

# Analoger Leistungsverstärker mit Energierückgewinnung für piezoelektrische Aktoren

## Analogue power amplifier for driving piezoelectric actuators with energy recovery

Michael Rissing<sup>1)</sup>, Hartmut Janocha<sup>1)</sup>, Thomas Würtz<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Lehrstuhl für Prozessautomatisierung, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland

<sup>2)</sup> Zentrum für innovative Produktion, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland

## Kurzfassung

Zur dynamischen Ansteuerung von Piezoaktoren kommen im Wesentlichen zwei Schaltungskonzepte zur Anwendung: Während analoge Leistungsverstärker eine sehr hohe Signalgüte und Übertragungsbandbreite im Großsignalbetrieb aufweisen, können schaltende Verstärker bei gleicher Ausgangsleistung bis zu 90% der im analogen Verstärker entstehenden Verlustleistung vermeiden, allerdings zu Lasten der Signalqualität und der Übertragungsbandbreite. Die nahe liegende Aufgabe, die Vorteile eines Analogverstärkers mit der energetischen Effizienz eines Schaltverstärkers zu kombinieren, also einen Analogverstärker mit hohem Wirkungsgrad zu realisieren, wurde bisher nicht zufrieden stellend gelöst. In unserem Beitrag wird ein neuartiges Schaltungskonzept vorgestellt, mit dem es möglich ist, einen analogen Leistungsverstärker mit Energierückgewinnung zu realisieren. Dadurch wird ein gegenüber einem konventionellen Analogverstärker deutlich verbesserter Wirkungsgrad erreicht, während die Signalgüte und Übertragungsbandbreite vergleichbar hoch bleiben.

## 1 Motivation

Piezoelektrische Aktoren stellen, ebenso wie andere Energiewandler aus der Gruppe der unkonventionellen Aktoren, elektrisch gesehen Impedanzen mit überwiegendem Blindanteil dar [1]. Bei diesen Aktoren erfolgt die Ansteuerung durch ein magnetisches oder – wie im Fall des piezoelektrischen Aktors – elektrisches Feld. Abhängig von seinem Wirkungsgrad wird ein Teil der im Aktor gespeicherten Feldenergie in mechanische Arbeit und in Verlustwärme umgewandelt, der Rest bleibt als Feldenergie erhalten.

Im Hinblick auf einen energetisch effizienten Betrieb lautet die Anforderung an die Leistungselektronik, den Feldaufbau und -abbau im Aktor mit minimalen Leistungsverlusten zu bewerkstelligen. Dies ist die Stärke von schaltenden Leistungsverstärkern (Abschnitt 2.1). Allerdings wird die hohe Effizienz erkaufte durch nicht zu vernachlässigende Störungen des gewünschten Signalverlaufs am Ausgang, welche den Einsatz solcher Verstärker in Anwendungen, die eine möglichst formtreue Signalübertragung voraussetzen, z.B. bei der Mikro- oder Nanopositionierung, ausschließt.

In solchen Applikationen finden analoge Leistungsverstärker Verwendung, die höchsten Ansprüchen an die Formtreue des übertragenen Signals genügen können (Abschnitt 2.2). Übliche analoge Verstärkertopologien verursachen jedoch eine sehr hohe Verlustleistung im dynamischen Betrieb, wenn also breitbandige Signale übertragen werden sollen; dadurch verbietet

sich ihr Einsatz dort, wo die vorhandene Energie möglichst effizient genutzt werden soll, z.B. in mobilen Anwendungen.

Obwohl bereits Schaltungskonzepte wie das des Hybridverstärkers (Abschnitt 2.3) existieren, die die Grundprinzipien von schaltenden und analogen Verstärkern verknüpfen, ist die nahe liegende Aufgabe, die Vorteile eines Analogverstärkers mit der energetischen Effizienz eines Schaltverstärkers zu kombinieren, also einen Analogverstärker mit hohem Wirkungsgrad zu realisieren, bisher nicht zufrieden stellend gelöst. In diesem Beitrag wird ein analoges Verstärkerkonzept vorgestellt, das diesem Anspruch gerecht zu werden sucht.

