

Leistungsverstärker für piezoelektrische Aktoren

Dipl.-Ing. Chr. Stiebel
Dipl.-Ing. (FH) Th. Würtz
Prof. Dr.-Ing. habil. H. Janocha

Dieseleinspritzventile mit piezoelektrischen Aktoren sollen Ende 2000 in den Serieneinsatz gehen [4]. Es ist zu erwarten, dass die Einführung der Piezo-Technologie in ein Massenprodukt wie das Automobil die Akzeptanz von piezoelektrischen Aktoren auch für andere Applikationen sprunghaft ansteigen lässt. Vor diesem Hintergrund kommt einer effizienten elektrischen Ansteuerung von piezoelektrischen Aktoren wachsendes Interesse zu. Im folgenden Beitrag werden verschiedene, auch kommerziell verfügbare Verstärkerkonzepte vorgestellt, und ihre anwendungsrelevanten Eigenschaften werden erläutert.

Problemstellung

Piezoaktoren sind für die elektrische Ansteuerung in erster Näherung kapazitive Lasten mit Aktorkapazitäten C_A zwischen einigen hundert Nanofarad für Piezoscheiben oder Biege wandler und einigen zehn Mikروفarad für große Multilayer-Stapelwandler. Zum Erreichen eines bestimmten Hubes muss an den Aktor eine Spannung angelegt werden, die für maximale Auslenkungen von 150 V für Niedervoltaktoren bis 1000 V für Hochvoltaktoren reicht. Auf Grund des kapazitiven Charakters wird zum Halten einer bestimmten Position ohne mechanische Laständerung keine Leistung benötigt. Hierin liegt neben der großen Dynamik (bis hinauf in den Kilohertzbereich) und der hohen Positioniergenauigkeit (bis hinab in den Nanometerbereich) der wesentliche Vorteil von Piezoaktoren gegenüber vielen anderen Aktorarten. Eine Änderung der Aktorspannung u_A ist über eine Zuführung von Ladung q_A möglich, und der damit verbundene Stromfluss i_A errechnet sich zu

$$i_A = \frac{dq_A}{dt} = C_A \frac{du_A}{dt} . \quad (1)$$

Bei einem eingepprägten Spannungsverlauf $u_A = U_0 + \hat{U}_A \cos(2\pi f t)$ mit $\hat{U}_A \leq U_0$ gemäß Bild 1 ist ein Strom von maximal

$$\hat{I}_A = 2\pi f C_A \hat{U}_A \quad (2)$$

notwendig, der vom ansteuernden Verstärker geliefert werden muss.

Analoger Verstärker zur Ansteuerung von Piezoaktoren

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Leistungsendstufe eines analogen Leistungsverstärkers zur Ansteuerung von piezoelektrischen Aktoren. Die Versorgungsspannung U_B muss hierbei größer sein als die Spannung $U_0 + \hat{U}_A$ am Aktor. Zum Steuern des Aktorstromes i_A werden zwei Transistoren benötigt. Der obere dient zum Aufladen und der untere zum Entladen des Piezos. Die sich daraus ergebenden Spannungs- und Stromverläufe sind ebenfalls in Bild 1 abgebildet. Ein solcher Betrieb, bei dem stets einer der beiden Leistungstransistoren gesperrt ist, wird als Klasse-C-Betrieb bezeichnet. Bei dieser Betriebsart fließt im Ruhezustand (Halten der Spannung) kein Strom durch die Endstufentransistoren, und folglich wird auch keine elektrische Leistung umgesetzt. Energetisch betrachtet ist also der Klasse-C-Betrieb die günstigste Variante eines Analogverstärkers.

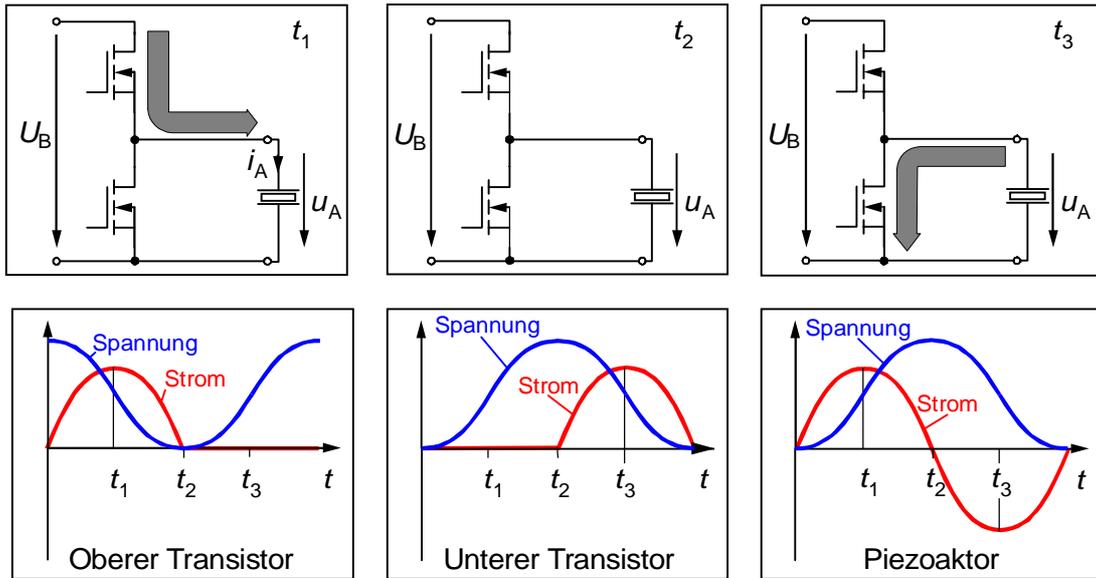


Bild 1: Spannungs- und Stromverläufe beim Klasse-C-Verstärker
 t_1 : Aufladen des Aktors mit maximalem Strom
 t_2 : Halten der Aktorspannung
 t_3 : Entladen des Aktors mit maximalem Strom

