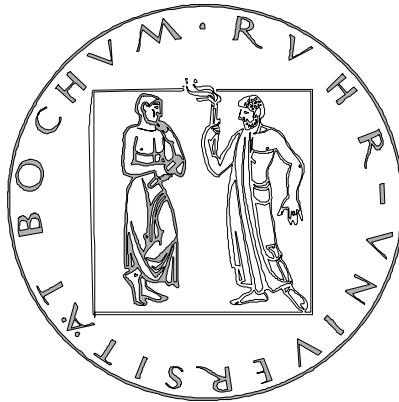


RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik



Breitbandige Analog/Digital-Schnittstellen
Systemanalyse und Beiträge zur digitalen Fehlerkompensation

DISSERTATION

zur
Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von
HEIKO KOPMANN
Bassum

Bochum, 24. November 2004

Dissertation eingereicht:
Referent:
Korreferent:
Tag der mündlichen Prüfung:

24. November 2004
Prof. Dr.-Ing. H. G. Göckler
Prof. Dr.-Ing. U. Langmann
22. April 2005

Schriftenreihe Digitale Signalverarbeitung

Band 4

Heiko Kopmann

Breitbandige Analog/Digital-Schnittstellen

Systemanalyse und Beiträge
zur digitalen Fehlerkompensation

Shaker Verlag
Aachen 2005

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.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4207-4

ISSN 1617-2221

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 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 im Lehr- und Forschungsbereich Kommunikationstechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben eine Vielzahl von Personen beigetragen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Heinz G. Göckler für die interessante und praxisorientierte Aufgabenstellung, die Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit, sowie für wertvolle Hinweise bei der Abfassung dieser Niederschrift. Vor allem danke ich ihm jedoch für die offene und außergewöhnlich freundschaftliche Atmosphäre sowie die ständige Diskussionsbereitschaft bzgl. fachlicher als auch außerfachlicher Themen.

Für die Übernahme des Korreferats, der damit verbundenen Mühen und dem meiner Arbeit entgegengebrachtem großen Interesse danke ich Herrn Professor Ulrich Langmann.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinem Kollegen Herrn Mohammed Abdulazim für die zahlreichen Diskussionen, sowie bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehr- und Forschungsbereichs Kommunikationstechnik für das angenehme Arbeitsklima.

Zu guter Letzt möchte ich mich herzlichst bei meiner Familie bedanken, die mich mit sehr viel Geduld seelisch unterstützt hat.

Bochum, April 2005

HEIKO KOPMANN

Inhaltsverzeichnis

Notation	v
1 Einleitung	1
2 Modellierung des Jitters	5
2.1 Aperturzeitjitter	5
2.2 Taktjitter	6
2.2.1 Grundlagen des Phasenrauschens	7
2.2.2 Phasenrauschmodelle	12
2.2.3 Zusammenhang zwischen Taktjitter und Phasenrauschen . . .	17
2.2.4 Taktjitteränderung eines Phasenrauschmodells	19
2.2.5 Stand der Technik	22
2.2.6 Beispiel	25
3 Breitbandige A/D-Umsetzer	29
3.1 Fehlermodell	29
3.2 Aussteuerung	29
3.3 Fehleranalyse	35
3.4 Auswertung	40
3.4.1 Allgemeine Diskussion und Interpretation	40
3.4.2 Jitter	41
3.5 Stand der Technik	44
3.6 Beispiel	54
4 Breitbandige A/D-Schnittstellen	59
4.1 Parallele A/D-Schnittstelle mit Scharmittelung	59
4.2 Zeitmultiplex-A/D-Schnittstelle	60
4.3 Hybrid-A/D-Schnittstelle	61
4.3.1 Fehlermodell	61
4.3.2 Fehleranalyse	62
4.3.3 Auswertung	71
4.3.4 Beispiel	77

5	Breitbandige Direktüberlagerungsempfänger	85
5.1	Idealer Direktüberlagerungsempfänger	86
5.2	Fehlermodell	87
5.3	Fehleranalyse	91
5.4	Auswertung	105
5.4.1	Allgemeine Diskussion und Interpretation	105
5.4.2	Spiegelspektrum	106
5.5	Beispiele	113
5.5.1	Beispiel 1	113
5.5.2	Beispiel 2	117
6	Digitale Fehlerkompensation	123
6.1	Kompensation der Gleichanteile bzw. DC-Offsets	124
6.1.1	Hybrid-A/D-Schnittstelle	125
6.1.2	Direktüberlagerungsempfänger	129
6.1.3	Aspekte der effizienten Mittelwertbildung	132
6.2	Kompensation der Verstärkungsunterschiede	137
6.2.1	Hybrid-A/D-Schnittstelle	139
6.2.2	Direktüberlagerungsempfänger	142
6.3	Kompensation des Phasenfehlers	146
6.4	Kompensation der Laufzeitdifferenzen	156
6.4.1	Zeitmultiplex-A/D-Schnittstelle	157
6.4.2	Direktüberlagerungsempfänger	164
6.5	Zusammenschaltung der Kompensationsverfahren	167
6.6	Simulationsbeispiele	168
6.6.1	Zeitmultiplex-A/D-Schnittstelle	170
6.6.2	Direktüberlagerungsempfänger	173
7	Zusammenfassung und Ausblick	183
A	VCO- und ADC-Übersicht	187
B	Stochastische Quantisierungstheorie	197
B.1	Amplitudenverteilung	197
B.2	Korrelation mit dem Eingangssignal	201
B.3	Spektrum	203
C	Betrachtungen zum Erwartungswert des SNDR	209

