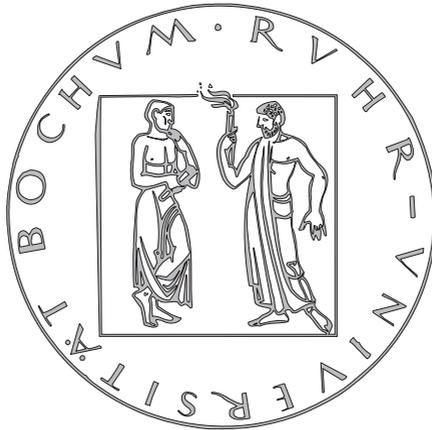


RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik



**Zum Entwurf digitaler Systeme zur
asynchronen Abstratenumsetzung**

DISSERTATION

zur
Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von
GENNARO EVANGELISTA
Roccadaspide (Salerno)
Bochum, den 25. Oktober 2000

Dissertation eingereicht:

Referent:

Koreferent:

Tag der mündlichen Prüfung:

25. Oktober 2000

Prof. Dr.-Ing. H. G. Göckler

Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Rabenstein

08. Dezember 2000

Schriftenreihe Digitale Signalverarbeitung

Band 1

Gennaro Evangelista

**Zum Entwurf digitaler Systeme zur
asynchronen Abstratenumsetzung**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Evangelista, Gennaro:

Zum Entwurf digitaler Systeme zur asynchronen Abstratenumsetzung/
Gennaro Evangelista.

Aachen : Shaker, 2001

(Schriftenreihe Digitale Signalverarbeitung ; Bd. 1)

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8429-5

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8429-5

ISSN 1617-2221

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Digitale Signalverarbeitung am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor H. G. Göckler für die jederzeit vorhandene Gesprächsbereitschaft bzgl. dieser Arbeit und weiterführenden fachlichen aber auch außerfachlichen Themen. Vor allem danke ich ihm für die offene und außergewöhnlich freundschaftlichen Atmosphäre, für die sorgfältige und kritische Durchsicht dieses Manuskripts und für seine zahlreichen Anregungen bzgl. Inhalt und Darstellung.

Für die Übernahme des Korreferats und die äußerst schnelle und gründliche Durchsicht des Manuskripts bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. habil. R. Rabenstein.

Herrn Professor H. D. Fischer möchte ich für das gute Arbeitsklima und für die freundschaftliche und faire Unterstützung der Arbeitsgruppe (und damit auch von mir) danken.

Meiner Freundin und Kollegin Frau Dipl.-Ing. Alexandra Groth danke ich besonders für die moralische Unterstützung und die ausgiebigen und anregenden Diskussionen.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls, sowie bei den zahlreichen Studien- und Diplomarbeitern, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Schließlich danke ich meinen Eltern, die mich jederzeit unterstützt haben.

Bochum, Dezember 2000

GENNARO EVANGELISTA

Inhaltsverzeichnis

Notation	v
1 Einleitung	1
1.1 Anwendungsgebiete der asynchronen Abtastratenumsetzung	2
1.2 Aufgabenstellung	3
1.3 Ziele	4
1.4 Übersicht	5
2 Ein einfaches Modell: Kaskade von DA- und AD-Umsetzung	7
2.1 Mathematische Beschreibung	7
2.2 Annahmen für das Referenz- und Eingangssignal	8
2.3 Forderungen an asynchrone Abtastratenumsetzer	9
2.4 Realisierung mit DA- und AD-Umsetzer	13
2.5 Zusammenfassung	14
3 Das erweiterte Modell: Digitaler asynchroner Abtastratenumsetzer (DAAU)	15
3.1 Mathematische Beschreibung	18
3.2 Spezifikation des DAAU	21
3.2.1 Wunschfunktionen von asynchronen Abtastratenumsetzern	21
3.2.2 Ermittlung der systembestimmenden Funktion	23
3.2.3 Spezifikation des diskreten Filters $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{T})$	25
3.2.4 Spezifikation des Interpolators $h_{\text{Int}}(t)$	27
3.2.5 Bedingungen für eine lineare Phase	28
3.3 Kriterien zur Beurteilung der Qualität	29
3.3.1 Abschätzung des L_∞ -Fehlers des Gesamtsystems durch die L_∞ -Fehler der Teilsysteme	34
3.3.2 Abschätzung des SNR_1 durch die L_2 -Fehler der Teilsysteme	37
3.4 Algorithmen zur Realisierung des DAAU	40
3.4.1 DAAU1: Direkte Gesamt-Realisierung	40
3.4.2 DAAU2: Geschlossene Realisierung nach (3.14)	42
3.4.3 Zur Realisierung des diskreten Filters $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{T})$	44
3.4.4 Zur Realisierung des Interpolators $h_{\text{Int}}(t)$	45
3.5 Aufwandsabschätzungen	48
3.5.1 Aufwand für den DAAU1	50

