Entwicklung eines drahtlosen Kommunikationssystems zur Kommando- und Datenübertragung zwischen Mikrorobotern und ihrer Steuerungseinheit

Dissertation zur Erlangung des Grades des Doktors der Ingenieurwissenschaften der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II – Physik und Mechatronik – der Universität des Saarlandes

von

Marc Nierlich

Saarbrücken

2009

Entwicklung eines drahtlosen Kommunikationssystems zur Kommando- und Datenübertragung zwischen Mikrorobotern und ihrer Steuerungseinheit

Dissertation zur Erlangung des Grades des Doktors der Ingenieurwissenschaften der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II – Physik und Mechatronik – der Universität des Saarlandes

von

Marc Nierlich

Saarbrücken

2009

Tag des Kolloquiums:

Dekanin/Dekan:

Mitglieder des Prüfungsausschusses: Vorsitzender Erster Gutachter Zweiter Gutachter Dritter Gutachter Akademischer Mitarbeiter 19.01.2010

Prof. Dr. Christoph Becher

Prof. Dr. Chihao Xu Prof. Dr. Günter Rolf Fuhr Prof. Dr. Alfons Blum Prof. Dr. Helmut Seidel Dr.-Ing. Dara Feili

Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Saarbrücken, den 14. April 2009

Marc Nierlich

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Mikroroboter-Kommunikationssystem entwickelt, das mobile, drahtlose, cm³-große Mikroroboter mit der Steuerungseinheit einer flexiblen, mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation verbindet.

Um insbesondere die durch Skalierungseffekte ausgelösten Unwägbarkeiten bei der Handhabung und Manipulation von Mikroobjekten auszugleichen, setzen Mikromanipulations-Tischstationen vermehrt auf kooperierenden Mikrorobotereinsatz durch mobile, möglichst nur wenige Kubikzentimeter kleine Mikroroboter. Gegenwärtige Tischstationen sind jedoch noch weit davon entfernt, auf autonome, zu Inferenzprozessen fähige Mikroroboter mit Nanometerpräzision zurückgreifen zu können. Daher ist eine informationstechnische Anbindung der Mikroroboter an eine übergeordnete Manipulationsplanungsund -steuerungseinheit durch ein drahtloses, für den Multirobotereinsatz geeignetes Kommunikationssystem unbedingt erforderlich.

Nach Ableitung eines Anforderungskatalogs, der die Komplexität mikroroboterbasierter Mikromanipulationsstationen einerseits und die Einschränkungen aufgrund der stark miniaturisierten Mikrorobotersysteme andererseits berücksichtigt, wurden verschiedene Kommunikationsverfahren und –standards verglichen. Darauf basierend wurde ein Kommunikationssystem konzipiert und umgesetzt, welches drahtlosen, mobilen Mikrorobotern in Mikromanipulationsstationen eine möglichst robuste und schnelle Datenübertragung bei geringem Energiebedarf bietet. Herzstück bildet ein neu entwickeltes ASIC-Modul, das in jede Mikroroboterelektronik entweder in Form eines Hybrids oder aber direkt in einen Mikroroboter-Kontroll-ASIC integriert werden kann.

Da sich das für den Multirobotereinsatz konzipierte Kommunikationssystem an bereits in der Industrie etablierten Standards orientiert, bietet es interessante Konzepte und Lösungsansätze, um unter Beachtung der Entwicklungs- und Herstellungskosten die Integration in Mikromanipulations-Tischstationen der neusten Generation ebenso wie die Adaption an bereits bestehende Mikromanipulatoren zu erleichtern.

Summary

Within the scope of this dissertation a communication system for micro-robots was developed that links mobile wireless micro-robots of cm³ size with the control unit of a versatile, micro-robot-based micromanipulation station.

In particular with a view to offsetting scale effects triggered by imponderables when handling and manipulating micro-objects, micro-manipulation table stations are turning increasingly towards cooperating micro-robot solutions utilizing mobile micro-robots of preferably just a few cubic centimetres in size. However, table stations are presently far from being able to turn to autonomous, inference-process capable micro-robots working to nanometre precision. Consequently, it is imperative to have a data link connecting the micro-robots to a higher-level manipulation planning and controlling unit by means of a wireless communication system that is suitable for deployment in multi-robot solutions.

Various communication systems and standards were compared after drawing up a catalogue of requirements that takes into consideration the complexity of micro-robot-based micro-manipulation stations on the one hand and the restrictions arising from highly miniaturized micro-robotic systems on the other. This then formed the basis for the design and implementation of a communication system that offers robust and fast data transmissions in conjunction with low energy requirements for wireless mobile micro-robots deployed in micro-manipulations stations. At its core is a newly developed ASIC module that can be integrated in any micro-robot electronics as a hybrid solution or even directly in a micro-robot control ASIC.

And because the communication system, which is designed for use in multi-robot solutions, is oriented on established standards it offers interesting concepts and approaches to solutions that allow integration in the latest generation of micro-manipulation table stations as equally as adaptation to legacy micro-manipulators whilst at the same time taking into account the costs for development and manufacturing.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsv	erzeichnis	V
Tabellenverz	eichnis	IX
Akronyme		X
1 Einleitui	ng	1
1.1	Gliederung der Arbeit	2
2 Mikrom	anipulationssysteme	5
2.1	Mikrosystemtechnologie	5
2.2	Problematik bei der Mikrohandhabung	7
2.3 2.3.1 2.3.2 2.3.3	Mikromanipulationssysteme Manipulieren und Handhaben mit Robotern Manuelle Mikromanipulationssysteme Automatisierte Mikromanipulationssysteme	10 10 13 13
2.4 2.4.1 2.4.2 2.4.3	Mikroroboter Grundanforderungen Klassifikation von Mikrorobotern Mikroroboter in Mikromanipulationsstationen	26 26 26 31
2.5	Formulierung der Aufgabenstellung	40
3 Kommu	nikation in der Robotik	41
3.1	Drahtlose Kommunikation	41
3.2	Induktive Nahfeldkommunikation (NFC)	43
3.3 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4	Funktechnik – drahtlose Netzwerke Funktechniken WLAN – IEEE 802.11, HomeRF, HiperLAN WPAN Nachteile der Funksysteme (WLAN, WPAN, UWB)	43 45 47 48 55
3.4 3.4.1 3.4.2 3.4.3 3.4.4 3.4.5 3.4.6 3.4.7 3.4.8	Drahtlose Infrarot-Kommunikation Klassifikation optischer Verbindungen Sender und Empfänger Optische Modulation und Detektion Freiraumdämpfung und Störquellen Elektrische Modulationstechniken Energiebezogene Größen IrDA-Standard für direkte LOS-Verbindungen Vergleich von IR-Kommunikation mit RF-WPAN	56 57 58 59 61 63 63 66
3.5 3.5.1 3.5.2	Drahtgebundene USB-Kommunikation USB allgemein Übertragungsmodi	68 68 68

Ι

nheit 87 89 89 89 89 89
73 73 74 78 80 81 81 83 84 84 84 84 84 88 89 89
n 80 81 81 83 84 84 84 87 88 88 89 89
81 81 83 84 84 84 87 88 88 89 89
84 84 87 88 89 89
88 89 89
89 89
91
99 99 100 101 101 103
107
107
108 108 109 110 113 118 e 119
119
122 122 123
127
127
130 130 132 133 135 136 136

6.2.8	IR-Applikation ROBOCOMM	138
6.3 6.3.1 6.3.2 6.3.3	USB-Linux-Treiber /proc-Dateisystem Treiberfunktionen Auswählen und Laden des Treibers	141 141 142 145
7 Ergebnisse	e und ihre Diskussion	147
7.1 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.4	ASIC-Modul IRC Testhardware und Testverfahren Programmierung des Transceivermoduls IR-Kommunikation Data Exchange Interface	147 147 148 149 152
7.2 7.2.1 7.2.2	Basisstation RовоСомм IR-Kommunikation USB2.0-Kommunikation	153 153 155
7.3 7.3.1 7.3.2 7.3.3 7.3.4	Einsatz in der Mikromanipulationsstation Integration in den MiCRoN-Mikroroboter IR-Kommunikation mit dem MiCRoN-Roboter Ansteuersignalerzeugung – Reset-By-IR Integration in die MiCRoN-Manipulationsstation	158 158 159 160 163
8 Zusamme	nfassung und Ausblick	167
8.1	Zusammenfassung	167
8.2 8.2.1 8.2.2 8.2.3	Ausblick Weiterentwicklung des <i>IRC</i> s Analog-Frontend Weitere Einsatzszenarien	169 170 171 172
Literaturverzei	ichnis	175
Anhang		197
Anhang A	Systementwicklung	199
A.1	ASIC-/FPGA-Design	199
A.2	Herstellerangaben zu TFDU6108	200
A.3 A.3.1 A.3.2 A.3.3 A.3.4 A.3.5 A.3.6 A.3.7 A.3.8 A.3.9 A.3.10	ROBOCOMM-USB-Konfiguration Register IR Mode Control Register SIR Line Control Register IR Tx-/Rx-Unit Control Register IR-USB-Device Configuration Register TFDU CONF Register Tx Current TFDU Register IR TxEcho Rejection Register IR-RxTxDelay Register IR-RxTimeout	200 200 201 201 202 203 203 203 204 204
A.4 A.4.1 A.4.2	ASIC-Testplatine Schematic Bestückungspläne	205 205 205
A.5 A.5.1 A.5.2	RoboComm-PCB Schematic Bestückungspläne	206 206 207

A.6	Teilausschnitt eines SENDIR-Testskripts	208
Anhang B	Mikroroboter	209
B.1 B.1.1	Drahtgebundene stationäre Systeme AoLAB Miniroboter-Tischstation	209 209
B.2	Verteilte, kooperative Roboter	210
B.3 B.3.1 B.3.2 B.3.3	Mikroroboterantriebe Elektrostatische Aktoren Elektromagnetische Aktoren Piezoelektrische Aktoren	212 212 213 214
B.4 B.4.1	Energieversorgung Kabellose Energieübertragung	217 218
Danksagung		221

Abbildungsverzeichnis

5 Bild 2.1: Struktur eines vollständigen Mikrosystems Bild 2.2: SEM-Bilder eines zellulären multiaxialen kapazitiven Kraftsensors 6 7 Bild 2.3: Hybrides Beschleunigungsmesssystem der Colibrys (Switzerland) Ltd. 7 Bild 2.4: Vergleich von Oberflächen- und Volumeneffekten in Abhängigkeit von der Strukturgröße Bild 2.5: Mikrozahnrad haftet an Endeffektor an. 8 Bild 2.6: Match-X Mikrosystembaukasten 10 Bild 2.7: MiniMoS-Mikromontagestation 10 Bild 2.8: Ein Biologe bedient die Mikromanipulatoren eines ICSI-Arbeitsplatzes. 13 Bild 2.9: Prinzipieller Aufbau einer Mikromanipulations-Tischstation 13 Bild 2.10: Mikromontagesstation der TU HELSINKI in geregelter Umgebung 14 Bild 2.11: GUI für teleoperierten Betrieb des NANOROBOTERS an der ETH ZÜRICH 14 Bild 2.12: Direkt teleoperiertes Manipulationssystem des japanischen Forschungslabors AOLAB 15 Bild 2.13: Aufgabenorientierte Teleoperation: Die Bahn für einen Pipettengreifer wird mittels GUI definiert. 15 Bild 2.14: Ausschnitt einer GUI zur Überwachung dreidimensionaler Mikromontageoperationen 16 17 Bild 2.15: Bildgenerierung durch Defokussiermethode 18 Bild 2.16: Gewinnung der 3D-Bildinformation durch zusätzliche mikroskopische Sichtachse 18 Bild 2.17: Montagestation für ortsfeste Mikroroboter mit verteilt angeordneten Miniaturmikroskopen Bild 2.18: Arbeitsfläche mit vergrößerter Darstellung der per STM analysierten Kohlenstoffgitteroberfläche 18 Bild 2.19: Konzept der NanoWalker Manipulationszelle mit globalem Sensorsystem 19 Bild 2.20: Globales Sensorsystem mit verteilen IR-PSDs für den Einsatz des NanoWakers 19 Bild 2.21: Flexible mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstation mit Mikroroboter MINIMAN-II 20 22 Bild 2.22: Modulare Steuerungsarchitektur einer flexiblen Mikromanipulationsstation 25 Bild 2.23: Informationsfluss in einer mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation 27 Bild 2.24: Der zur Terrainerkundung eingesetzte Mesoskalaroboter Scout Bild 2.25: Hybriddesign des solarbetriebenen, ortsfesten Mikro-Sensorknoten MOTE 27 Bild 2.26: Klassifikation von Mikrorobotern nach Funktionseinheiten 29 Bild 2.27: Roomba Staubsaugerroboter der Firma IROBOT 30 Bild 2.28: Mikromontagestationmit ortsfesten Mikrorobotern 31 Bild 2.29: Autonomes Mikroroboter-Zellinjektionssystem für DNA-Injektionen und ICSI-Operationen 31 Bild 2.30: Zellinjektion bei einem Maus-Embryo (im Pronucleus-Stadium) 31 Bild 2.31: Am AMIR der UNI OLDENBURG entwickelte kabelbetriebene mobile Miniaturroboter 32 Bild 2.32: MINIMAN IV assistiert MINIMAN III als "helfende Hand" beim Ablegen eines Mikroteils 33 Bild 2.33: Prototypen mobiler kabelbetriebener Mesoskalaroboter für Mikromanipulationen in einer FMMS 33 35 Bild 2.34: Die Architekturen KHEPERA und KHEPERA II Bild 2.35: Mikrogreifer der Scuola Superiore Sant'Anna 35 Bild 2.36: Der am MIT entwickelte NanoWalker (CAD-Darstellungen) 36 Bild 2.37: Der autonome Miniroboter ALICE 37 Bild 2.38: Miniroboter MARV mit Temperatursensor, Schrittmotor, aber ohne Kommunikationsschnittstelle 37 Bild 2.39: Hybriddesign des energieautonomen, mobilen Mikroroboters 37 Bild 2.40: Piezoaktorisch angetriebener Miniroboter NANORUNNER mit Batteriepack 38 Bild 3.1: Induktives System zur Energie- und Datenübertragung 43 Bild 3.2: Qualitative Betrachtung von Funkstandards bzgl. Frequenzbereich, Datenrate und Reichweite 43 Bild 3.3: Übersicht über funkbasierte WPAN- und WLAN-Systeme bzgl. Datenrate und Reichweite 45 Bild 3.4: Punkt-zu-Punkt-, Punkt-zu-Multipunkt- und Scatternetz-Modus 50 Bild 3.5: Synchrone und asynchrone Bluetooth-Kommunikation 51 Bild 3.6: Übersicht über ISO-OSI-Schichtenmodell, Bluetooth, ZigBee und WPAN-Standard IEEE 802.15 52 Bild 3.7: Qualitativer Vergleich der Leistungsdichtesprektren von Schmalbandsystemen und UWB-Technik 53 Bild 3.8: Kommunikationsschnittstellen des Miniaturroboters Alice 54 56 Bild 3.9: Drahtloser Infrarot-Kommunikationskanal 57 Bild 3.10: Klassifikation optischer Verbindungen nach Direktionalität und Sichtbarkeit 60 Bild 3.11: Richtungsgewinn eines modifizierten Lambert'schen Strahlers

Bild 3.12: Normalisiertes Leistungsdichtespektrum für umgebende Infrarotstrahlungsquellen	60
Bild 3.13: Vergleich verschiedener binärer Modulationsverfahren	61
Bild 3.14: Leistungsdichtespektren einiger Modulationstechniken aus Bild 3.13	61
Bild 3.15: Vergleich von Bandbreiten- und Leistungseffizienz verschiedener Modulationstechniken	61
Bild 3.16: Modulationsvertahren und ihre elektrischen bzw. optischen Anforderungen (10-Mbit-Datenrate)	61
BIId 3.17: IFDA-Protokolistack	64
Bild 3.18: Kommunikationskanale zwischen Client-Datenputtern und zugenörigen USB-Endpoints Bild 2.10: Kommunikationskanale zwischen Client-Datenputtern und zugenörigen USB-Endpoints	69 70
Bild 2.19: Kommunikationshuas im USB-system Bild 2.20: Kommunikationshunon des USB Protokolls	70
Dild J. 20. NOTHTHUHIKduonsebenen des USD-Frouvenis Pild J. 1: MicPoN Mikromanipulationseustom: mahrora Mikrorahatar arheitan im Cluster zusammen	71
Rild 4.2: MiCRON Manipulationsstation: Enorgiovorsorgung, Sonsoron Stouorungsoinhoit, Kommunikation	77
Rild 4.3: CAD-Darstellung des On-Roard-Kamerasystems für die MiCRoN Maninulationsstation	75
Bild 4.4: Rasterkraftmikroskop (AFM) als lokales Sensorsystem für mobile Mikroroboter	75
Bild 4.5. Globales Sensorsystem der MiCRoN-Manipulationsstation	76
Bild 4.6: Durchflutung des MiCRoN Power Packs durch ein flächiges, wanderndes Magnetfeld	77
Bild 4.7: Der MiCRoN Power Floor für biologische Experimente	77
Bild 4.8: 3-DOF-Stick-Slip-Positioniereinheit $(10 \times 10^{\circ} \times 1 \text{ mm}^{3})$ mit Saphirhalbkugeln	78
Bild 4.9: Manipulationseinheit des MiCRoN-Roboters	79
Bild 4.10: Konzept des Kommunikationssystems für eine mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstation	81
Bild 4.11: Bauform eines IrDA-Transceivermoduls	89
Bild 4.12: Graphische Darstellung der Energie/Bit-Abhängigkeit entsprechend Tabelle 4.2	91
Bild 4.13: Die asynchronen Übertragungsmodi SIR und SIRpMiCRoN mit '/RZI-OOK	91
Bild 4.14: MIR-Modus mit /-RZI-OOK	92
Bild 4.15: Codierung der Datenbitpaare bei FIR	92
Bild 4.16: Schwellenproblematik bei harter (digitaler) Detektion	92
Bild 4.17: Aufbau der IR-Nutzlast	93
Bild 4.18: An IrLAP angelehnte Datenstruktur für die IR-Übertragung	93
Bild 4.19: Datenstruktur des Acknowledge	95
Bild 4.20: Selektiver Schreib- bzw. Lesetransfer von Roboterdaten	96
Dild 4.21. Sequentiener Schreib- bzw. Lesenansier von Kobolendalen Pild 4.22: Statusaptwort des IPC	90
Rild 4.22: 20 Rytes umfassender IOC ontrol-Datenstrom zur Konfiguration von ROROCOMM	101
Rild 4.24: Struktur eines USB-Datenrahmens für eine Schreiboneration	101
Bild 4.25: Kontrollbytes innerhalb eines RoвоCомм-Erames	102
Bild 4.26: (m+1) verkettete RoboComm-Frames innerhalb eines USB-TxFrames	102
Bild 4.27: Detaildarstellung eines aus (m+1) RовоСомм-Frames zusammengesetzten USB-TxFrames	103
Bild 4.28: Struktureller Aufbau der Compose-Instruktion	104
Bild 4.29: Aufbau der Empfangsbestätigungsbotschaft (Acknowledge-Datenpaket)	104
Bild 4.30: Bitkonfiguration der Kontrollbytes zur Bestätigung der IR-Empfangsquittung	104
Bild 4.31: Aufbau des Antwortpaketes zur Meldung eines Übertragungsfehlers	105
Bild 4.32: Bitkonfiguration der Kontrollbytes für eine Fehlermeldung	105
Bild 4.33: Aufbau eines Antwortpaketes zur Übertragung von Roboterdaten	105
Bild 4.34: Bitkonfiguration der Kontrollbytes bei der Übertragung von Roboterdaten	105
Bild 4.35: Beispiel für bidirektionalen USB-Datentransfer	106
Bild 5.1: BIOCKSChaltbild des ASIC-Moduls IKC	109
Bild 5.2: FSIM-Flussalagramm der IRC-CPU Bild 5.2: Datentransfer über das Data Evsbange Interfase	 110
Bild 5.3. Daternialister uber uds Data Excitative interface Rild 5.4: IR Puls-Dataktion mittals Soamontzählar und Elankondataktionsfonstor (ohno IRC-DU.)	115
Rild 5.5: IR-Puls-Detektion mittels Segmentzähler und Flankendetektionsfenster (mit IRC-DLL)	116
Bild 5.6: EPGA-Entwicklungsplattform	119
Bild 5.7: FPGA-Design zur Emulation des IRCs und seiner wesentlichen Einzelkomponenten	120
Bild 5.8: Test der FIR-Übertragung	121
Bild 5.9: Energiebedarf einer MiCRoN-Vorentwicklung bei Übertragung eines Acknowledge (115,2 kbit/s)	121
Bild 5.10: Blockschaltbild des Kontroll- und Kommunikations-ASICs MXS	122
Bild 5.11: Layout des MXS nach Einbindung aller Komponenten innerhalb des PAD-Rings	124
Bild 5.12: Gefertigter Mikroroboter-Kontroll-ASIC MXS einschließlich des ASIC-Moduls IRC	125
Bild 6.1: Aufbau der Basisstation RoвоСомм mit ihren wesentlichen Funktionskomponenten	127
Bild 6.2: Hardware der Basisstation RoвоСомм	128
Bild 6.3: Top-Layer der RoвоCомм-PCB	129
Bild 6.4: Bottom-Layer der RoboComm-Erweiterungskarte	129
Bild 6.5: Zwei bestuckte IK-Analog-Frontends mit IEEE1394-Kabelsteckverbindung	130
BIIU 0.0. FUTIKUUNSDIOCKE TUF UAS FPGA-DESIGN DEF KOBOLOMM-BASISSTATION Bild 6.7: Plackdiagramm für dia VLIDL Entity ISD https://cr	1 <i>3</i> 1 127
DIIU 0.7. DIUCKUIAGIAIIIII IUI UIE VITUL-ENIILY ISPINIERFACE Rild 6.8: ESM für Firmward CNTRI	13Z 125
BIG 0.0. ESWERULE HITHWARE CIVINE	ככו

Bild 6.9: Aufbau der IR-Applikation RовоСомм mit ihren wichtigsten Funktionsblöcken	139
Bild 6.10: Enumeration der RoвоСомм-Basisstation als High-Speed-USB-Gerät	143
Bild 6.11: Einbindung der RoвоСомм-USB-Treiberfunktionen in das Lınux-Betriebssystem	143
Bild 6.12: Identifikation des zugehörigen RовоСомм-Gerätetreibers über Product-ID und Vendor-ID	145
Bild 7.1: Die auf das FPGA-Board aufgesteckte ASIC-Testplatine wird mit einem MXS (PLCC) bestückt.	147
Bild 7.2: Messung der IRC-Steuersignale bei Programmierung eines Transceivermoduls per SITC	148
Bild 7.3: Reaktion des IRC auf die Instruktion get_echo im SIR-Modus bei 115,2 kbit/s	149
Bild 7.4: Antwort des IRCs im FIR-Modus	150
Bild 7.5: Generierung eines trapezförmigen Ausgangssignals durch Übermittlung von IR-Datenpaketen	152
Bild 7.6: Ausschnittsvergrößerung des in Bild 7.5 dargestellten trapezförmigen Ausgangssignals	152
Bild 7.7: Durch write-DMA-Befehle werden für DAC1 und DAC2 trapezförmige Signale generiert	152
Bild 7.8: Die Basisstation initiiert synchrone FIR-Ubertragungen mit einer 1-ms-Periode.	154
Bild 7.9: Die Basisstation sendet ein IR-Datenpaket mit aktivierter Echo-Unterdrückung.	154
Bild 7.10: Graphische Benutzeroberfläche zur Konfiguration der RoвоСомм-Basisstation	156
Bild 7.11: Kontrolle des Nutzdatentransfers zwischen der Basisstation und dem IRC bzw. MXS	156
Bild 7.12: IR-Ubertragungen mit einem RoвоСомм-Frame je USB-TxFrame und Auslesen der IRC-Antwort	156
Bild 7.13: Sukzessive Ubertragung von Reset-By-IR-Sequenzen mit nicht verketteten RoboComm-Frames	157
Bild 7.14: FIR-Ubertragung von Reset-By-IR-Sequenzen bei Verkettung mehrerer RoвоСомм-Frames	157
Bild 7.15: Ausschnittsvergrößerung von Bild 7.14	157
Bild 7.16: Die ASIC-PCB mit MXS und zwei PAAs	158
Bild 7.17: Das Transceivermodul IFDU6108 auf der Platine ISC (Input Sensing for Control)	158
Bild 7.18: Der 4,12 cm ³ kleine MiCRoN mit TFDU6108, Power PACK, Moiré-Markern und "SyringeChip"	159
Bild 7.19: Das Sichtfeld (FOV) des TFDU6108 ist teilweise eingeschränkt.	159
Bild 7.20: Messaufbau zur Überprüfung der Ansteuersignalerzeugung mittels Oszilloskops	161
Bild 7.21: Per IR ubertragene Signalformparameter erzeugen am MiCRoN ein Sagezahnsignal.	161
Bild 7.22: Der MXS generiert für die negative Y-Richtung kein fallendes Sagezahnsignal	161
Bild 7.23: Generiertes Sagezahnsignal durch zeitgenaue IR-Ubertragung eines MXS-ACTUATOR-Resets	161
Bild 7.24: Zeitbegrenzte Erzeugung eines fallenden Sagezahnsignals mit Hilfe der Reset-By-IR-Strategie	162
Bild 7.25: Zu schnelle Überträgung der Keset-By-IR-Sequenz im Mik-Modus	162
Bild 7.26: Ausschnittvergroßerung von Bild 7.25	162
Bild 7.27: IK-Analog-Frontends der Basisstation wurden in ein Auflicht-Lichtmikroskop integrieft.	163
Bild 7.28: Drantioser MilcRon Kommuniziert auf dem eine Milwerkentisch für dierenden Deutse Fuees	164
Bild 7.29: Drei MilcRoiv-Mikroroboter auf dem als Mikroskoptisch fungierenden Power Floor	164
Bild 7.30: Manipulationstation mit Power Floor, globalem Sensorsystem und zwei MiCRON-Mikrorobolem	105
Bild 7.31: Spektraikurve des Warmeschulzhillers PGO5/400 zur Abschirmung von IR-Lichlahleilen Bild 7.32: MicRoN Manipulationsstation mit zwei MicRoNs, Dewer Floer, DepoConne und Sensersurtem	165
Dilu 7.32. MICRON-Mallipulation and Überwechung der Meninalationenrozerser für MiCRON	160
Dilu 7.55. GUI zur Simulation und Oberwächung des Manipulationsprozesses für Micholy Bild 9.1: Crößenvergleich zwischen Komergrebeter MINIMANI Mund Micholy	170
Dilu 6.1. Grobenvergreich zwischen Kameraloboler MinniviAn IV und Mickoln Bild A.1. Beschreibung des Digitaldesigns in der Hardwarebeschreibungssprache VIIDI	170
Dilu A. T. Beschreibung des Digitaldesigns in der Hardwarebeschreibungsspräche VHDL Bild A. 2: Logiksupthoso mit LoopordoSpoctrum Lovol 2	199
Dilu A.Z. Logiksimulation mit ModolSim SE 5. 8c von Montor Granhics	199
Pild A.J. ID Mode Control Pitkonfiguration	200
Rild A.5: Ritkonfiguration für das Register SIR Line Control	200
Rild A.G. Bitkonfiguration für IR Ty IRy Unit Control	200
Rild A 7: Bitkonstellation für IR-ISR-Device Configuration	201
Rild A 8: Bitkonfiguration des Registers TEDLI CONF	207
Rild A 9: Bitkonfiguration für das Registers TV Current TEDU	202
Rild A 10 [.] ASIC-Test-PCR (Teil1)	205
Rild A 11: ASIC-Test-PCR (Teil 2)	205
Rild A 12 [·] ASIC-Test-PCB – Top-Laver	205
Rild A 13: ASIC-Test-PCB – Bottom-Laver	205
Bild A 14 [·] RoboComm-PCB mit ISP1581 Av140-Bus Typ-B-USB-Konnektor und LFDs	206
Bild A 15: Schematic für TEDU6102	206
Bild A 16: Schematic für Transceivermodule TEDU8108 und TEDU6108 mit SITC-Schnittstelle	206
Bild A 17 [.] Anschlüsse der IR-Transceivermodule (mittels IFFE1394-Konnektoren) auf der RoвоСомм-РСВ	206
Bild A.18: ROBOCOMM-PCB – TOp-Laver	207
Bild A.19: RoвoComm-PCB — Bottom-Laver	207
Bild A.20: PCB für RoвоCомм-Transceivermodule TFDU8108, TFDU6108 und TFDU6102	207
Bild B.1: AoLAB Miniroboter-Tischstation zur automatischen Erzeugung eines Bohrlocharravs	209
Bild B.2: REM-Aufnahme des MEMS-Aktors zum Antrieb eines mikrotechnisch gefertigten Roboters	213
Bild B.3: Grundprinzip des Kriechantriebes	215
Bild B.4: Massenträgheitsantriebe: Stick-Slip und Impact Drive	216

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Auflistung einiger Mesoskala-, Miniatur- und Mikroroboter	42
Tabelle 3.2: Länderspezifische Spezifikationen des lizenzfreien 2,4-GHz-Bandes	44
Tabelle 3.3: Drahtlosnetzwerke: Unterschiede von WPAN, WLAN, WWAN und Satellitennetzwerk	44
Tabelle 3.4: Spezifikationen verschiedener WLAN-Varianten für 2,4 GHz und 5 GHz	47
Tabelle 3.5: Überblick über verschiedene WPAN-Realisierungen	49
Tabelle 3.6: Bluetooth-Funkklassen	50
Tabelle 3.7: Timingvergleich der WPAN-Standards Bluetooth und ZigBee	51
Tabelle 3.8: Eckwerte der zwei dominierenden UWB-Realisierungen	53
Tabelle 3.9: Frequenzen und Datenraten für LR-WPAN bzw. ZigBee	54
Tabelle 4.1: Eigenschaften verschiedener IR-Transceivermodule von Vishay und Agilent	89
Tabelle 4.2: Energie/Bit-Abhängigkeit vom Sendestrom (TFDU6108 mit 3,3V Versorgung)	91
Tabelle 4.3: Aufbau des Control-Bytes	95
Tabelle 4.4: Aufbau von IRC-Befehlen und Roboterkommandos inklusive Parameterbytes	96
Tabelle 4.5: Bitmap von IR-Select	96
Tabelle 4.6: Optionen für das SIR Line Control Register	97
Tabelle 4.7: RxTx-Parameter-Register	97
Tabelle 4.8: Zulässige Wertepaare für IR-Modus und Baudrate.	97
Tabelle A.1: Reichweite in Abhängigkeit vom per SITC programmierbaren Sendestrom für TFDU6108	200
Tabelle A.2: Binärcodierung zur Spezifikation der angeschlossenen Transceivermodule	202
Tabelle A.3: Einstellbare Stromstärken für die Module TFDU6108 und TFDU8108	203
Tabelle A.4: IR TxEcho Rejection Parameter	203
Tabelle B.1: Vergleich von Reichweite und Auflösung bei Positionierung mittels piezoelektrischer Aktoren	214
Tabelle B.2: Vergleich verschiedener Energiequellen bzgl. ihrer Energie und ihrer Größenabhängigkeit	217

Akronyme

ACI	Address-Control-Information	EDM	Electro Discharge Machining
ACL	Asynchronous Connection-less	EIRP	Effective Isotropically-Radiated Power
AEU	Autonomous Execution Unit	EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
AFM	Atomic Force Microscope, zu deutsch	EOF	End of Frame
	Rasterkraftmikroskop	EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de
AGV	Automated Guided Vehicle		Lausanne
AM	Amplitudenmodulation	FPM	Edge Position Modulation
ARO	Automatic Retransmission Ouerv	FPP	Enhanced Parallel Port
	Application Specific Integrated Circuit	FRC	Electrical Rule Check
ASK	Amplitude Shift Keving, zu deutsch	FSD	Electro Static Discharge
AJK	Amplitude sint Reynig, 20 deutsen	ETH	Eldanössischa Tachnischa Hachschula
ΔΤΝΑ	Ampiltudenumastung Asynchron Transfor Modo		
	Additive White Caussian Noise	ETSI	dards Institute
	Received a station of the station of		Converd Error Correction
DER	BILEITOI RALIO	FEC	
BOF	Beginning of Frame	FH	Frequency Hopping
BPSK	Binary Phase Shift Keying, zu deutsch	FHSS	Frequency-hopping spread spectrum
	Zweiphasenumtastung	FIFO	First-In-First-Out
BT	Bluetooth	FIR	Fast Infrared
CAS	Computer Aided Surgery	FMMS	Flexible mikroroboterbasierte Mikro-
ССК	Complementary Code Keying		manipulationsstation
CCITT	Comité Consultatif International Té-	FOV	Field of View
	légraphique et Téléphonique	FPGA	Field Programmable Gate Array
CE	Control Escape	FSK	Frequency Shift Keying, zu deutsch
CDMA	Code Division Multiple Access		Frequenzumtastung
CGU	Clock Generation Unit	FSM	Finite State Machine
CPLD	Complex Programmable Logic Device	GALS	Global Asynchron Lokal Synchron
CPU	Central Processing Unit	GESK	Gaussian Frequency Shift Keving
CRC	Cyclic Redundancy Check	GPS	Global Positioning System
	Carrier Sense Multiple Access/Collision	GSM	Global System for Mobile Communica-
control cont	Avoidance	down	tions
CSS	Chirn Spread Spectrum	GSPS	Global Scale Positioning System
RMRE	Bundesministerium für Bildung und	GUI	Graphisches User-Interface
DIVIDI	Forschung		Hardware Description Language
DT	Plustoath		High level Data Link Control
	dep't care" Dit		High level Data Link Control
	"UOTI (Carel - Dil Digital Enhanced Cardless Talasammu		Human Interface Device
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommu-	HIPERLAIN	High-Periomance Radio Local Area
D U	nications		Network
DLL		HII-KII	High Performance Interface Tool Kit
DOF	Degree of freedom	HOPG	Highly Oriented Pyrolytic Graphite
DPCM	Differenz-Pulscodemodulation	IC	Integrated Circuit
DPIM	Digital Pulse Interval Modulation	ICSI	Intracytoplasmatische Spermieninjek-
DPRAM	Dual-Port-RAM		tion
DPSRAM	Dual Port Static Random Access Mem-	ID	Identifikationsnummer
	ory	IEEE	Institute of Electrical and Electronics
DRC	Design Rule Check		Engineers
DSP	Digital Signal Processor	IM/DD	Intensity Modulation / Direct Detection
DSSS	Direct-sequence spread spectrum	IOC	Input/Output-Controller
DUT	Device Under Test	IP	Internet Protocol
DVB	Digital Video Broadcast	IPR	Institut für Prozessrechentechnik. Au-
ECMA	European Computer Manufacturers		tomation und Robotik
	Association	IR	Infrarot
FCP	Extended Canability Port	IRC	InfraRed Core
FDA	Electronic Design Automation	IRI AP	IrDA Link Access Protocol

IRLMP ISC	IrDA Link Management Protocol
ISM	Industrial Scientific Medical
	Kurzform für ISP1581
	International Standardization Organiza
130	tion
ITU	International Telecommunications Un-
	ion
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation
	Protocol
LAN	Local Area Network
LCR	Line Control Register
LD	Laserdiode
LED	Light Emitting Diode
LIGA	Lithografisch-galvanische Abformung
LLC	Logical Link Control
LNA	Low-Noise Amplifier
LSB	Least Significant Bit
LSRO	Laboratoire de Systèmes Robotiques
LVS	Layout Versus Schematic
LOS	Line of Sight, zu deutsch (direkte)
	Sichtverbindung
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MATAS	Modular Assembly Technology for mi-
	cro-TAS (micro Total Analysis Systems)
MDMA	Multi Dimensional Multiple Access
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-System
MIR	Medium Infrared
MPS	Micro Positioning System
MSB	Most Significant Bit
MXS	MiXed Signal Module
NR7	Non-Return-to-Zero
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multi-
01 D M	plex
OFCOM	Office of Communications London
00K	On-/Off-Keving
OSI	Open Systems Interconnection
PA	Präambel
PAA	Power Addressing and Amplification
PAM	Pulsamplitudenmodulation
PC	Personal Computers
PCM	Pulscodemodulation
PDA	Personal Digital Assistant
PFM	Pulsfrequenzmodulation
PHY	Physical Laver
π/4-DOPSK	$\pi/4$ -Shifted Differential Quadrature
M + DQI SIC	Phase Shift Keving
PLI	Phase-Locked Loop
PLCC	Plastic Leaded Chip Carrier (Gehäuse-
1 LCC	form)
PN	Pseudo Noise
POR	Power-On-Reset
PPM	Pulspositionsmodulation
PRNG	Pseudorandom Number Generator
PSD	Positioning Sensing Device
PSK	Phase Shift Keying zu deutsch Pha-
	senumtastung

PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
QAM	Quadraturamplitudenmodulation
O PSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAM	Random Access Memory
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommu-
5	nikation und Post
REM	Rasterelektronenmikroskop
RF	Radio Frequency
RFCOMM	Radio Frequency oriented emulation of
	serial communication ports
RFID	Radio Frequency Identification
RLL	Run-Length-Limited
ROM	Read Only Memory
RT	Register-Transfer
RTL	Register-Transfer-Level
RZ	Return-to-Zero
RZI	Return-to-Zero Invers
SC	Switch-Capacitors
SCO	Synchronous Connection-oriented
SDF	Standard Delay Format
SDP	Service Discovery Protocoll
SEM	scanning electron microscope
SIP	SIR Interaction Pulse
SIR	Serial Infrared
SITC	Serial Interface for Transceiver Control
SMA	Shape Memory Alloys
SMD	Surface Mount Device
SNR	Signal-to-Noise Ratio,
SOHO	Small Office, Home Office
STA	Start Flag
SIM	Scanning tunneling microscope, zu
CTO	deutsch Rastertunnelmikroskop
SIO	Stop Flag
TAP	Telenhamy Control meteoral Crossifier
ICS	tien
тср	tion Transmission Control Proto col
	Transmission Control Protocol
	Time Division Duplex
	Time Division Multiple Access
IFDU	TEDU6102 TEDU6108 odor TEDU8108
тп	Technische Universität
	Lipivorsal Asynchronous Posoivor
UANI	Transmitter
LICE	llser Constraints File
	User Datagram Protocol
LIFIR	Illtra East Infrared
LIM/R	Ultrawideband
	Verband Deutscher Maschinen- und
VDIVIA	Anlagenhau e V
VFIR	Very East Infrared
VHDI	Very High Speed Integrated Circuit
	Hardware Description Language
VITAL	VHDL Initiative Towards ASIC Libraries
VLSI	Very Large Scale Integration
WPAN	Wireless Personal Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

1 Einleitung

Mikrosysteme beeinflussen in zunehmendem Maße unseren Alltag. So sind aus der Automobilindustrie Mikrosysteme zur Steuerung der Bremsanlage (ABS) oder zur Beeinflussung der Fahrdynamik (ESP) ebenso wenig wegzudenken, wie intelligente Gurtstraffer, Regensensoren oder Airbagsysteme. In der Medizin wären minimalinvasive, endoskopische Eingriffe noch Zukunftsmusik und nicht bereits medizinischer Alltag. Auch die Entwicklung eines Antriebssystems für einen Roboter zur Zerstörung von Nierensteinen im Harnleiter eines Patienten klang noch vor einigen Jahren nach einem aus einem Science-Fiction Roman stammenden Gedanken und ist heute bereits Stand der Forschung [FKAM94], [EPR+03]. Dank der technischen Fortschritte in jüngster Zeit werden die dabei eingesetzten Systeme bzgl. ihrer geometrischen Abmaße immer kleiner. Während hinsichtlich der Erzeugung der Einzelkomponenten, beispielsweise eines nur wenige Mikrometer großen Zahnrädchens oder einer für die Rasterkraftmikroskopie eingesetzten Spitze mit Abmaßen im (Sub-)Nanometerbereich, von Industrie und Forschung bereits beachtliche Ergebnisse erzielt worden sind, wird die Handhabung dieser Kleinstelemente, ihr Zusammenfügen zu neuen "intelligenten" Systemen bisher von nur wenigen Forschungsgruppen weltweit untersucht. Insbesondere die kleinen Dimensionen, die eine direkte Manipulation per Hand trotzt der Zuhilfenahme von Mikroskopen nur schwer oder gar unmöglich machen, erfordern neue Systeme, die diese Aufgabe automatisiert mit hoher Zuverlässigkeit reproduzierbar durchführen.

Ein Ansatz, diesem Problem der (Nano-)Mikro-Makro-Kopplung zu begegnen, ist der Einsatz von Mikrorobotern, die, selbst auf eine Größe von einigen Kubikzentimetern begrenzt, Objekte mit Abmessungen von nur wenigen Mikrometern oder kleiner mit einer Genauigkeit bis in den Nanometerbereich handhaben und bearbeiten. Exemplarische Anwendungsszenarien sind die Montage mikromechanischer Systeme durch Löten oder Kleben oder aber das Manipulieren biologischen Zellmaterials. Jeder Mikroroboter ist mit einem individuellen Werkzeug, beispielsweise einem Greifer, einem Mikrolötkolben, einer Mikroinjektionsnadel oder einem Rasterkraftmikroskop (AFM), ausgestattet. Aus Gründen der Flexibilität und Mobilität sollte jeder Roboter über eine eigene Energieversorgung, sowie Elektronik und Aktorik für seine Positionier- bzw. Manipulationseinheiten verfügen.

Zur Durchführung komplexer Aufgaben, die den Einsatz mehrerer, verschiedener Werkzeuge erfordern, müssen die Roboter als Gruppe zusammenarbeiten. Die Planung und Steuerung eines solchen flexiblen mikroroboterbasierten Manipulationssystems wird von einer leistungsfähigen Zentralrecheneinheit (Host) übernommen, die – nach der Auswertung der ihr zu Verfügung stehenden globalen und lokalen Sensorendaten – die Bewegungen und den Werkzeugeinsatz eines jeden Roboters koordiniert. Die für die Roboter notwendigen Steuerkommandos sind per Kabel oder, im Sinne einer besseren Mobilität, drahtlos an die jeweiligen Roboter zu übertragen.

Die Montage bzw. Manipulation von Mikroobjekten durch Mikroroboter ist ein breit gefächertes Forschungsgebiet, so dass die Weiterentwicklung dieses Gebietes auf interdisziplinäre Forschungsaktivitäten angewiesen ist. Probleme wie echtzeitfähige Montageplanung und Steuerung, die Entwicklung energiesparsamer Roboterdirektantriebe für drahtlos betriebene Robotersysteme, die Verarbeitung verschiedenartiger Sensordaten, die drahtlose Energieversorgung von Mikrorobotern, deren intelligente Echtzeitsteuerung oder aber die Kommunikation und Organisation in Mehrrobotersystemen stehen noch am Anfang der Erforschung. Im Hinblick auf eine von der Industrie angestrebten Massenfertigung von Mikrosystemen gewinnen die Fertigungskriterien, die eine automatisierbare Montage einzelner Systemkomponenten berücksichtigen bzw. die automatisierte Manipulation von Objekten im Mikro- und Nanometerbereich gestatten, immer mehr an Bedeutung.

Die hier vorgestellte Arbeit befasst sich mit der Kommunikation zwischen der zentralen Manipulationsplanungs- und Steuerungseinheit und mehreren für Mikromanipulationen eingesetzten Mikrorobotern. Es wird ein **drahtloses Kommunikationssystem** für *flexible mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstationen* vorgestellt, das für mobile autonome Mikroroboter der jüngsten Generation mit maximalen geometrischen Abmaßen von wenigen Kubikzentimetern eingesetzt werden kann. Da über die drahtlose Verbindung nicht nur Steuerkommandos an die Roboter übertragen, sondern auch Sensordaten und Statusinformationen an die Manipulationsplanungs- und Steuerungseinheit zurückgesendet werden, findet der *Energieaspekt* genauso Beachtung wie die Anforderung an eine *robuste* und dennoch *schnelle* Datenverbindung. Das Kommunikationssystem orientiert sich dabei an bereits *in der Industrie etablierten Standards*, um unter Beachtung der Entwicklungs- und Herstellungskosten die Integration in Mikromontagesysteme der neusten Generation ebenso zu erleichtern wie die Adaption an bereits bestehende Mikromanipulatoren.

1.1 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden gegenwärtige Mikromanipulationssysteme vorgestellt. Hierzu wird in Kapitel 2.3, nach einer generellen Betrachtung von Mikrosystemen (Kapitel 2.1) und den Schwierigkeiten bei ihrer Handhabung und Manipulation von mikrosystemtechnischen Komponenten (Kapitel 2.2), auf verschiedene Ansätze zur Mikromanipulation eingegangen. Der Fokus liegt dabei auf automatisierter Mikromanipulation in Mikromanipulations-Tischstationen, die in interdisziplinärer Arbeit aus verschiedenen Komponenten modular aufgebaut werden (Kapitel 2.3.3). Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal für diese Stationen bietet sich über die Art der eingesetzten Mikroroboter (Kapitel 2.4). Nach der Darstellung von grundsätzlichen Anforderungen (Kapitel 2.4.1) und der Vorstellung verschiedener Klassifikationskriterien in Kapitel 2.4.2, werden bisherige mobile/immobile und kabelgebundene Mikroroboterrealisierungen für den Einsatz in Mikromanipulationsstationen vorgestellt (Kapitel 2.4.3). Zusätzlich werden die Anforderungen an Mikroroboter der nächsten Evolutionsstufe, die mobil und drahtlos in Mikromanipulationsstationen agieren (Kapitel 2.4.3.3), spezifiziert. Basierend auf diesen Betrachtungen wird die Zielstellung für diese Arbeit, die Entwicklung eines Kommunikationssystems zur Verbindung von mobilen, drahtlosen Mikrorobotern mit ihrer Mikromanipulationskontroll- bzw. Steuerungseinheit, formuliert (Kapitel 2.5).

Kapitel 3 beleuchtet verschiedene drahtlose Kommunikationsmöglichkeiten, immer mit einem Augenmerk bzgl. einer Eignung für miniaturisierte, mobile und energieautonome Mikroroboter. Zunächst werden in Kapitel 3.1 bereits realisierte Kommunikationslösungen für miniaturisierte Robotersysteme kurz vorgestellt. Hieran anschließend werden verschiedene Kommunikationskonzepte aus den Bereichen induktiver Nahfeldkommunikation (Kapitel 3.2), Funktechnik (Kapitel 3.3) und optischer, infraroter Übertragungstechnik (Kapitel 3.4) beschrieben. Hierbei finden die zumeist funkbasierten WPAN- und WLAN-Systeme ebenso Beachtung (Kapitel 3.3.2 und 3.3.3), wie die optische infrarotbasierte Kurzbereichskommunikation gemäß IrDA-Standard (Kapitel 3.4.7). Mit einem Vergleich der für Mikroroboter relevanten Kommunikationstechnologien RF-WPAN und IrDA wird in Kapitel 3.4.8 die Analyse möglicher Kommunikationslösungen abgeschlossen.

In Kapitel 4 wird das Single-Master-Multi-Slave-Konzept für eine Kommunikationsstation zur drahtlosen Kommando- und Datenübertragung zwischen Mikrorobotern und ihrer Steuerungseinheit vorgestellt. Eine erste Bewährungsprobe für das umgesetzte Konzept zeigt sich beim Einsatz des Kommunikationssystems in der Mikromanipulationsstation MiCRoN. Daher werden die wesentlichen Merkmale dieser Tischstation zunächst in Kapitel 4.1 dargestellt, zumal sich durch diese Mikromanipulationsstation weitere systemspezifische Anforderungen an ein Mikroroboter-Kommunikationssystem ableiten lassen (Kapitel 4.2). Nach einer Beschreibung des funktionalen Aufbaus und der Begründung für die gewählten Kommunikationsverfahren werden in den Kapiteln 4.5, 4.6 und 4.7, neben den Aspekten Konzeption und Realisierung der Einzelkomponenten des Kommunikationssystems, insbesondere die Kommunikationsprotokolle vorgestellt.

Die Kapitel 5 und 6 beschreiben die essentiellen Komponenten des drahtlosen Mikroroboter-Kommunikationssystems, den ASIC *IRC* und die für die Manipulationskontroll- und Steuerungseinheit benötigte Basisstation. Der ASIC *IRC* wird in Kapitel 5 vorgestellt. Sämtliche Entwicklungsschritte des ASICs werden in den Kapiteln 5.1 bis 5.3, von der Spezifikation über die Implementierung bis hin zur Verifikation, erläutert – hierbei werden den schaltungstechnischen Aspekten zur Reduktion des Energiebedarfs ebenso Aufmerksamkeit geschenkt, wie speziellen Funktionen zur Realisierung einer robusten Datenübertragung. Abschließend wird der ASIC *IRC* in einen Mikroroboter-Kontroll-ASIC der neusten Generation integriert (Kapitel 5.4). Kapitel 6 erörtert den Aufbau und die Funktionsweise der Kommunikationszentrale bzw. Basisstation, die für die Mikromanipulationskontrollund Steuerungseinheit als Pendant zum ASIC *IRC* fungiert. Als FPGA-Board realisiert, werden nach einer kurzen Beschreibung der Basisstations-Hardware (Kapitel 6.1), die wesentlichen funktionalen Aspekte der FPGA-Schaltung in Kapitel 6.2 erläutert. Zusätzlich wird die Entwicklung eines Softwaretreibers zur Anbindung der Basisstation an die Steuerungsund Kontrollsoftware der Mikromanipulationsstation kurz umrissen (Kapitel 6.3).

In Kapitel 7 werden die mit Hilfe zahlreicher Testverfahren ermittelten Ergebnisse zur Evaluierung des Mikroroboter-Kommunikationssystems zusammengetragen. Dies umfasst zunächst eine ausführliche Untersuchung und Bewertung der Einzelkomponenten in den Kapiteln 7.1 und 7.2. Abschließend werden in Kapitel 7.3 maßgebliche Resultate vorgestellt, die im Rahmen der Erprobung des Mikroroboter-Kommunikationssystems in der Mikromanipulationsstation MiCRoN gewonnen wurden.

Mit Kapitel 8 wird diese Arbeit abgeschlossen. Dort werden zunächst die wesentlichen Aspekte und Resultate dieser Dissertation nochmals zusammengefasst. Auf dieser Basis werden, im Rahmen eines kurzen Ausblicks, einerseits zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten aufgezeigt; darüber hinaus wird auf sowohl neue Einsatzszenarien als auch Entwicklungsrichtungen für flexible mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstationen mit mobilen Mikrorobotern hingewiesen.

2 Mikromanipulationssysteme

2.1 Mikrosystemtechnologie

Meist verstehen Forscher und Entwickler im Bereich der Mikrosystemtechnologie (MST) unter einem Mikrosystem eine Vereinigung von miniaturisierten Sensoren, Aktoren und Signalverarbeitungskomponenten mit dem Ziel, viele komplexe Einzelfunktionen innerhalb eines Systems zu integrieren. Möglich wird dies nur durch die konsequente Miniaturisierung der einzelnen Komponenten. **Mikrosystemtechnologie** kann somit als funktionale



Integration mechanischer, elektronischer, optischer und sonstiger Funktionselemente unter Anwendung von speziellen Mikro- und Systemtechniken definiert werden [Fat00]. In Bild 2.1 ist ein vollständiges Mikrosystem dargestellt. Es soll äußere Signale über seine Sensoren erfassen, bearbeiten und auswerten, um anhand der gewonnenen Informationen Entscheidungen zu treffen und diese in entsprechende Ak-

Bild 2.1: Struktur eines vollständigen Mikrosystems

torbefehle umzusetzen. Als Ergebnis führt das Mikrosystem aufgabenspezifische Manipulationen aus und wirkt hierdurch auf seine Umgebung ein.

Die MST unterscheidet sich in einigen Punkten wesentlich von der technologisch verwandten Mikroelektronik. Die MST arbeitet neben den elektrischen Größen zusätzlich auch mit mechanischen, thermischen, optischen, chemischen oder fluidischen Größen. Diese nichtelektrischen Größen haben prinzipbedingt sehr applikationsspezifische Ausprägungen der Basistechnologie für das Mikrobauteil zur Folge. So ist es nicht möglich, mit einem einzigen Prozess funktions- und kostenoptimiert Bauteile herzustellen, die z. B. Druck und/oder Drehrate messen. Außerdem zeigt sich, dass die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der nichtelektrischen Größen von einigen Ausnahmen abgesehen bisher keine applikationsunabhängige Standardisierung der Bauteile zulassen [ZKK00]. Die MST stellt sich somit als sehr heterogenes Technologiefeld dar, mit der Folge, dass bislang noch keine allgemein akzeptierte Definition der MST existiert. Hinsichtlich der Größenordnung der Systeme bzw. Einzelkomponenten gibt es ebenfalls noch keine einheitliche Begriffsbildung. Jedoch herrscht die Meinung vor, dass ein Mikrosystem dadurch gekennzeichnet ist, dass möglichst viele Funktionen auf kleinstem Raum unterzubringen sind und mindestens eine mikromechanisch hergestellte Komponente enthalten ist [Fat00].

Viele derzeit noch nicht gelöste Probleme in der MST existieren im Bereich der Schnittstellen zum Austausch von Information, Energie und/oder Substanzen zwischen dem Mikrosystem und der Außenwelt. Gerade im Hinblick auf Machbarkeit und Marktfähigkeit existiert Forschungsbedarf nach technisch vernünftigen Konzepten der Mikro-Makro-Kopplung. Im Bereich des Substanzaustausches werden derzeit hauptsächlich mikrofluidische Methoden umgesetzt, beispielsweise in Mikrodosiersystemen zur Applikation von Medikamenten oder aber beim Aufsaugen und dem anschließenden Transport biologischen Materials. Für die Übertragung von Energie und Information werden meist elektri

 20µm 1000X

sche Schnittstellen eingesetzt, jedoch werden auch thermische, akustische oder optische Schnittstellen untersucht (siehe z. B. [KBHL99], [KTA01] oder [ITSM02], [ZKP03]).

Bild 2.2: SEM-Bilder eines zellulären multiaxialen kapazitiven Kraftsensors zur Untersuchung von Membranverformungen an biologischen Zellen ([SWR+03], mod. ¹). Die bewegliche Struktur ist über gebogene Federelemente mit der Basisplattform verbunden. Die Kammstrukturen der Kondensatoren zur Bestimmung der x-y-Auslenkungen sind vergrößert dargestellt.

Angestrebt werden intelligente monolithisch integrierte Mikrosysteme. Die derzeit erfolgreichsten MEMS-Produkte, welche Mikrosensoren (z. B. Beschleunigungs- oder Drucksensoren) integrieren, werden wie in der Halbleiterfertigung in sog. Batch-Prozessen auf einem Substrat durchgängig mit verschiedenen Mikrotechniken hergestellt: Schichten von Mikrokomponenten werden aufeinander aufgebracht und justiert. Mehrere identische Mikrosysteme werden gleichzeitig erzeugt und abschließend durch vertikale Schnitte vereinzelt. Ein Beispiel für ein derartiges System ist in Bild 2.2 dargestellt. Ein großer Vorteil dieser auf Siliziumtechniken basierenden Systeme besteht darin, dass nur wenige bis keine Montageoperationen bei der Herstellung notwendig sind und viele Systeme parallel hergestellt werden. Eingeschränkt wird die Entwicklung derartiger Systeme jedoch dadurch, dass nur miteinander verträgliche Werkstoffe und sich nicht ausschließende Mikrotechniken zum Einsatz kommen dürfen [YGN01]; Batch-Verfahren sind daher nur bedingt für die Herstellung komplexer Mikrosysteme geeignet. Nur in Einzelfällen ist es möglich, Mechanik und Elektronik auf einem Chip zu integrieren. Ein weiterer Nachteil der integrierten Mikrosysteme liegt in den Kosten. Obwohl durch die parallele Fertigung vieler identischer Bauelemente die Prozesskosten für das Einzelelement erheblich gesenkt werden, sind für ein Unternehmen dennoch sehr große Stückzahlen (typischerweise 1-10 Mio. Stück p. a.) notwendig, so dass sich nur in wenigen Industriezweigen, beispielsweise im IT-Bereich oder in der Automobilindustrie, die hohen Entwicklungskosten amortisieren. Kleine und mittelständische Betriebe erreichen nur selten die für den Break-Even erforderlichen (großvolumigen) Stückzahlen [Rump03].

Größere Aspektverhältnisse, vor allem aber die zunehmende funktionale Komplexität zukünftiger Mikrosysteme erfordern einen anderen Lösungsansatz: Die Entwicklung und Herstellung **hybrider Mikrosysteme**. Diese dreidimensionalen heterogenen Systeme werden aus Bauelementen verschiedener Materialien und Fertigungstechnologien (LIGA, EDM, etc.) Schritt für Schritt aufgebaut. Oft ist es dabei notwendig, konventionelle Bauelemente mit Mikrokomponenten zu kombinieren [FSF+00]. Sensoren (z. B. biologisch oder chemisch aktive Strukturen), Aktoren und elektronische Komponenten, die als "Gehirn" das Mikrosystem steuern bzw. kontrollieren, werden miteinander verbunden. In vielen Fällen kann bei den Einzelkomponenten auf in großer Stückzahl preiswert hergestellte Standardkomponenten zurückgegriffen werden. Neben dem Kostenvorteil ergeben sich hierdurch auch kürzere Entwicklungszeiten, so dass diese Systeme auch für kleine und

6

¹ Für referenzierte Bilder, die aufgrund von eigenen Ergänzungen nicht mehr vollständig den ursprünglichen Bildquellen zugeordnet werden können, werden diese Quellen angegeben und zusätzlich durch "mod." (modifiziert) gekennzeichnet.

mittelständische Unternehmen interessant sind. Hybride Systeme zeichnen sich neben einer höheren Ausbeute bedingt durch einfachere (kostenoptimierte) Herstellungsprozesse auch durch eine höhere Flexibilität bezüglich der Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik aus [Sey03]. Die bei den monolithischen Systemen auftretenden Strukturierungsund Kompatibilitätsprobleme werden umgangen, hybride Systeme können daher im Ver-



Bild 2.3: Hybrides Beschleunigungsmesssystem der Colibrys (Switzerland) Ltd. ([Col05], mod.)

gleich zu integrierten Mikrosystemen komplexere Funktionen erfüllen. Bild 2.3 zeigt beispielsweise ein Beschleunigungsmessgerät, das einen MEMS-Sensor über ein Keramiksubstrat mit energiesparsamen, applikationsspezifischen integrierten Schaltkreisen (ASICs) zur Kalibrierung und Auswertung verbindet [Col05]. Die Vorteile der hybriden Mikrosysteme müssen jedoch durch einen erhöhten Aufwand bei der abschließenden Montage erkauft werden: Die Mikromontageoperatio-

nen beim Zusammenfügen der Einzelkomponenten zum kompletten Mikrosystem werden mit zunehmender Miniaturisierung der einzelnen Komponenten immer schwieriger. Dies erfordert nicht nur neue, ultrapräzise Stellglieder sondern auch neue Montagetechniken, da konventionelle, in der Makrowelt eingesetzte Manipulations- und Montagekonzepte hier an ihre Grenzen stoßen [WSF+00]. Meist hängt der Erfolg der Endmontage von den manuellen Fähigkeiten des Technikers (Operators) ab, wodurch die Ausfallraten hoch und die Fertigungszeiten häufig unrentabel lang sind.

2.2 Problematik bei der Mikrohandhabung

Mikrohandhabungsstationen unterscheiden sich in einigen Aspekten erheblich von konventionellen industriellen Handhabungssystemen (beispielsweise von automatisierten Robotermontagesystemen in der Automobilindustrie). Verantwortlich hierfür sind die sog. **Skalierungseffekte** [ZKK00] aufgrund der kleinen Dimensionen der zu bearbeitenden Einzelkomponenten. Bei Objekten des täglichen Lebens ist die Gewichtskraft die dominierende Kraft: Ein losgelassenes Objekt fällt stets zu Boden. Bei Objektgrößen von einem Millimeter und weniger gewinnen jedoch die Oberflächenkräfte gegenüber der Schwer-





kraft langsam an Dominanz und bestimmen das Verhalten der Bauteile [CRP97]: Ein Objekt haftet z. B. an einer Pinzette (trotz Öffnens) an. Diese Dominanz ergibt sich aufgrund von oberflächenabhängigen Effekten [MGEF02]: Verkleinert (skaliert) man einen Würfel mit der Kantenlänge a, so nimmt die Oberfläche nur proportional zu a² ab, wohingegen sich das Volumen und damit die Gravitationskraft proportional zu a³ verringert. In Bild 2.4 ist qualitativ dargestellt, dass bei sehr kleinen und leichten Bauteilen die Gravitation bzw. Trägheit nur eine untergeordnete Rolle spielt [Sey03]. Das Verhalten der Mikrobauteile wird überwiegend durch parasitäre Anziehungskräfte beeinflusst, wie

z. B. die elektrostatischen oder die zwischen einzelnen Atomen wirkenden Van-der-Waalsschen Kräfte, die sich beide umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes zwischen den Kontaktflächen verhalten [Fea95]. Zusätzliche Störeinflüsse ergeben sich durch die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten, da diese als Adhäsionskraft bei Mikromanipulationen wirkt [MES+01]. Befindet sich beispielsweise ein mit einem Greifer ausgestatteter Mikroroboter in einer Umgebung mit erhöhter Luftfeuchtigkeit, so entstehen bei gleichzeitigem Berühren von mikroskopischen Flüssigkeitströpfchen, die sich an der Oberfläche von Greifer und zu greifendem Bauteil befinden, sog. Kapillarkräfte, die in ihrer Wirkung den Einfluss von elektrostatischen oder Van-der-Waals-Kräften weit übersteigen. Jedoch können die durch Luftfeuchte hervorgerufenen Störkräfte unter Reinraumbedingungen, in Klimakammern oder in klimatisierten Räumen vernachlässigt werden, wenn die Luftfeuchtigkeit konstant unter ca. 9 % gehalten wird [Fat00]. Die übrigen Parasitäreffekte sind jedoch nicht zu vermeiden.

Derzeit lassen sich die parasitären Störkräfte für komplexe Mikrosystemkomponenten nur ansatzweise berechnen. Forschungsgruppen weltweit arbeiten an mathematischen **Modellen**, um beispielsweise die durch ein Montageplanungssystem ermittelten Mikromanipulationsoperationen bereits vor ihrer eigentlichen Durchführung in einer **Simulation** zu verifizieren [MEID04], [SZK04]. Jedoch gelingt dies bisher nur für einfache geometrische Mikroobjekte, wie z. B. kugel- oder quaderförmige Nanopartikel [ZKA+99]. Eine dynamische Modellierung per Computer, beispielsweise die Bestimmung von Adhäsionskräften bei Mehrfachkontakt, ist nur im Ansatz möglich [ZKK00]. Eine Online-Berechnung in Echtzeit ist aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge noch Zukunftsvision.

Häufig ist es leichter, das zu manipulierende Objekt zu greifen und zu manipulieren, als es abschließend beim Absetzen loszuwerden. Bild 2.5 zeigt anschaulich, wie ein von ei-



Bild 2.5: Mikrozahnrad haftet an Endeffektor an. ([Sey99], mod.)

nem Mikroroboter "losgelassenes" Objekt, hier ein Mikrozahnrad mit einem Durchmesser von ca. 500 µm, beim Öffnen des Mikrorobotergreifers an seinem Endeffektor anhaftet; die blauen Kreuze im Bild markieren jeweils das ursprüngliche Zentrum des Zahnrades [Sey99]. Auch der umgekehrte Effekt, dass sich ein Objekt aufgrund elektrostatischer Kräfte bewegt, sobald sich ein Greifer nähert, ist in der Mikrowelt zu beobachten. Diese unkontrollierten "Sprünge" von Mikroobjekten erschweren bereits die manuelle Montage kleinster Systeme. Jedoch wird die automatisierte, roboterbasierte Montage von Mikrosystemen durch das nichtdeterministische Verhalten der Bauteile sehr schwierig, sodass an Robotersysteme für Mikromanipulationen Anforderungen gestellt werden, die über das reine Skalieren der Bewegungen und die Erhöhung der Roboterpräzision hinausgehen.

Sämtliche Manipulationsoperationen sind für tatsächliche Manipulationsaufgaben unter Sensorüberwachung auszuführen, da die Oberflächeneffekte jederzeit unkontrollierte Objektbewegungen verursachen können. Sensoren für Mikroapplikationen, z. B. absolute Positionssensoren oder Kraft- und Berührungssensoren in Mikrowerkzeugen, die der Transmission von Informationen aus der Mikro- in die Makrowelt dienen, sind ebenfalls noch Gegenstand der Forschung [SWR+03], [MECD03], [MEID04]. So kann beispielsweise der Einsatz eines Kraftsensors die Kontrolle eines präzise auszuführenden Greifvorganges von leicht zerstörbaren biologischen Zellen oder mikromechanischen Komponenten unterstützen, da bereits Kraftunterschiede von wenigen mN oder auch µN über die Unversehrtheit des zu manipulierenden Objekts entscheiden [SFF+00]. Bisher existieren nur wenige Ansätze für die Entwicklung von Kraftsensoren, die in Hinblick auf Genauigkeit, Linearität und Auflösungsvermögen aus der Mikrowelt gewonnene Kraftinformationen als zuverlässige Eingangsgröße zur Steuerung bzw. Regelung eines vollständig automatisierten Mikrorobotersystems nutzen [ZF98], [FSF+00], [EMM+01]. Daher ist eine Mikrohandhabungsstation vor allem auf die visuelle Manipulationsüberwachung durch ein (Stereo-)Lichtmikroskop oder ein Elektronenmikroskop angewiesen (z. B. [SFFW99], [FFSB99], [Fat00], [BMR04], [AF01] und [KSTF05]).

Bei einem **Lichtmikroskop** finden die Manipulationen unter dem Mikroskopobjektiv statt. Als Unterlage dient i. d. R. der Probentisch. Aufgrund seiner Größe und seines Gewichts dominiert das Mikroskop den Aufbau des gesamten Mikromanipulationssystems. Restriktionen für die visuelle Überwachung ergeben sich durch die begrenzte Tiefenschärfe (ca. 0,5–100 µm) und durch das eingeschränkte Sichtfeld. Zoomobjektive gehören bei Mikroskopen noch nicht zum Standard, so dass fest eingestellte Vergrößerungsfaktoren alternativ ausgewählt werden müssen, um den Manipulationsbereich (sukzessive) zu beobachten: Zunächst wird ein weiträumiger Bereich mit einer nur geringen Vergrößerungsstufe analysiert; danach werden die eigentlichen Manipulationsoperationen in starker Vergrößerung beobachtet [SFFW99] – die eigentliche Arbeitsfläche der Roboter wird hierdurch auf einen kleinen Ausschnitt reduziert. Ein weiteres Problem bei der Lichtmikroskopie ergibt sich durch den meist zu geringen Arbeitsabstand (ca. 10-20 mm) zwischen Objektiv und Unterlage, sodass bestimmte Mikrooperationen mangels Bewegungsfreiheit der Manipulatoren nicht (oder nur mit großem Aufwand) durchgeführt werden können. Erschwerend kommt hinzu, dass mit zunehmendem Vergrößerungsfaktor der Arbeitsabstand immer weiter abnimmt [CRP97]. Außerdem ist die Auflösung eines Lichtmikroskops durch die Wellenlänge des sichtbaren Lichts (bis ca. 380 nm) begrenzt und reicht daher bei hohen Anforderungen an die Manipulationsgenauigkeit nicht mehr aus [SF00].

Um diese Probleme zu umgehen, kann eine Manipulationsstation in der Vakuumkammer eines Rasterelektronenmikroskops (REM) installiert werden. Der große Arbeitsabstand von bis zu einigen Zentimetern, die große Tiefenschärfe zwischen 2 µm und 10 mm, eine beliebige Zahl von Vergrößerungsstufen mit einem maximalen Vergrößerungsfaktor von 100 000 und mehr eröffnen für Mikrorobotersysteme einen Arbeitsbereich, innerhalb dessen Manipulationen mit einer Genauigkeit bis etwa 10 nm beobachtet werden können [SFF+00], [Fat04]. Das für das REM erforderliche Vakuum bietet den Vorteil, dass störende Umwelteinflüsse wie Staub und Luftfeuchtigkeit ausgeschaltet werden. Jedoch ist die Benutzung des Rasterelektronenmikroskops für die Montagerückkopplung nicht problemfrei. So verhindert das Vakuum bestimmte Anwendungen wie z. B. Klebeprozesse oder Manipulationen an biologischen Zellen [FSF+99]. Darüber hinaus ergeben sich sowohl für die Manipulatoren als auch die zu montierenden Mikrosysteme gewisse Konstruktionseinschränkungen in Hinblick auf Vakuum- bzw. Elektronenstrahlkompatibilität: Mikroelektronische Komponenten beispielsweise müssen aus der REM-Kammer entfernt oder durch entsprechende Gehäuse gegen Elektronenstrahlen abgeschirmt werden [Fat00]: Einerseits sind Beeinträchtigungen oder Beschädigungen der Roboterelektronik zu verhindern, andererseits gilt es elektromagnetische Störeinflüsse der Elektronik auf den Elektronenstrahl und damit auf das optische Auflösungsvermögen des Rasterelektronenmikroskops zu vermeiden [AF01]. Volumenbeschränkungen, die sich aufgrund der kleinräumigen Vakuumkammern für die Mikroroboter bzw. die zu manipulierenden Mikrosystemkomponenten ergeben, können durch den Einsatz von Großkammer-Mikroskopen aufgehoben werden. Jedoch sind derartige Systeme aufgrund der hohen Anschaffungskosten für kleine und mittelständische Betriebe nur selten interessant, sodass meist Anpassungen der Manipulationsanlage an die geometrischen Bedingungen der Kammer erforderlich sind [FA02a].

Abschließend ist an dieser Stelle die unzureichende Standardisierung bzw. Normung zu erwähnen, die den Einsatz von automatisierten oder zumindest teilautomatisierten Manipulationsstationen erschwert. Eine Universallösung für alle oder zumindest zahlreiche MST-Anwendungsbereiche wird es nicht geben. Vielmehr ist die industrielle Entwicklung der MST durch Flexibilität und Modularisierung von Mikrohandhabungs- bzw. Mikromontagestationen zu unterstützen, sodass eine Adaption an unterschiedliche Produkte mit nur geringem technischen und finanziellen Aufwand möglich und dadurch auch eine kostengünstige Fertigung bei niedrigen Stückzahlen rentabel wird. Bis zur Jahrtausendwende sind nur einige wenige Versuche unternommen worden, eine sinnvolle Vereinheitlichung auf dem MST-Gebiet zu schaffen [Fat00]. Die Notwendigkeit, normungsrelevante Fragestellungen in Hinblick auf Kompatibilität gleichartiger Systemkomponenten in verschiedenen Mikrosystemen aufzugreifen, ist mittlerweile allgemein anerkannt [Har03], [Rump03]. Im Rahmen von Kooperationen zwischen Universitäten, Forschungseinrichtungen und Unternehmen sind bereits erste interessante Ansätze, Richtlinien und Produkte hinsichtlich modularer Mikrosysteme mit standardisierten Schnittstellen entstanden, z. B. das Lab-On-A-Chip System MATAS [Lio05] oder der in Bild 2.6 dargstellte Mikrosystembaukasten *Match-X* entsprechend dem VDMA Einheitsblatt 66305 [Mat05]. Insbesondere in Hinblick auf elektrische, mechanische und informationstechnische Schnittstellen für Mikromanipulationsstationen zeigt sich die Modularisierung bzw. Standardisierung aufgrund fehlender Normen nach wie vor schwierig. Glücklicherweise gibt es auch hier Fortschritte zu verzeichnen. So sind standardisierte Schnittstellen für Mikrohandhabungssysteme im Rahmen von Forschungsprojekten und auch bereits für erste kommerziell erhältliche Produkte konzipiert, entwickelt und eingesetzt worden. Als Beispiele seien hierzu das BMBF-Projekt "*Greiferbaukasten"* mit seinem publizierten Normentwurf E DIN 32565 zur Normierung einer Endeffektorschnittstelle [For03] und das bis zur Marktreife entwickelte System *MiniMoS* (Bild 2.7) der Firma MILASYS TECHNOLOGIES GMBH [IVAM04] aufgeführt.





Bild 2.6: *Match-X* Mikrosystembaukasten: *Match-X*-Bausteine mit verschiedenen Funktionen werden zu komplexen Systemen zusammengesetzt. ([EMF05], mod.) Bild 2.7: *MiniMoS*-Mikromontagestation: *MiniROB* Miniaturroboter mit DIN-Schnittstelle und verschiedenen Endeffektoren führen gemeinsam Montageoperationen aus ([Min05], mod.).

Insgesamt gesehen existiert noch großer Forschungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung von Mikromanipulatoren, da sich die meisten in der Makrohandhabung von Objekten bewährten technischen Lösungen nicht einfach durch Skalierung auf ein automatisiertes oder zumindest teilautomatisiertes Mikromanipulationssystem übertragen lassen. Es sind neue technische Methoden zu entwickeln, die auf einer "mikrowelt-orientierten" Denkweise basieren, um obige Problemstellungen zumindest teilweise zu lösen.

2.3 Mikromanipulationssysteme

Durch Integration unterschiedlicher Funktionen entstehen sehr variantenreiche MST-Produkte mit Werkstückgrößen bis hinab zu 0,1 µm und Werkstückmassen von deutlich unter 1 g. Die Teilgeometrien sind sehr produktspezifisch und daher meistens unregelmäßig. Gleichzeitig werden bei Mikrosystemen Montagegenauigkeiten bis in den Nanometerbereich gefordert. Diese "harten" Fertigungsbedingungen erfordern in Hinblick auf eine Kleinserien- oder gar Massenproduktion eines hybriden Mikrosystems die Einführung von flexiblen (teil-)automatisierten, hochgenauen Manipulationssystemen [Fat00]. Im Folgenden werden die derzeit angewendeten Umsetzungen für Mikromanipulationsstationen mit einem Fokus auf die verschiedenen Konzepte für mikroroboterbasierte Mikrohandhabungssysteme (häufig auch als Manipulations-Tischstationen bezeichnet) vorgestellt. Hierzu sind zunächst einige Begriffe zu definieren bzw. zu erläutern.

2.3.1 Manipulieren und Handhaben mit Robotern

Manipulieren beschreibt im technischen Sinne das geschickte Hantieren, Verfahren und Handhaben von zu bearbeitenden Objekten [Kna82]. Nach der VDI-Richtlinie 2860 ver-

steht man unter **Handhaben** das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem; Form und Zustand der Körper bleiben unverändert. Als **Handhabungseinrichtung** wird in der Automatisierungstechnik ein Gerät bezeichnet, das den Materialfluss von oder zu einer Wirkstelle bewältigt. Dabei übernehmen die Handhabungseinrichtungen alle Funktionen, um das Material in der richtigen Menge und Pose zum richtigen Zeitpunkt an die geforderte Stelle zu bringen; **Pose** bezeichnet hierbei die nach DIN EN ISO 8373 definierte Kombination von Position und Orientierung im dreidimensionalen Raum. Typische Handhabungseinrichtungen, wie z. B. Industrieroboter, Einlege- oder Fördergeräte, sind programmgesteuert.

Im Zuge der verstärkten Automatisierung wird versucht, Handhabungstätigkeiten von Robotern, d. h. universell einsetzbaren Handhabungsautomaten, ausführen zu lassen, insbesondere wenn das zu manipulierende Objekt zu groß, zu klein oder zu gefährlich ist, die Umgebung zu gefährlich, die Genauigkeit des Menschen nicht ausreichend oder die Tätigkeit auf Dauer einfach zu monoton ist. Der tschechische Maler und Illustrator Josef Čapek gilt als Erfinder des heute viel verwendeten Wortes ,Roboter', das sich aus den tschechischen Wörtern für Fronarbeit (robota) und Sklave (robotnik) ableitet. Sein Bruder Karel Čapek hat 1920 den Begriff in seiner heutigen Bedeutung in dem Drama R.U.R.¹ eingeführt: Dort rebellieren Roboter - in Form intelligenter, humanoider Maschinen (Androiden), die von Menschen als Arbeitskräfte konzipiert und in Behältnissen als Fronarbeiter herangezüchtet worden sind – gegen ihre Schöpfer und löschen die menschliche Kultur aus. Basierend auf dieser dramaturgischen Begriffsbildung finden sich heute einige, in ihren Grundsätzen recht ähnliche, technische Definitionen. Sowohl das ROBOTICS INSTITUTE OF AMERICA (RIA) als auch die deutsche VDI-Richtlinie 2860 definieren Roboter als multifunktionale Manipulatoren (oder Vorrichtungen), deren Programm verändert werden kann; Roboter sind in der Lage, Materialien, Teile, Werkzeuge oder (Spezial-)Geräte auf programmierten, variablen Bahnen zur Erfüllung einer Vielfalt von verschiedenen Aufgaben zu bewegen [Neh02]. Ergänzen lässt sich diese Definition durch die DIN-Norm EN ISO 8373, die einen Roboter als einen automatisch gesteuerten, reprogrammierbaren Mehrzweck-Manipulator mit mehreren Freiheitsgraden (drei oder mehr Achsen) beschreibt, der entweder ortsfest oder beweglich in automatisierten Fertigungssystemen eingesetzt wird. Mit Manipulator wird in diesem Zusammenhang eine Maschine bezeichnet, deren Mechanismus aus einer Folge von Komponenten besteht, die durch Gelenke oder gegeneinander verschiebbar verbunden sind, mit dem Zweck, Gegenstände, d. h. Werkstücke oder Werkzeuge, zu greifen und/oder zu bewegen; normalerweise sind Manipulatoren mit mehreren Freiheitsgraden (DOF²) ausgestattet [Eur96]. Die eigentliche Manipulation wird mit den (End-)Effektoren durchgeführt; mit diesen wirkt der Roboter physisch auf seine Umgebung ein, kann beispielsweise Werkstücke ergreifen, bewegen und bearbeiten, Werk- und Messzeuge einsetzen oder Beobachtungsgeräte (Kameras, etc.) bedienen.

Die meisten heute in der Industrie eingesetzten Roboter sind Manipulatoren, häufig als "Fließbandroboter" bezeichnet, die stationär, d. h. immobil an einem festen Arbeitsplatz eingesetzt werden. **Mobile Roboter** können ihren Standort durch Lokomotion verändern. Entsprechend der Norm DIN EN ISO 8373 definieren sich mobile Roboter dadurch, dass sie die für ihre Überwachung und Bewegung notwendigen Ausrüstungen (Energieversorgung, Steuerung, Antrieb) mit sich tragen. Der derzeitig häufigste Typ des mobilen Roboters ist das automatisierte spurgeführte Fahrzeug (AGV – <u>A</u>utomated <u>G</u>uided <u>V</u>ehicle). AGVs sind unflexibel und empfindlich gegenüber (unvorhergesehenen) Veränderungen, sie können nur in einer auf sie abgestimmten Umgebung operieren.

Die Beschränkungen der fest programmierten mobilen Roboter lassen sich durch den Einsatz autonomer mobiler Roboter umgehen. Wird eine Handlung ohne Steuerung von außen durchgeführt, so weist der Roboter schwaches autonomes Verhalten auf. Besitzt

¹ R.U.R - Rossumovi Umělí Roboti (tschechisch), zu deutsch Rossums Universal-Roboter

² DOF – Degree of Freedom

dieser sogar Entscheidungsfreiheit, so spricht man von starker **Autonomie** [Neh02]. Roboter mit eingebauter Steuerung und Energieversorgung, z. B. AGVs, gelten im ersteren, schwächeren Sinne als autonom, wenn sie einer festgelegten, rigiden Anweisungssequenz von außen folgen. Wird vom Roboter jedoch Entscheidungsfreiheit gefordert, um mit unvorhergesehenen Situationen umgehen und sich auf veränderte Umgebungsbedingungen einstellen zu können, so impliziert die Fähigkeit des Roboters, seinen Handlungsablauf durch eigene Inferenzprozesse zu bestimmen, eine starke Autonomie – "Inferenz" beschreibt in der Informatik das automatisierte bzw. computerunterstützte Schlussfolgern.