D Leistungen zur SNDR-Bestimmung einer H-ADI	211
D.1 Nutzleistung	211
D.2 Störleistung	213
D.2.1 Eingangsrauschen	213
D.2.2 Aliasing	214
D.2.3 DC-Offsets	216
D.2.4 Jitter	217
D.2.5 Quantisierung und Sättigung	221
E Entstehung eines Spiegelspektrums beim DCR	223
E.1 Verstärkungsfehler	224
E.2 Phasenfehler	224
E.3 Laufzeitfehler	225
E.4 Kombination	225
F Leistungen zur SNDR-Bestimmung eines DCR	227
F.1 Nutzleistung	227
F.2 Störleistung	228
F.2.1 Eingangsrauschen	228
F.2.2 Spiegelspektrum	228
F.2.3 Jitter	229
F.2.4 Gleichanteil	232
F.2.5 Quantisierung und Sättigung	232
Literaturverzeichnis	233

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AAF	Anti-Aliasing Filter, S. 85
ACF	Autokorrelationsfunktion (engl.: <i>autocorrelation function</i>), S. 7
A/D	Analog/Digital, (engl.: <i>analogue-to-digital</i>), S. 5
ADC	A/D-Umsetzer (engl.: <i>A-to-D converter</i>), S. 5
ADI	A/D-Schnittstelle (engl.: <i>A-to-D interface</i>), S. 58
AGC	Regelkreis zur Stabilisierung des Signalpegels (engl.: <i>automatic gain control</i>), S. 149
BP	Bandpass, S. 42
CCF	Kreuzkorrelationsfunktion (engl.: <i>cross-correlation function</i>), S. 64
CIC	Kaskade aus einem Integrator und einem Kamm(filter) (engl.: <i>cascaded-integrator-comb (filter)</i>), S. 135
DCR	Direktüberlagerungsempfänger (engl.: <i>direct conversion receiver</i>), S. 85
DFT	diskrete FOURIER-Transformation (engl.: <i>discrete FOURIER transform</i>), S. 66
DTFT	zeitdiskrete FOURIER-Transformation (engl.: <i>discrete-time FOURIER transform</i>), S. 198
DSB	Zweiseitenband (engl.: <i>double sideband</i>), S. 6
ENOB	effektive Wortlänge (engl.: <i>effective number of bits</i>), S. 46
ERBW	effektive Auflösungsbandbreite (engl.: <i>effective resolution bandwidth</i>), S. 46
FD	Fractional Delay, S. 156
FDM	Frequenzmultiplex (engl.: <i>frequency division multiplex</i>), S. 37
FIR	endliche Impulsantwort (engl.: <i>finite impulse response</i>), S. 134
GS/s	Giga Samples pro Sekunde, S. 45
H-ADI	Hybrid-ADI, S. 58
HF	Hochfrequenz, S. 87
I	Inphase, S. 85
ISI	Intersymbol-Interferenz, S. 169
LO	Lokal-Oszillator, S. 85
LSB	niederwertigstes Bit (engl.: <i>least significant bit</i>), S. 48
MC-ADI	parallele A/D-Schnittstelle mit Scharmittelung (engl.: <i>multiple concurrent A-to-D interface</i>), S. 59
PDF	Dichte, Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (engl.: <i>probability density function</i>), S. 8

PLL	Phasenregelschleife (engl.: <i>phase locked loop</i>), S. 13
PSD	Leistungsdichtespektrum (engl.: <i>power spectral density</i>), S. 6
PSK	Phasenumtastung (engl.: <i>phase shift keying</i>), S. 157
ppm	ein Teil von einer Million (engl.: <i>parts per million</i>), S. 200
Q	Quadratur, S. 85
QAM	Quadratur-Amplitudenmodulation, S. 157
QPSK	quaternäre Phasenumtastung (engl.: <i>quadrature phase shift keying</i>), S. 157
S&H	Abtasten & Halten (engl.: <i>sample & hold</i>), S. 5
SER	Symbolfehlerrate (engl.: <i>symbol error rate</i>), S. 165
SNDR	Signal-Stör-Verhältnis (engl.: <i>signal-to-noise and distortion ratio</i>), S. 30
SSB	Einseitenband (engl.: <i>single sideband</i>), S. 6
TI-ADI	Zeitmultiplex-A/D-Schnittstelle (engl.: <i>time-interleaved A-to-D interface</i>), S. 60
TP	Tiefpass, S. 6
VCO	spannungsgesteuerter Oszillator (engl.: <i>voltage controlled oscillator</i>), S. 23
ZF	Zwischenfrequenz, S. 85

Operatoren und Funktionen

$\star$	elementweise Multiplikation zweier Vektoren, S. 170
$*$	Faltungsoperator, S. 37
$(a)_b$	a modulo b , S. 61
$\lfloor x \rfloor$	größte ganze Zahl kleiner oder gleich x , S. 216
$\lceil x \rceil$	kleinste ganze Zahl größer oder gleich x , S. 216
$ \bullet $	Betrag, S. 5
$\bar{x}$	Mittelwert von x , S. 21
$\underline{x}^* = x_r - j x_i$	Konjugation der komplexen Größe $\underline{x} = x_r + j x_i$, S. 7
$\dot{x}(t) = dx(t)/dt$	Ableitung der Funktion $x(t)$ nach t , S. 35
$\hat{x}$	Schätzer von x , S. 125
$\mathbf{1}$	Vektor, deren sämtliche Koordinaten 1 sind, S. 170
$\delta(k)$	Einheitsimpuls, S. 198
$\delta(t)$	DIRAC-Impuls, S. 9
$\arg\{\bullet\}$	Argument bzw. Winkel, S. 11
$D_X(s)$	charakteristische Funktion von X , S. 8
$E_t\{\bullet\}$	Erwartungswert bezüglich des Parameters t , S. 5
$\operatorname{erf}(x)$	Fehlerfunktion, S. 30
$\operatorname{Im}\{\bullet\}$	Imaginärteil, S. 92
$\operatorname{Re}\{\bullet\}$	Realteil, S. 86
$\operatorname{rect}(x)$	Rechteckfunktion, S. 6

