

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Aufgabenstellung.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Bestehendes analoges RC-Kanalmodell.....	2
1.2 RC-Kettenschaltung der "Ti-TP Kette" .....	2
2 Theoretische Grundlagen.....	4
2.1 Fourierreihe des periodischen Rechteckimpulszuges.....	4
2.2 Spektrum des periodischen Rechteckimpulses .....	6
2.3 Periodischer Rechteckimpuls am RC-Tiefpassnetzwerk.....	8
2.4 Zusammenfassung .....	10
2.5 Periodischer Rechteckimpuls am CR-Hochpassnetzwerk.....	12
3 Untersuchung des bestehenden Systems .....	13
3.1 Spannungsmessung am Ausgang der "Ti-TP Kette" bei OZ1 bis OZ8.....	13
3.2 Auswirkungen auf das Signalspektrum des periodischen Rechteckimpuls- zuges durch die "Ti-TP Kette" bei OZ1 bis OZ8 .....	14
3.3 Bestimmung der Übertragungsfunktion für die "Ti-TP Kette" .....	15
3.3.1 Spannungs- / Impedanzanalyse .....	15
3.3.2 Knotenpotentialanalyse mit "Mathematica 5.0" .....	19
3.3.3 Morgan-Voyce-Algorithmus .....	21
3.4 Bestimmung des Amplitudenganges der ermittelten Übertragungsfunktionen mit Matlab zum Vergleich mit der Messung am Modell.....	22
3.5 Berechnung der TP-Grenzfrequenzen und Kontrollmessung.....	24
3.5.1 Mathematische Bestimmung der Grenzfrequenzen.....	24
3.5.2 Vergleichstabelle der ermittelten Grenzfrequenzen .....	26
3.6 PSpice-Simulation der TP-Amplitudengänge und Vergleichsmessung .....	26
3.7 Polstellenbestimmung für die "Ti-TP Kette" .....	28
3.8 Bestimmung der Übertragungsfunktion für die HP-Einsteckkarte .....	31
4 Planungs- und Entwurfsphase für die digitalen IIR-Filter .....	32
4.1 Umrechnung der analogen RC-Tiefpassfilter in digitale IIR-Filter .....	32
4.1.1 Mathematische Bestimmung der digitalen Koeffizienten nach der "bilinearen Transformation" .....	32
4.1.2 Berechnung nach der "impulsinvarianten Nachbildung" .....	33
4.1.3 Bestimmung der digitalen Koeffizienten für die "Ti-TP Kette" mit Hilfe von Matlab .....	34