## 2 Stand der Technik

Leistungsverstärker zur Ansteuerung piezoelektrischer Aktoren können unter verschiedenen Aspekten kategorisiert werden. Im Hinblick auf ihre energetische Effizienz werden in diesem Abschnitt die grundlegenden Konzepte von

- schaltenden Leistungsverstärkern,
  - analogen Leistungsverstärkern und
  - hybriden Leistungsverstärkern
- vorgestellt.

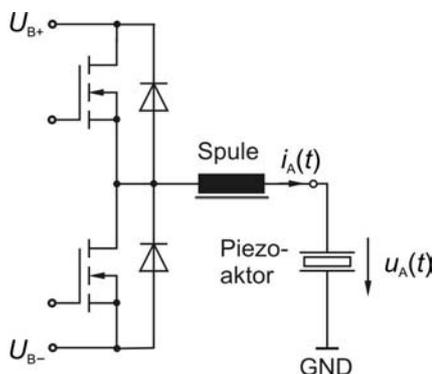
Zur Charakterisierung der Übertragungseigenschaften eines Verstärkers werden im Folgenden die Begriffe Signalqualität oder Signalgüte verwendet. In diesem Sinne weist das Ausgangssignal eines Verstärkers mit einer hohen Signalgüte bzw. -qualität nur geringe Stö-

rungen durch lineare und nichtlineare Verzerrungen oder unerwünschte, im Eingangssignal nicht enthaltene Frequenzanteile auf.

## 2.1 Schaltende Leistungsverstärker

Schaltende Leistungselektronik ist dadurch gekennzeichnet, dass die Leistungshalbleiter als Schalter maximal sperrend oder maximal leitend betrieben werden. Unter Berücksichtigung bestimmter Entwurfsregeln ergeben sich dadurch sehr geringe Leistungsverluste in den Halbleitern [2].

**Bild 1** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines als Durchflusswandler entworfenen Schaltverstärkers für einen piezoelektrischen Aktor. Das Auf- und Entladen der Last erfolgt in zwei Phasen. In der ersten Phase wird die zu übertragende Energie teilweise in einer Spule zwischengespeichert bevor sie in der zweiten Phase vollständig zur Last transferiert bzw. der Last entzogen wird. Durch die rechteckförmige Schaltspannung an der Spule ergibt sich am Aktor ein von Schaltripeln überlagerter Stromverlauf, der gegebenenfalls durch – je nach zu übertragender Leistung mehr oder weniger aufwändige – passive Signalfilter zwischen Spule und Aktor geglättet werden kann. Solche passive Filter weisen jedoch nicht zu vernachlässigende Verzögerungszeiten auf.



**Bild 1:** Schaltverstärker.

Abhängig von der gewünschten Signalqualität sollte die Frequenz der Schaltspannung mehrere Zehnerpotenzen über der höchsten Signalfrequenz gewählt werden. Allerdings erfordert eine Erhöhung der zu übertragenden Leistung eine niedrigere Schaltfrequenz des Schaltverstärkers. Dadurch entsteht bei hochdynamischen Anwendungen ein Zielkonflikt, denn die zu übertragende Leistung wächst proportional mit der Signalfrequenz.

Ein weiterer kritischer Designaspekt betrifft die Dimensionierung der Spule. Einerseits darf diese bei der höchsten zu übertragenden Leistung nicht in Sättigung geraten und muss daher für die gewünschte Pulsleistung des Schaltverstärkers entsprechend groß ausge-

legt werden. Andererseits verringert sich die erzielbare Grenzfrequenz im Großsignalbetrieb mit wachsender Spuleninduktivität.

Schaltverstärker ermöglichen bei entsprechender Konzeption die Rückspeisung der in der Last (Piezoaktor) gespeicherten Blindenergie in ihre Energiequelle, wodurch solche Verstärker bis zu 90% der Verlustleistung eines vergleichbaren analogen Verstärkers vermeiden können. Diesem Vorteil stehen die im Vergleich zum Analogverstärker verminderte Signalqualität, die begrenzte Übertragungsbandbreite und die durch die Schaltfrequenz vorgegebene verzögerte Reaktion auf Sollwertänderungen oder Laststörgrößen gegenüber.

