

freeDSPx AMP x4:

Ein kostengünstiges, quelloffenes Mehrkanal - Audioverstärkermodul

Tom Wühle, Simon Steiner, Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy

TU Dresden, Lehrstuhl für Akustik und Haptik, 01069 Dresden, Deutschland, Email: tom.wuehle@tu-dresden.de

Einleitung

In modernen elektroakustischen Wiedergabesystemen ist häufig die kombinierte Verarbeitung und Verstärkung von Audiosignalen erforderlich. Typischerweise werden dazu digitale Signalprozessoren (DSPs) in Kombination mit Verstärkern eingesetzt, die in geeigneter Weise miteinander verbunden werden. Ein Lösungsansatz für den Aufbau derartiger Wiedergabesysteme, der insbesondere während des Entwicklungsprozesses häufig angewendet wird, ist die Nutzung kommerziell verfügbarer DSP-Entwicklungsboards und kommerziell verfügbarer Verstärker als losgelöste Teilsysteme. Zu ihrer Verbindung werden analoge oder digitale (z. B. SPDIF, ADAT, MADI, usw.) Standard-Audioschnittstellen genutzt. Diese werden über zusätzliche Verarbeitungsstufen wie DA-Wandler, Ausgangsfilter, Eingangsfilter, AD-Wandler, und/oder verschiedene Codecs aus den hardwarenahen digitalen Audioschnittstellen (z. B. I²S) der zugrundeliegenden DSPs und Verstärker erzeugt. Im Gegensatz zu DSP-Entwicklungsboards, sind diese bei kommerziell verfügbaren Verstärkern jedoch üblicherweise nicht von außen zugänglich. Insbesondere bei komplexen, mehrkanaligen Systemen entsteht so ein enormer Hardwareaufwand der sich nachteilig auf die Signallaufzeit auswirken und auch einen erheblichen Kostenfaktor mit sich bringen kann. Ein alternativer Lösungsansatz zur Realisierung derartiger Wiedergabesysteme, der vor allem bei der finalen Produktentwicklung angewendet wird, ist die Integration beider Teilsysteme auf einer gemeinsamen Hardwareplattform. Zu ihrer Verbindung können dann direkt die verfügbaren hardwarenahen digitalen Audioschnittstellen genutzt werden und es sind keine zusätzlichen Verarbeitungsstufen erforderlich. Die entstehenden Systemlösungen sind robust, schnell und effizient. Sie erfordern jedoch stets eine individuelle Hardwareentwicklung.

Ziel des vorliegenden Beitrages ist die Vereinigung der beiden Lösungsansätze, durch die Entwicklung eines mehrkanaligen Audioverstärkermoduls, dass eine hardwarenahe digitale Audioschnittstelle aufweist. Das Modul ermöglicht damit die effektive und kostengünstige Entwicklung elektroakustischer Wiedergabesysteme und macht die vollständige Systemintegration in bestimmten Fällen überflüssig. Es stellt eine Erweiterung des quelloffenen freeDSP-Projektes am Lehrstuhl für Akustik und Haptik dar und trägt die Bezeichnung freeDSPx AMP x4. Im Folgenden wird zunächst das freeDSP-Projekt vorgestellt. Anschließend wird auf Konzeption und Implementierung des Audioverstärkermoduls eingegangen und es werden Anwendungsbeispiele vorgestellt.

Das freeDSP-Projekt

Das freeDSP-Projekt wurde von der Lautsprecher AG, einer studentischen Gruppe am Lehrstuhl für Akustik und Haptik, ins Leben gerufen. Ihr Ziel war es, ein kostengünstiges Audio-DSP-Modul zu entwickeln, das möglichst selbst herstellbar und einfach zu programmieren ist, um einen unkomplizierten Einstieg in das Themengebiet der Audiosignalverarbeitung zu ermöglichen. Darüber hinaus sollte eine modulare Erweiterbarkeit gewährleistet sein. Als Ergebnis entstand das freeDSP classic [1], ein Audio-DSP-Modul basierend auf dem DSP ADAU1701 von Analog Devices.