4.2	Transformation der analogen, aktiven Hochpassfilter in digitale IIR-Filter .....	36
4.3	Matlab/Simulink Simulation .....	38
4.4	Digitalfilter allgemein und entsprechende Theorie zur Realisierung.....	39
4.4.1	Bestimmung des Amplitudenganges für die ermittelten digitalen TP-Filter .....	39
4.4.2	Bestimmung der Grenzfrequenzen für die digitalen TP-Filter.....	42
4.4.3	Polstellenermittlung für die digitalen TP-Filter .....	43
4.5	Theorie zur Filterrealisierung.....	46
4.6	Berechnungszeit für ein IIR-Filter nach Kap. 4.5 mit einem Mikrocontroller ...	49
5	Lösungs- bzw. Realisierungsansätze für die Nachbildung der "Ti-TP Kette" .....	51
5.1	In der Diplomarbeit verwendeter Controller ( <i>DSP "C6713"</i> ) .....	51
5.1.1	CodeComposerStudio ( <i>CCS</i> ).....	52
5.1.2	Berechnungszeit für ein IIR mit dem "TMS320C6713 DSK-Board" und Programmoptimierungen.....	52
5.2	Realisierung von IIR-TP-Filtern mit dem "AIC23" on-board-Codec .....	56
5.3	Realisierung von IIR-TP-Filtern mit dem "ADDA16" ( <i>500KHz-Codec</i> ) .....	58
5.4	Synchronisierung von Bitgenerator und Bord .....	59
5.5	Synchronisierung mit Interrupt-Programm.....	60
5.6	Anforderungen an eine fertige DSP-Bord Lösung mit Codec .....	61
6	Realisierung der digitalen "Ti-TP Kette" .....	62
6.1	Realisierung des Filters ohne AD-Wandler und mit DA-Wandler Eval.-Bord ..	62
6.1.1	Serielle Ansteuerung des DAC.....	63
6.1.2	Parallele Ansteuerung des DAC per GPIO .....	63
6.1.2.1	Initialisierung der McBSP Register.....	65
6.1.2.2	External Interrupts als General-Purpose I/O nutzen .....	66
6.1.2.3	Programm mit Interrupt und Ausgabe über GPIO-Pins an "J3" ..	67
6.1.3	Parallele Ansteuerung des DA per EMIF .....	69
6.2	DA-Wandler Evaluationsbord mit AD9752 .....	71
6.2.1	"Unbuffered Voltage Output"-Modus.....	72
6.2.2	"Unipolar Buffered Voltage Output"-Modus .....	74
6.3	Realisierung des ITP bzw. Rekonstruktionsfilter.....	77
6.4	Spannungsversorgung mit dem LM2662.....	82
6.5	Hochpass.....	82
7	Realisierungskonzept der "Ti-TP Kette" und HP-Einsteckkarte .....	85
8	Zusammenfassung .....	86
	Anhang .....	87

Literaturverzeichnis .....	138
Versicherung über die Selbstständigkeit.....	139

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Analoges Kanalmodell mit den nachzubildenden Einsteckkarten .....	2
Abb. 1.2	Ersatzschaltbild der nachzubildenden RC-Kette und der Einsteckkarte .....	2
Abb. 1.3	Einsteckkarte "RC-Kette" .....	3
Abb. 1.4	Anwendungsprinzip des Kanalmodells .....	3
Abb. 2.1	Periodischer Rechteckimpulszug .....	4
Abb. 2.2	Überlagerungen der Harmonischen zum periodischen Rechteck .....	6
Abb. 2.3	Spektrum eines periodischen Rechteckimpulses.....	6
Abb. 2.4	Gemessenes Spektrum des periodischen Rechtecks am Generatorausgang .....	7
Abb. 2.5	Periodischer Rechteckimpulszug .....	8
Abb. 2.6	Veranschaulichung der Entstehung eines Rechteckimpulses .....	9
Abb. 2.7	Ausgangsspannung am RC-Netzwerk mit unterschiedlichen Zeitkonstanten .....	10
Abb. 2.8	Abgebrochene Fourierreihendarstellung des periodischen Rechteckimpulses .....	10
Abb. 2.9	Gleichanteil und die ersten 7 Harmonischen .....	10
Abb. 2.10	Ausgangssignal des RC-Tiefenpasses .....	11
Abb. 2.11	Gleichanteil und die ersten 7 Harmonischen .....	11
Abb. 2.12	Ausgangssignal des CR-Hochpasses und die ersten 7 Harmonischen .....	12
Abb. 3.1	Ausgangssignal "Ti-TP Kette" bei OZ1 und Eingangssignal .....	13
Abb. 3.2	Ausgangssignal und Takt vom Wortgenerator.....	13
Abb. 3.3	Ausgangssignal der "Ti-TP Kette" bei OZ2 und bei OZ6.....	13
Abb. 3.4	Signalspektrum am Eingang der "Ti-TP Kette" .....	14
Abb. 3.5	Signalspektrum am Ausgang der "Ti-TP Kette" bei OZ1 .....	14
Abb. 3.6	Signalspektrum am Eingang der "Ti-TP Kette" und am Ausgang bei OZ1 .....	14
Abb. 3.7	RC-Glied 1.Ordnung .....	15
Abb. 3.8	RC-Glied 2.Ordnung .....	15
Abb. 3.9	RC-Glied 3.Ordnung .....	16
Abb. 3.10	RC-Glied 2.Ordnung mit Spannungsquelle und mit gewandelten Quellen.....	19
Abb. 3.11	Darstellung des Koeffizienten des Morgan-Voyce-Polynoms als TriangularArray21	
Abb. 3.12	Messung des Frequenzganges der "Ti-TP Kette" bei OZ5 mit dem FSP3.....	22
Abb. 3.13	Messaufbau mit FSP3 .....	22
Abb. 3.14	Simulation des Amplitudenganges der ermittelten Übertragungsfunktion mit Matlab für OZ1 bis OZ4.....	23
Abb. 3.15	Messung des Amplitudenganges der "Ti-TP Kette" mit FSP3 für OZ1 bis OZ4 ...	23
Abb. 3.16	PSpice-Schaltung der RC-Kette für OZ8.....	26
Abb. 3.17	Ergebnis der PSpice-Simulation für OZ1 bis OZ4 und Vergleichsmessung .....	27