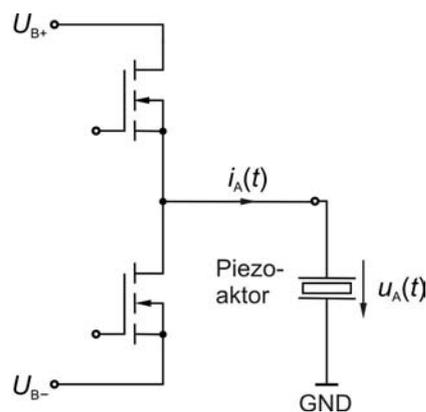
## 2.2 Analoge Leistungsverstärker

In der analogen Schaltungstechnik werden die Leistungshalbleiter als gesteuerte Stellglieder kontinuierlich über ihren gesamten Arbeitsbereich betrieben [2].

**Bild 2** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Analogverstärkers. Anders als beim Schaltverstärker wird die Energie beim Auf- und Entladen direkt in die Last übertragen bzw. der Last entzogen. Die dadurch während eines Auf- und Entladezyklus in den beiden Transistoren in Wärme umgesetzte mittlere Verlustleistung  $P_V$  berechnet sich zu

$$P_V = f C_A U_{A,ss} U_B. \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet  $f$  die Ansteuerfrequenz,  $C_A$  die als ideal angenommene Kapazität des Piezoaktors,  $U_{A,ss}$  den Spitze-Spitze-Wert der Lastspannung und  $U_B$  die Versorgungsspannung ( $U_B = U_{B+} - U_{B-}$ ).



**Bild 2:** Analogverstärker.

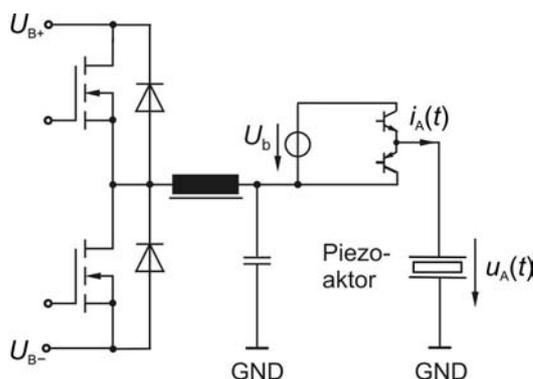
Bei maximaler Aussteuerung der Last mit  $U_{A,ss} = U_B$  wird während des Aufladens am oberen Leistungstransistor eine Energiemenge in Verlustwärme umgewandelt, die etwa der zur Last transferierten Energiemenge entspricht. Beim Entladen wird die in der Last gespeicherte Blindenergie im unteren Leistungshalbleiter

in Verlustwärme umgewandelt. Somit geht während eines Auf- und Entladezyklus annähernd das Doppelte der Energiemenge, die an die Last übertragen wird, im Verstärker verloren. Für den Fall, dass die Last nicht mit der maximalen Spannung angesteuert wird, sinkt die ohnehin schon geringe energetische Effizienz noch weiter. Die entstehende Verlustwärme muss durch geeignete Maßnahmen an die Umgebung abgeführt werden, was in der Regel dazu führt, dass das Bauvolumen eines analogen Leistungsverstärkers hauptsächlich durch den Platzbedarf der benötigten Kühlkörper bestimmt wird.

Die Vorteile des analogen Verstärkers liegen einerseits in der hohen Signalgüte aufgrund des kontinuierlichen Verlaufs des Ausgangsstroms und andererseits in der hohen Übertragungsbandbreite und geringen Ansprechzeit: Da keine Blindelemente zum Zwischenspeichern der Energie benötigt werden, kann der analoge Verstärker quasi unverzüglich auf Sollwertänderungen oder Laststörgrößen reagieren.

### 2.3 Hybride Leistungsverstärker

Eine hybride Leistungselektronik kombiniert die Schaltungskonzepte des schaltenden und des analogen Verstärkers [2,3,4]. Wie in **Bild 3** gezeigt, wird einer schaltenden Verstärkerstufe, die den Hauptteil der benötigten Energie aus dem Versorgungsnetz an den Aktor transferiert und die Rückgewinnung der im Aktor gespeicherten Blindenergie ermöglicht, eine analoge Verstärkerstufe nachgeschaltet, deren Versorgungsspannung  $U_b$  etwa 10% der Betriebsspannung  $U_B = U_{B+} - U_{B-}$  beträgt.



