

C. Kauczor / T. Schulte / H. Grotstollen

Piezelektrische Transformatoren - Schaltungen und Anwendungen

EINLEITUNG

Die Nutzung früher Patente zur elektrisch/elektrischen Energieumwandlung mittels des piezoelektrischen Effekts (z. B. Rosen-Transformator, 1958, s. [1]) scheiterte letztlich an den fehlenden technologischen Voraussetzungen sowohl seitens der piezoelektrischen Werkstoffe als auch seitens der leistungselektronischen Bauelemente für hohe Schaltfrequenzen. Erst seit Mitte der 80er-Jahre konnten mit PZT-Keramiken (PZT: Bleizirkonat-Titanat) erfolgreich piezoelektrische Transformatoren entwickelt und seit etwa Mitte der 90er-Jahre angewendet werden. Durch die intensive Forschung und Weiterentwicklung im Bereich der piezoelektrischen Wandler sowie im Bereich der Leistungselektronik und ihrer Komponenten erscheinen piezoelektrische Transformatoren heute bei einer Vielzahl von typischen leistungselektronischen Anwendungen als geeignete Alternative zu herkömmlichen Transformatoren. Dieser Aufsatz beinhaltet eine Zusammenfassung des Stands der Technik und der Entwicklungsperspektiven piezoelektrischer Transformatoren aus leistungselektronischer Sicht.

FUNKTIONSPRINZIP UND EIGENSCHAFTEN

Bei piezoelektrischen Transformatoren (PT) wird, wie bei Ultraschall-Leistungswandlern oder bei piezoelektrischen Motoren, ein piezokeramischer Wandler zur Erzeugung hochfrequenter, mechanischer Schwingungen eingesetzt, wobei der PT ein kontinuumsmechanisches Schwingungssystem darstellt, in dem sich eine mechanische Stehwelle ausbildet. Der Unterschied ist, daß die Schwingungsenergie nicht auf einen Bearbeitungsprozess oder auf einen mechanischen Abtrieb ausgekoppelt, sondern durch einen zweiten (sekundärseitigen) piezokeramischen Wandler in elektrische Energie zurückkonvertiert wird. Dabei bewirkt der PT bei geeigneter Bauform und Elektrodenkonfiguration wie ein herkömmlicher (magnetischer) Transformator eine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite und eine Änderung des Spannungsniveaus. Für PT sind zahlreiche Ausführungsformen bekannt: Zum einen kann die Dehnung der Piezokeramik in Längs- oder Querrichtung zum elektrischen Feld genutzt werden (d_{33} - bzw. d_{31} -Effekt); zum anderen sind unterschiedliche Geometrien und Ausbreitungsrichtungen

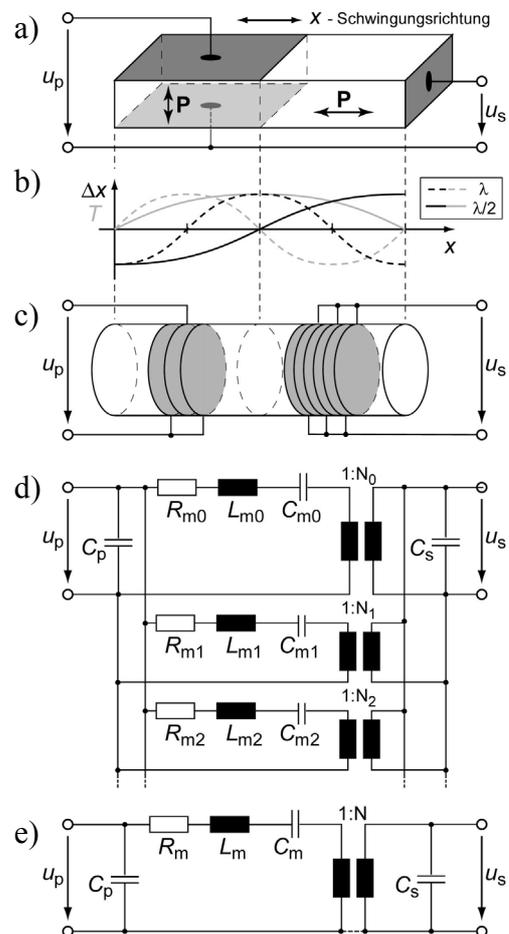


Bild 1: Funktionsprinzip von PT.

möglich (Längenschwinger, Dickenschwinger, Radialschwinger), s. a. [2]. Dabei liegt i. A. eine longitudinale Wellenausbreitung vor. PT mit transversaler Wellenausbreitung (z. B. Biegeschwinger) sind ungebräuchlich.

Bild 1a zeigt schematisch den bekannten Rosen-PT [1] der eine d_{31} - d_{33} -Konfiguration aufweist und aufgrund der für Primär- und Sekundärseite gemeinsamen Basiselektrode keine galvanische Trennung bietet. Rosen-PT (bzw. Derivate des Rosen-PT) sind besonders zur Erzeugung von hohen Betriebsspannungen geeignet und werden für die Speisung von Lampen oder Laptop-Display-Beleuchtungen aus kleinen Versorgungsspannungen eingesetzt. Bild 1c zeigt schematisch einen PT in Stabform, dessen Wandler als Stack- oder Multilayer-Aktoren ausgeführt sein können. Auf beiden Strukturen bildet sich eine longitudinale Stehwelle (Schwingung in Längsrichtung) aus, die aufgrund der Randbedingungen an den Enden des PT nur ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge umfassen kann (z. B. $\lambda/2$ -Schwinger oder λ -Schwinger usw., s. Bild 3b).

Das elektrische Verhalten eines PT kann durch das in Bild 1d dargestellte Ersatzschaltbild (ESB) beschrieben werden. Durch die parallele Struktur mehrerer elektrischer Schwingkreise wird das Verhalten in verschiedenen mechanischen Schwingungsmoden modelliert. Üblicherweise wird aber wie in Bild 1e nur ein mechanischer Schwingungsmodus im ESB berücksichtigt, was nur möglich ist, wenn der PT nahe dieser Resonanzstelle angeregt wird, und in der Umgebung des Arbeitspunkts kein anderer Schwingungsmodus relevant ist. Das ESB berücksichtigt die ein- und ausgangseitigen piezoelektrischen Kapazitäten durch C_p und C_s und das mechanische Schwingungssystem durch den L_m - C_m - R_m -Ersatzschwingkreis. Aufgrund der hohen Güte des mechanischen Schwingungssystems ist R_m i. A. sehr klein. Das natürliche Übersetzungsverhältnis N des PT resultiert ausschließlich aus der Elektrodenkonfiguration und der Geometrie. Beim Rosen-PT (Bild 1a) wird durch die gemischte Verwendung von d_{31} - und d_{33} -Effekt in Verbindung mit der Geometrie ein sehr großes Spannungsverhältnis erreicht, während dieses beim stabförmigen PT (Bild 1c) nur aus unterschiedlichen Lagendicken und der Verschaltung der Elektroden resultiert. Das vorliegende ESB nach Bild 1e ist in seiner Modellierungstiefe mit dem T-ESB eines konventionellen Transformators vergleichbar. Es eignet sich i. A. gut für die Synthese und Analyse von leistungselektronischen Schaltungen mit PT, nicht jedoch für Untersuchungen des PT selbst oder von Koppelungen zwischen Primär- und Sekundärseite [3]. Oft findet man das ESB nach Bild 1e auch mit einem zusätzlichen idealen Transformator am Eingang (hinter C_p), der eingefügt werden kann, um eine direkte Äquivalenz zwischen elektrischen und mechanischen Größen im Ersatzschwingkreis zu erreichen.

