

Digitale Signalprozessoren stecken in sehr vielen modernen Geräten. Auch PC profitieren von ihrer Anwesenheit. CHIP zeigt, was es mit diesen Schaltkreisen auf sich hat.

So funktioniert DSP

Ob in Mobiltelefonen, in Audioverstärkern, in der Medizintechnik, bei der Sprach- und Bildverarbeitung oder in Automobilen: digitale Signalprozessoren (DSP) sind aus unserem Alltag kaum mehr wegzudenken. Auch in der PC-Umgebung sind die kleinen Schaltkreise anzutreffen: Auf allen modernen Festplatten stecken DSP zur Datenauswertung, desgleichen in Modems und auf manchen Soundkarten. Eine technisch besonders interessante Anwendung sind Multifunktionskarten. Dort rechnen Signalprozessoren – zwischenzeitlich vom Treiber umprogrammiert – wahlweise an Audio- oder Modemdaten.

Fast nur von der Fachwelt beachtet, unterliegen diese Chips fortlaufend einer stürmischen Entwicklung. Die Hersteller feilen ständig an der Technologie und erreichen mit ihren Schaltkreisen von Generation zu Generation steigende

Rechenleistungen und gleichzeitig mehr Funktionen.

DSP sind auf die Belange der digitalen Signalverarbeitung spezialisierte Prozessoren. Ein Signalprozessor führt einen Algorithmus, also ein vorgegebenes Programm, zur digitalen Signalverarbeitung aus. Dabei kann er laufend umprogrammiert werden, was zu einer großen Flexibilität beiträgt. Die Rechenleistung moderner DSP erreicht oder übertrifft dabei oftmals die Leistung gängiger PC-Prozessoren.

Der Sinn der Verwendung eines DSP besteht darin, daß in digitale Signale umgewandelte Eingangssignale in Echtzeit nach eigenen Wünschen manipuliert

werden. Das Ergebnis der Manipulation steht am Ausgang des DSP als digitale Information zur Verfügung und wird in der Mehrzahl der Fälle wieder in ein analoges Signal zurückgewandelt.

Die digitale Signalverarbeitung hat gegenüber der analogen Schaltungstechnik eine Reihe von Vorteilen: So ist die digitale Schaltung programmierbar; ihre Funktion kann also ohne Lötcolben schnell und flexibel verändert werden. Die Ergebnisse sind reproduzierbar, was in der analogen Schaltungstechnik durch Bauelemente-Parameterstreuung nicht selbstverständlich ist. Deshalb bietet die digitale Signalverarbeitung auch eine höhere Präzision. Die Änderung des

Signalverhaltens beim Alterungsprozeß der Bauelemente ist in der digitalen Signalverarbeitung unbekannt. All diese Vorteile haben – trotz anfänglich höherer Kosten – zu der starken Verbreitung von DSP geführt.

Außerdem bietet die digitale Signalverarbeitung Möglichkeiten, die mit klassischen analogen Schaltungen nicht oder nur mit erheblichem Aufwand realisierbar sind. Als Beispiel sind digitale Filter zu nennen, die ideale Charakteristika der Übertragungskurven besitzen.

Analoge Schaltungen produzieren zudem – anders als digitale – in längeren Schaltungsketten ein störendes Rauschen, dessen Intensität von Stufe zu Stufe multipliziert wird.

○ Die digitale Signalverarbeitung

Der prinzipielle Ablauf einer digitalen Signalverarbeitung ist aus der Abbildung auf der nächsten Seite ersichtlich. Der A/D-Wandler tastet den Spannungswert des analogen Signals in festen Zeitabständen ab (nach jeder Abtastperiode T). Der Abtastwert wird an den DSP übermittelt. Der Kehrwert von T ist die Abtastfrequenz f_A . Um das Eingangssignal exakt zu quantisieren, muß f_A mindestens doppelt so hoch sein wie die obere Grenzfrequenz des Eingangssignals. (Diese Anforderung ist als Abtasttheorem nach Nyquist und Shannon bekannt.)

