

Leistungs- und Bandbreitensteigerung von Energy-Harvesting- Generatoren für energieautarke Systeme

Matthias Hunstig, Waleed Al-Ashtari, Tobias Hemsel, Walter Sextro
Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik, Universität Paderborn
Pohlweg 47 – 49, 33098 Paderborn
Tel. 05251/60-1802, Fax. 05251/60-1803
E-Mail: matthias.hunstig@uni-paderborn.de

Zusammenfassung

Energieautarke elektronische Systeme beziehen die zum Betrieb erforderliche Energie ausschließlich aus vorhandener Umgebungsenergie, beispielsweise aus Wärme, Licht-einfall oder Schwingungen. Diese Art der Energiegewinnung wird auch als „Energy Harvesting“ bezeichnet. Energieautarke Sensoren werden bereits vereinzelt eingesetzt und in einigen Jahren könnten derartige Systeme vielfältige Anwendung finden. Piezoelektrische Generatoren sind eine Möglichkeit zur Gewinnung elektrischer aus mechanischer Energie und erreichen eine hohe Leistungsdichte. Eine wesentliche Einschränkung beim ihrem Einsatz zur Energiegewinnung aus mechanischen Schwingungen ist die notwendige Übereinstimmung der Anregungsfrequenz und der optimalen Betriebsfrequenz des Generators, die durch Material und Aufbau des piezoelektrischen Wandler und durch die mechanischen und elektrischen Randbedingungen bestimmt wird. Aktuelle Entwicklungen zielen daher nicht nur auf eine Leistungssteigerung des Generators im optimalen Betriebspunkt, sondern auch auf eine Erhöhung der Bandbreite.

In diesem Beitrag wird ein Energy-Harvesting-Generator bestehend aus insgesamt drei piezoelektrischen Biegewandlern theoretisch und experimentell untersucht. Ein solcher Aufbau ist auch als „Cantilever Array“ bekannt. Reihen- und Parallelschaltung der Wandler sowie die Nutzung eines gemeinsamen oder einzelner Gleichrichter werden betrachtet. Die Eignung der verschiedenen Schaltungen zur Steigerung von Leistung und Bandbreite wird untersucht. Modellrechnungen und Versuchsergebnisse stimmen gut überein. Verglichen mit einem einzelnen Wandler ist mit drei Wandlern eine Leistungssteigerung von über 300 % und alternativ eine große Bandbreitensteigerung möglich. Zur Leistungssteigerung im schmalbandigen Betrieb ist die Reihenschaltung mit einer gemeinsamen Gleichrichterschaltung am effektivsten. Bei breitbandigem Betrieb ist die Spannungstoleranz der Anwendung entscheidend dafür, ob diese Schaltung oder die Reihenschaltung mit einzelnen Gleichrichtern sinnvoll ist.

Schlüsselwörter

Energieautarkes System, Energy Harvesting, piezoelektrischer Generator, Bandbreite

1 Einleitung

Der Begriff „Energy Harvesting“ bezeichnet die Umwandlung in der Umgebung vorhandener Energie in nutzbare elektrische Energie. Von Offshore-Windenergieanlagen mit Leistungen von mehreren MW bis hin zu Solarzellen oder piezoelektrischen Generatoren mit Leistungen unter einem mW ist die Spannbreite der Leistungen und Anwendungen beträchtlich. Im zuletzt beschriebenen Fall wird auch von „Micro Energy Harvesting“ gesprochen. Der Einsatz solcher Generatoren birgt großes Potential zum Betrieb vollständig autarker Systeme beispielsweise für medizinische Anwendungen, Zustandsüberwachung und verteilte Sensornetze. Piezoelektrische Energy-Harvesting-Generatoren, die elektrische Energie aus mechanischen Schwingungen gewinnen, haben aufgrund der hohen erreichbaren Leistungsdichte dabei in den letzten Jahren die größte Aufmerksamkeit erfahren.

In seiner Grundkonfiguration enthält ein energieautarkes System neben dem Generator drei Elemente: Einen Brückengleichrichter zum Umwandeln der erzeugten Wechselspannung in eine Gleichspannung, einen Kondensator zum Glätten der gleichgerichteten Spannung, der zusätzlich als Pufferspeicher dienen kann, und einen elektrischen Verbraucher, der die Hauptfunktion des System erfüllt. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau eines energieautarken Systems mit piezoelektrischem Generator.

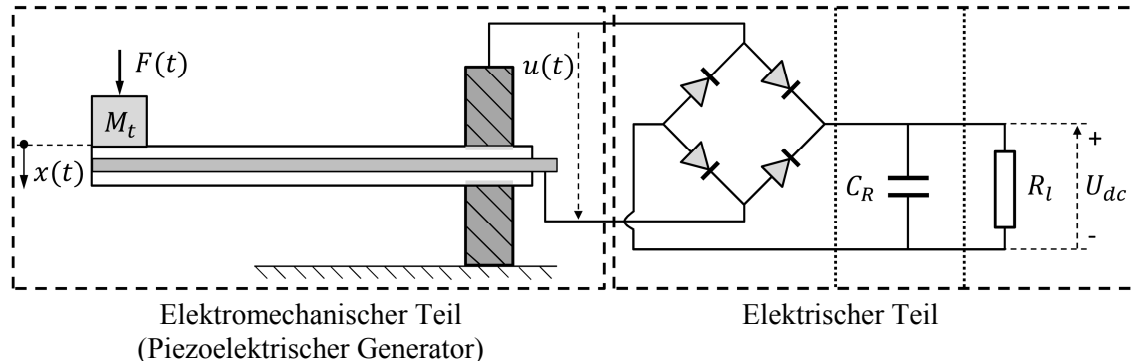


Bild 1: Energieautarkes System mit elektromechanischem Teil (piezoelektrischer Energy-Harvesting-Generator, links) und elektrischem Teil (rechts)

Ein wesentlicher Nachteil piezoelektrischer Generatoren ist, dass sie nur in einem sehr engen Frequenzbereich um eine Optimalfrequenz effektiv arbeiten. [AHH+12a] Wenn die Frequenz der Anregung außerhalb dieses Bereichs liegt, erreicht der Generator nur eine sehr geringe Leistung. Die Optimalfrequenz wird durch die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Generators und die angeschlossene elektrische Last bestimmt.