Zu den häufig genannten Vorteilen von PT gehört ihre hohe Leistungsdichte. Der im letzten Abschnitt durchgeführte Vergleich zeigt jedoch, daß erst PT-Entwicklungen jüngerer Zeit die Leistungsdichte konventioneller Transformatoren geringfügig übertrifft. Allerdings liegen bei PT offensichtlich günstigere Wachstumsgesetze bzgl. höherer Betriebsfrequenzen vor, und es lassen sich höhere Wirkungsgrade erreichen ($> 97\%$, s. [4]). Als zusätzliche positive Eigenschaften gelten ihre hohe Isolationsfestigkeit und Unbrennbarkeit sowie das Fehlen magnetischer Streufelder und eine bessere Miniaturisierbarkeit und Integrierbarkeit. Als Nachteil wird hingegen häufig ihre geringere Bandbreite aufgrund des inhärenten Schwingungssystems genannt. Diese stellt jedoch nicht bei allen Anwendungen zur Energieübertragung eine Einschränkung dar, sondern kann gelegentlich genutzt werden, um ein spezielles Betriebsverhalten zu erzielen (Erzeugung hoher Zündspannungen, Erzwingen von ZVS-Betrieb - s. u.).

Als definitive Nachteile hingegen müssen derzeit noch die eingeschränkte Leistung ($< 40\text{ W}$), die vergleichsweise hohen Kosten und die schlechtere Konfigurierbarkeit betrachtet werden. Insbesondere eine Leistungserhöhung und Kostenreduktion würde den Anwendungsbereich von PT erheblich erhöhen.

GRUNDSCHALTUNGEN

Bild 2a zeigt als Blockschaltbild die Grundstruktur, die sich bei allen Schaltnetzteilen (Gleichstromumrichtern) mit PT wiederfinden läßt. Die i. A. spannungseinprägende, eingangsseitige Wechselrichterstufe (WR) kann unterschiedliche Topologien aufweisen; in Anbetracht der kleinen Leistungen sind jedoch nur einfache Schaltungen wie Halbbrücken- oder Gegentakt-Wechselrichter gebräuchlich.

Das primärseitige Filter dient je nach Ausführung der Entkoppelung der Wechselrichterstufe von der piezoelektrischen Kapazität C_p , der Blindleistungskompensation oder der Einstellung der Eingangsadmittanz. Der ausgangsseitige Gleichrichter (GR) und das Ausgangsfilter können unterschiedlich realisiert sein und bei der Speisung von Wechselspannungsverbrauchern (z. B. Lampenstromversorgung) auch ganz entfallen.

Bild 2b zeigt eine häufig anzutreffende Schaltungsvariante mit Halbbrücken-Wechselrichter, Serieninduktivität L_s und nachgeschalteter Diodenbrücke mit Filterkondensator. Fügt man das ESB des PT in das Schaltbild ein (Bild 2c), wird die inhärente Schwingkreisstruktur deutlich, die aus leistungselektronischer Sicht an die Resonanzstromrichtertechnik erinnert. Resonanzstromrichter, wie z. B. der in Bild 2d dargestellte Serien-Resonanzstromrichter, wurden durch die leistungselektronische Forschung Anfang bis Mitte der 90er-Jahre intensiv mit dem Ziel untersucht, die Schaltverluste der Wechselrichterstufe zu reduzieren. Diese Schaltverluste treten beim Einschalten dann auf, wenn die parasitären Kapazitäten der Leistungshalbleiter entladen werden, ohne die dabei frei werdende Energie zurückzugewinnen. Bei den in Schaltnetzteilen mit Betriebsfrequenzen im Bereich von einigen hundert Kilohertz (also auch bei PT) ausschließlich verwendeten Brückenschaltungen mit Feldeffekt-Transistoren (MOSFET) spielt auch das Verhalten der produktionsbedingten inhärenten (Body-)Diode dieser Transistoren eine entscheidende Rolle. Geht eine stromführende Diode in den Sperrzustand über, kommt es zu einem kurzzeitig in Sperrichtung der Diode fließenden Stromimpuls, der sogenannten Rückstromspitze. Die inhärente Diode der MOSFET kann in Brückenschaltungen zwar als ohnehin notwendige Inversdiode verwendet werden, weist aber ein schlechtes Rückstromverhalten auf, d. h. die Rückstromspitze ist sehr ausgeprägt. Bild 3a zeigt einen Schaltvorgang bei dem der Strom i positiv ist und zunächst durch die inhärente Diode¹ von Transistor $z2$ geführt wird. Beim Einschalten des Transistors $z1$ muß dieser zusätzlich zum Laststrom i die Rückstromspitze der Diode sowie weitere Umladeströme parasitärer Kapazitäten führen, und es kommt aufgrund der Stromüberhöhung zu einer deutlichen Verlustleistungsspitze. Beim Schaltvorgang in Bild 3b wird von einem zunächst negativen Laststrom i ausgegangen, der beim Abschalten von Transistor $z2$ auf die inhärente Diode von Transistor $z1$ kommutiert. Transistor $z1$ wird anschließend eingeschaltet, während die Transistorspannung näherungsweise null ist. Dieser bzgl. der Schaltverluste günstige Fall wird als Null-Spannungschalten (ZVS: Zero Voltage Switching) bezeichnet und läßt sich bei Resonanzstromrichtern sowie bei Schaltungen mit PT erzielen, wenn der Resonanzkreis eingangsseitig induktives Verhalten zeigt, so daß die Last-

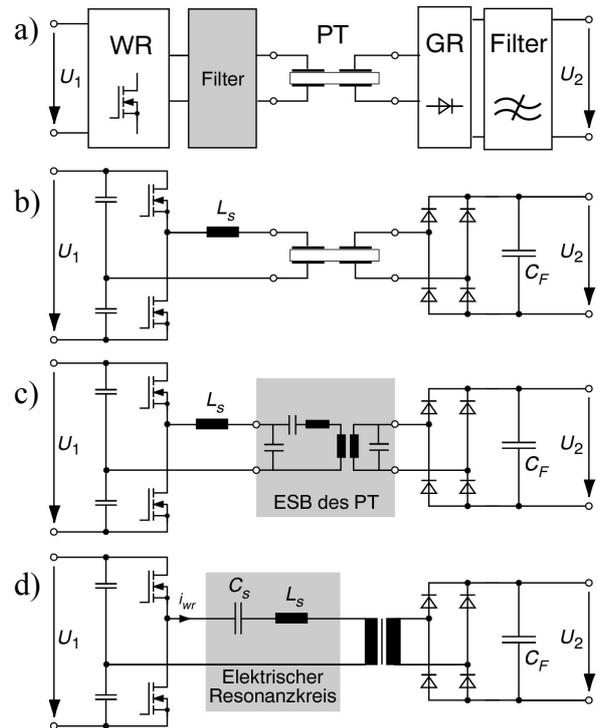


Bild 2: Grundschriftung mit PT.