$\text{Si}(x)$	Integralsinus, S. 27
$\text{si}(x) = \sin(x)/x$	si-Funktion, S. 27
$\text{sgn}(x)$	Signumfunktion, S. 20
$u(t)$	Einheitssprungfunktion (engl.: <i>unit step function</i>), S. 20
$\text{Var}_t \{\bullet\}$	Varianz bezüglich des Parameters t , S. 126

Symbole

α	Drehwinkel bei der Phasenkompensation, S. 148
β_o	Parameter zur Bildung des Gleichanteils- bzw. DC-Offsetschätzers, S. 133
$\Delta\phi_s^{\text{Clk}}(t, \Delta t)$	Änderung des Phasenrauschens bzw. akkumuliertes Phasenrauschen (engl.: <i>accumulated phase noise</i>) im Zeitinkrement Δt , S. 8
$\Delta\tau_s(t, \Delta t)$	Änderung des Jitters bzw. akkumulierter Jitter (engl.: <i>accumulated jitter</i>) im Zeitinkrement Δt , S. 19
$\Delta\tau_{d,m}$	Differenz zwischen den Aperturzeiten im m -ten und nullten Zweig, S. 158
$\Delta g = g - 1$	Verstärkungsfehler, S. 29
Δt	kontinuierliches Zeitinkrement, S. 7
λ_o	Parameter zur Bildung des Gleichanteils- bzw. DC-Offsetschätzers mittels eines rekursiven Filters erster Ordnung, S. 136
μ_X	Erwartungswert von X , S. 5
$\Omega = \omega T$	normierte Kreisfrequenz, S. 6
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz, S. 6
$\omega_B = 2\pi B$	Kreisbandbreite, S. 42
ϕ_τ	Phasendrehung, die durch den Laufzeitfehler verursacht wird, S. 164
$\phi_{s,n}^{\text{Clk}}(t)$	Phasenrauschen des Taktgenerators, S. 8
$\phi_{\text{sin}}^{\text{Clk}}(t)$	sinusförmige Störer beim Phasenrauschmodell, S. 16
$\varphi_e(t)$	Phase, S. 25
$\varphi'_e(t)$	modifizierte Phase, S. 91
φ_E	Phasenfehler, S. 89
φ_i	Phase des i -ten Sinusstörers, S. 16
$\varphi_{O,i}$	Phasenfehler durch die Zuleitung vom Oszillator zum Mischer des I-Pfades, S. 87
$\varphi_{O,q}$	Phasenfehler des Phasenschiebers (inkl. Laufzeit für die Zuleitung vom Oszillator und zum Mischer), S. 87
$\varphi_{OS,i}$	Phase des Übersprechens vom LO-Signal auf den HF-Eingang des Mixers im I-Pfad, S. 89
$\varphi_{OS,q}$	Phase des Übersprechens vom LO-Signal auf den HF-Eingang des Mixers im Q-Pfad, S. 89

$\varphi'_{\text{OS},i}$	modifizierte Phase des Übersprechens vom LO-Signal auf den HF-Eingang des Mischers im I-Pfad, S. 91
$\varphi'_{\text{OS},q}$	modifizierte Phase des Übersprechens vom LO-Signal auf den HF-Eingang des Mischers im Q-Pfad, S. 91
$\varphi_{\text{S},i}$	Phasenfehler des HF-Verzweigers für den I-Pfad (inkl. Laufzeit für die Zuleitung zum Mischer), S. 87
$\varphi_{\text{S},q}$	Phasenfehler des HF-Verzweigers für den Q-Pfad (inkl. Laufzeit für die Zuleitung zum Mischer), S. 87
$\varphi_{\text{SO},i}$	Phase des Übersprechens vom HF-Signal auf den LO-Eingang des Mischers im I-Pfad, S. 89
$\varphi_{\text{SO},q}$	Phase des Übersprechens vom HF-Signal auf den LO-Eingang des Mischers im Q-Pfad, S. 89
ρ	Korrelation bzw. Korrelationskoeffizient, S. 68
$\rho_{\tau_{\text{s},\text{MC}}}^{\text{Clk}}$	Korrelation zwischen den Taktjittern der MC-Zweige, S. 67
$\rho_{\tau_{\text{s},\text{TI}}}^{\text{Clk}}$	Korrelation zwischen den Taktjittern der TI-Zweige, S. 67
$\sigma'_{\tau_{\text{d}}}$	Standardabweichung der Differenz zweier Aperturzeiten $\tau_{\text{d},m}$ und $\tau_{\text{d},r}$, S. 212
σ_X	Standardabweichung von X , S. 5
σ_X^2	Varianz von X , S. 6
$\sigma_{\Delta X}^2(\Delta t)$	Varianz der Änderung von X im Zeitinkrement Δt , S. 8
ϑ	Temperatur in Kelvin, S. 12
τ	Gruppenlaufzeit, S. 29
τ'	auf die Abtastperiode T normierte Gruppenlaufzeit, S. 158
$\tau_m(t)$	zeitabhängige Laufzeit des m -ten ADC, S. 29
$\tau_{\text{d},m}$	Aperturzeit des m -ten ADC, S. 5
$\tau_{\text{s},m}(t)$	Schwankung des Abtastzeitpunktes (Jitter) des m -ten ADC, S. 5
$\tau_{\text{s}}^{\text{ADC}}(t)$	Aperturzeitjitter, S. 5
$\tau_{\text{s}}^{\text{Clk}}(t)$	Taktjitter, S. 15
$\tau_{\text{sin}}^{\text{Clk}}(t)$	sinusförmiger Taktjitter, S. 25
$\tau_{\text{F},i}$	Laufzeit des Filters im I-Pfad, S. 89
$\tau_{\text{F},q}$	Laufzeit des Filters im Q-Pfad, S. 89
$\tau_{\text{C},i}(t)$	zeitabhängige Laufzeit des ADC im I-Pfad, S. 89
$\tau_{\text{C},q}(t)$	zeitabhängige Laufzeit des ADC im Q-Pfad, S. 89
$\tau_{\text{d},\text{C},i}$	Aperturzeit des ADC im I-Pfad, S. 89
$\tau_{\text{d},\text{C},q}$	Aperturzeit des ADC im Q-Pfad, S. 89
$\tau_{\text{s},i}(t)$	Schwankung des Abtastzeitpunktes (Jitter) des ADC im I-Pfad, S. 89
$\tau_{\text{s},q}(t)$	Schwankung des Abtastzeitpunktes (Jitter) des ADC im Q-Pfad, S. 89
τ_{i}	deterministischer Anteil der Laufzeit im I-Pfad, S. 89