Um eine möglichst hohe Nachnutzbarkeit zu erreichen, wurde das gesamte Projekt quelloffen ausgerichtet. Sämtliche Entwicklungs- und Fertigungsdaten wurden auf einer eigens eingerichteten Website [2] unter einer Creative-Commons-Lizenz (CC-BY-SA) veröffentlicht. Diese erlaubt die uneingeschränkte Nutzung der veröffentlichten Daten, solange darauf aufbauende Projekte unter der gleichen Lizenz veröffentlicht werden. Das freeDSP-Projekt gewann schnell an Bekanntheit und wurde größer. Es wurden spezielle Anleitungen (sog. Getting Started Guides) veröffentlicht, die den Einstieg in den Umgang mit dem Audio-DSP-Modul, aber auch in fortführende Themen der Audiosignalverarbeitung mit DSPs erleichtern. Weiterhin wurden Entwicklungsrichtlinien [3] festgelegt, um die modulare Erweiterung des Audio-DSP-Moduls zu koordinieren und Kompatibilität zu gewährleisten. Im Laufe der Zeit traten Entwickler aus ganz Europa bei und es entstanden Erweiterungen, wie z. B. Module mit zusätzlichen Eingängen und Ausgängen, Kopfhörerverstärker oder echtzeitfähige Programmieradapter. Das im Rahmen des vorliegenden Beitrages vorgestellte Verstärkermodul, stellt ein weiteres Erweiterungsmodul des freeDSP-Projektes dar.

Entwurf

Mit der modernen Halbleitertechnik ist es in den meisten Fällen überflüssig, bestimmte Schaltungen vollständig aus diskreten Bauelementen aufzubauen. Vielmehr werden bestimmte Basisfunktionen mit integrierten Schaltungen (ICs) platzsparend umgesetzt, deren Funktionalität durch eine geringe Anzahl von diskreten Bauelementen in ihrer Außenbeschaltung definiert oder ergänzt wird. Als Entwurfsgrundlage für das Verstärkermodul des vorliegenden Beitrages wurden ebenfalls integrierte Schaltungen festgelegt.

Anforderungen

Wie einleitend beschrieben, bestand die Hauptanforderungen an das Verstärkermodul darin, dass es eine hardwarenahe digitale Audioschnittstelle mit mehreren Kanälen aufweisen soll. Im Hinblick auf die verfügbaren Schnittstellen am freeDSP classic, wurde dafür die I²S-TDM8 Schnittstelle ausgewählt. Diese überträgt acht Audiokanäle in einem seriellen Datenstrom [4]. Darüber hinaus wurden folgende Anforderungen festgelegt:

- Betriebsspannung: 12 V bis 24 V
- Leistung: ca. 20 W pro Kanal
- Kosten: 10 bis 15 Euro pro Kanal
- Gesamtqualität > Low Budget
- Schutzschaltungen gegen typische Fehler im Betrieb
- Energieeffizienz: Class-D Topologie [5]
- Keine Konfiguration per Software erforderlich

Auswahl des Verstärker-ICs

Eine Betrachtung verschiedener verfügbarer Verstärker-ICs zeigt, dass die gestellten Anforderungen durchaus anspruchsvoll sind. Im geforderten Preissegment sind ICs mit der geforderten Schnittstelle eher weniger oft vertreten. Die geforderte Konfigurierbarkeit ohne Software schränkt die Auswahl der ICs ebenfalls ein. Nichts desto trotz, konnte mit dem Verstärker-IC TAS5720M [6] von Texas Instruments eine integrierte Schaltung gefunden werden, welche die oben genannten Anforderungen erfüllt.