Durch zeitliche Mittelung der Strom-Spannungs-Produkte beider Transistoren ergibt sich die Gesamtverlustleistung, die in den beiden Endstufentransistoren im periodischen Betrieb in Wärme umgesetzt wird, zu

$$P_v = 2 C_A \hat{U}_A U_B f . \quad (3)$$

Im günstigsten Fall (maximale Aussteuerung, d.h. $2 \hat{U}_A = U_B$, $U_0 = \hat{U}_A$ und $\hat{I}_A = \hat{I}_{A \max}$) wird folglich pro Periode (Aufladen des Aktors, gefolgt von Entladen) in der analogen Endstufe das Doppelte der Energie

$$E_A = \frac{1}{2} C_A U_B^2 , \quad (4)$$

die dem Aktor zunächst zu- und dann wieder abgeführt wurde, in Wärme umgesetzt. Beim Aufladen des Aktors wird prinzipbedingt genauso viel Energie im oberen Transistor in Wärme umgesetzt wie dem Aktor zugeführt wird. Je nach Ankopplung der mechanischen Last wird erfahrungsgemäß bis zu 30 % der zugeführten Energie im Wandler in Verlustwärme und im angeschlossenen mechanischen System in mechanische Arbeit umgesetzt. Der restliche Anteil von 70 % bleibt zunächst im Wandler gespeichert und wird anschließend in der Entladephase im unteren Leistungstransistor ebenfalls in Wärme umgesetzt.

Bei hochdynamischen Großsignal-Anwendungen im Dauerbetrieb, wie beispielsweise der Schwingungserzeugung, wird auf diese Weise schnell die Größenordnung von einigen Hundert Watt erreicht, die das Versorgungsnetz liefern muss und die zum größten Teil in den Kühlkörpern der Endstufe in Wärme umgesetzt wird. Vor allem die Abmessungen der hierfür benötigten Kühlkörper steht der Miniaturisierung einer solchen Leistungselektronik entgegen.

Damit bei gewünschter rechteckförmiger Aktorspannung der Ladestrom des Aktors sicher begrenzt werden kann, müssen umfangreiche Maßnahmen zur zuverlässigen Strombegrenzung getroffen werden. Bei entsprechender Auslegung lassen sich auf diese Weise Pulsströme einstellen, die wesentlich höher sind als der Strom $\hat{I}_{A \max}$, der bei maximaler Aussteuerung für den Dauersinus-Betrieb notwendig ist. Mit solchen hohen Pulsströmen sind Rechteckpulse sehr hoher Flankensteilheit möglich. Ist die Wiederholrate der Pulse hinreichend gering, so

können mit verhältnismäßig kleinen Kühlkörpern Pulsverlustleistungen von einigen Kilowatt sicher abgeführt werden.

Ein Nachteil des Klasse-C-Betriebes sind die Übernahmeverzerrungen im Nulldurchgang des Stromes, wenn der eine Transistor stromlos wird und der andere gerade zu leiten beginnt. Beim Klasse-A-Betrieb werden die Verzerrungen dadurch minimiert, dass immer beide Transistoren im leitenden Betrieb gehalten werden, siehe Bild 2.

