

Aktuelle Forschung Medizintechnik –
Latest Research in Medical Engineering

RESEARCH

Matthias Gräser

Mehrdimensionale Magnet-Partikel- Spektroskopie und -Bildgebung

Physikalische Modellierung
und Instrumentierung



Springer Vieweg

Aktuelle Forschung Medizintechnik – Latest Research in Medical Engineering

Editor-in-Chief:

Th. M. Buzug, Lübeck, Deutschland

Unter den Zukunftstechnologien mit hohem Innovationspotenzial ist die Medizintechnik in Wissenschaft und Wirtschaft hervorragend aufgestellt, erzielt überdurchschnittliche Wachstumsraten und gilt als krisensichere Branche. Wesentliche Trends der Medizintechnik sind die Computerisierung, Miniaturisierung und Molekularisierung. Die Computerisierung stellt beispielsweise die Grundlage für die medizinische Bildgebung, Bildverarbeitung und bildgeführte Chirurgie dar. Die Miniaturisierung spielt bei intelligenten Implantaten, der minimalinvasiven Chirurgie, aber auch bei der Entwicklung von neuen nanostrukturierten Materialien eine wichtige Rolle in der Medizin. Die Molekularisierung ist unter anderem in der regenerativen Medizin, aber auch im Rahmen der sogenannten molekularen Bildgebung ein entscheidender Aspekt. Disziplinen übergreifend sind daher Querschnittstechnologien wie die Nano- und Mikrosystemtechnik, optische Technologien und Softwaresysteme von großem Interesse.

Diese Schriftenreihe für herausragende Dissertationen und Habilitationsschriften aus dem Themengebiet Medizintechnik spannt den Bogen vom Klinikingenieurwesen und der Medizinischen Informatik bis hin zur Medizinischen Physik, Biomedizintechnik und Medizinischen Ingenieurwissenschaft.

Editor-in-Chief:

Prof. Dr. Thorsten M. Buzug
Institut für Medizintechnik,
Universität zu Lübeck

Editorial Board:

Prof. Dr. Olaf Dössel
Institut für Biomedizinische Technik,
Karlsruhe Institute for Technology

Prof. Dr. Heinz Handels
Institut für Medizinische Informatik,
Universität zu Lübeck

Prof. Dr.-Ing. Joachim Hornegger
Lehrstuhl für Mustererkennung,
Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr. Marc Kachelrieß
German Cancer Research
Center, Heidelberg

Prof. Dr. Edmund Koch
Klinisches Sensoring und Monitoring,
TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. Tim C. Lüth
Micro Technology
and Medical Device Technology,
TU München

Prof. Dr.-Ing. Dietrich Paulus
Institut für Computervisualistik,
Universität Koblenz-Landau

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim
Institut für Simulation und Graphik,
Universität Magdeburg

Prof. Dr.-Ing. Georg Schmitz
Lehrstuhl für Medizintechnik,
Universität Bochum

Matthias Gräser

Mehrdimensionale Magnet-Partikel- Spektroskopie und -Bildgebung

Physikalische Modellierung
und Instrumentierung

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Thorsten M. Buzug

 Springer Vieweg

Dr. Matthias Gräser
Universität zu Lübeck
Institut für Medizintechnik
Lübeck, Deutschland

Dissertation Universität zu Lübeck, 2016

Aktuelle Forschung Medizintechnik – Latest Research in Medical Engineering
ISBN 978-3-658-17644-0 ISBN 978-3-658-17645-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-17645-7

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort des Reihenherausgebers

Das Werk *Mehrdimensionale Magnet-Partikel-Spektroskopie und -Bildgebung – Physikalische Modellierung und Instrumentierung* von Dr.-Ing. Matthias Gräser ist der 24. Band der Reihe exzellenter Dissertationen des Forschungsbereiches Medizintechnik im Springer Vieweg Verlag. Die Arbeit wurde durch einen hochrangigen wissenschaftlichen Beirat dieser Reihe ausgewählt. Springer-Vieweg verfolgt mit dieser Reihe das Ziel, für den Bereich Medizintechnik eine Plattform für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zur Verfügung zu stellen, auf der ihre Ergebnisse eine breite Öffentlichkeit erreichen. Autorinnen und Autoren von Dissertationen mit exzellentem Ergebnis können sich bei Interesse an einer Veröffentlichung ihrer Arbeit in dieser Reihe direkt an den Herausgeber wenden:

Prof. Dr. Thorsten M. Buzug
Reihenherausgeber Medizintechnik
Institut für Medizintechnik
Universität zu Lübeck
Ratzeburger Allee 160
23562 Lübeck
Web: www.imt.uni-luebeck.de
Email: buzug@imt.uni-luebeck.de

Geleitwort

Das Werk *Mehrdimensionale Magnet-Partikel-Spektroskopie und -Bildgebung – Physikalische Modellierung und Instrumentierung* von Dr.-Ing. Matthias Gräser behandelt die Methoden der neuartigen nanopartikelbasierten Bildgebungsmodalität Magnetic Particle Imaging (MPI). Hier insbesondere die Nanopartikelspektroskopie zur Weiterentwicklung von Partikelmodellen. Magnetic Particle Imaging ist eine bildgebende Methode, die den Tracer-Verfahren zuzuordnen ist. Eine Suspension von Dextran-umhüllten Eisenoxid-basierten Nanopartikeln soll dabei dem Organismus appliziert werden. Die hoch sensitive und echtzeitfähige Abbildung der räumlichen Verteilung der Partikel ist das Ziel der Methode. Dazu wird über eine Maxwellspulenpaaranordnung zunächst ein Selektionsfeld erzeugt. Der Null-Durchgang des Selektionsfeldgradienten wird dann über ein sogenanntes Drive-Field periodisch im Raum verschoben, so dass sich eine gewünschte Abtasttrajektorie ergibt, die der Spur dieses Null-Durchganges (dem feldfreien Punkt – FFP) entspricht. Die Änderung der Magnetisierung der Nanopartikel wird über eine Empfangsspuleneinrichtung detektiert. Dabei macht die Nichtlinearität der Magnetisierung, die über die Langevin-Theorie in erster Näherung gut beschrieben werden kann, die Messung der Magnetisierungsänderung erst möglich, denn sie erzeugt eine Reihe von Oberwellen, die vom anregenden Drive-Field nicht überlagert werden. Da nicht nur die Magnetisierungsänderung der Partikel im direkten FFP-Durchgang, sondern auch die der Partikel etwas außerhalb zum Empfangssignal beitragen, ist eine Entfaltung des Signals erforderlich. Während das Prinzip bis hierher einfach zu beschreiben und zu verstehen ist, liegt die Kunst der Bildgebung im Detail. Das vorliegende Werk von Dr.-Ing. Gräser berichtet im Kern von der spektroskopischen Analyse von magnetischen Nanopartikeln

zur Voraussage der Bildgebungseigenschaften der Partikel für MPI. Das vorliegende Werk ist als herausragend zu beurteilen. Sprachlich schnörkellos reihen sich Originalbeiträge in dieser Arbeit aneinander.

Prof. Dr. Thorsten M. Buzug
Institut für Medizintechnik
Universität zu Lübeck

Danksagung

Zunächst möchte ich Prof. Thorsten M. Buzug danken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Promotion am Institut für Medizintechnik anzufertigen. Während dieser Zeit hat er mir mit wissenschaftlichem und persönlichem Rat geholfen und durch zahlreiche Diskussionen meine akademische Entwicklung gefördert. Außerdem möchte ich Ihm für die Unterstützung meiner Ideen und Projekte danken, die durch seine Rückendeckung erst erfolgreich wurden.

Für viele persönliche Gespräche, die mir manche private wie berufliche Situation erst verständlich machten, möchte ich Maren Bobek meinen tiefen Dank aussprechen. Auch für fachliche Gespräche, das immer offene Ohr und Ihre Hilfe bei den kleinen oder großen schaltungstechnischen Problemen bin ich Maren sehr dankbar.

