

Mario Mösch

Entwurf und Charakterisierung
von selbstadaptiven kinetischen
Energy-Harvestern

Entwurf und Charakterisierung von selbstadaptiven kinetischen Energy-Harvestern

**Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation**

**von
Dipl.-Ing. Univ. Mario Angelo Mösch
aus
Kulmbach**

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer
Zweitgutachter: Prof. Dr. Leonhard Reindl
Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2020

Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik
Universität Bayreuth

2020

Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik

Band 32

Mario Mösch

**Entwurf und Charakterisierung von selbstadaptiven
kinetischen Energy-Harvestern**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7580-9

ISSN 1862-9466

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

Vorwort der Herausgeber

Die zunehmende Automatisierung im industriellen Bereich (Industrie 4.0, Internet of Things) und im privaten Umfeld (Smart Home) ist häufig mit dem Einsatz von Funksensoren verknüpft. Solche Funksensoren arbeiten idealerweise autark, also ohne menschliche Eingriffe. Das gilt auch für ihre Energieversorgung, was beispielsweise einen Batteriewechsel ausschließt. Eine mögliche Alternative zur Energieversorgung ist die Wandlung nichtelektrischer Energie aus der Umgebung des Sensors in elektrische Energie, das so genannte Energy-Harvesting.

Im Hausbereich können etwa Vibrationsquellen kinetische Energy-Harvester speisen. Ändert sich jedoch die Vibrationsfrequenz der Quelle, sinkt die Energieernte stark. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines selbstadaptiven Energy-Harvesters, der seine Resonanzfrequenz an die Vibrationsfrequenz anpasst und dabei vollkommen autark läuft. Dazu wurden lineare Energy-Harvester analysiert, aufgebaut und charakterisiert. Auf dieser Grundlage wurde ein selbstadaptives System realisiert, das zudem einen Mikrocontroller, Sensoren für die Zustandssensorik und einen Schrittmotor für die Aktorik umfasst. Ein neuartiger Leitfaden zum energieoptimierten Betrieb selbstadaptiver Systeme wurde zuerst theoretisch ausgearbeitet und dann in das selbstadaptive System integriert.

Der realisierte selbstadaptive Energy-Harvester adaptiert seine Resonanzfrequenz mittels magnetischer Kräfte. Dabei wurde eine relative Adaptionsbandbreite von 23 % erreicht. Das System läuft vollständig autark und erntet in vielen Szenarien mehr Energie als ein nichtadaptierendes System. Die linearen Harvester bieten je nach Baugröße eine Ernteleistung von einigen hundert μW bis wenigen mW bei Vibrationsstärken, wie sie im Hausbereich typischerweise auftreten.

Mit dieser erfolgreichen Implementierung ist der Weg geebnet für den Einsatz mit einer energiesparenden elektrischen Schaltung.

Bayreuth im August 2020

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer, Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik der Universität Bayreuth. Mein erster und größter Dank geht darum an meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer für die fachlich wie persönlich erstklassige Betreuung, welche ein absoluter Glücksfall war und ihresgleichen sucht. Ich habe in den vier Jahren meiner Tätigkeit enorm viel dazu gelernt, sowohl durch die Forschungsarbeit als auch durch die Lehrtätigkeit.

Dem gesamten Lehrstuhl danke ich für vier tolle Jahre, die immer einen Sonderplatz in meinen Erinnerungen haben werden. Ein derart angenehmes und kompetentes Arbeitsumfeld muss man erst einmal finden. Ein besonderer Dank gilt dabei meinem brüderlichen Freund (der englische Ausdruck „Bro“ trifft es da am besten), Trauzeugen und Bürokollegen Ronny Peter, M.Sc. sowie Dipl.-Ing. Univ. Alice Fischerauer, die mich vor allem als Student unter ihre Fittiche genommen hat.

