

Drahtlose Signal- und Energieübertragung mit Hilfe von Hochfrequenztechnik in CMOS-Sensorsystemen

Vom Fachbereich Elektrotechnik der
Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stephan Kolnsberg

aus

Krefeld

Referent:	Prof. Bedrich J. Hosticka, Ph.D.
Korreferent:	Prof. Dr. rer. nat. W. Mokwa
Tag der mündlichen Prüfung:	Mittwoch, 25. April 2001

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme in Duisburg, bei dessen Leiter, Prof. Dr. rer. nat. G. Zimmer, ich mich an dieser Stelle für die Möglichkeit zur Ausübung einer wissenschaftlichen Tätigkeit auf dem äußerst interessanten Gebiet der vorliegenden Dissertation bedanken möchte.

Ein besonderer Dank gilt Prof. B. J. Hosticka, Ph.D., der mir in zahlreichen Gesprächen viele nützliche Anregungen unterbreitete und durch seine kontinuierliche Förderung sowie sein entgegengebrachtes Interesse sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ebenso waren die Zusammenarbeit und Gespräche mit anderen augenblicklichen und ehemaligen Mitarbeitern des IMS während meiner Promotionszeit sehr aufschlußreich und förderlich. Insbesondere möchte ich in diesem Zusammenhang die Herren Dirk Weiler, Dr. Dirk Hammerschmidt, Ralf Ochsenbrücher, Thomas van den Boom, Karsten Stangel, Dirk Teßmann, Peter Fürst, Thorsten Kneip, Dr. Markus Schwarz, Dr. Jürgen Niederholz, Dr. Lutz Ewe, Dr. Hoc Khiem Trieu, Dr. Gerd vom Bögel und Michael Niederholz nennen. Des weiteren möchte ich ausdrücklich bemerken, daß bei allen Mitarbeitern des IMS stets die Bereitschaft herrschte, schnell und unproblematisch zur Lösung von Problemen beizutragen.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. W. Mokwa danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Meiner Familie danke ich für das entgegengebrachte Verständnis und die Entlastungen im privaten Bereich. Mein besonderer Dank gilt meiner Frau, die mir durch ihr Verständnis und die damit verbundenen Entlastungen während der gesamten Zeit das erhöhte Engagement zur Anfertigung der Arbeit ermöglichte.

Duisburg, im Juni 2000

Stephan Kolnsberg

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	XVI
1 EINLEITUNG	1
2 GRUNDLAGEN DER DRAHTLOSEN SIGNAL- UND ENERGIEÜBERTRAGUNG.....	1
2.1 Unterscheidungsmerkmale von RFID-Systemen	6
2.1.1 Frequenzbereiche und Wellenlängen.....	6
2.1.2 Übertragungsdistanz und Energieversorgung	10
2.1.3 Datenübertragung	11
2.2 Grundlegende Funktionsweise	13
2.2.1 1-Bit-Transponder	14
2.2.2 Mikroelektronisch aufgebaute Transceiver	17
2.3 Erweiterung zu RFIDS-Systemen.....	26
2.3.1 Integrierbare Sensoren.....	29
2.3.1.1 Drucksensor.....	29
2.3.1.2 Temperatursensor	33
2.3.1.3 Beschleunigungssensor	36
3 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN FÜR PASSIV VERSORGTE RFID- UND RFIDS-SYSTEME.39	
3.1 Magnetischen Feldkomponenten im Nah- und Fernfeld.....	39
3.2 Berechnung des Kopplungsfaktors in Abhängigkeit der Übertragungsdistanz	43
3.2.1 Wahl des Übertragers	48
3.2.2 Äquivalente Rauschbandbreite.....	61
3.2.3 Abschätzung der benötigten Eingangsleistung	66
3.2.4 Internationale Zulassungsvorschrift.....	69

