannung ermöglicht die Bestimmung der Phasenverschiebung zwischen der Spannung an der Empfangsspule und dem Strom in der Sendespule. Es wird dafür im ersten Schritt eine Phasenverschiebung zwischen der gemessenen Spannung an der Empfangsspule $U_2(t)$ und der Spannung an der Sendespule $U_1(t)$ wie folgt bestimmt.

$$U_1(t) = U_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (6.1)$$

$$U_2(t) = U_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_2) \quad (6.2)$$

$$U_1(t) \cdot U_2(t) = U_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot U_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_2) = \frac{1}{2} \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot (\cos(\varphi_2) - \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \varphi_2)) \quad (6.3)$$

φ_2 : Phasenverschiebung zwischen der Spannung an der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule

Der zeitabhängige Teil der Gleichung (6.3) wird durch Mittelung über die Hälfte der Periode des Signals entfernt. Die Phasenverschiebung zwischen der Spannung an der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule wird wie folgt berechnet.

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{2 \cdot U_1(t) \cdot U_2(t)}{U_1 \cdot U_2}\right) \quad (6.4)$$

Die berechnete Phasenverschiebung, sowie der Widerstand und die Induktivität der Sendespule ermöglichen die Berechnung der Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Spannung an der Sendespule. Diese wird wie folgt bestimmt.

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right) \quad (6.5)$$

φ_1 : Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Spannung der Sendespule

Die resultierende Phasenverschiebung φ_1 wird von der Phasenverschiebung φ_2 subtrahiert. Die resultierende Phasenverschiebung $\varphi_{1,2}$ entspricht dieser zwischen dem Strom in der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule.

$$\varphi_{1,2} = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (6.6)$$

$\varphi_{1,2}$: Phasenverschiebung zwischen dem Strom an der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule

Feldgenerator

Der im Rahmen der Arbeit von Kaiser entwickelte Feldgenerator besteht aus acht unterschiedlich ausgerichteten zylinderförmigen Luftspulen [111]. Da die magnetische Flussdichte in den ferromagnetischen Materialien nichtlinear von der Feldstärke abhängt, würde im Falle einer Sendespule mit einem magnetischen Kern ein deformiertes Signal an der Empfangsspule induziert. Die Berechnung der Lage und Ausrichtung der Empfangsspule erfolgt im kartesischen Koordinatensystem (siehe Unterkapitel 2.2). Der Mittelpunkt des Koordinatensystems wurde in den Mittelpunkt des Feldgenerators gesetzt (siehe Abb. 6.2).

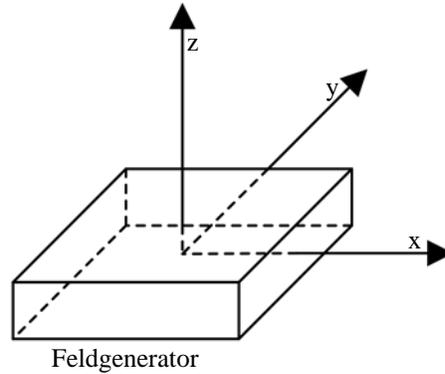


Abb. 6.2 Koordinatensystem des Feldgenerators

Die Sendespulen sind radial um die Mitte des Koordinatensystems des Feldgenerators auf einer Lochplatte mit dem Raster von 50 mm angeordnet und in unterschiedliche Richtungen ausgerichtet. Ein Foto und eine Skizze des Feldgenerators finden sich in der Abb. 6.3.

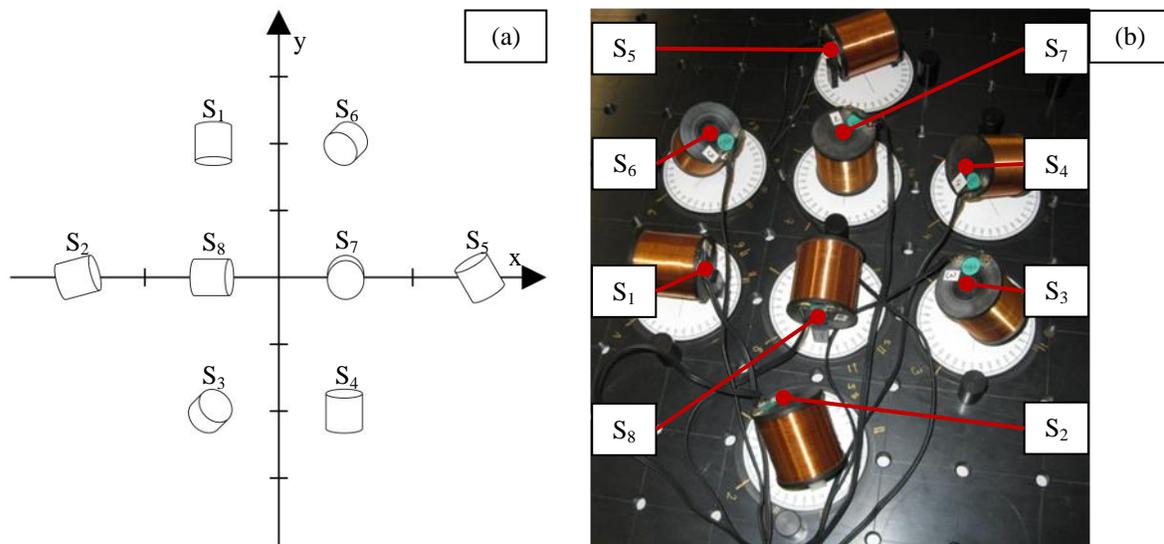


Abb. 6.3 Skizze (a) und Foto (b) der Sendespulen des Feldgenerators ($S_1 \dots S_8$) des entwickelten elektromagnetischen Trackingsystems

Die Lagen und die Ausrichtungen der Sendespulen des Feldgenerators in dem Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems befinden sich in der Tab. 2. In der Tab. 3 sind die Abmessungen, die Anzahl der Wicklungen, der Widerstand und die Induktivität der Spulen des Feldgenerators zu erkennen.

| | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| x _s [m] | -0.05 | -0.15 | -0.05 | 0.05 | 0.15 | 0.05 | 0.05 | -0.05 |
| y _s [m] | 0.10 | 0.00 | -0.10 | -0.10 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.00 |
| z _s [m] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| φ _s [°] | -90 | 30 | 90 | 120 | 120 | 240 | 0 | 0 |
| θ _s [°] | 90 | 60 | 30 | 60 | 90 | 30 | 0 | 90 |

Tab. 2 Lage (x_s, y_s, z_s) und Ausrichtung (φ_s, θ_s) der Sendespulen (S₁ ... S₈) des Feldgenerators des elektromagnetischen Trackingsystems

| | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| L [mH] | 1.168 | 1.165 | 1.164 | 1.175 | 1.161 | 1.164 | 1.147 | 1.164 |
| R [Ω] | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 |
| r [m] | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| l [m] | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| n _s [-] | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |

Tab. 3 Induktivität (L), Widerstand (R), Radius (r), Länge (l) und Anzahl der Wicklungen (n_s) der Sendespulen (S₁ ... S₈) des Feldgenerators des elektromagnetischen Trackingsystems

Empfangsspule

Die Empfangsspulen der Firma NDI wurden als Feldsensoren für den Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems verwendet [45]. Die Röntgenaufnahmen beider Spulen finden sich in der Abb. 6.4.



Abb. 6.4 Verwendete Empfangsspulen der Firma Northern Digital Inc. für den Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems: (a) Röntgenaufnahme der Empfangsspule mit einem Durchmesser von 0.5 mm, (b) Röntgenaufnahme der Empfangsspule mit einem Durchmesser von 0.3 mm

In der Tab. 4 befinden sich die Abmessungen, die Anzahl der Wicklungen und die Induktivität der Empfangsspulen.

| | Empfangsspule mit dem Durchmesser von 0.5 mm | Empfangsspule mit dem Durchmesser von 0.3 mm |
|----------------|--|--|
| L [mH] | 3.2 | 2.5 |
| R [Ω] | 80 | 100 |
| r [mm] | 0.5 | 0.3 |
| l [mm] | 8 | 11 |

Tab. 4 Induktivität (L), Widerstand (R), Radius (r) und Länge (l) der Empfangsspulen des elektromagnetischen Trackingsystems

Die Empfangsspule der Firma Northern Digital Inc. mit einem Durchmesser von 0.5 mm wurde bei den in den Kapiteln 2, 4, 5 und 7 beschriebenen Experimenten verwendet. Die Empfangsspule der Firma Northern Digital Inc. mit einem Durchmesser von 0.3 mm wurde wegen eines kleineren Durchmessers in einen Katheter und Führungsdraht integriert. Die Experimente mit dieser Empfangsspule werden im Kapitel 8 beschrieben.

Verstärker des Signals für die Sendespule

Das mit Hilfe des DA-Wandlers in NI PXI-6281 erzeugte sinusförmige Signal wird mit Hilfe eines Leistungsverstärkers verstärkt und an die Sendespulen des Feldgenerators angelegt. Die am Lehrstuhl für Medizinische Telematik und Medizintechnik im Rahmen einer studentischen Arbeit entwickelte Verstärkerschaltung basiert auf dem integrierten Operationsverstärker LT1210 der Firma Linear Technology. Dieser stromrückgekoppelte Leistungsverstärker ermöglicht die Generierung eines hohen Ausgangstromes mit großer Bandbreite [151]. Die Generierung eines hohen Ausgangsstromes und einer dementsprechend hohen Ausgangsleistung ist von großer Bedeutung, da die Amplitude der Spannung an der Empfangsspule proportional zur Amplitude des Stromes in der Sendespule ist (siehe Gleichung (2.16)).

Die entwickelte Verstärkerschaltung beinhaltet acht zweipolige Eingänge, die jeweils mit dem Ausgang des DA-Wandlers verbunden sind (siehe Abb. 6.1b). Die acht zweipoligen Ausgänge des Leistungsverstärkers sind mit den Sendespulen verbunden. Die Auswahl der Sendespulen, die mit dem Strom eingespeist werden, erfolgt mit Hilfe des Digitalausgangs des Messsystems. Die Sendespulen werden sequenziell mit dem Strom eingespeist. Die Digitalausgänge des Messsystems generieren ein Ansteuerungssignal mit der Amplitude von 3.3 V, welcher die Ausgangsspannung auf eine der Sendespulen einschaltet. Ein Schaltplan und ein Foto der Verstärkerschaltung sind folgend in Abb. 6.5 dargestellt.

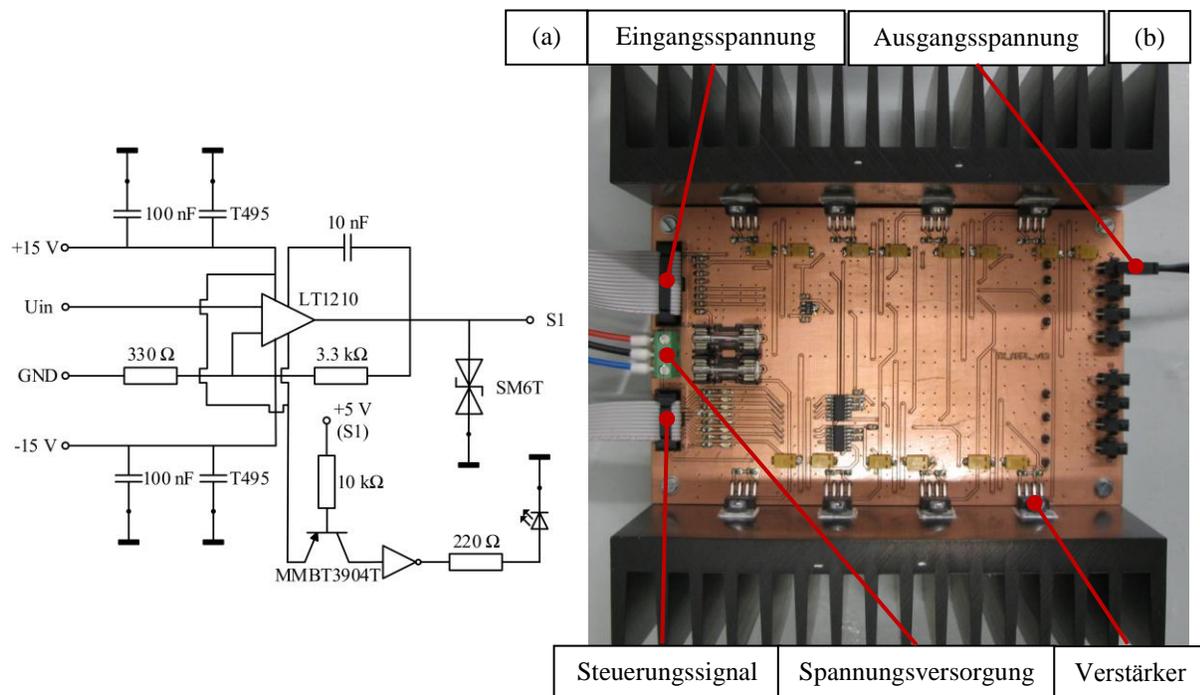


Abb. 6.5 Schaltplan (a) und Foto (b) der Verstärkerschaltung für die Sendespule

Verstärker für die Empfangsspule

Die an der Empfangsspule gemessene Spannung muss vor der Messung mit dem AD-Wandler verstärkt werden. Dafür wird eine Verstärkerschaltung eingesetzt, die einen integrierten Verstärker LT1168A der Firma Linear Technology beinhaltet. Der integrierte Instrumentenverstärker LT1168A wurde wegen der hohen Linearität, hoher Verstärkung und dem niedrigen Rauschen ausgewählt [146]. Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche wurden mit einer Verstärkung von 5192 durchgeführt. Mit dieser Verstärkung beträgt die maximale Amplitude der Spannung am AD-Wandler in der direkten Nähe der Empfangsspule am Feldgenerator 10 V, was dem ausgewählten Messbereich des AD-Wandlers entspricht. Nachfolgend sind ein Schaltplan und ein Foto dieser Verstärkerschaltung abgebildet.

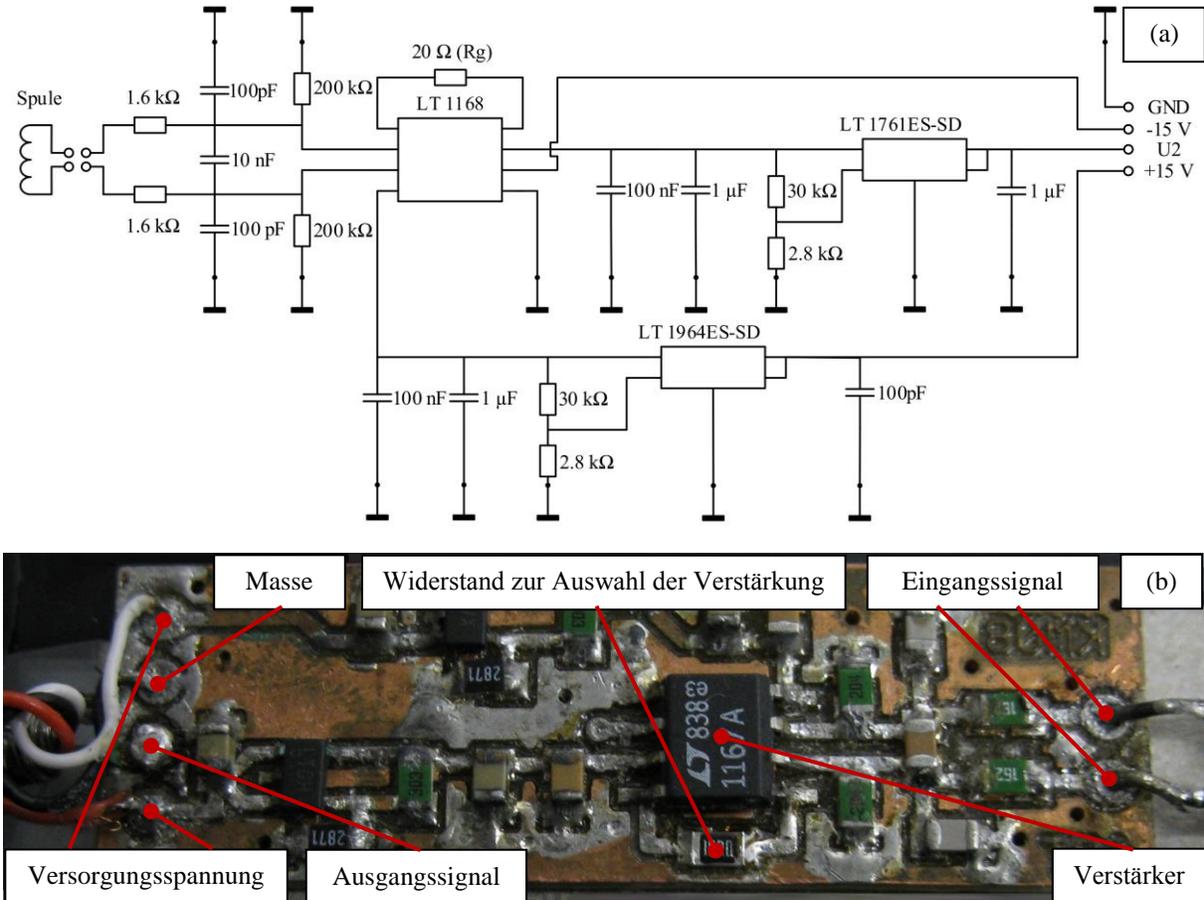


Abb. 6.6 Schaltplan (a) und Foto (b) der Verstärkerschaltung für die Empfangsspule

Software zur Spannungsmessung

Der Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems besteht neben den oben beschriebenen Elementen zusätzlich aus einem Rechner. Auf dem Rechner NI PXIe-8133 [152] in der NI PXI-Plattform wurde Matlab 2011a [153] mit Data Acquisition Toolbox [154] installiert. Die Spannungsmessung mit Hilfe des Demonstrators erfolgt durch ein Matlab-Programm, welches das Messsystem steuert und die Lage sowie die Ausrichtung der Empfangsspule bestimmt.

Die Spannungsmessung erfolgt kontinuierlich in der Zeit. Das für diese Aufgabe verwendete Matlab-Programm erfüllt die drei folgenden Aufgaben:

- **Ansteuerung des Verstärkers** – Die Software wird zur Auswahl der mit Spannung zu versorgenden Sendespule verwendet. Ein Gleichspannungspuls wird an einen der acht Digitaleingänge der Verstärkerschaltung angelegt, mit der eine von acht Sendespulen ausgewählt wird. Für diese Aufgabe werden acht Digitalausgänge des Messsystems NI PXI-6281 verwendet. Die Gleichspannungspulse mit einer Amplitude von 3.3 V werden

sequenziell mit einer einstellbaren Pulsdauer erzeugt. Die in den durchgeführten Versuchen gewählte Pulsdauer beträgt 50 ms für je Sendespule.

- **Eingangssignal** – Der DA-Wandler erzeugt ein sinusförmiges Signal, welches in Kombination mit dem Verstärker einen hohen Ausgangsstrom erzeugt und an die Sendespulen des elektromagnetischen Trackingsystems angelegt wird. Die im Matlab erzeugte Lookup-Tabelle der Spannungswerte wird mit Hilfe des DA-Wandlers in ein analoges Signal umgewandelt. Als Erregerspannung wird eine sinusförmige Spannung mit einer Amplitude von 1 V und einer Frequenz von 1 kHz verwendet. Es ist die maximale Spannungsamplitude, die mit dem verwendeten DA-Wandler erzeugt werden kann. Das entwickelte Matlab-Programm bietet die Möglichkeit der Änderung der Frequenz, der Amplitude und der Form der Erregerspannung.
- **Spannungsmessung** – Der AD-Wandler ermöglicht eine sehr präzise Messung der Spannung auf der Empfangsspule. Der verwendete AD-Wandler NI PXI-6281 bietet wegen seiner Auflösung von 18 Bit und eines maximalen Messfehlers von 0.98 mV eine dafür ausreichend präzise Spannungsmessungen [144]. Die Messung erfolgt mit einer Abtastrate von 160 kS und wird als Polling realisiert. Neben der Amplitude der Spannung soll auch die Phasenverschiebung zwischen dem Strom in der Sendespule und der Spannung an der Empfangsspule berechnet werden. Die Berechnung dieser Phasenverschiebung erfolgt mit Hilfe des digitalisierten Signals im Rahmen eines Matlab-Programms. Zur Vereinfachung wird nicht der Strom in der Sendespule, sondern die Spannung an der Sendespule mit Hilfe des AD-Wandlers gemessen. Aufgrund dieser Messung werden sowohl der Betrag als auch die Orientierung des gemessenen Vektors der Flussdichte senkrecht zur Querschnittsfläche der Empfangsspule berechnet (siehe Unterkapitel 2.1). Die beiden Messwerte sind für die Berechnung der Lage und der Ausrichtung der Empfangsspule notwendig.

Software zur Positionsbestimmung

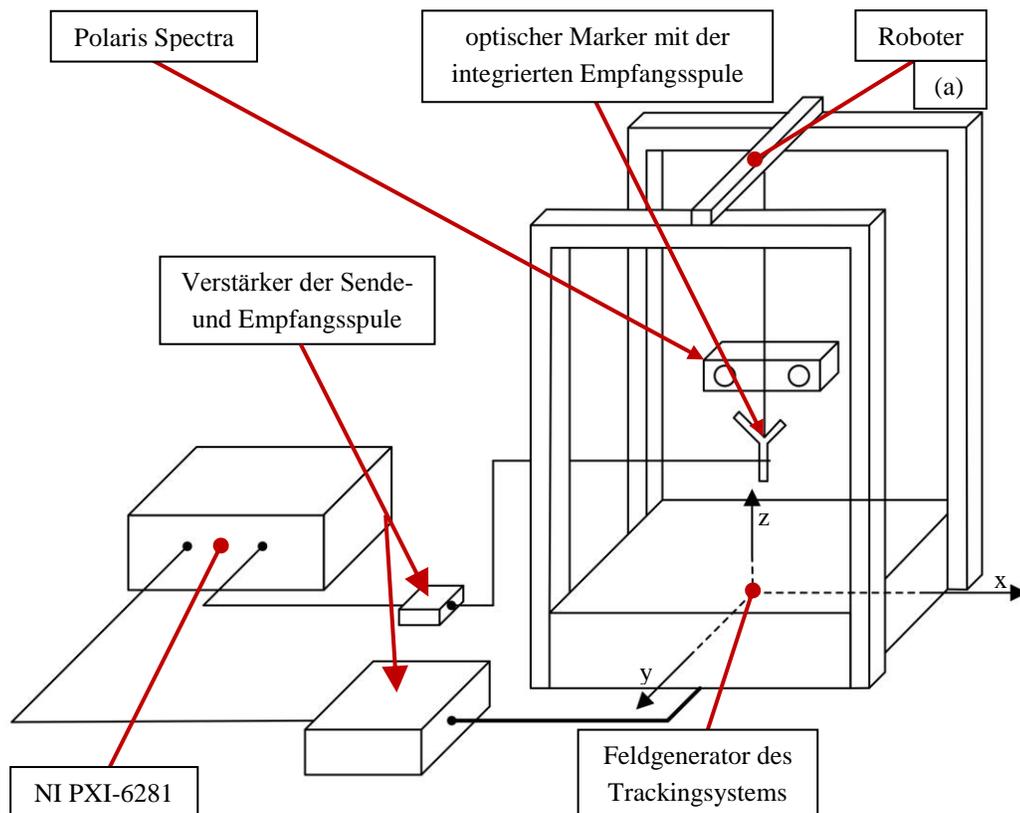
Auf Basis der gemessenen Spannung an der Empfangsspule werden die Lage und Ausrichtung der Empfangsspule berechnet. Die Berechnung erfolgt mit der Lösung der Gleichung (2.19). Hier wird der Unterschied zwischen der gemessenen und der modellierten Spannung an der Empfangsspule minimiert (siehe Unterkapitel 2.2). Die Minimierung findet mit Hilfe des *Levenberg-Marquardt* Algorithmus statt. In dem entwickelten Matlab-Programm zur Positionsbestimmung wird die Implementierung des *Levenberg-Marquardt* Algorithmus aus der Funktion *fsolve* herangezogen [111].

6.2 Versuchsaufbau zur Genauigkeitsevaluierung

Sowohl leitende, als auch ferromagnetische Objekte haben einen Einfluss auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems. Aus diesem Grund konnte für die Evaluierung der Genauigkeit des entwickelten Ortungssystems kein metallischer Industrieroboter verwendet werden. Deswegen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Robotersystem für die Genauigkeitsevaluierung des Trackingsystems entwickelt, der aus nicht leitenden und nicht ferromagnetischen Elementen aufgebaut worden ist. Der

Roboter besteht aus vier Lego Mindstorms NXT Motoren, die mit zwei Kontrollern angesteuert werden. Die Controller werden mit der Programmierungssprache Matlab mit Hilfe des RWTH – Mindstorms NXT Toolboxes programmiert [155], was die Bewegung der Schrittmotoren des Roboters ermöglicht. Der Aufbau gestattet eine beliebige Bewegung des Roboters in drei Achsen (x , y , z) in einem Messvolumen von $0.338 \text{ m} \times 0.420 \text{ m} \times 0.276 \text{ m}$ [156].

Die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems wird mit Hilfe des optischen Trackingsystems Polaris Spectra evaluiert. Dieses Ortungssystem ermöglicht die Bestimmung der Lage und der Ausrichtung des optischen Markers mit einem RMS-Fehler von 0.35 mm [157]. Eine Skizze und ein Foto des verwendeten Messaufbaus wurde in der Abb. 6.7 dargestellt.



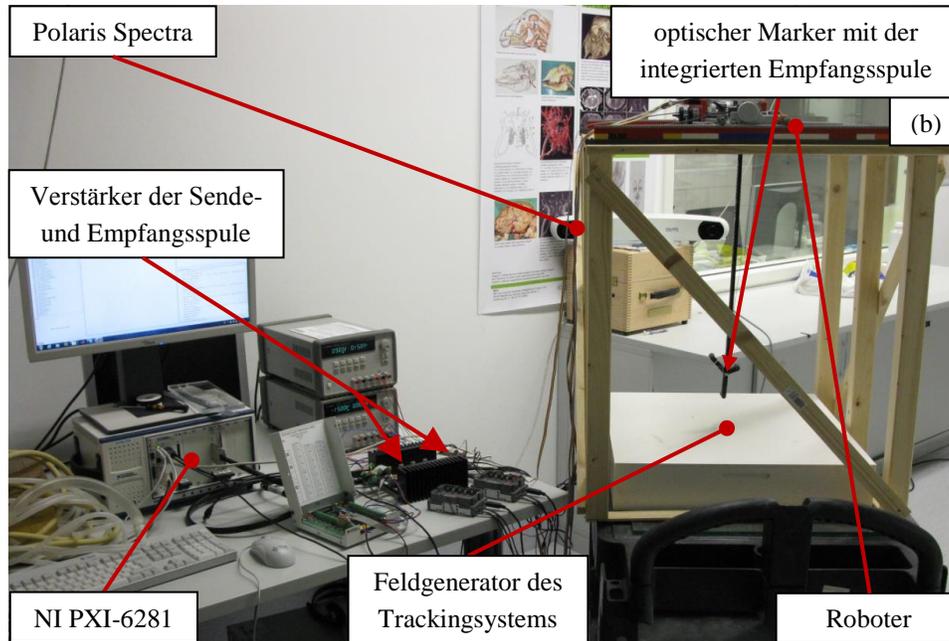


Abb. 6.7 Skizze (a) und Foto (b) eines Robotersystems zur Evaluierung der Genauigkeit des Demonstrators des elektromagnetischen Trackingsystems

Die von dem Hersteller des optischen Trackingsystems Polaris Spectra angebotene Halterung des Markers wurde aus Aluminium hergestellt. Wenn die Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems in die Halterung integriert worden wäre, könnte die Halterung einen Einfluss auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems nehmen [89]. Deswegen wurde eine neue Halterung für die optischen Marker aus Kunststoff entwickelt und mit der Trackingspule integriert (siehe Abb. 6.7a). Die neu entwickelte Halterung wurde mit Hilfe der Software 6D Architect der Firma NDI kalibriert [158], bevor sie zur Positionsbestimmung verwendet wurde.

Für die Genauigkeitsevaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems wurden die Koordinatensysteme des optischen Trackingsystems und des elektromagnetischen Trackingsystems registriert. Die Registrierung erfolgt mit Hilfe einer rigiden Transformation zwischen den ausgewählten Positionsmessungen mit beiden Ortungssystemen. Die rigide Transformation ändert nicht die Abstände zwischen den gemessenen Positionen, sondern verschiebt (Translation) und rotiert (Rotation) das Koordinatensystem des optischen Trackingsystems [159]. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Registrierung wurde mit Hilfe der Funktion *fiducial registration* mit dem Programm 3D Slicer 3.6.1 realisiert [159]. Im Rahmen der Registrierung wurde eine Registrierungsmatrix T_r berechnet, mit der die Positionsmessungen des optischen Trackingsystems multipliziert wurden. Nach dieser Multiplikation wurden die Positionsmessungen mit dem optischen Trackingsystem in das Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems transformiert. Dadurch können die Positionsbestimmungen mit dem optischen Trackingsystem für die Evaluierung der Genauigkeit des entwickelten elektromagnetischen Trackingsystems verwendet werden.

Die beiden Ortungssysteme messen neben der Lage auch die Ausrichtung des Sensors. Das verwendete optische Trackingsystem Polaris Spectra gibt die Ausrichtung des optischen Markers in den Quaternionen ein. Diese Erweiterung der komplexen Zahlen wird oft zur Darstellung der Ausrichtung und der Rotation

im 3D-Raum verwendet [17]. Die Ausrichtung des optischen Markers in Quaternionen wurde in die Euler-Winkel umgerechnet. Die drei Euler-Winkel werden als Gier- Nick- und Rollwinkel (φ_o , θ_o , γ_o) bezeichnet (siehe Abb. 6.8) [160]. Die verwendete Gleichung (6.7) wurde aus der Literatur übernommen [161–162]:

$$\begin{aligned}\varphi_o &= \arctan2\left(2 \cdot (q_0 q_1 + q_2 q_3), 1 - 2 \cdot (q_1^2 + q_2^2)\right) \\ \theta_o &= \arcsin(2 \cdot (q_0 q_2 + q_2 q_1)) \\ \gamma_o &= \arctan2(2 \cdot (q_0 q_3 + q_1 q_2), 1 - 2 \cdot (q_2^2 + q_3^2))\end{aligned}\quad (6.7)$$

q_0, q_1, q_2, q_3 : Ausrichtung des Sensors in Quaternionen

φ_o : Nickwinkel der Ausrichtung des Sensors

θ_o : Gierwinkel der Ausrichtung des Sensors

γ_o : Rollwinkel der Ausrichtung des Sensors

Die mathematische Funktion $\arctan2(y,x)$ aus der Gleichung (6.7) wird wie folgt definiert [163].

$$\arctan2(y,x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{falls } x > 0 \\ \text{sign}(y) \cdot \left(\pi - \arctan\left(\left|\frac{y}{x}\right|\right)\right) & \text{falls } x < 0 \\ 0 & \text{falls } x=y=0 \\ \text{sign}(y) \cdot \frac{\pi}{2} & \text{falls } x=0, y \neq 0 \end{cases}\quad (6.8)$$

Die gegebenen Lage und Ausrichtung des optischen Markers müssen in das Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems umgerechnet werden. Die Registrierung der beiden Koordinatensysteme wurde in der Abb. 6.8 schematisch dargestellt. In der Gleichung (6.9) wurden die drei für die Darstellung der Ausrichtung verwendeten Rotationsmatrizen berechnet [164]:

$$\begin{aligned}R_x(\varphi_o) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_o & -\sin \varphi_o \\ 0 & \sin \varphi_o & \cos \varphi_o \end{bmatrix} \\ R_y(\theta_o) &= \begin{bmatrix} \cos \theta_o & 0 & \sin \theta_o \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_o & 0 & \cos \theta_o \end{bmatrix} \\ R_z(\gamma_o) &= \begin{bmatrix} \cos \gamma_o & -\sin \gamma_o & 0 \\ \sin \gamma_o & \cos \gamma_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (6.9)$$

$R_x(\varphi_o)$, $R_y(\theta_o)$, $R_z(\gamma_o)$: Rotationsmatrizen der Ausrichtung des optischen Markers

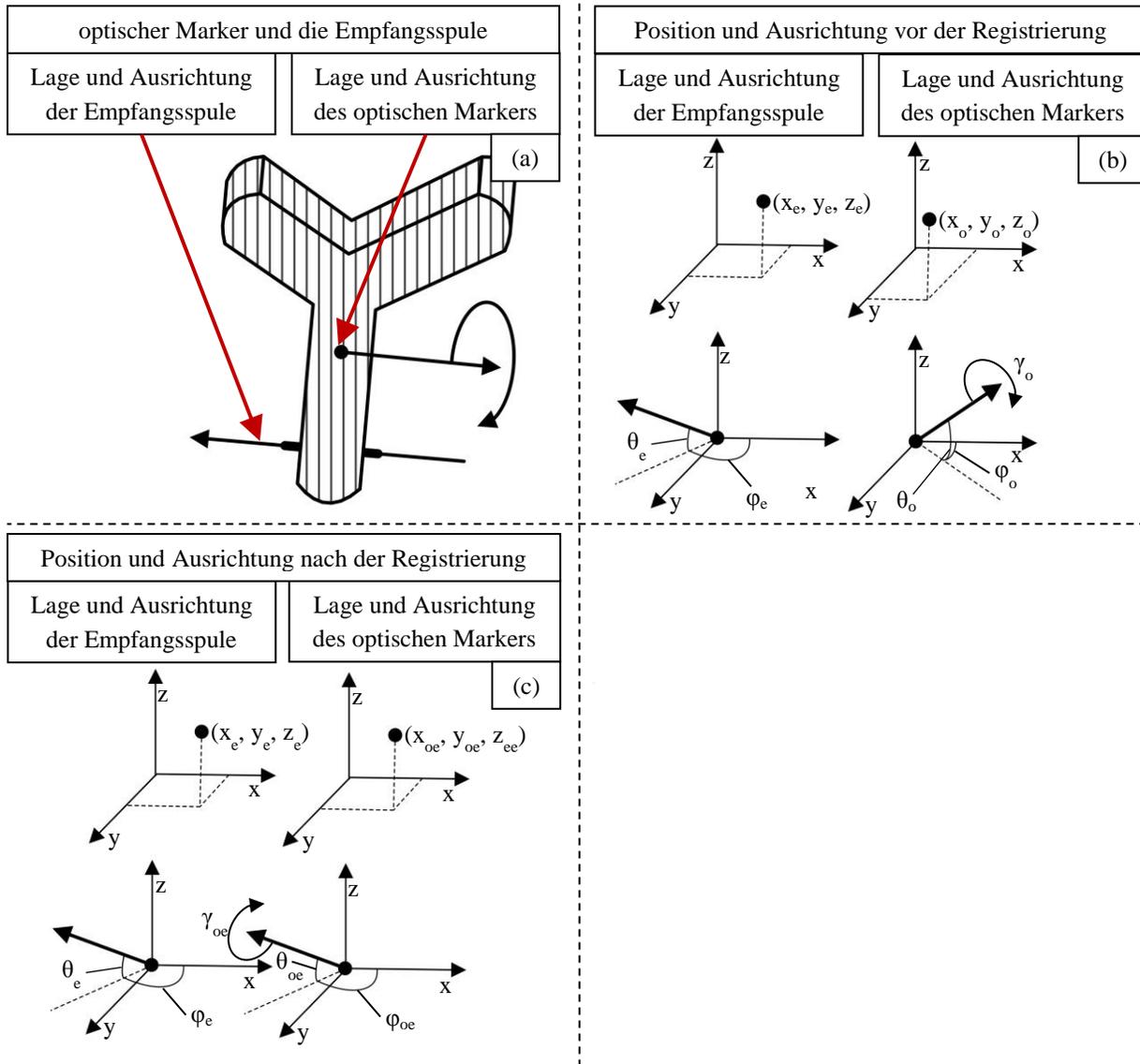


Abb. 6.8 Registrierung der Koordinatensysteme des optischen und des elektromagnetischen Trackingsystems, schematische Darstellung der Position und der Ausrichtung der Empfangsspule und des optischen Markers (a), Lage und Ausrichtung der Empfangsspule im Koordinatensystem des optischen und des elektromagnetischen Trackingsystems vor der Registrierung (b), Lage und Ausrichtung der Empfangsspule im Koordinatensystem des optischen und des elektromagnetischen Trackingsystems nach der Registrierung (c)

Die Lage des Markers wurde mit Hilfe einer Translationsmatrix dargestellt.

$$T_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_o \\ 0 & 1 & 0 & y_o \\ 0 & 0 & 1 & z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

T_o : Translationsmatrix mit der Lage des optischen Markers

x_o, y_o, z_o : Lage des optischen Markers

Die Lage und Ausrichtung des verwendeten optischen Markers können zusammen als eine Transformationsmatrix T_{ot} dargestellt werden. Diese Matrix entsteht durch Multiplikation der Rotationsmatrix mit der Translationsmatrix [165].

$$T_{ot} = R_x(\varphi_o) \cdot R_y(\theta_o) \cdot R_z(\gamma_o) \cdot T_o = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_o \\ 0 & 1 & 0 & y_o \\ 0 & 0 & 1 & z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_{ox} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_{oy} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_{oz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

T_{ot} : Transformationsmatrix mit der Lage und Ausrichtung des optischen Markers

$R_{ij}, T_{ox}, T_{oy}, T_{oz}$: Komponenten der Transformationsmatrix

Die Multiplikation dieser Transformationsmatrix T_{ot} mit der Registrierungsmatrix T_r führt zur Berechnung der Lage (x_{oe}, y_{oe}, z_{oe}) und Ausrichtung ($\varphi_{oe}, \theta_{oe}, \gamma_{oe}$) des Markers im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems [165].

$$T_{oet} = T_r \cdot T_{ot} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_x \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_y \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_{ox} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_{oy} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_{oz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_{11} & R'_{12} & R'_{13} & T'_{ox} \\ R'_{21} & R'_{22} & R'_{23} & T'_{oy} \\ R'_{31} & R'_{32} & R'_{33} & T'_{oz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

T_{oet} : Die resultierende Rotationsmatrix, die die Lage und die Ausrichtung des optischen Markers in den Koordinatensystemen des elektromagnetischen Trackingsystems beschreibt.