Ich danke auch Michael Weiss, Luca Bifano, Benjamin Ongherth, Vladimir Malashchuk, Lukas Diehl, Anna Baumann, Philipp Köferl und Niklas Krug, die im Rahmen studentischer Arbeiten oder als studentische Hilfskraft wertvollen Input geliefert haben.

Ich war als Doktorand in das Graduiertenkolleg „Energieautarke Gebäude“ der Technologie-Allianz Oberfranken (TAO) eingebunden. An dieser Stelle möchte ich den Verantwortlichen danken und dabei besonders den Kollegbetreuer Dr.-Ing. Florian Heberle herausstellen.

Dank geht auch nach Baden-Württemberg. Zum einen an Prof. Dr. Leonhard Reindl von der Universität Freiburg, der sich für das Zweitgutachten zur Verfügung gestellt hat, zum anderen an Dr. Daniel Hoffmann von der Hahn-Schickard-Gesellschaft in Villingen-Schwenningen für den interessanten fachlichen Austausch und die Leihgabe des Energiemanagements, ohne welches das zentrale Ziel dieser Arbeit nicht erreicht worden wäre.

Last, but not least danke ich meiner Frau Cornelia, meinen Eltern und meiner Oma für die Unterstützung, den Rückhalt und das Mut zusprechen während dieser Zeit. Auf Euch konnte ich mich immer verlassen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	x
Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik.....	1
1.1.1 Funksensornetzwerke.....	1
1.1.2 Quellen für Energy-Harvesting.....	2
1.1.3 Kinetisches Energy-Harvesting.....	3
1.2 Motivation und Zielstellung.....	7
1.3 Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen.....	9
2.1 Wandlung von Vibrationsenergie	9
2.1.1 Grundlagen zu mechanischen Schwingungen	9
2.1.2 Induktive Wandlung.....	11
2.2 Anpassung an Vibrationsquellen.....	14
2.2.1 Vergrößerung der Bandbreite	15
2.2.2 Anpassung der Resonanzfrequenz.....	18
2.2.3 Selbstadaptive Betriebsweise.....	21
3 Charakterisierung von Verbrauchern und verfügbaren Vibrationsquellen	23
3.1 Aufbau eines Funksensors als Beispiel eines typischen Verbrauchers	23
3.1.1 Energiesparende Betriebsweise	23
3.1.2 Anwendungsziel.....	24
3.1.3 Verwendete Hardware	25
3.1.4 Codeablauf	26
3.1.5 Messung des Verbrauchs	28
3.2 Mindestvibration zur Versorgung eines Verbrauchers	29
3.3 Vibrationsmessungen	30
3.3.1 Messaufbau und Datenverarbeitung.....	30
3.3.2 Messergebnisse.....	33
3.4 Folgen für das kinetische Energy-Harvesting.....	37

4 Optimierung der Ernteleistung von selbstadaptiven Energy-Harvestern	39
4.1 Hintergrund	39
4.1.1 Notwendigkeit einer Optimierung.....	39
4.1.2 Aktive und passive Adaption	40
4.2 Gestaltungsregeln.....	41
4.2.1 Einzeladaption	41
4.2.2 Periodische Adaption.....	42
4.3 Optimierung der Ernteleistung	43
4.3.1 Auslassen von Adaptionsschritten.....	43
4.3.2 Skalierung der Adaptionsbandbreite.....	44
4.4 Anwendung auf ein implementiertes System.....	49
5 Implementierung und Charakterisierung von linearen Energy-Harvestern	57
5.1 Aufbau der Prototypen	57
5.2 Elektromagnetische Simulation.....	60
5.3 Messaufbau	61
5.3.1 Prüfstand	61
5.3.2 Bestimmung der Messgrößen.....	62
5.4 Messergebnisse	64
5.4.1 Einfluss der elektromagnetischen Kopplung.....	64
5.4.2 Ernteleistung.....	66
5.4.3 Nichtlineares Verhalten.....	68
6 Implementierung und Charakterisierung von selbstadaptiven Energy-Harvestern....	71
6.1 Grundlegende Gedanken.....	71
6.2 Konkrete Umsetzung	72
6.3 Aufbau des Prototypen	73
6.3.1 Mechanisches Design.....	74
6.3.2 Wahl des Motors.....	77
6.3.3 Verwendete Elektronik.....	78
6.3.3.1 Mikrocontroller	78
6.3.3.2 Motortreiber	79
6.3.3.3 Beschleunigungssensor	80
6.3.3.4 Energiemanagement	80
6.4 Abstimmung der Einzelteile auf das Gesamtsystem.....	81
6.4.1 Betrieb des Schrittmotors	81
6.4.2 Bandbreite der Adaptivität	83