¹ Die in Bild 3 eingezeichneten Dioden stellen die inhärenten Dioden der MOSFET dar; sind also keine eigenständigen Bauelemente.

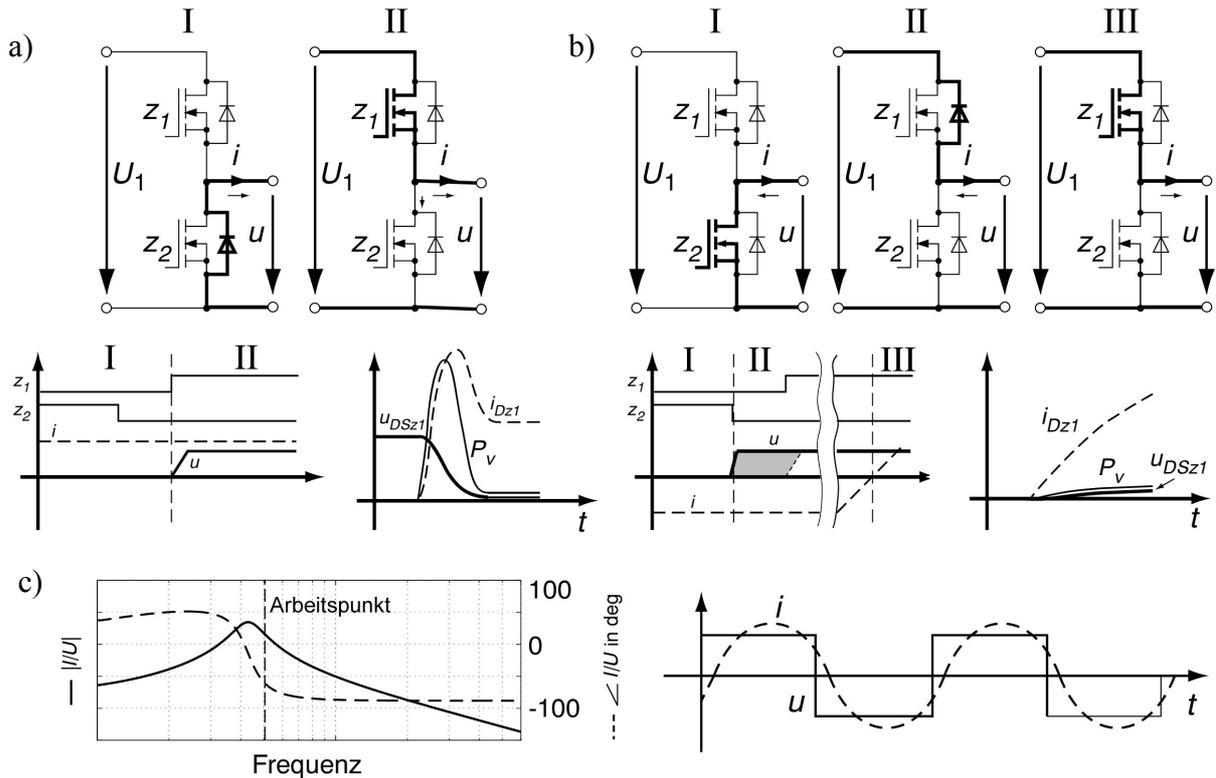


Bild 3: Schaltverhalten einer Wechselrichterstufe
 a) ohne ZVS, b) mit ZVS und c) Arbeitspunktwahl.

strom-Nulldurchgänge den Spannungs-Nulldurchgängen naheilen, s. Bild 3c. Induktives Verhalten im Arbeitspunkt wird bei Resonanzkreisen mit PT ggf. durch zusätzliche Filterinduktivitäten erreicht.

Bei Schaltnetzteilen mit PT liegen üblicherweise zwei regelungstechnische Aufgaben vor. Die Ausgangsspannung der Schaltung muß auf einen vorgegebenen Wert geregelt, und die Schaltfrequenz f an den gewünschten Arbeitspunkt des PT bzw. des Gesamtschwingkreises angepaßt werden. Die Einstellung der Schaltfrequenz erfolgt entweder indirekt (z. B. durch die Verwendung einer selbstoszillierenden Schaltung², s. [5]) oder dadurch, daß die Frequenz als Stellgröße der Spannungsregelung verwendet wird, oder aber durch einen Phasenregelkreis (PLL: Phase-Locked-Loop), bei dem vorzugweise die primärseitig abgreifbare Phaseninformation des Eingangsstroms des PT genutzt wird, z. B. [6]. Für die Regelung der Ausgangsspannung muß der entsprechende Meßwert ggf. potentialgetrennt zurückgeführt werden. Die Stellmöglichkeiten unterscheiden sich im Prinzip nicht von denen, die aus der konventionellen Schaltnetzteil- bzw. Resonanzstromrichtertechnik bekannt sind, wobei sich auch die gleichen bekannten Vor- und Nachteile ergeben: Die Verwendung der Schaltfrequenz als Stellgröße für die Ausgangsspannung bedingt, daß der PT im Niedriglastbereich in einem großen Abstand von seiner Resonanzfrequenz betrieben wird, was einen schlechten Wirkungsgrad hervorruft. Phasenanschnittsteuerung (s. [7]) des Wechselrichters hat den Nachteil, daß durch die Verschiebung der Schaltzeitpunkte die ZVS-Bedingung u. U. nicht eingehalten werden kann. Auch hierbei ergibt sich bei Niedriglast kein guter Wirkungsgrad. Der z. B. in [8] propagierte Aussetzbetrieb³ führt zwar auf gute Wirkungsgrade, da die Schaltung immer in einem günstigen

² Wird z. B. der Meßwert des Primärstroms direkt zur Ansteuerung der Wechselrichterbrücke zurückgeführt, so ergibt sich bei Einhaltung einer entsprechenden Phasenbedingung eine selbsterhaltende, resonanznahe Oszillation.

³ Aussetzbetrieb (Schwingungspaketsteuerung): Die Schaltung ist alternierend in Betrieb bzw. abgeschaltet, wobei das Tastverhältnis des alternierenden Betriebs die mittlere übertragene Leistung bestimmt und somit als Stellgröße dient.

Arbeitspunkt betrieben wird, bedingt aber andererseits ein größeres Ausgangsfilter. Letztlich ist wie in der konventionellen Schaltnetzteiltechnik auch die Kombination von mehreren Stelleingriffen denkbar.