Dabei handelt es sich um einen Class-D Verstärker, der einen frei adressierbaren Kanal des I²S-TDM8 Datenstroms verstärkt. Bei Leistungen von bis zu 13 W bei 12 V Betriebsspannung und einer Last von 4 Ω , liegen die entstehenden Verzerrungsprodukte im Ausgangssignal bei weniger als 0,1 % THD+N (bzw. < 10 % THD+N bei bis zu 18 W). Das Verstärker-IC verfügt über Schutzschaltungen gegen überhöhte Kerntemperatur, Überstrom am Ausgang oder Eingangssignalverlust. Addressierung, Ausgangsfilter und Fehleranzeige müssen durch Außenbeschaltung festgelegt bzw. ergänzt werden. Der Leistungsteil des ICs kann mit einer Betriebsspannung von bis zu 26,4 V betrieben werden. Für den Digitalteil (Schnittstelle, Adressierung, usw.) ist eine zusätzliche Betriebsspannung von 3,3 V bereitzustellen.

Schaltungskonzept

Abbildung 1 zeigt das Schaltungskonzept für das freeDSPx AMP x4 Verstärkermodul in einem Blockschaltbild. Es wurde eine Anzahl von vier Kanälen festgelegt. Dadurch ist es möglich, das Layout auf einer verhältnismäßig kleinen Platinenfläche (10 cm x 6 cm) umzusetzen, wodurch letztlich entsprechend geringe Kosten für die Platinenfertigung entstehen. Darüber hinaus legen die freeDSP Entwicklungsrichtlinien [3] eine

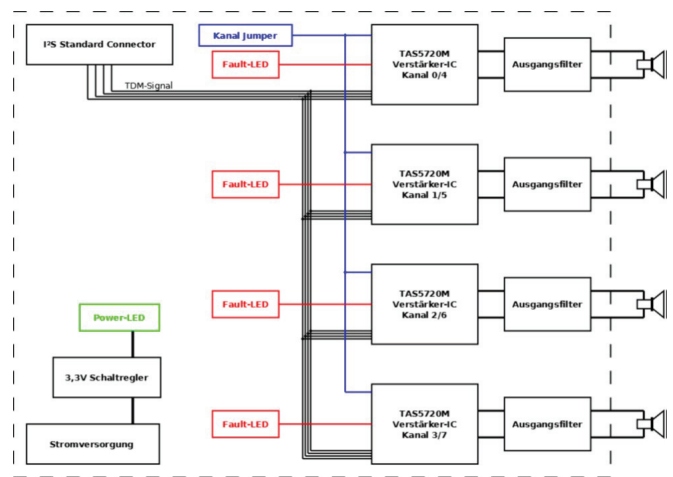


Abbildung 1: Schaltungskonzept des freeDSP x AMP x4 Verstärkermoduls.

bestimmte Anordnung der Ein- und Ausgangsklemmen fest, die sich so ebenfalls leichter erreichen lässt.

Die Anbindung an die I²S-TDM8-Schnittstelle wurde mit Hilfe eines modularen Adressierungskonzepts realisiert. Den vier Kanälen des Verstärkermoduls lassen sich per Jumper die Adressen 0-3 oder 4-7 des I²S-TDM8-Datenstroms zuweisen. Dadurch ist es möglich, die vollen acht Kanäle der I²S-TDM8-Schnittstelle durch den parallelen Anschluss zweier Verstärkermodule auszunutzen. Für die Fehleranzeige wurde eine rote LED je Verstärker-IC vorgesehen. Im Fehlerfall wird der betreffende Verstärkerkanal ohne Schaltgeräusche solange abgeschaltet, bis die Fehlerursache nicht mehr vorliegt. Die Ausgangsfilter wurden im Wesentlichen nach den Vorgaben im Datenblatt des Verstärker-ICs [6] dimensioniert. Allerdings musste aus Kostengründen auf Spulen mit abweichendem Kernmaterial zurückgegriffen werden. Für die Bereitstellung der Betriebsspannung für den Digitalteil der Verstärker-ICs wurde eine Spannungsregelung, basierend auf dem Schaltnetzteil-IC LM2841 von Texas Instruments realisiert. Gemäß der freeDSP Entwicklungsrichtlinien [3] wurde ein zweilagiges Platinendesign für die Realisierung der Schaltung des Verstärkermoduls vorgesehen, sowie ein freeDSP I²S-Standardconnector zum Anschluss der Eingangs- und Taktsignale. Zum Anschluss der Betriebsspannung und der Lautsprecher wurden robuste Schraubklemmen vorgesehen.