6.4.3 Beschleunigtes Vibrationsmessverfahren.....	86
6.4.4 Charakterisierung des Energiemanagements	90
6.4.5 Zyklische Arbeitsweise	93
6.5 Autarker selbstadaptiver Energy-Harvester	96
6.5.1 Betriebsfähigkeit.....	96
6.5.2 Messung unter regelmäßiger Adaption.....	98
6.6 Optimierte Betriebsweise	103
6.7 Bewertung und Verallgemeinerung.....	106
7 Zusammenfassung	108
8 Summary	111
Anhang	115
A Rechnungen	115
B Tabellen.....	116
C Bilder und Grafiken.....	118
Literaturverzeichnis.....	120
Eigene Publikationen	129

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Adaptionsbandbreitenskalierung
ADU	Analog-digital-Umsetzer
DMA	Speicherdirektzugriff (<i>Direct memory access</i>)
DSP	Digitale Signalverarbeitung (<i>Digital signal processing</i>)
EEPROM	Nichtflüchtiger, elektrischer Speicher (<i>Electrically erasable programmable read-only memory</i>)
EM	Energiemanagement
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FFT	Schnelle Fouriertransformation (<i>Fast Fourier transform</i>)
FIFO	Speicherverfahren (<i>First in – First out</i>)
FSK	Funksensorknoten
GPIO	Freie verfügbare Schnittstelle am Mikrocontroller (<i>General purpose input output</i>)
IDE	Integrierte Entwicklungsumgebung (<i>Integrated development environment</i>)
IT	Unterbrechung (<i>Interrupt</i>)
LED	Leuchtdiode (<i>Light-emitting diode</i>)
LUT	Umsetztabelle (<i>Lookup table</i>)
MCU	Mikrocontroller bzw. Mikrocontrollereinheit (<i>Mikrocontroller unit</i>)
MEMS	Mikroelektromechanische Systeme
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor-Legierung (chemische Zusammensetzung Nd ₂ Fe ₁₄ B)
NI	National Instruments
PWM	Pulsweitenmoduliert
RTC	Echtzeituhr (<i>Realtime clock</i>)
SPI	Seriellcs Bussystem (<i>Serial peripheral interface</i>)
STFT	Kurzzeit-Fouriertransformation (<i>Short-time Fourier transform</i>)
STM	STMicroelectronics
SW	Elektrischer Schalter (<i>Switch</i>)
WSN	Funksensornetzwerk (<i>Wireless sensor network</i>)