**Bild 3:** Hybridverstärker.

Aufgrund der verringerten Versorgungsspannung  $U_b$  wird die Verlustleistung in der analogen Stufe auf etwa 10% der Verlustleistung eines reinen Analogverstärkers begrenzt. Der Analogverstärker übernimmt die Funktion eines dem Schaltverstärker nachgeschalteten Signalfilters und glättet das Ausgangssignal – im Unterschied zu einem passiven Filter – ohne nennenswerte Signalverzögerungen. Dadurch werden die Anforder-

ungen an die schaltende Stufe deutlich reduziert. Innerhalb des Betriebsspannungsbereichs  $U_b$  der analogen Stufe werden Abweichungen vom Sollwert der Ausgangsspannung allein von dieser ausgeregelt. Die analoge Stufe kann somit bereits auf Sollwertänderungen oder Laststörgrößen reagieren, bevor der nächste Schaltzyklus des Schaltverstärkers beginnt.

Das Großsignalverhalten wird allerdings durch den schaltenden Teil bestimmt. Dadurch weist der Hybridverstärker ebenso wie der rein schaltende Verstärker eine begrenzte Großsignal-Übertragungsbandbreite auf. Allerdings können die Schaltrippl im Vergleich zu diesem um über 20 dB gedämpft werden.

## 3 Analoger Leistungsverstärker mit Energierückgewinnung

Bei genauerer Betrachtung des in Bild 2 dargestellten Schaltungskonzepts eines analogen Leistungsverstärkers zeigt sich, dass bei einem definierten kontinuierlichen Laststrom  $i_A(t)$  die Höhe der Verlustleistung durch die an dem jeweils stromführenden Leistungshalbleiter anliegende Spannung bestimmt wird. Diese berechnet sich aus der aktuellen Lastspannung  $u_A(t)$  sowie der oberen und unteren Betriebsspannung  $U_{B+}$  und  $U_{B-}$  für den oberen Transistor zu

$$u_{AT}(t) = U_{B+} - u_A(t) \quad (2)$$

und für den unteren Transistor zu

$$u_{ET}(t) = u_A(t) - U_{B-}. \quad (3)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Lastspannung  $u_A(t)$  am Aktor einem vorbestimmten Sollwertverlauf folgen muss, lassen sich die Spannungen  $u_{AT}(t)$  und  $u_{ET}(t)$  – und damit die Verlustleistung – reduzieren, indem man die obere und untere Betriebsspannung  $U_{B+}$  und  $U_{B-}$  im Sinne einer Annäherung an die aktuell benötigte Spannung  $u_A(t)$  anpasst. Eine Möglichkeit dazu bietet das Konzept des hybriden Leistungsverstärkers (Abschnitt 2.3), allerdings mit den genannten – durch den schaltenden Teil verursachten – Nachteilen.

### 3.1 Aufteilung der Betriebsspannung

Ein komplett auf analoger Schaltungstechnik basierender Lösungsansatz für die Annäherung der Betriebsspannung an den Verlauf von  $u_A(t)$  – sowohl beim Aufladen als auch beim Entladen des Piezoaktors – ist in **Bild 4** dargestellt. Der Betriebsspannungsbereich zwischen  $U_{B+}$  und  $U_{B-}$  wird durch die Serienschaltung mehrerer bezugspotentialfreier Netz-

teile in  $N$  gleiche Teilspannungen  $U_b$  aufgeteilt, so dass gilt:

$$U_b = \frac{U_{B+} - U_{B-}}{N}. \quad (4)$$

Diese Schaltungstopologie ermöglicht es, beim Auf- bzw. Entladen des Aktors die Energie aus genau demjenigen Versorgungsspannungsniveau  $U_{B,i}$  mit

$$U_{B,i} = U_{B-} + iU_b, \quad i = 0 \dots N, \quad (5)$$

zu entnehmen bzw. dahin zurückzuspeisen, welches die geringste Spannungsdifferenz zur aktuellen Aktorspannung  $u_A(t)$  aufweist. Somit geht beim Entladen des Aktors die darin gespeicherte Blindenergie nicht komplett verloren, sondern wird in das im Bezug zur Aktorspannung  $u_A(t)$  nächst tiefer gelegene Versorgungsspannungsniveau  $U_{B,i}$  zurückgespeist.