4	UNTERSUCHUNG VON DIGITALEN MODULATIONSVERFAHREN FÜR CMOS	
	TRANSCEIVER	72
4.1	Digitale Modulationsverfahren	73
4.2	Festlegung eines Gütefaktors zur Bestimmung des günstigsten Modulationsverfahrens	74
4.2.1	Betrachtung der Bitfehlerrate P_e	75
4.2.2	Abschätzung der Hardware-Komplexität bezogen auf den Stromverbrauch von Detektoren	77
4.2.3	Auswertung des Gütefaktors	80
4.3	Betrachtungen zum Signal-Übertragungsmodell.....	81
4.3.1	Einfluß des eingekoppelten Kanalrauschens	82
4.3.2	Betrachtungen zum Detektor Model	84
4.3.2.1	Berechnungen einer äquivalenten Bitfehlerrate $P_{e,äq}$	86
4.3.2.2	Bestimmung der minimalen Eingangsspannung des Komparators.....	90
5	CMOS SCHALTUNGSTECHNIK FÜR PASSIV VERSORGTTE TRANSCEIVER.....	92
5.1	Prinzipielle Architektur eines passiv versorgten RFIDS-Transceiver-ICs.....	92
5.2	Schaltungskomponenten des RF-Frontends eines passiven Transceivers	94
5.2.1	Schaltungsblock „Versorgung“ eines RF-Frontends.....	96
5.2.1.1	Gleichrichtung	97
5.2.1.2	Spannungsbegrenzung.....	103
5.2.1.3	ESD-Schutz	106
5.2.1.4	Biasstromquelle	106
5.2.1.5	Spannungsregelung	109
5.2.2	Schaltungsblock „Taktextraktion“ eines RF-Frontends	111
5.2.3	Schaltungsblock „Daten“ eines RF-Frontends	115
5.2.3.1	ASK-Modulator auf der Transceiverseite.....	116
5.2.3.2	Hüllkurvendemodulator	118
5.2.3.2.1	Verteilte RC-Filter.....	120
5.2.3.2.2	Hysteresekomparator.....	122
6	ANWENDUNGEN VON CMOS-TRANSCEIVER.....	128
6.1	Medizinische Anwendungen	128
6.1.1	Retina Implantat System zur Netzhautstimulation	129
6.1.1.1	Retina Encoder	132
6.1.1.2	Telemetrieinheit.....	138
6.1.1.3	Retina Stimulator.....	140
6.1.1.4	Retina Implantat	143
6.1.1.5	Messungen der diskret aufgebauten Übertragungsstrecke	144
6.1.1.6	Meßergebnisse an einem Retina-Implantat.....	147
6.1.2	Intraokulares Drucksensorsystem	151
6.1.2.1	Aufbau des implantierbarem Transceiverchips mit Drucksensor, Temperatursensor und Sensorelektronik.....	152
6.1.2.2	EEPROM zur Speicherung des ID-Kodes.....	154
6.1.2.3	Druck- und Temperatursensor mit ihren Sensorausleseschaltungen.....	155
6.1.2.4	Drahtlose Übertragung der Meßergebnisse	161

6.1.2.5	Realisierung des intraokularen Drucksensorsystems.....	162
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	166
8	LITERATURVERZEICHNIS	170
A	ANHANG.....	179
A.1	Transformatorische Kopplung	179
A.2	Übertragungsfunktionen eines Übertragers mit beidseitigen Resonanzschwingkreisen	187
A.2.1	Übertragungsfunktion $H_I(s)$	187
A.2.2	Übertragungsfunktion $H_U(s)$	190
A.3	Berechnung der äquivalenten Bitfehlerrate $B_{\text{äq}}$ für weißes Rauschen	193
A.4	Digitale Modulationsverfahren	196
A.4.1	Amplitudentastung (ASK)	197
A.4.2	Frequenzumtastung (FSK)	200
A.4.3	Phasenumtastung (PSK).....	204
A.4.3.1	Zweiphasenumtastung (BPSK).....	205
A.4.3.2	Vierphasenumtastung (QPSK).....	206
A.4.3.3	I/Q-Modulator	208
A.4.3.4	Minimum Shift Keying (MSK).....	212
A.4.3.5	Gaussian filtered Minimum Shift Keying (GMSK)	213
A.4.4	Vergleich der Modulationsverfahren für einen Einsatz bei CMOS Transceivern.....	213

Formelzeichen und Abkürzungen

α_R	linearer Temperaturkoeffizient eines Widerstandes
β	Steilheitskonstante des MOS-Transistors
ΔC	Kapazitätshub eines Drucksensorelements
Δf_T	Frequenzhub
$\Delta \varphi_T$	Phasenhub
ΔR	Widerstandsänderung
ΔT	zeitliche Differenz
ΔU	Spannungsänderung
Φ	Streufluß
Φ_m	magnetischer Fluß
η	Wirkungsgrad einer Antenne
η_F	Flächenwirkungsgrad
φ	Phasenwinkel
φ_T	Phasenwinkel einer Trägerschwingung
φ_{Tw}	Wechselanteil eines Phasenwinkels einer Trägerschwingung
λ	Wellenlänge
μ_0	magnetische Feldkonstante
ν	Querkontraktionszahl
θ	Rotationswinkel
σ	Rückstreuquerschnitt, Streufaktor