Von Tang u. a. [TYS10] stammt eine umfassende Darstellung der meisten in den letzten Jahren entwickelten Ansätze zur Steigerung der Bandbreite piezoelektrischer Generatoren. Darin wird unterschieden zwischen multimodalem Energy Harvesting, unterteilt in

hybride Systeme und Anordnungen mit mehreren Wandlern, und Methoden zur Anpassung der Optimalfrequenz, unterteilt in mechanische, magnetische und piezoelektrische Techniken. Eine anwendungsorientiertere alternative Einteilung ist die in manuelle und automatische Methoden zur Optimalfrequenzanpassung. Letztere können außerdem unterschieden werden in aktive Systeme, welche dauerhaft elektrische Leistung benötigen, und passive Systeme, die nur zum Einstellen der Frequenz Energie benötigen. Bis heute existiert kein automatisches System zur Frequenzanpassung, das sich mit der vom Generator erzeugten Energie zuverlässig selbst versorgen kann.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit dem Ansatz, in einem Generator mehrere piezoelektrische Wandler zur Steigerung von Leistung und/oder Bandbreite zu nutzen. In der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen hierzu: Beispielsweise betreibt Shahruz [Sha06a,b,c] eingehende theoretische Untersuchungen von Systemen mit vielen Biegebalken. Er betrachtet jedoch nur das mechanische Verhalten, die elektrischen Wechselwirkungen zwischen den piezoelektrischen Wandlern können damit nicht untersucht werden. Xue u. a. [XHW08] verwenden einen Aufbau mit zehn Wandlern unterschiedlicher Dicke und erreichen so eine Bandbreitenvergrößerung. Ihre Modellrechnungen vernachlässigen jedoch die elektrischen Wechselwirkungen. Ferrari u. a. [FFG+08] nutzen drei Wandler und stellen die Optimalfrequenz über eine Zusatzmasse ein. Ihr Modell erlaubt die explizite Beschreibung der elektrischen Wechselwirkungen. Zur Vermeidung von Leistungsübertragungen zwischen den einzelnen Wandlern wird für jeden Wandler ein Einweggleichrichter verwendet.

All diese Aufbauten müssen sehr exakt gefertigt werden und arbeiten bei einer unveränderlichen Frequenz. Wenn sich die Frequenz der Anregung ändert oder die Optimalfrequenz der Wandler sich durch Alterung verschiebt, sind sie nutzlos. Für den industriellen Einsatz sind sie daher wenig vielversprechend.

Für die von den Autoren in [AHH+13] vorgeschlagene und auch in diesem Beitrag untersuchte Anordnung von mehreren piezoelektrischen Wandlern mit einzeln einstellbarer Optimalfrequenz gelten diese Einschränkungen nicht. Dieser Aufbau nutzt die in [AHH+12a] vorgestellte Technik der magnetischen Versteifung, bei der die Optimalfrequenz eines Wandlers durch Einstellen des Abstands zwischen zwei Permanentmagneten jederzeit variiert werden kann. Damit ist der Aufbau unempfindlich gegenüber die Optimalfrequenz beeinflussenden Fertigungstoleranzen von piezoelektrischen Wandlern und mechanischer Struktur und anpassbar an veränderte Anregungen.

Beim Einsatz einer solchen Anordnung in einem autarken System sind die elektromechanischen Eigenschaften der einzelnen Wandler wie auch die elektrische Kopplung zwischen ihnen wichtige Parameter, die zur Steigerung von Leistung, Bandbreite oder Verlässlichkeit unterschiedlich gewählt werden können. Im Folgenden werden zunächst das elektrische und das elektromechanische Teilsystem eines autarken Systems mit piezoelektrischem Generator einzeln untersucht. Anschließend wird daraus abgeleitet das Verhalten eines Generators mit mehreren piezoelektrischen Wandlern bei unterschiedli-

cher Verschaltung untersucht. Zum Abschluss werden die theoretischen Ergebnisse durch Laborversuche validiert.

2 Analyse des elektrischen Teilsystems

Bild 2 zeigt das elektrische Teilsystem eines einfachen autarken Systems. Der Gleichrichter mit den vier Dioden D_1 , D_2 , D_3 und D_4 erzeugt aus der vom Generator erzeugten Wechselspannung $u(t)$ die Gleichspannung U_{dc} , die am Kondensator C_R und der Last R_l anliegt.

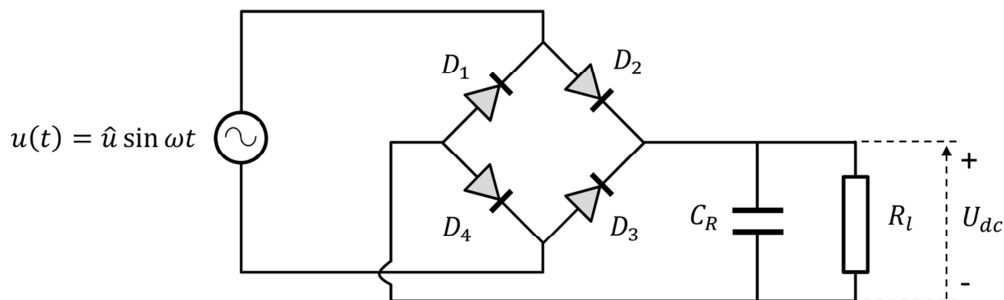


Bild 2: Elektrisches Teilsystem eines einfachen autarken Systems mit piezoelektrischem Generator als ideale Spannungsquelle

In den folgenden Betrachtungen wird die Wechselspannung $u(t)$ als ideal sinusförmig angenommen. Diese für hohe Lastwiderstände gültige Annahme wird in Abschnitt 3.2 erläutert. Bild 3(a) zeigt den Verlauf der Spannung über zwei Perioden der Länge $T = 2\pi/\omega$. Bild 3(b) zeigt die resultierende Kondensatorspannung U_{dc} für den Fall, dass der Kondensator C_R zum Zeitpunkt $t = 0$ spannungslos ist.