Der Energietransfer erfolgt durch  $N$  konventionelle Gegentaktendstufen, deren Ausgänge parallel an die Last geschaltet sind. Somit summieren sich die Ausgangsströme  $i_{A,i}(t)$  der einzelnen Stufen zum Laststrom

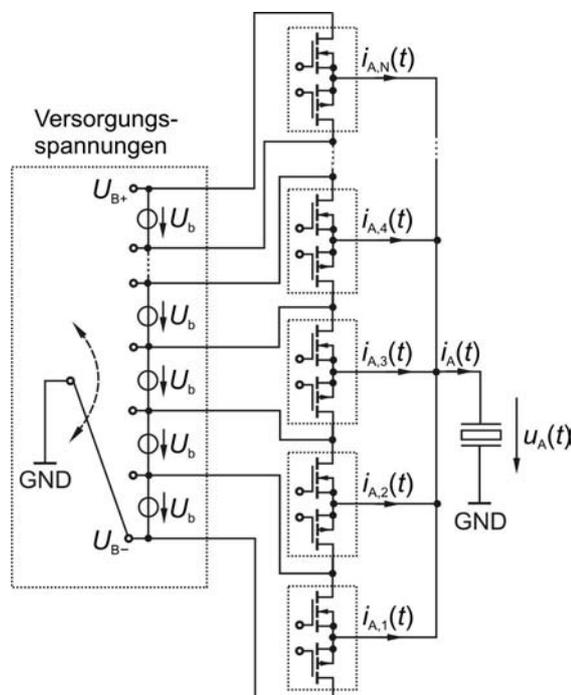
$$i_A(t) = \sum_{i=1}^N i_{A,i}(t). \quad (6)$$

Durch eine geeignete Strategie zur Ansteuerung der einzelnen Endstufen kann erreicht werden, dass in Abhängigkeit von der momentanen Lastspannung  $u_A(t)$  nur diejenige Endstufe arbeitet, welche die Verluste beim Auf- und Entladen der Last minimiert. Da die Versorgungsspannung jeder Endstufe um den Faktor  $N$  kleiner ist als die Versorgungsspannung eines konventionellen Analogverstärkers, wird hierdurch die Gesamtverlustleistung im dynamischen Betrieb theoretisch um den Faktor  $N$  reduziert. In der Praxis fällt die Effizienzsteigerung aufgrund der in Abschnitt 3.2 näher beschriebenen Einschränkungen allerdings etwas geringer aus.

Mit steigender Anzahl  $N$  der Teilspannungen wächst der Bauteileaufwand für die Schaltung, da für jede Teilspannung ein Netzteil sowie eine Endstufe mit einer geeigneten Treiberschaltung aufgebaut werden muss. Da die Treiberschaltungen selbst auch – überwiegend statische – Verlustleistungen aufweisen, sollte bei der Festlegung der Anzahl  $N$  der Teilspannungen die mit steigendem  $N$  größer werdende statische Verlustleistung mit der sich gleichzeitig verringernden dynamischen Verlustleistung des Verstärkers verglichen werden.

Neben der verbesserten energetischen Effizienz weist die beschriebene Verstärkertopologie einen weiteren inhärenten Vorteil auf. Durch die Verwendung poten-

tialfreier Netzteile kann jedes der Spannungspotentiale  $U_{B,i}$ , wie in Bild 4 angedeutet, als Referenzpotential (GND) festgelegt werden; hierdurch lässt sich der Ausgangsspannungsbereich des Verstärkers durch Umschalten des Referenzpotentials von  $-NU_b \dots$  GND bis GND  $\dots +NU_b$  variieren.