Der Tiefpaß am Eingang des A/D-Wandlers dient dazu, eventuell doch vorhandene, höhere Frequenzanteile herauszufiltern, die vom A/D-Wandler falsch interpretiert und zum sogenannten Aliasing-Effekt führen würden. Der vom A/D-Wandler gemessene Spannungswert ist nicht beliebig genau. Die Genauigkeit der Quantisierung ist abhängig von der Auflösung (in Bit) und der Wandlungsungenauigkeit.

Bei der Analog-Digital-Wandlung entsteht ein Rauschen, das sogenannte Quantisierungsrauschen. Dessen Stärke ist aber – anders als in der analogen Signalverarbeitung – leicht berechenbar, da seine Stärke nur von der Auflösung des A/D-Wandlers abhängt. Außerdem wird seine Intensität im Verlauf der digitalen Weiterverarbeitung nicht verstärkt.

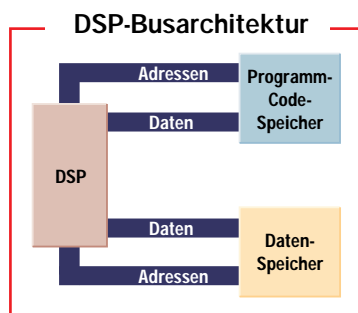
Der DSP nimmt in dieser Signalkette dann die eigentliche Bearbeitung des Signals vor. Er manipuliert das Signal in der vom Benutzer gewünschten Weise. Bezeichnend für den DSP ist dabei, daß sein Verhalten durch Programmierung in weiten Grenzen angepaßt werden kann.

Am Ausgang des Signalprozessors befindet sich ein D/A-Wandler. Danach kommt wieder ein Tiefpaß-Filter zum Einsatz, der das stufige Wandlersignal glättet.

Nicht in jedem Fall wird der A/D-Wandler am Eingang des DSP benötigt beziehungsweise benutzt. Wenn der DSP beispielsweise als Signalgenerator oder als Wavetable-Synthesizer programmiert wird, sind die Daten am Ausgang ausschließlich vom Programm des DSP vorgegeben.

○ Die DSP-Architektur

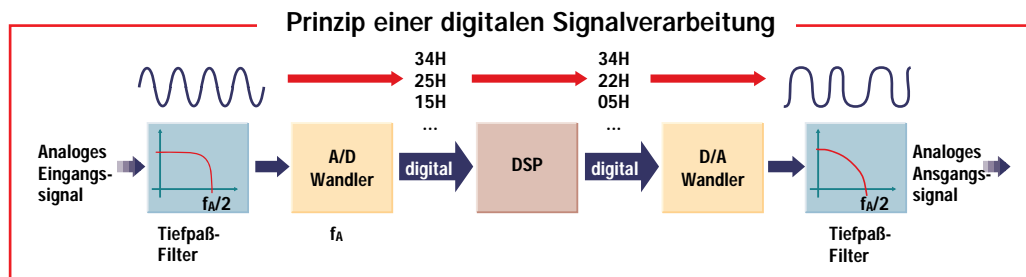
Anders als herkömmliche PC-Mikroprozessoren verfügen DSP nicht über eine Von-Neumann-Architektur. Diese zeichnet sich durch eine gemeinsame Nutzung



des Speichers für Daten und Programmcode aus. Die DSP-Busarchitektur arbeitet dagegen nach dem Harvard-Prinzip. Dieser Architektur folgend, trennt ein DSP strikt Programm- von Datenspeicher (siehe Abbildung oben). Diese Teilung hat den Vorteil, daß gleichzeitig auf den Programmcode und auf die Daten zugegriffen werden kann. Der Nachteil ist, daß der Speicher nicht beliebig zwischen Daten und Programm aufteilbar ist. Intern hat ein DSP mehrere Daten- und Adreßbusse. Eine Logik steuert spezielle Schalter im Inneren des Bausteins, die nach Bedarf die internen mit den externen Bussen verbindet.