ANWENDUNGEN

PT werden bisher vorwiegend für Anwendungen eingesetzt, bei denen die Verwendung konventioneller magnetischer Transformatoren problematisch ist (z. B. die Erzeugung hoher Spannungen in Kleingeräten). Schaltnetzteile mit PT werden derzeit nicht auf breiter Linie eingesetzt, obwohl zahlreiche Applikationen erfolgreich erprobt wurden.

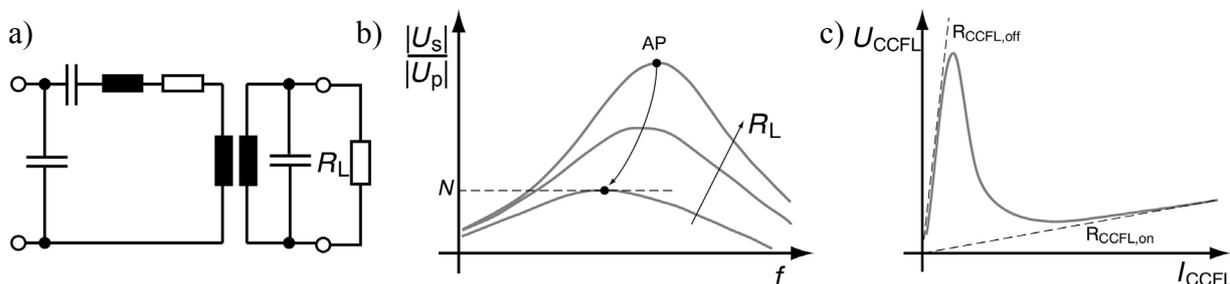


Bild 4: Speisung einer Cold-Cathode-Fluorescent-Lamp.

Bekannt ist z. B. die Verwendung in Stromversorgungen von Laptop-Display-Beleuchtungen (auch Flachbildschirme) mit Lumineszenz-Folien oder CCFL-Röhren (Cold Cathode Fluorescent Lamp) und weiteren CCFL-Anwendungen (s. [9], [10]). Hierbei spielt insbesondere die Erzeugung hoher Spannungen aus niedrigen Versorgungsspannungen eine Rolle. Ein besonderer Vorteil von PT ist die aufgrund der PT-Schwingkreisstruktur mögliche Spannungsüberhöhung zur Zündspannungserzeugung, s. [10]. Betrachtet man das ESB des PT (s. Bild 4a) bei unterschiedlichen Werten des Lastwiderstands R_L (s. Bild 4b), so erhält man für das Spannungsverhältnis die Frequenzkennlinien nach Bild 4b. Im unbelasteten Fall ist der von L_m , C_m , C_s gebildete Schwingkreis nur schwach gedämpft und weist eine ausgeprägte Spannungsüberhöhung auf, während im belasteten Fall lediglich das „natürliche“ Übersetzungsverhältnis N des PT in der mechanischen, durch L_m , C_m bestimmten Resonanz verbleibt.

Die Lastkennlinie einer CCFL ist schematisch in Bild 4c dargestellt. Zunächst ist eine hohe Zündspannung notwendig, die aufgrund des hohen Widerstandswertes $R_{CCFL,off}$ im unbelasteten Fall ohne weiteres durch den PT zur Verfügung gestellt werden kann. Im Betrieb wird dagegen eine erheblich niedrigere Spannung bei einem Widerstandswert $R_{CCFL,on}$ gefordert, so daß sich der Arbeitspunkt des PT zu niedrigeren Ausgangsspannungswerten hin verschiebt.

Ein weiterer interessanter Anwendungsbereich sind Treiberspannungsversorgungen. Die Leistungstristoren in Stromversorgungsgeräten aller Art befinden sich zumeist auf einem unbestimmten bzw. springenden Potential, so daß ihre Ansteuerschaltung (Treiberschaltung) mit einer

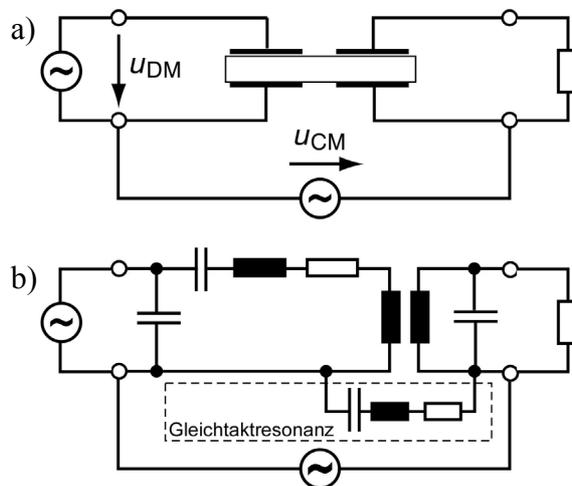


Bild 5: Gleichaktresonanzen.

potentialtrennenden (galvanisch isolierenden) Spannungsversorgung ausgestattet sein muß. PT eignen sich hierfür besonders aufgrund ihrer hohen Isolationsfestigkeit. In [6] wird z. B. eine Treiber-spannungsversorgung für einen Mittelspannungsumrichter (6 kV Isolationsspannung) vorgestellt. Aber auch für Stromversorgungsgeräte im Niederspannungsbereich sind PT interessant.

Zu beachten ist beim Einsatz von PT das Auftreten sogenannter „Gleichtaktresonanzen“, s. [11]: PT weisen i. A. eine hohe elektrische Isolationsfestigkeit und kleine Koppelkapazitäten zwischen Primär- und Sekundärseite auf. Erfolgt allerdings zusätzlich zur „normalen“ Gegentaktanregung⁴ (u_{DM} - differential mode, s. Bild 5a) durch die Primärspannung eine periodische Gleichtaktanregung (u_{CM} - common mode), so können hierdurch auf dem PT unerwünschte Schwingungsmoden angeregt werden, die im ESB durch Schwingkreise zwischen Primär- und Sekundärseite berücksichtigt werden müssen, Bild 5b. Erfolgt eine Gleichtaktanregung mit der Resonanzfrequenz eines derartigen Modes, so bricht die Koppelimpedanz ein, und es fließt ein erheblicher Gleichtaktstrom zwischen Primär- und Sekundärseite des PT. Gleichtaktströme sind i. A. unerwünscht, da sie sich in großflächigen Maschen ausbilden und so zu erheblichen EMV-Störungen führen können. Gleichtaktresonanzen dürfen im Betrieb weder durch die speisende Wechselrichterstufe noch durch die Last angeregt werden. Bei der Realisierung von Treiber-spannungsversorgungen mit PT müssen deshalb Schaltfrequenz sowie Vielfache der Schaltfrequenz der mit den Treibern angesteuerten Leistungstransistoren in einem ausreichenden Abstand zu möglichen Gleichtaktresonanzen liegen.

