



**et**  
elektrotechnik

Alan V. Oppenheim  
Ronald W. Schafer  
John R. Buck

# Zeitdiskrete Signalverarbeitung

2., überarbeitete Auflage

Prentice Hall

Neuübersetzung der  
aktuellen US-Ausgabe

PEARSON  
Studium

Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer, John R. Buck

# Zeitdiskrete Signalverarbeitung

2., überarbeitete Auflage



---

ein Imprint von Pearson Education

München • Boston • San Francisco • Harlow, England  
Don Mills, Ontario • Sydney • Mexico City  
Madrid • Amsterdam

# Zeitdiskrete Signalverarbeitung - PDF

## Inhaltsverzeichnis

Zeitdiskrete Signalverarbeitung - 2., überarbeitete Auflage

### Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Liste der Beispiele

Vorwort

Danksagung

1 Einführung

2 Zeitdiskrete Signale und Systeme

3 Die z-Transformation

4 Die Abtastung zeitkontinuierlicher Signale

5 Analyse linearer zeitinvarianter Systeme mittels Transformationen

6 Strukturen zeitdiskreter Systeme

7 Verfahren für den Filterentwurf

8 Die diskrete Fourier-Transformation

9 Berechnung der diskreten Fourier-Transformierten

10 Fourier-Analyse von Signalen mittels der diskreten Fourier-Transformierten

11 Diskrete Hilbert-Transformationen

A Zufallssignale

B Zeitkontinuierliche Filter

C Lösungen zu ausgewählten Grundaufgaben

Literaturverzeichnis

Register

### Abkürzungsverzeichnis

### Liste der Beispiele

### Vorwort

### Danksagung

### 1 Einführung

Historische Entwicklung

Zukünftige Entwicklung

### 2 Zeitdiskrete Signale und Systeme

2.0 Einführung

2.1 Zeitdiskrete Signale als Folgen

2.1.1 Grundfolgen und Operationen mit Folgen

2.2 Zeitdiskrete Systeme

2.2.1 Speicherlose Systeme

# Inhaltsverzeichnis

2.2.2 Lineare Systeme

2.2.3 Zeitinvariante Systeme

2.2.4 Kausalität

2.2.5 Stabilität

2.3 Lineare zeitinvariante Systeme

2.4 Eigenschaften linearer zeitinvarianter Systeme

2.5 Lineare Differenzgleichungen mit konstanten Koeffizienten

2.6 Darstellung zeitdiskreter Signale und Systeme im Frequenzbereich

2.6.1 Eigenfunktionen linearer zeitinvarianter Systeme

2.6.2 Einschaltvorgänge bei komplexen exponentiellen Eingangsfolgen

2.7 Darstellung von Folgen mithilfe der Fourier-Transformation

2.8 Symmetrieeigenschaften der Fourier-Transformation

2.9 Theoreme der Fourier-Transformation

2.9.1 Linearität der Fourier-Transformation

2.9.2 Zeit- und Frequenzverschiebung

2.9.3 Zeitumkehr

2.9.4 Differentiation im Frequenzbereich

2.9.5 Parseval'sches Theorem

2.9.6 Das Faltungstheorem

2.9.7 Das Modulations- oder Fenstertheorem

2.10 Zeitdiskrete Zufallssignale

2.11 Zusammenfassung

## 3 Die z-Transformation

3.0 Einführung

3.1 Die z-Transformierte

3.2 Eigenschaften des Konvergenzbereichs bei der z-Transformation

3.3 Die inverse z-Transformation

3.3.1 Tabellenverfahren

3.3.2 Partialbruchzerlegung

3.3.3 Potenzreihenentwicklung

3.4 Eigenschaften der z-Transformation

3.4.1 Linearität

3.4.2 Zeitverschiebung

3.4.3 Multiplikation mit einer Exponentialfolge

3.4.4 Differentiation von  $X(z)$

3.4.5 Konjugation einer komplexen Folge

3.4.6 Zeitumkehr

3.4.7 Faltung von Folgen

3.4.8 Anfangswert-Theorem

3.4.9 Zusammenfassung einiger Eigenschaften der z-Transformation

# Inhaltsverzeichnis

## 3.5 Zusammenfassung

## 4 Die Abtastung zeitkontinuierlicher Signale

### 4.0 Einführung

### 4.1 Periodische Abtastung

### 4.2 Darstellung der Abtastung im Frequenzbereich

### 4.3 Rekonstruktion eines bandbegrenzten Signals aus seinen Abtastwerten

### 4.4 Zeitdiskrete Verarbeitung zeitkontinuierlicher Signale

#### 4.4.1 Lineare zeitinvariante zeitdiskrete Systeme

#### 4.4.2 Impulsinvarianz

### 4.5 Zeitkontinuierliche Verarbeitung zeitdiskreter Signale

### 4.6 Veränderung der Abtastrate durch eine zeitdiskrete Verarbeitung

#### 4.6.1 Reduktion der Abtastrate um einen ganzzahligen Faktor

#### 4.6.2 Erhöhung der Abtastrate um einen ganzzahligen Faktor

#### 4.6.3 Veränderung der Abtastrate um einen nichtganzzahligen Faktor

### 4.7 Multiraten-Signalverarbeitung

#### 4.7.1 Austauschbarkeit von Filterung und Abwärts- bzw. Aufwärtstastung

#### 4.7.2 Polyphasenzerlegungen

#### 4.7.3 Polyphasenrealisierung von Dezimationsfiltern

#### 4.7.4 Polyphasenrealisierung von Interpolationsfiltern

### 4.8 Digitale Verarbeitung von analogen Signalen

#### 4.8.1 Vorfilterung zur Vermeidung von Aliasing

#### 4.8.2 Analog-Digital-Wandlung (A/D-Wandlung)

#### 4.8.3 Analyse der Quantisierungsfehler

#### 4.8.4 Digital-Analog-Wandlung (D/A-Wandlung)

### 4.9 Überabtastung und Rauschformung bei der A/D- und D/A-Wandlung

#### 4.9.1 A/D-Wandlung mit Überabtastung und direkter Quantisierung

#### 4.9.2 A/D-Wandlung mit Überabtastung und Rauschformung

#### 4.9.3 Überabtastung und Rauschformung bei der D/A-Wandlung

### 4.10 Zusammenfassung

## 5 Analyse linearer zeitinvarianter Systeme mittels Transformationen

### 5.0 Einleitung

### 5.1 Der Frequenzgang von LTI-Systemen

#### 5.1.1 Ideale frequenzselektive Filter

#### 5.1.2 Phasenverzerrung und Laufzeit

### 5.2 Systemfunktionen von Systemen, die durch lineare Differenzgleichungen mit konstanten Koeffizienten beschrieben werden

#### 5.2.1 Stabilität und Kausalität

#### 5.2.2 Inverse Systeme

#### 5.2.3 Impulsantwort bei rationalen Systemfunktionen

### 5.3 Frequenzgang bei rationalen Systemfunktionen

# Inhaltsverzeichnis

5.3.1 Frequenzgang einer einfachen Nullstelle oder eines einfachen Pols

5.3.2 Beispiele mit mehrfachen Polen und Nullstellen

5.4 Zusammenhang zwischen Amplituden- und Phasengang

5.5 Allpässe

5.6 Minimalphasensysteme

5.6.1 Zerlegung in Minimalphasensysteme und Allpässe

5.6.2 Kompensation des Frequenzgangs

5.6.3 Eigenschaften von Minimalphasensystemen

5.7 Lineare Systeme mit verallgemeinerter linearer Phase

5.7.1 Systeme mit linearer Phase

5.7.2 Verallgemeinerte lineare Phase

5.7.3 Kausale Systeme mit verallgemeinerter linearer Phase

5.7.4 Beziehungen zwischen linearphasigen und minimalphasigen FIR-Systemen

5.8 Zusammenfassung

6 Strukturen zeitdiskreter Systeme

6.0 Einführung

6.1 Darstellung linearer Differenzgleichungen mit konstanten Koeffizienten durch Blockschaltbilder

6.2 Darstellung linearer Differenzgleichungen mit konstanten Koeffizienten durch Signalflussgraphen

6.3 Grundstrukturen von IIR-Systemen

6.3.1 Direktformen

6.3.2 Kettenform

6.3.3 Parallelforn

6.3.4 Rückkopplung in IIR-Systemen

6.4 Transponierte Formen

6.5 Grundstrukturen von Netzwerken für FIR-Systeme

6.5.1 Direktform

6.5.2 Kettenform

6.5.3 Strukturen für linearphasige FIR-Systeme

6.6 Überblick über die Auswirkungen einer endlichen Rechengenauigkeit

6.6.1 Zahlendarstellungen

6.6.2 Quantisierung bei der Implementierung von Systemen

6.7 Auswirkungen der Koeffizientenquantisierung

6.7.1 Auswirkungen der Koeffizientenquantisierung bei IIR-Systemen

6.7.2 Beispiel zur Koeffizientenquantisierung bei einem Cauer-Filter

6.7.3 Pollagen bei quantisierten Teilsystemen zweiter Ordnung

6.7.4 Auswirkungen der Koeffizientenquantisierung bei FIR-Systemen

6.7.5 Beispiel für die Quantisierung eines optimalen FIR-Filters

6.7.6 Erhaltung der linearen Phase

# Inhaltsverzeichnis

## 6.8 Auswirkungen des Rundungsrauschens bei Digitalfiltern

- 6.8.1 Analyse von IIR-Strukturen in Direktform
- 6.8.2 Skalierung bei Festkomma-Realisierungen von IIR-Systemen
- 6.8.3 Beispiel für die Analyse einer IIR-Struktur in Kettenform
- 6.8.4 Analyse von FIR-Systemen in Direktform
- 6.8.5 Gleitkomma-Realisierungen zeitdiskreter Systeme

## 6.9 Grenzyklen bei Festkomma- Realisierungen von IIR-Digitalfiltern

- 6.9.1 Grenzyklen durch Runden und Abschneiden
- 6.9.2 Grenzyklen durch Überlauf
- 6.9.3 Vermeidung von Grenzyklen

## 6.10 Zusammenfassung

## 7 Verfahren für den Filterentwurf

### 7.0 Einführung

### 7.1 Entwurf zeitdiskreter IIR-Filter aus zeitkontinuierlichen Filtern

- 7.1.1 Filterentwurf über Impulsinvarianz
- 7.1.2 Bilineare Transformation
- 7.1.3 Beispiele für den Entwurf mittels bilinearer Transformation

### 7.2 Entwurf von FIR-Filtern mit Fenstertechnik

- 7.2.1 Eigenschaften häufig genutzter Fenster
- 7.2.2 Einbeziehung der verallgemeinerten linearen Phase
- 7.2.3 Filterentwurfsmethode mit Kaiser-Fenster
- 7.2.4 Beziehungen zwischen dem Kaiser-Fenster und anderen Fenstern

### 7.3 Beispiele für den FIR-Filterentwurf mit der Kaiser-Fenster-Methode

- 7.3.1 Hochpassfilter
- 7.3.2 Zeitdiskrete Differentiatoren

### 7.4 Optimale Approximationen von FIR-Filtern

- 7.4.1 Optimale Tiefpassfilter des Typs I
- 7.4.2 Optimale Tiefpassfilter des Typs II
- 7.4.3 Parks-McClellan-Algorithmus
- 7.4.4 Charakteristiken optimaler FIR-Filter

### 7.5 Beispiele für FIR-Approximationen mit gleichmäßiger Welligkeit

- 7.5.1 Tiefpassfilter
- 7.5.2 Kompensation eines Halteglieders nullter Ordnung
- 7.5.3 Bandpassfilter

### 7.6 Bemerkungen zu zeitdiskreten IIR- und FIR-Filtern

### 7.7 Zusammenfassung

## 8 Die diskrete Fourier-Transformation

### 8.0 Einführung

- 8.1 Darstellung von periodischen Folgen: Die diskrete Fourier-Reihe
- 8.2 Eigenschaften der diskreten Fourier-Reihen

# Inhaltsverzeichnis

- 8.2.1 Linearität
- 8.2.2 Verschiebung einer Folge
- 8.2.3 Dualität
- 8.2.4 Symmetrieeigenschaften
- 8.2.5 Periodische Faltung
- 8.2.6 Zusammenfassung der Eigenschaften der DFS-Darstellung periodischer Folgen
- 8.3 Die Fourier-Transformierte periodischer Signale
- 8.4 Abtastung der Fourier-Transformierten
- 8.5 Fourier-Darstellung endlicher Folgen: Die diskrete Fourier-Transformierte
- 8.6 Eigenschaften der diskreten Fourier-Transformierten
  - 8.6.1 Linearität
  - 8.6.2 Zirkulare Verschiebung einer Folge
  - 8.6.3 Dualität
  - 8.6.4 Symmetrieeigenschaften
  - 8.6.5 Zirkulare Faltung
  - 8.6.6 Zusammenfassung der Eigenschaften der diskreten Fourier-Transformierten
- 8.7 Lineare Faltung unter Verwendung der diskreten Fourier-Transformation
  - 8.7.1 Lineare Faltung zweier endlicher Folgen
  - 8.7.2 Zirkulare Faltung als lineare Faltung mit Aliasing
  - 8.7.3 Implementierung linearer zeitinvarianter Systeme mithilfe der DFT
- 8.8 Diskrete Cosinus-Transformation (DCT)
  - 8.8.1 Definitionen der DCT
  - 8.8.2 Definition von DCT-1 und DCT-2
  - 8.8.3 Beziehung zwischen der DFT und der DCT-1
  - 8.8.4 Beziehung zwischen der DFT und der DCT-2
  - 8.8.5 Eigenschaft der Energiekonzentration bei der DCT-2
  - 8.8.6 Anwendungen der DCT
- 8.9 Zusammenfassung
- 9 Berechnung der diskreten Fourier-Transformierten
  - 9.0 Einführung
  - 9.1 Effiziente Berechnung der diskreten Fourier-Transformierten
  - 9.2 Der Goertzel-Algorithmus
  - 9.3 FFT-Algorithmen mit Dezimation im Zeitbereich
    - 9.3.1 In-place-Berechnungen
    - 9.3.2 Alternative Formen
  - 9.4 FFT-Algorithmen mit Dezimation im Frequenzbereich
    - 9.4.1 In-place-Berechnung
    - 9.4.2 Alternative Formen
  - 9.5 Praktische Überlegungen
    - 9.5.1 Indizierung



# Inhaltsverzeichnis

9.5.2 Koeffizienten

9.5.3 Algorithmen für allgemeinere Werte von

## 9.6 Implementierung der DFT mithilfe der Faltung

9.6.1 Überblick über den Winograd-Algorithmus für die Fourier-Transformation

9.6.2 Der Chirp-Transformations-Algorithmus

## 9.7 Auswirkungen der endlichen Wortbreite der Register

## 9.8 Zusammenfassung

# 10 Fourier-Analyse von Signalen mittels der diskreten Fourier-Transformierten

## 10.0 Einführung

## 10.1 Fourier-Analyse von Signalen mittels der DFT

## 10.2 Analyse sinusförmiger Signale mittels der DFT

10.2.1 Die Auswirkung der Fensterung

10.2.2 Die Auswirkung der spektralen Abtastung

## 10.3 Die zeitabhängige Fourier- Transformation

10.3.1 Die Auswirkung des Fensters

10.3.2 Abtastung im Zeit- und Frequenzbereich

## 10.4 Blockweise Faltung mithilfe der zeitabhängigen Fourier-Transformation

## 10.5 Fourier-Analyse nichtstationärer Signale

10.5.1 Zeitabhängige Fourier-Analyse von Sprachsignalen

10.5.2 Zeitabhängige Fourier-Analyse von Radarsignalen

## 10.6 Fourier-Analyse stationärer Zufallssignale: Das Periodogramm

10.6.1 Das Periodogramm

10.6.2 Eigenschaften des Periodogramms

10.6.3 Mittelung von Periodogrammen

10.6.4 Berechnung der gemittelten Periodogramme mittels der DFT

10.6.5 Beispiel einer Analyse mittels eines Periodogramms

## 10.7 Spektralanalyse von Zufallssignalen mittels Schätzungen der Autokorrelationsfolge

10.7.1 Berechnung von Schätzungen der Korrelationsfolge und des Leistungsdichtespektrums mittels der DFT

10.7.2 Beispiel einer Schätzung des Leistungsdichtespektrums auf der Basis der Schätzung der Autokorrelationsfolge

## 10.8 Zusammenfassung

# 11 Diskrete Hilbert-Transformationen

## 11.0 Einführung

## 11.1 Real- und Imaginärteil der Fourier-Transformierten von kausalen Folgen

## 11.2 Theoreme für endliche Folgen

## 11.3 Beziehungen zwischen Amplitude und Phase

## 11.4 Hilbert-Transformation für komplexe Folgen

# Inhaltsverzeichnis

11.4.1 Entwurf von Hilbert-Transformatoren

11.4.2 Darstellung von Bandpass-Signalen

11.4.3 Abtastung von Bandpass-Signalen

11.5 Zusammenfassung

## A Zufallssignale

A.1 Zeitdiskrete Zufallsprozesse

A.2 Momente

A.2.1 Definitionen

A.2.2 Zeitmittelwerte

A.3 Eigenschaften von Korrelations- und Kovarianzfolgen

A.4 Darstellung von Zufallssignalen als Fourier-Transformierte

A.5 Berechnung der mittleren Leistung mittels der z-Transformation

## B Zeitkontinuierliche Filter

B.1 Butterworth-Tiefpassfilter

B.2 Tschebyscheff-Filter

B.3 Cauer-Filter

## C Lösungen zu ausgewählten Grundaufgaben

Kapitel 2

Kapitel 3

Kapitel 4

Kapitel 5

Kapitel 6

Kapitel 7

Kapitel 8

Kapitel 9

Kapitel 10

Kapitel 11

## Literaturverzeichnis

## Register

A

B

C

D

E

F

G

H

# Inhaltsverzeichnis

I  
K  
L  
M  
N  
O  
P  
Q  
R  
S  
T  
U  
V  
W  
Z

Ins Internet: Weitere Infos zum Buch, Downloads, etc.

Copyright



## Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als persönliche Einzelplatz-Lizenz zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschliesslich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs
- und der Veröffentlichung

bedarf der schriftlichen Genehmigung des Verlags.

Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwortschutzes ausdrücklich untersagt!

Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: [info@pearson.de](mailto:info@pearson.de)

## Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

## Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website



herunterladen