○ ALU und Register

Die wichtigste Komponente eines DSP ist die arithmetisch-logische Einheit (ALU). In ihr können zwei Zahlen – meist repräsentiert mindestens eine davon einen Spannungswert – miteinander addiert oder multipliziert werden. Häufig führt die ALU eine Multiplikation mit anschließender Akkumulation des Zwischenergebnisses (MAC, Multiply-Accumulate) durch. Typisch schafft ein DSP diese Operationen in einem bis zwei



Taktzyklen. Dieser Umstand ist einerseits durch die Harvard-Architektur begründet; andererseits ist die DSP-Additions- und Multiplikationslogik fest verdrahtet und nicht über einen Microcode realisiert.

Außerdem beherrscht die arithmetisch-logische Einheit Bit-Schiebeoperationen und die logische Verknüpfung zweier Werte. Mit diesem Rüstzeug wird der Programmierer des Signalprozessors in die Lage versetzt, praktisch alle in der digitalen Signalverarbeitung vorkommenden Probleme zu lösen. Die Grenzen

werden nur durch die DSP-Rechenleistung gesetzt.

DSP besitzen On-Chip-RAM-Zellen, die wie bei einem Universalprozessor als Register bezeichnet werden. Der Zugriff auf die Register ist merklich schneller als auf externen Speicher. DSP haben außerdem spezialisierte Register, zum Beispiel Indexregister, in denen Zeiger auf Speicherbereiche gehalten werden.

Die Register, in denen Werte gespeichert werden, sind, je nach DSP-Typ, 16, 24 oder 32 Bit breit. Je größer die Registerbreite, desto genauer kann der DSP

seine Berechnungen ausführen. Selbst wenn das Eingangssignal nur 16-Bit-genau quantisiert vorliegt, bringen Registerbreiten über 16 Bit Vorteile, da die Zwischenergebnisse der Berechnungen häufig Rundungsfehler aufweisen. Diese Fehler werden durch den gesamten Rechenweg weitergezogen und akkumulieren unter Umständen. Bei einem 24-Bit-DSP können nun vom Endergebnis die niederwertigen, sowieso ungenauen Bits abgeschnitten werden. Der Ausgangswert ist tendenziell genauer.

Zwischenergebnisse von Multiplikationen oder Additionen werden häufig in speziellen, doppelt breiten Registern gehalten, um Registerüberläufe zu vermeiden.

Von DSP häufig abgearbeitete Algorithmen

Die **Diskrete Fourier-Transformation** (DFT) ist für die digitale Signalverarbeitung von größter Bedeutung. Spektrale Filterung und Darstellung von Signalen sind Beispiele für den Einsatz der DFT. Die Diskrete Fourier-Transformation ist ein mathematischer Algorithmus, der eine Zeit-Frequenz-Umwandlung ausführt. Das bedeutet, daß das Ausgangssignal in seine Spektralanteile (Amplituden und Phasen) überführt wird. Das Ergebnis sind einzelne (diskrete) komplexe Spektrallinien.

Für die Berechnungen wird ein Block von Eingangswerten f_n als Stützweite mit der Anzahl N herangezogen. Mit der Erhöhung von N verbessert sich die Auflösung. In der Praxis wird häufig der Wert 1024 verwendet. Der eigentliche Algorithmus führt dann – vereinfacht ausgedrückt – eine fortgesetzte Aufsummierung von Produkten durch. Der Haken dabei ist, daß der Vorgang sehr rechenintensiv ist: Es müssen N^2 komplexe Multiplikationen und $N \cdot (N-1)$ komplexe Additionen ausgeführt werden.