In der MST sind vor allem die winzigen Dimensionen der zu manipulierenden Objekte treibende Kraft für die Entwicklung von automatisierten, robotergestützten Handhabungssystemen. An die Roboter werden hierbei immer mehr Forderungen hinsichtlich Flexibilität, Genauigkeit und Größe gestellt. Seit Beginn der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts werden aufgrund dieser Forderungen sowohl stationäre als auch mobile **Mikroroboter** konzipiert und entwickelt: Mikroroboter sind Roboter, die in der Lage sind, Objekte mit Abmessungen von einigen Millimetern bis hin zu wenigen Mikrometern mit einer Wiederholgenauigkeit von einigen Mikrometern und besser zu handhaben [Sey03].

Mikroroboter entsprechend dieser Definition können in vielfältigen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Neben den Bereichen Messtechnik oder Verifikation in der Chipherstellung (Waferprobing, etc.) steht insbesondere die Herstellung und Montage von Mikro- und Nanomaschinen im Vordergrund: beispielsweise bei der Fertigung medizinischer Ventile oder Stents, die 100mal kleiner sind als derzeitige Produkte, bei der Herstellung miniaturisierter Formwerkzeuge zur Erzeugung von Komponenten einer Mikrofabrik oder aber bei der Fertigung von Biochips für den Einsatz in sicherheitssensitiven Applikationen. Weiterhin finden Mikroroboter zunehmend Verwendung in der Medizin, genauer in der Roboter- bzw. Computer-unterstützten Chirurgie (CAS): So ist in der Mikrochirurgie für minimalinvasive Anwendungen (z. B. endovaskuläre Mikrobiopsien an Blutgefäßwänden) oder aber bei Operationen in der Neuro- und Gehirn-Chirurgie, höchste Präzision erforderlich. Abschließend sei an dieser Stelle als eines von zahlreichen interessanten Beispielen für den Einsatz von Mikrorobotern im Bereich der Biologie die automatisierte Durchführung von Zellinjektionsexperimenten in der Genetik (Manipulation von Proteinen oder genetischen Komponenten) aufgeführt.

Ein **flexibler mobiler Mikroroboter** ist ein "Mikroroboter, der sich auf oder in einem mit ihm nicht baulich verbundenen Basismedium fortbewegen kann" [Sey03]. Er besteht ebenso wie ein konventioneller mobiler Roboter aus zwei unabhängigen Teilsystemen, die das gesamte Einsatz- bzw. Bewegungspotential des Mikroroboters bestimmen: Aktoren zum Positionieren der Roboterplattform, im Folgenden Positioniereinheit genannt, und Aktoren zur Mikromanipulation von Objekten (nachfolgend als Manipulationseinheit bezeichnet). Das erste Teilsystem ("Roboterbeine") bestimmt dabei die Mobilität, das zweite Teilsystem ("Roboterarme und -hände") die Manipulationsfähigkeit des Mikroroboters.

Neben der bereits zuvor erläuterten Informationsautonomie, die eine Regelung on-Board mittels integrierter Sensoren beschreibt, existieren auf dem noch jungen Forschungsgebiet der Mikrorobotik noch weitere (abschwächende) Merkmale für autonomes Verhalten. Nicht selten wird bereits von autonomen Mikrorobotern gesprochen, wenn nur das Kriterium der räumlichen Beweglichkeit erfüllt ist, oder aber physikalische Autonomie, d. h. eine eigenständige Energieversorgung, für einen Mikroroboter vorliegt [Fat04].

Analog zur konventionellen Robotik können Mikromanipulationssysteme anhand von **Leistungsfähigkeit** bzw. **Intelligenzgrad** eingestuft werden. Es werden manuelle und automatisierte Manipulationssysteme unterschieden. Letztere werden weiter untergliedert in direkt teleoperierte, in aufgabenorientiert teleoperierte und in vollautomatische Mikrohandhabungsstationen. Bisher haben sich die meisten Untersuchungen auf den Übergang von rein manuellen zu teleoperierten Systemen konzentriert ([ZF98], [FA02a], [BMR04]). Der Fokus hat bei diesen Systemen allerdings auf der Entwicklung von geeigneten Mikromanipulatoren gelegen, die mit höchster Präzision Handhabungsoperationen (schnell) ausführen können. Die Forderungen nach Flexibilität und eines für den Bediener einfachen

Gebrauchs sind hierbei häufig vernachlässigt worden [KSTF05]. Entwicklungen von aufgabenorientierten und automatischen Systemen finden sich beispielsweise in [CRP97], [ZBW97], [FSF+00], [WSF+00], [YGN03], [Sey03] oder [ZAC+04].

2.3.2 Manuelle Mikromanipulationssysteme

Manuelle Mikromanipulation ist noch heute die am häufigsten eingesetzte Manipulationsmethode. So werden beispielsweise bei der Mikromontage die Montageteile von einem geübten Techniker mittels Schrauben, Federn oder Klemmmechanismen grob vorpositioniert, unter Zuhilfenahme von feinsten Pinzetten mit erheblichem Geschick in die Zielposition gebracht und dort mit kleinen Hämmern fixiert.

Auch bei einer manuell durchgeführten intracytoplasmatischen Spermieninjektion (kurz ICSI), bei der ein isoliertes Spermium in eine Eizelle injiziert wird, hängt der Erfolg der



Bild 2.8: Ein Biologe bedient die Mikromanipulatoren eines ICSI-Arbeitsplatzes. Die rechte Bildhälfte zeigt eine Ausschnittsvergrößerung des Monitorbildes. ([Sin05], mod.)

Zellmanipulation von den händischen Fähigkeiten des Biologen ab. Lichtmikroskope oder Lupen dienen bei den durchzuführenden Manipulationen als Visualisierungshilfen. Bild 2.8 zeigt einen ICSI-Arbeitsplatz: Ein Biologe bedient manuell die Mikromanipulatoren des Spezialmikroskops. Über Joysticks kann er die Pipetten be-

wegen sowie die Samenzelle ansaugen und einspritzen. In der Ausschnittsvergrößerung des Monitorbildes erkennt man rechts die Haltepipette, in der Mitte die Eizelle mit dem nach unten gerichteten Polkörperchen und links die Injektionspipette mit der isolierten Samenzelle (rot eingekreist).

Nachteilig bei der manuellen Manipulationsmethodik ist die begrenzte Genauigkeit, da der Mensch nur im Labormaßstab arbeiten kann. Außerdem ist aufgrund der hohen Arbeitsbelastung keine kontinuierlich stabile Produktqualität zu garantieren. Zudem verringern sich mit zunehmender Miniaturisierung der Komponenten die zulässigen Toleranzen, so dass die durch den Mensch als Quelle von Verunreinigungen hervorgerufenen Störeinflüsse, z. B. Hautpartikel oder Atemfeuchte, eine fehlerlose Durchführung der Mikromanipulationen erschweren oder gar vollständig verhindern.

2.3.3 Automatisierte Mikromanipulationssysteme

2.3.3.1 Prinzipieller Aufbau

Eine mikrorobotergestützte Manipulationsstation ist prinzipiell durch den in Bild 2.9 dargestellten Aufbau gekennzeichnet. Sie besteht aus der eigentlichen Manipulationseinheit



Bild 2.9: Prinzipieller Aufbau einer Mikromanipulations-Tischstation ([WSF+00], [KSTF05], mod.)

zur Bearbeitung der meist auf einer horizontalen Arbeitsfläche positionierten Objekte, dem Operationsmodul für den Bediener und der Steuerungseinheit. Für eine Rückkopplung des Manipulationsprozesses sorgen im Idealfall mehrere unterschiedliche Sensorsysteme, um die Zustände von Manipulatoren, Endeffektoren und den zu handhabenden Objekten zu bestimmen.

Das entsprechend Kapitel 2.2 essentielle visuelle Sensormodul (eine ausführlichere Beschreibung findet sich in Kapitel 2.3.3.2) wird dabei möglichst durch weitere taktile und akustische Systeme unterstützt: Beispielsweise werden Effektoren jeweils mit einem Mehrachsen-Kraftsensor ausgerüstet, um dessen Signale, nach einer Verstär-



Bild 2.10: Mikromontagesstation der TU HELSINKI in geregelter Umgebung ([ZAC+04], mod.) kung über einen Kraftrückführungshebel oder in entsprechende akustische Signale umgewandelt, an den Operator zu übermitteln. Äußere Störeinflüsse durch Vibration, Staub und Luftfeuchtigkeit können meist durch eine auf einem vibrationsbedämpften Tisch montierte Klimakammer reduziert werden (Bild 2.10). Aufgrund der überschaubaren geometrischen Abmaße der Mikroroboterarbeitsfläche (z. B. Mikroskoptisch oder Grundplatte für die REM-Vakuumkammer) trägt ein derarti-

ges Mikromanipulationssystem auch die Bezeichnung Mikromanipulations-,, Tischstation". Vergleicht man die derzeitigen, von Forschungsgruppen weltweit realisierten Mikromanipulationssysteme miteinander, so zeigt sich ein grundsätzlicher Unterschied, die Flexibilität und Mobilität der Manipulationseinheiten betreffend: Es ist zwischen ortsfesten Mikrorobotern und auf mobilen Robotern basierenden Mikromanipulatoren zu unterscheiden. Bei ortsfesten Manipulationseinheiten findet sich meist eine Kombination aus Grob- und Feinpositionierern. Die Grobpositionierer dienen dazu, angetrieben über (elektromagnetische, elektrodynamische oder elektrostatische) Feldantriebe oder neuerdings auch mittels sog. Festkörperantriebe (u. a. Piezoaktoren), die Endeffektoren in den Sichtbereich des visuellen Sensorsystems zu verfahren. Die Feinpositionierer, die hauptsächlich piezoelektrisch, elektromagnetisch oder elektrostatisch angetrieben werden, führen die eigentlichen Manipulationen am Mikroobjekt mit nm-Präzision durch. Für eine Beschreibung der wesentlichen Mikroroboterantriebe wird auf Anhang B.3 verwiesen. Beim mobilen Mikroroboter spricht man analog von der mobilen Plattform zur Positionierung des Roboters und der Manipulationseinheit, die mittels ihrer Endeffektoren Objekte manipuliert. Das Steuerungssystem muss in solch rechenintensiven Systemen modular aufgebaut werden, wobei die Grobpositionierer und die Feinpositionierer jeweils von einem Rechnermodul (Mikrocontroller oder PC-Modul) gesteuert werden.

Direkte Teleoperation

Direkt teleoperierte Mikromanipulationsstationen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Handbewegungen des Operators über einen speziellen Joystick oder, in Verbindung mit



Bild 2.11: GUI für teleoperierten Betrieb des *NANOROBOTERs* an der ETH ZÜRICH [CRP97] einer GUI, d. h. einer graphischen Bedienoberfläche (Bild 2.11), über eine Maus unmittelbar in Grob- und Feinbewegungen des Mikromanipulators im dreidimensionalen Arbeitsraum des Manipulationssystems umgesetzt werden.

Derartige Systeme benötigen eine große Anzahl an (rotatorischen) Freiheitsgraden für die Manipulatoren, da die Lage der Mikroobjekte und die Orientierung der Endeffektoren (Werkzeuge, Pipetten) bei vielen Anwendungen oft geändert werden müssen [Fat00]. Systemtheoretisch betrachtet handelt es sich bei einem teleoperierten System zunächst um einen offenen Regelkreis, die Manipulatoren werden (fern-) gesteuert. Durch eine geeignete Rückkopplung von Prozessinformationen kann der Regelkreis jedoch (über den Operator) geschlossen werden. In der Mikrotelerobotik wird daher besonderer Wert auf die Entwicklung von Technologien gelegt, die dem Bediener verschiedenartige Signale aus der

Mikrowelt, wie z. B. Bilder, Kräfte oder Töne möglichst realistisch übertragen [KSTF05]. Die Fähigkeiten der menschlichen Hand werden bei direkter Teleoperation durch technisch


Bild 2.12: Direkt teleoperiertes Manipulationssystem des japanischen Forschungslabors AOLAB: Drei mobile, kabelbetriebene Mikroroboter manipulieren in der Vakuumkammer eines REMs die Oberfläche einer Siliziumscheibe mittels YAG-Laser (Mikroablation). ([AF01], [FA02a], mod.)

ausgefeilte Lösungen unterstützt. Jedoch bleiben die grundsätzlichen Probleme wie Bewegungsauflösung, Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der Operationen bestehen, da die Werkzeugbewegungen eine direkte Nachahmung der Handbewegungen des Operators sind.

Bild 2.12 zeigt ein direkt teleoperiertes System, das im japanischen Forschungslabor für Mikrorobotertischstationen AOLAB der UNIVERSITÄT FÜR ELEKTRO-TELEKOMMUNIKATION VON TO-KIO entwickelt worden ist [FAO2a]. Drei mobile, per Kabel betriebene Mikroroboter (detaillierte Darstellung im rechten Bilddrittel) führen in einem Rasterelektronenmikroskop Mikroabtragungen z. B. an Siliziumwafern durch – ein Foto des Aufbaus mit den vor Manipulationsbeginn auf der Arbeitsplatte angeordneten kabelbetriebenen Mikrorobotern ist magentafarben eingerahmt. Per Glasfaserkabel, das auf einem der Mikroroboter fixiert ist, wird das Licht eines YAG-Lasers in die Vakuumkammer des REMs geführt; die beiden anderen Roboter verfahren die Siliziumscheibe, um den Laserstrahl an die gewünschte Stelle zu positionieren (grün umrandeter Bildbereich). Der Operator kann dabei die Bewegungen der Mikroroboter über ein Steuerpult oder über eine graphische Benutzeroberfläche am PC steuern. Weitere Freiheitsgrade bieten sich über die Positionsstellglieder der REM-Arbeitsplatte. Das Ergebnis der AOLAB Mikromanipulation ist dunkelblau eingerahmt [AF01].

Aufgabenorientierte Teleoperation

Sowohl Mikroobjekte als auch Mikrowerkzeuge sind aufgrund ihrer mechanischen Empfindlichkeit vorsichtig zu behandeln. Daher geht man mit zunehmender geforderter Hand-



Bild 2.13: Aufgabenorientierte Teleoperation: Die Bahn für einen Pipettengreifer wird mittels GUI definiert. ([CRP97], mod.)

habungsgenauigkeit, insbesondere aber bei gleichzeitigem Einsatz mehrerer Mikromanipulatoren zur aufgabenorientierten Teleoperation über, um folgenschwere Kollisionen der Roboterkomponenten zu vermeiden. Der Bediener wird im systemtheoretischen Sinne nicht mehr direkt in den Regelkreis einbezogen. Vielmehr gibt er dem Mikroroboter Befehle in Form einer höheren Kommandosprache (z. B. "Greife Objekt!") oder über ein Graphisches Benutzer-Interface. Bild 2.13 zeigt ein Beispiel für den graphisch eingegebenen Befehl "Bewege den Greifer mit vorgegebener Orientierung von Position A in die Ziel-Pose Z und passiere dabei die Posen X und Y":

Über einen per Maus gesteuerten Marker werden in einem vom visuellen Sensorsystem zur Verfügung gestellten Bild die gewünschten Posen unter Angabe der jeweils zulässigen Toleranzen für Position und Orientierung angegeben. Das Manipulationssystem führt den Befehl in Form einzelner Teilaufgaben, sog. Tasks, mit Hilfe der sensorischen Rückkopplung automatisch durch. Der Operator hat während der Befehlsausführung nur noch überwachende Funktion. Aufgabenorientierte Systeme erfordern eine gewisse Autonomie des Steuersystems, insbesondere automatische Bewegungskontrolle. Verglichen mit den direkt teleoperierten Systemen sind sie aufwändiger zu programmieren, da an das Sensorsystem zur Manipulationsrückkopplung, insbesondere an das visuelle System, hohe Ansprüche gestellt werden.

Vollautomatisierte Mikromanipulation

Im Gegensatz zur Mikrotelerobotik gibt es bei vollautomatisierten Mikromanipulationssystemen keine unmittelbare Verbindung mehr zwischen dem Operator und dem agierenden Mikroroboter. Die Manipulationsoperationen werden gesteuert oder, bei komplexen Aufgaben, geregelt durchgeführt. Der Benutzer entsendet einen kleinen künstlichen Assistenten direkt in den Arbeitsraum mit dem Ziel, dadurch seine begrenzten mikromanipulatorischen Fähigkeiten auszugleichen bzw. zu verbessern. Die Befehle des Bedieners werden mit Hilfe eines intelligenten Steuerungssystems an die Roboteraktoren in geeigneter Form weitergegeben; der Abstraktionsgrad der Kommandos bestimmt dabei die Leistungsfähigkeit der Steuerungsalgorithmen. Auch können mehrere Mikroroboter in einer multifunktionalen Mikromanipulations-Tischstation gleichzeitig tätig sein. Damit besteht beispielsweise die Möglichkeit, mehrere Arbeitszellen zu einer automatisierten Montagestraße, wie sie aus der robotergestützten (Fließband-)Fertigung bekannt ist, zu verbinden. Während der eigentlichen Durchführung der Mikromanipulationen hat der Operator lediglich beobachtende Funktion. Solange das Steuerungssystem in der Lage ist, Skalierungseffekte zu kompensieren bzw. den Systemzustand z. B. nach einer Objektbewegung wieder zu bestimmen, kann der Manipulationsprozess automatisiert ohne Eingriff des Bedieners weitergeführt werden.

Als Beispiel wird hier auf die *Flexible Mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstation FMMS* am INSTITUT FÜR PROZESSRECHENTECHNIK, AUTOMATION UND ROBOTIK (IPR) DER UNIVERSITÄT KARLSRUHE verwiesen (vgl. Bild 2.21), die u. a. für Mikromontageaufgaben eingesetzt wird [FSF+00]: Vor der eigentlichen Manipulationsdurchführung werden vom Anwender die Parameter zur Beschreibung des a priori Weltmodells (vgl. Kapitel 2.3.3.4), die Manipulationsaufgabe, die Dimensionen und Toleranzen der zu manipulierenden Objekte und die Eigenschaften der eingesetzten Mikroroboter in das System eingespeist. Dabei werden zu handhabende Objekte vom Benutzer aus mehreren geometrischen Grundelementen graphisch zusammengesetzt; zusätzliche Parameter werden derart ergänzt, dass die Beziehungen dieser Grundelemente zueinander für die Montageplanungs- und Steuerungseinheit verständlich werden.

2.3.3.2 Visuelles Sensorsystem

Das sichtbasierte Sensorsystem übernimmt die Aufgabe, für den Anwender Informationen über den aktuellen Verarbeitungsstand an einen Monitor zu übermitteln. Ausgefeilte Algorithmen erlauben die Überwachung und Beobachtung kleinster Mikrokomponenten in Echtzeit. Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, basiert die Visualisierungseinheit entweder



Überwachung des Arbeitsraumes

Vergrößerung für Manipulationsbereich

Bild 2.14: Ausschnitt einer graphischen Benutzeroberfläche zur Überwachung dreidimensionaler Mikromontageoperationen mit verschiedenen Perspektiven und Vergrößerungen ([YGN01], mod.) auf einem Lichtmikroskop mit angeschlossener CCD-/CMOS-Kamera oder, für höhere Auflösungen, auf einem Rasterelektronenmikroskop [FSF+00], [WSB+01], [BMR04], [KSTF05]. Bei älteren CCD-Kameras werden die Bilder über eine sog. Framegrabberkarte in den Arbeitsspeicher eines bildverarbeitenden PCs übertragen. Seit Einführung der Standards USB 2.0 und IEEE 1394 können hoch auflösende Industriekameras auch über diese Schnittstellen direkt an die Bildverarbeitungseinheit angeschlossen werden. Um die Posen der Endeffektoren und der Mikroobjekte zu bestimmen, werden die Bilder durch eine Bildverarbeitungseinheit aufbereitet: in teleoperierten Systemen für den Benutzer, in aufgabenorientierten bzw. vollautomatischen Systemen für die Manipulationsplanungs- und Steuerungseinheit. Das gesamte Operationsfeld muss für den Operator wahrnehmbar sein, möglichst, wie in Bild 2.14 dargestellt, mit *verschiedenen Sichtweisen* auf den Arbeitsraum. Hierzu werden die Mikroskope zusätzlich durch weitere Kamerasysteme ergänzt.

Bei der visuellen Manipulationsüberwachung wird zwischen **Lokalem und Globalem Sensorsystem** unterschieden [BF99], [MRSH00]. Das globale System dient zur Grobpositionierung der Mikroroboter bzw. Endeffektoren und zur Überwachung des Arbeitsbereiches, um z. B. bei gleichzeitigem Einsatz mehrerer Roboter folgenschwere Kollisionen zu verhindern. Die eigentliche Manipulation wird über das lokale Sensorsystem genau beobachtet. Diese Aufteilung des Visualisierungssystems findet sich insbesondere bei Mikromanipulationsstationen, die mit mobilen Mikrorobotern arbeiten; bei Manipulationssystemen mit ortsfesten Robotern ist diese Untergliederung nicht immer eindeutig.

In Hinblick auf Qualität und Effizienz der bildgebenden Sensorsysteme kommt der **Beleuchtung** eine besondere Bedeutung zu. Sie bestimmt maßgeblich die Güte des Bildverarbeitungssystems. Wird eine falsche oder zu schwache Beleuchtung gewählt, so erhält man eine schlechte Bildqualität, die sich z. B. in einem geringen Kontrast oder in unerwünschter Schattenbildung manifestiert. Die grundlegende Beleuchtungsmethode bei Grobpositionierungssystemen für Mikroroboter ist die Auflicht-Beleuchtung [Fat04]. Um störende Reflexionen zu vermeiden, die bei direkter Illumination eines stark reflektierenden Objekts entstehen können, wird häufig eine diffuse Beleuchtung beispielsweise durch Anstrahlen eines Reflektors mit diffus streuender Oberfläche (vgl. Bild 2.17) angestrebt.

Lokales Sensorsystem

Die Basis für das lokale Sensorsystem der Mikromanipulationsstation bildet entweder das eingesetzte ortsfeste Lichtmikroskop mit CCD-Kamera oder, bei höherer erforderlicher Genauigkeit, das Rasterelektronenmikroskop mit digitalem Bildgeber. Das lokale Sensorsystem unterstützt das Steuerungssystem bzw. den Operator, um die Robotereffektoren während der auszuführenden Mikromanipulationsaufgabe exakt positioniert einsetzen und das Verhalten der zu handhabenden Mikroobjekte überwachen zu können. Erreicht z. B. ein mobiler Roboter bzw. der entsprechende Endeffektor den Beobachtungsbereich des Mikroskops, so übernimmt das lokale System die Manipulationskontrolle. Der Arbeitsraum wird auf das Sichtfeld des Mikroskops herunterskaliert, um den Manipulationsvorgang hoch aufgelöst beobachten und im Falle von aufgabenorientierten bzw. vollautomatisierten Systemen automatisch regeln zu können.

An die Software zur Objekterkennung in Echtzeit werden aufgrund des eingegrenzten Ausschnitts des Arbeitsbereichs hohe Anforderungen gestellt, da nicht alle Mikroobjekte gleichzeitig beobachtet werden können oder aber ein großes Objekt nicht vollständig zu sehen ist. Bei der Lichtmikroskopie wird die Objekterkennung zusätzlich durch die geringe Tiefenschärfe erschwert, da immer nur eine schmale "Schicht" (fokale Ebene) scharf dargestellt werden kann. Alle Objekte ober- und unterhalb sind verschwommen oder gar nicht zu erkennen. Aufwändige technische Lösungen sind erforderlich, die eine Objekterkennung auch bei unscharfen Rändern des zu untersuchenden Objektes erlauben.

Eine häufig eingesetzte Technik, die Tiefeninformation aus dem 2D-Bild des Mikroskops zu gewinnen, ist die sog. *Depth-from-Defocus*-Methode ("Tiefe durch Defokussierung"),



Bild 2.15: Bildgenerierung durch Defokussiermethode ([SFF+00], mod.) die u. a. bei der FMMS an der UNIVERSITÄT KARLSRUHE eingesetzt wird [SFF+00]. Die begrenzte Fokussiertiefe wird, wie in Bild 2.15 dargestellt, durch Mehrfachfokussierung ausgeglichen: Sowohl die Endeffektoren eines Mikroroboters als auch ein Zahnrad befinden sich im Sichtfeld eines Lichtmikroskops, jedoch mit ver-

schiedenen Abständen zum Objektiv. Es werden mehrere Bilder entlang der Sichtachse des Mikroskops mit konsekutiven Fokussierebenen aufgenommen. Im Anschluss wird aus den verschiedenen scharf abgebildeten Bereichen ein neues Bild mit scharf umrandeten Objekten generiert, das für Objekterkennungsalgorithmen geeignet ist.

Für den kontrollierten Einsatz der Endeffektoren bzw. die Manipulation von Mikroobjekten ist die 2D-Darstellung durch das Mikroskopbild allein nicht ausreichend: Neben der ho-



Bild 2.16: Gewinnung der 3D-Bildinformation durch zusätzliche mikroskopische Sichtachse ([KYHN04], [YN05], mod.)

rizontalen Ausrichtung der Objekte wird zusätzlich eine Information über deren vertikalen Abstand zueinander benötigt. Weitere technische Systeme sind notwendig, die das Mikroskop ergänzen. Der 1995 von der ETH ZÜRICH (Schweiz) vorgestellte Nanoroboter verwendet ein Stereo-Lichtmikroskop mit zwei CCD-Kameras, um die Abstände der Mikrokomponenten zueinander zu ermitteln [ZBS95]: Durch geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen sind Auflösungen von ca. 300 nm erzielbar, die sogar das eigentliche Auflösungsvermögen des eingesetzten Lichtmikroskops übersteigen [CRP97]. Die FMMS am Karlsruher IPR kann zur Bestimmung der vertikalen Objektposition durch ein mit Tri-

angulationsverfahren arbeitendes Infrarot-Lasermesssystem ergänzt werden [Fat00]. Auf immobilen Mikrorobotern basierende Manipulationssysteme der jüngeren Generation nutzen mehrere um die Arbeitsfläche *verteilt positionierte Miniaturmikroskope*, die



Bild 2.17: Montagestation für ortsfeste Mikroroboter (4-DOF) mit verteilt angeordneten Miniaturmikroskopen ([KYHN04], mod.)

jeweils aus einer mit variablem Zoom ausgestatteten Mikroskoplinse und angeschlossener Kamera bestehen. Wie in Bild 2.16 zu erkennen, ist es durch die verschiedenen mikroskopischen Sichtachsen dem Operator möglich, mit mehreren 2D-Bildgebern in Echtzeit einen dreidimensionalen Einblick in die Mikrowelt, auf die Manipulatoren und die zu handhabenden Objekte zu erhalten [YN05] – je nach Anzahl der Miniaturmikroskope auch aus verschiedenen Perspektiven. Zusätzlich bieten diese Mikroskope eine bessere Schärfentiefe und daher auch mehr Arbeitsab-

stand im Vergleich zur herkömmlichen Lichtmikroskopie (vgl. Kapitel 2.2). Bild 2.17 zeigt als Beispiel den Ausschnitt einer an der ETH ZÜRICH entwickelten Mikromontagestation zur Handhabung von hybriden MEMS-Strukturen [KYHN04]: Es sind ein Mikrogreifer und der mit drei translatorischen und einem rotatorischen Freiheitsgrad aus-



Bild 2.18: Ausschnitt der Arbeitsfläche mit vergrößerter Darstellung der per STM analysierten Kohlenstoffgitteroberfläche ([MKH01], mod.)

gestattete Koordinatentisch abgebildet. Um den Tisch sind zwei optische Mikroskope des Typs VZM 300 der Firma EDMUND INDUSTRIAL OPTICS zu erkennen. Jedes ist mit einer CMOS-Kamera über eine IEEE 1394 Schnittstelle an die Bildverarbeitungseinheit angeschlossen. Die erzielbare Positionsauflösung liegt bei etwa 1,0 µm. Ein weiteres Beispiel für eine Mehrfachmikroskopanwendung findet sich in Kapitel 2.4.3.1.

Der Drang zu kleinen mobilen Mikrorobotersystemen verlangt nach immer kleiner werdenden (mobilen) lokalen Sensorsystemen. So wird ein Rastertunnelmikroskop (STM) als lokales Sensorsystem direkt in den am MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT) entwickelten mobilen Mikroroboter NanoWalker integriert: Für die Arbeitsfläche des NanoWalkers wird die Oberfläche als spezielles Gitter aus hoch geordnetem pyrolytischem Kohlenstoff (HOPG, Highly Oriented Pyrolytic Graphite) hergestellt [SBD+04]. Durch Einsatz seines STMs ist der Roboter in der Lage, die einzelnen Gitteratome zu zählen und hierdurch im Subnanometerbereich bis auf wenige Ängström genau eine in einem vorhergehenden Oberflächenscan ermittelte Position nochmals anzufahren [MKH01]. Bild 2.18 zeigt einen Ausschnitt der Kohlenstoffoberfläche. Der NanoWalker wird zunächst mit Hilfe seines globalen Sensorsystems bis zum Startpunkt geleitet. Daraufhin analysiert der Mikroroboter mit seinem STM die Oberfläche und verfährt, bis er schließlich den Zielort erreicht, um dort mit seiner Manipulationsoperation fortzufahren.

Globales Sensorsystem

Das Globale Sensorsystem hat die Aufgabe, den Arbeitsbereich zu überblicken, die Position und Orientierung der Roboter zu detektieren und den Operator bzw. die Manipulationsplanungs- und Steuerungseinheit über die Posen der auf der Arbeitsfläche arbeitenden Roboter zu informieren. Im Sinne einer höheren Flexibilität und Mobilität für die Mikroroboter haben sich für das globale Sensorsystem berührungslose Messverfahren als besonders geeignet herauskristallisiert.



Bild 2.19: Konzept der *NanoWalker* Manipulationszelle mit globalem Sensorsystem: Ein Ausschnitt der Roboterarbeitsfläche wird über eine Linse mit IR-Filter auf ein zweidimen- NanoWakers in heliumgekühlter Klimasionales PSD (Beispielexemplare links unten) projiziert.



Bei der Manipulationsstation NanoWalker beispielsweise basiert das globale Positionierungssystem GSPS auf einem halbleitenden Positionsdetektor (PSD), dessen zweidimensional angeordnete Photodioden auf Infrarotlicht reagieren. Bild 2.19 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer sog. NanoWalker Kommunikations-/Positionierungszelle [MRSH00]. Der NanoWalker (vgl. Bild 2.36 in Kapitel 2.4.3.3) ist mit zwei Infrarotleuchtdioden (IR-LEDs) als Marker auf seiner Oberseite ausgerüstet, die, mit 100 mA betrieben, abwechselnd aufleuchten; die jeweilige Aufleuchtdauer kann zwischen 10 µs und 400 ms variiert werden. Das IR-Licht wird über eine Linse auf ein zweidimensionales PSD mit einer aktiven Fläche von 20 x 20 mm² abgebildet. Der Photodiodenstrom wird in ein aussagekräftiges Spannungssignal transformiert und danach verstärkt. Mit Hilfe des durch A/D-Wandlung ermittelten digitalen Spannungswertes wird die Position der leuchtenden Marker-LED von einem Computer bestimmt. Die Genauigkeit schwankt je nach Abstand der Linse von der Roboterarbeitsfläche zwischen 1,6 µm und 10 µm [MKR+01], [MB03]. Entsprechend der gewählten Ausleuchtdauer liegt die Frequenz für das Positionsupdate zwischen 2,5 Hz und 100 kHz. Durch Auswertung der beiden abwechselnd leuchtenden LEDs wird die Pose des NanoWalkers ermittelt und dem Operator über ein graphisches Benutzerinterface angezeigt [MRSH00]. Je nach eingesetzter Linse kann ein kreisrunder Ausschnitt mit einem Durchmesser zwischen 0,33 m und 0,5 m auf die aktive Fläche des PSDs projiziert werden. Durch Einsatz eines x-y-Tisches lässt sich die Linse samt PSD verschieben, um so die gesamte Roboterarbeitsfläche (*Power Floor* mit Graphit-Oberfläche) überwachen zu können. Bild 2.20 zeigt eine immobile Alternative für die Überwachung des gesamten *Power Floors*: Es werden mehrere verteilt angeordnete Linsensysteme mit jeweils angeschlossenem IR-PSD eingesetzt, wobei jedes PSD-System jeweils nur einen Teilbereich der Arbeitsfläche abdeckt [MB03].



Bild 2.21: Flexible mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstation mit dem per Kabel betriebenen Mikroroboter *MINIMAN-II* am IPR der UNIVERSITÄT KARLSRUHE. Eine Momentaufnahme der globalen monochromen CCD-Kamera ist im rechten Bilddrittel dargestellt ([FSF+99], [Sey03], mod.).

Eine weitere Möglichkeit, die Pose eines Mikroroboters auf der Arbeitsunterlage bei aufgabenbedingtem Manövrieren (z. B. Transportieren von Mikroobjekten) zu erfassen, bietet sich bei Einsatz einer bzw. mehrerer CCD-Kameras auf der Basis der rechnergestützten Bildverarbeitung. Die flexible mikroroboterbasierte Montagestation MINMAN der UNI-VERSITÄT KARLSRUHE operiert über eine monochrome CCD-Kamera in Verbindung mit Infrarotleuchtdioden. Diese sind als Marker, ein gleichschenkliges Dreieck bildend, auf der Oberseite am jeweils eingesetzten Mikroroboter positioniert [FSF+00]. Über geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen lässt sich aus dem 2D-Bild der globalen CCD-Kamera, genauer aus der Anordnung der leuchtenden IR-LEDs, die Pose des Roboters ermitteln. Die Auflösung liegt im Bereich um 0,5 mm. Bild 2.21 zeigt den Aufbau der FMMS mit einem am IPR entwickelten, über Kabel sowohl informationstechnisch als auch mit Energie versorgten, dezimetergroßen Mikroroboter vom Typ MINIMAN-II. Im linken und mittleren Teil ist die durch ein Glasgehäuse geschützte, vollautomatisierte Manipulationsstation abgebildet, die auf einem mit einer CCD-Kamera ausgerüsteten Mikroskop basiert. Eine weitere monochrome CCD-Kamera überwacht die Posen des verkabelten Mikroroboters. Ganz rechts im Bild ist eine Momentaufnahme der als globaler Sensor arbeitenden Monochromkamera zu sehen, die das Aufleuchten der drei IR-LEDs des überwachten Mikroroboters zeiat.

Ein ähnliches Konzept wird von der Abteilung für Mikrorobotik und Regelungstechnik (AMiR) an der Universität Oldenburg verfolgt. Dort entwickelte mobile Mikroroboter für den Einsatz in einer REM-Vakuumkammer (siehe [KSTF05]) werden auf der Unterseite ihrer mobilen Mikroroboterplattform mit einer unverwechselbaren Markierung versehen. Die mobile Plattform wird mittels IR-LED-Panels von der Unterseite durch eine mit Metall bedampfte Glasplatte (Roboterarbeitsfläche) beleuchtet. Etwa 12 Bilder/s werden über eine CCD-Kamera aufgenommen und an eine Bildverarbeitungseinheit zur Bestimmung der Mikroroboterpose weitergeleitet. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung beträgt im Mittel 500 µm [Fat04].

2.3.3.3 Operationsmodul

Das Operationsmodul bildet die physikalische Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die Handbewegungen des Bedieners werden über das Operationsmodul mit Hilfe der Steuerungseinheiten bis in die Mikrowelt unter dem Mikroskop herunterskaliert. Für die Bedienung der Mikromanipulationsstation werden dabei sog. Haptikgeräte eingesetzt. Die Telemikrorobotik setzt auf *aktive Haptik-Schnittstellen* beispielsweise spezielle 3D-Computermäuse [WSF+00] oder aber 3D-Joysticks, die über eine Kraftrückkopplung verfügen [KSTF05]. In diese hoch entwickelten Geräte sind sowohl Sensoren also auch Aktoren integriert. Sie besitzen i. d. R. einen Mehrachsen-Kraftsensor, der die vom Operator ausgeübten Kräfte ermittelt, und Gleichstrommotoren mit Geschwindigkeitskontrolle, um dem Benutzer durch Bewegungen des Joysticks einen Eindruck von den in der Mikrowelt herrschenden Kräfteverhältnissen zu vermitteln (Force Feedback).

Tastatur, Maus, und Trackball zählen zu den *passiven haptischen Schnittstellen*, welche die Handbewegungen des Operators erfassen. Sie werden hauptsächlich in aufgabenorientierten und vollautomatisierten Mikromanipulatoren eingesetzt, bei denen die Manipulationen, durch ein Sensorsystem überwacht, gesteuert bzw. bei hoher geforderter Genauigkeit geregelt durchgeführt werden. Der Bediener wirkt über die passiven Haptikgeräte entweder textbasiert oder über eine graphische Benutzeroberfläche (vgl. aufgabenorientierte Teleoperation in Kapitel 2.3.3.1) auf das Manipulationssystem ein. Während der eigentlichen Manipulationsdurchführung werden die Mikromanipulationen vom Operator lediglich beobachtet. Da er die Manipulatoren nicht unmittelbar steuernd oder regelnd beeinflusst, wird keine direkte Rückinformation durch das Operationsmodul benötigt. In teleoperierten Systemen finden passive Haptikgeräte nur selten Anwendung, da hier eine Rückkopplung aus der Mikrowelt vom Benutzer immer erwünscht ist – lediglich für erste Funktionstests wird eine manuelle (passive) Steuerung der Manipulatoren implementiert.

2.3.3.4 Steuerungseinheit

Die Steuersignale von Robotern so zu berechnen, dass diese das für die Manipulation vorgesehene Verhalten aufweisen, ist die Aufgabe der Manipulationskontrolleinheit, kurz Steuerungseinheit. Die Steuerung und Regelung von Mikrorobotern in einer Mikromanipulationsstation erfordert ein hohes Maß an Systemintelligenz, die durch ein leistungsfähiges, flexibel erweiterbares Rechnersystem unterstützt werden muss:

- Bereits bei einem Stationsroboter müssen die Roboteraktoren von Plattform, Manipulationseinheit und Endeffektoren aufeinander abgestimmt und angesteuert werden.
- Aufgrund der geforderten Manipulationsgenauigkeit sind Sensordaten der zu platzierenden (bewegten oder beweglichen) Sensoren einzulesen und auszuwerten, um die Zustände der Manipulatoren, Endeffektoren, Objekte und Kraftsensoren zu messen. Bei aufgabenorientierten und vollautomatisierten Systemen ist weiterhin eine automatische Qualitätssicherung des Manipulationsvorgangs zu gewährleisten.
- Durch gleichzeitigen Einsatz mehrerer Sensoren stellt sich zusätzlich die Aufgabe der Sensordatenfusion, die den Prozess beschreibt, aus den Informationen mehrerer Sensormodalitäten (d. h. Sensortypen) ein Konzept von der Umwelt zu erstellen [Neh02]. Die bzgl. ihres Gehalts redundanten Informationen aus verschiedenen Sensorquellen (Teilansichten) sind zu einem einheitlichen Bild zu verschmelzen. Hierbei sind zu verschiedenen Zeitpunkten (asynchron) erworbene Sensordaten chronologisch zu ordnen, Widersprüche aufzulösen und Lücken zu füllen [KCB00].
- Sämtliche Operationen der Station müssen in Echtzeit durchgeführt werden, weiterhin muss dem Operator die Möglichkeit gegeben sein, im Falle einer kritischen Prozesssituation den Roboter schnell ansprechen zu können. Wird die Manipulationsstation durch Systeme mit eigener Steuerungseinheit ergänzt, so nimmt die Komplexität bei der Integration dieser Systeme in das Gesamtsystem aufgrund der zusätzlichen informationstechnischen Anforderungen weiter zu; als Beispiel sei hier ein Zuführungssystem (für Materialien, Teile, Werkzeuge, etc.) mit selbstständig verwalteter Steuerung zur Ergänzung einer Mikromontagestation genannt.
- Für zahlreiche Manipulationsaufgaben sind mindestens zwei Mikroroboter nötig ("helfende Hand"). Moderne Steuerungssysteme sollten daher **mehrroboterfähig** realisiert sein, zumal derartige Umsetzungen weiteres Potential für parallelisierte Manipulationsabläufe und damit verkürzte Bearbeitungszeiten bieten (vgl. auch Kapitel 2.4.2.2).

Die Komplexität der Mikromanipulationssysteme und der damit verbundenen hardwareund softwaretechnischen Lösungen steigt jedoch mit der Anzahl der eingesetzten Mikroroboter und erfordert insbesondere bei auf mobilen Mikrorobotern basierenden Manipulationsstationen eine **modulare Steuerungsarchitektur**, die entsprechend Bild 2.22 in Benutzerebene, Steuerungsebene und Prozessebene untergliedert werden kann.

Auf der **Benutzerebene** wird dem Anwender eine multimodale Benutzerschnittstelle zur Überwachung und/oder zum Eingreifen in den Manipulationsprozess zur Verfügung gestellt: Das Operationsmodul (vgl. Kapitel 2.3.3.3) kann hierbei, wie beispielsweise bei den Miniaturrobotern vom Typ *KHEPERA* umgesetzt [Cyb06], durch Werkzeuge zur Softwareerstellung und zur Simulation der geplanten Manipulationsaufgaben ergänzt werden. Zusätzlich werden bei aufgabenorientierten und vollautomatisierten Manipulationssyste-



Bild 2.22: Modulare Steuerungsarchitektur einer flexiblen Mikromanipulationsstation (angelehnt an [Fat00], [FSF+00])

men die für die Manipulationsstation benötigten Wissensbasen mit Informationen über die vorhandenen Mikroroboter, die Fähigkeiten der Manipulationsstation und die zu manipulierenden Komponenten gespeist.

Auf der Steuerungsebene findet sich generell eine Unterteilung in Planungsebene und Ausführungsebene. Abhängig vom Automatisierungsgrad und der Vielschichtigkeit des Steuerungsproblems in der Mikromanipulationsstation werden Planungsund Ausführungsebene ieweils in weitere Unterebenen untergliedert. Sowohl für die Planung als auch die Ausführung der Manipulationsoperationen wird vorprogrammiertes Wissen benöbeispielsweise Bahnplatiqt, nungsalgorithmen oder Algorithmen, um etwa eine vom Operator selektierte biologische Zelle in einem Nährmedium (Petrischale) separieren zu können.

Weiterhin sind Algorithmen zur Integration und Auswertung von Sensordaten zu implementieren. Diese werden aufgrund nicht voraussehbarer Parasitäreffekte während der Manipulationsoperationen benötigt: vom Robotersteuerungssystem zur Überwachung und Steuerung und von der Manipulationsplanungsebene zur Überwachung und gegebenenfalls Neuplanung.

Die **Prozessebene** schließlich umfasst sämtliche Manipulationsoperationen durch die Mikroroboter, beispielsweise das Greifen, Transportieren, Absetzen und Justieren von Mikrokomponenten; auch das Messen, Inspizieren und Analysieren von Werkstoffen sowie die von Periphersystemen durchgeführten Operationen lassen sich dieser Ebene zuordnen.

Planungsebene

In aufgabenorientierten und vollautomatisierten Manipulationssystemen sorgt die Planungsebene, unterteilt in *Manipulationsplanung* und *Ausführungsplanung* [Fat00], für eine aufgabenspezifische Aufteilung der benötigten Roboter und Werkzeuge sowie ihrer Bewegungen und Kräfte, um einen störungs- und kollisionsfreien Ablauf des Manipulationsprozesses zu realisieren – für direkte Mikroteleoperation spielt die Planungsebene nur eine untergeordnete Rolle, da dort der Operator vollständig die Prozessplanung übernimmt.

Bei der Manipulationsplanung wird zunächst die korrekte Abfolge der einzelnen Operationsschritte aus der vom Benutzer eingegebenen Aufgabenstellung bzw. Bewegungsvorgabe (bei aufgabenorientierter Telerobotik) ermittelt. Im Anschluss folgt die Auswahl des optimalen Operationsplanes, bei der insbesondere die Besonderheiten der Mikrowelt berücksichtigt werden müssen: Schwierige Manipulationsabläufe sind über die Kostenfunktion des Planers bereits zu Beginn auszuschließen. Mit der Dekomposition des ausgewählten Manipulationsplans und der Zuteilung der Einzelaufgaben an die in der Manipulationsstation vorhandenen Mikroroboter wird der Manipulationsplanungsvorgang abgeschlossen. Hierbei gilt es zu beachten, dass jede einzelne Operation der erzeugten Manipulationssequenz jeweils demjenigen verfügbaren Roboter zugeordnet wird, dessen Leistungskapazität und aktueller Status (Roboterpose und -ausstattung) zur Durchführung der Operation am besten geeignet sind.

Die Ausführungsplanung sorgt für die Interpretation und Transformation der geplanten Operationsschritte in explizite, roboterspezifische Anweisungen. Die Ausführungsplanung übernimmt darüber hinaus die Bewegungsplanung: Für stationäre Roboter wird eine hohe Armgeschwindigkeit hin auf einen Zielpunkt bei gleichzeitig hoher Bahntreue und möglichst geringer mechanischer Belastung der Gelenkmotoren angestrebt; für mobile Roboter muss ein kostenoptimierter Kompromiss bzgl. des Einsatzes von Positionier- und Manipulationseinheit gefunden werden. Sowohl für stationäre als auch mobile Roboter gilt es, Kollisionen mit statischen oder bewegten Objekten zu vermeiden. Die Tendenz zu Mikromanipulationssystemen, die auf kooperierenden mobilen Robotern basieren, erfordert zunehmend den unmittelbaren Einbezug von Sensorik in die Ausführungsplanung, insbesondere für die kollisionsfreie Trajektorienplanung. Eine integrierte Sensoreinsatzplanung muss hierzu sicherstellen, dass für jeden geplanten Manipulationsschritt ein Sensor zur Überwachung der korrekten Durchführung verfügbar ist. Die Sensoreinsatzplanung aktiviert die entsprechenden Sensoren und ermittelt diejenigen Parameter, die eine Lösung der ihr gestellten Erkennungsaufgabe, unter Beachtung einer vorgeschriebenen Erkennungsqualität und gegebenenfalls unter Beachtung einer Obergrenze für die entstehenden Kosten, erlauben. Solche Parameter sind beispielsweise der Sensorstandort bzw. der Sichtwinkel (bei bewegbaren bzw. mitbewegten Sensoren), sowie die Empfindlichkeit und der fokussierte Bereich ("region-of-interest") [KCB00]. Die Sensoreinsatzplanung soll hierbei weitgehend automatisch die Parameter in der Wechselwirkung zwischen Erkennungsaufgabe, Objektstruktur und Sensorcharakteristik bestimmen, um daraus einen Plan zu generieren, der sowohl räumlich als auch zeitlich die verfügbaren Sensoren mittels entsprechender Parameter aktiviert – eine solche Planung ist die Voraussetzung für eine sinnvolle Fusion der redundanten Informationen der einzelnen Sensoren.

Die gesamte Planungsebene ist derart zu implementieren, dass sie im Fehlerfall ein Wiederaufsetzen des Planers erlaubt, um bei fehlgeschlagenen Manipulationsschritten oder Ausfällen im Robotersystem eine möglichst hohe Abdeckung des primären Manipulationsplanes zu erzielen. Ein möglicher Lösungsansatz für einen Planer zur Durchführung von Mikromontageoperationen bzw. zur Handhabung biologischer Zellen in einer flexiblen mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation findet sich in [Sey99], [Fat00] und [SFF+00]. Dort werden insbesondere monodirektionale, nichtlineare Montageplanungssysteme propagiert, um einerseits den immer komplexer werdenden Geometrien zukünftiger Mikrosysteme, andererseits der hohen Komplexität von Mehrrobotersystemen Rechnung zu tragen [Sey03].

Ausführungsebene

Die Ausführungsebene wird wie die Planungsebene in mehrere Komponenten unterteilt, um die Komplexität jedes einzelnen Moduls beherrschbar zu halten. Die Aufgaben reichen dabei von der Interpretation des Roboteroperationsplanes bis zur Ansteuerung einzelner Aktoren der Mikroroboter durch das **Robotersteuerungssystem**, der wichtigsten Komponente der Ausführungsebene. Das Robotersteuerungssystem setzt die geplanten Manipulationsaktionen in die entsprechenden Grobbewegungen der Positioniereinheit bzw. in die Feinbewegungen von Manipulator und Endeffektor um. Je nach Realisierung der Mikromanipulationsstation ist hierzu eine hohe E/A-Leistung des Rechnersystems notwendig. Werden beispielsweise piezoaktorisch angetriebene mobile Mikroroboter eingesetzt, so bedarf es für die Steuersignale der Roboter eines Ansteuerbereichs, der mehrere Größenordnungen hinsichtlich Geschwindigkeit und Genauigkeit je nach Steuerungssituation überdeckt: Zur Grobpositionierung mit hoher Geschwindigkeit sind hohe Datenraten notwendig; die Auflösung des ansteuernden Signals ist für diese Steuerungssituation nicht essentiell. Sie ist vielmehr bei der hoch aufgelösten Präzisionsbewegung der Manipulationseinheit mit ihren Endeffektoren bestimmender Faktor. Als Beispiel sei hier auf einen Mikroroboter vom Typ MINIMAN für die FMMS der Universität Karlsruhe verwiesen, der, als 6-DOF-Roboter ausgestattet, mit 25 einzelnen Aktoren bei 256 Abtastwerten je Periode, einer Samplerate von 2 kHz und einer Auflösung von 8 Bit/Sample ein Datenvolumen von 12,8 MByte/s zur Ansteuerung benötigt [Sey03].

Zur Erzielung der geforderten Genauigkeit muss die Steuerungseinheit die Durchführung der vom Interpreter ausgehenden Befehle durch die innerhalb der Manipulationsstation eingesetzten (lokalen und globalen) Stations- und Robotersensoren überwachen. Daten von Kraft- oder Berührungssensoren, Position und Orientierung der Roboter und Pose bzw. weitere Merkmale der zu manipulierenden Komponenten im Arbeitsraum werden als Rückkopplungsinformation dem Robotersteuerungssystem übermittelt. Auf diese Weise können mehrere Regelkreise gebildet werden, die miteinander in Kooperation für die geregelte Prozessdurchführung sorgen [SES+03]. Die Regelalgorithmen können hierbei sowohl modellbasiert als Zustandsregelung (bei Vorhandenseins eines mathematischen Modells der Strecke) als auch verhaltensbasiert mittels Fuzzy-Regler oder Abbildung auf ein künstliches neuronales Netz arbeiten [SFF99], [PW02]. Beispielsweise verwendet die Mikromanipulationsstation der Abteilung für Mikrorobotik und Regelungstechnik (AMiR) an der Universität Oldenburg ein Regelungssystem, das in zwei Module hierarchisch untergliedert ist: Das HILEC-Modul (High-Level Control) ermittelt aus den vom Sensorsystem gemessenen Zuständen die gewünschten Zustände der Manipulatoren, Endeffektoren, Objekte und Kraftsensoren und stößt, basierend auf den gewünschten Zuständen, sog. Prozess-Primitiven im untergeordneten LOLEC-Modul (Low-Level Control) an. Das LOLEC-Modul vergleicht ständig die gewünschten Zustände mit den gemessenen Zuständen und ermittelt die notwendigen Parameter für die Signalgeneratoren, die letztendlich die Steuersignale für die Roboteraktoren erzeugen. Für eine weiterführende Betrachtung dieser Manipulationsstation wird auf [Fat04] verwiesen; dort findet sich auch eine ausführliche Behandlung verschiedener Regelungsansätze zur Steuerung von Mikrorobotern (zustandsgeregelt, verhaltensbasiert, adaptiv, generisch, etc.).

Wissensbasen

Die Planungs- und Steuerungsalgorithmen benötigen teilweise Daten der intern gewarteten Wissensbasen. In der mobilen Robotik bezeichnet man diese Wissensbasen als Weltmodell [Neh02]; im Zusammenhang mit Mikromanipulationsstationen findet sich zusätzlich eine Untergliederung in *Weltmodell-Wissensbasis* und *Produkt-Wissensbasis*.

Das (wissensbasierte) Weltmodell enthält Informationen über die Realisierung der Manipulationsstation und ihre Einsatzmöglichkeiten. Sie berücksichtigt Daten über die Zustände der Manipulationsstation, über Roboter und Sensoren. Die Strukturierung des Weltmodells, insbesondere die Modellierung der Roboterumwelt, bestimmt maßgeblich die Parameter für die Planungs- und Steuerungsalgorithmen, die Formulierung der durchzuführenden Manipulationsaufgaben und die daraus abgeleiteten Befehle [Fat00]. Die Planungsebene greift auf die Umweltwissensbasis zurück, um die Durchführbarkeit der Manipulationsoperationen zu prüfen. Dies könnte die Sichtbarkeit z. B. eines zu montierenden Bauteils oder einer zu transportierenden, biologischen Zelle betreffen, um eine automatische Sichtkontrolle während der Manipulationsdurchführung zu garantieren. Weiterhin werden die Manipulationsfähigkeiten der beteiligten Roboter und Hilfseinrichtungen in Hinblick auf notwendige translatorische und rotatorische Freiheitsgrade beachtet.

Die objektorientierte Produkt-Wissensbasis umfasst Daten über die zu manipulierenden Komponenten, beispielsweise Informationen über Materialien bzw. Geometrien sowie produktspezifische Spezifikationen und Handhabungseinschränkungen.

Informationsflussdiagramm

Bild 2.23 stellt den prinzipiellen Daten- und Informationsfluss, untergliedert in drei Funktionsebenen, in einer mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation dar. Die *Aufgabentransformation* dient dazu, mit Hilfe des Manipulationsplaners die Aufgabenstellung des Benutzers in für jeden Stationsroboter interpretierbare Anweisungen umzuwandeln. Als Eingabe erhält diese Ebene in direkt teleoperierten Systemen eine über ein GUI oder eine haptische Schnittstelle angeforderte Bewegungsvorgabe ("Gehe nach rechts!" oder "Greifer schließen!"), in aufgabenorientierten oder vollautomatisierten Systemen ein aufgaben-



Bild 2.23: Informationsfluss in einer mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation

orientiertes sprachlich formuliertes Programm ("Gehe zu Teil A, greife es und transportiere es zu Position B!").

Hierbei kann ein graphisches Simulationssystem den Benutzer unterstützen: Dieses kann z. B. bei der graphischen Eingabe der Trajektorien und Posen für die eingesetzten Mikroroboter (vgl. Bild 2.13) bereits vor der Manipulationsdurchführung überprüfen, ob der gesamte Manipulationsprozess unter Sensorüberwachung durchführbar ist. Im Fehlerfalle kann der Simulator den Operator direkt auf die Notwendigkeit für eine Änderung der Aufgabenstellung hinweisen bzw. den Manipulationsplaner dazu veranlassen, einen neuen Manipulationsplan zu erarbeiten. Unterstützt werden Planer und Simulator durch die a priori Weltwissensbasis, um z. B. Neuplanung bzw. Programmänderungen in Echtzeit zu ermöglichen.

Die zentrale Komponente der Programminterpretationsebene ist die Exe-

kutive, häufig als AEU (Autonomous Execution Unit) bezeichnet, die als übergeordnete Steuerung des Robotersystems fungiert. Sie interpretiert die vom Manipulationsplaner erhaltenen expliziten Roboterbefehle (z. B. Positionierbefehle, Feinmanipulationsbefehle und Sensorabfragebefehle) und generiert aus diesen entsprechende Steueranweisungen, die an die Robotersteuerung übergeben werden. In der Daten- und Wissensbasis werden Datenobjekte und Variablen des Roboterprogramms gespeichert, um beispielsweise in den Roboterbefehlen angegebene Positionsangaben mit Hilfe der Weltmodell-Wissensbasis auf Gültigkeit prüfen zu können. Mit Hilfe des Überwachungsmoduls, das die vorhandenen Sensordaten abfragt und auswertet, wird der gesamte Manipulationsprozess qualitativ gesichert.

Die *Befehlsausführungsebene* bildet als unterste Abstraktionsebene die vorhandene Hardwarestruktur der Mikromanipulationsstation ab. Dies umfasst neben den Mikrorobotern mit ihren Endeffektoren auch Zusatzkomponenten, wie z. B. Mikrodosierer, Systeme zur Materialzuführung (Wechsel der Werkstückpaletten, Zubringetechniken) oder automatisiert ansteuerbare x-y-Positioniertische der eingesetzten Mikroskope. Das Robotersteuerungssystem erhält als Eingabe die Bewegungsanweisungen sowohl für die Mikroroboter als auch die peripheren Komponenten der Mikromanipulationsstation. Über die Positionier- und Manipulationsaktoren der Roboter bzw. Zusatzkomponenten führt das Robotersteuerungssystem diese Anweisungen aus und wirkt in den Manipulationsprozess ein. Die aktuelle Prozesssituation wird dabei über die lokalen und globalen Stations- und Robotersensoren ständig erfasst und als Rückkopplungsinformation dem komplexen (adaptiven) Steuerungs- und Regelungssystem zugeführt.

2.4 Mikroroboter

2.4.1 Grundanforderungen

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert, sind insbesondere die winzigen Dimensionen der zu manipulierenden Objekte und die hierdurch implizierten Schwierigkeiten (vgl. Kapitel 2.2) für die fortwährende Entwicklung von automatisierten, robotergestützten Mikromanipulationsstationen verantwortlich. Für diese Systeme werden Mikroroboter entsprechend der Definition von Kapitel 2.3.1 konzipiert und eingesetzt. Unabhängig vom jeweiligen Einsatzgebiet des Mikroroboters lassen sich grundsätzliche Anforderungen formulieren:

- 1. Mikroroboter müssen höchst präzise, d. h. möglichst bis in den Nanometerbereich hinein, arbeiten und
- 2. dabei über möglichst viele (jedoch mindestens drei) Freiheitsgrade verfügen können.
- 3. Entsprechend Kapitel 2.2 ist der Mikroroboter derart zu entwickeln, dass er eine sensorische Überwachung des Manipulationsprozesses zulässt.
- 4. Weiterhin sollte der Mikroroboter flexibel und an verschiedene Aufgabengebiete anpassbar sein.
- 5. Hierzu sollten vermehrt standardisierte Schnittstellen Einsatz finden, die neben besserer Kompatibilität eine kostengünstigere Fertigung der mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation erlauben.

In diesem Kapitel werden die in Mikromanipulationsstationen eingesetzten Mikroroboter näher betrachtet. Nach Einführung verschiedener Klassifikationskriterien zur Kategorisierung der zahlreichen Realisierungsansätze für Mikroroboter werden anhand bereits bestehender Manipulationsstationen die Vor- und Nachteile bisheriger Mikrorobotersysteme aufgezeigt. Darauf basierend werden die Anforderungen sowohl für mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstationen der jüngsten Generation als auch für zukünftige Mikromanipulationssysteme herausgearbeitet, für die das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Kommunikationssystems eingesetzt werden soll/kann.

2.4.2 Klassifikation von Mikrorobotern

In der Literatur finden sich die unterschiedlichsten Antworten auf die Frage: "Was ist ein Mikroroboter?". Besonders deutlich wird dies bei Betrachten des an der ETH ZÜRICH entwickelten "Nanoroboters", der aufgrund seines Namens den Eindruck vermittelt, es handele sich um einen Roboter mit physikalischen Hauptabmaßen in der Größenordnung weniger Moleküle. Stattdessen verstehen die Entwickler dieses Systems darunter eine mehrere Kubikmeter umfassende Anlage mit Rasterelektronenmikroskopen, die Manipulationen im Nanometerbereich erlaubt [ZBW97]. Dieses Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit nach Klassifikationskriterien, die in Ergänzung zur Mikroroboter-Definition des Kapitels 2.3.1 eine ausreichende Orientierungshilfe auf dem Forschungsgebiet der Mikroroboter bieten. Die derzeit wesentlichen Klassifikationssäulen sind die größenbezogene Klassifikation, die aufgabenspezifische Klassifikation und die funktionale Klassifikation, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

2.4.2.1 Klassifikation nach Größe

Ein Vorschlag zur Klassifikation von Robotern hinsichtlich ihrer physikalischen Abmessungen findet sich in [FR97]. Es wird unterschieden zwischen **Miniaturrobotern**¹, die Abma-Be von einigen Kubikzentimetern aufweisen, **Mikrorobotern** mit einem Volumen von einigen Kubikmikrometern und **Nanomaschinen** mit Dimensionen unterhalb des Kubikmikrometerbereichs. Nach oben kann diese Klassifikation zunächst durch die sog. "mesoscale

¹ häufig auch als Miniroboter bezeichnet





Bild 2.24: Der zur Terrainerkundung eingesetzte Mesoskalaroboter *Scout* ist mit einer Minikamera und einem Mechanismus zum Überwinden von Treppenstufen ausgestattet [SRS+02].

Bild 2.25: Hybriddesign des solarbetriebenen, ortsfesten Mikro-Sensorknoten *MOTE* (16,3 mm³) mit optischer Kommunikationsschnittstelle (CCR), Photo- und Beschleunigungssensorchip (XL). *MOTE* basiert auf mikrolithographischer Siliziumtechnologie. ([WSL+02], mod.)

robots" (wörtlich übersetzt **Mesoskalaroboter**) mit Abmessungen bis in den Dezimeterbereich und durch die **Makroroboter** als Produkte des Maschinenbaus mit Hauptabmaßen im Kubikmeterbereich ergänzt werden. Der Übergang von Miniaturrobotern zu Mesoskalarobotern ist hierbei fließend: So wird z. B. der an der UNIVERSITÄT VON MINNESOTA (Minneapolis, USA) entwickelte "Erkundungsroboter" *Scout* (Bild 2.24) mit einem Volumen je nach Ausführung zwischen 100 cm³ und 125 cm³ sowohl den Mesoskalarobotern [YNP+99] als auch den Miniaturrobotern zugeordnet [RSG+02].

In [Gra06] finden sich, entsprechend ihren Hauptabmaße untergliedert, zahlreiche Beispiele für derzeit bereits realisierte Roboter, die nicht nur für den Bereich der Manipulation und Handhabung, sondern im Rahmen verschiedenster Forschungsarbeiten weltweit auf sämtlichen Gebieten der Robotik (Miniaturisierung, autonomes Verhalten, Erkundung und Überwachung, Organisation von verteilten Robotersystemen, etc.) entwickelt worden sind.

Miniaturroboter und Mesoskalaroboter werden aus konventionellen, miniaturisierten Komponenten (Aktoren, Sensoren, Elektronik), die mit Technologien der Feinwerk- und Mikrotechnik hergestellt sind, aufgebaut. Mikroroboter dagegen lassen sich im Sinne der größenbezogenen Klassifikation als eine Art "modifizierte Chips" betrachten, die als MEMS-Strukturen realisierte Mikroaktoren und Mikrosensoren mit hoch integrierten, elektrischen Signalverarbeitungseinheiten kombinieren (Bild 2.25). Für ihre Herstellung kommen Technologien der Mikrotechnik (Silizium-Technologie, LIGA-Verfahren) zum Einsatz, um die benötigten Strukturabmessungen zu erreichen; nicht selten werden hierbei mehrere MEMS-Chips und/oder ASICs, die jeweils mit der bestmöglichen zur Verfügung stehenden Technologie individuell gefertigt werden, zusammengefügt (Hybriddesign). Mikrogeräte stehen heute vor dem Sprung von zahlreichen theoretischen Untersuchungen zu den ersten funktionsfähigen Prototypen. Als Beispiel sei an dieser Stelle das Projekt SmartDust der UNIVERSITÄT VON KALIFORNIEN (Berkeley, USA) benannt: Dort werden auf Mixed-Signal-ASICs bzw. MEMS-Technologie basierende, drahtlose, ortsfeste Mikro-Sensorknoten eingesetzt, um im sog. Multisensoreinsatz ein großflächig verteiltes, solar- bzw. batteriebetriebenes Sensornetzwerk zu realisieren [ZKP03] – in Bild 2.25 ist eine mögliche Designvariante dargestellt [WSL+02]. Für weitere interessante Mikroroboterprototypen wird auf [EMKS99], [KBHL99] und [HFBP03] verwiesen.

In der Nanorobotik werden der Entwurf, die Herstellung, die Programmierung und die Kontrolle von Nanorobotern untersucht; Nanoroboter bezeichnen hierbei kontrollierbare, aus Nanokomponenten bestehende Maschinen mit Hauptabmaßen in der Größenordnung einiger Kubikmikrometer bis hinab zu nur nanometergroßen Molekülen. Vom Stand heutiger Technik aus kann von winzigen Nanorobotern, die beispielsweise vor Ort die menschliche DNA reparieren oder unsichtbar als Mundspray Zahnbelag entfernen [Dre91], nur visionär geträumt werden. Bereits 1992 sind von Eric Drexler, dem Begründer des Begriffs "molekulare Nanotechnologie" und dem heutigen Leiter des FORESIGHT INSTITUTE in Palo

Alto, USA, einige visionäre Konzepte für Nanomechanismen veröffentlicht worden [Dre92]. Abgesehen von einigen Ausnahmen im Bereich der Oberflächenstrukturierung fehlen aber auch derzeit noch die Grundlagen bzgl. der Wirkprinzipien und Fertigungstechnologien für eine industrielle Nutzung. Herkömmliche mechanische Antriebsprinzipien kommen, im Gegensatz zu Mikrorobotern, in der Nanorobotik nicht in Frage; vielmehr stellen biologische Organismen mit einem elektrochemischen "Antrieb" ein natürliches Vorbild für die Modelle zukünftiger Nanogeräte dar. So ist es Forschern beispielsweise gelungen, ein Bakterium zu einem molekularen Motor umzubauen; bedingt durch chemische Manipulationen am Zellkern konnte dieser für ca. 40 min. in eine Drehbewegung mit drei Umdrehungen pro Sekunde versetzt werden [Reg03]. Experten prognostizieren, dass die wirkliche "Nanorevolution" in der zunehmenden Verschmelzung von Technik und Biologie zu sehen ist. Weltweit wird in den Labors nach neuartigen Konzepten und Techniken geforscht, noch kleinere und leistungsfähigere Nanomechanismen zu entwickeln; ein guter Überblick über den derzeitigen Entwicklungsstand findet sich in [UDSM05].

2.4.2.2 Klassifikation nach Größe und Bewegungsbereich

Die aufgabenspezifische Klassifikation von Mikrorobotern ([RFDM95]) betrachtet das Verhältnis C zwischen den physikalischen Abmessungen des Roboters und seinem erzielbaren Bewegungsbereich (2.1).

$$C = \frac{Bauvolumen \ des \ Roboters}{Volumen \ des \ Arbeitsraums}$$
(2.1)

Anhand dieses Verhältnisses kann eine Aussage über die von dem Roboter ausführbaren Aufgaben getroffen werden. Konventionelle und miniaturisierte Industrieroboter für Mik-

romanipulationsaufgaben weisen weitestgehend ein Verhältnis von C \approx 1 auf; ihr Arbeitsbereich liegt in der Größenordnung ihrer eigenen Abmessungen. Am einen Ende der Klassifikationsskala (C >> 1) finden sich stationäre Manipulatoren der Präzisionsmechanik mit großen Abmessungen (einige Kubikdezimeter), die aufgrund ihrer Stellwege im µm- oder sogar nm-Bereich sehr präzise Manipulationen durchführen können. Am anderen Ende der Skala (C << 1) sind im Gegensatz dazu mobile Miniatur- und Mikrorobotersysteme angesiedelt, die aufgrund ihrer Mobilität einen nahezu unbegrenzten Arbeitsraum bei sehr kleinen Abmessungen bedienen können.

Vorteile mobiler, miniaturisierter Roboter

Die letztgenannte Gruppe von mobilen Miniatur- und Mikrorobotern ist derzeit Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte weltweit, da mobile miniaturisierte Systeme, wie im Folgenden aufgeführt, Vorteile sowohl in wirtschaftlicher Hinsicht als auch im Hinblick auf die erzielbare Genauigkeit aufweisen:

- 1. Roboter mit den Mikrobauteilen angepassten Abmessungen erlauben aufgrund des nur geringen Platzbedarfs den Aufbau von kompakten und flexiblen Mikromanipulationsanlagen. Zudem reagieren die am Roboter installierten Werkzeuge und Messinstrumente unempfindlicher auf niederfrequente Vibrationen, da die zunehmende Miniaturisierung eine höhere Eigenresonanzfrequenz der Roboterkomponenten impliziert [MB03].
- 2. Die Möglichkeiten der sensorischen Überwachung und Steuerung von Mikromanipulationsoperationen werden durch die Roboterminiaturisierung erheblich erweitert: Nicht nur die systemimmanenten Beschränkungen, den Greifer des Roboters im nur einige Millimeter großen Raum zwischen Lichtmikroskopobjektiv und Bauteil platzieren zu müssen oder den Roboter gar selbst an das Vakuumkammervolumen eines Rasterelektronenmikroskops anzupassen, werden vermindert. Auch die Entwicklung von für die Überwachung der Manipulationen essentiellen visuellen Sensorsystemen zur Erschließung der Dreidimensionalität wird hinsichtlich verbesserter und/oder neuartiger Konzepte vorangetrieben, da Roboterkomponenten nicht ständig den Sichtbereich versperren.
- 3. Eine kompakte, miniaturisierte Bauform erlaubt den gleichzeitigen Einsatz mehrerer mobiler Roboter in einer multifunktionalen Mikromanipulations-Tischstation:

- a) Mehrere aus jeweils einigen Robotern zusammengesetzte Arbeitszellen lassen sich, in Anlehnung an die robotergestützte Makrofertigung, z. B. für Mikromontageaufgaben zu einer automatisierten Montagestraße verbinden.
- b) Insbesondere aber der gleichzeitige Einsatz miniaturisierter, mobiler und flexibler Roboter, die dieselben Prozessschritte parallel in mehreren Arbeitszellen durchführen, offenbart das Potential von (kompakten) Mikromanipulationsstationen bzgl. der Kompensation von Mikroeffekten: Werden in einer Fließbandproduktionsstätte die einzelnen Arbeitsschritte sequentiell ausgeführt, so kann bei einer plötzlich auftretenden Störung die gesamte Produktion zum Erliegen kommen. Bei einer Mikromanipulationsstation, bei der aufgrund der durch Skalierungseffekte auftretenden Handhabungsschwierigkeiten (siehe Kapitel 2.2) jederzeit mit einer Störung bzw. Verzögerung zu rechnen ist, stellt daher der gleichzeitige Einsatz mehrerer Mikroroboter einen interessanten Lösungsansatz dar: Die Auswirkungen von Störungen innerhalb einer Prozesskette werden durch redundante Arbeitszellen reduziert, sodass ein durchschnittlicher Durchsatz auch für Mikro- und/oder Nanooperationen abgeschätzt werden kann.
- c) Durch die Mobilität stehen für die in einer Manipulationsstation eingesetzten Werkzeuge und On-Board-Messinstrumente (AFM, STM, Bio-/Gassensoren, etc.) zusätzliche Freiheitsgrade für die Positionierung zur Verfügung. Gleichzeitig nimmt aufgrund der Miniaturisierung die Dichte von eingesetzten Mikroroboterwerkzeugen und Mikrorobotermessinstrumenten je Flächeneinheit der Roboterplattform zu.
- d) Die Kombinationsmöglichkeiten für den Einsatz verschiedener Werkzeuge auf derselben Roboterplattform werden ebenso verbessert wie die Flexibilität, Mikrowerkzeuge bzw. -instrumente hinzuzufügen, zu entfernen oder zu ersetzen, ohne dass hierzu die gesamte Mikromanipulationsstation umstrukturiert oder gar vollständig umgebaut werden muss.

2.4.2.3 Klassifikation nach Funktionseinheiten

Mikroroboter lassen sich gemäß ihren vier Funktionseinheiten Steuerungseinheit (SE), Energieversorgung (EV), Positioniereinheit (PE) und Manipulator mit Endeffektor (ME) klassifizieren. Verschiedenartige Realisierungen der einzelnen Funktionseinheiten und eine geeignete Kombination der einzelnen Komponenten führen zu einer Vielzahl unterschiedlicher Typen von Robotern. Diese Vielzahl an möglichen und realisierten Variationen kann anhand der Anordnung und Verbindung der Komponenten zueinander charakterisiert werden. Ein Ansatz hierzu findet sich in [DVC+92]. Grundsätzlich kann zwischen per Kabel



Bild 2.26: Klassifikation von Mikrorobotern nach Funktionseinheiten

fest verbundenen, drahtlosen und im Sinne der Informationsautonomie (vgl. Kapitel 2.3.1) autonomen Mikrorobotern unterschieden werden, die weiterhin über das Kriterium der Mobilität in stationäre und mobile Systeme eingeteilt werden (Bild 2.26).

In der linken Spalte von Bild 2.26 finden sich per Kabel ferngesteuerte Roboter, deren Steuereinheit und Energieversorgung nicht in den Roboter integriert sind. Die Typen (a) und (b) entsprechen konventionellen miniaturisierten Industrierobotern; bei (b) sind alle Roboteraktoren (inkl. miniaturisierter Antriebseinheiten) direkt am Manipulator zusammengefasst und über elektrische, hydraulische oder pneumatische Verbindungen an Steuereinheit und Energieversorgung angeschlossen. Bei den stationären Robotern (a), (b) und (d) bewegt die Positioniereinheit nur den Manipulator mit Endeffektor. Bewegt das Positioniersystem sich selbst und damit auch das Werkzeugsystem, so spricht man von einem mobilen Roboter, dessen Arbeitsbereich nahezu unbegrenzt ist. Im Gegensatz zu konventionellen Robotern lässt sich die Positioniereinheit eines mobilen Mikroroboters nicht nur durch eine eingebaute Kinematik [vgl. Typ (f)] realisieren, sondern, wie in Bild 2.26 für Typ (e) angedeutet, auch durch äußere Feldkräfte innerhalb eines natürlichen Mediums (Flüssigkeit oder Gas) – Antriebe durch gerichtete Luft-Strömungsfelder oder das Feld im Innern eines Kernspintomographen werden bereits erforscht [MMF+04]. Drahtlos und autonom operierende Roboter besitzen eine integrierte Energieversorgung, wodurch sie für viele Applikationen äußerst interessant wären, aber bislang insbesondere bei miniaturisierten Systemen eine große Herausforderung hinsichtlich Entwicklung, Versorgung und Steuerung darstellen. Während die drahtlos mobilen Mikroroboter (f) ihre Operationsinstruktionen von einer extern platzierten Steuerungseinheit erhalten, sind autonome mobile Roboter nach Variante (g) (häufig auch als Serviceroboter bezeichnet) in der Lage, sich in ihrer Umgebung eigenständig umherzubewegen. Aufgrund ihrer Autonomie sind diese Roboter befähigt, ein Weltmodell als interne Repräsentation der Roboterumgebung zu entwickeln und dieses für Inferenzprozesse wie z. B. Navigationsplanung einzusetzen. Sie lernen aus Erfahrung und passen ihr Verhalten an Veränderungen in ihrer Umwelt an, um ihre ursprünglichen Aufgaben zu erfüllen.

Für Serviceroboter, die mit Endeffektoren manipulierend auf ihre Umwelt einwirken, seien an dieser Stelle zwei Beispiele benannt: Zum einen der in Kooperation von PUTZMEIS-TER AG und dem FRAUNHOFER INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG IPA rea-



Bild 2.27: Roomba Staubsaugerroboter der Firma IROBOT [Roo06]

lisierte mobile Makro-Putzroboter *SkyWash SW 33* zur vollautomatischen Reinigung von Großflugzeugen [Put06], zum anderen die ersten schon kommerziell erwerbbaren Staubsaugerroboter, die als autonom arbeitende Makroroboter (z. T. bereits an der Schwelle zum Mesoskalaroboter) in einer zunächst unbekannten Umgebung die Reinigung des Fußbodens vornehmen (Bild 2.27). Auch die Fußball spielenden Roboter der verschiedenen Ligen des *Robo-Cups*, u. a. mit dem kommerziell erhältlichen Roboterhund *AIBO* von SONY[™] [Son06], agieren größtenteils autonom. Jedoch spielen diese Roboter derzeit für den Bereich der Mikrorobotik (mit dem

Ziel der Durchführung von Mikromanipulationen) nur eine untergeordnete Rolle. Vielmehr dienen diese Roboter dazu, die Forschung im Bereich der Künstlichen Intelligenz und Robotik durch die Konzentration auf ein Standardproblem (in diesem Falle das des Fußballspielens) zu fördern: Es sind autonome Agenten zu entwickeln, die, unterstützt durch Auswertung und Fusion von Sensordaten in Echtzeit, in der Lage sind, in einem Multi-Agentensystem zusammenzuarbeiten und hierbei selbstständig Strategien zu entwickeln und anzupassen.

Betrachtet man Größe, Lokomotion und gegebenenfalls Manipulator heutiger Serviceroboter, so ist offensichtlich, dass diese Makro- oder Mesoskalaroboter, angetrieben über Schrittmotoren bzw. pneumatische oder hydraulische Grobpositionierer, nicht in der Lage sind, qualitativ überprüfbare Mikromanipulationen mit Präzisionen im Nanometerbereich durchzuführen. Hier besteht noch großer Forschungsbedarf; Mikroroboter, die als autonomer, mobiler Mikromanipulator fungieren, sind derzeit erst Stand der Forschung.

2.4.3 Mikroroboter in Mikromanipulationsstationen

Dieses Kapitel liefert anhand der zuvor eingeführten Klassifikationsschemata einen Überblick über die bisher existierenden Mikrorobotersysteme und zeigt neben ihren augenscheinlichen Vorzügen auch ihre teilweise systemimmanenten Nachteile auf.

2.4.3.1 Stationäre Mikrorobotersysteme

Konventionellen Industrierobotern entsprechende, stationäre Mikromanipulationsstationen zeichnen sich durch ortsfeste Mikroroboter mit mehreren Freiheitsgraden aus, die i. A. mit mehreren, unterschiedlichen Manipulatoren ausgestattet sind. Unterstützt durch verschiedene Sensorsysteme (Lichtmikroskope mit Bildverarbeitung, Kraftsensoren, etc.) können Manipulationen mit hoher Präzision und Wiederholgenauigkeit bei hoher Geschwindigkeit und dennoch niedrigen Beschleunigungen (Materialbelastungen) durchgeführt werden.



Bild 2.28: Mikromontagestation ([ZAC+04], mod.): Das auf ortsfesten Mikrorobotern basierende System arbeitet mit zwei Mikrogreifern bei einer Auflösung von 0,05 µm auf einem mobilen x-y-Koordinatentisch (Arbeitsfläche ca. 15x15 mm²). Zusätzlich ist eine Mikrodosiereinrichung für Klebstoffe, die mittels UV-Lampe ausgehärtet werden, für stoffschlüssige Fertigungsschritte verfügbar.

In Bild 2.28 ist eine an der Technischen Universität von Helsinki (Finnland) entwickelte Mikromontagestation abgebildet [ZAC+04]. Dieses mit ortsfesten Mikrorobotern arbeitende Manipulationssystem kann im manuellen, teleoperierten oder automatischen Modus betrieben werden. Die Manipulationsstation nutzt die verteilte Positionierung von Miniaturmikroskopen: Neben den Mikroskopen für Draufsicht und Seitenansicht zum Überblicken des gesamten motorisierten Positionstisches ist ein drittes Mikroskop für die perspektivische Überwachung des Montageprozesses installiert. Diese Konfiguration liefert gute visuelle Informationen über den Arbeitsraum und erlaubt dem System sowohl mit großen Objekten (größer 1 mm) als auch kleinen Objekten mit Abmaßen kleiner 5 µm zu arbeiten.