T_r : berechnete Registrierungsmatrix für die Registrierung der Koordinatensysteme

Die Ausrichtung des verwendeten optischen Markers im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems wird wie folgt berechnet [165].

$$\begin{aligned}
 \theta_{oe} &= 180 + \arcsin(R'_{31}) \\
 \varphi_{oe} &= \arctan2\left(\frac{R'_{32}}{\cos \theta_{oe}}, \frac{R'_{33}}{\cos \theta_{oe}}\right) \\
 \gamma_{oe} &= \arctan2\left(\frac{R'_{21}}{\cos \theta_{oe}}, \frac{R'_{11}}{\cos \theta_{oe}}\right)
 \end{aligned} \tag{6.13}$$

Die Lage des optischen Markers im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems (x_{oe}, y_{oe}, z_{oe}) kann aus folgender Gleichung entnommen werden [165].

$$T_{oe} = \begin{bmatrix} R'_{11} & R'_{12} & R'_{13} & 0 \\ R'_{21} & R'_{22} & R'_{23} & 0 \\ R'_{31} & R'_{32} & R'_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R'_{11} & R'_{12} & R'_{13} & T'_{ox} \\ R'_{21} & R'_{22} & R'_{23} & T'_{oy} \\ R'_{31} & R'_{32} & R'_{33} & T'_{oz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{oe} \\ 0 & 1 & 0 & y_{oe} \\ 0 & 0 & 1 & z_{oe} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.14}$$

T_{oe} : Translationsmatrix mit der Lage des optischen Markers im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems

Das entwickelte elektromagnetische Trackingsystem berechnet nur den Nick- und Gierwinkel der Empfangsspule, deswegen wurde der durch das optische Trackingsystem berechnete Rollwinkel γ_o nicht verwendet.

Die Positionsbestimmungen des optischen Trackingsystems wurden nach der Registrierung für die Evaluierung der Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems verwendet. Im Rahmen der Genauigkeitsevaluierung wurden 500 Positionsbestimmungen gleichzeitig mit dem elektromagnetischen und dem optischen Trackingsystem durchgeführt. Das Messvolumen der Evaluierung betrug 0.338 m x 0.420 m x 0.138 m. Nach der Registrierung wurden die Fehler, mittlerer Fehler, die Standardabweichungen und die RMS-Fehler der Positions- und der Ausrichtungsbestimmung nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$F_{p-i} = \sqrt{(x_{oei} - x_{ei})^2 + (y_{oei} - y_{ei})^2 + (z_{oei} - z_{ei})^2} \tag{6.15}$$

$$F_{\varphi-i} = \varphi_{oei} - \varphi_{ei} \tag{6.16}$$

$$F_{\theta-i} = \theta_{oei} - \theta_{ei} \tag{6.17}$$

F_{p-i} : Fehler der Positionsbestimmung in der i-ten Messung

$F_{\varphi-i}$: Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel φ in der i-ten Messung

$F_{\theta-i}$: Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ in der i-ten Messung

$$\bar{F}_p = \frac{\sum_{i=1}^n F_{p-i}}{n} \quad (6.18)$$

$$\bar{F}_\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n F_{\varphi-i}}{n} \quad (6.19)$$

$$\bar{F}_\theta = \frac{\sum_{i=1}^n F_{\theta-i}}{n} \quad (6.20)$$

n: Anzahl der Messwerte

\bar{F}_p : Mittelwert des Fehlers der Positionsbestimmung

\bar{F}_φ : Mittelwert des Fehlers der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel φ

\bar{F}_θ : Mittelwert des Fehlers der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{p-i} - \bar{F}_p)^2}{n}} \quad (6.21)$$

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{\varphi-i} - \bar{F}_\varphi)^2}{n}} \quad (6.22)$$

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{\theta-i} - \bar{F}_\theta)^2}{n}} \quad (6.23)$$

σ_p : Standardabweichung des Fehlers der Positionsbestimmung

σ_φ : Standardabweichung des Fehlers der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel φ

σ_θ : Standardabweichung des Fehlers der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ

$$F_{p-RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((x_{oei} - x_{ei})^2 + (y_{oei} - y_{ei})^2 + (z_{oei} - z_{ei})^2)}{n}} \quad (6.24)$$

$$F_{\varphi-RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_{oei} - \varphi_{ei})^2}{n}} \quad (6.25)$$

$$F_{\theta-RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{oei} - \theta_{ei})^2}{n}} \quad (6.26)$$

- F_{P-RMS} : der RMS-Fehler der Positionsbestimmung
 $F_{\varphi-RMS}$: der RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel φ
 $F_{\theta-RMS}$: der RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ

Die Ergebnisse der Genauigkeitsevaluierung werden im Unterkapitel 7.1 präsentiert. Für den Vergleich der Methoden zur Korrektur der Störungen wurden Korrelationskoeffizienten eingeführt, die den Grad des Zusammenhangs zwischen dem Abstand der Empfangsspule zum Störkörper und den Fehler der Ausrichtungs- und Positionsbestimmung beschreiben. Die Korrelationskoeffizienten werden wie folgt berechnet [166].

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{p-i}}{n} \quad (6.27)$$

$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{p-i} - \bar{F}_p) \cdot (d_{p-i} - \bar{d})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_{p-i} - \bar{F}_p)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (d_{p-i} - \bar{d})^2}} \quad (6.28)$$

$$R_{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{\varphi-i} - \bar{F}_{\varphi}) \cdot (d_{p-i} - \bar{d})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_{\varphi-i} - \bar{F}_{\varphi})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (d_{p-i} - \bar{d})^2}} \quad (6.29)$$

$$R_{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{\theta-i} - \bar{F}_{\theta}) \cdot (d_{p-i} - \bar{d})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_{\theta-i} - \bar{F}_{\theta})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (d_{p-i} - \bar{d})^2}} \quad (6.30)$$

- d_{p-i} : Abstand zwischen dem Störkörper und der Empfangsspule
 \bar{d} : Mittelwert des Abstandes zwischen dem Störkörper und der Empfangsspule
 R_p : Korrelationskoeffizient zwischen dem Abstand der Empfangsspule zum Störkörper und dem Fehler der Positionsbestimmung
 R_{φ} : Korrelationskoeffizient zwischen dem Abstand der Empfangsspule zum Störkörper und dem Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel φ
 R_{θ} : Korrelationskoeffizient zwischen dem Abstand der Empfangsspule zum Störkörper und dem Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ

7 Experimentelle Evaluierung und Resultate

7.1 Evaluation des Algorithmus zur Kalibrierung des Demonstrators

In diesem Unterkapitel wird der in Kapitel 3 beschriebene Algorithmus zur Kalibrierung des Trackingsystemdemonstrators evaluiert. Für die Evaluierung des Algorithmus wurden 500 Messungen in einem Messvolumen von 0.338 m x 0.420 m x 0.138 m sowohl mit dem elektromagnetischen (nach der Kalibrierung) als auch mit dem optischen Trackingsystem durchgeführt. Die Positionsbestimmung mit dem optischen Trackingsystem wurde nach der Registrierung als eine Referenz (wahre Position der Empfangsspule) betrachtet und zur Berechnung der simulierten Spannung verwendet. Zur Evaluierung des Algorithmus wurde ein Datensatz verwendet, welcher sich von dem für die Kalibrierung verwendeten Datensatz in Hinsicht auf die Verteilung der Messpunkte unterscheidet.

Genauigkeit ohne Kalibrierung

Im ersten Experiment wird die Genauigkeit des Trackingsystems ohne zusätzliche Kalibrierung evaluiert. Der Vergleich zwischen der optischen und der elektromagnetischen Positionsbestimmung ist in der Abb. 7.1 dargestellt. Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung F_{P-RMS} beträgt 7.3 mm. Die Standardabweichung des Fehlers σ_P beträgt 4.3 mm.

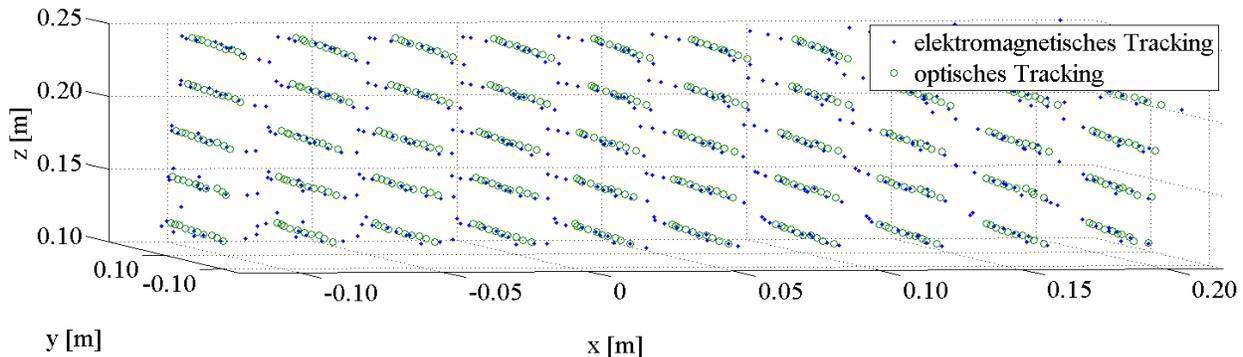


Abb. 7.1 Positionsbestimmung mit dem optischen und dem elektromagnetischen Trackingsystem ohne Kalibrierung des Demonstrators

Der Fehler der Positionsbestimmung wird in Abb. 7.2 als Funktion des Abstandes zwischen der Empfangsspule und dem Mittelpunkt des Koordinatensystems des elektromagnetischen Trackingsystems abgebildet. Der Fehler der Positionsbestimmung nimmt mit steigendem Abstand zwischen dem Mittelpunkt des Koordinatensystems und der Empfangsspule zu.

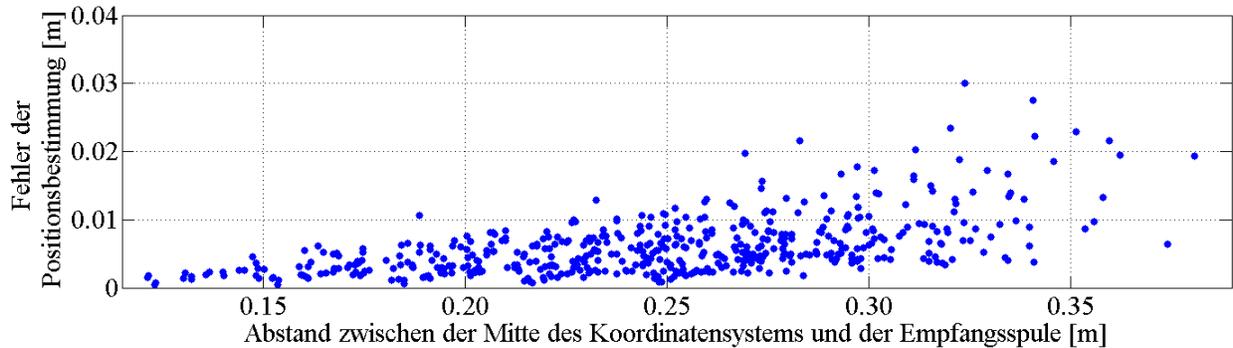


Abb. 7.2 Fehler der Positionsbestimmung als Funktion des Abstandes zwischen der Mitte des Koordinatensystems und der Lage der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems, ohne Kalibrierung des Demonstrators

Evaluierung des Algorithmus zur Kalibrierung des Trackingsystems

Die vorgeschlagene Kalibrierungsmethode wird mit Hilfe einer Genauigkeitsmessung evaluiert. In der Abb. 7.3 ist die gemessene Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems dargestellt.

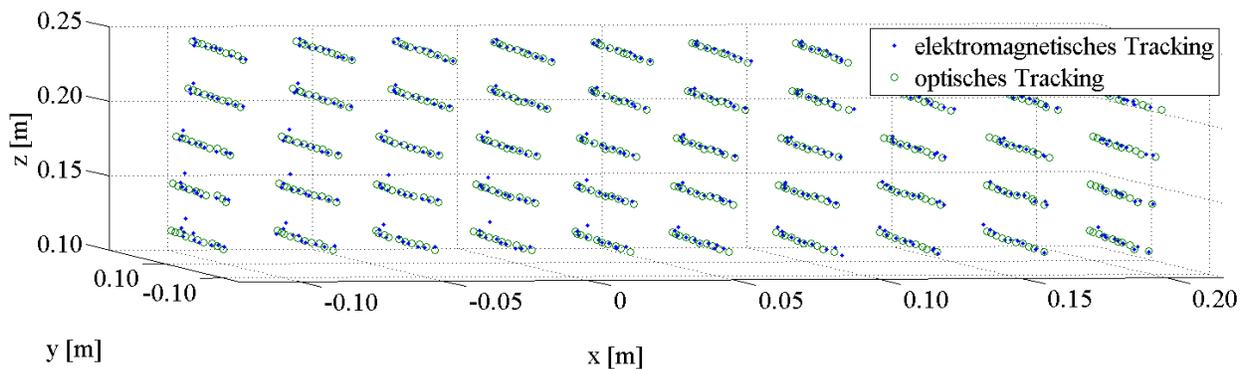


Abb. 7.3 Positionsbestimmung mit dem optischen und dem elektromagnetischen Trackingsystem nach der Kalibrierung des Demonstrators des elektromagnetischen Trackingsystems

Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung beträgt 2.5 mm. Laut dem in Kapitel 3 definierten Kriterium ermöglicht diese Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems die Evaluierung der Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen durch die leitenden Störkörper (siehe Unterkapitel 7.3 und 7.4).

In der Abb. 7.4 ist der Verlauf des Fehlers der Positionsbestimmung als Funktion des Abstandes zwischen der Mitte des Koordinatensystems und der Lage der Empfangsspule des Ortungssystems dargestellt.

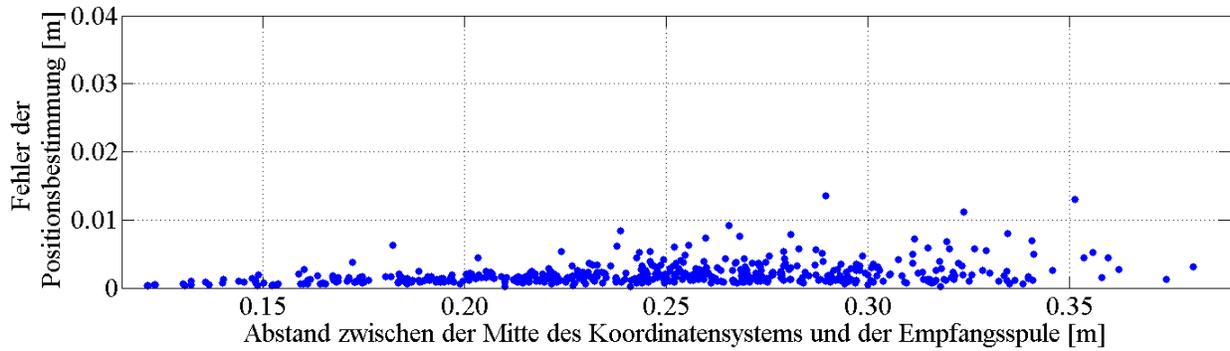


Abb. 7.4 Fehler der Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem nach der Kalibrierung des Demonstrators mit dem vorgeschlagenen Ansatz als Funktion des Abstandes zwischen der Mitte des Koordinatensystems und der Lage der Empfangsspule

Die Lage, Ausrichtung und Stärke der magnetischen Dipolmomente im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems vor und nach der Kalibrierung mit vorgeschlagenem Algorithmus finden sich in der Abb. 7.5.

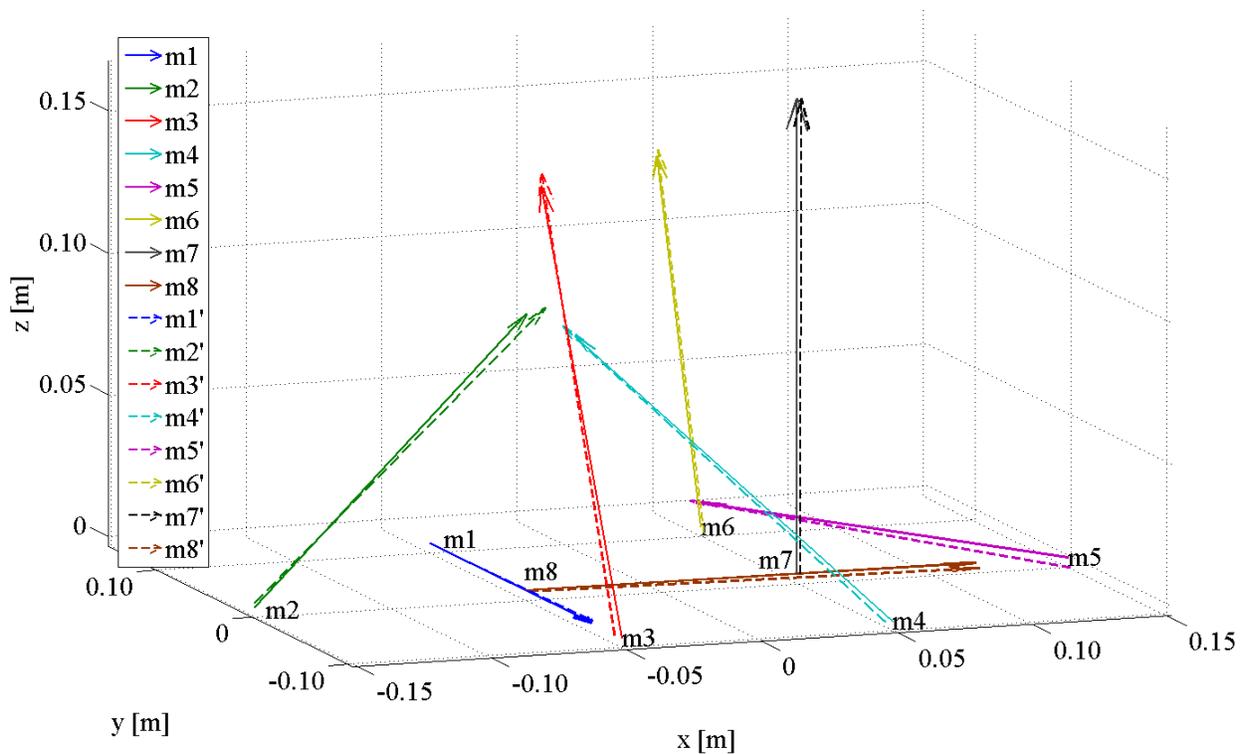


Abb. 7.5 Räumliche Lage und Ausrichtung der Dipolmomente der Sendespulen des Feldgenerators vor ($m_1 - m_8$) und nach ($m_1' - m_8'$) der Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems

Ergebnisse der Kalibrierung

In Tab. 5 sind die Ergebnisse der Kalibrierung des Trackingsystems dargestellt.

| | ohne Kalibrierung | mit Kalibrierung |
|--|----------------------|---------------------|
| RMS-Fehler [mm] | 7.3 | 2.5 |
| Standardabweichung des Fehlers [mm] | 4.3 | 1.6 |
| RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel φ [°] | 1.2 | 0.6 |
| RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ [°] | 0.9 | 0.7 |
| Anzahl der Messwerte für die Kalibrierung | - | 500 |
| Zeit der Kalibrierung [s] ⁷ | - | 154 766 |

Tab. 5 Ergebnisse der Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems

Die Positionsbestimmung ohne zusätzliche Kalibrierung erfolgt mit einer aus Datenblättern ermittelten Verstärkung des Verstärkers und mit den mechanisch bestimmten Lagen, Ausrichtungen und Abmessungen der Sendespulen. Die Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems entsprechend dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Algorithmus hat zu einer wesentlichen Erhöhung der Genauigkeit des Demonstrators geführt. Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung wurde mit Hilfe dieses Algorithmus von 7.3 auf 2.5 mm reduziert. Auch der RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung wurde von 1.2° auf 0.6° für den Winkel φ und von 0.9° auf 0.7° für den Winkel θ reduziert.

7.2 Einfluss der Störkörper auf die Genauigkeit des Trackingsystems Aurora

Zur Evaluierung wurde das elektromagnetische Trackingsystem verwendet, welches in dem System zu minimalinvasiven Eingriffen CAPPÄ integriert wurde [84]. Das elektromagnetische Trackingsystem Aurora wurde direkt an einen Laptop angeschlossen und mit dem Northern Digital Toolbox kontrolliert [54]. Die Northern Digital Toolbox ist ein Softwarepaket zur Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit den Trackingsystemen der Firma Northern Digital. Die Empfangsspule wurde im Abstand von 400 mm vor dem Feldgenerator platziert und befestigt. Dieser Abstand wurde gewählt, damit die Ergebnisse der Genauigkeitsevaluierung mit Studien von Kirsch vergleichbar sind [131]. Anschließend wurden als Störkörper eine Aluminium-, Messing- und Eisenscheibe mit einem Durchmesser von 0.1 m und einer Dicke von 0.03 m in der direkten Nähe der Empfangsspule platziert und schrittweise um jeweils 10 mm von der Empfangsspule entfernt. Nach jeder Verschiebung der Metallscheibe wurden die Lage und die Ausrichtung der Empfangsspule mit dem Trackingsystem Aurora bestimmt. Der Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung wird als Unterschied zwischen der Messung ohne Störung und der jeweiligen

⁷ Die Kalibrierung erfolgte mit Hilfe des Programms Matlab 2011R auf einem Rechner mit dem Hauptprozessor Q9450 2.66 GHz und mit einem Arbeitsspeicher von 4 GB.

Messung mit dem Störkörper definiert. Der verwendete Versuchsaufbau wird in der Abb. 7.6 wiedergegeben.

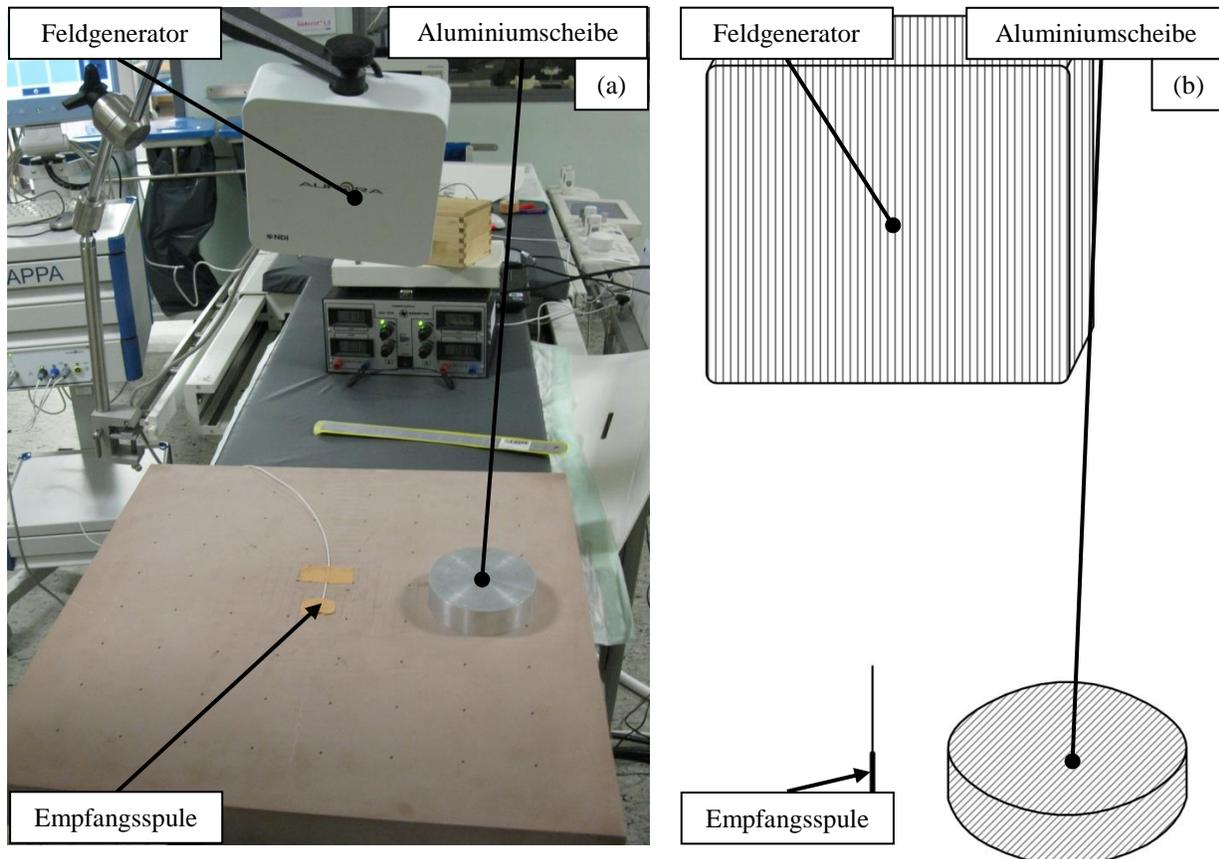
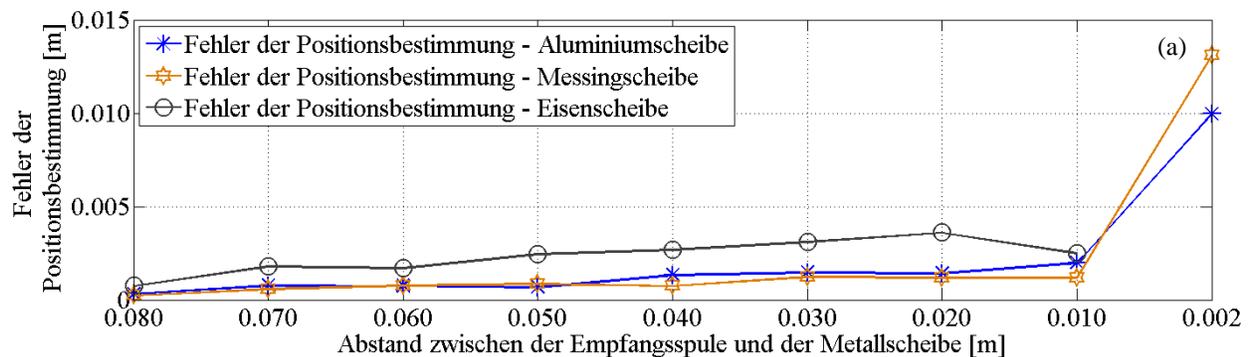


Abb. 7.6 Versuchsaufbau zur Evaluierung des Einflusses der Metallscheiben auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems Aurora, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus

In der Abb. 7.7 werden die Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung als Funktion des Abstandes zwischen der Empfangsspule und den Metallscheiben dargestellt.



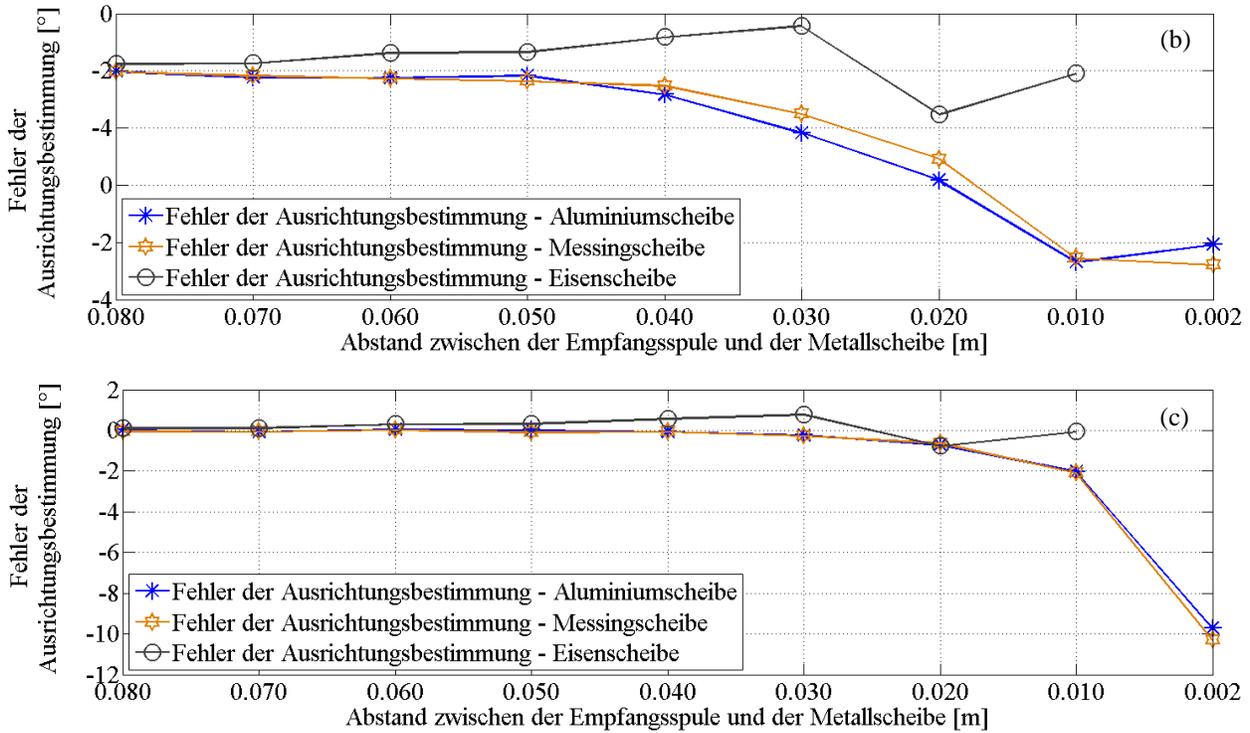


Abb. 7.7 Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung des Trackingsystems Aurora mit Präsenz einer Metallscheibe als Funktion des Abstands zwischen der Metallscheibe und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – φ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – θ

Anschließend wurde im zweiten Versuch die Empfangsspule parallel zur Oberfläche des Feldgenerators auf der Höhe von 0.12 m befestigt. Als Störkörper werden eine Aluminium-, Messing- (CuZn40Pb2) und eine Eisenscheibe mit einem Durchmesser von 0.1 m und einer Dicke von 0.03 m verwendet. Der Störkörper wurde in der direkten Nähe der Empfangsspule platziert und stückweise um 2 mm entfernt. Der verwendete Versuchsaufbau wird in der Abb. 7.8 präsentiert.

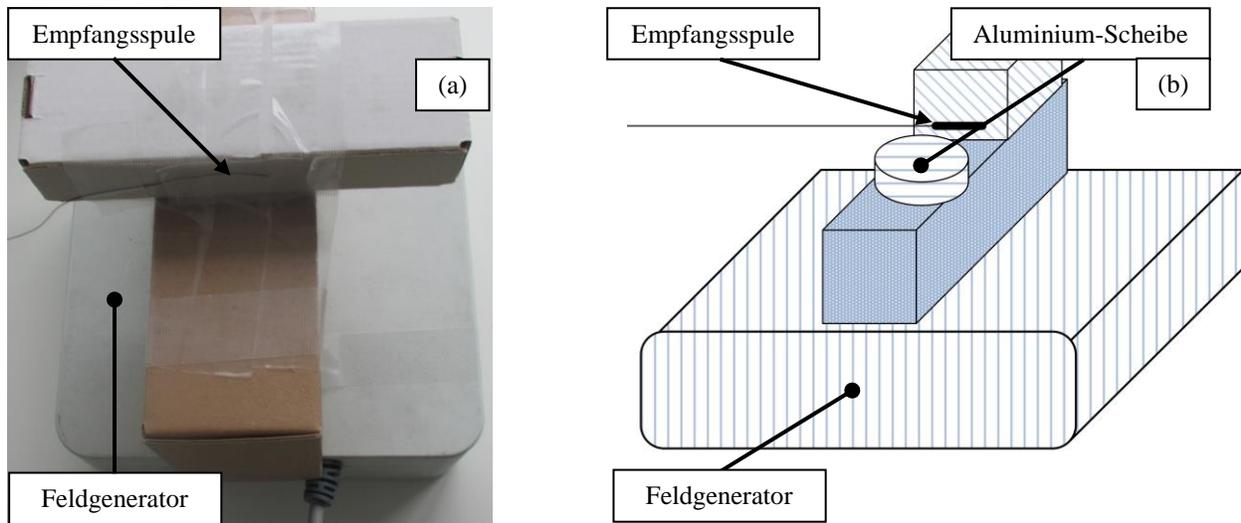
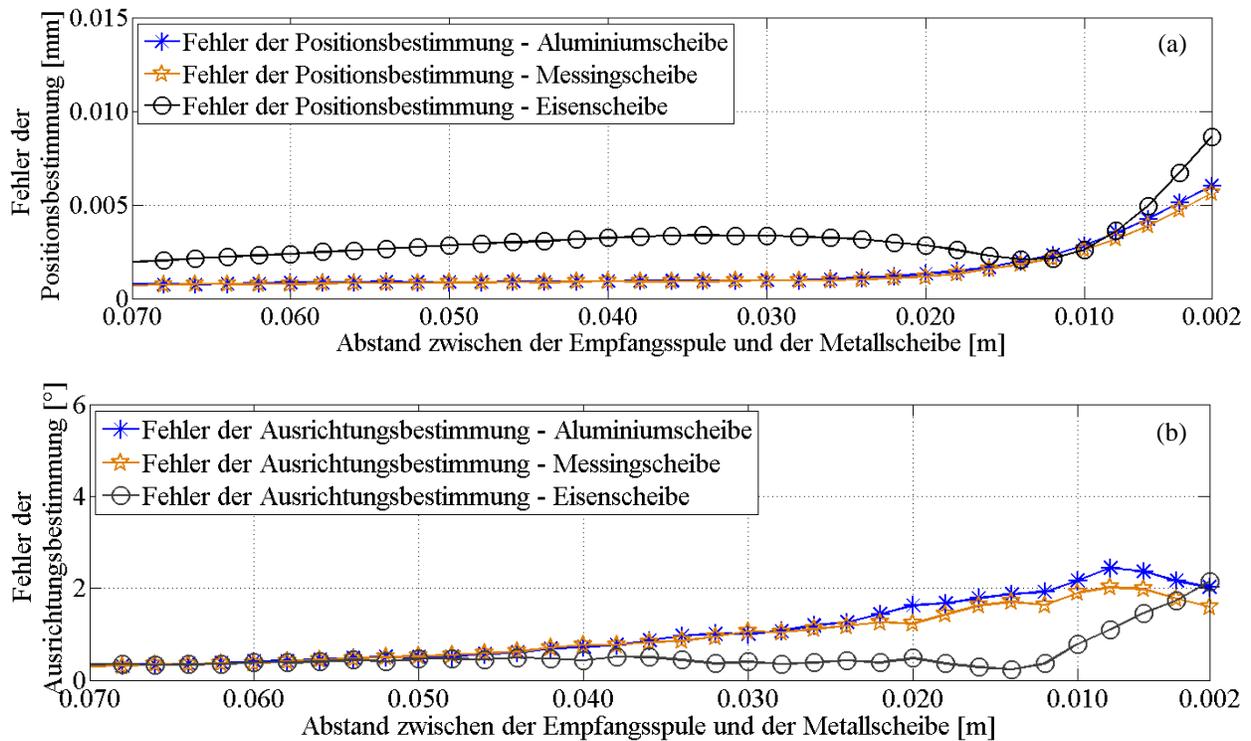


Abb. 7.8 Versuchsaufbau zur Evaluierung des Einflusses der Metallscheiben auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems Aurora, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus

Die Ergebnisse der Positions- und Ausrichtungsbestimmung in dieser Versuchsreihe werden in der Abb. 7.9 präsentiert.



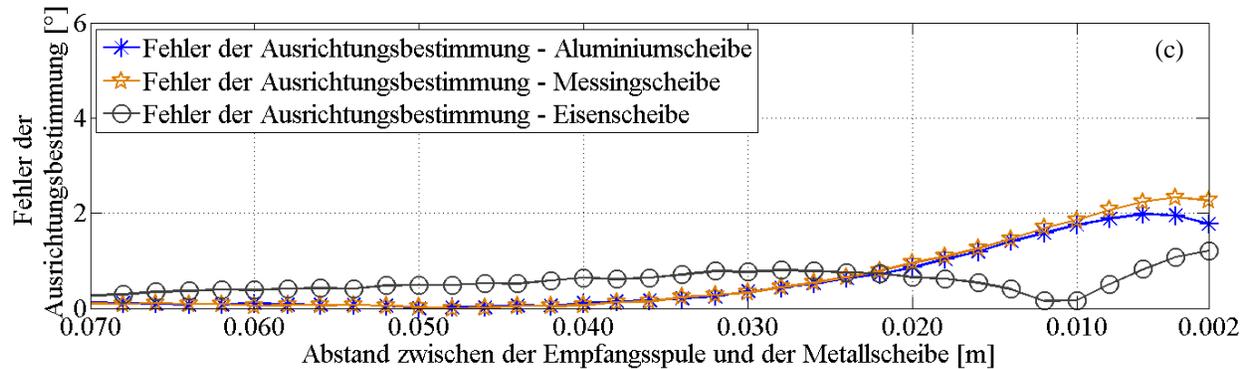


Abb. 7.9 Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung des Trackingsystems Aurora mit Präsenz einer Metallscheibe als Funktion des Abstands zwischen der Metallscheibe und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – φ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – θ

Diskussion

Im ersten Versuch nehmen die Fehler der Positionsbestimmung aufgrund der Präsenz des leitenden Störkörpers in direkter Nähe der Empfangsspule des Trackingsystems Aurora stark zu. Dieser Versuch hat gezeigt, dass das elektromagnetische Trackingsystem Aurora keine Fehlerdetektion für die Navigation mit einer einzelnen Empfangsspule bietet. Im zweiten Versuch wurde der Einfluss der Störungen auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems mit dem gleichen Versuchsaufbau untersucht, mit dem die entwickelten Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen im Unterkapitel 8.3 und 8.4 evaluiert wurden. Dieser Versuch dient dem Vergleich der entwickelten Methoden mit einem kommerziellen Trackingsystem, das ein Bestandteil von mehreren Systemen zur CAS-Eingriffe ist.

7.3 Evaluation und Vergleich der Algorithmen zur Detektion des Störkörpers

In diesem Unterkapitel wurden die im Kapitel 4 beschriebenen Vorgehensweisen zur Detektion des leitenden Störkörpers mit dem entwickelten Demonstrator evaluiert. Die experimentelle Evaluation dieser Methoden erfolgt mit Hilfe zweier Versuchsreihen. In den durchgeführten Experimenten wird neben der Evaluierung der Algorithmen auch der Fehler der Position- und Ausrichtungsbestimmung angegeben. Die Berechnung dieses Fehlers basiert auf dem Vergleich der gemessenen Lage und Ausrichtung der Empfangsspule mit einer „tatsächlichen“ Position und Ausrichtung der Empfangsspule und wird mit Hilfe der Gleichungen (6.15)–(6.17) berechnet. Die „tatsächliche“ Position und Ausrichtung der Empfangsspule werden in beiden Experimenten unterschiedlich bestimmt.