Im Verlauf von U_{dc} zeigen sich vier verschiedene Phasen: Die Sperrphase t_0 und die transiente Durchlassphase t_{tr} , welche bei geeignet gewählter Kapazität C_R nur zu Beginn der ersten Periode auftreten, und die Leerlaufphase t_{op} und die stationäre Durchlassphase t_{ss} , welche mit Ausnahme der ersten Periode in jeder Periode zweimal auftreten.

In der Sperrphase t_0 ist der Betrag der Wechselspannung $|u(t)|$ kleiner als $2U_d$, die Durchlassspannung von zwei Dioden. Am Ausgang des Gleichrichters entsteht daher keine Spannung.

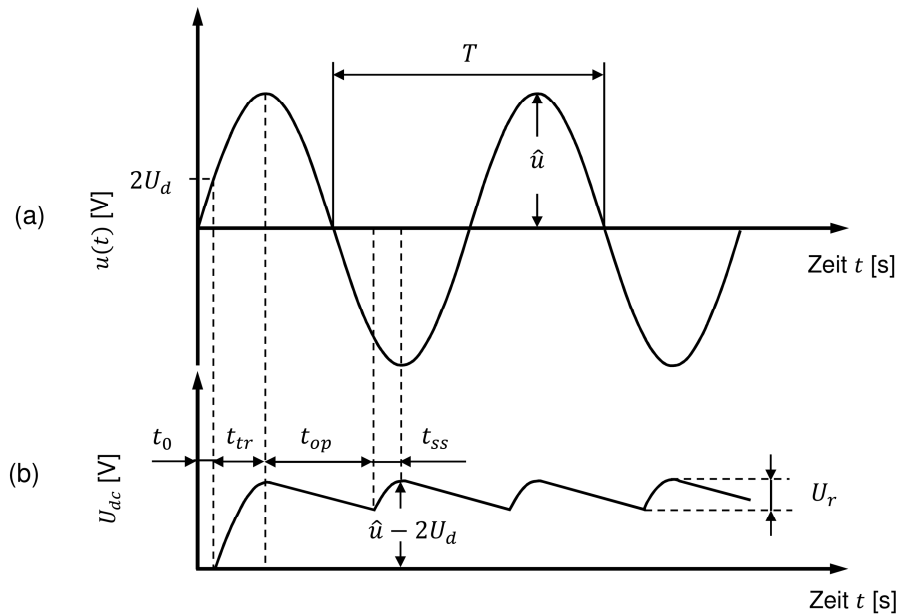


Bild 3: (a) Angelegte Wechselspannung $u(t)$ und (b) daraus erzeugte, an der Last anliegende Gleichspannung U_{dc}

Die Sperrphase t_0 endet und die transiente Durchlassphase t_{tr} beginnt, wenn der Betrag der Wechselspannung $|u(t)|$ die Durchlassspannung $2U_d$ erreicht. Innerhalb der transienten Durchlassphase ist eines der zwei Diodenpaare (D_1, D_3) und (D_2, D_4) leitend und das andere nicht. Vom Generator fließt Strom in die parallel geschalteten Elemente C_R und R_l . In der Darstellung in Bild 3(b) ist der Kondensator C_R so ausgelegt, dass er genau am Ende dieser Phase (annähernd) vollständig geladen ist. Wird ein Kondensator mit größerer Kapazität gewählt, so treten mehrere transiente Durchlassphasen auf, bis der Kondensator voll geladen ist.

Wenn der Betrag der Wechselspannung $|u(t)|$ sinkt und unter $U_{dc} + 2U_d$ fällt, sperren die Dioden. Der Generator ist nun von der Last getrennt, befindet sich also im Leerlauf. Während der Leerlaufphase t_{op} des Generators sinkt U_{dc} , da im Kondensator gespeicherte Energie in der Last R_l verbraucht wird. Die Leerlaufphase endet, wenn $|u(t)|$ erneut über $U_{dc} + 2U_d$ liegt. Damit beginnt die stationäre Durchlassphase t_{ss} , in der der Kondensator wieder vom Generator geladen wird. Gleichzeitig fließt ein Teil der generierten Ladung über den Widerstand R_l ab. Dieser Teil ist, da der Kondensator fast vollständig geladen ist, deutlich größer als der in den Kondensator fließende Teil. Dies bedeutet, dass in dieser Phase hauptsächlich der Widerstand R_l als Last für den Generator wirkt. Wenn $|u(t)|$ am Ende dieser Phase wieder unter $U_{dc} + 2U_d$ fällt, schließt sich die nächste Leerlaufphase an. Im stationären Zustand wechseln sich, wie in Bild 3(b) gezeigt, stationäre Durchlassphase und Leerlaufphase ab. Das zeitliche Verhältnis der beiden Phasen wird durch die Last R_l bestimmt: Bei kleinerem Lastwiderstand fällt die Kondensatorspannung in der Leerlaufphase schneller und dadurch beginnt die Durchlassphase früher.

3 Analyse des elektromechanischen Teilsystems

Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des piezoelektrischen Generators, der das elektromechanische Teilsystem des autarken Systems darstellt, sind eng verknüpft und abhängig von den mechanischen und elektrischen Randbedingungen. Im Folgenden werden zwei Zustände des Generators betrachtet: Im ersten Fall befindet sich der Generator im Leerlauf, die Elektroden sind offen. Im zweiten Fall ist eine rein ohmsche Last angeschlossen. Bild 4 zeigt den piezoelektrischen Generator in diesen beiden Betriebszuständen.