Um eine gute Ausnutzung piezokeramischer Werkstoffe zu erreichen, müssen diese je nach Material mit Feldstärken von einigen 100 V/mm betrieben werden. Bisher werden PT vorwiegend zur Erzeugung von hohen Spannung genutzt. PT sind aber auch für viele Schaltnetzteilanwendungen für Kleinspannungen von großem Interesse. In [4] wird z. B. ein Schaltnetzteil mit PT als miniaturisiertes Ladegerät (z. B. für Handys) vorgestellt, wobei ein erstaunlich hoher Wirkungsgrad ($> 97\%$) und eine hohe Leistungsdichte erreicht werden. Zur Realisierung geeigneter PT sind sehr kleine Elektrodenabstände notwendig, die sich nicht durch Wandler in konventionellen Bauformen, sondern nur durch Multilayer-Wandler realisieren lassen. Auch in [4] wurde eine entsprechende Technik angewendet. Bis vor geraumer Zeit waren Multilayer-Wandler nur auf der Basis von PZT-Weichkeramiken möglich, die insgesamt ungünstigere Wandlereigenschaften (z. B. höhere Dämpfung) haben. Seit kurzem sind jedoch auch Multilayer-Wandler auf der Basis von PZT-Hartkeramiken möglich. Dies dokumentiert einen nicht unerheblichen technologischen Fortschritt jüngerer Zeit, der das zukünftige Potential der PT-Technik hervorhebt.

SCHALTUNGS- UND BETRIEBSVARIANTEN

Für den Betrieb von PT existieren zahlreichen Schaltungsvarianten, die sich hinsichtlich der Schaltungstopologie und der erzeugten Spannungsverläufe unterscheiden. Die Vielseitigkeit und die Vor- und Nachteile soll im Folgenden an einigen Beispielen aufgezeigt werden.

Induktivitätsloser Betrieb:

Bei der konventionellen Technik des harten Schaltens werden die beiden Transistoren einer Halbbrückenschaltung abwechselnd ein- und ausgeschaltet, so daß der Ausgangsleiter immer mit einem Pol der Eingangsgleichspannung verbunden ist und mit einer rechteckförmigen Spannung beaufschlagt wird. Die schlagartige Umladung der Piezokapazität durch den Wechselrichter ist verbunden mit hohen Stromimpulsen, wodurch eine Längsinduktivität zur Strombegrenzung notwendig wird. Erfolgt die Umladung der eingangsseitigen Piezokapazität durch den mechanischen Teil des

⁴ Gegen- und Gleichtaktanregung (bzw. -störung oder -ströme) sind feststehende Begriffe und beziehen sich auf die Verhältnisse an den Eingangsklemmen eines Vierpols (Gleichtakt – Anregung gegenüber Bezugspotential).

PT, kann aber auf dieses zusätzliche Bauelement verzichtet werden. Den hierfür maßgeblichen Teil bildet im ESB von Bild 6a die Längsinduktivität L_m , die die Masse des mechanischen Systems repräsentiert und bei gesperrten Ventilen des Wechselrichters mit der Piezokapazität einen Schwingkreis bildet. Durch geeignete Auslegung des PT kann nun erreicht werden, daß die eingangsseitige Piezokapazität nach dem Abschalten eines Transistors in einem Resonanzvorgang selbsttätig auf den neuen Spannungszustand umschwingt, wenn der einzuschaltende Transistor für die Dauer dieses Vorgangs gesperrt bleibt, siehe Bild 6b. Es ist damit Nullspannungsschalten möglich.

Die Schaltung nach Bild 6 wurde z. B. in [12] vorgestellt und arbeitet im einzelnen folgendermaßen: Nachdem zum Zeitpunkt t_0 der Transistor S_1 bei positivem Strom i_p abgeschaltet wurde, übernimmt die Piezokapazität C_p den durch die Induktivität L_m eingepprägten Strom i_m und wird durch diesen entladen. Zum Zeitpunkt t_1 ist die Spannung zu Null geworden, und die Diode D_2 beginnt zu leiten. Die Spannung über dem Transistor S_2 ist nun Null, und der Transistor kann bis zum Zeitpunkt t_2 , in dem der Strom i_p seine Richtung umkehrt, verlustarm eingeschaltet werden. Der weitere Signalverlauf ist direkt übertragbar. Es liegt auf der Hand, daß die Verhältnisse zur Gewährleistung des Null-Spannungsschaltens stark von den inhärenten Eigenschaften des PT abhängen.

So muß bei seinem Entwurf auf eine hinreichend große Induktivität L_m des mechanischen Ersatzmodells geachtet werden, damit die Kapazität C_p , die ja ebenfalls vom jeweiligen PT-Entwurf abhängt, vollständig geladen bzw. entladen werden kann. Außerdem muß die Zeit, um die das Einschalten des einen Transistors gegenüber dem Ausschalten des anderen verzögert wird, an die Nullspannungsbedingungen angepaßt werden. Es liegt also eine sehr enge Verknüpfung zwischen dem Entwurf des PT und der Auslegung der Leistungselektronik, also eine typisch mechatronische Aufgabenstellung, vor.

In [12] wurde dieser Schaltungstyp als Vorschaltstufe zur Stromversorgung von 40W-Leuchtstoffröhren am amerikanischen 110 V / 60 Hz Netz eingesetzt. Dabei wurden für PT sehr hohe Leistungen von 32 W bei einem Wirkungsgrad von ca. 90 % realisiert. Die Schaltfrequenz der Halbbrücke wird mit 81 kHz angegeben.

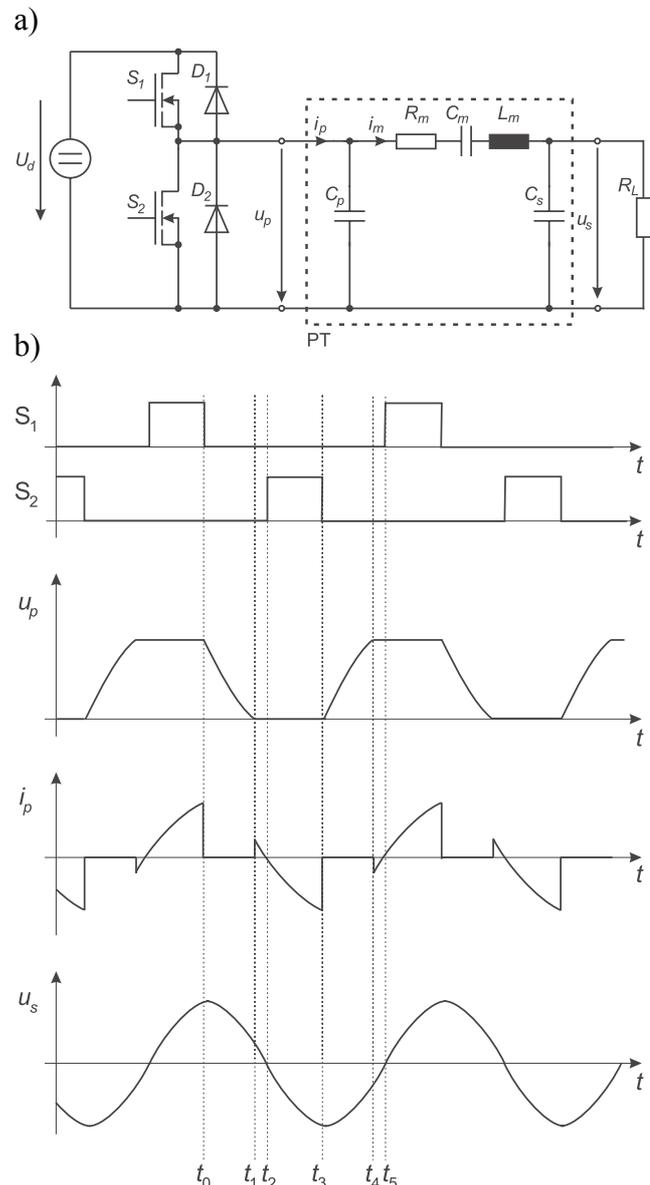


Bild 6: Halbbrücke ohne Parallelspeule:

a) Schaltung,

b) Signalverläufe und Schaltintervall.