1. Versuchsreihe – systematische Änderung des Abstandes zwischen dem Störkörper und der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems

In der ersten Versuchsreihe wird die Empfangsspule in der Mitte des Koordinatensystems befestigt und der Störkörper wird stückweise von der Empfangsspule entfernt. Die Ergebnisse der Positions- und Ausrichtungsbestimmung ohne zusätzliche Störkörper werden als Referenz betrachtet und für die Berechnung des Fehlers der weiteren Positions- und Ausrichtungsbestimmungen verwendet.

In den Studien von Birkfellner wurde ein ähnlicher Versuch zur 1. Versuchsreihe beschrieben. Die Autoren dieser Studien haben die Empfangsspule des Trackingsystems an einer bestimmten Stelle befestigt und diverse Störkörper systematisch von der Empfangsspule entfernt. Der Nachteil dieser Vorgehensweise liegt in der unpräzisen Bestimmung der wahren Position der Empfangsspule, da als Referenz nur eine ungestörte Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem verwendet wird. Jedoch liegt der größte Vorteil dieser Vorgehensweise in der ausschließlichen Betrachtung der Fehler der Position- und Ausrichtungsbestimmung, die durch die leitenden Störkörper verursacht worden sind. Die absolute Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems spielt bei diesem Versuch eine untergeordnete Rolle [167].

Detektion einer Aluminium-, Messing- und Eisenscheibe

Im ersten Teil dieses Experimentes wird die Empfangsspule in einer Höhe von 0.12 m befestigt und eine Metallscheibe als Störkörper verwendet. Der in diesem Experiment eingesetzte Versuchsaufbau wird in Abb. 7.10 gezeigt. Als Störkörper werden eine Aluminium-, Messing- (CuZn40Pb2) und Eisenscheibe mit einem Durchmesser von 0.1 m und einer Dicke von 0.03 m verwendet. Es wird jeweils eine einzelne Metallscheibe in der Nähe der Empfangsspule als Störkörper benutzt. Die Metallscheiben werden nacheinander in der direkten Nähe der Empfangsspule platziert und schrittweise wird jede Scheibe um jeweils 2 mm entlang einer Achse von der Empfangsspule entfernt (siehe Abb. 7.10). Nach jeder Verschiebung der Metallscheibe werden die Lage und die Ausrichtung der Empfangsspule mit dem elektromagnetischen Trackingsystem bestimmt. Die Präsenz des leitenden Störkörpers wird anschließend mit den beiden in diesem Kapitel beschriebenen Algorithmen detektiert.

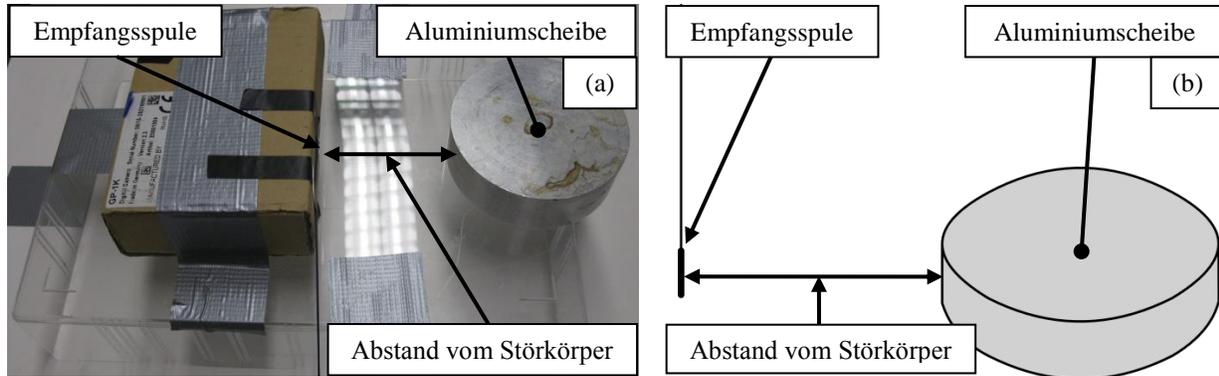
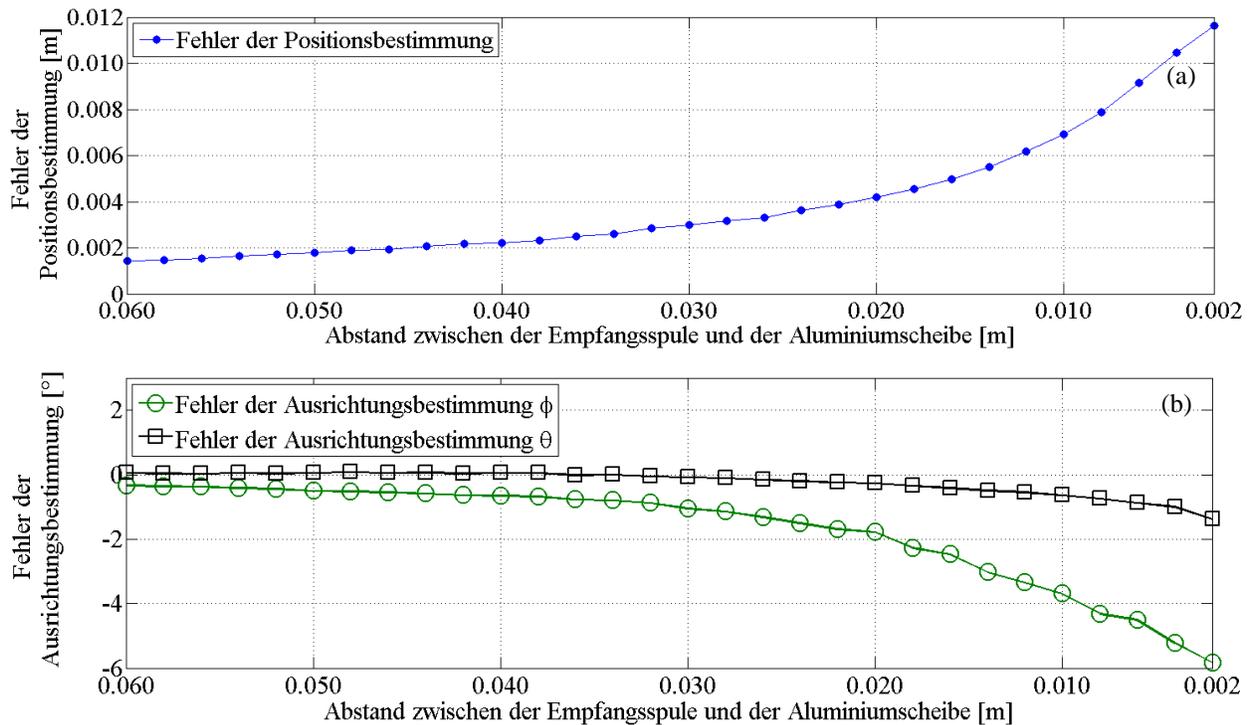


Abb. 7.10 Versuchsaufbau zur Evaluierung der Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers mit systematischer Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des Ortungssystems und der Metallscheibe, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus

Die Positionsbestimmung und die Detektion des Störkörpers mit den beiden Algorithmen erfolgen in dem durchgeführten Versuch nacheinander. Die Ergebnisse der Positions- und Ausrichtungsbestimmung und der Störkörperdetektion werden als Funktion des Abstandes zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule in der Abb. 7.11 präsentiert.



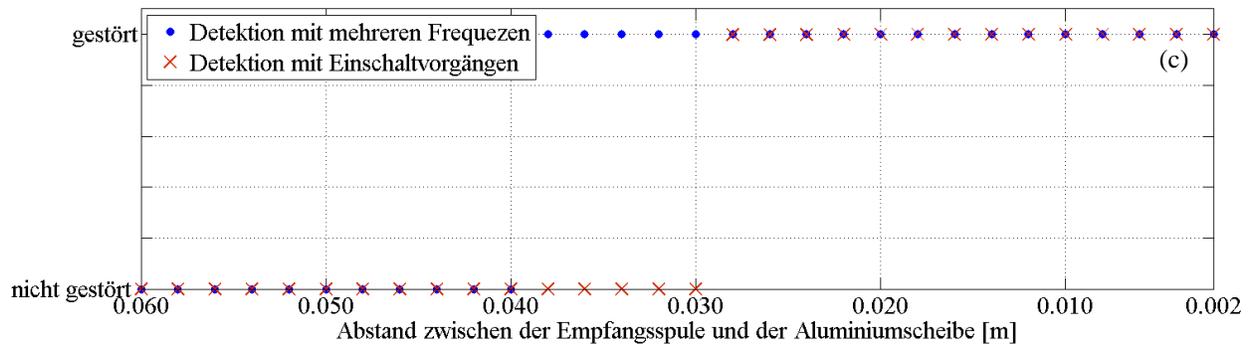
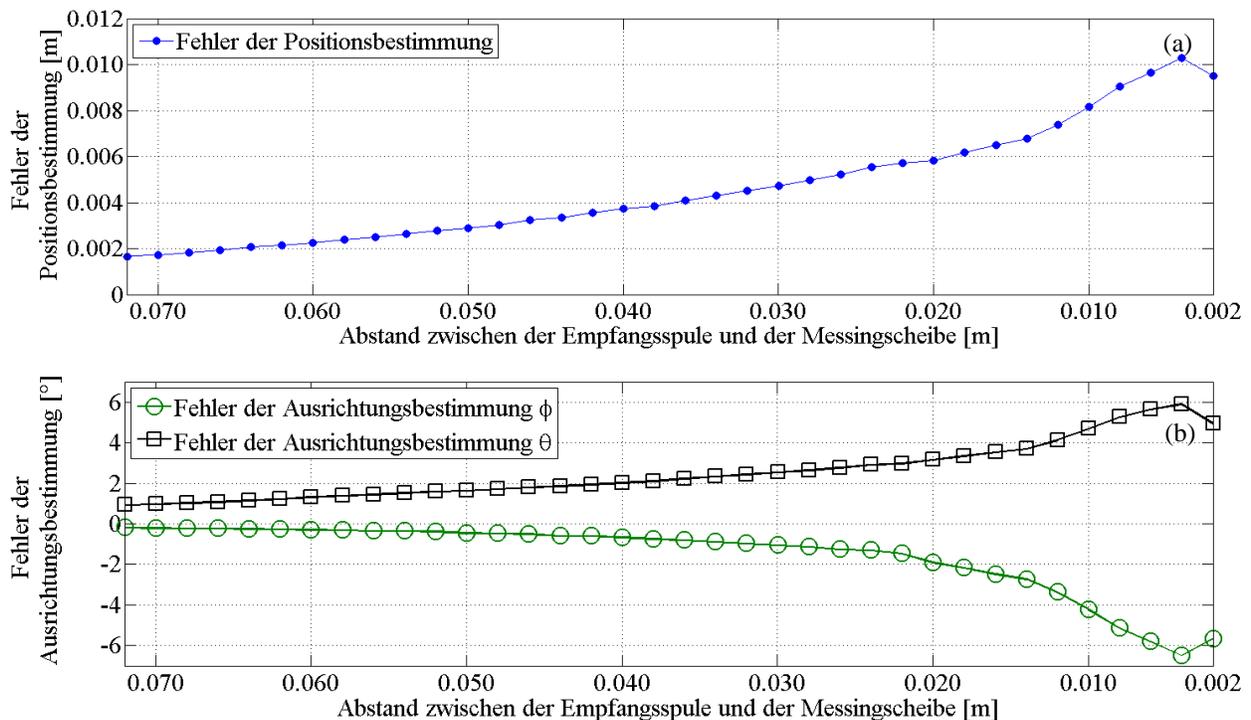


Abb. 7.11 Detektion der Aluminiumscheibe mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störung durch die Aluminiumscheibe

Damit die entwickelten Algorithmen unter diversen Bedingungen evaluiert werden können, wird im nächsten Versuch die Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems um 90 Grad entlang der z-Achse gedreht. Statt der Aluminiumscheibe wurde eine Messingscheibe (CuZn40Pb2) mit gleichen Abmessungen als Störkörper verwendet. Die Ergebnisse der Positions- und Ausrichtungsbestimmung und der Störkörperdetektion werden als Funktion des Abstandes zwischen der Messingscheibe und der Empfangsspule in der Abb. 7.12a und in Abb. 7.12b präsentiert. In der Abb. 7.12c werden die Ergebnisse der Detektion des Störkörpers mit den beiden im Kapitel 4 beschriebenen Algorithmen mit Präsenz der Messingscheibe wiedergegeben.



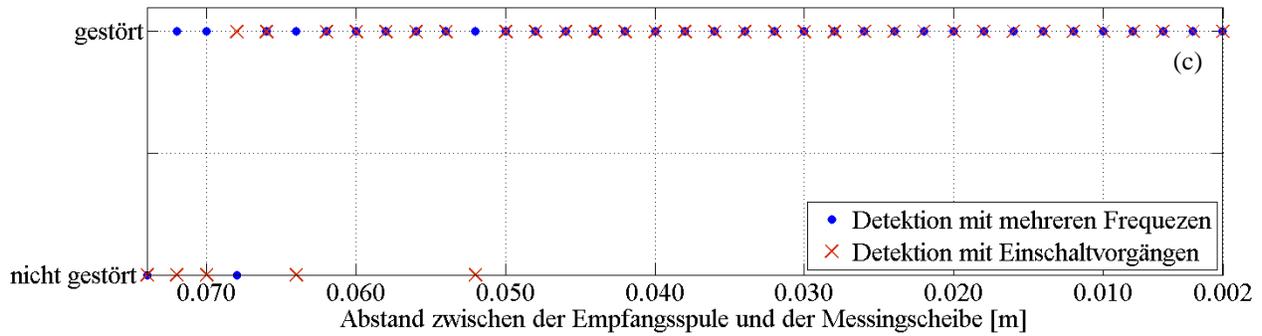
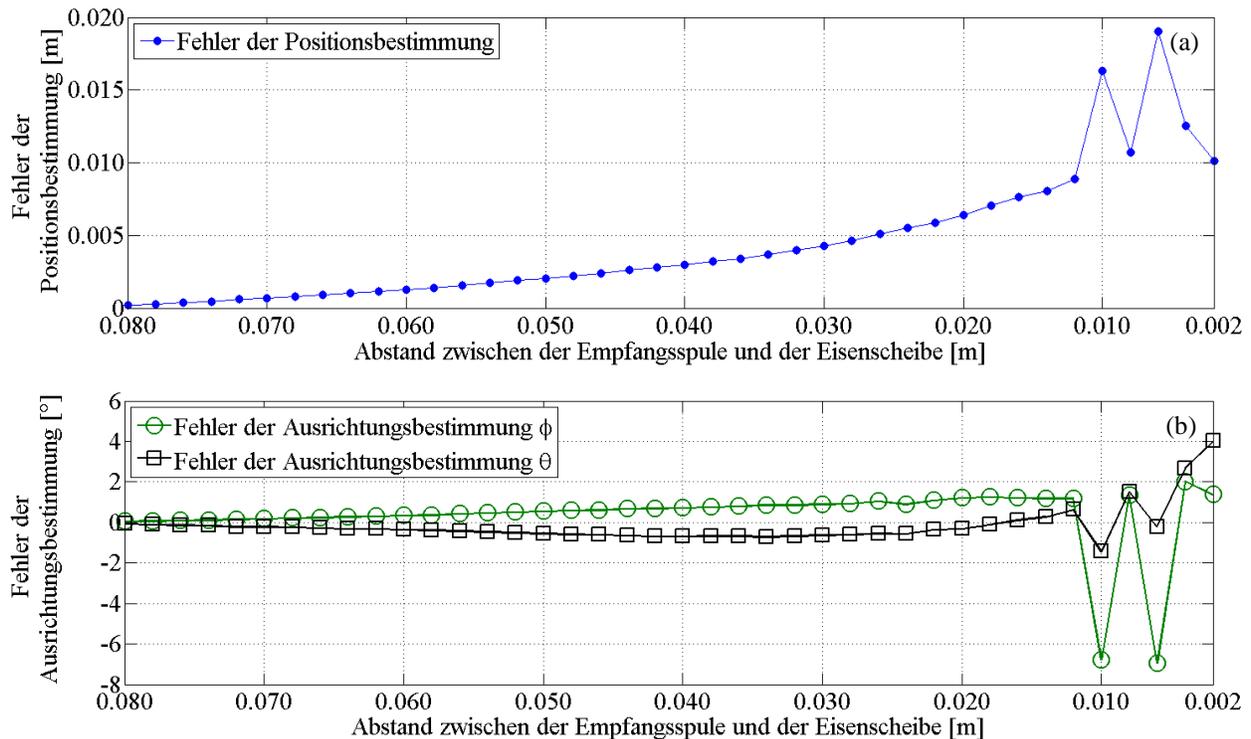


Abb. 7.12 Detektion der Messingscheibe mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störungen durch die Messingscheibe

Anschließend wurde statt der Messingscheibe eine Eisenscheibe mit gleichen Abmessungen als Störkörper verwendet. In der Abb. 7.13a und Abb. 7.13b wird der Verlauf des Fehlers der Positions- und Ausrichtungsbestimmung in Abhängigkeit des Abstandes zwischen der Empfangsspule und dem Störkörper dargestellt. In der Abb. 7.13c werden die Ergebnisse der Detektion des Störkörpers mit beiden in dieser Arbeit beschriebenen Algorithmen mit Präsenz der Eisenscheibe wiedergegeben.



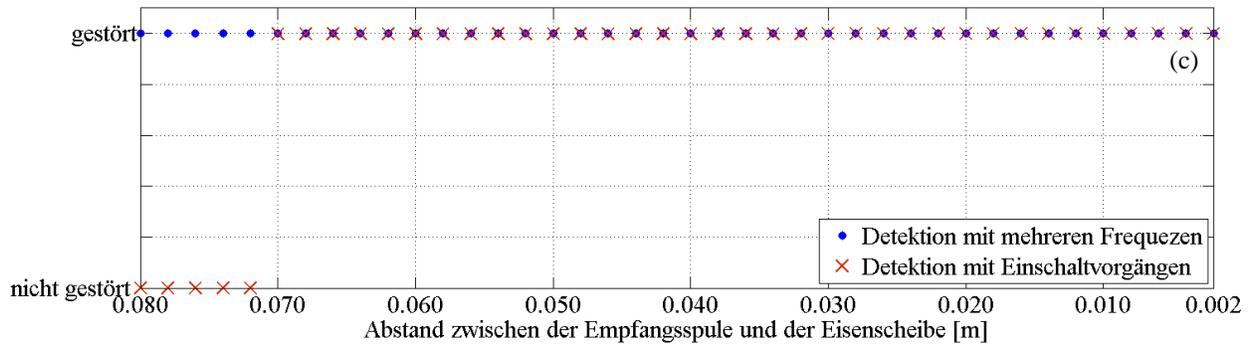


Abb. 7.13 Detektion der Eisenscheibe mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störung durch die Eisenscheibe.

Detektion eines Aluminiumquaders

Im zweiten Experiment wird anstatt einer Scheibe ein quaderförmiger Störkörper verwendet. Der in diesem Experiment eingesetzte Versuchsaufbau wird in Abb. 7.14 gezeigt. Als Störkörper wurde ein Aluminiumquader mit der Kantenlänge von $0.03 \times 0.03 \times 0.042$ m verwendet. Der Aluminiumquader wurde in der direkten Nähe der Empfangsspule platziert und schrittweise um jeweils 2 mm entlang einer Achse von der Empfangsspule entfernt (siehe Abb. 7.14). Nach jeder Verschiebung des Aluminiumquaders werden die Lage und die Ausrichtung der Empfangsspule mit dem elektromagnetischen Trackingsystem bestimmt. Die Präsenz des leitenden Störkörpers wird anschließend mit den beiden in dieser Arbeit beschriebenen Algorithmen detektiert.

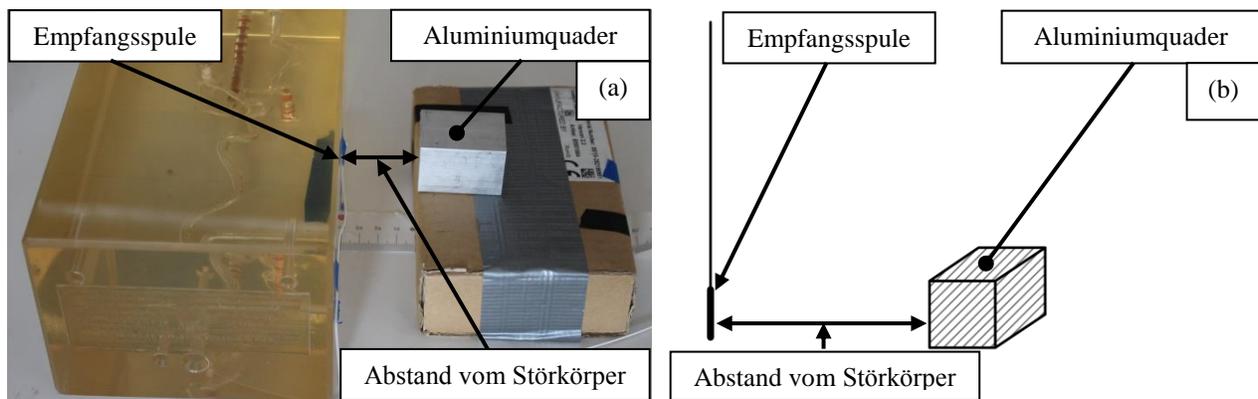


Abb. 7.14 Versuchsaufbau zur Evaluierung der Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers mit systematischer Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des Ortungssystems und dem Aluminiumquader, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus

Die Positionsbestimmung und die Detektion des Störkörpers mit den beiden Algorithmen erfolgen in dem durchgeführten Versuch nacheinander. Die Ergebnisse der Positions- und Ausrichtungsbestimmung und der Störkörperdetektion werden als Funktion des Abstandes zwischen dem Aluminiumquader und der Empfangsspule in der Abb. 7.15 präsentiert.

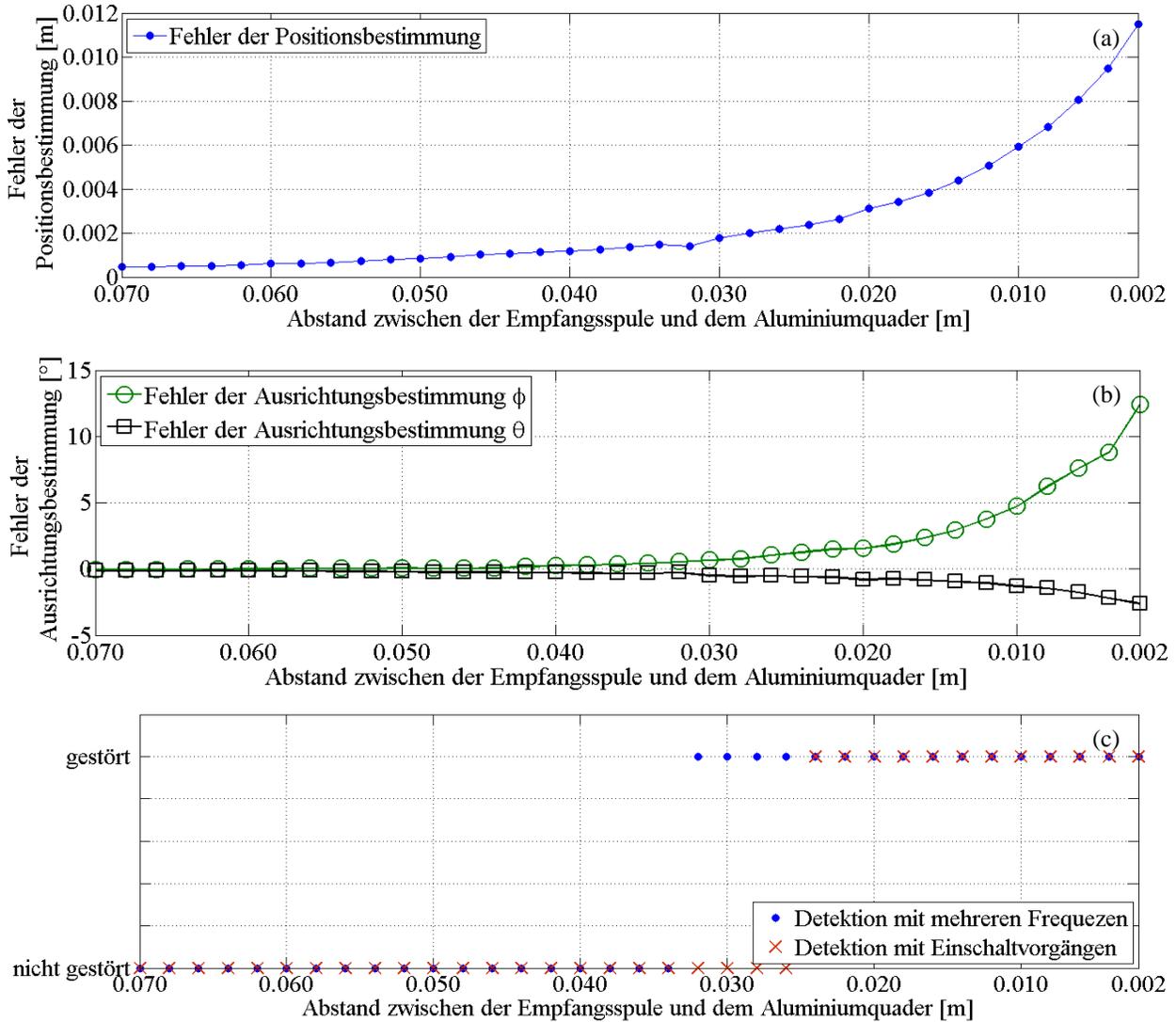


Abb. 7.15 Detektion der Präsenz des Aluminiumquaders mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störung durch die Präsenz des Aluminiumquaders

Detektion des Flachdetektors des C-Arms

Im letzten Experiment der ersten Versuchsreihe wird der Einfluss des Flachdetektors des C-Arms Siemens Artis zeego [168] auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems evaluiert und dessen Präsenz mit Hilfe der entwickelten Algorithmen detektiert. In diesem Versuch wird die Empfangsspule des Ortungssystems in der Mitte des Koordinatensystems auf der Höhe von 0.12 m platziert (siehe Abb. 7.16). Der Flachdetektor des C-Arms wird in der direkten Nähe der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems angeordnet und in jedem Schritt um 2 mm von der Empfangsspule entfernt (siehe Abb. 7.16). In der Abb. 7.17 werden sowohl die Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung als auch die Ergebnisse der Evaluierung der beiden Algorithmen zur Detektion des leitenden Störkörpers präsentiert.

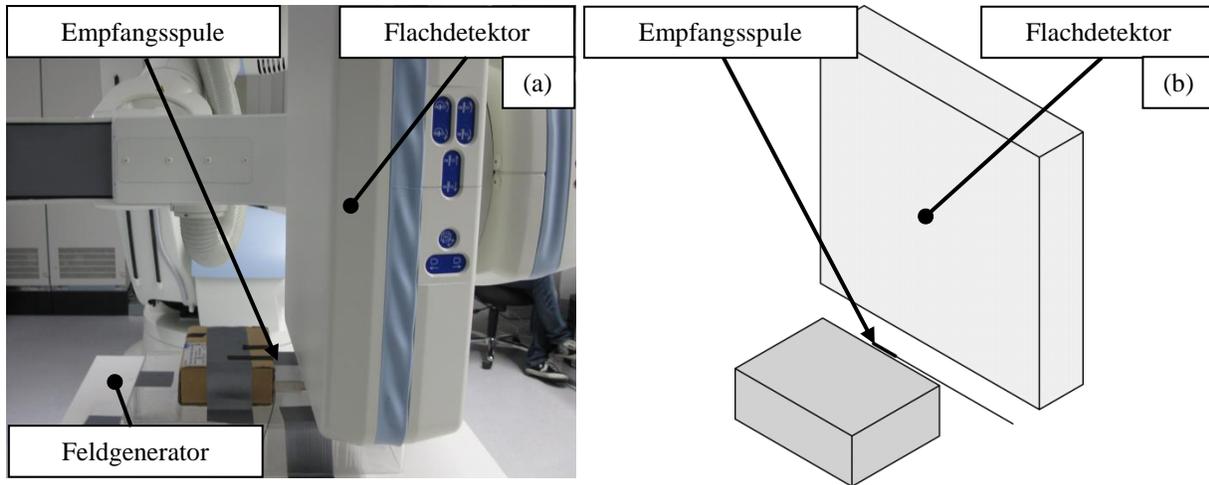
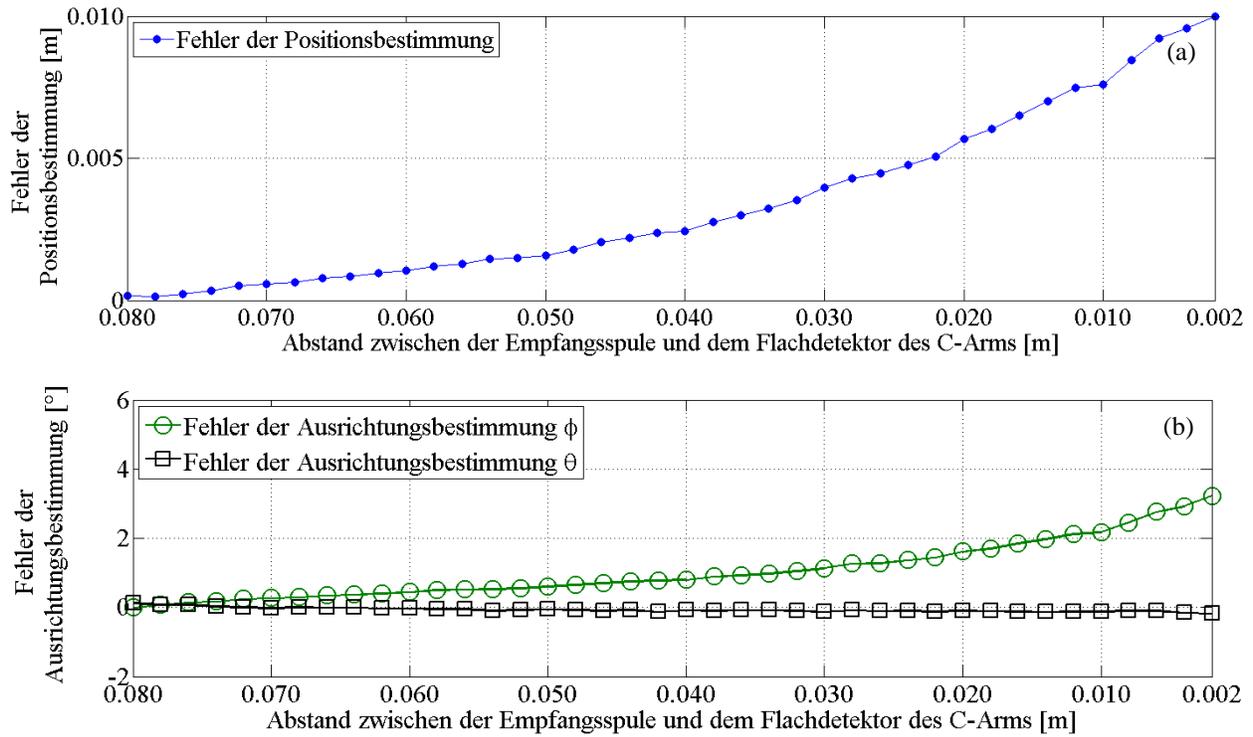


Abb. 7.16 Versuchsaufbau zur Detektion des Flachdetektors des C-Arms Siemens Artis zeego in der Nähe der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems



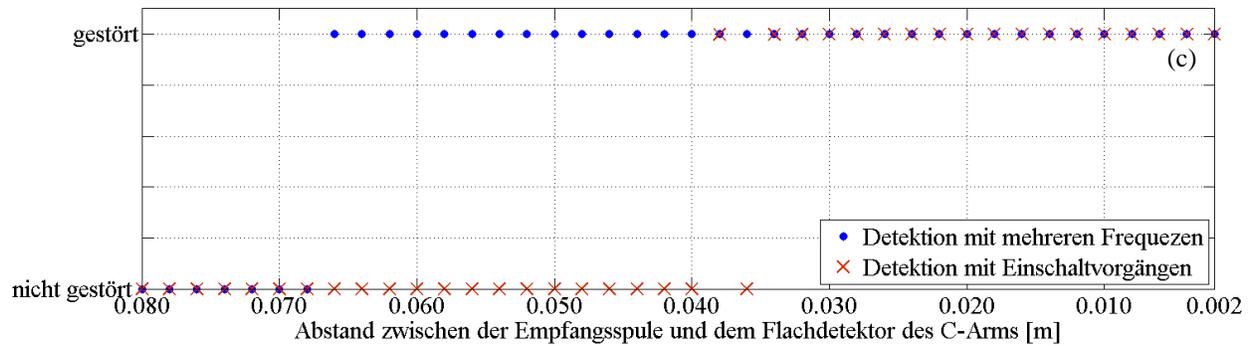


Abb. 7.17 Detektion der Präsenz des Flachdetektors des C-Arms Siemens Artis zeego mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störung durch die Präsenz des Flachdetektors

2. Versuchsreihe – zufällige Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems und der Aluminiumscheibe

In der zweiten Versuchsreihe wird statt des Störkörpers, die Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems verschoben. Die Empfangsspule wird durch den Roboter in einer zufälligen Position auf einer Fläche von 0.1 m x 0.1 m in der direkten Nähe des Störkörpers platziert. Die Lagen der Empfangsspule wurden mit einem Zufallsgenerator mit einer Gleichverteilung mit Hilfe der Matlab-Funktion *rand* generiert. In dieser Versuchsreihe wird eine Aluminiumscheibe mit einem Durchmesser von 0.1 m und der Höhe von 0.03 m als Störkörper verwendet. Bei jeder Position der Empfangsspule werden deren Lage und Ausrichtung mit dem optischen Trackingsystem Polaris Spectra gemessen. Die Positionsbestimmung mit dem optischen Trackingsystem wird als Referenz zur Bestimmung der Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem verwendet. Nach jeder Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen und dem optischen Trackingsystem wird die Präsenz des leitenden Störkörpers mit den beiden oben beschriebenen Algorithmen nacheinander detektiert. Der Versuchsaufbau wird in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.

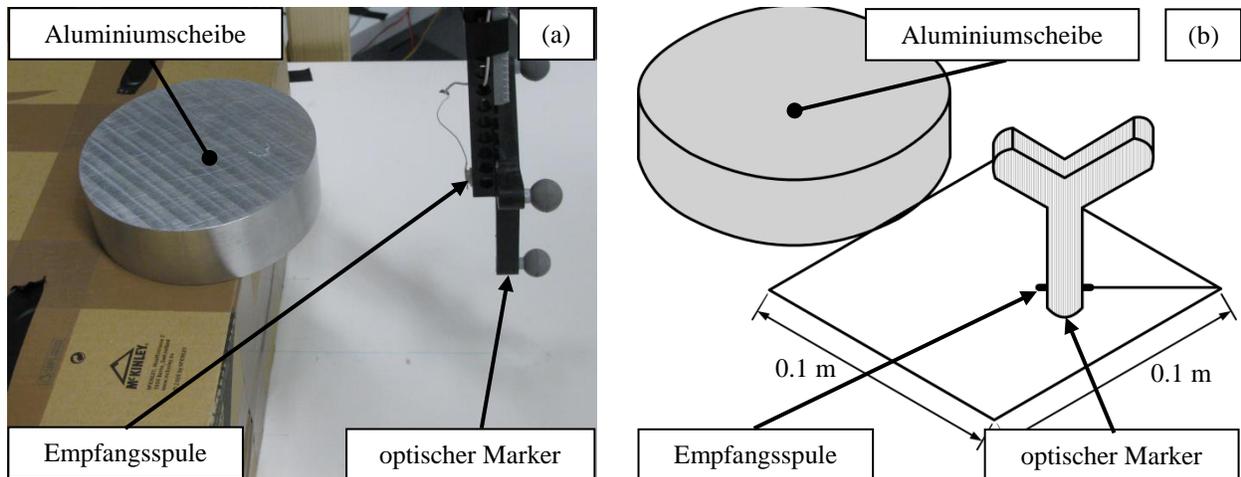
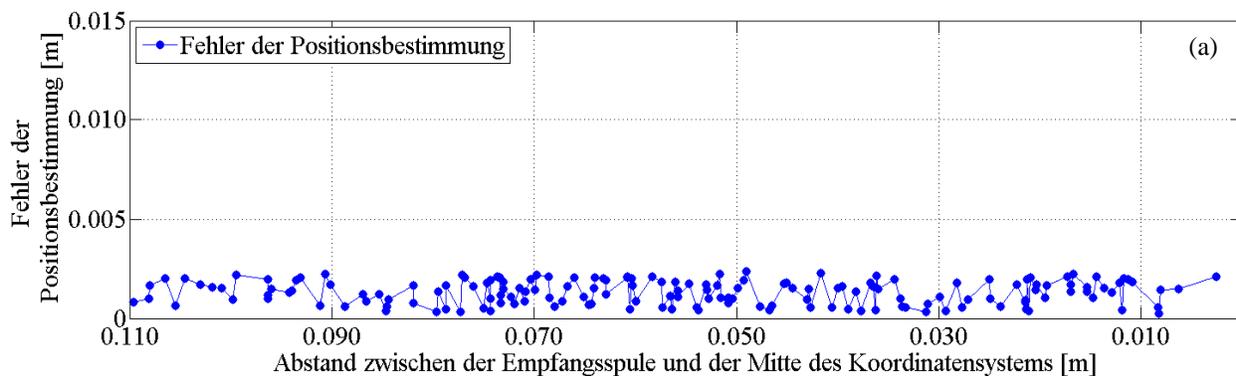


Abb. 7.18 Versuchsaufbau zur Evaluierung der Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus

Diese Versuchsreihe ist ähnlich der experimentellen Evaluierung der Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems in den Studien von Frantz [104]. Der Vorteil dieses Experimentes liegt in der Automatisierung der Evaluation des Ortungssystems, die eine hohe Anzahl der Messwerte ohne einen mühsamen Messvorgang ermöglicht. Zu den Nachteilen gehört ein großer Aufwand, der mit der Entwicklung des nicht metallischen Robotersystems verbunden ist. Außerdem wird bei diesem Experiment der Fehler der Positionsbestimmung mit optischem Trackingsystem sowie der Fehler der Registrierung des Koordinatensystems des optischen Trackingsystems und des Koordinatensystems des elektromagnetischen Trackingsystems eingeführt.