τ_q	deterministischer Anteil der Laufzeit im Q-Pfad, S. 89
τ_E	Differenz zwischen den deterministischen Anteilen der Laufzeiten im Q- und I-Pfad, S. 89
$A_c(t)$	Amplitude, S. 25
$A'_c(t)$	modifizierte Amplitude, S. 91
A_i	Amplitude des i -ten Sinusstörers, S. 16
a	Anzahl der ADC einer MC-ADI, S. 59
B_φ	Zahl der Beobachtungen zur Bildung des Phasenschätzers, S. 155
B_τ	Zahl der Beobachtungen zur Bildung des Laufzeitschätzers, S. 158
B_c	Bandbreite des c -ten Kanals, S. 24
B_{eff}	effektive Auflösungsbandbreite (ERBW), S. 46
B_g	Zahl der Beobachtungen zur Bildung des Verstärkungsschätzers, S. 138
B_o	Zahl der Beobachtungen zur Bildung des Gleichanteils- bzw. DC-Offsetschätzers, S. 125
b	Anzahl der ADC einer TI-ADI, S. 60
C	Anzahl der Kanäle, S. 54
$C_{\text{OS},i}$	Gleichanteil durch Übersprechen des LO-Signals auf den HF-Eingang des Mischers im I-Pfad, S. 92
$C_{\text{OS},q}$	Gleichanteil durch Übersprechen des LO-Signals auf den HF-Eingang des Mischers im Q-Pfad, S. 93
$C_{\text{SO},i}$	Multiplikator von $ y'_{\text{id}}(t) ^2$ durch Übersprechen des HF-Signals auf den LO-Eingang des Mischers im I-Pfad, S. 93
$C_{\text{SO},q}$	Multiplikator von $ y'_{\text{id}}(t) ^2$ durch Übersprechen des HF-Signals auf den LO-Eingang des Mischers im Q-Pfad, S. 93
$c_{\text{OS},i}$	Betrag des Übersprechens des LO-Signals auf den HF-Eingang des Mischers im I-Pfad, S. 89
$c_{\text{OS},q}$	Betrag des Übersprechens des LO-Signals auf den HF-Eingang des Mischers im Q-Pfad, S. 89
$c'_{\text{OS},i}$	modifizierter Betrag des Übersprechens des LO-Signals auf den HF-Eingang des Mischers im I-Pfad, S. 91
$c'_{\text{OS},q}$	modifizierter Betrag des Übersprechens des LO-Signals auf den HF-Eingang des Mischers im Q-Pfad, S. 91
$c_{\text{SO},i}$	Betrag des Übersprechens des HF-Signals auf den LO-Eingang des Mischers im I-Pfad, S. 89
$c_{\text{SO},q}$	Betrag des Übersprechens des HF-Signals auf den LO-Eingang des Mischers im Q-Pfad, S. 89
$c'_{\text{SO},i}$	modifizierter Betrag des Übersprechens des HF-Signals auf den LO-Eingang des Mischers im I-Pfad, S. 91

