

---

---

# Vorwort

In allen Bereichen der Informationstechnik und der Telekommunikation breitet sich der Einsatz der Digitalisierung mit rasanter Geschwindigkeit aus. Mobilfunk, digitaler Rundfunk und vor allem das globale Netzwerk Internet benötigen eine digitale Speicherung, Übertragung und Verarbeitung analoger Signale. Von Forschern und Ingenieuren auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung wird heute vorausgesetzt, daß sie beim Systementwurf umfangreiche Simulationen der eingesetzten, hochkomplexen Algorithmen vornehmen. Dazu werden eine Fülle von Programmpaketen angeboten, die dem Anwender vor allem die Programmierung von Standardaufgaben und die Visualisierung der Daten erleichtern. Ein weitverbreitetes und leistungsfähiges Programmpaket ist MATLAB®. Es stellt nicht nur schlüsselfertige Lösungen für viele Standardaufgaben zur Verfügung, sondern ermöglicht auch durch eine universelle Programmentwicklung maßgeschneiderte Lösungen. Wegen der Komplexität muß sich ein Anwender die MATLAB®-Kenntnisse allerdings meist mühsam durch das Studium der sehr umfangreichen Dokumentation aneignen.

Hier bietet das vorliegende Buch in kompakter Form einen rascheren Einstieg. Anhand grundlegender Problemstellungen und ausgewählter Anwendungen der digitalen Signalverarbeitung kann Schritt für Schritt der effiziente Einsatz der MATLAB®-Programmierung erlernt werden. Die dabei gewählte Methodik besteht aus einer theoretischen Einführung zu jeder Gruppe von Aufgaben und aus Musterlösungen, die als Starthilfe für das Kennenlernen der jeweils verwendeten MATLAB®-Befehle dienen.

Das Buch ist anhand des Skriptums zu einer Lehrveranstaltung entstanden, die ich seit 1994 an der Technischen Universität Wien abhalte. Dabei wird das Ziel verfolgt, den Studenten neben der theoretischen Ausbildung auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung die Möglichkeit zum anwendungsbezogenen Umgang mit den Methoden und Algorithmen anzubieten. Daher ist dieses Buch auch als Brückenschlag zwischen Theorie und Praxis anzusehen, mit einer Stoffauswahl, die sich nicht nur auf Standardwissen der digitalen Signalverarbeitung beschränkt. Das vorliegende Buch ist daher meiner Meinung nach auch für die Weiterbildung von Ingenieuren in der Praxis gut geeignet.

Ein großer Teil dieses Buches besteht aus Aufgaben, mit denen die MATLAB®-Programmierung vertieft wird und die fast alle anwendungsorientiert sind. Die Grundlagen für die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben werden zwar knapp aber hoffentlich verständlich präsentiert. Trotzdem werden grundlegende Kenntnisse der digitalen Signalverarbeitung vorausgesetzt, die in jedem Standardwerk auf diesem Gebiet zu finden sind. Schnelle Leser können gerne einzelne Kapitel überspringen und sich auf Aufgaben ihrer Wahl beschränken, wenn auch zu bedenken ist, daß Schwierigkeit und Umfang proportional zur Seitenzahl zunehmen. Zum Verständnis der Programmbeispiele ist es sicher vorteilhaft, die Kurzbeschreibung der MATLAB®-Syntax im Anhang zu lesen. Ansonsten sollte man Programmieren nicht durch Lesen, sondern durch Programmieren lernen!

Die Programmbeispiele dieses Buches, die Lösungen zu den umfangreicheren Aufgaben und andere nützliche Programme sind unter

<http://www.nt.tuwien.ac.at/dspgroup/gdabling.html>

zu finden. Für diese Programme wird jedoch keine Garantie für deren richtige Funktion übernommen. Der Einsatz dieser Programme ist ausschließlich für den Ausbildungsbereich und nicht für eine kommerzielle Verwertung gedacht. Die Verfügbarkeit der Lösungen sollte nicht den Reiz der Suche nach eigenen Problemlösungen vermindern. Es gibt daher auf meiner Internetseite auch eine Sammlung von Aufgaben, deren Lösung nicht publik gemacht wird und die z.B. für Seminararbeiten vorgesehen sind.