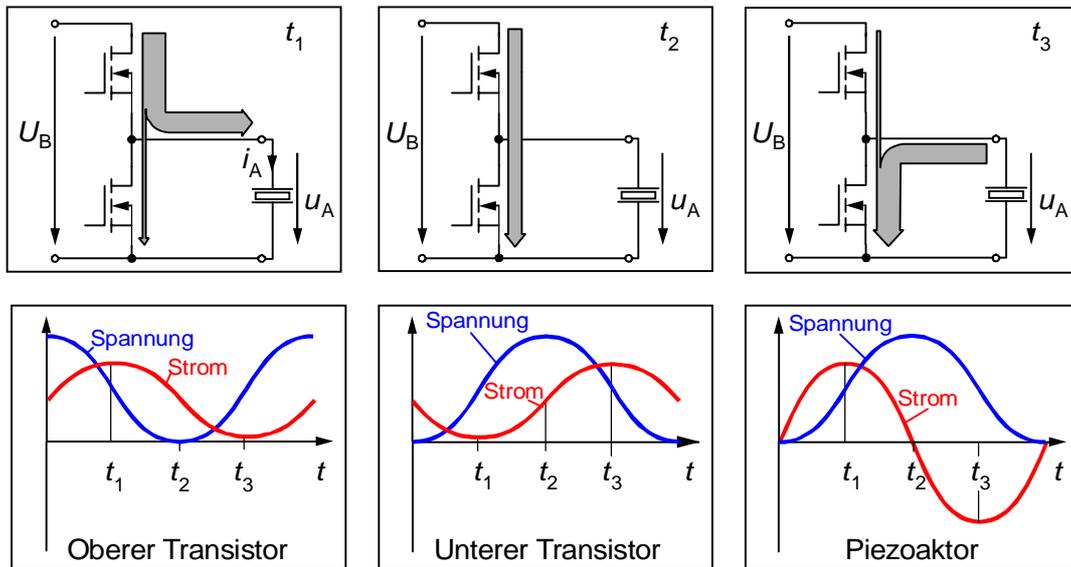


Bild 2: Spannungs- und Stromverläufe beim Klasse-A-Verstärker

t_1 : Aufladen des Aktors mit maximalem Strom

t_2 : Halten der Aktorspannung

t_3 : Entladen des Aktors mit maximalem Strom

In Bild 2 ist auch erkennbar, dass im Klasse-A-Betrieb der Ruhestrom $\hat{I}_{A \max} / 2$ betragen muss, was zu hohen Verlustleistungen von $(\hat{I}_{A \max} / 2) U_B$ führt. Deswegen ist diese Betriebsart nur für den niedrigen Leistungsbereich geeignet, wenn vor allem hohe Anforderungen an die Güte des Ausgangssignals im Vordergrund stehen, wie es beispielsweise bei Präzisionspositionierungen der Fall ist (vgl. Tabelle 1)

Schaltende Verstärker zur Ansteuerung von Piezoaktoren

Geringe Leistungsverluste bei der Ansteuerung von Piezoaktoren, eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine mögliche Miniaturisierung, erfordert, dass die Leistungselektronik sowohl in der Lage ist den Aktor mit minimalen Verlusten aufzuladen, als auch bei der Entladung die im Aktor gespeicherte Energie zurückzugewinnen. Beide Anforderungen lassen sich mit schaltenden Verstärkern erfüllen.

Bild 3 zeigt eine mögliche Schaltung für einen solchen Verstärker. Im Unterschied zum analogen Verstärker werden hierbei die beiden Leistungstransistoren als reine Schalter eingesetzt, was zu einer drastischen Reduzierung der Verluste führt. Darüber hinaus wird nun ein zusätzliches Bauelement, eine Drossel, benötigt. Sie erfüllt zwei wesentliche Aufgaben. Während der Phasen I und III dient sie zum verlustlosen Begrenzen des Aktorstromes und in der Phase IV ermöglicht sie ein Rückspeisen der im Aktor gespeicherten Energie (Energierückgewinnung). Sowohl in Phase II als auch in Phase IV, nach dem Öffnen des entsprechenden Leistungstransistors, führt die in der Drossel gespeicherte Energie zu einem weiteren Auf- bzw.

Entladen des Aktors. Dieser „unkontrollierbare“ Anteil des Ladestromes erschwert die Regelung eines solchen Verstärkers.

Da die Drossel im Hinblick auf den maximalen Ladestrom des Wandlers dimensioniert werden muss, ist beim schaltenden Verstärker ein stark überhöhter Pulsstrom ähnlich wie beim analogen Verstärker nicht möglich. Somit ist beim schaltenden Verstärker die Dynamik prinzipiell auch im Großsignalbereich geringer als beim analogen. Zum Tragen kommt die hohe Energieausbeute eines schaltenden Verstärkers erst, wenn die hochdynamische Großsignalansteuerung dauerhaft gefordert ist, eine analoge Ansteuerung also mit sehr großen Dauerverlusten verbunden wäre (z.B. piezoelektrische Schwingerreger).