Bild 2.29: Das Autonome Mikroroboter-Zellinjektionssystem ist Bild 2.30: Zellinjektion bei einem sowohl für DNA-Injektionen in den Pronukleus befruchteter Oozyten als auch für ICSI-Operationen geeignet. ([SN01], mod.)

Maus-Embryo (im Pronucleus-Stadium) ([SN01], mod.)

Als weiteres Beispiel für einen stationären Mikroroboter ist in Bild 2.29 das autonome Mikroroboter-Zellinjektionssystem des Instituts für Robotik und Intelligente Systeme (IRIS) an der ETH ZÜRICH abgebildet [SN01]. Primäre Aufgabe dieser Mikromanipulationsstation ist die vollautomatische Injektion von DNA in den Pronukleus befruchteter Oozyten

[SN03]; zusätzlich lassen sich mit diesem ortsfesten Mikrorobotersystem, bestehend aus ansteuerbarem Manipulator mit Haltekapillare und 3-DOF-Mikroroboter, intracytoplasmatische Spermieninjektionen (ICSI) durchführen. Neben dem vollautomatischen Modus steht dem Operator auch ein teleoperierter Modus für die Injektionsdurchführung zur Verfügung. Bild 2.30 zeigt eine durch das Inversmikroskop aufgenommene Momentaufnahme während der Injektion von DNA in den Pronukleus eines Maus-Embryos (mit ca. 50 µm Durchmesser) [SN01]. Unterstützt durch ein hybrides Kontrollsystem, das die für Präzisionsbewegungen zuständige Bewegungs-Kontrolleinheit mit dem visuellen Sensorsystem kombiniert, kann bei der Reproduktion transgener Mäuse eine Erfolgsrate von nahezu 100 % verzeichnet werden. Die für die Injektionen benötigte Zeit ist dabei vergleichbar mit der Zeit für eine manuelle Durchführung durch einen erfahrenen Techniker.

Diese beiden Beispiele, die im Sinne der aufgabenspezifischen Klassifikation entsprechend Formel (2.1) ein Verhältnis C >> 1 aufweisen, zeigen zwei gravierende Nachteile stationärer Mikrorobotersysteme auf: Sie sind unflexibel und groß – betrachtet man allein die Dimension der Klimakammer (Bild 2.10, Seite 14) für die zuvor vorgestellte Manipulationsstation der TU HELSINKI, so kann von "Mikrorobotern" im Sinne der größenbezogenen Klassifikation keine Rede sein. Die hohe Präzision und Wiederholgenauigkeit erfordert derzeit meist noch ortsfeste Manipulatoren, die möglichst optimal auf die aktuelle Manipulationsaufgabe zugeschnitten sind. Soll die Manipulationsstation für von der ursprünglichen Aufgabe abweichende Operationen eingesetzt werden, müssen die Manipulatoren oder gar die gesamte Station neu konzipiert oder zumindest aufwändig umgebaut werden, um die vorhandenen ausgeklügelten visuellen und taktilen Sensorsysteme weiterhin nutzen zu können. Daraus folgt unmittelbar, dass derartige Systeme keine hinreichende Flexibilität bieten und daher eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Akzeptanz und den Einsatz von Mikrorobotern in der Industrie bisher nicht erfüllen. Die z. T. Raum füllenden Systeme erschweren darüber hinaus das gleichzeitige Aufstellen mehrerer dieser Anlagen, es mangelt an Redundanz, woraus sich insbesondere für klein- und mittelständische Betriebe ein nur niedriger Manipulationsdurchsatz (vgl. Kapitel 2.4.2.2) ableiten ließe. Diese Systeme können derzeit nur für Großunternehmen wirtschaftlich interessant sein, zumal die komplexen und teueren Sensorssysteme nicht variabel für grundsätzlich unterschiedliche Manipulationsaufgaben einsetzbar sind.

2.4.3.2 Kabelgebundene mobile Mikroroboter

Zur Überwindung der systemimmanenten Probleme stationärer Mikrorobotersysteme setzt die Forschung vermehrt auf den Einsatz mobiler Mikroroboter entsprechend der Definition aus Kapitel 2.3.1. Diese sollten, wie in Bild 2.31 gezeigt, aus einer mobilen Plattform mit möglichst drei Freiheitsgraden und einer Manipulationseinheit mit Endeffektor, die zumindest einen weiteren Freiheitsgrad bietet, aufgebaut sein. Im Sinne von Kapitel 2.4.2.2 wird



Bild 2.31: Die am AMIR der UNI OLDENBURG entwickelten kabelbetriebenen mobilen Miniaturroboter RollBot III und RollBot IV sind auch für den REM-Einsatz konzipiert ([Fat04], [KSTF05], mod.).

für diese Roboter eine kompakte Bauweise gefordert (C << 1), die neben der Erhöhung der Redundanz im Rahmen eines Multirobotersystems auch die Forderung nach Flexibilität erfüllt. Diese Mikroroboter können je nach Bedarf mit einem anderen/neuen Endeffektor versehen in den visuell überwachten Manipulationsbereich entsandt werden. Ebenso ist der gleichzeitige Einsatz von mit verschiedenen Endeffektoren ausgestatteten Mikrorobotern auf derselben Manipulationsplattform denkbar, um Mikroeffekte zu kompensieren,

etwa durch den Einsatz einer "helfenden Hand" (Bild 2.32). Aufgrund der Mobilität der Roboter lassen sich z. B. die für konventionelle Manipulationssysteme typischen Probleme der Materialzuführung (Zubringetechniken, Wechsel der Werkstückpaletten) und des Produktabtransports auf natürliche Weise lösen.



Bild 2.32: MINIMAN IV (rechts) assistiert MINIMAN III als "helfende Hand" beim Ablegen eines Mikroteils: Dieses wird beim Abrücken des Greifers mit einer Nadel (mit minimaler Oberfläche) niedergehalten. ([WSB+01], mod.)



Bild 2.33: Prototypen mobiler kabelbetriebener Mesoskalaroboter für Mikromanipulationen in der FMMS am IPR der Universität Karlsruhe ([Sey99], mod.)

Bisherige auf mobilen Robotern basierende Manipulationsstationen arbeiten jedoch nur mit fest verbundenen, d. h. per Kabel energetisch und informationstechnisch angebundenen Miniatur- bzw. Mesoskalarobotern. So werden beispielsweise bei der FMMS am IPR der UNIVERSITÄT KARLSRUHE die in Bild 2.33 dargestellten kabelbetriebenen Mesoskalaroboter mit vier oder fünf Freiheitsgraden eingesetzt. Für den Einsatz sowohl unter einem Mikroskop (siehe hierzu auch Bild 2.21) als auch in der Vakuumkammer eines REMs konzipiert, erlauben diese Roboter bereits präzise Manipulationen im µm-Bereich [Sey99]. Ähnliches gilt für die am AMIR der UNIVERSITÄT OLDENBURG entwickelten Miniaturroboter (Bild 2.31). Leider sind sämtliche für den Einsatz in Manipulationsstationen geeignete Roboter derzeit hinsichtlich ihrer Größe den Miniatur- bzw. Mesoskalarobotern zuzuordnen. Erste Ansätze für kabelbetriebene Mikroroboterrealisierungen sind zwar bereits existent (z. B. [EMKS99] und [KBHL99]), jedoch wird das Augenmerk meist nur auf per MEMS-Techniken gefertigte Mikroroboterantriebe gelegt. Im Hinblick auf die größenbezogene Kategorisierung ist festzuhalten, dass kabelbetriebene Mikroroboterprototypen mit für Manipulationsstationen obligatorischen Werkzeugen bisher gänzlich fehlen!

Die Präzision der Positioniereinheit kabelbetriebener Mikroroboter ist stark abhängig von der gewählten Antriebstechnik. Derzeit werden für die Lokomotion kabelbetriebener mobiler Mikroroboter insbesondere auf dem *inversen piezoelektrischen Effekt basierende Direktantriebe* (vgl. Kapitel B.3.3) eingesetzt, die hohe Geschwindigkeiten und (im Gegensatz zu Schrittmotoren) theoretisch minimale Stellwege bis in den (Sub-)Nanometerbereich erlauben. Sämtliche Elektronik ist bei diesen Systemen i. d. R. extern bei den Hardware-komponenten der Steuerungseinheit installiert; dies gilt insbesondere für die Ansteuer-elektronik, bestehend aus digitalen Schaltkreisen zur Signalformerzeugung (von z. B. Sägezahnfunktionen für "Stick-Slip"-Antriebe) und Leistungselektronik (Treiberstufen) für die eigentlichen Aktoren. Zu den Robotern bestehen lediglich Kabelverbindungen zum direkten Ansprechen der Aktoren bzw. zum Auslesen der On-Board-Sensoren. Dieses Konzept gestattet den Einsatz leistungsfähiger aber auch energiehungriger Prozessoren (extern) und vermeidet gleichzeitig eventuelles thermisches Überhitzen der Mikroroboter durch die Leistungselektronik.

Aufgrund der Kabelverbindungen zwischen der Manipulationskontrolleinheit und den Robotern ergeben sich, abgesehen von Reichweitenbegrenzungen bedingt durch endliche Kabellängen, erhebliche Unterschiede bzw. Einschränkungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Antriebsrealisierung:

 Auf der Massenträgheit basierende Verfahren, die z. B. dem "Impact"-, dem "Stick-Slip"- oder dem "Push-Slip"-Prinzip folgen (vgl. Kapitel B.3.3), können nur eine Genauigkeit bis in den µm-Bereich gewährleisten. Ursächlich hierfür sind die Kabelkräfte, die aufgrund der Steifheit und/oder des Gewichtes der (Mikro-)Kabel zu Variationen der Roboterschrittweite führen, sodass Lokomotion mit Nanometerpräzision unmöglich wird [MMS+99], [MSMH00], [MTSK01].

Die Zugspannungen der Kabel erfordern für Präzisionsbewegungen spezielle Antriebstechniken, etwa die vom "Inchworm"-Verfahren bekannten Kriechantriebe [Zes97]. Diese kommen jedoch im Gegensatz zu den Trägheitsantrieben nicht mit nur einem einzelnen Aktor je Freiheitsgrad aus und erfordern daher in Verbindung mit komplexerer Ansteuerelektronik einen höheren Platzbedarf. Als Beispiel sei an dieser Stelle auf das bereits in Bild 2.12 (Seite 15) vorgestellte System zur Mikroablation verwiesen: Dort werden kabelbetriebene mobile Miniaturroboter eingesetzt, die in Ergänzung zu den für die Lokomotion essentiellen Piezoaktoren mit Elektromagneten versehen sind [FA02b]. Abgesehen vom erhöhten Volumenbedarf erschweren die Elektromagnete zusätzlich den Einsatz in einem REM insofern, dass der Elektronenstrahl und damit das optische Auflösungsvermögen des REMs beeinflusst wird (vgl. Kapitel 2.3.1). Bauliche Abschirmungsmaßnahmen sind notwendig; das benötigte Aktorvolumen je Freiheitsgrad nimmt zu.

Bereits dieses Beispiel, insbesondere aber die in Anhang B.1.1 näher beschriebene vollautomatische Mikromanipulationsstation, die zur Erzeugung eines Bohrlocharrays auf die Kooperation mehrerer Mikroroboter angewiesen ist, führt noch zu einem weiteren gravierenden Nachteil kabelbetriebener Mikroroboter: Das Gewirr an Kabeln zur Ansteuerung der Aktoren bzw. zum Übertragen der Messdaten der mobilen Sensoren darf nicht dazu führen, dass sich die Mikroroboter (bei einer nur kleinen Arbeitsfläche) gegenseitig behindern [MB03]. Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an die Manipulationskontrolleinheit. Die Manipulationsplanungsebene muss ein Überkreuzen vermeiden. Die Manipulationssteuerungsebene hat bei der Ausführung von Antikollisionsalgorithmen ein "Verknoten" zu verhindern; des Weiteren muss sie durch Kabelkräfte bedingte Bewegungsungenauigkeiten der Mikroroboter ausgleichen. Höhere Anforderungen an die für die Bewegung zuständigen Softwaretreiber, komplexere Elektronik und ein höherer E/A-Datentransfer zwischen den verschiedenen Sensor- bzw. Aktorsystemen und der Steuerungseinheit sind die Folge.

Ein Ansatz, diesen Nachteilen entgegenzuwirken und gleichzeitig die Entwicklung hin zu kleineren Robotern zu fördern, ist der Einsatz von Mixed-Signal-ASICs, die, digitale und analoge Schaltungskomponenten einschließlich Leistungselektronik integrierend, direkt auf den Mikrorobotern implementiert werden [MBL+01]. Der im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes entwickelte Miniaturroboter *MINIMAN V* kann an dieser Stelle beispielhaft aufgeführt werden [WSB+01]: Dieser per Mikrokabeln fest verbundene, nur einige Kubikzentimeter große Roboter nutzt mehrere Mixed-Signal-ASICs, die zur Reduktion der Kabelverbindungen über ein nur wenige Steuerleitungen erforderndes Digitalinterface angesprochen werden und je nach Betriebszustand die integrierte Leistungselektronik für die Piezoaktoren des Roboters ansteuern.

2.4.3.3 Drahtlose mobile Mikroroboter

Verteilte, kooperative Roboterschwärme versus Roboter für Mikromanipulationen Grundsätzlich betrachtet, weisen die Forschungsbestrebungen bei drahtlosen, mobilen Robotern momentan in zwei verschiedene, sich z. T. ergänzende Richtungen: Auf der einen Seite wird der Schwerpunkt verschiedener Forschungseinrichtungen auf die Systemintegration, die Miniaturisierung und Implementierung immer komplexerer Sensorik, Aktorik und Kontrollkomponenten (i. d. R. Elektronik) gesetzt; es werden Roboter entwickelt, die bei kleinstmöglichen physikalischen Abmessungen auf minimalem Raum (z. B. auf der Arbeitsplattform einer Mikromanipulationsstation) zentral und/oder dezentral organisiert auf ihre Umwelt mit Mikro- bzw. Nanometerpräzision manipulierend einwirken können. Auf der anderen Seite werden verteilte, kooperative Robotersysteme untersucht, die, bestehend aus einem Cluster energie- und informationsautonomer Roboter, auf unbekanntem Terrain dezentral organisiert agieren sollen; besonderes Augenmerk liegt dabei auf der dynamischen dezentralisierten Planung, der dynamischen Verteilung und den koordinierten Kontroll- und Hardwaresystemen mobiler homogener Roboterschwärme bzw. heterogener Roboterteams (siehe z. B. [JA01], [MGF+05] bzw. [GNPK00], [RPS+00]). Da die hier vorgestellte Arbeit dem erstgenannten Themenbereich zuzuordnen ist, wird für weitergehende Ausführungen für verteilte, kooperative Roboter neben [CFK97] und [JA01] auf Anhang B.2 verwiesen.

An dieser Stelle sei nur angemerkt, dass verteilte, kooperative Robotersysteme der Analyse des (dynamischen) Gruppenverhaltens, der Verbesserung der Organisationskonzepte und zur Effizienzsteigerung der Kontrollalgorithmen dienen [MFI93]. Präzise Manipulationsfähigkeiten, wie sie für Roboter in einer Mikromanipulationsstation zur Handhabung



Bild 2.34: Die Architektur *KHEPERA*: Basisplattform (1) und Greiferkonfiguration (2) der ersten Entwicklungsstufe des Mesoskalaroboters sind blau eingerahmt [Mar99]. Die 115,5 cm³ Plattform *KHEPERA II* ist z. B. durch Greifer (58,5 cm³) oder RF-Modul (45,4 cm³) erweiterbar. ([Kte05], mod.)

von Mikro- bzw. Nanoobiekten erforderlich sind, werden bei den bestehenden verteilt, kooperativen Systemen nicht angestrebt. Daher sind zahlreiche autonome Roboterlösungen, wie z. B. die Mesoskala-SCOUT [KBD+03], roboter MILLIBOT [NGPK02] oder KHEPERA [FGM+99], ebenso wenig mit Manipulatoren bzw. Endeffektoren ausgestattet, wie die bisherigen drahtlosen Miniaturroboterrealisierungen MARS [FMSA99] bzw. ALICE [CES02], um nur einige Beispiele zu nennen. Hierbei kommt den am schweizerischen EPFL entwickelten autonomen, mobilen Roboterarchitekturen ALICE und KHEPERA (Bild 2.34) - letzteres System wird mittlerweile als KHEPERA II kommer-

ziell von K-TEAM CORPORATION vertrieben [Kte05] – bereits eine Ausnahmestellung zu: Ihre mittels NiMH-Akku bzw. Batterie betriebenen, homogenen Basisplattformen, die Volumina von 115,5 cm³ für *KHEPRERA* bzw. 9,2 cm³ für die jüngere Entwicklung *ALICE* umfassen, sind für den verteilt kooperativen Einsatz modular erweiterbar. Neben zahlreichen Zusatzkomponenten wie Kommunikations- oder Sensormodulen (z. B. CCD-Kamera) kann auch ein Greifermodul ergänzt werden. Eine z. T. erhebliche Vergrößerung des Volumenbedarfs implizierend (im Falle von *KHEPERA II* z. B. um 58,5 cm³), sind die Greifermodule,



Bild 2.35: Mikrogreifer der Scuola Superiore Sant'Anna (Pisa, Italien) [MES+01]

angetrieben über Schrittmotoren mit zugehörigen Reduktionsgetrieben, jedoch nur für grobmotorische Greifprozesse ausgelegt. Die Greiferwerkzeuge dienen dem Test der Teamfähigkeit in homogenen oder heterogenen Roboterteams, z. B. beim gemeinsamen Transportieren schwerer Objekte oder bei der "Nahrungssuche", die durch Einsammeln und Anordnen von Bauklötzen simuliert wird [Mar99]. Für hochpräzise Operationen sind diese Greiferroboter, obgleich im Falle der *KHEPERA*-Architektur bereits mit Impedanzmesssensoren und optischen Sensoren zur Optimierung des Greifprozesses ausgestattet,

nicht geeignet. Ein Vergleich mit speziell für Mikromanipulationen entwickelten Greifern, wie z. B. in Bild 2.35, [DEM+01] oder [GSN05] vorgestellt, bestätigen diesen Eindruck.

Den verteilten, kooperativen Robotern und den manipulierenden Mikrorobotern gemeinsam ist der Bedarf nach einer drahtlosen Verbindung zu einer ausgelagerten bzw. übergeordneten Basis- oder Manipulationskontrolleinheit. Im Falle von *KHEPERA* beispielsweise ist die zunächst per Kabel realisierte serielle Kommunikationsschnittstelle zur Basisstation durch eine Funkschnittstelle ersetzt worden. Hierdurch ergeben sich gleich mehrere Vorteile: Zunächst wird in einer Multiroboteranwendung durch eine drahtlose Kommunikationsschnittstelle ein zeitgleicher, globaler Daten- oder Programmabgleich (Broadcast) möglich. Darüber hinaus ist drahtlose Kommunikation unabdingbar, um komplexe Verhaltens- und Lernstrategien von mobilen Robotern, die, aufgrund ihrer eigenen begrenzten Rechenleistung, zur Bearbeitung rechenintensiver Algorithmen einer externen, leistungsstarken Basisstation bedürfen, wirklich uneingeschränkt analysieren zu können.

Ähnlich verhält es sich mit Robotern in einer Mikromanipulationsstation. Konzepte zur Reduktion der Kabelanzahl, wie z. B. am Ende des letzten Kapitels beschrieben, können die negativen Auswirkungen der Kabelverbindungen zwischen Manipulationskontrolleinheit und Roboter bestenfalls abschwächen, keinesfalls endgültig beseitigen. Die in Kapitel 2.4.3.2 beschriebenen Nachteile machen den Wunsch nach drahtlosen mobilen Mikrorobotern (mit C << 1) für den Einsatz in Mikromanipulationsstationen offensichtlich. Allerdings werfen die Forderungen nach Flexibilität und Mobilität weitere technische (mechatronische) Problemstellungen auf. Sämtliche Module zur Kontrolle und Koordination, einschließlich komplexer On-Board-Sensorik (AFM, STM, CCD-Kamera, etc.) und Aktoransteuerung für Positioniereinheit und Manipulator, sind auf dem Mikroroboter zu integrieren. Jeder Roboter muss physikalisch autonom mit Energie versorgt und (bei nicht informationsautonomer Realisierung) über ein geeignetes Kommunikationssystem mit der Manipulationskontrolleinheit verbunden sein. Letztgenannte Forderung schließt insbesondere den Rückkanal vom Roboter zur Manipulationskontrollstation ein, da dieser Kommunikationsweg neben der Übertragung von Statuswerten insbesondere dem Übersenden der On-Board-Sensordaten an die Sensordatenfusion der Steuerungseinheit dient.

Miniaturisierung der Elektronik

Bei den derzeitigen mechatronischen Mikroroboterlösungen bildet die Elektronik das Herzstück bzw. das "Gehirn" des Roboters. Sie kontrolliert und koordiniert die verschiedenen Mikroroboterkomponenten einschließlich der komplexen On-Board-Sensoren. Aufgrund der ständig steigenden Anforderungen gestaltet sich ihre Realisierung jedoch zunehmend aufwändiger. Die für sämtliche Roboterkomponenten benötigte Energie gilt es aus der Primärenergiequelle (z. B. Batterie) zu gewinnen und die erforderlichen Spannungsversorgungsebenen für Aktorik und sich selbst zu erzeugen. Sämtliche Mikroroboterkomponenten sind im Sinne der vom Operator vorgegebenen Manipulationsaufgabe zu koordinieren. Dies betrifft die möglichst energieeffiziente Ansteuerung leistungshungriger Präzisionsantriebe ebenso wie den geschickten Einsatz der On-Board-Sensoren zur Manipulationsüberwachung – bei informationsautonomen Systemen ist zusätzlich die Roboterpose selbstständig zu bestimmen. Weiterhin ist die Elektronik für die Kommunikation zwischen Mikrorobotern und der externen Manipulationskontrolleinheit verantwortlich, wobei hier trotz begrenzter Platz- und Energieverhältnisse schnelle und gleichzeitig robuste Übertragungssysteme gefordert sind.

Zur Bewältigung der Problemstellungen werden kommerziell erhältliche komplexe Logikbausteine (z. B. CPLDs) und leistungsfähige Mikrocontroller ebenso herangezogen, wie speziell auf die jeweiligen Bedürfnisse des Roboters zugeschnittene ASICs. Als Beispiele seien hier die Miniaturroboter *NanoWalker* (Bild 2.36) und *ALICE* (Bild 2.37) aufgeführt [MMS+99], [MSH+01], [CES02]. Abhängig von der zur Verfügung stehenden Chip-Fertigungstechnologie werden wie z. B. bei [WP04] entweder direkt Mixed-Signal-ASICs eingesetzt oder separat entwickelte digitale und analoge ICs einschließlich Leistungselekt-



Bild 2.36: Der am MIT entwickelte *NanoWalker* ([MRK+01], [MB03], mod.): Die CAD-Darstellung zeigt den komplexen Aufbau des Miniroboters (ca. 30,7 cm³) mit Elektronik für Energieversorgung, IR-Kommunikation, IR-Positionsbestimmung und Piezoaktorkontrolle für Lokomotion und STM. Im Photo rechts, das die Außenseite der bestückten, flexibel faltbaren 12-Layer-Platine zeigt, lässt sich die Komplexität der aus ca. 350 Bauelementen bestehenden Elektronik erahnen [MER+01].

ronik in einer Hybridlösung kombiniert. Aus Platzgründen wird häufig direkt der unverpackte Chip auf dem Mikroroboter mittels Flip-Chip oder Bond-Technologie montiert.

Hierzu sind allerdings zusätzliche Maßnahmen gegen mechanische bzw. thermische Belastungen der Kontakte bzw. des gesamten Chips zu treffen. Bild 2.38, auf dem die zwei-



Bild 2.37: Ein PIC16F877 8-bit-μC bildet das Herzstück des autonomen, mit verschiedenen Kommunikationsschnittstellen versehenen Miniroboters *ALICE* (Basis mit ca. 9,2 cm³).



Bild 2.38: *MARV*: Obwohl nur mit Temperatursensor, aber ohne Kommunikationsschnittstelle ausgestattet, ist der per Schrittmotor angetriebene Miniroboter für nur ca. 10 min autonom funktionsfähig. ([Sand01], mod.). te Generation des an den SANDIA NATIONAL LABORA-TORIES in Albuquerque (New Mexico, USA) entwickelten Miniroboters *MARV* abgebildet ist, zeigt einen interessanten Lösungsansatz für ein kompaktes 4 cm³ kleines Roboterdesign [BAE+02]: Aus Platzgründen werden für den über drei Uhrenbatterien versorgten Miniaturroboter ungehäuste Chips eingesetzt. Mittels eines per Laser gehärteten und strukturierten Harzes wird das Gehäuse für die Elektronik derart gefertigt, dass genügend Platz und gleichzeitig Stabilität bei kompakter Roboterbauform garantiert werden können.

Analog zu den kabelbetriebenen Robotern gilt auch für drahtlose, mobile Mikroroboter, dass bisherige Prototypen aufgrund ihrer Größe lediglich den Miniatur- und Mesoskalarobotern zuzuordnen sind. Beispiele, wie das in Bild 2.39 dargestellte Design eines hybriden, vollständig auf monolithischen Fertigungstechniken basierenden 1-DOF-Mikroroboters der Universität von Kalifornien (Berkeley, USA) zeigen interessante Konzepte auf. Jedoch existieren trotz des kombinierten Einsatzes von MEMS-Techniken und hoch integrierten Schaltkreisen im Sinne der Größenkategorisierung bisher keine Mikroroboterprototypen, die für den Einsatz in Manipulationsstationen gerüstet sind. Essentielle Komponenten, wie Manipulatoren, Sensoren, Kommunikationsschnittstellen und/oder zu Inferenzprozessen fähige Intelligenz fehlen bei bisherigen Prototypen.

[Cap03] bietet eine Übersicht über miniaturisierte, größtenteils nur einige Kubikzentimeter umfassende Miniaturroboter, die, per Kabel oder Batterie betrie-

ben, schwaches und teilweise sogar stark autonomes Verhalten aufweisen. Allerdings lassen auch die dort vorgestellten Realisierungen die für Mikroroboter-Tischstationen essentielle Fähigkeit, Mikromanipulationen an Objekten durchführen zu können, vermissen.



Bild 2.39: Das Hybriddesign des energieautonomen, mobilen Mikroroboters besteht aus drei separat gefertigten Chips: Der digitale Sequenzer (ASIC) generiert die Ansteuersignale für den elektrostatischen Inchworm-Motor (MEMS-Chip). Der Solarzellenchip erzeugt die vom Motor benötigten hohen Spannungspegel von ca. 50 V. ([HFBP03], mod.)

Energiedilemma

Bei kleinen mobilen Miniatur- oder Mikrorobotern ist die Energieversorgung, insbesondere die Energiequelle on-Board (z. B. in Form einer leistungsstarken Batterie) ein bislang noch



Bild 2.40: Piezoaktorisch angetriebener Miniroboter NANORUNNER mit einem Batteriepack, der nur wenige Minuten autarken Betriebs erlaubt. ([MRH00], mod.) nicht gelöstes Problem. Verschiedene Entwicklungen zeigen die Problematik in der Mikrorobotik auf: Effiziente hochpräzise Aktoren haben i. d. R. einen derart großen Strombedarf, dass eine implementierbare miniaturisierte Batterie (Knopfzelle) diesen Bedarf nicht abdecken kann (Bild 2.40). Beim *NanoWalker* beispielsweise müsste in das 30,7 cm³ umfassende Robotergehäuse eine Batterie integriert werden, die eine kontinuierliche Leistungsentnahme zwischen 15 W und 20 W verkraften müsste [MB03]; darüber hinaus bedarf es für die piezoaktorisch angetriebene Positioniereinheit des *NanoWalker*s bipolarer Spannungen zwischen ±80 V und ±150 V, die über Span-

nungsaufwärtskonverter mit hohem Platz- und Energiebedarf (vgl. die DC/DC-Konverter in Bild 2.36) aus einer Niederspannungsquelle generiert werden müssen [MGH00].

Umgekehrt erlauben Aktuationsprinzipien, die von einer Energiequelle on-Board gespeist werden können, meist nur ineffiziente, ungenaue Bewegungen von Positionier- und Manipuliereinheit. Anhand der oben beschriebenen drahtlosen, batteriebetriebenen Roboter der verteilten Systeme, die für ihre Fortbewegung Schrittmotoren bemühen, lässt sich diese missliche Lage bestätigen: Der energieautonome Betrieb geht zu Lasten der Manipulationspräzision. Im Falle von *KHEPERA II* beispielsweise hindert eine Schrittweite von 1/12 mm den Positionierer am Anfahren des gewünschten Raumpunktes mit Nanometer-Präzision. Ähnlich verhält es sich auch beim Miniaturroboter *ALICE* [CS05] oder den für Erkundungsaufgaben und Kartographie eingesetzten Mesoskalarobotern *SCOUT* (Bild 2.24) und *MILLIBOT* [GNPK00]. Auch dort finden sich weniger präzise, aber dafür energiesparende Schrittmotorantriebe. Jedoch garantieren selbst Schrittmotoren noch keine lange Betriebszeit. Dies verdeutlicht das *MARV* Nachfolgemodell, das trotz stark reduzierten Funktionsumfangs (lediglich mit einem Temperatursensor ausgestattet) für nur wenige Minuten autarken Betriebs geeignet ist (vgl. Bild 2.38).

In diesem Zusammenhang sind auch die thermischen Probleme nicht zu verachten, die kompakte Realisierungen insbesondere bei Einsatz hochpräziser piezoaktorischer Antriebe aufwerfen. So sind beim NanoWalker beispielsweise verschiedene Konzepte erarbeitet worden, um trotz des hohen Leistungsverbrauch von 15-20 W die thermische Überlastung und letztendlich die Zerstörung des Mikroroboters zu verhindern: Zum einen könnte mit Hilfe eines mikrofluidischen, mit Wasser gefüllten Kühlkörpers ein autonomer Betrieb von etwa 3 min. erzielt werden. Dann wäre sämtliche Kühlflüssigkeit verdampft, die integrierten Temperatursensoren würden einen den Roboter gefährdenden Temperaturbereich anzeigen, und der Roboter müsste schließlich ausgeschaltet werden [MER+01]. Diese für Mikromanipulationen inakzeptabel kurze Betriebszeit hat die Forscher am MIT zu einem weitaus aufwändigeren Lösungsansatz geführt. Der Miniaturroboter wird, wie in Bild 2.20 (Seite 19) angedeutet, innerhalb einer auf ihn abgestimmten, heliumgekühlten Kühlkammer eingesetzt. Weisen die Messwerte seiner integrierten Temperatursensoren auf eine bevorstehende Überhitzung hin, fordert er per IR-Kommunikation bei der für die Klimakammer zuständigen Temperaturkontrolleinheit ein Herunterkühlen an. Durch dieses Konzept steigen jedoch die Komplexität des Manipulationskontrollsystems und damit sowohl Aufwand als auch Fehleranfälligkeit für die gesamte Manipulationsstation erheblich an. Für das (wärmestrahlungsempfindliche) infrarotbasierte globale Sensorsystem sind zusätzliche Maßnahmen zu treffen. Darüber hinaus wird die Lebensdauer sowohl der Roboter als auch der in der Klimakammer integrierten, externen Komponenten durch thermische Spannungen negativ beeinflusst, wenn aufgrund hoher Leistungsverluste der Roboterelektronik starkes Herunterkühlen (insbesondere bei Multirobotereinsatz) erforderlich wird.

Asynchrones Weltmodell und Modularisierung des Steuerungssystems

Die Manipulationskontrolleinheit für drahtlose, mobile Mikroroboter gestaltet sich verglichen mit dem kabelbetriebenen Pendant weitaus aufwändiger. Bei beiden Systemen sind die für die Generierung von Steuerungs- und Kontrollsignalen essentiellen Sensorinformationen aus externen und On-Board-Sensoren zu gewinnen. Jedoch kann das Weltmodell für drahtlose Systeme nur noch asynchron aktualisiert werden: Ursächlich hierfür sind, verglichen mit dem direkten Auslesen kabelgebundener Sensoren, z. T. nichtdeterministisch variierende Verzögerungen bei der Datenübermittlung der On-Board-Sensorinformationen zur externen Sensordatenfusion über externe oder bereits im Mikroroboter integrierte Datenaufbereitungseinheiten (Analog-/Digitalfilter, Messverstärker, A/D-Wandler, etc.). Die Datenfusion muss chronologisch korrekt die verteilten globalen immobilen Sensoren mit den On-Board-Sensorsystemen kombinieren. Hierbei kommt erschwerend hinzu, dass die On-Board-Sensordaten meist stärker verrauscht und fehleranfälliger sind, da sich die einzelnen Mikroroboterkomponenten z. B. aufgrund räumlich kompakter Bauteilanordnung durch Übersprechen gegenseitig beeinflussen können. Mögliche Ausfälle von On-Board-Sensorinformationen aufgrund von Störungen des Kommunikationskanals zwischen Mikroroboter und Steuerungseinheit sind zu kompensieren. Die Datenfusion muss das Manipulationssteuerungssystem bei der möglichst exakten Abschätzung der Konfigurationen der einzelnen Roboter unterstützen – Konfiguration bezieht sich hierbei auf die Pose und, abhängig von der Dynamik des Roboters, auf seine Geschwindigkeit und Beschleunigung. Inkonsistenzen im Weltmodell sind unbedingt zu vermeiden, um dem Steuerungssystem keine Fehlinformationen über den Manipulationsprozess zu vermitteln und so zur fehlerhaften Ausführung der ursprünglichen Manipulationsaufgabe beizutragen.

Die steigende Komplexität erfordert eine weitere Modularisierung der Manipulationskontrolleinheit: Für jeden Mikroroboter wird in der Steuerungssoftware ein Robotermodul (auch als Robotertreiber bezeichnet) benötigt, das Informationen über die Konfiguration des jeweiligen Roboters enthält. Die Update-Funktion des Robotermodells erhält durch die Sensordatenfusion eine Abschätzung über die Roboterkonfiguration, basierend auf den letzten Sensordaten in Verbindung mit dem dynamischen Modell des jeweiligen Roboters. Für das Manipulationskontrollsystem wird häufig eine mindestens zweistufige Regelungsarchitektur implementiert, die zwischen Grob- und Feinbewegungen jedes einzelnen Roboters unterscheidet [WSB+03]. Hierdurch lässt sich einerseits eine Vielzahl verschiedener Aufgaben durchführen. Andererseits ergibt sich hierdurch die Möglichkeit, verschiedenartige mobile Mikroroboter einzusetzen, die sich bzgl. ihres Werkzeugs (Manipulator, Kamera, etc.) aber auch hinsichtlich ihrer Materialermüdungseigenschaften unterscheiden können [SES+03], [Fat04].

Kommunikationssystem – Einschränkungen und Anforderungen

An dieser Stelle sei noch ein wesentlicher Punkt benannt, der die Konzeption sowohl der Steuerungseinheit als auch der drahtlosen Roboter beeinflusst. Von den bei kabelgebundenen Mikrorobotern bewährten Verfahren, die Ansteuersignale direkt in analoger Form oder per PCM-Signal an vorgeschaltete D/A-Wandler zu übertragen, muss bei drahtlosen Robotersystemen Abstand genommen werden. Hohe Datenraten von z. B. 12,8 MByte/s, wie sie für die Ansteuerung der *MINIMAN*-Roboter erforderlich sind (vgl. Kapitel 2.3.3.4), werden von einem drahtlosen Mikroroboter-Kommunikationssystem, das sich gemäß Kapitel 2.4.1 an bereits existierenden Standards orientieren sollte, in nächster Zukunft nicht zu leisten sein: Die für den Übertragungskanal erforderliche Netto-Bandbreite, die sich im gegebenen Beispiel bereits für einen Mikroroboter anspruchsvoll hoch auf ca. 100 MBit/s belaufen würde, läge z. B. bereits in der Größenordnung des noch nicht abschließend spezifizierten, Energie "verschlingenden" Nachfolgers zum aktuellen 54Mbit-WLAN-Standard 802.11 g, der eine Brutto-Datenrate von 108 MBit/s vorsehen wird. Unter Beachtung des bereits angesprochenen Energiedilemmas eine nicht zu überwindende Hürde, zumal sich die erforderliche Bandbreite und damit einhergehend sowohl Komplexität als

auch Energieaufwand bei zeitgleichem Einsatz mehrerer Mikroroboter drastisch vergrö-Bern würden. Hieraus folgt unmittelbar die Notwendigkeit, die *Datenmenge*, die für die Aktoransteuerung an die Roboter übertragen werden muss, erheblich zu *reduzieren*, indem z. B. nicht mehr die Aktorsignale selbst sondern nur noch die Signalformparameter in Form von Amplitude, Frequenz und Phase übertragen werden. Dies setzt jedoch seitens der Roboter leistungsfähige Elektronik voraus: Nach Datenempfang und Interpretation als Signalformparameter, werden diese an die Ansteuerelektronik weitergegeben. Diese wiederum muss in der Lage sein, die empfangenen Parameter in entsprechende, für die Aktoren geeignete Ansteuersignale zu transformieren. Auch die Manipulationskontrolleinheit gestaltet sich aufgrund der veränderten Roboteransteuerung vielschichtiger. Die Robotertreiber müssen den Zwischenschritt über die Signalformparameter ebenso berücksichtigen, wie das Robotersteuerungssystem, das darüber hinaus noch mögliche Verzögerungen bei der Datenübertragung an die Roboter mit in seine Regelungsalgorithmen zur Berechnung der nächsten Roboteraktionen (bzw. Signalformparameter) einbeziehen muss.

2.5 Formulierung der Aufgabenstellung

Um die Forschung im Bereich kabelloser Mini- bzw. Mikroroboter voranzutreiben, sind einerseits die Forschungsbestrebungen nach energiesparenden präzisen Antriebssystemen zu intensivieren. Andererseits sind, insbesondere aufgrund des noch ungelösten Energiedilemmas, die übrigen Roboterkomponenten für Funktionskontrolle, Aktorsignalerzeugung, On-Board-Sensorik und Kommunikation mit der Steuerungseinheit so energie- und platzsparend wie möglich zu realisieren; hierbei gilt es auch immer einen Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und Energiebedarf zu finden.

Schließt man die Forderungen nach möglichst kleinen Hauptabmaßen (< 1 cm³) und ein Verhältnis C << 1 (vgl. Kapitel 2.4.2.2) in den Anforderungskatalog für Mikroroboter mit ein, dann existieren für flexible Mikromanipulationsstationen derzeit überhaupt noch keine drahtlosen oder gar autonomen, mobilen Mikroroboter im Sinne der Definitionen von Kapitel 2.3.1. Entweder besitzen heutige cm³-große mobile Roboter autonomes Verhalten, da sie durch verschiedene Sensoren ihre Umgebung analysieren und die Sensordaten mit in ihre Inferenzprozesse einbeziehen; dann sind sie jedoch ohne Manipulator ausgestattet und somit nicht für Mikromanipulationsstationen geeignet. Handelt es sich umgekehrt um mobile Mikroroboter, die mit einer Manipulationseinheit versehen sind, dann sind sie entweder von der Größe her den Makrorobotern zuzuordnen oder aber, bei kleineren Hauptabmaßen im Bereich eines Kubikdezimeters, per Kabel betrieben und daher als nichtautonome Mesoskalaroboter einzustufen.

Es bleibt festzuhalten, dass bis zu diesem Zeitpunkt für den Einsatz in einer Mikromanipulationsstation keine miniaturisierten mobilen Mikroroboter mit physikalischen Hauptabmessungen von wenigen Kubikzentimetern existieren. Dementsprechend stehen bisher auch keine drahtlosen Kommunikationssysteme für derartige Mikroroboter zur Verfügung.

Ziel dieser Arbeit ist es nun, ein Konzept zu entwickeln und umzusetzen, das zukünftigen miniaturisierten Mikrorobotersystemen in Mikromanipulationsstationen eine möglichst robuste und schnelle Datenübertragung bei geringem Energiebedarf erlaubt. In diesem Kapitel wurden zum einen die Anforderungen an Mikromanipulations-Tischstationen und zum anderen der Aufbau bzw. die benötigten Komponenten von miniaturisierten mobilen Mikrorobotern ausführlicher betrachtet. Damit sind die Grundlagen für die Konzeption und Integration eines geeigneten Kommunikationssystems gelegt. Nun gilt es, ein passendes Kommunikationsverfahren auszuwählen. Hierzu werden im nachfolgenden Kapitel 3 die gegenwärtig in Frage kommenden Technologien näher beleuchtet, insbesondere entsprechend der Forderung von Kapitel 2.4.1 nach kostengünstigen, standardisierten Schnittstellen, die zudem eine robuste und schnelle Datenübertragung bei zugleich energie- und platzsparender Realisierung erlauben.

3 Kommunikation in der Robotik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen dafür gelegt, die einzelnen Technologiestandards, die für die Entwicklung eines Kommunikationssystems in einer Mikromanipulationsstation in Frage kommen, vorzustellen. Zunächst werden einige grundsätzliche Begriffe geklärt, um daran anknüpfend einen Überblick über die verschiedenen Technologien zu bieten.

3.1 Drahtlose Kommunikation

Wie in der klassischen Robotik sind auch in der Mikrorobotik die Einsatzfelder drahtloser Kommunikation vielfältig: Beginnend bei kabellosen, mit oder ohne Haptik versehenen Eingabegeräten, über Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, bis hin zur Kommunikation in Schwärmen von autonomen Mikrorobotern (auch als *Swarm-Bots* bezeichnet). Abhängig vom jeweiligen Mikrorobotersystem bezieht sich die Drahtlosigkeit primär auf die Datenübertragung zur Steuerung bzw. Regelung oder das Vermitteln von Daten zur Navigation bzw. Terrainerkundung. Aber auch die in Kapitel B.4.1 beschriebene drahtlose Energieübertragung kann hier aufgeführt werden, sofern man sich vom Standpunkt, Kommunikation ausschließlich als Nachrichtentransfer zu betrachten, etwas distanziert [DJ97].

Grundsätzlich wird in der Robotik zwischen impliziter und expliziter Kommunikation unterschieden. *Implizite Kommunikationsformen* beschreiben den indirekten Informationsaustausch beispielsweise durch einfache Umgebungsmodifikationen oder Ablagerung chemischer Spuren (Pheromone). Die Umgebung selbst kann in diesem Fall als eine Art "schwarzes Brett" verstanden werden, das von den beteiligten Kommunikationspartnern gemeinsam genutzt wird. Diese Art der Kommunikation, die bereits in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts unter dem Begriff *"stigmergy"* von Pierre-Paul Grassé im Zusammenhang mit sozialen Insektengemeinschaften beschrieben wurde [Gra59], ist insbesondere für die Robotikforschung im Bereich verteilter, kooperierender Systeme (Kapitel 2.4.3.3 bzw. B.2) interessant [CFK97]. Da in vielen Anwendungsbereichen implizite Verfahren im Vergleich zu expliziten eine um 10–20 % reduzierte Leistungsfähigkeit aufweisen [Mar99], werden implizite Kommunikationssysteme im Zusammenhang mit Kommunikationssystemen für Mikromanipulationsstationen hier nicht weiter beleuchtet.

Explizite Kommunikation bezeichnet den Austausch von unverwechselbaren Nachrichten, meist mit Sender- und Empfängeridentifikation versehen, über einen dedizierten physikalischen Kanal (z. B. Funk- oder Infrarot-Verbindung): im Falle der Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen einem Roboter und einem Supervisor oder weiteren Roboter, im Falle eines Rundrufs (im Folgenden als *Broadcast* bezeichnet) zwischen einem Roboter und einer ganzen Gruppe bestehend aus Robotern in- oder exklusive Supervisor. Bei der expliziten Kommunikationsform wird in der Robotik weiterhin zwischen der *lokalen Kurzstreckenkommunikation* und der über eine größere Reichweite verfügenden, *globalen Kommunikation* unterschieden. Während bei letztgenannter ein Übertragungskanal ohne räumliche Begrenzung von allen Robotern und einer Basisstation gemeinsam genutzt wird, bezeichnet lokale Kommunikation den Datenaustausch durch direkte Interroboterkommu-

nikation, wobei hier die Reichweite eingeschränkt ist und dadurch nur räumlich begrenzt zwischen benachbarten Robotern kommuniziert werden kann.

Bei verteilten Robotersystemen kann sich eine globale Kommunikationslösung als nachteilig erweisen, da ein einzelner Kanal mit begrenzter Bandbreite unter allen Teammitgliedern aufgeteilt werden muss. Abhängig von der Teamgröße und der zu übertragenden Datenmenge kann der globale Kommunikationskanal in diesem Falle einen die Leistungsfähigkeit begrenzenden Engpass darstellen. Umgekehrt gestaltet sich der Fall bei Mikromanipulationssystemen, zu deren Steuerung neben den mobilen Robotern externe, nicht unmittelbar in den Manipulationsprozess eingreifende Komponenten (Visualisierungssystem, globale Sensorsysteme) mit in den Validierungs- und Entscheidungsprozess einzubeziehen sind. Hier sind, im Anschluss an Sensordatenfusion und Berechnung der nächsten Manipulationsschritte durch das Steuerungssystem, Robotersteuerbefehle von einer Basisstation (Supervisor) an die Mikroroboter zu übertragen, wofür sich eine globale Kommunikationslösung anbietet.

Verglichen mit klassischer Robotik und verteilten Robotersystemen, die zur Umsetzung ihrer drahtlosen Schnittstellen aus einem weiten Gebiet verschiedener, bereits etablierter Kommunikationssysteme schöpfen können, differieren die Schwerpunkte bei Kommunikationssystemen der Mikrorobotik z. T. erheblich. [Fat04] bemüht sogar den Vergleich mit einem Satellitensubsystem von Sensorsatelliten, da die **Entscheidungsparameter** sehr ähnliche Gewichtungen erfahren: Dies betrifft die *Baugröße*, das *Gewicht*, die *Komplexi-tät*, die *Übertragungsgeschwindigkeit*, den *Leistungsverbrauch* und die *Vakuumtauglichkeit* (Einsatz in einem REM) ebenso, wie die Fragen nach *Zuverlässigkeit* und *Kosten* – den beiden letztgenannten Punkten kommt in der Raumfahrttechnik verständlicherweise eine noch höhere Priorität zu.

Roboter	Тур	Volumen	Energie	Kommunikation	Datenrate
Khepera II	Autonom (Schrittmotor)	115,5 cm ³ (Basis) + 45,4 cm ³ (RF-Modul)	Kabel / Akku (1h)	2,4 GHz RF (Vollduplex, 7 Kanäle)	115,2 kbps / 38,4 kbps
Alice	Autonom (Schrittmotor)	9,24 cm³ (ohne RF-Modul)	Akku (3V NiMH)	1) IR: lokal / RC-5 2) RF: 433MHz 3) RF: 868MHz 4) RF: 2,4 GHz (ZigBee)	1) 500 Bps 2) 1000 Bps 3) 115,2 kbps 4) k. A.
NanoWalker	Drahtlos (Stick-Slip)	30,7 cm ³	Power Floor (max. 36 W; Ø15–20 W)	Infrarot (23% des Ge- samtenergieverbrauchs)	4 Mbps
Denso Röh- renroboter	Drahtlos (Piezo- Trägheitsantrieb)	4,7 cm ³ (1,1 cm ³ für RF-Modul)	22 GHz Mikrowellen (485 mW)	RF: 24GHz (Mikrowellen)	2,5 Mbps
Smart Dust	Stationär	16 mm³	Batterie, integrierte Solarzelle	532nm-Laser (passiv)	Down: 375 kbps Up:118-4000 Bps
Millibot	Autonom (Schrittmotor)	Mesoskala	NiMH-Akku (7,2 V; 230 mAh)	RF	4,8 kbps
Scout	Autonom (Schrittmotor)	Mesoskala (Ø 4 cm; 11 cm Länge)	Batterie (9 x 3 V)	1) RF: 900 MHz (Video) 2) RF: 434 MHz (Befehle)	 30 Frames/s (320x240 Pixel) k. A.

Tabelle 3.1: Auflistung einiger Mesoskala-, Miniatur- und Mikroroboter hinsichtlich Typ, Größe, Energieversorgung und Kommunikationsverfahren

Die Tabelle 3.1 zeigt bisherige drahtlose Kommunikationslösungen für autarke kleinvolumige Mesoskalaroboter und mobile Miniaturroboter. Mit Ausnahme des Miniaturroboters *NanoWalker* sind die derzeitigen Roboterrealisierungen jedoch nicht für den Bereich der Mikromanipulation ausgelegt. Die manipulativen Fähigkeiten von *ALICE* und *KHEPERA* bzw. *KHEPERA II* sind als zu grob und ungenau einzustufen. Selbst der *NanoWalker* besitzt keinen Greifmechanismus als Werkzeug, sondern nur ein Rastertunnelmikroskop zur Werkstoffanalyse. Von richtiger Mikromanipulation kann daher nur im weiteren Sinne gesprochen werden. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass bis zum jetzigen Zeitpunkt keine miniaturisierten drahtlosen mobilen Mikroroboter für den Einsatz in einer Mikromanipulationsstation existieren. Daher sind auch für den Bereich der drahtlosen Kommunikationssysteme für Mikroroboter mit physikalischen Abmessungen von nur wenigen Kubikzentimetern bislang keine Konzepte umgesetzt worden.

3.2 Induktive Nahfeldkommunikation (NFC)

Das Prinzip der induktiven Kopplung, das für den drahtlosen Energietransfer eingesetzt wird (vgl. Kapitel B.4.1), kann auch für die Informationsübertragung angewendet werden.



Bild 3.1: Induktives System zur Energieund Datenübertragung ([BPNP02], mod.)

die Informationsübertragung angewendet werden. Für mobile Systeme gestaltet sich die induktive Signalübertragung insbesondere für höhere Datenraten aber als schwierig, da diese Systeme ebenso wie bei der Energieübertragung sehr empfindlich auf räumliche Versetzung von Primär- und Sekundärspule reagieren. So wird in [BPNP02] ein Mehrspulensystem vorgestellt, mit dem bei optimaler Spulenausrichtung neben ca. 10 W gleichzeitig auch Daten bidirektional mit bis zu ca. 200 kBaud im Halbduplex induktiv übertragen werden können (Bild 3.1) – hierzu werden die Primärspule zur Energieübertragung mit einem 150 kHz-Signal und der Resonanzkreis zur Datenübertragung mit einem 4 MHz-Trägersignal angesteuert. Allerdings reduziert sich die Datenrate selbst bei optimiertem

Spulendesign sehr schnell auf maximal 19,2 kBaud, sobald realistische, d. h. mobilen Spulensystemen entsprechende Positionsabweichungen vorliegen.

Ein mittlerweile kommerziell einsetzbares, induktives Verfahren ist die von ISO, ECMA und ETSI standardisierte Nahfeldkommunikation *NFC*, die für Autorisierung oder Zugriffskontrolle ebenso eingesetzt werden kann, wie für das Herunterladen von Geldbeträgen mittels Smartcard aus Automaten. NFC arbeitet mit 13,56 MHz. Als Modulation wird die Amplitudenumtastung (ASK) eingesetzt; die Codierung basiert sowohl auf der von Philips entwickelten *Mifare*-Technik als auch auf der *FeliCa*-Technik von Sony [NFC05]. Bis zu einer Reichweite von einigen Zentimetern beträgt die in Stufen einstellbare Übertragungsrate bis zu maximal 424 kbit/s.

Die beiden Beispiele Mehrspulensystem und NFC veranschaulichen deutlich, dass insbesondere für hohe Übertragungsraten, wie sie für Mikromanipulationsstationen mit mobilen Mikrorobotern gegenwärtig erforderlich sind (vgl. Kapitel 2.4.3.3), induktive Datenübertragungssysteme sehr schnell an ihre Grenzen stoßen. Sie scheinen derzeit keine sinnvolle Alternative zu Funktechnologie und optischen Übertragungsverfahren zu sein.

3.3 Funktechnik – drahtlose Netzwerke

Drahtlose Netzwerke lassen sich in vier Hauptkategorien einteilen: drahtlose, räumlich deutlich begrenzte Netzwerke (*WPAN*), drahtlose lokale Netzwerke mit höherer Reichweite (*WLAN*), drahtlose Langstreckennetze (*WWAN*) und Satellitennetzwerke. Zahlreiche, z. T. recht unterschiedliche Funktionen werden durch Drahtlosnetzwerke abgedeckt. In ei-



Bild 3.2: Qualitative Betrachtung verschiedener Funkstandards bzgl. Frequenzbereich, Datenrate und Reichweite ([Mul02], mod.)

nigen Fällen dienen sie als Kabelersatz, während sie in anderen Fällen erst die Erfassung und den Zugriff auf entfernt liegende Räumlichkeiten möglich machen. Entsprechend dieser Betrachtungsweise lassen sich Drahtlosnetzwerke in Nahbereichs- und Langstreckennetzwerke einteilen. Die jeweils erforderlichen Datenraten reichen dabei je nach Anwendungsfall zwischen einigen wenigen kbit/s für einfache Textübertragung bis hin zu mehreren 10 Mbit/s und mehr für datenintensive Multimediaübertragungen (Bild 3.2).

Drahtlose Nahbereichsnetze sind auf einen räumlich begrenzten Bereich eingeschränkt. Im Falle der lokalen Netzwerke (LAN) können das größere Firmengebäude, Werksanlagen aber auch Privathäuser sein, im Falle von persönlichen lokalen Netzwerken (PAN), z. B. bei portablen Computern (Laptop, PDA) ist die Reichweite auf den Nahbereich mit wenigen Metern Distanz zwischen den Kommunikationspartnern begrenzt. Sowohl WPAN als auch WLAN operieren typischerweise im Bereich der unlizenzierten, für Industrie, Wissenschaft und Medizin allgemein zugewiesenen ISM-Frequenzspektren, die jedem Benutzer gebührenfrei zur Verfügung stehen. Von der europäischen Industrie verbreitet genutzt sind das 433-MHz-Band und das Frequenzspektrum um 868 MHz – letzteres bezieht sich auf die

Standort	Frequenzbe- reich (GHz)	Max. Ausgangs- leistung (mW)	
Europa	2,400 - 2,4835	1000	
Nordamerika	2,400 - 2,4835	100 (EIRP*)	
Japan	2,471 - 2,497	10	

*EIRP: äquivalente isotrope Strahlungsleistung

Tabelle 3.2: Länderspezifische Spezifikationen des lizenzfreien 2,4-GHz-Bandes n um 868 MHz – letzteres bezieht sich auf die europäische Spezifikation, sein amerikanisches Pendant findet sich im Bereich um 915 MHz. Dies verdeutlicht bereits, dass die ISM-Frequenzen, aber auch die jeweils zulässigen Sendeleistungen von Land zu Land abweichend definiert sein können, wodurch eine Verbreitung national zugelassener Funksysteme auf Nachbarländer oder -kontinente aufgrund fehlender oder teuerer Lizenzen erschwert oder gar unmöglich

wird. Das am häufigsten nahezu global genutzte, lizenzfreie Frequenzband liegt um 2,4 GHz (vgl. Tabelle 3.2), ebenfalls weltweit verbreitet sind die Frequenzbänder um 5 GHz und 40 GHz [KK02], [GGW03], [Mal03].

Ein Langstrecken- oder Fernbereichsnetz bezeichnet eine zu überbrückende Kommunikationskanallänge, welche die WLAN-Reichweite von typisch 100 m bis 300 m (in seltenen Fällen sogar bis 500 m) übersteigt. Langstreckennetze überspannen ganze Städte (*Metropolitan Area Network*, kurz *MAN*), Provinzen oder ein ganzes Land, ihr Einsatzzweck ist die drahtlose Abdeckung großflächiger Gebiete z. B. im Bereich des nationalen Polizeifunks. Ist weltweite Umspannung gefordert, wie z. B. im Flug- oder Schiffsverkehr, so dominieren Satellitennetze – als Beispiel sei hier das Kommunikationssystem IRIDIUM für die weltweite satellitengestützte Telefonie benannt [Iri06].

Netzwerktyp	Versorgungsbereich	Einsatzzweck	Zugehörige Kosten	Typ. Daten- durchsatz	Standards
WPAN (Wireless Personal Area Network)	Persönliches Arbeitsum- feld, typ. 10 m	Kabelersatz, Per- sönliche Netzwerke	Sehr niedrig	9,6 kbit/s – 16 Mbit/s	IrDA, Bluetooth, 802.15 (ZigBee, UWB, etc.)
WLAN (Wireless Local Area Network)	In Gebäuden oder auf Plätzen, typ. 100 m	WPAN-Erweiterung LAN-Alternative	Niedrig bis mittel	1 Mbit/s - 54 Mbit/s	802.11a, b, g, HIPERLAN/2
WWAN (Wireless Wilde Area Network	überregionale oder nati- onale Abdeckung mit Mehrträgertechnik	Erweiterung (LAN/WLAN)	Mittel bis hoch	8 kbit/s – 2 Mbit/s	GSM, TDMA, CDMA, GPRS, EDGE, WCDMA
Satellitennetzwerke	Weltweite Abdeckung	Erweiterung von LAN- bzw. nationa- lem WAN	Sehr hoch	2 kbit/s – 19.2 kbit/s, (auch 4 Mbit/s)	TDMA, CDMA, FDMA, (SkyDSL)

Tabelle 3.3: Drahtlosnetzwerke: Wesentliche Unterschiede der Hauptkategorien WPAN, WLAN, WWAN und Satellitennetzwerk [Mal03]

Tabelle 3.3 zeigt einige Details bzw. Unterschiede der vier Hauptkategorien drahtloser Netzwerke – zur Beschreibung der verschiedenen Standards sei auf die Literatur verwiesen z. B. [IEEE97], [Stü02], [Mal03]. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale sind der Versorgungsbereich, der Einsatzzweck, der Datendurchsatz und die zugehörigen Kosten. Wie bereits oben beschrieben, arbeiten Kurzbereichsnetzwerke auf unlizenzierten Frequenzbändern, für die keine Gesprächs- oder Sendezeitgebühren anfallen – ganz im Gegensatz zu WWAN oder Satellitennetzwerken, die neben den höheren Infrastrukturinvestitionen laufende Kosten in Form von Zeit- oder Volumentarifen verursachen.

Die beiden letztgenannten Kategorien, die der Vollständigkeit wegen hier aufgeführt sind, werden im Folgenden nicht tiefgehender beleuchtet, da sie einerseits aufgrund des



Bild 3.3: Übersicht über funkbasierte WPAN- und WLAN-Systeme bzgl. Datenrate und Reichweite ([Mul02], mod.)

energetischen und finanziellen Aufwandes, andererseits wegen der großen räumlichen Abdeckung für die Mikrorobotik überdimensioniert sind. Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich daher auf WPAN- und WLAN-Techniken (Bild 3.3), wobei zunächst ein kurzer Überblick über verschiedene Funktechniken gegeben wird, mit dem Ziel, neben einem besseren Verständnis vor allem die geeignete Technologie für das Kommunikationssystem in einer Mikromanipulationsstation auswählen zu können.

3.3.1 Funktechniken

Viele der drahtlosen Netzwerktechnologien in WPAN und WLAN (und auch WWAN) transportieren Informationen über modulierte Radiowellen. Modulation beschreibt das Überlagern des Datenstromes auf die sog. Trägerwelle: Ein Trägerbandsignal wird in Abhängigkeit eines Nachrichten- oder auch Basisbandsignals verändert; das Basisbandsignal wird in einen anderen Frequenzbereich verschoben. Man spricht von analogen oder digitalen Modulationsverfahren, je nachdem, ob das Nachrichtensignal in harmonischer (sinusförmiger) oder periodisch impulsförmiger Art dem Träger aufmoduliert wird. Zahlreiche Modulationsverfahren sind mittlerweile verfügbar, jeweils mit gewissen Vor- aber auch Nachteilen versehen. Grundsätzlich lassen sich drei Modulationstechniken unterscheiden: Schmalbandtechniken, Spreizmodulationsverfahren und OFDM¹-Techniken [Cou97].

Schmalbandtechnik

Schmalbandfunksysteme senden und empfangen Daten auf einer festgelegten Trägerfreguenz (single carrier modulation). Das Frequenzband wird hierbei so schmal gehalten, dass das Frequenzspektrum der zu übertragenden Information gerade darin verzerrungsfrei transportierbar ist - die Bandbreite ist im Idealfall (nahezu) gleich der Symbolrate des Übertragungskanals. Auf der Empfangsseite werden abgesehen vom spezifizierten Freguenzband sämtliche Störsignale herausgefiltert. Bei Schmalbandfunksystemen finden Modulationsverfahren mit harmonischen Trägern, wie z. B. AM, ASK, PSK, FSK oder QAM, ebenso Verwendung, wie die auf pulsförmigen Trägern basierenden Modulationsmethoden PAM, PFM, PCM oder DPCM, um nur einige hier zu benennen [Cou97], [Stü02]. Nachteilig bei Schmalbandtechnologien ist die Tatsache, dass sie nicht selten einer staatlichen Genehmigung zur Nutzung des Frequenzbereiches bedürfen, wodurch erhebliche Kosten für den Betreiber des Funknetzes entstehen können – hier sei nur an die milliardenteure Versteigerung der UMTS-Lizenzen (Nutzfreguenzen von 1900 MHz bis 2170 MHz) in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2000 erinnert. Werden Schmalbandsysteme dagegen für die lizenzfreien ISM-Bänder (u. a. 433 MHz, 868/915 MHz, 2,4 GHz oder 5,8 GHz) konzipiert, müssen sie gegen breitbandige und damit häufig robuster arbeitende Konkurrenzsysteme ankämpfen. Für verteilt kooperierende Robotersysteme finden sich bereits jetzt zahlreiche schmalbandige Realisierungen [FMSA99],

¹ Orthogonal Frequency Division Multiplexing

[BWBK02], [CES02], [RSG+02] (vgl. auch Tabelle 3.1). Im Zusammenhang mit Schmalbandsystemen sollen wegen ihres sehr geringen Energiebedarfs auch die sog. Pico-Radios nicht unerwähnt bleiben [RAK+02], [LKP04]: Jedoch scheinen diese ursprünglich für drahtlose Sensornetzwerke konzipierten Funksysteme aufgrund ihrer niedrigen Datenrate bis ca. 20 kbit/s vorerst hauptsächlich für verteilt kooperierende Robotersysteme interessant zu sein, da z. B. für an "stigmergy" angelehnte Kommunikationsverfahren niedrige Datenraten vollkommen ausreichend sind.

Spreizspektrum

Die Technik der *Spreizmodulation* stellt einen Kompromiss dar zwischen Bandbreiteneffizienz einerseits und Zuverlässigkeit, Integrität, Sicherheit andererseits. Sie beansprucht verglichen mit der Schmalbandtechnik eine höhere Bandbreite, produziert dafür aber ein deutlicheres Signal, das durch den Empfänger, die Kenntnis der Sendesignalparameter vorausgesetzt, leicht detektiert werden kann. Ohne Kenntnis dieser Parameter erscheint das Spreizspektrumsignal als Hintergrundrauschen. Gegenwärtig existieren drei Varianten der Spreizmodulation, die Frequenzsprungmodulation FHSS, die Direktsequenz-Spreizmodulation DSSS und die Chirp-Spreizmodulation CSS [Stü02], [GGW03].

FHSS verwendet einen Schmalbandträger, der zyklisch seine Trägerfrequenz wechselt. Nur Sender und Empfänger kennen dabei die Abfolge der benutzen Frequenzen. Hinter diesem Verfahren steckt die Idee, dass für den Fall einer blockierten Frequenz eine andere ausweichend zur Verfügung stehen sollte, auf der die Daten erneut gesendet werden können. Eine saubere Synchronisation zwischen Sender und Empfänger vorausgesetzt, ergibt sich ein einzelner logischer Kanal für den Informationstransport mit einer typischen maximalen Datenrate von 1 Mbit/s bis 2 Mbit/s. Nicht synchronisierte Empfänger erhalten lediglich kurze, impulsartige Rauschsignale, sog. Burst-Störungen.

Im Gegensatz zur "punktuell schmalbandigen" Übertragung bei FHSS wird das Signal bei DSSS simultan über ein breites Frequenzband verteilt. Jedem zu übertragenden Bit wird ein redundantes Bitmuster, als Chip bezeichnet, zugeordnet. Hierbei gilt, dass sich mit zunehmender Chiplänge die Rückgewinnung der ursprünglichen Daten vereinfacht, jedoch auf Kosten eines steigenden Bandbreitebedarfs. Empfängern, denen die Chipfolge unbekannt ist, erscheit das DSSS-Signal als breitbandiges Rauschen mit kleiner Leistung. FHSS nutz das Frequenzspektrum besser aus als DSSS. Daher besitzt DSSS im Vergleich zu FHSS einen höheren Leistungsbedarf [Mal03], bietet aber neben größerer Reichweite den Vorteil einer höheren Datenrate von typischerweise 2 Mbit/s bis 11 Mbit/s – letztere Datenrate gilt z. B. beim Wi-Fi-Standard 802.11b [IEEE97].

Im Rahmen der von der Firma Nanotron Technologies entwickelten WPAN-Technik nanoNET wird eine sog. MDMA-Modulation mit dem sich daraus ergebenden *Chirp Spread Spectrum* CSS verwendet [Nan05]. MDMA (*Multi Dimensional Multiple Access*) kombiniert die Modulationsverfahren AM, FM und PM, um auf diese Weise Datenpakete mit einer zuvor festgelegten Qualität bei nahezu optimaler Ausnutzung der gegebenen Kanalbandbreite zu übertragen. MDMA basiert auf sog. Chirp-Pulsen – in der Natur von Delphinen und Fledermäusen genutzt: Ein Chirp-Impuls ist ein Signal, dessen Frequenz sich zeitlich ändert; der Chirp durchläuft innerhalb einer festgelegten Zeitspanne ein bestimmtes Frequenzband ("gewobbelter" Frequenzimpuls). Die Amplitude bleibt dabei konstant. In Analogie zu DSSS sind Chirp-Pulse bedingt durch ihre Breitbandigkeit robust gegenüber Störungen. Die Bandbreite wird im Gegensatz zu DSSS jedoch nahezu optimal ausgenutzt, Die CSS-Modulation zeichnet sich durch geringen Energiebedarf aus, darüber hinaus können Chirp-Impulse kostengünstig realisiert und verarbeitet werden. In der für nanoNET realisierten Konfiguration mit einer Chirp-Puls-Bandbreite von 80 MHz und einer Symboldauer von 1 µs werden Datenraten bis maximal 2 Mbit/s erzielt.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

OFDM ist ein Modulationsverfahren, das statt der Modulation eines einzelnen Signalträgers eine Vielzahl von Subträgern gleichzeitig moduliert. Zur Übertragung werden mehrere, sich nicht überlappende Unterträger verwendet, die so konstruiert sind, dass ihre Spektren jeweils dort eine Nullstelle besitzen, wo über die anderen Unterträger Informationen ausgesendet werden. Die Gesamtdatenrate ergibt sich durch die Anzahl der Unterträger, durch die Symbolrate und die Anzahl der Bits, die pro Symbol übermittelt werden. Im Gegensatz zu Frequenzsprungtechnik und Direktsequenz-Spreizmodulation wird bei OFDM das Signal über parallele Frequenzen gesendet, wodurch, bei günstiger Wahl des Abstandes zwischen den Subträgern, die parallel übertragenen Daten gegen störende Differenzträgerstörungen besser geschützt werden [KK02]. Die spektrale Effizienz ist bei OFDM sehr viel höher, da mehr Daten über ein vergleichsweise schmaleres Frequenzband übertragen werden. Daher ist OFDM besonders für die Transmission mit hoher Datenrate interessant; so verwenden z. B. Digital-TV (DVB) und WLANs (IEEE802.11 a/h, HiperLAN) dieses Modulationsverfahren. Allerdings steigen Leistungsbedarf und Implementierungsaufwand verglichen mit FHSS oder DSSS erheblich – nicht zuletzt wegen der aufwändigen Logik (Hardware) für eine schnelle inverse Fouriertransformation [Mal03]. Aus diesem Grund hat OFDM bei kleinen, batteriebetriebenen Geräten (Mobiltelefon oder PDA) bisher nur geringe Verbreitung gefunden. Für weitergehende Details wird auf [BS02] verwiesen.

3.3.2 WLAN – IEEE 802.11, HomeRF, HiperLAN

Bis vor einigen Jahren basierten die meisten Systeme auf firmeneigenen Luftschnittstellen und MAC¹-Protokollen ohne offenen Standard. Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Radio-LAN-Systemen, die auf unlizenzierten Frequenzbändern operieren. Wesentliche Parameter der derzeitigen WLAN-Realisierungen sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst, weitere Details sind der Literatur zu entnehmen [KK02], [Stü02], [GGW03], [Mal03], [Ziv05].

	802.11a/h	802.11b	802.11g	HIPERLAN/2	HomeRF (DECT & IEEE802.11)
Frequenzband	5,15 - 5,35 GHz; 5,47 - 5,725 GHz	2,4 GHz ISM	2,4 GHz ISM	5 GHz	2,4 GHz ISM (2,404–2,478 GHz)
Modulation	OFDM (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM)	FHSS/DSSS (CCK, DQPSK)	OFDM/DSSS (CCK)	OFDM (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM)	FHSS (50 Sprünge/s) (2FSK, 4FSK)
Kanalbreite	10 MHz–30 MHz (typ.16,56 MHz)	22 MHz	20 MHz	20 MHz	Vers. 1.2: 1 MHz Vers. 2.0: 3 MHz–5 MHz
Kanalanzahl Europa/USA/Japan	12 (überlappungsfrei)	13 / 11 / 14	13 / 11 / 14	3 – 19 (länderspezifisch)	Version 1.2: 75 Version 2.0: 15
Max. Sendeleistung (differiert für Europa, USA und Japan)	200 mW bis 1000 mW (EIRP)	100 mW	100 mW	200 mW (5,15 – 5,35 GHz) 1 W (5,47 – 5,725 GHz)	100 mW
Zugangsart	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA	TDMA/TDD	TDMA/TDD (DECT); CSMA/CA (TCP/UDP/IP)
Reichweite (bei Sichtkontakt)	< 100 m	100 m	100 m	150 m – 2 km (30 m im Gebäude, da dort RegTP Leistung begrenzt)	ca. 50 m (mind76/-62 dBm am Empfänger)
Maximale Bandbreite (brutto) (Für IEEE 802.11 zu- sätzliche Angabe für 1500 Bytes bzw. 60 Bytes Payload)	54 Mbps (effekt. 34,4 Mbps); (30 Mbps bzw. 2,6 Mbps)	11 Mbps (Ø 5,9 Mbps netto); (7,11 Mbps bzw. 0,75 Mbps)	54 Mbps (Ø 24,4 Mbps netto); (26 Mbps bzw. 2 Mbps)	54 Mbps (effekt. 44,8 Mbps)	Version 1.2: 0,8 - 1,6 Mbps (Ø 0,6 Mbps netto) Version 2.0: sync.: 0,8 Mbps async.: 1.6 – 10 Mbps
Anwendung	Vernetzung (SOHO)	Vernetzung (SOHO)	Vernetzung (SOHO)	SOHO-Vernetzung (ATM, IP, UMTS, IEEE1394)	SOHO-Vernetzung (Sprache und Daten)
Standardisierer / Anbieter	IEEE	IEEE	IEEE	ETSI	HomeRF Working Group (Konsortium 2003 aufgelöst, keine Weiterentwicklung!)

Tabelle 3.4: Spezifikationen verschiedener WLAN-Varianten für 2,4 GHz und 5 GHz

Die gängigsten Vertreter für Radio-LANs (RLAN) entspringen dem IEEE-Standard IE-EE802.11, der, aufgrund der geringen Marktpräsenz anderer RLAN-Systeme wie HomeRF oder HiperLAN, nicht selten mit dem Begriff WLAN gleichgesetzt wird. Leider gestaltet sich

¹ MAC – Medium Access Control, zu deutsch Medium-Zugriffssteuerung

dieser für WLANs maßgebliche Standard IEEE 802.11 sowohl für Anwender als auch Entwickler als sehr unübersichtlich, da, bedingt durch ständigen technischen Fortschritt, z. T. vollkommen unterschiedliche Versionen hinsichtlich Übertragungsrate, Frequenzbereich, Modulationsverfahren oder Kanalanzahl verfügbar sind.

Im Jahr 1997 etablierte die IEEE 802.11-Standardisierungsgruppe den ersten WLAN-Standard mit Summenbitraten von 1 Mbit/s und 2 Mbit/s: Allerdings sind lediglich die beiden unteren Ebenen des OSI-Referenzmodells, d. h. die Bitübertragungsschicht (PHY) und die aus Medien-Zugriffssteuerung (MAC) und Link Layer Control (LLC) bestehende Verbindungsschicht (Data Link Layer) definiert: Die physikalische Ebene sieht die drei unterschiedlichen Übertragungstechniken FHSS, DSSS und Infrarot (IR) vor, CSMA/CA stellt das gemeinsame Medienzugriffsprotokoll dar. Zunächst setzten IEEE 802.11-WLANs auf die Übertragungstechnik FHSS, die jedoch durch DSSS-Modulation (11-Bit-Barker-Spreizsequenz) verbunden mit entweder BPSK bei 1 Mbit/s-Symbolrate oder QPSK für die 2Mbit-Übertragung abgelöst wurde. Ein ähnliches "Schicksal" wie die FHSS-Technik haben auch die Infrarot-WLANs erfahren, die, für einen Spektralbereich von 850 nm bis 950 nm spezifiziert, Übertragungsraten von 1 Mbit/s bei (BPSK) und 2 Mbit/s (QPSK) erzielen können: IR wird im Bereich der WLANs kaum mehr eingesetzt [KK02]. Der 1998 verabschiedete Standard IEEE 802.11b, auch als Wi-Fi (Wireless Fidelity) bezeichnet, erweitert mittels Komplementärcodeumtastung (CCK) die Datenrate der Luftschnittstelle auf 5,5 Mbit/s und 11 Mbit/s [Stü02]. Ebenfalls 1998 wurde in den Standard IEEE 802.11a das technisch aufwändige Modulationsverfahren OFDM aufgenommen. Dieses bildet die Basis für einen 5 GHz-Standard mit Datenraten von 6 Mbit/s bis 54 Mbit/s. Allerdings ist der 5 GHz-Frequenzbereich nicht als ISM-Band ausgewiesen: Daher fehlt es an einheitlichen Spezifikationen, zumal deren Definition dadurch erschwert ist, dass sich in diesem Frequenzspektrum Dienste wie ziviles Luftraumüberwachungsradar, aber auch militärische Anwendungen finden.

An die IEEE 802.11a-Spezifikationen anknüpfend, eignet sich der europäische ETSI-Standard *High-Perfomance Radio LAN (HIPERLAN)* das OFDM-Verfahren für die Spezifikation der Bitübertragungsschicht (physikalische Ebene) an. Nachdem sich der ETSI-Standard HIPERLAN/1 (1996 verabschiedet) nicht durchsetzen konnte, ist derzeit noch fraglich, inwiefern der Nachfolgestandard HIPERLAN/2 (im Jahr 2000 verabschiedet) sich auf dem Markt für Drahtlosvernetzung durchsetzen wird. Ein zu HIPERLAN/1 sehr ähnliches Schicksal hat sich beim Konsortium HomeRF ergeben: Die Arbeitsgruppe zur Entwicklung dieses Radio-LAN Standards, der als Mix aus DECT-Telefonie und IEEE 802.11-WLAN-Standard insbesondere für drahtlose Netzwerke zur asynchronen Daten- und synchronen Sprachübertragung in Privathaushalten und kleinen Büros entwickelt worden ist, ist trotz der Verfügbarkeit erster Halbleiter-Prototypen im Jahre 2003 aufgelöst worden.

Der Einsatz heutiger WLAN-Systeme für drahtlose Feldbusse, wie sie für die Automation und Robotik interessant sind, ist in [WMW05] diskutiert. Dort wird auf die Notwendigkeit verwiesen, in Feldbussystemen häufig nur Kurzpakete, d. h. Pakete mit wenigen Nutzdaten (Payload), übertragen zu müssen. Gerade aber dann reduzieren sich die möglichen Datenraten z. T. erheblich aufgrund des für die einzelnen Datenpakete erforderlichen Protokoll-Overheads (z. B. "Lernsequenzen" zu Beginn der Übertragung, CSMA/CA-Protokoll) – für den dominierenden Standard IEEE 802.11 sind entsprechende Werte in Tabelle 3.4 gesondert aufgeführt.

3.3.3 WPAN

Für die Durchsetzung von drahtlosen *Personal Area Netzwerken* sind eine einfache Implementierung und eine erschwingliche Technologie verantwortlich. Primär als Kabelersatz zur Verbindung der verschiedensten Komponenten wie PCs, PDAs, Handys, Pagern, Kopfhörern, Druckern aber auch Sensoren dienend, bilden WPANs *kleine Kommunikationsnetzwerke* im unmittelbaren (persönlichen) *Nahbereich*. Neben ihren *niedrigen Kosten* zeichnen sie sich aufgrund der *kurzen Kommunikationsreichweite* durch eine *geringe Leis-* *tungsaufnahme* aus. Diese Kenndaten machen die räumlich begrenzten Drahtlosnetzwerke für den Einsatz in einer Mikromanipulationsstation, die aufgrund ihrer Gestaltung ebenfalls räumlich überschaubar bleibt, sehr interessant.

Zahlreiche WPAN-Lösungen sind verfügbar, jede mit individuellen Stärken und Schwächen versehen (Tabelle 3.5). Je nach Aufgabengebiet ist die geeignete Technologie auszuwählen. Gegenwärtig wird die Realisierung von WPANs durch die drei Standards Bluetooth, IEEE 802.15 und IrDA wesentlich bestimmt – letztgenannter Standard ist nicht den Funksystemen sondern den optischen Übertragungssystemen zuzuordnen und wird gesondert in KAPITEL 3.4.7 behandelt. Die proprietären WPAN-Lösungen *nanoNET* der Firma *Nanotron* [Nan05] oder die Cypress-Entwicklung *WirelessUSB* [Woo06] sind wegen ihrer interessanten Technologiekonzepte hier zwar benannt, werden jedoch u. a. wegen möglicher Lizenzierungsgebühren nicht weiter betrachtet.