$c'_{\text{SO},q}$	modifizierter Betrag des Übersprechens des HF-Signals auf den LO-Eingang des Mischers im Q-Pfad, S. 91
$c_{xx}(\Delta t)$	Kovarianzfunktion von x , S. 204
$D(n)$	Verzerrungsfunktion durch Verstärkungen, Aperturzeiten, etc., S. 65
$\underline{D}_i$	Verzerrungsfunktion durch die Wechselwirkung des bidirektionalen Übersprechens an den Mischereingängen im I-Pfad, S. 92
$\underline{D}_q$	Verzerrungsfunktion durch Phasenfehler und die Wechselwirkung des bidirektionalen Übersprechens an den Mischereingängen im Q-Pfad, S. 92
D_κ^Q	FOURIER-Koeffizienten von $d_{eQ}^1(x)$, S. 198
$d_{eQ}^1(x)$	PDF des Quantisierungsfehlers im Intervall $[-q/2, q/2]$, S. 197
$d_X(x)$	Dichte, Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF), S. 8
E_Q	Quantisierungsenergie, S. 47
$e_m(t_k)$	Nichtlinearitätsfehler (Quantisierung und Sättigung) des m -ten ADC, S. 35
$e_i(t_k)$	Nichtlinearitätsfehler des ADC im I-Pfad, S. 89
$e_q(t_k)$	Nichtlinearitätsfehler des ADC im Q-Pfad, S. 89
$e_c(t_k)$	Sättigungsfehler (engl.: <i>clipping error</i> , <i>saturation error</i>), S. 29
$e_Q(t_k)$	Quantisierungsfehler (engl.: <i>quantisation error</i>), S. 29
F	schaltungsinterner Rauschfaktor, S. 12
f	Frequenz, S. 5
$f_{C,c}$	Mittenfrequenz (engl.: <i>centre frequency</i>) des c -ten Kanals, S. 23
$f'_{C,c}$	modifizierte Mittenfrequenz des c -ten Kanals, S. 227
$f_e(t)$	gerader (engl.: <i>even</i>) Teil von $f(t)$, S. 19
f_F	Eckfrequenz des $1/f$ -Rauschens (Funkelrauschen), S. 13
f_g	Grenzfrequenz, S. 44
f_i	Frequenz des i -ten Sinusstörers, S. 16
$f_{i,c}$	untere (engl.: <i>lower</i>) Grenzfrequenz des c -ten Kanals, S. 23
f_M	Messbandbreite, S. 13
$f_O(t)$	Oszillatorfrequenz, S. 86
$f_o(t)$	ungerader (engl.: <i>odd</i>) Teil von $f(t)$, S. 19
f_{PLL}	Schleifenbandbreite der PLL, S. 13
f_Q	Resonatoreckfrequenz, S. 12
$f_S = 1/T$	Abtastfrequenz (engl.: <i>sampling frequency</i>), Abtastrate = $1/\text{Abtastperiode}$, S. 5
$f_{\text{Sig,max}}$	maximale Signalfrequenz, S. 17
f_T	Transitfrequenz, S. 51

$f_{u,c}$	obere (engl.: <i>upper</i>) Grenzfrequenz des c -ten Kanals, S. 23
$G(p_{f,m})$	äquivalente Verstärkung des m -ten ADC, S. 29
$G(p_{f,i})$	äquivalente Verstärkung des ADC im I-Pfad, S. 89
$G(p_{f,q})$	äquivalente Verstärkung des ADC im Q-Pfad, S. 89
$\underline{g}_n^{\text{Clk}}(t)$	Rauschen des Taktsignals, S. 7
g_m	zeitunabhängige Verstärkung des m -ten ADC, S. 29
$g_{C,i}$	Verstärkung des ADC im I-Pfad, S. 87
$g_{C,q}$	Verstärkung des ADC im Q-Pfad, S. 87
$g_{F,i}$	Verstärkung des Filters im I-Pfad, S. 87
$g_{F,q}$	Verstärkung des Filters im Q-Pfad, S. 87
$g_{M,i}$	Verstärkung des Mischers im I-Pfad, S. 87
$g_{M,q}$	Verstärkung des Mischers im Q-Pfad, S. 87
$g_{S,i}$	Verstärkung des HF-Verzweigers für den I-Pfad, S. 87
$g_{S,q}$	Verstärkung des HF-Verzweigers für den Q-Pfad, S. 87
g_i	Verstärkung im I-Pfad, S. 89
g_q	Verstärkung im Q-Pfad, S. 89
g_E	Verhältnis der Verstärkung im Q-Pfad zur Verstärkung im I-Pfad, S. 89
$H(z)$	Übertragungsfunktion eines digitalen Systems, S. 133
$H_0(e^{j\Omega})$	Amplitudengang eines digitalen Systems, S. 128
$h_0(t)$	nullphasige, nichtkausale Impulsantwort, S. 169
I	Anzahl sinusförmiger Störer, S. 16
$I_{A,c}$	Bei der Berechnung der Störleistung durch Aliasing auftretendes Integral, S. 214
I_{JC}^{ADC}	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Aperturzeitjitter vorkommendes Integral, S. 217
I_{JC}^{Clk}	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Taktjitter vorkommendes Integral, S. 218
I_J	Bei der Berechnung der Störleistung durch Jitter auftretendes Integral, S. 218
I_J^{ADC}	Bei der Berechnung der Störleistung durch Aperturzeitjitter auftretendes Integral, S. 218
I_J^{Clk}	Bei der Berechnung der Störleistung durch Taktjitter auftretendes Integral, S. 218
j	imaginäre Einheit, S. 6
$\mathbf{K}$	Kovarianzmatrix, S. 204
K	Konstante, S. 25
k	BOLTZMANN-Konstante, S. 12
$\hat{k}_\varphi$	Kehrwert des Verstärkungsschätzers zur Phasenkompensation, S. 149
$k_{\tau,m}$	Hilfsgröße zur Laufzeitkompensation, S. 158
$\hat{k}_g$	Kehrwert des Verstärkungsschätzers, S. 139