3.5.2	Aufwand für den DAAU2	50
3.5.3	Aufwandsvergleich	51
3.6	Auswirkungen der Abwärtstastung	53
3.7	Zusammenfassung	54
4	Entwurf des diskreten Filters $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_L}{L})$	55
4.1	Minimierung des L_∞ -Fehlers mit dem MPR-Verfahren	56
4.2	L_2 -Approximation mit spezifiziertem Übergangsbereich (L2SPLINE)	58
4.3	L_2 -Approximation mit don't-care Bereichen (L2KONT)	60
4.4	L -tel Bandfilterentwurf nach OETKEN	61
4.5	Diskrete L_2 -Approximation (L2DISK)	63
4.6	Constrained Least Square (CLS)-Entwurf	65
4.7	Zusammenfassung: Entwurfskriterien und -verfahren	68
5	Entwurf des kontinuierlichen Interpolators $h_{\text{Int}}(t)$	71
5.1	LAGRANGE-Interpolation	71
5.1.1	Mathematische Beschreibung	73
5.1.2	Frequenzgang	75
5.1.3	Randbehandlung	76
5.2	Approximation mit TSCHEBYSCHEFF- und LEGENDRE-Polynomen	78
5.3	Interpolation mit Splines	79
5.4	Weitere bekannte, zeitbereichsbezogene Approximationsverfahren	80
5.5	Approximation mittels Frequenz-Transformationen	81
5.6	Zeit- und Frequenzbereichsapproximation mit geschlossen beschriebem Polynom	83
5.6.1	Zeitbereichsapproximation mit geschlossen beschriebenem Polynom	83
5.6.2	Frequenzbereichs-Approximation mit geschlossen beschriebenem Polynom	91
5.7	Frequenzbereichs-Approximation mit abschnittsweise definiertem Polynom	92
5.7.1	Bedingungen für lineare Phase	93
5.7.2	Amplitudengang	94
5.7.3	Strategien zum Entwurf eines optimalen Interpolators	95
5.7.4	Einbringen der Interpolationsbedingung	96
5.7.5	Entwurf des Interpolators mit der CLS-Approximation: CLS-Interpolator	96
5.8	Interpolation mit Fractional Sample Delay (FSD)	99
5.9	Zusammenfassung	103

6	Verfahren zum Entwurf nichtrekursiver Filter mit quantisierten Koeffizienten	105
6.1	Direkte Quantisierung	105
6.2	Suchalgorithmen	106
6.3	Iterative Quantisierung	107
7	Übersicht und Einordnung bekannter Verfahren zur asynchronen Abstratenumsetzung	111
7.1	Vom DAAU ableitbare Systeme	112
7.1.1	Mathematische Approximationsverfahren	112
7.1.2	Hybride Systeme	112
7.2	Nicht vom DAAU ableitbare hybride Systeme	114
7.2.1	Quasi-kontinuierlicher Interpolator $h_{\text{Int}}(t)$ und Dezimator	114
7.2.2	Digitale Interpolator, quasi-kontinuierlicher Interpolator $h_{\text{Int}}(t)$ und Dezimator	115
7.3	Alternative Ansätze	116
7.3.1	Adaptive Filter	116
7.3.2	Systemidentifikation	117
7.4	Fazit	117
8	Untersuchungsergebnisse	119
8.1	Entwurf von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$ mit quantisierten Koeffizienten	119
8.1.1	Tiefpaßentwurf mit $D_{\text{Dig},1}(e^{j\omega T_1/L})$	119
8.1.2	Entwurf von L -tel Bandfiltern mit $D_{\text{Dig},2}(e^{j\omega T_1/L})$	125
8.2	Entwurf des Interpolators $h_{\text{Int}}(t)$	127
8.3	Entwurf des Gesamtsystems (DAAU)	132
8.3.1	Prüfung der Abschätzformeln zum Aufteilen des L_2 - bzw. L_∞ -Fehlers	133
8.3.2	Untersuchung für $M > 1$	134
8.3.3	Zur Wahl des Aufwärtstastfaktors L	136
8.3.4	Untersuchung verschiedener DAAU bei Variation von L	137
8.3.5	Aufwand für den DAAU bei Variation von L und konstantem L_∞ -Fehler	140
8.4	Simulation zur Verifikation der Systemeigenschaften	144
9	Zusammenfassung und Ausblick	149