	Bluetooth	IEEE 802.15.4	Cypress WirelessUSB	nanoNET	IrDA
Frequenzband	2,4 GHz ISM (2,402–2,48 GHz)	2,4 GHz ISM; 868/915 MHz (EU/USA)	2,4 GHz ISM (2,4–2,483 GHz)	2,4 GHz ISM (2,402–2,481 GHz)	850 nm – 950 nm
Modulation	FHSS [QPSK, DQPSK (2.0 EDR)]	DSSS [QPSK (2,4 GHz), BPSK (868/915 MHz)]	DSSS (mit PN- Codierung / GFSK)	MDMA/CSS	IM/DD [OOK, PPM, HHH(1,13)]
Kanalbreite	1 MHz	5 MHz (nur für 2,4 GHz, sonst 2 MHz)	1 MHz	80 MHz	-
Kanalanzahl	79	16 (2,4 GHz) 1 (868 MHz) 10 (915 MHz)	79	1 oder 2	1
Maximale Sendeleistung	1 / 2,5 / 100 mW	100 mW	k. A.	10 mW	500 mW/sr ("Eye-Safety")
Zugangsart	TDMA/TDD	TDMA/TDD	TDMA/TDD	CSMA/CA, TDMA, Aloha	Master Slave TDMA, CSMA/CA
LOS-Reichweite (Sichtkontakt)	10 m / 50 m / 100 m	0,1 m – 10 m	10 m (50 m geplant)	900 m (im Gebäude 60 m)	1 m (3 m möglich)
Maximale Bandbreite (brutto/netto)	1 Mbps / (723 kbps + 57,6 kbps); [EDR: 3 Mbps/2,167 Mbps]	250 kbps (2,4 GHz) 20 kbps (868 MHz) 40 kbps (915 MHz)	62,5 kbps - 250 kbps; 1Mbps (GFSK)	2 Mbps / Ø 1,5 Mbps	115,2 kbps; 0,576-1,152 Mbps; 4 Mbps; 16 Mbps
Anwendung	Handy, PDA, HID	Sensor-, Aktor- Vernetzung; Alarm- systeme	HID (Human Interface Device)	Sensor-, Aktor- Vernetzung, RFID	Vernetzung (SOHO)
Standardisierer / Anbieter	IEEE 802.15.1; Bluetooth SIG	IEEE; ZigBee Alliance	Cypress (proprietär)	Nanotron (proprietär)	IrDA

Tabelle 3.5: Überblick über verschiedene WPAN-Realisierungen

3.3.3.1 Bluetooth

Bluetooth, kurz BT, definiert eine Funkverbindung im 2,4 GHz- ISM-Band von mobilen Geräten (Handy, PDA, etc.) untereinander und die kabellose Anbindung von Peripherie an einen PC. Die Vorentwicklungen des Bluetooth¹-Standards durch den Mobiltelefonhersteller Ericsson gehen bis auf das Jahr 1994 zurück. Zu Beginn des Jahres 1998 wurde die sog. *Bluetooth Special Interest Group (SIG)* von den Firmen Ericsson, IBM, Intel, Nokia und Toshiba gegründet, um eine Spezifikation für eine kostengünstige drahtlose Kommunikationsschnittstelle zu definieren. 1999 wurde die Versionsspezifikation 1.0 von der Bluetooth Organisation, die mittlerweile über 2000 Mitglieder zählt, veröffentlicht. Seit Februar 2001 galt der BT-Standard 1.1 [Blu01], der auch die Grundlage für den Standard IEEE 802.15.1 (Bluetooth WPAN) bildete (siehe hierzu auch nachfolgendes Kapitel 3.3.3.2). Bis zur Verabschiedung der Spezifikation 2.0+EDR (*Enhanced Data Rate*) im November 2004 wurde BT 1.1 neben verbesserten Verbindungstechniken vor allem um neue BT-Profile, als Nahtstelle zwischen der BT-Hardware und der eigentlichen Applikation, ergänzt [Blu03].

Im Gegensatz zum optischen WPAN-Pendant IrDA (vgl. Kapitel 3.4 bzw. 3.4.7) ist für Bluetooth keine direkte Sichtverbindung zwischen den Geräten erforderlich. Die Funk-

¹ Im Folgenden auch mit BT abgekürzt

technologie erlaubt die Kommunikation durch physikalische Barrieren hindurch. Die Reichweite ist dabei neben Art der Hindernisse und gewählter Funkklasse (vgl. Tabelle 3.6) von der Empfindlichkeit des Funkempfängers abhängig; diese ist auf -70 dBm bei einer Bitfehlerrate (BER) von 10⁻³ festgelegt [Mul00], [Blu03].

Basierend auf einem Frequenzsprungverfahren mit Codemultiplexzugriff (FH-CDMA) arbeitet BT im ISM-Band bei 2,402 GHz bis 2,48 GHz [Haa00]. Als Modulation wird GFSK

Sendeleistung	Reichweite*
100 mW (20 dBm)	0,01 m – 100 m
2,5 mW (4 dBm)	0,01 m – 20 m
1 mW (0 dBm)	0,01 m – 10 m
	Sendeleistung 100 mW (20 dBm) 2,5 mW (4 dBm) 1 mW (0 dBm)

Tabelle 3.6: Bluetooth-Funkklassen

mit einem Modulationsindex von 0,28 bis 0,35 eingesetzt. Für die Frequenzsprünge stehen 79 Trägerfrequenzen mit 1 MHz Abstand zur Verfügung, die entsprechend einer Pseudo-Zufallsfolge durchlaufen werden. Bei einer Verweildauer (Zeitslot) von 625 µs ergeben sich pro Sekunde bis zu 1600 Frequenzsprünge. Durch

die Frequenzsprünge und kurzen Zeitslots bzw. Datenpakete sollen Interferenzen und Störungen auch für stark gestörte Funkumgebungen (WLAN IEEE 802.11, Mikrowellengeräte) vermieden werden – in Japan, Frankreich und Spanien gelten wegen differenter Freguenzbandvergabe abweichende Frequenzen und Sprungfolgen.

Ein Datenpaket (Daten und Steuersignale einschließlich 3-Bit-MAC-Adresse) ist mindestens einen Slot lang, kann sich aber auch auf bis zu fünf Slots ausdehnen. Für die Fehlerkorrektur wird eine 1/3- oder 2/3-Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC) implementiert, um den Nachrichtenkopf (*Header*) des Datenpakets grundsätzlich vor Zerstörung zu schützen. Zusätzlich wird auf CRC-Verfahren zurückgegriffen und eine Automatische Wiederholanfrage (ARQ) für die direkte Empfangsquittierung im nachfolgenden Slot eingesetzt. Die Übertragung erfolgt mit einem kombinierten Frequenzsprung-/Zeitduplexverfahren (kurz FH/TDD) und arbeitet mit Übertragungskanälen (sog. Links), die entweder synchron verbindungsorientiert (SCO) oder asynchron verbindungslos (ACL) verwaltet werden [Blu03].

Zwei oder mehr Bluetooth-Geräte können selbst organisiert ein sog. *Piconetz* bilden, ein räumlich sehr kleines Ad-hoc-Netzwerk, das maximal aus acht Geräten bestehen kann



Bild 3.4: Punkt-zu-Punkt-, Punkt-zu-Multipunkt- und Scatternetz-Modus

(Bild 3.4). Jedes Mitglied eines Piconetzes kann direkt mit den anderen Teilnehmern kommunizieren. Der Initiator der ersten Verbindung übernimmt dabei eine Masterfunktion für die Kommunikation, die anderen (maximal sieben) Geräte arbeiten als aktive Slaves – zusätzlich können bis zu 255 passive Slaves in diversen Standby-Modi eingebucht sein. Der Master, der mittels eines Zufallsgenerators die Frequenzsprung-Abfolge bestimmt, verwaltet die 48-Bit-Adressen der Teilnehmer und versendet Signale (u. a. Frequenzsprung-Muster) für die Synchronisierung und Regelung des Kanalzugriffs. Da jedes Piconetz ein anderes Frequenzsprung-Muster verwendet,

können auch mehrere Piconetze nebeneinander in denselben oder in überlappenden Versorgungsbereichen existieren. Sind Netzwerke mit mehr als acht Geräten gleichzeitig erforderlich, lassen sich mehrere Piconetze (maximal zehn) in einem sog. *Scatternetz* kombinieren. Allerdings erlaubt eine Scatternetz-Konfiguration keine direkte Kommunikation zwischen allen Teilnehmern. Lediglich die Teilnehmer innerhalb eines Piconetzes sind zur Kommunikation untereinander befähigt. Jedoch können sowohl der Master als auch die Slaves auf Basis eines Zeitmultiplexschemas an bis zu vier verschiedenen Piconetzen teilnehmen – der Master eines Piconetzes kann in einem anderen auch Slave sein, respektive auch der Slave als Master fungieren.

Bis zu drei Sprachkanäle mit 64 kbit/s lassen sich bei synchroner Übertragung gleichzeitig in einem Piconetz betreiben, weiterhin unterstützt Bluetooth asynchrone Datenkanäle (bis zu sieben je Piconetz) und auch Kombinationen von asynchronem Datenkanal und
synchronem Sprachkanal (Bild 3.5). Gemäß Bluetooth 1.1 oder 1.2 wird nach jedem Frequenzsprung ein Datenpaket mit 1 Mbit/s Symbolrate übertragen. Für den asynchronen



Bild 3.5: Synchrone und asynchrone Bluetooth-Kommunikation

Datenkanal ergibt sich bei symmetrischer Übertragung eine Nettodatenrate von 432,6 kbit/s in beide Richtungen, im asymmetrischen Modus sind bis zu 723,2 kbit/s im *Downstream* und 57,6 kbit/s für den *Upstream*-Kanal spezifiziert. Bei Verwendung des BT-Standards 2.0+EDR mit *Enhanced Data Rate* (EDR) und einem verbesserten Modulationsverfahren (π /4-DQPSK) kann die Bruttosymbolrate auf 3 Mbit/s erhöht werden, sodass netto je nach EDR-Modus zwischen

1446,4 kbit/s und 2169,6 kbit/s übertragen werden können. Diese maximalen Nettodatenraten setzen jedoch voraus, dass das Bluetooth-Gerät ausschließlich in einem Piconetz aktiv ist. Im Falle der gleichzeitigen Mitgliedschaft in zwei Piconetzen (*Scatternetz*) reduziert sich die Netto-Datenrate erheblich.

Bluetooth unterstützt auf Netzwerkebene neben den dezentral organisierten Ad-hoc-Netzwerken Punkt-zu-Punkt- und Punkt-zu-Multipunkt-Verbindungen (Bild 3.4). Im Punktzu-Punkt-Modus wird ein Master ausschließlich mit einem Slave synchron und leitungsorientiert verbunden, wie es z. B. für Telefoniedienste erforderlich ist – die Information wird auch dann in reservierten Slots übertragen, wenn keine Nutzdaten vorhanden sind (z. B. bei Schweigen beider Gesprächspartner). Die asynchrone verbindungslose Punkt-zu-Multipunkt-Verbindung verlinkt den Master mit einem oder mehreren Slaves. Asynchroner und synchroner Modus lassen sich auch kombinieren, sodass Sprache einerseits synchron in reservierten Slots (Punkt-zu-Punkt-Verbindung) und Daten andererseits zwischen Master und jedem anderen Slave asynchron übertragen werden können.

Neben verschiedenen Verschlüsselungsstufen zur Datenabsicherung der Luftschnittstelle sind für BT-Module drei verschiedene Strom sparende Betriebszustände spezifiziert: *Hold*, *Park* und *Standby*. Der Strombedarf beträgt bei den beiden erstgenannten Betriebsarten nur 50 µA, für den Standby-Modus sind 300 µA vorgesehen. Für weitere Angaben wird auf [Mul00] und [Blu03] verwiesen.

Bevor ein Piconetz aufgebaut wird, überprüft ein BT-Gerät alle 1,28 s den ihm zugewiesen Funkraum auf Nachrichten anderer BT-Geräte, d. h. alle 1,28 s "wacht" das Gerät auf.

Ereignis	Bluetooth	ZigBee™
Enumeration (neuer Slave)	3 s	30 ms
Slave-Aktivierung (aus Sleeping-Modus)	Typ. 3 s	Typ. 15 ms
Kanalzugriff (aktiver Slave)	Typ. 2 ms	Typ. 15 ms

Tabelle 3.7: Timingvergleich der WPAN-Standards Bluetooth und ZigBee [Zig02] Initiiert ein Gerät den Aufbau eines Piconetzes und ist die Empfänger-Adresse des Slaves bekannt, so genügt dem Master ein sog. Page-Ruf: Ein Page-Signal wird auf den ersten 16 der einem Slave zugewiesenen 32 Sprungfrequenzen gesendet; hiernach anschließend wird bis zu 2,56 s auf die Slave-Antwort gewartet – durchschnittlich sollten 0,64 s verstreichen [ZivO3]. In Tabelle 3.7 sind die wesentlichen Verzögerungszeiten von Bluetooth im direk-

ten Vergleich zur aus dem IEEE 802.15.4-Standard abgeleiteten Technologie ZigBee (Kapitel 3.3.3.2) zusammengefasst.

Um Bluetooth in eingebetteten Systemen wie z. B. Miniaturrobotern einzusetzen, ist im Sinne einer leichteren Anpassung eine Kombination aus fertigem Funkmodul mit integriertem Host-Controller, auf dem das Protokoll implementiert wird, empfohlen. Hierzu sind 32-Bit- bzw. leistungsfähige 16-Bit-CPUs notwendig; der Code für den Protokollstack benötigt in vereinfachter Ausführung mindestens 40 kByte [Lat00], nicht selten werden aber ca. 250 kByte veranschlagt [Hei03a].

3.3.3.2 IEEE 802.15

Im Jahre 1999 wurde die IEEE802.15-Arbeitsgruppe als Teil des für LAN und MAN zuständigen Standardisierungskomitees ins Leben gerufen, mit dem Ziel, einen Standard für drahtlose Kurzbereichsnetzwerke oder WPANs zu entwickeln. Mit Kurzstrecken-Funktechniken besteht die Möglichkeit, Kabelverbindungen zu ersetzen oder aber Kommunikationsschnittstellen zu implementieren, wenn aufgrund inkompatibler mechanischer Anschlüsse eine direkte Verbindung zwischen unterschiedlichen Geräten nicht möglich ist.

Vier Sonderkommissionen sind seit 1999 einberufen worden, die jeweils an bestimmten Komponenten der Spezifikation 802.15 arbeiten. Die *802.15 WPAN Task Group1*, kurz TG1, hat den auf der Bluetooth-Spezifikation 1.1 basierenden WPAN Standard 802.15.1 entwickelt. Hierzu hat der IEEE die Technologie der Bluetooth SIG lizenziert. Der Standard definiert entsprechend der Bluetooth-Spezifikation, unter Beachtung der Erfordernisse für die Koexistenz mit Geräten des WLAN-Standards 802.11, sowohl Medien-Zugriffssteuerung (MAC) als auch Bitübertragungsschicht (PHY) für portable oder fest installierte Geräte im "Persönlichen Nahbereich". Zusätzlich bedient sich der IEEE-Standard u. a. der Bluetooth-Spezifikationen für Basisband, *Link Manager* und *Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)* (Bild 3.6). Für weitere Erläuterung wird auf [GGW03] verwiesen.



Bild 3.6: Zusammenhang zwischen ISO-OSI-Schichtenmodell (bzw. IEEE 802-Standard), Bluetooth, ZigBee und den zugehörigen WPAN-Standards IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 ([GGW03], mod.)

Die Arbeitsgruppe WPAN TG2 (IEEE 802.15.2) ist für die Entwicklung geeigneter Techniken verantwortlich, die eine Koexistenz zwischen WPAN 802.15 und WLAN 802.11 vereinfachen oder gar erst ermöglichen. Diese Aufgabe umfasst auch die Erstellung von Koexistenzmodellen zur Quantifizierung der gegenseitigen Beeinflussung. Die *WPAN Task Group3* (TG3) arbeitet am WPAN-Standard IEEE 802.15.3 für hohe Datenraten (20 Mbit/s oder höher) bei möglichst geringem Energieverbrauch und niedrigen Kosten und zielt damit auf die Anforderungen zukünftiger portabler Konsumelektronikprodukte (Digital-Photographie, Multimediaapplikationen) ab. Der WPAN-Standard IEEE 802.15.4 schließlich definiert drahtlose Kommunikationsmethoden für niedrige Datenraten von ca. 250 kbit/s bei geringer Komplexität [IEEE03]. Auf international unlizenzierten Frequenzbändern operierend, ist 802.15.4 insbesondere für Sensornetzwerke, Hausautomation und Fernsteuerungen ausgelegt [Mal03].

IEEE 802.15.3 und IEEE 802.15.3a

IEEE 802.15.3 sieht, abhängig von der etwaigen Anwesenheit von 802.11b-Funksystemen, drei bzw. vier Kanäle mit jeweils 15 MHz Bandbreite im Frequenzbereich zwischen 2,4 GHz und 2,4835 GHz vor. Mit Trellis-Code-Modulation (TCM) und QPSK bzw. QAM werden mit einem Einkanalträger mehrere selektierbare Datenraten, von 11 Mbit/s bis 55 Mbit/s reichend, angestrebt. Da der Standard bisher noch nicht verabschiedet ist, wird für weitere Details wie z. B. PHY, MAC oder Netztopologie auf [GGW03] verwiesen.

Mit dem Ziel, durch alternative Definitionen von PHY und MAC noch höhere Übertragungsraten von 100 Mbit/s über 10 m Entfernung bis hin zu 480 Mbit/s für Kurzstreckenfunk bei 2 m Distanz zu erzielen, hat sich aus der ursprünglichen TG3 die Arbeitsgruppe IEEE 802.15.3a etabliert: Die Begriffe *Wireless USB* – nicht zu verwechseln mit der proprietären Cypress-Entwicklung *WirelessUSB* aus Tabelle 3.5 – und *Wireless 1394* (drahtloses



Bild 3.7: Qualitativer Vergleich der Leistungsdichtesprektren von Schmalbandsystemen und UWB-Technik ([Nek05], mod.)

FireWire™) sind hier die Schlagworte. Hierzu setzt die Arbeitsgruppe für die Bitübertragungsschicht auf die Ultra-Breitband-Technologie *Ultra Wideband* (UWB) im Frequenzbereich von 3,1 GHz bis 10,6 GHz (Bild 3.7). Bei UWB werden hohe Datenraten bei gleichzeitig niedriger spektraler Leistungsdichte durch die Modulation mit extrem kurzen Pulsen erzielt (Bild 3.7 rechts oben). Die kurze Dauer der UWB-Pulse spreizt ihre Energie über einen sehr breiten Frequenzbereich bei niedriger Leistung je MHz. Diese Spreizung soll UWB-Signale dazu befähigen, einerseits das Frequenzspekt-

rum mit bereits existierenden Funksystemen zu teilen und andererseits, aufgrund der geringen spektralen Energiedichte unterhalb des Grundrauschens typischer Schmalbandempfänger, teure Lizenzgebühren für die Nutzung des Frequenzbereiches zu vermeiden.

UWB-Kommunikation scheint eine viel versprechende Lösung für das zunehmend überfüllte Frequenzspektrum zu sein, jedoch kann eine Überlagerung energiearmer, breitbandiger Signale zu einem Anstieg an Störsignalen und Interferenzen für existierende Schmalbandsysteme führen. Denn trotz niedriger UWB-Signalpegel besteht bei Einsatz einer Vielzahl von UWB-Geräten die Gefahr der Rauschpegelanhebung bis auf ein störendes Maß für insbesondere sicherheitsrelevante Funksysteme, die dicht am natürlichen Rauschpegel arbeiten (z. B. Flugradar, Satellitensysteme). Studien der britischen Regulierungsbehörde OFCOM zeigen Ausfälle einiger Dienste wie DVB-T und Bluetooth, da der Rauschpegel in den überlagerten Frequenzbändern zu stark angehoben wird [Bar05]. Die Federal Communications Commission (FCC) schreibt deshalb (zumindest für die USA) eine minimale Bandbreite von 500 MHz und eine maximale spektrale Leistungsdichte von -41,3 dBm (75 nW) je MHz vor. Jedoch sorgen diese niedrigen Pegel beispielsweise dafür, dass in Anwesenheit eines WLAN-Systems UWB-Kommunikation in einem Umkreis bis zu 10 m kaum mehr möglich ist [Nek05] – dies gilt sowohl für 2,4-GHz-WLAN (IEEE 802.11b) als auch für das 5-GHz-Band (IEEE 802.11a); umgekehrt wird die Reichweite dieser WLAN-Systeme z. T. erheblich durch UWB-Interferenzen beeinflusst [Nek05].

	WiMedia Alliance	UWB Forum
Normen / Standards	ECMA 368/369 (zuvor IEEE 802.15.3.a)	IEEE 802.15.3a
Spektrum in GHz	3,1 – 10,6	3,1 – 10,6
Modulation	OFDM	DSSS
Kanalanzahl / Ka- nalbreite	14 / 528 MHz	12 / 1,313 GHz – 2,73 GHz
Max. effektive Sen- deleistung	-41,3 dBm/MHz 75 nW/MHz	-41,3 dBm/MHz 75 nW/MHz
Reichweite (bei Sicht)	10 m	10 m
Max. Übertragungs- geschwindigkeit	480 Mbit/s	1320 Mbit/s
Anwendung	WPAN, PC-Peripherie	Unterhaltungs- elektronik

Um die Störeinflüsse durch UWB-Technologien möglichst gering zu halten, diskutierte die Arbeitsgruppe IEEE 802.15.3a zwei Standardisierungsvorschläge mit den Modulations-

verfahren OFDM bzw. DSSS. Aus diesen Überlegungen resultieren zwei große Firmenkonsortien: einerseits die WiMedia Alliance [Wim06] mit vornehmlicher Ausrichtung auf die Peripherieanbindung am PC und anderseits das UWB Forum [UWB06], das sich vor allem auf die drahtlose Verbindung von Konsumelektronik (Set-Top Boxen, Digitale Camcorder, TV) konzentriert - die wesentlichen technischen Parameter sind in Tabelle 3.8 angegeben [Ziv05]. Da sich beide Konsortien bis zum heutigen Tag unversöhnlich gegenüberstehen, wurde zu Beginn des Jahres 2006 die Auflösung der Arbeitsgruppe IE-

Tabelle 3.8: Eckwerte der zwei dominierenden UWB-Realisierungen

EE 802.15.3a beantragt. Daher bleibt bzgl. der UWB-Technik abzuwarten, welches Verfahren sich letztendlich durchsetzen wird.

IEEE 802.15.4 – ZigBee

Der im Oktober 2003 fertig gestellte Standard IEEE 802.15.4 spezifiziert sowohl PHY als auch MAC für ein mit sehr geringen Datenraten kommunizierendes, äußerst energiesparsames WPAN (Low-Rate WPAN), das eine bidirektionale Kommunikation innerhalb eines Drahtlosnetzwerkes, bestehend aus Sensoren, Aktoren und Kontrollgeräten, erlaubt [IEEE03]. Im Gegensatz zu Bluetooth und IEEE 802.15.1 ist LR-WPAN für statische Netzwerke optimiert, in denen zahlreiche Geräte jeweils nur recht selten kleine Datenpakete übersenden.

In Stern-Topologie oder als vermaschtes Netz (Peer-to-Peer- oder Cluster-Netzwerk) aufgebaut, sind aufgrund der 16-bit-ID bis über 65.000 Teilnehmer gleichzeitig möglich

Frequenzband	Abdeckung	Datenrate	Kanäle
2,4 GHz ISM	Weltweit	250 kbit/s	16
868 MHz ISM	Europa	20 kbit/s	1
915 MHz ISM	Amerika	40 kbit/s	10

Tabelle 3.9: Frequenzen und Datenraten für LR-WPAN bzw. ZigBee [GNC+01]. Neben dem 2,4GHz-ISM-Band ist LR-WPAN auch für das ISM-Band um 900 MHz, genauer 868 MHz in Europa und 915 MHz für Nordamerika, spezifiziert. Als Modulationsverfahren setzt IE-EE 802.15.4 im Sinne einer hohen Störfestigkeit bei gleichzeitig einfacherer Analog-

elektronik auf DSSS. Die maximale Datenrate beträgt 250 kbit/s für einen einzelnen Kanal innerhalb des 2,4-GHz-Bandes, insgesamt 16 dieser Kanäle stehen für dieses Frequenzband zur Verfügung. Entsprechende Angaben über Kanalanzahl und Bruttodatenraten für die Frequenzen 868 MHz bzw. 915 MHz sind der Tabelle 3.9 zu entnehmen. Die Angaben über die Datenrate sind allerdings mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten: Wegen verschiedener Systemparameter, insbesondere aber aufgrund des genutzten MAC-Protokolls betragen die realen Datenraten nur etwa die Hälfte der Nominalwerte, wobei je nach Operationsmodus noch niedrigere Datenraten (38–70 kbit/s) keine Seltenheit sind [WMW05]. Ähnlich wie Bluetooth, arbeitet LR-WPAN mit niedriger Sendeleistung (-3 dBm bis 10 dBm, typ. 0 dBm), nutzt aber zusätzlich sehr kurze Symbolraten (bis zu 62.500 Symbole/s), wodurch dem für Industrieanlagen typischen Problem der Signalzeitdispersion besser begegnet werden kann.

Der LR-WPAN-Protokollstack weist eine im Vergleich zu BT wesentlich geringere Komplexität auf [Lat04]. Die ZigBee Alliance, einem ersten Firmenkonsortium, das auf Basis des



Bild 3.8: Kommunikationsschnittstellen des Miniaturroboters Alice ([CES02],[CS05], mod.):
a) Infrarot (lokal und Fernbedienung), b) ZigBee, c) 868MHz-RF, d) 433MHz-RF.

LR-WPAN-Protokollstacks zusätzlich bis zur Applikationsebene die höheren Schichten des ISO-Referenzmodells spezifiziert, geht von einer Codegröße von ca. 28 kByte (zum Vergleich Bluetooth mit bis zu 250 kByte) zur Umsetzung des ZigBee-Protokolls (Bild 3.6) aus [Hei03b]. Verbunden mit der Tatsache, dass die Wiederaufnahme der Funktionsfähigkeit aus dem Schlafmodus heraus wesentlich schneller vonstatten geht, und darüber hinaus der zusätzliche Paket-Overhead geringer ist, bietet sich LR-WPAN- bzw. ZigBee-Geräten bei der Übertragung ihrer kurzen Datenpakete erhebliches Energieeinsparpotential, allerdings auf Kosten der Datenrate. In Hinblick auf die Robotik scheint ZigBee

insbesondere für verteilt kooperierende Mikroroboter sehr interessant. So ist der Miniaturroboter *ALICE* beispielsweise mit ZigBee ausrüstbar, allerdings sieht man am Beispiel dieses Roboters sehr deutlich (Bild 3.8), dass für bisherige Funklösungen noch erheblicher Platzbedarf besteht, um einerseits die Umsetzung des Kommunikationsprotokolls und andererseits die Anbindung an den Roboter-Hauptprozessor zu erreichen.

3.3.4 Nachteile der Funksysteme (WLAN, WPAN, UWB)

Durch Reflexionen bedingte Mehrwegausbreitung führt u. a. zu *Delay Spread* (Zeitdispersion) und zu (*Multipath-)Fading*, d. h. zeitlicher Variation der Signalstärke im Kommunikationskanal [TV05]: Phasenversetzt eintreffende Wellen verursachen eine ständige Änderung der Empfangspegel. So wurde in der Studie SFB425 der Uni Karlsruhe zur Wellenausbreitung bei 2,4 GHz, d. h. innerhalb des z. B. für WLAN, ZigBee oder Bluetooth spezifizierten ISM-Frequenzbandes, bei einer messtechnischen Ortsauflösung von nur 1 cm aufgezeigt, dass z. T. bereits Pegeländerungen von bis zu 40 dB festzustellen sind [Fat04]. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf den Mikro- bzw. Nanometerbereich, wie er für drahtlose, mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstationen gefordert wird, verdeutlich die Problematik: Trotz stark differierender ortsabhängiger Signalpegel (*small-scale fading*) muss eine zuverlässige Kommunikation zwischen Steuerungseinheit und Roboter gewährleistet sein, selbst wenn der Mikroroboter mit Nanometerschrittweite in einem "Funkloch" agieren soll. Zusätzlich ist zu bedenken, dass bei Mikromanipulationsstationen die durch Resonanzen entstehenden Interferenzmuster durch (metallische) Klima- oder REM-Kammern begünstigt werden können.

Allen Funksystemen gemein ist die Notwendigkeit einer Antenne zur Übertragung des modulierten Signals. Die räumliche Ausdehnung der passiven Antennen nimmt mit steigender Trägerfrequenz ab – eine λ /4-Antenne beispielsweise, für die im 433-MHz-ISM-Band noch eine Länge von ca. 17,32 cm benötigt wird, kann für das 2,4-GHz-Band bereits auf 3,12 cm verkürzt werden. In Hinblick auf den Platzbedarf spricht dies für Funkkommunikationssysteme mit möglichst hoher Trägerfrequenz. Jedoch steigt mit zunehmender Frequenz auch der Energiebedarf der benötigten elektronischen Komponenten erheblich an, z. B. für Mischer, Oszillatoren, PLLs oder in SC-Technologie aufgebaute rauscharme Verstärker (LNAs): In [RAK+02] wird beschrieben, dass der Leistungsbedarf einer Schaltung, der bei 170 MHz Trägerfrequenz nur ca. 100 μ W beträgt, bei einer Anpassung an das 2,4 GHz-ISM-Band auf über 100 mW (bei gleich bleibender niedriger Datenrate) ansteigt – es sei angemerkt, dass sich diese Werte auf einen Empfänger (!) beziehen, der energetische Mehraufwand für den zugehörigen Sender liegt naturgemäß noch darüber.

Nicht nur dieses Beispiel zeigt auf, dass für ein mikroroboterfreundliches Kommunikationssystem immer ein Kompromiss zwischen dem Modulationsverfahren und der Übertragungsrate einerseits und dem Energie- und Platzbedarf (für Antenne bzw. externe induktive und/oder kapazitive Anpasskomponenten) andererseits bei der jeweiligen Trägerfrequenz zu finden ist. WLAN-Systeme mit hoher Übertragungsrate sind für eine hohe Sendeleistung zwischen 100 mW und 1 W konzipiert. Während Makroroboter und größere Mesoskalaroboter den aus Sendeleistung und Modulationsverfahren resultierenden, hohen Energiebedarf abdecken könnten, stellt dieser für kleinste autarke Mikroroboter bzw. deren Energiequellen eine derzeit nicht zu überwindende Hürde dar.

WPAN-Kommunikationssysteme, wie z. B. Bluetooth oder ZigBee, bieten hier zwar erhebliches Energieeinsparpotential, allerdings zu Lasten der Übertragungsrate. Im Übrigen ist bei diesen Standards das hohe Energieeinsparpotential z. T. dadurch begründet, dass die Kommunikationspartner paketorientiert, mit kurzen Datenpaketen miteinander in Beziehung stehen, die meiste Zeit die energiesparenden Hold, Idle- oder Standby-Modi nutzen können und nur selten aus ihrem "Schlaf" erwachen müssen [GNC+01], [Hei03b].

Die UWB-Technologie mit ihren hohen Übertragungsraten könnte für zukünftige Roboterkommunikationssysteme ein interessantes Einsatzgebiet darstellen. Allerdings können sich die führenden Technologiefirmen bis heute nicht auf einen einheitlichen Standard (z. B. IEEE 802.15.3) verständigen. Weiterhin bleibt abzuwarten, inwiefern die hohen Trägerfrequenzen von 3,1 GHz bis 10,6 GHz die Energiebilanz entsprechend dem Beispiel aus [RAK+02] konterkarieren und dadurch den Einsatz für kleinste Miniaturroboter ohne Lösung des Energiedilemmas erschweren oder gar unmöglich machen. Darüber hinaus sind mittlerweile Bestrebungen der nationalen und internationalen Zulassungsbehörden zu erkennen, diese "extremen" Breitbandfunker aufgrund von Überschneidungen mit bereits bestehenden Funksystemen und dem damit einhergehendem Störpotential zu reglementieren. Dies in Verbindung mit dem aufgrund der hohen Frequenzen recht großen Energiebedarf führt zum Ausschluss des Verfahrens im Hinblick auf die aktuelle Entwicklung eines Kommunikationssystems für eine mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstation.

3.4 Drahtlose Infrarot-Kommunikation

Optische Kommunikation beschreibt die Übertragung von Daten bei optischen Wellenlängen. Dies gilt sowohl für die terrestrische Datenübertragung mittels Glasfaserkabel als auch für die in ihrer Entwicklung noch jüngere optische Freiraumkommunikation. Der genutzte Wellenlängenbereich reicht vom sichtbaren Licht bis in den Infrarotbereich, wobei auf Infrarotlicht insbesondere bei der drahtlosen Übertragung zurückgegriffen wird. Das erste Innenraumkommunikationssystem wurde bereits 1979 entwickelt [GB79]. Seither hat die drahtlose IR-Kommunikation in zahlreichen Anwendungsbereichen Einzug gefunden, sei es bei Fernbedienungen, LANs oder in der Intersatellitenkommunikation.

Im Gegensatz zu Funksystemen, die aufgrund eingeschränkt nutzbarer Frequenzspektren und Interferenzen nur begrenzte Bandbreiten unterstützen (vgl. die Kapitel zuvor), können optische Übertragungsverfahren drahtlose Kommunikationsverbindungen mit sehr hohen Datenraten (bis zu einigen Gbit/s) realisieren [SJST02]. Das lizenzfreie optische Spektrum erlaubt die Entwicklung global einsetzbarer Produkte, da, abgesehen von Vorschriften zum Schutz des Augenlichts ("Eye-Saftey") oder der Haut, keine weiteren (länderspezifischen) Vorschriften existieren.

Infrarotlicht lässt sich anhand der Wellenlänge in vier Kategorien einteilen: Nahes (780 nm–3 µm), mittleres (3 µm–6 µm), fernes (6 µm–15 µm) und extrem fernes Infrarotlicht (15 µm–1 mm). Durch dunkle Objekte wird IR-Licht absorbiert, durch helle Objekte diffus und an glänzenden Oberflächen kontrolliert gerichtet reflektiert. Derzeit findet in der drahtlosen Infrarotkommunikation insbesondere nahes Infrarotlicht im Bereich von 780 nm bis 950 nm Verwendung. Die Ursache liegt vor allem in den kostengünstig herzustellenden optoelektronischen Komponenten [KB97]: Dies gilt für Licht emittierende Dioden (LEDs) und Halbleiterlaserdioden (LDs) ebenso, wie für als IR-Empfänger eingesetzte Silizium-PIN-Dioden, die neben einer besonders hohen Quanteneffizienz im nahen Infrarotbereich eine niedrige elektrische Kapazität aufweisen.



Bild 3.9: Drahtloser Infrarot-Kommunikationskanal

Generell wird für die Datenübertragung einzelner Bits über einen physikalischen Kanal das Bit zunächst in ein Signal konvertiert, welches dann zuverlässig über den Kommunikationskanal transmittiert werden kann. Dieser Konvertierungsprozess ist der physikalischen Ebene (Bitübertragungsschicht) des Kommunikationssystems zugeordnet. Im Falle eines drahtlosen IR-Übertragungssystems (Bild 3.9) findet diese Konvertierung in zwei aufeinanderfolgenden Schritten statt: Die elektrische Modulation wandelt den zu übertragenden Bitstrom in eine elektrische Wellenform, die an die Eigenschaften des sich daran anschlie-Benden optischen Modulators angepasst ist. Der optische Modulator wandelt das elektrische Signal in ein Infrarotsignal um, welches über den optischen Übertragungskanal an den Receiver gesendet wird. Dort wird der Bitstrom über die konsekutiven Pendants Detektion und elektrische Demodulation zurück gewonnen.

3.4.1 Klassifikation optischer Verbindungen

Eine optische Verbindung zwischen Modulator und Detektor, auch als Link bezeichnet, wird entsprechend Bild 3.10 anhand von zwei unabhängigen Kriterien klassifiziert [KB97]: Zum einen unterscheidet man zwischen gerichteter und ungerichteter (indirekter) Verbindung, zum anderen wird der Übertragungskanal dahingehend beschrieben, ob eine direkte Sichtverbindung (*LOS, Line-Of-Sight*) vorliegt oder nicht (*Non-LOS, Non-Line-Of-Sight*).

Gerichtete Verbindungen erfordern Transmitter und Empfänger mit spezifischer Vorzugsrichtung für das Aussenden bzw. Empfangen der IR-Lichtwellen; sie sind entsprechend dieser Vorzugsrichtung zueinander auszurichten. Gerichtete Verbindungen zeichnen sich durch maximale Leistungseffizienz aus, da sie sowohl Dämpfungsverluste als auch den Empfang störenden Umgebungslichtes minimieren; allerdings reagieren diese Systeme sehr empfindlich auf Fehljustage. Ungerichtete Verbindungen umgehen die Ausrichtungsproblematik durch Transmitter und Receiver mit einem weitwinkligen Sichtbereich (FOV, *Field Of View*); sie sind leichter für den Benutzer einzurichten und daher auch für den Einsatz in mobilen Systemen interessant. Erweitern lässt sich FOV entweder durch Diffusionslinsen oder Matrixanordnungen von LEDs bzw. Photodetektoren. Im Falle unterschiedlicher Direktionalitätsgrade für Transmitter und Receiver spricht man von Hybridverbindungen.

Der LOS-Link, der den Fall einer direkten Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger beschreibt, zeichnet sich durch eine hohe Leistungseffizienz bei gleichzeitig sehr



Bild 3.10: Klassifikation optischer Verbindungen nach Direktionalität und Sichtbarkeit ([KB97], mod.)

geringem Mehrweg-Fading aus; Non-LOS-Links dagegen weisen neben einem einfacheren Gebrauch insbesondere eine hohe Robustheit auf, da Sichtbarrieren zwischen Transmitter und Receiver durch Reflexion des Infrarotlichtes z. B. an einer Decke oder an anderen diffus reflektierenden Oberflächen überwunden werden. Jedoch geht dies zu Lasten der Leistungsbilanz: Während beispielsweise ein 100-Mbit-LOS-System der British Telecom bereits mit einer durchschnittlichen optischen Leistung von nur 6 mW aus-

kommt, benötigt ein vergleichbares Non-LOS-System bei gleicher Datenrate eine durchschnittliche optische Leistung von 600 mW [KYD+98], [WK03].

Betrachtet man beide Klassifikationskriterien gemeinsam, so lässt sich feststellen, dass nichtgerichtete Non-LOS-Verbindungen, die als sog. diffuse Links bezeichnet werden, einfachste Benutzbarkeit und höchste Störunanfälligkeit gegenüber Abschattung aufweisen. Gerichtete LOS-Verbindungen erfordern dagegen die geringste Leistung und erlauben dabei gleichzeitig höhere Datenraten, da Mehrwegstörungen vernachlässigbar sind. Allgemein gilt, dass IR-Verbindungen immun gegen Mehrwegfading sind, allerdings führt die Mehrwegausbreitung zu Zeitdispersion. Diese wiederum führt ab einer Datenrate von ca. 10 Mbit/s¹ zu Intersymbolinterferenzen (ISI), die insbesondere bei diffusen Verbindungen erheblichen Negativeinfluss auf die Bitfehlerrate haben. Allerdings lässt sich dieser Einfluss mittels komplexerer Modulations- und Detektionstechniken teilweise ausgleichen, sodass auch mit diffusen Verbindungen prinzipielle Datenraten von 50 Mbit/s oder 100 Mbit/s möglich sind [KB97], [KYD+98].

3.4.2 Sender und Empfänger

Ein Transmitter konvertiert das elektrische Signal in ein optisches. Die hierzu am besten geeigneten Bauelemente sind LED und LD. Verglichen mit LEDs zeichnen sich Laserdioden

¹ Nur Ungefährangabe, da Abhängigkeit vom elektrischen Modulationsverfahren zu beachten ist

neben einer höheren, auf ein schmales Spektrum verteilten optischen Leistung durch eine größere Modulationsbandbreite aus. Weiterhin weisen sie lineares Verhalten bzgl. der elektrisch-optischen Konvertierung aus und sind hierbei mit einer Energieeffizienz von 30 % bis 70 % gegenüber LEDs (lediglich 10-20 %) im Vorteil [SJST02] - die Linearität ist dabei insbesondere für hochentwickelte Modulationsverfahren mit Multi-Subträgern oder Multilevel-Signalen vorteilhaft. Dennoch sind drahtlose Lasersysteme vorwiegend für Au-Benanwendungen geeignet, da sie als Punktquelle mit großer Kohärenzlänge im Innenraum ein potentielles Risiko sowohl für Haut als auch insbesondere für das Augenlicht darstellen. Vorschriften bzgl. Gewährung und Sicherung des Augenlichtes (z. B. "Eye-Safety"-Vorgaben entsprechend der internationalen Lasersicherheitsnorm IEC 60825-1) erfordern für alle Transmitter im nahen IR-Bereich, dass sie im Innenraum unter allen Umständen zu Klasse-1-Lichtquellen gehören [HWNC98]. Diese Maßgabe gilt sowohl für Laser als auch LEDs, jedoch sind die durchschnittlichen Leistungsangaben unterschiedlich groß bemessen, abhängig von der Art der Lichtquelle: ein IR-Laser als Punktquelle darf z. B. eine durchschnittliche Leistung von 500 µW nicht übersteigen während für eine ausgedehnte Lichtquelle wie einfache LEDs noch höhere Leistungen erlaubt sind [GH00].

LEDs besitzen naturgemäß ein breiter gefächertes (weitwinkligeres) Übertragungsmuster mit einer spektralen Breite im Bereich von 25 nm bis 100 nm. Sie sind daher auch für indirekte Verbindungen geeignet, zumal die großflächigere LED-Lichtquelle auch bei relativ hoher Leistung augensicher betrieben werden kann [Car02]. LEDs werden vorzugsweise für drahtlose Innenraum-Kommunikation eingesetzt, da sie günstiger herzustellen sind, zudem als zuverlässiger gelten und die geringere Leistung einer einzelnen LED durch LED-Arrays ausgeglichen werden kann, ohne den Klasse-1-Status zu verlieren [HWNC98], [Car02]. Allerdings sind LEDs aufgrund ihres Lichterzeugungsmechanismus nur für Über-tragungsgeschwindigkeiten bis 100 Mbit/s geeignet, die Modulationsbandbreite liegt typischerweise zwischen einigen 10 kHz und einigen 10 MHz; daher führt für Datenraten im Bereich einiger Gbit/s derzeit kein Weg an teureren Laserdioden vorbei [SJST02].

Der Detektor konvertiert, durch Detektion des einfallenden Photonenflusses auf der Detektorfläche, die empfangene optische Leistung in einen elektrischen Strom. Im Wesentlichen werden für diese Aufgabe die PIN-Diode und die Avalanchephotodiode (APD) eingesetzt. Die aus Silizium gefertigten PIN-Dioden zeichnen sich neben einer guten Quanteneffizienz durch geringe Kosten, Temperaturstabilität und niedrige Betriebsspannungen aus. Im Prinzip handelt es sich bei APDs um PIN-Dioden, die mit einer hohen Spannung invers vorgespannt werden; sie weisen aber eine um etwa 10–15 dB höhere Empfindlichkeit auf [SJST02]. Die geringere Sensitivität der PIN-Diode lässt sich durch erhöhte Übertragungsleistung und größeren Durchmesser von Empfängerlinse bzw. Konzentrator teilweise kompensieren. Die empfindlichere APD erlaubt allerdings robustere Links bei gleichbleibender Übertragungsleistung, die durch Eye-Safety-Vorgaben nach oben ohnehin begrenzt ist. Jedoch erfordert die APD aufgrund ihres Wirkprinzips eine höhere Betriebsspannung. Neben ihrem höheren Preis sind darüber hinaus ihr temperaturabhängiger Verstärkungsfaktor und ihre systembedingte Störanfälligkeit bei IR-Systemen mit hohem natürlichen und/oder künstlichen Umgebungslichtanteil negativ zu bewerten [KB97]. Daher werden zumindest für die Kurzbereichskommunikation einfache PIN-Dioden favorisiert; erst für Freiraum-Langstreckensysteme sind die Kosten für adaptive APDs akzeptabel [HWNC98].

3.4.3 Optische Modulation und Detektion

Intensitätsmodulation mit direkter Detektion (IM/DD) ist das zurzeit bestgeeignete und daher auch meist eingesetzte optische Modulations- bzw. Demodulationsverfahren für die drahtlose Infrarot-Kommunikation [KB97], [Car02], [SJST02]. Hierbei wird die Intensität bzw. Momentanleistung des transmittierten Lichtsignals entsprechend dem bereits elektrisch modulierten Bitstrom variiert. Auf der Empfangsseite wird ein Photodetektor eingesetzt. Dessen Strom verhält sich proportional zur empfangenen Momentanleistung und damit direkt proportional zum ursprünglichen modulierenden Signal. Der Maximalwert des Proportionalfaktors, die Diodensensitivität *R*, ist dabei physikalisch bedingt und wesentlich durch die Wellenlänge bestimmt (vgl. in Bild 3.12 die spektrale Empfindlichkeit Siliziums).

Hinsichtlich IM/DD unterscheidet sich die drahtlose IR-Kommunikation wesentlich von den Kommunikationssystemen, die auf Phasen-, Amplituden- oder Frequenzmodulation oder einer Kombination dieser Techniken basieren. Die hauptsächliche Ursache für die Abweichung von den sonst meist auf Homodyn- oder Heterodynempfänger basierenden Verfahren liegt in der Schwierigkeit, eine exakte Phasenbeziehung zwischen Träger und Lokaloszillator aufrechterhalten zu können: Dies liegt einerseits an der physikalischen Beschaffenheit der IR-Empfänger, die aufgrund ihrer photoelektrischen Wirkfläche immer nur als Intensitätsdetektor fungieren, andererseits aber auch an der Tatsache, dass im Falle diffuser Links, selbst bei Einsatz kohärenten Laserlichtes, nahezu jegliche Phaseninformation an diffus reflektierenden Oberflächen verlorengeht (räumliche Inkohärenz) [GH00], [Car02]. Die für RF-Systeme problematische Inkohärenz stellt für Photodetektoren kein Problem dar, obwohl auch die Photodetektorfläche bzgl. des empfangenen elektrischen Feldes räumlicher Variationen in Amplitude und Phase unterliegt. Diese Variationen wären allerdings nur dann detektierbar, wenn die Photodetektorfläche kleiner als eine Wellenlänge wäre. Die im Vergleich zum Quadrat der Wellenlänge um den Faktor 10⁶ größere Empfangsfläche erlaubt Raumdiversity, sodass selbst Bewegungen des Detektors in der Größenordnung einer Wellenlänge keinerlei Auswirkungen auf das Verhalten des Übertragungskanals haben [KB97]. Durch Interferenzen auftretende Unterschiede werden auf der Empfangsfläche "herausgefiltert", da die Kohärenzzeit gewöhnlicher LED Transmitter im Vergleich zur Bitdauer viel kürzer und die Superposition der optischen Signalkomponenten dadurch die Intensität (Leistung) und nicht die Amplitude beeinflusst [WK03].

In dieser Arbeit wird nur binäre Intensitätsmodulation (LED an/aus) betrachtet, da in mobilen Anwendungen die Distanz zwischen Transmitter und Receiver variieren kann und daher im Falle einer mehrstufigen Intensitätsmodulation eine kostenintensive, schaltungstechnisch aufwändige Adaption an variierende Empfangsleistungen notwendig wäre [Lüf05]. Elektrische Modulation und Demodulation werden mittels digitaler Signalverarbeitung durchgeführt, während Intensitätsmodulation und direkte Detektion als analoge Aufgaben von einem sog. Transceivermodul, einer Kombination aus optoelektronischem Chip und optischem Konzentrator mit Umgebungslichtfilter übernommen werden. Die kombinierten Transceivermodule fungieren bei der Detektion als harte binäre Entscheiderschaltung, sodass nachgeschaltete, aufwändige Demodulations- und (rückgekoppelte) Entzerrungstechniken mit Mehrfachbit-A/D-Wandlern, wie z. B. in [KB97] oder [LK99] vorgestellt, das Empfangsverhalten kaum verbessern.

3.4.4 Freiraumdämpfung und Störquellen

Wie für jedes drahtlose System ist die Leistungsbilanz einer Übertragungsstrecke stark abhängig von den atmosphärischen Verlusten des Ausbreitungsweges. Da die Innenraumatmosphäre frei von Einflüssen wie Dunst, Nebel oder Wolken ist, sind Innenraumübertragungsstrecken, abgesehen vom Signalfading, lediglich von der Freiraumdämpfung betroffen. Hier gilt als Richtwert bei Punkt-zu-Punkt-Kurzstreckensystemen mit einem nur gering divergierenden Lichtstrahl eine Dämpfung von ca. 20 dB, bei Innenraumsystemen mit einem weitwinkligeren Strahl sind Dämpfungen von 40 dB und mehr keine Seltenheit [HWNC98]. Die optische Freiraumdämpfung verhält sich antiproportional zum Quadrat des Abstands *d* zwischen den Kommunikationspartnern ($\sim 1/d^2$). Für Funksysteme kann für den ungestörten Kanal dasselbe $1/d^2$ -Verhältnis angenommen werden, jedoch kann der Exponent im Falle von Multipath-Fading zwischen 2 und 7 variieren ($\sim 1/d^2 \rightarrow 7$) – für die Mobiltelefonie verhält sich die Freiraumdämpfung z. B. proportional zu $1/d^4$ [WP02].

Die IR-Übertragung zeigt verglichen mit Funksystemen dennoch ein wesentlich schlechteres Dämpfungsverhalten. Ursächlich ist die kleinere effektive Antennenfläche, da diese beim IR-System hauptsächlich durch die Photodetektorfläche vorgegeben ist und diese weitaus kleiner ist als das Quadrat der Wellenlänge eines äquivalenten Funksystems [WK03], zumindest solange die RF-Trägerfrequenz 10 GHz nicht übersteigt. Entsprechend [GH00] ist das elektrische Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) proportional zur Photodetektorfläche, sodass für leistungsarme Systeme eine große Fläche der PIN-Diode vorteilhaft wäre, diese aber neben höherer Herstellungskosten zusätzlich einen Kapazitätsanstieg und damit verbunden eine Limitierung der Empfängerbandbreite zur Folge hätte. Teilweise Abhilfe



Bild 3.11: Richtungsgewinn eines modifizierten Lambert'schen Strahlers ([WK03], mod.)

scher oder halbkugelförmiger Bauform schaffen, um durch Reduktion der Strahldivergenz einen Anstieg der gerichteten, optischen Leistung und damit, verglichen mit einem Kugelstrahler, einen Gewinn für das Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen [KB97]. Dieser Richtungsgewinn kann bei kleinem FOV sogar den Nachteil der geringeren effektiven Antennenfläche überproportional ausgleichen, allerdings setzt dies einen kleinen Leistungshalbwertwinkel (Bild 3.11), eine nahezu optimale Ausrich-

kann hier ein sog. Konzentrator mit paraboli-

tung von Transmitter und Receiver und damit den Verlust der richtungsuneingeschränkten Datenausbreitung voraus.

Der IR-Kanal kann für IM/DD als lineares, zeitinvariantes Basisbandsystem modelliert werden, das signalunabhängigen Störungen (additivem Rauschen) unterliegt [KB97]. Die Rauschanteile setzen sich im Wesentlichen aus den vier Komponenten Photonen- bzw. Schrotrauschen, Verstärkungsvariation, thermisches Rauschen der Empfängerschaltung und periodisches Rauschen zusammen [Car02]. Das hauptsächlich nur bei Avalanchedio-den auftretende Verstärkungsrauschen wird hier nicht weiter beachtet. Thermisches Empfängerrauschen kann bei entsprechender Schaltungsauslegung im Vergleich zum Schrotrauschen ergibt sich aufgrund der Diskretheit der eintreffenden Photonen und des eher zufälligen Verhaltens des Photonendetektionsprozesses und wird hervorgerufen durch umgebende Lichtquellen, wie Sonnenlicht, Fluoreszenzlampen und Glühlampen (Bild 3.12), aber auch durch die signalabhängige Lichtquelle des Transmitters. Der Einfluss sichtbaren Lichtes lässt sich mit schmalbandigen IR-Filtern eingrenzen, allerdings gilt dies nicht für IR-Anteile. Die durchschnittliche kombinierte Leistung aller Hintergrundlichtguellen liegt typi-





scherweise um 25 dB höher als die empfangene Signalleistung [GH00]. Daher wird eine direkte Abhängigkeit zwischen Signal und Rauschen vernachlässigt; das Photonenrauschen wird als additives weißes gaußsches Rauschen (AWGN) des IR-Übertragungskanals berücksichtigt [Car02]. Sonnenlicht repräsentiert eine unmodulierte Lichtquelle mit breitem Spektrum und maximaler spektraler Leistungsdichte bei ca. 500 nm Wellenlänge, einen DC-Photostrom hervorrufend.

The fur umgebende Intrarotstrahlungsquellen Die Strahlungsintensität von Glühlampen wird durch das Stromnetz mit 100 Hz bzw. 120 Hz moduliert und besitzt aufgrund der langen Ansprechzeit nur wenige Harmonische; das Maximum der spektralen Leistungsdichte liegt bei ca. 1000 nm. Diese niederfrequenten Störeinflüsse lassen sich z. B. durch ein Empfängerdesign, das jeglichen Gleichanteil abblockt, erheblich reduzieren. Schwieriger verhält es sich bei Leuchtstoff- und Fluoreszenzlampen, die wie Quecksilber und Argon erhebliche spektrale Anteile im Wellenlängenbereich von 780–950 nm besitzen. Werden sie direkt mit Netzfrequenz betrieben, zeigen sie eine modulierte spektrale Signatur mit Harmonischen von einigen 10 kHz. Wird dagegen ein energieeffizientes Vorschaltgerät mit Schaltfrequenzen im Bereich von 20 kHz bis 40 kHz eingesetzt, erzeugt dies ein Störsignal mit signifikanten Anteilen bis zu einigen MHz [GH00]. Leuchtstofflampen verursachen hierdurch nicht nur ein zusätzliches Schrotrauschen, sondern auch ein periodisches Interferenzsignal (periodisches Rauschen). Optische oder elektrische Filterung und/oder elektrische Modulationstechniken können diese Negativeinflüsse reduzieren [NAK96] siehe hierzu die differierenden Kurvenverläufe in Bild 3.16 (Kapitel 3.4.5) bedingt durch Einsatz eines Hochpasses [Car02].

Elektrische Modulationstechniken 3.4.5

Die elektrische Modulation wandelt den zu übertragenden Bitstrom in eine elektrische, an die Eigenschaften des optischen Modulators angepasste Wellenform um. Entsprechend der Beschränkung auf die binäre Intensitätsmodulation soll nur die binäre elektrische Modulation (Spannung an/aus bzw. high/low) weiter betrachtet werden – Unterträgermodulationen wie z. B. BPSK (Bild 3.13) haben für das Gebiet der optischen Kurzbereichskommunikation kaum Bedeutung. Empfängerseitig wird, nach optischer Übertragung und optischer Demodulation durch das Transceivermodul, der ursprüngliche Bitstrom mittels elektrischer Demodulation wieder aus der elektrischen Wellenform extrahiert.



dulationsverfahren: OOK-NRZ, OOK-RZ-0,5, BPSK, 2-PPM, 4-PPM, 4-DPPM [SJST02]

Bild 3.13: Vergleich verschiedener binärer Mo- Bild 3.14: Leistungsdichtespektren einiger Modulationstechniken aus Bild 3.13 (Symboldauer T, transmittierte optische Durchschnittsleistung P_t) [KB97].

Bei niedrigen Frequenzen, typischerweise kleiner 100 kHz, wird die Leistungsfähigkeit des Empfängers von Rauschen und Interferenzen bedingt durch Umgebungslicht dominiert [GH00]. Aus diesem Grund stellt die Datenübertragung über das Basisband kein probates Mittel für eine stabile Signalübertragung dar. Vielmehr bedarf es Modulationsverfahren mit einem Übertragungsspektrum jenseits einiger 100 kHz. Aus dieser Notwendigkeit heraus sind zahlreiche, verschiedenartige Modulationsschemata für die drahtlose IR-Kom-



10 Mb/s 22-kHz Ballast (optical 30 7.5 (B 00 No HPF 2.0-dB HPF ectrical BER (25 5.0 BER (ele 10-9 20 2.5 BPS Achiev 2-PPM 10-9 15 0.0 Achieve 10 4-PPM Req. -2.5 \$ ower 8-PPA 5 -5.0 Req. 16-PPM SNR I 0 -7.5 Nor -5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 -10.0 10-1 10⁰ 10¹ P_f/P_0

Bild 3.15: Theoretischer Vergleich von Bandbreiten- und Leistungseffizienz verschiedener Modulationstechniken für nichtgestörte Kanäle mit IM/DD und AWGN (Additivem weißem gaußschem Rauschen) [KB97]

Bild 3.16: Modulationsverfahren und ihre elektrischen bzw. optischen Anforderungen für eine Datenrate von 10 Mbit/s bei Störung durch 22kHz-Fluoreszenzlicht. Auch die Auswirkungen eines Hochpassfilters (HPF) sind dargestellt [NAK96].

munikation entstanden, z. B. OOK, PPM, DPIM, HHH(1,13) oder EPM(5,12,1/3,1), um nur einige hier zu benennen [KB97], [GH00], [IrDA01], [Lüf05].

Jede Modulationstechnik weist jeweils individuelle Vor- und Nachteile auf (vgl. z. B. Bild 3.14 und Bild 3.15). Da die durchschnittliche emittierte optische Leistung des IR-Transceivers u. a. aus Sicherheitsgründen begrenzt ist, lässt sich die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Modulationstechniken anhand der durchschnittlichen empfangenen optischen Leistung, die für die Übertragung bei gegebener Bitfehler- und Datenrate erforderlich ist, analysieren. Die am weitesten verbreiteten Verfahren sind die Ein-Aus-Tastung (On-Off-Keying, OOK) mit NRZ-Codierung, OOK mit RZ-Pulsen der normalisierten Breite γ (RZ- γ) und die Pulspositionsmodulation mit *L* Pulsen (L-PPM). Bild 3.13 erlaubt einen Vergleich der Modulationstechniken.

On-Off-Keying (OOK)

OOK ist das am einfachsten zu implementierende Modulationsverfahren sowohl für Transmitter als auch Receiver. Vor der optischen Übertragung wird die Information hierzu in einen Code wie z. B. RZ (Return-to-zero), NRZ (Non-Return-to-Zero) oder Manchester übersetzt, sodass man einen Strom von Pulsen erhält. Bei OOK wird im Falle einer Logisch-1 ein Puls für die Dauer eines festen Zeitschlitzes übertragen, eine logisch-0 symbolisiert analog das Ausbleiben eines Lichtpulses während des Zeitschlitzes. Bei OOK-RZ ist das Tastverhältnis γ von Pulsdauer zu Bitdauer kleiner als eins. Hierdurch erhöht sich der Bandbreitebedarf um den Faktor $1/\gamma$, allerdings verbessert sich die Leistungseffizienz gegenüber OOK-NRZ (Bild 3.14 und Bild 3.15) – aus diesem Grund ist OOK-RZ bei IR-Systemen weit verbreitet [SJST02].

Pulspositionsmodulation (PPM)

Die PPM gehört zur Gruppe der Pulsmodulationen, zu denen auch die Differentielle PPM (DPPM) oder die Digitale Pulsintervallmodulation (DPIM) zugehörig sind. PPM und seine Variationen gelten als Modulationstechniken der Wahl für energiebegrenzte Intensitätsmodulation mit direkter Detektion, obgleich dem Transmitter bei PPM eine im Vergleich zu OOK höhere Spitzenleistung abverlangt wird [KB97]. PPM findet vielfältigen Einsatz sowohl im Bereich des Kurzbereichskommunikationsstandards IrDA als auch für die IR-Bitübertragungsschicht des LAN-Standards IEEE 802.11 [IEEE97], [IrDA01]. Allgemein besteht bei *L*-PPM eine einzelne Symboldauer aus *L* Zeitslots (als *Chips* bezeichnet). Bei *L*-PPM wird die optische Leistung *LP_t* während eines einzelnen Chips übertragen, während der übrigen (*L-1*) Chips wird keine Leistung transmittiert – P_t bezeichnet hier die durchschnittliche übertragene Leistung. M=Log₂(*L*) Datenbits werden innerhalb eines Symbols der *L*-PPM moduliert. Die Information über die M Datenbits ergibt sich aus der jeweiligen Chipposition. Bild 3.13 verdeutlicht dies am Beispiel einer 4-PPM.

Die PPM bietet eine höhere durchschnittliche Leistungseffizienz auf Kosten eines erhöhten Bandbreitebedarfs (Bild 3.15), wodurch verglichen mit OOK-NRZ eine höhere Empfindlichkeit auf Intersymbolinterferenzen durch Multipfadausbreitung resultiert [SJSTO2]. Jedoch lassen sich diese Effekte reduzieren, beispielsweise durch Variation des Empfängerdesigns (keine harte, d. h. binäre, schwellwertabhängige Detektion) oder zusätzliche Codierungstechniken [AKB96], [LK99]. So ist z. B. Trellis-Codierung für Hochgeschwindigkeitsübertragungen mit 8-, 16- oder 32-PPM vorteilhaft [LKA97]. Systembedingte PPM-Nachteile, wie z. B. die zulässigen, aber fehleranfälligen Doppelpulse, begründen auch den Einsatz für Codierungen mit begrenzter Lauflänge, sog. RLL-Codes, wie sie beispielsweise als HHH(1,13) im Bereich des IrDA-Standards für Datenraten bis zu 16 Mbit/s eingesetzt werden [HHH01].

Verglichen mit OOK zeigen PPM-Systeme eine gestiegene Systemkomplexität, da empfängerseitig sowohl Chip- als auch Symbolsynchronisation erforderlich sind. Zur Umgehung dieser Problematik bietet sich beispielsweise DPPM (Bild 3.13) als Alternative an, bei der die auf den Lichtpuls (High-Chip) folgenden Low-Chips ausgelassen werden [SK99]: Eine symbolbezogene Synchronisierung wird auf diese Art vermeiden. Insbesondere bei harter Detektion (kein Abtasten mittels A/D-Wandler) lässt sich mit DPPM, geringe Multipfad-Intersymbolinterferenzen vorausgesetzt, eine verbesserte Leistungs- und/oder Bandbreiteeffizienz erzielen [KB97]. Allerdings sind bei DPPM die Symboldauer und daher auch die Symbolgrenzen zu Beginn der Detektion unbekannt, mit der Folge, dass der nicht einheitliche Datendurchsatz je nach vorliegendem Kommunikationsnetzwerk zusätzliche Datenpaketsanpassungen, wie z. B. in [SK99] beschrieben, erforderlich macht.

Auch bei DPIM werden alle überflüssigen Chips eliminiert; da jedes Symbol mit einem Lichtpuls beginnt ist keine zusätzliche Symbolsynchronisation notwendig. Die Information steckt in der Anzahl der Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen [GH00]. Hieraus folgt unmittelbar, dass die Symboldauer wie bei DPPM variabel und von der zu übertragenden Information abhängig ist – verglichen mit PPM ergibt sich für die Datentransmission ein um 2,2 dB höherer, durchschnittlicher optischer Leistungsbedarf [SJST02].

3.4.6 Energiebezogene Größen

Licht transportiert Energie. Zur Charakterisierung der optischen Verbindungen werden daher einige energiebezogene Größen definiert: Die **Strahlungsenergie** Q [J] gibt die gesamte Energiemenge an, die in einem Strahlungsprozess ausgesendet, übertragen oder empfangen wird. Die auch als Strahlungsfluss bezeichnete **Strahlungsleistung** Φ_e [W] beschreibt die pro Zeitintervall transportierte Strahlungsenergie. Die **Strahlungsintensität** I_e [W/sr] einer Quelle in einer bestimmten Richtung \vec{n} bezeichnet den Quotienten aus dem Strahlungsfluss, der die Quelle in Richtung des durchfluteten Raumwinkelelements $d\Omega$ verlässt, und dem Element des Raumwinkels (3.1).

$$I_e(\vec{n}) = \frac{d\Phi_e(\vec{n})}{d\Omega}$$
(3.1)

Die **Bestrahlungsstärke** E_e [W/m²] beschreibt den Anteil der Strahlungsleistung $d\Phi_e$ in Bezug auf das Oberflächenelement dA, auf das die Strahlung einfällt. Ist die Distanz d von Strahlungsquelle zu Detektor um mindestens das 5fache größer als der Strahlungsquellendurchmesser, so können die auf dem Detektor einfallenden Strahlen als zueinander parallel angenommen werden. In diesem Falle lässt sich die Bestrahlungsstärke aus der Strahlungsintensität entsprechend der Beziehung (3.2) bestimmen [Vis03b].

$$E_{\rm e} = \frac{d\Phi_{\rm e}}{dA} \approx \frac{l_{\rm e}}{d^2} \tag{3.2}$$

Formel (3.2) beschreibt eine gute Näherung. Für eine exaktere Berechnung ist zusätzlich der Winkel φ zwischen der Strahlungsausbreitungsrichtung und der Normalen der Detektorfläche zu berücksichtigen. Im Falle einer gerichteten LOS-Verbindung bei zusätzlich relativ schmalem FOV können Multipfadstörungen vernachlässigt werden, und nach [Lüf05] ergibt sich Formel (3.3), wobei $\Omega_0 = 1$ sr aus Dimensionsgründen hier angegeben ist.

$$E_e = \frac{I_e}{d^2} \Omega_0 \cos(\varphi) \tag{3.3}$$

3.4.7 IrDA-Standard für direkte LOS-Verbindungen

Das im Jahre 1993 gegründete Konsortium *Infrared Data Association* (kurz IrDA) zielt auf den Bereich der kostengünstigen und energiesparsamen Kommunikationssysteme ab. Daher werden für IrDA direkt gerichtete LOS-Verbindungen entsprechend Kapitel 3.4.1 vorgesehen. Die Entwicklung von IrDA basiert dabei im Wesentlichen auf Vorarbeiten und Entwicklungen der Firma Hewlett-Packard, die bereits 1979 eine IR-Schnittstelle zur Verbindung eines Taschenrechners mit einem Drucker implementierte und 1990 die ersten Desktop-PCs mit einer IR-Schnittstelle, als Serial Infrared (SIR) bezeichnet, ausstattete. Im Jahre 1994 wurde die IrDA Spezifikation 1.0 verabschiedet, die, zum Großteil auf den

Vorarbeiten von HP basierend, ebenfalls als SIR bezeichnet wird. Die maximale Bruttodatenrate beträgt bei SIR 115,2 kbit/s. 1995 folgte mit der Version 1.1 neben dem Übertragungsmodus FIR (Fast Infrared) mit 4 Mbit/s auch der häufig als MIR (Medium Infrared) bezeichnete Modus mit Übertragungsgeschwindigkeiten von 576 kbit/s und 1,152 Mbit/s. Mittlerweile liegt die IrDA Spezifikation in der Version 1.4 vor und spezifiziert mit VFIR (Very Fast Infrared) eine maximalen Bruttodatenrate von 16 Mbit/s [IrDA01].

Die IrDA-Spezifikation sieht einen Protokollstack vor, der einen obligatorischen und einen optionalen Protokollsatz umfasst (Bild 3.17). Obligatorisch sind neben der Bitübertra-



Bild 3.17: IrDA-Protokollstack

gungsschicht IrDA Physical Layer (IrPHY), die Sicherungsschicht IrDA Link Access Protocol (IrLAP) und die Vermittlungsschicht IrDA Link Management Protocol (IrLMP), bestehend aus Link Management Information Access Service (LM-IAS) und Link Management Multiplexer (LM-MUX).

IrPHY spezifiziert die elektrischen und optischen Modulationstechniken für die

Infrarotübertragung über die Luftschnittstelle (Kapitel 3.4.7.1). IrLAP sorgt mit einer Prozedur für den Aufbau einer zuverlässigen Punkt-zu-Punkt-Verbindung im Sinne eines Master-Slave-Konzepts: Der Master (*Primary*), überprüft die Umgebung auf die Existenz kompatibler Kommunikationspartner (als *Secondary* bezeichnet) und initiiert gegebenenfalls eine Verbindung. Hierzu werden zwischen Primary und Secondary entsprechende Übertragungsparameter, beispielsweise Übertragungsmodus, Datenrate oder Umschaltzeit zwischen Sende- und Empfangsmodus (Turnaround Time), ausgehandelt. Innerhalb von IrLAP wird auch die Rahmenstruktur für die Datenpakete definiert. Dies schließt den Schutz der Pakete durch eine CRC-Summe (Cyclic Redundancy Check) mit ein: Für SIR und MIR mit einem CRC-16-Verfahren, für FIR und VFIR mit einer 32-bit-CRC-Summe.

IrLMP überwacht die IrLAP Verbindung, initiiert gegebenenfalls eine Neuadressierung der an der Kommunikation beteiligten Geräte und startet bzw. beendet logische Verbindungen zwischen den beteiligten IrLMP-Clients. LM-MUX ermöglicht durch Multiplexing den gleichzeitigen Einsatz mehrerer logischer Verbindungen (IrLMP-Clients) über einen physikalischen IrLAP-Link. Nach Aufbau einer zuverlässigen Verbindung durch IrLAP steht den verbundenen Geräten die Datenbank LM-IAS des jeweiligen Kommunikationspartners zur Abfrage der von ihm bereitgestellten Dienste und Anwendungen, wie z. B. IrOBEX, *IR-*COMM oder IrMC, zur Verfügung. LM-IAS bildet damit die Grundlage für die Verbindungsaufnahme in IrDA-Netzen.

Für eine detaillierte Beschreibung von IrLAP und IrLMP wird auf die spezifizierten Standards verwiesen [IrDA96a], [IrDA96b]. Gleiches gilt für die optionalen Protokolle, von denen nur einige hier bzgl. ihres Funktionsumfanges kurz umrissen sind [Lat00], [Vis03a]:

- Die wichtigste Aufgabe von Tiny TP, kurz TTP, ist die auf sog. Credits basierende Flusskontrolle, die für jede IrLMP-Verbindung getrennt vorgenommen wird. Auf diese Weise sollen Datenverlust und Systemblockaden (Deadlocks) auch dann entgegengewirkt werden, wenn im Falle des IrLMP-Mehrfachverbindungsmodus insbesondere auch mehrere IrLAP Verbindungen aktiv sind.
- Mittels *IRCOMM* werden verschiedene serielle und parallele Schnittstellen emuliert (z. B. RS-232, Centronics). Es arbeitet je nach Anwendungsfall direkt mit IrLMP oder Tiny TP.
- Die Applikation IrOBEX (IrDA Object Exchange Protocol) dient dem Austausch von Daten der unterschiedlichsten Formate (Bilder, Visitenkarten, etc.) zwischen IrDA-Geräten. Der OBEX-Standard, der in seiner Funktionsweise dem HTTP-Protokoll ähnelt, wird auch bei Bluetooth verwendet.
- IrLAN dient der Anbindung mobiler PCs an Büronetzwerke. Ziel ist der besonders leichte temporäre Anschluss von mobilen Geräten an Firmennetze. Allerdings wird dieses Protokoll immer stärker durch funkbasierte WPANs und WLANs verdrängt.

3.4.7.1 Bitübertragungsschicht IrDA Physical Layer

Die Bitübertragungsschicht IrDA Physical Layer (IrPHY) spezifiziert, unter Berücksichtigung der IrLAP-Datenrahmenstruktur, eine bidirektionale, serielle Übertragung im Halbduplex mit folgenden Kenndaten [IrDA01]:

- Die Übertragungsdistanz reicht von 0 m bis mindestens 1 m, Entfernungen bis zu etwa 3 m sind möglich – im Falle der Low-Power-Option kann die Reichweite auf nur 0,2 m weiter reduziert werden.
- Die Strahlungsintensität des Transmitters muss innerhalb des Konus mit einem Halbwinkel von 15°, je nach Bitrate, mindestens zwischen 40 mW/sr bis 100 mW/sr betragen und darf den Maximalwert von 500 mW/sr nicht übersteigen. Für einen Halbwinkel zwischen 15° und 30° darf die Strahlungsintensität den Minimalwert unterschreiten; für darüber hinausgehende Halbwinkel muss die Intensität niedriger sein.
- Die Wellenlänge höchster Strahlungsintensität liegt im für IrDA spezifizierten Wellenlängenbereich zwischen 850 nm und 900 nm.
- Der Sichtbereich (FOV) des Empfängers muss mindestens 15° betragen.
- Befindet sich der Transmitter im FOV des Receivers, dann muss dieser einen korrekten Empfang garantieren für sowohl minimale als auch maximale Bestrahlungsstärken, die durch den Transmitter mit seinen möglichen Strahlungsintensitäten im Bereich der spezifizierten Linkdistanzen hervorgerufen werden.
- Die Bitfehlerquote BER sollte nicht größer sein als 10⁻⁸.
- IrDA unterstützt die Übertragungsmodi SIR (2,4 kbit/s 115,2 kbit/s), MIR (576 kbit/s, 1,152 Mbit/s), FIR (4 Mbit/s) und VFIR (16 Mbit/s). Der SIR Modus mit einer Datenrate von 9,6 kbit/s wird als Standardgeschwindigkeit festgelegt.

Für Verbindungen mit Datenraten unterhalb 4 Mbit/s kommt bei IrDA als elektrische Modulation OOK zum Einsatz, genauer OOK-RZI – bei RZI (Return-to-zero-inverted) wird ein Lichtpuls nicht bei logisch-1, sondern bei logisch-0 gesendet. Für Datenraten \leq 115,2 kbit/s besitzen die Pulse wahlweise eine Länge von $\gamma = {}^{3}/{}_{16}$ der nominellen Bitdauer oder aber eine Länge von ${}^{3}/{}_{16}$ der zu 115,2 KBaud äquivalenten Bitdauer. Im MIR-Modus, mit Datenraten von 576 kbit/s und 1,152 Mbit/s, beträgt das Tastverhältnis $\gamma = {}^{1}/{}_{4}$ der nominellen Bitdauer [IrDA01]. Für FIR und VFIR werden komplexere Modulationstechniken eingesetzt: Während FIR auf einer 4-PPM basiert, wird für VFIR zusätzlich HHH(1,13) als RLL-Codierung eingesetzt (vgl. Kapitel 3.4.5). Sowohl bei FIR als auch VFIR werden die durch Codierung entstehenden Chipfolgen direkt als OOK-NRZ entsprechend der Chiplänge (125 ns bei FIR; 41,6 ns bei VFIR) übertragen.

Bei SIR werden die Datenpakete, bestehend aus Startbit, 8 Datenbits, keinem Paritätsbit und einem Stoppbit asynchron übertragen. Bei den übrigen Übertragungsmodi MIR, FIR und VFIR werden die Daten synchron übertragen, d. h. nach Beginn einer Synchronisationsfolge werden die Daten sukzessive innerhalb eines Datenrahmens, mit äquidistanten Zeitabständen für die einzelnen Bits (SIR, MIR) bzw. Chips (FIR, VFIR), übermittelt. In allen Übertragungsmodi wird das niederwertigste Bit zuerst übertragen (*Little Endian*).

Für die empfängerseitige Synchronisation stehen je nach Übertragungsmodus verschiedene Synchronisierungskonzepte zur Verfügung. Bei SIR (OOK-RZI-³/₁₆) dient hierzu das Startbit zu Beginn eines jeden zu transmittierenden Bytes. Für den MIR-Modus, der mit OOK (RZI-¹/₄) arbeitet, setzt IrDA auf Bit-Stuffing: Folgt fünfmal logisch-1 aufeinander, so wird daran anschließend einmal logisch-0 (Lichtpuls bei RZI-Codierung!) als Stuffing-Bit in den synchronen Bitstrom eingefügt. Hierdurch ist sichergestellt, dass ein aus lauter High-Werten (logisch-1) bestehender Bitstrom nicht als Sendepause interpretiert werden kann und eine Empfängersynchronisation möglich bleibt. Durch die 4-PPM bei FIR können aufgrund der Codierungsvorschrift maximal 6 Chips zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lichtpulsen auftreten, daher kann auf Bit-Stuffing ähnelnde Technologien verzichtet werden. Gleiches gilt auch für VFIR; dort sorgt der RLL-Code HHH(1,13) dafür, dass für die reguläre Chipfolge minimal 1 Chip und maximal 13 Chips zwischen zwei Lichtpulsen auftreten können. Für die Koexistenz von SIR-Geräten und Geräten mit schnelleren Übertragungsmodi sieht IrPHY einen 1,6 µs langen *Serial Infrared Interaction Puls*e (SIP) vor: Haben zwei oder mehr IR-Geräte einen schnelleren IR-Link (MIR, FIR, oder VFIR) ausgehandelt, dann muss SIP mindestens alle 500 ms von den schnelleren IR-Geräten ausgesendet werden. Da die SIP-Länge von 1,6 µs in etwa der Pulslänge entspricht, die für SIR mit ³/₁₆ der Bitdauer bei 115,2 KBit/s spezifiziert ist, wird garantiert, dass sämtliche SIR-Geräte diesen Puls als Startbit eines (dann ausbleibenden) Bytes verstehen, entsprechend auf Empfang schalten, keine IR-Pulse aussenden und daher den schnelleren IR-Link nicht stören.

3.4.7.2 Implementierungsaufwand für IrDA

Der Implementierungsaufwand für das IrDA-Protokoll ist verglichen mit der WPAN-Alternative Bluetooth als geringer einzuschätzen. So lässt sich der SIR-Modus bereits mit einem UART-Baustein und einem Transceivermodul einfach realisieren. Eine Integration für embedded Systeme scheint auch leichter durchführbar, zumal keine CPU-Rechenzeit benötigt wird, wenn keine IR-Datenübertragung stattfindet [Lat00]: Für IrDA mit FIR beträgt die Codegröße je nach Anwendung (IrOBEX, *IRCOMM*) ca. 14–20 kByte; für den Primary werden hierbei ca. 3–5 kByte mehr veranschlagt als für den Secondary. 8-bit-Prozessoren sind für Datenraten bis zu 115,2 kbit/s ausreichend, für höhere Geschwindigkeiten sollten 16-bit-CPUs eingesetzt werden. Mit der Spezifikation IrDA Lite werden dem Entwickler zusätzliche Methoden zur Code-Reduzierung zur Verfügung gestellt; die Kompatibilität zu IrDA-Geräten mit vollständiger Implementierung bleibt gewährleistet. Die Methoden zielen dabei auf minimale Komplexität und geringen Speicherbedarf (RAM, ROM) ab [IrDA96c].

3.4.8 Vergleich von IR-Kommunikation mit RF-WPAN

Bei direkt detektierenden IR-Systemen ist die demodulierte Ausgangsgröße proportional zur empfangenen Leistung und damit proportional zum Quadrat des empfangenen elektrischen Feldes. Anders verhält sich die Ausgangsgröße in RF-Systemen, dort hängt die Spannung des elektrischen Signals linear von der Amplitude des elektrischen Feldes des Trägers ab [KB97]. Aus der quadratischen Gesetzmäßigkeit resultiert abweichendes Empfangsverhalten von optischen Detektoren und entsprechenden RF-Empfängern [WK03]. Betrachtet man das elektrische Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), so ergibt sich für Infrarot-Empfänger eine quadratische Abhängigkeit von der optischen Signalleistung: Ein Anstieg der Freiraumverluste um 3 dB führt in diesem Fall zu einer Abnahme des Rauschabstandes um 6 dB. Umgekehrt kann man aber einer Störsignalanhebung um 3 dB bereits durch Anheben der optischen Signalleistung um 1,5 dB begegnen.

Nachteilig bei der IR-Übertragung ist die höhere Freiraumdämpfung bedingt durch eine geringere effektive Antennenfläche – Richtwerte liegen zwischen 20 dB für schwach divergierende und 40 dB für weitwinklig divergierende Punkt-zu-Punkt Kurzstreckenverbindungen. Die geringere effektive Fläche der PIN-Dioden lässt sich zumindest für LOS-Links durch konzentrierte, gerichtete Übertragung mittels halbkugelförmigem oder parabolischem Konzentrator ausgleichen oder sogar überkompensieren [RPG+03]. Weiterhin kann nach Kapitel 3.4.4 die Abhängigkeit der Dämpfung von der Übertragungsdistanz *d* im Falle von Multipath-Fading zugunsten der optischen Übertragung ausfallen [WP02].

Ein weiterer Nachteil der optischen Übertragung liegt in der geringeren Empfindlichkeit der IR-Empfänger: Bei einem Vergleich von 1-Mbit-Bluetooth (GFSK) mit 1,152-Mbit-IrDA (¹/₄-RZ-OOK) wird eine um etwa 40 dB niedrigere Empfangssensitivität des IR-Empfängers ermittelt [WK03]. Bzgl. dieses Vergleiches sei angemerkt, dass der Einsatz empfindlicherer Avalanchedioden für WPAN-Kommunikation wegen hoher Kosten und hohen erforderlichen Betriebsspannungen hier ebenso wenig beachtet wird, wie eine sich durch Multipath-Fading verschlechternde Freiraumdämpfung der RF-Systeme entsprechend Kapitel 3.4.4. Der Nachteil der geringeren Empfangsempfindlichkeit lässt sich auch durch die Verwendung komplexerer Modulationsverfahren nicht eliminieren, da auch für Funksysteme, verglichen mit Bluetooth, ständig leistungsfähigere Techniken existieren [WK03].