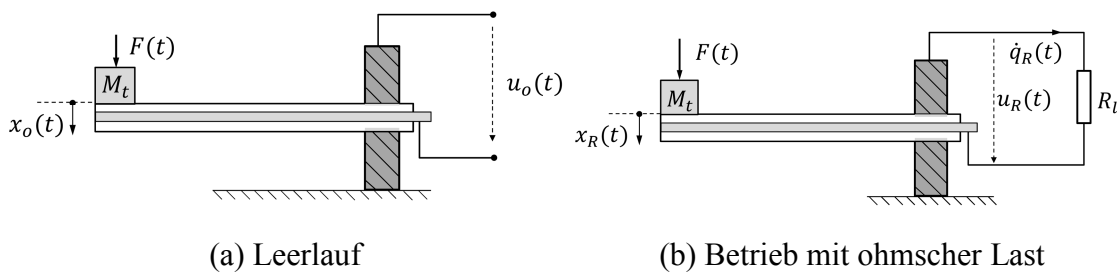


Bild 4: Piezoelektrischer Generator als elektromechanisches Teilsystem eines einfachen autarken Systems in zwei Betriebszuständen

Der Generator wird durch die Kraft $F(t) = \hat{F} \sin \omega t$ angeregt. Dabei ist \hat{F} die Amplitude der Anregungskraft und ω deren Kreisfrequenz. In Anwendungen wird ein piezoelektrischer Generator üblicherweise auf einer schwingenden Struktur befestigt. Der Biegeelement wird dann durch eine Fußpunktbeschleunigung angeregt. Eine solche Anregung kann jedoch leicht in die äquivalente Kraftanregung mit der Amplitude $M\hat{a}_b$ an der Spitze des Biegeelementes umgerechnet werden. Dabei ist M die modale Masse des Generators und \hat{a}_b die Amplitude der Fußpunktanregung. Da diese Umformung die Systemanalyse vereinfacht, ist sie in der Literatur weit verbreitet.

Zur Analyse des elektromechanischen Verhaltens des piezoelektrischen Generators werden im Folgenden Übertragungsfunktionen von der Kraftanregung zur generierten Spannung verwendet. Diese wurden mit Hilfe elektrischer und mechanischer Ersatzmodelle für piezoelektrische Generatoren bestimmt, wie sie für den Fall mit ohmscher Last beispielsweise von Richter u. a. [RTW09] beschrieben werden.

3.1 Leerlauf

Beim Betrieb mit offenen Elektroden wie in Bild 4(a) sind $x_o(t)$ und $u_o(t)$ die Auslenkung des Biegeelementes und die erzeugte Leerlaufspannung. Letztere kann als $u_o(t) = \hat{u}_o \sin(\omega t + \varphi_{u_o})$ ausgedrückt werden, mit der Spannungsamplitude \hat{u}_o und der Phasenverschiebung φ_{u_o} . Mit den Laplace-Transformierten $F(s)$ und $U_o(s)$ von Anregungskraft und Leerlaufspannung ist die Übertragungsfunktion von Kraftanregung zu Leerlaufspannung

$$\frac{U_o(s)}{F(s)} = \frac{\alpha}{MC_p s^2 + BC_p s + KC_p + \alpha^2}. \quad (1)$$

Darin beschreibt M die modale Masse des piezoelektrischen Wandlers, B seine Dämpfung, K seine Steifigkeit, C_p seine elektrische Kapazität und α den Koppelfaktor zwischen elektrischem und mechanischem Verhalten. Mit der Serienresonanzfrequenz ω_s , der Parallelresonanzfrequenz ω_p und dem Dämpfungsmaß ζ ergeben sich aus dieser Übertragungsfunktion unter Ausnutzung der Zusammenhänge

$$\omega_s = \sqrt{K/M}, \quad (2)$$

$$B = 2\zeta M \omega_s, \quad (3)$$

$$\alpha^2 = M(\omega_p^2 - \omega_s^2)C_p \quad (4)$$

Amplitude und Phase der Leerlaufspannung als

$$\hat{u}_o = \frac{(\alpha/MC_p)\hat{F}}{\sqrt{(\omega_p^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_s\omega)^2}}, \quad (5)$$

$$\varphi_u = -\tan^{-1}\left(\frac{2\zeta\omega_s\omega}{\omega_p^2 - \omega^2}\right). \quad (6)$$

3.2 Betrieb mit ohmscher Last

Beim Betrieb des Generators an einer ohmschen Last wie in Bild 4(b) ist $x_R(t)$ die Auslenkung des Biegewandlers und $u_R(t)$ und $\dot{q}_R(t) = u_R(t)/R_l$ sind die an der Last anliegende Spannung und der durch die Last fließende Strom. Die Übertragungsfunktion von der Kraftanregung zur erzeugten Spannung ist

$$\frac{U_R(s)}{F(s)} = \frac{\alpha R_l s}{MR_l C_p s^3 + (M + BR_l C_p)s^2 + (B + KR_l C_p + \alpha^2 R_l)s + K}. \quad (7)$$

Mit den Zusammenhängen (2) bis (4) ergeben sich daraus Amplitude und Phase der erzeugten Spannung als

$$\hat{u}_R = \frac{(\alpha R_l \omega / M) \hat{F}}{\sqrt{[\omega_s^2 - (1 + 2\zeta\omega_s R_l C_p)\omega^2]^2 + \omega^2 [2\zeta\omega_s + R_l C_p(\omega_p^2 - \omega^2)]^2}}, \quad (8)$$

$$\varphi_{u_R} = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega [2\zeta\omega_s + R_l C_p(\omega_p^2 - \omega^2)]}{\omega_s^2 - (1 + 2\zeta\omega_s R_l C_p)\omega^2}\right). \quad (9)$$

Ein Vergleich der Gleichungen (5) und (8) bzw. (6) und (9) zeigt, dass die generierte Spannung an einer ohmschen Last stets geringer ist als im Leerlauf und dass die Phasenlage der Spannung auch bei rein ohmscher Last von dieser beeinflusst wird. Bei geringer Last R_l ändert sich die Spannung in Amplitude und Phase beim Wechsel zwischen

den beiden Betriebszuständen stark. Bei ausreichend hoher Last R_l ist die Auswirkung des Lastwechsels auf den Generator jedoch gering und es kann von einem näherungsweise sinusförmigen Spannungssignal ausgegangen werden.