Symbolverzeichnis

a	Beschleunigung der Basis in m/s^2
$ a(t) _{\max}$	Maximale Beschleunigung eines Signals in m/s^2
A	Beschleunigungsamplitude der Basis in m/s^2
A_{\min}	Minimale Beschleunigungsamplitude zur Versorgung eines Verbrauchers in m/s^2
A_s, A_{sf}	Spektrum bzw. diskretes Spektrum von $a(t)$ in m/s^2
$ A_{sf} _{\max}$,	Maximum des diskreten Spektrums bzw. der größere Nachbarwert des
$ A_{sf} _{\max,2}$	Maximums in m/s^2
\vec{B}	Magnetischer Flussdichtevektor in T
B_r	Remanenzflussdichte in T
b	Breite des Biegebalkens in m
b_E, b_L, b_M	Breite des Eisenschenkels, der Aussparung bzw. des Magneten in m
C	Kapazität in F
c, c_e, c_m	Dämpfungskoeffizient, gesamt, elektrisch bzw. mechanisch in kg/s
D_a, D_i	Außen- bzw. Innendurchmesser der Spulen in m
d	Dicke des Biegebalkens in m
d_D	Drahtdurchmesser in m
d_E, d_M, d_S	Dicke des Eisenschenkels, des Magneten bzw. der Spule in m
d_{KT}	Abstand zwischen Koppel- und Tuningmagnet in m
E	E-Modul in N/m^2
E_C	Kondensatorenergie in J
E_{run}	Energiebedarf eines Mikrocontrollers während des Betriebs in J
F_a	Axiale Kraft auf einen Biegebalken in N
F_E	Eulersche Knicklast in N
F_{mag}	Magnetische Kraft in N
f	Frequenz in Hz
Δf_{AB}	Adaptionsbandbreite in Hz
f_a	Dominante Frequenz der Vibration in Hz
$f_{a,i}, f_{r,i}$	Vibrations- bzw. Resonanzfrequenz im i -ten Abschnitt in Hz
$f_{a,\text{mess}}$	Gemessene dominante Vibrationsfrequenz in Hz

Δf_a	Abstand zwischen f_a und dem Spektrumsmaximum in Hz
Δf_L	Grenzwert für Einzeladaptionen in Hz
f_n	Eigenfrequenz in Hz
$f_r, \Delta f_r, \overline{\Delta f_r}$	Resonanzfrequenz, deren Änderung einzeln und im zeitlichen Mittel in Hz
$f_{r,M}$	Unbelastete Resonanzfrequenz des selbstadaptiven Systems in Hz
$f_{r,\min}, f_{r,\max}$	Unter- bzw. Obergrenze des Adaptionbereichs in Hz
Δf_S	Abstand zwischen zwei Frequenzpunkten im Spektrum in Hz
H_C	Koerzitivfeldstärke in A/m
h_E, h_M	Höhe des Eisenschenkels bzw. des Magneten in m
I	Flächenträgheitsmoment in m^4
i	Strom in A
K	Elektromagnetischer Koppelkoeffizient in Wb/m
$K_i, K_K, K_L, K_R,$	K ermittelt nach verschiedenen Methoden in Wb/m
K_{sim}	
k	Federsteifigkeit in N/m
k_e	Zusätzliche, externe Federsteifigkeit in N/m
k_{eff}	Effektive Federsteifigkeit in N/m
k_n	Federsteifigkeit der nichtlinearen Bewegung in N/m
L_S	Induktivität der Spule in H
ℓ	Freie Biegelänge des Biegebalkens in m
ℓ_L, ℓ_R	Länge der Aussparung bzw. des freien Balkenendes in m
$\vec{\ell}_S$	Wegvektor der Spulenwindungen
m	Masse in kg
m_B, m_P	Masse des Biegebalkens bzw. der Punktmasse in kg
N	Anzahl an Spulenwindungen
N_{FFT}, N_M	Anzahl der Punkte für eine FFT bzw. Anzahl an Messpunkten
n	Anzahl an Temperaturmessungen pro Funkübertragung
P	Leistung in W
P_{dis}	Verlustleistung des EMs in W
P_{FSK}	Durchschnittliche Leistungsaufnahme eines Mikrocontrollers in W