Abb. 3.18	Ergebnis der Pspice-Simulation für OZ5 bis OZ8 und der Vergleichsmessung .....	27
Abb. 3.19	Pol-/Nullstellenplan als 3D-Grafik für OZ2 .....	28
Abb. 3.20	Pol-/Nullstellenplan für OZ3 .....	29
Abb. 3.21	HP 1.Ordnung .....	31
Abb. 4.1	Eingangssignal z.B. mit $T_0=31,25\mu s$ .....	33
Abb. 4.2	RC-Glied 1.Ordnung .....	33
Abb. 4.3	Simulink-Simulation der analogen TP und der ermittelten digitalen TP für OZ2 .....	38
Abb. 4.4	Rechteckantwort.....	38
Abb. 4.5	Amplitudengang digitaler TP.....	39
Abb. 4.6	Amplitudengang digitaler TP OZ1 und das analoge Filter OZ1 .....	40
Abb. 4.7	Amplitudengang digitaler TP OZ2 und analoger TP zum Vergleich.....	41
Abb. 4.8	Amplitudengang digitaler TP OZ2 und analoger TP zum Vergleich/Ausschnitt ..	41
Abb. 4.9	Pol-/Nullstellenplan für den digitalen TP OZ1 .....	43
Abb. 4.10	Pol-/Nullstellenplan für OZ2 als 3D-Grafik mit Einheitskreis .....	43
Abb. 4.11	Polstellenplan für den ermittelten digitalen Filter 6.Ordnung .....	45
Abb. 4.12	Koeffizientenkonstellation für reellwertige Systeme 2.Ordnung.....	45
Abb. 4.13	Filternetzwerk für transversales Filter 2.Ordnung .....	46
Abb. 4.14	Rein rekursives Filternetzwerk .....	47
Abb. 4.15	Allgemeine Übertragungsfunktion 2.Ordnung .....	47
Abb. 4.16	Umsetzung der drei Teilgleichung .....	48
Abb. 4.17	StaVer40 Bord mit $\mu C$ AltMega32 .....	49
Abb. 4.18	Struktogramm für die Ermittlung der Berechnungszeit mit StaVer40 Bord .....	49
Abb. 5.1	Das komplette Starter-Kit (DSK) für den TM320C6713 DSP .....	51
Abb. 5.2	“Circular Buffer“ .....	56
Abb. 5.3	Prinzipschaltbild des Testaufbaus mit Codec .....	57
Abb. 5.4	Einfluss des digitalen Filters (OZ2) mit 12-fach Oversampling und Messung .....	57
Abb. 6.1	Prinzipschaltbild des geplanten Kanalmodells.....	62
Abb. 6.2	DAC mit serieller Ansteuerung.....	63
Abb. 6.3	DAC mit paralleler Ansteuerung.....	64
Abb. 6.4	Initialisierung der McBSP-Pins als GPIO-Pins.....	65
Abb. 6.5	Funktionsblock Diagramm.....	66
Abb. 6.6	Initialisierung der ext. Interrupt-Pins als GPIO-Pins .....	67
Abb. 6.7a	Struktogramm für GPIO-Programm .....	67
Abb. 6.7b	Struktogramm für GPIO-Programm.....	68
Abb. 6.8	Programmoptimierung 1 .....	68
Abb. 6.9	Programmoptimierung 2 .....	68