A Anhang	153
A.1 Asynchrone Abstratenumsetzung komplexwertiger Signale	153
A.2 Eigenschaften der Faltung in (2.4) und (2.5)	155
A.2.1 Linearität	155
A.2.2 Assoziativität	155
A.2.3 Kommutativität	156
A.3 Abschätzungen für $\ e(t)\ _\infty$ und $\ E_{\text{aAU}}(j\omega)\ _\infty$	156
A.4 Zusammenhang zwischen den Fehlernormen nach [166]	157
A.5 Anmerkung zum DAAU2	158
A.6 Signalquantisierung	158
A.7 Steuerung bzw. Messung und Quantisierung des Zeitintervalls $\tau_\Delta[\nu]$ beim Interpolator	159
A.8 Koeffizienten $c_{\mu,\nu}$ der LAGRANGE-Interpolation	161
A.9 Berechnung des Integrals in (5.12)	162
A.10 Berechnung der Lösung (5.40) der l_2 -Approximation mit Gleichheits- anforderungen	163
A.11 Details zum Entwurf des CLS-Interpolators	164
A.12 Binärzahlendarstellung und Skalierung	165
Literaturverzeichnis	167

Notation

Symbole

β_ν	Koeffizienten der Binärardarstellung Darstellung von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$ (entspricht einem bit, 0 oder 1), S.165
$\beta_{\text{Koeff}}(\lambda T)$	zeitvariante Koeffizienten der Spline-Interpolation, S.80
$\beta_{\text{Spline}}^{-1}(\lambda T)$	diskrete Teil-Impulsantwort der Spline-Interpolation, S.79
$\delta(t)$	DIRAC-Impuls, S.7
$\delta_0(kT)$	Impulsfolge (1 für $k = 0$, sonst 0), S.74
$\Delta\nu$	gewünschte Verzögerung eines FSDs, S.99
δ^{Alt}	Fehler auf der Alternante der l_∞ -Approximation in Abschnitt 5.6.1.2, S.89
$\delta_{\text{CLS}}(e^{j\omega T_1/L})$	Fehlergrenze beim CLS-Algorithmus, S.65
$\hat{\delta}_{\text{CLS}}(j\omega)$	Fehlergrenze beim CLS-Algorithmus, S.97
δ_{CLS}	konstantes $\delta_{\text{CLS}}(\omega)$ bzw. $\delta_{\text{CLS}}(e^{j\omega T_1/L})$
$\delta_{\text{D,aAU}}$	maximaler Durchlaßbereichsfehler von $H_{m_0}(j\omega)$, S.36
$\delta_{\text{D,int}}$	maximaler Durchlaßbereichsfehler von $H_{\text{int}}(j\omega)$, S.35
$\delta_{\text{D,PP}}$	maximaler Durchlaßbereichsfehler von $H_{m_0}^{\text{PP}}(e^{j\omega MT_1/L})$, S.35
Δf	Breite des Übergangsbereichs von $H_{\text{Spline}}(j\omega)$, S.58
Δh	Abweichung von der idealen Impulsantwort (vektoriell), S.61
$\Delta h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$	Fehler durch Quantisierung von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.165
$\delta_{\text{S1,int}}$	maximaler Sperrbereichsfehler von $H_{\text{int}}(j\omega)$ im Sperrbereich von $H_{m_0}^{\text{PP}}(e^{j\omega MT_1/L})$, S.36
$\delta_{\text{S2,int}}$	maximaler Sperrbereichsfehler von $H_{\text{int}}(j\omega)$ im Durchlaßbereich von $H_{m_0}^{\text{PP}}(e^{j\omega MT_1/L})$, S.36
$\delta_{\text{S,aAU}}$	maximaler Sperrbereichsfehler von $H_{m_0}(j\omega)$, S.36
$\delta_{\text{S,PP}}$	maximaler Sperrbereichsfehler von $H_{m_0}^{\text{PP}}(e^{j\omega MT_1/L})$, S.35
Δw_i	zusätzlich innere Wortlänge bei der Signalquantisierung, S.158
$\varepsilon(\lambda \frac{T_1}{L})$	Fehler beim L -tel Bandfilterentwurf nach OETKEN, S.62
$\varepsilon_{\text{int}}(\omega)$	Durchlaßbereichsfehler von $H_{\text{int}}(j\omega)$, S.37
$\varepsilon_{\text{PP}}(\omega)$	Durchlaßbereichsfehler von $H_{m_0}^{\text{PP}}(e^{j\omega MT_1/L})$, S.37
η	Zahl der Stützwerte der Approximation $h_{\text{int}}(t)$, $(\lambda_0 + \lambda_1 + 1)$, S.46,50
$\zeta - 1$	Ordnung der Approximation $h_{\text{int}}(t)$, S.46
$\lambda_0 + 1$	Zahl der vergangenen Stützwerte der Approximation $h_{\text{int}}(t)$, S.47,73
λ_1	Zahl der zukünftigen Stützwerte der Approximation $h_{\text{int}}(t)$, S.47
$\tau_\lambda^{\text{Alt}}$	Alternante der l_∞ -Approximation in Abschnitt 5.6.1.2, S.89
Φ	Zahl der diskrete Frequenzen ω_φ bei einer diskreten L_2 -Approximation, S.63
ω	Kreisfrequenz, $2\pi f$
ω_φ	diskrete Frequenzen, an denen der diskrete L_2 -Fehler minimiert wird, S. 63