P_L	Verlustleistung eines ohmschen Verbrauchers in W
P_{\max}	Ernteleistung unter Verwendung von $R_{L,\text{opt}}$ in W
$P_{\text{net}}, P_{\text{net},A}, P_{\text{net},B}, \Delta P_{\text{net}}$	Verfügbare Nettoleistung in W; Subindizes A und B für P_{net} vor und nach einer Adaption bzw. ΔP_{net} als Differenz davon
P_{sleep}	Leistungsaufnahme des Mikrocontrollers im Tiefschlaf in W
$P_T, P_{T,A}, P_{T,B}$	Adaptionsleistung in W; Subindizes A und B für P_T vor und nach einer ABS
$P_0, P_{0,A}, P_{0,B}$	Ernteleistung in W; Subindizes A und B für P_0 vor und nach einer ABS
Q, Q_e, Q_m	Gütefaktor, allgemein, elektrisch bzw. mechanisch
q	Leistungsquotient vor einer ABS
R^2	Bestimmtheitsmaß
R_L	Lastwiderstand in Ω
$R_{L,\text{äqu.}}$	Äquivalenter Lastwiderstand in Ω
$R_{L,\text{opt}}, R_{L,\text{opt},c}$	Optimaler Lastwiderstand, gemessen bzw. errechnet in Ω
R_S	Spulenwiderstand in Ω
s	Skalierungsfaktor einer ABS
s_{opt}	Optimaler Skalierungsfaktor
s_1, s_2	Nullstellen des Skalierungsfaktors
$\text{sinc}()$	Kardinalsinus ($\text{sinc}(x) := \sin(x) / x$)
T_{cycle}	Zeitabstand zwischen zwei Arbeitsphasen in s
t	Zeit in s
t_x	Relevanter Zeitpunkt in s
T	Dauer eines Zeitabschnitts in s
T_{Tx}	Dauer zwischen zwei Funkübertragungen in s
U_C	Kondensatorspannung in V
$U_{C,H}$	Hysteresespannung des EMs in V
$U_{C,\max}$	Maximale Kondensatorspannung in V
$U_{C,\min}$	Minimale Kondensatorspannung in V
U_L	Spannungsamplitude am Lastwiderstand in V
U_{out}	Spannung am Ausgang des EMs in V

u_{ind}	Induktionsspannung in V
V	Volumen in m^3
W_{net}	Verfügbare Nettoenergie in J
$W_{\text{T}}, W_{\text{T,A}}, W_{\text{T,B}}$	Adaptionsenergie in J; Subindizes A und B für W_{T} vor und nach einer ABS
$\tilde{W}_{\text{T}}(f)$	Adaptionsenergie pro Frequenzeinheit in J/Hz
$W_0, W_{0,A}, W_{0,B}$	Ernteenergie in J; Subindizes A und B für W_0 vor und nach einer ABS
$W_{0,i}, W_{\text{T},i}$	Ernte- bzw. Adaptionsenergie im i -ten Abschnitt in J
x, X	Absolute Bewegung bzw. Bewegungsamplitude der Schwungmasse in m
y, Y	Absolute Bewegung bzw. Bewegungsamplitude der Basis in m
z, Z	Relative Bewegung der Schwungmasse zur Basis bzw. Bewegungsamplitude in m
Z_{L}	Bewegungsamplitude im Leerlauf und bei Resonanz in m
$\alpha, \Delta\alpha, \overline{\Delta\alpha}$	Winkel des Tuningmagneten bzw. Änderung bzw. mittlere Änderung in $^\circ$
Φ	Verketteter magnetischer Gesamtfluss in Wb
φ	Magnetischer Fluss durch eine Einzelwindung in Wb
φ_z	Phasenwinkel zwischen z und y
ρ	Dichte in kg/m^3
τ, τ_0, τ_1	Dauer der Haltephase bzw. durchschnittliche Zeit zwischen zwei Adaptionen in s; für τ_0 bzw. τ_1 ist die Nettoleistung 0 bzw. P_{L}
$\omega, \omega_n, \omega_r$	Kreisfrequenz, allgemein, Eigenkreisfrequenz bzw. Resonanzkreisfrequenz in Hz
ζ, ζ_e, ζ_m	Dämpfungsgrad, gesamt, elektrisch bzw. mechanisch