Dieser Versuch wird sowohl in der Nähe der Aluminiumscheibe als auch ohne sie durchgeführt. Die Ergebnisse des Versuches ohne leitenden Störkörper sind in Abb. 7.19 dargestellt. In Abb. 7.20 sind die Ergebnisse des Versuchs mit Aluminiumscheibe wiedergegeben.



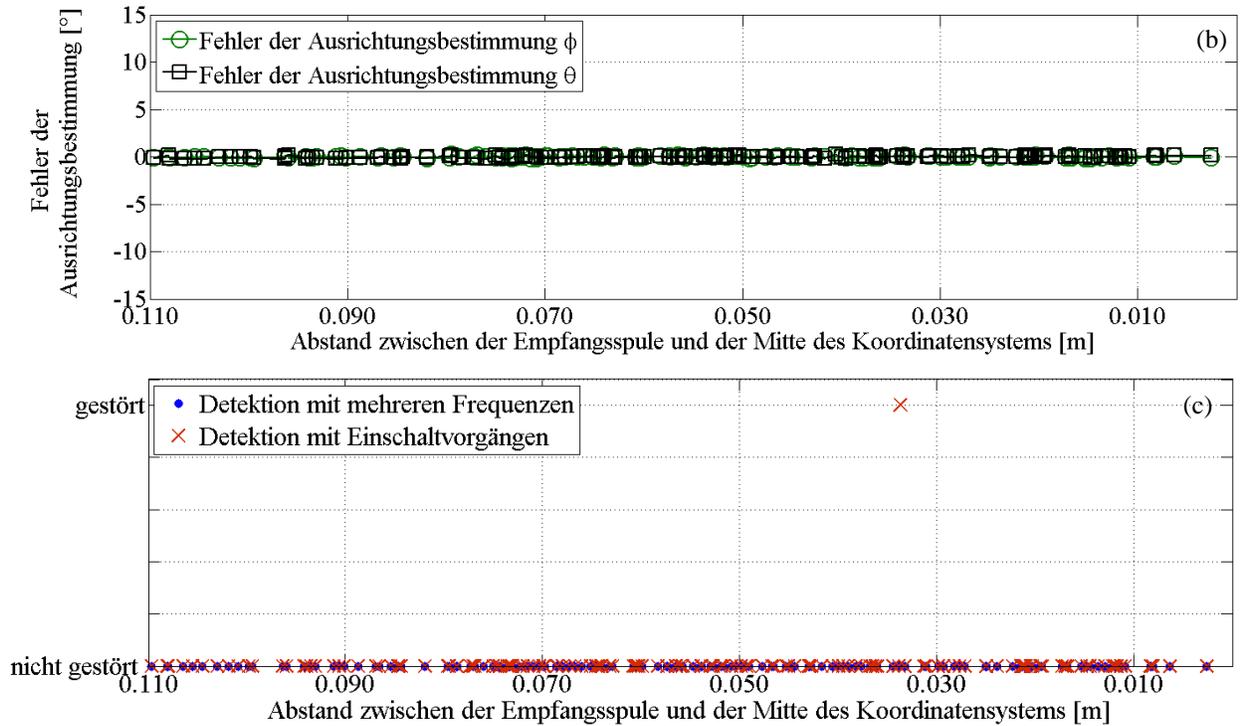
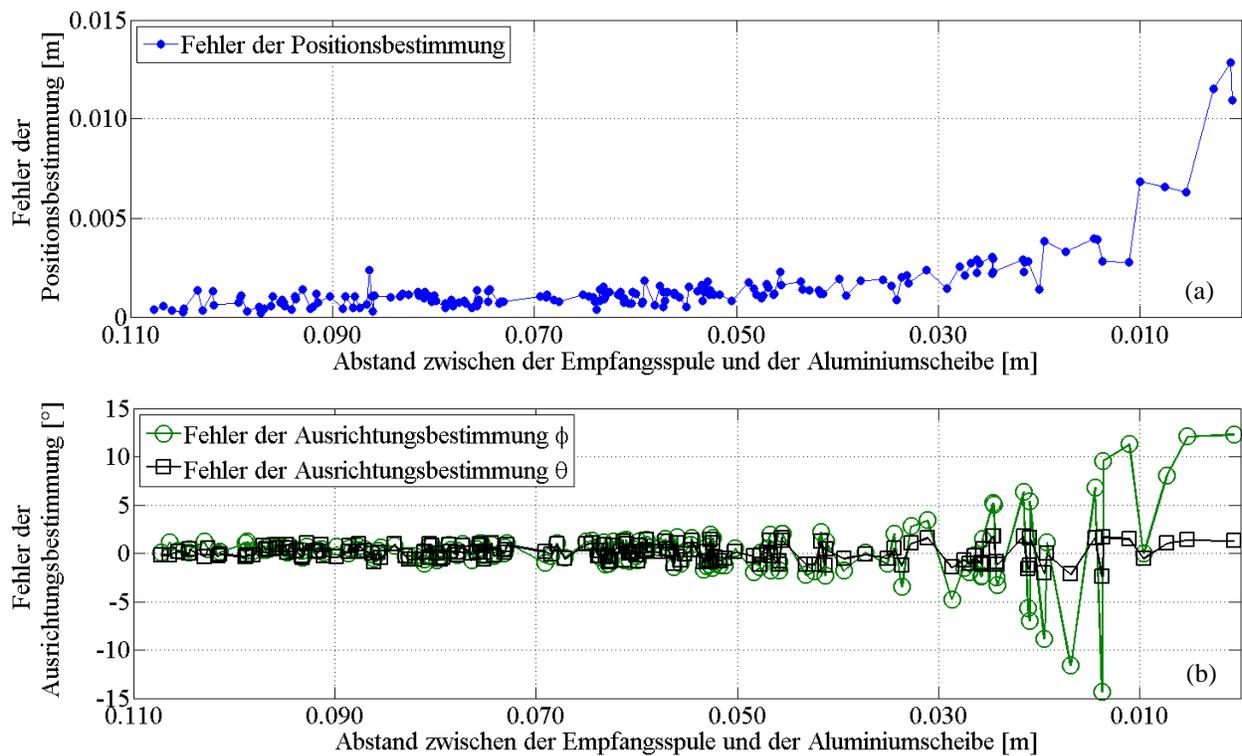


Abb. 7.19 Detektion der Störung durch leitende Objekte mit zufälliger Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems und der Mitte des Koordinatensystems, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Evaluierung der Algorithmen zur Detektion der Störungen.



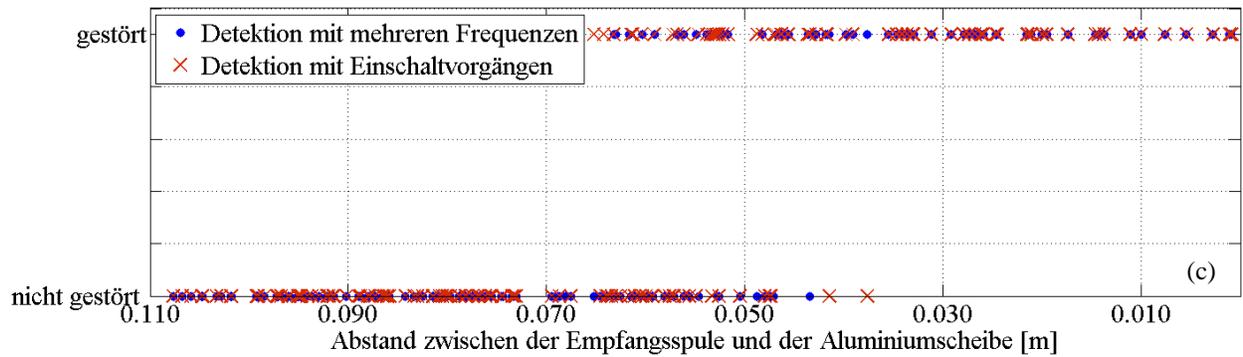


Abb. 7.20 Detektion der Störung durch leitende Objekte mit zufälliger Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems und der Aluminiumscheibe, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Evaluierung der Algorithmen zur Detektion der Störungen

Vergleich der Algorithmen zur Detektion des leitenden Störkörpers

In der Tab. 6 werden die Ergebnisse der beiden entwickelten Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers verglichen.

| 1. Versuchsreihe | | mit mehreren Frequenzen | mit Einschaltvorgängen |
|---|------------------|-------------------------|------------------------|
| Abstand von der Empfangsspule, in der die getesteten Störkörper als Störung detektiert wurden. [mm] | Aluminiumscheibe | 38.0 | 28.0 |
| | Messingscheibe | 72.0 | 68.0 |
| | Eisenscheibe | 80.0 | 70.0 |
| | Flachdetektor | 76.0 | 38.0 |
| Fehler der Positionsbestimmung, ab dem die Störkörper als Störung erkannt wurden. [mm] | Aluminiumscheibe | 2.3 | 3.2 |
| | Messingscheibe | 1.6 | 1.8 |
| | Eisenscheibe | 0.2 | 0.7 |
| | Flachdetektor | 0.2 | 2.8 |
| Fehler der Ausrichtungsbestimmung φ (θ), ab dem die Störkörper als Störung erkannt wurden. [°] | Aluminiumscheibe | 0.7 (0.1) | 1.1 (0.1) |
| | Messingscheibe | 0.2 (0.9) | 0.2 (1.0) |
| | Eisenscheibe | 0.1 (0.1) | 0.2 (0.2) |
| | Flachdetektor | 0.1 (0.1) | 0.9 (0.1) |
| Mess- und Berechnungszeit \pm die Standardabweichung [s] ⁸ | | 69.8 \pm 5.8 | 33.6 \pm 0.6 |
| Ist die Parallelisierbarkeit möglich? | | ja | nein |

Tab. 6 Tabellarischer Vergleich der entwickelten Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers

⁸ Mittelwert \pm Standardabweichung von 200 Messungen mit der Aluminiumscheibe

In der Tab. 7 wird eine Auswertung der Ergebnisse der Positionsbestimmung ohne und mit Präsenz des Störkörpers aus der 2. Versuchsreihe präsentiert. Die Standardabweichung und die RMS-Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung wurden mit den Gleichungen (6.21) – (6.26) bestimmt.

| | ohne Störung (1 kHz) | mit Aluminium- scheibe (1 kHz) |
|---|-------------------------|-----------------------------------|
| maximaler Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 2.3 | 12.9 |
| RMS-Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 1.3 | 1.5 |
| Standardabweichung des Fehlers der Positionsbestimmung [mm] | 0.6 | 1.7 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung (φ) [°] | 0.3 | 14.3 |
| RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung (φ) [°] | 0.1 | 3.0 |
| Standardabweichung des Fehlers der Ausrichtungsbestimmung (φ) [°] | 0.1 | 3.0 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung (θ) [°] | 0.3 | 2.4 |
| RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung (θ) [°] | 0.1 | 0.4 |
| Standardabweichung des Fehlers der Ausrichtungsbestimmung (θ) [°] | 0.1 | 0.8 |

Tab. 7 Ergebnisse der Genauigkeitsevaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems mit und ohne Aluminiumscheibe bei zufälliger Änderung der Lage und Ausrichtung der Empfangsspule

Die Ergebnisse des 2. Versuchs mit der Aluminiumscheibe ermöglichen die Evaluierung der Sensitivität und Spezifität der Detektion des leitenden Störkörpers mit den beiden Verfahren in der Funktion des Fehlers der Positionsbestimmung. Als Erfolgskriterium wird eine Detektion bei einem Fehler der Positionsbestimmung festgelegt, der grösser als der jeweils festgelegte Schwellwert ist. Die Ergebnisse der im Unterkapitel 4.1 beschriebenen Vorgänge werden in der Tab. 8 und Tab. 9 präsentiert.

| | Sensitivität [-] | Spezifität [-] | Anzahl der Messwerte [-] |
|---|---------------------|-------------------|-----------------------------|
| Fehler der Positionsbestimmung > 1.0 mm | 0.56 | 0.94 | 108 |
| Fehler der Positionsbestimmung > 1.5 mm | 0.87 | 0.81 | 46 |
| Fehler der Positionsbestimmung > 2.0 mm | 0.97 | 0.77 | 31 |
| Fehler der Positionsbestimmung > 2.5 mm | 1.00 | 0.72 | 21 |

Tab. 8 Sensitivität und Spezifität der Detektion des leitenden Störkörpers mit mehreren Frequenzen in der Funktion des Fehlers der Positionsbestimmung

| | Sensitivität [-] | Spezifität [-] | Anzahl der Messwerte [-] |
|---|---------------------|-------------------|-----------------------------|
| Fehler der Positionsbestimmung > 1.0 mm | 0.61 | 0.90 | 108 |
| Fehler der Positionsbestimmung > 1.5 mm | 0.93 | 0.78 | 46 |
| Fehler der Positionsbestimmung > 2.0 mm | 0.97 | 0.71 | 31 |
| Fehler der Positionsbestimmung > 2.5 mm | 1.00 | 0.67 | 21 |

Tab. 9 Sensitivität und Spezifität der Detektion des leitenden Störkörpers mit Einschaltvorgängen in der Funktion des Fehlers der Positionsbestimmung

Die Aufteilung der Ergebnisse des zweiten Versuchs erfolgt in Intervallen basierend auf dem Fehler der Positionsbestimmung und für jedes Intervall wird eine Sensitivität (Detektionsrate) berechnet. In Abb. 7.21 sind die Ergebnisse dargestellt.

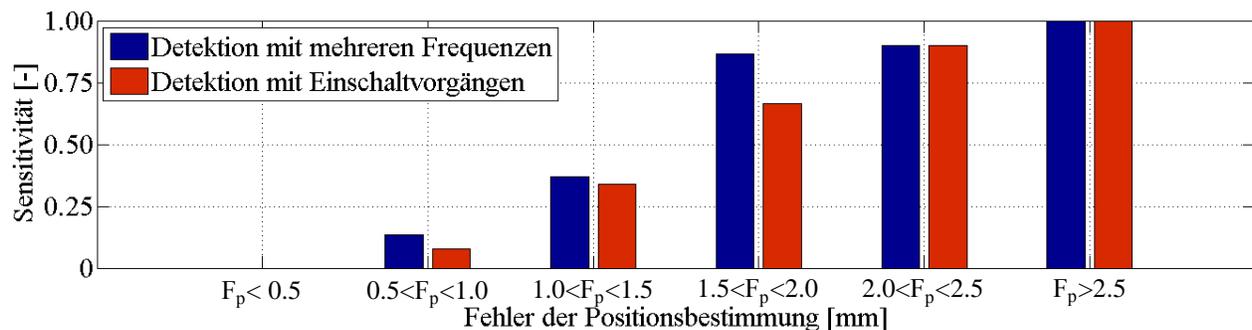


Abb. 7.21 Sensitivität der Detektion der Störung durch leitende Objekte in der Funktion des Fehlers der Positionsbestimmung

Diskussion

Der Fehler der Positionsbestimmung des elektromagnetischen Trackingsystems mit dem Trackingsystemdemonstrator nimmt mit der dritten Potenz des Abstandes zwischen der Sende- bzw. der Empfangsspule und dem Störkörper ab [36]. Der gemessene Verlauf der durch die Aluminiumscheibe verursachten Fehler entspricht dem erwarteten Verlauf (siehe z. B. Abb. 7.11a und Abb. 7.11b). Jedoch weisen die durch die Eisenscheibe verursachten Fehler in der direkten Nähe der Empfangsspule hohe Schwankungen auf. Diese Schwankungen könnten durch die schwer einschätzbare Deformation des elektromagnetischen Feldes der Sendespulen verursacht werden, weil die Eisenscheibe im Vergleich zu Aluminium und Messing ferromagnetisch ist.

In dem Experiment mit der Aluminiumscheibe wurde nach jeder Positionsbestimmung eine Detektion der leitenden Störkörper mit den beiden in diesem Kapitel beschriebenen Algorithmen durchgeführt. Der Algorithmus auf Basis der Erregung der Sendespule mit zwei unterschiedlichen Frequenzen hat ab dem Abstand von 38.0 mm zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule bis zur direkten Nähe der Empfangsspule einen leitenden Störkörper detektiert. Der Fehler der Positionsbestimmung beim Abstand zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule von 38.0 mm nahm mit sinkendem Abstand

kontinuierlich zu. Deswegen konnte in diesem Experiment keine Detektion der Störung als falsch betrachtet werden (Fehler 1. und 2. Art – siehe Seite 69). Die weiteren Experimente mit der Messingscheibe, Eisenscheibe und dem Aluminiumquader beziehungsweise mit dem Flachdetektor des C-Arms haben diese Beobachtungen bestätigt.

Die Detektion des leitenden Störkörpers mit den Einschaltvorgängen resultierte mit einer kontinuierlichen Fehlermeldung nach der ersten Erkennung der Aluminiumscheibe beziehungsweise des Aluminiumquaders. In den Versuchen mit der Messingscheibe und mit dem C-Arm werden die Störkörper trotz der steigenden Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung nach der ersten Erkennung nicht kontinuierlich erkannt. Diese unzuverlässige Erkennung des Störkörpers bei kleinen Fehlern der Positions- und Ausrichtungsbestimmung kann als Fehler 2. Art betrachtet werden. Die aufgetretenen Fehler 2. Art bei dieser Methode der Detektion des leitenden Störkörpers können als Folgen der in dieser Arbeit angenommenen Strategie zur Vermeidung des Fehlers 1. Art bei der Festlegung der Schwellwerte verstanden werden (siehe Seite 69 und 73).

Die Ergebnisse der zufälligen Änderungen der Lage und der Ausrichtung der Empfangsspule wurden in der Tab. 7 zusammengefasst. Ähnlich wie im Experiment mit der sequenziellen Verschiebung der Metallscheibe, nimmt der Fehler der Positionsbestimmung mit sinkendem Abstand zwischen dem Störkörper und der Empfangsspule stark zu (siehe Abb. 7.20c).

Im Experiment ohne elektrisch leitenden Störkörper in der Nähe der Empfangsspule wurden mit dem Algorithmus zur Detektion der Störungen auf Basis mehrerer Frequenzen keine Störkörper detektiert. Die Detektion des Störkörpers mit dem Algorithmus auf Basis der Einschaltvorgänge resultierte in einer Fehlermeldung. Im gleichen Experiment mit der Aluminiumscheibe in der Nähe der Empfangsspule wurden 65 Messwerte von 200 mit dem Algorithmus auf der Basis mehrerer Frequenzen als gestört angenommen. Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung für diese 65 gestörten Messungen beträgt 2.6 mm. Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung in den restlichen 135 Messungen liegt bei 0.9 mm.

Die Detektion des Fehlers mit den Einschaltvorgängen hat zu 73 Positionsbestimmungen geführt, bei denen die Präsenz des leitenden Störkörpers detektiert worden ist. Der Mittelwert des Fehlers der Positionsbestimmung für diese 73 gestörten Messungen beträgt 2.5 mm. Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung in den restlichen 127 Messungen liegt bei 0.9 mm. Im Szenario mit der Aluminiumscheibe in der Nähe der Empfangsspule konnten keine Fehlermeldungen als Fehler 1. Art betrachtet werden. Alle in diesem Szenario detektierten Störungen können mit Präsenz der Aluminiumscheibe erklärt werden. Mit den beiden Methoden war es möglich, alle Fehler der Positionsbestimmung grösser als 2.5 mm zu detektieren (Sensitivität gleich 1).

7.4 Evaluation und Vergleich der Methoden zur Korrektur der Störung

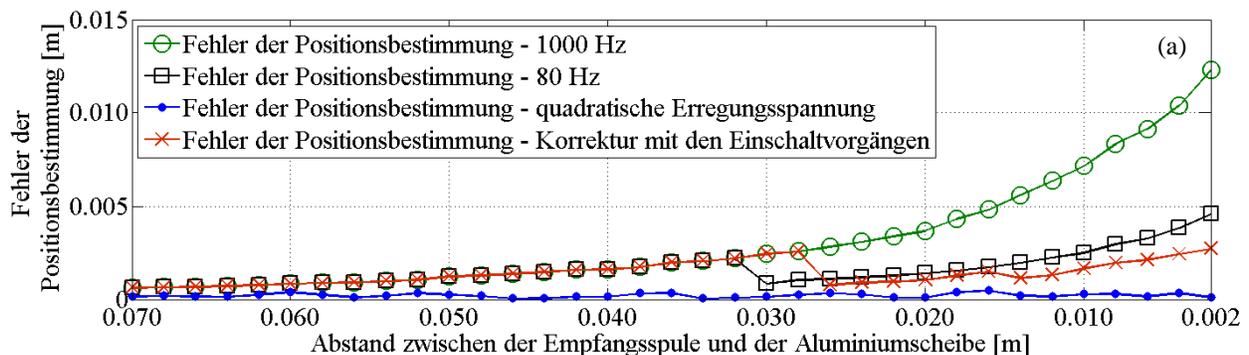
In diesem Unterkapitel wurden die entwickelten Methoden zur Korrektur der Störungen durch die leitenden Störkörper evaluiert und miteinander verglichen. Die Evaluierung der Methoden erfolgt mit Hilfe zweier Experimente. Diese Experimente wurden zusammen mit der experimentellen Evaluation der Algorithmen zur Detektion des leitenden Störkörpers durchgeführt und die Versuchsaufbauten, wie im Unterkapitel 7.3 beschrieben, verwendet.

1. Versuchsreihe – systematische Änderung der Lage des Störkörpers

Im ersten Experiment wird die Empfangsspule in der Mitte des Koordinatensystems in einer Höhe von 150 mm befestigt. Der Versuchsaufbau für dieses Experiment wurde in der Abb. 7.10 wiedergegeben. Bevor ein Störkörper eingeführt wird, wird die erste Positionsbestimmung ohne zusätzliche Störkörper als Referenz aufgenommen. Im nächsten Schritt wird eine Aluminiumscheibe in der direkten Nähe der Empfangsspule platziert und schrittweise um jeweils 2 mm von der Empfangsspule entfernt. Nach jeder Verschiebung der Aluminiumscheibe wird die Positions- und Ausrichtungsbestimmung in vier unterschiedlichen Varianten durchgeführt.

- mit einer sinusförmigen Erregerspannung (1000 Hz)
- nach der Korrektur der Störungen mit Hilfe der Frequenzabhängigkeit
- nach der Korrektur der Störungen mit Hilfe der Einschaltvorgänge
- mit einer quadratischen Erregerspannung

Die Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung werden als Unterschied zwischen den Messungen ohne den Störkörper und mit dem Störkörper berechnet. Die Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung als Funktion des Abstandes zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule werden in der Abb. 7.22 dargestellt.



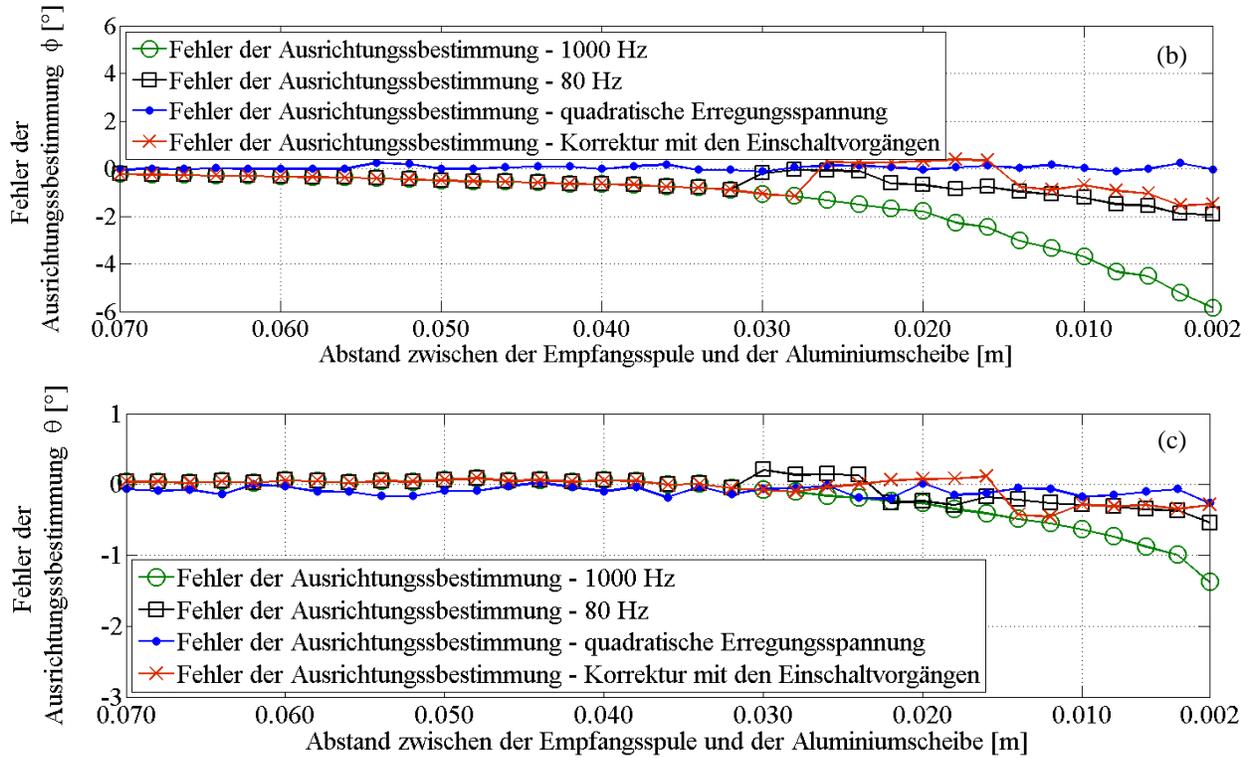
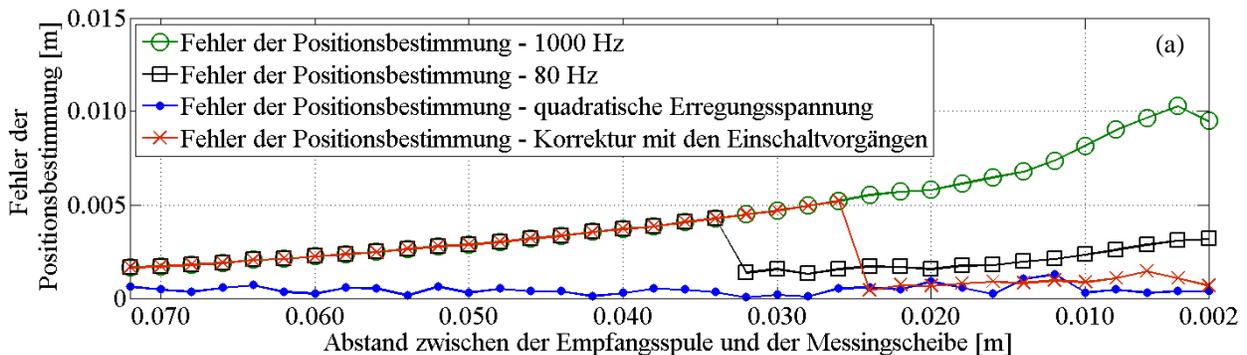


Abb. 7.22 Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Aluminiumscheibe als Funktion des Abstands zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – ϕ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – θ

Damit die entwickelten Algorithmen unter diversen Bedingungen evaluiert werden können, wird im nächsten Versuch die Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems um 90 Grad entlang der z-Achse rotiert. Anschließend wird anstatt einer Aluminiumscheibe eine Messingscheibe in der direkten Nähe der Empfangsspule platziert und schrittweise um jeweils 2 mm von der Empfangsspule entfernt. Die Fehler der Positionsbestimmung als Funktion des Abstandes zwischen der Messingscheibe und der Empfangsspule werden in der Abb. 7.23a präsentiert. Die Fehler der Bestimmung der Ausrichtung der Empfangsspule werden in der Abb. 7.23b und Abb. 7.23c präsentiert.



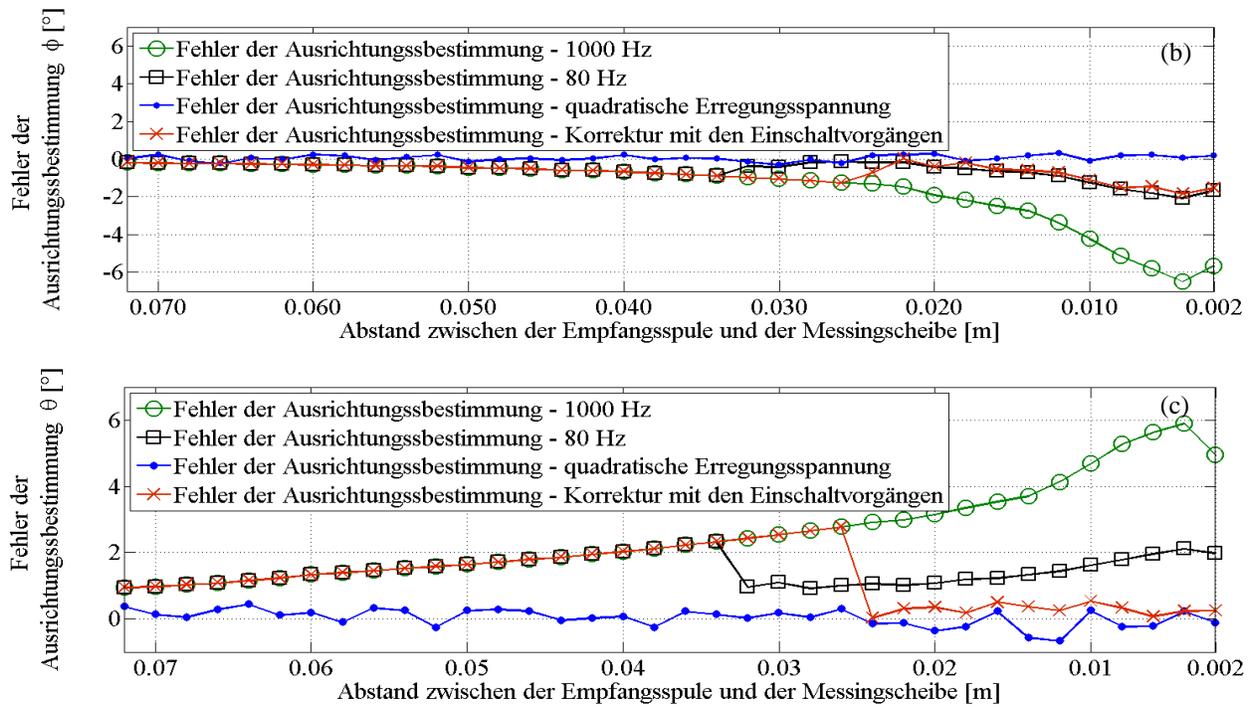
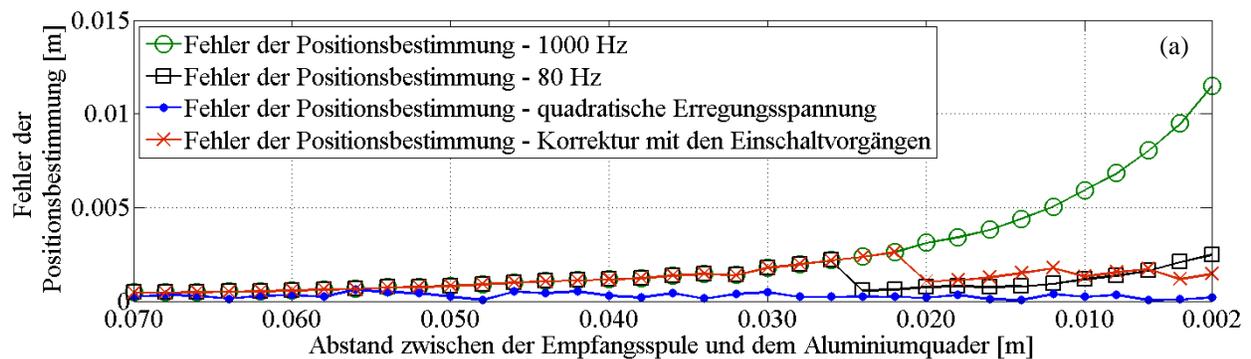


Abb. 7.23 Fehler der Positions- und Ausrichtungssbestimmung mit Messingscheibe als Funktion des Abstands zwischen der Messingscheibe und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungssbestimmung – ϕ , c) Fehler der Ausrichtungssbestimmung – θ

Im letzten Experiment der 1. Versuchsreihe wurde ein Aluminiumquader als Störkörper anstatt der Messingscheibe verwendet (siehe Abb. 7.14). Die Fehler der Positionsbestimmung als Funktion des Abstandes zwischen dem Aluminiumquader und der Empfangsspule werden in der Abb. 7.24a präsentiert. Die Fehler der Bestimmung der Ausrichtung der Empfangsspule werden in der Abb. 7.24b und Abb. 7.24c präsentiert.



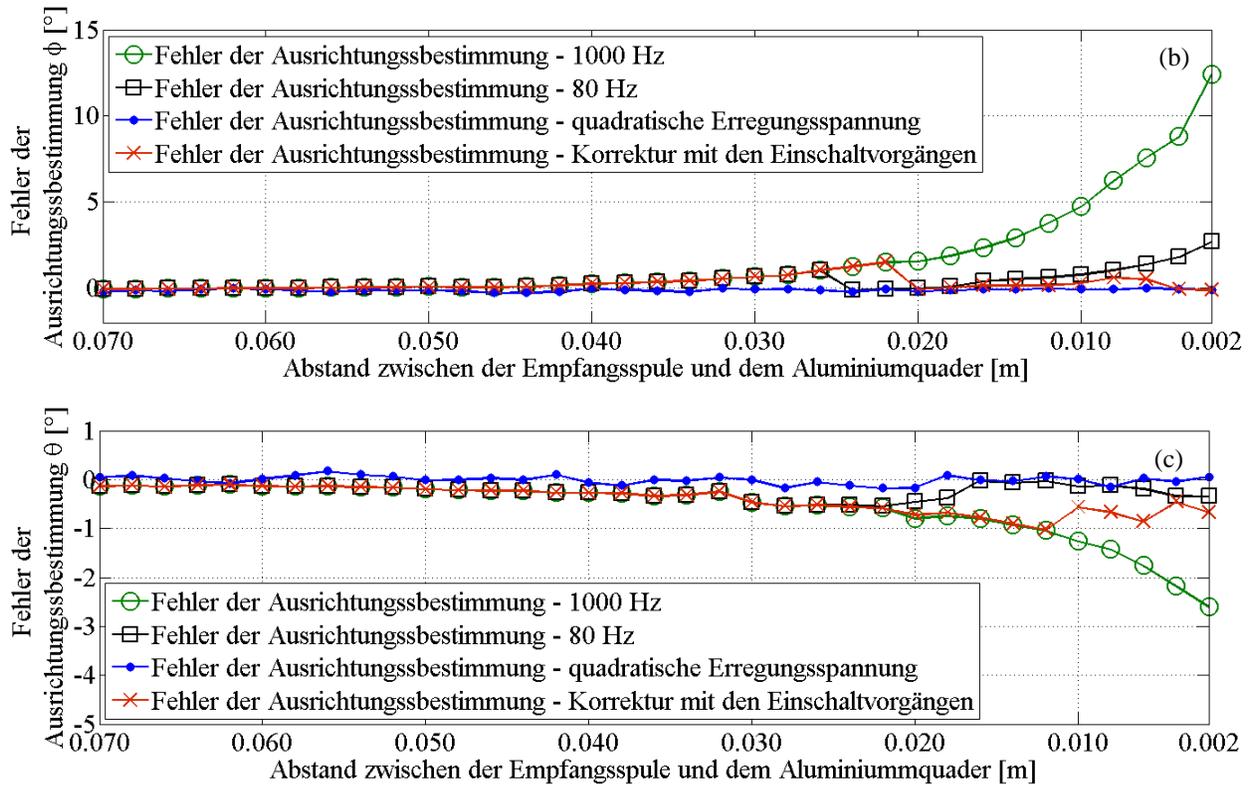


Abb. 7.24 Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Aluminiumquader als Funktion des Abstands zwischen dem Aluminiumquader und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – ϕ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – θ

2. Versuchsreihe – zufällige Änderung der Lage der Empfangsspule

Im zweiten Versuch zur Evaluierung der entwickelten Algorithmen zur Korrektur der Störung durch die elektrisch leitenden Störkörper bleiben die Lage und die Ausrichtung der Aluminiumscheibe relativ zur Sendespule konstant. Die Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems wird durch den Roboter zu einer zufälligen Position auf einer vorgegebenen Fläche von 100 mm x 100 mm verschoben. Bei jeder Lage und jeder Ausrichtung der Empfangsspule werden die Lage und die Ausrichtung des Feldsensors mit dem optischen Trackingsystem gemessen. Der Versuchsaufbau für dieses Experiment wird in der Abb. 7.18 wiedergegeben. Die Positionsbestimmung mit dem optischen Trackingsystem wird als Referenz zur Bestimmung des Fehlers der Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem verwendet. In jeder Position der Empfangsspule werden eine Positionsbestimmung ohne Korrektur und die drei oben beschriebenen Algorithmen zur Korrektur des Einflusses des leitenden Störkörpers verwendet. Das Experiment wurde sowohl mit Aluminiumscheibe als auch ohne Störkörper durchgeführt. Der Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung bei der Verwendung der drei beschriebenen Algorithmen ohne leitenden Störkörper in der Nähe der Empfangsspule findet sich in der Abb. 7.25. Der Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Aluminiumscheibe in der direkten Nähe der Empfangsspule wird in der Abb. 7.26 wiedergegeben. Die Ergebnisse dieses Experimentes werden in der Tab. 10 zusammengefasst.