A	Additionsrate, S.48
a_μ	Koeffizienten des Polynoms für eine geschlossene Darstellung von $h_{\text{int}}(t)$, S.46
\mathbf{A}_{aAU}	Matrix der CLS-Approximation für $h_{\text{int}}(t)$, S. 97
\mathbf{a}_{GI}	Vektor der a_μ , zuständig für das Einhalten der Gleichheitsanforderungen in (5.25), S.86
$\mathbf{A}_{\text{IB,IB}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_1^{\text{IB}}, \mathbf{c}_1^{\text{IB}}$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{IB,LP}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_1^{\text{IB}}, \mathbf{c}_1^{\text{LP}}$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{IB,f}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_1^{\text{IB}}, \mathbf{c}_f$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{IB,u}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_1^{\text{IB}}, \mathbf{c}_u$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{LP,LP}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_1^{\text{LP}}, \mathbf{c}_1^{\text{LP}}$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{LP,f}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_1^{\text{LP}}, \mathbf{c}_f$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{LP,u}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_1^{\text{LP}}, \mathbf{c}_u$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{f,f}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_f, \mathbf{c}_f$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{f,u}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_f, \mathbf{c}_u$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{u,u}}$	Untermatrix von \mathbf{A}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_u, \mathbf{c}_u$, S.98
$\mathbf{A}_{\text{L,2}}$	Matrix der L_2 -Approximation für $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.60
\mathbf{A}_{Mod}	Matrix der CLS-Approximation mit Freiheitsgrad \mathbf{c}_u , S.98
\mathbf{a}_{Rest}	Vektor der a_μ , nicht enthalten in \mathbf{a}_{GI} , S.86
A_{Spline}	Amplitude von $h_{\text{Spline}}(t)$, S.58
$b_{\text{Spline}}(t)$	quasi-kontinuierliche Teil-Impulsantwort der Spline-Interpolation, S.79
\mathbb{B}_t	betrachteter Zeitbereich, S.30
\mathbb{B}_ω	betrachteter Frequenzbereich, S.30
\mathbf{c}	Vektor mit den Elementen $c_{\mu,\nu}$, S.95,97
\mathbf{C}	Matrix mit den Elementen $c_{\mu,\nu}$, S.96
\mathbb{C}	Menge der komplexen Zahlen
$c_{\mu,\nu}$	Koeffizienten der Polynome zur abschnittswise Darstellung von $h_{\text{int}}(t)$, S.47,74
$\mathbf{c}_1^{\text{IB}}, \mathbf{c}_2^{\text{IB}}$	durch Interpolationsbedingung festgelegte $c_{\mu,\nu}$, S.96,97
$\mathbf{c}_1^{\text{LP}}, \mathbf{c}_2^{\text{LP}}$	durch lineare Phase festgelegte $c_{\mu,\nu}$, S.96,97,98
\mathbf{c}_f	durch Quantisierung festgelegte $c_{\mu,\nu}$, S.96,97
c_{Max}	Maximum der $c_{\mu,\nu}$, S.127
\mathbf{c}_u	frei bestimmbar $c_{\mu,\nu}$, S.96,97
$D_{\text{aAU}}(j\omega)$	Wunschfunktion des asynchronen Abtastratenumsetzers, S.21
\mathbf{D}_{Dig}	Vektor mit den Elementen $D_{\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$, S.63
$D_{\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$	Wunschfunktion des diskreten Filters $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.25
$D_{\text{FSD}}(e^{j\omega T})$	idealer Frequenzgang eines FSDs, S.100
$h_{\text{int}}(t)$	ideales $h_{\text{int}}(t)$, S.83
$D_{\text{int}}(j\omega)$	Wunschfunktion des Interpolators $h_{\text{int}}(t)$, S.27
\mathbf{D}_{Mod}	mit \mathbf{h}_f modifiziertes \mathbf{D}_{Dig} , S.64
$d_{\text{TP}}(t)$	Impulsantwort eines idealen Tiefpasses, S.10
$D_{\text{TP}}(j\omega)$	idealer Tiefpaß, S.10
$D_{\text{ÜB}}(f)$	Funktion zur Spezifikation des Übergangsbereichs, S.26

