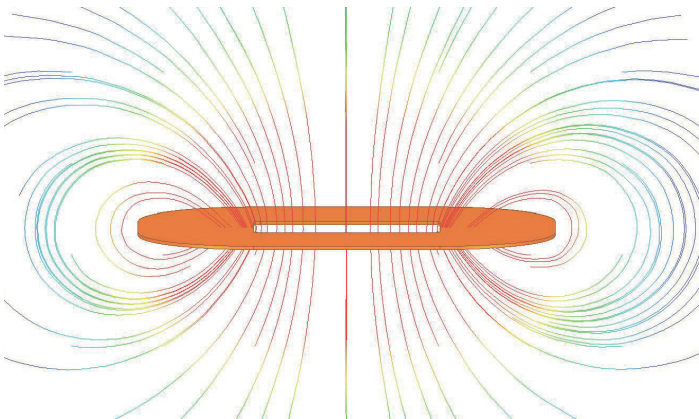


Florian Niedermeier

Methoden zur technischen Analyse von induktiven Ladesystemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge





Methoden zur technischen Analyse von induktiven Ladesystemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

durch die Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik

der Bergischen Universität Wuppertal genehmigte

Dissertation

Von:	Florian Niedermeier, M. Sc.
Geboren am:	10.03.1988 in Burghausen
Eingereicht am:	11.11.2020
Promotionsprüfung am:	30.04.2021
Gutachter*innen:	Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling Prof. Dr.-Ing. Annette Mütze

Wuppertaler Schriftenreihe zu Elektromobilität und
Energiespeichersystemen

Band 2

Florian Niedermeier

**Methoden zur technischen Analyse von induktiven
Ladesystemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8062-9

ISSN 2628-2003

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsvorhaben	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Einordnung und Aufbau induktiver Ladesysteme	5
2.1.1 Energieübertragung	7
2.1.2 Weitere Systemfunktionen	10
2.2 Kompensationsarten	13
2.3 Magnetische Materialeigenschaften	15
2.4 Verlustbetrachtungen	18
2.5 Spulengeometrien	20
2.6 Standardisierung	22
3 Ermittlung von Übertragungsparametern und Feldgrößen	27
3.1 Charakteristische Übertragungsparameter induktiver Koppler	27
3.2 Simulation	30
3.2.1 Finite Elemente Methode	30
3.2.2 Modellierung	32
3.2.3 Simulationsergebnisse	36
3.3 Messung	39
3.4 Verifikation	42
4 Analyseverfahren für induktive Ladesysteme	47
4.1 Übertragungsparameter von Systemen mit mehreren Primärspulen	48
4.2 Funktionaler Zusammenhang von Übertragungsparametern und Spulenposition	52
4.2.1 Approximation durch Polynome	52
4.2.2 Beschreibung der Methode	57
4.2.3 Anwendung und Verifikation	59
4.2.4 Optimierung der Parameter	65
4.3 Frequenzanalyse von Schaltungen mit nichtlinearen Elementen	68
4.3.1 Struktur induktiver Ladesysteme	68
4.3.2 Voraussetzungen	70
4.3.3 Beschreibung der Methode	72

4.3.4	Verifikation	79
5	Mehrstufige Analyse von induktiven Ladesystemen	87
5.1	Analyse und Vergleich charakteristischer Übertragungsparameter	87
5.2	Integration der Sekundärspule im Fahrzeug	90
5.2.1	Sekundärspule im freien Raum	92
5.2.2	Abschirmung durch plane Aluminiumplatte	92
5.2.3	Abschirmung durch dreidimensional angepasste Aluminiumplatte	94
5.3	Auswirkungen von rotatorischem Spulenversatz auf Übertragungsparameter	95
5.3.1	Rotation in einer Achse	97
5.3.2	Rotation in zwei Achsen	98
5.3.3	Rotation in drei Achsen	100
5.3.4	Diskussion	100
6	Zusammenfassung	103
A	Simulationsmodelle	105
B	Simulationsergebnisse	109
C	Messobjekte	129
D	Messergebnisse	131
	Literaturverzeichnis	xi
	Eigene Veröffentlichungen	xxi

Nomenklatur

Abkürzungen

DFT	diskrete Fourier-Transformation
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
FEM	Finite-Elemente-Methode
FOD	Fremdkörpererkennung (engl.: Foreign Object Detection)
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
ICNIRP	engl.: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission (engl.: International Electrotechnical Commission)
IEEE	engl.: Institute of Electrical and Electrotechnical Engineers
IPT	induktive Leistungsübertragung (engl.: inductive power transfer)
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl.: International Organization for Standardization)
LOP	Erkennung von lebendigen Objekten (engl.: Living Object Detection)
RP	engl.: Recommended Practice
SAE	Verband der Automobilingenieure (engl.: Society of Automotive Engineers)
TIR	engl.: Technical Information Report
VDA	Verband der Automobilindustrie
WPT	kabellose Leistungsübertragung (engl.: Wireless Power Transfer)

Konstanten

ε_0	Dielektrizitätskonstante im Vakuum
μ_0	Permeabilitätskonstante im Vakuum
e	Eulersche Zahl
π	Kreiszahl

Indizes

0	Nulleingangsgröße
---	-------------------

1	primärseitige Größe
2	sekundärseitige Größe
AC	Wechselgröße
DC	Gleichgröße
ges	Gesamtwert
max	Maximalwert
min	Minimalwert
N	nomineller Wert
n	normierte Größe
orig	Originalgröße
S	Schwellwert
Sat	bei Sättigung
soll	Sollgröße
V	Verlustgröße

Attribute

$x(t)$	zeitkontinuierliche Größe
$x[n]$	zeitdiskrete Größe
$X[k]$	diskrete Größe im Frequenzbereich
$\underline{x}, \underline{X}$	komplexe Größe
X	Effektivwert oder Betrag
$\Delta x, \Delta X$	Änderung einer Größe
$ x , X $	absoluter Betrag
\vec{x}, \vec{X}	vektorielle Größe
x', X'	gestrichene Größe, auf Primärseite bezogen
\mathbf{X}	Matrix
$x^{(i)}, X^{(i)}$	i -te Iteration
\hat{x}, \hat{X}	Scheitelwert
\bar{x}, \bar{X}	arithmetischer Mittelwert
x^{\max}, X^{\max}	Maximalwert
$P(x)$	Polynom in der Variablen x
$\deg(P(x))$	Grad des Polynoms $P(x)$

Formelzeichen

A	Kettenmatrix oder Koeffizientenmatrix
a	Steinmetz-Parameter oder Koeffizientenvektor

B	magnetische Flussdichte oder inverse Kettenmatrix
B_r	Remanenzflussdichte
b	Steinmetz-Parameter
C	Kapazität
c	Steinmetz-Parameter
D	elektrische Flussdichte
d	Abweichung
e	Energiefehler
E	elektrische Feldstärke
F	Fläche
f	Frequenz
f_{res}	Resonanzfrequenz
H	magnetische Feldstärke oder Hybridmatrix
H_k	Koerzitivfeldstärke
i	elektrischer Strom oder Laufvariable
i_l	Torstrom
J	elektrische Stromdichte
j	imaginäre Einheit
k	Kopplungsfaktor oder Frequenzindex
L	Induktivität
L_h	Hauptinduktivität
L_σ	Streuinduktivität
l	Laufvariable
M	Gegeninduktivität oder Iterationsmatrix
N	Windungszahl oder Abtastrate
m	Laufvariable oder Anzahl
n	Laufvariable oder Anzahl oder Windungsverhältnis oder Zeitindex
P	Leistung oder inverse Hybridmatrix
Q	Gütefaktor
R	elektrischer Widerstand oder Parametermatrix
R_m	magnetischer Widerstand
r	Polynom-Koeffizient
S	Scheinleistung oder Parametervektor
s	Polynom-Koeffizient
T	Zweitormatrix oder Periodendauer
t	Zeit oder Polynom-Koeffizient
t_d	zeitliche Distanz

u	elektrische Spannung
u_D	Dioden-Schwellspannung
u_t	Torspannung
X	Designmatrix
x	erste Komponente bei kartesischen Koordinaten
x_i	Zustandsvektor
x_{offset}	relativer Spulenversatz in x -Richtung
Y	Admittanz
y	zweite Komponente bei kartesischen Koordinaten
y_i	Regressand
y_{offset}	relativer Spulenversatz in y -Richtung
Z	Impedanz
z	Höhe oder dritte Komponente bei kartesischen Koordinaten
z_{c2c}	horizontaler Abstand von Primär- zu Sekundärspule (engl.: coil to coil)
z_{gc}	Unterbodenfreiheit (engl.: ground clearance)
z_x	standardisierte z -Klasse
α	maximale Normalabweichung
α_i	Eigenwert
γ	maximale Oberflächenabweichung
δ	Eindringtiefe
δ_{rel}	prozentualer Offset
ε	Permittivität
ε_r	relative Permittivität
ϵ	Fehlerterm
Θ	Pitch-Winkel
λ	Leistungsfaktor
μ	magnetische Permeabilität oder Konvergenzfaktor
μ_r	relative Permeabilität
ϱ	elektrische Ladungsdichte
σ	elektrische Leitfähigkeit
φ	Phasenwinkel
Φ	magnetischer Fluss oder Yaw-Winkel
Φ_h	magnetischer Hauptfluss
Φ_σ	magnetischer Streufluss
Ψ	Roll-Winkel
ω	Kreisfrequenz