Implementierung

Das Schaltungskonzept wurde mit der frei verfügbaren Software KiCad [7] umgesetzt. Sämtliche Schaltpläne und Fertigungsdaten für das freeDSPx AMP x4 Modul wurden auf der freeDSP Website [2] veröffentlicht. Dort ist auch ein entsprechender Getting Started Guide [9] zu finden, der detaillierte Hinweise zu Fertigung und Inbetriebnahme enthält. Abbildung 2 zeigt ein vollständig bestücktes freeDSPx AMP x4 Verstärkermodul.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme wurden u. a. verschiedene Messungen zum Verzerrungsverhalten des Verstärkermoduls [8] durchgeführt. Bei einer Betriebs-

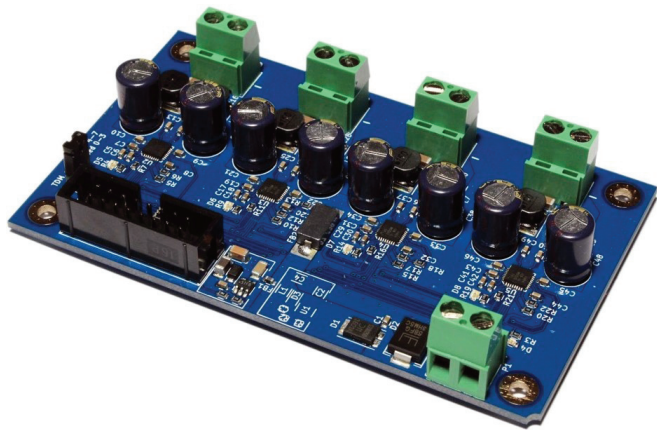


Abbildung 2: freeDSPx AMP x4 Verstärkermodul.

spannung von 12 V und einer Last von $4\ \Omega$ liegen die Verzerrungsprodukte im Ausgangssignal für Leistungen bis 11,9 W bei weniger als 0,1 % THD+N (bzw. $< 10\%$ THD+N bei bis zu 15,2 W). Das Verzerrungsverhalten des freeDSPx AMP x4 Moduls ist damit minimal schlechter, als die Datenblattangaben des verwendeten Verstärker-ICs. Dies kann durch das abweichende Kernmaterial der verwendeten Spulen im Ausgangsfilter, aber auch durch Begrenzungen bei der Ausführung des Layouts im zweilagigen Platinendesign verursacht werden (der Hersteller empfiehlt ein vierlagiges Platinendesign [10]).

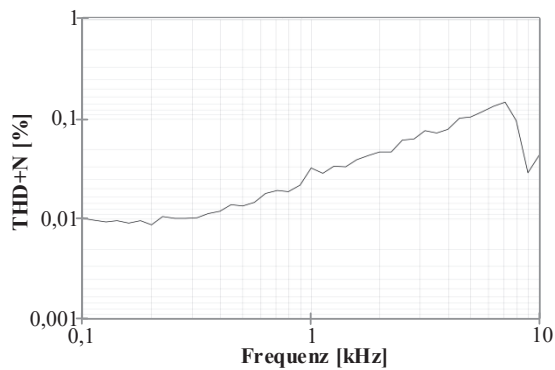


Abbildung 3: Frequenzabhängiges Verzerrungsverhalten des freeDSPx AMP x4 Verstärkermoduls bei 12 V Betriebsspannung und einer Leistung von 1 W an einer Last von $4\ \Omega$.