**Bild 4:** Analogverstärker mit Energierückgewinnung.

### 3.2 Ansteuerkonzept

Innerhalb des Arbeitsbereiches einer Endstufe, festgelegt durch das obere und untere Versorgungsspannungsniveau  $U_{B,i}$  und  $U_{B,i-1}$ , ist die Arbeitsweise des vorgestellten Verstärkers mit der des konventionellen Analogverstärkers in Abschnitt 2.2 vergleichbar. Über- oder unterschreitet die Aktorspannung  $u_A(t)$  den Arbeitsbereich einer Stufe, muss zugunsten einer hohen Signalgüte eine möglichst verzerrungsarme Stromübernahme von der aktuell arbeitenden zur nächsten Stufe sichergestellt werden. Der Übernahmebereich, in dem jeweils zwei Endstufen Strom führen, sollte hinsichtlich der Energieeffizienz so schmal wie möglich sein. In der Praxis ergibt sich jedoch in Abhängigkeit vom Laststrom  $i_A(t)$  eine Untergrenze durch die minimale Betriebsspannung der Leistungshalbleiter und den Spannungsabfall an anderen Schaltungskomponenten im Strompfad, die zugunsten der Übersichtlichkeit in Bild 4 nicht dargestellt sind. Dadurch wird auch der minimale Wert der Teilspannung  $U_b$  und somit nach Gleichung (4) die maximale Anzahl  $N$  der Teilspannungen bei vorgegebenem Betriebsspannungsbereich  $U_B$  festgelegt.

Zwei prinzipiell verschiedene Konzepte zur Ansteuerung der einzelnen Endstufen sind denkbar. Zum einen kann die Aktivierung der einzelnen Endstufen zentral durch den Regler erfolgen, der die Lastspannung  $u_A(t)$  dem gewünschten Sollwertverlauf nachführt. Dazu muss der analoge Regler schaltungstechnisch erweitert und an die Anzahl  $N$  der Endstufen angepasst werden. Zum anderen kann die Aktivierung der Endstufen dezentral erfolgen. In diesem Fall bilden alle Teilstufen zusammen eine funktionelle Einheit, die vom Lastspannungsregler wie eine einzelne, konventionelle Gegentaktendstufe angesteuert wird. Im Vergleich zur zentralen Ansteuerung verlagert sich der prinzipiell höhere Schaltungsaufwand für die Ansteuerung mehrerer Endstufen vom Regler in die einzelnen Endstufen, da diese – um eine funktionelle Einheit bilden zu können – eine größere Schaltungskomplexität aufweisen.

## 4 Messergebnisse

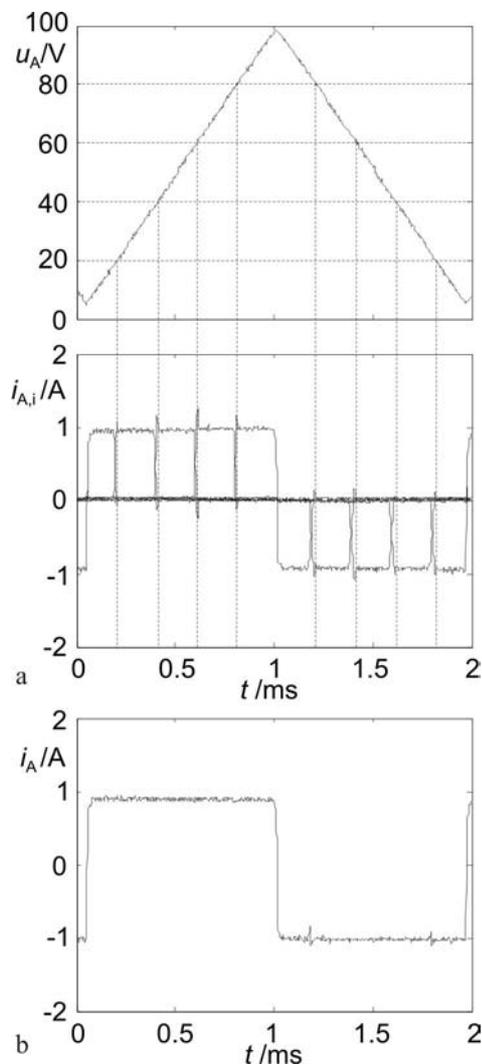
Nach umfassenden Schaltungssimulationen zur Verifikation des vorgestellten Verstärkerkonzepts wurde ein Prototyp mit  $N = 5$  Teilspannungen von je  $U_b = 20$  V und dezentraler Ansteuerung aufgebaut. Es wurden verschiedene Messungen bei einem unipolaren Ausgangsspannungsbereich von 0 bis 100 V durchgeführt. Die Messkurven in **Bild 5** demonstrieren die Funktion des neuen Schaltungskonzepts anhand des Auf- und Entladevorgangs einer Lastkapazität von  $10 \mu\text{F}$  mit dreieckförmigem Spannung-Zeit-Verlauf. Bild 5a zeigt im oberen Signalgraph die Lastspannung  $u_A(t)$  und darunter die Ausgangsströme  $i_{A,i}(t)$ ,  $i = 1 \dots 5$ , der einzelnen Endstufen. In Bild 5b ist der gemessene resultierende Laststrom  $i_A(t)$  dargestellt.