Die **Fast Fourier-Transformation** (FFT) ist eine Abwandlung der DFT, die sich durch einen rechenzeit-

optimierten Algorithmus auszeichnet. Darum wird die FFT von digitalen Signalprozessoren häufig benutzt. Die Ergebnisse von FFT und DFT sind identisch. Auch die FFT führt eine Konvertierung des Zeit- in den Frequenzraum durch. Die häufigst verwendete FFT ist der Cooley-Tukey-Algorithmus, der voraussetzt, daß N eine Potenz von 2 ist, was in der Praxis aber keine Einschränkung bedeutet.

Die FFT reduziert unter Ausnutzung von Formelsymmetrien die Anzahl der nötigen Multiplikationen durch Ausklammerung von Faktoren. Der Rechenaufwand reduziert sich dadurch auf $N \cdot \lg N$ (\lg ist der Logarithmus zur Basis 2).

Im Zusammenhang mit DSP wird nach einer erfolgten DFT oder FFT das gewonnene Spektrum bearbeitet. Wenn beispielsweise ein Klangregler gewünscht ist, werden einfach die Spektralwerte frequenzabhängig mathematisch gedämpft oder verstärkt. Danach erfolgt – immer noch im DSP – eine **Rücktransformation** aus dem Frequenzraum in den Zeitraum. Das Ergebnis ist dann am D/A-Ausgang hörbar.

○ Fest- und Gleitkomma

Weiter werden DSP-Typen grundsätzlich nach Festkomma- und Gleitkomma-Prozessoren (Fixed-point und Floating-point) unterschieden. Festkomma-Signalprozessoren sind heute 16 oder 24 Bit breit. Intern stellen sie ein Integerartiges Zahlenformat zur Verfügung. Dieses muß der Programmierer dann entsprechend den technischen Gegebenheiten verwenden. Häufig wird dabei den einzelnen Bits eine bestimmte Wertigkeit zugeordnet. Potentiell besteht bei der Festkommadarstellung die Gefahr von Bereichsüberläufen. Der Geschicklichkeit des Programmierers bleibt es dabei überlassen, solche kritischen Zustände abzufangen.

Gleitkomma-Signalprozessoren sind zumeist 32 Bit breit. Bei ihnen entfällt bei der Programmierung das zwischenzeitliche Umskalieren der Werte, weil von vornherein Bruchzahlen verwendet werden. Die 32 Bit sind dann zum Beispiel in 23 Bit Mantisse, 8 Bit Exponent und 1 Bit für das Vorzeichen aufgeteilt. Gerade wenn Sensoren mit einem großen Wertebereich am Eingang eines DSP angeschlossen werden, sind Floating-point-DSP im Vorteil. Ausgehend von gleicher Bitbreite arbeiten bei geschickter Skalierung Festkomma-DSP aber genauer als Gleitkomma-DSP.

○ Nach dem Reset

Vielfach besitzen DSP intern einen nicht-flüchtigen Speicher, in dem sich ein Urladerprogramm befindet (Bootstrap-ROM). Dieses kleine Programm initialisiert nach einem Reset den Baustein und sorgt für das Laden und Starten des eigentlichen Prozessorprogramms. In fertigen Geräten wird das eigentliche Programm aus einem EPROM geladen oder von dort direkt ausgeführt. In der Entwicklungsphase ist das Laden des Programms im allgemeinen über die serielle oder parallele Schnittstelle eines PC möglich.

Am Rande sei noch erwähnt, daß viele DSP auch noch Interrupts, DMA und Multitaskingunterstützung bieten. Diese Eigenschaften werden jedoch von den Herstellern sehr unterschiedlich realisiert, ihre Beschreibung würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen.

○ Die ersten Programme

Wie schon erwähnt, sind die Möglichkeiten eines DSP kaum beschränkt. Je nachdem, welches Programm der Anwender dem DSP zur Berechnung übergibt, verhält sich dieser völlig anders.