Abbildung 3 zeigt die Messung der Verzerrungsprodukte im Ausgangssignal des Verstärkermoduls in Abhängigkeit der Frequenz bei einer Betriebsspannung von 12 V und 1 W Leistung an einer Last von $4\ \Omega$. Der grundsätzliche Verlauf stimmt dabei gut mit den Angaben im Datenblatt überein. Der Anstieg im Bereich ca. 300 Hz bis ca. 7 kHz ist typisch für Verstärker in Class-D Topologie [8]. Der Einbruch für Frequenzen größer als 7 kHz ist ebenfalls typisch. Hier liegen potentielle Verzerrungsprodukte außerhalb des hörbaren Bereichs und werden durch den Ausgangsfilter entsprechend gedämpft.

Tabelle 1: Kostenkalkulation für die Fertigung eines freeDSPx AMP x4 Verstärkermoduls.

Platine	≈10 Euro
Verstärker-ICs	≈20 Euro
Sonstige Bauteile	≈25 Euro
Summe	≈55 Euro

Tabelle 1 zeigt die Kostenkalkulation für die Fertigung eines freeDSPx AMP x4 Verstärkermoduls. Es resultiert ein Gesamtpreis von ca. 55 Euro. Damit ergeben sich Kosten pro Kanal von ca. 14 Euro, was im Rahmen der gestellten Anforderungen liegt. Werden mehrere Module gefertigt, entstehen durch Staffelpreise beim Platinen- und Bauteilbezug entsprechend geringere Kosten.

Im Gesamtergebnis ist das entwickelte freeDSPx AMP x4 Verstärkermodul zufriedenstellend. Im Vergleich mit kommerziell verfügbaren Verstärkermodulen (z. B. [11]) die ähnliche Kosten und Leistungen pro Kanal aufweisen, ist sein Verzerrungsverhalten vergleichbar oder oft besser. Zusätzlich weist es umfassende Fehlerschutzschaltungen auf. Die verfügbare hardwarenahe digitale Audioschnittstelle, insbesondere in ihrer mehrkanaligen Ausführung, ist ein Alleinstellungsmerkmal.

Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden ausgewählte Anwendungsbeispiele vorgestellt, die einen kleinen Einblick in die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des freeDSPx AMP x4 Verstärkermoduls geben sollen. Sie stammen hauptsächlich aus Projekten von Nutzern und Mitwirkenden des freeDSP-Projekts und sind beliebig fortsetzbar. Ein klassisches Beispiel ist etwa der Aufbau von aktiven Mehrwege-Boxen. Hierbei wird ein DSP-Modul zur Erstellung der Frequenzweiche sowie ggf. zur Frequenzgangentzerrung genutzt. Die Ansteuerung der Lautsprecher erfolgt dann direkt über das per I²S-Schnittstelle gekoppelte Verstärkermodul. Beide Module können platzsparend direkt in die jeweiligen Boxen integriert werden. Ein weiteres Beispiel ist der Aufbau mobiler Audioanlagen, sog. Boomboxes, wo DSP-Modul und Verstärkermodul in ähnlicher Weise eingesetzt werden. Im Hinblick auf Akkulaufzeit ist hierbei insbesondere die Energieeffizienz des Verstärkermoduls von Bedeutung.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel stellt die Ansteuerung von Lautsprecherarrays dar. Hierbei wird ein DSP-Modul zur Berechnung der verschiedenen Lautsprecheransteuerungssignale genutzt. Durch die direkte Kopplung mehrerer Verstärkermodule entstehen dann kompakte Ansteuerungseinheiten. Neben dem geringen Hardwareaufwand durch die verfügbare I²S-Schnittstelle ist hierbei insbesondere der geringe Kostenfaktor bei Anwendungen mit mehreren Kanälen von Bedeutung. Ein weiteres Beispiel ist Active Noise Cancelling, etwa in Lüftungskanälen. Dabei wird ein DSP-Modul zur Auswertung der Mi-

krofonsignale, sowie der darauf basierenden Berechnung der Lautsprecheransteuerungssignale genutzt und ein Verstärkermodul direkt gekoppelt. Insbesondere bei regelzeitkritischen Anwendungen ist hier die geringe Laufzeit von Bedeutung, die durch das Entfallen zusätzlichen Hardwareaufwands durch die verfügbare I²S-Schnittstelle besteht.

Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wurde ein kostengünstiges Mehrkanal-Audioverstärkermodul entwickelt - das freeDSPx AMP x4. Es verfügt über vier Kanäle mit bis zu 15 W und eine hardwarenahe I²S-TDM8-Schnittstelle. Es kann direkt und ohne zusätzlichen Hardwareaufwand mit vielen gängigen DSPs verbunden werden. Dadurch wird die Entwicklung moderner elektroakustischer Wiedergabesysteme vereinfacht und effektiviert. In bestimmten Fällen wird eine individuelle Integration von DSP und Verstärker auf eine gemeinsame Hardwareplattform sogar überflüssig. Die verschiedenen Anwendungsbeispiele stellen die vielseitige Nutzbarkeit des Verstärkermoduls unter Beweis.

Das freeDSPx AMP x4-Modul stellt eine Erweiterung des freeDSP-Projektes dar. Die zugehörigen Entwicklungs- und Fertigungsdaten wurden quelloffen unter einer Creative-Commons-Lizenz (CC-BY-SA) veröffentlicht [2]. Diese erlaubt die uneingeschränkte Nutzung der veröffentlichten Daten, solange darauf aufbauende Projekte unter der gleichen Lizenz veröffentlicht werden.

Das freeDSP-Projekt wächst beständig weiter. Gegenwärtig wird ein leistungsfähigeres DSP-Modul basierend auf dem DSP ADAU1452 von Analog Devices veröffentlicht, das im Vergleich zum freeDSP classic eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit aufweist. Weiterhin wird ein USB-Audiodevice entwickelt, das ebenfalls über eine I²S-Schnittstelle verfügt, und so eine direkte Kopplung der freeDSPx Erweiterungsmodule an einen Rechner möglich macht.

Literatur

- [1] Merchel, M., Kormann, L.: freeDSP: A Low-Budget Open-Source Audio-DSP Module. Proceedings of the 17th Int. Conference on Digital Audio Effects, Erlangen, Germany, September 1-5, 2014
- [2] freeDSP Homepage, Abgerufen am 14.03.2017, URL: <http://www.freedsp.cc>
- [3] freeDSP Entwicklungsrichtlinien, Abgerufen am 14.03.2017, URL: <https://github.com/freeDSP/WIKI-AND-GENERAL-TOPICS/wiki/freeDSP-Guidelines>
- [4] Analog Devices: Datenblatt des ADAU1701 DSP, Abgerufen am 14.03.2017, URL: http://www.dafx14.fau.de/papers/dafx14_sebastian_merchel_freedsp_a_low_budget_ope.pdf

- [5] Analog Devices, Class D Amplifiers: What, Why and How, Abgerufen am 14.03.2017, URL: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/class-d-audio-amplifiers.html>
- [6] Texas Instruments: Datenblatt des TAS5720M, Abgerufen am 14.03.2017, URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tas5720m.pdf>
- [7] KiCad Homepage, Abgerufen am 14.03.1017, URL: <http://kicad-pcb.org/>
- [8] Texas Instruments: Guidelines for Measuring Audio Power Amplifier Performance, Application Report, Abgerufen am 14.03.2017, URL: <http://www.ti.com/lit/an/sloa068/sloa068.pdf>
- [9] Getting started with the freeDSPx AMP x4, Abgerufen am 14.03.2017, URL: https://docs.google.com/document/d/1tbhADnNkIt9oIQV_o0-B78TdL-QS84C08iAzlX1_Vq0/edit
- [10] Texas Instruments: User's guide TAS5720M Evaluation Board, Abgerufen am 14.03.2017, URL: <http://www.ti.com/lit/ug/slou437/slou437.pdf>
- [11] Sure Electronics 2x25 Watt Class D Audio Amplifier Board, Abgerufen am 14.03.2017, URL: <http://store3.sure-electronics.com/2-x-25-watt-class-d-audio-amplifier-board-tpa3123>