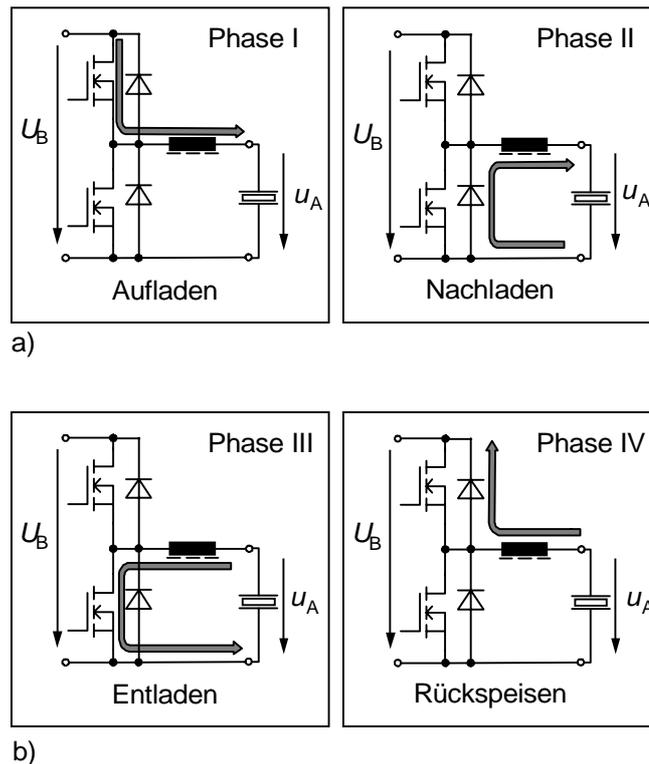


Bild 3: Bidirektionaler Schaltverstärker
a) Aufladezyklus b) Entladezyklus

Für die Regelung eines solchen Schaltverstärkers für Piezowandler existieren nun verschiedene Ansätze; der einfachste ist die festfrequente Pulsweitenmodulation (PWM). Hierbei wird normalerweise ein Transistor mit einer festen Schaltfrequenz geschaltet und die Dauer des Einschaltzustandes anhand der Soll-/Istwert-Differenz variiert. Im Falle einer kapazitiven Last muss dieses Verfahren jedoch modifiziert werden. Im einfachsten Falle wird während jeder Schaltperiode zunächst der obere Schalttransistor eingeschaltet, zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder geöffnet und schließlich für den Rest der Periodendauer der untere Transistor geschlossen. Durch Variation des Umschaltzeitpunktes lässt sich steuern, ob der Aktor aufgeladen, entladen oder ob der momentane Wert der Aktorspannung gehalten wird. Beim Halten ist der obere Transistor genau so lange eingeschaltet wie der untere, hierdurch wird dem Aktor im zeitlichen Mittel die selbe Ladung zu- wie abgeführt, und die Aktorspannung „rippelt“ mit der Schaltfrequenz um den Sollwert. Die Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass sich Drosselstrom und Aktorspannung in einem Schaltzyklus nur wenig ändern. Dies ist immer erfüllt, wenn mit einer wesentlich höheren Frequenz geschaltet wird, als die Eigenfrequenz des Serienschwingkreises, der sich aus der Drossel und der Aktorkapazität bildet. Die Ein-

fachheit des Schaltungsprinzips und die Verfügbarkeit von vielen kommerziellen Schaltteil-ICs, die alle für die PWM und die Regelung benötigten Komponenten enthalten, führt dazu, dass diese Art der Regelung von vielen Anwendern bevorzugt wird [1, 7].

Ein wesentlicher Nachteil eines solchen Verstärkers ist, dass er ständig schalten muss. Insbesondere bei DC-Spannungen am Aktor wird Ladung sinnlos umgeladen. Dies kann auf Grund der Schaltverluste im DC-Betrieb zu höheren Verlusten führen als beim analogen Klasse-C-Verstärker, der zum Halten der Aktorladung keinerlei Energie benötigt. Ein weiterer Aspekt, der hiermit unmittelbar in Verbindung steht, rührt aus der kapazitiven Belastung durch den piezoelektrischen Aktor her. Piezoaktoren können Ladungsänderungen sehr schnell in Bewegung umsetzen. Auch wenn die Schaltfrequenz sehr viel höher gewählt wird als die mechanische Eigenfrequenz des Aktors, kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch die Schaltripfel insbesondere bei Multilayerkeramiken einzelne Scheiben in Bewegung versetzt werden. Permanentes „Rippeln“ um den eigentlichen Sollwert führt folglich zu einer erhöhten mechanischen und auf Grund von Hystereseverlusten auch zur thermischen Belastung des Aktors. Durch Verwendung zweier getrennter Pulsweitenmodulatoren für das Auf- und Entladen und eines Toleranzbandes um den Sollwert von u_A kann erreicht werden, dass der Verstärker beim Erreichen des Sollwertes aufhört zu schalten. Hierdurch lassen sich seine Leistungsverluste insbesondere im DC-Betrieb reduzieren, und der Aktor wird weniger belastet. Ungünstig ist jedoch, dass die Einführung eines Toleranzbandes auch eine Einbuße in der Regelgenauigkeit nach sich zieht.

Ein Nachteil, der sich mit dieser Methode nicht beheben lässt, ist die schwierige Auslegung des LC -Kreises. Schaltverstärker mit Energierückgewinnung sind auf Grund ihres hohen Designaufwandes nur dann sinnvoll, wenn die Steuerleistung gemäß Gleichung 3 hoch ist. Hohe Steuerleistungen treten jedoch vor allem bei der dynamischen Ansteuerung der Aktoren auf. Die Eigenfrequenz des LC -Kreises muss nun einerseits hoch gegenüber der maximalen Signalfrequenz sein (sinnvoll z.B. 1 kHz), andererseits jedoch wesentlich niedriger als die Schaltfrequenz, damit die PWM keine Sättigung der Drossel bewirkt. Hierdurch werden schnell Schaltfrequenzen von mehreren hundert Kilohertz erforderlich, was bei Spannungen von 150 V bis 1000 V und Leistungen von mehreren hundert Watt nicht unproblematisch ist, insbesondere da die Ansteuerung des oberen Transistors potenzialfrei erfolgen muss.