$e(t)$	Fehler, $y(t) - x_K(t)$, S.29
$E(j\omega)$	Fehler, $Y(j\omega) - X_K(j\omega)$, S.29
$e_{\text{aAU}}(t)$	Zeitfunktion zu $E_{\text{aAU}}(j\omega)$
$E_{\text{aAU}}(j\omega)$	Fehler, $ H_{m_0}(j\omega) - D_{\text{aAU}}(j\omega)$, S.29
\mathbf{E}_{Dig}	Vektor mit den Elementen $E_{\text{Dig}}(e^{j\omega_\nu T_1/L})$, S.63
$E_{\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$	Fehler von $H_{\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$, S.56,S.60
$E_{\text{FSD}}(e^{j\omega T}, \Delta\nu)$	Fehler eines FSDs, S.100
\mathbf{e}_{Int}	Vektor mit den Elementen $e_{\text{Int}}(\tau_k)$, S.87
$e_{\text{Int}}(\tau_k)$	Fehler der l_2 - und l_∞ -Approximation, S.87
$E_{\text{Int}}(j\omega)$	Frequenzbereichs-Fehler des Interpolators: $H_{\text{Int}}(j\omega) - D_{\text{Int}}(j\omega)$
f	Frequenz
\mathbf{f}	Vektor mit den frequenzabhängigen Termen von $H_{0,\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$, S.60
\mathbf{F}	Matrix mit den Elementen $e^{-j\omega_\nu \lambda T_1/L}$, φ Zeile, λ Spalte, S.63,63
f_0	Mittenfrequenz des Übergangsbereichs von $H_{\text{Spline}}(j\omega)$, S.59
f_{A1}	Abtastfrequenz des Eingangssignals $x(t_{1k})$, S.1
f_{A2}	Abtastfrequenz des Ausgangssignals $y(t_{2n})$, S.1
\mathbf{f}_{aAU}	Vektor mit den Elementen $f_{\text{aAU}}(\omega, \mu, \nu)$, S.95
\mathbf{F}_{aAU}	Matrix mit den Zeilenvektoren $\mathbf{f}_{\text{aAU}}^T(\omega_\varphi)$, S.97
$\hat{f}_{\text{aAU}}(\omega, \mu, \nu)$	Hilfsfunktion bei der Bestimmung von $H_0(j\omega)$, S.95
\mathbf{F}_f	Untermatrix von \mathbf{F} zugehörig zu \mathbf{h}_f , S.64
\mathbf{F}_f	Untermatrix von \mathbf{F}_{aAU} zugehörig zu \mathbf{c}_f , S.98
f_G	Grenzfrequenz des Spektrums von $x_K(t)$ und $x(kT_1)$, S.10
\mathbf{F}_{IB}	Untermatrix von \mathbf{F}_{aAU} zugehörig zu \mathbf{c}_1^{IB} , S.98
\mathbf{F}_{LP}	Untermatrix von \mathbf{F}_{aAU} zugehörig zu \mathbf{c}_1^{LP} , S.98
\mathbf{F}_{Mod}	Matrix der CLS-Approximation mit Freiheitsgrad \mathbf{c}_u , S. 98
f_s	Sperrfrequenz eines Filters, S.59
\mathbf{F}_u	Untermatrix von \mathbf{F} zugehörig zu \mathbf{h}_u , S.64
\mathbf{F}_u	Untermatrix von \mathbf{F}_{aAU} zugehörig zu \mathbf{c}_u , S.98
\mathbf{G}	Diagonalmatrix mit den Elementen $G(e^{j\omega_\nu T_1/L})$, S.63
$G(e^{j\omega T_1/L})$	Funktion zur Gewichtung des Fehlers von $H_{\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$, S.56
$h_{\Delta\nu}(\nu T)$	Impulsantwort eines FSDs, S.99
$H_{\Delta\nu}(e^{j\omega T})$	Frequenzgang von $h_{\Delta\nu}(\nu)$, S.99
$h_{\text{Dez}}(\lambda \frac{T_1}{M})$	diskretes Filter vor Abwärtsstastung mit M (Anti-Aliasing-Filter), S.114
\mathbf{h}_{Dig}	Vektor mit den Elementen $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, $\lambda \in [0, \frac{N_{\text{Dig}}-1}{2}]$, S.60
$h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$	diskretes Filter nach Aufwärtsstastung mit L (Anti-Imaging-Filter), S.15
\mathbf{H}_{Dig}	Vektor mit den Elementen $H_{\text{Dig}}(e^{j\omega_\nu T_1/L})$, S.63
$H_{\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$	Frequenzgang oder Amplitudengang von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.16,S.60
$h_{\text{Dig}}^Q(\lambda \frac{T_1}{L})$	quantisierte Koeffizienten des Filters $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.165
\mathbf{h}_f	Vektor mit den bekannten (fixed) $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.64
$h_{\text{Gesamt}}(t)$	Gesamtimpulsantwort eines asynchronen Abtaststratenumsetzers ohne Abwärtsstastung, S.158