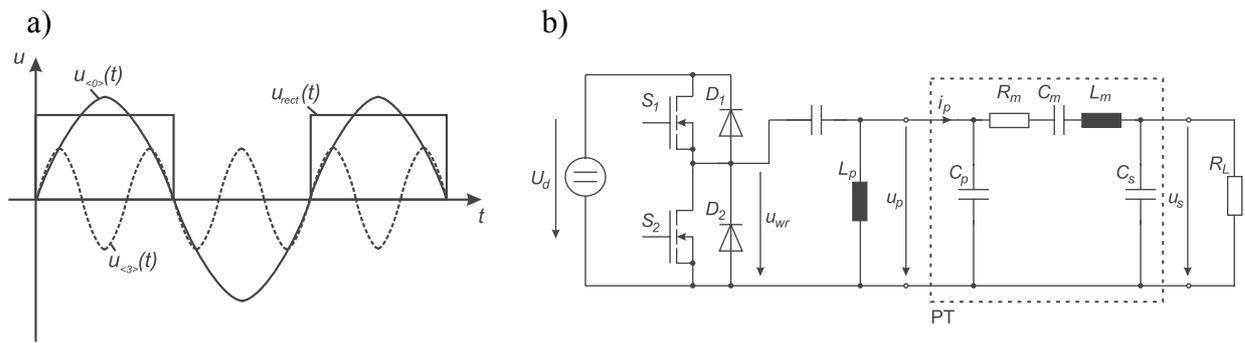


Bild 7: Ansteuerung eines PT mit dem Subharmonic Driving Konzept:

- Rechteckförmige Wechselrichterspannung mit Grund- und dritter Oberschwingung,
- Halbbrückentopologie mit PT und parallelgeschalteter Spule.

Subharmonischer Betrieb:

Außer von Materialparametern wie der Dielektrizitätszahl und des elektromechanischen Koppelfaktors hängt die volumenbezogene Leistungsdichte (P : Leistung, V : Volumen) proportional von der Resonanzfrequenz f_{res} des PT ab:

$$\frac{P}{V} \sim f_{res} \cdot$$

Hohe Leistungsdichten kann man demnach mittels hoher Resonanzfrequenzen erzielen. Dem stehen jedoch die Schaltverluste der Leistungshalbleiter entgegen, die mit der Schaltfrequenz ansteigen und den Wirkungsgrad der Schaltung erheblich verringern können.

Um dem zu begegnen, wird in [13] ein Verfahren vorgestellt, bei dem der Wechselrichter mit einer Schaltfrequenz betrieben wird, die um einen ganzzahligen Teiler niedriger ist als die Resonanzfrequenz des PT (Subharmonic Driving). Genutzt wird die dritte Oberschwingung der Wechselrichter-Ausgangsspannung, die der gewünschten Resonanzfrequenz des PT entspricht, siehe Bild 7. Damit die Schaltverluste in der Wechselrichterstufe verringert werden, ist Null-Spannungsschalten vorgesehen, daß mit Hilfe einer dem PT parallelgeschalteten Spule erzielt wird. Nachteilig an dieser Betriebsart ist der erhöhte Blindleistungstransfer zwischen der Parallelspele und dem PT, was zu zusätzlicher Erwärmung und schlechterem Wirkungsgrad führt. Weiterhin werden hohe Spannungen der Grundschwingung benötigt, was eine höhere dielektrische Verlustleistung nach sich zieht. Diese Eigenarten müssen beim Entwurf des PT berücksichtigt werden und führen zu erhöhtem Volumen. Vorteilhaft wirken sich Einsparungen an Größe und Gewicht seitens der Leistungselektronik aus. In [13] werden bei Betrieb des PT bei einer Resonanzfrequenz von 390 kHz mit sinusförmigen Signalformen Wirkungsgrade des PT von 96 % bei einer abgegeben Leistung von 12 W dokumentiert. Im Vergleich dazu wurde derselbe PT unterresonant und rechteckförmig angesteuert. Hier wurden Wirkungsgrade von 93 % bei einer Leistung von nur 6W erreicht.

Gegentakt-Wechselrichter:

Eine weitere Wechselrichterschaltung, die bevorzugt bei geringen Eingangsgleichspannungen eingesetzt wird, ist der in Bild 8 dargestellte Gegentakt-Wechselrichter, siehe z. B. [9]. Sein Vorteil liegt in der einfachen Implementierbarkeit der Treiberschaltungen, die im Prinzip keine Potentialtrennung erfordern. Während des stationären Betriebes treten bei dieser Schaltung vier Zustände auf, die im Folgenden näher erläutert werden. Bezüglich des ersten Zustands wird angenommen, daß der Transistor S_1 leitet. Dadurch fließt ein Magnetisierungstrom durch die Spule L_1 . Die Spule L_2 bildet mit den parallel liegenden Kapazitäten C_3 und C_2 einen Schwingkreis, und die Spannung

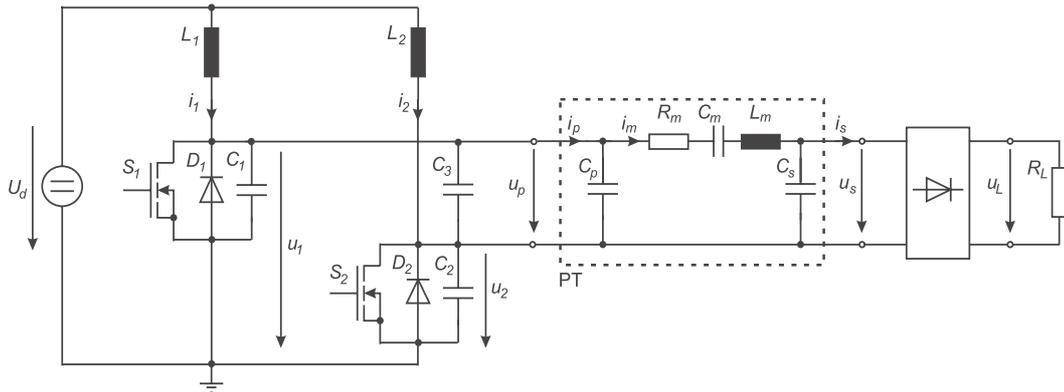


Bild 8: Gegentakt-Wechselrichter mit Ausgangsgleichrichter.