τ	Zeitkonstante
τ_k	Zeitkonstante eines kontinuierlichen RC-Filters
τ_v	Zeitkonstante eines verteilten RC-Filters
ω	Kreisfrequenz
ω_0	Resonanzfrequenz
ω_{res}	Resonanzfrequenz eines lose gekoppelten Systems
ω_s	Kreisfrequenz der Signalschwingung
ω_T	Kreisfrequenz der Trägerschwingung
Ψ	verketteter magnetischer Fluß
A_E	Emitterfläche eines Bipolartransistors
ASK	Amplitude Shift Keying - Amplitudentastung
A_T	Fläche der Transceiverspule
B	Flußdichte
B	Bandbreite
$B_{\text{äq}}$	äquivalente Rauschbandbreite
$B_{\text{äqÜ}}$	äquivalente Rauschbandbreite eines Übertragers mit Übertragungsfunktion in Abhängigkeit der Spannung
B_{HF}	Bandbreite im hochfrequenten Übertragungskanal
BMBF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
B_N	Nyquist-Bandbreite
BPF	Bandpaßfilter
B_{Praxis}	Bandbreite, die in der Praxis verwendet wird.
BPSK	Bi Phase Shift Keying – Zweiphasenumtastung
H_I	Übertragungsfunktion des Übertragers in Abhängigkeit des Stromes
C	Kapazität

c	Lichtgeschwindigkeit
c'_{ox}	Kapazitätsbelag
C_0	Sensorgrundkapazität
CCD	Charge-Coupled-Device
C_{fix}	fester Kapazitätswert
C_{Lmin}	minimale Knotenkapazität
C_r	Resonanzkapazität
CRC	Cyclic Redundancy Check
C_{Sensor}	Kapazität des Drucksensors
C_{temp}	Kapazität zur Temperatúrauslese
d	binäres Datenwort
d	Abstand zwischen zwei Spulen
D	Membranbiegesteifigkeit
DBPSK	Zweiphasenumtastung mit Differenzkodierung
$d_{Fernfeldgrenze}$	Fernfeldgrenze
D_n	Einstein-Relation
D_{nB}	Elektroden-Diffusionskonstante in der Basis
DSP	digitaler Signalprozessor
d_0	Abstand zwischen den Elektroden des Drucksensors bei Vakuum
E	Elastizitätsmodul
E	Signalenergie
EAS	Electronic article surveillance – elektronische Artikelsicherung
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ERM	Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters
ESD	Electro Static Discharge – Elektrostatische Entladung
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

f	Frequenz
f_b	Grenzfrequenz eines verteilten RC-Gliedes
f_{Bit}	Frequenz eines Übertragungsbits
FDX	Vollduplexverfahren
f_H	Hilfstaktfrequenz
FM	Frequenzmodulation
$f_{\text{Oszillator}}$	Frequenz des Ausleseoszillators
f_s	Sendefrequenz
f_S	Signalfrequenz
FSK	Frequency Shift Keying - Frequenzumtastung
f_T	Trägerfrequenz
f_{Tw}	Wechselanteil der Trägerfrequenz
GBW	Gain Band Width - Verstärkungsbandbreiteprodukt
GLEI	Gleichrichter
GMSK	Gaussian filtered Minimum Shift Keying
h	Membrandicke
H	magnetische Feldstärke
H	Übertragungsfunktion
HDX	Halbduplexverfahren
HF	Hochfrequenz
H_I	Übertragungsfunktion des Übertragers in Abhängigkeit des Stromes
H_k	Übertragungsfunktion eines kontinuierlichen RC-Filters
H_U	Übertragungsfunktion des Übertragers in Abhängigkeit der Spannung
$H_{\text{Ü}}$	Übertragungsfunktion des Übertragers
H_v	Übertragungsfunktion eines verteilten RC-Filters
H_z	z-Komponente der magnetischen Feldstärke