$H_{\text{Gesamt}}(j\omega)$	Fouriertransformierte von $h_{\text{Gesamt}}(t)$, S.158
h_{GI}	Vektor der Gleichheitsanforderungen, S.86
$h_{\text{Int}}(t)$	Impulsantwort der Approximation bzw. Interpolation, S.15
$H_{\text{Int}}(j\omega)$	Fouriertransformierte von $h_{\text{Int}}(t)$, S.16
h_{L2}	Vektor der L_2 -Approximation für $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.60
$H_{\text{Im}}(z_S)$	Übertragungsfunktion eines der LM Teilsysteme in einer effizienten Realisierung der synchronen Abtast ratenumsetzung, S.41
$h_{m_0}(t)$	eine von M Impulsantworten zur Beschreibung des asynchronen Abtast ratenumsetzers in Bild 3.1, S.20
$H_{m_0}(j\omega)$	Fouriertransformierte von $h_{m_0}(t)$, S.20
$H_{m_0}^{\text{wc}}(j\omega)$	$H_{m_0}(j\omega)$, das $D_{\text{aAU}}(j\omega)$ am schlechtesten approximiert, S.23
$h_{m_0}^{\text{PP}}(\lambda \frac{M}{L} T_1)$	eine der M Polyphasen-Komponenten von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.19
$H_{m_0}^{\text{PP}}(e^{j\omega M T_1/L})$	Frequenzgang von $h_{m_0}^{\text{PP}}(\lambda \frac{M}{L} T_1)$, S.20
h_{Max}	Maximum von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.165
h_{Min}	Minimum von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.165
h_{Rest}	Vektor mit den Elementen $h_{\text{Spline}}(\tau_\kappa)$, S.87
h_{Skal}	Skalierungsgröße bei der Quantisierung, S.165
$h_{\text{Spline}}(t)$	Impulsantwort eines idealen Tiefpasses mit Übergangsbereich, S.58
$H_{\text{Spline}}(j\omega)$	Fouriertransformierte von $h_{\text{Spline}}(t)$, S.59
h_{Start}	Startlösung des CLS-Algorithmus, S.66
$h_{\text{TP}}(t)$	analoger Glättungstiefpaß bei DA-Umsetzung, S.7
$H_{\text{TP}}(j\omega)$	Fouriertransformierte von $h_{\text{TP}}(t)$, S.10
h_u	Vektor mit den unbekanntenen (unknown) $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.64
$I(\omega, \mu)$	Integral bei Bestimmung von $H_{\text{Int}}(j\omega)$, S.75
$I_\eta(\omega, \mu)$	Integral bei Bestimmung von $H_{\text{Int}}(j\omega)$, S.85
kT_1	äquidistante Abtastzeitpunkte von $x(kT_1)$, S.8
k_1	Vektor zur Berechnung von \mathbf{c}_1^{LP} , S.98
$K(e^{j\omega T_1})$	Funktion zur Beschreibung des tiefpaßbegrenzten Eingangssignals mit konstantem Spektrum, S.24
L	Aufwärtstastfaktor, S.15
l_{∞} -Fehler	maximaler Zeitbereichsfehler, S.30
L_{∞} -Fehler	maximaler Frequenzbereichsfehler, S.30
l_2 -Fehler	Energie des Zeitbereichsfehlers, S.30
L_2 -Fehler	Energie des Frequenzbereichsfehlers, S.30
L_{LI}	notwendiger Aufwärtstastfaktor für $h_{\text{Int}}(t)$ als linearer Interpolator, S.136
L_{Raster}	Dichte des Approximationsrasters in Abschnitt 5.6.1.1, S.85
L_{SH}	notwendiger Aufwärtstastfaktor für $h_{\text{Int}}(t)$ als SH-Glied, S.136
m_0	ganzzahlige Variable $m_0 \in [0, M - 1]$, S.19
\mathbf{m}_{Lagr}	Vektor der Lagrange-Multiplizierer, S.66,97
m_M	ganzzahlige Variable, S.19
m_M^o	obere Grenze für m_M in (3.80), S.42
m_M^u	untere Grenze für m_M in (3.80), S.42