Bei anderen Ansätzen wird unter Zuhilfenahme eines Aktormodells und der mathematischen Beschreibung der Endstufe für jeden Schaltzyklus die erforderliche Schaltzeit bzw. der damit verbundene maximale Drosselstrom errechnet. Auf diese Weise gelingt es, mit jedem Schaltzyklus nur diejenige Ladung zu übertragen, die zum Erreichen einer bestimmten Aktorspannung notwendig ist. Für die zeitkritischen Rechnungen wird dazu ein Signalprozessor oder ein frei programmierbares Gate Array (FPGA) [3] verwendet. In [5] wird eine Schaltung vorgestellt, mit der es gelingt, einen piezoelektrischen Aktor in einem einzigen Schaltzyklus von 0 V auf eine bestimmte, jedoch feste Ausgangsspannung aufzuladen. Die hierfür erforderliche Schaltzeit wird aus der Systemdifferentialgleichung und der Energiebilanz errechnet. Die Realisierung der Schaltzeit erfolgt mit Hilfe einer einfachen Timerschaltung.

Schaltverstärker mit "intelligentem" Schalten

Die konsequente Weiterführung des letzten Gedankens führt zu einem Regelkonzept, mit dem es ohne Verwendung eines komplexen Rechenwerkes gelingt, mit jedem Schaltzyklus nur diejenige Energieportion zu übertragen, die zum Erreichen einer bestimmten Aktorspannung notwendig ist [2]. Auf diese Weise können unnötige Schaltzyklen, die lediglich den Aktor und die Leistungshalbleiter belasten, vermieden werden. Durch die explizite Auswertung der Dif-

ferentialgleichung der Leistungsendstufe in jeder Phase (vgl. Bild 3) kann die exakte Zeitspanne Δt errechnet werden, für die der MOSFET M_1 bzw. M_2 geschlossen werden muss, um von einem beliebigen Istwert der Wandlerspannung in einem einzigen Schaltzyklus auf einen beliebigen Sollwert zu kommen. Das Ergebnis ist eine nichtlineare Gleichung in Abhängigkeit vom momentanen Istwert der Wandlerspannung und vom gewünschten Sollwert. Damit die Dynamik des Schaltverstärkers nicht durch lange Rechenzeiten begrenzt wird, wird an Stelle eines Rechenwerkes ein Halbleiterspeicher verwendet, in dem für alle Soll-/Istwertpaare die entsprechenden Schaltzeiten tabelliert sind, siehe Bild 4. Im Betrieb wird dieser Speicher direkt von schnellen AD-Umsetzern angesteuert, welche unmittelbar die Systemgrößen erfassen. Durch eine Modifikation der Schalttabelle lässt sich auch eine Überstrombegrenzung ohne Strommessung implementieren. Die gesamte Kontrolllogik der Schaltung ist in einem programmierbaren Logikbaustein (CPLD) implementiert. Bild 5 zeigt einige Messergebnisse, die mit diesem Konzept erzielt worden sind.

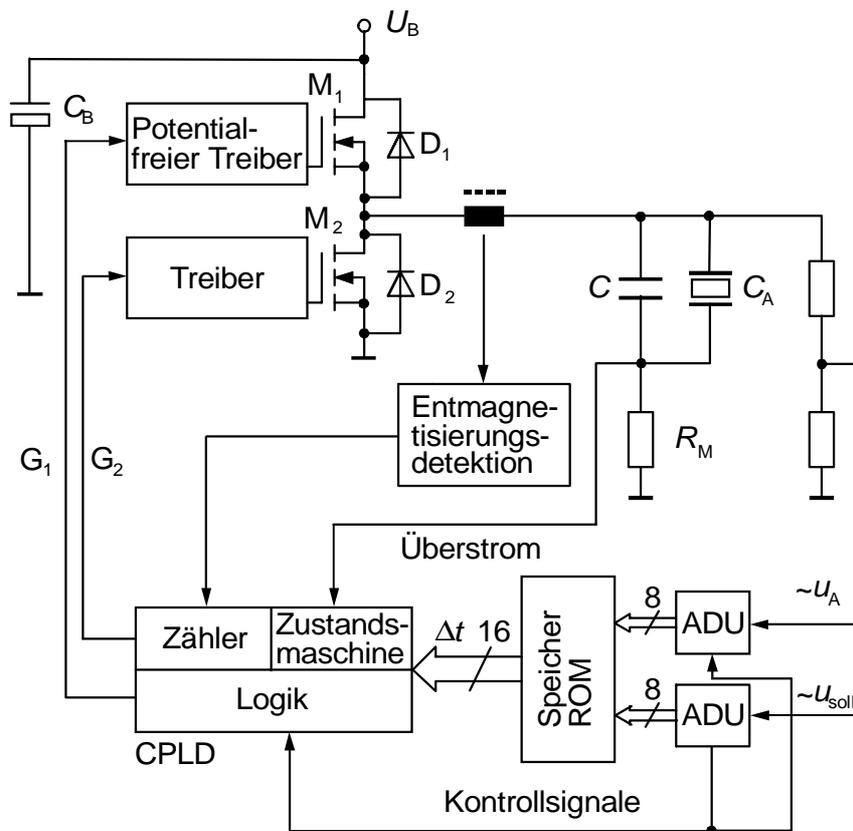


Bild 4: Schaltbild eines Schaltverstärkers mit „intelligentem“ Schaltzyklus [2]

