

---

---

# Vorwort

Die digitale Signalverarbeitung zählt bereits seit vielen Jahren zu den rasant wachsenden Forschungsgebieten mit hochaktuellen Anwendungen und vereint verschiedene Disziplinen wie z.B. Computertechnik, Softwaretechnik, Signal- und Systemtheorie, Nachrichtentechnik, numerische Mathematik, VLSI-Technologie. Dem Ingenieur bietet die digitale Signalverarbeitung ein reichhaltiges Betätigungsfeld mit faszinierenden Problemlösungen, die mit herkömmlicher Analogtechnik nicht erreichbar sind. Als Beispiele seien Sprachcodierungsverfahren bei der Mobilkommunikation, schnelle Datenübertragung über Telefonleitungen und Datenreduktion bei Audio- und Videosignalen genannt. Ermöglicht werden diese vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der digitalen Signalverarbeitung durch die Verfügbarkeit integrierter Signalprozessoren (DSPs). Die Entwicklung dieser Chips ist vergleichbar mit jener normaler Mikroprozessoren, wie sie heute in leistungsfähigen Arbeitsplatzrechnern eingesetzt werden. Die Multimedia- und Internetanwendungen dieser Rechner haben die Nachfrage nach Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung noch weiter verstärkt, wobei die Anforderungen natürlich immer komplexer werden.

Für den Ingenieur erfordert dieser Trend einerseits die Auseinandersetzung mit den Methoden der digitalen Signalverarbeitung und andererseits profunde Kenntnisse in der Programmierung von DSPs. Dabei hat er die Wahl zwischen DSPs verschiedener Architekturen und Hersteller und muss im Normalfall noch vor der eigentlichen Entwicklung die passende Auswahl treffen. Hier soll das vorliegende Buch eine Hilfestellung bieten, mit dem Ziel, die wesentlichen Aspekte des Einsatzes von DSPs darzustellen. Dabei ist es mein Anliegen, nicht nur einen Überblick über verfügbare DSPs zu geben, sondern aufbauend auf allgemeinen Architekturfragen und Verarbeitungsprinzipien von DSPs eine möglichst herstellerunabhängige Sicht zu vermitteln. Es wird daher auch keine enzyklopädische Besprechung kommerzieller DSPs angeboten, sondern eine repräsentative Auswahl getroffen, anhand der die allgemeinen Aspekte deutlich sichtbar sind. Dabei werden natürlich DSPs bevorzugt, bei denen ich auch Programmiererfahrungen habe.

Dieses Buch ist das vorläufige Endprodukt einer Reihe von Aktivitäten, die ich als Vortragender in Vorlesungen und Seminaren seit 1981 unternommen habe.

Mein Hauptziel war dabei immer eine kompakte und verständliche Darstellung des breiten Gebiets der digitalen Signalverarbeitung, um den Einstieg in dieses relativ anspruchsvolle Fachgebiet zu erleichtern.

Die Gliederung des Buches ist so gestaltet, dass zunächst allgemeine Prinzipien erläutert werden und damit relativ universelle Modelle von Signalprozessorarchitekturen vorgestellt werden. Die besprochenen Architekturkonzepte spiegeln den Stand der Technik wider und werden auch in der nahen Zukunft noch aktuell sein, da das Potential der behandelten DSP-Architekturen durch die derzeitige Technologie noch nicht ausgeschöpft ist. Das zentrale Kapitel behandelt den Zusammenhang zwischen Algorithmus und Architektur und zeigt, wie beides aneinander angepasst werden kann. Die allgemein gehaltene Darstellung wird danach verwendet, um die Architekturen kommerzieller DSPs zu besprechen bzw. zu vergleichen. Signalprozessoren werden derzeit noch immer sehr maschinennahe programmiert, so dass in einem eigenen Kapitel auch Fragen der Zahlendarstellung und der Struktur der wichtigsten Funktionseinheiten erörtert werden. Die häufigsten Programmierfehler werden bei DSPs (insbesondere bei Festkommasignalprozessoren) im Zusammenhang mit Zahlenformaten gemacht. Die Zahlendarstellung verdient daher eine besondere Beachtung. Um ein abgerundetes Bild von Signalprozessoren anzubieten, wird im Anhang auch eine bewusst einfach gehaltene Einführung in die Methoden der digitalen Signalverarbeitung präsentiert. Sie bildet die Grundlage für die eingehende Analyse von Signalprozessorarchitekturen und liefert auch die notwendigen Voraussetzungen für das Verständnis der ausgewählten DSP-Anwendungen dieses Buches. Diese Anwendungen betreffen die Realisierung eines Einseitenbandmodulators und von adaptiven Filtern zur Echoentzerrung. Die Beispiele zeigen sehr deutlich die Vorzüge einer digitalen Implementierung. Neben den Algorithmindetails werden auch die wesentlichen Programmsegmente für zwei DSPs erläutert, so dass durch Verwendung kostengünstiger Entwicklungssysteme der DSP-Hersteller diese Anwendungen ohne großen Aufwand realisiert werden können.