u_2 durchläuft eine sinusförmige Halbschwingung. Sobald die Halbschwingung zum Zeitpunkt t_1 wieder zu null wird, beginnt die inhärente Diode D_2 des Transistors S_2 zu leiten. Nun liegen Nullspannungsverhältnisse für S_2 vor, und der Transistor wird verlustarm eingeschaltet. Für die Spannung u_1 stellt sich aufgrund des Schwingkreises, bestehend aus der Spule L_1 und den Kapazitäten C_3 und C_1 , wie im ersten Schaltzustand eine sinusförmige Halbschwingung ein. Gleichzeitig wird die Spule L_1 ummagnetisiert. Wenn die Spannung u_1 wieder den Wert Null erreicht, beginnt zum Zeitpunkt t_3 die Diode D_1 zu leiten, und der Transistor S_1 kann unter Nullspannungsvoraussetzungen eingeschaltet werden. Da der inhärente Serienschwingkreis C_m - L_m des PT aufgrund seiner hohen Güte wie ein sehr schmalbandiges Bandfilter wirkt, ist die Ausgangsspannung u_s des PT nahezu sinusförmig.

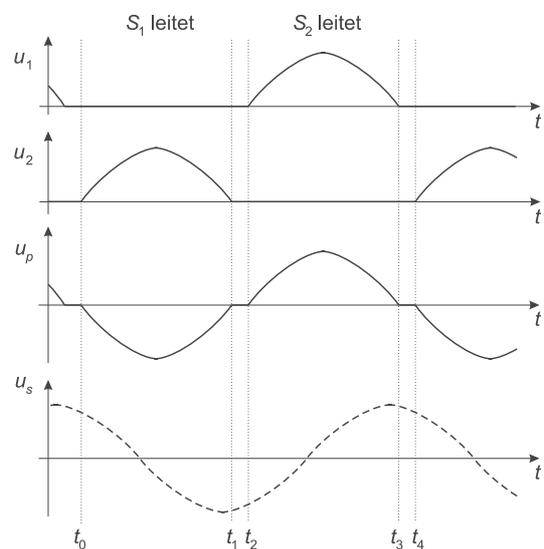


Bild 9: Spannungsverläufe am Gegentakt-Wechselrichter.

VERGLEICH UND BEWERTUNG

Piezoelektrische Transformatoren haben ohne Zweifel Vorteile in Bezug auf Isolationsfestigkeit und Unbrennbarkeit, die insbesondere bei der Erzeugung hoher Spannungen in Kleingeräten von Bedeutung sind. Ob piezoelektrische Transformatoren sich aber in Zukunft tatsächlich auf breiter Linie gegenüber den herkömmlichen magnetischen Transformatoren behaupten können oder aber weiterhin ein „Exotendasein“ führen werden, hängt im wesentlichen von der erreichbaren Leistung, der Leistungsdichte, dem Wirkungsgrad und den Kosten ab. Zu den in der Serienproduktion möglichen Kosten ist eine Abschätzung derzeit nur schwer möglich. Bezüglich Leistung, Leistungsdichte und Wirkungsgrad kann jedoch in den letzten Jahren eine stetige Entwicklung beobachtet werden. Mitte der 90er-Jahre wurden lediglich wenige Watt bei ebenso wenigen Watt pro Kubikzentimeter erreicht (1994; [14] 5 W bei $3,9 \text{ W/cm}^3$, 1996; [15] 8 W bei 4 W/cm^3). Zwar werden 1996 in [16] bereits 30 W bei 34 W/cm^3 dokumentiert, diese werden jedoch nur bei einer ungewöhnlich hohen Betriebsfrequenz von 2 MHz erreicht, die auch für die Leistungshalbleiter in Bezug auf Wirkungs-

grad und Dimensionierung problematisch ist. Tatsächlich wird auch für den Transformator ein für PT sehr schlechter Wirkungsgrad von lediglich 82 % angegeben. Aber schon 1997 werden in [17] 20 W bei 17 W/cm^3 erreicht und 2001 sind in [4] 12 W bei 32 W/cm^3 2001 sowie in [12] eine maximale Leistung von 32 W dokumentiert. Damit liegt die derzeit erreichte Leistungsdichte von PT immer noch etwa eine Dekade unter der theoretisch möglichen Leistungsdichte, die z. B. in [18] mit 330 W/cm^3 bei einer Betriebsfrequenz von nur 100 kHz beziffert wird.

Ein realistischer Vergleich mit den Leistungsdichten magnetischer Transformatoren ist schwierig, da sich sowohl für PT als auch für magnetische Transformatoren je nach Anwendung sehr unterschiedliche Werte finden lassen, die z. B. von Leistungsklasse, Übersetzungsverhältnis und Bauform abhängen. In vielen Veröffentlichung findet sich dann auch der sprichwörtliche „Apfel-mit-Birnen-Vergleich“. Bei einer annähernd realistischen Abschätzung der Leistungsdichten von konventionellen Transformatoren für Schaltnetzteile kleiner bis sehr kleiner Leistung kommt man auf etwa $20\text{-}25 \text{ W/cm}^3$. Damit übertreffen PT bereits heute konventionelle Transformatoren⁵, zumal mit Werten von 97 % Wirkungsgrade erreicht werden, die die von hochausgenutzten, konventionellen Transformatoren kleiner Leistung übertreffen. Außerdem weisen PT insgesamt günstigere Wachstumsgesetze bzgl. hoher Betriebsfrequenzen auf. Bei einer weiteren Steigerung der Leistungsdichte mit einem realistisch erscheinenden Ziel von $60\text{-}100 \text{ W/cm}^3$ und einer Steigerung der möglichen Gesamtleistung könnten PT auf breiter Linie eine gute Alternative zu konventionellen Transformatoren bei Schaltnetzteilanwendungen werden, sofern die Kosten im Griff sind.

Eine grundlegende Fragestellung, die bei einer Zukunftsprognose berücksichtigt werden muß, ist die Akzeptanzproblematik beim Anwender. Hierzu sind folgende Punkte zu bedenken:

- Magnetische Transformatoren sind seit über 100 Jahren Stand der Technik. Bei Unternehmen im Bereich der Stromversorgungsgeräte und Schaltnetzteile ist daher umfangreiches Know-How über magnetische Transformatoren vorhanden.
- In seiner Funktion als Transformator ist der PT zwar ein typisches elektrotechnisches Bauelement. Sein Einsatz erfordert aber Kenntnisse aus den Bereichen Schwingungsmechanik und Mechatronik sowie die enge Zusammenarbeit mit ungewohnten Kooperationspartnern.
- Aufgrund ihrer ausgeprägten Resonanzeigenschaften wirken PT stärker als konventionelle Transformatoren auf ihre Speiseeinrichtungen zurück und erfordern eine deutlich stärkere Berücksichtigung ihres Betriebsverhaltens beim Entwurf der leistungselektronischen Schaltungen.

