

# **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

<b>VORWORT .....</b>	<b>II</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>III</b>
<b>FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 GRUNDLAGEN DER DRAHTLOSEN SIGNAL- UND ENERGIEÜBERTRAGUNG.....</b>	<b>1</b>
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
<b>3 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN FÜR PASSIV VERSORGTE RFID- UND RFIDS-SYSTEME.39</b>	
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

<b>4</b>	<b>UNTERSUCHUNG VON DIGITALEN MODULATIONSVERFAHREN FÜR CMOS</b>	
	<b>TRANSCEIVER .....</b>	<b>72</b>
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
<b>5</b>	<b>CMOS SCHALTUNGSTECHNIK FÜR PASSIV VERSORGTTE TRANSCEIVER.....</b>	<b>92</b>
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
<b>6</b>	<b>ANWENDUNGEN VON CMOS-TRANSCEIVER.....</b>	<b>128</b>
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
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>166</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>170</b>
<b>A</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>179</b>
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

$\alpha_R$	linearer Temperaturkoeffizient eines Widerstandes
$\beta$	Steilheitskonstante des MOS-Transistors
$\Delta C$	Kapazitätshub eines Drucksensorelements
$\Delta f_T$	Frequenzhub
$\Delta \varphi_T$	Phasenhub
$\Delta R$	Widerstandsänderung
$\Delta T$	zeitliche Differenz
$\Delta U$	Spannungsänderung
$\Phi$	Streufluß
$\Phi_m$	magnetischer Fluß
$\eta$	Wirkungsgrad einer Antenne
$\eta_F$	Flächenwirkungsgrad
$\varphi$	Phasenwinkel
$\varphi_T$	Phasenwinkel einer Trägerschwingung
$\varphi_{Tw}$	Wechselanteil eines Phasenwinkels einer Trägerschwingung
$\lambda$	Wellenlänge
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\theta$	Rotationswinkel
$\sigma$	Rückstreuquerschnitt, Streufaktor

---

$\tau$	Zeitkonstante
$\tau_k$	Zeitkonstante eines kontinuierlichen RC-Filters
$\tau_v$	Zeitkonstante eines verteilten RC-Filters
$\omega$	Kreisfrequenz
$\omega_0$	Resonanzfrequenz
$\omega_{\text{res}}$	Resonanzfrequenz eines lose gekoppelten Systems
$\omega_s$	Kreisfrequenz der Signalschwingung
$\omega_T$	Kreisfrequenz der Trägerschwingung
$\Psi$	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
$B_{\text{HF}}$	Bandbreite im hochfrequenten Übertragungskanal
BMBF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
$B_N$	Nyquist-Bandbreite
BPF	Bandpaßfilter
$B_{\text{Praxis}}$	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
$f_{\text{Bit}}$	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
$f_{\text{Tw}}$	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)
$I_{\text{aus}}$	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
$I_{\text{ein}}$	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

---

$P_{\text{refl}}$	vom Transceiver reflektierte Leistung
PS	Phasen-Shifter
$P_S$	Strahlungsleistung
PSK	Phase Shift Keying, - Phasenumtastung
$P_T$	Leistung einer Trägerschwingung
$P_{\text{USB}}$	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
$R_{\text{ab}}$	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

---

$r_{\text{sens}}$	Radius eines Drucksensorelements
$r_{\text{sq}}$	Square-Widerstand
$r_{\text{T}}$	Radius der Transceiverspule
$R_{\text{T}}$	temperaturabhängiger Widerstand
$R_{\text{V}}$	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
$T_{\text{Bit}}$	Periodendauer eines Übertragungsbits
$t_{\text{max}}$	maximale Ladezeit
$t_{\text{min}}$	minimale Ladezeit
TPF	Tiefpaßfilter
$T_{\text{s}}$	Schrittdauer
$T_{\text{S}}$	Periodendauer eines Signals
$T_{\text{T}}$	Periodendauer einer Trägerschwingung
$T_0$	Bezugstemperatur
$U$	Spannung
$U_{\sim}$	Wechselspannung
$U_{=}$	Gleichspannung

---

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

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

# Abbildungsverzeichnis

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



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

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

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

---

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