i	Kleinsignalstrom
I_0	konstanter Strom (Biasstrom)
I_{aus}	Ausgangsstrom
IC	Integrated Circuit – integrierte Schaltung
I_C	Kollektorstrom
ID	Identifikationssystem
i_D	Strom durch den Drainanschluß eines MOS-Transistors
i_{Di}	Strom durch eine Diode
IDS	Identifikations-und Sensor-System
I_{ein}	Eingangsstrom
I_{RL}	Strom durch den Lastwiderstand
I_S	Transportstrom
ISM	Industrial-Scientifical-Medical
k	Boltzmannkonstante
k	Kopplungsfaktor
K	Kettenmatrix
K	Anzahl der Perioden einer Übertragung
KOMP	Komparator
$k_{1,2}$	Technologieparameter
L	Transistorlänge
L	Eigeninduktivität
LSB	Least Significant Bit
m	Modulationsgrad
M	Modulationsindex
M	Gegeninduktivität
M	Anzahl der Bit eines Wortes
$M_{1..k}$	Transistorennummerierung

MESAflex	Membran elastisch gekoppelte Siliziumanordnung auf flexiblen Substrat
MSB	Most Significant Bit
MSK	Minimum Shift Keying
MULT	Multiplizierer
N	Flächenverhältnis zweier Bipolartransistoren
N	Anzahl der gezählten Pulse
N	Rauschleistung
N	Anzahl der Wörter einer Übertragung
N_D	Anzahl der parallel geschalteten Drucksensorelemente
N_0	Rauschleistungsdichte
N_1	Windungszahl der Spule der Basiseinheit
N_2	Windungszahl der Transceiverspule
OOK	On-Off-Keying
OSB	Oberes Seitenband
p	Druck
P	Leistung
P_A	Wirkleistung
P_{AM}	Leistung einer amplitudenmodulierten Schwingung
P_{chip}	Leistungsaufnahme eines Mikrochips
P_e	Bitfehlerrate
$P_{e,äq}$	äquivalente Bitfehlerrate
P_E	Empfangsleistung
PLL	Phase-Locked –Loop - Phasenregelschleife
PM	Phasenmodulation
p_N	Nenndruck
P_{OSB}	Leistung des oberen Seitenbandes

P_{refl}	vom Transceiver reflektierte Leistung
PS	Phasen-Shifter
P_S	Strahlungsleistung
PSK	Phase Shift Keying, - Phasenumtastung
P_T	Leistung einer Trägerschwingung
P_{USB}	Leistung des unteren Seitenbandes
P_V	Verlustleistung
p_0	Druck bei Vakuum
P_1	Eingangsscheinleistung
$P_{1\text{max}}$	maximale Eingangsscheinleistung
P_2	Wirkleistung am Verbraucher
q	Elementarladung
Q_B	Basisladungen
QPSK	Vierphasenumtastung
r	Roll-off-Faktor
r	Radius
R	Widerstand
R_0	Bezugswiderstand
R_A	Realteil der Antenneneingangsimpedanz
R_{ab}	Abstand des Transceivers zur Sendeantenne
r_B	Radius der Spule der Basiseinheit
RFID	Radio Frequency Identification
RFIDS	Radio Frequency Identification and Sensors
R_L	Lastwiderstand
R_{L1}	Verlustwiderstand der Spule der Basiseinheit
R_{L2}	Verlustwiderstands der Transceiverspule
R_S	Strahlungswiderstand

r_{sens}	Radius eines Drucksensorelements
r_{sq}	Square-Widerstand
r_{T}	Radius der Transceiverspule
R_{T}	temperaturabhängiger Widerstand
R_{V}	Verlustwiderstand
S	Empfindlichkeit
s	komplexe Frequenz
SEQ	Sequentielles System
SIMOX	Separation-by-Implanted-Oxygen
SNR	Signal zu Rauschverhältnis
SRD	Short Range Devices
t	Zeit
T	Temperatur
T	Zeitdauer
$T_{\text{äq}}$	äquivalente Rauschbandbreite eines Übertragers mit Übertragungsfunktion in Abhängigkeit des Stromes
T_{Bit}	Periodendauer eines Übertragungsbits
t_{max}	maximale Ladezeit
t_{min}	minimale Ladezeit
TPF	Tiefpaßfilter
T_{s}	Schrittdauer
T_{S}	Periodendauer eines Signals
T_{T}	Periodendauer einer Trägerschwingung
T_0	Bezugstemperatur
U	Spannung
U_{\sim}	Wechselspannung
$U_{=}$	Gleichspannung