Dieses Buch wäre ohne fachliche Unterstützung und ohne Ermunterung durch viele meiner Kollegen, insbesondere durch Herrn Prof. Dr. W. Mecklenbräuker, sicher nicht entstanden. Auch die permanente Herausforderung durch engagierte und hochmotivierte Studenten hat mir dabei sehr wesentlich geholfen. Schließlich haben auch zahlreiche Gespräche mit Entwicklungsingenieuren dazu beigetragen, Auswahl und Darstellung des Stoffes praxisorientiert zu gestalten. Ihnen allen sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt. Herrn Dr. J. Schlembach vom Verlag bin ich für die Unterstützung und unkomplizierte Vorgehensweise im Zuge der Publikation zu großem Dank verpflichtet.

G. Doblinger

Wien, im August 2000

---

---

# Vorwort zur zweiten Auflage

In den vergangenen vier Jahren haben sich auf dem Gebiet der digitalen Signalprozessoren (DSPs) vor allem technologische Fortschritte ereignet, die sich auf die Entwicklung und Verbesserung der derzeit kommerziell verfügbaren DSPs maßgebend ausgewirkt haben. Die Taktfrequenzen konnten entscheidend erhöht und die internen Speicher vergrößert werden. Viele DSPs sind heute mit peripheren Komponenten ausgestattet, die hochintegrierte Produkte in den Bereichen Multimediaanwendungen und Telekommunikation gestatten. Der Leistungsverbrauch konnte stark reduziert werden, so dass der Einsatz in mobilen Geräten in den letzten Jahren enorm zugenommen hat. Durch ausgefeiltes Power Management verbrauchen DSPs heute in Mobiltelefonen und Digitalkameras kaum mehr Strom als andere Komponenten dieser Geräte.

Die hohen Taktfrequenzen bei DSPs sind – wie bei anderen CPUs auch – derzeit nur durch den Einsatz längerer Pipelines erreichbar. Nur so können die vergleichsweise langsamen Speicherzugriffszeiten mit den Durchsatzraten der vielen parallel arbeitenden Funktionseinheiten der Prozessoren Schritt halten. Nachteilig wirkt sich dabei die erschwerte Assemblerprogrammierung aus, da die Ergebnisse der meisten Operationen nicht mehr im nächsten Taktzyklus fertig sind, sondern unterschiedlich lange Verzögerungszeiten haben. Für den Entwicklungsingenieur bedeutet das eine erheblich längere Zeit zur Programmentwicklung und ein noch intensiveres Studium der zumeist sehr umfangreichen Handbücher der Hersteller. Die automatische Optimierung von Assembler- und C-Programmen ist in den vergangenen Jahren zwar ständig verbessert worden, eine solide Handarbeit bei zeitkritischen Routinen ist aber noch immer unerlässlich.

Ansonsten hat es bei den grundlegenden Architekturkonzepten wenig Änderungen gegeben, so dass der überwiegende Teil der ersten Auflage dieses Buches auch weiterhin Gültigkeit besitzt. Die grundlegenden Konzepte lassen noch immer Spielraum für zukünftige Entwicklungen zu. So gibt es beispielsweise auch heute noch wenige handelsübliche DSPs, die echte MIMD (Multiple Instruction Multiple Data) Rechner sind. Hingegen hat sich der Einsatz von SIMD (Single Instruction Multiple Data) Befehlen bei DSPs weitgehend etabliert. Das ursprüngliche Konzept dieses Buches, eine kompakte, grundlegende Einführung in die vielschichtigen

Aspekte von Signalprozessoren zu bieten, konnte daher beibehalten werden. In erster Linie ist die Übersicht kommerzieller DSPs aktualisiert und erweitert worden. Die Ergänzungen beziehen sich vor allem auf eine eingehende Darstellung der leistungsfähigen DSPs Blackfin<sup>®</sup> und TigerSHARC<sup>™</sup> von Analog Devices und der C6000<sup>™</sup> DSPs von Texas Instruments.

Für Anregungen, Fehlerhinweise und aufbauende Kritik möchte ich den Lesern der ersten Auflage sehr herzlich danken. Herrn Schlembach vom Verlag danke ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren.