4 Generator mit mehreren piezoelektrischen Wandlern

Werden in einem Generator mehrere piezoelektrische Wandler genutzt, können diese in Reihe oder parallel geschaltet werden. Außerdem können die Wandler einen gemeinsamen oder einzelne Gleichrichter nutzen. Diese beiden Möglichkeiten werden im Folgenden als direkte und indirekte Zusammenschaltung bezeichnet. Bild 5 zeigt die sich so ergebenden vier Schaltungsmöglichkeiten am Beispiel von zwei Wandlern.

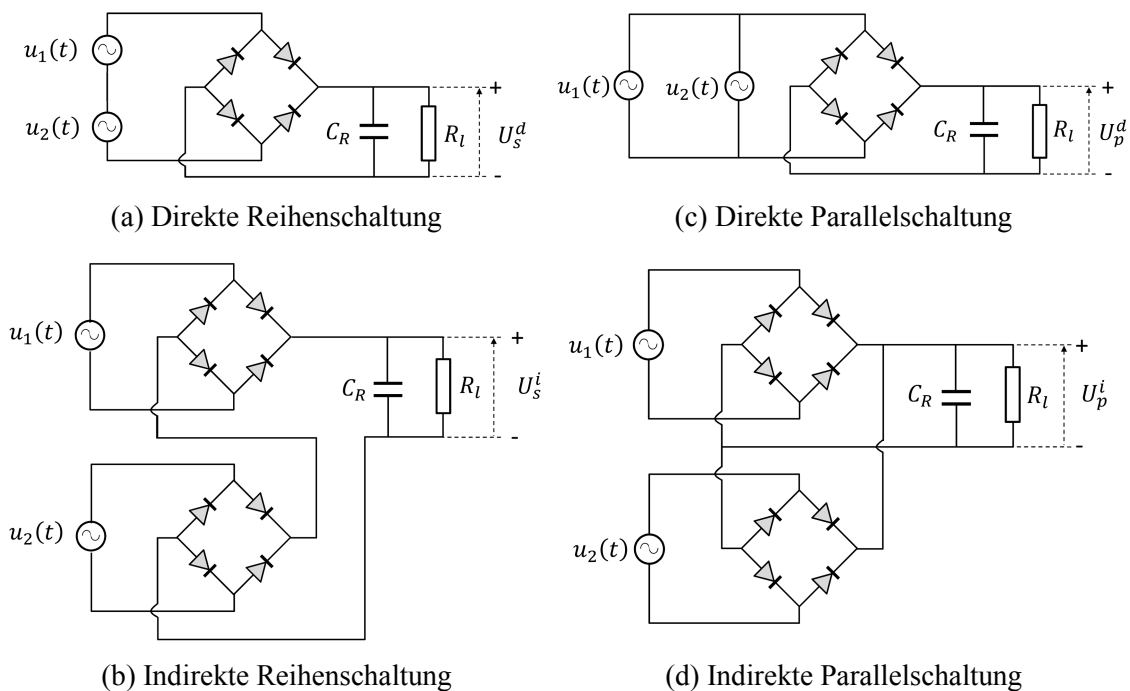


Bild 5: Schaltungsmöglichkeiten in einem autarken System mit zwei piezoelektrischen Wandlern (als Spannungsquellen dargestellt)

Prinzipiell addieren sich bei einer Reihenschaltung mehrerer Wandler die einzelnen erzeugten Spannungen und bei einer Parallelschaltung die erzeugten Ströme. In vielen potentiellen Anwendungen piezoelektrischer Energy-Harvesting-Generatoren ersetzen diese konventionelle Batterien. Wesentlich ist dabei, dass der piezoelektrische Generator eine der Batterie vergleichbare Spannung liefert. Wenn ein einzelner Wandler hierzu nicht ausreicht, empfiehlt sich für eine solche Anwendung daher eine Reihenschaltung.

4.1 Direkte Reihenschaltung

Wenn die Wandler wie in Bild 5(a) vor der Gleichrichtung in Reihe geschaltet werden, sollten sie möglichst identisch und auf die gleiche Optimalfrequenz abgestimmt sein. Andernfalls verhindern u. U. die Amplitudenunterschiede und Phasenverschiebungen zwischen den von den einzelnen Wandlern erzeugten Spannungen die erwünschte Spannungserhöhung.

Die Amplitude \hat{u}_i der von den einzelnen Wandlern in einem Generator mit n Wandlern generierten Spannung kann mit Gleichung (8) berechnet werden. Wenn alle Wandler identisch sind, also auch die gleiche Optimalfrequenz haben und phasengleiche Spannungen erzeugen, ist die Amplitude der insgesamt erzeugten Spannung $n \cdot \hat{u}_i$. Die gleichgerichtete Spannung hat den Wert

$$U_s^d = \begin{cases} n \cdot \hat{u}_i - 2U_d & \text{wenn } n \cdot \hat{u}_i > 2U_d \\ 0 & \text{wenn } n \cdot \hat{u}_i \leq 2U_d \end{cases} \quad (10)$$

4.2 Indirekte Reihenschaltung

Bei indirekter Reihenschaltung wie in Bild 5(b) werden die von den Wandlern erzeugten Wechselspannungen voneinander unabhängig gleichgerichtet und erst danach in Reihe geschaltet. Für ein gut funktionierendes System müssen die Wandler hierbei nicht notwendigerweise identisch sein. Eine solche Schaltung kann daher zur Erhöhung der Bandbreite des Generators genutzt werden.

Die vom k . Wandler erzeugte Gleichspannung ist

$$U_k = \begin{cases} \hat{u}_k - 2U_d & \text{wenn } \hat{u}_k > 2U_d \\ 0 & \text{wenn } \hat{u}_k \leq 2U_d \end{cases} \quad (11)$$

und die an der Last anliegende Gesamtspannung ist

$$U_s^i = \sum_{k=1}^{k=n} U_k. \quad (12)$$

Wenn nur ein Teil der Wandler die erforderliche Durchlassspannung erreicht, was insbesondere bei großen Unterschieden zwischen den Optimalfrequenzen der Fall ist, stellen die übrigen Wandler und Gleichrichter eine zusätzliche Last dar. Die theoretische Beschreibung dieser Last ist sehr aufwendig. Die experimentellen Ergebnisse zeigen aber, dass die Gleichungen (11) und (12) auch in diesem Fall mindestens näherungsweise gelten.