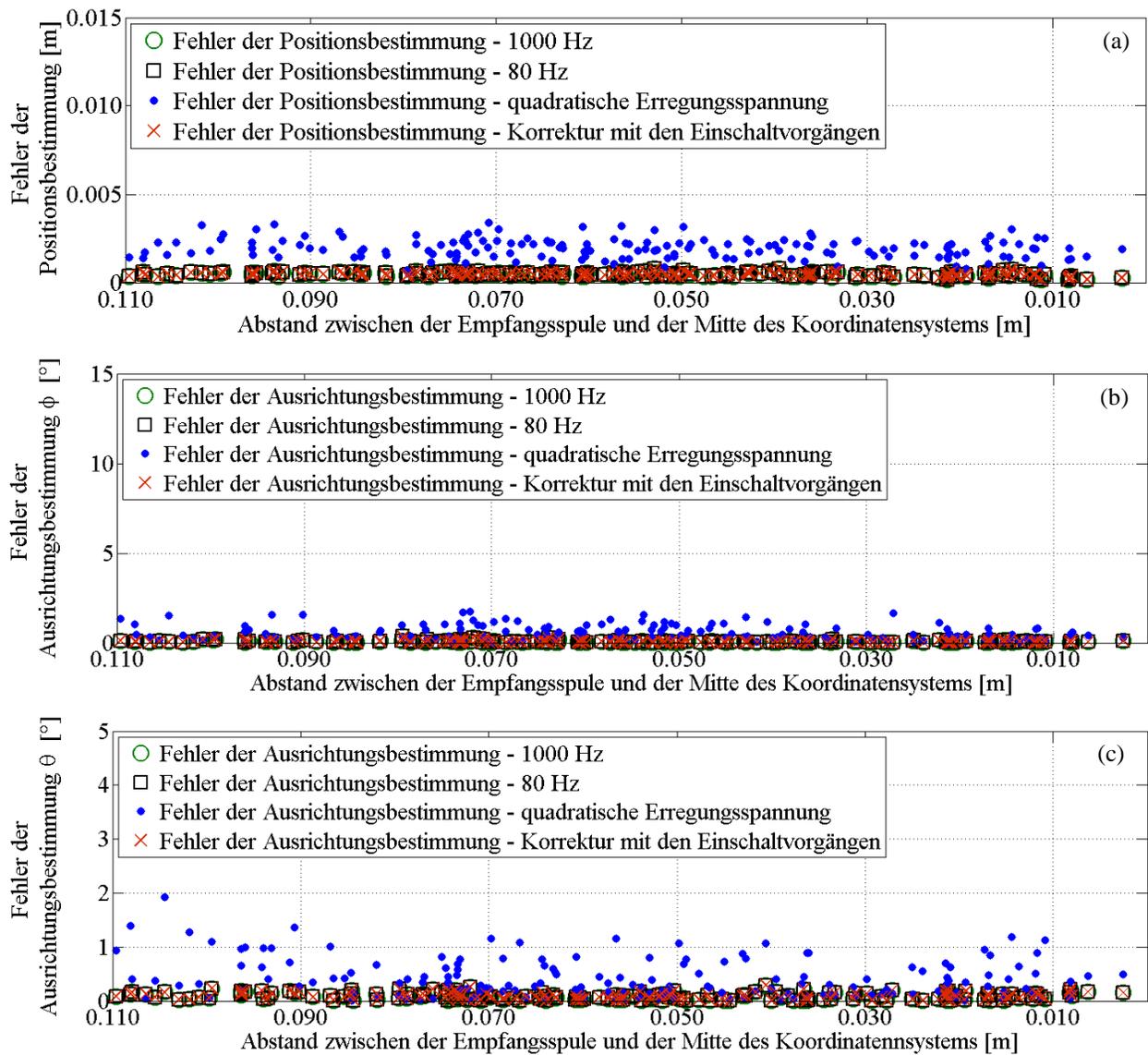


Abb. 7.25 Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung ohne Aluminiumscheibe als Funktion des Abstands zwischen der Empfangsspule und der Mitte des Koordinatensystems, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel ϕ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ

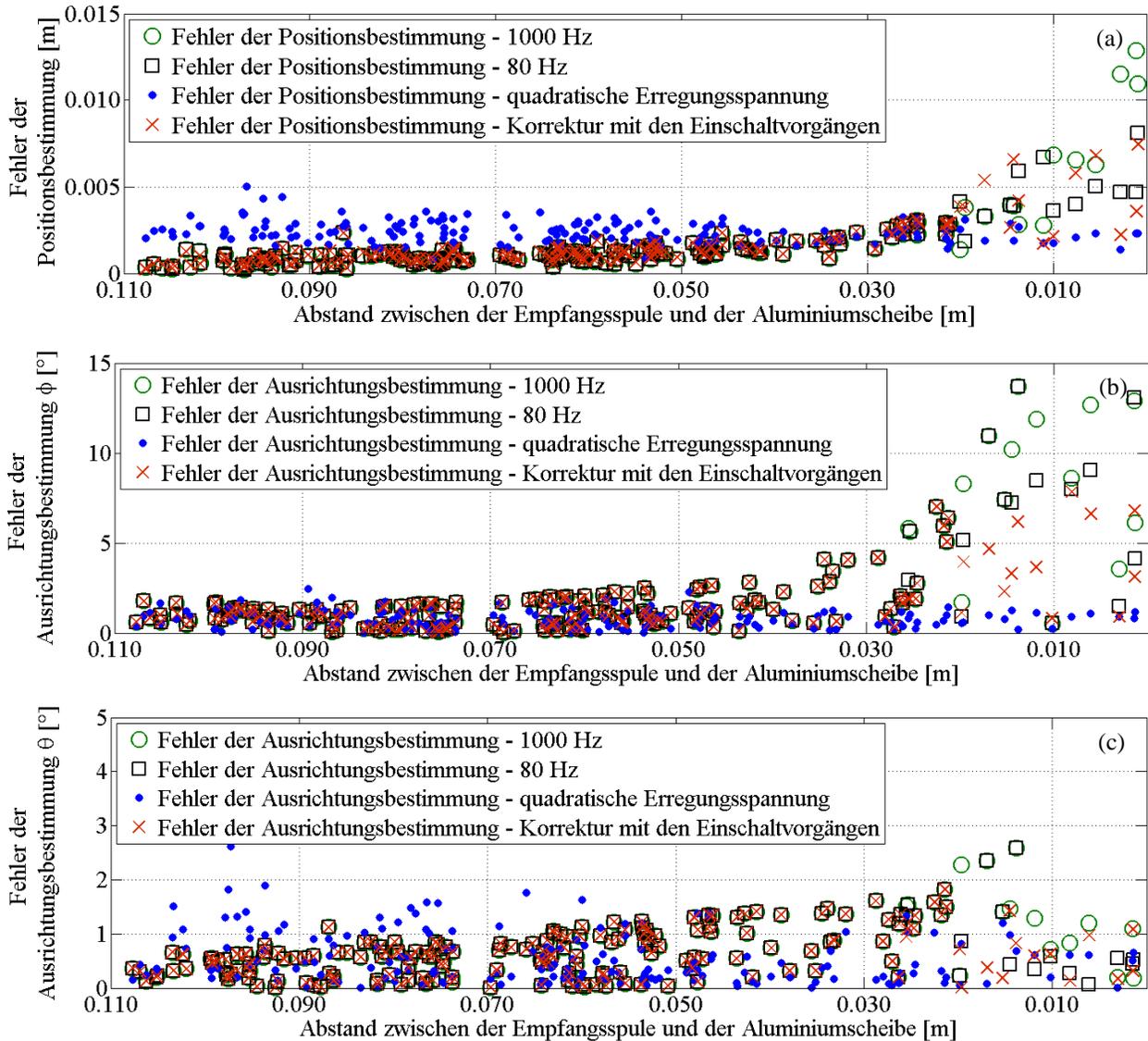


Abb. 7.26 Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Aluminiumscheibe als Funktion des Abstands zwischen der Aluminiumscheibe (Mitte des Koordinatensystems) und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel ϕ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ

Vergleich der Algorithmen

In der Tab. 10 und Tab. 11 werden die drei entwickelten Methoden zur Korrektur der Störung durch leitende Störkörper miteinander verglichen. In Tab. 10 sind die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe mit der systematischen Änderung der Lage des Störkörpers dargestellt. Tab. 11 und Tab. 12 geben die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe mit der zufälligen Änderung der Lage der Empfangsspule wieder.

| | ohne Korrektur | mit mehreren Frequenzen | mit Einschaltvorgängen | mit quadratischer Erregerspannung |
|---|----------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| mit Aluminiumscheibe | | | | |
| maximaler Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 12.3 | 4.6 | 2.7 | 0.5 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung φ [°] | 5.8 | 1.9 | 1.5 | 0.2 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung θ [°] | 1.4 | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| mit Messingscheibe | | | | |
| maximaler Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 10.3 | 4.3 | 2.7 | 1.3 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung φ [°] | 6.5 | 2.1 | 1.8 | 0.3 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung θ [°] | 5.9 | 2.3 | 2.8 | 0.7 |
| mit Aluminiumquader | | | | |
| maximaler Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 11.5 | 2.2 | 2.6 | 0.6 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung φ [°] | 12.4 | 2.7 | 1.5 | 0.2 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung θ [°] | 2.6 | 1 | 0.5 | 0.2 |

Tab. 10 Vergleich der entwickelten Methoden zur Korrektur der Fehler, die durch leitende Störkörper verursacht wurden (1. Versuchsreihe – systematische Änderung der Lage des Störkörpers).

| | ohne Korrektur | mit mehreren Frequenzen | mit Einschaltvorgängen | mit quadratischer Erregerspannung |
|---|----------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| ohne Störkörper | | | | |
| maximaler Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 4.1 |
| RMS-Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 1.8 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung φ [°] | 0.3 | 0.3 | 0.9 | 1.9 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung θ [°] | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 2.7 |
| RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung φ [°] | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.6 |
| RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung θ [°] | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.6 |

Tab. 11 Vergleich der entwickelten Methoden zur Korrektur der Fehler, die durch leitende Störkörper verursacht wurden (2. Versuchsreihe – zufällige Änderung der Lage der Empfangsspule ohne Störkörper).

| | ohne Korrektur | mit mehreren Frequenzen | mit Einschaltvorgängen | mit quadratischer Erregerspannung |
|---|----------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| mit Aluminiumscheibe | | | | |
| maximaler Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 12.0 | 8.1 | 7.5 | 4.9 |
| RMS-Fehler der Positionsbestimmung [mm] | 2.3 | 1.4 | 1.4 | 1.8 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung φ [°] | 14.2 | 14.2 | 7.3 | 2.8 |
| maximaler Fehler der Ausrichtungsbestimmung θ [°] | 2.6 | 2.6 | 1.9 | 2.7 |
| RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung φ [°] | 1.7 | 1.6 | 1.3 | 0.7 |
| RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung θ [°] | 0.7 | 0.7 | 0.6 | 0.6 |
| Korrelationskoeffizient des Fehlers der Positionsbestimmung mit dem Abstand zum Störkörper | -0.67 | -0.68 | -0.71 | 0.16 |
| Korrelationskoeffizient des Fehlers der Ausrichtungsbestimmung φ mit dem Abstand zum Störkörper | -0.67 | -0.64 | -0.57 | -0.1 |
| Korrelationskoeffizient des Fehlers der Ausrichtungsbestimmung θ mit dem Abstand zum Störkörper | -0.57 | -0.30 | -0.18 | 0.128 |
| Mess- und Berechnungszeit \pm die Standardabweichung ⁹ [s] | 13.5 \pm 0.1 | 303.4 \pm 7.1 | 69.7 \pm 8.8 | 69.3 \pm 4.2 |
| Ist die Ansteuerung von mehreren Sendespulen gleichzeitig möglich? | ja | ja | nein | nein |

Tab. 12 Vergleich der entwickelten Methoden zur Korrektur der Fehler, die durch leitende Störkörper verursacht wurden (2. Versuchsreihe – zufällige Änderung der Lage der Empfangsspule mit der Aluminiumscheibe).

Diskussion

Mit sinkendem Abstand zwischen der Empfangsspule und der Aluminiumscheibe steigt der Fehler der Positionsbestimmung. Dieser Fehler nimmt bei der Frequenz der Erregerspannung von 1000 Hz kontinuierlich von 0.6 mm bis zu 12.3 mm (Abstand zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule von 2 mm) zu (siehe Abb. 7.22a). Die Fehler der Ausrichtungsbestimmung erhöhen sich ebenfalls kontinuierlich und erreichen 5.8° (Winkel φ) und 1.4° (Winkel θ).

Der Fehler der Positionsbestimmung bei der Korrektur der Störungen mit mehreren Frequenzen der Erregerspannung steigt von 0.6 mm bei einem Abstand von 70 mm und erreicht 4.6 mm bei einem

⁹ Mittelwert aus den 100 Messungen \pm die Standardabweichung

Abstand von 2 mm. Im Verlauf des Fehlers der Positionsbestimmung kann ein kontinuierlicher Anstieg bis zum Abstand von 32 mm zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule beobachtet werden. Ab diesem Abstand wird die Aluminiumscheibe mit Hilfe des Algorithmus zur Detektion der Störungen auf Basis mehrerer Frequenzen in den Spannungen von mehr als vier Sendespulen detektiert (siehe Unterkapitel 4.1) und der Algorithmus zur Korrektur der Störungen verwendet. Nach dieser Senkung nimmt der Fehler der Positionsbestimmung zu, erreicht jedoch nicht das Niveau, das beim Tracking ohne Korrektur der leitenden Störungen gewonnen wird. Einen ähnlichen Verlauf zeigt der Fehler der Ausrichtungsbestimmung. Nach der anfänglichen Zunahme nimmt der Fehler ab dem Abstand von 32 mm ab und anschließend bei der direkten Nähe der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule wieder zu. Der kleinere Einfluss des elektrisch leitenden Störkörpers bei 80 Hz ist durch die Frequenzabhängigkeit der Wirbelströme verursacht, die in den Metallscheiben induziert wurden. Die Amplitude der induzierten Wirbelströme hängt von der Frequenz des Erregungsfeldes ab, was bei kleineren Frequenzen mit kleinerem Einfluss des Störkörpers resultiert.

Ein ähnlicher Verlauf des Fehlers der Positionsbestimmung kann mit der Korrektur der Störungen durch den leitenden Störkörper mit Hilfe der Einschaltvorgänge ermittelt werden (siehe Abb. 7.22a). Der Fehler der Positionsbestimmung nimmt kontinuierlich von 0.6 mm bis 2.6 mm zu, während sich der Abstand zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule von 70 mm bis 28 mm verringert. Ab dem Abstand von 24 mm wird die Aluminiumscheibe detektiert und ihr Einfluss korrigiert. Der Fehler der Positionsbestimmung nimmt ab diesem Abstand erst ab und anschließend mit der Näherung der Aluminiumscheibe an die Empfangsspule moderat zu. Der Fehler der Positionsbestimmung bei Korrektur der Spannung auf der Empfangsspule mit Hilfe der Einschaltvorgänge erreicht 2.7 mm bei einem Abstand von 2 mm. Der Fehler der Ausrichtungsbestimmung nimmt bis zum Abstand von 28 mm zu. Ab hier sinkt der Fehler und steigt erst wieder bei direkter Nähe der Aluminiumscheibe an der Empfangsspule.

Der Fehler der Positionsbestimmung bei quadratischer Erregerspannung ändert sich zwischen 0.1 mm und 0.5 mm (siehe Abb. 7.22). Es konnte kein Zusammenhang zwischen der Änderung des Fehlers sowie dem Abstand zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule festgestellt werden. Der Fehler der Positionsbestimmung beim Abstand von 2 mm beträgt 0.2 mm. Der Fehler der Ausrichtungsbestimmung bei quadratischer Erregerspannung für den Winkel φ ändert sich zwischen 0.0° und 0.2° (für den Winkel θ zwischen 0.0° und 0.3°). Dieser Fehler beträgt beim Abstand zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule 2 mm für den Winkel φ 0.0° (0.1° für den Winkel θ).

Die Versuche mit der Messingscheibe sowie mit dem Aluminiumquader weisen eine ähnliche Tendenz wie der Versuch mit der Aluminiumscheibe auf. Der Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit der Erregerfrequenz von 1000 Hz nimmt systematisch zu. Die Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit der Korrektur auf Basis mehrerer Frequenzen der Erregerspannung und auf Basis der Analyse der Einschaltvorgänge nehmen systematisch bis zu einer Messung zu, bei der die Störungen detektiert werden. Ab diesem Messpunkt wird der Algorithmus zur Korrektur verwendet und die Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung nehmen im ersten Schritt ab und bei der Platzierung der Metallscheibe in der direkten Nähe der Empfangsspule wieder zu. Die Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Messingscheibe sowie mit dem Aluminiumquader schwanken bei einer quadratischen Erregung um Null und weisen keine eindeutige Tendenz auf.

Die Ergebnisse der Positions- und Ausrichtungsbestimmung des zweiten Experimentes werden in den Abb. 7.25, Abb. 7.26 und in der Tab. 11 dargestellt. Diese Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus dem

ersten Experiment, dass durch die Korrektur mit Hilfe der Einschaltvorgänge und Erregung mit mehreren Frequenzen die Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung des elektromagnetischen Trackingsystems wesentlich reduziert werden. Es konnte kein Zusammenhang zwischen dem Abstand der Empfangsspule zum Störkörper und dem Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung bei einer quadratischen Erregung festgestellt werden (siehe Abb. 7.26b). In den durchgeführten Versuchen sinkt der Fehler der Positionsbestimmung leicht mit dem sinkenden Abstand zum Störkörper (Korrelationskoeffizient gleich 0.16), was auf einen zufälligen Charakter dieser Änderung hinweist. Der absolute Betrag des Fehlers ist jedoch wesentlich höher als bei einer sinusförmigen Erregung. Dies kann durch niedrigere Genauigkeit der Spannungsmessung erklärt werden. Die Bestimmung des Anstiegs des Signals an der Empfangsspule benötigt eine Subtraktion der Einschaltvorgänge, was bei stark verrauschten Spannungsmessungen eine zusätzliche Fehlerquelle bildet.

8 Klinische Evaluierung des elektromagnetischen Ortungssystems

In diesem Kapitel wird ein Machbarkeitsnachweis der Anwendung des entwickelten Trackingsystems für die elektromagnetische Ortung eines flexiblen Mikrokatheters und eines flexiblen Führungsdrahtes präsentiert. Für die Anwendung des entwickelten elektromagnetischen Trackingsystems in den endovaskulären Eingriffen musste das entwickelte elektromagnetische Ortungssystem (siehe Kapitel 2 und 6) um folgende Elemente ergänzt werden:

- radiologische Instrumente (Führungsdraht und Mikrokatheter) mit integrierten Empfangsspulen des elektromagnetischen Trackingsystems
- Möglichkeit der Registrierung des Koordinatensystems der angiografischen Aufnahmen mit dem Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems
- Möglichkeit der Visualisierung des Katheters und des Gefäßsystems des Patienten

Das elektromagnetische Trackingsystem wird in dieser Machbarkeitsstudie für die Ortung radiologischer Instrumente mit einem Außendurchmesser von weniger als 1 mm verwendet. Die auf dem Markt zur Verfügung stehenden Ortungssysteme ermöglichen zwar die Navigation flexibler endovaskulärer Katheter, aber die Systeme werden für das Tracking von Ablationskathetern mit einem Durchmesser von 3.5 mm verwendet [63].

8.1 Integration eines Sensors in die radiologischen Instrumente

In diesem Unterkapitel werden ein flexibler Mikrokatheter und ein flexibler Führungsdraht mit einer integrierten Empfangsspule beschrieben. Für die Integration in die radiologischen Instrumente wird eine Empfangsspule der Firma NDI mit einem Außendurchmesser von 0.3 mm und der Länge von 11 mm verwendet [45]. Diese Empfangsspule wurde im Unterkapitel 6.1 beschrieben. Die Integration der Empfangsspule in die radiologischen Instrumente war für die Evaluierung des entwickelten Demonstrators für die Ortung der kleinen vaskulären Instrumente notwendig.

Mikrokatheter

Die Empfangsspule muss mit Hilfe zweier Anschlussdrähte an den Verstärker des Ortungssystems angeschlossen werden. Für eine elektromagnetisch navigierte Intervention mit einem flexiblen Katheter wird neben der Empfangsspule auch ein Führungsdraht benötigt. Deswegen wurde für die Integration mit der Empfangsspule ein zweilumiger Twin-Pass[®] Dual Access Katheter der Firma Vascular Solution Inc. ausgewählt. Dieser Katheter weist einen Außendurchmesser von 3 F (1 mm) auf [169].

Die Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems wurde in einem Lumen des Katheters platziert. Das zweite Lumen wird für den Führungsdraht bereitgestellt. Eine Fotografie und eine Röntgenaufnahme dieses Katheters mit einer integrierten Empfangsspule finden sich in der nachfolgenden Abbildung.

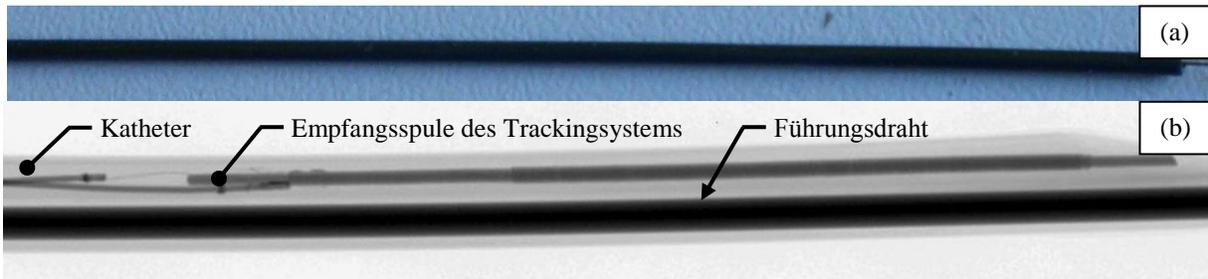


Abb. 8.1 Fotografie (a) und Röntgenaufnahme (b) eines Twin-Pass Katheters mit einer integrierten Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems

Führungsdraht

Als zweites radiologisches Instrument wurde ein elektromagnetisch navigierbarer Führungsdraht entwickelt. Für die Integration mit der Empfangsspule wurde ein Führungsdraht NiT-Vu der Firma AngioDynamics mit einem Außendurchmesser von 0.36 mm ausgewählt [170]. Führungsdraht und Empfangsspule wurden (Außerdurchmesser von 0.3 mm) mit Hilfe eines dünnwandigen Schrumpfschlauchs verbunden [55]. Dieser Schrumpfschlauch der Firma Vention Medical wird für die Verbindung der drahtgebundenen elektrischen Komponenten und Geräte mit den medizinischen Endoskopen und Kathetern angeboten [171]. Die Beschichtung des Führungsdrahtes mit diesem Schrumpfschlauch ermöglicht neben der mechanischen Verbindung auch eine zusätzliche elektrische Isolation der Anschlussdrähte der Empfangsspule an. Die Fotografie und die Röntgenaufnahme des elektromagnetisch navigierbaren Führungsdrahtes werden in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

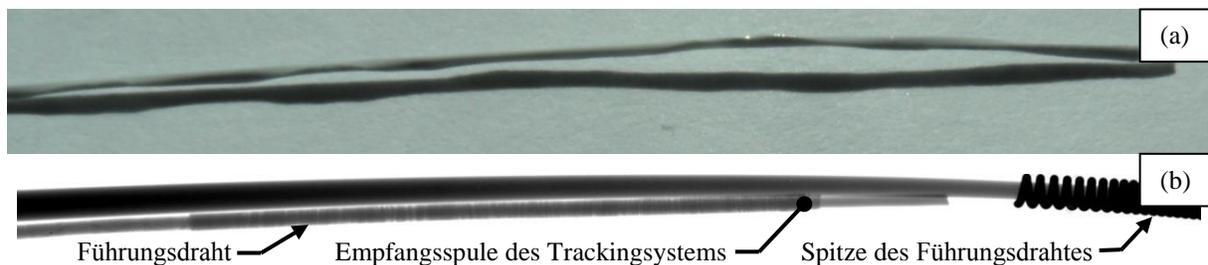


Abb. 8.2 Fotografie (a) und Röntgenaufnahme (b) des Führungsdrahtes NiT-Vu mit einer integrierten Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems

8.2 Evaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems mit einem Phantomversuch

Registrierung der Koordinatensysteme

Für die Visualisierung der Lage und Ausrichtung des radiologischen Instruments in dem Koordinatensystem der medizinischen Aufnahmen müssen die Koordinatensysteme der Aufnahmen und des elektromagnetischen Trackingsystems registriert werden. In dieser Arbeit erfolgt die Registrierung der beiden Koordinatensysteme mit Hilfe einer Registrierungsplatte des Systems für die minimalinvasiven Eingriffe CAPPÄ der Firma CAS Innovation [8]. Diese Registrierungsplatte beinhaltet fünf räumlich verteilte Röntgenmarker und zwei senkrecht zueinander liegende Empfangsspulen. Eine Röntgenaufnahme der Registrierungsplatte wurde in der Publikation vom Autor präsentiert [172]. Die Ausrichtungsbestimmung mit der zweiten Spule ermöglicht die Bestimmung der Rotation der ersten Spule um die eigene Symmetrieachse. Der Rollwinkel der ersten Spule entspricht der Ausrichtung der Symmetrieachse der zweiten Spule. Auf Basis der bekannten Lagen der Röntgenmarker relativ zur Empfangsspule wird die Lage der Röntgenmarker im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems berechnet. Parallel dazu werden die Röntgenmarker auf den medizinischen Aufnahmen in 3D-Slicer manuell identifiziert und deren Lage im Koordinatensystem der Aufnahmen bestimmt. Die Koordinaten der Röntgenmarker im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems und im Koordinatensystem der medizinischen Aufnahmen werden anschließend registriert. Die Registrierung der beiden Koordinatensysteme erfolgt als eine rigide Registrierung [173] mit Hilfe des Software-Paketes 3D-Slicer [174]. Das Ergebnis der Registrierung stellt eine Transformationsmatrix dar. Die Multiplikation dieser Transformationsmatrix mit der Lage und Ausrichtung der radiologischen Instrumente in dem Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems ergibt die Lage und die Ausrichtung der radiologischen Instrumente im Koordinatensystem der medizinischen Aufnahmen.

Visualisierung des radiologischen Instruments mit Hilfe von 3D Slicer

Während eines minimalinvasiven Eingriffes muss der Radiologe die Lage und die Ausrichtung der radiologischen Instrumente relativ zur Patientenanatomie kennen. Deswegen müssen die Instrumente zusammen mit dem Gefäßsystem des Patienten visualisiert werden. Bei den konventionellen Eingriffen unter der DSA-Kontrolle werden das Gefäßsystem und indirekt auch die Spitze des Katheters mit zweidimensionalen angiografischen Aufnahmen visualisiert. In dem vorgeschlagenen System werden, sowohl das Gefäßsystem, als auch das radiologische Instrument als dreidimensionale Objekte visualisiert. Zur Visualisierung wird die Software 3D Slicer verwendet. Mit Hilfe dieser Software wird ein vor der Intervention aufgenommener CT-Datensatz des Gefäßsystems des Patienten in ein Oberflächenmodell umgewandelt. 3D Slicer ermöglicht die Visualisierung eines radiologischen Instruments, welches als Oberflächenmodell visualisiert wird. Die Lage und die Ausrichtung der Empfangsspule werden mit Hilfe einer Matlab – 3D Slicer Schnittstelle zu 3D Slicer geschickt. Die Matlab-basierte Software zur Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem berechnet die Lage und die

Ausrichtung des radiologischen Instruments. Diese Position und Ausrichtung im Koordinatensystem des elektromagnetischen Trackingsystems wird anschließend in das Koordinatensystem der CT-Aufnahmen umgerechnet und diese Koordinaten der Instrumente werden relativ zur Patientenanatomie mit einer Messrate von drei Positionsbestimmungen pro Sekunde visualisiert.

In der Abb. 8.3 ist die Darstellung der Software 3D Slicer während der Ortung abgebildet. Die Lage der Spitze des radiologischen Instruments (die Position der Mitte der Empfangsspule) wurde als eine gelbe Kugel dargestellt. Der Radius dieser Kugel (2.5 mm) entspricht dem RMS-Fehler der Positionsbestimmung des elektromagnetischen Trackingsystems. Die zusätzliche blaue Linie zeigt die Ausrichtung des Instruments (bzw. Empfangsspule).

Evaluation der Katheternavigation mit dem entwickelten Demonstrator

Das entwickelte Ortungssystem für die computerassistierten Eingriffe mit einem flexiblen Katheter wurde mit einem Phantomexperiment evaluiert. Das Ziel des Versuchs lag in der Erbringung eines Nachweises, dass die Genauigkeit und die zur Verfügung stehenden Modalitäten des elektromagnetischen Ortungssystems die Navigation eines radiologischen Instrumentes im Gefäßsystem des Patienten ermöglichen. Für das Experiment wurde das Aneurysmen-Phantom der inneren Halsschlagader der Firma Elastrat Sàrl verwendet [175]. Im ersten Schritt wurde die Registrierungsplatte der Firma CAS Innovation auf der Oberfläche des Phantoms befestigt und eine CT-Aufnahme mit dem C-Arm Siemens Artis zeego aufgenommen. Anschließend wurde das Phantom auf der Oberfläche des Feldgenerators des entwickelten elektromagnetischen Trackingsystems platziert. Nachdem die CT-Aufnahmen in die Software 3D-Slicer importiert worden sind, erfolgte die Registrierung des Koordinatensystems des elektromagnetischen Tracking- und Koordinatensystems der CT-Aufnahmen. Die in das Koordinatensystem der CT-Aufnahmen transformierten Lagen und Ausrichtungen des chirurgischen Instruments werden nach dem Aufbau der Verbindung zwischen Matlab und 3D-Slicer auf der grafischen Oberfläche des Programms 3D-Slicer präsentiert (siehe Abb. 8.3). Der elektromagnetisch navigierbare Führungsdraht wurde in diesem Experiment entlang dem Gefäßsystem des Aneurysmen-Phantoms in die Halsschlagader eingeführt und zurückgezogen (siehe Abb. 8.4). Der Versuch wurde mit Hilfe einer einzelnen CT-Aufnahme durchgeführt, die vor Beginn des Versuches aufgenommen wurde¹⁰.

¹⁰ Eine Videoaufnahme des Versuchs findet sich unter dem Link [youtube.com/watch?v=koF6Ac9JoVs](https://www.youtube.com/watch?v=koF6Ac9JoVs) (geprüft am 14.05.2015).

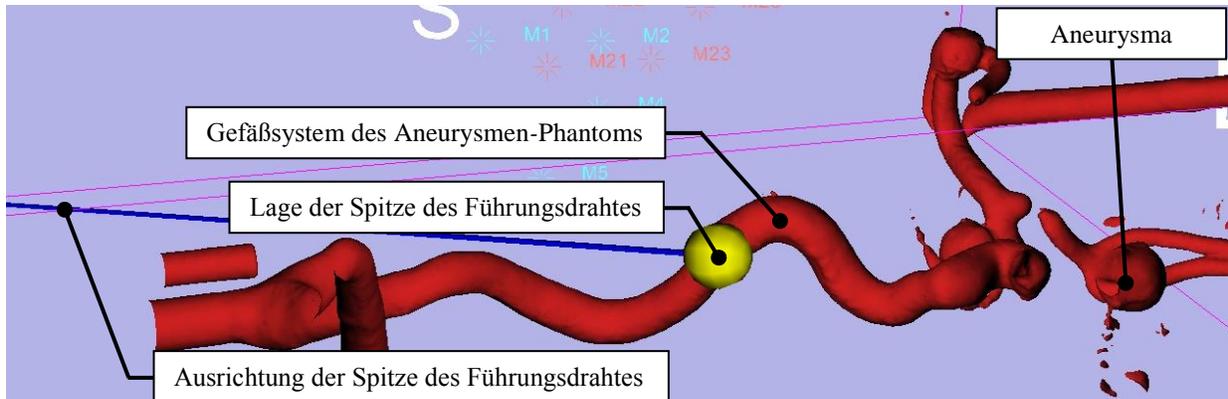


Abb. 8.3 Darstellung des 3D-Slicer Programms während der Ortung des elektromagnetisch navigierbaren Führungsdrahtes im Aneurysmen-Phantom

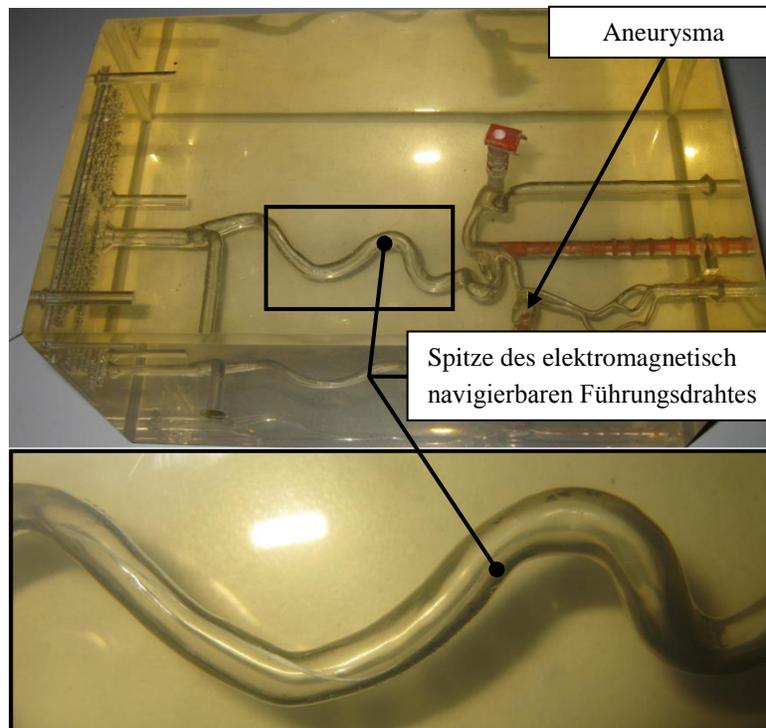


Abb. 8.4 Fotografie des elektromagnetisch navigierbaren Führungsdrahtes zur Evaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe eines Phantomversuchs

Einsatz der Methoden zur Detektion und Korrektur der Störungen in klinischen Bedingungen

Die in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Methoden zur Detektion und Korrektur der Störungen durch elektrisch leitenden Störkörper wurden im Rahmen eines Phantomversuchs eingesetzt. Der Versuch ergänzt die quantitative Evaluierung der Methoden in den Unterkapiteln 7.3 und 7.4. Eine Messingscheibe mit einem Durchmesser von 0.1 m und einer Höhe von 0.03 m wurde als Störkörper in der direkten Nähe des Phantoms platziert. Es wurde eine Positions- und Ausrichtungsbestimmung durchgeführt und die

Ergebnisse wurden mit 3D Slicer visualisiert. Der Versuchsaufbau wird in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.

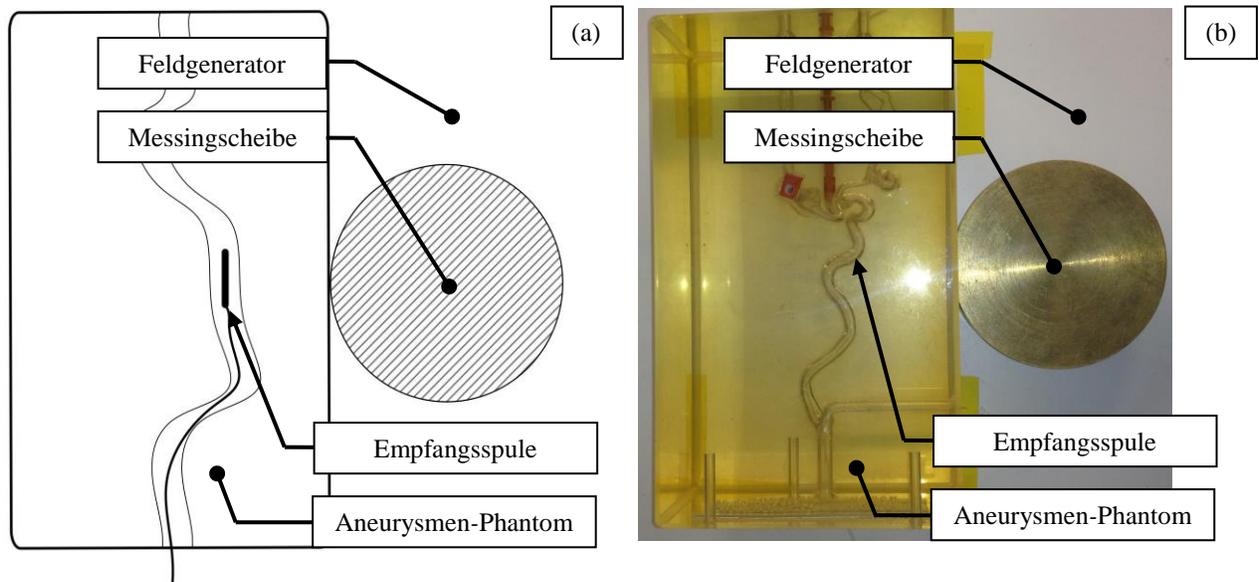


Abb. 8.5 Skizze (a) und Foto (b) des Versuchsaufbaus zur Evaluierung der Algorithmen zur Detektion und Kompensation der Störungen mit einem elektromagnetisch navigierbaren Führungsdraht

Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in der Abb. 8.6 zu sehen.