G. Doblinger

Wien, im August 2004

[Gerhard.Doblinger@tuwien.ac.at](mailto:Gerhard.Doblinger@tuwien.ac.at)

[www.nt.tuwien.ac.at/dspgroup/gdobl意思ing.html](http://www.nt.tuwien.ac.at/dspgroup/gdobl意思ing.html)

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Hardware zur Realisierung von DSP-Algorithmen . . . . .	2
1.2	Top-Down Design von DSP-Anwendungen . . . . .	3
1.3	Historischer Überblick . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Architekturen für Signalprozessoren</b>	<b>9</b>
2.1	Einleitung . . . . .	9
2.2	Modifizierte Harvard-Architekturen . . . . .	11
2.3	Superskalare Rechnerarchitekturen . . . . .	13
2.4	SIMD Architekturerweiterungen bei DSPs . . . . .	16
2.5	Adressrechner für DSPs . . . . .	19
2.6	Steuerung des Pipelining bei DSPs . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Zusammenhang Algorithmus – Architektur</b>	<b>25</b>
3.1	Allgemeines Modell eines DSP-Datenpfades . . . . .	26
3.2	Signalflussgraph und Präzedenzgraph . . . . .	27
3.3	Transformationen für Signal- und Datenflussgraphen . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Arithmetikeinheiten für DSPs</b>	<b>45</b>
4.1	Zahldarstellung . . . . .	46
4.1.1	Festkommazahldarstellung . . . . .	46
4.1.2	Gleitkommazahldarstellung . . . . .	50
4.1.3	Blockgleitkommazahlen . . . . .	52
4.1.4	CSD-Codierung . . . . .	53
4.2	Paralleladdierer . . . . .	55
4.3	Parallelmultiplizierer . . . . .	58
4.4	Multiplizierer-Akkumulatoreinheiten (MACs) . . . . .	62

<b>5</b>	<b>Kommerzielle DSPs</b>	<b>65</b>
5.1	Einleitung . . . . .	65
5.2	Arithmetikeinheiten . . . . .	68
5.2.1	Festkomma-DSPs . . . . .	68
5.2.2	Gleitkomma-DSPs . . . . .	75
5.3	Adressengeneratoren und interne Speicher . . . . .	83
5.4	Programmsteuerung . . . . .	88
5.5	Schnittstellen . . . . .	91
5.6	Architektur des Blackfin® DSP . . . . .	93
5.6.1	Kernarchitektur . . . . .	93
5.6.2	Betriebszustände des Blackfin® Prozessors . . . . .	96
5.6.3	Programmsequenzer . . . . .	96
5.6.4	Speicher- und Busarchitektur des Blackfin® DSP . . . . .	98
5.6.5	Programmierung des Blackfin® DSP . . . . .	99
5.6.6	Vergleich mit anderen kommerziellen DSPs . . . . .	102
5.6.7	Resümee . . . . .	103
5.7	Architektur des TigerSHARC™ DSP . . . . .	103
5.7.1	Kernarchitektur . . . . .	103
5.7.2	Betriebszustände des TigerSHARC™ Prozessors . . . . .	105
5.7.3	Programmsequenzer . . . . .	106
5.7.4	Speicher- und Busarchitektur des TigerSHARC™ DSP . . . . .	107
5.7.5	Programmierung des TigerSHARC™ DSP . . . . .	108
5.7.6	Resümee . . . . .	110
5.8	Architektur der C6000™ DSPs . . . . .	110
5.8.1	Kernarchitektur . . . . .	110
5.8.2	Programmsequenzer . . . . .	112
5.8.3	Interne Speicher der C6000™ DSPs . . . . .	114
5.8.4	Programmierung der C6000™ DSPs . . . . .	116
5.8.5	Resümee . . . . .	118
5.9	Ausblick . . . . .	118
5.10	Weitere Informationen über kommerzielle DSPs . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Ausgewählte DSP-Anwendungen</b>	<b>121</b>
6.1	Einseitenbandmodulator . . . . .	121
6.2	Adaptiver Echoentzerrer . . . . .	132

---

<b>A Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung</b>	<b>149</b>
A.1 Analog/Digitalumsetzung . . . . .	149
A.1.1 Abtastung analoger Signale . . . . .	151
A.1.2 Amplitudenquantisierung analoger Signale . . . . .	155
A.2 Digital/Analogumsetzung . . . . .	159
A.3 Zeitdiskrete Signale und Systeme . . . . .	161
A.3.1 Elementare zeitdiskrete Signale . . . . .	161
A.3.2 Elementare Signaloperationen . . . . .	165
A.3.3 Beschreibung zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich . . . . .	166
A.3.4 Beschreibung zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich . . . . .	170
A.4 Die schnelle Fouriertransformation (FFT) . . . . .	175
A.5 FIR-Filterimplementierung mit der FFT . . . . .	183
A.6 Strukturen digitaler Filter . . . . .	185
A.7 Wortlängeneffekte . . . . .	192
A.7.1 Koeffizientenquantisierung . . . . .	193
A.7.2 Rundungsrauschen . . . . .	194
A.7.3 Grenzyklen . . . . .	196
A.8 Besprechung der weiterführenden Literatur . . . . .	201
<b>Literatur</b>	<b>202</b>
<b>Glossar</b>	<b>207</b>
<b>Index</b>	<b>211</b>