U_0	Gleichspannung
u_{ASK}	Spannung bei Amplitudentastung
U_{aus}	Ausgangsspannung
U_{BE}	Basis-Emitter Spannung
U_{Bias}	Referenzspannung
u_{BPSK}	Spannung bei Zweiphasenumtastung
U_{DD}	Betriebsspannung - Obergrenze
u_{Di}	Spannung über eine Diode
U_{ein}	Eingangsspannung
$U_{\text{ein-}}$	invertierende Eingangsspannung des Komparators
$U_{\text{ein+}}$	nicht invertierende Eingangsspannung des Komparators
U_{F}	Flußspannung einer Diode
u_{FSK}	Spannung bei Frequenzumtastung
u_{GS}	Gate-Source-Spannung
U_{i}	Induzierte Spannung
u_{M}	Modulationsprodukt
u_{PSK}	Spannung bei Phasenumtastung
U_{Q}	Quellenspannung
u_{QPSK}	Spannung bei Vierphasenumtastung
u_{S}	Signalschwingung
u_{SB}	Seitenschwingung
USB	Unteres Seitenband
U_{SH}	Schaltswelle von Low- nach High-Pegel
U_{SL}	Schaltswelle von High- nach Low-Pegel
u_{T}	Trägerschwingung
U_{T}	Schwellenspannung eines MOS-Transistors
U_{th}	thermische Spannung

U_{TS}	Ausgangsspannung eines Temperatursensors
W	Transistorweite
X_A	Imaginärteil der Antenneneingangsimpedanz
z	Durchbiegung

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1:	Prinzipielle Architektur eines RFID-Systems	5
Bild 2.2:	Unterscheidungsmerkmale von RFID-Systemen	6
Bild 2.3:	Übersicht der ISM-Frequenzbereiche	7
Bild 2.4:	Grundlegende Funktionsweisen von RFID-Systemen	14
Bild 2.5:	Darstellung der zeitlichen Abläufe bei Voll-, Halbduplex- und sequentiellen Systemen	19
Bild 2.6:	Erweiterung eines RFID-Systems zu einem RFIDS-System	27
Bild 2.7:	Aufbau eines mikromechanischen Drucksensorelements in Schnittdarstellung	30
Bild 2.8:	Aufbau eines druckunabhängigen Referenzelements in Schnittdarstellung	31
Bild 2.9:	Wheatstone-Brücke als Temperatursensor	34
Bild 2.10:	Temperatursensor mit Hilfe von PNP-Bipolartransistoren	35
Bild 2.11:	Prinzipieller Aufbau eines Beschleunigungssensors in Draufsicht	37
Bild 3.1:	Verlauf der magnetischen Feldstärke H beim Übergang von Nah- zum Fernfeld bei einer Frequenz von 13,56 MHz	41
Bild 3.2:	Anordnung zweier Spulen	44
Bild 3.3:	Abhängigkeit des Kopplungsfaktors k vom Abstand d bei einem im 13,56 MHz Bereich arbeitenden RFIDS-System	47
Bild 3.4:	Abhängigkeit des Kopplungsfaktors k vom Abstand d bei unterschiedlichen Verhältnissen der Radien beider Spulen zueinander	48
Bild 3.5:	Prinzipieller Aufbau eines Übertragers	49
Bild 3.6:	Resonanzübertrager mit beidseitigen Resonanzschwingkreisen	50
Bild 3.7:	Abhängigkeit des Verhältnisses von Scheinleistung am Eingang P_1 zur Wirkleistung am Ausgang P_2 vom Kopplungsfaktor k	68
Bild 3.8:	Betrag der z -Komponente der magnetischen Feldstärke H in z -Richtung in Abhängigkeit des Abstandes d	70
Bild 4.1:	Abhängigkeit der Bitfehlerrate P_e vom maximalen Signal zu	