Diese Betrachtungen lassen den Schluß zu, daß als zukünftige Ziele der Forschung nicht nur allgemeine Punkte wie Erhöhung von Leistung, Leistungsdichte und Wirkungsgrad, Kostenminimierung sowie der Entwicklung von neuen Schaltungs- und PT-Konzepten verfolgt werden müssen. Von Bedeutung wird vielmehr auch der verstärkte Einbezug der Anwender, die Berücksichtigung anwendungsspezifischer Gegebenheiten und langfristig auch die Schaffungen von unterstützenden Konzepten und Werkzeugen sein, die den Entwurf und den Einsatz von PT vereinfachen. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen elektrotechnischen (leistungselektronischen), maschinentechnischen (schwingungstechnischen) Instituten mit Erfahrungen im Bereich piezoelektrischer Wandler und Schwingungserzeugung sowie technologischen Instituten bzw. Unternehmen im Bereich piezokeramischer Werkstoffe.

RESÜMEE

⁵ Alle Angaben sind volumenbezogene Leistungsdichten. Das Leistungs-Gewichts-Verhältnis fällt für PT aufgrund der geringeren Dichte von PZT-Keramiken eher günstiger aus.

Für piezoelektrische Transformatoren sind bereits zahlreiche Schaltungsvarianten erprobt worden; eine Konsolidierung hat auf diesem noch recht jungen Gebiet jedoch noch nicht stattgefunden. Vor dem Hintergrund des bemerkenswerten Fortschritts der letzten Jahren und der zahlreichen erfolgreichen Applikationen ist aber denkbar, daß PT in Zukunft in vielen Stromversorgungsgeräten zum Einsatz kommen werden.

In der Vergangenheit fand die Forschung an PT und entsprechenden Schaltungen vor allem im US-amerikanischen und asiatischen Bereich statt. In Europa existiert z. B. im Rahmen des EU-ESPRIT-Projekts TRAMST ein sehr erfolgreiches Konsortium (s. [4], [19]). In Deutschland hingegen hat die anwendungsbezogene Forschung an PT derzeit leider nur eine geringe Bedeutung, was zur Bildung entsprechender Kooperationen anregen sollte.

Literatur- und Quellenhinweise:

- [1] Rosen, Charles A. et al.: *Electromechanical Transducer*. US-Patent 2,830,274, 1958.
- [2] Hemsel, T.; Littmann, W.; Wallaschek, J.: *Piezoelektrische Transformatoren – Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven*. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, September 23 - 26, 2002.
- [3] Schwander, D.; Garnier, J.; Cailhol, A.; Predine C.: *Modelisation et Caracterisation Electrique Fine des Transformateurs Piezo-Electriques*. MAGELEC 2001, Toulouse, S. 139-145, Dezember 2001.
- [4] Navas, J.; Bove, T.; Cobos, J. A.; Nuno, F.; Brebol, K.: *Miniaturised Battery Charger using Piezoelectric Transformers*. Proc. of APEC 2001, Anaheim, CA, März 2001.
- [5] Ramos-Fernandez, A.; Montoya-Vitini, F.; Gallego-Juarez, J. A.: *Automatic System for Dynamic Control of Resonance in High Power and High Q Ultrasonic Transducers*. Ultrasonics, S. 151 - 156, Juli 1985.
- [6] Volkert, N.: *DC-DC Converter with Very High Insulation Capability*. Proc. of EPE'99, Lausanne.
- [7] Zaitso, T.; Ninomiya, T.; Shoyama, M.: *Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control*. IEICE Trans. Commun, Vol. E80-B, 1997.
- [8] Díaz, J.; Nuno, F.; Prieto, M. A.; Martín, J. A.: *A New Control Strategy for an AC/DC Converter Based on a Piezoelectric Transformer*. Proc. of APEC 2001, Anaheim, CA, März 2001.
- [9] Shoyama, M.; Horikoshi, K.; Ninomiya, T.: *Steady-State Characteristics of the Push-Pull Piezoelectric Converter*. Proc. of 28th IEEE PESC 97, St. Louis, MO, 1997.
- [10] Ben-Yaakov, S.; Shvartsas, M.; Ivensky, G.: *A Piezoelectric Cold Cathode Fluorescent Lamp Driver Operating from a 5 Volt Bus*. Proc. of PCIM 2000, S. 379-383, Nürnberg, 2000.
- [11] Hamamura, S.; Zaitso, T.; Ninomiya, T.; Shoyama, M.: *Noise Characteristics of Piezoelectric-Transformer DC-DC Converter*. Proc. of 29th IEEE PESC 98, Fukuoka, S. 1262-1267, 1997.
- [12] Lin, R. L.; Lee, F. C.; Baker, E. M.; Chen, D. Y.: *Inductor-less Piezoelectric Transformer Electronic Ballast for Linear Fluorescent Lamp*. Proc. of APEC 2001, Anaheim, CA, März 2001.
- [13] Alou, P.; Cobos, J. A.; Sanz, M.; Prieto, R.; Uceda, J.; Rivas, M.; Navas, J.: *Subharmonic Driving: A New Concept to Drive Piezoelectric Transformers in Power Converters*. Proc. of APEC 2001, Anaheim, CA, März 2001.
- [14] Zaitso, T.; Ohnishi, O.; Inoue, T.; Shoyama, M.; Ninomiya, T.; Lee, F. C.; Hua, G. C.: *Piezoelectric Transformer Operating in Thickness Extensional Vibration and its Application to Switching Converter*. Proc. of 23th IEEE PESC 94, Taipei, Taiwan, S. 585-589, June 1994
- [15] Smidt, P. J. M.; Duarte, J. L.: *Powering Neon Lamps Through Piezoelectric Transformers*. Proc. of 27th IEEE PESC 1996, Baveno, Italien, 1996.
- [16] Zaitso, T.; Shigehisa, T.; Shoyama, M.; Ninomiya, T.: *Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control*. Proc. of APEC 96, San Jose, S. 279-283, März 1996.
- [17] Zaitso, T.; Fuda, Y.; Okabe, Y.; Ninomiya, T.; Hamamura, S.; Katsuno, M.: *New Piezoelectric Transformer Converter for AC-Adapter*. Proc. of APEC 97, Atlanta, GA.
- [18] Flynn, A. M.; Sanders, S. R.: *Fundamental Limits on Energy Transfer and Circuit Considerations for Piezoelectric Transformers*. Proc. of 29th IEEE PESC 1998, S. 1463-1471, Bd. 2.
- [19] Prieto, R.; Sanz, M.; Cobos, J. A.; Alou, P.; García, O.; Uceda J.: *Design Considerations of Multi-Layer Piezoelectric Transformers*. Proc. of APEC 2001, Anaheim, CA, März 2001.

Autorenangaben:

Dipl.-Ing. Christopher Kauczor

Dipl.-Ing. Thomas Schulte

Prof. Dr.-Ing. Horst Grotstollen

Universität Paderborn FB14/250, Warburger Str. 100

33098, Paderborn

Tel.: 05251/60-2209

Fax: 05251/60-3443

E-mail: kauczor@lea.upb.de, schulte@lea.upb.de, grotstollen@lea.upb.de