Es ist erkennbar, dass jeweils nur diejenige Stufe Strom führt, in deren Arbeitsbereich sich die momentane Lastspannung  $u_A(t)$  befindet. Der Gesamtstrom  $i_A(t)$  entspricht weitestgehend dem Stromverlauf, wie ihn ein konventioneller Analogverstärker erzeugen würde.

Zur Beurteilung der erzielbaren Signalgüte wurde eine Lastkapazität von  $1 \mu\text{F}$  mit einem nahezu idealen 1 kHz-Sinussignal (Störpegel  $< -100$  dB) angesteuert, und die im Verstärker erzeugten Störungen des gewünschten Lastspannungsverlaufes  $u_A(t)$  wurden gemessen. **Bild 6** zeigt die Ergebnisse. Die größte Störung stellt die harmonische Verzerrung durch die erste Oberwelle dar; diese ist im Vergleich zur Amplitude der Grundfrequenz um  $-69$  dB gedämpft. Dies belegt, dass sich die mit dem vorgestellten Verstärkerkonzept erzielbare Signalgüte durchaus mit der konventioneller analoger Leistungsverstärker messen kann.

In **Bild 7** sind die steigende und die fallende Flanke der Lastspannung  $u_A(t)$  bei rechteckförmiger Ansteuerung einer Lastkapazität von  $1 \mu\text{F}$  dargestellt. Im Be-

reich der Flanken liefern die einzelnen Endstufen nacheinander ihren maximalen Pulsstrom. Aufgrund von Parameterschwankungen variiert dieser leicht von Stufe zu Stufe, was durch die Welligkeit der Anstiegsflanke zum Ausdruck kommt. Diese Schwankung des maximalen Pulsstroms kann durch geeignete Kompensationsmaßnahmen minimiert werden.



**Bild 5:** Auf- und Entladen einer Lastkapazität von  $10 \mu\text{F}$ ; **a:** Lastspannung  $u_A(t)$  und Ausgangsströme  $i_{A,i}(t)$  der einzelnen Stufen; **b:** Laststrom  $i_A(t)$ .

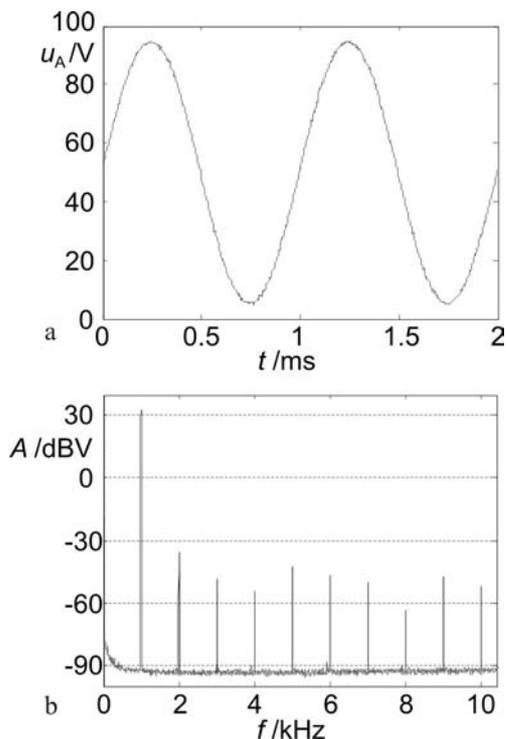
## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Schaltungskonzept für einen analogen Leistungsverstärker für piezoelektrische Aktoren bzw. kapazitive Lasten vorgestellt, das im Wesentlichen auf der Aufteilung der Gesamtbetriebsspannung in mehrere Teilspannungen basiert. Ähnliche Schaltungskonzepte werden als Klasse-G Verstärker bezeichnet.