$\hat{k}'_g$	Kehrwert des modifizierten Verstärkungsschätzers, S. 142
$\hat{k}_g^S$	Summe der Signalbeträge zur Bildung des Verstärkungsschätzers, S. 139
$\check{L}(\omega)$	Maß für das Phasenrauschen, S. 10
M	Anzahl der ADC einer H-ADI, S. 58
N_0	Rauschleistungsdichte, S. 12
N_0^{Clk}	Rauschleistungsdichte für Frequenzablagen kleiner als f_{PLL} , S. 13
N_0^{B}	Grundrauschleistungsdichte, S. 12
N_0^{X}	Spektrale Leistungsdichte des Eingangssignals, S. 42
$N_0^{\text{XS},c}$	Spektrale Leistungsdichte des Nutzanteils des Eingangssignals im c -ten Kanal, S. 211
N_0^{XN}	Spektrale Leistungsdichte des Rauschanteils des Eingangssignals, S. 211
n	Ordnung bzw. Grad, S. 159
$O(n)$	Störfunktion durch DC-Offsets, S. 67
$\underline{o}$	komplexer DC-Offset, S. 129
o_m	DC-Offset des m -ten ADC, S. 29
o_i	DC-Offset im I-Pfad, S. 91
o_q	DC-Offset im Q-Pfad, S. 91
o'_i	Gleichanteil der I-Komponente am Ausgang, S. 129
o'_q	Gleichanteil der Q-Komponente am Ausgang, S. 129
$o_{\text{C},i}$	DC-Offset des ADC im I-Pfad, S. 89
$o_{\text{C},q}$	DC-Offset des ADC im Q-Pfad, S. 89
$o_{\text{M},i}$	DC-Offset des Mischers im I-Pfad, S. 89
$o_{\text{M},q}$	DC-Offset des Mischers im Q-Pfad, S. 89
P	Leistung, S. 31
$P_{\text{A},c}$	Störleistung durch Aliasing im c -ten Kanal, S. 213
$P_{\text{C},c}$	Störleistung durch Sättigung im c -ten Kanal, S. 31
$P_{\text{L},c}$	Spiegelspektralleistung im c -ten Kanal, S. 228
$P_{\text{L},c}^{\text{N}}$	Spiegelspektralleistung am Ausgang hervorgerufen durch den Störanteil des Eingangssignals im c -ten Kanal, S. 228
$P_{\text{L},c}^{\text{S}}$	Spiegelspektralleistung am Ausgang hervorgerufen durch den Nutzanteil des Eingangssignals im c -ten Kanal, S. 107
$P'_{\text{id},c}$	modifizierte ideale Ausgangsleistung im c -ten Kanal, S. 94
$P_{\text{id},\text{N},c}$	Störanteil der idealen Ausgangsleistung im c -ten Kanal (ohne Fehler im DCR), S. 228
$P_{\text{id},\text{S},c}$	Nutzanteil der idealen Ausgangsleistung im c -ten Kanal, S. 107

$P_{J,c}$	Störleistung durch Jitter im c -ten Kanal, S. 50
$P_{N,c}$	Störleistung im c -ten Kanal, S. 209
$P_{O,c}$	Störleistung durch DC-Offsets im c -ten Kanal, S. 213
$P_{O,c}^{\text{DC}}$	Störleistung durch DC-Offsets bei $f = 0$, S. 216
$P_{O,i}$	Leistung des Gleichanteils der I-Komponente, S. 104
$P_{O,q}$	Leistung des Gleichanteils der Q-Komponente, S. 104
$P_{Q,c}$	Leistung des Quantisierungsrauschens im c -ten Kanal, S. 32
P_R	thermische Rauschleistung, S. 49
$P_{S,c}$	Signalleistung bzw. Nutzleistung im c -ten Kanal, S. 30
$P_{\text{SO},c}$	Störleistung durch Übersprechen vom Eingangssignal auf die LO-Eingänge der Mischer im c -ten Kanal, S. 228
P_u	Leistung des Begrenzereingangssignals, S. 30
$P_{X,c}$	durch Eingangsrauschen direkt (ohne Spiegelspektrum, etc.) am Ausgang im c -ten Kanal hervorgerufene Rauschleistung, S. 213
$p_{f,m}$	Spitzenfaktor (engl.: <u>peak factor</u> , <u>back-off factor</u>) des m -ten ADC, S. 29
$p_{f,i}$	Spitzenfaktor des ADC im I-Pfad, S. 89
$p_{f,q}$	Spitzenfaktor des ADC im Q-Pfad, S. 89
p_f^{opt}	optimaler Spitzenfaktor, S. 33
p_i	Primfaktoren, S. 133
Q	Gütemaß für ADC, S. 46
Q_L	belastete Resonatorgüte, S. 12
q	Quantisierungsschrittweite, S. 32
R	Widerstand, S. 49
$\check{R}_{\phi_s^{\text{Clk}}\phi_s^{\text{Clk}}}(\omega)$	Leistungsdichtespektrum des Phasenrauschens nach dem verallgemeinerten Modell, S. 15
$\check{R}_{\phi_s^{\text{Clk}}\phi_s^{\text{Clk}}}^{\text{D}}(\omega)$	Leistungsdichtespektrum des Phasenrauschens nach dem Modell von DEMIR et al., S. 14
$\check{R}_{\phi_s^{\text{Clk}}\phi_s^{\text{Clk}}}^{\text{L}}(\omega)$	Leistungsdichtespektrum des Phasenrauschens nach dem Modell von LEESON, S. 12
$\check{R}_{\phi_s^{\text{Clk}}\phi_s^{\text{Clk}}}^{\text{M}}(\omega)$	Leistungsdichtespektrum des Phasenrauschens nach dem Modell von MÜLLER, S. 13
$\check{R}_{\phi_s^{\text{Clk}}\phi_s^{\text{Clk}}}^{\text{S}}(\omega)$	Leistungsdichtespektrum des Phasenrauschens nach dem Modell von SCHERER, S. 13
$\check{R}_{\tau_{s,\text{MC},m}\tau_{s,\text{MC},r}}(\omega)$	Kreuzspektrum der Taktjitter von MC-Zweigen, S. 66
$\check{R}_{\tau_{s,\text{TI},m}\tau_{s,\text{TI},r}}(\omega)$	Kreuzspektrum der Taktjitter von TI-Zweigen, S. 66
$\check{R}_{\text{ADC}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Aperturzeitjitter auftretendes Faltungsintegral, das im Zusammenhang mit dem Spiegelspektralanteil des Ausgangssignals entsteht, S. 101