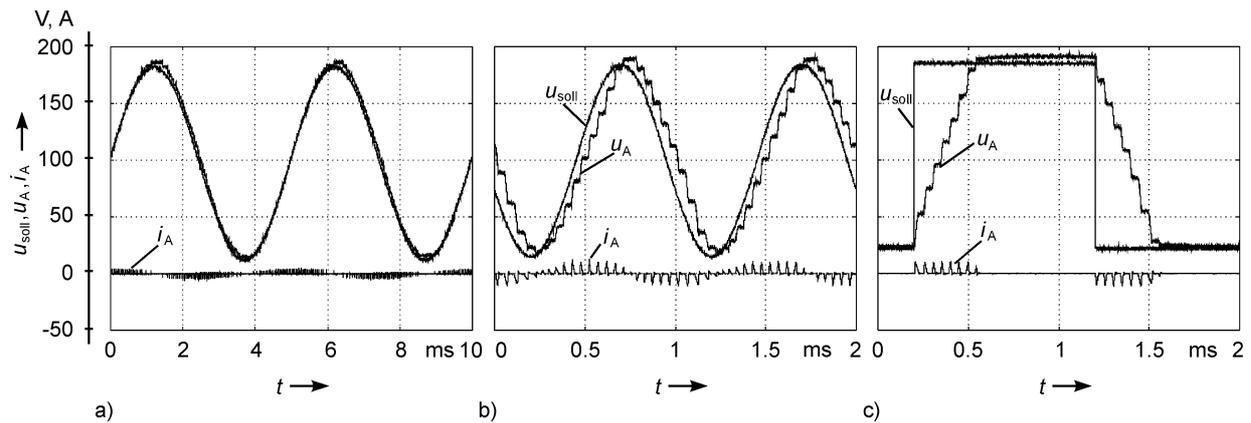


Bild 5: Gemessene Ausgangssignale eines Schaltverstärkers mit „intelligentem“ Schaltzyklus
a) 200 Hz-Sinussignal b) 1 kHz-Sinussignal c) 500 Hz-Rechtecksignal [2]

Im Vergleich mit konventionellen, schaltenden Verstärkern ist die Güte des Ausgangssignals exzellent (Bild 5a). Erst bei höherfrequenten Eingangssignalen (Bild 5b) wird die schaltende Arbeitsweise des Verstärkers deutlicher erkennbar. Die Ausgangsspannung eilt der Eingangsspannung immer um einen Schaltzyklus nach, und ein neuer Schaltzyklus kann nur gestartet werden, wenn die Drossel entmagnetisiert ist. Das 500 Hz-Rechtecksignal zeigt weitere Eigenschaften des Verstärkers: Die Strombegrenzung sorgt für ein stufenweises Ansteigen der Aktorspannung; mit der letzten Stufe wird der gewünschte Sollwert exakt erreicht, und der Verstärker hört auf zu schalten. Da die Aktorkapazität niemals überladen wird, sind auch keine zusätzlichen Schaltzyklen zur Korrektur der Aktorspannung erforderlich. Das ist ein wesentlicher Vorteil dieses Konzepts, der in dieser Form mit einer einfachen Pulsweitenmodulation nicht erzielbar wäre. Weiterhin ist in Bild 5b erkennbar, dass der Ladestrom des Aktors diskontinuierlich fließt mit relativ hohen Spitzenwerten bis zu 12 A. Dies ist eine Eigenart, die von der schaltenden Arbeitsweise der Endstufe herrührt und mehr oder weniger stark ausgeprägt bei allen schaltenden Verstärkern auftritt.

Hybridverstärker

Die in Bild 5b dargestellten Diskontinuitäten im Ladestrom i_A der Aktoren werden von der Piezokeramik teilweise in hochfrequente, nicht gewünschte Bewegung umgesetzt. Dies führt zu einer erhöhten Belastung gegenüber einer gleichfrequenten analogen Ansteuerung mit der selben Spannungsamplitude und kontinuierlichem Ladestrom [6]. Ideal wäre folglich ein Verstärker, der die hohe Effizienz eines schaltenden Verstärkers mit den kontinuierlichen Spannungs- und Stromverläufen eines analogen Verstärkers kombiniert. Bild 6 zeigt das Schaltungsprinzip eines solchen „hybriden“ Verstärkers.

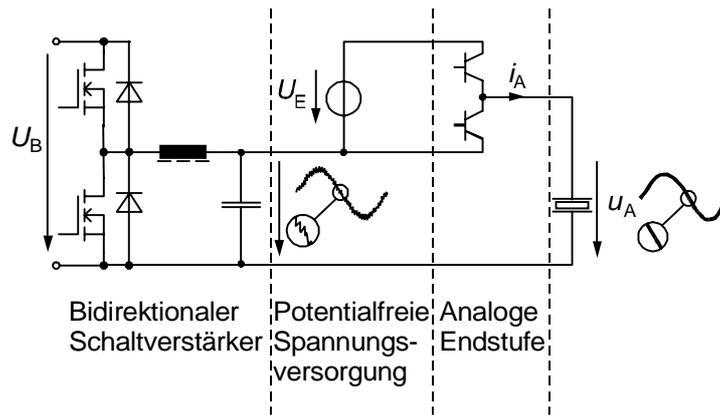


Bild 6: Prinzipschaltbild eines Hybridverstärker [6]