Ein ganz einfacher Fall ist eine digitale Lautstärkeregelung. Zum Wert am Eingang des DSP braucht das Programm nur einen Faktor numerisch zu multiplizieren und den so gewonnenen Wert zum DSP-Ausgang zu leiten. Eine Multiplikation ist ja für die DSP-ALU in einem oder zwei Taktzyklen möglich. Ist der Faktor kleiner als 1, erfolgt eine Dämpfung des Ausgangssignals; die Signalkette verhält sich also wie ein Spannungsteiler. Ist der Faktor größer als 1, ist am Ausgang eine Verstärkung festzustellen. Der DSP arbeitet wie ein Verstärker.

Dieses Beispiel ist selbstverständlich keine Anwendung aus dem „richtigen Leben“. Ein Potentiometer als Lautstärkeregler für ein paar Mark erfüllt die Aufgabe auch und benötigt darüber hinaus keinen PC zur Steuerung. Beim folgenden Ansatz könnte ein DSP aber schon sinnvoll sein.

Nicht sehr viel schwieriger als das digitale Potentiometer ist eine Modulation des Eingangssignals realisierbar. Hier wird der konstante (Verstärkungs-)Faktor des eben beschriebenen Beispiels jeweils mittels eines eigenen Algorithmus neu berechnet. Wenn dieser Algorithmus also beispielsweise die Werte eines 100-Hertz-Sinussignals hervorbringt, ist das Ergebnis der Multiplikationen ein mit 100 Hertz modulierte Eingangssignal.

Zum Ausprobieren

Die Hersteller von DSP haben naturgemäß ein Interesse an der weiteren Verbreitung ihrer Produkte. Da DSP nur mit entsprechender Software verwendbar sind, bieten die Hersteller mehr oder minder teure Entwicklungsumgebungen für ihre Chips an.



Beispielsweise hat Texas Instruments für zirka 100 US-Dollar ein DSP-Starter-Kit im Programm. Um in die DSP-Materie relativ kostengünstig hineinzuriechen, ist dieses Hardware-Kit sehr gut geeignet. Die Rechenleistung ist beachtlich: Der mit 50 Megahertz getaktete TI schafft es beispielsweise, ein MPEG-codiertes Audiosignal in Echtzeit zu decodieren. Der Experimentierfreude für den Einsteiger sind also kaum Grenzen gesetzt. So ist es kein Wunder, daß sich schon eine kleine Starter-Kit-Fanggemeinde gebildet hat, die ihre selbstgeschriebenen Applikationen und Programmbibliotheken zum Beispiel auf dem Internet-Server von TI der Mitwelt kostenfrei zur Verfügung stellt.

Im Lieferumfang befindet sich eine fertig bestückte Platine, auf der ein Gleitkomma-DSP TMS320C31 mit 32 Bit werkelt. Mit dem mitgelieferten Kabel wird das Platinchen an die parallele Schnittstelle des PC angeschlossen. Je eine analoge Ein- und Ausgangsbuchse ist auch vorhanden. Der Käufer muß sich allerdings selbst um die Spannungsversorgung der Platine kümmern. Ein handelsübliches Gleich- oder Wechselstromnetzteil ist dafür geeignet. Und schon kann es losgehen. Als Software liegen neben ein paar Beispiel-Applikationen ein Assembler und ein Debugger bei.

Außerdem bietet TI ein Teaching-Kit für etwa 200 Dollar an. Ursprünglich für Universitäten entwickelt, ist es auch für all jene interessant, die Grundlegendes über die digitale Signalverarbeitung lernen möchten. Dieses Kit – dem TI-Starter-Kit äußerlich ähnlich – arbeitet mit einem 40-MHz-Festkomma-DSP. Außerdem liegen ihm eine pädagogisch begutachtete Dokumentation und umfangreiche Software bei.

Die Halbleiterschmiede Motorola bietet ein Evaluation Module mit der Bezeichnung DSP56002EVM für 250 Mark an. Auf diesem verrichtet der 24-Bit-Festkommaprozessor DSP56002 seine Rechenaufgaben. Das kleine Entwicklerboard wird an die serielle Schnittstelle des PC angeschlossen. Auch hier befinden sich Dokumentation und Assembler im Lieferumfang.