$\check{R}_{\text{ADC}}^{\text{S}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Aper- turzeitjitter auftretendes Faltungsintegral, das im Zu- sammenhang mit dem Nutzanteil des Ausgangssignals einschließlich dem Störanteil durch das Eingangsrau- schen entsteht, S. 101
$\check{R}_{\text{ADC}}^{\text{SO1}}(\omega), \check{R}_{\text{ADC}}^{\text{SO2}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Aper- turzeitjitter auftretende Faltungsintegrale, die im Zu- sammenhang mit dem Anteil des Ausgangssignals durch Übersprechen vom Eingangssignal auf die LO-Eingänge der Mischer entstehen, S. 102
$\check{R}_{\text{Clk}}^{\text{I}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Takt- jitter auftretendes Faltungsintegral, das im Zusam- menhang mit dem Spiegelspektralanteil des Ausgangssignals entsteht, S. 101
$\check{R}_{\text{Clk}}^{\text{S}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Taktjitter auftretendes Faltungsintegral, das im Zusam- menhang mit dem Nutzanteil des Ausgangssignals ein- schließlich dem Störanteil durch das Eingangsrauschen entsteht, S. 101
$\check{R}_{\text{Clk}}^{\text{SO1}}(\omega), \check{R}_{\text{Clk}}^{\text{SO2}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Takt- jitter auftretende Faltungsintegrale, die im Zusam- menhang mit dem Anteil des Ausgangssignals durch Über- sprechen vom Eingangssignal auf die LO-Eingänge der Mischer entstehen, S. 102
$\check{R}_{\text{J}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Jitter auftretendes Faltungsintegral, S. 66
$\check{R}_{\text{J}}^{\text{ADC}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Aper- turzeitjitter auftretendes Faltungsintegral, S. 67
$\check{R}_{\text{J}}^{\text{Clk}}(\omega)$	Bei der Berechnung des Störanteils des PSD durch Takt- jitter auftretendes Faltungsintegral, S. 67
$\check{R}_{xx}(\omega)$	Leistungsdichtespektrum (PSD) von $x(t)$, S. 6
$\check{R}_{xy}(\omega)$	Kreuzspektrum von $x(t)$ und $y(t)$, S. 64
r	Rolloff-Faktor, S. 169
$r_{xx}(\Delta t)$	Autokorrelationsfunktion (ACF) von $x(t)$, S. 7
$r_{xy}(\Delta t)$	Kreuzkorrelationsfunktion (CCF) von $x(t)$ und $y(t)$, S. 64
S	Sättigungsschwelle, S. 29
$SNDR$	Signal-Stör-Verhältnis in dB, S. 32
$SNDR'$	Verhältnis der Erwartungswerte von Nutz- zu Störlei- stung in dB, S. 39
$SNDR_{\text{lin}}$	Signal-Stör-Verhältnis, S. 209
$SNDR_{y,c}$	Signal-Stör-Verhältnis am Ausgang im c -ten Kanal in dB, S. 32

$SNDR_y^C$	Signal-Stör-Verhältnis durch Sättigung in dB, S. 33
$SNDR_y^J$	Signal-Stör-Verhältnis durch Jitter in dB, S. 41
$SNDR_y^Q$	Signal-Stör-Verhältnis durch Quantisierung in dB, S. 33
$SNDR_y^{\text{opt}}$	Signal-Stör-Verhältnis durch Quantisierung und Sättigung in dB für p_f^{opt} , S. 33
T	Abtastperiode, S. 5
T_{FD}	nominelle Laufzeit des FD-Filters, S. 165
T_{Sym}	Symboldauer, S. 169
t_{Δ}	diskretes Zeitinkrement, S. 36
t_k	Abtastzeitpunkt, S. 5
U_{FS}	Eingangsspannungsbereich eines ADC, S. 49
$u(t_k)$	Ausgangssignal des Abtasters bzw. Eingangssignal des Begrenzers, S. 29
$u_i(t_k)$	Ausgangssignal des Abtasters bzw. Eingangssignal des Begrenzers im I-Pfad, S. 93
$u_q(t_k)$	Ausgangssignal des Abtasters bzw. Eingangssignal des Begrenzers im Q-Pfad, S. 93
$v_m(t_k)$	Eingangssignal des m -ten Begrenzers beim H-ADI-Modell, S. 62
w	Wortlänge, S. 32
w_{Akku}	Wortlänge des Akkumulators, S. 133
w_{eff}	effektive Wortlänge, S. 45
w_{eff}^C	effektive Wortlänge durch die Komparatorunsicherheit, S. 51
w_{eff}^J	effektive Wortlänge durch den Jitter, S. 50
w_{eff}^R	effektive Wortlänge durch thermisches Rauschen, S. 49
w_i	Wortlänge des i -ten Speichers, S. 133
$\underline{X}_n^{\text{Clk}}$	FOURIER-Koeffizienten des Taktsignals, S. 7
$\tilde{X}(j\omega)$	FOURIER-Transformierte von $x(t)$, S. 7
$x(t)$	Eingangssignal, S. 29
$x'(t)$	modifiziertes Eingangssignal, S. 91
$\tilde{x}(t)$	komplexe Einhüllende von $x(t)$, S. 86
$\tilde{x}'(t)$	komplexe Einhüllende von $x'(t)$, S. 91
$\tilde{x}_c(t)$	c -tes Teilsignal von $\tilde{x}(t)$, S. 95
$\underline{\tilde{x}}_c(t)$	c -tes Teilsignal von $\underline{\tilde{x}}(t)$, S. 95
$\underline{x}_{\text{Clk}}(t)$	Taktsignal, S. 7
$x_N(t)$	Störanteil des Eingangssignals, S. 29
$x_S(t)$	Nutzanteil des Eingangssignals, S. 29
$y(t_k)$	Ausgangssignal, S. 29
$\underline{y}(t_k)$	komplexes Ausgangssignal, S. 93
$\underline{y}'(t_k)$	phasenverschobenes Ausgangssignal, S. 148
$\underline{\underline{y}}''(t_k)$	zur Phasenkompensation transformiertes Ausgangssignal, S. 147
$\underline{y}_{\varphi}(t_k)$	phasenkompensiertes Ausgangssignal, S. 147