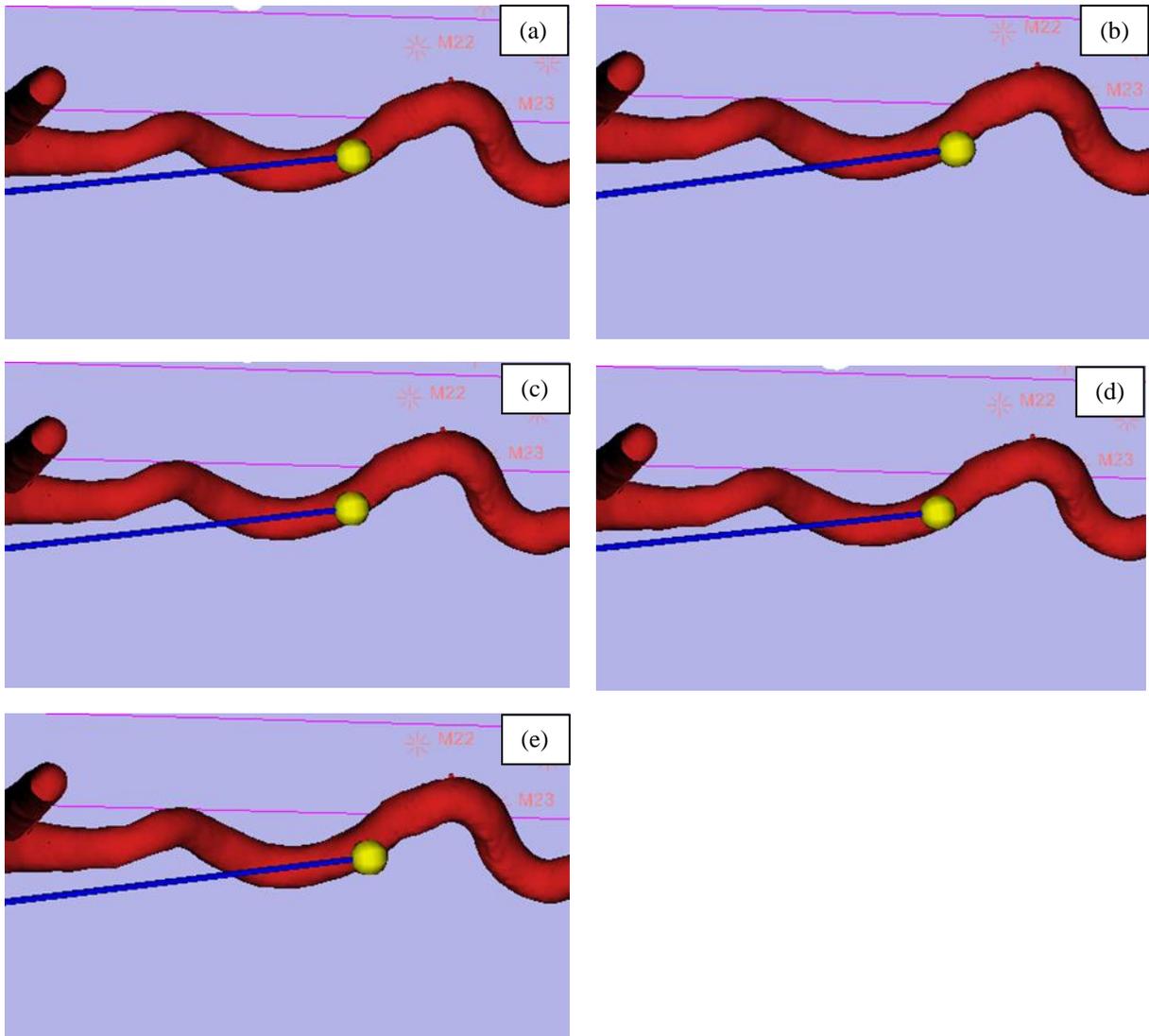


Abb. 8.6 Einfluss einer Messingscheibe als Beispiel für eine Störung auf die Genauigkeit der Positions- und Ausrichtungsbestimmung eines elektromagnetisch navigierbaren Führungsdrahtes im Rahmen eines Phantomversuchs, a) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes ohne Störkörper, b) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes bei Präsenz der Messingscheibe – ohne Korrektur, c) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes bei Präsenz der Messingscheibe – Korrektur mit mehreren Frequenzen, d) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes bei Präsenz der Messingscheibe – Korrektur mit quadratischen Erregungsspannung, e) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes bei Präsenz der Messingscheibe – Korrektur mit Einschaltvorgängen

Das Trackingsystem wurde mit Hilfe der Methode mit mehreren Frequenzen als gestört erkannt. Die Methode mit Hilfe der Einschaltvorgänge hat keine Störungen detektiert.

Katheternavigation mit dem entwickelten Demonstrator – Diskussion

Der durchgeführte Phantomversuch hat die Möglichkeit eines computerassistierten vaskulären Eingriffs mit dem entwickelten elektromagnetischen Trackingsystems für die Ortung der minimalinvasiven radiologischen Instrumente gezeigt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Instrumente mit den integrierten Empfangsspulen sollten als Demonstratoren für die Vorentwicklung betrachtet werden. Die Fragestellungen der Biokompatibilität, der Sterilisierbarkeit und der Zuverlässigkeit der entwickelten Instrumente sind kein Bestandteil der durchgeführten Studien.

Die steife solenoidförmige Empfangsspule könnte wegen der Länge von 11 mm den Zugang zu den kleinsten Gefäßen im Gehirn erschweren, weil der Führungsdraht (bzw. der Katheter) seinen kleinen Biegeradius an der Spitze einbüßt. Die Möglichkeit der Durchführung eines neurovaskulären Eingriffes mit der verwendeten Empfangsspule sollte in weiteren Studien mit einem realitätsnäheren Phantom evaluiert werden, der die Evaluierung des Setups bei einer radiologischen Intervention ermöglicht. Die quantitative Evaluierung der Reduktion der Strahlungs- und Kontrastmittelexposition durch den Einsatz eines elektromagnetischen Trackingsystems würde einer genauen Workflow-Analyse bedürfen.

Die Ergebnisse der Evaluierung der entwickelten Methoden zur Detektion und zur Kompensation der Störungen im Phantomversuch haben die quantitative Evaluierung in den Unterkapiteln 7.3 und 7.4 bestätigt. Die Detektion mit Hilfe mehrerer Frequenzen ist zuverlässiger als die Detektion mit Hilfe der Einschaltvorgänge. Die Kompensation mit Hilfe der quadratischen Erregungsspannung führt zur besseren Kompensation als die Methode mit Hilfe mehrerer Frequenzen sowie die Methode mit Hilfe der Einschaltvorgänge.

9 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Es wurde ein Demonstrator für das elektromagnetische Trackingsystem für die minimalinvasiven endovaskulären Eingriffe entwickelt. Der RMS-Fehler der Positionsbestimmung beträgt 2.5 mm im quaderförmigen Arbeitsvolumen mit den Abmessungen von 0.338 m x 0.420 m x 0.138 m. Dabei beträgt der RMS-Fehler der Ausrichtungsbestimmung in diesem Messvolumen 0.6° für den Winkel φ und 0.7° für den Winkel θ . Mit Hilfe des optischen Trackingsystems Polaris Spectra wurden die RMS-Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung berechnet. Der Verlauf der Genauigkeitsevaluierung wurde mit einem Robotersystem automatisiert.

Ein Phantomexperiment wurde durchgeführt, um den Demonstrator für die endovaskulären Eingriffe zu untersuchen. In diesem Experiment wurde der entwickelte elektromagnetisch navigierbare Führungsdraht in die Halsschlagader eines Aneurysmenphantoms mit einer einzelnen ionisierenden Aufnahme am Anfang des Eingriffes eingeführt. Anschließend wurde die Lage und die Ausrichtung des Führungsdrahtes mit Hilfe einer Matlab-basierten Schnittstelle auf der grafischen Oberfläche des Programms 3D Slicer visualisiert und mit den CT-Aufnahmen überlagert (siehe Unterkapitel 8.2).

Die hohen Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung des entwickelten Ortungssystems bewirkten die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems. Der entwickelte Ansatz wurde quantitativ evaluiert (siehe Unterkapitel 7.1).

Die Modellierung des Trackingsystems und des Störkörpers mit einer Übertragungsfunktion und die damit verbundene vereinfachte Darstellung des Einflusses eines Störkörpers auf das elektromagnetische Trackingsystem ermöglichten ein besseres und vollständigeres Verständnis der Problematik der Störung durch leitende Störkörper. Diese Vorgehensweise führte zur Entwicklung der Methoden zur Detektion und Kompensation der Störungen bei Präsenz eines leitenden Störkörpers. Die leitenden Störkörper addierten zur Spannung an der Empfangsspule eine zusätzliche Spannung, welche den Verlauf der Spannung an der Sendespule nach deren Filterung mit einem Hochpassfilter zweiter Ordnung zeigt. Die Abbildung der Eigenschaften der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule und des elektrisch leitenden Störkörpers als lineare zeitinvariante Systeme wurden anhand der Analyse der Sprung- und Frequenzantwort evaluiert (siehe Kapitel 2.3).

In Kapitel 4 wurden dann zwei Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers vorgeschlagen und evaluiert. In der ersten beschriebenen Methode wurde ein Klassifikator basierend auf der unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit des leitenden Störkörpers verwendet (siehe Unterkapitel 4.1). In der zweiten Methode kam ein Klassifikator zum Einsatz, welcher auf Basis des Unterschiedes im Verlauf der Sprungantwort zwischen dem gestörten und dem ungestörten Signal an der Empfangsspule arbeitet (siehe Unterkapitel 4.2). Die Vor- und Nachteile dieser Methoden sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

| Vorteile der Detektion mit Frequenzabhängigkeit | Nachteile der Detektion mit Frequenzabhängigkeit |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Zuverlässigkeit: Die Detektion des leitenden Störkörpers mit mehreren Frequenzen ermöglicht die Erkennung des Störkörpers bei größeren Abständen und bei einem kleineren Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung als die Detektion des Störkörpers mit Hilfe der Einschaltvorgänge (siehe Tab. 6). • Parallelisierbarkeit: Es können gleichzeitig mehrere Sendespulen mit unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung eingespeist werden. • Hohe Messrate möglich: Eine sehr hohe Messrate von über 25 Messungen pro Sekunde wäre dank der Ausfilterung der emittierten Frequenzen denkbar. | <ul style="list-style-type: none"> • Kleiner Messbereich bei der Parallelisierung: Die gleichzeitige Einspeisung mehrerer Sendespulen mit unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung führt zur Reduktion der Spannungsamplitude und konsequent zur Begrenzung des Messvolumens. |

Tab. 13 Bewertung der Methode zur Detektion des Störkörpers mit mehreren Frequenzen

| Vorteile der Detektion mit den Einschaltvorgängen | Nachteile der Detektion mit den Einschaltvorgängen |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Einfachheit: einfache Anwendung beim AC-Trackingsystem | <ul style="list-style-type: none"> • Zuverlässigkeit: Die Detektion des leitenden Störkörpers mit Hilfe der Einschaltvorgänge ermöglicht die Erkennung des Störkörpers nur für kleinere Abstände bei gleichzeitig größeren Fehlern als bei der Detektion des Störkörpers mit Hilfe der Frequenzabhängigkeit (siehe Tab. 6). • Niedrige Messrate: Die Detektion des leitenden Störkörpers benötigt die Aufnahme der ganzen Antwort des Störkörpers, was die erwartete Detektionszeit wiederum erhöht. • Keine Parallelisierbarkeit: Die Sendespulen müssen nacheinander mit dem Strom eingespeist werden. |

Tab. 14 Bewertung der Methode zur Detektion des Störkörpers mit Hilfe der Einschaltvorgänge

Der Unterschied in der Übertragungsfunktion zwischen dem gestörten und dem ungestörten elektromagnetischen Trackingsystem ermöglicht auch die Kompensation der Störungen durch einen elektrisch leitenden Störkörper. In dieser Arbeit wurden drei unterschiedliche Methoden vorgeschlagen.

Die erste Vorgehensweise basiert auf der unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit des leitenden Störkörpers und des ungestörten elektromagnetischen Trackingsystems (siehe Unterkapitel 5.1). Tab. 15 illustriert die Vor- und Nachteile dieser Vorgehensweise.

| Vorteile der Korrektur mit mehreren Frequenzen | Nachteile der Korrektur mit mehreren Frequenzen |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Parallelisierbarkeit: Es können gleichzeitig mehrere Sendespulen mit unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung eingespeist werden. Dies kann zur weiteren zeitlichen Optimierung des Algorithmus führen. Eine sehr hohe Messrate von über 25 Messungen pro Sekunde wäre dank der Ausfilterung der emittierten Frequenzen möglich. | <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Fehler: Die Korrektur mit mehreren Frequenzen hat trotz einer Verbesserung im Vergleich mit dem Szenario ohne Korrektur zu einem wesentlichen Fehler der Positionsbestimmung geführt (siehe Tab. 10). • Kleiner Messbereich: Die Einspeisung mehrerer Sendespulen gleichzeitig mit unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung führt zur Reduktion der Amplitude der Spannung und zur Begrenzung des Messvolumens. |

Tab. 15 Bewertung der Methode zur Korrektur der Störungen mit Hilfe mehrerer Frequenzen

Die zweite Methode basiert auf der mathematischen Beschreibung der Sprungantwort des Trackingsystems, welche Informationen über den leitenden Störkörper beinhaltet. Die Eigenschaften dieser Methode sind in der Tab. 16 zusammengefasst.

| Vorteile der Korrektur mit Hilfe der Einschaltvorgänge | Nachteile der Korrektur mit Hilfe der Einschaltvorgänge |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Vergleichbar kleine Fehler: Die Korrektur des leitenden Störkörpers mit Hilfe der Einschaltvorgänge hat zu wesentlich kleineren Fehlern der Positions- und Ausrichtungsbestimmung als bei der Korrektur mit Hilfe mehrerer Frequenzen geführt (siehe Tab. 10). | <ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Messrate: Diese Methode der Korrektur des leitenden Störkörpers benötigt die Aufnahme der ganzen Antwort des Störkörpers, was die erwartete Detektionszeit erhöht. • Keine Parallelisierbarkeit: Die Sendespulen müssen nacheinander mit dem Strom eingespeist werden. |

Tab. 16 Bewertung der Methode zur Korrektur der Störungen mit Hilfe der Einschaltvorgänge

Die dritte Vorgehensweise basiert auch auf dem Unterschied in der Übertragungsfunktion zwischen dem gestörten und dem ungestörten elektromagnetischen Trackingsystem. Bei der Erregung der Sendespule mit einer quadratischen Erregerspannung zeigt das Signal des Störkörpers einen rechteckigen Verlauf. Im Vergleich dazu weist das Signal, das direkt von der Sendespule an der Empfangsspule induziert worden ist, die Form eines Dreiecks auf. Dieser dreieckige Verlauf der Spannung an der Empfangsspule wurde charakterisiert und zur Positionsbestimmung verwendet. In Tab. 17 sind die Vor- und Nachteile dieser Methode wurden aufgelistet.

| Vorteile der Positionsbestimmung mit quadratischer Erregerspannung | Nachteile der Positionsbestimmung mit quadratischer Erregerspannung |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Kein messbarer Einfluss des Störkörpers auf die Genauigkeit: Die Korrektur des leitenden Störkörpers mit Hilfe der quadratischen Erregerspannung führt zu einer starken Reduktion des Einflusses des leitenden Störkörpers auf die Genauigkeit des Ortungssystems (siehe Tab. 10). Es konnte kein Einfluss des Störkörpers festgestellt werden. | <ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit: höherer Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung als mit einer sinusförmigen Erregung. • Niedrige Messrate: Diese Methode der Korrektur des leitenden Störkörpers benötigt die Aufnahme der ganzen Antwort des Störkörpers auf eine quadratische und eine rechteckige Erregung, was die erwartete Detektionszeit erhöht. • Keine Parallelisierbarkeit: Die Sendespulen müssen nacheinander mit dem Strom eingespeist werden. |

Tab. 17 Bewertung der Methode zur Korrektur der Störungen mit Hilfe der quadratischen Erregerspannung

9.2 Schlussfolgerungen

Das in Kapitel 2.3 vorgeschlagene Modell des leitenden Störkörpers ermöglicht trotz der Einfachheit eine gute Abbildung sowohl der Sprungantwort als auch der Frequenzantwort des leitenden Störkörpers in dem verwendeten Frequenzbereich. Da das Modell kein Skin-Effekt berücksichtigt, ist eine höhere Abweichung der Antwort des Störkörpers im Vergleich zu dem Modell bei höheren Frequenzen zu erwarten.

Die in Kapitel 4 beschriebenen Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers benötigen im Gegensatz zu den kommerziellen elektromagnetischen Trackingsystemen nur eine einzige Empfangsspule. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil im Vergleich zu den kommerziell verfügbaren elektromagnetischen Trackingsystemen dar, da der Sensor des elektromagnetischen Trackingsystems in Form einer einzelnen Empfangsspule einen wesentlich kleineren Durchmesser aufweisen kann. Der kleinere Durchmesser der Empfangsspule ermöglicht deren Integration in die kleinen radiologischen Instrumente. Darüber hinaus stellen die Empfangsspulen einen erheblichen Kostenfaktor in der Herstellung navigierbarer Instrumente für die computerassistierte Chirurgie dar. Die Detektion des Störkörpers anhand einer statt zwei Spulen würde zu einer Reduktion der Kosten führen, was auch zu einer Erhöhung der klinischen Akzeptanz der elektromagnetisch navigierbaren Eingriffe führen könnte.

Die beiden entwickelten Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers wurden mit Hilfe mehrerer Experimente evaluiert und miteinander verglichen. Die Methode auf Basis mehrerer Frequenzen der Erregerspannung zeigt eine höhere Zuverlässigkeit als die Methode auf Basis der Analyse der Sprungantwort, und zwar sowohl wegen der Erkennung des Fehlers bei einem größeren Abstand zum Störkörper, als auch wegen des nicht aufgetretenen Fehlers der 1. Art (siehe Tab. 6). Aufgrund der potenziell kürzeren Berechnungszeit kann diese Methode auch bevorzugt werden. Im Gegensatz dazu benötigt ein zuverlässiger Einsatz der Methode auf Basis der Analyse der Einschaltvorgänge die Aufnahme der vollständigen Antwort des Störkörpers, was wiederum die Dauer der Detektion erhöhen und dadurch auch die Anwendung dieser Methode in der klinischen Praxis erschweren würde. Die

ferromagnetischen Störkörper können ebenfalls mit beiden Methoden detektiert werden, soweit diese elektrisch leitend sind. Dies konnte in dem Versuch mit einer Eisenscheibe nachgewiesen werden.

Das Trackingsystem Aurora wurde wie das entwickelte Ortungssystem mit identischem Versuchsaufbau und identischen Störkörpern evaluiert. Die Ergebnisse dieses Versuchs bestätigen, dass das Trackingsystem Aurora trotz hoher Fehler bei der Positionsbestimmung mit einer einzelnen Empfangsspule die Messungen fortsetzt und dem Anwender so keinen Hinweis auf die möglichen Störungen liefert (siehe Unterkapitel 7.2).

Die Genauigkeit der kommerziell verfügbaren elektromagnetischen Trackingsysteme, wie z. B. Aurora (NDI), wird stark durch die elektrisch leitenden Störkörper beeinflusst. Die drei in Kapitel 5 vorgeschlagenen Methoden zur Korrektur der Störung bieten drei unterschiedliche Strategien zur Lösung dieses Problems. Die Erregung der Sendespule mit mehreren Frequenzen ermöglicht eine sehr schnelle Korrektur sowie die Anwendung dieser Vorgehensweise bei den Applikationen, bei denen eine sehr hohe Messrate notwendig wird. Allerdings weist diese Methode von allen drei vorgeschlagenen Methoden den höchsten Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung bei Präsenz des leitenden Störkörpers auf. Die zweite Variante, die auf der Analyse der Sprungantwort des gestörten elektromagnetischen Trackingsystems basiert, verursacht einen kleineren Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung als die Korrektur mit mehreren Frequenzen. Gleichzeitig benötigt sie mehr Zeit für die Spannungsmessung. Daher kann diese Vorgehensweise nur in den Applikationen angewendet werden, wo eine Positionsbestimmung mit einer hohen Messrate nicht notwendig ist. Die Erregung der Sendespule mit einer quadratischen Erregerspannung führt zu einem vernachlässigbaren Einfluss des leitenden Störkörpers auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems. Der wichtigste Nachteil dieser Vorgehensweise liegt in der Notwendigkeit der Aufnahme der gesamten Antwort des Störkörpers, was zur wesentlichen Reduktion der Messrate mit dem elektromagnetischen Trackingsystem führt. Die Aufnahme der Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems auf eine quadratische Erregung zieht einen wesentlich höheren Fehler der Spannungsmessung nach sich als bei einer sinusförmigen Erregung, was den Messbereich des elektromagnetischen Trackingsystems beeinträchtigt. Diese Methode kann als eine Alternative für die DC-Trackingsysteme betrachtet werden, weil der Einfluss des hoch leitenden Störkörpers weitgehend auf Kosten einer niedrigeren Messrate reduziert werden kann. Im Vergleich zu dem DC-Trackingsystem liegt der Vorteil dieser Lösung in der Messung der Änderung der magnetischen Flussdichte am Sensor, was die Verwendung der Empfangsspulen anstatt der Feldsensoren ermöglicht. Die Verwendung der Empfangsspulen anstatt der Feldsensoren schließt den Einfluss des Magnetfeldes der Erde auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung aus und ermöglicht eine zuverlässige Positions- und Ausrichtungsbestimmung auch mit Präsenz des elektrisch leitenden Störkörpers. Es kann anhand dieser Methoden keine Korrektur der Störungen des elektromagnetischen Störkörpers durch die ferromagnetischen Störkörper stattfinden, da diese durch ein unterschiedliches physikalisches Phänomen verursacht worden sind.

Die vorgeschlagenen Algorithmen wurden mit gleichem Versuchsaufbau und mit gleichen Störkörpern wie das Trackingsystem Aurora getestet. Die resultierenden Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit dem Trackingsystem Aurora sind grösser als mit den drei vorgeschlagenen Algorithmen (siehe Unterkapitel 7.2 und 7.4).

9.3 Ausblick

Die in dieser Arbeit verwendete Matlab-basierte Software wurde in Hinblick auf die möglichst hohe Genauigkeit der Positions- und Ausrichtungsbestimmung entwickelt. Eine Optimierung der Abläufe der Algorithmen zur Detektion und Korrektur der Störungen durch leitende Störkörper kann noch weitgehend in Bezug auf die Dauer stattfinden. Die Detektion des leitenden Störkörpers mit Hilfe eines Klassifikators auf Basis mehrerer Frequenzen kann anstatt mit 1000 nur mit drei bis vier aufgenommenen Perioden der Erregerspannung durchgeführt werden. Bei der parallelen Einspeisung aller Sendespulen mit Strom und einer Erregerfrequenz von 1000 Hz kann die Dauer der Spannungsmessung auf 3 bis 4 ms reduziert und demzufolge die Messrate der Detektion des leitenden Störkörpers auf über 25 Messwerte pro Sekunde erhöht werden. Im Gegensatz dazu ist es bei der Detektion des leitenden Störkörpers mit Hilfe eines Klassifikators auf Basis der Einschaltvorgänge notwendig, die vollständige Antwort des leitenden Störkörpers zuzunehmen. Laut den durchgeführten Messungen dauert es bei den verwendeten Störkörpern allerdings bis zu 7 ms (achtmal die Zeitkonstante des Störkörpers τ_{ST} – siehe Unterkapitel 2.3), was bei der Verwendung von acht Sendespulen im Feldgenerator des Trackingsystems eine Zeit der Spannungsmessung von 112 ms bedeutet (acht Erregungen mit einem rechteckigen Signal und acht Pausen zwischen den Erregungen). Daher ist zu erwarten, dass eine Optimierung dieser Methode in Hinsicht auf die Dauer zu einer Detektionsrate von sechs Detektionen pro Sekunde führen würde.

Die Methoden zur Korrektur der Störung auf Basis der Spannungsmessung mit mehreren Frequenzen der Erregerspannung lassen sich ähnlich wie die Methode zur Störkörperdetektion mit mehreren Frequenzen weitgehend in Hinsicht auf die Dauer der Korrektur optimieren. Es ist zu erwarten, dass mit der Korrektur der Störungen mit Hilfe dieser Vorgehensweise eine Messrate von über 25 Messungen pro Sekunde erreicht werden könnte. Die Methoden zur Korrektur der Störungen auf Basis der Analyse der Einschaltvorgänge und auf Basis der quadratischen Erregerspannung benötigen im Gegensatz dazu mindestens 112 ms für eine vollständige Spannungsmessung. Daher ist zu erwarten, dass die maximale Messrate mit diesen beiden Vorgehensweisen nach der Optimierung des Algorithmus in Hinsicht auf die Dauer der Spannungsmessungen bei vier Messungen pro Sekunde liegen wird. Eine höhere Messrate würde die Genauigkeit der Positions- und Ausrichtungsbestimmung beeinträchtigen, weil die vollständige Antwort des Störkörpers in den Algorithmen nicht aufgenommen werden muss.

In den typischen computerassistierten Eingriffen vergleicht der Radiologe die Lage und die Ausrichtung seiner Instrumente mit Patientenanatomie, wenn die Instrumente stillgehalten werden. Die erreichbaren Messraten bei allen drei vorgeschlagenen Methoden ermöglichen deswegen eine Implementierung der Methoden zur Korrektur der Störung in die klinische Praxis.

Der Autor sieht auch die Möglichkeit der Entwicklung einer Methode zur Detektion und Kompensation der Störungen, die auf der Analyse der Einschalt- und Ausschaltvorgänge des gestörten Trackingsystems bei einer sinusförmigen Erregung mit einer einzelnen Frequenz basiert. Wird das gestörte System mit einer Sinusfunktion mit einer bestimmten Phasenverschiebung eingespeist, können die durch die Eingangsphase der Erregerspannung verursachten Einschaltvorgänge, die Einschaltvorgänge der Sendespule kompensieren. Dadurch werden an der Empfangsspule nur die Einschaltvorgänge des Störkörpers und das sinusförmige Signal von der Sendespule und Störkörper gemessen. Die Filterung der sinusförmigen Spannung ermöglicht die mathematische Beschreibung der Einschaltvorgänge des

Störkörpers und infolgedessen die Abschätzung des Koeffizienten des Modells des Störkörpers. Diese Koeffizienten führen zur Subtraktion der Spannung vom Störkörper von der gesamten gemessenen Spannung.

Es ist zu erwarten, dass eine höhere Frequenz der Erregerspannung sowohl die Genauigkeit des Demonstrators des elektromagnetischen Trackingsystems als auch das Messvolumen vergrößern würde. Die Spannung an der Empfangsspule ist proportional zur Frequenz und eine höhere Spannungsamplitude könnte mit einer höheren Genauigkeit gemessen werden. Zu den Nachteilen dieser Vorgehensweise zählt der erhöhte Einfluss der elektrisch leitenden Störkörper auf die Genauigkeit des Ortungssystems.

Bei erhöhter Frequenz der Erregerspannung würde auch die Reaktanz der Sendespule proportional zunehmen. Werden die Sendespulen allerdings resonant betrieben, würde der Anstieg der Frequenz einen proportionalen Anstieg des Stromes verursachen. Mit dem zusätzlichen Kondensator, der die induktive Reaktanz der Sendespule kompensiert, könnte die resultierende Reaktanz des Systems reduziert werden. Dies würde zur Erhöhung der Amplitude des Stromes in der Sendespule bei gleicher Erregerspannung führen. Die Amplitude der Spannung an der Empfangsspule würde damit erhöht werden, was eine Verbesserung der Genauigkeit der Positionsbestimmung bei großen Abständen zwischen der Empfangsspule und dem Feldgenerator zur Folge hätte. In dem verwendeten Demonstrator mit der Erregerfrequenz von 1000 Hz würde die dadurch resultierende Erhöhung des Stromes zu einer übermäßigen Erwärmung der Sendespule führen.

Die Genauigkeit des entwickelten Demonstrators könnte mit Hilfe der Optimierung der Lage und Ausrichtung der Sendespulen des Feldgenerators erhöht werden. Diese Optimierung könnte die Abdeckung des Messvolumens mit einer höheren Feldstärke ermöglichen. Dadurch wäre es wiederum möglich, die Genauigkeit der Ortung, insbesondere bei großen Abständen zwischen dem Feldgenerator und dem Trackingsensor, zu steigern.

Aufgrund der Überbestimmung des Gleichungssystems könnte die größere Anzahl der Sendespulen im Feldgenerator zur Erhöhung der Genauigkeit der Positionsbestimmung führen [93].

Das elektromagnetische Feld der Sendespulen des elektromagnetischen Trackingsystems wird in dieser Arbeit mit einem Dipol abgebildet. Diese Abbildung führt zu einem zusätzlichen Fehler der Positionsbestimmung, insbesondere bei kleinen Abständen zwischen dem Feldgenerator und der Empfangsspule. Eine Minimierung der Fehler der Abbildung des magnetischen Dipols könnte entweder durch die Optimierung der Abmessungen der Sendespulen [16] oder durch die analytische Berechnung des elektromagnetischen Feldes der Sendespule [19, 134] erfolgen.

Die dipolförmige Feldverteilung kann mit einer komplizierteren Feldgeometrie ersetzt werden (z.B. Quadrupol oder Oktupol), welche die Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit höherer räumlicher Auflösung ermöglichen würde [21–22].

10 Anhang

Grafische Oberfläche der Software zur Detektion und Korrektur des leitenden Störkörpers

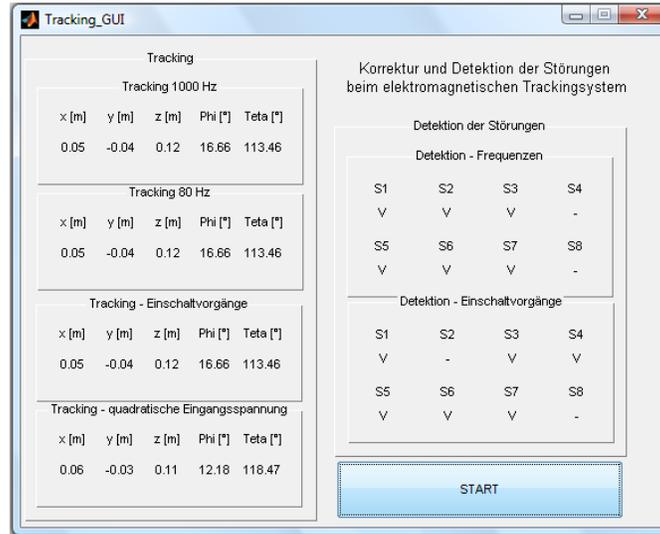


Abb. 10.1 Grafische Oberfläche des Programms zur Evaluierung der Algorithmen zur Detektion und Korrektur der Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems durch die leitenden Störkörper

Simulink-Modell des elektromagnetischen Trackingsystems und des leitenden Störkörpers

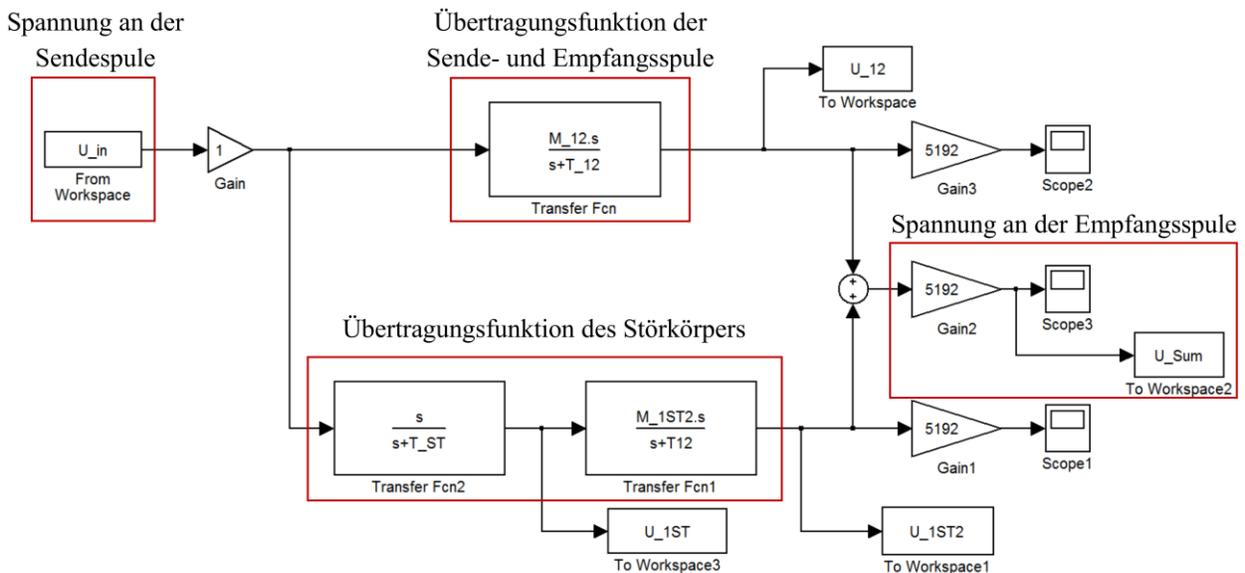


Abb. 10.2 Simulink-Modell des elektromagnetischen Trackingsystems und des leitenden Störkörpers

Detektion der Störung

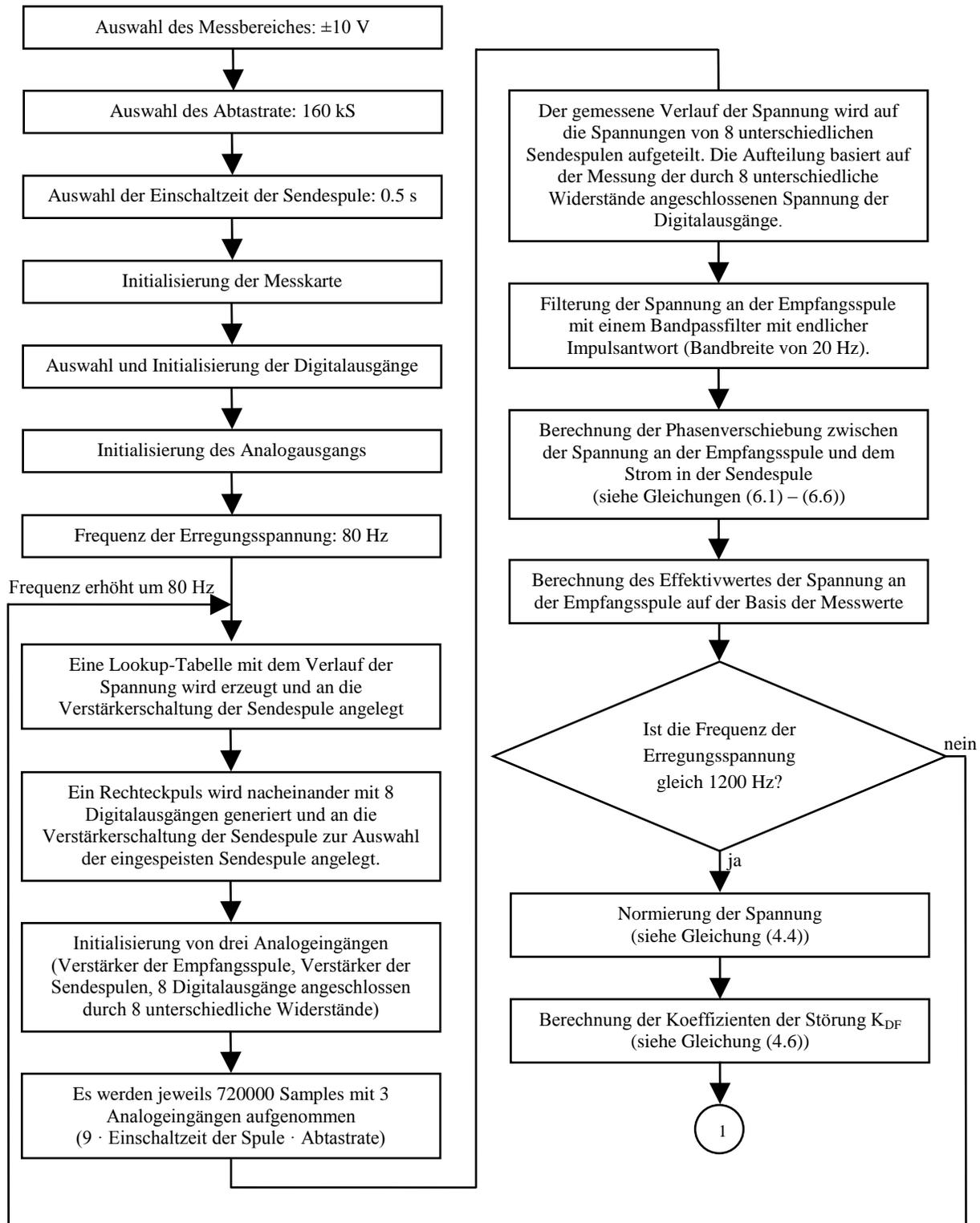


Abb. 10.3 Detektion der leitenden Störkörper mit mehreren Frequenzen der Erregerspannung (Spannungsmessung)

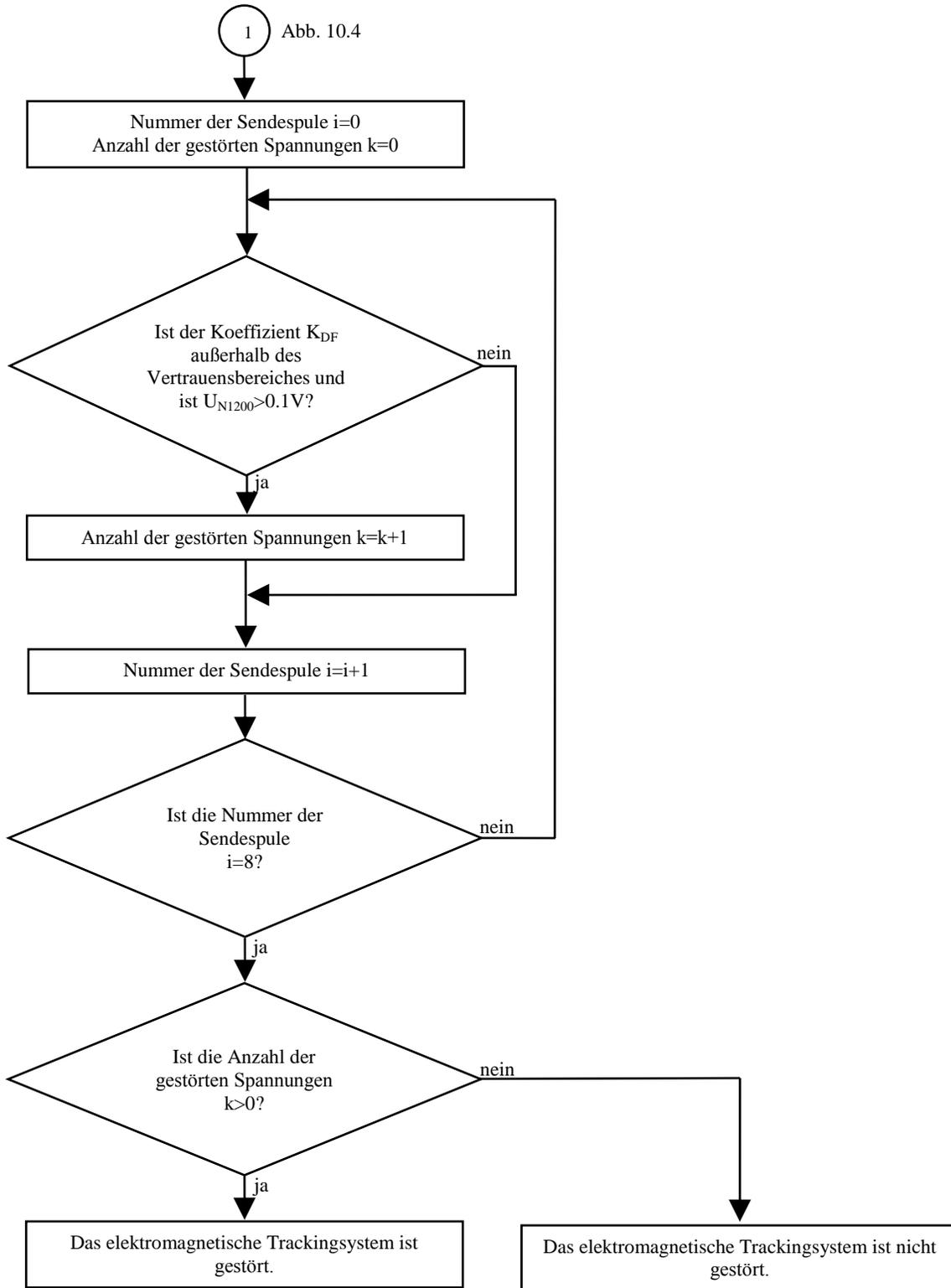


Abb. 10.4 Detektion der leitenden Störkörper mit mehreren Frequenzen der Erregerspannung