Verbesserungen könnten hier komplexe, kostenintensive und darüber hinaus energiehungrige Techniken wie z. B. Transmitter-Arrays aus Laserdioden bringen: Diese könnten, in Verbindung mit abbildender optischer Diversifizierung und optimiertem Empfängerdesign, für eine Erweiterung der räumlichen IR-Abdeckung bei gleichzeitiger Erhöhung der effektiven Fläche und daher verbessertem Rauschabstand sorgen [SJST05]. Aber von diesen Techniken ist für miniaturisierte Robotersysteme gegenwärtig wegen zu hohen Platzbedarfes und insbesondere wegen des Energiedilemmas Abstand zu nehmen.

Die Problematik der Empfangssensitivität lässt einen nicht wettzumachenden Vorteil der WPAN-Funksysteme gegenüber Kurzbereichs-Infrarotlösungen wie z. B. IrDA vermuten. Jedoch bleibt eine abschließende Bilanzierung hinsichtlich des für Mikromanipulationsstationen am besten geeigneten Verfahrens schwierig:

- Mittels optischer Kurzbereichsverbindungen wie z. B. IrDA besteht die Möglichkeit, den Energieverbrauch auf den wirklichen Bedarfsfall zu beschränken, da Daten (IR-Lichtpulse) in einer Art "Point-and-Shoot" Lösung spontan, d. h. ohne ständige Synchronisationssignale (vgl. ZigBee oder Bluetooth), mit vergleichbar höheren Datenraten (bis zu 16 Mbit/s) übertragen werden können. Darüber sind die Verzögerungszeiten von Ad-Hoc-Infrarotverbindungen verglichen mit Funklösungen, die ihre Energiesparmodi nutzen, vernachlässigbar (siehe z. B Tabelle 3.7).
- Neben dem Spontancharakter der schnellen IR-Kurzbereichsübertragung ist zusätzlich die geringere Code-Komplexität der IrDA-Geräte zu berücksichtigen. Durch die geringere erforderliche Rechenleistung und den damit niedrigeren dynamischen Energiebedarf lässt sich zusätzlich Energie einsparen: Während für Bluetooth als RF-WPAN-Pendant ca. 40 kByte an ROM-Speicher und eine 32-bit-CPU veranschlagt werden, liegen der Speicherbedarf für IrDA-Systeme mit einer 8-bit- oder 16-bit-CPU bei nur ca. 5–6 kByte für Slaves und zusätzlich nochmals 3-5 kByte für den Master (Primary) [Lat00]. Für ZigBee setzt man eine zur IrDA vergleichbare Codegröße (Speicherbedarf) an, allerdings sind die Datenübertragungsraten bei ZigBee erheblich geringer [Lat04].
- Sieht man von Pico-Radios mit geringer Bruttodatenrate (ca. 20 kbit/s) einmal ab, dann haben derzeitige RF-Transceiver eine schlechtere Energieeffizienz, da entsprechend Kapitel 3.3.4 ein zusätzlicher Energiebedarf von bis zu 100 mW für Mischer, Oszillatoren und Einstellen des Arbeitspunktes für Filter- bzw. Verstärkerschaltungen zu berücksichtigen ist [WP02].
- Nicht zu verachten ist auch das Bitfehlerverhältnis BER als Richtwert dafür, wie häufig ein zuvor fehlerhaft übertragenes Datenpaket wiederholt und damit zusätzliche Energie aufgewendet werden muss. Verglichen mit Bluetooth beispielsweise (mit einer spezifizierten BER von 10⁻³) liegt IrDA mit einer BER von 10⁻⁸ hier klar im Vorteil, zumal der optische Übertragungskanal durch benachbarte Funksysteme vollständig unbeeinflusst bleibt und Störungen durch benachbarte Infrarot-Systeme mittels dunkler Abschirmungen eliminiert werden können.
- Auch ein Kostenvergleich von IR-Systemen mit den gegenwärtigen WPAN-Funksystemen spricht für eine optische Lösung. Dies liegt nicht nur an vergleichsweise kostengünstigen optischen Modulatoren und Detektoren bzw. kombinierten Transceivermodulen, sondern vor allem, sieht man von den "Eye-Safety"-Vorgaben einmal ab, an dem uneingeschränkt nutzbaren, lizenzfreien optischen Spektrum.

Daher muss infrarotbasierte Kurzbereichskommunikation den Vergleich mit adäquaten Funklösungen, zumindest für ungehindert sichtbasierte Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, trotz geringerer effektiver Antennenfläche und geringerer Empfindlichkeit, nicht scheuen. Dieser Eindruck erhärtet sich, wenn man im Hinblick auf die Integrierbarkeit in miniaturisierte Robotersysteme den bei RF-Systemen derzeit noch höheren Platzbedarf für Elektronik und Antenne mit berücksichtigt (vgl. Bild 3.8), insbesondere wenn trotz hoher Datenrate bei gleichzeitig niedriger BER geringer Energiebedarf gefordert ist [War03].

Anders verhält es sich im Bereich der gleichzeitigen, weiträumigen Vernetzung mehrerer Geräte. Bisherige diffuse IR-Systeme sind hier der Funktechnik unterlegen: Einerseits wegen der geringeren Empfangssensitivität, andererseits wegen der hohen Dämpfungsverluste, da ein durch Richtwirkung bzw. Konzentrator erzielbarer Gewinn, wie er für LOS- Systeme positiv ausgenutzt wird, bei den Non-LOS-Verbindungen durch die Reflexion an einer diffusen Oberfläche nahezu vollständig verloren geht. Hier existiert noch Entwicklungsbedarf, z. B. im Bereich segmentierter Photodetektoren geringer spektraler Bandbreite, die in Verbindung mit räumlich diversifizierenden optischen Konzentratoren für eine winkelabhängige Auflösung der Kommunikationszelle sorgen können [WK03].

3.5 Drahtgebundene USB-Kommunikation

In einem Vorgriff auf die Kapitel 4.4.2 bzw. 4.7 werden an dieser Stelle die wesentlichen Aspekte der drahtgebundenen USB-Kommunikation aufgeführt, da USB (als Akronym für Universal Serial Bus) mittlerweile die wesentliche Schnittstelle zur Anbindung von Komponenten an PC-Systeme darstellt. Da umgekehrt die Steuerungseinheiten komplexer Mikromanipulationsstationen mit drahtlosen, mobilen Mikrorobotern aufgrund ihrer Komplexität softwareseitig auf PC-Systemen (bzw. PC-System-Clustern) realisiert werden, scheint der Schluss zulässig, dass USB zur Anbindung von Peripherie an die Steuerungseinheit einer Mikromanipulationsstation zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

Für weitere Überlegungen im Hinblick auf den Einsatz von USB im Bereich der Mikromanipulationsstationen, hier insbesondere zur Anbindung von Kommunikationssystemen, wird auf Kapitel 4.4.2 verwiesen. Dort findet sich auch ein Vergleich von USB mit weiteren drahtgebundenen Kommunikationsverfahren (seriell, parallel, IEEE1394 oder Ethernet), wobei insbesondere die Aspekte Übertragungsgeschwindigkeit und Komplexität berücksichtigt werden.

3.5.1 USB allgemein

USB ist ein Single-Master-Bus. Ein einzelner Host-Controller kommuniziert mit vielen (max. 127) USB-Geräten, den sog. *USB-Functions*, die sternförmig, gegebenenfalls über einen oder mehrere USB-Hubs (max. 5 in Kaskadierung), an den Host angeschlossen sind.

Den USB-Geräten wird während einer automatisch ablaufenden Konfigurationsphase, der sog. Enumeration, vom Host-Controller eine unverwechselbare 7-Bit-Adresse zwischen 1 und 127 zugewiesen, über die sie zukünftig angesprochen werden. Die USB-Geräte können nicht selbstständig einen Datentransfer starten. Jeder Bus-Verkehr wird durch den Host initiiert, er ist der einzige Busmaster. Entsprechend der USB-Spezifikation ist aus Sicht des Hosts zwischen schreibendem Zugriff im Downstream (USB-OUT-Transfer auf die USB-Function) und lesendem Zugriff im Upstream (USB-IN-Transfer vom USB-Gerät) zu unterscheiden. Der Host übernimmt sämtliche komplexen Kommunikationsaufgaben, z. B. die Erkennung und Behandlung von Übertragungsfehlern. Die Elektronik der USB-Functions lässt sich daher relativ einfach und kostengünstig realisieren.

Gegenwärtig unterstützt USB drei Geschwindigkeitsvarianten: USB Version 1.1 spezifiziert die Varianten *Low-Speed* (1,5 Mbit/s) und Full-Speed (12 Mbit/s). USB 2.0, auch als *High-Speed* bezeichnet, erlaubt bis zu 480 Mbit/s [USB00].

3.5.2 Übertragungsmodi

Für die IN- und OUT-Transfers stehen vier verschiedene Übertragungsarten zur Verfügung.

Über sog. Control-Transfers werden kurze Datenpakete, sog. USB-Device-Requests, über ein erweitertes Handshake-Modell sicher angefordert und ausgetauscht [Kel03]. Control-Transfers werden im Rahmen der Enumeration zunächst zur Identifikation und anschließend zur Konfiguration des USB-Gerätes benötigt, und müssen daher von jedem Gerät unterstützt werden. Der USB-Standard schreibt hierzu einen minimalen Satz an Kontrollkommandos, die sog. Standard-Device-Requests, vor, auf die jedes USB-Gerät reagieren muss [USB00]. Im Einzelnen sind dies die USB-Kommandos GET_STATUS, CLEAR_FEATURE, SET_FEATURE, SET_ADDRESS, GET_DESCRIPTOR, SET_DESCRIPTOR, GET_CONFI-GURATION, SET_CONFIGURATION, GET_INTERFACE, SET_INTERFACE und SYNCH_FRAME, die zusätzlich um weitere applikationsspezifische oder klassenspezifische Requests ergänzt werden können. Für eine ausführliche Beschreibung der *Standard-Device-Requests* sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [USB00], [And01], [Kel03], [Axe01], [Axe05].

- Bulk-Transfers unterstützen eine sichere Übertragung von Datenpaketen mit Datenraten bis in Höhe der vollen Busbandbreite. Fehlerhafte Transaktionen, die anhand von abweichenden CRC-Summen (16-bit-CRC für Datentransfers) identifiziert werden, können mehrfach (i. d. R. dreimal) wiederholt werden.
- Interrupt-Transfers verhalten sich ähnlich zu Bulk-Transfers, werden aber periodisch ausgeführt: Wird ein Interrupt-Transfer durch den USB-Gerätetreiber abgesetzt, so wiederholt der Host-Controller-Treiber diesen Request automatisch innerhalb eines vorgebbaren Zeitintervalls (1–127 ms).
- Isochronous-Transfers dienen der Übertragung von Daten, die Anforderungen an die Latenzzeit stellen. Sie werden insbesondere für Echtzeit-Datenströmen mit garantierter Busbandbreite (z. B. Audio- oder Video-Streams) eingesetzt. Der Wunsch nach Synchronität und Kontinuität des Datenstroms geht in diesem Übertragungsmodus zu Lasten der Datensicherheit. USB-Übertragungsfehler sind möglich!

3.5.3 Pipe-/Endpoint-Konzept

Physikalisch wird jedes USB-Gerät über lediglich zwei Leitungen (D+ und D-) mit dem USB-Host verbunden. USB unterstützt die Einrichtung mehrerer virtueller logischer Datenkanäle, die als *Pipes* bezeichnet werden. Seitens der USB-Function endet jede Pipe in einem



Bild 3.18: Kommunikationskanäle zwischen den Datenpuffern der Client-Software und den zugehörigen Endpoints einer USB-Function sog. Endpoint¹, der physikalisch einem FIFO mit festgelegter Tiefe zum Empfang bzw. Senden von USB-Daten entspricht. Da jedes USB-Gerät mehrere Endpoints und daher mehrere Pipes unterstützen kann, ist es möglich, mehrere, logisch unabhängige Geräte innerhalb eines physikalischen USB-Gerätes zu realisieren (Bild 3.18). Hierzu werden die zugehörigen USB-Endpoints für jedes logische Gerät jeweils als *USB-Interface* strukturiert zusammengefasst.

Generell unterscheidet die USB-Spezifikation zwischen einer *Message-Pipe* und einer *Stream-Pipe* [And01].

Die Message-Pipe etabliert eine logische Verbindung zwischen dem USB-Gerätetreiber und dem für jedes USB-Gerät obligatorischen Control-Endpoint EP0 (Endpoint 0).

Der Control-Endpoint EPO ist als einziger Endpoint der USB-Function bidirektional sowohl zum Senden als auch Empfangen ausgeführt. Als Übertragungsart ist ausschließlich der Control-Transfer für EPO spezifiziert. Die Kommunikation mit dem Control-Endpoint erfordert neben einer von der USB-Spezifikation vorgegebenen Struktur (Standard-Device-Request) auch eine USB-spezifische Übertragungssequenz, als doppeltes Handshake-Modell bezeichnet [Kel03], die sowohl dem Host als auch der USB-Function die erfolgreiche Interpretation der transferierten Daten signalisiert.

Stream-Pipes dienen der Übertragung von Datenströmen, die hinsichtlich Format, Struktur oder Inhalt nicht durch die USB-Spezifikation definiert sind. Vielmehr wird der Aufbau

¹ Auch in deutschsprachiger Literatur findet sich überwiegend der englische Begriff "Endpoint".

und Inhalt dieser Datenströme herstellerspezifisch oder entsprechend einer bereits etablierten USB-Geräteklasse (z. B. HID oder Massenspeicher) gestaltet. Stream-Pipes arbeiten immer unidirektional. Als Übertragungsart sind Bulk-, Interrupt- und Isochronous-Transfer zulässig.

3.5.4 USB-Software-Architektur

Die USB-Software (Client-Software) des Host-Computers initiiert alle USB-Übertragungen: Für einen Zugriff der Client-Software auf ein USB-Gerät (USB-Function bzw. USB-Interface) bedient sich die Client-Software des USB-Gerätetreibers, der über die USB-System-





Software, bestehend aus USB-Bustreiber und USB-Host-Controller-Treiber, mit dem ihm zugeordneten Gerät kommuniziert (Bild 3.19). Der USB-Bustreiber dient als Schnittstelle zwischen USB-Gerätetreiber USB-Host-Controller-Treiber. und dem Letztgenannter übernimmt neben der Bildung von Transaktionslisten auch die Übertragung der daraus resultierenden USB-Transaktionen durch die USB-Host-Controller-Hardware.

In Bild 3.20 sind die verschiedenen Kommunikationsebenen zur Umsetzung des USB-Protokolls dargestellt.

Der USB-Gerätetreiber (USB-Device-Dri-

ver) ist für die Erzeugung von Anfragen (*Requests*) an den USB-Bustreiber zuständig. Hierzu bedient er sich sog. *IRPs* (*I/O-Request-Packets*), die einen Transfer von bzw. zu USB-Endgeräten initiieren. Für die auszutauschenden Datenpakete sind jeweils entsprechende Speicherbereiche bereitzustellen.

Dem USB-Bustreiber (*USB-Driver*) werden mit Hilfe der Geräte-Deskriptoren während der Enumerationsphase die spezifischen Kommunikationseigenschaften der einzelnen an den *USB-Root-Hub* angeschlossenen USB-Geräte bekannt gegeben: Dies betrifft z. B. die Anzahl der verfügbaren Konfigurationen oder USB-Interfaces, die pro Datenrahmen zulässige Datenmenge, die vom jeweiligen Endpoint unterstützte Transferart oder den Zeitabstand zwischen zwei periodischen Zugriffen. Für eine exakte Beschreibung der vom USB-Standard vorgeschriebenen USB-Deskriptoren (Device-, Configuration-, Interface-, Endpoint-, String-, Other-Speed-Configuration- und Device-Qualifier-Deskriptor) wird auf die Literatur verwiesen [USB00], [And01], [Kel03], [Axe05].

Erhält der USB-Bustreiber vom USB-Gerätetreiber ein IRP, so erzeugt er gemäß dieser Anforderung, unter Berücksichtigung der gerätespezifischen Kommunikationseigenschaften, einzelne Transaktionen, die jeweils innerhalb eines Übertragungsrahmens (1-ms-Frame für Low- und Full-Speed, 125-µs-Mikro-Frame für High-Speed) ausführbar sind.

Der USB-Host-Controller-Treiber organisiert die zeitliche Abfolge der einzelnen Transaktionen (*Scheduling*). Hierzu generiert der Host-Controller-Treiber eine Folge von Transaktionslisten. Jede Transaktionsliste besteht aus den für die angeschlossenen Geräte bestimmten Transaktionen, die noch nicht abgearbeitet worden sind. Die Transaktionsliste definiert die Abfolge der Transaktionen, die innerhalb eines jeden Frames bzw. µ-Frames ausgeführt werden. Beim Aufsetzen der Transaktionsliste besteht durchaus die Möglichkeit, dass ein von der USB-Client-Software initiierter Block-Transfer in eine Serie von Transaktionen aufgeteilt wird, welche dann in aufeinanderfolgenden (Micro)-Frames ausgeführt werden.

Der USB-Host-Controller-Treiber löst die Transaktionen über die USB-Hardware Root-Hub (*USB-Host-Controller*) und die daran angeschlossenen USB-Hubs aus. Alle Transaktionen werden entsprechend der Reihenfolge aus der Transaktionsliste in die niedrigeren Pro-



Bild 3.20: Kommunikationsebenen des USB-Protokolls

tokollebenen umgesetzt: Die Transaktionen werden in einzelne Pakete und diese wiederum in einen physikalischen Datenstrom umgewandelt.

Die Folge von Paketen setzt sich dabei neben den eigentlichen Datenpaketen auch aus speziellen Paketen, die den Protokollrahmen bilden oder der Fehlererkennung und Fehlerbehandlung dienen, zusammen. Dies verdeutlicht der untere Teilbereich von Bild 3.20: Das sog. *Token-Packet* initiiert den USB-Datenverkehr, beschreibt die nachfolgende Aktion und definiert neben Geräteadresse und Endpoint der USB-Function auch die Art der nachfolgenden Daten-Transaktion (Lese- oder Schreibzugriff). Das *optionale Data-Packet* enthält die Nutzdaten des USB-Transfers. Das *Handshake-Packet* schließlich quittiert die Transaktion und dient zugleich der Fehlererkennung – fehlerhafte Token- bzw. Datentransfers werden ebenso erkannt wie Endpoints, die nicht verfügbar sind, keine Daten akzeptieren oder blockiert sind (*"stalled endpoint"*). Für eine weiterführende Beschreibung der USB-Kommunikation wird an dieser Stelle auf [Kel03] verwiesen.

4 RoboComm – Konzept

4.1 MiCRoN

Da das im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Kommunikationssystem erstmalig in der Mikromanipulationsstation MiCRoN Einsatz findet, wird der Vorstellung des Kommunikationskonzeptes zunächst ein Überblick über diese neuartige Mikromanipulations-Tischstation vorangestellt.

4.1.1 Gesamtsystem

Um die "Kluft" zwischen der Mikro- und der Nanowelt zu überbrücken, wird im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes MiCRoN (**Mi**niature **C**o-operative **Ro**bots advancing towards the **N**ano range) eine neuartige Mikromanipulationsstation (Bild 4.1) entwickelt, die auf drahtlosen, mobilen, nur kubikzentimeterkleinen Mikrorobotern basiert [BPL+05].



Bild 4.1: MiCRoN Mikromanipulationssystem: mehrere Mikroroboter arbeiten im Cluster zusammen. (mod. Bild des IPR, Arbeitsgruppe Mikromechatronik und Mikrorobotik, TH Karlsruhe) Diese Roboter, im Folgenden als MiCRoNs bezeichnet, werden mit

Mikromanipulationswerkzeugen zur Handhabung von millimetergroßen Objekten mit Nanometerpräzision ausgestattet. Für die Manipulationsvisualisierung wird eine echtzeitfähige 3D-Objekterkennung angestrebt, wobei auch eine Prozessüberwachung mit einer Roboterkamera on-Board angedacht ist. Da die MiCRoNs aufgrund ihrer physikalischen Dimensionen nur über begrenzte On-Board-Ressourcen (nur ein Werkzeug je Roboter) verfügen, bedarf es zur Umsetzung komplexerer Aufgaben der Kooperation. Diese wird über eine mehrstufig aufgebaute Mikromanipulationssteuerungseinheit koordiniert [SES+03], die nach Datenfusion und Auswertung der einzelnen globalen und lokalen Sensorsysteme entsprechende Befehle

für die einzelnen Roboter generiert und über ein drahtloses Kommunikationssystem an diese weiterleitet. Das Kommunikationssystem ist hierzu bidirektional zu implementieren, da einerseits Roboterbefehle (Downstream) und andererseits Roboterdaten, z. B. AFM-Messwerte oder Statusinformationen, im sog. Upstream übertragen werden müssen.

Aufgrund sowohl geometrischer als auch funktionstechnischer Anforderungen sind sämtliche Komponenten der Mikromanipulationsstation mit den derzeit möglichen Stateof-the-art-Fertigungstechniken neu zu konzipieren und zu entwickeln. Dies betrifft die Manipulationswerkzeuge, die Komponenten für Fortbewegung und Roboterarm, die drahtlose Energieversorgung, die Manipulationssteuerungseinheit mit globaler und lokaler Prozessüberwachung und das Kommunikationssystem als Schnittstelle zwischen den Mikrorobotern und der Manipulationssteuerungseinheit.

4.1.2 Mikromanipulationsstation

Die MiCRoN Manipulationsplattform (Bild 4.2) setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die alle per Ethernetschnittstelle informationstechnisch an ein auf LINUX basie-



Bild 4.2: MiCRoN Manipulationsstation mit den Systemen für Energieversorgung, globale und lokale Sensoren, Manipulationskontrolle und Kommunikation

rendes Kontrollsystem angebunden werden [MiC06]. Einzige Ausnahme bildet diesbezüglich der sog. POWER FLOOR, der keinerlei informationstechnische Anbindung an die Steuerungseinheit erfährt. Er versorgt die drahtlosen MiCRoN-Roboter induktiv mit Energie und gibt gleichzeitig durch seine physikalischen Abmessungen die Größe der Roboterarbeitsfläche vor. Das globale Sensorsystem dient zur Bestimmung der Roboterposen innerhalb der MiC-RoN-Tischstation mit einer Genauigkeit von bis zu 1 µm (nähere Erläuterungen hierzu in Kapitel 4.1.2.2). Vier 25 W Leuchten sorgen für eine ausreichende Illumination der Roboterarbeitsfläche, um das geforderte Auflösungsvermögen der auf Microsoft Windows™ Detektionssoftware aufsetzenden zu erzielen. Für das softwaretechnisch auf LINUX basierende lokale Sensorsystem (Kapitel 4.1.2.1) wird der Einsatz von mobilen, kabelbe-

triebenen Mikrorobotern angestrebt, die mit On-Board-Kamerasystemen ausgerüstet werden: Als Basis dient hierbei der Roboter MINIMAN IV (vgl. Kapitel 2.4.3.2), dessen Manipulationseinheit für das Tragen des On-Board-Kamerasystems zu modifizieren ist. Informationstechnisch werden die kabelbetriebenen Kameraroboter über den für ihre Bewegungskoordination zuständigen Steuerrechner in das Manipulationssystem integriert. Das Kontrollsystem, dessen Aufbau und Funktionsweise bereits in Kapitel 2.3.3.4 prinzipiell beschrieben ist, überwacht die verschiedenen Aufgaben der am Manipulationsprozess beteiligten Mikroroboter: Hierzu werden die Daten der Sensorsysteme ausgewertet, das Weltmodell nach der Sensordatenfusion aktualisiert und schließlich, über Manipulationsplanung und Steuerungsebene, die neuen Roboterinstruktionen generiert. Das bidirektionale Kommunikationssystem schließlich überträgt im Downlink die Roboterkommandos an die MiCRoN-Roboter. Im Uplink sorgt die Kommunikationseinheit für die Übermittlung von Roboterstatusinformationen und den von den Robotern gewonnenen lokalen Sensordaten zurück an die Steuerungseinheit. Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Mikromanipulationsstation MiCRoN werden für das Steuerungssystem eine direkte und aufgabenorientierte Teleoperation ebenso umgesetzt wie eine vollautomatisierte Prozessüberwachung.

4.1.2.1 Lokales Sensorsystem

Gemessen an bisherigen Lokalsensorsystemlösungen (vgl. Kapitel 2.3.3.2) geht man im Rahmen des MiCRoN-Forschungsprojektes noch einen Schritt weiter und sieht gleich meh-



Bild 4.3: CAD-Darstellung des On-Board-Kamerasystems für die MiCRoN Manipulationsstation ([MiC05], mod.)

rere mobile lokale Sensoren vor. Es werden miniaturisierte Kamerasysteme eingesetzt, die, auf mobilen Mikrorobotern montiert, direkt an den Ort der zu überwachenden Manipulationsoperation verfahren werden. Das On-Board-Kamerasystem besteht aus einem $1/_4$ " CCD-Chip mit separater Elektronikplatine (*GP-CX261 colour* von PANA-SONIC) und einem über zwei Spulen elektronisch steuerbaren, zoomfähigen Linsensystem (Bild 4.3 links). Objekte

mit Abmessungen von nur wenigen Mikrometern können mit bis zu 5facher Vergrößerung beobachtet werden; der Arbeitsabstand beträgt etwa 4–5 mm. Die Tiefeninformation aus dem aufgenommenen Bild kann entweder durch die in Kapitel 2.3.3.2 beschriebene Defokussiermethode oder durch Stereoskopie mittels eines zweiten, ebenfalls mit einer On-Board-Kamera ausgestatteten Mikroroboters gewonnen werden. Aufgrund der geometrischen Abmaße und des Energiebedarfs wird das Kamerasystem nicht auf einem kabellosen MiCRoN Roboter montiert, sondern auf einem dezimetergroßen *MINIMAN IV* Mikroroboter (siehe Bild 4.3 rechts) – dieser wurde ursprünglich für das flexible mikroroboterbasierte Manipulationssystem *MINIMAN* (**Mini**aturized Robots for Micro **Man**ipulation) entwickelt [WSB+01].



Bild 4.4: Rasterkraftmikroskop (AFM) als lokales Sensorsystem für mobile Mikroroboter ([BDL+04], [BDV+04], mod.)

Ergänzt werden die Kameraroboter durch Mikroroboter, die jeweils mit einem Rasterkraftmikroskop (AFM) ausgestattet, ähnlich wie beim *NanoWalker*, die Oberfläche mit Auflösungen im (Sub-)Nanometerbereich abtasten. Eine mögliche Realisierung für kubikzentimetergroße Mikroroboter basiert auf einer monolithischen Stahlstruktur mit zwei oder drei Freiheitsgraden (2-DOF bzw. 3-DOF), an der Piezoelemente als monomorphe Aktoren angebracht sind [BDV+04]. Bild 4.4 zeigt die schematische Zeichnung eines AFM-Lokalsensors (Scan Plattform) mit zwei Freiheitsgraden (2-DOF), der im LABORATOIRE DE SYSTÈMES ROBOTIQUES (LSRO) der ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL) entwickelt worden ist. Auf der linken Seite ist ein experimenteller Aufbau für die Rasterkraftmikroskop-Plattform abgebildet: Ein mobiler Mikroroboter, der hier über Kabel mit Energie und Steuersignalen versorgt wird, analysiert die Oberfläche einer Probe, die in z-Richtung über den Koordinatentisch grob und über einen Piezoaktor fein positioniert wird; ein Ausschnitt von 5,5 x 5,5 µm² der gescannten Teststruktur ist gelbfarben dargestellt [BDL+04].

4.1.2.2 Globales Sensorsystem

Für das globale Positionierungssystem *MPS*¹ der MiCRoN Manipulationsstation (Bild 4.5) wird eine Messkamera eingesetzt. In ca. 70 cm Höhe senkrecht über der Mikroroboterarbeitsfläche wird eine monochrome 4-Megapixel-CCD-Kamera mit 10bit-Graustufenauflösung montiert. Wegen der für MiCRoN geforderten hohen Genauigkeit wird die berührungslose Positionsbestimmung nicht wie beim *NanoWalker* durch Bilderkennungsverfahren mittels IR-LEDs (vgl. Kapitel 2.3.3.2) realisiert. Stattdessen kommt ein interferometrisches, auf dem Moiré-Effekt basierendes Verfahren zum Einsatz [BPL+05] – im alltäglichen Leben ist der Moiré-Effekt immer dann zu beobachten, wenn durch Überlagern zweier Gitter Interferenzmuster, die sog. Moiré-Muster entstehen.



Bild 4.5: Globales Sensorsystem der MiCRoN-Manipulationsstation: Der obere Bildbereich stellt den mechanischen und informationstechnischen Sensorsystemaufbau dar. Das untere Bilddrittel zeigt von links nach rechts das virtuelle Weltgitter, einen Moiré-Marker (jeweils drei sind auf einem MiC-RoN montiert), den Moiré-Effekt (durch Überlagerung von virtuellem Weltgitter und Marker) und die für die Bestimmung der Roboter-Posen essentiellen Moiré-Punkte ([SES+03], [MiC06], mod.).

Die ursprüngliche Moiré-Theorie geht davon aus, dass die zwei interferierenden Gitter auf eine weiße Oberfläche projiziert werden. Übertragen auf das MiCRoN Manipulationssystem werden daher auf den MiCRoN Mikrorobotern schwarz-weiße Moiré-Marker entsprechend Bild 4.5 an ausgezeichneten Positionen auf der Roboteroberseite angebracht [BPL+05]. Jede Markierung besteht aus fünf konzentrischen Kreisen. Zur Verbesserung der Auflösung besteht der Moiré-Marker nicht abwechselnd aus hart gegeneinander abgegrenzten weißen und schwarzfarbenen konzentrischen Kreisen. Der Übergang erfolgt vielmehr in mehreren Graustufen entsprechend einer kosinusförmigen Funktion, die das Auflösungsvermögen der Kamera ebenso berücksichtigt wie die Dimension der Roboterarbeitsfläche, die in dieser Konfiguration bis zu 50 x 50 cm² betragen darf. Die Markierungen des Roboters werden von der Messkamera ca. alle 0,2 s aufgenommen und auf eine den Mikroroboterarbeitsraum repräsentierende virtuelle Arbeitsfläche projiziert. Diese enthält ebenfalls eine aus konzentrischen Kreisen bestehende Markierung, das sog. Weltgit-

¹ MPS – Micro Positioning System

ter. Gemäß dem Superpositionsprinzip entstehen durch Überlagerung der nun virtuellen, konzentrischen Robotermarker mit dem virtuellen Weltgitter (virtuelle) Moiré-Muster. Bildverarbeitungsalgorithmen extrahieren aus den sich ergebenden Interferenzmustern die sog. Moiré-Punkte, über die sich das jeweilige Zentrum der konzentrischen Kreise und somit das Zentrum der Robotermarker auf 1 µm genau bestimmen lässt. Der Positionsfehler liegt für die beschriebene Moiré-Markerkonfiguration bei etwa 100 nm und nimmt mit zunehmender Anzahl der Kreise des Robotermarkers weiter ab. Durch Auswertung der ermittelten virtuellen Zentren wird schließlich die Pose der Roboter errechnet und per TCP/IP-Protokoll an die Robotersteuereinheit übermittelt.

Die Verwendung eines virtuellen Weltgitters ist gegenüber einem realen, z. B. durch Lichtprojektion oder Aufdruck erzeugten Weltgitter von Vorteil: Gitterfehler, die beispielsweise durch mechanische Verformung während des Mikrorobotereinsatzes entstehen, würden bei einem realen Weltgitter unausweichlich zu Verfälschungen des Messergebnisses führen; bei Einsatz eines virtuellen Gitters können diese Gitterfehler dagegen durch geeignete Kalibrierungsverfahren wieder eliminiert werden. Dieses mehrdimensionale Moiré-Interferenzverfahren erlaubt trotz des einfachen mechanischen Aufbaus die simultane Überwachung mehrerer Mikroroboter auf der Arbeitsfläche, da neben hoher Genauigkeit auch eine hohe Aktualisierungsrate möglich ist [SES+03].

Um objektseitige Schattenbildung und damit Fehlinterpretationen z. B. eines ungewollt in die virtuelle Welt transformierten Schattens zu verhindern, ist eine gleichmäßige Ausleuchtung des Mikroroboterarbeitsraumes zu garantieren. Zusätzlich sind für die Moiré-Interferometrie hohe Kontraste und feine Auflösungen hinsichtlich der Grauwerte der konzentrischen Kreise erforderlich, daher wird beim MPS des MiCRoN Manipulationssystems eine Direktbeleuchtung eingesetzt: Vier 25 W-Niedervolthalogenstrahler leuchten in einem Abstand von ca. 40 cm bis 50 cm die Roboterarbeitsfläche gleichmäßig aus.

4.1.2.3 Energieversorgung

Die MiCRoNs werden mittels induktiver Energieübertragung durch den sog. POWER FLOOR versorgt. Im Gegensatz zu Konzepten, wie sie in [JCG+96] oder [BPNPO2] vorgestellt sind



Bild 4.6: Durchflutung des MiCRoN POWER PACKs durch ein flächiges, wanderndes Magnetfeld ([Gao05b], mod.)

(vgl. auch die Kapitel 3.1 und B.4.1), wird für die MiCRoN Roboter die magnetische Flussänderung in der Empfängerspule dadurch erreicht, dass die Roboterspule, der sog. POWER PACK, wie in Bild 4.6 angedeutet, einem flächigen, wandernden magnetischen Feld ausgesetzt wird [Gao05a]: Hierzu wird ein Zweispulensystem aus zwei identischen Spulen eingesetzt, die in x-Richtung zueinander versetzt angeordnet sind, und deren Ströme in der Phase um $\pi/2$ differieren [Gao05b]. Die spezielle Anordnung der Spulen und ihre phasenversetzte Ansteuerung ermöglicht dem roboterseitigen



Bild 4.7: Der MiCRoN POWER FLOOR (Bildmitte) kann für biologische Experimente in ein Lichtmikroskop integriert werden (linkes Bilddrittel). Das Diagramm rechts spiegelt die Messergebnisse der Spannungswerte entlang der jeweiligen Diagonale des POWER FLOORs wider. ([MiC05], mod.).

Energiemodul, dem sog. POWER PACK, bei einem Volumen von 11,5 x x11,5 x 4 mm³ den Empfang nahezu konstanter Leistung (330 mW bei einer angestrebten roboterseitiger Versorgungsspannung von 3,3 V) entlang der gesamten Roboterarbeitsfläche [MiC05].

Der POWER FLOOR (Bild 4.7) gibt mit seinen physikalischen Abmessungen von 24 x 24 cm² die Roboterarbeitsfläche vor. Durch Halterungs- und Stabilisierungsaufbauten, die eine mechanische Ankopplung an ein Auflicht-Lichtmikroskop ermöglichen, begrenzt sich die Arbeitsfläche auf 20 x 22 cm². Für die Elektronik kommt ein aufwändiges Verstärkersystem zum Einsatz, das mittels eines Spulenstromes von 500 kHz die zeitlich sehr exakte Phasenverschiebung bei der Ansteuerung des Zwei-Spulensystems vornimmt. Doch wegen insbesondere mechanischer Abweichungen, kann ein vollständig konstantes Spannungsniveau nicht über die gesamte Fläche des POWER FLOORs hinweg garantiert werden. Dies wird im rechten Bilddrittel von Bild 4.7 deutlich. Eine roboterseitige Stabilisierungsschaltung im Anschluss an einen Vollweggleichrichter gilt es daher in den POWER PACK zu integrieren. Da bei geringer Belastung des POWER PACKs seine Ausgangsspannung 7 V übersteigen kann, wird in Ergänzung zu einem Siebkondensator eine Zenerdiode zum Schutz der nachfolgenden Roboterelektronik in den Power Pack integriert [MiC06].

4.1.3 MiCRoN Roboter

Innerhalb des MiCRoN-Projektes sollen 5 bis 10 drahtlose, kubikzentimetergroße Mikroroboter entstehen. Die On-Board-Elektronik des Roboters, die hierbei verschiedenartige Aufgaben übernimmt, setzt sich aus unterschiedlichen Modulen zusammen. Dies schließt, neben der Leistungselektronik für Energieversorgung und Aktortreiber, die Elektronikkomponenten für Energieversorgung, Kontrolle und Koordination der Roboterkomponenten einschließlich Aktorsignalformerzeugung ein. Für die informationstechnische Anbindung des Mikroroboters an die Manipulationskontrolleinheit ist eine drahtlose Kommunikationsschnittstelle zu integrieren. Aus Platz- und Energiegründen sind entsprechend Kapitel 2.4.3.3 applikationsspezifische Schaltkreise (ASICs) für sowohl die Leistungselektronik als auch die Kontroll- und Kommunikationselektronik zu entwickeln. Für die Leistungselektronik wird der applikationsspezifische Chip *PAA (Power Addressing and Amplification)* entwickelt, für die Kontroll- und Kommunikationselektronik soll der ASIC *MXS* (MiXed Signal IC Module¹) entstehen [TNS+05], [CDL+05b].





Die Laufaktorik des mobilen Mikroroboters basiert auf einem bimorphen Piezoaktor, der mittels "Stick-Slip"-Antriebsmechanismus (vgl. Kapitel B.3.3) drei Freiheitsgrade (Translation in x- und y-Richtung, θ_z -Rotation) mit nm-Auflösung bietet [BDL+04]. Bild 4.8 zeigt den piezokeramischen PZT-Antrieb, bestehend aus einem Stahlrahmen mit einer per Laser herausgearbeiteten flexiblen Struktur [MiC06]. Als mechanisches Interface dienen halbkugelförmige Saphire. Diese werden stoffschlüssig auf den sog. "Bimorph Carrier" aufgeklebt, der in dieser Konfiguration im Stepping-Modus (vgl. Kapitel B.3.3) große Schrittweiten von bis zu 800 nm erlaubt, bei einer Arbeitsfrequenz, die auf etwa 2 kHz begrenzt ist

¹ Das Akronym "MXS" stammt vom Lehrstuhl für Elektronik, Universität Barcelona (UB), Spanien.



Bild 4.9: Die Manipulationseinheit des MiCRoN-Roboters besteht aus einem per Stick-Slip angetriebenen 1-DOF-Roboterarm (blau umrahmt), der entweder mit einem Greifmechanismus (linkes Bilddrittel), einem Rasterkraftmikroskop (grün eingerahmt in der unteren Bildmitte), oder dem Injektionschip "SyringeChip" (magentafarben umrandet) ausgestattet wird. ([MiC05], [MiC06], mod.)

[BDV+04]. Für den MiCRoN-Roboter sind Schritte von 7 nm durch die Lokomotion-Plattform möglich.

Als Manipulationseinheit verfügt der MiCRoN-Roboter über einen Roboterarm, der mit verschiedenen Werkzeugen bestückt werden kann (Bild 4.9). Der rotatorische Antrieb des Roboterarms, der für den MiCRoN einen weiteren Freiheitsgrad durch Veränderung der Vertikalposition des Werkzeugs eröffnet, basiert ebenfalls auf einem piezokeramischen Aktor. Ein trapezförmiges Ansteuersignal treibt einen quasistatischen Laufmechanismus an, der die Genauigkeit erhöht und gleichzeitig einen verringerten Spitzenstrom gestattet. Der Roboterarm, mit einem minimalen Auflösungsvermögen von 0.1 µrad bei Frequenzen bis etwa 80 Hz (0,1 U/min), erzielt Kräfte bis zu 80 µN, allerdings bei Spannungen um 50 V (Energiedilemma!) – die Ansteuerspannung sollte 20 V nicht unterschreiten. Für schnellen Transport kann der Roboterarm in einem Frequenzbereich zwischen 3 kHz und 6 kHz (4 U/min) angesteuert werden [MiC05], [MiC06].

Der MiCRoN-Roboter ist derart konzipiert, dass an seinem Arm verschiedene Werkzeuge (Bild 4.9) angeschlossen werden können [MiC06]: Der aus vier Piezostapeln bestehende AFM-Scanner mit einem Volumenbedarf von 2 x 2 x 3,5 mm³ erlaubt eine Positionskontrolle des piezoresistiven AFM-Cantilevers im Bereich einiger Nanometer. Für Greifprozesse steht ein per EDM gefertigter, selbstschließender Stahlgreifer mit ca. 12 mm Länge zur Verfügung. Die Greiferelemente werden durch einen U-förmigen Piezoaktor bewegt, der aus monolithischen Strukturen zusammengesetzt ist. Ein Trapezsignal mit 20 V Spannungsamplitude erlaubt das Öffnen der Greiferelemente mit ca. 40 µm Spannweite.

Für Injektionsexperimente an biologischen Zellen wird der mikrofluidische Injektionschip "SyringeChip" des FRAUNHOFER INSTITUTS BIOMEDIZINISCHE TECHNIK IBMT eingesetzt [Tag05]: Dieser besteht aus einer Mikronadel, einem integrierten Flüssigkeitsreservoir und einem thermo-pneumatischen Aktor. Die Nadel, die in den beiden linken Teilansichten (REM-Aufnahmen) aus verschiedenen Perspektiven dargestellt ist, besitzt einen Außendurchmesser von nur 2 µm, um die Verletzung der Zellmembran gering zu halten. Aufgrund des integrierten Flüssigkeitsreservoirs, welches in der REM-Ansicht rechts oben als Erhebung gut erkennbar ist, können nach dem Befüllen zwischen 100 und 1000 Injektionen sequentiell ohne Wiederbefüllen durchgeführt werden. Für den Aktor wird ein membranloses Aktuationsprinzip eingesetzt, das auf einem in den Chip integrierten Heizelement beruht. Für eine kontrollierte Injektionsdurchführung ist zusätzlich ein Temperatursensor integriert, so dass in Verbindung mit der Roboterkontrollelektronik, d. h. dem Roboter-Kontroll-ASIC *MXS*, ein geschlossener Regelkreis mit PID-Regler für die Injektionsexperimente entsteht [TNS+05]: Die entsprechenden Reglerparameter sind hierbei per drahtloser Kommunikationsschnittstelle von der Steuerungseinheit an den Mikroroboter zu übermitteln.

4.2 Kommunikationssystem - Anforderungen

Bevor in den darauffolgenden Kapiteln die Konzeption und Umsetzung eines Kommunikationssystems vorgestellt wird, das für Mikromanipulationsstationen mit mobilen, drahtlosen kubikzentimeterkleinen Mikrorobotern geeignet ist, werden die wesentlichen Anforderungen an ein solches Datenübertragungssystem nochmals zusammengefasst.

- Drahtlose Roboter einer Mikromanipulationsstation erfordern einen bidirektionalen Kommunikationskanal, da einerseits Kommandodaten zu den Robotern, und andererseits Messdaten oder Statusinformationen von den Robotern zu übermitteln sind.
- Für komplexere Aufgaben müssen am Manipulationsprozess gleichzeitig mehrere Roboter beteiligt sein (Kapitel 2.4.3.2); das Kommunikationssystem ist daher multiroboterfähig auszulegen.
- Dabei kann auf Interroboterkommunikation verzichtet werden, da die Roboter aufgrund ihrer begrenzten On-Board-Ressourcen nicht autonom agieren.
- Vielmehr übernimmt eine externe Steuerungseinheit (Kapitel 2.3.3.4) die Koordination der kooperierenden Mikroroboter, weshalb ein globaler Kommunikationskanal einzurichten ist. Dieser muss neben der individuellen Roboterkommunikation auch das gleichzeitige Ansprechen aller beteiligten Roboter (Broadcast) ermöglichen, um z. B. im Falle einer kritischen Prozessituation (Kollisionsgefahr, etc.) schnell in die mikroroboterseitige Kontrollelektronik im Sinne eines Notauslösers eingreifen zu können.
- Es muss eine hohe Datenrate verfügbar sein, um eine Überlastung des globalen Kommunikationskanals zu vermeiden und jederzeit ein schnelles Ansprechen der einzelnen Roboter garantieren zu können.
- Aufgrund des Energiedilemmas (Kapitel 2.4.3.3) ist dabei einerseits auf geringen statischen und dynamischen Energiebedarf zu achten.
- Andererseits wird eine robuste Verbindung gefordert, die durch umgebende Mikroroboterkomponenten nicht beeinträchtigt wird und auch eine induktive Energieeinspeisung mit teilweise schwankenden Spannungsversorgungspegeln verkraftet. Dennoch auftretende Übertragungsfehler müssen detektierbar sein. Fehlinterpretationen von übermittelten Datenpaketen sind unbedingt zu vermeiden, um die empfindlichen Mikroroboter bzw. Werkzeuge nicht zu gefährden. Es wird eine möglichst niedrige Bitfehlerhäufigkeit (BER<10⁻⁶) gefordert, um die Anzahl der durch Übertragungsfehler hervorgerufenen Datenpaketwiederholungen gering zu halten. Neben einem höheren Datendurchsatz spart dies im Normalbetrieb Energie und reduziert in einer kritischen Prozesssituation die Transferzeit z. B. zur Übertragung der Notstopp-Sequenz.
- Das Volumen von kubikzentimeterkleinen Robotern begrenzt den zur Verfügung stehenden Platz erheblich. Daher ist die Kommunikationselektronik nach Möglichkeit innerhalb der Mikroroboterkontrollelektronik zu integrieren und zusätzlich die Anzahl der Bauteile für ein analoges Frontend auf ein Minimum zu reduzieren.
- Die Hardware des Kommunikationssystems muss zu den Komponenten einer Mikromanipulations-Tischstation mit mobilen drahtlosen Mikrorobotern kompatibel sein. Weder die Energieversorgung, noch die globalen und lokalen Sensorsysteme (Kapitel 2.3.3.2) dürfen beeinträchtigt werden; die Mikroroboterelektronik sollte durch die Kommunikationselektronik möglichst unbeeinflusst bleiben (kein Übersprechen, keine hochfrequenten Störungen).
- Um die Adaption an neue und die Integration in bestehende Systeme zu erleichtern, soll möglichst auf standardisierte Schnittstellen zurückgegriffen werden (siehe auch Kapitel 2.2 und 2.4.1). Dies betrifft einerseits das drahtlose Kommunikationsverfahren selbst. Andererseits muss die Kommunikationselektronik sowohl an die Hardware der Mikroroboter als auch an die Hardware des modularen Steuerungssystems (PC-Cluster) elektronisch angebunden werden. Weiterhin ist eine mechanische Anpassung erforderlich, zum einen an die Bauform des Mikroroboters und seiner Komponenten (Sensoren, Aktoren, Kontroll- und Ansteuerelektronik), zum anderen an die externen Baugruppen der Mikromanipulationsstation mit ihren lokalen und globalen Sensorsystemen.

4.3 Kommunikationssystem - Aufbau

4.3.1 Kommunikationskonzept

Aus dem Anforderungskatalog des Kapitels 4.2 abgeleitet, wird für das Kommunikationssystem in einer Mikromanipulationsstation mit drahtlosen, mobilen Mikrorobotern ein **Single-Master-Multi-Slave-Konzept** entsprechend Bild 4.10 vorgeschlagen: Mittels optischer Infrarot-Übertragungstechnik wird in Anlehnung an den IrDA-Standard, mit Intensitätsmodulation und direkter Detektion (IM/DD) nach Kapitel 3.4.3, ein globaler Kommunikationskanal ohne (lokale) Interroboterkommunikation implementiert – eine Begründung für die Wahl des optischen IR-Übertragungsverfahrens findet sich in Kapitel 4.4. Die Steuerungseinheit, im Folgenden auch als Host bezeichnet, initiiert sämtliche Übertragungen von und zu den Mikrorobotern. Im sog. **Downlink** werden Daten an einen oder im Falle des Rundrufs (Broadcast) an alle Roboter transferiert. Der **Uplink** beschreibt den Datentransfer von einem Roboter zur Steuerungseinheit. Um eine gleichzeitige Nutzung und damit Überlastung des optischen Kommunikationskanals zu vermeiden, ist zu gewährleisten, dass jederzeit jeweils nur ein Roboter Datenpakete zurücksenden kann.



Bild 4.10: Konzept des Kommunikationssystems für eine mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstation mit energetisch und informationstechnisch drahtlos angebundenen Mikrorobotern

Zur Anbindung des Kommunikationssystems an die Hardware der Manipulationssteuerungseinheit wird eine USB2.0-Schnittstelle realisiert, da sich USB als Single-Master-Bus nahtlos in die Single-Master-Multi-Slave-Konzeption einfügt: Bei USB besitzt nur der Host Masterfunktionalität und kann Datentransfers auf dem Bus initiieren [Kel03].

Für die Integration des Kommunikationssystems in eine aus zahlreichen verschiedenartigen Komponenten bestehende Manipulationsstation werden ein modularer Aufbau und eine Aufteilung der Kommunikationsstrecke auf zwei separate Teilbereiche vorgesehen. Im Sinne des Single-Master-Multi-Slave-Konzeptes umfasst der erste Teilbereich die USB-Kommunikation zwischen dem Steuerungssystem und der Kommunikationszentrale, kurz ROBOCOMM. Die zweite Teilstrecke realisiert die drahtlose IR-Kommunikationsverbindung zwischen ROBOCOMM und den mobilen Mikrorobotern der Mikromanipulationsstation. Diese zweigeteilte, modulare Architektur erlaubt einerseits die Reduktion der Systemkomplexität, andererseits erleichtert sie die Anpassung an neue Umgebungsparameter und veränderte Hardwarespezifikationen von sowohl Roboter als auch Steuerungseinheit – aufgrund der interdisziplinären Komplexität der Mikromanipulationsstation ist mit sich ändernden Spezifikationen jederzeit zu rechnen.

Analog-Frontends sorgen sowohl roboterseitig als auch seitens der Basisstation ROBO-COMM für die optische Modulation bzw. Demodulation. Jedes Analog-Frontend wird aus kommerziell erhältlichen Komponenten, insbesondere einem IrDA-kompatiblen Transceivermodul für IM/DD, aufgebaut. Dies erlaubt einen robusten IR-Link, da industriell gefertigte Komponenten bereits durch den Hersteller auf Funktionsfähigkeit und Störanfälligkeit geprüft werden. Um der begrenzten IR-Abdeckung, bedingt durch den Richtungsgewinn (Kapitel 3.4.4) eines einzelnen IR-Transceivermoduls, entgegenzuwirken, werden seitens der Basisstation gleich mehrere Analog-Frontends räumlich verteilt eingesetzt – für die Manipulationsstation MiCRoN finden, wie in Bild 4.10 bereits angedeutet, vier Analog-Frontends gleichzeitigen Einsatz.

Jedes Analog-Frontend soll über eine digitale SITC-Schnittstelle (weitere Informationen zu SITC in Kapitel 4.6.1) verfügen, die es erlaubt, verschiedene Parameter, insbesondere eine Obergrenze für den IR-Sendestrom des angeschlossenen Transceivermoduls einzustellen. Hierdurch böte sich der Steuerungseinheit eine elegante Möglichkeit, per Remote-Zugriff (IR-Schreibzugriff) über die Empfangselektronik des Roboters auf dessen Analog-Frontend zuzugreifen, um den Sendestrom und damit den Energiebedarf für IR-Übertragungen vom Roboter zurück zur Basisstation fernzusteuern (Kapitel 4.3.2).

Die einzelnen Komponenten des Kommunikationssystems werden weitestgehend mittels digitaler Schaltungstechnik anwendungsspezifisch realisiert. Für die Basisstation ROBO-COMM wird eine Platine mit XILINX-FPGA-Baustein – künftig vereinfacht als FPGA-Board bezeichnet – eingesetzt. Das FPGA-Design setzt einerseits das in Kapitel 4.6.2 beschriebene IR-Kommunikationsprotokoll um und realisiert anderseits die informationstechnische Anbindung an die Steuerungseinheit per USB 2.0-Schnittstelle. Für die Umsetzung der physikalischen USB-Spezifikation (Low-Level Protokoll) wird ein USB 2.0-Schnittstellen-Controller eingesetzt, der, über das FPGA angesteuert, ROBOCOMM als USB 2.0-Compositegerät mit mehreren, unabhängigen Schnittstellen (*USB-Interfaces*) an die Steuerungseinheit anbindet – bei einem Compositegerät teilen sich sämtliche über die Kombination von FPGA und USB2.0-Controller realisierbaren USB-Functions eine Message-Pipe bzw. einen gemeinsamen Control-Endpoint 0 (EP0) [Kel03]. Softwareseitig wird ein Low-Level-Treiber für USB-Schreib- und Lesezugriffe implementiert (Kapitel 6.3).

Für die roboterseitige Umsetzung der IR-Kommunikation wird in Ergänzung zum Analog-Frontend ein applikationsspezifischer digitaler Schaltkreis, der digitale ASIC "*IRC*" (Infra**R**ed **C**ore) als digitales Standardzellen-Design entwickelt. Dieser kann platzsparend in die Roboterelektronik integriert werden – im Falle der Manipulationsstation MiCRoN wird *IRC* direkt in den Roboter-Kontroll-ASIC *MXS* (vgl. Kapitel 4.1.3) eingebettet.

Die Vorteile einer Realisierung mittels digitaler Schaltungstechnik sind offensichtlich:

 Zunächst ist ein Digitalentwurf weniger empfindlich gegenüber äußeren Störeinflüssen, hervorgerufen z. B. durch induktive Energieversorgung oder Strom- und Spannungsspitzen der Aktoransteuerelektronik, zumal die einzelnen Komponenten bei miniaturisierten Mikrorobotersystemen auf engstem Raum angeordnet sind.

- Weiterhin wird die Anpassung an Spezifikationsänderungen vereinfacht: Bedingt durch die ASIC- bzw. FPGA-Schaltungsentwicklung mittels Hardwarebeschreibungssprache (vgl. Kapitel 4.5) können die Komponenten zur Umsetzung des IR-Protokolls gleichzeitig für die FPGA-Realisierung als auch den ASIC eingesetzt werden (Entwurfsregularität). Auf diese Weise werden Änderungen und Ergänzungen am IR-Protokoll gleichzeitig für die Basisstation und die ASICs der Roboter übernommen.
- Zusätzlich wird mittels FPGA-Board die Verifikation vereinfacht: Teilkomponenten des *IRC* oder gar der vollständige, digitale ASIC (dies ist abhängig von der äquivalenten Gatterzahl des FPGAs) lassen sich bereits vor Beginn der Chipfertigung, d. h. vor dem Tape-Out, funktional in Echtzeit verifizieren: Eventuelle Inkompatibilitäten zu den Analog-Frontends lassen sich auf diese Weise ebenso erkennen, wie Fehler im Kommunikationsprotokoll oder bei der Verarbeitung korrekt bzw. fehlerhaft empfangener Datenpakete. Weiterhin können technische Verfahren, die, unter Berücksichtigung der Transceivermodul-Charakteristik, die elektrische Modulation bzw. Demodulation verbessern sollen, schneller auf ihre Effizienz hin überprüft werden (Weiteres hierzu in Kapitel 5.3).

4.3.2 Single-Master-Multi-Slave-Konzept

Dieser Abschnitt soll den durch das Single-Master-Multi-Slave-Konzept vorgegebenen Kommunikationsablauf zur Datenübertragung zu bzw. von den Mikrorobotern näher beleuchten. Da mehrere Roboter im Sinne einer Kooperation gleichzeitig in der Manipulationsstation zum Einsatz kommen können, besitzt jeder Roboter eine einzigartige, unverwechselbare Roboter-Identifikationsnummer (kurz Roboter-ID), die nach Anschluss der roboterseitigen Spannungsversorgung jedem Roboter von der Steuerungseinheit per Remote-Zugriff individuell zugewiesen werden kann (Genaueres hierzu in Kapitel 4.6.2.2).

Alle Datentransfers werden von der Steuerungseinheit, dem Host, per USB-Schnittstelle initiiert. Im Downlink (Roboter-Schreibzugriff) werden zunächst USB-Datenpakete per Schreibzugriff auf die Basisstation ROBOCOMM (FPGA-Board) übertragen. Diese übermittelt, nach elektrischer Modulation durch das FPGA-Design und optischer Modulation durch das Analog-Frontend, IR-Datenpakete an alle Roboter der Mikromanipulationsstation. Die von den Analog-Frontends der Mikroroboter optisch demodulierten IR-Pulspakete werden vom jeweiligen IRC elektrisch demoduliert, auf Übertragungsfehler hin überprüft und bei passender Roboter-ID verarbeitet. Hierbei wird zwischen IRC-Kontrolldaten und Roboterkontrolldaten unterschieden – jedes Datenpaket enthält zur Unterscheidung eine Information über den Typ der übermittelten Nachricht. Im Falle von Roboterkontrolldaten werden insbesondere Signalformparameter für die Aktoransteuerelektronik von Lokomotion, Roboterarm oder Mikroroboterwerkzeug gesendet (vgl. hierzu auch die Überlegungen auf Seite 39 des Kapitels 2.4.3.3). IRC-Kontrolldaten, auch als IRC-Befehle bezeichnet, dienen zur Konfiguration und Anpassung des IR-Links hinsichtlich Übertragungsmodus, Datenrate und weiterer Übertragungsparameter wie z. B. Roboter-ID; zusätzlich werden per IRC-Befehl auch Einstellungen (Registereinträge) für das über SITC programmierbare Analog-Frontend übersendet, vor allem der IRC-Befehl zur Anpassung bzw. Begrenzung des IR-Sendestromes (vgl. Kapitel 4.6.1.2) ist hier wesentlich.

Fordert die Steuerungseinheit Statusinformationen oder Messerwerte eines Roboters an (Roboter-Lesezugriff), so ist dem jeweiligen Roboter-*IRC* zunächst per Downlink mitzuteilen, welche Daten an die Steuerungseinheit zu übermitteln sind. Diese werden daraufhin vom *IRC* zusammengetragen, entsprechend dem IR-Kommunikationsprotokoll sowohl elektrisch als auch optisch moduliert und im Uplink zunächst an die Basisstation ROBO-COMM und schließlich per USB-Lesezugriff an die Steuerungseinheit transferiert. Werden Messwerte (z. B. vom AFM) angefordert, so liest *IRC* die Messdaten aus den entsprechenden Registern der Roboterkomponenten-Elektronik. Bei angeforderten Statusinformationen ist zu differenzieren: Es können sowohl der Status des *IRC*s einschließlich des AnalogFrontends, als auch Statusangaben von den übrigen Roboter-Komponenten abgefragt werden. Letztgenannte werden vom *IRC* wie Messdaten verarbeitet: Die gewünschten Registerinhalte der Roboterkomponenten-Elektronik werden ausgelesen und per IR-Pulsfolge an ROBOCOMM übermittelt. Im Falle angeforderter *IRC*-Statusinformationen ist kein Zugriff auf weitere Roboterkomponenten erforderlich. Die gewünschten Informationen werden direkt aus den *IRC*-Statusregistern entnommen; gegebenenfalls wird per SITC-Schnittstelle lesend auf die Register des Analog-Frontends zugegriffen. Daran anschließend werden die *IRC*-Statusangaben in einem Datenpaket verpackt, elektrisch moduliert und mittels Analog-Frontend an die Basisstation ROBOCOMM transferiert. Dort kann per USB-Lesezugriff auf die übertragenen *IRC*-Statusdaten zugegriffen werden.

4.4 Auswahl der Kommunikationsverfahren

4.4.1 Kommunikation RoboComm ⇔ Mikroroboter

4.4.1.1 Entscheidung für optische IR-Übertragung

Im Bereich der mobilen Roboter hängt die Kommunikationsfähigkeit meist von den Faktoren wie Roboterumgebung, Robotergröße, Budget und weiteren durch die Entwickler vorgegebenen Bestimmungen des Leistungskatalogs ab. Je größer die Roboter sind, desto vielfältiger sind die Möglichkeiten, eine störungsarme, schnelle und unempfindliche Kommunikationsstrecke zu realisieren. Da *stigmergy* (vgl. Kapitel 3.1) derzeit keine technisch adäquate Kommunikationslösung darstellt, konzentriert sich die Robotik auf den expliziten Datenaustausch über Nachrichten. Hierbei wird sich vor allem der offenen Technologiestandards bedient. Dies sind einerseits Funklösungen auf den lizenzfreien ISM-Frequenzbändern (RF-Systeme bei 433 MHz, 868 MHz oder 2,4 GHz), andererseits individuelle optische Kommunikationslösungen, meist im nahen Infrarotbereich, die unter Berücksichtigung der Vorgaben zur Augensicherheit ebenfalls keiner expliziten Zulassung bedürfen.

Störunanfällige Übertragung mit hoher Datenrate bei geringem Energiebedarf

Der Anforderungskatalog (Kapitel 4.2) enthält die wesentlichen Kriterien für die Auswahl eines geeigneten drahtlosen Kommunikationsverfahrens für miniaturisierte, energieautonome Mikroroboter. Die in Kapitel 3.3.4 aufgeführten Aspekte legen die Schlussfolgerung nahe, dass derzeitig existente Funkübertragungssysteme die Anforderungen an eine störunanfällige Übertragung mit hoher Datenrate bei niedrigem Energie- und Platzbedarf für den Einsatz in einer flexiblen, auf drahtlosen, mobilen Mikrorobotern basierenden Mikromanipulationsstationen kaum erfüllen können. Daher wird ein optisches Übertragungsverfahren im nahen Infrarotbereich für die Kommunikation zwischen Mikroroboter und Steuerungseinheit ausgewählt – die Entscheidung für den Nahinfrarotbereich liegt in dem gro-Ben Angebot an IR-Transceivermodulen für den entsprechend dem IrDA-Standard spezifizierten IR-Wellenlängenbereich zwischen 850 nm und 900 nm begründet.

Für den Einsatz der IR-Technologie in der autonomen Robotik, angefangen bei Mesoskalarobotern bis hin zu Mikrorobotern, wird aus Energiegründen eine direkte Sichtverbindung gefordert. Zahlreiche Forschungsergebnisse bzgl. verschiedener Übertragungsund Codierungstechniken im Falle von diffuser Infrarotkommunikation lassen keinen Zweifel am energetischen Vorteil der direkten Sichtverbindung aufkommen (vgl. Kapitel 3.4.1).

Die Forderung nach einer direkten Sichtverbindung, eine räumlich beschränkte Erreichbarkeit implizierend, wird von Verfechtern der verschiedensten funkbasierten Systeme meist als schwerwiegender Nachteil nicht nur der Infrarotkommunikation, sondern sämtlicher optischer Kommunikationsverfahren aufgeführt. Doch dieselbe eingeschränkte Ortsauflösung kann sich, wie bei den verteilten, kooperativen Roboterschwärmen, auch für auf mobilen Mikrorobotern basierende Mikromanipulationsstationen als vorteilhaft erweisen: Eine Station erfordert aufgrund der kleinen Roboterabmessungen nur relativ kleine geometrische Abmessungen, ihre Größe wird gegenwärtig hauptsächlich durch die Visualisierungssysteme oder Klimakammer vorbestimmt. IR-Kommunikation besitzt nun gegenüber Funklösungen den systemimmanenten Vorteil, den Datenverkehr auf das Volumen der Mikromanipulationsstation begrenzen zu können. Eine gegenseitige Beeinflussung mit umgebenden Systemen, wie sie bei Funksystemen (Bluetooth, ZigBee, WLAN, etc.) gegeben ist, wird vermieden. Gleichzeitig lassen sich mehrere Manipulationssysteme des gleichen Typs nebeneinander (eventuell durch einen Sichtschutz getrennt) aufstellen, ohne weitere Vorkehrungen z. B. am Kommunikationsprotokoll vornehmen zu müssen.

Geringe Bauteil- und Rechnerressourcen

Infrarotkommunikation zeichnet sich dadurch aus, dass nur wenige Komponenten notwendig sind, und Ad-hoc-Infrarotschnittstellen verglichen mit Bluetooth nur relativ geringer Rechnerressourcen bedürfen (Kapitel 3.4.8). Hierbei ist weiterhin vorteilhaft zu berücksichtigen, dass wenn keine IR-Datenübertragung stattfindet, das IR-Protokoll keine CPU Rechenzeit und damit keine Energie benötigt – ganz im Gegensatz z. B. zu Bluetooth, da dort im Normalempfangsbetrieb (d. h. kein Idle- bzw. Standby-Betrieb) ständig eine Synchronisation bzgl. der Frequenzsprünge (FHSS) erforderlich ist. Werden die Energiesparmodi von Bluetooth dagegen intensiver genutzt, so ist mit z. T. erheblichen Übertragungsverzögerungen zu rechnen (vgl. Tabelle 3.7 in Kapitel 3.3.3.1).

Die Ressourcen einsparende Umsetzung macht die Infrarotkommunikation auch für verteilte Roboterschwärme mit autonomen Mesoskala- und Miniaturrobotern interessant [MFI93], [HKKV98], [FMSA99]. Bereits mit begrenzten On-Board-Ressourcen lassen sich im autonomen Roboter implementierte IR-Abstandssensoren für einen Informationsaustausch per Infrarotsignal umfunktionieren, wenn auch meist nur mit niedrigen Übertragungsgeschwindigkeiten im Bereich bis zu wenigen kbit/s [CES02]. Zusätzlich können die meist als Nachteil aufgeführten Aspekte, IR-Kommunikation erfordere eine direkte Sichtverbindung und erlaube keine direkte Kommunikation mit Robotern außerhalb des Sichtbereichs, bei diesen Systemen als Vorteil ausgenutzt werden: Durch die begrenzte Reichweite lässt sich der Datenaustausch mittels Infrarotkommunikation auf unmittelbar benachbarte Mikroroboter eingrenzen, um ein Verhalten ähnlich dem von sozialen Insektengruppen zu erzielen (*stigmergy*-Emulation) [FGM+99].

Störanfälligkeit: Optik contra Funk

Nachteilig bei mobilen Robotersystemen mit Infrarotkommunikation ist die Anfälligkeit gegenüber "Wärmequellen" mit Strahlungsanteilen im Infrarotbereich [MVD96]; insbesondere durch Sonnenlicht, Glühbirnen und Leuchtstoffröhren können die infrarotbasierten Kommunikationssysteme erheblich gestört werden (vgl. Kapitel 3.4.4).

Trotz dieser Störanfälligkeit des optischen Kommunikationskanals lassen sich optische Systeme, insbesondere bei gerichteten LOS-Verbindungen, gegenüber Funklösungen als robuster einstufen (Kapitel 3.4.8), da sich die Störeinflüsse durch technische Maßnahmen, wie z. B. optische Filter, Konzentratoren oder adaptive Verstärkerschaltungen, stark reduzieren lassen. Dies veranschaulicht bereits ein Vergleich der beiden WPAN-Standards IrDA und Bluetooth hinsichtlich der zulässigen bzw. erzielbaren Bitfehlerraten: Hier übertrumpft das infrarotlichtbasierte Übertragungsverfahren mit einer BER von 10⁻⁸ den Bluetooth-Standard deutlich, der sich mit einer BER von 10⁻³ zufrieden geben muss.

Darüber hinaus liegt der Energiebedarf bei Funklösungen häufig höher als bei optischen Übertragungsverfahren. Das energiehungrige WLAN beispielsweise arbeitet je nach umgesetztem Standard im für weitere Funklösungen offenen 2,4-GHz-ISM-Frequenzband. Die theoretisch sehr hohen Bruttodatenraten von 54 Mbit/s und höher lassen sich jedoch nur für große Paketgrößen realisieren [WMW05], und dies auch nur dann, wenn keine weiteren unabhängigen Funksysteme wie *Bluetooth* oder *ZigBee* im WLAN-Wirkbereich vorhanden sind. Die Einschränkung "unabhängig" soll hier darauf hindeuten, dass in der Robotik theoretisch ähnliche Lösungen vorstellbar sind, wie sie z. B. bei Notebookherstellern bereits umgesetzt werden: Dort wird zur gemeinsamen Implementierung von Wi-Fi und Bluetooth-Standard auf VLSI-Designs gesetzt, die als Ein-Chip-Lösungen nicht mehr unabhängig voneinander die Module beider Standards kontrollieren und daher eine gegenseitige Funktionsstörung durch gleichzeitiges Senden vermeiden können [Phi05]. Aber nicht zuletzt wegen fehlender Normen (vgl. Kapitel 2.2) ist gegenwärtig kein ungestörter Einsatz von ISM-Band-Funksystemen gewährleistet – sofern keine aufwändigen Abschirmmaßnahmen z. B. in die Klimakammer der Mikromanipulationsstation integriert werden.

Dieser Nachteil wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass immer mehr Funklösungen, die sich der offenen ISM-Bänder bedienen, in IEEE-Standards zusammengefasst bzw. spezifiziert werden – als anschauliches Beispiel lässt sich hierfür der Standard IEEE 802.15 (vgl. Kapitel 3.3.3.2) bemühen, der neben seinen Spezifikationen für die im 2,4 GHz-Bereich arbeitenden Funklösungen Bluetooth, IEEE 802.15.3 und ZigBee auch Konzepte und Grundlagen für weitere proprietäre Funklösungen wie z. B. NanoNet oder Cypress' WirelessUSB anbietet. Die im Sinne der Kompatibilität grundsätzlich als positiv zu bewertende Tatsache der Standardisierung wirkt sich hier eher nachteilig aus, da immer mehr Hersteller Produkte für die verschiedenen, nicht vollständig kompatiblen Kommunikationsstandards der offenen Frequenzbänder anbieten. Zwar ist in Simulationen und praktischen Anwendungen eine funktionierende Koexistenz verschiedener Systeme nicht grundsätzlich ausgeschlossen, jedoch führt eine steigende Anzahl der Kommunikationssysteme und partner schließlich zum Kollaps des RF-Kommunikationskanals und damit zum Verlust der Kommunikationsfähigkeit [WMW05] – hierzu sei an die desaströse Einführung des Bluetooth-Standards auf der CeBit 2001 verwiesen, bei der innerhalb der für die Bluetooth-Technologie extra reservierten Halle die vorhandenen Geräte sich derart gestört haben, dass selbst Geräte desselben Standards nicht mehr zur Kommunikation in der Lage waren.

Die ständig zunehmende Nachfrage nach standardisierten, drahtlosen Büro- bzw. Industrielösungen, wird zu einer weiteren Zunahme unkoordinierter Netzwerke und damit zu einer Zunahme möglicher Störquellen führen, zumal diese Netzwerke gerade wegen der Verwendung des offenen ISM-Frequenzbandes kostengünstig realisierbar sind. Daher bleibt es fraglich, ob auf ISM-Frequenzbändern basierende Funktechnologien für Mikromanipulationsstationen mit drahtlosen mobilen Robotern sinnvoll sind. Hier kann ein optisches Übertragungsverfahren seinen Vorteil ausspielen, trotz einer großen Anzahl vorhandener Funksysteme, Daten einfach, energiesparend, schnell und vor allem ungestört übertragen zu können. Verbunden mit der ohnehin geringeren BER wirkt das optische Kommunikationssystem im Vergleich zu einer vergleichbaren Funklösung robuster.

4.4.1.2 Zusätzliche Parameter eines Kommunikationssystems

Die Kommunikationstechnik stellt lediglich die Basisbedingungen für die direkte Kommunikation dar. Weitere wichtige Parameter, die das Kommunikationssystem maßgeblich charakterisieren, gilt es bei der Entwicklung unbedingt zu berücksichtigen:

- Übertragungsreichweite: Ist die Kommunikationsreichweite zu klein, so ist der Datenaustausch zwischen Steuereinheit und Roboter nicht gewährleistet, dies gilt es auf jeden Fall zu vermeiden. Ist die Reichweite dagegen zu groß, so könnten sich ohne Sichtbarrieren benachbarte oder aber auch weiter entfernt angeordnete Mikromanipulationsstationen gegenseitig beeinflussen und behindern.
- Kommunikationsbereich: Im Idealfall deckt das Kommunikationssystem den vollständigen Arbeitsbereich des mobilen Mikroroboters ab auf den ersten Blick scheint diese Forderung bei einer Funklösung erfüllt zu sein, aber es sei an dieser Stelle nochmals auf die in Kapitel 3.3.4 erwähnte Studie SFB425 der Uni Karlsruhe bzgl. Wellenausbreitung und Signalschwankungen bedingt durch Interferenz verwiesen. Im Falle einer optischen Lösung (IR-LEDs oder IR-LDs) kann eine vollständige Abdeckung aufgrund der Richtcharakteristik nicht ohne weiteres gewährleistet werden (Kapitel 3.4.4).
- Nachrichtenlänge: Kurze Nachrichten produzieren aufgrund ihres Nachrichtenkopfes, der z. B. Quellen-ID, Ziel-ID und Nachrichtentyp enthält, großen Overhead; bei großen Nachrichten ist dagegen die Wahrscheinlichkeit eines Übertragungsfehlers höher als bei Kurznachrichten.
4.4.2 Kommunikation RoboComm ⇔ Steuerungseinheit

Für die drahtgebundene Anbindung von Peripheriegeräten an einen PC stehen zahlreiche standardisierte Anschlussoptionen zur Auswahl. Da für die IR-Datenübertragung zwischen der Basisstation ROBOCOMM und den Mikrorobotern in einer ersten Entwicklungsphase Datenraten von bis zu 4 Mbit/s angestrebt werden, scheidet die serielle Schnittstelle RS-232 mit Datenraten zwischen 9,6 kBaud und 115,2 kBaud ebenso aus, wie der Parallelport mit seinen Varianten IEEE 1284, EPP und ECP (ca. 1,5 Mbit/s bis 2,1 Mbit/s). Alternativ gilt es zwischen den Standards Ethernet, IEEE 1394 (auch als FireWire™ bekannt), und dem Universal Serial Bus (USB) auszuwählen. Bzgl. der Übertragungsgeschwindigkeit werden diese drei Standards selbst bei einer IR-Datenübertragung im VFIR-Modus mit 16 Mbit/s nicht überfordert: FireWire™ unterstützt bereits in der einfachsten Variante IEEE 1394a Datenraten von 400 Mbit/s, die Weiterentwicklung IEEE 1394b gar Übertragungsraten zwischen 800 Mbit/s und 3,2 Gbit/s [Lat00]. Auch Ethernet in seinen Varianten Fast Ethernet (100 Mbit/s) und Gigabit Ethernet (1000 Mbit/s) kann die möglichen IR-Datenraten problemlos bedienen. Bei Verwendung von USB wäre zumindest eine Full-Speed-Schnittstelle vorzusehen, da eine 4Mbit-FIR-Übertragung bereits die Datenrate für Low-Speed-USB übersteigt (vgl. Kapitel 3.5.1).

Bei USB als Single-Master-Bus kommuniziert ein einzelner Host-Controller mit bis zu 127 sternförmig angeschlossenen USB-Geräten. Da der Host sämtliche komplexen Kommunikationsaufgaben übernimmt, ist die Elektronik der USB-Geräte relativ einfach und kostengünstig zu realisieren. Im Gegensatz zur Sternnetzstruktur von USB ist mit IEEE 1394 eine Busstruktur mit max. 1024 Bussen und max. 64 Teilnehmern pro Bus realisierbar. Jedes IEEE1394-Gerät kann dabei als Host agieren und mit jedem anderen Gerät direkt kommunizieren; eine Übertragung an mehrere Empfänger ist gleichzeitig möglich. Diese gegenüber USB höhere Flexibilität erfordert jedoch eine aufwändigere und teurere Elektronik für IEEE1394-Geräte [Axe05]. USB-Peripherie gilt auch verglichen mit Ethernet als einfacher zu realisieren [Axe05], und dies trotz der Tatsache, dass USB mit seinen vier verschiedenen Transferarten [Kel03] und einer Vielzahl vordefinierter Klassen (HID, Massenspeicher, Maus, etc.) verglichen mit Ethernet vielseitiger einsetzbar ist. Es gilt festzuhalten, dass die grundsätzlichen Geschwindigkeits- und Flexibilitätsvorteile von Ethernet bzw. FireWire™ durch komplexere und daher teurere Hardwareimplementierungen erkauft werden müssen [Lat00], [Kel03], [Axe05].

Da für die Umsetzung des Mikroroboterkommunikationssystems keine große Anzahl von Geräten miteinander zu verbinden ist, und weder große Kabellängen, noch Broadcastoder IP-Fähigkeiten für die kabelgebundene Anbindung von ROBOCOMM an die Hardware der Steuerungseinheit gefordert werden, spricht neben der geringeren Komplexität insbesondere die nahtlose Integration des Single-Master-Busses in das Single-Master-Multi-Slave-Konzept für USB als geeignete Schnittstelle. Weiterhin erlauben verschiedene USB-Transferarten trotz geringerer Gesamtkomplexität die Auswahl eines passenden Übertragungsmodus bzw. Übertragungsverfahrens. Darüber hinaus wird die USB-Geräteentwicklung dadurch begünstigt, dass für das Open-Source-Betriebssystem LINUX in der Kernelversion 2.6, welches auch die Basis für die Mikromanipulationsstation MiCRoN darstellt, insbesondere sog. USB-Treiber-Skelette verfügbar sind. Diese können bereits nach ersten Anpassungen von sowohl Product-ID als auch Vendor-ID (vgl. [QK04]) die Entwicklung des ROBOCOMM-USB-Gerätes dahingehend unterstützen, dass zumindest das Enumerationsverhalten der ROBOCOMM-USB-Hardware, unmittelbar nach Anschluss von ROBOCOMM am USB-Port des LINUX-PCs, getestet werden kann. Um für zukünftige Hochgeschwindigkeitsübertragungen wie z. B. VFIR oder gar die noch in der Entwicklungsphase befindliche Variante UFIR (Ultra Fast Infrared) mit 100 Mbit/s gerüstet zu sein, wird für die Basisstation ROBOCOMM standardmäßig eine USB2.0-Schnittstelle vorgesehen. Für ältere PC-Systeme ohne USB2.0-Schnittstelle wird aus Kompatibilitätsgründen zusätzlich eine USB 1.1 Full-Speed Variante implementiert.

4.5 ASIC-/FPGA-Entwurf

Für die applikationsspezifische Digitalschaltungsentwicklung wird auf den vom Autor am IBMT implementierten Design-Flow von MENTOR GRAPHICS, insbesondere auf das Entwicklungswerkzeug *FPGA Advantage for HDL Design*, zurückgegriffen. Dieser Design-Flow zeichnet sich dadurch aus, dass insbesondere für die Bereiche Logikbeschreibung, Logiksimulation (*ModelSim SE*) und Logiksynthese (*Leonardo Spektrum Level 3*) dieselben Entwicklungsschritte durchlaufen werden können, unabhängig davon, ob das Digitaldesign für eine ASIC- oder eine FPGA-Technologie bestimmt ist.

Im Anschluss an die Designspezifizierung werden die Komponenten zunächst mittels Editor in der Hardwarebeschreibungssprache VHDL beschrieben (Bild A.1). Daran anschlie-Bend folgen für eine funktionale Überprüfung die Logiksimulation und im Fehlerfalle ein Redesign. Stimmen Funktion und Spezifikation überein, wird in einem zweistufigen Logiksyntheseverfahren eine Gatternetzliste (vgl. Bild A.2) in der Hardwarebeschreibungssprache Verilog generiert. Diese spiegelt das ursprüngliche Digitaldesign nach dem sog. Technologiemapping auf die für die jeweilige Zieltechnologie zur Verfügung stehenden Standardzellen wider. Diese Gatternetzliste gilt es im Anschluss wiederum zu verifizieren. Die technologiespezifischen Gatterverzögerungszeiten können nun bereits bei der Timinganalyse berücksichtigt werden, verdrahtungsbedingte Verzögerungen jedoch können zu diesem Zeitpunkt nur als Schätzwerte in die Simulation mit einfließen (Bild A.3).

Entsprechen die Simulationsergebnisse sowohl dem funktional als auch zeitlich spezifizierten Verhalten, beginnt zur Erstellung des Layouts das sog. Backend-Design, bestehend aus Floorplanning und Placement&Route. Für das FPGA-Design wird hierzu, entsprechend dem eingesetzten FPGA von XILINX, auf die passende Place&Route-Software, in unserem Falle *Xilinx ISE* in der Version 6, zurückgegriffen. Diese erlaubt, nach Place&Route, abschließend die Erzeugung des Konfigurationsbitstromes zur Programmierung des FPGAs.