	Rauschverhältnis SNR_{\max}	76
Bild 4.2:	Aufbau eines kohärenten Detektors	78
Bild 4.3:	Aufbau des inkohärenten Detektors	78
Bild 4.4:	Aufbau des Detektors für das Verfahren mit DBPSK-Modulation	78
Bild 4.5:	Aufbau der inkohärenten ASK- und FSK-Detektoren	79
Bild 4.6:	Signal-Übertragungsmodell	81
Bild 4.7:	Übertragungskanalmodell	82
Bild 4.8:	Detektor Model eines Hüllkurven-Demodulators	84
Bild 4.9:	Rauschmodel des Komparators	85
Bild 4.10:	Definition der Wortbreite M	86
Bild 4.11:	Definition der Periodenlänge N'M Bit	87
Bild 4.12:	Betrachtung einer Nachricht aus K Perioden	88
Bild 4.13:	Betrachtung unterschiedlicher Fehler in einer Nachricht (Oben: 1/2 LSB-Fehler zu jedem Zeitpunkt; Mitte: 1 einzelner MSB-Fehler über die ganze Nachricht; Unten: fehlerfrei)	89
Bild 5.1:	Architektur eines passiv versorgten RFIDS-Transceiver-ICs	93
Bild 5.2:	Schaltungsblöcke eines RF-Frontends und ihre Eingangs- und Ausgangsbezeichnungen	95
Bild 5.3:	Schaltungsblock "Versorgung" eines RF-Frontends	96
Bild 5.4:	Übertragungscharakteristik einer idealen und einer Halbleiterdiode	97
Bild 5.5:	Übertragungscharakteristik eines als Diode geschalteten NMOS-Transistors	98
Bild 5.6:	Einweggleichrichtung mit einem MOS-Transistor	99
Bild 5.7:	Schematische Darstellung der Spannungsverläufe einer Einweggleichrichtung	99
Bild 5.8:	Funktionsprinzip eines regelbaren Gleichrichters mit einem gesteuerten Schalter	100
Bild 5.9:	Realisierung des regelbaren Gleichrichters in einer CMOS-Technologie	101
Bild 5.10:	Schematische Darstellung der Spannungsverläufe an einem Gleichrichter mit einem gesteuerten Schalter	102
Bild 5.11:	Spannungsbegrenzung für induzierte Spannung bei Versorgungsspannungen kleiner 5 V	103
Bild 5.12:	Spannungsbegrenzung für induzierte Spannungen bei Versorgungsspannungen größer 5 V	104
Bild 5.13:	Strom-Spannungsabhängigkeit bei der Überspannungsschutzschaltung	105

Bild 5.14: ESD-Schutzstrukturen auf einem Siliziumchip: links mit Halbleiterdioden und rechts mit als Diode geschalteten Transistoren	106
Bild 5.15: Aufbau einer konstanten Stromquelle	107
Bild 5.16: Aufbau einer Spannungsregelung	110
Bild 5.17: Schaltungsblock „Taktextraktion“ des RF-Frontends	111
Bild 5.18: Taktextraktion mit einem Inverter und eingebauter Hysterese der Schaltschwelle	112
Bild 5.19: Zeitverlauf der Taktextraktion	113
Bild 5.20: Taktextraktion mit einer Schmitt-Trigger-Schaltung	114
Bild 5.21: Blockschaltbild einer Phasenregelschleife (PLL)	115
Bild 5.22: Schaltungsblock „Daten“ des RF-Frontends	116
Bild 5.23: ASK-Modulator	117
Bild 5.24: ASK-Modulator mit einer OOK-Modulation	118
Bild 5.25: Architektur des Hüllkurvendemodulators	119
Bild 5.26: Querschnitt durch ein verteiltes RC-Glied	120
Bild 5.27: Querschnitt durch ein konzentriertes RC-Glied	121
Bild 5.28: Funktionsweise des Hysteresekomparators	123
Bild 5.29: Hysteresekomparator als differentielle Eingangsstufe	124
Bild 6.1: Architektur des Retina Implantat Systems zur Netzhautstimulation	130
Bild 6.2: Blockschaltbild des Retina Implantat Systems	131
Bild 6.3: Blockdiagramm der Algorithmenabläufe zur Generierung der Ortsfilter, die den individuellen rezeptiven Feld-Funktionen entsprechen	133
Bild 6.4: Dynamik der Pixel	134
Bild 6.5: Architektur des logarithmischen Bildsensors mit 128 x 128 Pixeln	135
Bild 6.6: Chipphoto des 128 x 128 CMOS-Bildsensors	136
Bild 6.7: Aufnahme der 128 x 128 CMOS-Kamera	137
Bild 6.8: Blockschaltbild der Telemetrieinheit	139
Bild 6.9: Chipphoto des integrierten Transceivers	140
Bild 6.10: Blockschaltbild der Stimulationselektronik	141
Bild 6.11: Chipphoto der integrierten Stimulationselektronik	142
Bild 6.12: Darstellung des aufgebauten Retina-Implantates	143
Bild 6.13: Hohe flexible Siliziumteststrukturen (links eine mit einer Vakuumpinzette angehobene Struktur und rechts ein um 90° gebogener Siliziumchip)	144
Bild 6.14: Aufbau der diskreten Übertragungsstrecke	145