M	Abwärtstastfaktor, S.15
\mathbf{M}_{LP}	Matrix zur Berechnung von $\mathbf{c}_1^{\text{LP}}, \mathbf{c}_2^{\text{LP}}$, S.98
\mathbf{M}_1^{u}	Untermatrix von \mathbf{M}_{LP} , S.98
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
\mathbb{N}_0	Menge der natürlichen Zahlen mit Null
N_{Dig}	Länge von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.44
N_{Gl}	Zahl an Gleichheitsanforderungen der l_2 - und l_∞ -Approximation, S.86
N_{PP}	Länge einer Polyphasen-Komponente von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$ bei OETKEN, S.61
O	Operationsbitrate, S.49
O_{konst}	Operationsbitrate für konstante Koeffizienten, S.49
O_{zeit}	Operationsbitrate für zeitvariante Koeffizienten, S.49
p	Parameter von $h_{\text{spline}}(t)$, S.58
p_{Opt}	optimales p für minimalen l_2 -Abschneidfehler, S.85
\mathbb{Q}	Menge der rationalen Zahlen
q_{Dig}	Quantisierungsstufe von $h_{\text{Dig}}^{\text{Q}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.105
q_{sig}	Quantisierungsstufe der Signale, S.136
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathbf{R}	Vektor mit den Elementen $R(j\omega_\varphi)$, S.66
$R(j\omega_\varphi)$	Gleichheitsanforderungen beim CLS-Verfahren, S.66
\mathbf{R}_{AAU}	Vektor mit den Elementen $R_{\text{AAU}}(j\omega_\varphi)$, S.97
$R_{\text{AAU}}(j\omega_\varphi)$	Gleichheitsanforderungen an $H_{\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$ bei der CLS-Approximation, S.97
\mathbf{R}_{Mod}	Vektor der CLS-Approximation mit Freiheitsgrad \mathbf{c}_1 , S.98
$R_{\text{ob}}(e^{j\omega_\varphi T_1/L})$	obere Grenze der CLS-Approximation von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.66
$R_{\text{ob}}(j\omega_\varphi)$	obere Grenze der CLS-Approximation, S.97
$R_{\text{un}}(e^{j\omega_\varphi T_1/L})$	untere Grenze der CLS-Approximation von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.66
$R_{\text{un}}(j\omega_\varphi)$	untere Grenze der CLS-Approximation, S.97
$S_{\text{Int}, S_{\text{Dig}}}$	Konstante Faktoren in den Aufwandsbetrachtungen ($=1,2$), S.50
S_{Koeff}	Zugriffsbitrate für Koeffizientenspeicher, S.48
S_{Sig}	Anzahl an Zustandsspeichern gewichtet mit Zugriffstakt, S.48
SNR_1	Signal-Stör-Abstand, S.31
SNR_2	Signal-Stör-Abstand, S.32
t	kontinuierliche Zeit
t_0	beliebiger Zeitpunkt, S.45
$t_\Delta[n]$	Approximationszeitpunkte, S.45
t_{1k}	Abtastzeitpunkte von $x(t_{1k})$, nicht notwendigerweise äquidistant, S.7
t_{2n}	Abtastzeitpunkte von $y(t_{2n})$, nicht notwendigerweise äquidistant, S.7
T	Abtastzeit
T_η	halbe Länge von $h_{\text{Int}}(t)$, S.46
T_0	halbe Länge von $h_{\text{TP}}(t)$, S.13

T_1	Abtastzeit von $x(kT_1)$, S.3
T_2	Abtastzeit von $y(kT_2)$, S.11
$\mathbf{T}_{\text{Gl},1}$	Matrix der l_2 -Approximation in Abschnitt 5.6.1.1, S.86
$\mathbf{T}_{\text{Gl},2}$	Matrix der l_2 -Approximation in Abschnitt 5.6.1.1, S.87
T_{Max}	minimale Auflösung für $\tau_{\Delta}[\nu_0]$, S.161
$\mathbf{T}_{\text{Rest},1}$	Matrix der l_2 -Approximation in Abschnitt 5.6.1.1, S.86
$\mathbf{T}_{\text{Rest},2}$	Matrix bei der Approximation in Abschnitt 5.6.1.1, S.87
$u(\lambda \frac{M}{L} T_1)$	Ausgangssignal einer synchronen Abtastratenumsetzung mit $\frac{L}{M}$, S.15,19
$U(e^{j\omega M T_1/L})$	Frequenzgang von $u(\lambda \frac{M}{L} T_1)$, S.16
\mathbf{v}_{aAU}	Vektor der CLS-Approximation eines Interpolators $h_{\text{Int}}(t)$, S.97
\mathbf{v}_{f}	Teilvektor von \mathbf{v}_{aAU} zugehörig zu \mathbf{c}_{f} , S.98
\mathbf{v}_{1B}	Teilvektor von \mathbf{v}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_{\text{1B}}^{\text{1B}}$, S.98
\mathbf{v}_{LP}	Teilvektor von \mathbf{v}_{aAU} zugehörig zu $\mathbf{c}_{\text{LP}}^{\text{LP}}$, S.98
\mathbf{v}_{Mod}	Vektor der CLS-Approximation mit Freiheitsgrad \mathbf{c}_{u} , S. 98
\mathbf{v}_{u}	Teilvektor von \mathbf{v}_{aAU} zugehörig zu \mathbf{c}_{u} , S.98
w_{Dig}	Wortlänge der Koeffizienten von $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.48
w_{Int}	Wortlänge der Koeffizienten von $h_{\text{Int}}(t)$, S.48
w_{Sig}	Wortlänge der Signale, S.136
$x(t_{1k}), x(kT_1)$	Eingangssignal der asynchronen Abtastratenumsetzung, S.3,7
$X(e^{j\omega T_1})$	Frequenzgang von $x(kT_1)$, S.10
X_0	Frequenzbereichsamplitude des tieffpaßbegrenzten Eingangssignals mit konstantem Spektrum, S.23
$x_{\text{Auf}}(\lambda \frac{T_1}{L})$	mit L aufwärtsgetastetes Signal, S.15
$X_{\text{Auf}}(e^{j\omega T_1/L})$	Frequenzgang von $x_{\text{Auf}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.16
$x_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$	Signal nach Filterung mit $h_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.15
$X_{\text{Dig}}(e^{j\omega T_1/L})$	Frequenzgang von $x_{\text{Dig}}(\lambda \frac{T_1}{L})$, S.16
$x_{\text{Ein}}(\nu T)$	Eingangssignal einer Approximation bzw. Interpolation, S.45,47
$x_{\text{Ein}}(t)$	Referenz-Signal einer Approximation bzw. Interpolation
$X_{\text{Ein}}(e^{j\omega T})$	Fouriertransformierte von $x_{\text{Ein}}(kT)$, S.75
$x_{\text{K}}(t)$	zeitkontinuierliches Referenz-Signal, S.3
$X_{\text{K}}(j\omega)$	Fouriertransformierte von $x_{\text{K}}(t)$, S.10
$x_{m_0}(m_M M T_1)$	eine der M Polyphasen-Komponenten von $x(kT_1)$, S.19
$X_{m_0}(e^{j\omega M T_1})$	Frequenzgang von $x_{m_0}(m_M M T_1)$, S.20
$x_{\text{Oetken}}(\omega)$	Amplitude des Testsignals beim L -tel Bandfilterentwurf nach OETKEN, S.62
$x_{\text{Puls}}(t)$	pulsgeformtes Signal, S.7
$X_{\text{Puls}}(j\omega)$	Fouriertransformierte von $x_{\text{Puls}}(t)$, S.11
$y(t)$	(quasi-)kontinuierliches Ausgangssignal der asynchronen Abtastratenumsetzung, S.7
$Y(j\omega)$	Fouriertransformierte von $y(t)$, S.10
$y(t_{2n}), y(nT_2)$	Ausgangssignal der asynchronen Abtastratenumsetzung, S.3
$Y(e^{j\omega T_2})$	Fouriertransformierte von $y(nT_2)$, S.10
$y_{\text{Aus}}(t)$	Ausgangssignal einer Approximation bzw. Interpolation, S.45,47