Für die ASIC-Komponenten gestaltet sich der Fall schwieriger. Das roboterseitige Digitaldesign zur Umsetzung des Kommunikationsprotokolls kann je nach Anwendungsfall als Hard- bzw. Softmakro in einen ASIC, der letztendlich die Umsetzung und Kontrolle der Roboterfunktionen übernimmt, integriert werden. Aufgrund dieser Tatsache ist die weitere Entwicklung des Kommunikationsdigitaldesigns hauptsächlich durch den Design-Flow zur Entwicklung des Roboterkontrollchips vorgegeben (hierzu mehr in Kapitel 5.4).

Place&Route umfasst verschiedene Arbeitsschritte: Neben der Platzierung und Verdrahtung der Standardzellen werden bzgl. Timing ausbalancierte Takt- und Reset-Bäume implementiert. Zusätzlich müssen die Anschlüsse, die das Design mit der externen Elektronik verbinden, definiert werden. Für das XILINX-FPGA wird hierzu eine sog. Mapping-Tabelle (UCF-Datei) beschrieben, sodass die Place&Route-Software jedem Ein- bzw. Ausgang des Digitaldesigns automatisch den gewünschten Anschlusskonnektor des FPGAs (Input-, Output, Bidirektionaler-PAD, etc.) zuordnet. Im Gegensatz zum FPGA sind beim ASIC-Design die Positionen der Anschlusspads vom Entwickler selbst zu konfigurieren. In einem sog. PAD-Ring angeordnet, fungieren sie als Anschlussflächen für das Drahtbonden, entweder zur Verbindung des Chips mit einem Gehäuse oder zur direkten Anbindung des Dies auf einer Platine (vgl. Bild 2.38). Die zur Verfügung stehenden PADs sind von der Technologiebibliothek des Herstellers abhängig; so stehen z. B. bei den Ausgangspads mehrere Ausgangstreibervarianten für verschiedene maximale Stromstärken zur Verfügung. Auch für die Eingänge sind verschiedene Realisierungen mit oder ohne Hysterese (Schmitt-Trigger) verfügbar. Nach verschiedenen Tests (u. a. Design Rule Check und Layout Versus Schematic) werden eine Layout-Netzliste und eine SDF-Datei, die Verzögerungszeiten von Gattern, Verdrahtung und Parasitärelementen berücksichtigt, extrahiert. Diese erlauben mittels Backannotation die Timing-Simulation und Verifikation des endgültigen Layouts. Entspricht das Simulationsergebnis der ursprünglichen Spezifikation, kann die Fertigung des Chips beginnen (Tape-Out). Eine fehlerbehaftete Simulation erfordert ein Redesign.

4.6 IR-Kommunikation

4.6.1 Analog-Frontend

4.6.1.1 IR-Transceivermodul Auswahl

Das Analog-Frontend für die elektrooptische Modulation IM/DD (vgl. Kapitel 3.4.3) basiert auf einem kommerziellen IrDA-Transceivermodul entsprechend Bild 4.11, um eine mög-



lichst robuste Kommunikationsverbindung zu erhalten: Kommerzielle Module besitzen bereits optimierte IR-Filter und Konzentratoren, um in Verbindung mit adaptiven Empfangsverstärkerschaltungen, die den Einfluss des Umgebungslichtes zusätzlich reduzieren, die IrDA-Spezifikationen für IrPHY (Kapitel 3.4.7.1) insbesondere im Hinblick auf Übertragungsgeschwindigkeit und Bitfehlerrate (BER<10⁻⁸) zu erfüllen. Darüber hinaus passen moderne Module bereits während der optisch/elektrischen Rückwandlung die Pulsform an den jeweiligen IrDA-Übertragungsmodus (SIR, MIR, FIR oder VFIR) an. Die bzgl. ihrer Pulsweite daher nahezu¹

Bild 4.11: Bauform eines IrDA-Transceivermoduls [Vis03c]

IrDA-konformen elektrischen Pulse am Transceivermodulausgang erleichtern die elektrische Demodulation. Folgende **Anforderungen** werden an die Transceivermodule gestellt:

- Ihre physikalischen Dimensionen müssen, bedingt durch die Robotergröße, ≤1 cm sein,
- und der zusätzliche Platzbedarf durch externe Komponenten (z. B. Kapazitäten und Widerstände) möglichst gering bleiben.
- Verschiedene elektrische Modulationsverfahren, insbesondere die IrDA-Modi SIR, MIR und FIR müssen unterstützt werden.
- Die roboterseitige Versorgungsspannungsebene liegt zwischen 3 V und 5 V.
- Die benötigte Empfangsleistung sollte sich auf ca. 6 mW (max. 10 mW) belaufen.
- Wenn möglich, sollte der Sendestrom des Transceivermoduls programmierbar sein, um unter dem Aspekt des Energiesparens eine variable (dynamische) Anpassung der Sendeleistung an sich ändernde Umgebungsbedingungen zu erlauben.

Manalu In	Dimensionen	IR Modi ,		Versorgung	Strom	[mA]	Dynamische	Externe Komponenten		
Module	L ×W×H [mm]	s	М	F	VF [V] TX (Puls) R		RX	Strom- begrenzung	min. Zemptohlen (Widerstand, Kondensator)	
TFDU8108	9,7×4,0×4,7	~	1	~	~	2,7 - 5,5	8 – 500	2 — 2,3	✓ (SITC¹)	0 / 3 (1 × R, 2 × C)
TFDU6108	9,7×4,0×4,7	~	~	1		2,7 – 5,5	8 – 500	2 — 2,3	✓ (SITC¹)	0 / 3 (1 × R, 2 × C)
TFDU6102	9,7×4,0×4,7	1	~	1		2,7 – 5,5	500 - 600	2 – 3		0 / 3 (1 × R, 2 × C)
HSDL-3220	8,0×3,0×2,5	1	~	~		2,7 - 3,6	150	1,8 - 3,0		4 (1 × R, 3 × C) / 5 (1 × R, 4 × C)
TFBS5711	6,0×1,9×3,1	1	1			2,7 - 5,5	400 - 500	1, 1 – 1,5		1 (1× R) /4 (2× R, 2× C)
TFBS4711	6,0×1,9×3,1	1				2,4 - 5,5	200 - 400	0,08		3 (1 × R, 2 × C) /5 (1 × R, 4 × C)

1 – Serial Interface for Transceiver Control [IrDA00]

Tabelle 4.1: Eigenschaften verschiedener IR-Transceivermodule von Vishay und Agilent

Nach intensiver Korrespondenz mit verschiedenen Herstellern von IR-Produkten (VISHAY SEMICONDUCTORS, AGILENT TECHNOLOGY SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INSILICON (SYNOPSYS INC.), INFINEON TECHNOLOGIES AG, MKNET CORPORATION) haben sich schließlich nur wenige geeignete Auswahlmöglichkeiten ergeben (Tabelle 4.1): die Module TFDU8108, TFDU6108 und TFDU6102 von VISHAY SEMICONDUCTORS und der Transceiver HSDL-3220 von AGILENT TECHNOLOGIES. Die VISHAY Transceiver TFBS5711 und TFBS4711 sind nur aufgrund ihres geringen Platzbedarfs in Tabelle 4.1 zusätzlich aufgeführt.

Basierend auf dem obigen Anforderungskatalog fiel die Wahl auf die Transceivermodule TFDU6108 und TFDU8108 von VISHAY SEMICONDUCTORS [Vis03c], [Vis03d], die zum Zeit-

¹ Abweichungen bei harter Detektion sind nicht auszuschließen (vgl. nachfolgendes Kapitel 4.6.2.1)

punkt der Entwicklung allerdings erst als Testprodukte (Pre-Engineering- und Engineering-Samples) vorlagen. Obwohl TFDU6102 [Vis02] keine programmierbare Strombegrenzung unterstützt, wurde dieses Modul zusätzlich berücksichtigt, einerseits aufgrund seiner unmittelbaren Verfügbarkeit, andererseits aus Gründen der Kompatibilität zu einem ersten MiCRoN Prototypen (vgl. hierzu Bild 5.9 in Kapitel 5.3). Diese Module liefern bei Empfang eines IR-Lichtpulses einen low-aktiven elektrischen Puls.

Jedes der drei Module wird in der Gehäuseform *BabyFace (Universal)* mit einem Gewicht von 0,2 g und einem Volumenbedarf von 0,182 cm³ angeboten (Bild 4.11). Sollte die Spannungsversorgung des Roboters selbst im Falle von Spitzenstrombelastungen (durch IR-Sendepulse, aber auch bedingt durch Ansteuerelektronik und Aktorik des Roboters) stabil sein, kann auf weitere externe Komponenten vollständig verzichtet werden – hierdurch würde sich der zusätzliche Platzbedarf auf 0 cm³ belaufen. Aber selbst bei schlechter Spannungsversorgungsqualität bleibt die Anzahl weiterer Komponenten überschaubar.

Die beiden erstgenannten Module TFDU8018 und TFDU6108, die eine identische Anschlussbelegung aufweisen, zeichnen sich insbesondere durch die IrDA-spezifische Programmierschnittstelle *SITC* (*Serial Interface for Transceiver Control*) zur Einstellung verschiedener Sende- und Empfangsparameter (Shutdown, Sendeleistung, Empfangsmodus, etc.) aus [IrDA00]: Für den Empfang können die Transceivermodule an die elektrische Modulation des jeweiligen IrDA-Modus' angepasst werden; die integrierte IR-Empfängerschaltung formt den elektrischen Ausgangspuls entsprechend der durch IrDA definierten Pulsweite (*Pulse Shaping*). Der Sendestrom lässt sich in 2³ Stufen auf Werte zwischen 8 mA und max. 512 mA (für TFDU8108) bzw. 550 mA (für TFDU6108) einstellen. Allerdings reduzieren sich mit niedrigem Sendestrom die Strahlungsintensität und schließlich die Übertragungsreichweite – im Falle einer Tischstation jedoch eine akzeptable Einschränkung.

TFDU8108 unterstützt als einziges der drei Module die Transmission sehr kurzer VFIR-Pulse, weshalb dieser Transceiver für zukünftige Erweiterungen, z. B. zur drahtlosen Kamerabildübertragung, besonders interessant ist. TFDU6108 weist dafür (trotz identischer Datenblattangaben) eine etwas bessere Empfangssensitivität auf [Rod04]. Hierdurch bietet sich (eventuell) zusätzliches Energieeinsparpotential, da sich die roboterseitige Sendeleistung aufgrund der dann höheren Empfindlichkeit der ROBOCOMM-Transceiver weiter reduzieren lässt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen TFDU8108 und TFDU6108 besteht in den Standardwerten der über SITC programmierbaren Register. TFUD8108 ist standardmäßig ausgeschaltet und erfordert zunächst eine Programmierroutine zum Einschalten, Empfangen und Senden. Das Modul TFDU6108 dagegen ist ohne zusätzliche Programmierung, schon direkt nach Anschluss der Spannungsversorgung, zum Senden und Empfangen im Modus SIR bereit.

Der Transceiver TFDU6102 besitzt eine abweichende, aber dennoch kompatible Pinbelegung. SITC wird nicht unterstützt. Der Sendestrom bzw. die Sendeleistung lässt sich nicht mittels Programmierung begrenzen, dafür weist dieser Class-1-Transceiver eine geringfügig bessere Empfängersensitivität auf. Über zusätzliche Pins am Transceivermodul können lediglich ein energiesparender Shutdown-Modus und eine Vorgabe zur Pulsformung (Auswahl zwischen SIR und MIR/FIR) eingestellt werden.

4.6.1.2 Programmierbarer Sendestrom - Energieeinsparpotential

An dieser Stelle soll der Energiebedarf je übertragenem Bit mit funkbasierten WPAN-Lösungen verglichen werden. Für Bluetooth 1.1 beispielsweise werden ca. 100 nJ/Bit und für den LR-WPAN Standard IEEE 802.15.4 (915MHz, 40 kbps, 25 nJ/Bit bei 0 dBm Sendeleistung) ca. 1-2 µJ/Bit Gesamtenergiebedarf veranschlagt [War03]. Für die IR-Übertragung ergeben sich mit dem Transceivermodul TFDU6108, eine Versorgungsspannung von 3,3 V vorausgesetzt, die in Tabelle 4.2 angegebenen Werte. Hierbei sind sowohl Sendestrom als auch Übertragungsmodus mit entsprechender elektrischer Modulation (OOK, 4-PPM) berücksichtigt – für Transceivermodule ohne Sendestrombegrenzung sind die Zahlenwerte der letzten Zeile von Tabelle 4.2 als Richtwerte geeignet. Ohne Sendestrombegrenzung, d. h. für einen Sendestrom von 550 mA, scheinen die oben genannten Funklösungen



destrom (TFDU6108 mit 3,3V Versorgung)

Tabelle 4.2: Energie/Bit-Abhängigkeit vom Sen- Bild 4.12: Graphische Darstellung der Energie/Bit-Abhängigkeit entsprechend Tabelle 4.2

energetisch günstiger zu sein. Allerdings wird in diesem Vergleich weder berücksichtigt, dass die Datenübertragung bei den RF-Systemen aufgrund der vergleichsweise niedrigeren Datenrate länger andauert, noch, dass die RF-Systeme im Gegensatz zu Ad-hoc-IR-Verbindungen auch dann Energie benötigen, wenn keine Nutzdaten transferiert werden.

Durch die Programmierbarkeit des Sendestroms per SITC bietet sich abhängig von Übertragungsdistanz und Umgebungsbedingungen die Möglichkeit, Energie soweit einzusparen, dass sich die Verhältnisse zugunsten der IR-Kommunikation umkehren können. Setzt man die obige Energie/Bit-Angabe von ca. 100 nJ/Bit für Bluetooth als Richtwert an und berücksichtigt man zusätzlich die Herstellerangaben aus Tabelle A.1, dann sind im Modus SIR ca. 35 cm und sowohl mit MIR als auch FIR knapp 70 cm an Distanz zu überbrücken. Betrachtet man z. B. die für das MiCRoN Manipulationssystem vorgegebene Roboterarbeitsfläche, d. h. den in ein Lichtmikroskop integrierbaren POWER FLOOR (vgl. Bild 4.7), dann scheinen diese Distanzen für eine Mikromanipulations-Tischstation ausreichend bzw. akzeptabel zu sein, zumal verglichen mit Bluetooth bereits bei MIR, insbesondere aber im FIR-Modus mit einer weitaus höheren Bruttodatenrate gearbeitet werden kann. Wird eine Distanz von nur 30 cm für die IR-Kommunikation vorausgesetzt, ergibt sich im Vergleich zu den RF-WPAN-Systemen für die IR-Übertragung ein z. T. erheblich geringerer Energiebedarf pro Bit: Für SIR beläuft er sich zwar noch auf ca. 80 nJ/Bit (bei 15 mA Sendestrom); für den energieeffizienteren MIR-Modus reduziert sich der Wert, bei 30 mA Strompulsen, aber bereits auf ca. 22 nJ/Bit und FIR mit 4-PPM beansprucht nur noch etwa 12 nJ/Bit, wobei der Sendestrom immerhin schon 60 mA betragen sollte – im Übrigen bestätigen diese Werte die nach [KB97] höhere, erforderliche Spitzenleistung des Transmitters bei PPM im Vergleich zu OOK.

IR-Kommunikationsprotokoll 4.6.2

4.6.2.1 Physikalische Ebene

Die physikalische Ebene des Mikroroboterkommunikationssystems wird angelehnt an den IrDA-Standard IrPHY (Kapitel 3.4.7.1), der eine bidirektionale Infrarot-Kommunikation im



Bild 4.13: Die asynchronen Übertragungsmodi SIR und SIRpMiCRoN mit ³/₁₆-RZI-OOK

Halbduplex für eine Bitfehlerrate von BER<10⁻⁸ spezifiziert. Ziel der Adaption von IrPHY ist die Erzielung einer ähnlich niedrigen Bitfehlerrate für das IR-Kommunikationssystem der Mikroroboter (vgl. Kapitel 4.2). Um jederzeit eine Anpassung der Datenrate bzw. des Energiebedarfs zu gestatten, werden für das IR-Kommunikationsprotokoll die Übertragungsmodi SIR, MIR und FIR vorgesehen (vgl. auch die Kapitel 3.4.5 und 4.6.1.2). Zusätzlich wird, für den Fall der energetischen Versorgung der Roboter mittels Batteriepack, ein bzgl. Nach-

91

richtenlänge und Übertragungsreichweite angepasstes Protokoll implementiert, das den Energiebedarf insbesondere bei kurzen Datenpaketen weiter reduzieren soll – dieses wird als SIRpMiCRoN bezeichnet, angelehnt an den SIR-Modus und die MiCRoN Mikromanipulationsstation, für die das IR-Kommunikationssystem erstmals eingesetzt wird.





Bild 4.15: Codierung der Datenbitpaare bei FIR

Sämtliche Datenübertragungen beruhen auf dem Format *Little Endian*, d. h. das niederwertigste Bit wird immer zuerst übertragen. SIR und SIRpMiCRoN transmittieren die einzelnen Bytes des zu übermittelnden Datenpaketes in Anlehnung an IrPHY asynchron mit ³/₁₆-RZI-OOK als elektrischem Modulationsverfahren; Bild 4.13 zeigt den direkten Vergleich zum Bitstrom eines UART-Bausteines einer seriellen RS-232-Schnittstelle. Auch für die schnelleren, synchronen Übertragungsmodi MIR und FIR wird IrPHY bemüht: MIR arbeitet sowohl bei 576 kbit/s als auch 1,152 Mbit/s mit ¹/₄-RZI-OOK und Bit-Stuffing (Bild 4.14); bei der FIR-Übertragung mit 4 Mbit/s werden 4-PPM-Datensymbole aus Datenbitpaaren entsprechend der Vorschrift von Bild 4.15 codiert. Auf SIP (vgl. Kapitel 3.4.7.1) kann verzichtet werden, da alle Mikroroboter der Manipulationsstation synchron, d. h. im gleichen Übertragungsmodus arbeiten sollen.

Wegen des Energiebedarfs durch hohe Taktraten (vgl. Kapitel 3.3.4) und aufgrund des Energiedilemmas (Kapitel 2.4.3.3) wurde im Falle der MiCRoN Manipulationsstation von der Umsetzung des VFIR-Modus für die roboterseitige Kommunikationselektronik abgesehen, zumal zu Beginn der ASIC-Entwicklung keine gesicherten Angaben über die Zuverlässigkeit der induktiven Energieversorgung oder den tatsächlichen Energiebedarf der übrigen Roboterelektronik existierten. Der IrDA-Standard empfiehlt für den Hochgeschwindigkeitsmodus VFIR eine Taktrate von N·12 MHz, mit N \geq 4 [IrDA01]. Die hieraus sich ergebenden 48 MHz stellen allerdings nur eine untere Grenze dar. Wegen der kurzen IR-Pulse scheint besonders bei harter (digitaler) Detektion eine empfangsseitige Überabtastung mit hoher Abtastrate und daher hoher Oszillatorfrequenz für die digitale Demodulationselektronik des ASIC angebracht: So spezifiziert z. B. das FRAUNHOFER INSTITUT FÜR PHOTONI-SCHE MIKROSYSTEME IPMS für seinen IrDA Controller eine Oszillatorfrequenz von 72 MHz für die Nutzung des VFIR-Modus [FhG05].

Die Begründung für eine notwendige Überabtastung bei harter, d. h. digitaler Detektion lässt sich bereits im FIR-Modus aus dem Signal am (digitalen) Transceivermodulausgang



Bild 4.16: Schwellenproblematik bei harter (digitaler) Detektion

ableiten (siehe hierzu die qualitative Darstellung in Bild 4.16 bzw. das Messergebnis aus Bild 5.8 in Kapitel 5.3). Schon in diesem Modus erreichen die kurzen Pulse am Digitalausgang des Transceivermoduls nicht über die gesamte IR-Pulsdauer hinweg die volle Ausgangsspannung für logisch-1. Der Grund hierfür liegt im Transceivermodul, das mit seiner Bandbreite die Qualität und Übertragungsgeschwindigkeit der IR-Kommunikation maßgeblich bestimmt, einerseits durch die Einschwingzeit und andererseits durch die DC-Entkopplung des störenden Um-

gebungslichts vom IR-Empfangssignal – eine gute Beschreibung hierzu findet sich in Kapitel 2.5.4 von [Lüf05]. Bei harter Detektion ist die Schwelle für die Detektion von logisch-0 bzw. logisch-1 durch den Eingang des elektrischen Demodulators, genauer durch die Eingangsschwellenspannung des digitalen Eingangspads (technologieabhängig) vorgegeben. Für OOK mit niedrigen Übertragungsraten kann diese Schwelle mittig zwischen LOW- und HIGH-Pegel liegen. Dagegen wäre nach [GH00] die Schwelle bei FIR besser von der Mitte abweichend anzusetzen, da bei PPM die Wahrscheinlichkeit für eine logische 1 (Lichtpuls) generell geringer ist als für eine logische 0. Jedoch ist die Schwellenspannung bei harter (digitaler) Detektion technologiebedingt fest vorgegeben. Eine Schwellenanpassung in Abhängigkeit vom Übertragungsmodus ist am Demodulator, in diesem Falle am IRC mit fest vorgegebenem Eingangspad, nicht möglich. Stattdessen muss die zeitliche Abweichung zwischen der eigentlichen Länge des digitalen Pulses und der tatsächlichen Pulslänge nach Überschreiten der HIGH-Pegel-Schwelle berücksichtigt bzw. detektiert werden. IrDA spezifiziert deswegen zulässige Abweichungen von der nominellen Pulslänge [IrDA01]. Möchte man diese Abweichungen als Entscheidungsgrundlage für die Detektion der eingehenden optisch demodulierten Pulsfolge mit berücksichtigen, erfordert dies eine im Vergleich zur Übertragungsrate höhere zeitliche Aufteilung bzw. Abtastrate und damit letztendlich eine höhere Oszillatorfreguenz für den digitalen Demodulator.

Da das gesamte Projekt MiCRoN nicht an einer zu hohen Taktrate für die Kommunikationselektronik, als essentiellem Bindeglied zwischen Steuerungseinheit (Makrowelt) und Roboter (Mikrowelt), scheitern sollte, wird an dieser Stelle auf VFIR mit einer Oszillationsfrequenz von 48 MHz (bzw. eher 72 MHz) verzichtet – eine geringere Übertragungsrate kann durch das Steuerungssystem aufgefangen werden. Ein langsamerer Manipulationsablauf ist akzeptabel, ganz im Gegensatz zu etwaigen Kabelverbindungen, die gemäß Kapitel 2.4.3.2 präzise Bewegungsabläufe aufgrund der dann wirksamen Kabelkräfte der Stick-Slip-Piezoaktoren unmöglich machen würden.

4.6.2.2 Datenstruktur

Für einen kontrollierten Datenaustausch ist es notwendig, Art und Aufbau der auszutauschenden Nachrichten zu spezifizieren. **IR-Nutzdaten** werden in Anlehnung an die von



Nutzlast



IrDA spezifizierte IrLAP-Nutzlast [IrDA96b] gemäß der Struktur ACI (Address-Control-Information) übertragen (Bild 4.17). Jedes IR-Nutzdatenpaket beginnt für SIR, MIR und FIR mit einer 8-bit-Adressenangabe (Robo-

ter-ID), im Modus SIRpMiCRoN ist sie auf 4 Bit verkürzt. Für einen Rundruf an alle Roboter wird die Broadcast-ID auf 0xFF bzw. 0xF (für SIRpMiCRoN) festgelegt. An die Roboter-ID schließt sich das Control-Byte an, welches im Modus SIRpMiCRoN ebenso wie die Adressenangabe auf 4 Bit verkürzt wird. Mittels Control-Byte teilt die Steuerungseinheit dem *IRC* mit, wie mit den nachfolgenden Informationsbytes (kurz I-Bytes) zu verfahren ist, wie sie zu interpretieren und zu verarbeiten sind.

In Anlehnung an den IrDA-Standard werden die Nutzdaten vor dem Senden mittels sogenannter *Wrapper* in eine IrLAP Datenstruktur entsprechend Bild 4.18 eingebettet [IrDA96b], die einerseits die speziellen Anforderungen an den optischen Übertragungskanal berücksichtigt und andererseits die Erkennung von Übertragungsfehlern mittels CRC



Bild 4.18: An IrLAP angelehnte Datenstruktur für die IR-Übertragung

ermöglicht. Empfängerseitig extrahieren passende *Unwrapper* wieder die Nutzdaten und prüfen auf Übertragungsfehler. Die Funktionen der Wrapper bzw. Unwrapper sind jeweils abhängig vom IR-Modus:

- Für SIR wird der Nutzlast mit 0xC0 ein Startbyte (BOF Beginning of Frame) vorangesetzt. Nach der Nutzlast wird eine CRC-16-Prüfsumme (CRC-16-CCITT) angefügt und der Datenrahmen mit 0xC1 als EOF-Byte (End of Frame) abgeschlossen. Um auszuschließen, dass innerhalb der eigentlichen Nutzdaten BOF und EOF auftreten und falsch interpretiert werden können, arbeitet SIR mit einer sog. Escape-Sequenz: Hierbei wird dem zu übertragenden BOF- oder EOF-Byte zunächst das CE-Byte (*Control Escape*) mit 0x7D vorangesetzt; daran anschließend folgt das BOF- oder EOF-Byte, das mittels XOR-Operation (XOR 0x20) zusätzlich verändert wird – es gilt zu beachten, dass auch das CE-Byte selbst, d. h. ein Datenbyte mit 0x7D, dieser Escape-Sequenz unterliegen muss.
- Im asynchronen Modus SIRpMiCRoN beginnen die Datenrahmen konstanter Länge ebenfalls mit BOF. Daran anschließend folgen die Datenbytes, die einschließlich einer gegenüber SIR verkürzten Checksumme (CRC-8) immer eine feste Länge aufweisen müssen. Auf diese Weise kann auf das Stoppbyte und die Escape-Sequenz, die im SIR-Modus Start- bzw. Stoppbyte maskiert, verzichtet werden, so dass sich die Anzahl der zu übertragenden Bytes und damit Zeit- und Energiebedarf reduzieren. Die Datenrahmenlänge ist durch die Steuerungseinheit vorgebbar, und kann je nach Anforderung angepasst werden. Ist im Rahmen eines Sensorupdates für die Steuerungseinheit beispielsweise das Auslesen der Robotermessdaten in äquidistanten Zeitabständen (mit immer derselben geringen Byteanzahl) gefordert, so kann hier der SIRpMiCRoN-Modus gute Dienste verrichten. Entsprechend [Kow06] sollte die Paketlänge aufgrund der verwendeten 8bit-CRC 15 Bytes einschließlich CRC-Byte nicht überschreiten, um durch die CRC auch 2-Bit-Fehler garantiert zu erkennen.
- Der IrDA-Standard orientiert sich für MIR an dem synchronen, bitorientierten Sicherungsschichtprotokoll HDLC (High-Level Data Link Control), allerdings wird das einleitende Startflag STA (0x7E) für die IR-Übertragung einmal wiederholt. Daran anschlie-Bend folgen die Nutzdaten, die durch eine Rahmenprüfzeichenfolge (Frame Check Seguenz) mittels CRC-16 (CRC-16-CCITT) gegen Bitfehler gesichert werden. Abgeschlossen wird die synchrone Übertragung durch das Stoppflag STO (ebenfalls 0x7E). Um die Transparenz der Daten zu gewährleisten und insbesondere die 6fache Wiederholung von logisch-1 zu verhindern (die unter Umständen fälschlicherweise als STO interpretiert werden könnte), wird entsprechend Kapitel 4.6.2.1 Bit-Stuffing angewendet. Für den IRC kann optional vor der ersten STA-Folge zusätzlich eine Präambel (0x00, d. h. 8 Lichtpulse bei RZI!) übertragen werden, um das empfangende Transceivermodul auf den Datenempfang vorzubereiten: Die IR-Empfangsverstärkerschaltung des Transceivermoduls passt sich unter Beachtung von Umgebungslicht und Stärke des IR-Empfangssignals derart an, dass die Schwellen für das interne Pulse Shaping des Transceivermoduls möglichst gut ausgenutzt werden. Hierbei gilt es auch die Abklingzeit des integrierten Hochpassfilters bedingt durch Umgebungslichtstörungen zu berücksichtigen [Lüf05]. Um auch bei reduzierter IR-Sendeleistung eine rechtzeitige Reaktion des Empfangsmoduls auf nur energieschwache IR-Pulsfolgen und damit eine korrekte Detektion des essentiellen Startflags zu erreichen, wird die zusätzliche Präambel zur Forcierung des Einschwingvorganges der STA-Folge vorangestellt.
- Bei FIR wird eine aus 16 Chips bestehende Präambel (PA), die genau 16mal gesendet wird, bereits vom IrDA-Standard vorgesehen. Diese 32 µs andauernde, fest vorgeschriebene Chipfolge kann aufgrund ihrer Zusammensetzung nicht mit einer regulären, d. h. sich aus Nutzdaten ergebenden 4-PPM verwechselt werden. Gleiches gilt für die sich an PA anschließende Startfolge STA, die aus 32 Chips (4 µs) unverwechselbar aufgebaut ist. Nach STA werden die Nutzdaten übertragen, die mit einer 32bit-CRC gegen Übertragungsfehler gesichert werden. Abgeschlossen wird der synchrone Datenstrom (4-PPM-Chipfolge) durch ein Stoppflag, das sich ähnlich zu STA, nicht 4-PPM-konform aus 32 Chips zusammensetzt. Aufgrund der in Kapitel 4.6.2.1 bereits angesprochenen

Schwellenwertproblematik bei höherer Übertragungsrate bzw. PPM, wird für FIR eine zuschaltbare Option ergänzt, die, im Vergleich zu IrDA mit spezifizierter FIR-Mindestpulslänge von 115 ns, auch Kurzpulse mit einer Pulsdauer von 50 ns akzeptiert.

Die CRC-Polynome (4.2) und (4.3) sind in Anlehnung an den IrDA-Standard [IrDA01] gewählt, für das SIRpMiCRoN-Polynom (4.1) wird auf CRC-8-ATM zurückgegriffen [KC04]:

$$CRC_{SIRPMICRON}(x) = x^8 + x^2 + x^1 + 1$$
(4.1)

$$CRC_{SIR, MIR}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$
(4.2)

$$CRC_{FIR}(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x^1 + 1$$
(4.3)

Die maximale Anzahl der Informationsbytes in der ACI-Datenstruktur ist nicht von IrDA vorgeschrieben – für MIR werden in IrPHY beispielsweise maximal 2045 Bytes vorgeschlagen. Vielmehr ist die Maximalzahl in Abhängigkeit von der eigentlichen Applikation, dem gewünschten Datendurchsatz, der gewünschten Übertragungsrate und der Qualität des IR-Links (BER > 10^{-8}) festzulegen. Analysen in [BBV00] führen zu dem Ergebnis, dass eine Datenpaketgröße von 128 Bytes bei Umsetzung des IrDA-Protokolls für kurze Turnaround-Zeiten und gleichzeitig hohen Datendurchsatz sorgt und dies selbst bei gestörtem IR-Link mit einer Bitfehlerrate von BER = 10^{-5} , die um Größenordnungen schlechter liegt als im Ir-DA-Standard spezifiziert. Obgleich das infrarotbasierte Mikroroboterkommunikationssystem IrDA nicht vollständig umsetzt, sondern sich nur an den Standard anlehnt, wird die Größe der FIFOs für sowohl Senden als auch Empfangen im ASIC-Modul IRC entsprechend [BBV00] auf 128 Bytes festgelegt (vgl. Kapitel 5.1), zumal hierdurch der Platzbedarf und letztlich die Kosten für die Chipfertigung überschaubar bleiben. Die FIFO-Größe begrenzt die Maximalzahl an I-Bytes, die innerhalb eines Datenrahmens übertragbar sind, auf einen Wert kleiner 128 Bytes – für die Berechnung sind neben Adresse und Control-Bytes zusätzlich die Bytes der jeweiligen CRC (vgl. Bild 4.18) zu berücksichtigen.

Die Steuerungseinheit kann für jedes gesendete IR-Datenpaket eine Empfangsquittierung anfordern. Die Quittierung ist optional, um durch Auslassen der Bestätigung sowohl

Address Control

Bild 4.19: Datenstruktur des Acknowledge den Datendurchsatz zu erhöhen, als auch roboterseitig Energie einsparen zu können. Beim sog. Acknowledge wird aus Energieeinspargründen die Struktur ACI auf zwei Bytes beschränkt. Wie Bild 4.19 verdeutlicht, ist es auf die Adresse des antwortenden Roboters und das zuvor empfangene Control-Byte in leicht modifizierter Form

(Bit 3 wird gemäß Tabelle 4.3 auf logisch-1 gesetzt) reduziert; auf I-Bytes wird verzichtet.

Control-Byte

Das Control-Byte, das entsprechend Tabelle 4.3 aufgebaut ist, spezifiziert Zweck und Inhalt der angefügten Informationsbytes. Mit Bit 0 wird unterschieden, ob das zugehörige

Bit	logisch-0	logisch-1
0	Roboterdaten	IRC-Befehl
1	Kein Acknowledge	Sende Acknowledge
2	Nur Schreiben	Leseanforderung
3	ID ROBOCOMM-Frame	ID Roboter-Frame
[7:4]	Rese	rviert

Tabelle 4.3: Aufbau des Control-Bytes

Datenpaket ein *IRC*-Befehl ist, oder aber für die weitere Roboterelektronik bestimmt ist. Bit 1 gibt Aufschluss darüber, ob der Datenempfang quittiert werden soll. Allerdings macht die Quittierung nur Sinn bei reinen *IRC*- bzw. Roboter-Schreibzugriffen (Bit 2 mit logisch-1). Im Falle einer Leseanforderung (Bit 1 = LOW; Bit 2 = HIGH) werden statt einer Empfangsbestätigung entweder Statusinformatio-

nen vom *IRC* (Bit 0 = HIGH) oder Roboterdaten, d. h. Messwerte oder Statusangaben von der Roboterelektronik (BIT 0 = LOW), im Uplink an die Basisstation zurückgesendet.

Informationsbytes – IRC-Befehle

Der Inhalt der I-Bytes bzw. deren Interpretation ist vom Control-Byte abhängig. Für den Downlink von der Basisstation zu den Robotern ist zwischen *IRC*-Befehlen und Roboterkommandos zu unterscheiden (Tabelle 4.4 auf S. 96): Roboterkommandos (in Tabelle 4.4 mit gelbfarbenem Hintergrund) sind bzgl. erforderlicher Schreib- oder Lesezugriffe direkt über das Control-Byte identifizierbar. *IRC*-Befehle erfordern nach Verarbeitung des Control-Bytes zusätzlich die Analyse des I-Bytes I₀.



Bild 4.21: Sequentieller Schreib- bzw. Lesetransfer von Roboterdaten

Roboterdaten im 16-bit-Format werden durch einen an DMA angelehnten Zugriffsmodus ausgetauscht: Per 16-bit-Adresse kann der gesamte Adressraum entweder selektiv angesprochen werden, oder aber per sequentiellem Zugriff mit einer zu übersendenden 16-bit-Startadresse beginnend. Ein Vergleich von Bild 4.20 und Bild 4.21 zeigt, dass der sequentielle Modus einen höheren Datendurchsatz erlaubt, da weniger Adressbytes und stattdessen mehr Datenbytes zwischen Steuerungseinheit und Robotern ausgetauscht werden können. Umgekehrt betrachtet sorgt ein optimiertes Roboterelektronikdesign, das für sequentielle Zugriffe optimiert ist, bei gleichem Datendurchsatz für weiteres Energieeinsparpotential, da sich die Datenpakete für die Übermittlung von Signalformparametern oder Messdaten verkürzen.

Zugriff	Control	Bofobl		Parameter	
Zugiiii	[30]	Derein	I _o	I ₁	ا ₂
		set_ir_mode	0x00	SIR_LCR	IR-Select
		set framesize	0x01	SIRpMiCRoN Datenrahmenlänge	SIRpMiCRoN Datenrahmen-
Schreiben	(00×1)	Set_Indiffesize	0,01	Low-Byte	länge High-Byte
(IRC)	(00,1)2	set_robotid	0x03	Roboter-ID	0x00
		set_rxtx_params	0x04	Tx-Parameter	IRC-Antwortverzögerung
		write_tfdu	0x06	TFDU ACI (Adresse & Command Index)	TFDU Data
Loson		get_status	0x02	0x00	0x00
	$(0101)_2$	get_echo	0x05	Anzahl der Echobytes	1. Echo-Byte
(IIIC)		read_tfdu	0x07	TFDU-ACI (Adresse & Command Index)	0x00
Schreiben	(00×0)	write DMA	Anzahl DMA-	DMA-Adresse Low-Byte (für sequentielles	DMA-(Start-)Adresse
(Roboter)	(00x0)2	WITTE_DIVIA	Zugriffe	Schreiben: DMA-Start-Adresse Low-Byte)	High-Byte
Lesen	(0100).	read DMA	Anzahl DMA-	DMA-Adresse Low-Byte (für sequentielles	DMA-(Start-)Adresse
(Roboter)	(0100)2	read_DIVIA Zugriffe		Lesen: DMA-Start-Adresse Low-Byte)	High-Byte

Für IRC sind gegenwärtig 5 Schreib- und 3 Lesebefehle implementiert (Tabelle 4.4):

Tabelle 4.4: Aufbau von IRC-Befehlen und Roboterkommandos inklusive Parameterbytes (I1, I2)

Set_ir_mode

Der Befehl set_ir_mode beeinflusst die Eigenschaften des IR-Links. Es werden Parameter für das SIR Line Control Register (SIR_LCR) des IRCs gesetzt, um das Verhalten des integ-

Bit	Beschreibung					
[3:0]	Baudrate					
[6:4]	IR-Modus					
7	Disable DLL	Enable DLL				

rierten UARTs für die Modi SIR und SIRpMiCRoN bzgl. Daten, Stopp- und Paritätsbits entsprechend Tabelle 4.6 zu spezifizieren – Bit 7 und Bit 6 bleiben gegenwärtig unbenutzt. Über IR-Select (Tabelle 4.5) werden der IR-Modus und die Baudrate vorgegeben – die Werte sind entsprechend Tabelle 4.8 auszuwählen.

Tabelle 4.5: Bitmap von IR-Select

Optional kann für die Modi SIR, SIRpMiCRoN und MIR ein in *IRC* zu integrierender digitaler Phasenregelkreis (Delayed-Lock Loop, kurz DLL) zur Empfangssynchronisation bzw.

Bit	Binär	Beschreibung		Bit	Logisch-0	Logisch-1
[1:0]	00	5 Datenbits in jedem Zeichen			IRC-Empfänger (Rx)	IRC-Empfänger (Rx)
	01	6 Datenbits in jedem Zeichen		0	AUS während	AN während
	10	7 Datenbits in jedem Zeichen	1		IRC-Senden (Tx)	IRC-Senden (Tx)
	11	8 Datenbits in jedem Zeichen		1	Keine zusätzliche	Zusätzliche
2	0	1 Stoppbit			Praambel lur IVIR	Praambel für Mik
	1	2 Stoppbits		2	Ignoriere	Erlaube kurzo EIP Pulco
3	0	Kein Paritätsbit				
	1	Paritätsbit wird übertragen und überprüft (Parity enable)		З	ALIS während	AN während
4	0	Ungerade Parität [Ungerade Anzahl von ,1']		5	DMA-Transfer	DMA-Transfer
	1	Gerade Parität [Gerade Anzahl von ,1'] (Even Parity)			Datenausgabe	Datenausgabe
5	0	Stick Parity ausgeschaltet		4	per DMA	an Testbus
	1	Stick Parity (Festes Paritätsbit) eingeschaltet:		[7:5]	rese	rviert
		Parity enable = 1 & Even Parity = 1 \rightarrow Paritatsbit 0 Parity enable = 11 & Even Parity = 10' \rightarrow Paritatsbit 11'		[15:8]	IRC-Antwortve	rzögerungszeit

Tabelle 4.6: Optionen für das SIR Line Control Register

Tabelle 4.7: RxTx-Parameter-Register

Anpassung an sender- und empfangsseitig differierende Lokaloszillatoren eingeschaltet werden. Für den Modus SIRpMiCRoN muss über den *IRC*-Befehl *set_framesize* zusätzlich die Byteanzahl für den IR-Datenrahmen konstanter Länge eingestellt werden. Wird mit Hilfe des Befehls *set_ir_mode* der Übertragungsmodus verändert, so übernimmt *IRC* automatisch die am angeschlossenen Transceivermodul erforderlichen Einstellungen für das Pulse Shaping; über SITC verfügende Module werden entsprechend programmiert.

IR-M				Baudrat	e [Bits (3:0))]			
[Bits	(6:4)]	9600	19200	38400	57600	115200	576000	1152000	4000000
	Hex.	0x1	0x2	0x3	0x4	0x5	0x6	0x7	0x8
SIRpMiCRoN	0x0	✓	√	✓	✓	✓			
SIR	0x1	✓	✓	✓	✓	✓			
MIR	0x2						√	~	
FIR	0x3								√

Tabelle 4.8: Zulässige Wertepaare für IR-Modus und Baudrate

Set_robotid

Über *set_robotid* legt die Steuerungseinheit die Adresse (Roboter-ID) fest. Nach einem Power-On-Reset (POR) des *IRCs*, d. h. nach Anschalten der ASIC-Spannungsversorgung, ist die Roboter-ID standardmäßig auf 0xFF und damit identisch zur Broadcast-Adresse eingestellt. Die Adresse (Roboter-ID) wird mittels *set_robotid* durch die Steuerungseinheit auf Werte zwischen 0x00 und 0xFE eingestellt. Allerdings gilt es zu beachten, dass Roboter, die im Laufe des Mikromanipulationsprozesses im SIRpMiCRoN-Modus angesprochen werden sollen, auf den 4-Bit-Adressbereich von 0x0 bis 0xE angewiesen sind. Ist die Roboter-ID eines Roboters einmal über einen Broadcast-Zugriff programmiert worden, so reagiert er auf einen nächsten *set_robotid*-Befehl nur noch dann, wenn das Adressfeld der ACI-Nutzdaten explizit seine neue Roboter-ID enthält – eine weitere Programmierung der Roboter-ID per Broadcast ist nicht mehr möglich.

Dies führt zu folgender Prozedur im Falle des gleichzeitigen Einsatzes mehrerer Roboter in einem Multirobotersystem: Die Roboter sind sukzessive mit Spannung zu versorgen und auf eine von 0xFF abweichende Adresse zu programmieren. Wenn mehrere Roboter gleichzeitig angeschaltet werden, dann muss durch IR-Abschirmungen gewährleistet sein, dass die Steuerungseinheit jeweils nur einen Roboter nach dem anderen auf eine neue Roboter-ID programmieren kann.

Set_rxtx_params

Per *IRC*-Befehl *set_rxtx_params* können verschiedene Sonderfunktionen des *IRCs* bzgl. seiner IR-Sendeeinheit TX-Unit und seiner Empfangseinheit RX-Unit zugeschaltet werden (Tabelle 4.7). Die RX-Unit kann während der eigenen IR-Übertragung (Datentransfer vom *IRC* zur Steuerungseinheit) ausgeschaltet werden (Bit 0), indem die Taktversorgung der RX-Unit abgeschaltet wird. Hierdurch wird zum einen der (dynamische) Energiebedarf des *IRCs* reduziert, zum anderen ist ein durch Reflexionen hervorgerufener Selbstempfang

ausgeschlossen. Durch Einschalten der MIR-Präambel für die TX-Unit soll das Einschwingen der zur Steuerungseinheit gehörenden Analog-Frontends im MIR-Modus insbesondere bei reduzierter IR-Sendeleistung des Robotertransceivermoduls forciert werden. Um der in Kapitel 4.6.2.1 erläuterten Schwellenwertproblematik insbesondere beim FIR-Modus zu begegnen, ist die RX-Unit derart modifizierbar, dass auch außerhalb der IrDA-Spezifikation liegende IR-Kurzpulse akzeptiert werden; dies soll den Empfang der FIR-Chips verbessern.

Im Falle der Übermittlung von Roboterkontrolldaten (von der Steuerungseinheit an den *IRC*) können während des Weiterleitens dieser empfangenen Roboterkontroll-Datenwörter aus dem *IRC*-Empfangs-FIFO zur Roboterelektronik Verzögerungen auftreten, die durch niedrige Taktfrequenzen der weiteren Roboterkontrollelektronik hervorgerufen werden – im Falle des MiCRoN-Roboters können die Verzögerungen je DMA-Transfer zwischen *IRC* und *MXS*-ASIC bis zu 30 ms betragen. Aufgrund einer FIFO-Größe von 128 Bytes können innerhalb eines ACI-Datenpaketes bis zu 30 DMA-Datenwörter von der Steuerungseinheit an den *IRC* übertragen werden. Da in diesem Falle das Empfangs-FIFO keinen Platz mehr für ein nachfolgendes Datenpaket bietet, der DMA-Transfer für die empfangenen Datenworte aber bis zu 900 ms andauern kann, wird mit Bit 3 des RxTx-Parameter-Registers eine Option angeboten, die RX-Unit während des DMA-Transfers (*IRC*-FIFO \rightarrow Roboterelektronik) auszuschalten. Dies erlaubt der Steuerungseinheit, zwischenzeitig an andere Roboter Roboterkommandos oder *IRC*-Befehle zu übermitteln.

Bit 4 des Parameter-Registers dient der Chipverifikation. Wesentliche Signale des *IRC*-internen Testbusses können optional an den Ausgangspins des ASICs ausgegeben werden. Hierdurch können fehlerhaft gefertigte Chips identifiziert bzw. die Funktionsfähigkeit des ungehäusten Chips auch nach der Integration auf dem Roboter überprüft werden.

Schließlich bietet sich über set_rxtx_params die Möglichkeit, eine Antwortverzögerung für den *IRC* einzustellen. Nach Empfang eines IR-Datenpakets wird ein sich daran anschließender Uplink nicht unmittelbar, sondern erst nach Überlauf eines mit *IRC*-Taktfrequenz arbeitenden 8bit-Timers durchgeführt.

Write_tfdu und read_tfdu

Über diese beiden *IRC*-Instruktionen wird auf ein an *IRC* angeschlossenes Transceivermodul mit SITC-Schnittstelle schreibend bzw. lesend zugegriffen. *Write_tfdu* erlaubt das Schreiben der im Transceivermodul vorhandenen Register. Da die Pulsformung (Puls-Shaping) über *set_ir_mode* bereits automatisch eingestellt wird, dient *write_tfdu* insbesondere dem Einstellen des IR-Sendestroms des roboterseitigen Transceivermoduls. Durch den Befehl *read_tfdu* lassen sich sämtliche Einstellungen der mit SITC ausgestatteten Transceivermodule jederzeit überprüfen. Die Inhalte der auslesbaren Register sind dabei z. T. herstellerspezifisch vorgegeben [Vis03c], [Vis03d].

Get_echo

Die bidirektionale IR-Verbindung zwischen Steuerungseinheit und Roboter-*IRC* kann mit der Instruktion *get_echo* jederzeit getestet werden: Eine an *IRC* übertragene Bytefolge wird von diesem wieder unverändert an die Steuerungseinheit zurückgesendet. Hierzu folgt nach *get_echo* (I-Byte Null) zunächst die Anzahl der zurückzusendenden Bytes. Die eigentlichen "Echo"-Bytes, d. h. die von *IRC* an die Steuerungseinheit zurückzugebenden Bytes, schließen sich unmittelbar daran an.

Get_status

Über den *IRC*-Lesebefehl *get_status* können die Einstellungen des *IRC* jederzeit von der Steuerungseinheit abgefragt werden. *IRC* sendet ein IR-Datenpaket entsprechend der

Address Control SIR_LCR IR-Select meter [7:0]

Bild 4.22: Statusantwort des IRC

Struktur aus Bild 4.22 zurück. Die Statusinformationen des *IRC* umfassen neben den Werten von SIR_LCR und IR-Select auch das Low-Byte des RxTx-

Parameter-Registers. Die Datenstruktur der einzelnen Bytes folgt hierbei den obigen Vorgaben aus Tabelle 4.5, Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7.

4.7 USB-Basisstation RoboComm

Für das Kommunikationssystem der auf drahtlosen, mobilen Mikrorobotern basierenden Mikromanipulationsstation bildet die Basisstation ROBOCOMM die Schnittstelle zwischen den Robotern und der für ihre Koordination und Steuerung zuständigen Steuerungseinheit (Host). ROBOCOMM dient einerseits zum Übertragen der für die Steuerung der Roboter notwendigen Konfigurationsdaten, anderseits gibt es die von einem Roboter empfangenen Messdaten bzw. Statusinformation an den Host zurück. ROBOCOMM wird an einer USB 2.0 Schnittstelle betrieben, die eine Übertragungsgeschwindigkeit bis zu 480 Mbit/s (High-Speed-Modus) spezifiziert – die eigentliche Umsetzung des USB-Low-Level-Protokolls (physikalische Ebene einschließlich Sicherungs- und Vermittlungsschicht) übernimmt hierbei ein USB 2.0-Schnittstellen-Controller. Aus Kompatibilitätsgründen wird zusätzlich der Full-Speed-Modus unterstützt, der mit einer maximalen Bruttoübertragungsrate von 12 Mbit/s auch die Funktion des USB-Gerätes an einer USB 1.1 Schnittstelle gestattet.

Die Basisstation kann nicht selbstständig einen Datentransfer starten. Jeder Bus-Verkehr wird durch die Steuerungseinheit, d. h. den Host-PC als Busmaster initiiert. Entsprechend der USB-Spezifikation wird auch bei der Kommunikation zwischen Steuerungseinheit und ROBOCOMM aus Sicht der Steuerungseinheit zwischen schreibendem Zugriff im Downstream und lesendem Zugriff im Upstream unterschieden: Schreiboperationen werden benötigt, um Befehle und Steuerdaten an die Roboter zu senden (USB-OUT-Transfer); bei einem lesenden USB-Zugriff werden Empfangsbestätigungen oder Roboterdaten, d. h. Mess- und Konfigurationsdaten, von ROBOCOMM zum Host übertragen (USB-IN-Transfer).

Softwareseitig wird ROBOCOMM über einen zu entwickelnden LINUX-Treiber an das Betriebssystem der Zentralrecheneinheit angebunden. Nach erfolgreicher USB-Enumeration wird ROBOCOMM als Blockgerät in das LINUX-Dateisystem integriert und erlaubt der Anwendersoftware neben Lese- und Schreiboperationen zusätzlich sog. *IOControl*-Zugriffe – in Anlehnung an den LINUX-Systemcall *ioctl* – zur Konfiguration (siehe hierzu Kapitel 6.3).

4.7.1 Aufgabenspezifikation

Für die Kommunikation mit den Mikrorobotern setzt ROBOCOMM neben den IR-Modi SIR, SIRpMiCRoN, MIR und FIR die für *IRC* vorgesehenen Spezialfunktionen um: die DLL als elektronische Verzögerungsschleife zur Stabilisierung des Phasengleichlaufs von gesendetem und empfangenem IR-Puls in den Modi SIR, SIRpMiCRoN, und MIR (Anpassung an Lokaloszillatordifferenzen), die Akzeptanz von FIR-Kurzpulsen und die Ergänzung einer Präambel für den MIR-Übertragungsmodus (vgl. hierzu Kapitel 4.6.2.2).

Von den Robotern empfangene IR-Datenpakete werden durch die Basisstation analysiert, aufbereitet und zwischengespeichert, bis sie durch die Steuerungseinheit per USB angefordert und ausgelesen werden. Die Empfangsdatenanalyse umfasst hierbei auch das Erkennen von CRC-Fehlern oder einer falschen Roboter-ID; weiterhin wird eine Timeout-Fehlermeldung generiert, wenn ein von einem Roboter angefordertes Datenpaket nicht innerhalb des zulässigen, von der Steuerungseinheit wählbaren Zeitfensters ("Timeout-Timer") von der Basisstation empfangen wird (siehe hierzu auch Kapitel 4.7.5.2).

Es wird ein optional einschaltbarer, zeitsynchroner Übertragungsmodus vorgesehen, der die Übermittlung der IR-Datenpakete in äquidistanten Zeitabständen erlaubt. Dies ermöglicht beispielsweise, die Messdaten eines mit einem AFM-Werkzeug ausgestatten Roboters immer mit der gleichen zeitlichen Differenz abzufragen. Dem Roboter, der seine Messwerte i. d. R. durch Abtastung mit anschließender A/D-Wandlung gewinnt, bliebe bei geeigneter Wahl des im FPGA zu implementierenden Synchronisations-Timers genügend Zeit, seine Messwert-Register zu aktualisieren. Dies würde gleichzeitig verhindern, dass Messdaten weder zu früh noch zu spät von ROBOCOMM und letztendlich vom Host angefordert werden – die wiederholte Übertragung eines alten Messwertes wäre dadurch ebenso zu vermeiden, wie das Überspringen eines neuen, noch nicht gesendeten Wertes. Um auch bei reduzierter IR-Sendeleistung seitens der Mikroroboter dennoch eine vollständige Empfangsabdeckung auf der gesamten Manipulationsarbeitsfläche für ROBO-COMM zu gewährleisten, wird für die Basisstation der Einsatz gleich mehrerer IR-Transceivermodule und digitaler FPGA-Empfangsschaltungen angestrebt (Multiempfängerbetrieb). Hierzu ist eine sich dynamisch an die IR-Pulslänge anpassende Echo-Unterdrückung zu implementieren. Diese soll unterbinden, dass die von ROBOCOMM gesendeten IR-Datenpakete nicht über (Mehrfach-)Reflexion wieder von den eigenen Transceivermodulen und ihren zugehörigen IR-Empfangseinheiten empfangen und, bedingt durch die im IR-Datenpaket implementierte Fehler erkennende Codierung, als fehlerhaft interpretiert werden – RO-BOCOMM würde das reflektierte Datenpaket als ein von einem Roboter gesendetes auffassen wollen, jedoch wäre Bit 3 des Control-Bytes fälschlicherweise auf logisch-0 gesetzt (vgl. Tabelle 4.3). Die daraufhin ablaufende interne Fehlerbehandlungsroutine würde den Empfang eines zwischenzeitlich von einem Roboter gesendetes verhindern.

Für die Datenübertragung an die Roboter hat die Steuerungseinheit, nach Ermittlung der Roboterpositionsdaten durch das globale Sensorsystem, das nächstliegende Transceivermodul mit Sichtkontakt auszuwählen – im Falle der MiCRoN Manipulationsstation z. B. gemäß dem jeweils belegten Quadranten der Roboterarbeitsfläche (vgl. Bild 4.10).

4.7.2 USB-Konzept für RoboComm

Die mittels FPGA und USB2.0-Controller zu realisierende Basisstation ROBOCOMM wird als multiapplikationsfähiges USB-Composite-Gerät konzipiert, d. h. sämtliche über die Kombination von FPGA und USB2.0-Controller realisierbaren USB-Functions teilen sich bzgl. Ihrer logischen Strukturierung eine Message-Pipe bzw. physikalisch betrachtet einen gemeinsamen Control-Endpoint 0 (EP0). Hierdurch ist es möglich, für sich zukünftig ergebende zusätzliche Aufgabengebiete weitere USB-Functions in die Firmware des FPGAs zu integrieren, z. B. für die Synchronisation mit globalen Sensorsystemen, für die Kommunikation mit einem Zuführungssystem für Werkzeuge und Materialen oder für die Synchroniserung mehrerer Mikromanipulationsstationen untereinander per Funkübertragungsstrecke.

Für ROBOCOMM als USB-Function werden zusätzlich zur Message-Pipe drei logische Datenkanäle (Stream-Pipes) implementiert: Über einen Konfigurationskanal kann das Verhalten der Basisstation zu Beginn eingestellt und im laufenden Betrieb jederzeit angepasst werden. Die beiden weiteren Stream-Pipes übernehmen den eigentlichen Datentransfer zwischen Steuerungseinheit und Basisstation bzw. den damit verbundenen Mikrorobotern.

Zum Konfigurieren von ROBOCOMM wird der OUT-Endpoint 1 (EP1-OUT) zur Übertragung der Konfigurationsdaten von der Steuerungseinheit an die Basisstation vorgesehen. Für diesen Endpoint wird der Bulk-Übertragungsmodus implementiert, da die Konfiguration nicht ständig in zeitäquidistanten Abständen übertragen werden muss (kein Interrupt-Transfer erforderlich) und dennoch eine fehlerfreie Datenübertragung notwendig ist – letztgenannter Aspekt führt zum Ausschluss des Isochronous-Transfers.

Der Datentransfer zwischen Steuerungseinheit und Mikrorobotern wird vollständig über Endpoint 2 (EP2) abgewickelt: Für den Downstream (USB-OUT-Transfer), d. h. den Transfer von Steuerungseinheit zur Basisstation bzw. weiter zu den Mikrorobotern wird EP2-OUT vorgesehen, EP2-IN bedient entsprechend die Rückrichtung. Für beide Übertragungsrichtungen von EP2 wird der Bulk-Transfer als Übertragungsmodus ausgewählt, da Datenintegrität, d. h. fehlerfreie Übertragung, erforderlich ist, eine synchrone Übertragung mit fester Datenrate aber nicht zwingend notwendig ist – vielmehr wird der Kommunikationsaufwand zwischen Steuerungseinheit und Mikrorobotern je nach Manipulationssituation unterschiedlich sein und die zu übertragende Datenmenge dementsprechend variieren.

Dem Nachteil des Bulk-Transfers, im Gegensatz zu Interrupt- und Isochronous-Transfer nicht über eine garantierte Bandbreite verfügen zu können, ist dadurch zu begegnen, dass an denselben USB-Root-Hub, an den die Basisstation ROBOCOMM angeschlossen wird, möglichst keine weiteren USB-Geräte zur Übertragung hoher Datenvolumina oder gar isochroner Multimedia-Datenströme angeschlossen werden. Eine Standard-PC-Maus dagegen kann als unkritisch betrachtet werden, da diese als Low-Speed-Gerät, trotz ihres Interrupt-Transfermodus' mit reservierter Bandbreite, keine großen Datenmengen überträgt, und die Belegung eines 125-µs-Mikro-Frames keine Beeinträchtigung für die ROBOCOMM-Kommunikation über den 480-Mbit-High-Speed-Bus darstellt.

4.7.3 Konfiguration von RoboComm

Vor Beginn des eigentlichen Datenaustausches zwischen Host und Roboter muss ROBO-COMM konfiguriert werden. Hierzu werden gemäß Bild 4.23 20 Bytes per *IOControl*-

IR Mode Control	SIR LCR	IR-Tx-/Rx-Unit Control 0	IR-Tx-/Rx-Unit Control 1
IR-USB-Dev Conf	TFDU CONF	TxCurrent TFDU 0/1	TxCurrent TFDU 2/3
IR TxEcho	IR TxEcho	IR-RxTxDelay	IR-RxTxDelay
Rejection (7:0)	Rejection (15:8)	(7:0)	(15:8)
IR-Tx-Synchron	IR-Tx-Synchron	IR-Tx-Synchron	IR-Tx-Synchron
Timer (7:0)	Timer (15:8)	Timer (23:16)	Timer (31:24)
IR-Rx	IR-Rx	IR-Rx	IR-Rx
Timeout (7:0)	Timeout (15:8)	Timeout (23:16)	Timeout (31:24)

Bild 4.23: 20 Bytes umfassender *IOControl*-Datenstrom zur Konfiguration von ROBOCOMM

Schreiboperation über EP1-OUT an das USB-Gerät übertragen – bestehen die einzelnen Konfigurationsworte z. B. für den Synchronisations-Timer aus mehr als einem Byte, so ist immer zuerst das niederwertige Byte zu übertragen.

Zunächst werden über die Register *IR Mode Control* und *SIR LCR* die für die IR-Datenübertragung notwendigen Parameter wie Übertragungsmodus und Baudrate einge-

stellt. IR-Tx/Rx-Unit Control spezifiziert Zusatzparameter für die IR-Sende- und Empfangseinheiten von ROBOCOMM, um die Sonderfunktionen der mikroroboterseitig eingesetzten IRCs wie z. B. MIR-Präambel, FIR-Kurzpulse, DLL oder SIRpMiCRoN-Modus entsprechend handhaben zu können. Daran anschließend werden über IR-USB-Dev Conf wesentliche hardwarespezifische Funktionen der Basisstation vorgegeben: Neben einem möglichen Selbsttestmodus zur Prüfung der angeschlossenen Transceivermodule sind hier insbesondere der Multiempfängerbetrieb, der synchronisierbare Datentransfer (äguidistanter Zeitabstand zwischen zwei IR-Übertragungen) und die IR-Echo-Unterdrückung zur Vermeidung des Empfangs eigener ausgesendeter IR-Datenpakete zu benennen. TFDU Conf in Verbindung mit den beiden Bytes TxCurrent TFDU 0/1 und TxCurrent TFDU 2/3 konfiguriert die an ROBOCOMM angeschlossenen IR-Transceivermodule bzgl. Typ und Sendeleistung (maximaler Sendestrom). Über die vier Bytes von IR-Tx-Synchron Timer wird der Zeitabstand definiert, der bei zeitäguidistanter Datenübertragung zwischen zwei IR-Übertragungen einzuhalten ist. Die letzten vier Bytes (IR-Rx Timeout) des IOControl-Datenstroms schließlich definieren die zulässige Wartezeit, die ROBOCOMM verstreichen lassen muss, bevor auf das Ausbleiben einer Mikroroboterantwort mit einer Fehlermeldung an die Steuerungseinheit zu reagieren ist (Timeout-Fehler). Eine detaillierte Beschreibung der Konfigurationsbytes einschließlich der jeweils empfohlenen Standardwerte findet sich in Anhang A.3.

4.7.4 USB-Datentransfer: Schreiboperation

Schreibzugriffe über EP2-OUT zur Übertragung von Daten an einen oder im Falle eines Broadcasts an mehrere Roboter erfordern eine für ROBOCOMM fest vorgeschriebene Da-





tenstruktur. Hierbei erfolgt eine grundsätzliche Unterteilung in USB-TxFrame, ROBO-COMM-Frame, und IR-Frame (Bild 4.24): Jeder USB-TxFrame setzt sich aus mindestens einem ROBOCOMM-Frame zusammen, der wiederum genau einen IR-Frame entsprechend dem in Kapitel 4.6.2 vorgestellten IR-Kommunikationsprotokoll umfasst.

4.7.4.1 **ВовоСомм-Frame**

Für jeden IR-Datenrahmen wird ein zugehöriger ROBOCOMM-Frame benötigt, der mit einer aus zwei Bytes bestehenden Längenangabe beginnt – hierbei werden in Anlehnung an die USB-Bitübertragungsschicht [KelO3] diese zwei Bytes mit in die Rahmenlänge eingerechnet. Die sich hieran anschließenden zwei Kontrollbytes bestimmen das Verhalten von RO-BOCOMM in Bezug auf den zu sendenden IR-Frame (Bild 4.25):



Bild 4.25: Kontrollbytes innerhalb eines ROBOCOMM-Frames

Wird von einem Roboter eine Bestätigung erwartet, so muss das Flag AckWanted gesetzt sein. Sollen Messdaten empfangen werden, muss stattdessen logisch-1 für das RxRequest-Flag gewählt werden. Haben beide Flags den Wert logisch-0, so sind lediglich Daten von ROBOCOMM an den bzw. die Roboter zu übermitteln. Über TxTFDUselection wird dasjenige Transceivermodul ausgewählt, das für die Übertragung des zum aktuellen ROBO-COMM-Datenrahmen zugehörigen IR-Datenpakets zuständig ist. Bei abgeschaltetem Multiempfängermodus muss über RxTFDUselection angegeben werden, welche IR-Empfangseinheit im Falle eines gewünschten Datenempfangs die von einem Roboter gesendeten Daten zu erwarten und auszuwerten hat. Die Funktion des Flags ValidateRxFIFO wird im Kapitel 4.7.5.1 erläutert.

Fordert der Host über den aktuellen ROBOCOMM-Frame Roboterdaten oder eine Empfangsbestätigung an, so ist in dem höherwertigen Byte *USB IR-Tx Control 1* die Roboter-ID desjenigen Roboters anzugeben, von dem das IR-Datenpaket erwartet wird. Auch die sog. *Broadcast*-Adresse 0xFF ist hier als Wert zulässig. Allerdings ist eine Datenanforderung im Falle eins Broadcasts nicht sinnvoll, da alle angesprochenen Roboter nahezu gleichzeitig antworten würden; ein fehlerfreier Empfang durch die IR-Empfangseinheit(en) wäre dann unmöglich.

4.7.4.2 USB-TxFrame

Der USB-TxFrame umfasst den gesamten Datenrahmen. Er enthält in den ersten zwei Bytes beginnend mit dem niederwertigen Byte die Angabe über die Länge des gesamten Datenrahmens – diese beiden Bytes sind mit in der Längenangabe zu berücksichtigen. Im Anschluss daran folgt direkt der erste ROBOCOMM-Frame.



Bild 4.26: (m+1) verkettete ROBOCOMM-Frames innerhalb eines USB-TxFrames

Um den Datendurchsatz bei der USB-Kommunikation zwischen Host und ROBOCOMM zu erhöhen, ist es dem Host möglich, mehrere ROBOCOMM-Frames miteinander zu verketten und innerhalb eines USB-Datenrahmens an ROBOCOMM zu versenden (Bild 4.26). Hierbei ist die maximale Bytezahl von derzeit 4096 Bytes innerhalb eines USB-TxFrames nicht zu überschreiten. Eine detaillierte Darstellung für einen zusammengesetzten USB-TxFrame ist dem nachfolgenden Bild 4.27 zu entnehmen.

USB-TxFrame [Max. 4096 Bytes (incl. USB-Frame Length Bytes)]	USB-Frame Length (Low Byte)	USB-Frame Length (High Byte)	(ir	RoboComi ncl. Frame L	m-Frame 0 ength Byte	s)		
	Frame 0 Length (Low Byte)	Frame 0 Length (High Byte)	USB IR-Tx Control 0	USB IR-Tx Control 1 (Robot ID)	Info 0_ 0	Info 0_ 1	Info 0	Info 0_ N
	Frame 1 Length (Low Byte)	Frame 1 Length (High Byte)	USB IR-Tx Control 0	USB IR-Tx Control 1 (Robot ID)	Info 1_ 0	Info 1 _1	Info 1	Info 1_ N
	Frame 2 Length (Low Byte)	Frame 2 Length (High Byte)	USB IR-Tx Control 0	USB IR-Tx Control 1 (Robot ID)	Info 2_ 0		Info 2	
	Frame M Length (Low Byte)	Frame M Length (High Byte)	USB IR-Tx Control 0	USB IR-Tx Control 1 (Robot ID)	Info M_ 0	Info M_ 1	Info M	Info M _N

Bild 4.27: Detaildarstellung eines aus (m+1) ROBOCOMM-Frames zusammengesetzten USB-TxFrames

4.7.5 USB-Datentransfer: Leseoperation

Entsprechend der USB-Spezifikation [USB00] ist nur dann ein Datentransfer von einem USB-Gerät zum Host möglich, wenn dieser Transfer vom Host angefordert wird. Ein an USB angeschlossenes Gerät kann nicht selbstständig eine Datenübertragung initiieren. Entsprechend dem USB-Master-Slave-Konzept teilt die Steuerungseinheit über EP2-OUT der Basisstation ROBOCOMM mit, dass Daten, die sog. ROBOCOMM-Antwortpakete, gelesen werden sollen. Diese werden daraufhin von ROBOCOMM über das FIFO des USB 2.0-Schnittstellen-Controllers zur Verfügung gestellt, so dass sie vom Host durch lesenden USB-Zugriff über EP2-IN innerhalb eines sog. *USB-RxFrames* abgerufen werden können.

Solange ROBOCOMM vom Host keine Aufforderung erhält, die Antwortpakete in das FI-FO des USB-Controllers zu übertragen, werden die Pakete in einem ROBOCOMM-internen Speicher zwischengespeichert. Dies ist notwendig, da zum einen der Befehl zum Bereitstellen der Daten nicht unmittelbar auf ein mit einer Roboterrückantwort verbundenes IR-Datenpaket folgen muss, zum anderen lässt sich, ähnlich wie beim USB-Schreibzugriff, der Datendurchsatz beim Lesen durch Verkettung der einzelnen Antwortpakete erhöhen.

Der USB-RxFrame wird auf eine Länge von 4096 Bytes begrenzt. Daher ist es für die auf dem Host ausgeführte Roboterkontrollsoftware erforderlich, abzuschätzen, wie viele Bytes bisher von ROBOCOMM zu erwarten sind. Würde die erwartete Bytezahl für die Antwortpakete den Wert 4096 nach Absetzen des nächstfolgenden ROBOCOMM-Frames übersteigen, dann wäre von ROBOCOMM zuvor die Vorbereitung der Antwortpakete zu fordern: entweder über das Flag *RxValidateFIFO* direkt innerhalb des aktuell zu sendenden ROBOCOMM-Frames oder im direkten Anschluss an diesen ROBOCOMM-Frame durch Senden der sog. *Compose*-Instruktion. Im Anschluss an den dann notwendigen Lesezugriff kann die Übertragung des nächsten ROBOCOMM-Frames fortgesetzt werden.

Eine grobe Abschätzung bzgl. Anzahl der Antwortbytes genügt, da bzgl. der Maximalanzahl von 4096 Bytes noch eine Sicherheitsmarge von 256 Bytes implementiert wird. Fehlerbotschaften für den Fall eines per IR fehlerhaft übertragenen ROBOCOMM-Frames stellen auch keine Gefahr dar hinsichtlich des Überschreitens der maximalen Byteanzahl: Träte beispielsweise bei der Übertragung von Roboterdaten ein Fehler auf, so würde sich das auf den entsprechenden ROBOCOMM-Frame beziehende Antwortpaket automatisch auf vier Bytes verkürzen. Weiterhin ist sichergestellt, dass die Byteanzahl der Fehlerbotschaften die minimale Anzahl an Bytes für eine fehlerfrei empfangene IR-Rückantwort, insbesondere eine Empfangsbestätigung (siehe nachfolgendes Kapitel 4.7.5.2), nicht übersteigt.

4.7.5.1 Vorbereitung der RoвоСомм-Antwortpakete

Aus Sicht der Steuerungseinheit (Host) bestehen zwei Möglichkeiten, das Verschieben der Antwortpakete aus dem internen ROBOCOMM-Speicher in das FIFO des USB-Controllers zu erwirken: entweder durch die sog. *Compose*-Instruktion oder durch das Flag *ValidateRxFI-FO* im Low-Byte des Kontroll-Wortes (Bild 4.25). In beiden Fällen ist ein Schreibzugriff über



Bild 4.28: Struktureller Aufbau der Compose-Instruktion EP2-OUT durch die Steuerungseinheit notwendig.

Die aus zwei Bytes bestehende Instruktion (Hex-Wert 0x0000) muss im Rahmen eines eigenständigen, d. h. nicht verketteten USB-Schreibzugriffs an ROBOCOMM gesendet werden – das zugehörige Datenpaket entspricht nach Bild 4.28 einem USB-TxFrame, der sich nur aus zwei Bytes zur Längenangabe zusammensetzt.

Falls mehrere USB-Geräte gleichzeitig an den Host angeschlossen sind, die ähnlich wie ROBOCOMM ebenfalls höhere Datenmengen quasi-kontinuierlich übertragen müssen, so kann zur Reduktion der USB-Aktivitäten auf die *Compose*-Instruktion verzichtet werden: Stattdessen kann bereits bei der Übertragung des letzten ROBOCOMM-Frames eines einzelnen oder verketteten USB-TxFrames das Flag *ValidateRxFifo* (vgl. Bild 4.25) auf logisch-1 gesetzt werden. Dieses Flag sorgt dafür, dass nach Ausführung des zugehörigen ROBO-COMM-Frames zunächst die bisher im internen Speicher abgelegten Antwortpakete und abschließend das gerade erzeugte Antwortpaket in das FIFO des USB-Controllers geschrieben werden und somit für den nächsten USB-Lesezugriff zur Verfügung stehen.

4.7.5.2 Aufbau der RoвоСомм-Antwortpakete

Alle von den Robotern empfangen IR-Datenpakete werden von ROBOCOMM zunächst auf Fehlerfreiheit, erwarteten Datenpakettyp (Empfangsbestätigung oder Roboterdaten) und Roboter-ID hin überprüft. Fehlerfrei bedeutet hier, dass die für eine Rückantwort zulässige Wartezeit (siehe Kapitel 4.7.3) nicht überschritten und das IR-Datenpaket entsprechend dem gewählten Übertragungsmodus korrekt, d. h. bitfehlerfrei empfangen wurde. Die empfangene Roboteradresse wird mit derjenigen verglichen, die zuvor in dem höherwertigen Kontrollbyte des zugehörigen ROBOCOMM-Frames angegeben worden ist (vgl. Bild 4.25). Im Anschluss an die IR-Datenpaketanalyse wird entsprechend ein ROBOCOMM-Antwortpaket erzeugt und zunächst im internen ROBOCOMM-FIFO abgelegt – dieses FIFO ermöglicht letztendlich dem Host die zeitliche Zuordnung von Antwortpaket zu ROBO-COMM-Frame. Nachfolgend werden die Antwortpakete zur Empfangsbestätigung, zur Fehlermeldung und zum Übermitteln von Roboterdaten an den Host erläutert.

Empfangsbestätigung

Wird vom Host im Anschluss an eine IR-Datenübertragung eine Quittierung des Empfangs durch den adressierten Roboter gewünscht, so wird, fehlerfreie IR-Übertragung der Robo-

USB-Rx-RoboComm FrameLength (7:0) FrameLength (15:8) Acknowledge Low (Robot ID)

Bild 4.29: Aufbau der Empfangsbestätigungsbotschaft (Acknowledge-Datenpaket) terempfangsbestätigung vorausgesetzt, ein vier Bytes umfassendes USB-Antwortpaket als Bestätigungsmeldung entsprechend Bild 4.29 von ROBOCOMM

generiert. Das Paket beginnt mit zwei Bytes zur Längenangabe gefolgt von zwei Kontrollbytes (Bild 4.30) zur Identifikation und Charakterisierung des Pakets als Empfangsbestätigung. Bzgl. der Längenangabebytes ist zu beachten, dass diese beiden Bytes mit in die Länge einzubeziehen sind. Daher besitzt das Low-Byte zur Angabe der Paketlänge für die-

Acknowledge Low										
7	6	5 4	3	2	1	0				
0 1 RX-TFDUmodule 0 0 0 0										
		Acknowl	edge High							
7	7 6 5 4 3 2 1 0									
Robot ID (7:0)										

Bild 4.30: Bitkonfiguration der Kontrollbytes zur Bestätigung der IR-Empfangsquittung vom Roboter mit der Adresse Robot ID sen Pakettyp immer den Hex-Wert 0x04, während das High-Byte auf 0x00 gesetzt ist. Das Byte *Acknowledge Low* der zwei Kontrollbytes hat für die beiden höchstwertigen Bits immer den Binärwert $(01)_2$. Über die zwei Bits von *RX-TFDUmodule* wird die IR-Empfangseinheit angegeben, die das IR-Datenpaket vom Roboter empfangen hat. Die in der IR-Empfangsbestätigung enthaltene Roboter-ID wird im Byte Acknowledge High abgelegt.

Fehlermeldung

In Bild 4.31 ist der grundsätzliche Aufbau eines ROBOCOMM-Antwortpaketes zur Meldung eines IR-Übertragungsfehlers angegeben. Es besteht aus vier Bytes, zwei Bytes zur Angabe USB-Rx-RoboComm FrameLength (7:0) USB-Rx-RoboComm (Robot ID)

Bild 4.31: Aufbau des Antwortpaketes zur Meldung eines Übertragungsfehlers

der Paketlange und zwei Kontrollbytes, die es dem Host erlauben, dieses Antwortpaket als Fehlermeldung interpretieren zu können. Analog zum Ant-

wortpaket für eine Empfangsbestätigung besitzt das Low-Byte der Längenangabe bei einer Fehlermeldung immer den Hex-Wert 0x04, das zugehörige High-Byte den Wert 0x00.

Die Bitkonfiguration der beiden Kontrollbytes ist in Bild 4.32 dargestellt. Im Byte *Error Message High* wird jeweils die Roboter-ID des zuvor per Infrarotübertragung angesprochenen Roboters eingetragen. Die zwei höchstwertigen Bits des Bytes *Error Message Low* kennzeichnen durch (11)₂ das Antwortpaket als Fehlermeldung.

Das Flag *FewData* wird nur für Testzwecke, insbesondere für den ROBOCOMM-Selbsttest, verwendet, im Normalbetrieb bleibt es ohne Bedeutung. Wird die über das Register

Error Message Low										
7	6	5	4	3	2	1	0			
1	1	FewData	RxTimeout	RxPhys- Layer	RobotID	RxRequest	Ackn			
Error Message High										
/	7 6 5 4 3 2 1 0 Robot ID (7:0)									

Bild 4.32: Bitkonfiguration der Kontrollbytes für eine Fehlermeldung

IR-RxTimeout (vgl. Bild 4.23 in Kapitel 4.7.3) eingestellte Zeitdauer beim Warten auf ein vom adressierten Roboter zu empfangendes Datenpaket überschritten, wird das Flag *RxTimeout* auf logisch-1 gesetzt. Tritt ein Fehler auf der physikalischen Ebene des IR-Protokolls

auf, so wird dies mit einer logisch-1 durch das Flag *RxPhysLayer* angezeigt. Stimmt die Roboter-ID des empfangenen IR-Datenpaketes nicht mit der im zugehörigen ROBOCOMM-Frame angegebenen Roboteradresse überein, so wird dieser Fehler dem Host über das Flag *Robot ID* mitgeteilt. Handelt es sich bei einem empfangenen IR-Datenpaket nicht um den jeweils erwarteten Datenpakettyp, so wird dies über die Flags *RxRequest* und/oder *Ackn* in der Fehlermeldung berücksichtigt. Falls der Wert eines der im aktuellen ROBO-COMM-Frame gesetzten Flags (Bit 1 und Bit 2 in Bild 4.25) vom Wert des analog im empfangenen IR-Datenpaket vorkommenden Flags (Bit 1 bzw. Bit 2 im Control-Byte gemäß Tabelle 4.3) abweicht, so erhalten die entsprechenden Fehlerkennzeichnungen Bit 0 und/oder Bit 1 im Byte *Error Message Low* den Wert logisch-1.

Übermittlung von Roboterdaten

Der Aufbau eines ROBOCOMM-Antwortpaketes zur Übermittlung von Roboterdaten an den Host ist in Bild 4.33 dargestellt. Beginnend mit zwei Bytes zur Längenangabe folgen nach zwei Kontrollbytes die eigentlichen Roboterdaten (in der Abbildung (N+1) Info-Bytes).

USB-Rx-RoboComm FrameLength (7:0)	USB-Rx-RoboComm FrameLength (15:8)	RxRequest Low	RxRequest High (Robot ID)	Info_0	Info_1	
Info_2			Info		Info_N	



In den Wert der Längenangabe sind die Längenangabebytes selbst mit eingerechnet. Die beiden Kontrollbytes *RxRequest Low* und *RxRequest High* besitzen einen Aufbau entsprechend nachfolgendem Bild 4.34: Die beiden höchstwertigen Bits des Low-Bytes sind

RxRequest Low							
7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	RX-TFD	Jmodule	0	0	0	0
RxRequest High							
7	6	5	4	3	2	1	0
			Robot I	D (7:0)			

Bild 4.34: Bitkonfiguration der Kontrollbytes bei der Übertragung von Roboterdaten

auf den Wert $(00)_2$ gesetzt, über *Rx-TFDUmodule* wird die IR-Empfangseinheit angegeben, die das vom Roboter gesendete Datenpaket ausgewertet hat. Das High-Byte enthält den Absender (Roboter-ID) der empfangenen Daten.