Die Ansteuerung des Piezoaktors erfolgt hierbei, wie bei einem Analogverstärker, mit hoher Präzision über eine analoge Endstufe. Diese wird jedoch nicht mit der maximalen Ausgangsspannung versorgt, sondern lediglich mit der niedrigen Spannung $U_E = 20 \dots 40 \text{ V}$. Deswegen bleiben, obwohl der gesamte Wandlerstrom i_A kontrolliert und frei von Stromrippeln durch die analoge Endstufe fließt, deren Leistungsverluste gering. Damit nun trotz der niedrigen Versorgungsspannung U_E der Endstufe ein Aufladen des Aktors bis zur erforderlichen Hochspannung $\hat{U}_A = 150 \dots 1000 \text{ V}$ möglich ist, lässt sich das Bezugspotenzial der analogen Endstufe mit Hilfe eines bidirektionalen Schaltverstärkers verlustlos auf jede beliebige Spannung zwischen 0 V und \hat{U}_A verschieben. Diese Potenzialverschiebung setzt voraus, dass sowohl die Zuführung der Versorgungsspannung, als auch die gesamte Regelung der analogen Endstufe sowie die Zuführung aller Eingangssignale zur Endstufe potenzialfrei erfolgen. Eine analoge Regelung ist jedoch nur solange möglich, wie das Bezugspotenzial der analogen Endstufe der Spannung am Aktor exakt nachgeführt wird, was eine sehr hohe Anforderung an die Signalgüte des schaltenden Verstärkers stellt (Verstärker mit "intelligentem Schalten"). Sind alle diese Bedingungen erfüllt, so stellt der Hybridverstärker die ideale Kombination aus einem schaltenden Verstärker mit hoher Energieausbeute und einem analogen Verstärker mit großer Signalgüte dar. Darüber hinaus werden die Aktoren nicht mehr durch diskontinuierliche Ladeströme mit hohen Stromspitzen belastet.

Vergleich der Verstärkerarten

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der verschiedenen Verstärkerarten. In vielen Fällen ist das zur Verfügung stehende Bauvolumen ein wichtiges Auswahlkriterium. Bei analogen Verstärkern wird das Bauvolumen durch die erforderliche Kühlung bestimmt, d.h. bei gegebener Maximalspannung durch den Ausgangsdauerstrom. Im Klasse-C-Betrieb kann dieser Ausgangsdauerstrom kurzzeitig und mit niedriger Wiederholrate um bis zum Hundertfachen überschritten werden (Pulsbetrieb). Nicht so jedoch bei schaltenden Verstärkern. Hier ist das volumenbestimmende Element die Speicherdrossel; sie muss stets auf den maximalen Pulsstrom dimensioniert werden, der auf Grund der niedrigen Verluste dem Dauerstrom entsprechen kann.

In der Praxis bedeutet dies, dass im Falle einer niedrigen Ausgangsdauerleistung und vereinzelter kurzer Rechteckpulse das Bauvolumen eines Klasse-C-Verstärkers unter Umständen kleiner ausfallen kann, als das eines Schaltverstärkers mit Energierückgewinnung, da die Drossel des Schaltverstärkers stets auf den maximalen Pulsstrom ausgelegt sein muss, auch wenn dieser nur zeitweise benötigt wird. Bei den Verlusten kann es trotz der Energierückgewinnung ähnlich sein, wenn berücksichtigt wird, dass der schaltende Verstärker auf Grund seiner „höheren Intelligenz“ (Stromverbrauch des CPLDs, usw.) Ruheverluste von einigen

Watt verursacht im Gegensatz zum Klasse-C-Verstärker, dessen Ruheverluste verschwindend gering sein können.

Kriterium	Analoger Klasse-A-Verstärker	Analoger Klasse-C-Verstärker	Schaltender Verstärker	Hybrider Verstärker
Verluste in den Leistungstransistoren	auch im Ruhezustand sehr hoch	bei Ansteuerung hoch	sehr niedrig	niedrig
Rückspeisung der gespeicherten Feldenergie	nicht möglich	nicht möglich	möglich	möglich (zum größten Teil)
Restwelligkeit des Ausgangssignals	extrem gering	sehr gering	hoch	gering
Verhältnis Puls- / Dauerstrom ¹	typisch 3,14 (π)	bis 100	1	1
Dynamik im Kleinsignalbetrieb ²	extrem hoch	sehr hoch	gering	hoch
Belastung des Aktors ³	sehr gering	sehr gering	hoch	gering
Elektromagnetische Verträglichkeit	sehr gut	sehr gut	schlecht aktiv störend	schlecht aktiv störend
Lastbereich ⁴ ($C_A / C_{A\text{ Nenn}}$)	100	100	≈ 5	100

¹ wichtig für die maximale Flankensteilheit einzelner Rechteckpulse bei gegebenem Bauvolumen (Dauerstrom)

² ohne Ansprechen der Maximalstrombegrenzung

³ Belastung durch Anteile des Aktorstromes, die nicht vom Eingangssignal herrühren (z.B. Stromrippel, diskontinuierlicher Ladestrom)

⁴ Variationsbereich der Lastkapazität um den Nennwert, ohne dass eine Änderung der Regelparameter des Verstärkers vorgenommen werden muss.