4.3 Parallelschaltung

Sowohl die direkte als auch die indirekte Parallelschaltung haben wesentliche Nachteile. Zwar können beide Schaltungsvarianten mit mehreren identischen Wandlern zur Erhöhung des erzeugten Stroms eingesetzt werden. Bei auch nur leicht unterschiedlichen Wandlern jedoch stellen diese bei direkter Parallelschaltung für die jeweils anderen Wandler zusätzliche Lasten dar und bei indirekter Parallelschaltung generiert effektiv nur der Wandler Leistung, welcher die höchste Spannung erzeugt.

Wegen dieser Nachteile und der oben beschriebenen Vorteile einer Reihenschaltung in vielen Anwendungen werden die Eigenschaften der Parallelschaltungen an dieser Stelle nicht detaillierter beschrieben und im Folgenden nicht experimentell untersucht.

5 Experimentelle Validierung

Bild 6 zeigt die Anordnung von drei piezoelektrischen Biegewandlern mit einzeln einstellbarer Optimalfrequenz, welche zur Validierung der Modellrechnungen genutzt wurde. Verwendet wurden Bimorph-Biegewandler von Johnson Matthey (SITEX-Module 427.0085.11Z: Länge 45 mm, Breite 7,2 mm, Gesamtdicke 0,78 mm), die mit einer freien Länge von 40 mm eingespannt wurden. Die Biegewandler sind voneinander und von der Grundplatte elektrisch isoliert. Durch magnetische Versteifung [AHH+12a] können ihre Optimalfrequenzen unabhängig voneinander einzeln eingestellt werden. Hierzu wurden Magnete von HKCM Engineering genutzt (Typ Q08.5x02x01.5Ni48H, Maße 8,5 x 2 x 1,5 mm³), deren Abstand mit Rändelmuttern einstellbar ist. Für die Modellrechnungen wurden die elektromechanischen Parameter der Biegewandler aus Geometrie und Materialdaten wie in [AHH+12b] beschrieben bestimmt und der Einfluss der Magnetkräfte mit Formeln aus [AHH+12a] berechnet.

Für das elektrische Teilsystem wurden Brückengleichrichter bestehend aus vier Schottky-Dioden und ein Kondensator mit einer Kapazität von 200 μF verwendet. Das System soll als Demonstrator zum Betrieb eines Temperatursensor (Kat. Nr. 30.2018 von TFA Dostmann) genutzt werden. Dieser ist für den Betrieb mit 1,5 V-Knopfzellen ausgelegt und hat einen Eingangswiderstand von 360 k Ω . Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein Widerstand dieser Größe als Last verwendet.

Das System wurde auf einen elektrodynamischen Shaker montiert und von diesem zu harmonischen Schwingungen angeregt. Mit Laservibrometern wurden die Schwinggeschwindigkeit der Grundplatte und relativ dazu die Schwinggeschwindigkeit der Spitze des betrachteten Biegewandlers gemessen. Anhand der Geschwindigkeitsmessung wurde die Eingangsspannung des Shakers in jedem Betriebspunkt manuell so angepasst, dass die Grundplatte mit einer Beschleunigungsamplitude von 5,5 m/s² schwingt. Diese Amplitude wurde so gewählt, dass ein Generator mit einem Wandler bei seiner Optimalfrequenz gerade die erforderliche Spannung von 1,5 V erzeugt.

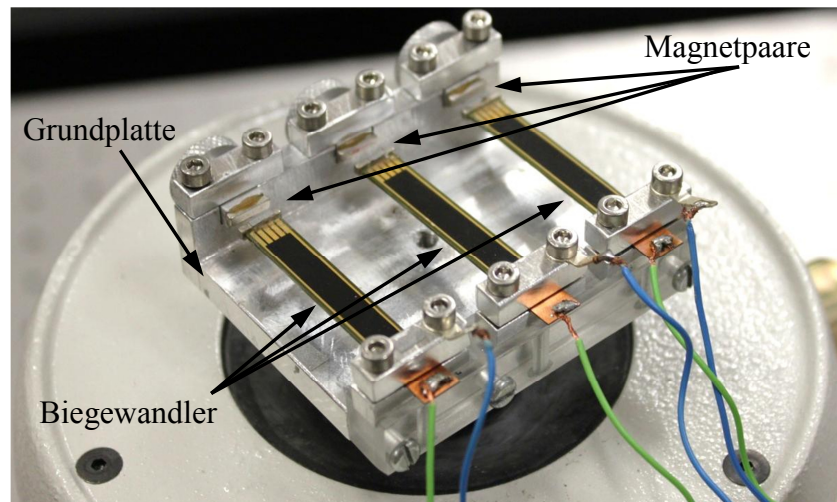


Bild 6: Versuchsaufbau mit einer Anordnung von drei piezoelektrischen Biegewandlern mit einzeln einstellbarer Optimalfrequenz

Für die erste Untersuchung wurden alle Biegewandler auf dieselbe Optimalfrequenz von 250 Hz eingestellt. In Bild 7 ist die Höhe der an der Last anliegenden Gleichspannung bei direkter und indirekter Reihenschaltung der drei Biegewandler und zum Vergleich bei Nutzung nur eines Biegewandlers dargestellt. Es zeigt sich, dass die Reihenschaltung mehrerer Biegewandler mit gleicher Optimalfrequenz gegenüber einem einzelnen Biegewandler eine deutliche Spannungserhöhung bewirkt. Bezogen auf die Anwendung, welche im betrachteten Beispiel eine Betriebsspannung von 1,5 V benötigt, kann dies in dreierlei Weise genutzt werden:

- Wird der Generator mit seiner Optimalfrequenz angeregt, genügt eine Schwingungsamplitude von $1,9 \text{ m/s}^2$ zur Erzeugung der benötigten Spannung.
- Beim Betrieb mit einer größeren Anregungsamplitude steigt die Bandbreite, bei Anregung mit $5,5 \text{ m/s}^2$ wie in Bild 7 bis auf 241,2 bis 258,4 Hz mit der direkten Reihenschaltung. Jedoch kann diese Bandbreite nur genutzt werden, wenn die angeschlossene Last tolerant gegenüber Spannungen deutlich oberhalb ihrer Nennspannung ist.
- Wird der Generator nicht bei seiner Optimalfrequenz betrieben, ist bei gleicher Gesamtspannung wie beim Optimalfrequenz-Betrieb eines einzelnen Wandlers die Auslenkung der einzelnen Wandler deutlich kleiner, was ihre Lebensdauer erhöht.