Besonderer Dank gilt Dirk Steinhagen, der viele unmöglich erscheinende Probleme durch kreative Ideen in kürzester Zeit lösbar machte. Mein Dank gilt auch seinem stets zuvorkommenden Wesen, durch das er die Arbeitsatmosphäre im gesamten Institut positiv beeinflusst.

Frau Gisela Thaler möchte ich danken für ihre immerwährende Hilfsbereitschaft, ihre Unterstützung bei 1001 Fragen zum Universitätsalltag und ihr freundliches Wesen.

Herrn Reinhard Schulz habe ich viel Wissen über die Möglichkeiten und die Arbeitsabläufe der mechanischen Fertigung zu verdanken. Außerdem wären viele Aufbauten ohne seinen Rat und seine unerreichbare Präzision in der Fertigung nicht möglich gewesen.

Für den fachlichen Austausch möchte ich Andre, Thomas, Alexander, Ksenija, Martin, Matthias und Klaas danken, die mir stets mit Interesse und kreativen Ideen neue Denkanstöße gaben. Auch dem Rest des Instituts danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und viele interessante, fachliche und fachfremde Diskussionen.

Timo Sattel, Tobias Knopp und Marlitt Jönsson (geb. Erbe) möchte ich für die Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten und das stets offene Ohr danken. Danke, dass Ihr mir ein Vorbild wart und seid.

Mein besonderer Dank gilt Anselm von Gladiß für unzählige Diskussionen, sein Vertrauen, seine Toleranz für meine Softwareanfragen und für seine Freundschaft. Einen besseren Kollegen hätte ich mir nicht wünschen können.

Meiner Freundin Christine danke ich für die stets offenen Arme, ihre Wärme und Ihre unendliche Toleranz.

Meinen Eltern danke ich für Ihren tiefen Glauben an mich. Ebenso danke ich meinen Geschwistern, die mir in vielen Bereichen ein Vorbild sind. Auch dem Rest meiner Familie möchte ich für den Rückhalt und die immerwährende Unterstützung danken.

Kurzfassung

Die Magnet-Partikel-Bildgebung (engl. Magnetic Particle Imaging, MPI), ist ein medizinisches Bildgebungsverfahren, das die örtliche Verteilung von superparamagnetischen Eisenoxid-Nanopartikeln (engl. Superparamagnetic iron oxide nanoparticles, SPIONs) abbildet. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hervorragende räumliche und zeitliche Auflösung aus. Das rekonstruierte Bild enthält quantitative Informationen über das Kontrastmittel und bietet dadurch einen hohen diagnostischen Wert. Im Gegensatz zu anderen etablierten Verfahren, wie der Computer-Tomographie, existiert bis heute kein ausreichendes physikalisches Modell, um das Bild zu rekonstruieren. Die vorgestellten Rekonstruktionsmethoden, die auf physikalischen Modellen beruhen, gehen vom Langevin-Modell des Paramagnetismus aus. Dieses Modell berücksichtigt keine Hysterese oder dynamische Relaxationsprozesse. Durch diese Vereinfachung konnte sich die modellbasierte Rekonstruktion bisher nicht durchsetzen.

Das dynamische Magnetisierungsverhalten von Nanopartikeln ist bis heute nicht vollständig verstanden. Neben Größe und Kernmaterial, zeigen auch Form, Kristallstruktur, hydrodynamischer Durchmesser und Größenverteilung deutliche Auswirkungen auf die Partikeldynamik. Durch die Feldsequenzabhängigkeit dieser Auswirkungen lässt sich bisher kein allgemein gültiges Modell beschreiben.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung von Partikelmodellen für MPI sowie der Entwicklung eines mehrdimensionalen Magnet-Partikel-Spektrometers für die Analyse des Relaxationsverhaltens.

Um ein grundlegendes Verständnis der Auswirkungen der Partikelparameter und Feldsequenzen auf die Magnetisierungsantwort der Partikel zu erhalten, wird zunächst ein

Partikelmodell auf Basis stochastischer Differenzialgleichungen eingeführt. Das Kernmaterial der Partikel bildet einen kristallinen Festkörper, welcher je nach Struktur und Material unterschiedliche Eigenschaften besitzen kann. Sowohl diese Kristallstruktur als auch eine asymmetrische Form verursachen magnetische Anisotropien. Durch Anisotropien entstehen bevorzugte Magnetisierungsrichtungen, die im Partikel fixiert sind. Eine räumliche Änderung dieser Vorzugsrichtung ist nur durch die mechanische Rotation der Partikel möglich. Nach der Formulierung des Modells für immobilisierte Partikel wird zunächst die Auswirkung des Kristallgitters auf die Magnetisierungsantwort untersucht. Anschließend wird das Modell um die mechanische Rotation erweitert. Hierdurch ist es möglich, Partikel unter Einfluss von mehrdimensionalen Feldsequenzen zu untersuchen. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen einen großen Unterschied zwischen eindimensionalen und mehrdimensionalen Feldsequenzen. Vor allem der hydrodynamische Durchmesser der Partikel zusammen mit der Winkelgeschwindigkeit der Feldsequenz spielen für die Magnetisierung der Partikel eine große Rolle. Ist die hydrodynamische Reibung zu groß für die Winkelgeschwindigkeit der Feldsequenz, beginnen die Vorzugsrichtungen zu divergieren. Die Folge ist eine breitere Punktpreisfunktion mit geringerer Amplitude. Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines mehrdimensionalen Magnet-Partikel-Spektrometers. Hierzu wird zunächst eine Methode zur Signalseparation vorgestellt. Durch das gleichzeitige Senden und Empfangen wird das Partikelsignal von dem starken Anregungssignal überlagert. Ohne analoge Vorverarbeitung ist hierdurch keine Digitalisierung des Partikelsignals möglich. Aktuelle Bildgebungssysteme nutzen zur Signaltrennung analoge Filter. Nebenwirkungen dieser Methode sind der Verlust der Grundwelle des Partikelsignals und das Verbleiben der höheren Frequenzen des Anregungssignals in der Empfangskette. Eine Alternative zur Filterung stellt die Auslöschungsmethode dar. Hierzu wird dem Sendesignal ein gleiches Signal mit 180° Phase überlagert. Die Superposition dieser Signale führt zur Auslöschung des Anregungssignals über dem gesamten Frequenzband, ohne dass das Partikelsignal beeinflusst wird. In der Realität ist jedoch eine solche Phasengenauigkeit nicht zu erreichen. Als Folge reduziert sich die erreichbare Dämpfung auf ca. 70 dB. Diese Arbeit vergleicht die Vorteile von Filterung und Dämpfung und schlägt die Kombination beider Methoden vor. Sie bietet ausreichende Dämpfung des Anregungssignals bei optimaler Digitalisierung des Partikelsignals.

Aktuelle Spektrometer weisen im Gegensatz zu den Bildgebungsgeräten nur eine Anreizungsrichtung auf. Die Ergebnisse der Simulationen legen jedoch nahe, dass der Rückschluss von eindimensionalen Daten auf mehrdimensionale Daten nicht für jede Feldsequenz funktioniert. Daher wurde für dieses neue Gerät eine zweite Send- und Empfangskette integriert. Durch ausreichende Dimensionierung der Leistungsverstärker konnte zusätzlich eine Variabilität in den Feldsequenzen ermöglicht werden. Neben der meist verwendeten Lissajous-Trajektorie stehen ebenfalls die radiale und spirale Trajektorie für die Analyse zur Verfügung. Um die Vergleichbarkeit mit aktuellen kommerziellen und wissenschaftlichen MPI-Geräten zu sichern, werden die gleichen Frequenzen und Feldstärken verwendet. Mit Hilfe des neuen Messaufbaus ist es möglich die Ergebnisse der Simulationen zu verifizieren. Durch den vergrößerten Parameterraum der Messsequenz lassen sich unterschiedliche Mechanismen des Magnetisierungsprozesses gezielt untersuchen.

Neben der Nutzung des Spektrometers für die Partikelanalytik eignet es sich des Weiteren zur Aufnahme einer hybriden Systemfunktion. Durch die Applikation eines homogenen Offsetfeldes durch integrierte Stromquellen lässt sich jeder Punkt des FOV eines beliebigen MPI-Bildgebungsgeräts emulieren, das die zu Verfügung stehenden Trajektorien nutzt. Die in dieser Arbeit vorgestellte hybride Systemmatrix wurde für den Feldgenerator des ersten kommerziellen Bildgebungsgeräts von Bruker BioSpin entwickelt. Die rekonstruierten Bilder haben eine hohe Qualität und weisen teilweise eine bessere räumliche Trennung der Proben auf. Zusätzlich kann die Aufnahmezeit nahezu halbiert werden, ohne das Bildgebungsgerät zu blockieren. Für den klinischen Einsatz bedeutet diese Verfügbarkeit einen deutlichen ökonomischen Vorteil.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	xi
Physikalische Größen	xix
Abkürzungsverzeichnis	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	2
1.2 Gliederung der Arbeit	5
1.3 Publikationen	6
2 Physikalisches Prinzip	9
2.1 Grundlagen der Bildgebung	10
2.2 Bildeigenschaften	16
2.3 Rekonstruktion	17
2.4 Magnet-Partikel-Spektrometer	20
3 Elektrotechnische Betrachtung eines Magnet-Partikel-Messsystems	21
3.1 Grundlagen	22
3.2 Komponenten eines Magnet-Partikel-Messsystems	31
3.3 Signalerzeugung	32
3.4 Leistungsverstärker	33
3.5 Sendekette	33

3.6	Feldgenerator	35
3.7	Empfangskette	36
3.8	Aufnahmegeräte	44
4	Modellierung magnetischer Nanopartikel	45
4.1	Grundlagen	46
4.2	Eigenschaften von superparamagnetischen Nanopartikeln	47
4.3	Einleitung	48
4.4	Aktuelle Forschung	49
4.5	Material und Methoden	50
4.6	Validierung und Verifikation des Modells	57
4.7	Ergebnisse	59
4.8	Zusammenfassung und Diskussion	70
5	Mehrdimensionales Verhalten von magnetischen Nanopartikeln	71
5.1	Einleitung	72
5.2	Material und Methoden	73
5.3	Ergebnisse	81
5.4	Zusammenfassung und Diskussion	87
6	Analoge Signalverarbeitung in MPI und MPS	89
6.1	Einleitung	90
6.2	Theorie	91
6.3	Praktische Aspekte	96
6.4	Material und Methoden	102
6.5	Ergebnisse	103
6.6	Zusammenfassung und Diskussion	107
7	Entwicklung eines mehrdimensionalen MPS	111
7.1	Einleitung	112
7.2	Material und Methoden	112
7.3	Ergebnisse	126

7.4	Zusammenfassung und Diskussion	131
8	Emulation einer mehrdimensionalen Systemmatrix	133
8.1	Einleitung	134
8.2	Material und Methoden	135
8.3	Ergebnisse	141
8.4	Diskussion	145
9	Zusammenfassung und Ausblick	147
9.1	Zusammenfassung	148
9.2	Ausblick	150
10	Referenzen	153
	Eigene Arbeiten	153
	Allgemeine Arbeiten	160
	Handbücher und Datenblätter	176

Physikalische Größen

α	Dämpfungskonstante	Δ_{Signale}	Unterschied der Signalamplituden zwischen Anregungs- und Partikelsignal
α, β, γ	Richtungskosinusse		
\hat{a}_k	Komponenten der Transferfunktion	Δ_{ADC}	dynamischer Bereich des ADC
A	Fläche		
a	Größenverhältnis der Halbachsen bei Ellipsoiden	$\Delta_{\text{Auslöschung}}$	Verbesserung des Signalabstands durch die Nutzung einer Auslöschungseinheit
k_B	Boltzmann Konstante	d_{FOV}	Ausdehnung des FOV
$\tilde{c}(\mathbf{r})$	mit Punktspreizfunktion gefaltete Partikelkonzentration	η	Viskosität
C	Kapazität	\mathbf{E}	elektrisches Feld
$c(\mathbf{r})$	ortsvariable Partikelkonzentration	$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$	Einheitsvektoren
Δ_{Partikel}	dynamischer Bereich des Partikelsignals	E	Energie
		\mathbf{B}	Flussdichte
		f	Frequenz

f_r	Resonanzfrequenz	$\widehat{\mathbf{M}}(r)$	konzentrationsnormalisierte Magnetisierung
γ	gyromagnetisches Verhältnis		
\mathbf{G}	magnetischer Gradient	$M_{\mathbf{B}}$	Magnetisierung projiziert auf die Anregungsrichtung \mathbf{B}
G	Verstärkung	M_s	Sättigungsmagnetisierung des Kernmaterials
g	Gradientenfeldstärke		
\mathbf{H}	magnetische Feldstärke	\mathbf{n}	Partikelkoordinatensystem
I	Stromamplitude	$\mathbf{N}(t)$	thermisch verursachtes zufälliges Drehmoment
i	Strom		
\mathbf{J}	Stromdichte	N	Wicklungszahl
K_1, K_2	Anisotropiekonstanten der Kristallanisotropie	N_D	Demagnetisierungsfaktor
K_u	Anisotropiekonstante der uniaxialen Formanisotropie	$\mathbf{p}(\mathbf{r})$	ortsabhängige Spulensensitivität
		ϕ	magnetischer Fluss
k	Frequenzkomponente	φ	Phasenwinkel
ξ	Langevin-Parameter	P	Wirkleistung
L	Induktivität	Q	Blindleistung
$\hat{M}_{\mathbf{B}}$	Fouriertransformierte Magnetisierung projiziert auf die Anregungsrichtung \mathbf{B}	Q_c	Ladung
		\mathbf{r}	Ortsvektor
\mathbf{M}	Magnetisierung	R	Widerstand
\mathbf{m}	normalisierte Magnetisierung	$\hat{s}_k(\mathbf{r})$	Systemfunktionskomponente
μ_0	magnetische Permeabilitätskonstante		k
		σ	Standardabweichung

\mathbf{S}	Systemmatrix	$u_E(t)$	Empfangssignal
S	Scheinleistung	U	Spannungsamplitude
s	Streckenelement	$u(t)$	zeitabhängige Spannung
τ_B	Brownsche Relaxationszeit	V_{Kern}	Kernvolumen des Partikels
T	absolute Temperatur	V_{Hydro}	hydrodynamisches Volumen des Partikels
t	Zeit		
T_R	Trajektorienrepetitionszeit	ω	Winkelgeschwindigkeit
TF	Transferfunktion	\mathbf{W}	Gewichtungsmatrix
\hat{u}	Fouriertransformierte Spannung	X	Reaktanz
$u_A(t)$	Anregungssignal	x, y, z	Raumrichtungen
$u_C(t)$	Auslöschungssignal	Z	Impedanz

Abkürzungsverzeichnis

BSF	Band-Stop-Filter
BPF	Band-Pass-Filter
DV	differenzieller Verstärker
ESR	äquivalenter Reihenwiderstand, equivalent serial resistance
FFL	Feld-Freie-Line
FFL	Feld-Freier-Punkt
HSK	Hochstromkreis
LNA	rauscharmer Verstärker, engl. low noise amplifier
LV	Leistungsverstärker
MPI	Magnetic-Particle-Imaging
MPS	Magnet-Partikel-Spektrometer
MSPS	Megasample pro Sekunde
PC	Personal Computer