Aufgrund der Begrenzung eines IR-Datenpaketes auf maximal 128 Bytes (entsprechend den Überlegungen aus Kapitel 4.6.2.2) können unter Berücksichtigung einer zur Fehlererkennung notwendigen CRC-Sequenz maximal 120–127 Bytes als IR-Rohdaten (Roboterdaten) an den Host übertragen werden – der Unterschied von bis zu sieben Bytes ergibt sich zum einen aus den verschieden langen CRC-Sequenzen je nach Übertragungsmodus, zum anderen aus den zwei verschiedenen Möglichkeiten, auf die Register des Roboters lesend zuzugreifen (sequentieller oder selektiver Lesezugriff gemäß Bild 4.20 bzw. Bild 4.21).

4.7.5.3 Verkettung von Antwortpaketen

Zur Erhöhung des Datendurchsatzes können mehrere Antwortpakete innerhalb eines USB-Datenpakets an den Host übertragen werden. Hierbei werden die Antwortpakete unmittelbar hintereinander in einen USB-Datenrahmen eingetragen (siehe hierzu in Bild 4.35 den USB-RxFrame (ROBOCOMM → Host)).

Nachfolgend wird in Bild 4.35 ein Beispiel für einen bidirektionalen USB-Datentransfer zwischen Host und ROBOCOMM gezeigt. Hierbei ist vorausgesetzt, dass sämtliche, zuvor in ROBOCOMM erzeugten Antwortpakete bereits in einem vorherigen USB-Lesezugriff vom Host abgerufen worden sind:



Bild 4.35: Beispiel für bidirektionalen USB-Datentransfer

Der Host sendet einen 259 Bytes großen USB-Frame, der vier ROBOCOMM-Frames umfasst. Der erste ROBOCOMM-Frame, bestehend aus 69 Bytes, enthält einen IR-Frame, der über die IR-Sendeeinheit 0 an den Roboter mit der Roboter-ID 0x05 zu übertragen ist. Nach Senden der Daten des IR-Frames wird auf die Empfangsquittierung durch den Roboter gewartet. Durch den zweiten 63 Bytes langen ROBOCOMM-Frame wird dem Roboter mit der Roboter-ID 0x06 über die IR-Sendeeinheit 0 mitgeteilt, welche Roboterdaten an ROBOCOMM zurückzusenden sind. Über den dritten ROBOCOMM-Frame (64 Bytes) wird ein IR-Datenpaket über die Sendeeinheit 1 an den Roboter mit der ID 0x05 gesendet, wobei der Empfang der IR-Daten vom Roboter zu bestätigen ist. Der letzte ROBOCOMM-Frame mit einer Größe von 61 Bytes erwartet nach Senden des IR-Frames über das IR-Sendemodul 3 Roboterdaten vom Roboter 0x02.

An diesen USB-TxFrame anschließend folgt die *Compose*-Instruktion, die ROBOCOMM dazu veranlasst, dem Host über den USB 2.0-Controller die erzeugten Antwortpakete für einen USB-Lesezugriff zur Verfügung zu stellen.

Abschließend werden die Antwortpakete vom Host innerhalb eines USB-RxFrames gelesen: Das erste Paket vermittelt die erfolgreiche Empfangsbestätigung durch Roboter 0x05. Hieran anschließend erhält der Host über das 124 Bytes umfassende Antwortpaket Roboterdaten vom Roboter mit der ID 0x06. Das dritte Paket enthält wieder eine Empfangsbestätigung vom Roboter 05 und das letzte Antwortpaket signalisiert dem Host über die 4-Byte-lange Fehlermeldung, dass die vom Roboter 02 angeforderten Roboterdaten nicht innerhalb der für deren Übertragung zulässigen Zeit von ROBOCOMM empfangen werden konnten (Timeout-Fehler).

5 ASIC IRC

5.1 Spezifikation

Das ASIC-Modul *IRC* setzt das in Kapitel 4.6.2 spezifizierte IR-Kommunikationsprotokoll für den Datenaustausch zwischen der Kontrollelektronik des jeweiligen Mikroroboters und der Steuerungseinheit bzw. Basisstation um. Neben den verschiedenen IR-Übertragungsmodi (SIR, SIRpMiCRoN, MIR, FIR) sind weitere Zusatzfunktionen (*IRC*-Spezialfunktionen) zu unterstützen. Es wird eine optional zuschaltbare DLL für die Modi SIR, SIRpMiCRoN und MIR implementiert, die den Phasengleichlauf von gesendetem und empfangenem IR-Puls synchronisiert (Anpassung an Lokaloszillatordifferenzen). Für den Sendebetrieb im MIR-Modus kann dem eigentlichen IR-Datenpaket optional eine Präambel vorangeschaltet werden. Für den FIR-Modus ist der Empfang von IR-Kurzpulsen mit einer Pulsdauer von 50 ns zu implementieren. Diese optional zuschaltbare Funktion soll den Empfang des FIR-Datenstroms erleichtern, da Pulse bei harter Detektion mit einer geringeren als der von Ir-DA spezifizierten Mindestpulslänge von 115 ns auftreten können – wesentliche Ursache hierfür liegt in der bereits in Kapitel 4.6.2.1 angesprochenen Schwellenwertproblematik insbesondere bei höherer Übertragungsrate bzw. PPM.

Sowohl für den Empfang als auch das Senden der IR-Datenpakete wird jeweils ein FIFO vorgesehen. Hierzu ist für den *IRC* ein FIFO-Kontroll-Modul zu implementieren, das die Logik- und Timing-Vorgaben eines in der Zieltechnologie zur Verfügung stehenden Hardmakros für digitale Halbleiterspeicher (RAMs) erfüllt. Die FIFOs umfassen, wie in Kapitel 4.6.2.2 bereits erläutert, jeweils 128 Byte (=1024 Bit), um selbst bei einem gestörten Kanal (BER = 10⁻⁵) einen hohen Datendurchsatz bei gleichzeitig kurzen Turnaround-Zeiten erzielen zu können. Entsprechend ist das Zusammenspiel zwischen Daten- und Kontrollpfad des *IRC* so zu entwerfen, dass die Turnaround-Zeit des *IRC*, d. h. der zeitliche Abstand zwischen dem vollständigen Empfang eines IR-Datenpakets und seiner entsprechenden Reaktion (Rücksenden eines angeforderten IR-Datenpakets) möglichst gering ausfällt.

Die für die elektrooptische Wandlung vorgesehenen Transceivermodule TFDU6108, TFDU8108 und TFDU6102 der Firma VISHAY SEMICONDUCTORS sind durch *IRC* nach dem Power-On-Reset (POR) zu initialisieren und bei Umstellung des IR-Modus' zu rekonfigurieren. Hierzu ist für die Module TFDU6108 und TFDU8108 das Kommunikationsprotokoll der SITC-Schnittstelle gemäß [Vis03c] und [Vis03d] zu implementieren. Zur Konfiguration des TFDU6102 sind die zur SITC-Schnittstelle kompatiblen Konfigurationspins für *Pulse Shaping* und *Shutdown* (vgl. Kapitel 4.6.1.1) entsprechend einzustellen. Die hier aufgeführten Module von VISHAY propagieren bei Empfang eines IR-Lichtpulses einen low-aktiven elektrischen Puls an den *IRC* (vgl. Kapitel 4.6.1.1); dennoch sollte im Hinblick auf zukünftige Kompatibilität auch ein high-aktiver elektrischer Puls als Eingangssignal vom ASIC-Modul verarbeitet werden können.

Für den Datenaustausch mit der Kontrollelektronik des Mikroroboters wird gemäß Kapitel 4.6.2.2 eine standardisierte asynchrone DMA-Schnittstelle für sequentielle und selektive Transfers von 16-Bit-Datenworten im 16-Bit-Adressraum realisiert, um die Anbindung des *IRCs* an weitere elektronische Komponenten des Mikroroboters zu vereinfachen. Im Sinne des Master-Slave-Kommunikationskonzeptes ist ein Schreibzugriff (Downstream) als Datentransfer vom DMA-Ausgang des *IRCs* an die Mikroroboterelektronik zu verstehen; die umgekehrte Richtung von der Roboterkontrollelektronik an den *IRC* (DMA-Eingang) wird als lesender Datentransfer (Upstream) bezeichnet. Für jede Transferrichtung wird jeweils ein 16 Bit breiter unidirektionaler Datenbus vorgesehen; die Adressierung geschieht über einen für beide Datenbusse gemeinsamen 16-Bit-Adressbus, da Schreib- und Lesezugriffe aufgrund des Master-Slave Konzepts nicht gleichzeitig erfolgen.

Bedingt durch das systemimmanente Energiedilemma bei drahtlosen, mobilen Mikrorobotern (Kapitel 2.4.3.3) ist auf geringen statischen und dynamischen Energiebedarf zu achten. Hierzu sind innerhalb des *IRC* die jeweils gerade nicht benötigten Komponenten abzuschalten, d. h. von der Taktversorgung abzukoppeln und erst bei Bedarf wieder zu aktivieren. Weiterhin ist für die Transceivermodule TFDUx108 die Einstellung des Sendestroms per SITC-Schnittstelle zu realisieren, so dass die Steuerungseinheit per *IRC*-Befehl den Maximalstrom und damit den Energiebedarf für die IR-Lichtpulse fernsteuern kann.

Um den Platzbedarf so gering wie möglich zu halten, werden nur wenige externe Kontrollsignale für das *IRC*-ASIC-Modul vorgesehen. Diese dienen primär zur Spezifikation des angeschlossenen Transceivermoduls: Neben dem Typ (TFDUx108 oder TFDU6102) ist zusätzlich anzugeben, ob das eingesetzte Transceivermodul einen empfangenen IR-Lichtpuls herstellerbedingt in einen high-aktiven oder aber in einen low-aktiven elektrischen Puls umwandelt – die Transceivermodule TFDU6108, TFDU8108 und TFDU6102 liefern einen low-aktiven Ausgangspuls. Weiterhin ist eine externe Kontrollleitung für die ASIC-Verifikation vorzusehen, um die wesentlichen Signale eines internen Testbusses, welcher die wichtigsten *IRC*-Systemgrößen wiedergibt, am 16-bit-DMA-Ausgang zugänglich zu machen.

5.2 Implementierung

5.2.1 Gesamtaufbau

Um eine hohe Abarbeitungsgeschwindigkeit der von der Steuerungseinheit eingehenden Befehle, eine kurze Reaktionszeit (einschließlich Turnaround-Zeit) und damit einen hohen Datendurchsatz zu erreichen, wird für das ASIC-Modul *IRC* eine Taktfrequenz (Master-Clock) von 40 MHz festgelegt. Der *IRC* wird modular aufgebaut, um die Komplexität der Einzelkomponenten beherrschbar zu halten und neben der Testbarkeit auch die Adaptierbarkeit hinsichtlich Spezifikationsänderungen zu garantieren. Weiterhin erlaubt der modulare Ansatz, mit Blick auf das Energiedilemma, die gezielte Abschaltung nicht benötigter *IRC*-Komponenten. In Verbindung mit einem vom IR-Modus abhängigen Taktmanagement kann hierdurch der dynamische Energiebedarf gezielt reduziert bzw. angepasst werden.

Sämtliche *IRC*-Blöcke sind gemäß Kapitel 4.5 in VHDL in Form separater *ENTITY*- und *Architecture*-Dateien beschrieben. Basis bildet das VHDL-Package IRDA_PHYS_LAYER zur Konfiguration des IR-Protokolls, zur einfachen Adaption an z. B. eine andere Modul-Taktfrequenz oder für Korrekturen bzgl. der *IRC*-Spezialfunktionen.

In Bild 5.1 ist der Gesamtaufbau des *IRCs* als Blockschaltbild dargestellt: Der *IRC*-ASIC setzt sich aus der *RX-Unit*, der *TX-Unit*, der *CPU* und dem Transceivermodul-Interface, bestehend aus *init TFDU6102* und *init TFDUx108*, zusammen.

Die *RX-Unit* sorgt für den Empfang, genauer die elektrische Demodulation, der von *Ro-BOCOMM* gesendeten IR-Datenpakete (Roboterdaten oder *IRC*-Befehle), die *TX-Unit* übernimmt umgekehrt den IR-Transfer (elektrische Modulation) von Empfangsbestätigungen, *IRC*-Statusinformationen und Roboterdaten zurück an die Basisstation.

Die CPU koordiniert und kontrolliert die gesamten *IRC*-Funktionskomponenten. Zur Einstellung wesentlicher Parameter, die es während der *IRC*-Initialisierung von der CPU zu berücksichtigen gilt, sind externe Kontrollsignale vorgesehen. Für den Datenaustausch mit der (*IRC*-externen) Roboterkontrollelektronik wird das bidirektionale, an eine standardisierte DMA-Schnittstelle angelehnte *Data Exchange Interface* innerhalb der CPU realisiert. Dieses erlaubt einerseits die Übermittlung der von *ROBOCOMM* gesendeten Signalansteuerparameter wie Signalform, Amplitude oder Frequenz an die entsprechenden Generatoren (Takt-Generator bzw. Signalform-Generator) der Roboteraktorik. In umgekehrter Datenflussrichtung werden über diese Schnittstelle, nach Anforderung durch die Steuerungseinheit, Messwerte oder Statusinformationen der Robotersensorik an den *IRC* und per IR-Verbindung weiter an *ROBOCOMM* und letztendlich an die Steuerungseinheit übermittelt.



Bild 5.1: Blockschaltbild des ASIC-Moduls IRC

Über die beiden *init TFDU*-Komponenten wird das jeweils angeschlossene Transceivermodul nach dem Power-On-Reset (POR) initialisiert und sowohl zu Beginn als auch während des Betriebs entsprechend dem gewünschten IR-Modus eingestellt. Die Komponente *init TFDUx108* dient der Kommunikation per SITC-Schnittstelle mit den Transceivermodulen TFDU6108 und TFDU8108; *init TFDU6102* übernimmt die Konfiguration im Falles eines angeschlossenen Transceivermoduls vom Typ TFDU6102.

5.2.2 Technologie

Für das mittels digitaler Standardzellen zu realisierende *IRC*-ASIC-Modul wird die 0,35 µm CMOS-Technologie **c35b4** (HIT-Kit¹, Version 3.51) des österreichischen Halbleiterherstellers *austriamicrosystems* AG, kurz AMS, als Zieltechnologie ausgewählt [Ams06a]. Diese Prozesstechnologie ist für digitale, analoge und Mixed-Signal-ASICs applizierbar; "b4" bezeichnet die vier Metalllagen, die in Ergänzung zu den polykristallinen Siliziumlagen für die

¹ High Performance Interface Tool Kit

Realisierung und Verknüpfung der Standardzellen eingesetzt werden. Als Versorgungsspannung für die digitalen Standardzellen sind 3,3 V vom Halbleiterhersteller spezifiziert, zusätzlich existieren auch I/O-Buffer bzw. I/O-Pads, die eine Anbindung an externe Komponenten gestatten, die mit 5 V Versorgungsspannung betrieben werden.

Der Grund für die Wahl dieser CMOS-Technologie liegt primär in der Tatsache, dass die durch den EUROPRACTICE Dienst für Universitäten und Forschungsinstitute kostengünstig zur Verfügung stehende AMS-Prozesstechnologie für den Roboter-Kontroll-ASIC *MXS* als Zieltechnologie spezifiziert wurde [Eur06a], [Eur06b] – die AMS Technologiebibliotheken bilden daher die Grundlage für die nahtlose Integration des *IRC* in den *MXS*. Weiterhin bietet diese Technologie den angenehmen Nebeneffekt, dass der zulässige Spannungsbereich einerseits ohne weitere schaltungstechnische Maßnahmen zur umgebenden Mikroroboterelektronik (3–5 V) einschließlich Transceivermodul kompatibel ist und andererseits auch mit dem POWER FLOOR vereinbar ist, für dessen roboterseitig eingesetzte POWER PACKS eine stabilisierte Ausgangsspannung von 3,3 V spezifiziert ist (vgl. Kapitel 4.1.2.3).

Für die Digitalschaltungsentwicklung, insbesondere die Logiksynthese zur Erzeugung der technologieabhängigen Gatternetzliste, stehen dem FRAUNHOFER IBMT die Bibliotheken CORELIB (digitale Standardzellen), IOLIB_4M (digitale Input-/Output-/Bidirektionale Buffer und Power Pads) und IOLIB5V_4M (digitale Input-/Output-/Bidirektionale Buffer und Power Pads zur Anbindung an 5V-Peripherie) zur Verfügung. Weiterhin sind für die Technologie c35b4 direkt einsetzbare analoge Standardzellen, wie z. B. Blöcke für Power-On-Reset oder Oszillatorschaltungen für 20 MHz oder 40 MHz, von AMS erhältlich.

Für die Einbindung von digitalen Halbleiterspeichern ist der *Memory Generator* von AMS verfügbar [Ams06b]. Dieser erlaubt, verglichen mit Latches oder Flip-Flops, die sowohl platz- als auch energiesparende Implementierung spezieller RAM- oder ROM-Speicherzellen für die 0,35-µm-CMOS-Technologie. Für die Einbindung dieser speziellen Speicher in den Design-Flow werden die erforderlichen Dateien für die Backend-Werkzeuge und zur Integration in die Timing-Simulationsumgebung (VHDL-VITAL95-Bibliotheken und SDF-Timinginformationen) von AMS automatisch zur Verfügung gestellt. Durch den *Memory Generator* können nur ROM-Blöcke und RAM-Speicher mit einem Zugriffskanal (*Single-Port-RAM*) oder mit Doppelzugriff (*Dual-Port-RAM*) generiert werden. Komplexere Speichertypen, wie z. B. die für den *IRC* spezifizierten FIFOs, sind nicht direkt erzeugbar.

5.2.3 *IRC*-CPU

Die *IRC*-CPU koordiniert das Zusammenspiel der einzelnen *IRC*-Komponenten. Zur Speicherung der für die IR-Verbindung essentiellen Parameter wie IR-Modus, Baudrate, *IRC*-Spezialfunktionen, Roboter-ID, etc. werden innerhalb der CPU jeweils Kontrollregister eingerichtet, deren Ausgänge bedarfsgerecht an *RX-Unit* und *TX-Unit* propagiert werden. Die Registerinhalte können durch die in Kapitel 4.6.2.2 erläuterten *IRC*-Befehle überschrieben bzw. ausgelesen werden. Im Hinblick auf kurze Reaktionszeiten (Turnaround-Zeiten) und damit hohen Datendurchsatz gemäß [BBV00] wird die *IRC*-CPU direkt an die 40-MHz-Master-Clock angebunden – hierdurch kann ein empfangenes Datenpaket von 128 Bytes innerhalb von ca. 3,2 µs vollständig ausgelesen und ausgewertet werden – zum Vergleich: Die Lichtpulsdauer eines Einzelpulses für SIR bei 115,2 kbit/s beträgt bereits 1,63 µs, für die FIR-Startfolge werden 4 µs benötigt.

5.2.3.1 Finiter Zustandsautomat CPU-FSM

Die CPU wird als finite Ablaufsteuereinheit (Finite State Machine, kurz FSM) realisiert. Bild 5.2 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Flussdiagramms für die *IRC*-CPU. Nach einem Reset (Power-On-Reset bzw. Reset über asynchronen low-aktiven Reset-Pin) durchläuft die CPU zunächst eine Initialisierungsroutine: Die Register zur Speicherung der IR-Übertragungsparameter (Baudrate, IR-Modus, SIR Line Control Register) werden mit den Vorgabe-Werten für SIR-Modus mit 115,2 kbit/s initialisiert. Die Logikwerte der externen Kontrolllei-

tungen werden in den zugehörigen internen CPU-Registern abgespeichert. Nach Auswertung der Kontrollsignale zur Identifikation des angeschlossenen Transceivermoduls (vgl. nachfolgendes Kapitel 5.2.3.2) wird die zugehörige Transceivermodulkomponente zur Initialisierung aufgerufen: *init TFDU6102* für TFDU6102 oder aber *init TFDUx108* für



Bild 5.2: FSM-Flussdiagramm der IRC-CPU

TFDU6108 bzw. TFDU8108. Im Anschluss an die TFDU-Initialisierungsroutine ist das Transceivermodul empfangsbereit. Die CPU schaltet die Empfangseinheit *RX-Unit* an. Der *IRC* ist bereit für den Empfang von *ROBO-COMM*-Datenpaketen.

Wird durch die *RX-Unit* bzw. durch den entsprechend dem IR-Modus eingeschalteten Unwrapper ein empfangenes Datenpaket angezeigt, so liest die CPU dieses aus dem 8-bit-breiten Empfangs-FIFO aus. Bei Empfangsfehlern (Fehler im IR-Protokoll auf physikalischer Ebene, CRC-Fehler, Timeout) werden die bisherigen fehlerhaften Datenbytes aus dem Empfangs-FIFO ausgelesen und ihr Inhalt verworfen. Das einfache Auslesen des FIFO-Inhalts bietet den Vorteil, fehlerhafte Datenpakete aus dem FIFO löschen zu können, ohne die vielleicht schon direkt

im Anschluss fehlerfrei empfangenen Bytes eines nachfolgenden Datenpakets anzutasten. Im fehlerfreien Falle werden, parallel zum Auslesen des Datenpakets aus dem RX-FIFO, die Roboter-ID geprüft und die Informationsbytes des Datenpakets, nach Auswertung von Control-Byte und I-Byte I₀ (*IRC*-Befehl, Schreiben oder Lesen von Roboterdaten mit/ohne

- angeforderter Empfangsbestätigung), entsprechend weiterverarbeitet:
 Wird durch die Steuerungseinheit eine Anpassung des IR-Links bzgl. Baudrate, IR-Modus, SIR Line Control oder *IRC*-Spezialfunktion gefordert, so filtert die CPU die betreffenden Parameter direkt aus dem Datenpaket heraus und schreibt sie in die entsprechenden *IRC*-internen Register.
- Ist das empfangene Datenpaket f
 ür die *IRC*-externe Roboterelektronik bestimmt, so werden die 16-bit-Adresse und das zugeh
 örige 16-bit-Datenwort jeweils aus dem 8-bit-Bytestrom zusammengesetzt und per DMA-Schreibzugriff
 über das *Data Exchange Interface* an die Roboterelektronik
 übermittelt.

Fordert die Steuerungseinheit eine Rückantwort an, so bereitet die CPU das zu sendende Datenpaket vor und speichert dieses mit dem Low-Byte voran im 8-bit-breiten Sende-FIFO der Sendeeinheit *TX-Unit* ab:

- Sind Roboterdaten zu übermitteln, so werden per selektivem bzw. sequentiellem DMA-Lesezugriff mit der Roboterkontrollelektronik kommuniziert, die gewünschten 16-bit-Datenworte angefordert und byteweise in die Datenrahmenstruktur entsprechend Bild 4.20 bzw. Bild 4.21 verpackt.
- Für das Senden einer Empfangsbestätigung oder den Transfer von *IRC*-Statusinformationen bzw. TFDU-Registerwerten ist kein Zugriff über das *Data Exchange Interface* notwendig. Das Acknowledge-Paket wird direkt durch die CPU entsprechend Bild 4.19 mit der aktuellen Roboter-ID des *IRC* generiert. Für die Übermittlung des *IRC*-Status werden die *IRC*-internen Register für Baudrate, IR-Modus, SIR Line Control und die spezifischen Sende- und Empfangsparameter für die *IRC*-Spezialfunktionen ausgelesen und in die Datenstruktur gemäß Bild 4.22 eingebettet. TFDU-Registerwerte werden per SITC-Zugriff ausgelesen.

Nachdem das zu sendende Datenpaket vollständig in das Sende-FIFO geschrieben ist, wird vor dem Einschalten der *TX-Unit* zunächst die Empfangseinheit *RX-Unit* abgeschaltet, um den Empfang eines Echos zu vermeiden und zugleich Energie einzusparen – zu Testzwecken kann die *RX-Unit* optional auch durchgehend angeschaltet bleiben (siehe Tabelle 4.7). Wird schließlich die *TX-Unit* eingeschaltet, so wird das im Sende-FIFO vorliegende Datenpaket mittels des zum eingestellten IR-Modus zugehörigen Wrappers elektrisch moduliert (einschließlich Berechnen und Anhängen der jeweiligen CRC) und über das Signal *IR txd* an das Transceivermodul zur elektrooptischen Modulation weitergereicht.

Zeigt die *TX-Unit* den vollständigen Versand des Datenpakets an, so schaltet die CPU die Sendeeinheit wieder ab. Abschließend wird die *RX-Unit* wieder aktiviert, bei einem angeforderten IR-Moduswechsel entsprechend mit dem neuen, nun zuständigen Unwrapper. Die FSM der *IRC*-CPU befindet sich wieder empfangsbereit im Ausgangszustand und erwartet nun die Anzeige eines neu empfangenen Datenpakets durch die *RX-Unit*.

Wird von der Steuerungseinheit in Verbindung mit einer Empfangsbestätigung die Änderung des IR-Übertragungsmodus oder des maximalen Sendestroms angefordert, so wird das Transceivermodul erst im Anschluss an die Übersendung der Empfangsbestätigung über die passende Transceivermodulkomponente *init TFDU* in Bezug auf Pulsformungsverhalten oder Sendestrom neu programmiert – das Acknowledge als Bestätigung des *IRC*-Befehls zur Änderung des IR-Modus' wird immer mit den zuvor noch eingestellten IR-Parametern (des alten IR-Modus) übertragen.

5.2.3.2 Externe Kontrollsignale

Das Verhalten des *IRCs* ist über externe Kontrollsignale beeinflussbar, da diese Signale während der auf einen Reset folgenden Initialisierungsroutine durch die *IRC*-CPU ausgelesen und innerhalb der CPU-Konfigurationsregister abgespeichert werden.

- Über die zwei Flags conf_tfdu_select_type_i und conf_ir_neg_pos_sel_i wird das angeschlossene Transceivermodul spezifiziert: Zusätzlich zum angeschlossenen Modultyp (TFDUx108 oder TFDU6102) wird angegeben, ob das elektrische Ausgangssignal des Transceivermoduls Rxd bei Empfang eines IR-Lichtpulses low- oder high-aktiv ist.
- Normalerweise sind die Kommunikationsparameter über *IRC*-Befehle dynamisch veränderbar. Zusätzlich kann die Kommunikation als sog. Backup-Lösung über das Kontrollsignal *conf_force_fixed_sir_i* auf den SIR-Modus mit 115,2 kbit/s fest eingestellt werden, sofern die dynamische Konfiguration beispielsweise aufgrund roboterseitig instabiler Spannungsversorgung nur unzuverlässig funktionieren sollte.
- Über das 4 Bit breite Signal conf_robot_id_i ist das Low-Nibble der 8 Bit umfassenden IRC-eigenen Roboter-ID vorgebbar – zur Vervollständigung der Broadcast-ID sollten diese vier Bit auf 0xF fest eingestellt werden.
- Mit dem Kontrollsignal conf_en_limit_dll_i wird von außen vorgegeben, ob der digitale Phasenregelkreis standardmäßig durch die CPU-Initialisierungsroutine ein- oder ausgeschaltet wird. Im laufenden Betrieb kann die DLL per *IRC*-Befehl jederzeit dynamisch zuoder abgeschaltet werden.
- Das Signal force_test_i dient der ASIC-Verifikation. Die Signale f
 ür IR-Modus, CPU-Zustand, IRC-Spezialfunktionen und weitere Signale des internen Testbusses werden nach Setzen dieser Kontrollleitung auf logisch-1 auf den 16-bit-DMA-Ausgang gespiegelt.

5.2.3.3 Data Exchange Interface

Das Data Exchange Interface dient dem Datenaustausch mit der IRC-externen Roboterkontrollelektronik. Hierzu wird eine asynchrone DMA-Schnittstelle für sequentielle und selektive Transfers von 16-Bit-Datenworten realisiert. Sowohl für Downstream als auch Upstream wird jeweils ein unidirektionaler 16-bit-Datenbus implementiert; ein gemeinsamer 16-Bitbreiter Adressbus sorgt für die gezielte Ansteuerung des 65k-Adressraumes. Asynchrone Kontrollleitungen regeln den Datenaustausch über ein doppeltes Quittungsaustauschverfahren (doppeltes Handshaking) entsprechend Bild 5.3. Bei einem Schreibzugriff (Downstream) schreibt die CPU zunächst die Adresse und das Datenwort auf die 16-Bit-Busse *rb_addr_o* und *rb_wr_data_o*. Danach wird das Signal



rb_wr_en_o auf logisch-1 gesetzt. Die DMA-Gegenstelle liest darauf hin das Datenwort und quittiert dies durch eine logisch-1 über die Quittungsleitung *rb_dma_ack_i*. Die CPU kann daraufhin das *Write-Enable*-Signal zurücksetzen, die DMA-Gegenstelle quittiert dies ihrerseits durch Rücksetzen des Quittungssignals auf logisch-0.

Bild 5.3: Datentransfer über das Data Exchange Interface

Für den Upstream schreibt die CPU zuerst die gewünschte Ad-

resse auf den 16-Bit-Adressbus und initiiert den Lesevorgang durch eine logisch-1 über die Kontrollleitung *rb_rd_en_o*. Die Gegenseite schreibt daraufhin das gewünschte Wort auf den Datenbus (*rb_rd_data_i*) und signalisiert die Gültigkeit des Datums über eine logisch-1 auf der Quittungsleitung *rb_dma_ack_i*. Die *IRC*-CPU liest das Datenwort und zeigt den erfolgreichen Lesevorgang mit einer logisch-0 über *rb_rd_en_o* an. Die Quittungsleitung wird daraufhin wieder auf logisch-0 zurückgesetzt.

5.2.4 IR-RX-Unit

Die *RX-Unit* analysiert das elektrische Signal *IR rxd*, welches vom angeschlossenen Transceivermodul nach der optischen Demodulation an den *IRC* propagiert wird. Die eigentliche elektrische Demodulation übernehmen drei Submodule, die sog. Unwrapper, die je nach ausgewähltem IR-Modus den Bitstrom analysieren und zu einem Datenrahmen zusammensetzen. Der *SIR Unwrapper* übernimmt den Empfang von SIR und SIRpMiCRoN; für die Modi MIR bzw. FIR sind die namentlich entsprechenden Unwrapper zuständig.

Die einzelnen Datenbytes werden vom jeweils aktivierten Unwrapper in das 8-bit-breite Empfangs-FIFO *RX FIFO*, auf das die CPU lesend zugreifen kann, hineingeschrieben. Bei Empfang eines vollständigen Datenrahmens wird dies der CPU über ein Flag angezeigt, gleichzeitig wird die Anzahl der empfangenen Bytes an die CPU übermittelt. Treten beim Empfang des aktuellen Datenrahmens Fehler z.B. in Form einer abweichenden CRC-Berechnung oder eines unvollständigen IrLAP-Datenrahmens (Timeout) auf, so wird dies der CPU über entsprechende Fehler-Flags signalisiert; die CPU kann daraufhin die bereits empfangenen Bytes des fehlerhaften Datenrahmens durch Auslesen aus dem Empfangs-FIFO löschen.

Die empfangenen IR-Lichtpulse können je nach angeschlossenem Transceivermodul sowohl low-aktive als auch high-aktive elektrische Pulse auslösen – die drei in Kapitel 4.6.1.1 ausgewählten Transceivermodule erzeugen low-aktive Pulse. Entsprechend den Spezifikationen aus Kapitel 5.1 sollte der *IRC* beide Pulse verarbeiten können. Daher kann durch ein externes Kontrollsignal eine Inverterschaltung innerhalb der *RX-Unit* vorgeschaltet werden, so dass der für die elektrische Demodulation zuständige Unwrapper jeweils von einem high-aktiven Logikpuls im Falle eines empfangenen IR-Lichtpulses ausgehen kann.

5.2.4.1 RX-Clk-Unit

Wird die *RX-Unit* durch die *IRC-CPU* eingeschaltet, so erzeugt der integrierte Taktgenerator *RX Clk* aus der 40-MHz-Master-Clock entsprechend dem eingestellten IR-Modus das für den zugehörigen Unwrapper erforderliche Taktsignal. Hierbei wird durch geeigneten Schaltungsentwurf ein störungsfreies Umschalten (*glitch-free*, d. h. ohne unerwünschte, Taktstörimpulse) zwischen den verschiedenen Taktfrequenzen erzielt [Ska96]. Für SIR werden 7,2728 MHz, für MIR 18,461 MHz generiert; für den FIR-Unwrapper wird die MasterClock durchgeschleift, da für die Detektion von 50-ns-Kurzpulsen (*IRC*-Spezialfunktion) die volle Taktrate von 40 MHz (25-ns-Takt) erforderlich wird. Die gewählten Taktraten berücksichtigen jeweils die nach Kapitel 4.6.2.1 erforderliche Überabtastung für die digitale Demodulation bei harter Detektion.

Für die Decodierung der elektrischen Pulsfolge wird nur der jeweils zuständige Unwrapper über die CPU aktiviert und mit seinem Taktsignal versorgt. Die beiden anderen Unwrapper sind in dieser Zeit deaktiviert und weisen keine Signalwechsel auf. Der Energiebedarf konzentriert sich daher jeweils nur auf den gerade aktivierten Unwrapper – auf diese Art bleibt der Energiebedarf selbst im FIR-Modus überschaubar.

5.2.4.2 Synchronisierer

Da die Unwrapper mit Ausnahme des FIR-Unwrappers mit einer von der Master-Clock abweichenden Taktgeschwindigkeit arbeiten, sind für die nicht-taktsynchronen Kommunikationsbusse zwischen *IRC*-CPU und den einzelnen Unwrappern Synchronisationsschaltungen zu implementieren [Cum01]. So verhindern beispielsweise Synchronisations-Flip-Flops metastabile Zustände [Nie01]. Diese werden im Übrigen auch für den FIR-Unwrapper benötigt, da dessen Taktsignal zwar dieselbe Taktfrequenz aber eine von der Master-Clock abweichende Phasenlage aufweist: Das Taktsignal für den FIR-Unwrapper muss aufgrund der angestrebten (De-)Aktivierbarkeit per "Enable"-Signal als sog. "Gated-Clock" über zumindest ein Gatter (mit Verzögerungszeit) propagiert werden.

5.2.4.3 Unwrapper

Jeder Unwrapper wird aus mehreren finiten Ablaufsteuereinheiten (FSMs) aufgebaut, die über Statussignale miteinander in Kontakt stehen. Hierbei ist grundsätzlich zwischen Bitebene, Byteebene und der an IrLAP angelehnten Datenstruktur entsprechend Bild 4.18 des Kapitels 4.6.2.2 zu unterscheiden. Die Bitebene bemüht sich um die (Flanken-)Erkennung der gesendeten bzw. ausbleibenden IR-Pulse. Die Byteebene übernimmt die Einbindung und Interpretation der empfangenen Bits innerhalb der physikalischen Bitübertragungsschicht; dies betrifft die Erkennung des Start- oder Stoppbits bei SIR, die Detektion der Stuffing-Bits bei MIR und die Zuordnung der empfangenen FIR-Chips zu den Datenbitpaaren. Die Einbindung der empfangenen Bits in die IrLAP-Datenstruktur gestattet schließlich eine Abarbeitung und Interpretation des Bitstromes auf Byteebene entsprechend dem in Kapitel 4.6.2.2 festgelegten Kommunikationsprotokoll.

Sind vom jeweils aktivierten Unwrapper (SIR, MIR oder FIR) 8 Datenbits empfangen worden, wird das sich ergebende Byte in das Empfangs-FIFO geschrieben und der Zähler zur Ermittlung der Anzahl der empfangenen Bytes inkrementiert.

Für alle Modi gilt, dass sämtliche, das jeweilige IR-Protokoll betreffende Zusatzbytes bzw. IR-Pulsfolgen für die Datenübertragung transparent sind und daher nicht in das Empfangs-FIFO *RX FIFO* eingetragen werden. Dies gilt für BOF, EOF und die Escape-Sequenz bei den asynchronen Modi SIR und SIRpMiCRoN¹ ebenso, wie für die synchronen Übertragungsmodi MIR und FIR mit den entsprechenden Start- und Stoppfolgen STA bzw. STO und den jeweiligen Synchronisationsfolgen PA (FIR) und STA (MIR-Präambel). Einzige Ausnahme bilden die Rahmenprüfzeichenfolgen (CRC), die aufgrund der byteweisen Verarbeitung bereits als reguläre Datenbytes in das *RX FIFO* eingetragen werden, bevor die Interpretation als CRC-Byte(s) durch Erkennen der Stoppfolge möglich ist – es ist Aufgabe der CPU, anhand des Registers zur Ermittlung der Anzahl empfangener und ins FIFO eingetragener Bytes die CRC-Folge entsprechend dem eingestellten IR-Modus herauszufiltern.

Bzgl. der Entwicklung der CRC-Hardware sei an dieser Stelle erwähnt, dass die CRC-Hardware-Architektur derart beschrieben ist, dass bei einem Wunsch nach Änderung eines oder aller CRC-Polynome, beispielsweise entsprechend den Vorschlägen aus [KC04], lediglich das gewünschte CRC-Polynom im VHDL-package IRDA_PHYS_LAYER angepasst werden muss; die sich mit einer Polynomänderung zwangsläufig ergebenden, strukturellen Ände-

¹ Aufgrund der festen Rahmenlänge fehlen EOF und Escape-Sequenz beim IR-Modus SIRpMiCRoN.

rungen in der CRC-Hardware (bestehend aus über XOR-Gatter verknüpften Schieberegistern) werden daraufhin automatisch bei der nächsten Simulation, insbesondere aber bei der nächsten Logiksynthese übernommen.

SIR- und MIR-Unwrapper

Die Unwrapper für SIR und MIR arbeiten auf Bitebene, d. h. zur Detektion der IR-Pulse, mit dem gleichen Detektionsprinzip. Grundlage bilden ein inkrementierender Zähler (im Folgenden auch als Segmentzähler bezeichnet) und ein damit verknüpftes Flankendetektionsfenster (Bild 5.4): Je nach Zählerstand wird das Detektionsfenster aktiviert, innerhalb dessen eine eingehende IR-Pulsflanke zugelassen und als logisch-O interpretiert wird. Bleiben IR-Puls bzw. Flanke innerhalb dieses Zeitfensters aus, so wird, bei Erreichen eines zulässigen Grenzwertes durch den Segmentzähler innerhalb dieses Fensters, dieser ausbleibende Puls als logisch-1 gewertet – der "Segmentgrenzwert" (in Bild 5.4 jeweils rot dargestellt) wird entweder fest über das VHDL-Package IRDA_PHYS_LAYER vorgegeben, oder aber durch den digitalen Phasenregelkreis DLL dynamisch entsprechend den empfangenen IR-Pulsen nachgeführt (siehe Kapitel 5.2.4.4).



Bild 5.4: IR-Puls-Detektion mittels Segmentzähler und Flankendetektionsfenster (ohne IRC-DLL)

Im Anschluss an die Flanken- bzw. Bitdetektion wird das empfangene Bit durch finite Zustandsautomaten innerhalb des SIR- bzw. MIR-Übertragungsprotokolls eingebettet und zugeordnet. Im asynchronen SIR-Modus sind auf Bitebene Start-, (Paritäts-), Stoppbit oder Datenbit entsprechend den Einstellungen des SIR Line Control Registers (Tabelle 4.6) zu erkennen; auf Byteebene gilt dies für die Startfolge BOF, die Stoppfolge EOF, die Escape-Sequenz und die regulären Datenbytes einschließlich CRC-Summe. Für den synchronen MIR-Modus verhält es sich ähnlich: Die FSM für die Bitebene identifiziert die Datenbits (einschließlich CRC-Bits) und die Stuffing-Bits; die FSM der MIR-Byteebene befasst sich mit der Erkennung der Präambel, der Startfolge STA, der Stoppfolge STO und der Verarbeitung der Datenbytes, zu denen auch die CRC-Bytes zu zählen sind.

FIR-Unwrapper

Für die Detektion der FIR-Pulse (Chips) wird ein von SIR- und MIR-Detektion abweichender Ansatz gewählt, da aufgrund der Kürze der elektrischen Pulse von im Nominalfall 125 ns ein Zähler in Verbindung mit einem Detektionsfenster bei einem 25-ns-Takt (40 MHz) zu langsam und unflexibel wäre. Dies gilt insbesondere bei Zuschaltung der *IRC*-Spezialfunktion zur Abtastung der Flanken bei kurzen FIR-Pulsen mit einer Pulslänge von nur 50 ns.

Bei Detektion einer steigenden FIR-Chipflanke wird ein Zustandsautomat mit einer Umschaltzeit von 25 ns je Zustand durchlaufen. Dieser kommuniziert mit einer weiteren FSM, die für die Positionszuordnung des Chips innerhalb des nominal 500 ns langen Datensymbols zuständig ist. Der Chipdetektionsautomat überprüft anhand des erreichten Zustandes bis zur Detektion der fallenden Flanke des FIR-Chips, ob der Puls kürzer als 75 ns bzw. im Falle der Kurzpulsdetektion kürzer als 50 ns war. Ist die Mindestpulsdauer überschritten, wird innerhalb der Zustandsmaschine zusätzlich geprüft, ob die Chiplänge eines Einzelchips nicht die zulässige Maximallänge für FIR-Chips übersteigt – im Sinne einer großzügigeren Akzeptanzmarge bei harter Detektion wird die Maximalgrenze von 135 ns auf 175 ns ausgedehnt. Für die bei 4-PPM möglichen doppelten Chippulse mit einer Nominallänge von 250 ns ist zusätzlich die Information der übergeordneten FSM über die Position der Chipflanke zu berücksichtigen: Doppelpulse dürfen nur dann auftreten, wenn die steigende Chip-Flanke entsprechend Bild 4.15 für Chip 3 detektiert wird, und die fallende Chip-Flanke mit einem zeitlichen Abstand detektiert wird, der eine Interpretation als gültigen Chip 1 des nachfolgenden Datensymbols zulässt.

Den Zustandsautomaten zur Detektion des IR-Chippulses und seiner Chipposition innerhalb des Datensymbols ist eine weitere FSM übergeordnet, die neben den für die FIR-Übertragung erforderlichen Bitfolgen PA, STO und STA auch die Datenbitpaare und die CRC-Prüffolge erkennt und entsprechend verarbeitet.

5.2.4.4 Digitaler Phasenregelkreis IRC-DLL

Die optional zuschaltbare *IRC*-DLL sorgt bei differierenden Lokaloszillatoren für die Stabilisierung des Phasengleichlaufs von sender- und empfangsseitigem IR-Puls in den IR-Modi SIR und MIR. Da sich Pulsdauerschwankungen als Zeitverschiebungen der Pulsflanken zum nominalen Bit- bzw. Chiptakt äußern, werden durch die DLL nicht nur Lokaloszillatorschwankungen sondern auch IR-Pulsdauerschwankungen, hervorgerufen durch harte Detektion des Transceivermoduls, ausgeglichen: Nach Erkennen einer IR-Flanke ist die Position des Detektionsfensters neu zu berechnen und so der Pulsflankendetektor möglichst exakt nachzuführen. Die Neuberechnung wird bei jeder neu detektierten IR-Pulsflanke ausgelöst. Die DLL ermittelt den Segmentzählerstand und schätzt zugleich die Position (zeitliche Differenz) der neu erkannten Flanke im Vergleich zu der Flanke des zuvor als Berechnungsgrundlage dienenden IR-Pulses ab (Wie häufig wurde eine logisch-1, d. h. ein ausbleibender IR-Lichtpuls zwischenzeitlich "gesendet"?).

Die Funktionsweise der *IRC*-DLL wird am Beispiel des SIR-Modus für eine Baudrate von 115,2 kbit/s erläutert. Durch die für SIR gewählte Arbeits- bzw. Abtastfrequenz von 7,2728 MHz ergibt sich für jedes Bit bei idealer Detektion, d. h. bei vollständiger Synchronität zwischen Sender und Empfänger bzw. zeitexakter harter Detektion, eine Aufteilung des Bits in 64 (0-63) Segmente (vgl. Bild 5.4). Diese Segmentierung erlaubt eine sehr exakte Detektion des zeitlichen Abstandes zwischen den Flanken der eingehenden IR-Pulse (RZI-Codierung mit ³/₁₆-Bitdauer). Mit Hilfe dieses Zeitabstandes wird für den in Kapitel 5.2.4.3 vorgestellten Segmentzähler der Zählerstand zur Aktivierung des Flankendetektionsfensters und gleichzeitig der Segmentzählergrenzwert für die Abschätzung des Beginns des unmittelbar nachfolgenden Bits angepasst. Auf diese Weise wird auch für den Fall eines nachfolgend ausbleibenden Lichtpulses (logisch-1) empfängerseitig eine exakte zeitliche Reproduktion des Bitstromes erreicht.



Bild 5.5: IR-Puls-Detektion mittels Segmentzähler und Flankendetektionsfenster (mit IRC-DLL)

Die ständige Neuberechung der Zählerstände für Detektionsfenster und Flankenzeitpunkt erlaubt eine Anpassung an zeitliche Schwankungen zwischen Sende- und Empfangsoszillator: Würde der Empfangsoszillator beispielsweise mit einer im Vergleich zum Sendeoszillator geringfügig höheren Taktfrequenz arbeiten, so würde sich diese Abweichung derart offenbaren, dass der empfangsseitige Segmentzähler bis zum Eintreffen einer IR-Flanke bis zu einem Wert inkrementiert werden müsste, der den bei 115,2 kBaud standardmäßig einzustellenden Grenzwert von 64 überstiege. Würde sich der zeitliche Abstand zwischen zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden IR-Flanken auf einen Zählerstand von z. B. 66 Segmenten belaufen, so würden für das nächstfolgende Bit die Zählerstände für sowohl Detektionsfensteraktivierung als auch erwarteten Flankenzeitpunkt durch die DLL nach oben korrigiert werden – beispielsweise würde sich der neuberechnete Flankenzeitpunkt von 64 auf nachfolgend 66 erhöhen (Bild 5.5). Ein darauf folgender ausbleibender Lichtpuls würde damit auch zu einem späteren Zählzeitpunkt (nämlich bei Erreichen des neu berechneten Grenzwertes von 66) als logisch-1 interpretiert werden. Bei einer Abschätzung mit einem Bitzählerstand von standardmäßig 64 würden ausbleibende IR-Pulse ständig, zum eigentlichen Zeitpunkt versetzt, "detektiert" bzw. interpretiert werden, so dass bei sukzessiver Versetzung innerhalb eines Bytes Fehlinterpretationen entstehen könnten. Bei der für SIR spezifizierten RZI-Codierung gilt dies insbesondere bei Übertragung des Broadcast-Bytes (FF)₁₆, da für diesen Fall nach dem essentiellen Startbit-Lichtpuls neun ausbleibende IR-Pulse (8 Datenbits plus 1 Stoppbit) folgen – ähnliche Schwierigkeiten sind im Übrigen auch für (7F)₁₆ zu erwarten. Dank der Einbettung des Nutzdatenpakets in die IrLAP-Datenstruktur wird aufgrund des Aufbaus des einleitenden BOF-Bytes eine Synchronisation vorab garantiert, so dass mit Beginn der Übertragung der eigentlichen

Datenbytes auch Bitkonstellationen ähnlich dem des Broadcast-Bytes handhabbar werden. Besteht ein komplettes Datenpaket fast vollständig aus (FF)₁₆, so erlauben die für jedes Byte erforderlichen Startbits zumindest eine Neuabschätzung und Teilsynchronisation je Byte. Wie dieses Beispiel zeigt, kann durch die konsequente Neuberechnung der Zählerstände für Detektionsfenster und Flankenzeitpunkt mit Hilfe der empfangenen IR-Lichtpulse der Vorlauf des im Vergleich zum Sendeoszillator schneller arbeitenden Empfangsoszillators abgefangen werden. Nachfolgende IR-Pulse treffen am Empfänger nicht (plötzlich) außerhalb des Detektionsfenster ein, eine fehlerhafte Detektion wird dadurch vermieden – dies gilt auch für den umgekehrten Fall eines im Vergleich zum Sendeoszillator langsameren Empfangsoszillators.

Die Funktionsweise der DLL für den MIR-Modus ist analog zu der für SIR beschriebenen Methodik. An dieser Stelle soll daher lediglich herausgestellt werden, dass sich der mögliche "zeitversetzte" Empfang bei der in Kapitel 5.2.4.3 beschriebenen Realisierung zur Bitstromdetektion (im MIR-Modus) noch problematischer als im SIR-Modus gestaltet: Dies gilt, obwohl bei MIR im Vergleich zu SIR lediglich fünf logisch-1-Bits (keine IR-Pulse) aufeinander folgen können – nach fünf ausbleibenden Lichtpulsen wird automatisch ein Stuffing-Bit als IR-Lichtpuls eingefügt. Ursache für die höhere Anfälligkeit gegenüber Zeitversatz liegt in der höheren Baudrate bei MIR: Obgleich die *RX-Clk-Unit* für MIR einen im Vergleich zu SIR höheren Arbeitstakt von 18,461 MHz generiert, ist bei einer Baudrate von 1,152 MBit/s lediglich eine 16-teilige Segmentierung möglich. Dies führt zu einer Reduktion des zeitlichen Auflösungsvermögens auf lediglich 25 % verglichen mit SIR. Trotz Kenntnis dieser systemimmanenten Empfangsproblematik, wird zugunsten eines geringeren Energiebedarfs auf eine höhere Taktrate für den MIR-Unwrapper verzichtet.

5.2.4.5 RX-FIFO

Da der in Kapitel 5.2.2 angesprochene *Memory Generator* von AMS keine direkte Erzeugung eines FIFO-Speichers anbietet, wird auf ein generierbares 1 kbit Dual-Port-RAM mit 8-bit-Datenwortbreite (128x8-DPRAM) zurückgegriffen. Dieses DPRAM bietet, wie für ein FIFO erforderlich, zwei (nahezu) unabhängige, asynchron selektierbare I/O-Zugänge zum 128x8-Bit-Speicherbereich [Ams06c].

Um das DPRAM als synchrones FIFO einsetzen zu können, wird zusätzlich eine synchrone DPRAM-Kontrollkomponente in VHDL realisiert, die nach außen hin die für ein synchrones FIFO üblichen Anschlussports bietet. Die Kontrollkomponente bedient sich der *Chip-Select*-Signale des DPRAMs zur synchronen Ansteuerung des asynchronen Speichers. Die *Chip-Select*-Signale werden mit den jeweils anliegenden Lese- bzw. Schreibtakten angesteuert – das RX-FIFO des *IRC* arbeitet bzgl. der Lesezugriffe mit der Taktrate der *IRC*-CPU, also bei 40 MHz (Master-Clock); für die Schreibzugriffe ist die Taktgeschwindigkeit abhängig vom Arbeitstakt des aktivierten Unwrappers und kann daher entsprechend Kapitel 5.2.4.1 zwischen 7,2728 MHz, 18,461 MHz oder 40 MHz variieren.

Die FIFO-Kontrollkomponente berücksichtigt die herstellerspezifischen Timingvorgaben für sowohl lesenden als auch schreibenden Zugriff. Die Zeiger für die neu zu beschreibende bzw. die im nächsten Lesezugriff auszulesende Speicherstelle werden jeweils mit Hilfe eines Gray-Codes berechnet, da dieser weniger Bitwechsel je Speicherzugriff und daher eine geringere dynamische Verlustleistung bedingt. Darüber hinaus bietet die FIFO-Kontrollkomponente die Möglichkeit, die Zeiger neben dem standardmäßig implementierten low-aktiven Asynchron-Reset auch synchron zurückzusetzen, um der *IRC*-CPU eine Möglichkeit zu bieten, den Inhalt des Empfangs-FIFOs bei Bedarf synchron zu löschen.

5.2.5 IR-TX-Unit

Die Sendeeinheit *TX-Unit* hat die Aufgabe, die von der *IRC-*CPU vorbereiteten *IRC-*Antwortpakete (Acknowledge, *IRC-*Statusantwort oder Roboterdaten) entsprechend dem selektierten IR-Modus elektrisch moduliert über das Signal *IR txd* an das angeschlossene Transceivermodul und letztendlich an die Basisstation zu transferieren. Analog zur Empfangseinheit übernehmen drei Submodule, die sog. Wrapper, diese elektrische Modulation. Der SIR-Wrapper bedient sowohl das SIR- als auch das SIRpMiCRoN-Protokoll; für die Modi MIR und FIR sind entsprechend der MIR- bzw. FIR-Wrapper zuständig.

Nach dem Anschalten der Sendeeinheit durch die *IRC*-CPU wird zunächst der integrierte Taktgenerator *TX Clk* aktiviert, der aus der Master-Clock mit 40 MHz die vom jeweiligen Wrapper benötigte Taktfrequenz generiert. Wie beim Taktgenerator RX-Clk-Unit werden für SIR, SIRpMiCRoN und MIR 7,272 MHz bzw. 18,461 MHz aus der 40-MHz-Master-Clock abgeleitet. Für den FIR-Wrapper werden jedoch nur 8 MHz, entsprechend der Nominalchipdauer von 125 ns, vom TX-Taktgenerator zur Verfügung gestellt. Das Umschalten zwischen den einzelnen Frequenzen geschieht wie bei der Empfangseinheit garantiert ohne "Hazard" auslösende Signalspitzen (*glitch-free*).

Sobald das Taktsignal des entsprechend dem eingestellten IR-Modus zu aktivierenden Wrappers stabil ist, liest dieser das von der CPU im Sende-FIFO *TX FIFO* abgelegte Datenpaket byteweise aus. Die Anzahl der zu übertragenden Bytes findet sich im 12 Bit umfassenden Register *tx_bytes_to_send_i*. Bei SIR, SIRpMiCRoN und MIR werden die einzelnen Bits des aktuell ausgelesenen Bytes entsprechend Bild 4.13 und Bild 4.14 (Kapitel 4.6.2.1) moduliert und in die Datenstruktur nach Kapitel 4.6.2.2 eingebunden; im FIR-Modus werden jeweils 2 Bit des aktuellen Bytes als Datenbitpaar zusammengefasst und nach Zuordnung der Chipposition innerhalb eines Datensymbols in die synchrone FIR-Chipfolge eingebunden. Sämtliche, das jeweilige IR-Protokoll betreffende Zusatzbytes bzw. IR-Pulsfolgen für die Datenübertragung (BOF, EOF, Escape-Sequenz, STA, STO oder PA) werden vom jeweils aktivierten Wrapper selbstständig generiert. Gleiches gilt für die obligatorische CRC, die automatisch berechnet und an die Nutzdaten angefügt wird. Für die *IRC*-CPU sind diese protokollspezifischen Ergänzungen transparent. Sie wird dadurch nicht belastet: Die *IRC*-CPU muss ausschließlich die zu übermittelnden Nutzdaten (*IRC*-Statusinformationen, Acknowledge, Roboterdaten) zusammentragen und im Sende-FIFO ablegen.

Für das Sende-FIFO wird, analog zum Empfangs-FIFO aus Kapitel 5.2.4.5, ein 128x8-DPRAM eingesetzt, das um ein Modul zur Kontrolle der DPRAM-Timingvorgaben, zur Adressierung des Speichers mittels Gray-Code und zur Realisierung der für ein synchrones FI-FO erforderlichen Anschlussports ergänzt wird. Der Port für FIFO-Schreibzugriffe arbeitet mit der Taktrate der *IRC*-CPU (40 MHz), für Lesezugriffe variiert der Takt zwischen 7,2728 MHz, 18,461 MHz und 8 MHz entsprechend dem jeweils aktivierten Wrapper.

Analog zur Empfangseinheit *RX-Unit* sind auch für die Sendeeinheit Synchronisationsschaltungen notwendig, um beim Datenaustausch zwischen der *IRC-CPU* und dem jeweils aktivierten Wrapper metastabile Zustände bedingt durch die mit unterschiedlichen Taktraten arbeitenden Schaltungskomponenten zu verhindern: Dies betrifft Kontrollsignale von der *IRC*-CPU an die *TX-Unit* bzw. Wrapper und in umgekehrter Signalflussrichtung Statussignale zur Anzeige vollständig durchgeführter Datenübertragungen bzw. zur Anzeige von fehlerhaften Lesezugriffen auf das TX-FIFO.

5.2.6 IRC-Spezialfunktionen – Simulationsergebnisse

Der IrDA Standard spezifiziert für die physikalische Übertragungsebene Datenratentoleranzen für die einzelnen IR-Modi. Für SIR sind Abweichungen von $\pm 0,87$ % zulässig, MIR gestattet $\pm 0,1$ % und FIR sogar nur $\pm 0,01$ % [IrDA01]. Diese Angaben legen zugleich die Toleranzen für die Eingangstaktfrequenz der entsprechenden IR-Elektronik fest. Für den IrDA-Controller *IPMS_IRHSP* des FRAUNHOFER INSTITUT FÜR PHOTONISCHE MIKROSYSTEME IPMS wird beispielsweise eine Eingangstaktfrequenz mit einer Toleranz von kleiner/gleich 100 ppm empfohlen [Dei05]. Jedoch kann diese Eingangstaktstabilität bei einem Mikroroboter nicht unbedingt garantiert werden: Ursächlich hierfür sind Bauteiltoleranzen, Temperaturdrift, Spannungsschwankungen oder gegenseitige Beeinflussung bedingt durch die hohe Packungsdichte der Mikroroboterelektronik.

Während die optional zuschaltbare Funktion zur Detektion von Kurzpulsen die hohen Anforderungen an die Eingangstaktfrequenz bei der FIR-Übertragung abmildern soll, sorgt die ebenfalls optional zuschaltbare DLL für die Stabilisierung des Phasengleichlaufs von sender- und empfangsseitigem IR-Puls in den IR-Modi SIR und MIR. Zusätzlich zu den Oszillatorschwankungen lassen sich durch die *IRC*-Spezialfunktionen SIR-DLL, MIR-DLL und FIR-Kurzpulse insbesondere auch IR-Pulsdauerschwankungen, hervorgerufen durch harte Detektion des Transceivermoduls, ausgleichen, da sich diese Pulsdauerschwankungen als Zeitverschiebungen im Vergleich zum nominalen Bit- bzw. Chiptakt darstellen. Simulationen führen zu dem Ergebnis, dass durch die FIR-Kurzpulsdetektion und die DLLs für SIR und MIR Unterschiede bzgl. sender- und empfangsseitiger Bit- bzw. Chiptakte, selbst bei Abweichungen von über 5% der Nenntaktfrequenz, ausgeglichen werden können.

Im Einzelnen ergaben die Simulationen für den SIR-Modus zulässige Abweichungen von ca. $\pm 6,5$ %, durch Zuhilfenahme geeigneter Datenpakete als Lernsequenz sind bei niedrigerer Baudrate (9,6–57,6 kbit/s) aus Sicht des Empfängers noch weit höhere Taktabweichungen von bis zu ± 25 % ausgleichbar. Für den MIR-Modus lässt die DLL laut Simulation Takttoleranzen im Bereich von $\pm 5,3$ % zu, hier lässt sich der Wert durch Vorschalten der MIR-Präambel noch auf ca. $\pm 5,5$ % steigern. Im FIR-Modus schließlich konnte durch das Zulassen von FIR-Kurzpulsen ein Ausgleich von Abweichungen mit bis zu ± 20 % der Nenntaktfrequenz in der Simulation ermittelt werden.

5.3 Design Verifikation mit Xilinx FPGA

Vor der Integration in den Mikroroboterkontrollchip *MXS* wurden die wesentlichen Teilkomponenten des entsprechend Kapitel 5.2 realisierten ASIC-Moduls *IRC* mit Hilfe der FPGA-Entwicklungsplattform ADS-V2-MB-DEV6000XP [Avn03] der Firma AVNET getestet (Bild 5.6): Die Sendeeinheit *TX-Unit* und die Empfangseinheit *RX-Unit* wurden bzgl. ihrer



Bild 5.6: FPGA-Entwicklungsplattform: Die linke Bildhälfte zeigt die Draufsicht auf die Platine, die rechte Bildhälfte verdeutlicht die wesentlichen Funktionsgruppen einschließlich der zahlreichen Erweiterungsmöglichkeiten über die Konnektoren P2, P3, P4, P5, P6, P7 und JP16 ([Avn02], mod.).

Grundfunktionalität, der *IRC*-Spezialfunktionen und der Kompatibilität zu den Transceivermodulen verifiziert. Weiterhin wurden die Module *init TFDU6102* und *init TFDUx108* zur Initialisierung, Konfiguration bzw. Programmierung des jeweils angeschlossenen Transceivermoduls auf ihre korrekte Funktion hin überprüft. Für das FPGA des Avnet-Entwicklungsboards wurden, wie für den *IRC* spezifiziert, 40 MHz als Arbeitstakt gewählt, dies ermöglichte eine Prüfung der einzelnen *IRC*-Komponenten in Echtzeit.

Für die Hardwareverifikation mittels FPGA wurde das ASIC-Design auf das auf dem Avnet-Entwicklungsboard implementierte Xilinx Virtex[™]-II FPGA vom Typ XC2V6000-FF1152 abgebildet. Sende- und Empfangseinheit des *IRC*-Designs mussten nur geringfügig modifiziert werden [Xil01], [Xil02]: Die für die FIFOs benötigten DPRAMs der AMS-Zieltechnologie wurden für die Hardwareverifikation gegen Xilinx-spezifische DPSRAMs ersetzt. Hierzu wurden die bereits im FPGA integrierten SelectRAM-Blöcke mit Hilfe des *Xilinx Core Generators* als VHDL-Modul beschrieben, welches sowohl in Sende- als auch Empfangseinheit instanziiert wurde. Die Änderungen wurden zunächst sowohl auf Register-Transfer-Ebene als auch mit einer durch Logiksynthese gewonnenen Gatternetzliste erfolgreich verifiziert. Hiernach wurde entsprechend Kapitel 4.5 mit Hilfe der Place&Route-Software aus dem Softwarepaket *Xilinx ISE* ein Bitstrom für das Avnet-FPGA-Board erzeugt. Hierbei waren die systemspezifischen Gegebenheiten der Avnet-Entwicklungsplattform zu berücksichtigen, insbesondere war die ucf-Datei – zur Zuordnung der *IRC*-Anschlüsse (Pads) an die für den Benutzer zugänglichen Pins des Virtex[™]-II Bausteins – entsprechend den platinenspezifischen Gegebenheiten anzupassen.

Wie Bild 5.7 zeigt, umfasst das für die Verifikation speziell entwickelte FPGA-Design neben einem vollständigen *IRC*-Block zusätzlich auch die wesentlichen *IRC*-Einzelkomponen-



Bild 5.7: FPGA-Design zur Emulation des *IRCs* und seiner wesentlichen Einzelkomponenten

ten *TX-Unit, RX-Unit, init TFDU6102* und *init TFDUx108*. Zusätzlich wurde ein selbstentwickeltes Terminalmodul implementiert, das die Kontrolle der zu testenden Module über ein beliebiges PC-Terminalprogramm gestattet. Das FPGA-Terminalmodul enthält hierzu ein UART-kompatibles Submodul, das eine serielle Kommunikationsschnittstelle zur direkten Anbindung des FPGA-Boards an die RS-232-Schnittstelle des PCs realisiert (8 Datenbits, 1 Stoppbit, keine Parität). Ein für diese Tests entwickelter Befehlssatz erlaubt das selektive Ansprechen der einzelnen Module: Sämtliche Konfigurationspins des *IRC*-Designs sind hierüber

einstellbar. Die für die Sende- und Empfangseinheit erforderlichen Parameter (IR-Modus, Baudrate, *IRC*-Spezialfunktionen, Anzahl der zu übertragenden Bytes, etc.) können ebenso vorgegeben werden, wie die für die angeschlossenen Transceivermodule erforderlichen Konfigurationsdaten. Weiterhin kann das Sende-FIFO der separaten Sendeeinheit *Tx-Unit* beschrieben und das Empfangs-FIFO der separaten *Rx-Unit* nach einer IR-Datenübertragung ausgelesen und auf Übertragungsfehler geprüft werden. Weiterhin erlaubt die separate Empfangseinheit die Analyse der Antwortpakete des *IRC*-Designs.

Die Transceivermodule wurden über kleine, mit Testpunkten versehene Platinen mit kurzen Flachbandkabeln an das FPGA-Board angebunden – ab einer Kabellänge von ca. 30 cm waren bereits erhebliche Signalqualitätseinbußen festzustellen. Für die Energieversorgung der Transceiver wurde ein separates Netzteil eingesetzt, welches über seine variable Strombegrenzung die Möglichkeit bot, das Übertragungsverhalten auch bei eingeschränkter Energieversorgung im Sinne des Energiedilemmas emulieren zu können. Die Tests vor der Integration des *IRC*-Designs in den ASIC *MXS* konnten nur mit den Transceivermodulen TFDU6102 und TFDU8108 durchgeführt werden, TFDU6108 war zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar.

nach Kapitel 4.6.2 kompatible Datenpakete ausgewählt. Fehlerzustände der Sende- und 2 1.00 V/ 3 1.00 V/ T 1.030 V

Bild 5.8: Test der FIR-Übertragung: Ein TFDU8108 wird gemäß dem blauen Signalverlauf angesteuert, in rot ist das Ausgangssignal eines TFDU6102 bei aktiver Strombegrenzung dargestellt.

Empfangseinheit wurden mit der PC-Terminalsoftware direkt abgefragt. Zusätzlich wurden mit Hilfe eines digitalen Speicheroszilloskops die elektrisch (de-)modulierten Signalströme am FPGA-Board abgegriffen. Bild 5.8 zeigt exemplarisch den Ausschnitt bei einer FIR-Übertragung mit **TFDU8108** IR-Sendemodul als und als Empfangsmodul, TFDU6102 wobei letztgenanntes in diesem Falle mit aktiver Strombegrenzung (Begrenzung auf 1,5 mA) und damit außerhalb der eigentlichen Spezifikationen betrieben wurde: Die Amplitude des "Digitalsignals" am Transceivermodulausgang (rot dargestellt) er-

reicht nicht mehr den erforderlichen Spannungshub von 3,3 V. Während für FIR-Doppelpulse der Minimalwert noch bei ca. 0,3 V liegt (linke Bildhälfte), beläuft er sich für einzelne FIR-Pulse auf ca. 0,9 V, wie in der rechten Bildhälfte zu erkennen ist.

Für die Datenübertragung wurden zufällige, jedoch zum IR-Kommunikationsprotokoll

Mit Hilfe des FPGA-Testaufbaus konnte die korrekte Funktionalität der IRC-Komponenten bei Einhaltung der Mindestanforderungen für die Transceivermodule bestätigt werden. Dabei zeigte sich eine vergleichsweise bessere Empfangsfähigkeit durch die IR-*RX-Unit* für den Fall der Realisierung des FPGA-Eingangspins *pad_rxd_i* als Schmitt-Trigger-Eingang. Im Falle einer aktivierten Strombegrenzung ist dies nur bedingt möglich: Da die Gegebenheiten bei einem Mikroroboter nicht mit denen des hier beschriebenen Testaufbaus zu vergleichen sind, macht eine Analyse des Transceivermodulverhaltens abhängig von der Höhe des eingestellten Maximalstromes an dieser Stelle nur begrenzt Sinn. Insbesondere der bei dieser Testkonfiguration sich ergebende Ausgangspegel am Transceivermodul bei Empfang eines IR-Datenpakets ist nicht auf den Mikrorobotereinsatz übertragbar, da die Höhe des Spannungseinbruches bei Erreichen des Begrenzungsstromes von der Realisierung des jeweiligen Netzteiles abhängig ist und ein kommerzielles Netzteil nicht die für das Mikroroboternetzteil (z. B. den POWER PACK in Kapitel 4.1.2.3) existenten Einschränkungen berücksichtigen muss. Jedoch ließen die Tests mit verschiedenen Strombegrenzungseinstellungen erkennen, dass TFDU6102 unempfindlicher als TFDU8108 auf Abweichungen von den Mindestanforderungen hinsichtlich Energieversorgung reagiert. In SIR- und MIR-Modus ermöglichten beide Transceivermodule bis zu Distanzen von 20 cm bis 30 cm noch einen fehlerfreien Empfang. In einem mittels Terminalprogramm durchgeführten Dauertest wurde für TFDU6102 bei einer Strombegrenzung von 1,5 mA eine Fehlerwahrscheinlichkeit von ca. 7,3% (SIR) bzw. 9,6 % (MIR) ermittelt. Für TFDU8108 ergaben sich bei gleicher Konfiguration Werte von 8,1 % für SIR bzw. 11,2% im MIR-Modus. Im FIR-Modus erlaubt lediglich das Modul TFDU6102 mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 19,2 % noch den Empfang kurzer FIR-Datenpakete mit bis zu 10 Datenbytes, allerdings nur unter Zuhilfenahme der IRC Spezialfunktion zur Detektion von FIR-Kurzpulsen.



Bild 5.9: Energiebedarf einer ersten MiCRoN-Vorentwicklung (links dargestellt) bei Übertragung eines Acknowledge bei 115,2 kbit/s ([MiC04], mod.)

TFDU8108 ermöglichte unter gleichen Bedingungen keinen fehlerfreien Empfang mehr.

Trotz des robusteren Empfangsverhaltens von TFDU6102 werden für den Mikrorobotereinsatz primär die Module TFD8108 bzw. TFDU6108 vorgesehen, da diese aufgrund der programmierbaren Sendestrombegrenzung einen geringeren Energiebedarf ermöglichen. Bild 5.9 bestätigt diesen Eindruck: Es zeigt den über einen Zeitausschnitt aufgezeichneten Energiebedarf eines ersten MiCRoN-Roboter-Prototyps [MiC04], dessen Elektronik vollständig aus kommerziell erhältlichen ICs aufgebaut ist, der aber bereits mit der für den MiCRoN-Roboter entwickelten 3-DOF-Stick-Slip-Positioniereinheit (Bild 4.8, Kapitel 4.1.3) und einem TFDU6102 Transceivermodul ausgestattet ist. Die im Diagramm auffällige Energiespitze entstand zu dem Zeitpunkt, zu dem der Roboter eine Empfangsbestätigung zurück an seine Basisstation per IR-Transfer übermittelte – spätere Tests mit dem letztendlich für MiCRoN eingesetzten TFDU6108 ließen nach Begrenzung des Sendestroms per *IRC*-Befehl keine Energiespitze mehr erkennen.

5.4 Integration in ASIC MXS

5.4.1 Blockschaltbild und Funktionsbeschreibung

Aufgrund der standardisierten Schnittstellen des *IRCs* kann das ASIC-Modul mit geringem Aufwand in ein beliebiges ASIC-Design, welches um eine bidirektionale IR Kommunikationsschnittstelle erweitert werden soll, integriert werden. Erstmalig wurde der *IRC* im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes MiCRoN in den Mikroroboter-Kontroll-



Bild 5.10: Blockschaltbild des Kontroll- und Kommunikations-ASICs MXS ([LCB+05], mod.)

ASIC *MXS*, die Kontrollelektronik für die Ansteuerung von sowohl roboterseitigen Piezoaktoren als auch dem jeweils angeschlossenen Roboterwerkzeug, integriert – *MXS* ist das Kernstück für die drahtlosen, mobilen MiCRoN-Mikroroboter. Bild 5.10 zeigt das Blockschaltbild des *MXS*.

Die wesentlichen Schaltungskomponenten des *MXS* sind neben dem *IRC* die Module CLOCKGEN, WAVEGEN, MEMORY (SRAM und SRAM-Controller sind in Bild 5.10 hellgrün umrandet), BUFFER und ACTUATOR (zuzüglich des A/D-Wandlers und der vier D/A-Wandler). Der gesamte *MXS*-ASIC ist wie der *IRC* im Sinne eines überschaubaren Energiebedarfs als sog. GALS¹-Architektur konzipiert, d. h. die Taktfrequenz wird entsprechend dem Rechenbedarf für jeden Block individuell generiert. Basis bildet eine Master-Clock

mit 40 MHz, die für die einzelnen Blöcke des *MXS*, z. B. entsprechend der angeforderten Signalform, herunterskaliert wird, um die dynamische Verlustleistung zu begrenzen. Der *IRC* wird direkt an die Master-Clock angeschlossen.

Empfängt der *IRC* von der Steuerungseinheit Signalformparameter zur Ansteuerung der Roboteraktoren, so werden diese über das *Data Exchange Interface* gemäß Kapitel 5.2.3.3 an die Blöcke CLOCKGEN, WAVEGEN und ACTUATOR kommuniziert. CLOCKGEN erzeugt die für die synchronen Blöcke WAVEGEN, ACTUATOR und MEMORY erforderlichen Frequenzen.

WAVEGEN berechnet entsprechend den per IR übermittelten Frequenz- und Amplitudenvorgaben die Amplitudenwerte (Samples) zur Ausgabe bzw. Reproduktion einer vollständigen Signalperiode (z. B. eines Sägezahns) – die Samples werden für jeden der vier D/A-Wandlerkanäle einzeln errechnet, wobei auch Vorgaben, wie z. B. ein Phasenversatz um

¹ GALS – Global Asynchronous, Local Synchronous
90° oder 180°, mit berücksichtigt werden. Zur Zwischenspeicherung der errechneten Samples stehen für jeden der vier Kanäle jeweils 1 KByte SRAM-Speicher (512x16 Bit) zur Verfügung – das Zwischenspeichern der Samplewerte bietet in Hinblick auf den Energiebedarf erhebliches Einsparpotential, da die Ansteuersignale für die Roboteraktorik nicht ständig in Echtzeit berechnet werden müssen [CLD+05].

Nach Abspeichern der Samples im SRAM werden diese vom ACTUATOR ausgelesen und entsprechend der durch CLOCKGEN applizierten Ansteuersignalfrequenz an die D/A-Wandler übermittelt. Weiterhin erzeugt der ACTUATOR-Block die Kontrollsignale für die bereits in Kapitel 4.1.3 angesprochenen ASICs *PAA* (*Power Addressing and Amplification*) – jeweils zwei *PAA*s werden je Roboter zur Verstärkung der D/A-Ausgangssignale eingesetzt, um die für die Piezoaktoren erforderlichen hohen Signalamplituden zu erzielen [CMS+04] (vgl. Anhang B.3.3). Der ACTUATOR schließt auch den z. B. für biologische Injektionsvorgänge erforderlichen PID-Regler mit ein (vgl. Kapitel 4.1.3) – die Reglerparameter werden über das *Data Exchange Interface* des *IRC* vermittelt.

Da der Arbeitstakt der Blöcke WAVEGEN, MEMORY und ACTUATOR in Abhängigkeit von den geforderten Aktorsignalen durch CLOCKGEN eingestellt und daher durchaus erheblich niedriger sein kann als die für den *IRC* gültigen 40 MHz, werden wesentliche Messwerte und Parameter der Kontrollelektronik in entsprechende Register des sog. BUFFER-Blocks gespiegelt. Dieser BUFFER, der über das *Data Exchange Interface* für den *IRC* zugänglich ist, arbeitet bei der vollen Master-Taktfrequenz von 40 MHz. Dies gestattet, bei Anforderung von Parametersätzen oder Messwerten durch die Steuerungseinheit, einen schnellen Lesevorgang und damit eine geringe Turnaround-Zeit für das Senden der Rückantwort.

Weniger elegant verhält sich die MXS-Kontrollelektronik leider beim Datentransfer vom IRC an die Blöcke WAVEGEN und ACTUATOR, da die Taktfrequenz für diese Blöcke sehr niedrig werden kann: Da sich für die Ansteuerung von Piezoaktoren (siehe hierzu auch Anhang B.3.3) insbesondere trapezförmige Signale und Sägezahnsignale mit Frequenzen im Bereich von einigen 10 Hz bis hin zu maximal einigen kHz eignen (exaktere Werte für Antrieb und Roboterwerkzeug sind beispielsweise Kapitel 4.1.3 zu entnehmen), stellt CLOCK-GEN Taktfrequenzen bis hinab zu minimal 100 Hz zur Berechnung und Wiedergabe der Signalsamples für die zuvor benannten Blöcke bereit. Da die Synchronisations-Flip-Flops und die FSMs für den Datenaustausch über das asynchrone Data Exchange Interface ebenfalls mit der niedrigen Taktfrequenz arbeiten, ist der Datentransfer vom IRC an den jeweiligen MXS-Block dementsprechend langsam – wie in Kapitel 4.6.2.2 bereits angedeutet können sich für den IRC hierdurch Verzögerungen von 30 ms pro zu übertragendem Datenwort ergeben. An dieser Stelle greift der IRC-Befehl set_rxtx_params, der gemäß Tabelle 4.7 aus Kapitel 4.6.2.2, die IR-RX-Unit des IRC während des Datentransfers über das Data Exchange Interface gezielt abschalten kann, um den Kommunikationsfluss innerhalb des Mikroroboter-Clusters nicht vollständig zu blockieren.

Aufgrund der universellen Konzeption und Realisierung kann der *MXS*, nicht zuletzt dank seiner standardisierten Schnittstellen (IrDA, DMA) und seiner analogen Anschlüsse (vier 10-bit-D/A-Wandler, ein 10-bit-A/D-Wandler), für verschiedene Aufgaben zukünftiger Mikroroboter eingesetzt werden [CDL+05a], [CDL+05b], [CLD+05], [LCB+05]. Der modulare Aufbau des *MXS* erlaubt darüber hinaus jederzeit die individuelle Anpassung an zukünftige Mikroroboterapplikationen, ohne dass sämtliche Komponenten des ASICs gleich zeitaufwändig neu entworfen werden müssten.

5.4.2 MXS Implementierung

Der Kontroll- und Kommunikations-ASIC *MXS* entstand im Rahmen einer Kooperation mit dem auf ASIC-Entwicklungen spezialisierten Lehrstuhl für Elektronik an der Universität Barcelona (UB), Spanien (Prof. J. Samitier, Dr. M. Puig-Vidal). Die einzelnen Schaltungskomponenten des Mixed-Signal ASICs wurden am Fraunhofer IBMT in VHDL und an der Universität Barcelona in Verilog jeweils separat entwickelt, simuliert und getestet. Die Verknüpfung der einzelnen ASIC-Komponenten fand abschließend, auf Einladung von Prof. Samitier und Dr. Puig-Vidal in den spanischen Labors statt. Dort wurde im Rahmen einer fünfwöchigen Integrationsphase das Layout des *MXS*, sowohl die spanischen Schaltungskomponenten als auch das ASIC-Modul *IRC* umfassend, mit Hilfe des ASIC-Design-Flows der Firma CADENCE DESIGN SYSTEMS LTD. entwickelt und für die AMS-Zieltechnologie (vgl. Kapitel 5.2.2) vorbereitet und verifiziert.

5.4.2.1 Simulation im Gesamtsystem

Für die Verifikation des *MXS* wurde vom Autor in Anlehnung an die *IRC*-Verifikation eine Testbenchumgebung im Sinne der Master-Slave-Architektur entworfen, die es gestattete, die Funktionalität des *MXS*, sprich die Verbindung von *IRC* und den Komponenten von UB, nach jedem Entwicklungsschritt, d. h. auf RT-Ebene, nach der Synthese und nach dem Layout zu verifizieren. Hierzu wurde das VHDL-Design des *IRC* zunächst auf die CADENCE-Designumgebung portiert und seine Funktionalität auf Register-Transferebene (RTL) mittels des HDL-Simulators *nclaunch* erneut bestätigt. Daraufhin wurden die in der Hardwarebeschreibungssprache Verilog beschriebenen UB-Blöcke des *MXS* ebenfalls auf RT-Ebene in die Testbenchumgebung des IBMT-Kommunikationssystems integriert und das Gesamtsystem per Mixed-Mode-Simulation getestet. Auf diese Weise wurden das *Data Exchange Interface* und letztendlich die Konfiguration und Funktionalität sämtlicher UB-Komponenten in Verbindung mit dem *IRC* getestet und bestätigt.