Zum Abschluß möchte ich mich sehr gerne bei meinen Kollegen und Studenten bedanken, die mir bei den Vorarbeiten zu diesem Buch in hohem Maße geholfen haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. W. Mecklenbräuker für seine zahlreichen Beiträge und Diskussionen auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung, Herrn Dr. R. Sucher für die engagierte Mithilfe bei der Verfassung des Skriptums zur erwähnten Lehrveranstaltung und Herrn Dr. M. Lang für seine exzellenten Beiträge über Optimierungsmethoden zum Entwurf digitaler Filter. Mein Dank geht auch an Herrn Prof. H. W. Schüßler. Die Stoffauswahl und anschauliche Darstellung der digitalen Signalverarbeitung in seinen Büchern und Skripten haben mich bei der Verfassung dieses Buches sehr inspiriert. Bei Herrn Dr. J. Schlembach vom Verlag möchte ich mich für die bewährte Unterstützung und Bereitwilligkeit zur Publikation dieses Buches sehr herzlich bedanken.

Wien, im März 2001

G. Doblinger

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zeitdiskrete Signale</b>	<b>1</b>
1.1	Erzeugung elementarer Signale . . . . .	2
1.2	Zeitachsentransformationen . . . . .	7
1.3	Faltungsoperation für zeitdiskrete Signale . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Zeitdiskrete Systeme</b>	<b>27</b>
2.1	Beschreibung durch Faltungsoperation . . . . .	28
2.2	Beschreibung im Frequenzbereich . . . . .	34
2.3	Beschreibung durch Differenzgleichung . . . . .	41
2.4	Zustandsraumbeschreibung . . . . .	54
<b>3</b>	<b>Diskrete Fouriertransformation</b>	<b>63</b>
3.1	Interpolation im Frequenzbereich . . . . .	67
3.2	Dezimation im Frequenzbereich . . . . .	69
3.3	Fenstereffekt bei der DFT . . . . .	71
3.4	Zyklische Faltung . . . . .	72
3.5	Overlap-Add und Overlap-Save Methode . . . . .	75
3.6	Chirp-DFT . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Entwurf digitaler Filter</b>	<b>83</b>
4.1	FIR-Filterentwurf . . . . .	83
4.1.1	Frequenzabtastungsmethode . . . . .	87
4.1.2	Methode der kleinsten Quadrate . . . . .	89
4.1.3	Fenstermethode . . . . .	91
4.1.4	Optimaler Entwurf mit dem Remez-Algorithmus . . . . .	95
4.1.5	FIR-Filter mit geringer Signalverzögerung . . . . .	99

4.2	IIR-Filterentwurf . . . . .	107
4.2.1	Approximation der Impulsantwort . . . . .	107
4.2.2	Bilineare $\mathcal{Z}$ -Transformation . . . . .	113
4.2.3	Frequenztransformationen . . . . .	120
4.2.4	Least-Squares-Approximation von Frequenzgängen . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Multiratenfilterbänke und Wavelets</b>	<b>127</b>
5.1	Cosinusmodulierte Filterbänke . . . . .	129
5.1.1	Entwurf äquidistanter Filterbänke . . . . .	129
5.1.2	Entwurf nichtäquidistanter Filterbänke . . . . .	136
5.2	DFT-Filterbänke . . . . .	144
5.3	Wavelet-Transformation . . . . .	151
5.3.1	Diskrete Wavelet-Transformation (DWT) . . . . .	151
5.3.2	Zeitdiskrete Wavelet-Transformation (DTWT) . . . . .	154
5.3.3	Signalentstörung mit Wavelets . . . . .	168
<b>6</b>	<b>Anwendungen aus dem Bereich der Audiotechnik</b>	<b>173</b>
6.1	Pitch- und Zeitskalierung mit der DFT-Filterbank . . . . .	174
6.1.1	Pitch-Skalierung . . . . .	174
6.1.2	Zeitskalierung . . . . .	179
6.2	Entstörung verrauschter Audiosignale . . . . .	182
<b>A</b>	<b>Kurzbeschreibung der MATLAB<sup>®</sup> Syntax</b>	<b>191</b>
A.1	Vektoren und Matrizen . . . . .	192
A.2	Cell-Arrays und Strukturen . . . . .	194
A.3	Steuerung des Programmablaufs . . . . .	197
A.4	MATLAB <sup>®</sup> -Funktionen . . . . .	199
A.5	Verwendung von <code>eval()</code> und <code>feval()</code> . . . . .	200
<b>B</b>	<b>Formeln für Fourier- und <math>\mathcal{Z}</math>-Transformation</b>	<b>203</b>
B.1	Fourierreihen zeitdiskreter periodischer Signale . . . . .	204
B.2	Fouriertransformation zeitdiskreter Signale . . . . .	205
B.3	Diskrete Fouriertransformation (DFT) . . . . .	206
B.4	$\mathcal{Z}$ -Transformation . . . . .	208
B.5	Systeme mit Mehrfachtaktverarbeitung . . . . .	211

Inhaltsverzeichnis	vii
<hr/>	
<b>Literatur</b>	<b>213</b>
<b>Glossar</b>	<b>217</b>
<b>Index</b>	<b>219</b>