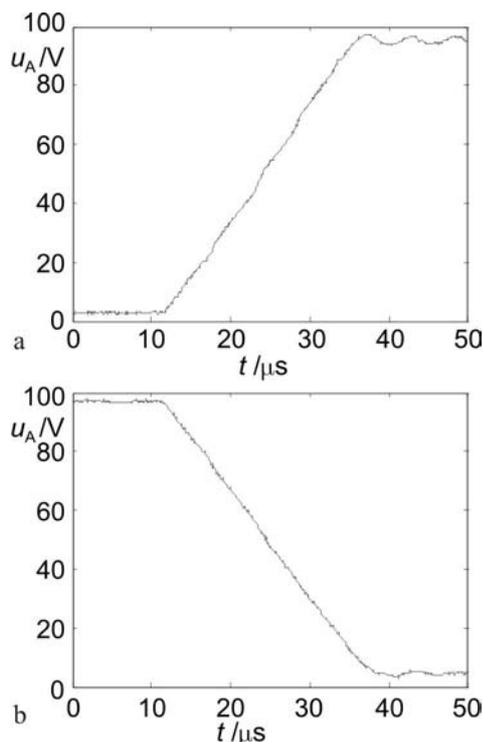
Aufgrund dieser Topologie können die dynamischen Leistungsverluste im Vergleich zu einem konventionellen Leistungsverstärker deutlich reduziert werden. Die hohe Signalgüte und Übertragungsbandbreite im Großsignalbetrieb, die konventionelle Analogverstärker auszeichnet, konnte anhand der Vermessung eines Prototyps auch für das neuartige Schaltungskonzept nachgewiesen werden.

Der erhöhte Bauteileaufwand aufgrund der gestiegenen Anzahl von Netzteilen und Endstufen wird zum einen kompensiert infolge der deutlich reduzierten Verlustleistung; hierdurch können die verwendeten Bauteile kleiner dimensioniert werden (dies gilt vor allem für die Kühlkörper). Zum anderen besteht die Gesamtschaltung überwiegend aus mehrfach verwendeten Modulen, die zum Teil als integrierte Schaltungen realisiert werden können.

Es ist geplant, die bisher diskret aufgebauten Treiberschaltungen für die einzelnen Endstufen in einen integrierten Schaltkreis umzusetzen. Die hierfür erforderlichen Voraussetzungen wurden bereits beim Design der Treiberschaltungen berücksichtigt. Eine auf die neue Verstärkertopologie und deren Lastverhalten angepasste Netzteilarchitektur zur effizienten Erzeugung der benötigten Betriebsspannungen befindet sich in der Entwicklung.



**Bild 6:** Signalgüte; **a:** Lastspannung  $u_A(t)$  bei Ansteuerung mit 1kHz-Sinus; **b:** Amplitudenspektrum  $A$  der Lastspannung  $u_A(t)$ , bezogen auf 1 V.



**Bild 7:** Rechteckansteuerung; **a:** Steigende Flanke der Lastspannung  $u_A(t)$ ; **b:** Fallende Flanke der Lastspannung  $u_A(t)$ .

## 6 Literatur

- [1] Janocha, H. (Ed.): *Actuators, Basics and Applications*. Springer, Berlin Heidelberg New York (2004).
- [2] Stiebel, C.: *Leistungsverstärker zur verlustarmen Ansteuerung von kapazitiven Lasten*. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken (2002), Aachen: Shaker Verlag 2002.
- [3] Popov, J.; Janocha, H.: *Power amplifier with energy recovery for the control of large magnetostrictive actuators*. Actuator 2004, Proc. 9th International Conference on New Actuators, (Bremen 14.-16.06.2004), pp. 800-803.
- [4] Janocha, H.; Quinten, R.: *New Power Amplifier Concept for Piezoelectric Actuators*. Actuator 2002, Proc. 8th International Conference on New Actuators (Bremen 10.-12.06.2002), pp. 462-465.