Bild 6.15:	Messung der mit den Daten modulierten Trägerschwingung bei unterschiedlicher Zeitauflösung auf der Seite des Transceivers	145
Bild 6.16:	Meßergebnisse der demodulierten und dekodierten Daten des Transceivers bei unterschiedlichen Zeitauflösungen	146
Bild 6.17:	Ausgangssignale an zwei Elektroden der Stimulationselektronik über einem 27 k Ω Widerstand abgegriffen	147
Bild 6.18:	Darstellung des angeschlossenen Transceivers im Retina-Implantat	147
Bild 6.19:	Messung der mit einer externen Gleichrichterdiode gewonnenen Versorgungsspannung (linke Seite) und der anschließend auf dem Chip geregelten digitalen Versorgungsspannung (rechte Seite)	148
Bild 6.20:	Messung der demodulierten Daten im Transceiver bei unterschiedlicher Zeitauflösung	148
Bild 6.21:	Messung des extrahierten und anschließend durch den Digitalteil heruntergeteilten Taktes	149
Bild 6.22:	Messung der dekodierten Daten im Transceiver bei unterschiedlicher Zeitauflösung	149
Bild 6.23:	Darstellung der angeschlossenen Stimulationselektronik	150
Bild 6.24:	Messung des aus den Daten in der Stimulationselektronik umgesetzten Stromes über zwei Elektroden an einem 27 k Ω Widerstand	150
Bild 6.25:	Architektur des intraokularen Drucksensorsystems	152
Bild 6.26:	Blockschaltbild des Transceiverchips mit einer externen Antennenspule	153
Bild 6.27:	Blockschaltbild der Struktur des EEPROMs	154
Bild 6.28:	Aufbau einer EEPROM-Zelle	155
Bild 6.29:	Das Prinzip der Sensorausleseschaltung	156
Bild 6.30:	Änderung der Sensorkapazität in Abhängigkeit des Drucks	157
Bild 6.31:	Schaltungstechnische Realisierung der Sensorausleseschaltungen	157
Bild 6.32:	Zeitdiagramm der Auflade- und Entladevorgänge des Oszillators	159
Bild 6.33:	Zeitdiagramm der Meß- und Übertragungszyklen	161
Bild 6.34:	Chippfoto des intraokularen Drucksensorsystems	162
Bild 6.35:	Messung des Drucksensors mit verschiedenen Durchmessern d der Drucksensorelemente	163
Bild 6.36:	Kommunikation zwischen dem integrierten Chip und der externen Basiseinheit	164
Bild 6.37:	Prototyp des intraokularen Drucksensorsystems	165

Bild A.1:	Verkettung zweier gekoppelter Spulen a) nur Spule 1 stromdurchflossen b) nur Spule 2 stromdurchflossen	180
Bild A.2:	Schaltsymbole der gekoppelten Spulen a) gleichsinnig gewickelte Spulen, b) gegensinnig gewickelte Spulen	185
Bild A.3:	Resonanzübertrager mit beidseitigen Resonanzschwingkreisen	187
Bild A.4:	Zeitfunktion einer Amplitudentastung	198
Bild A.5:	Spektrum einer Amplitudentastung	199
Bild A.6:	Amplitudentastung zwischen zwei unterschiedlichen Versorgungsspannungen	200
Bild A.7:	Zeitfunktion einer phasenkontinuierlichen Frequenzumtastung	202
Bild A.8:	Spektren bei Frequenzumtastung mit verschiedenem Modulationsindex	203
Bild A.9:	Zeitfunktion einer Zweiphasenumtastung	205
Bild A.10:	Spektrum einer Zweiphasenumtastung	206
Bild A.11:	BPSK-Modulator und zugehöriges Phasendiagramm	206
Bild A.12:	Zeitfunktion der Vierphasenumtastung	207
Bild A.13:	Spektrum bei Vierphasenumtastung	208
Bild A.14:	Aufbau eines I/Q-Modulators	209
Bild A.15:	Phasenzustandsdiagramm der Vierphasenumtastung	210
Bild A.16:	Phasenzustandsdiagramm einer 16-QAM	211