Die Bandbreite des Generators kann weiter erhöht werden, wenn die Wandler versetzte Optimalfrequenzen haben. Der Frequenzabstand kann mit verschiedenen Strategien festgelegt werden. Für die in Bild 8 dokumentierten Untersuchungen wurden ausgehend von einem auf die Mitte des angestrebten Frequenzbereichs eingestellten Wandler die übrigen Wandler so eingestellt, dass zwei Wandler mit benachbarten Optimalfrequenzen bei einer dazwischen liegenden Frequenz jeweils die Hälfte ihrer Maximalspannung erzeugen.

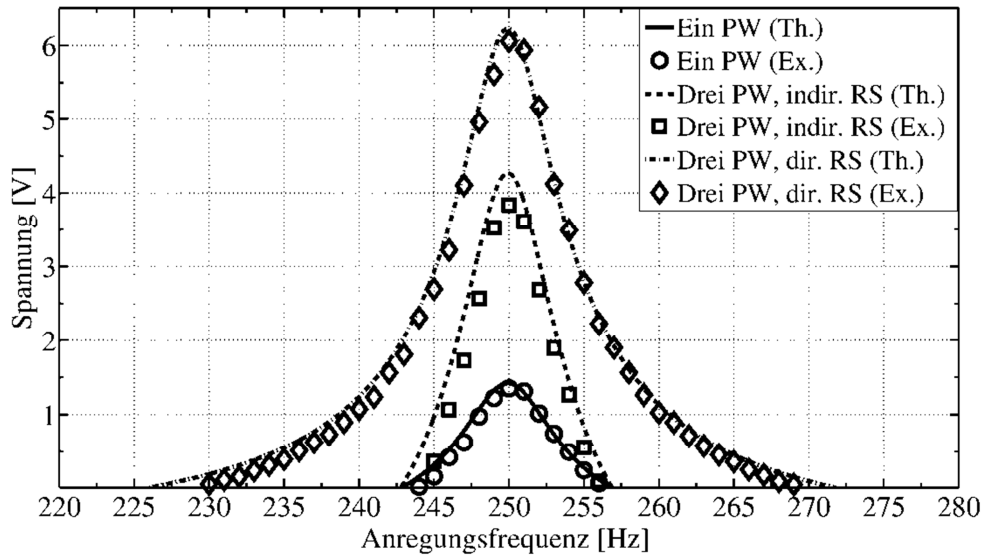


Bild 7: An einer Last von $360\text{ k}\Omega$ bei einer Anregung mit $5,5\text{ m/s}^2$ anliegende Spannung beim Betrieb von einem piezoelektrischen Wandler (PW) und von drei Wandlern mit gleicher Optimalfrequenz in indirekter und direkter Reihenschaltung (RS) – Vergleich von Theorie und Experiment

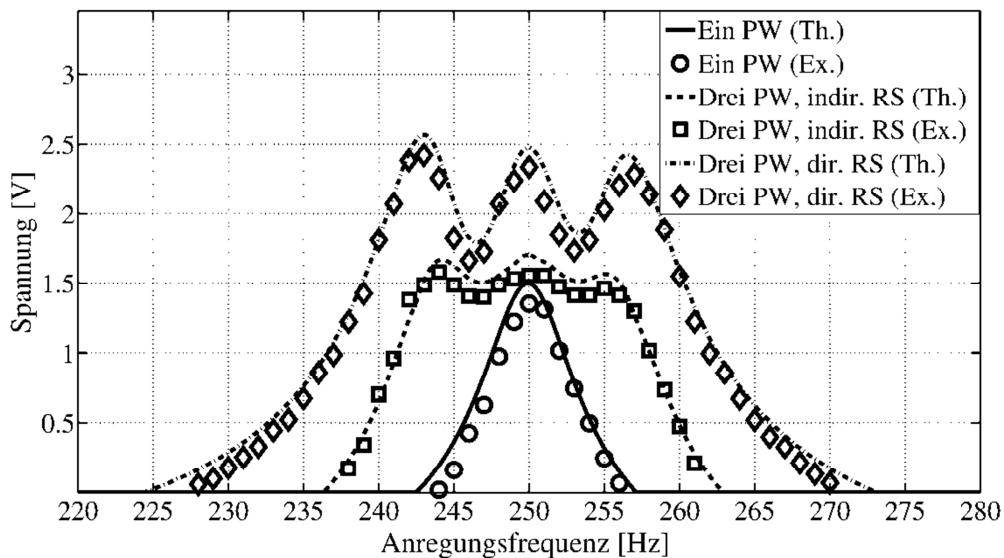


Bild 8: An einer Last von $360\text{ k}\Omega$ bei einer Anregung mit $5,5\text{ m/s}^2$ anliegende Spannung beim Betrieb von einem piezoelektrischen Wandler (PW) und von drei Wandlern mit versetzter Optimalfrequenz in indirekter und direkter Reihenschaltung (RS) – Vergleich von Theorie und Experiment

Bild 8 zeigt, dass mit dieser effektiven Abstimmstrategie eine deutliche Bandbreitensteigerung erreicht wird. Während ein einzelner Wandler nur bei seiner Optimalfrequenz die geforderte Gleichspannung von $1,5\text{ V}$ erzeugt, wird bei indirekter Reihenschaltung eine Bandbreite von 13 Hz (243 Hz bis 256 Hz), bei direkter Reihenschaltung sogar von 22 Hz , erreicht. Jedoch ist der Maximalwert der Spannung in diesem Bereich

bei direkter Reihenschaltung deutlich höher. Es hängt daher von der Empfindlichkeit der Anwendung gegenüber Spannungen deutlich oberhalb ihrer Nennspannung ab, ob die direkte oder die indirekte Reihenschaltung zur Bandbreitenerhöhung vorteilhafter ist.

