Energiewandlung aus hochohmigen kapazitiven Stromquellen für die
Versorgung drahtloser Sensorik
aus dem elektrostatischen Feld von Hochspannungsleitungen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz

von Dipl.-Ing. Thomas Keutel

geboren am 30.12.1978 in Leipzig

Chemnitz, den 26.06.2012

Bibliographische Angaben

Energy Harvesting für die Versorgung drahtloser Sensorik aus dem elektrostatischen Feld von Hochspannungsleitungen

Keutel, Thomas

Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Dissertation

2012 – 127 S., 72 Abb., 6 Tab., 106 Lit., 3 Anl.

Stichworte:

- Energy Harvesting
- Hochohmige kapazitive Stromquelle
- DC-DC-Wandler

Reports on Measurements and Sensor Technology

Volume 1

Thomas Keutel

**Energiewandlung aus hochohmigen
kapazitiven Stromquellen für die Versorgung
drahtloser Sensorik aus dem elektrostatischen Feld
von Hochspannungsleitungen**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1489-1

ISSN 2197-9006

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mess- und Sensortechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Zurückblickend, auf die Zeit der Bearbeitung, so habe ich die wohl härteste Nuss ganz am Ende dieser Arbeit zu knacken. Wie auch immer, bei der Danksagung unbeabsichtigt jemanden zu vergessen, dem eine mehr oder weniger großen Rolle am Gelingen dieser Arbeit zu Teil wird, stellt mich vor große Schwierigkeiten.

All diesen Persönlichkeiten - jede einzelne Person herausragend auf Ihrem Gebiet -, die ich getroffen und mit denen ich diskutiert und gearbeitet habe, sei von ganzem Herzen gedankt. Sie alle namentlich zu nennen, würde den Rahmen sprengen, aber sie werden sich angesprochen fühlen.

Obwohl es absolut nicht fair all den Beteiligten gegenüber ist, komme ich nicht drum rum einige wenige herauszustellen. Mein besondere Dank gilt meiner Doktor Mutter, Frau Prof. O. Kanoun, die mir die Möglichkeit und gegen Ende der Arbeit die Freiräume gegeben hat, an diesem interessanten Thema zu arbeiten. Mein Dank gilt außerdem den Herren T. Motl und G. Griessbach, die mit Ihrer Kreativität und Ihrem Sachverstand der Arbeit diese Arbeit unterstützt haben.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir stets ein seelischer und moralischer Ruhepol waren.

Abschließend möchte ich mich bei Prof. L. Reindl bedanken, der sich bereit erklärt hat das Zweitgutachten dieser Arbeit zu übernehmen.

Chemnitz, den 26.06.2012

Thomas Keutel

Referat

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung von Konzepten zur Spannungswandlung, für die Nutzung hochohmiger kapazitiver Stromquellen, mit dem Ziel, drahtlose Sensorsysteme mit Energie zu versorgen. Als Stromquelle dient exemplarisch eine kapazitive Anordnung, realisiert durch eine zusätzliche Zylinderelektrode um das Leiterseil einer Hochspannungsübertragungsleitung. Nach einer ausführlichen Beschreibung der speziellen Quelleigenschaften werden Wandlertopologien analysiert mit dem Ziel, die Quelle bei möglichst hohem Leistungsaufkommen zu nutzen. Eine besondere Herausforderung für den Wandler stellt hierbei die Fähigkeit selbstständig und ohne zusätzliche Energie anzulaufen, dar. Identifiziert wurden sowohl eine Flusswandler- als auch eine Sperrwandler-Topologie, die anschließend evaluiert und für die besonderen Anforderungen eines drahtlosen Sensorsystems weiterentwickelt wurden. Außerdem wurde ein neuartiges Wandlungsprinzip vorgeschlagen, das auf dem kontrollierten Avalanche-Effekt basiert. Die drei sich grundsätzlich unterscheidende Wandlerstrukturen wurden bis zum Stadium eines Funktionsmusters konzipiert, entwickelt und sowohl im Labor als auch unter feldähnlichen Bedingungen in einem Hochspannungsprüffeld getestet. Kriterien für die experimentelle Evaluation sind z.B. die erreichbare Wandlerausgangsleistung, die Fähigkeit eines selbstständigen Anlaufs sowie die konfigurierbare Eingangsimpedanz. Abschließend stehen zwei vollwertige Wandlerstrukturen zur Verfügung, die die hohen Anforderungen eines drahtlosen Sensorsystems erfüllen. Der Flusswandler zeichnet sich unter anderem durch die primärseitig realisierbare Ansteuerung mit einer besonders hohen Robustheit aus. Damit eignet sich dieser Wandler für Anwendungen in rauen Umgebungen, wo Störungen und veränderliches Quellverhalten zu erwarten sind. Der Sperrwandler liefert im Vergleich zu den anderen untersuchten Wandlertopologien die höchste Ausgangsleistung, bei einem besonderen Konfigurationsvermögen hinsichtlich der Eingangsimpedanz. Wenn mit längeren Ausfällen der Quelle zu rechnen ist, wird jedoch eine Gerätebatterie erforderlich, die zu einer Begrenzung der Wartungsfreiheit führt. Der Avalanche-Wandler zeichnet sich durch den einfachen Aufbau und die einfache Miniaturisierung aus. Aufgrund des etwas niedrigen Energieaufkommens ist er insbesondere für die Versorgung von peripheren Anwendungen geeignet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	11
1.1	Motivation	11
1.2	Problemstellung.....	12
1.3	Zielsetzung und Struktur der Arbeit.....	14
2	Elektrostatistisches Feld als Energiequelle	17
2.1	Physikalische Grundlagen	18
2.2	Energieverfügbarkeit	21
2.3	Leistungsanpassung.....	23
2.4	Zusammenfassung der elektrischen Eigenschaften.....	27
3	Stand der Wissenschaft und der Technik.....	29
3.1	Anpassung an hochohmige kapazitive Stromquellen	29
3.2	Analyse von geeigneten Wandlertopologien	31
3.2.1	Geschaltete Spannungswandler.....	33
3.2.2	Ladungspumpe	41
3.2.3	Bewertung der Wandlertopologien	44
4	Schaltungsentwurf	46
4.1	Festlegungen zum Schaltungsentwurf.....	46
4.2	Wandler-Eingangsstufe	47
4.3	Flusswandler Konzept	49
4.3.1	Angepasstes Wandlerwirkprinzip	50
4.3.2	Wandleransteuerung.....	50
4.3.3	Weitere Teilmechanismen und deren Auslegung.....	56
4.4	Sperrwandler Konzept.....	59
4.4.1	Angepasstes Wandlerwirkprinzip	59
4.4.2	Wandleransteuerung	61
4.4.3	Weitere Teilmechanismen und deren Auslegung.....	65
4.4.4	Wandler Simulation.....	69
4.5	Avalanche-Wandler-Konzept.....	71
4.5.1	Angepasstes Wandlerwirkprinzip	73
4.5.2	Wandleransteuerung.....	74
4.5.3	Weitere Teilmechanismen und deren Auslegung.....	75
4.5.4	Wandler-Simulation	76
5	Evaluation.....	78
5.1	Versuchsaufbau	78
5.2	Laborversuch mit Spannungsquelle	80
	<i>Flusswandler</i>	80

<i>Sperrwandler</i>	83
<i>Avalanche-Wandler</i>	84
5.3 Feldversuch im Hochspannungslabor	87
<i>Flusswandler</i>	87
<i>Sperrwandler</i>	89
<i>Avalanche-Wandler</i>	91
5.4 Vergleich der Wandlerstrukturen.....	92
5.5 Bewertung der Ergebnisse und Ausblicke	94
6 Zusammenfassung	101
Anhang	104
A1 Lösung einer DGL 2.Ordnung	105
A2 Anlagen zur Flusswandlerstruktur	111
A3 Anlagen zur Sperrwandlerstruktur	114
Literatur.....	118

Glossar

Lateinische Buchstaben

A	allgemein Fläche
B	magnetische Flussdichte
C	Kapazität
c	Parameter
D	Verschiebestrom
D	Tastverhältnis
E	elektrische Feldstärke
F	Kraft
f	Frequenz
H	magnetische Feldstärke
I	Stromstärke
J	elektrischer Strom
j	imaginäre Einheit
K	Kriterium
L	Induktivität
N	Windungszahl
P	Leistung
Q	Ladung
R	Widerstand
S	Steuersignal
T	Periodendauer
t	Zeit
U	Spannung
V	engl. Spannung (Simulation)
W	Energie
X	Imaginärteil von Z
Z	komplexer Widerstand

Griechische Buchstaben

δ	Differentiationszeichen
φ	Winkelbezeichnung
ε	dielektrische Konstante
η	Wirkungsgrad
π	Kreiszahl

ρ	Ladungsdichte
τ	Zeitkonstante
ω	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

1, 2, ...	Nummerierung
LE	Leiter-Elektrode
EE	Elektrode-Erde
el	elektrisch
MZ	Mantelfläche (Zylinder)
max	Maximum
eff	Effektivwert
P	piezoelektrisch
out	Ausgang
in	Eingang
FW	Flusswandler
SW	Sperrwandler
AW	Avalanche-Wandler
C_{T+}	Transferkapazität
R_{amp}	Anpassungswiderstand
T_{ent}	Entladezeit
W_V	Verlustenergie
U_L	Last-Spannung
U_{BL}	Betriebsspannung im Belastungsfall
U_{GS}	Gate-Source Spannung
U_{CE}	Kollektor-Emitter Spannung
U_R	Spannung in Sperrichtung
U_{Br}	Durchbruchspannung
U_B	Betriebsspannung
U_C	Kollektor Spannung
U_F	Flussspannung
U_{SO}	Spannungshysterese Obergrenze
U_{SU}	Spannungshysterese Untergrenze
U_{DSK}	Speicherspannung (SOC)
V_{ctrl}	engl. Steuerspannung (Simulation)
L_{21}, L_{22}	Sekundärwicklung 1 und 2
$R_{DS,on}$	Bahnwiderstand

$N_{\text{pri}}, N_{\text{sec}}$	Windungsanzahl primär und sekundär
I_{R}	Strom in Sperrrichtung
I_{Bat}	Batteriestrom
I_{S}	Verschiebestrom
f_{Takt}	Taktfrequenz
P_{k}	kontinuierliche Leistung
t_{sim}	Simulationszeit

Abkürzungen

DC/DC	Gleichspannungswandler
ZVS	Zero Voltage Switching
ZCS	Zero Current Switching
RF	Radio Frequency Communication (Funk)
μC	μ Controller
FW	Flusswandler
SW	Sperrwandler
AW	Avalanche-Wandler
ESR	Serieller Ersatzwiderstand
NDR	Negativ Differential Resistance
RDSon	MOSFET Einschaltwiderstand
DSK	Doppelschichtkondensator
PWM	Pulsweitenmodulation
ADC	Analog Digital Wandler
DAC	Digital Analog Wandler
DIO	Digital Ein- Ausgang
IC	Integrated Circuit
CPU	Prozessor
WD	Watch Dog Timer
OCx	Clock Ausgang
.trans	Simulationsparameter

Bauelemente

C	Kondensator
D	Diode
D_z	Z-Diode
T	Transistor

M	MOSFET
S	Schalter
L	Induktivität
R	Widerstand
Bat	Batterie
DI	DIAC
TR	Transformator

Operatoren

$$\text{grad} \quad \text{grad } \vec{v} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\text{div} \quad \text{div } \vec{v} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

$$\text{rot} \quad \text{rot } \vec{v} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial y} v_z - \frac{\partial}{\partial z} v_y \\ \frac{\partial}{\partial z} v_x - \frac{\partial}{\partial x} v_z \\ \frac{\partial}{\partial x} v_y - \frac{\partial}{\partial y} v_x \end{pmatrix}$$

$$\Delta \quad \Delta v = \text{div}(\text{grad } v)$$

$$\nabla \quad \vec{\nabla} v = \text{grad } v$$