Unmittelbar vor der Produktreihe befinden sich außerdem die Modelle DSP56811EVM für etwa 150 Mark und die Typen DSP56303EVM für zirka 350 Mark.

Ein Hall- oder Echoeffekt ist durch das Zwischenspeichern von aufeinanderfolgenden Werten und anschließendes numerisches Addieren des aktuellen Eingangssignals mit einem früheren Wert möglich. In einem solchen Anwendungsfall programmiert man einen ringförmig organisierten Speicher, der dann verzeigert wird. Mittels der DSP-Indexregister läßt sich das relativ leicht organisieren. Der Aufwand für die digitale Lautstärkeregelung beläuft sich (ohne Initialisierung des DSP) auf etwa zehn Assembler-Zeilen. (Siehe Kasten:

„Von DSP häufig abgearbeitete Algorithmen“)

○ Hersteller von DSP

Führende DSP-Hersteller sind Texas Instruments, Motorola, Analog Devices und AT&T. Sie stellen ein breites Angebot bereit, das nahezu alle Anwendungsgebiete von DSP abdeckt. Besonders interessant für Einsteiger und Leute, die einfach nur mal ausprobieren wollen, wie so ein DSP programmiert wird, sind Einsteiger-Kits. Der Kasten „Zum Aus-

probieren“ nennt ein paar preisgünstige Produkte. Es gibt viele Einsatzmöglichkeiten: An die heimische Stereoanlage angeschlossen, kann beispielsweise eine Klangverfremdung programmiert werden. Wird ein Sensor mit dem Eingang dieser kleinen Boards verbunden, ist eine Meßwertauswertung möglich.

IBM stellt den im PC-Bereich relativ bekannten Mwave-Chip her, der in IBM-Notebooks, auf Einsteckkarten zur Klangerzeugung und für Modemfunktionen benutzt wird. Die Firma Hitachi hat in ihrer Mikrocontroller-Serie SuperH einen Chip, der zusätzlich zum Controller-Kern DSP-Funktionen aufweist. Der Infokasten am Ende dieses Artikels nennt einige Internet-Anlaufpunkte für näher Interessierte.

○ Die Zukunft des DSP im PC

Im PC-Bereich ist aber auch ein Trend zur Abkehr vom DSP erkennbar. Die Rechenleistung schneller Pentium-Prozessoren ist in vielen Fällen auch zur Lösung von Aufgaben geeignet, die bislang eine sichere Domäne digitaler Signalprozessoren war. Eine grundsätzliche Entscheidung für oder gegen den DSP kann es aber nicht geben, da ein Pentium beim Einsatz für Signalberechnungen erheblich belastet wird; er steht für andere Aufgaben nur noch eingeschränkt zur Verfügung. Auch die Auslastung des PC-Busses sollte in diesem Zusammenhang nicht außer acht gelassen werden. Das Resultat wären deutlich schlechtere Antwortzeiten des Systems. Die Zukunft wird erweisen, ob die DSP-Funktionalität in den Hauptprozessor wandern wird oder auch nicht.

Jan Kleinert



Web-Links führender DSP-Hersteller:

<http://www2.motorola-dsp.com/dsp/dsp/home/prd/prodover.htm>
<http://www.ti.com/sc/docs/dsps/dsphone.html>

Weiterführende Informationen über DSP im Web: <http://www-dsp.rice.edu/history/>

Newsgroup über DSP: comp.dsp

Texas-Instruments-Starter- und Teaching-Kit
 Spoerle Electronic, Max-Planck-Str. 1-3,
 63303 Dreieich, Tel. (06103) 304-8 (weitere
 Distributoren auf Anfrage)

Motorola Evaluation Module DSP56002EVM,
 DSP56811EVM und DSP56303EVM über
 Distributoren wie Spoerle (siehe oben) oder
 AVNET E2000, 81829 München,
 Tel. (089) 4511001 (weitere Distributoren
 auf Anfrage)