

eXamen.press

**eXamen.press** ist eine Reihe, die Theorie und Praxis aus allen Bereichen der Informatik für die Hochschulausbildung vermittelt.

Heinz Wörn  
Uwe Brinkschulte

# Echtzeitsysteme

Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen

Mit 440 Abbildungen und 32 Tabellen

 Springer

Heinz Wörn  
woern@ira.uka.de

Uwe Brinkschulte  
brinks@ira.uka.de

Universität Karlsruhe  
Fakultät für Informatik  
Institut für Prozessrechentechnik,  
Automation und Robotik  
Engler-Bunte-Ring 8  
76131 Karlsruhe

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1614-5216

ISBN-10 3-540-20588-8 Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN-13 978-3-540-20588-3 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media  
[springer.de](http://springer.de)

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005  
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Satz: Druckfertige Daten der Autoren  
Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig  
Umschlaggestaltung: KünkelLopka Werbeagentur, Heidelberg  
Gedruckt auf säurefreiem Papier 33/3142/YL - 5 4 3 2 1 0

Für meine Frau Dagmar und unsere Kinder Antje, Jeanine, Ina und Mirko  
Heinz Wörn

Für meine Frau Angelika und unsere Tochter Melanie  
Uwe Brinkschulte

# Vorwort

Zeitkritische Systeme, so genannte Echtzeitsysteme, spielen in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen eine bedeutende Rolle. Zu nennen sind hier z.B. die Fabrikautomation, die Robotik, die Medizintechnik, aber auch Bereiche aus dem täglichen Leben wie Kraftfahrzeugtechnik oder Mobilkommunikation. Das vorliegende Buch vermittelt einen Einblick in die Welt solcher Systeme. Von elementaren Grundlagen bis hin zu Zukunftstechnologien und Forschungstrends werden Methoden, Konzepte und Funktionsprinzipien sowie Architekturen, Aufbau und Systeme allgemein erläutert und anhand von Beispielen dargestellt.

Kapitel 1 behandelt allgemeine Definitionen und Grundlagen von Echtzeitsystemen. Ein bedeutendes Anwendungsfeld solcher Systeme, die Automatisierung, wird näher vorgestellt sowie wichtige Grundlagen und Methoden der Steuerungs- und Regelungstechnik behandelt. Kapitel 2 betrachtet die Hardwaregrundlagen von Echtzeitsystemen und erläutert hierfür geeignete digitale Rechnerarchitekturen. In Kapitel 3 werden Hardwareschnittstellen zum Prozess sowie die analoge Signalverarbeitung für Echtzeitsysteme besprochen. Kapitel 4 befasst sich mit echtzeitfähiger Kommunikation und echtzeitfähigen Feldbussen. Kapitel 5 erläutert elementare Programmiertechniken für Echtzeitsysteme, während sich Kapitel 6 ausführlich dem Themenkomplex „Echtzeitbetriebssysteme“ und damit verbundene Fragestellungen wie Echtzeitscheduling widmet. Kapitel 7 behandelt verteilte Echtzeitsysteme und führt in die Welt echtzeitfähiger Middleware ein. Die Kapitel 8 bis 10 geben schließlich konkrete Anwendungsbeispiele aus den Bereichen Speicherprogrammierbarer Steuerungen, Werkzeugmaschinensteuerungen und Robotersteuerungen.

Zielgruppe dieses Buchs sind Studierende der Informatik, der Elektrotechnik, des Maschinenbaus, der Physik und des Wirtschaftsingenieurwesens mittleren und höheren Semesters sowie in der Praxis stehende Experten, die mit der Entwicklung, der Planung und dem Einsatz von Echtzeitsystemen befasst sind. Das Buch soll helfen, die Methoden und Architekturen sowie die Leistungsfähigkeit, Grenzen und Probleme solcher Systeme verstehen und beurteilen zu können. Darüber hinaus gibt das Buch einen Einblick in den Stand der Technik und Forschung und ermöglicht es, zukünftige Entwicklungen im Voraus zu erkennen.

Bei der Erstellung des Manuskripts haben uns viele Personen unterstützt. Stellvertretend danken wir unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Nina Maizik, Dr. Igor Tchouchenkov, Dirk Osswald, Andreas Schmid sowie Mathias Pacher.

Ein weiterer Dank geht an Frau Angelika Brinkschulte für das sorgfältige Korrekturlesen und die vielen stilistischen Verbesserungen. Ergänzungen und Korrek-

turen finden sich auf der Homepage des Buchs (siehe nächste Seite), die auch über die Homepages der Autoren zu erreichen sind.

Für Ergänzungen, Anregungen und Korrekturen der Leserinnen und Leser sind wir immer dankbar. Zu erreichen sind wir unter [woern@ira.uka.de](mailto:woern@ira.uka.de) und [brinks@ira.uka.de](mailto:brinks@ira.uka.de).

Karlsruhe, Februar 2005 Heinz Wörn und Uwe Brinkschulte

Buch-Homepage:

<http://www.ipr.ira.uka.de/buchezs/index.htm>

Homepages der Autoren:

<http://www.ipr.ira.uka.de/~woern>

<http://ipr.ira.uka.de/perso/brinks/brinks.html>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1</b>	<b>Grundlagen für Echtzeitsysteme in der Automatisierung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung	1
1.1.1	Echtzeitdatenverarbeitung	1
1.1.2	Ziele und Grundprinzip der Automatisierung von technischen Prozessen	2
1.1.3	Anwendungsbeispiele zur Automatisierung von technischen Prozessen	4
1.1.4	Prozessmodell	9
1.1.5	Steuerung und Regelung	11
1.2	Methoden zur Modellierung und zum Entwurf von diskreten Steuerungen	16
1.2.1	Petri-Netze	16
1.2.2	Automaten	25
1.2.3	Zusammenhang zwischen Petri-Netzen und Automaten	31
1.3	Methoden für Modellierung und Entwurf zeitkontinuierlicher Regelungen	33
1.3.1	Aufgabenstellung in der Regelungstechnik	33
1.3.2	Beschreibungsverfahren für zeitkontinuierliche Systeme	34
1.3.3	Streckenidentifikation	54
1.3.4	Entwurf von zeitkontinuierlichen Regelungen	59
1.3.5	PID-Regler	73
1.3.6	Vorsteuerung und Störgrößenaufschaltung	80
1.3.7	Mehrschleifige Regelung	82
1.3.8	Zustandsregler und modellbasierte Regler	84
1.3.9	Adaptive Regler	86
1.4	Methoden für Modellierung und Entwurf zeitdiskreter Regelungen	89
1.4.1	Zeitdiskreter Regelkreis	89
1.4.2	Das Abtasttheorem	91
1.4.3	Beschreibung linearer zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich	92
1.4.4	Beschreibung linearer zeitdiskreter Systeme im Bildbereich	93
1.4.5	Die zeitdiskrete Ersatzregelstrecke	98



	1.4.6	Der digitale PID-Regler	100
	1.4.7	Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion, Stabilität	103
	1.4.8	Stabilität mit dem Schur-Cohn-Kriterium	103
	1.4.9	Digitale Filter	105
1.5		Methoden für Modellierung und Entwurf von Regelungen mit Matlab	108
	1.5.1	Systemanalyse und Reglerentwurf im zeitkontinuierlichen Fall	109
	1.5.2	Systemanalyse und Reglerentwurf im zeitdiskreten Fall	118
	1.5.3	Systemanalyse und Reglerentwurf mit Simulink	127
		Literatur	129
<b>Kapitel 2</b>		<b>Rechnerarchitekturen für Echtzeitsysteme</b>	<b>131</b>
2.1		Allgemeines zur Architektur von Mikrorechnersystemen	131
	2.1.1	Aufbau und Konzepte	133
	2.1.2	Unterbrechungsbehandlung	137
	2.1.3	Speicherhierarchien, Pipelining und Parallelverarbeitung	145
	2.1.4	Echtzeitfähigkeit	152
2.2		Mikrocontroller	155
	2.2.1	Abgrenzung zu Mikroprozessoren	155
	2.2.2	Prozessorkern	157
	2.2.3	Speicher	158
	2.2.4	Zähler und Zeitgeber	161
	2.2.5	Watchdogs	162
	2.2.6	Serielle und parallele Ein-/Ausgabekanäle	163
	2.2.7	Echtzeitkanäle	164
	2.2.8	AD-/DA-Wandler	166
	2.2.9	Unterbrechungen	167
	2.2.10	DMA	168
	2.2.11	Ruhebetrieb	168
	2.2.12	Erweiterungsbus	169
2.3		Signalprozessoren	169
2.4		Parallelbusse	172
	2.4.1	Grundkonzepte	173
	2.4.2	Echtzeitaspekte	182
	2.4.3	Der PCI-Bus	183
	2.4.4	Der VME-Bus	190
2.5		Schnittstellen	198
	2.5.1	Klassifizierung von Schnittstellen	200
	2.5.2	Beispiele	204
2.6		Rechner in der Automatisierung	207
		Literatur	212

---

<b>Kapitel 3</b>	<b>Hardwarechnittstelle zwischen Echtzeitsystem und Prozess</b>	<b>215</b>
3.1	Einführung	215
3.2	Der Transistor	217
3.2.1	Der Transistor als Verstärker	217
3.2.2	Der Transistor als Schalter	218
3.3	Operationsverstärker	220
3.3.1	Definition und Eigenschaften des Operationsverstärkers	220
3.3.2	Realisierung mathematischer Funktionen mit Operationsverstärkern	222
3.3.3	Weitere Operationsverstärkerschaltungen	228
3.4	Datenwandler zur Ein- und Ausgabe von Analogsignalen	232
3.4.1	Parameterdefinitionen für Datenwandler	233
3.4.2	Digital zu Analog (D/A) - Wandler	234
3.4.3	Analog zu Digital (A/D) - Wandler	236
3.4.4	Analogmessdatenerfassung	243
3.5	Eingabe/Ausgabe von Schaltsignalen	245
3.5.1	Pegel-/Leistungsanpassung durch Relaisreiber mit gemeinsamer Spannungsversorgung	245
3.5.2	Pegel-/Leistungsanpassung durch Relaisreiber mit separater Spannungsversorgung	247
3.5.3	Pegelumsetzung auf 24 Volt	248
3.6	Serielle Schnittstellen	249
3.6.1	RS-232 Schnittstelle	249
3.6.2	RS-422-Schnittstelle	252
3.6.3	RS-485-Schnittstelle	253
<b>Kapitel 4</b>	<b>Echtzeitkommunikation</b>	<b>255</b>
4.1	Einführung	255
4.2	Grundlagen für die Echtzeitkommunikation	257
4.2.1	Kommunikationsmodell	257
4.2.2	Topologien von Echtzeit-Kommunikationssystemen	260
4.2.3	Zugriffsverfahren auf Echtzeit-Kommunikationssysteme	263
4.2.4	Signalkodierung, Signaldarstellung	266
4.3	Ethernet für die Kommunikation zwischen Leitebene und Steuerungsebene	267
4.4	Feldbusse für die Kommunikation zwischen Steuerungs- und Prozessebene	272
4.4.1	Allgemeines	272
4.4.2	PROFIBUS	274
4.4.3	CAN-Bus	278
4.4.4	CAN-Bus - höhere Protokolle	283

	4.4.5	INTERBUS	290
	4.4.6	ASI-Bus	293
	4.4.7	Sicherheitsbus	296
	4.4.8	Industrial Ethernet mit Echtzeit	301
	4.4.9	ETHERNET Powerlink	303
	4.4.10	EtherCAT	306
	4.4.11	PROFINet	308
	4.4.12	SERCOS III	310
	4.4.13	Vergleich der Eigenschaften von Echtzeit-Ethernetsystemen	312
	Literatur		314
<b>Kapitel 5</b>	<b>Echtzeitprogrammierung</b>		<b>317</b>
	5.1	Problemstellung und Anforderungen	317
	5.1.1	Rechtzeitigkeit	318
	5.1.2	Gleichzeitigkeit	322
	5.1.3	Verfügbarkeit	324
	5.2	Verfahren	325
	5.2.1	Synchrone Programmierung	326
	5.2.2	Asynchrone Programmierung	334
	5.3	Ablaufsteuerung	338
	5.3.1	Zyklische Ablaufsteuerung	339
	5.3.2	Zeitgesteuerte Ablaufsteuerung	340
	5.3.3	Unterbrechungsgesteuerte Ablaufsteuerung	340
	Literatur		342
<b>Kapitel 6</b>	<b>Echtzeitbetriebssysteme</b>		<b>343</b>
	6.1	Aufgaben	343
	6.2	Schichtenmodelle	344
	6.3	Taskverwaltung	349
	6.3.1	Taskmodell	350
	6.3.2	Taskzustände	351
	6.3.3	Zeitparameter	354
	6.3.4	Echtzeitscheduling	356
	6.3.5	Synchronisation und Verklemmungen	378
	6.3.6	Task-Kommunikation	391
	6.3.7	Implementierungsaspekte der Taskverwaltung	394
	6.4	Speicherverwaltung	395
	6.4.1	Modelle	396
	6.4.2	Lineare Adressbildung	397
	6.4.3	Streuende Adressbildung	405
	6.5	Ein-/Ausgabeverwaltung	410
	6.5.1	Grundlagen	410
	6.5.2	Synchronisationsmechanismen	413
	6.5.3	Unterbrechungsbehandlung	419
	6.6	Klassifizierung von Echtzeitbetriebssystemen	420

---

6.6.1	Auswahlkriterien	421
6.6.2	Überblick industrieller Echtzeitbetriebssysteme	424
6.7	Beispiele	425
6.7.1	QNX	425
6.7.2	POSIX.4	429
6.7.3	RTLinux	433
6.7.4	VxWorks	437
	Literatur	442
<b>Kapitel 7</b>	<b>Echtzeitmiddleware</b>	<b>443</b>
7.1	Grundkonzepte	443
7.2	Middleware für Echtzeitsysteme	445
7.3	RT-CORBA	447
7.4	OSA+	453
	Literatur	465
<b>Kapitel 8</b>	<b>Echtzeitsystem Speicherprogrammierbare Steuerung</b>	<b>467</b>
8.1	Einführung	467
8.2	Grundprinzip der SPS	467
8.3	Hardware und Softwarearchitekturen der SPS	469
8.4	SPS-Programmierung	476
	Literatur	486
<b>Kapitel 9</b>	<b>Echtzeitsystem Werkzeugmaschinensteuerung</b>	<b>487</b>
9.1	Einführung	487
9.2	Struktur und Informationsfluss innerhalb einer NC	492
9.3	Bewegungsführung	499
9.4	Kaskadenregelung für eine Maschinenachse	505
<b>Kapitel 10</b>	<b>Echtzeitsystem Robotersteuerung</b>	<b>511</b>
10.1	Einführung	511
10.2	Informationsfluss und Bewegungssteuerung einer RC	512
10.3	Softwarearchitektur und Echtzeitverhalten der RC	517
10.4	Sensorgestützte Roboter	533
	10.4.1 Sensorstandardschnittstelle	535
<b>Indexverzeichnis</b>		<b>541</b>