6 Zusammenfassung und Fazit

Die Nutzbarkeit eines piezoelektrischen Generators mit mehreren Wandlern in einem energieautarken System wurde untersucht. Hierzu wurden verschiedene Möglichkeiten zur elektrischen Zusammenschaltung der einzelnen Wandler und der erforderlichen Gleichrichter betrachtet. Zur experimentellen Validierung wurde eine Anordnung von drei piezoelektrischen Biegewandlern mit einstellbarer Optimalfrequenz genutzt. Modellrechnungen und Versuchsergebnisse stimmen gut überein.

Die Steigerung von Leistung, Bandbreite oder Zuverlässigkeit durch die Nutzung einer Anordnung mit mehreren piezoelektrischen Wandlern wurde gezeigt. Hierbei wurde verglichen mit einem einzelnen Wandler eine Leistungssteigerung von über 300 % und alternativ eine Bandbreitensteigerung von nahezu 0 Hz auf bis zu 22 Hz erreicht. Zur Leistungssteigerung im schmalbandigen Betrieb ist die direkte Reihenschaltung mit einer gemeinsamen Gleichrichterschaltung am effektivsten. Bei breitbandigem Betrieb ist die Spannungstoleranz der Anwendung entscheidend dafür, ob diese Schaltung oder die indirekte Reihenschaltung mit einzelnen Gleichrichtern sinnvoll ist.

Literatur

- [AHH+12a] AL-ASHTARI, W.; HUNSTIG, M.; HEMSEL, T.; SEXTRO W.: Frequency Tuning of Piezoelectric Energy Harvesters by Magnetic Force *Smart Mater. Struct.* **21** 035019, 2012
- [AHH+12b] AL-ASHTARI, W.; HUNSTIG, M.; HEMSEL, T.; SEXTRO W.: Analytical determination of characteristic frequencies and equivalent circuit parameters of a piezoelectric bimorph *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **23** 15-23, 2012
- [AHH+13] AL-ASHTARI, W.; HUNSTIG, M.; HEMSEL, T.; SEXTRO W.: Enhanced Energy Harvesting Using Multiple Piezoelectric Elements: Theory and Experiments *Sens. Actuators A: Phys.*, 2013 (im Druck, DOI: 10.1016/j.sna.2013.01.008)
- [FFG+08] FERRARI M.; FERRARI, V.; GUIZZETTI, M.; MARIOLI, D.; TARONI, A.: Piezoelectric multifrequency energy converter for power harvesting in autonomous microsystems *Sens. Actuators A: Phys.* **142** 329-335, 2008
- [RTW09] RICHTER, B.; TWIEFEL, J.; WALLASCHEK, J.: Piezoelectric Equivalent Circuit Models. In *Energy Harvesting Technologies*, Hrsg. S. Priya, D. J. Inman. Springer US, Boston, 2009
- [Sha06a] SHAHRUZ, S. M.: Design of mechanical band-pass filters for energy scavenging *J. Sound and Vibration* **292** 987-998, 2006
- [Sha06b] SHAHRUZ, S. M.: Design of mechanical band-pass filters with large frequency bands for energy scavenging *Mechatronics* **16** 523-531, 2006
- [Sha06c] SHAHRUZ, S. M.: Limits of performance of mechanical band-pass filters used in energy scavenging *J. Sound and Vibration* **293** 449-461, 2006

- [TYS10] TANG, L.; YANG, Y.; SOH, C. K.: Toward Broadband Vibration-based Energy Harvesting *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **21** 1867-1896, 2010
- [XHW08] XUE, H.; HU, Y.; WANG, Q.: Broadband Piezoelectric Energy Harvesting Devices Using Multiple Bimorphs with Different Operating Frequencies *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control* **55** 2104-2108, 2008

Autoren

Dipl.-Ing. Matthias Hunstig schloss Ende 2007 sein Studium des Maschinenbaus an der Universität Paderborn mit Auszeichnung ab. Seit Januar 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter, seit April 2009 akademischer Rat am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Seine Forschungsschwerpunkte sind Energy Harvesting und piezoelektrische Antriebe, insbesondere Trägheitsmotoren.

M. Sc. Waleed Al-Ashtari studierte an der Al-Nahrain University in Bagdad, Irak und erhielt 2003 seinen Master-Abschluss in Maschinenbau mit dem Schwerpunkt angewandte Mechanik. Anschließend arbeitete er für Al-Itkan/Siemens im Irak und wurde 2006 Mitglied der Fakultät des College of Engineering der University of Bagdad. Seit 2009 erforscht er mit einem Stipendium von DAAD und irakischem Ministerium für Bildung und Forschung am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität piezoelektrische Energy-Harvesting-Generatoren.

Dr.-Ing. Tobias Hemsel studierte Maschinenbau an der Universität Paderborn. Er war von 1996 bis 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik und promovierte 2001 mit Auszeichnung. Seitdem ist Dr. Hemsel Oberingenieur am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik. Er wurde 2003 und 2005 mit dem Forschungspreis der Universität Paderborn ausgezeichnet. Seine Schwerpunkte in Forschung und Lehre liegen im Bereich der Sensorik und Aktorik mit Fokus auf piezoelektrischen Systemen und Ultraschalltechnik.

Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro hat Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover und am Imperial College in London studiert. Nach seiner Industrietätigkeit in Deutschland und den USA promovierte er 1997 an der Universität Hannover. Seine Habilitation hat er im Bereich dynamischer Kontaktprobleme mit Reibung verfasst. In den Jahren 2004 bis 2009 hatte er eine Professur an der Technischen Universität Graz inne. Seit 2009 leitet er den Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn.