

Analog-Frontend – Ein AFE für alle:

# Neue Schaltungsdesigns für Ultraschallsysteme

AFE-Bausteine wie z. B. das AFE5805 von TI können mit identischer Pinbelegung sowohl bei tragbaren Ultraschallsystemen als auch bei Konsolensystemen eingesetzt werden. Durch die Pincompatibilität können Hersteller von Ultraschallsystemen bei erheblichen Kosteneinsparungen und kürzeren Markteinführungszeiten das AFE-Design standardisieren und innovative Produkte vorantreiben.

Die Ultraschallbildgebung stellt aufgrund ihrer Sicherheit und Echtzeitfähigkeit sowie ihrer niedrigen Kosten ein wichtiges Diagnoseinstrument in der Medizin dar. Bei herkömmlichen Ultraschallsystemen werden Frequenzen zwischen 2 und 15MHz mit einer Auflösung im Millimeterbereich verwendet. Diese Systeme werden häufig zur Beobachtung von Föten sowie zur Diagnose von Krankheiten der inneren Organe wie Herz, Leber, Gallenblase, Milz, Bauchspeicheldrüse, Nieren und Blase eingesetzt. In den vergangenen 20 Jahren wurden in der Medizin vorwiegend traditionelle Ultraschallsysteme mit Konsole verwendet. Der Grund hierfür liegt in den hohen Anforderungen, die Ultraschallsysteme an die Anzahl der Kanäle und an die Signalverarbeitung stellen. Die veränderte Alterspyramide, steigende Gesundheitskosten sowie der zunehmende Bedarf in Schwellenregionen haben jedoch zu einer schnell wachsenden Nachfrage nach innovativen Lösungen in der Medizintechnik geführt. Hochentwickelte Halbleitertechnologien mit optimierter Leistung und niedrigeren Kosten, beispielsweise mit digitalen Signalprozessoren (DSP), haben medizinische Bildgebungssysteme entscheidend verbessert. Inzwischen ist auch eine beschleunigte Miniaturisierung bei medizinischen Ultraschallbildgebungssystemen festzustellen, wobei die Leistungsfähigkeit dieser Geräte mit herkömmlichen Ultraschallsystemen

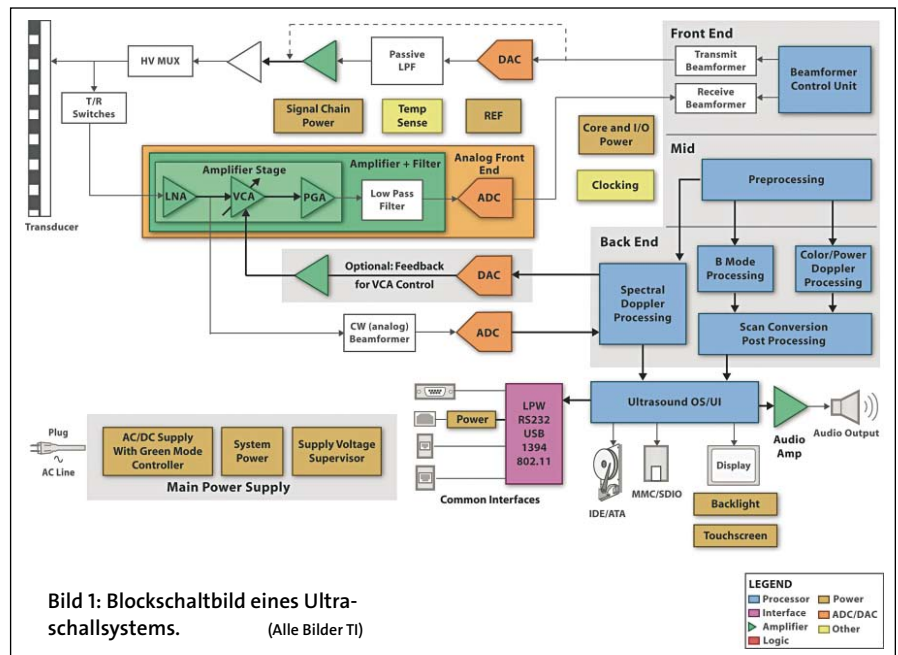


Bild 1: Blockschaubild eines Ultraschallsystems. (Alle Bilder TI)

vergleichbar ist. Gegenwärtig eingesetzte tragbare Ultraschallsysteme bieten eine gute Bildqualität, sodass die Ärzte exakte und schnelle Diagnosen stellen können. Tragbare Systeme spielen daher eine zunehmend wichtige Rolle bei Anwendungsfällen wie der sofortigen Diagnose von Verletzungen und der Diagnose und Behandlung von Notfällen. Da immer mehr Hersteller von Ultraschallsystemen tragbare Ultraschallgeräte entwickeln, dürfen nur diejenigen Hersteller auf höhere Marktanteile hoffen, die ihre Produkte entsprechend schnell auf den Markt bringen. Hersteller von Ultraschallgeräten verlangen sowohl analoge Ultraschall-Frontends (AFE) als auch DSPs mit kleinem Formfaktor, niedriger Verlustleistung und hoher Leistungsfähigkeit. Noch wichtiger ist die Forderung der Hersteller nach ei-

nem einheitlichen Schaltungsdesign, das in verschiedenen Systemen eingesetzt werden kann. Dadurch lassen sich Entwicklungs- und Markteinführungszeiten verkürzen.

## Aufbau von Ultraschallsystemen

Ultraschallsysteme werden nach Funktion und Leistungsfähigkeit unterschieden. Beispielsweise werden bei Systemen des oberen Preissegments normalerweise 3-D-, 4-D- und THI (Tissue Harmonic Imaging) verwendet, während Systeme im unteren Preissegment teilweise nur mit 2-D-B- und Spektral-Doppler-Bildgebung arbeiten. Die Unterscheidung nach den oben beschriebenen Funktionsarten wird hauptsächlich in dem Backend vorgenommen. Ultraschallsysteme der oberen Preisregion erfordern eine höhere und schnellere Rechenleistung und somit

**AUTOR**  
 Xiaochen Xu,  
 Harish Venkataraman und  
 Anand Udupa, Texas Instruments

auch teure Digitale Signalprozessoren, die eine Signalverarbeitung in nahezu Echtzeit ermöglichen. Natürlich ist es nicht ohne Weiteres möglich, dieselben Digitalen Signalprozessoren sowohl in teuren Highend-Systemen als auch in tragbaren Systemen einzusetzen. Andererseits ist bei Ultraschallsystemen unabhängig von unterschiedlichen Leistungsanforderungen in der Regel eine ähnliche Architektur der Empfangskanäle zu finden.

Wie in **Bild 1** zu sehen, besteht das analoge Empfangs-Frontend von Ultraschallsystemen aus üblichen Funktionsblöcken. Dazu gehören unter anderem rauscharme Verstärker (LNA), Verstärker mit zeitabhängiger Verstärkungsregelung (TGC), Spannungsgeregelter Verstärker (VCA), Verstärker mit programmierbarer Verstärkung (PGA), Tiefpassfilter und A/D-Wandler (ADC). In allen Fällen hat die Leistungsfähigkeit des AFE einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Somit kann das AFE-Design standardisiert und das AFE in verschiedenen Systemen eingesetzt werden. Dies gilt jedoch nur, solange AFE-Produkte erhältlich sind, die die unterschiedlichen Leistungsanforderungen in einem Pin-kompatiblen Gehäuse erfüllen. Diese Standardisierung lässt sich bei Systemen des mittleren und unteren Preissegments leicht realisieren, da keine spezielle Aufbereitung des Analogsignals erforderlich ist.

Die meisten gegenwärtig eingesetzten AFE-Produkte berücksichtigen diese Anforderung der Ultraschallgeräte-Hersteller nicht. Daher müssen verschiedene Chips gewählt werden, um unterschiedlichen Leistungsanforderungen von tragbaren Systemen und Konsolensystemen gerecht zu werden. Beispielsweise ist bei Konsolensystemen ein höherer Stromverbrauch tolerierbar, während nur ein geringer Rauschpegel auftreten darf. Bei tragbaren Systemen ist ein niedriger Stromverbrauch unabdingbar. In jedem Fall sind Änderungen im Design erforderlich.

Neue AFE-Bausteine wie z. B. das AFE5805 von Texas Instruments können mit identischer Pinbelegung sowohl bei tragbaren Ultraschallsystemen als auch bei Konsolensystemen eingesetzt werden. Durch die Pinkompatibilität können Hersteller von Ultraschallsystemen bei erheblichen Kosteneinsparungen und kürzeren Markteinführungszeiten das AFE-Design standardisieren und innovative Produkte vorantreiben.

### Funktionen von Analog-Frontends und Systemleistung

Betrachtet man den komplizierten Entwicklungsprozess bei Ultraschallsystemen, wird deutlich, dass jede einzelne Funktion eines AFE die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems beeinflussen kann. Dabei die richtige Balance zwischen den unterschiedlichen Parametern eines jeden Systems zu finden, ist eine wirkliche Kunst.

Bei tragbaren Ultraschallsystemen ist der Stromverbrauch von großer Bedeutung. Ein niedriger Verbrauch verlängert die Betriebsdauer und reduziert die Anzahl der erforderlichen Batterien. Der niedrige Stromverbrauch kann sich jedoch auch auf andere Parameter auswirken, wie z. B. auf den Eingangssignalebereich, das auf den Eingang bezogene Rauschen, den Oberwellengehalt usw. Allerdings kann diese Einschränkung der Leistungsfähigkeit bei tragbaren Systemen normalerweise in einem akzeptablen Rahmen gehalten werden.

Der zweite wichtige Gesichtspunkt neben dem Stromverbrauch ist für Entwickler von Ultraschallsystemen das Rauschen des AFE. Die Amplituden der vom Ultraschallschwinger empfangenen Signale können zwischen  $10 \mu\text{VPP}$  und  $1\text{VPP}$  schwanken. Je kleiner das Empfangssignal sein kann, desto höher ist die Empfindlichkeit des Systems. Das auf den Eingangsstrom und die Eingangsspannung bezogene Rauschen tragen zur Empfindlichkeit des Systems bei. Im Allgemeinen wählt man bei teuren Systemen Rauschparameter im Bereich von  $0,7 \text{ nV/rt(Hz)}$  und preiswerten Systemen etwa  $1,5 \text{ nV/rt(Hz)}$  (RTI). Diese in der Praxis erprobten Rauschparameter sind ausreichend, um qualitativ hochwertige Bilder zu erzeugen. Es kann auch ein rauschärmerer Verstärker eingesetzt werden. Es wird jedoch am fertig aufbereiteten Ultraschallbild keine merkliche Verbesserung erzielt, wenn man das auf den Eingangsstrom bezogene Rauschen und das Rauschen der Sende-/Empfangsumschalter berücksichtigt. Neben dem auf die Eingangsspannung bezogenen Rauschen ist bei Bildgebungsanwendungen auch das  $1/f$ -Rauschen von Bedeutung. Bei Dauerstrichbetrieb mit Mischung wird das Rauschspektrum der niederen Frequenzen auf die Trägerfrequenz verlagert, wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) auf der Nutzfrequenz reduziert wird. Beim Verstärker ist ein flacher Verlauf der Rauschkurve ►

dem breiten Frequenzbereich des Verstärkers vorzuziehen.

Bei Ultraschallanwendungen spielt der Verstärkungsregelbereich eine wichtige Rolle für das dynamische Spektrum des Bildes. Bei einem größeren Verstärkungsregelbereich des VCA vergrößert sich der Dynamikbereich der fertig aufbereiteten Bilder. Das Ergebnis ist eine bessere Bildqualität. Bezieht man das Signal-Rausch-Verhältnis des A/D-Wandlers ein, kann der Dynamikbereich des Systems wie folgt berechnet werden:

$$\text{Dynamikbereich} = \text{SNR} + \text{Verstärkungsregelbereich}$$

Beispielsweise lässt sich in einem System mit einem 12-Bit-SNR von 70 dB und einem VCA mit einem Verstärkungsregelbereich von 40 dB ein Dynamikbereich von 110 dB erzielen. Durch die Multiplikation  $10 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 7,5$  erhält

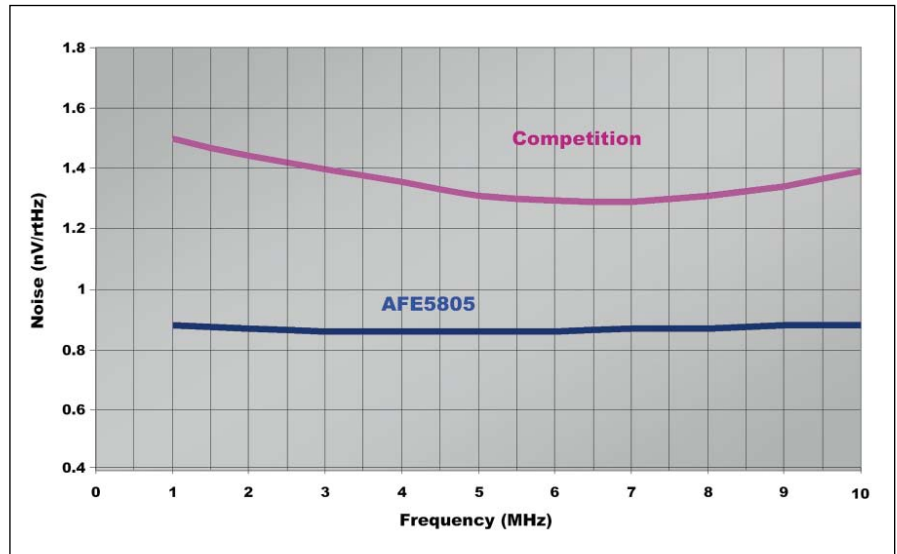


Bild 2: Ausgezeichnetes Rauschverhalten.

man einen Dynamikbereich von 105 dB. Hierbei sind ein Dämpfungskoeffizient des menschlichen Körpers von 0,7 dB/cmMHz, eine Bildgebungstiefe von 10 cm und ein 7,5-MHz-Schwinger berücksichtigt.

Bei gegenwärtig eingesetzten Ultraschallsystemen werden zur Bildgebung kleiner Körperteile Sonden mit Frequenzen zwischen 10 und 15 MHz verwendet. Daher wird oft ein Dynamikbereich von über 100 dB benötigt. Die Schlussfolgerung wäre somit, dass ein AFE mit einem größeren Verstärkungsregelbereich vorzuziehen ist. Darüber hinaus erweist sich ein AFE mit höherer Gesamtverstärkung als vorteilhaft, wenn es um die Erkennung kleiner Signale und die Kompensation des durch andere Stromkreise verursachten Einfügeverlustes geht, z. B. um den Einfügeverlust eines passiven Filters höherer Ordnung.

Ein weiterer sehr wichtiger Systemparameter ist die Sättigung des Verstärkers und die Erholung nach einem Überlastzustand. Es ist zweckmäßiger, diese beiden Parameter zusammen und nicht jeweils einzeln zu bewerten. Grundsätzlich wird der ideale Eingangssignalbereich eines Verstärkers durch dessen lineare Ausgangsspannung (bezogen auf die Versorgungsspannung) und die Verstärkung begrenzt:

$$V_{in\ pp} = \frac{V_{Ausgang}}{\text{Verstärkg.}}$$

Daher können eine geringere Verstärkung und eine höhere Versorgungsspannung den Wert dieses Parameters verbessern. Eine geringere Verstärkung verschlechtert jedoch das auf die Eingangsspannung bezogene Rauschen. Gleichzeitig bewirkt eine höhere Versorgungsspannung einen größeren Gesamtstromverbrauch, sodass hier ein Kompromiss gefunden werden muss. Üblicherweise werden bei tragbaren und mittelgroßen Systemen Parameterwerte zwischen 200 und 400 mVpp gewählt. Bei Ultraschallverstärkern wird die Sättigung im Allgemeinen durch Hochspannungsimpulse oder durch große reflektierte Signale verursacht, die von dicht an der Oberfläche befindlichen Objekten herrühren. Bei diesen Objekten schwankt die Schallimpedanz sehr stark. Beispiele hierfür sind Oberflächengewebe oder Knochen, zu denen nur begrenzte klinische Informationen vorhanden sind. In den meisten Fällen beeinträchtigen die hier verloren gegangenen Informationen die klinische Diagnose nicht. Es können allerdings in beträchtlichem Umfang Informationen verloren gehen, wenn sich die Verstärker nicht rechtzeitig erholen. Die kurze Erholungszeit der AFEs im Überlastungsfall gewährleistet, dass die Ultraschallsysteme so viele nützliche Informationen wie möglich erfassen. Die AFE-Erholungszeit im Überlastungsfall wird meistens als Anzahl von Taktzyklen des A/D-Wandlers angegeben. Eine Er-

holungszeit von einem Taktzyklus wäre der ideale Wert.

Ein weiterer Effekt, der durch die Sättigung hervorgerufen wird, ist der erhöhte Oberwellengehalt. Durch die verbreitete Verwendung von Kontrastmitteln darf bei vielen Systemen (auch bei tragbaren) die 2. Harmonische im gesamten System nur einen niedrigen Pegel aufweisen, um eine erfolgreiche Oberwellenbildgebung (THI) zu gewährleisten. Normalerweise sind die von Schwingern empfangenen Oberwellensignale um 40 dB schwächer als die Basissignale. Dies hängt von der Kombination aus Schalleigenschaften des Kontrastmittels, Senderspannung und Gewebeeigenschaften ab. Somit sollte die 2. Harmonische nach einem Verstärker kleiner als 40 dBc sein. Dadurch kann ein System, das das THI (Tissue Harmonic Imaging) Verfahren einsetzt, Bilder von ausreichender Qualität liefern. Darüber hinaus können aufgrund einer 2. Harmonischen Dopplerverschiebungsfrequenzen als Artefakte vorhanden sein. In manchen Fällen können diese Artefakte eine exakte klinische Diagnose beeinträchtigen. Bei fertig aufbereiteten Dopplerbildern kann die Dopplerverschiebungsfrequenz des Artefakts zu einer Richtungstrennung bei einem Dopplersystem beitragen. Die einschlägige Literatur sagt hierzu, dass eine Richtungstrennung von 45 bis 50 dB sowohl bei Dauerstrich- als auch bei Impuls-Dopplersystemen ausreichend sein kann. Der lineare Eingangsbereich des AFE sollte unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Faktoren festgelegt werden, wenn der Pegel der 2. Harmonischen weniger als 40 dBc beträgt.

Nebensignaleffekte sind ein weiterer wichtiger Parameter bei Ultraschallsystemen. Diese Effekte beeinträchtigen ebenfalls die Genauigkeit der Bilddarstellung. Der Hauptanteil der Nebensignaleffekte bei Ultraschallsystemen entsteht durch Schwinger-Arrays. Die Größenordnung liegt je nach Abstand zwischen den Schwingerelementen, Frequenz, Anordnung, Werkstoff usw. zwischen -30 dBc und -35 dBc. Im Allgemeinen liegen die durch ICs oder Leiterplatten verursachten Nebensignaleffekte weit unter -35 dBc. Daher wird die Leistungsfähigkeit des

Systems durch Nebensignaleffekte der Stromkreise nicht beeinträchtigt.

### Analog-Frontend für Ultraschall

Die oben genannten Kriterien wurden bei dem Design des AFE5805 von TI berücksichtigt. Um den Stromverbrauch und das Rauschverhalten zu optimieren, wird bei diesem Frontend die neuste BiCMOS- und CMOS-Technologie kombiniert. Aufgrund des niedrigen Stromverbrauchs, des geringen Platzbedarfs auf dem Chip und des geringen 1/f-Rauschens eignet sich das BiCMOS-Verfahren optimal für den spannungsgesteuerten Verstärker. Für den Analog/Digital-Wandler ist aber das CMOS-Verfahren am besten geeignet. Die Kombination dieser neuartigen Verfahren führt gegenüber vergleichbaren Lösungen zu einer Platzeinsparung von 50 Prozent, einem um 20 Prozent geringeren Stromverbrauch und 40 Prozent weniger Rauschen. Das in **Bild 2** dargestellte Rauschen ist im gesamten Betriebsfrequenzbereich konstant. Dadurch können tragbare Ultraschallsysteme mit höherer Bildqualität und dem kleinstmöglichen Stromverbrauch entwickelt werden.

### Zusammenfassung

In den kommenden Jahren wird weltweit die Nachfrage nach tragbaren Ultraschallgeräten erheblich steigen, die neue Herausforderungen an die Hersteller von Ultraschallsystemen stellen. Der Einsatz der neusten TI-Technologie für Ultraschall-Frontends ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit des Ultraschallsystems an die Systemgröße anzupassen. In dem Fall der AFE58XX Familie lassen sich mit einem Design sowohl bei tragbaren Geräten als auch bei mittelgroßen Ultraschallsystemen mehrere Produkte auf den Markt bringen, was letztendlich zu erheblichen Zeiteinsparungen und Senkung der Entwicklungskosten führt. (sb)

	<b>infoDIRECT</b>	<b>442e/1108</b>
<a href="http://www.elektronik-industrie.de">www.elektronik-industrie.de</a>		
▶ <a href="#">Link zu Texas Instruments</a>		
	<b>Halle A4 Stand 420</b>	