Abb. 6.10	Programmausschnitt mit EMIF -Initialisierung .....	69
Abb. 6.11	EB-9752.....	71
Abb. 6.12	Zeitliches Ablaufdiagramm zur Ansteuerung des "AD9752".....	72
Abb. 6.13	OV bis 1V "Unbuffered Voltage Output" .....	72
Abb. 6.14	50Ω -SMA-Stecker .....	73
Abb. 6.15	Vergleichsmessung des analogen mit dem digitalen Filter.....	73
Abb. 6.16	Ausgangssignalebenen im "Unbuffered Voltage Output"-Modus .....	74
Abb. 6.17	"Unipolar Buffered Voltage Output".....	74
Abb. 6.18	Vergleichsmessung des zu interpolierenden Signals.....	75
Abb. 6.19	Inverterschaltung .....	76
Abb. 6.20	Darstellung der zu interpolierenden Stufen .....	76
Abb. 6.21	Darstellung der zu interpolierenden Stufen mit großer Auflösung .....	76
Abb. 6.22	Interpoliertes Signal.....	77
Abb. 6.23	Verstärkungsbandbreiteprodukt des TL074.....	77
Abb. 6.24	ITP mit TL074.....	78
Abb. 6.25	Amplitudengang des ITP0 .....	78
Abb. 6.26	Ausgangssignal vor dem ITP .....	79
Abb. 6.27	Messung der digitalen IIR-Filter .....	79
Abb. 6.28	Interpoliertes Ausgangssignal .....	80
Abb. 6.29	Übersichtsplan des Testaufbaus für die "Ti-TP Kette" .....	81
Abb. 6.30	HP-Algorithmus 2. Ordnung.....	82
Abb. 6.31	"Unipolar Buffered Voltage Output" Modus mit Offset .....	83
Abb. 6.32	"Single Supply DC Differential" Modus .....	83
Abb. 7.1	Verarbeitungskette für das digitale Kanalmodell.....	85
Abb. 8.1	Benutzeroberfläche für das digitale Kanalmodell.....	85

# Anhang

## Inhaltsverzeichnis des Anhangs

Inhaltsverzeichnis des Anhangs .....	87
Anhang A Anhang zu Kapitel 1 .....	88
A.1 Kanalnachbildung .....	88
A.2 Ersatzschaltbild der "Ti-TP Kette" .....	92
Anhang B Anhang zu Kapitel 2.....	93
B.1 Ersatzschaltbild der Einsteckkarte "HP" .....	93
Anhang C Anhang zu Kapitel 3.....	94
C.1 Messergebnisse der "Spannungsmessung am Ausgang der "Ti-TP Kette" bei OZ1 bis OZ8" .....	94
C.2 Auswirkungen auf das Signalspektrum des periodischen Rechtecks durch die "Ti-TP Kette" bei OZ1 bis OZ8 .....	95
C.3 Spannungs- / Impedanzanalyse für OZ4 und OZ5.....	96
C.4 Knotenpotentialanalyse.....	97
C.5 Bestimmung des Amplitudenganges der ermittelte Übertragungsfunktionen mit Matlab zum Vergleich mit der Messung am Modell .....	100
C.6 Bestimmung der Grenzfrequenz ab OZ4 .....	101
C.7 Messung des Amplitudenganges mit dem Audioanalysator.....	103
Anhang D Anhang zu Kapitel 4 .....	105
D.1 Bestimmung der Übertragungsfunktion mit Hilfe von Matlab.....	105
D.2 Ermittelte Koeffizienten für ein digitales IIR-Filter .....	105
D.3 Testprogramm für ein IIR-Filter mit Umspeichern und Erklärungen .....	106
D.4 Testprogramm für ein IIR-Filter ohne Umspeichern mit dem ATmega32 .....	107
Anhang E Anhang zu Kapitel 5.....	108
E.1 Testprogramm für ein IIR-Filter mit dem "TMS320C6713 DSK-Board" .....	108
E.2 Realisierung der "Ti-TP Kette" mit dem "AIC23" on-board-Codec .....	109
E.3 Realisierung eines IIR-Filters mit dem "ADDA16" Aufsteckmodul .....	113
E.4 Johnson Counter .....	114
E.5 Angebote der Firma GBM .....	115
E.6 Verwendete Wandler-ICs und Bauteile .....	117
Anhang F Anhang zu Kapitel 6.....	118
F.1 "J3" Connector.....	118
F.2 Register zur Initialisierung der McBSP-Pins als GPIO .....	119
F.3 Register zur Initialisierung der externen Interrupts-Pins als GPIO .....	120
F.4 GPIO-Programm mit Ausgabeoptimierungen .....	122
F.5 "J4" EMIF-Connector .....	126
F.6 Schaltbild des EB-9752.....	127
F.7 Active Filter Design Tool.....	128
F.8 EMIF-Register .....	129
Anhang H CD mit elektronischer Ausführung der Diplomarbeit .....	in der Rückseite