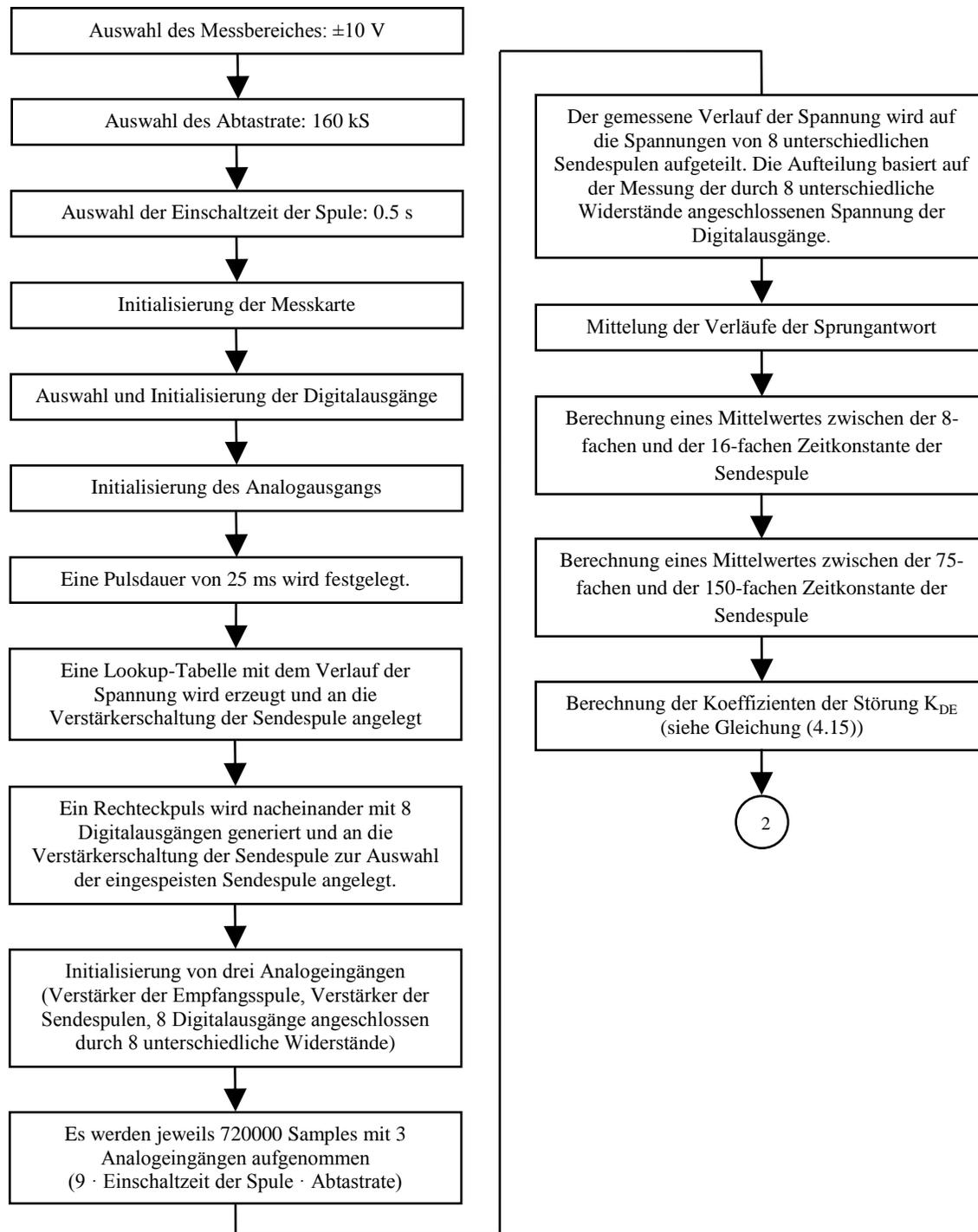
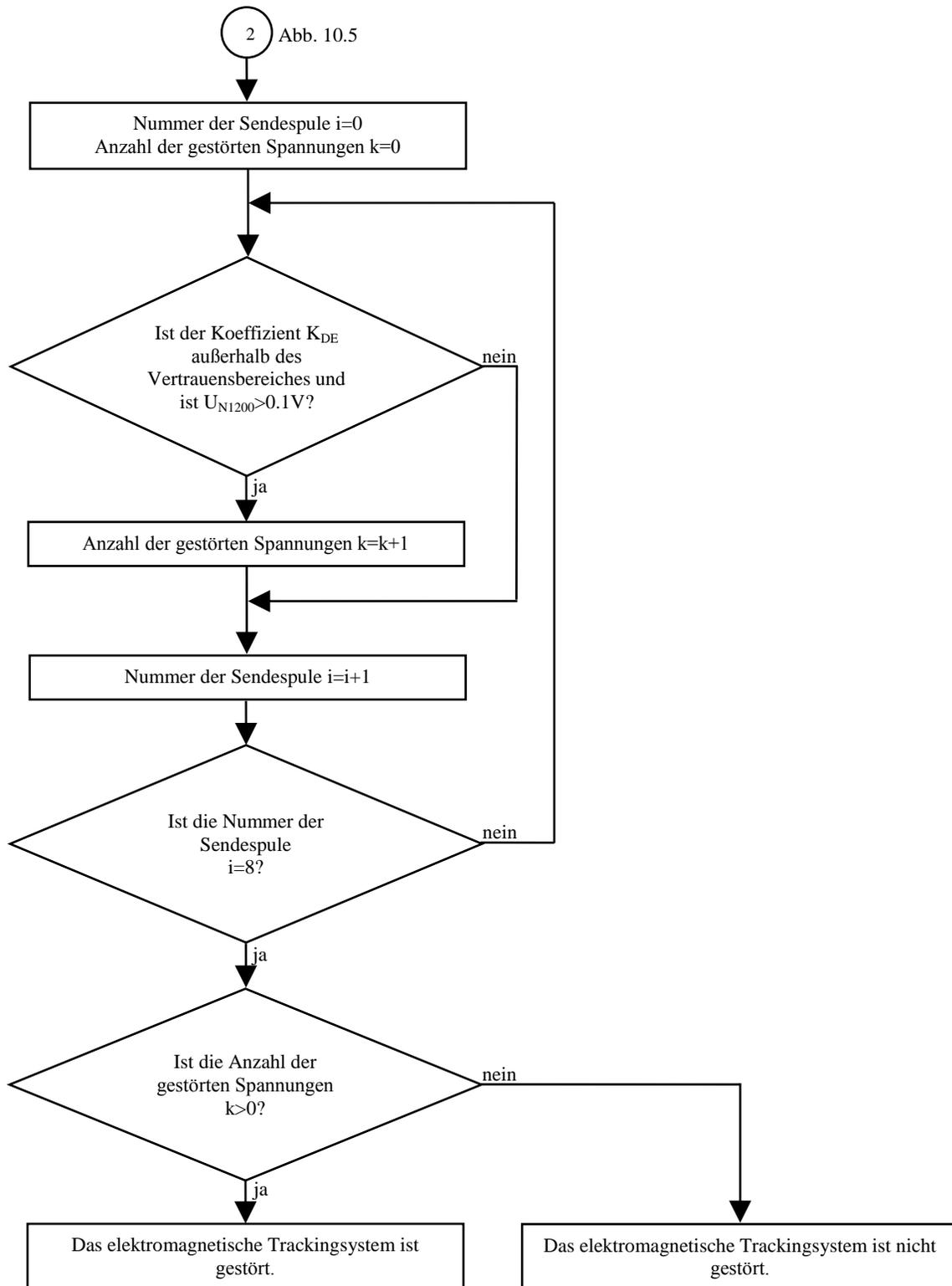


Abb. 10.5 Berechnung des Koeffizienten der Störung K_{DE} mit Hilfe der Einschaltvorgänge (Spannungsmessung)

Abb. 10.6 Berechnung des Koeffizienten der Störung K_{DE} mit Hilfe der Einschaltvorgänge

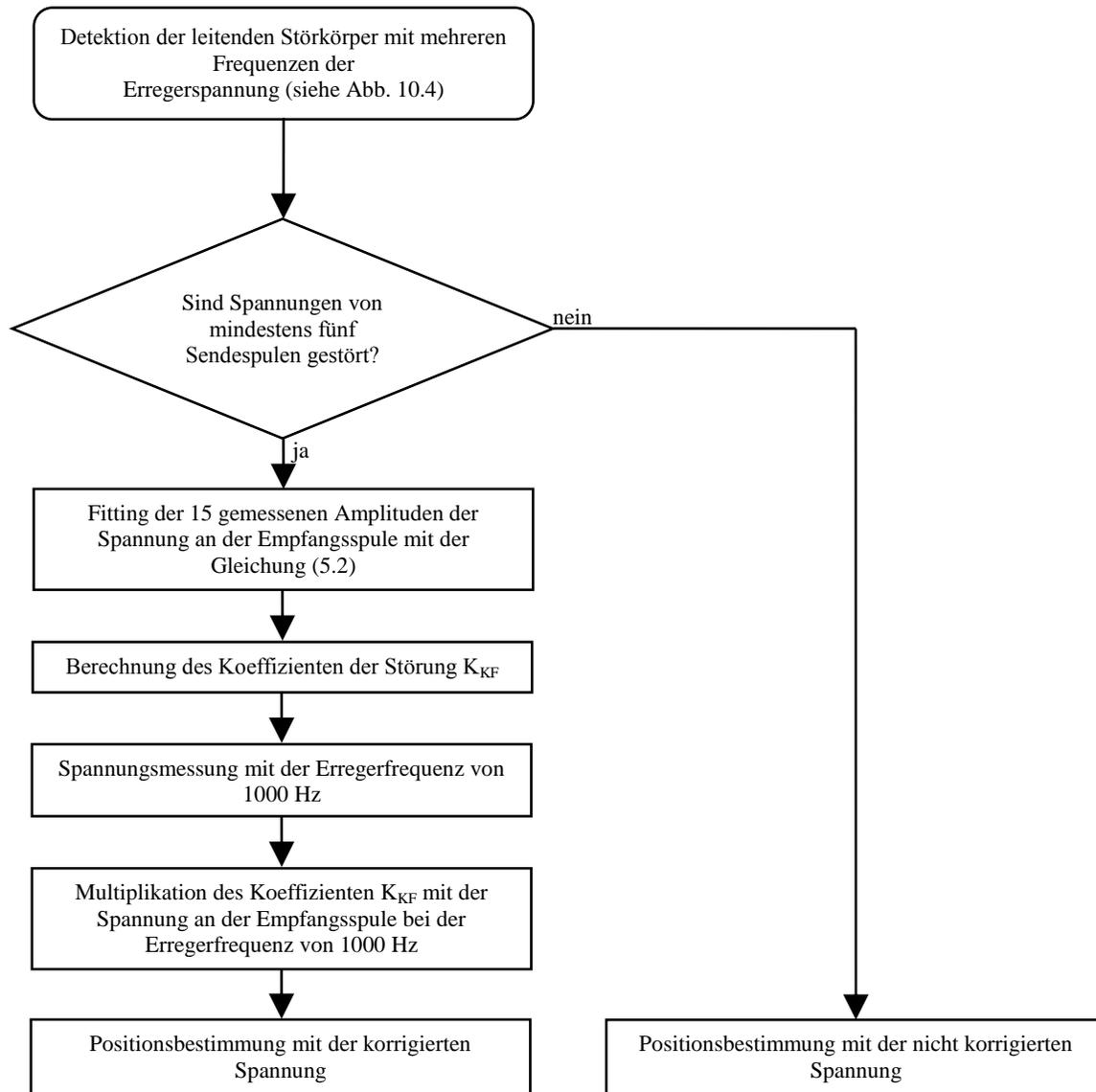
Kompensation der Störung

Abb. 10.7 Kompensation der Störungen mit Hilfe der Frequenzabhängigkeit

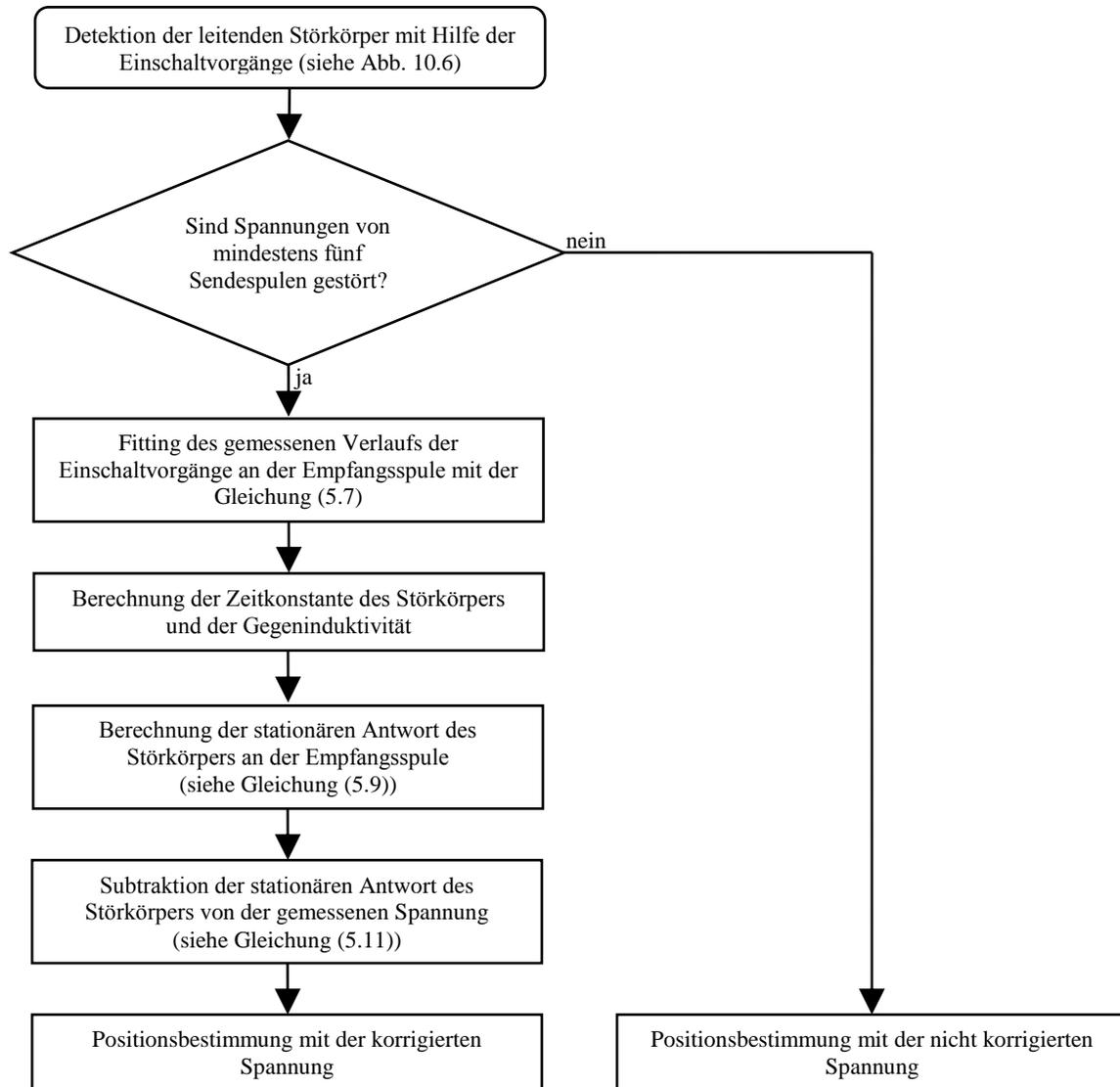


Abb. 10.8 Kompensation der Störungen mit Hilfe der Einschaltvorgänge

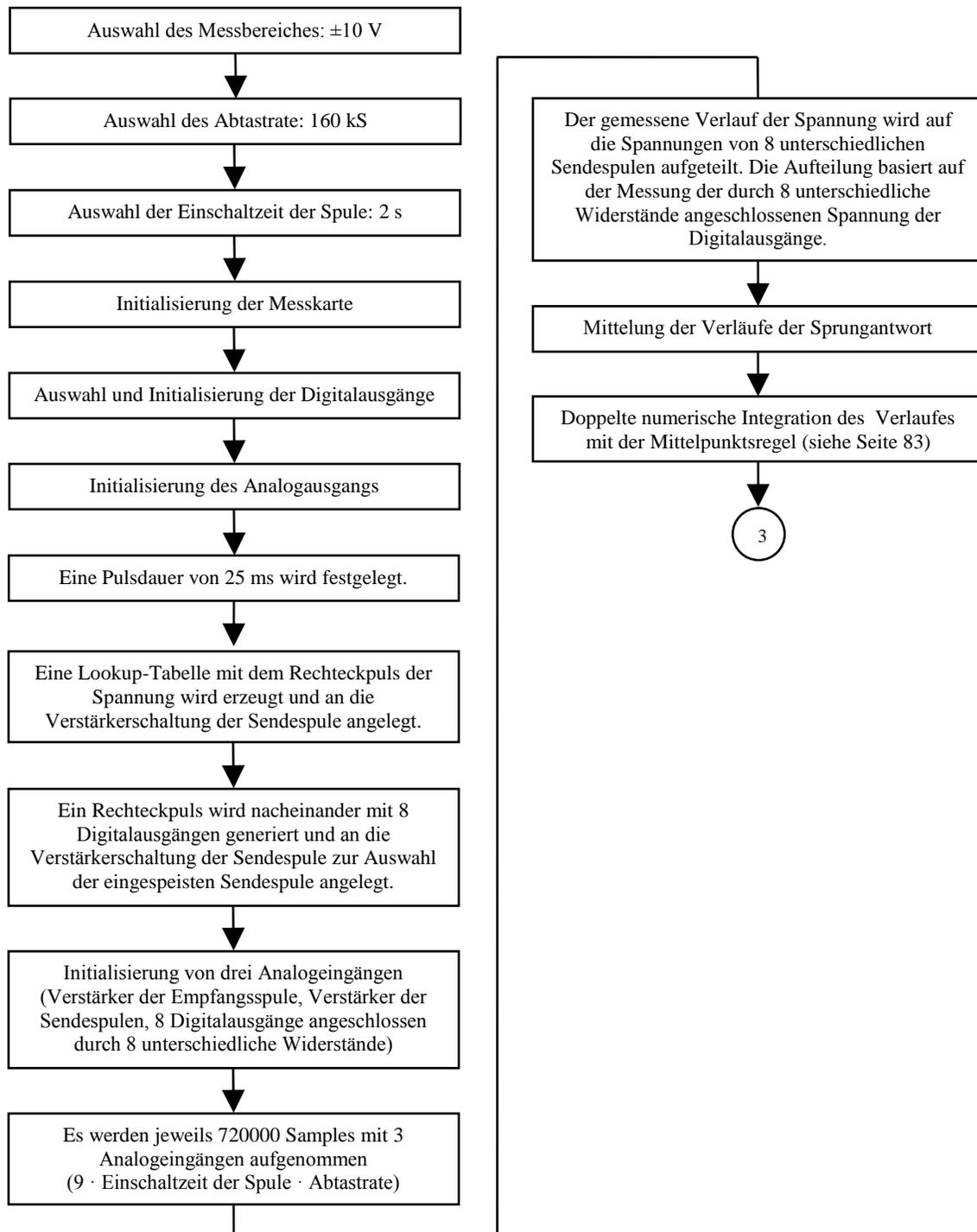


Abb. 10.9 Kompensation der Störungen mit Hilfe der quadratischen Erregungsspannung (Spannungsmessung vom Rechteckpuls)

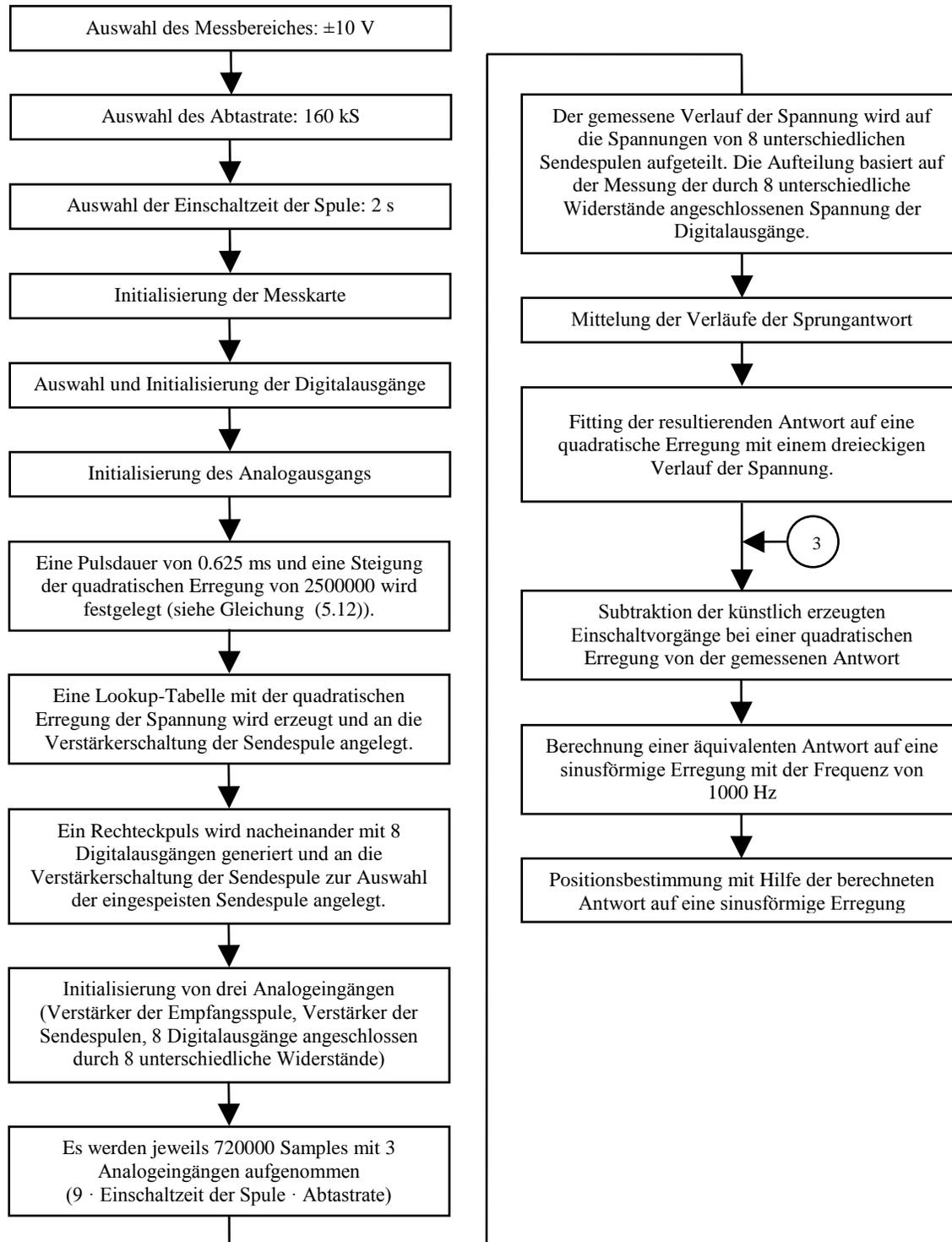


Abb. 10.10 Kompensation der Störungen mit Hilfe der quadratischen Erregungsspannung

10.1 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|---|
| 3D | dreidimensional |
| AC | (engl. <i>alternating current</i>) – Wechselstrom |
| AD/DA | Analog-Digital-/Digital-Analog-Wandler |
| CT | Computertomografie |
| CAS | (engl. <i>computer assisted surgery</i>) – Computerassistierte Chirurgie |
| DC | (engl. <i>direct current</i>) – Gleichstrom |
| DSA | (engl. <i>digital subtraction angiography</i>) – Digitale Subtraktionsangiographie |
| LED | (engl. <i>light-emitting diode</i>) – Leuchtdiode |
| MIC | minimalinvasive Chirurgie |
| MRT | Magnetresonanztomographie |
| OEM | (engl. <i>original equipment manufacturer</i>) – Originalausrüstungshersteller |
| RFID | (engl. <i>radio-frequency identification</i>) – Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen |
| RMS | (engl. <i>root mean square</i>) – quadratisches Mittel |

10.2 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 1.1 | Aufteilung der minimalinvasiven Eingriffe..... | 2 |
| Abb. 1.2 | Aufteilung der radiologischen Eingriffe..... | 3 |
| Abb. 1.3 | Funktionsprinzip des Ortungssystems Calypso 4D..... | 9 |
| Abb. 1.4 | Ortung von RFID-Markern..... | 10 |
| Abb. 2.1 | Messung des elektromagnetischen Feldes einer Sendespule..... | 31 |
| Abb. 2.2 | kreisförmige Leiterschleife durchgeflossen durch Strom I_L | 33 |
| Abb. 2.3 | Induktion der Spannung an der Empfangsspule..... | 36 |
| Abb. 2.4 | Ersatzschaltbild der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule..... | 42 |
| Abb. 2.5 | Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe einer Sprungantwort: a) gemessenes rechteckiges Signal an den Anschlüssen des Verstärkers der Sendespule, b) gemessene und simulierte Antwort des Trackingsystems, c) gemessene und simulierte Antwort des Trackingsystems mit einem zusätzlichen Widerstand von 10Ω | 47 |
| Abb. 2.6 | Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe des Frequenzganges: a) gemessener und simulierter Amplitudenfrequenzgang an der Empfangsspule mit und ohne den zusätzlichen Widerstand von 10Ω , b) gemessener und simulierter Phasenfrequenzgang an der Empfangsspule mit und ohne den zusätzlichen Widerstand von 10Ω | 49 |
| Abb. 2.7 | Ersatzschaltbild der magnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspule mit einem zusätzlichen elektrisch leitenden Störkörper..... | 49 |
| Abb. 2.8 | Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe einer Sprungantwort: a) gemessenes rechteckiges Signal an den Anschlüssen des Verstärkers der Sendespule, b) gemessene und simulierte Antwort einer Messingscheibe, c) gemessene und simulierte Antwort einer Aluminiumscheibe..... | 53 |

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 2.9 | Validierung des Modells des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe der Analyse des Frequenzgangs, a) Amplitudenfrequenzgang der Aluminiumscheibe, b) Phasenfrequenzgang der Aluminiumscheibe, c) Amplitudenfrequenzgang der Messingscheibe, d) Phasenfrequenzgang der Messingscheibe | 55 |
| Abb. 4.1 | Gemessene Frequenzgänge des elektromagnetischen Trackingsystems zwischen den Anschlüssen der Sende- und Empfangsspule mit und ohne Störkörper: a) Amplitudenfrequenzgänge, b) Phasenfrequenzgänge | 62 |
| Abb. 4.2 | Normierung der Spannung an der Empfangsspule: a) Amplitudenfrequenzgänge des elektromagnetischen Trackingsystems nach der Normierung, b) Koeffizienten der Normierung K_i zur Kompensation der Frequenzabhängigkeit des Amplitudenfrequenzganges der elektromagnetisch gekoppelten Sende- und Empfangsspulen | 65 |
| Abb. 4.3 | Normierter Amplitudenfrequenzgang des elektromagnetischen Trackingsystems mit Präsenz des leitenden Störkörpers..... | 65 |
| Abb. 4.4 | Gemessene Amplitude der Spannung an der Empfangsspule von acht Sendespulen mit Aluminiumscheibe in direkter Nähe und ohne leitenden Störkörper bei zwei unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung (80 Hz und 1200 Hz), a) gemessene Amplituden der Spannung, b) Unterschied zwischen den gestörten und ungestörten Messwerten von acht Sendespulen bei zwei unterschiedlichen Frequenzen der Erregerspannung..... | 66 |
| Abb. 4.5 | Versuchsaufbau zur Festlegung des Entscheidungskriteriums zur Detektion des leitenden Störkörpers mit dem elektromagnetischen Trackingsystem auf der Basis der Spannungsmessungen mit zwei Frequenzen der Erregerspannung, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus..... | 68 |
| Abb. 4.6 | Histogramm des Koeffizienten der Störung K_{DF} bei der Spannungsmessung mit zwei Frequenzen der Erregerspannung, a) ohne leitenden Störkörper, b) mit Aluminiumscheibe | 69 |
| Abb. 4.7 | Vergleich der gemessenen Sprungantwort des elektromagnetischen Trackingsystems, a) Sprungantwort ohne Präsenz des leitenden Störkörpers mit der Antwort der Sendespule und des Verstärkers, b) Sprungantwort ohne Präsenz des leitenden Störkörpers und ohne Antwort der Sendespule und des Verstärkers, c) Sprungantwort mit Präsenz der Aluminiumscheibe mit der Antwort der Sendespule und des Verstärkers, d) Sprungantwort mit Präsenz der Aluminiumscheibe ohne die Antwort der Sendespule und des Verstärkers | 72 |
| Abb. 4.8 | Histogramm des Koeffizienten der Störung K_{DE} wird mit Hilfe der Auswertung der Einschaltvorgänge, a) ohne Präsenz des leitenden Störkörpers, b) mit Präsenz der Aluminiumscheibe dargestellt | 73 |
| Abb. 5.1 | Gemessene und simulierte Amplitude der Spannung an der Empfangsspule nach der Normierung mit in direkter Nähe liegender Aluminiumscheibe..... | 77 |
| Abb. 5.2 | Gemessene und gefittete Sprungantwort der Aluminiumscheibe an der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems nach Ablauf der Sprungantwort der Sendespule (nach der 8-fachen Zeitkonstante der Sendespule). | 79 |
| Abb. 5.3 | Extraktion des stationären Zustands der Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems auf eine quadratische Erregerspannung, (a) gemessener quadratischer Verlauf der Spannung an der Sendespule, (b) gemessene Antwort des Trackingsystems an der Empfangsspule auf eine quadratische Erregung, (c) gemessener rechteckiger Verlauf der Spannung an der Sendespule, (d) gemessene Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems an der Empfangsspule auf eine rechteckige Erregung, (e) künstlich erzeugte transiente Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems an der Empfangsspule auf eine quadratische Erregung mit Hilfe der doppelten Integration der Antwort des Trackingsystems auf eine rechteckige Erregung, (f) korrigierte Antwort des elektromagnetischen Trackingsystems an der Empfangsspule auf eine quadratische Erregung mit den subtrahierten Einschaltvorgängen..... | 85 |
| Abb. 6.1 | Messsystems zur Ansteuerung der Sendespulen und der Messung der Spannung an der Empfangsspule | 87 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Abb. 6.2 | Koordinatensystem des Feldgenerators | 89 |
| Abb. 6.3 | Skizze (a) und Foto (b) der Sendespulen des Feldgenerators ($S_1 \dots S_8$) des entwickelten elektromagnetischen Trackingsystems | 89 |
| Abb. 6.4 | Verwendete Empfangsspulen der Firma Northern Digital Inc. für den Demonstrator des elektromagnetischen Trackingsystems: (a) Röntgenaufnahme der Empfangsspule mit einem Durchmesser von 0.5 mm, (b) Röntgenaufnahme der Empfangsspule mit einem Durchmesser von 0.3 mm..... | 90 |
| Abb. 6.5 | Schaltplan (a) und Foto (b) der Verstärkerschaltung für die Sendespule | 92 |
| Abb. 6.6 | Schaltplan (a) und Foto (b) der Verstärkerschaltung für die Empfangsspule..... | 93 |
| Abb. 6.7 | Skizze (a) und Foto (b) eines Robotersystems zur Evaluierung der Genauigkeit des Demonstrators des elektromagnetischen Trackingsystems..... | 96 |
| Abb. 6.8 | Registrierung der Koordinatensysteme des optischen und des elektromagnetischen Trackingsystems, schematische Darstellung der Position und der Ausrichtung der Empfangsspule und des optischen Markers (a), Lage und Ausrichtung der Empfangsspule im Koordinatensystem des optischen und des elektromagnetischen Trackingsystems vor der Registrierung (b), Lage und Ausrichtung der Empfangsspule im Koordinatensystem des optischen und des elektromagnetischen Trackingsystems nach der Registrierung (c) | 98 |
| Abb. 7.1 | Positionsbestimmung mit dem optischen und dem elektromagnetischen Trackingsystem ohne Kalibrierung des Demonstrators..... | 103 |
| Abb. 7.2 | Fehler der Positionsbestimmung als Funktion des Abstandes zwischen der Mitte des Koordinatensystems und der Lage der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems, ohne Kalibrierung des Demonstrators | 104 |
| Abb. 7.3 | Positionsbestimmung mit dem optischen und dem elektromagnetischen Trackingsystem nach der Kalibrierung des Demonstrators des elektromagnetischen Trackingsystems..... | 104 |
| Abb. 7.4 | Fehler der Positionsbestimmung mit dem elektromagnetischen Trackingsystem nach der Kalibrierung des Demonstrators mit dem vorgeschlagenen Ansatz als Funktion des Abstandes zwischen der Mitte des Koordinatensystems und der Lage der Empfangsspule | 105 |
| Abb. 7.5 | Räumliche Lage und Ausrichtung der Dipolmomente der Sendespulen des Feldgenerators vor ($m1 - m8$) und nach ($m1' - m8'$) der Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems..... | 105 |
| Abb. 7.6 | Versuchsaufbau zur Evaluierung des Einflusses der Metallscheiben auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems Aurora, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus..... | 107 |
| Abb. 7.7 | Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung des Trackingsystems Aurora mit Präsenz einer Metallscheibe als Funktion des Abstands zwischen der Metallscheibe und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung $-\varphi$, c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung $-\theta$ | 108 |
| Abb. 7.8 | Versuchsaufbau zur Evaluierung des Einflusses der Metallscheiben auf die Genauigkeit des elektromagnetischen Trackingsystems Aurora, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus..... | 109 |
| Abb. 7.9 | Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung des Trackingsystems Aurora mit Präsenz einer Metallscheibe als Funktion des Abstands zwischen der Metallscheibe und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung $-\varphi$, c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung $-\theta$ | 110 |
| Abb. 7.10 | Versuchsaufbau zur Evaluierung der Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers mit systematischer Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des Ortungssystems und der Metallscheibe, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus | 112 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Abb. 7.11 | Detektion der Aluminiumscheibe mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störung durch die Aluminiumscheibe..... | 113 |
| Abb. 7.12 | Detektion der Messingscheibe mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störungen durch die Messingscheibe..... | 114 |
| Abb. 7.13 | Detektion der Eisenscheibe mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störung durch die Eisenscheibe. | 115 |
| Abb. 7.14 | Versuchsaufbau zur Evaluierung der Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers mit systematischer Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des Ortungssystems und dem Aluminiumquader, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus..... | 115 |
| Abb. 7.15 | Detektion der Präsenz des Aluminiumquaders mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störung durch die Präsenz des Aluminiumquaders..... | 116 |
| Abb. 7.16 | Versuchsaufbau zur Detektion des Flachdetektors des C-Arms Siemens Artis zeego in der Nähe der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems | 117 |
| Abb. 7.17 | Detektion der Präsenz des Flachdetektors des C-Arms Siemens Artis zeego mit dem elektromagnetischen Trackingsystem, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Detektion der Störung durch die Präsenz des Flachdetektors..... | 118 |
| Abb. 7.18 | Versuchsaufbau zur Evaluierung der Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers, a) Fotografie des Versuchsaufbaus, b) Skizze des Versuchsaufbaus..... | 119 |
| Abb. 7.19 | Detektion der Störung durch leitende Objekte mit zufälliger Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems und der Mitte des Koordinatensystems, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Evaluierung der Algorithmen zur Detektion der Störungen. | 120 |
| Abb. 7.20 | Detektion der Störung durch leitende Objekte mit zufälliger Änderung des Abstandes zwischen der Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems und der Aluminiumscheibe, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung, c) Evaluierung der Algorithmen zur Detektion der Störungen..... | 121 |
| Abb. 7.21 | Sensitivität der Detektion der Störung durch leitende Objekte in der Funktion des Fehlers der Positionsbestimmung..... | 123 |
| Abb. 7.22 | Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Aluminiumscheibe als Funktion des Abstandes zwischen der Aluminiumscheibe und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – φ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – θ | 126 |
| Abb. 7.23 | Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Messingscheibe als Funktion des Abstandes zwischen der Messingscheibe und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – φ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – θ | 127 |
| Abb. 7.24 | Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Aluminiumquader als Funktion des Abstandes zwischen dem Aluminiumquader und der Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – φ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung – θ | 128 |
| Abb. 7.25 | Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung ohne Aluminiumscheibe als Funktion des Abstandes zwischen der Empfangsspule und der Mitte des Koordinatensystems, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel φ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ | 129 |
| Abb. 7.26 | Fehler der Positions- und Ausrichtungsbestimmung mit Aluminiumscheibe als Funktion des Abstandes zwischen der Aluminiumscheibe (Mitte des Koordinatensystems) und der | |

| | | |
|------------|--|-----|
| | Empfangsspule, a) Fehler der Positionsbestimmung, b) Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel φ , c) Fehler der Ausrichtungsbestimmung für den Winkel θ | 130 |
| Abb. 8.1 | Fotografie (a) und Röntgenaufnahme (b) eines Twin-Pass Katheters mit einer integrierten Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems | 136 |
| Abb. 8.2 | Fotografie (a) und Röntgenaufnahme (b) des Führungsdrahtes NiT-Vu mit einer integrierten Empfangsspule des elektromagnetischen Trackingsystems | 136 |
| Abb. 8.3 | Darstellung des 3D-Slicer Programms während der Ortung des elektromagnetisch navigierbaren Führungsdrahtes im Aneurysmen-Phantom | 139 |
| Abb. 8.4 | Fotografie des elektromagnetisch navigierbaren Führungsdrahtes zur Evaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems mit Hilfe eines Phantomversuchs | 139 |
| Abb. 8.5 | Skizze (a) und Foto (b) des Versuchsaufbaus zur Evaluierung der Algorithmen zur Detektion und Kompensation der Störungen mit einem elektromagnetisch navigierbaren Führungsdraht | 140 |
| Abb. 8.6 | Einfluss einer Messingscheibe als Beispiel für eine Störung auf die Genauigkeit der Positions- und Ausrichtungsbestimmung eines elektromagnetisch navigierbaren Führungsdrahtes im Rahmen eines Phantomversuchs, a) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes ohne Störkörper, b) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes bei Präsenz der Messingscheibe – ohne Korrektur, c) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes bei Präsenz der Messingscheibe – Korrektur mit mehreren Frequenzen, d) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes bei Präsenz der Messingscheibe – Korrektur mit quadratischen Erregungsspannung, e) Lage und Ausrichtung des Führungsdrahtes bei Präsenz der Messingscheibe –Korrektur mit Einschaltvorgängen..... | 141 |
| Abb. 10.1 | Grafische Oberfläche des Programms zur Evaluierung der Algorithmen zur Detektion und Korrektur der Störungen des elektromagnetischen Trackingsystems durch die leitenden Störkörper .. | 150 |
| Abb. 10.2 | Simulink-Modell des elektromagnetischen Trackingsystems und des leitenden Störkörpers | 150 |
| Abb. 10.3 | Detektion der leitenden Störkörper mit mehreren Frequenzen der Erregerspannung (Spannungsmessung)..... | 151 |
| Abb. 10.4 | Detektion der leitenden Störkörper mit mehreren Frequenzen der Erregerspannung..... | 152 |
| Abb. 10.5 | Berechnung des Koeffizienten der Störung K_{DE} mit Hilfe der Einschaltvorgänge (Spannungsmessung)..... | 153 |
| Abb. 10.6 | Berechnung des Koeffizienten der Störung K_{DE} mit Hilfe der Einschaltvorgänge | 154 |
| Abb. 10.7 | Kompensation der Störungen mit Hilfe der Frequenzabhängigkeit | 155 |
| Abb. 10.8 | Kompensation der Störungen mit Hilfe der Einschaltvorgänge | 156 |
| Abb. 10.9 | Kompensation der Störungen mit Hilfe der quadratischen Erregungsspannung (Spannungsmessung vom Rechteckpuls)..... | 157 |
| Abb. 10.10 | Kompensation der Störungen mit Hilfe der quadratischen Erregungsspannung | 158 |