$\underline{y}_\tau(t_k)$	laufzeitkompensiertes Ausgangssignal, S. 166
$\underline{y}_A(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Aliasing, S. 66
$\underline{y}_{\text{ADC}}^I(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Aperturzeitjitter, der im Zusammenhang mit dem Spiegelspektralanteil des Ausgangssignals entsteht, S. 100
$\underline{y}_{\text{ADC}}^S(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Aperturzeitjitter, der im Zusammenhang mit dem Nutzanteil des Ausgangssignals einschließlich dem Störanteil durch das Eingangsrauschen entsteht, S. 100
$\underline{y}_{\text{ADC}}^{\text{SO}}(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Aperturzeitjitter, der im Zusammenhang mit dem Anteil des Ausgangssignals durch Übersprechen vom Eingangssignal auf die LO-Eingänge der Mischer entsteht, S. 100
$\underline{y}_C(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Sättigung, S. 38
$\underline{y}_{\text{Cik}}(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Taktjitter, der im Zusammenhang mit dem Spiegelspektralanteil des Ausgangssignals entsteht, S. 100
$\underline{y}_{\text{Cik}}^S(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Taktjitter, der im Zusammenhang mit dem Nutzanteil des Ausgangssignals einschließlich dem Störanteil durch das Eingangsrauschen entsteht, S. 100
$\underline{y}_{\text{Cik}}^{\text{SO}}(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Taktjitter, der im Zusammenhang mit dem Anteil des Ausgangssignals durch Übersprechen vom Eingangssignal auf die LO-Eingänge der Mischer entsteht, S. 100
$\underline{y}_F(t)$	Ausgangssignal des Filters, S. 92
$\underline{y}_g(t_k)$	verstärkungskompensiertes Ausgangssignal, S. 147
$\underline{y}_I(t_k)$	Spiegelspektralanteil des Ausgangssignals, S. 99
$\underline{y}_I(t_k)$	Inphase-Ausgangssignal, S. 93
$\underline{y}_{\text{id}}(t_k)$	ideales Ausgangssignal, S. 87
$\underline{y}_{\text{id},N}(t_k)$	Störanteil des idealen Ausgangssignals (ohne Fehler im DCR), S. 99
$\underline{y}_{\text{id},S}(t_k)$	Nutzanteil des idealen Ausgangssignals, S. 99
$\underline{y}'_{\text{id}}(t_k)$	modifiziertes ideales Ausgangssignal, S. 92
$\underline{y}_J(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Jitter, S. 38
$\underline{y}_J^I(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Jitter, der im Zusammenhang mit dem Spiegelspektralanteil des Ausgangssignals entsteht, S. 102
$\underline{y}_J^S(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Jitter, der im Zusammenhang mit dem Nutzanteil des Ausgangssignals einschließlich dem Störanteil durch das Eingangsrauschen entsteht, S. 102

$\underline{y}_J^{\text{SO}}(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Jitter, der im Zusammenhang mit dem Anteil des Ausgangssignals durch Übersprechen vom Eingangssignal auf die LO-Eingänge der Mischer entsteht, S. 102
$\underline{y}_M(t)$	Ausgangssignal des komplexen Mischers, S. 87
$\underline{y}_m(t_k)$	Ausgangssignal des m -ten Zweiges, S. 59
$\underline{y}_m^{\text{ADC}}(t_k)$	Ausgangssignal des m -ten ADC, S. 63
$\underline{y}_N(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals, S. 37
$\underline{y}_O(t_k)$	Gleichanteil des Ausgangssignals, S. 38
$\underline{y}_Q(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Quantisierung, S. 38
$\underline{y}_Q(t_k)$	Quadratur-Ausgangssignal, S. 93
$\underline{y}_S(t_k)$	Nutzanteil des Ausgangssignals, S. 37
$\underline{y}_{\text{SO}}(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Übersprechen vom Eingangssignal auf die LO-Eingänge der Mischer, S. 99
$\underline{y}_X(t_k)$	Störanteil des Ausgangssignals durch Störungen des Eingangssignals, S. 38
$\mathbb{Z}$	Menge der ganzen Zahlen, S. 5

Anmerkungen zur Notation

- Im Frequenzbereich werden zeitkontinuierliche bzw. zeitdiskrete Variablen mit den entsprechenden Großbuchstaben mit bzw. ohne dem Akzent '˘' bezeichnet.
- Komplexe Größen werden unterstrichen.
- Fettgedruckte kleine bzw. große Buchstaben bezeichnen Vektoren bzw. Matrizen.