## Quellenverzeichnis

- [1] Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Micheel: Unterlagen zum Praktikumsversuch “Entzerrung von Digitalsignalen“ (*Versuch 56*), 22.04.2002
- [2] Werner, Martin: Nachrichtentechnik, Vieweg Verlag, 4. Auflage 2003, ISBN: 3-528-37433-0
- [3] Müller-Wichards, Dieter: Transformationen und Signale, B.G. Teubner Verlag, 1999, ISBN: 3-519-02742-9
- [4] Kröger, Peter; Gerdson, Peter: Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung, Springer Verlag, 2. Auflage 1997, ISBN: 3-540-61194-0
- [5] Görth, Joachim: Bauelemente und Grundschaltungen, B.G. Teubner Verlag, 1999, ISBN: 3-519-06258-5
- [6] Chassaing, Rulph: Digital Signal Processing and Applications with the C6713 and C6416 DSK, Wiley-Interscience Verlag, 2005, ISBN: 0-471-69007-4
- [7] Tietze / Schenk: Halbleiterschaltungstechnik, Springer Verlag, 2002, ISBN: 978-3-540-42849-7
- [8] Lancaster, Don: Das Aktiv-Filter-Kochbuch, IWT Verlag, 1982, ISBN: 3-88322-007-8
- [9] Kammermeyer, Karl-Dirk; Kroschel, Kristian: Digitale Signalverarbeitung, Teubner Verlag, 2006, ISBN: 3-8351-0072-6
- [10] Morgan-Voyce Algorithmus  
<http://mathworld.wolfram.com/Morgan-VoycePolynomials.html> (16.12.2007)  
<http://www.research.att.com/%7Enjas/sequences/table?a=85478&fmt=312>
- [11] spru190d.pdf, sprs266e.pdf, spra186l.pdf, TMS320C6713techref .pdf, Programming reference  
§install dir (Hilfeordner der installierten CCS Version)
- [12] AD9764, AD5444, AD9752, EB-9752, AD8047, AD9765, AD9774  
<http://www.analog.com/en/subCat/0,2879,761%255F795%255F0%255F%255F0%255F,00.html> (11.10.07)
- [13] Active Filter Design Tool  
[http://www.analog.com/Analog\\_Root/static/techSupport/designTools/interactiveTools/filter/filter.html](http://www.analog.com/Analog_Root/static/techSupport/designTools/interactiveTools/filter/filter.html) (10.11.2007)
- [14] TMS320C6000 EMIF calculator  
<http://www.dsigt.de/support/tools/c6000emif.html> (23.10.07)