10.3 Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------|--|----|
| Tab. 1 | OEM-elektromagnetische Trackingsysteme..... | 12 |
| Tab. 2 | Lage (x_s , y_s , z_s) und Ausrichtung (φ_s , θ_s) der Sendespulen ($S_1 \dots S_8$) des Feldgenerators des elektromagnetischen Trackingsystems | 90 |
| Tab. 3 | Induktivität (L), Widerstand (R), Radius (r), Länge (l) und Anzahl der Wicklungen (n_s) der Sendespulen ($S_1 \dots S_8$) des Feldgenerators des elektromagnetischen Trackingsystems | 90 |
| Tab. 4 | Induktivität (L), Widerstand (R), Radius (r) und Länge (l) der Empfangsspulen des elektromagnetischen Trackingsystems..... | 91 |

| | | |
|---------|--|-----|
| Tab. 5 | Vergleich der Algorithmen zur Kalibrierung des elektromagnetischen Trackingsystems | 106 |
| Tab. 6 | Tabellarischer Vergleich der entwickelten Methoden zur Detektion des leitenden Störkörpers | 121 |
| Tab. 7 | Ergebnisse der Genauigkeitsevaluierung des elektromagnetischen Trackingsystems mit und ohne Aluminiumscheibe bei zufälliger Änderung der Lage und Ausrichtung der Empfangsspule..... | 122 |
| Tab. 8 | Sensitivität und Spezifität der Detektion des leitenden Störkörpers mit mehreren Frequenzen in der Funktion des Fehlers der Positionsbestimmung | 122 |
| Tab. 9 | Sensitivität und Spezifität der Detektion des leitenden Störkörpers mit Einschaltvorgängen in der Funktion des Fehlers der Positionsbestimmung | 123 |
| Tab. 10 | Vergleich der entwickelten Methoden zur Korrektur der Fehler, die durch leitende Störkörper verursacht wurden (1. Versuchsreihe – systematische Änderung der Lage des Störkörpers). | 131 |
| Tab. 11 | Vergleich der entwickelten Methoden zur Korrektur der Fehler, die durch leitende Störkörper verursacht wurden (2. Versuchsreihe – zufällige Änderung der Lage der Empfangsspule ohne Störkörper). | 131 |
| Tab. 12 | Vergleich der entwickelten Methoden zur Korrektur der Fehler, die durch leitende Störkörper verursacht wurden (2. Versuchsreihe – zufällige Änderung der Lage der Empfangsspule mit der Aluminiumscheibe). | 132 |
| Tab. 13 | Bewertung der Methode zur Detektion des Störkörpers mit mehreren Frequenzen | 144 |
| Tab. 14 | Bewertung der Methode zur Detektion des Störkörpers mit Hilfe der Einschaltvorgänge..... | 144 |
| Tab. 15 | Bewertung der Methode zur Korrektur der Störungen mit Hilfe mehrerer Frequenzen | 145 |
| Tab. 16 | Bewertung der Methode zur Korrektur der Störungen mit Hilfe der Einschaltvorgänge | 145 |
| Tab. 17 | Bewertung der Methode zur Korrektur der Störungen mit Hilfe der quadratischen Erregerspannung.. | 146 |

11 Literaturverzeichnis

- [1] Köckerling F., Bittner R., Gastinger I., Lippert, H. (2003), Minimal Invasive Chirurgie, Auflage: 1, Med Science
- [2] Kaufman J., Reekers J., Burners J., Al-Kutoubi A., Lewis C., Hardy B., Kuribayashi S., Sharma S. (2003), Global Statement Defining Interventional Radiology, *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 21, S. 1147–1149
- [3] Rösch J, Keller F, Kaufman J. (2003), The Birth, Early Years, and Future of Interventional Radiology, *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 14, S. 841–853
- [4] Katzen B. (1995), Interventional radiology: past, present and future, *MedicaMundi*
- [5] Galloway R., Peters T. (2008), Image-guided interventions: Overview and History of Image-Guided Interventions, Springer US, New York
- [6] Birkfellner W., Hummel J., Wilson E., Cleary K. (2008), Image-guided interventions: Tracking Devices; Thoracoabdominal Interventions, Springer US
- [7] Jolesz F. (2014), Intraoperative Imaging and Image-Guided Therapy, Auflage: 2014, Springer-Verlag New York Inc.
- [8] Nagel M., Hoheisel M., Petzold R., Kalender W. A., Krause U. H. W. (2007), Needle and catheter navigation using electromagnetic tracking for computer-assisted C-arm CT interventions, *Proc. of SPIE Medical Imaging 2007: Visualization and Image-Guided Procedures*
- [9] Fischer G. S. (2005), Electromagnetic tracker characterization and optimal tool design (with applications to ENT surgery), Master Thesis, Johns Hopkins University
- [10] Glossop N. D. (2009), Advantages of optical compared with electromagnetic tracking, *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 91(1), S. 23–28
- [11] Koizumi N., Sumiyama K., Suzuki N., Hattori A., Tajiri H., Uchiyama A. (2002), Development of three-dimensional endoscopic ultrasound system with optical tracking, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2002*, S. 60–65
- [12] Birkfellner W., Watzinger F., Wanschitz F., Ewers R., Bergmann H. (1998), Calibration of tracking systems in a surgical environment, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17(5), S. 737–742
- [13] Nafis Ch., Jensen V., Beauregard L., Anderson P. (2006), Method for estimating dynamic EM tracking accuracy of Surgical Navigation tools, *Proc. of SPIE Medical Imaging 2006*
- [14] Kuipers J. (1975), Tracking and determining orientation of object using coordinate transformation means, system and process, US Patent 3,983,474
- [15] Raab F. H. (1979), Magnetic position and orientation tracking system, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 15(5), S. 709–718
- [16] Paperno E., Plotkin A. (2004), Cylindrical induction coil to accurately imitate the ideal magnetic dipole, *Sensors and Actuators A: Physical*, 112(2-3):5, S. 248–252
- [17] Stahlke D., Quaternions in Classical Mechanics, *Reviews of Modern Physics*, 621
- [18] Boksberger H., Kirsch S., Schilling Ch. (1997), Device and process for determining the position, Patent 97/36192

- [19] Govari A. (2000), Electromagnetic position single axis system, US Patent 6,484,118 B1
- [20] Anderson P. T. (2001), A source of accurately calculable quasi-static magnetic fields, PhD Thesis, The University of Vermont, Burlington
- [21] Kirsch S. R., Schilling Ch. J. (2003), Fehlerentdeckung bei der Bestimmung magnetischer Lokationen oder Orientierungen, DE Patent 08 601 365 T2
- [22] Seiler P. G., Blattmann H., Kirsch S., Muench R. K., Schilling C. (2000), A novel tracking technique for the continuous precise measurement of tumor positions in conformal radiotherapy, *Physics in Medicine and Biology*, 45(9), S. 103-110
- [23] Schenck J., Safety of Strong, Static Magnetic Fields (2000), *Journal of magnetic resonance imaging*, 12, S. 2–19
- [24] Yang W., Hu Ch., Li M., Meng M. Q. H., Song S. (2010), A new tracking system for three magnetic objectives, *IEEE Transaction on Magnetics*, 46(12), S. 4023–4029
- [25] Hu C., Li M., Song S., Yang W., Zhang R., Meng M. Q. H. (2010), A cubic 3-Axis magnetic sensor array for wirelessly tracking magnet position and orientation, *IEEE Sensors Journal*, 10(5), S. 903–913
- [26] Hu C., Meng M. Q. H., Mandal M. (2007), A linear algorithm for tracing magnet position and orientation by using three-axis magnetic sensors, *IEEE Transaction on Magnetics*, 43(12), S. 4096–4101
- [27] Blattmann H., Kirsch S., Münch R., Schilling Ch., Seiler P.G., Verwey J. (2000), Echtzeitortung von Tumoren zur Verbesserung der konformalen Radiotherapie, *Computerunterstützte Medizin und Robotik*
- [28] Rotier D. J. (1988), Magnetic direction finding device with improved accuracy, US Patent 4,829,250
- [29] Higgins R. F., Jones Jr. H. R., Rodgers A. G. (2008), AC magnetic tracking system with non-coherency between sources and sensors, US Patentanmeldung 2008/0120061 A1
- [30] Li M., Bien T., Rose G. (2013), FPGA based electromagnetic tracking system for fast catheter navigation, *Design of Medical Devices - Europe Edition*
- [31] O'Donoghue K., Cantillon-Murphy P., Eustace D., Griffiths J., Mansfield H., Power T., O'Shea M. (2014), Catheter position tracking system using planar magnetics and closed loop current control, *IEEE Transaction on Magnetics*, 50(7), S. 1-9
- [32] Placidi G., Franchi D., Maurizi A., Sotgiu A. (2009), Review on patents about magnetic localisation systems for in vivo catheterizations, *Recent Patents on Biomedical Engineering*, 2(1), S. 58–64
- [33] Northern Digital (2011), Aurora: EM tracking system, ndigital.com/medical/documents/aurora/aurora-brochure.pdf, geprüft am 22.01.2013
- [34] Ascension Technology Corporation (2009), Magnetic fact sheet and video: DC vs. AC tracking: Overcoming Metal Problems
- [35] Blood E. B. (1989), Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields, US Patent 4,945,305
- [36] Polhemus Inc. (2010), AC & pulsed DC motion trackers
- [37] Anderson P. T. (1993), Pulsed-DC position and orientation measurement system, US Patent 5,453,686, 1993

- [38] Balter J. M., Wright J. N., Newell L. J., Friemel B., Dimmer S., Cheng Y., Wong J., Vertatschitsch E., Mate T. P. (2005), Accuracy of a wireless localization system for radiotherapy, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 61(3), S. 933–937
- [39] Rau A. W. (2008), Real-time tumor localization with electromagnetic transponders for image-guided radiotherapy applications, Dissertation, Ruperto-Carola University of Heidelberg
- [40] Wille A., Broll M., Winter S. (2011), Phase Difference Based RFID Navigation for Medical Applications, *2011 IEEE International Conference on RFID*
- [41] Broll M., Wille A., Troesken V., Hasenau L., Winter S. (2011), Comparing Accuracies of a RFID-based and an Optical Tracking System for Medical Navigation Purposes, *Proceedings of BMT 2011*
- [42] Schlageter V., Drljaca P., Popovic R., Kucera P. (2002), A magnetic tracking system based on highly sensitive integrated hall sensors, *JSME International Journal Series C*, 45(4), S. 967-973
- [43] Kimura T., Takasaki K., Tozune A., Masuzawa T. (2006), Characteristics of a two-dimensional integrated magnetic sensor for position sensing and motor control, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 1(2), S. 188-193
- [44] Wu X., Hou W., Peng Ch., Zheng X., Fang X., He J. (2008), Wearable magnetic locating and tracking system for MEMS medical capsule, *Sensors and Actuators A: Physical*, 141(2), S. 432–439
- [45] Northern Digital (2013), The Aurora Electromagnetic Tracking System, ndigital.com/medical/aurora.php, geprüft am 16.05.2015
- [46] Ascension Technology Corporation (2008), 3D Guidance driveBAY® 2, www.ndigital.com/msci/products/drivebay-trackstar/, geprüft am 16.05.2015
- [47] Ascension Technology Corporation (2008), trakSTAR™: A Family of DC Magnetic Field Generators to Best Meet Your Requirements, ndigital.biz/medical/pdf/TrakStarTransmitter.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [48] Yaniv Z., Wilson E., Lindisch D., Cleary K. (2009), Electromagnetic tracking in the clinical environment, *Medical Physics*, 36(3), S. 876–892
- [49] Polhemus Inc. (2011), Fastrak: The fast and easy digital tracker, 5dt.com/downloads/3rdparty/polhemus_Fastrak.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [50] Soper T. D., Haynor D. R., Glenny R. W., Seibel E. J. (2010), In Vivo Validation of a Hybrid Tracking System for Navigation of an Ultrathin Bronchoscope within Peripheral Airways, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(3), S. 736–745
- [51] Hummel J., Maurer Jr. C., Figl M., Bax M., Bergmann H., Birkfellner W., Shahidi R. (2005), Standardized evaluation method for electromagnetic tracking systems, *Proc. of SPIE Medical Imaging 2005: Visualization and Image-Guided Procedures*
- [52] Solomon S. B., Dickfeld T., Calkins H. (2003), Real-time cardiac catheter navigation on three-dimensional CT images, *Journal of Interventional Cardiac Electrophysiology*, 8(1), S. 27–36
- [53] Condino S., Calabrò E., Alberti A., Parrini S., Cioni R., Berchiolli R., Gesi M, Ferrari V., Ferrari M. (2014), Simultaneous Tracking of Catheters and Guidewires: Comparison to Standard Fluoroscopic Guidance for Arterial Cannulation, *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*.
- [54] Bien T., Rose G., Skalej M. (2011), Electromagnetic tracking system for neurovascular interventions, *Proceedings of the Eighth IASTED International Conference on Biomedical Engineering*

- [55] Bien T., Brose A., Schmidt B., Rose G. (2012), Neurovascular intervention with an electromagnetic navigated guidewire, *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering*
- [56] Penzkofer T., Bruners P., Pfeffer J., Steinseifer U., Schmitz-Rode T., Mahnken A. H. (2008), Electromagnetic tracking for vascular interventions: initial results in a rapid prototyped phantom, *CIRSE 2008*
- [57] Wood B. J., Zhang H., Durrani A., Glossop N., Ranjan S., Lindisch D., Levy R. E., Banovac F., Borgert J., Krueger S., Kruecker J., Viswanathan A., Cleary K. (2005), Navigation with electromagnetic tracking for interventional radiology procedures: a feasibility study, *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 16(4), S. 493–505
- [58] Solomon S. B., Magee C., Acker D. E., Venbrux A. C. (1999), TIPS placement in swine, guided by electromagnetic real-time needle tip localization displayed on previously acquired 3-D CT, *Cardiovascular and Interventional Radiology*, 22(5), S. 411–414
- [59] Manstad-Hulaas F., Tangen G., Dahl T., Hernes T., Aadahl P. (2012), Three-Dimensional Electromagnetic Navigation vs. Fluoroscopy for Endovascular Aneurysm Repair: A Prospective Feasibility Study in Patients, *Journal of endovascular therapies*, 19(1), S. 70-78
- [60] Kaulen H. (2012), Navigating the Heart, *AXIOM Innovations: The Magazine for Interventional Radiology, Cardiology and Surgery*, 14, S. 38-43
- [61] Strommer G., Schwartz L., Shmarak I., Flugelman M. Y., Shiran A., Sobe L., Oren E., Shofti R., Leon M. B., Lewis B. S. (2005), Fluoroscopy free navigation of Guided-Stent using Medical Positioning System and 3D Guided-IVUS (GIVUS™) image, *CARS 2005: Computer Assisted Radiology and Surgery*, S. 387–392.
- [62] Kabra R., Singh J. (2010), Recent trends in imaging for atrial fibrillation ablation, *Indian Pacing and Electrophysiology Journal*, 10(5), S. 215–227
- [63] Sonna J. (2008), Vergleich zweier dreidimensionaler Navigationssysteme (Carto® versus NavX®) bei der zirkumferentiellen Pulmonalvenenablation zur Behandlung von Vorhofflimmern unter Einbeziehung einer 3D-Rekonstruktion des linken Vorhofs aus den CT-Daten, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München
- [64] Maestle R., Mucha D., Kosmecki B., Krueger T. (2009), An intrahepatic electromagnetic localizer, *IFMBE Proceedings*, 22, S. 958–961
- [65] Solomon S. B., White Jr. P., Wiener Ch. M., Orens J. B., Wang K. P. (2000), Three-dimensional CT-guided bronchoscopy with a real-time electromagnetic position sensor, *Chest*, 118(6), S. 1783-1787
- [66] Deligianni F., Chung A., Yang G. Z. (2006), Non-rigid 2D-3D registration with catheter tip EM tracking for patient specific bronchoscope simulation, *Medical Image Computing and Computer Aided Intervention - MICCAI 2006*, 9(1), S. 281-288
- [67] Hautmann H., Schneider A., Pinkau T., Peltz F., Feussner H. (2005), Electromagnetic catheter navigation during bronchoscopy, *Chest*, 128(1), S. 382–387
- [68] superDimension Inc. (2011), iLogic: The smart way to hit the target, iacharitygolf.com/docs/ilogic.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [69] Bercik P., Schlageter V., Mauro M., Rawlinson J., Kucera P., Armstrong D. (2005), Noninvasive verification of nasogastric tube placement using a magnet-tracking system: a pilot study in healthy subjects, *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 29(4), S. 305–310

- [70] Szura M., Bucki K., Matyja A., Kulig J. (2008), Evaluation of magnetic scope navigation in screening endoscopic examination of colorectal cancer, *Surgical Endoscopy*, 26(3), S. 632-628
- [71] Franz A., Haidegger T., Birkfellner W., Cleary K., Peters T., Maier-Hein L. (2014), Electromagnetic Tracking in Medicine – a Review of Technology, Validation and Applications, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 33(8), S. 1702-1725
- [72] Lionberger D., Weise J., Ho D., Haddad J. (2008), How Does Electromagnetic Navigation Stack Up Against Infrared Navigation in Minimally Invasive Total Knee Arthroplasties? *The Journal of Arthroplasty*, 23(4), S. 573-580
- [73] Jain A., Gutierrez L., Stanton D. (2009), 3D TEE registration with X-ray fluoroscopy for interventional cardiac applications, *Functional Imaging and Modeling of the Heart*, S. 321–329
- [74] Lange T., Eulenstein S., Calibration of swept-volume 3D ultrasound (1999), *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3, S. 339–360
- [75] Barrat D. C., Davies A. H., Hughes A. D., Thom S. A., Humphries K. N. (2001), Optimisation and evaluation of an electromagnetic tracking device for high-accuracy three-dimensional ultrasound imaging of the carotid arteries, *Ultrasound in Medicine & Biology*, 27(7), S. 957–968
- [76] Ewertsen C., Dencker D., Karstrup S. (2012), Stanzbiopsie eines kleinen retroperitonealen Lymphoms gestützt durch Bildfusion und elektromagnetischem Nadel-Tracking, *Ultraschall in der Medizin*, 33(1), S. 1–3
- [77] GE Healthcare (2012), Logiq E9: Agile Intelligenz
- [78] Philips (2013), PercuNav: Image fusion and navigation, healthcare.philips.com/main/products/ultrasound/systems/percunav, geprüft am 16.05.2015
- [79] Ultrasonix Medical Corporation (2013), SonixGPS™ - Needle Guidance: With our SonixGPS needle Guidance Positioning System, targeting is easy, ultrasonix.com/webfm_send/695, geprüft am 15.05.2015
- [80] Straßmann G., Kolotas C., Heyd R., Walter S., Baltas D., Martin T., Vogt H., Ioannidis G., Sakas G., Zamboglou N. (2000), Navigation system for interstitial brachytherapy, *Radiotherapy & Oncology*, 56(1), S. 49–57
- [81] Hildebrand P., Besirevic A., Kleemann M., Schlichting S., Martens V., Schweikard A., Bruch H. P. (2007), Design and development of adapters for electromagnetic trackers to perform navigated laparoscopic radiofrequency ablation, *Annals of Surgical Innovation and Research*, 1(7), S. 1-6
- [82] Meyer B., Peter O., Nagel M., Hoheisel M., Wolf K. (2008), Electromagnetic field-based navigation for percutaneous punctures on C-arm CT: experimental evaluation and clinical application, *European Radiology*, 18(12), S. 2855–2864
- [83] Nagel M. (2008), Computer unterstützte Navigation für minimal invasive Intervention mit CT und C-Arm Systemen, 39. DGMP Tagung
- [84] Juennemann V. (2009), Navigating the body without radiation iGuide CAPPa takes needle guidance one step further, *AXIOM Innovations: The Magazine for Interventional Radiology, Cardiology and Surgery*, S. 20-21
- [85] Braun B. (2009), The optical navigation system Cappa C-Nav facilitates minimally-invasive surgical procedures, siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2009/workflow_solutions/HWS200905042e.pdf, geprüft am 14.05.2015

- [86] fiagon GmbH (2010), The new Dimension in Navigation: For Ear, Nose and Face Surgery, mikronmed.se/dokument/fiagon.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [87] Medtronic Navigation (2012), StealthStation® S7® AxiEM™ System: Information Center in the OR, neurosurgeonadelaide.com.au/pdf/s7salessheet.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [88] Wilson E., Yaniv Z., Lindisch D., Cleary K. (2008), A buyer's guide to electromagnetic tracking systems for clinical applications, *Proc. SPIE Medical Imaging 2008: Visualization, Image-guided Procedures, and Modeling*
- [89] Hummel J., Figl M., Kollmann Ch., Bergmann H., Birkfellner W. (2002), Evaluation of a miniature electromagnetic position tracker, *Medical Physics*, 29(10), S. 2205–2212
- [90] Kindratenko V. V. (2000), A survey of electromagnetic position tracker calibration techniques, *Virtual Reality: Research, Development, and Applications*, 5, S. 169–182
- [91] Plotkin A., Kucher V., Horen Y., Paperno E. (2008), A new calibration procedure for magnetic tracking systems, *IEEE Transaction on Magnetics*, 44(11), S. 4525–4528
- [92] Hu C., Meng M., Mandal M. (2006), The Calibration of 3-Axis Magnetic Sensor Array System for Tracking Wireless Capsule Endoscope, *Proc. Intelligent Robots and Systems*
- [93] Plotkin A., Paperno E. (2003), 3-D magnetic tracking of a single subminiature coil with a large 2-D array of uniaxial transmitters, *IEEE Transaction on Magnetics*, 39(5), S. 3295–3297
- [94] Hummel J., Figl M., Birkfellner W., Bax M. R., Shahidi R., Maurer Jr. C. R., Bergmann H. (2006), Evaluation of a new electromagnetic tracking system using a standardized assessment protocol, *Physics in Medicine and Biology*, 51(10), S. 205–210
- [95] Poulin F., Amiot L. P. (2002), Interference during the use of an electromagnetic tracking system under OR conditions, *Journal of Biomechanics*, 35(6), 733–737
- [96] LaScalza S., Arico J., Hughes R. (2003), Effect of metal and sampling rate on accuracy of Flock of Birds electromagnetic tracking system, *Journal of Biomechanics*, 36(1), S. 141–144,
- [97] Schuler N. B., Bey M. J., Shearn J. T., Butler D. L. (2005), Evaluation of an electromagnetic position tracking device for measuring in vivo, dynamic joint kinematics, *Journal of Biomechanics*, 38(10), S. 2113–2117
- [98] Schneider M., Stevens Ch. (2007), Development and testing of a new magnetic-tracking device for image guidance, *Proc. of SPIE Medical Imaging 2007: Visualization and Image-Guided Procedures*
- [99] Anderson P. T. (2007), Electromagnetic tracking method and system, US Patentanmeldung 2008/0186018 A1
- [100] Traub J., Kaur S., Kneschaurek P., Navab N. (2007), Evaluation of electromagnetic error correction methods, *Bildverarbeitung für die Medizin 2007*
- [101] Milne A. D., Chess D. G., Johnson J. A., King G. J. W. (1996), Accuracy of an electromagnetic tracking device: A study of the optimal operating range and metal interference, *Journal of Biomechanics*, 29(6), S. 791–793
- [102] Maier-Hein L., Franz A. M., Birkfellner W., Hummel J., Gergel I., Wegner I., Meinzer H. P. (2012), Standardized assessment of new electromagnetic field generators in an interventional radiology setting, *Medical Physics*, 39(6), S. 3424–3434

- [103] Wu X., Taylor R. H. (2003), A framework for calibration of electromagnetic surgical navigation system, *Proc. Intelligent Robots and Systems*
- [104] Frantz D. D., Wiles A. D., Leis S. E., Kirsch S. R. (2003), Accuracy assessment protocols for electromagnetic tracking systems, *Physics in Medicine and Biology*, 48(14), S. 2241–2251
- [105] Mucha D. (2009), Ein fehlerkompensierendes, elektromagnetisches Navigationssystem für die Kopf-Chirurgie, Dissertation, Technische Universität Berlin
- [106] Schicho K., Figl M., Donat M., Birkfellner W., Seemann R., Wagner A., Bergmann H., Ewers R. (2005), Stability of miniature electromagnetic tracking systems, *Physics in Medicine and Biology*, 50(9), S. 2089–2098
- [107] Nafis Ch., Jensen V., von Jako R. (2008), Method for evaluating compatibility of commercial electromagnetic (EM) microsensor tracking systems with surgical and imaging tables, *Proc. SPIE Medical Imaging 2008: Visualization, Image-guided Procedures, and Modeling*
- [108] Nixon M. A., McCallum B. C., Fright W. R., Price N. B. (1998), The effects of metals and interfering fields on electromagnetic trackers, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2, S. 204-218
- [109] Khalfin I. (2003), Method and apparatus for electromagnetic position and distortion compensation employing a modulated signal, US Patent 6,762,600, B2
- [110] Khalfin I., Jones Jr. H. (2001), Electromagnetic position and orientation system with distortion compensation employing wireless sensors, US Patent 6,369,564
- [111] Kaiser M. (2010), Kalibrierungsstrategien und Störkörperdetektion beim elektromagnetischen Tracking, Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [112] Kirsch S. (2000), Schilling Ch., Errors in systems using magnetic fields to locate objects, US Patent 6,553,326 B1
- [113] Osadchy D., Govari A. (1998), Detection of metal disturbance, US Patent 6,147,480
- [114] Nieminen J. M., Kirsch S. R. (2006), Eddy current detection and compensation, US Patent 7,353,125
- [115] Anderson P. T. (2007), System and method for tracking medical device, US Patentanmeldung 2009/0082665 A1
- [116] Härtle N. (2004), Method for determining tracking the position and orientation of a magnetic field sensor, US Patent 6,993,443 B2
- [117] Jones H. R., Khalfin I. (1998), Method and apparatus for determining electromagnetic field characteristic within a volume, US Patent 6,377,041 B1
- [118] Elfring R. (2012), Störungskompensation und Optimierung des elektromagnetischen Trackings in der computergestützten Chirurgie, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- [119] Gilbert H., Saglombeni A., Rakijas M., Kohnen K. (1998), Linear perturbation method for kalman filter tracking of magnetic field sources, US Patent 6,292,758
- [120] Roggers A., Higgins R., Hanf K., Farr J. (2006), Distributed array magnetic tracking, US Patentanmeldung 2006/0170417
- [121] Anderson P. T. (2007), Electromagnetic tracking method and system, US Patentanmeldung 2008/0238413 A1
- [122] Anderson P. T. (2007), System and method for minimizing electromagnetic field distortion in an electromagnetic tracking system, US Patentanmeldung 2009/0085559 A1

- [123] Scully J. T., Schneider M. R. (2005), DC magnetic-based position and orientation monitoring system for tracking medical instruments, US Patentanmeldung 2007/0078334 A1
- [124] Shalgi A., Nitzan Y., Bar-Tal M., Yaron U. (2006), Reduced field distortion in medical tools, US Patentanmeldung 2007/0255132 A1
- [125] Schneider M. R. (2004), System and method for measuring position and orientation using distortion-compensated magnetic field, US Patent 7,373,271
- [126] Schneider M. R., Conover Ch D. (1999), Position and orientation measuring with magnetic fields, US Patent 6,427,079
- [127] Govari A., Altmann A. C., Ephrath Y. (2006), Metal immunity in a reverse magnetic system, EU Patentanmeldung 1,776,923 A1
- [128] Bar-Tal M., Govari A. (2006), Distortion-immune position tracking using redundant measurements, EU Patent 1,887,309 A1
- [129] Govari A. (2002), High-gradient recursive locating system, US Patentanmeldung 2004/0068178
- [130] Dumoulin Ch. L. (1998), Error Compensation for device tracking system exploiting electromagnetic fields, US Patent 6,201,987 B1
- [131] Kirsch S. R., Schilling Ch., Brunner G. (2006), Assessment of metallic distortions of an electromagnetic tracking system, *Proc. SPIE 6141, Medical Imaging 2006: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display*
- [132] Knight R. (2007), *Physics for Scientists and Engineers: A Strategic Approach with Modern Physics and Mastering Physics*, 2. Auflage, Addison-Wesley
- [133] Jackson J. D. (1998), *Classical electrodynamics*, 3. Auflage, John Wiley & Sons Inc.
- [134] Simpson J., Lane J., Immer Ch., Youngquist R. (2001), Simple analytic expressions for the magnetic field of a circular current loop, ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010038494.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [135] Nocedal J., Wright S. (1999), *Numerical Optimization*, 3. Auflage, Springer-Verlag.
- [136] Ranganathan A. (2004), The Levenberg-Marquardt Algorithm, anath.in/docs/lmtut.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [137] Chong E., Zak S. (2001), *An introduction to optimization*, 2. Auflage, John Wiley & Sons Inc.
- [138] Gavin H. (2013), The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems, Department of Civil and Environmental Engineering - Duke University.
- [139] Madsen K., Nielsen H., Tingleff O. (2004), *Methods for non-linear least squares problems*, 2. Auflage, Technical University of Denmark
- [140] Bien T., Rose G. (2011), Distortion detection in AC electromagnetic tracking systems using multiple frequency signals, *International journal of computer assisted surgery (supplement)*, 6, S. 135-137
- [141] Bien T., Kaiser M., Rose G. (2011), Conductive distortion detection in AC electromagnetic tracking systems, *Proc. of the Eighth IASTED International Conference on Biomedical Engineering*
- [142] Bien T., Li M., Salah Z., Rose G. (2013), Distortion-immune electromagnetic tracking system: A new approach using quadratic excitation, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (supplement)*, 8, S. 137-138

- [143] Bien T., Li M., Salah Z., Rose G. (2013), Electromagnetic tracking system with reduced distortion using quadratic excitation, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 9, S. 323–332
- [144] National Instruments Corporation (2012), NI PXI-6281: 18 bit, 500 kS/s (mehrkanalig), 625 (einkanalig)
- [145] Keesman K. J. (2011), *System Identification: An Introduction*, Springer
- [146] Linear Technology Inc. (2000), LT1168: Low Power, Single Resistor Gain Programmable, Precision Instrumentation Amplifier
- [147] Northern Digital (2011), Aurora V2 User Guide, Canada
- [148] Hooke R., Jeeves T. (1961), "Direct search" solution of numerical and statistical problems, *Journal of the ACM*, 8(2), S. 212–229
- [149] Runkler T. A. (2010), *Data Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*, 1. Auflage, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH
- [150] The MathWorks (2013), fit: Fit curve or surface to data, mathworks.de/de/help/curvefit/fit.html, geprüft am 16.05.2015
- [151] Linear Technology Inc. (1996), LT1210: 1.1A, 35MHz Current Feedback Amplifier
- [152] National Instruments Corporation (2012), NI PXIe-8133: 1.73 GHz Quad-Core Embedded Controller for PXI Express, sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-267/lang/de, geprüft am 16.05.2015
- [153] The MathWorks Inc. (2011), Matlab, mathworks.de, geprüft am 16.05.2015
- [154] The MathWorks (2011), Data Acquisition Toolbox, mathworks.de/products/daq, geprüft am 16.05.2015
- [155] RWTH-Aachen (2013), RWTH-Mindstorms NXT Toolbox, mindstorms.rwth-aachen.de, geprüft am 16.06.2015
- [156] Rehse C. (2012), Roboter zur automatisierten Genauigkeitsevaluierung von einem elektromagnetischen Navigationssystem, Forschungsprojekt, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
- [157] Wiles A. D., Thompson D. G., Frantz D. D. (2004), Accuracy assessment and interpretation for optical tracking systems, *Proc. SPIE Medical Imaging 2004: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display*
- [158] Northern Digital (2005), NDI 6D Architect User Guide, ndigital.com/wp-content/uploads/2014/03/6DArchitect.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [159] Heinz Handels (2009), *Medizinische Bildverarbeitung*, 2. Auflage, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH
- [160] Knabner P., Barth W. (2013), *Lineare Algebra: Grundlagen und Anwendungen*, Auflage: 2013, Springer Spektrum
- [161] Baker M. (2013), Euclidean Space - building a 3D world, euclideanspace.com, geprüft am 08.03.2013
- [162] Diebel J. (2006), Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors swarthmore.edu/NatSci/mzucker1/e27/diebel2006attitude.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [163] Thrun S., Burgard W., Fox D. (2006), *Probabilistic Robotics*, 1. Auflage, The Mit Press
- [164] Slabaugh G. G. (2013), Computing Euler angles from a rotation matrix, staff.city.ac.uk/~sbbh653/publications/euler.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [165] Gruber D. (2000), The Mathematics of 3D Rotation Matrix, *Xtreme Game Developers Conference*

- [166] Gibbons J., Chakraborti S. (2003), *Nonparametric Statistical Inference*, 4. Auflage, Marcel Dekker Inc.
- [167] Birkfellner W., Watzinger F., Wanschitz F., Enislidis G., Kollmann C., Rafolt D., Nowotny R., Ewers R., Bergmann H. (1998), Systematic distortions in magnetic position digitizers, *Medical Physics*, 25(11), S. 2242–2248
- [168] Siemens AG (2009), *Artis zee/zeego - Operator Manual Volume 1: Safety, Technical and Administrative Information*, München
- [169] Vascular Solutions (2012), *Twin-Pass: Dual Access Catheters*, epsvascular.com/wp-content/uploads/2014/04/Twin-Pass-ML2784-Rev-B-Brochure.pdf, geprüft am 15.05.2015
- [170] AngioDynamics (2011), *NiT-Vu: High-Performance Micro Guidewire*, angiodynamics.com/uploads/pdf/081811-071051_Nit-Vu.pdf, geprüft am 15.05.2015
- [171] Saab M. (1999), *Thin wall heat shrinking tubing in medical device manufacturing*, ventionmedical.com/Documents/PHSTApplications.pdf, geprüft am 16.05.2015
- [172] Bien T., Rose G. (2011), *Elektromagnetisches Tracking für bildgesteuerte neurovaskuläre Eingriffe*, *Magdeburger Maschinenbau-Tage*
- [173] Academic Press (ed.) (2003), *Human Brain Function: Rigid body registration*, 2. Auflage, Academic Press
- [174] The Slicer Community (2010), *Slicer 3.6.1*, slicer.org, geprüft am 16.05.2015
- [175] Elastrat Sàrl (2012), *Head & Neck Rigid: Right internal carotid artery with 3 reusable aneurysms*, elastrat.ch/datasheets/H+N-R-A-EV-003.pdf, geprüft am 15.05.2015
- [176] The MathWorks (2013), *mle: Maximum likelihood estimates*, mathworks.de/de/help/stats/mle.html, geprüft am 10.05.2015
- [177] Deutsches Kupferinstitut, *Werkstoffdatenblätter*, eddy.dawa.de/daten-blatt/CuZn40Pb2.pdf, geprüft am 01.02.2015
- [178] NDT Education (2002), *Conductivity and Resistivity Values for Aluminum & Alloys*, nde-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity_Al.pdf, geprüft am 01.02.2015
- [179] Schlittgen R. (2012), *Einführung in die Statistik: Analyse und Modellierung von Daten*, 12. Auflage, Oldenbourg Verlag München, München

12 Lebenslauf

Name: Tomasz Bien
Geburtsdatum: 22.11.1983
Geburtsort: Legnica (Polen)
Geschlecht: männlich
Familienstand: verheiratet

Ausbildungsdaten

2007 – Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg Promotion an der Fakultät für Elektrotechnik

2005 – 2007 Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg
Studium der Elektrotechnik, Studienschwerpunkt: Elektrische Energiesysteme
Abschluss – Master of Science an der Otto-von-Guericke Universität
Abschlussnote (1.4)

2002 – 2007 Technische Universität Breslau (Polen)
Studium der Elektrotechnik, Studienschwerpunkt: Electrical Power Engineering
Abschluss – Diplomingenieur an der Technischen Universität Breslau
Abschlussnote (1.0)

1998 – 2002 Władysław Wyspiński Oberschule in Legnica (Polen)

Berufstätigkeit

2014 – Fiagon GmbH, Hennigsdorf,
01.01 – 31.05 Entwicklungsingenieur, seit 01.06 Entwicklungsleiter

Lebenslauf

- 2007 – 2013 Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg
Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Elektronik, Signalverarbeitung und
Kommunikationstechnik
- 2007 Vattenfall Europe Transmission GmbH, Berlin
Praktikant
- 2006 – 2007 Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg
Wissenschaftliche Hilfskraft im Institut für Elektrische Energiesysteme
- 2005 EnergiaPro, Legnica (Polen)
Praktikant