Tabelle 1 : Vergleich verschiedener Verstärkerarten für Piezoaktoren

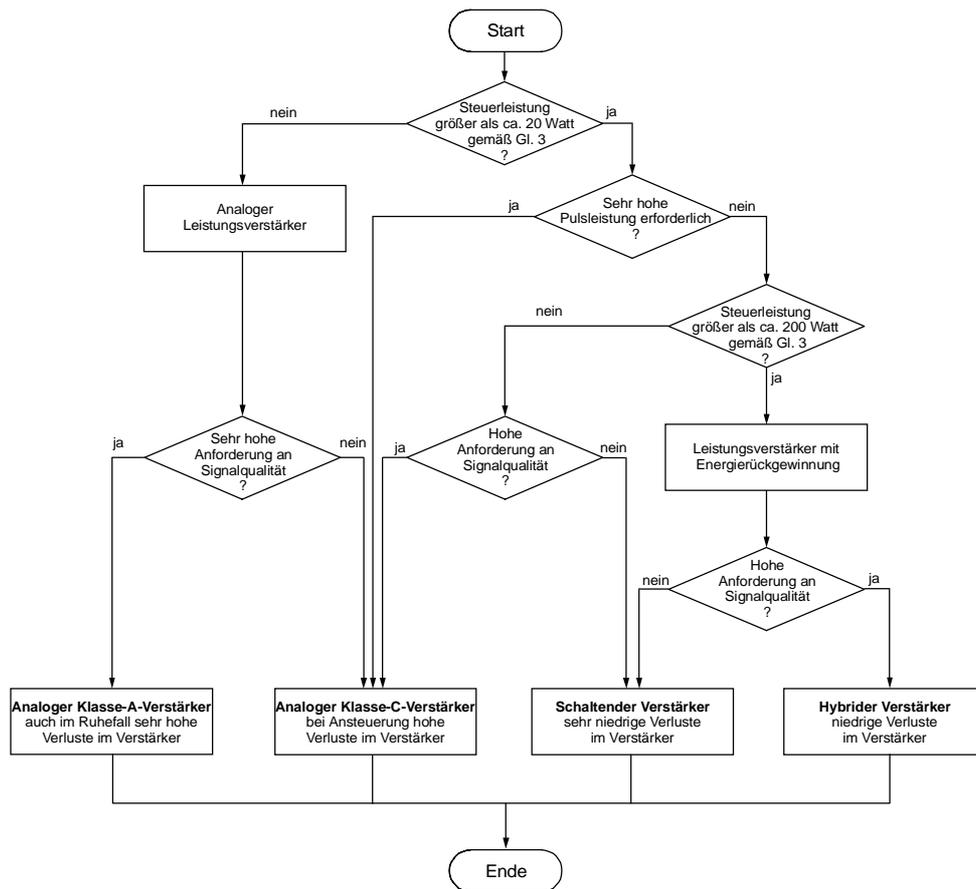


Bild 7: Mögliche Vorgehensweise bei der Auswahl eines Piezoverstärkers

Generell lässt sich festhalten, dass es den universellen Verstärker, der alle denkbaren Anwendungen von Piezoaktoren gleich gut abdeckt, nicht gibt. Als Orientierungshilfe bei der Auswahl einer geeigneten Verstärkerart kann das Flussdiagramm Bild 7 dienen, das mehrjährige Erfahrungen der Autoren widerspiegelt. In schwierigen Fällen oder wenn optimale Lösungen gefunden werden müssen, ist jedoch spezieller fachmännischer Rat unverzichtbar. Hierfür stehen Dienstleister wie die *D*ASS* mbH (<http://www.dass.de>) bereit, in deren Produkte und Dienstleistungen die hier vorgestellten Erkenntnisse seit langem eingeflossen sind.

Literatur

- [1] Clingman, D.J.: *Drive Electronics for Large Piezo Actuators*; Proc. SPIE Vol. 3044; Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies; San Diego; USA; 1997; S. 459-467
- [2] Janocha, H.; Stiebel, C.: *New Approach to a Switching Amplifier for Piezoelectric Actuators*, Proc. 6th Internat. Conf. on New Actuators; Bremen; Germany; 1998; S. 189-192
- [3] Kasper, R.; Schröder, J.; Wagner, A.: *Schnellschaltendes Hydraulikventil mit piezoelektrischem Stellantrieb*; O+P Ölhydraulik und Pneumatik; 1997; Nr. 41; S. 694-698
- [4] N.N.: *Der neue Dieselspezialist, mit Piezohydraulik zur Serienfertigung*, Nutzfahrzeug-Dieselspezialist für Nordamerika; Siemens Automobiltechnik; <http://www.siemens.de>; 1999
- [5] Schmeißer, F.: *Piezoelektrische Aktuatoren: Kräftig und schnell*; Elektronik; 1984; Nr. 8; S. 92-96
- [6] Stiebel, C.; Würtz, T.; Janocha, H.: *Analogverstärker mit Energierückgewinnung zum Ansteuern von piezoelektrischen Aktoren*, SPS/IPC/DRIVES; Elektrische Automatisierungstechnik - Systeme und Komponenten MESAGO, 1999. - Nürnberg, S. 693-702

- [7] Zvonar, G.A.; Douglas, K.L.: *Nonlinear Electronic Control of an Electrostrictive Actuator*, Proc. SPIE Vol. 3044; Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies; San Diego; USA; 1997; S. 448-458