$Y_{\text{Aus}}(j\omega)$	Fouriertransformierte von $y_{\text{Aus}}(t)$, S.75
$y_{\text{FSD}}(\nu T)$	Ausgangssignal eines FSDs, S.99
$y_{\text{Korr}}(t_{2n})$	durch adaptives Filter bzw. IIR-Filter korrigiertes Ausgangssignal der asynchronen Abtastenumsetzung, S.116,117
$y_{m_a}(t)$	Teilergebnis des DAAU2, S.42
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen
z	Variable der z -Transformation
Z_{Int}	Zahl der Interpolationen bei der Aufwandsbetrachtung, S.51

Operatoren und Funktionen

\otimes	Faltungsoperator zwischen kontinuierlichem und diskretem Signal bzw. zwischen zwei diskreten Signalen verschiedener Abtastfrequenz, S.8,8
$\lfloor a \rfloor$	nächstkleinere ganze Zahl zu a
$\lceil a \rceil$	nächstgrößere ganze Zahl zu a
$\text{Rd}\{\}$	Rundungsoperator der Quantisierung, S.105
$\text{Im}\{a\}$	Imaginärteil von a
$\text{Re}\{a\}$	Realteil von a
$\text{sgn}(x)$	Signum-Funktion
$\text{si}(t)$	si-Funktion, $\frac{\sin(t)}{t}$

Abkürzungen

AD	Analog-Digital
AQ	Abgleich-Quantisierung, S.107
CLS	Constrained Least Square
CSD	Canonical Signed Digit
DA	Digital-Analog
DAAD	Kaskade von DA- und AD-Umsetzung, S.7
DAAU	Digitale asynchrone Abtastenumsetzer, S.15
DAAU1	Realisierung des DAAU wie in Abschnitt 3.4.1
DAAU2	Realisierung des DAAU wie in Abschnitt 3.4.2
DB	Durchlaßbereich eines Filters
DQ	Direkte Quantisierung, S.105
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DTFT	Discrete Time Fourier-Transformation, S.10
FIR	Finite Impulse Response
FKA	Festkomma-Arithmetik
FSD	Fractional Sample Delay
GKA	Gleitkomma-Arithmetik
IB	Interpolationsbedingung
IIR	Infinite Impulse Response

IQ	Iterative Quantisierung, S.107
MPR	McClellan-Parks-Rabiner-Programm, S.56
RLS	Recursive Least Squares, S.116
SB	Sperrbereich eines Filters
SH	Sample/Hold
SNR	Signal-to-Noise-Ratio, Signal-Rausch-Abstand, S.31
wc	worst-case