5.4.2.2 Logiksynthese, Taktbäume, I/O-Pads, Layout

Für die Synthese der einzelnen digitalen *MXS*-Logikblöcke (*IRC*, CLOCKGEN, WAVEGEN, ME-MORY, ACTUATOR und BUFFER) wurden jeweils sog. Constraints für das Synthesewerkzeug *Cadence PKS for BuildGates* definiert, um den Setup- und Hold-Zeiten der AMS-Technologie gerecht zu werden. Für den *IRC* waren hierbei insbesondere die unterschiedlichen Taktebenen für die einzelnen *IRC*-Komponenten (*IRC*-CPU, *Rx-Unit*, *Tx-Unit* und *initTFDU*-Module) zu berücksichtigen. Zur Verifikation der einzelnen Gatternetzlisten wurde neben den individuellen Testumgebungen für den *IRC* und die UB-Logikmodule auch wiederum auf die Testbenchumgebung und Teststimuli zur Verifikation des Gesamtsystems zurückgegriffen – die Gatterverzögerungen wurden jeweils in die Simulation mit einbezogen.

Die eng mit der Synthese-Software verknüpfte Layout-Software *Silicon Ensemble* erlaubte die skriptgesteuerte Layouterzeugung mittels Standardzellen für die einzelnen digitalen



Bild 5.11: Layout des *MXS* nach Einbindung aller Komponenten innerhalb des PAD-Rings

MXS-Blöcke. Hierbei wurden auch die AMS-Hardmakros für die (Dual-Port-)SRAMs der *IRC*-FIFOs und die SRAMs des UB-Designs eingesetzt. Weiterhin wurden die sog. *Distribution Trees* für die Takt- und Reset-Netzwerke implementiert: Für den *IRC* waren dies neben dem asynchronen Reset-Netzwerk die Taktnetze für *IRC*-CPU, *IR-RX-Unit* und *IR-TX-Unit* inklusive der jeweiligen Wrapper bzw. Unwrapper.

Nach erfolgreicher Verifikation der einzelnen Logikblöcke durch DRC (Design-Rule-Check) und LVS-Vergleich (Layout-Versus-Schematic) wurden aus den geometrischen Layoutdaten jeweils die Gatter- und Verdrahtungsverzögerungen mit Hilfe des *Pearl Timing Analyzer* extrahiert. Diese Ver-

zögerungszeiten wurden in Form von SDF-Dateien für Backannotation und damit für die Simulation und Layoutverifikation des *IRCs*, der UB-Blöcke und letztendlich des Gesamtsystems zur Verfügung gestellt. Die Timingsimulationen des Gesamtdesigns unter Berücksich-

tigung der Gatter- und Verdrahtungsverzögerungszeiten der einzelnen MXS-Komponenten verliefen fehlerfrei.

Abschließend wurden daher die einzelnen Logikblöcke mit Hilfe des Layout Editors *Virtuoso XL* innerhalb eines vom spanischen Lehrstuhl realisierten ASIC-Floorplans eingesetzt und miteinander verdrahtet (Bild 5.11). Weiterhin wurde mit *Virtuoso XL* auch der 84 Anschlusspads umfassende PAD-Ring einschließlich der Treiberstufen zur Anbindung der ASIC-Ein- und Ausgänge an die Außenwelt kreiert: Die digitalen I/O-Pads decken dabei einen Spannungsbereich von 0–3,3 V ab, für die Eingangs- und Ausgangspads der analogen Schaltungsteile des Mixed-Signal-ASICs sind Spannungspegel zwischen 1 V und 2,4 V zulässig. Hinsichtlich der *IRC*-Anschlusspads wurde, bedingt durch die Ergebnisse aus Kapitel 5.3, für das IR-Eingangssignal *IR rxd* ein Schmitt-Trigger-Eingangspad mit einer Hysterese von 0,6 V implementiert; für das IR-Ausgangssignal *IR txd* wurde ein 4 mA-Ausgangstreiber zur direkten Ansteuerung des roboterseitigen Transceivermoduls ausgewählt.

Nach erneut fehlerfreier Durchführung von DRC und LVS wurde abschließend mit Hilfe der Gesamtsystem-Testbench eine Timinganalyse des vollständigen *MXS*-Designs durchgeführt. Die Timingsimulationen berücksichtigten auch die sich durch Verbindung der einzelnen Logikmodule ergebenden Verzögerungszeiten. Selbst unter "Worst-Case"-Bedingungen, d. h. unter Zuhilfenahme der jeweils ungünstigsten extrahierten Gatter- und Verdrahtungsverzögerungen aus den SDF-Dateien, konnten die Simulationsergebnisse die korrekte Funktionalität des gelayouteten Designs bestätigen.

Nach Abschluss der Layoutverifikation wurden sämtliche Geometriedaten für das Tape-Out zusammengetragen und schließlich an den Halbleiterhersteller AMS übermittelt. Bild 5.12, das den in 0,35 µm CMOS-Technologie gefertigten ASIC *MXS* zeigt, bietet einen guten Überblick über das Layout bzw. die Anordnung der einzelnen *MXS*-Komponenten einschließlich des *IRCs*. Die Chipfläche des *MXS* beläuft sich insgesamt auf etwa 18,71 mm² (4479,10 x 4177,30 µm²). Auf den *IRC* entfallen hierbei mit einer Breite von 945 µm und einer Länge von 2989 µm etwa 2,825 mm², die *IRC*-eigenen 128x8 Bit umfassenden DSPRAMs belegen mit ihren Abmessungen von jeweils 570 x 615 µm² insgesamt etwa ein Viertel der *IRC-Gesamtfläche* (0,701 mm²).



SRAMs D/As A/D Actuator WaveGen Buffer DPSRAMs IRC

Bild 5.12: Mikroskopisch vergrößerte Aufnahme des gefertigten Mikroroboter-Kontroll-ASIC *MXS* (4,479 x 4,177 mm²) einschließlich des 2,825 mm² umfassenden ASIC-Moduls *IRC*

6 Basisstation RoboCoмм

Dieses Kapitel stellt die Basisstation ROBOCOMM als Verbindungsglied zwischen der Steuerungseinheit und den Robotern einer auf mobilen, drahtlosen Mikrorobotern basierenden Manipulations-Tischstation vor. Die Aufgabenspezifikationen für die Basisstation wurden bereits ausführlich in Kapitel 4.7 beschrieben. Basierend auf diesen Spezifikationen wurde ein Lösungskonzept für die Basisstation entsprechend Bild 6.1 vorgestellt: Dieses sieht für



Bild 6.1: Aufbau der Basisstation ROBOCOMM mit ihren wesentlichen Funktionskomponenten

ROBOCOMM ein FPGA-Schaltungsdesign zur Umsetzung des IR-Kommunikationsprotokolls unter Berücksichtigung von IR-Spezialfunktionen und Multiempfängerbetrieb – in Bild 6.1 vereinfacht als "IR-Applikation ROBOCOMM" bezeichnet – vor. Die Basisstation wird als USB 2.0-Compositegerät an die Steuerungseinheit angebunden, wobei das FPGA-Design um einen externen USB2.0-Schnittstellen-Controller ergänzt wird. Dieser übernimmt das USB2.0-Low-Level-Protokoll (physikalische Ebene einschließlich Sicherungs- und Vermittlungsschicht). Das FPGA-Design selbst ist für die höheren Protokollebenen sowohl während der Enumeration als auch für die Umsetzung des in Kapitel 4.7 vorgestellten USB-Kommunikationsprotokolls während des "Normalbetriebes", d. h. für die Datentransfers zwischen Steuerungseinheit und Mikrorobotern, verantwortlich. Darüber hinaus übernimmt die FPGA-Schaltung die Konfiguration und Ansteuerung des USB-Controllers entsprechend den Timingvorgaben des Controller-Herstellers.

6.1 RoвoComm-Hardware

Basis für die Kommunikationsstation ROBOCOMM bildet die bereits in Kapitel 5.3 vorgestellte FPGA-Entwicklungsplattform ADS-V2-MB-DEV6000XP [Avn03] der Firma AVNET (vgl. Bild 5.6). Das auf diesem Entwicklungsboard eingesetzte Xilinx VirtexTM-II FPGA vom Typ XC2V6000-FF1152 ([Xil01], [Xil02]) bietet ausreichend Kapazität, um die höheren USB-Protokollebenen bedienen zu können und zugleich die IR-Applikation einschließlich Multiempfängerbetrieb und IR-Empfangsdatenanalyse, unter Beachtung der IR-Spezialfunktionen (DLL, MIR-Präambel, FIR-Kurzpulse), auszuführen.

Als USB 2.0-Interface-Controller wird der Baustein ISP1581 der Firma NXP, vormals PHI-LIPS SEMICONDUCTORS, ausgewählt [PhiO3], [PhiO4b]. Betrieben mit 3,3 V oder 5 V, erlaubt dieser USB-Controller einen Datenaustausch mit bis zu 25 MByte/s mit dem ihn ansteuernden Baustein, in diesem Fall mit dem Xilinx-FPGA: Dies bietet ausreichend Leistungsreserve auch für zukünftige Hochgeschwindigkeitsübertragungsverfahren wie z. B. VFIR oder UFIR. Der ISP1581 verfügt zusätzlich zum bidirektionalen Control-Endpoint EPO über vierzehn Endpoints (7 IN- und 7 OUT-Endpoints) und ermöglicht daher jederzeit den Ausbau der Basisstation durch Ergänzung um weitere Applikationen (USB-Functions). Die zu den jeweiligen Endpoints zugehörigen Endpoint-FIFOs können dabei für einfaches oder aber doppeltes Buffering zur weiteren Steigerung der USB-Kommunikationsperformance konfiguriert werden. Über eine Interruptleitung kann der ISP1581 dem Xilinx-FPGA das Auftreten von USB-Ereignissen signalisieren; die einen Interrupt auslösenden USB-Ereignisses (Interruptquellen) sind dabei entsprechend [PhiO3] bzw. [PhiO4b] wählbar.

Für den Datenaustausch zwischen Virtex[™]-II und ISP1581 stehen prinzipiell zwei Übertragungsarten zur Verfügung: Der "normale" Registerzugriff über Daten- und Adressbus und der Datentransfer per DMA-Schnittstelle. Für den Registerzugriff findet sich zusätzlich eine Unterteilung in die Modi *Split Bus Mode* und *Generic Processor Mode*.

Im Modus *Split Bus Mode* werden Daten über einen gemultiplexten 8-bit-breiten Adress-/Datenbus ausgetauscht – dieser Modus ist insbesondere für Applikationen mit kleineren 8-bit-Mikroprozessoren und überschaubaren Anforderungen bzgl. der Übertragungsgeschwindigkeit zwischen µC und ISP interessant. Der leistungsfähigere *Generic Processor Mode* realisiert den Datentransfer über einen 8-bit-breiten Adressbus in Verbindung mit einem separaten bidirektionalen 16-bit-breiten Datenbus. Beide Modi erlauben den Austausch jeweils innerhalb von minimal 80 ns – der Generic Processor Mode ermöglicht aber aufgrund seiner höheren Datenbusbreite die doppelte Datenrate. In beiden Modi kann zusätzlich jeweils auf ein DMA-Interface mit Schreib-/Lesezyklen von minimal 72 ns je Datenwort zurückgegriffen werden (12,8 MWorte/s) – im Generic Processor Mode erfolgen DMA-Transfer und normaler Datentransfer über dieselben Datenbusleitungen [Phi01], [Phi02b].

Aufgrund der größeren Leistungsreserven im Falle eines schnellen Datentransfers zwischen dem ISP und dem hochleistungsfähigen Virtex[™]-II wird der USB-Controller im Generic Processor Mode an das Xilinx-FPGA angebunden [Phi04a]: Konfigurationsdaten zur Initialisierung des ISP1581 werden ebenso über 8-bit-Adress- und 16-bit-Datenbus übertragen, wie die über die Message-Pipe (Endpoint 0) auszutauschenden Datenströme im Rahmen der Verarbeitung von Standard-Device-Requests (vgl. Kapitel 3.5). Für den Datentransfer zwischen ISP und der eigentlichen USB-Applikation (USB-Function) kann entweder auf dieselbe Kommunikationsart (separater Adress- und Datenbus) oder aber auf den DMA-Transfermodus zurückgegriffen werden (siehe hierzu nachfolgendes Kapitel 6.2.2).



Bild 6.2: Hardware der Basisstation ROBOCOMM bestehend aus FPGA-Board, ROBOCOMM-Erweiterungskarte und vier IR-Analog-Frontends, die per FireWire[™]-Kabel angeschlossen werden. Bild 6.2 zeigt die wesentlichen Hardwarekomponenten der Basisstation ROBOCOMM auf. Diese besteht neben der FPGA-Entwicklungsplattform aus einer anwendungsspezifisch entworfenen Platinenerweiterung und, im Falle der MiCRoN-Manipulationsstation, aus vier IR-Analog-Frontends, die mit den aus Kapitel 4.6.1.1 bekannten Transceivermodulen TFDU6108, TFDU8108 oder TFDU6102 bestückt werden können. Diese Hardwarekomponenten werden im Folgenden näher vorgestellt.

Die für das FPGA-Board entwickelte Zusatzplatine dient dazu, sowohl die USB 2.0-Schnittstelle mit Schnittstellen-Controller und USB-Konnektor als auch die IR-Analog-Frontends elektrisch und elektromechanisch an das Xilinx-FPGA anzuschließen – Schaltund Bestückungsplan der "ROBOCOMM-PCB" sind dem Anhang A.5 zu entnehmen. In Bild 6.3 bzw. Bild 6.4 sind die Ober- bzw. Unterseite der bestückten Platine dargestellt.



Bild 6.3: Top-Layer der ROBOCOMM-PCB mit IE-EE1394-Steckern, USB-Konnektor, Reset-Taster, 12-MHz-Oszillator und Gerätestatus-LEDs

Bild 6.4: Bottom-Layer der ROBOCOMM-Erweiterungskarte mit Av140-Bus-Konnektor und ISP1581 im LQFP64-Gehäuse

Die Oberseite (Top-Layer) der Erweiterungskarte umfasst vier Anschlüsse für die IR-Analog-Frontends, weiterhin LEDs zur Anzeige des USB-Gerätestatus', den USB-Konnektor (Typ B) zum Anschluss des USB-Kabels, einen 12 MHz Quarzoszillator für den ISP1581 und einen Reset-Taster zum asynchronen Rücksetzen der durch das FPGA realisierten USB-Functions. Angeschlossen wird die ROBOCOMM-PCB über einen der zahlreich am FPGA-Board zur Verfügung stehenden Erweiterungsports (Av140-Bus-Konnektor). Über diesen werden einerseits die zwischen den Analog-Frontends und dem FPGA benötigten Signalleitungen verbunden. Gleichzeitig werden über den Av140-Bus Konfigurationsleitungen (einschließlich Read-, Write- und Interruptleitung), Adressbus und Datenbus zur Ansteuerung des ISPs propagiert. Darüber hinaus bietet der Av140-Bus zahlreiche Pins zur Anbindung an verschiedene Spannungsversorgungsebenen des FPGA-Boards – im Falle der RO-BOCOMM-PCB sind dies 3,3 V, 5 V und Massepotential zur Versorgung des ISP1581. Av140-Bus-Konnektor und ISP1581 sind auf der Unterseite platziert, sodass die Anzahl der sonst für Bus- und Konfigurationsleitungen erforderlichen Vias überschaubar bleibt.

Während der Verifikation des *IRC*-Designs mittels FPGA-Board (vgl. Kapitel 5.3) hatten die zur Anbindung eingesetzten Flachbandkabel ab einer Leitungslänge von etwa 30 cm die Qualität der zwischen Transceivermodul und FPGA auszutauschenden Signale z. T. erheblich verschlechtert: Die Pulsformänderungen machten eine fehlerfreie Detektion insbesondere bei der FIR-Übertragung (selbst bei nicht begrenztem Sendestrom) nahezu unmöglich. Bei der Basisstation ROBOCOMM wird daher für die Kabelverbindungen zwischen den Analog-Frontends und der Erweiterungsplatine auf kommerziell erhältliche FireWire[™]-Kabel zurückgegriffen. Diese 6-adrigen Kabel garantieren aufgrund ihrer teilweise doppelten Schirmung eine gute Signalintegrität für die zu sendenden bzw. zu empfangenen IR-Pulsfolgen, weiterhin werden auch die Konfigurationssignale sowohl für das Modul TFDU6102 bzw. die per SITC-Schnittstelle zu programmierenden Module TFDU6108 und TFDU8108 störungsarm übermittelt. Im Sinne einer einfachen und dennoch stabilen

Steckverbindung zwischen Erweiterungsplatine und IR-Analog-Frontend werden sowohl auf der Erweiterungsplatine als auch für die IR-Analog-Frontends jeweils standardisierte IEEE 1394-Stecker für den Anschluss der FireWire[™]-Kabel vorgesehen.

Für die IR-Analog-Frontends zur elektrooptischen (De-)Modulation wurden handliche kleine Platinen entwickelt, die entsprechend den Schaltplänen aus dem Anhang A.5.1 (Bild A.15 und Bild A.16) neben dem IR-Transceivermodul zusätzlich mit den vom Modulher-



Bild 6.5: Zwei bestückte IR-Analog-Frontends mit IEEE1394-Kabelsteckverbindung

steller empfohlenen Passivbauteilkomponenten bestückt wurden – diese sollen die Signalintegrität auf der Übertragungsstrecke zwischen Analog-Frontend und Erweitungsplatine bzw. FPGA garantieren. Wie Bild 6.5 zeigt, ist die Abmessung des Analog-Frontends hauptsächlich durch die Größe des IEEE1394-Steckers vorgegeben. Die einfache Aufsteckmöglichkeit der handlichen Analog-Frontends erlaubt in Verbindung mit den abschirmenden FireWire[™]-Kabeln eine flexible, störunanfällige und zu-

gleich platzsparende Integration der IR-Transceivermodule in einer Mikroroboter-Manipulationsstation. Bezogen auf die MiCRoN-Tischstation bietet dies eine elegante Anbindungsmöglichkeit der für den Multiempfängerbetrieb erforderlichen Transceivermodule an den POWER FLOOR, selbst im Falle der mechanischen Ankopplung des POWER FLOORs an ein Auflicht-Lichtmikroskop – siehe hierzu Bild 7.27 und Bild 7.30 im späteren Kapitel 7.3.

6.2 Implementierung im FPGA

6.2.1 Gesamtaufbau

Für das FPGA-Design der USB-Basisstation wird entsprechend Bild 6.6 ein modularer Aufbau konzipiert, der eine Verteilung der Aufgabenbereiche auf verschiedene Teilkomponenten zur Realisierung des multiapplikationsfähigen USB 2.0-Compositegerätes erlaubt. Über die Interruptleitung des ISP1581 wird dem FPGA das Auftreten von USB-Ereignissen - beispielsweise ein OUT-Transfer über EPO, ein IN-Transfer über EP2, ein Bus-Reset oder etwa ein abgezogenes USB-Kabel ("disconnect") – angezeigt. Das FPGA-Design kann darauf hin durch lesenden Zugriff auf die ISP-internen Register die Ursache des Interrupts abfragen und gegebenenfalls auf dieses Ereignis reagieren. Das ISP INTERFACE (in Bild 6.6 grün hervorgehoben) dient dabei als Schnittstelle für den (physikalischen) Datenaustausch mit dem USB 2.0-Controller. Für die USB-Kommunikation mit dem Host-PC über die Message-Pipe (EPO), d. h. für die Enumeration und Verwaltung der USB-Verbindung auf höherer Protokollebene, sind die hellblau unterlegten Funktionsblöcke verantwortlich - wie im vorhergehenden Kapitel 6.1 bereits erläutert, übernimmt der ISP1581 lediglich die korrekte Umsetzung des Low-Level-Protokolls. Die Funktionsblöcke ISP INTERFACE, IRQ CONTROL, UBUS CONTROL, EPO CONTROL und FIRMWARE CONTROL werden unter dem Begriff USB-BASISINTERFACE zusammengefasst.

Über EP17 CONTROL werden die Endpoints bzw. Stream-Pipes den einzelnen USB-Functions bzw. USB-Interfaces (Appl. 0 bis Appl. n) zugeordnet. Weiterhin organisiert EP17 CONTROL, zusätzlich zu interruptgetriggerten Datentransfers, den Zugriff der einzelnen Applikationen auf die zugehörigen Endpoint-FIFOs des ISP1581 im Sinne eines fest definierbaren Zeitrasters (Time Schedule). Der Funktionsblock IRQ CONTROL koordiniert die Zugriffe der Komponenten UBUS CONTROL, EP0 CONTROL und EP17 CONTROL entsprechend den vom ISP1581 angezeigten Interrupts. Weiterhin garantiert IRQ CONTROL für den Block



Bild 6.6: Funktionsblöcke für das FPGA-Design der ROBOCOMM-Basisstation

EP17 CONTROL bzw. die daran anhängigen Applikationen uneingeschränkten Lese- oder Schreibzugriff auf den ISP, sofern sämtliche zuvor angezeigte Interrupts abgearbeitet sind und kein neuer ISP-Interrupt ausgelöst wird.

Zusätzlich zu den zuvor benannten Komponenten, die ausschließlich der Realisierung des USB-Gerätes dienen, wurde ein ON-CHIP-DEBUG-SYSTEM (OCDS) für die Funktionsverifikation innerhalb des FPGAs implementiert. Über OCDS können die Systemzustände der einzelnen Teilkomponenten abgefragt werden, weiterhin können die Datentransfers zwischen ISP INTERFACE und USB 2.0-Controller nicht nur mitprotokolliert, sondern auch über eine RS-232 Schnittstelle in Echtzeit an ein PC-Terminalprogramm übermittelt werden.

Um die bereits für den *IRC* entwickelten Komponenten, insbesondere die Empfangseinheit IR-RX-Unit, die Sendeeinheit IR-TX-Unit und die für die Initialisierung und Programmierung der angeschlossenen Transceivermodule zuständigen Funktionsgruppen, nahtlos in das FPGA-Design der Basisstation integrieren zu können, wurde für ROBOCOMM dieselbe Taktfrequenz von 40 MHz (25 ns Periodendauer) gewählt, wie sie nach Kapitel 5.2.1 bereits für den *IRC* als Master-Clock spezifiziert wurde.

Beschrieben wird das FPGA-Design wie der IRC in der Hardwarebeschreibungssprache VHDL in Form separater Entity- und Architecture-Dateien. Zwei VHDL-Packages bilden die Basis für die USB-Applikation "ROBOCOMM". Das Package USB_DESCRIPTOR PACK dient der Beschreibung des USB-Protokolls; dies umfasst einerseits Konstantendeklarationen zur Definition der Standard-Device-Requests und andererseits Typenbeschreibungen bzgl. des Aufbaus der einzelnen in Kapitel 3.5.4 benannten USB-Deskriptoren. In dem VHDL-Package USB_FIRMWARE_PACK werden neben den Zuständen der für die USB-Functions erforderlichen finiten Zustandsautomaten die Inhalte der USB-Deskriptoren beschrieben, die während des Enumerationsprozesses an den USB-Root-Hub bzw. an USB-Bustreiber und USB-Host-Controller-Treiber übermittelt werden müssen (vgl. Kapitel 3.5.4). Weiterhin werden über dieses Package die am USB 2.0-Controller verfügbaren Endpoints den zu realisierenden USB-Interfaces zugeordnet. Für den Fall alternativer Konfigurationen werden für ein oder mehrere USB-Functions (USB-Interfaces) sämtliche Einstellungen insbesondere für die alternativen Interface-Deskriptoren in USB FIRMWARE PACK eingetragen. Darüber hinaus werden die für das Time Scheduling notwendigen Parameter und Konstanten in Abhängigkeit von der Anzahl der zu realisierenden Applikationen definiert.

6.2.2 ISP Interface

Über das ISP INTERFACE greift das USB-Gerät ROBOCOMM physikalisch auf den externen USB 2.0-Interface-Controller zu. Das ISP INTERFACE ist derart als finiter Zustandsautomat konzipiert, dass es sämtliche vom ISP unterstützten Zugriffsmodi, d. h. Registerzugriff (im Generic Processor oder Split Bus Mode) und DMA-Zugriff, verwalten und koordinieren kann. Das ISP Interface basiert auf dem VHDL-Package ISP1581_PACK, das insbesondere die Adressdeklarationen für die internen ISP-Register entsprechend den Vorgaben aus den ISP-Datenblättern [Phi03] bzw. [Phi04b] enthält. Für die verschiedenen Zugriffsarten definiert das Package darüber hinaus unter Berücksichtigung von eingestellter Master-Clock (40 MHz) und ISP-Timingvorgaben automatisch die minimal einzuhaltenden Warte- und Haltezeiten der jeweiligen Zugriffskontrollsignale.

Bild 6.7 zeigt ein Blockschaltbild der VHDL-Entity ISP INTERFACE. Auf der rechten Seite befinden sich die direkt mit dem ISP1581 verbundenen Signalleitungen: Man erkennt neben dem Interrupteingang *ISP_int_i* und den für die Initialisierung notwendigen Signalen



Bild 6.7: Blockdiagramm für die VHDL-Entity ISP INTERFACE

zusätzlich die ISP-Kontrollleitungen für sowohl Registerzugriff als auch DMA-Transfer. Auf der linken Seite des Blockes finden sich die internen, für das FPGA-Design benötigten Leitungen. Über UBUS CONTROL erhält das ISP IN-TERFACE unter Berücksichtigung des Packages ISP1581_PACK die Vorgaben für die Initialisierung des ISP1581, insbesondere wird hierüber, wie in Kapitel 6.1 bereits angedeutet, der Generic Processor Mode für Registerzugriffe vorgegebenen. Über die Leitung init_ISP_i kann UBUS CONTROL gezielt einen Reset mit anschließender Neukonfiguration des ISPs auslösen, das ISP INTERFACE setzt daraufhin den USB-Controller entsprechend den ISP-Timingspezifikationen zurück – dies ist z. B. bei Detektion eines USB-Bus-Resets bzw. bei Verbinden des USB-Kabels mit dem Host-PC notwendig. Im Anschluss an die Reset-

Sequenz werden die Konfigurationssignale zur Einstellung des gewünschten Registerzugriffmodus' gesetzt. Die übrigen Signale auf der linken Seite von Bild 6.7, die für die Initiierung eines Lese- oder Schreibzugriffs entweder per Register oder DMA-Transfer zuständig sind, werden mit der zentralen Koordinationsstelle IRQ CONTROL verbunden – für nachfolgende Erläuterungen werden diese Signale vereinfachend unter dem Begriff "IN-TERNER ISP-KOMMUNIKATIONSBUS", zusammengefasst. Der bidirektionale Datenbus zwischen ISP INTERFACE und IPS1581 wird innerhalb des ISP INTERFACEs in zwei unidirektionale Datenbusse gleicher Bitbreite aufgetrennt, da auf diese Weise keine bidirektionalen Verbindungen mehr innerhalb des FPGA-Designs notwendig sind – die Aufteilung betrifft sowohl Registerzugriffe als auch DMA-Transfers.

Für einen schreibenden Registerzugriff wird über *isp_addr_i* die Adresse des ISP-internen Registers angegeben, das zu schreibende Datenwort wird über *wr_data_i* vorgegeben. Durch Setzen von *en_wr_i* auf logisch-1 wird der Schreibzugriff gestartet. Während die FSM des ISP INTERFACEs den Schreibzugriff auf den ISP1581 durchführt, wird das Busy-Signal (*busy_o*) auf HIGH gesetzt, um anzuzeigen, dass momentan kein (weiterer) lesender oder schreibender Zugriff über das ISP INTERFACE initiiert werden kann. Analog verhält es sich für einen lesenden Registerzugriff, der unter Angabe der ISP-internen Registeradresse und Setzen von *en_rd_i* auf logisch-1 gestartet wird. Die Gültigkeit des aus dem USB-Controller ausgelesenen und über *rd_data_o* ausgegebenen Datenworts wird über das Steuersignal *rd_data_valid_o* angezeigt.

Für DMA-Transfers ist ein davon abweichendes Verhalten realisiert: Bei Aktivierung der DMA-Kommunikation über entweder *en_dma_rd_i* oder *en_dma_wr_i* werden die DMA-Signale DACK, DIOR, DIOW und DREQ direkt mit den ISP-zugehörigen Pendants verbunden. Im Falle des aus Sicht des FPGAs lesenden DMA-Zugriffs ist *en_dma_rd_i* auf logisch-1 zu setzen; die am bidirektionalen Datenbus *ISP_data_io* eintreffenden Datenworte werden dann automatisch auf den Datenbusausgang *rd_data_o* weitergeleitet. Umgekehrt wird für den schreibenden DMA-Zugriff (angezeigt durch HIGH-Pegel am Steuersignal *en_dma_wr_i*) das über *wr_data_i* eintreffende Datenwort unmittelbar am ISP-Datenbus *ISP_data_io* ausgegeben. In Analogie zu den Registerzugriffen soll auch im DMA-Modus durch Anzeigen eines HIGH-Pegels am Busy-Signal *busy_o* die gleichzeitige Nutzung des ISP INTERFACES durch mehrere ISP-Komponenten bzw. die zeitgleiche Durchführung von Register- und DMA-Zugriffen verhindert werden, da dies unmittelbar zu Datenverfälschungen führen würde.

6.2.3 IRQ Control

Die in Bild 6.6 rotfarben dargestellte Komponente IRQ CONTROL ist die Schaltzentrale des FPGA-Designs. Wie bereits in Kapitel 6.2.2 angesprochen, ist der vom ISP INTERFACE herrührende interne ISP-Kommunikationsbus direkt an IRQ CONTROL angeschlossen. Die drei Komponenten UBUS CONTROL, EPO CONTROL und EP17 CONTROL sind jeweils wiederum über einen identisch aufgebauten Internen Kommunikationsbus mit IRQ CONTROL verbunden. Die als finite Ablaufsteuereinheit (IRQ-FSM) realisierte Komponente IRQ CONTROL koordiniert und priorisiert für diese drei Module den Zugriff auf den ISP1581 in Abhängigkeit vom (Nicht-)Auftreten eines ISP-Interrupts – ist kein Interrupt (IRQ) abzuarbeiten, wird der interne ISP-Kommunikationsbus automatisch mit EP17 CONTROL verbunden, um den daran angeschlossenen Applikationen direkten Register- oder DMA-Zugriff auf das ISP INTERFACE zu gewähren.

Wird vom USB 2.0-Controller ISP1581 ein Interrupt auslösendes USB-Ereignis detektiert, so wird der Interrupt-Puls des ISP1581 über das ISP INTERFACE an die Schaltzentrale IRQ CONTROL übermittelt. Aufgabe von IRQ CONTROL ist es dann, abhängig vom Interrupttyp, den Kommunikationsbus derjenigen Komponente, die für die Bearbeitung des USB-Ereignisses zuständig ist, mit dem internen ISP-Kommunikationsbus und damit letztendlich mit dem ISP INTERFACE zu verknüpfen – IRQ CONTROL kann daher, stark vereinfacht betrachtet, als ein auf USB-Ereignisse getriggerter Multiplexer aufgefasst werden.

Die Funktionsweise von IRQ CONTROL soll am Beispiel eines durch den USB-Gerätetreiber ausgelösten OUT-Transfers über Endpoint 0 erläutert werden. Hierbei sei vorausgesetzt, dass zuvor bereits detektierte Interrupts bereits vollständig abgearbeitet worden sind. Initiiert der HOST-PC entsprechend Kapitel 3.5.4 über USB-Bustreiber und USB-Host-Controller-Treiber einen USB-OUT-Transfer über Endpoint 0, so löst dies am ISP1581 einen Interrupt (EPO-OUT-IRQ) aus. Dem Modul IRQ CONTROL wird zunächst nur das Auftreten irgendeines Interrupts über die Interruptleitung des ISPs signalisiert, zu diesem Zeitpunkt ist für IRQ CONTROL der exakte Interrupttyp jedoch noch nicht ersichtlich. Die Identifikation des Interrupts erfordert das Auslesen des ISP-internen Interrupt-Registers per Registerzugriff. Allerdings ist durch das Modul IRQ CONTROL zuvor zu gewährleisten, dass einerseits ein eventuell zu diesem Zeitpunkt durch ein anderes Modul ausgeführter ISP-Zugriff (egal ob als Register- oder als DMA-Transfer) noch vollständig und korrekt durchgeführt wird und anderseits aber ein sich normalerweise unmittelbar daran anschließender ISP-Zugriff nicht mehr durch die zu diesem Zeitpunkt priorisierte Komponente (UBUS CONTROL, EPO CONTROL oder EP17 CONTROL) initiiert werden kann – daher wird ein Steuersignal an die drei Komponenten propagiert, um die bevorstehende Bearbeitung eines ISP-Interrupts anzukündigen.

Ist der Interne ISP-Kommunikationsbus freigegeben (*busy_o* geht zurück auf logisch-0), greift IRQ CONTROL zunächst lesend auf das 32 Bit umfassende Interrupt-Register zu. Um möglichst schnell den ISP wieder für die Detektion anderer USB-Ereignisse freizugeben,

wird der Inhalt des Interrupt-Registers sofort in einem taktsynchronen FIFO abgespeichert und daran unmittelbar anschließend der Wert 0 als 32-Bit-Wort in das Interrupt-Register des ISPs zurückgeschrieben: Der ISP ist nun wieder bereit, bei Detektion eines (anderen) maskierten USB-Ereignisses erneut einen Interrupt auszulösen – solange das OUT-FIFO des Endpoints EP0 allerdings nicht vollständig (durch EP0 CONTROL) ausgelesen oder explizit gelöscht ist, kann kein erneuter EP0-OUT-Interrupt ausgelöst werden, da der USB-Controller erst dann wieder einen neuen OUT-Transfer über Endpoint 0 akzeptiert, wenn das EP0-OUT-FIFO wieder leer ist.

Das FIFO zur Zwischenspeicherung der Interrupt-Registerwerte, kurz IRQ-FIFO, dient dazu, trotz der hohen Reaktionsgeschwindigkeit auf eintreffende Interrupts die Chronologie hinsichtlich der Abarbeitung der bereits identifizierten Interrupts zu wahren. Dies gilt allerdings nur für die Interruptflags für die vom USB-Gerät benötigten Endpoints. Da der ISP, gemäß den Überlegungen am Ende des vorigen Absatzes, von sich aus die mehrfache Erzeugung desselben Endpoint-Interrupts verhindert, bleibt die Tiefe des IRQ-FIFOs mit 32 Datenworten überschaubar – normalerweise würde nach [Phi04b] eine Tiefe von 17 Datenworten für die Endpoint-Interrupts ausreichen (3mal EP0-IRQ plus jeweils 2 IRQs je Endpoint EP1 bis EP7), jedoch wird für den *Xilinx Core Generator* zur Erzeugung kompakter Synchron-FIFOs eine zu 2ⁿ kompatible Worttiefe empfohlen.

Wenn nicht unmittelbar im Anschluss an das Rücksetzen des Interrupt-Registers ein erneuter, anders begründeter Interrupt durch den ISP1581 angezeigt wird, so beginnt die IRQ-FSM, aufgrund des nun nicht-leeren IRQ-FIFOs, mit der Analyse des nach einem Lesezugriff am FIFO-Ausgang vorliegenden Datenworts. Da das IRQ-FIFO vor dem Empfang des EPO-OUT-Transfers keine weiteren Einträge zu verzeichnen hatte – alle vorhergehenden Interrupts waren nach obiger Voraussetzung schon abgearbeitet –, liegt das gerade zuvor abgespeicherte Interrupt-Register mit einer logisch-1 zur Anzeige eines EPO-OUT-IRQs am FIFO-Ausgang vor. IRQ CONTROL aktiviert daraufhin das Modul EPO CONTROL, es zeigt diesem die Existenz eines EPO-OUT-Interrupts an. Zugleich verknüpft IRQ CONTROL den internen ISP-Kommunikationsbus mit dem Kommunikationsbus von EPO CONTROL, sodass der Zustandsautomat von EPO CONTROL das im EPO-OUT-FIFO des ISPs vorliegende Datenpaket auslesen und entsprechend reagieren kann.

Die IRQ-FSM wartet nach Aktivierung der Komponente EPO CONTROL, bis diese die vollständige Abarbeitung des EPO-OUT-Interrupts bestätigt. In der Zwischenzeit auftretende Interrupts werden von IRQ CONTROL registriert, die Interrupt-Registerwerte ausgelesen und im Falle von Endpoint-IRQs jeweils in das IRQ-FIFO geschrieben – die garantiert vollständige und korrekte Durchführung eines zufällig gerade zeitgleich durch EPO CONTROL initiierten ISP-Zugriffs bleibt hierbei gewahrt.

Sobald die Abarbeitung des EPO-OUT-IRQs abgeschlossen und dies dem Modul IRQ CONTROL angezeigt ist, kann die IRQ-FSM die Abarbeitung des nächsten IRQ-FIFO-Eintrags initiieren und den internen ISP-Kommunikationsbus an die für die Bearbeitung des Endpoint-IRQs zuständige Komponente durchschalten. Im Falle eines erneuten EPO-Interrupts ist dies wiederum EPO CONTROL. Für den Fall eines durch eine Stream-Pipe (EP1-IN, EP1-OUT, EP2-IN, usw.) ausgelösten Endpoint-Interrupts (im Folgenden als EP17-Interrupt bezeichnet) wird die Komponente EP17 CONTROL zur Verarbeitung des oder der Interrupts aufgefordert – theoretisch können zum Zeitpunkt des Interrupt-Registerzugriffs bereits schon mehrere EP17-Interruptflags auf logisch-1 gesetzt sein.

Sind alle eingegangenen Interrupts abgearbeitet, und ist das IRQ-FIFO entsprechend wieder geleert, schaltet IRQ CONTROL den internen ISP-Kommunikationsbus automatisch wieder für EP17 CONTROL mit den daran angeschlossenen Applikationen frei.

Hochpriore Interrupts, die etwa einen USB-Bus-Reset oder einen USB-Statuswechsel von Full-Speed-USB auf High-Speed-USB anzeigen, werden nicht im IRQ-FIFO abgespeichert, sondern immer direkt und unmittelbar den dann zu aktivierenden Komponenten UBUS CONTROL und FIRMWARE CONTROL angezeigt. Dieses Verhalten der IRQ-FSM ist dadurch begründet, dass diese speziellen Bus-Ereignisse eine nahezu vollständige Neukonfiguration des USB-Geräts erfordern: Die Initialisierungsregister des ISPs sind neu zu konfigurieren, sämtliche Endpoint-FIFOs des USB-Controllers und damit die darin zuvor noch vorhande-

nen Datenpakete werden ungültig, und abhängig vom USB-Gerätezustand werden wesentliche Teile des Enumerationsprozesses neu angestoßen (siehe hierzu Kapitel 6.2.4). Die zuvor noch durch IRQ CONTROL aktivierte Komponente EPO CONTROL würde auf jeden Fall, spätestens nach Beendigung eines gerade noch durchgeführten ISP-Zugriffs, automatisch durch das Modul FIRMWARE CONTROL zurückgesetzt werden.

6.2.4 Firmware Control

Dieses Modul des FPGA-Designs dient der Verwaltung der USB-Gerätezustände, die während der Enumerationsphase durchlaufen werden. Der Aufbau der in Bild 6.8 dargestellten FSM ist dabei angelehnt an die vom USB-Standard vorgegebenen Gerätezustände *Attached*, *Powered*, *Default*, *Addressed* und *Configured* (vgl. hierzu Kapitel 19 in [And01]). Je



Bild 6.8: FSM für Firmware CNTRL

nach Gerätezustand wird das Verhalten bzw. der Funktionsumfang der einzelnen Blöcke des FPGAs vorgegeben bzw. eingeschränkt: So wird z. B. im Gerätezustand *FW_Powered* verhindert, dass über einen SET_ADDRESS-Standard-Device-Request das USB-Gerät vor seiner vollständigen Konfiguration schon eine einzigartige Geräteadresse (Device-ID) erhält.

Nachfolgend wird die Funktionsweise der FSM kurz erläutert. Nach dem Anschalten der Versorgungsspannung bzw. nach Auslösen eines asynchronen Resets über den Taster der ROBOCOMM-Erweiterungsplatine (vgl. Bild 6.3) verweilt die Zustandsmaschine von FIRMWARE CONTROL zunächst im Zustand *FW_Idle*. Nach Aktivieren der USB-Schnittstelle wird das USB-Gerät bzw. der ISP1581 durch die Komponente UBUS CONTROL im Zustand *FW_Init* konfiguriert. Hiernach gilt das USB-Gerät bzw. die USB-Schnittstelle des Gerätes als aktiviert (*"Powered"*) und wartet auf die physikalische USB-Verbindung zum Host-PC.

Wird ein USB-Bus-Reset nach Verbinden des USB-Gerätes registriert bzw. der Status der USB-Verbindung von Full-Speed auf High-Speed geändert, so wird wiederum UBUS CONTROL zur Konfiguration aktiviert. Das Gerät ist danach im "*Default"-*Zustand: Es ist spannungsversorgt, zurückgesetzt, jedoch besitzt es noch die USB-Standardadresse 0. Im Rahmen der Abarbeitung der Standard-Device-Requests durch EP0 CONTROL werden die Device-Deskriptoren der

USB-Basisstation an den Host-PC übermittelt. Dieser weist daraufhin dem USB-Gerät eine einzigartige USB-Geräteadresse zu – die FSM befindet sich im Zustand *FW_Addressed*. Hieran anschließend konfiguriert EP17 CONTROL die für die USB-Interfaces (Applikationen) des USB-Gerätes benötigten Endpoints des ISPs – dies geschieht im Zustand *FW_EP17_DMA_Conf*. Sobald die Endpoint-Konfiguration für die Stream-Pipes der USB-Interfaces abgeschlossen ist, kann der USB Client Driver (vgl. Bild 3.20 in Kapitel 3.5.4) auf die durch das USB-Gerät unterstützen Funktionen zugreifen. EP17 CONTROL seinerseits koordiniert den Zugriff der einzelnen USB-Interfaces auf die im USB 2.0-Controller zugeordneten Endpoint-FIFOs unter Beachtung des Zeitrasters für das durch das Package USB_FIRMWARE_PACK definierte Time Scheduling. Das USB-Gerät ROBOCOMM ist konfiguriert, der Zustand *FW_Configured* ist erreicht.

6.2.5 UBUS Control

Nach einem Reset des USB-Gerätes ist UBUS CONTROL zunächst für die Konfiguration der internen Register des ISP1581 zuständig. Im Rahmen einer finiten Ablaufsteuereinheit werden per Registerzugriff über den internen ISP-Kommunikationsbus die sog. Initialisierungsregister des ISPs programmiert (siehe hierzu [Phi04a] und[Phi04b]). Neben der Konfiguration der Message-Pipe bzw. des bidirektionalen Endpoint 0 (u. a. bzgl. der maximalen EP0-Paketgröße) ist hierbei insbesondere die Programmierung des Interrupt-Enable-Registers zur Maskierung der zulässigen Interruptquellen hervorzuheben: Über dieses 32 Bit umfassende Register wird festgelegt, für welche auftretenden USB-Ereignisse jeweils ein Interrupt-Puls an das FPGA zu übermitteln ist. Nach der Initialisierungsprozedur ist UBUS CONTROL für die Verarbeitung grundlegender USB-Busereignisse zuständig. Dies gilt insbesondere für einen detektierten USB-Bus-Reset oder aber die Detektion der Änderung des USB-Modus' von Full-Speed zu High-Speed. Weiterhin wird über diese Komponente das Suspend/Resume-Verhalten des USB-Gerätes kontrolliert.

6.2.6 EP0 Control

Die FPGA-Komponente EPO CONTROL ist für die Kommunikation zwischen dem USB-Gerät und dem Host-PC (USB-Gerätetreiber, USB-Bustreiber und USB-Host-Controller-Treiber) über die bidirektionale Message-Pipe, d. h. Endpoint 0, verantwortlich. Insbesondere sind die vom USB-Standard vorgegebenen Standard-Device-Requests, genauer die Reaktion des USB-Gerätes auf diese Requests, durch EPO CONTROL abzubilden.

Wie bereits in Kapitel 6.2.3 beschrieben, wird EPO CONTROL nach der Detektion eines EPO-Interrupts durch IRQ CONTROL zur Abarbeitung des jeweils vorliegenden EPO-Interrupts aktiviert. Aufgrund des doppelten Handshakings sowohl bei der Bearbeitung von Standard-Device-Requests, insbesondere bei der Übermittlung der USB-Deskriptoren, sieht der ISP1581 zusätzlich zu EPO-OUT- und EPO-IN-Interrupt noch den EPO-Setup-Interrupt zur Anzeige eines empfangenen Setup-Token vor.

Zur Realisierung der für EPO CONTROL angestrebten Funktionalität wird ein sehr umfangreicher finiter Zustandsautomaten (EPO-FSM) implementiert. Hauptgrund für den recht großen Aufwand bei der Realisierung der EPO-FSM ist neben der Übermittlung der USB-Deskriptoren insbesondere das für die Vermittlung bzw. Verarbeitung von Standard-Device-Requests spezifizierte doppelte Handshake-Verfahren (vgl. Kapitel 3.5.3): Dieses erfordert eine Abarbeitung von mindestens drei Interruptflags je Standard-Device-Requests. Dies gilt übrigens nur dann, wenn das zu transferierende Datenpaket nicht die für das EPO-FIFO festgelegte maximale Paketlänge übersteigt. Ist das zu übermittelnde Datenpaket größer als die für den Endpoint 0 definierte FIFO-Größe – z. B. bei der Übermittlung des Configuration-Deskriptors - so wird eine Aufteilung auf mehrere Pakete zwingend notwendig: Abgesehen vom letzten Paket werden alle Pakete davor mit der maximal zulässigen Länge übermittelt, allerdings impliziert jedes zu übertragende Teilpaket die Verarbeitung eines weiteren EPO-Interrupts. An dieser Stelle wird auf eine ausführlichere Beschreibung der EPO-FSM verzichtet. Vielmehr sei auf die für den ISP1581 verfügbaren Datenblätter und die Programmierempfehlungen aus dem ISP1581 Programming Guide verwiesen [Phi03], [Phi04b], [Phi04a]: Die VHDL-Implementierung der EPO-FSM orientiert sich, neben den Empfehlungen aus der Literatur ([Kel03], [And01], [Axe01]) insbesondere an den Programmablaufdiagrammen des ISP1581 Programming Guide [Phi04a]. Allerdings gilt es für die Umsetzung des Zustandsautomaten EPO-FSM zusätzlich die FPGA-Designstruktur mit den für EPO CONTROL wesentlichen Modulen IRQ CONTROL, UBUS CONTROL und FIRMWARE CONTROL und den vom ISP INTERFACE vorgegebenen internen ISP-Kommunikationsbus mit zu berücksichtigen.

6.2.7 EP17 Control

6.2.7.1 Konfiguration der Stream-Pipes

EP17 CONTROL stellt das Bindeglied zwischen dem sog. USB-BASISINTERFACE, bestehend aus ISP INTERFACE, IRQ CONTROL, *UBUS Control*, EP0 CONTROL und FIRMWARE CONTROL, und den eigentlichen USB-Applikationen (USB-Functions bzw. USB-Interfaces) dar.

Nach Erreichen des USB-Gerätezustandes *FW_EP17_DMA_Conf* (vgl. Kapitel 6.2.4), der sich nach fehlerfreier Verarbeitung des Standard-Device-Requests SET_CONFIGURATION einstellt, wird EP17 CONTROL dazu aufgefordert, die für die Applikationen (USB-Interfaces) benötigten Stream-Pipes zu konfigurieren, d. h. die Endpoints im ISP1581 einzurichten. Für diese Aufgabe wird ein finiter Zustandsautomat (EP17-FSM) implementiert, der die für die Konfiguration des jeweiligen Endpoints notwendigen ISP-internen Register programmiert. Dabei werden die Endpoints gemäß den Vorgaben des VHDL-Packages USB_FIRM-WARE_PACK aktiviert, wobei zusätzlich zu berücksichtigen ist, welche Interface-Einstellungen durch den Host-PC mit Hilfe des Standard-Device-Request SET_INTERFACE ausgewählt sind. Ist die Konfiguration der Stream-Pipe-Endpoints abgeschlossen, wird dies an FIRMWA-RE CONTROL übermittelt.

Das USB-Gerät ist nun vollständig konfiguriert. Die USB-Client-Software kann ab diesem Zeitpunkt mit den USB-Interfaces über Stream-Pipes kommunizieren, die USB-Functions (Applikationen) ihrerseits müssen spätestens ab dann für die Kommunikation mit der USB-Client-Software bereit sein und auf Konfigurations- oder Kontrolldatenströme reagieren können. Übertragen auf die USB-Basisstation ROBOCOMM bedeutet dies, dass die in Bild 6.1 bzw. Bild 6.6 gelbfarben hervorgehobene IR-Applikation ROBOCOMM die in den Kapiteln 4.7.3, 4.7.4 und 4.7.5 festgelegten Datenströme entsprechend den Vorgaben aus den Kapiteln 4.7.1 und 4.7.2 verarbeiten muss.

6.2.7.2 EP17-Interruptbehandlung und Time Scheduling

Wie in Kapitel 6.2.3 bereits mehrfach angeklungen ist, wird der interne ISP-Kommunikationsbus automatisch für EP17 CONTROL frei geschaltet, wenn weder EPO-Interrupts noch hochpriore Interrupts zu verarbeiten sind. Die an EP17 CONTROL angeschlossenen Applikationen sollten daraufhin mit dem ISP1581 über das ISP INTERFACE kommunizieren können. Hierzu muss allerdings EP17 CONTROL, ähnlich wie die USB-Interface-Komponente IRQ CONTROL, den internen ISP-Kommunikationsbus "bedarfsgerecht" zwischen den angeschlossenen USB-Functions verteilen, um diesen auch den Zugriff auf die zu den Stream-Pipes zugehörigen Endpoint-FIFOs zu ermöglichen.

Zwei Szenarien sind prinzipiell für den Datentransfer zwischen ISP1581 und einer USB-Function denkbar. Einerseits kann der Datenaustausch zwischen Applikation und zugehörigem Endpoint-FIFO dadurch erzwungen werden, dass für eine Stream-Pipe durch IRQ CONTROL ein Interrupt (gemäß Kapitel 6.2.3 als EP17-Interrupt bezeichnet) angezeigt wird. Anderseits ist aber auch ein "ungetriggerter" Zugriff der Applikationen auf die ihnen im ISP1581 jeweils zugewiesenen Endpoint-FIFOs möglich.

Sind keine EP17-IRQs durch die USB-Functions abzuarbeiten, so sorgt ein in EP17 CON-TROL integrierter *Time Scheduler* für die "gerechte" Zuweisung des internen ISP-Kommunikationsbusses an die identisch aufgebauten Kommunikationsbusse der einzelnen USB-Functions. Innerhalb eines fest vorgegebenen Zeitrahmens gewährt der Scheduler sämtlichen Applikationen anteilig Zugriff auf das ISP INTERFACE. Wie viel Prozent dieses Zeitrahmens den einzelnen Applikationen als Zeitfenster zugesprochen werden, ist im VHDL-Package USB_FIRMWARE_PACK definiert. Die Gesamtlänge des Zeitrahmens orientiert sich dabei am USB-Status: Im Full-Speed-Modus beträgt er in Analogie zur Periodizität des USB-Übertragungsrahmens 1 ms, im High-Speed-Modus ist er entsprechend der Länge eines USB-Mikro-Frames auf 125 µs verkürzt (vgl. Kapitel 3.5.4).

EP17 CONTROL wird derart konzipiert, dass getriggerten, d. h. per Interrupt ausgelösten ISP-Zugriffen immer eine höhere Priorität im Vergleich zu normalen, über den Time Scheduler gesteuerten Datentransfers eingeräumt wird: Ein EP17-IRQ kann jederzeit eine normale ungetriggerte Übertragung unterbrechen. Wird durch IRQ CONTROL ein EP17-Interrupt angezeigt, so sind gleich mehrere funktionale Abläufe bei der Interruptverarbeitung denkbar. Die Interruptbehandlung ist dabei vor allem abhängig von der Beschaffenheit des oder der angezeigten EP17-Interrupts – innerhalb eines ausgelesenen Interrupt-Registerwertes können nach Kapitel 6.2.3 theoretisch gleichzeitig mehrere Interruptflags auf logisch-1 gesetzt sein.

Bei Auftreten eines einzelnen EP17-Interrupts wird automatisch die zum jeweiligen Endpoint zugehörige Applikation zur Reaktion auf diesen Endpoint-Interrupt aufgefordert. Zugleich sorgt EP17 CONTROL für die Verbindung zwischen dem internen ISP-Kommunikationsbus (von IRQ CONTROL herrührend) und dem ISP-Kommunikationsbus der "getriggerten" USB-Function – hierbei wird durch EP17 CONTROL gewährleistet, dass ein zu diesem Zeitpunkt noch aktiver ISP-Zugriff zunächst noch vollständig durchgeführt wird, bevor der ISP-Kommunikationsbus derjenigen USB-Function zugewiesen wird, die nachfolgend für die Abarbeitung des EP17-IRQs zuständig ist. Wird durch IRQ CONTROL das Auftreten gleich mehrerer EP17-Interrupts angezeigt, so ist hier zu unterscheiden, ob die Endpoint-Interrupts nur eine oder aber gleich mehrere Applikationen betreffen. Im erstgenannten Fall verhält es sich wie für einen einzelnen EP17-IRQ. Sind jedoch mehrere Applikationen betroffen, so schaltet EP17 CONTROL sukzessive, mit Applikation 0 beginnend, den internen ISP-Kommunikationsbus für die einzelnen Applikationen durch: Die Verbindung zu einer Applikation wird dabei jeweils nur so lange aufrechterhalten, bis sämtliche zu dieser Applikation zugehörige EP17-Interrupts abgearbeitet sind.

Sobald die EP17-Interrupt-Verarbeitung durch die USB-Functions abgeschlossen ist, übernimmt wieder der Time Scheduler die Kontrolle und verwaltet bis zum nächsten EP17-Interrupt die Verbindungen zwischen ISP INTERFACE und den Kommunikationsbussen der Applikationen bzw. USB-Functions.

6.2.8 IR-Applikation RoboComm

6.2.8.1 Aufbau

Für die USB-Function (IR-Applikation ROBOCOMM) wird ein USB-Interface implementiert, das entsprechend dem USB-Konzept aus Kapitel 4.7.2 auf zwei Endpoints basiert. Endpoint 1 wird zur Konfiguration der USB-Applikation ROBOCOMM herangezogen, Endpoint 2 dient dem eigentlichen Datentransfer zwischen der Manipulationssteuerungseinheit und den Mikrorobotern. Obwohl für die Konfiguration der Basisstation nur der Endpoint 1 für OUT-Transfers notwendig ist, wird zusätzlich der Endpoint 1 für IN-Transfers als Stream-Pipe vorgesehen, um auf diese Weise Statusinformationen bzgl. der USB-Applikation an den Host-PC übermitteln zu können.

Wie bereits in Kapitel 6.2.1 aufgeführt, wird für das FPGA-Design eine 40-MHz-Master-Clock spezifiziert, um für die Implementierung der IR-Applikation ROBOCOMM die verschiedenen, bereits schon für das ASIC-Modul *IRC* erarbeiteten Komponenten instanziieren zu können. Dies ist insbesondere für die Komponenten IR-TX-Unit und IR-RX-Unit wichtig, da diese über eine aufwändige Taktgeneratorschaltung zur Erzeugung der für den Transfer benötigten Arbeitstakte verfügen, die bei einem von 40 MHz abweichenden Takt aufwändig zu modifizieren wären.

Bild 6.9 zeigt die innere Struktur der IR-Applikation ROBOCOMM. EP_12_HANDLE CNTRL stellt die Datenaustausch-Schnittstelle zur im vorigen Kapitel 6.2.7 vorgestellten Komponente EP17 CONTROL dar: Sobald ein Endpoint-Interrupt (für EP1 bzw. EP2) von IRQ CONTROL über EP17 CONTROL angezeigt wird, beginnt EP_12_HANDLE CNTRL mit der Verarbeitung des entsprechenden Interrupts und löst hierdurch wiederum die Weiterverarbeitung durch die nachfolgenden Funktionsblöcke aus.

ROBOCOMM CNTRL übernimmt die Konfiguration der Basisstation entsprechend dem in Kapitel 4.7.3 spezifizierten *IOControl*-Datenstrom. Da dies auch die Initialisierung der an

die Basisstation angeschlossenen Transceivermodule umfasst, werden in ROBOCOMM CNTRL die bereits im *IRC* implementierten Module *init TFDU6102* und *init TFDUx108* instanziiert.



Bild 6.9: Aufbau der IR-Applikation ROBOCOMM mit ihren wichtigsten Funktionsblöcken

Sämtliche Konfigurationsvorgaben bzgl. Synchronisations-Timer, Timeout, Echo-Unterdrückung oder Multiempfängerbetrieb werden in Registern abgelegt, deren Ausgänge an die Module MUXCNTRL und IR-DA_DATA_CNTRL propagiert werden.

IRDA DATA CNTRL verarbeitet die von der USB-Client-Software zusammengesetzten USB-TxFrames: Über die angebundene Sendeeinheit Tx werden die Roboterdaten entsprechend dem spezifizierten IR-Kommunikationsprotokoll übermittelt; die Timer zur Sendeverzögerung oder Synchronisation des Sendezeitpunkts (vgl. Kapitel 4.7.1) gilt es dabei je nach Konfigurationseinstellung (per ROBOCOMM CNTRL) zusätzlich zu berücksichtigen. Eine durch eine der mehrfach instanziierten Empfangseinheiten (Rx0 bis Rx3) empfangene Roboterantwort wird auf fehlerfreie CRC und korrekte Roboter-ID hin geprüft; die an die Steuerungseinheit bzw. USB-Client-Software zu übermittelnden ROBOCOMM-Antwortpakete werden gemäß Kapitel 4.7.5.2 zusammengesetzt und an EP_12_HANDLE CNTRL übergeben. Für die Sende- und Empfangseinheiten werden die bereits für den IRC entwickelten Module IR-TX-Unit und IR-RX-Unit eingesetzt, da diese die IRC-Spezialfunktionen (DLL, MIR-Präambel, FIR-Kurzpulse) beherrschen, sofern die FSM von IRDA_DATA_CNTRL die Steuersignale für diese Module entsprechend einstellt.

Der Block MUXCNTRL sorgt für die korrekte Verbindung zwischen den Transcei-

vermodulen und den jeweils für Senden bzw. Empfang zuständigen Komponenten (*TX-Unit* bzw. *RX-Unit*). Weiterhin findet sich hierin die für die Unterdrückung von Echos zuständige Funktionslogik. Darüber hinaus wird während der Verarbeitung eines Konfigurationsdatenstromes das jeweils zu konfigurierende Transceivermodul mit der passenden Komponente *init TFDU6102* oder *init TFDUx108* verbunden.

6.2.8.2 Funktionalbeschreibung

Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten wird nachfolgend an einem Beispiel erläutert. Fordert die Steuerungseinheit der Manipulationsstation beispielsweise Statusinformationen eines Mikroroboter-*IRCs* an, so wird ein USB-TxFrame gemäß Bild 4.24 des Kapitels 4.7.4 durch die zuständige USB-Client-Software generiert. Hierbei sind die Spezifikationen für den Aufbau des für die Statusabfrage erforderlichen *IRC*-Befehls (IR-Frames) zu berücksichtigen. Weiterhin ist mit Hilfe des globalen Sensorsystems zur Bestimmung der Roboterposition das bestgeeignete IR-Transceivermodul für die Übertragung im Downstream auszuwählen und dies im Header des zum IR-Frame zugehörigen ROBOCOMM-Frames einzutragen. Dieser USB-TxFrame wird als OUT-Transfer an Endpoint 2 des USB-Controllers ISP1581 übermittelt. Dies wird EP_12_HANDLE CNTRL schließlich, nach Durchlaufen der Module IRQ CONTROL und EP17 CONTROL, als EP2-OUT-Interrupt angezeigt. Daraufhin greift die für EP2-OUT-IRQ zuständige finite Ablaufsteuereinheit von EP_12_HANDLE CNTRL über das ISP IN-TERFACE auf den USB-Controller zu und liest den USB-TxFrame entweder per DMA-Transfer oder über Registerzugriffe aus dem EP2-FIFO des ISPs aus – die Art des Zugriffs wird über das VHDL-Package USB_FIRMWARE_PACK vorgegeben. Der USB-TxFrame wird unmittelbar im zu EP2 zugehörigen FIFO EP2-OUT-DATA abgespeichert. Die Größe des USB-TxFrames wird zusätzlich ins FIFO EP2-OUT-CNTRL eingetragen.

Der Block IRDA_DATA_CNTRL, bzw. der darin realisierte finite Zustandsautomat, sorgt für die Ausführung des empfangenen USB-TxFrames. Sobald IRDA_DATA_CNTRL die Abarbeitung eines eventuell vorangegangenen USB-TxFrames beendet hat, wird auf das nicht leere FIFO EP2-OUT-CNTRL reagiert und ein Eintrag ausgelesen. Nach Kenntnis über die Länge des nun zu bearbeitenden USB-TxFrames wird mit dessen Abarbeitung begonnen: Der USB-TxFrame wird aus dem FIFO EP2-OUT-DATA ausgelesen, die Steuerinformationen aus dem ROBOCOMM-Frame-Header werden ausgewertet. Daran anschließend wird der IR-Frame extrahiert und in das FIFO der IR-Sendeeinheit *IR-TX-Unit* eingetragen. Zeitgleich wird über Steuersignale auf den Block MUXCNTRL zugegriffen, um das gewünschte Transceivermodul, genauer seine Sendeleitung TxD, mit der Sendeeinheit zur verbinden. Die Übertragung wird entweder sofort oder aber erst nach Überlauf des Verzögerungs- bzw. Synchronisations-Zählers gestartet: Die Sendeeinheit übermittelt nach elektrischer Modulation des *IRC*-Befehls die IR-Pulsfolge über MUXCNTRL zum ausgewählten Transceivermodul.

Noch bevor die Sendeeinheit die Vollständigkeit der Übertragung anzeigt, werden die Empfangseinheiten aktiviert. Das vorzeitige Starten ist notwendig, da die *IR-TX-Unit* aufgrund des langsameren Arbeitstaktes des aktivierten Wrappers erst mit einigen Takten Verspätung die vollständige Durchführung anzeigen kann; der *IRC* hätte in dieser Zeit aber aufgrund seiner kurzen Turnaround-Zeit bereits schon mit der IR-Übertragung der Rückantwort, d. h. der Übermittlung der *IRC*-Statusinformationen, begonnen: Ein korrekter Empfang durch die Basisstation wäre dann nicht mehr möglich. MUXCNTRL garantiert, dass jedes Transceivermodul, d. h. seine Ausgangsleitung RxD, an die zugehörige Empfangseinheit angeschlossen ist (TFDU0 ist mit Rx0 verbunden, TFDU1 mit Rx1, usw.).

Sobald eine der Empfangseinheiten den Empfang eines IR-Antwortpakets signalisiert, wird geprüft, ob die Empfangseinheit Fehler, z. B. bzgl. der CRC-Berechnung, anzeigt. Sind die *IRC*-Daten fehlerfrei empfangen worden, wird die Roboter-ID mit den Vorgaben des ROBOCOMM-Frame-Kontrollbytes verglichen (vgl. Bild 4.25). Sind keine Abweichungen feststellbar, wird ein ROBOCOMM-Antwortpaket mit den empfangenen *IRC*-Statusinformationen als Nutzdaten vorbereitet und an EP_12HANDLE_CNTRL übergeben: Die Länge des Antwortpakets wird in das FIFO EP2-IN-CNTRL eingetragen, das Antwortpaket selbst im FIFO EP2-IN-DATA abgespeichert.

Zeigt eine Empfangseinheit einen fehlerbehafteten Datenempfang an, wird weiter gewartet und auf den vollständigen und korrekten Empfang durch eine andere Empfangseinheit "gehofft". Erst mit Überlauf des Timeout-Zählers wird eine Fehlerbotschaft als RO-BOCOMM-Antwortpaket (vgl. Bild 4.31) generiert und an EP_12_HANDLE_CNTRL übergeben.

Liest IRDA_DATA_CNTRL aus dem EP2-OUT-FIFO die *Compose*-Instruktion aus oder erkennt eine logisch-1 für das Flag *ValidateRxFifo* im USB-TxFrame (Kapitel 4.7.5.1), wird EP_12_HANDLE_CNTRL dazu aufgefordert, die im FIFO EP2-IN-DATA zwischengespeicherten ROBOCOMM-Antwortpakete für einen Lesezugriff durch die Steuerungseinheit bzw. die USB-Client-Software vorzubereiten.

EP_12_HANDLE_CNTRL liest zuerst einen Eintrag aus dem FIFO EP2-IN-CNTRL aus, um die Länge des nun zu sendenden ROBOCOMM-Antwortpaketes zu ermitteln. Hiernach werden die Daten des Antwortpakets aus dem FIFO EP2-IN-DATA ausgelesen und in das ISP-FIFO für IN-Transfers über Endpoint 2 (EP2-IN-FIFO) transferiert – je nach VHDL-Package-De-klaration als Register- oder DMA-Zugriff. Nach Übertragen des letzten Bytes des Antwortpakets wird der Inhalt des EP2-IN-FIFOs durch EP_12_HANDLE_CNTRL für gültig erklärt: Die

USB-Client-Software bzw. der Gerätetreiber kann nun per lesendem Zugriff (USB-IN-Transfer) auf den FIFO-Inhalt des ISPs zugreifen – der erfolgreiche Lesezugriff wird EP_12_HANDLE_CNTRL als EP2-IN-Interrupt angezeigt. Übersteigt die Größe des Anwortpakets die für EP2-IN maximal zulässige Paketlänge, sind eine Aufsplittung auf mehrere Teilpakete und demzufolge mehrere USB-IN-Transfers notwendig – mit jeder erfolgreichen Übertragung eines Teilpakets wird ein EP2-IN-IRQ ausgelöst, der EP_12_HANDLE_CNTRL signalisiert, dass das nächste Teilpaket ins ISP-FIFO übertragen und für gültig erklärt werden kann. Mit Ausnahme des letzten Teilpakets muss immer die jeweils maximal zulässige Bytezahl in das EP2-IN-FIFO des ISPs übertragen werden, das letzte Teilpaket darf auch kürzer sein. Durch diese Konvention ist es möglich, dem USB-Gerätetreiber durch einen USB-IN-Transfer mit maximal zulässiger Bytezahl zu signalisieren, dass weitere Daten verfügbar sind und daher ein weiterer USB-IN-Transfer durch den Treiber zu initiieren ist.

Wurde vom Host-PC die Übertragung eines *IOControl*-Datenstroms zur Übersendung von Konfigurationsdaten (vgl. Kapitel 4.7.3) angestoßen, so wird dies über das Interruptflag für OUT-Transfers an Endpoint 1 (EP1-OUT-IRQ) angezeigt. EP_12_HANDLE CNTRL greift daraufhin über das ISP INTERFACE auf den USB-Controller zu, liest diesen Datenstrom (entweder per DMA-Transfer oder über Registerzugriffe) aus und speichert die Daten im zugehörigen FIFO EP1-OUT-DATA. Die Anzahl der ausgelesenen Bytes wird parallel im FIFO EP1-OUT-CNTRL abgelegt. Für die umgekehrte Richtung zur Übermittlung von Statusin-formationen werden die beiden FIFOs für EP1-IN-CNTRL und EP1-IN-DATA instanziiert. Diese sind durch die Komponente ROBOCOMM CNTRL in Analogie zu den FIFOs für End-point 2 zu bedienen, wenn ROBOCOMM-Statusinformationen ausgelesen werden sollen.

6.3 USB-LINUX-Treiber

Der USB-Gerätetreiber der Basisstation ROBOCOMM wird als Kernel-Modul für den LINUX-Kernel in der Version 2.6 realisiert. Die Implementierung als Kernel-Modul bietet nicht nur den Vorteil, ständiges "Neubooten" während der Treiberentwicklung vermeiden zu können, sondern spart darüber hinaus auch Ressourcen während des normalen Betriebes ein: Treiber in Modulform werden nur dann geladen, wenn sie vom Betriebssystem auch wirklich benötigt werden. Wie bereits in Kapitel 4.4.2 angedeutet, wird ROBOCOMM als Blockgerät in das LINUX-Dateisystem, genauer in das /proc-Dateisystem (Kapitel 6.3.1), integriert. In kurzer Form beschreibt Kapitel 6.3.2 die wesentlichen Treiberfunktionen. In Kapitel 6.3.3 werden die Integration von ROBOCOMM in das LINUX-Betriebssystem und die für Treiberzuordnung und Enumeration notwendigen Mechanismen vorgestellt.

6.3.1 /proc-Dateisystem

Über das virtuelle /proc-Dateisystem bietet der LINUX-Kernel den Subsystemen, d. h. den Kernel-Funktionen und Kernel-Modulen (d. h. auch dem ROBOCOMM-Treiber), einen eleganten Mechanismus, einerseits zum Senden von Informationen an die einzelnen Systemprozesse, anderseits zur Wiedergabe und Entgegennahme von Zustands- und Konfigurationsinformation der einzelnen Kernel-Module [QK04], [SBP04]. Aus Sicht des Anwenders bzw. der Anwendersoftware sind im /proc-Dateisystem eine Vielzahl von Dateien vorhanden, die teilweise in Unterverzeichnissen gruppiert sind – jede Datei in /proc entspricht einer Kernel-Funktion. Auf diese Dateien kann i. d. R. ASCII-kodiert lesend bzw. schreibend zugegriffen werden. Im Falle eines lesenden Zugriffs erzeugt die zugehörige Kernel-Komponente, dynamisch, d. h. zum Zeitpunkt des Lesezugriffs, aus den internen Kernel-Modul-Informationen die ASCII-kodierten Inhalte. Umgekehrt werden, im Falle eines aus Anwendersicht durchzuführenden Schreibzugriffs auf eine /proc-Datei, die Daten zur Weiterverarbeitung an die zugehörige Schreibfunktion des Systemprozesses bzw. Kernel-Moduls weitergereicht [QK04]. Da das USB-Dateisystem für die LINUX-Betriebssysteme ebenfalls dynamisch generiert wird, werden in den meisten LINUX-Derivaten die den USB-Treibern zugehörigen Geräte-Dateien innerhalb des dynamischen /proc-Dateisystems eingerichtet. Dies bietet den Vorteil, dass die sog. *Inode (Index-Node)* für den Treiber eines Plug&Play-Gerätes nicht von vornherein bekannt sein muss [SBP04] – für ein nicht-virtuelles Dateisystem, z.B. auf einer Festplatte, enthält die *Inode* neben den Dateizugriffsrechten auch den Zeiger zur physikalischen Lokalisierung der (auf Festplatte abgelegten) Daten.

Für die ROBOCOMM-Basisstation als USB-Gerät wird daher eine Anbindung an das /proc-Dateisystem realisiert. Hierzu orientiert sich der Gerätetreiber an der für das /proc-Dateisystem erforderlichen Struktur – dies umfasst u. a. die Zeiger auf die treiberspezifischen Schreib- und Lesefunktionen *usb_micron_read* und *usb_micron_write* sowie auch die Bekanntgabe des Funktions-Handles *usb_micron_ioctl* für die *IOControl-*Zugriffe (vgl. nachfolgendes Kapitel 6.3.2).

Der ROBOCOMM-Treiber ist derart aufgebaut, dass für die bidirektionale Kommunikation zwischen Steuerungseinheit und Mikrorobotern eine symbolische Gerätedatei im /proc-Dateisystem zur Verfügung gestellt wird, auf die entsprechend den Kapiteln 4.7.4 und 4.7.5 schreibend bzw. lesend zugegriffen werden kann. Diese Gerätedatei ist für jede Applikation im LINUX-Betriebssystem direkt sichtbar. Daher können über diese Datei "gleichzeitig" mehrere Applikationen, insbesondere die einzelnen Mikroroboter-Treiberinstanzen des Manipulationssteuerungssystems (vgl. Kapitel 2.4.3.3, S. 39), direkt auf die Mikroroboter zugreifen, die Beachtung von USB-Datentransferprotokoll einschließlich IR-Protokoll entsprechend den Kapiteln 4.6.2, 4.7.4 und 4.7.5 vorausgesetzt.

Für die Konfiguration der ROBOCOMM-Basisstation wird vom Treiber keine symbolische Gerätedatei im /proc-Dateisystem eingerichtet, um ein (unbeabsichtigtes) Überschreiben der Basisstationskonfiguration durch eine beliebige Applikation des LINUX-Betriebssystems zu vermeiden. Vielmehr muss die für die Konfiguration der Basisstation zuständige Applikation über die Betriebssystemmethode *ioctl* (siehe z. B. [RC02]) einen sog. *IOControl*-Zugriff mit der Kapitel 4.7.3 entsprechenden Datenstruktur initiieren. Dieser Systemaufruf setzt spezifische Kenntnisse über den Funktionsumfang des USB-Treibers der Basisstation voraus und bleibt daher anderen (außenstehenden) Applikationen verborgen.

6.3.2 Treiberfunktionen

6.3.2.1 Registrierung und An-/Abmeldung des USB-Geräts

usb_micron_init und usb_micron_exit

Die applikationsgetriggerten Treiberfunktionen eines Gerätes sind dem Betriebssystem vor der erstmaligen Nutzung bekannt zu geben. Hierzu muss einerseits der Treiber geladen werden, zuvor allerdings muss die Zuordnung zwischen dem symbolischen Gerätenamen (Dateinamen) und der sog. *Majornumber* angelegt werden (siehe hierzu das nachfolgende Kapitel 6.3.3) – die Majornumber (für USB-Geräte ist dies i. d. R. die Majornumber 180) identifiziert den Treiber innerhalb des LINUX-Kernels. Während des Ladevorgangs wird die Treiber-Funktion *module_init* (im ROBOCOMM-Treiber *als usb_micron_init* bezeichnet) ausgeführt. Diese dient dazu, das zugehörige Gerät zu finden, das Unterverzeichnis *MiCRoN* im /proc-Dateisystem anzulegen und schließlich den Treiber im System zu registrieren.

In Analogie zur Funktion *module_init* meldet die Funktion *usb_micron_exit* den Treiber aus dem Betriebssystem ab und löscht wieder das Unterverzeichnis *MiCRoN* aus dem /proc-Dateisystem.

usb_micron_probe und usb_micron_disconnect

Wird die ROBOCOMM-Basisstation an einen LINUX-PC angeschlossen, so wird durch das USB-Subsystem des LINUX-Kernels die USB-Enumerationsphase angestoßen. Im USB-Treiber wird hierzu die Funktion *usb_micron_probe* aufgerufen. Diese richtet nach Auslesen der USB-Deskriptoren (Device-, Configuration-, Interface-, Endpoint- und String-Deskriptoren)

im /proc-Unterverzeichnis MiCRoN die symbolischen Block-Gerätedateien *usbMic-ron_XCV2001_0* und *usbMicron_XCV2001_1* entsprechend den vom USB-Gerät ROBO-COMM unterstützten USB-Functions ein.

	×xt	erm			
Γ	Aug	31 17:4	:08 amelinuxus	kernel:	usb 5-2: new high speed USB device using address 5
	Aug	31 17:4	:08 amelinuxus	kernel:	usb 5-2: Product: RoboComm
L	Aug	31 17:4	208 amelinuxus	o kernel:	usb 5-2: Manufacturer: FhG-IBMT
L	Aug	31 17:4	208 amelinuxus	kernel:	usb 5-2: SerialNumber: XCV2001
L	Aug	31 17:4	:08 amelinuxus	b kernel:	Probing for usbMicron device, interface 0 found.
L	Aug	31 17:4	:08 amelinuxus	b kernel:	Device Release: 01.06
L	Aug	31 17:4	:08 amelinuxus	b kernel:	Interface String (index): Iface 0 (5)
L	Aug	31 17:4	208 amelinuxus	b kernel:	scanning endpoints:
L	Aug	31 17:4	\$1:08 amelinuxus	b kernel:	0. endpoint: address 81, type 02
L	Aug	31 17:4	1:08 amelinuxus	o kernel:	1. endpoint: address 01, type 02
L	Aug	9 31 17 : 4	\$108 amelinuxus	o kernel:	2. endpoint: address 82, type 02
L	Aug	31 17:4	\$1:08 amelinuxus	o kernel:	3. endpoint: address 02, type 02
L	Aug	9 31 17 : 4	¦:08 amelinuxus	o kernel:	creating proc entry in directory /proc/MiCRoN
L	Aug	9 31 17 : 4	\$1:08 amelinuxus	o kernel:	/home/NierlichM/USB/USBLinux/Driver/usbMicron.c: USB MiCRoN device now attached to MiCRoN-192
L	Aug	31 17:4	¦:08 amelinuxus	o kernel:	Probing for usbMicron device, interface 1 found.
	Aus	9 31 17 : 4	¦:08 amelinuxus	o kernel:	Device Release: 01.06
	Aus	31 17:4	1:08 amelinuxus	o kernel:	Interface String (index): Iface 1 (6)
	Aus	31 17:4	:08 amelinuxus	b kernel:	scanning endpoints:
	- Aug	9 31 17 : 4	¦:08 amelinuxus	o kernel∶	0. endpoint: address 83, type 02
	Aus	31 17:4	:08 amelinuxus	o kernel:	1. endpoint: address 03, type 02
	- Aug	31 17:4	:08 amelinuxus	b kernel:	2. endpoint: address 84, type 02
	Aug	31 17:4	:08 amelinuxus	o kernel∶	3. endpoint: address 04, type 02
1	Ĥug	31 17:4	:08 amelinuxus	⊃ kernel:	creating proc entry in directory /proc/MiCRoN
	Aug	9 31 17 : 4	1:08 amelinuxus	o kernel:	/home/NierlichM/USB/USBLinux/Driver/usbMicron.c: USB MiCRoN device now attached to MiCRoN-193

Bild 6.10: Enumeration der ROBOCOMM-Basisstation als High-Speed-USB-Gerät: ROBOCOMM besitzt zwei USB-Interface (zwei unabhängige USB-Functions) mit je zwei IN- und zwei OUT-Endpoints.

Wie Bild 6.10 zu entnehmen ist, unterstützt ROBOCOMM in der gegenwärtigen Konfiguration zwei USB-Functions (Interface 0 und Interface 1) mit jeweils zwei IN- und zwei OUT-Endpoints. Für die Kommunikation zwischen den Mikrorobotern der Mikromanipulationsstation und dem zugehörigen Steuerungssystem wird lediglich das Interface 0 zur Umsetzung des in Kapitel 4.7 vorgestellten USB-Kommunikationsprotokolls benötigt. Interface 1 wird lediglich für Test- und Debugging-Aufgaben eingesetzt und steht daher einer weiteren USB-Function frei zur Verfügung.

Die Funktion *usb_micron_disconnect* stellt das zu *usb_micron_probe* analoge Pendant dar, um im Falle des Trennens der USB-Verbindung zwischen LINUX-PC und der ROBO-COMM-Basisstation die noch ausstehenden lesenden/schreibenden USB-Zugriffe abzuschließen, allokierte Speicherbereiche freizugeben und schließlich die entsprechenden Geräte-Dateien zu löschen.

6.3.2.2 Systemcalls

Über Systemaufrufe, die sog. *Systemcalls*, fordern Applikationen die Dienste des LINUX-Kernels an. Für die USB-Treiberentwicklung sind dies im Wesentlichen die Funktionen

static stru	\mathbf{ct}	file_operations micron_proc_fops =
.owner	=	THIS_MODULE,
.read	=	usb_micron_read,
.write	=	usb_micron_write,
.ioctl	=	usb_micron_ioctl,
.open	=	usb_micron_open,
.release	=	usb_micron_release,
);;		

Bild 6.11: Einbindung der ROBOCOMM-USB-Treiberfunktionen in das LINUX-Betriebssystem read, write, ioctl, open und close bzw. release, die den Zugriff auf die Dateien und Geräte koordinieren. Verwendet eine Applikation einen Systemcall, der eine Interaktion mit einem Gerät zur Folge hat, so wird durch den Betriebssystemkern im Treiber eine korrespondierende Funktion aufgerufen. Über die LINUX-spezifische

Struktur *file_operations* ist diese Funktion dem Betriebssystem zuvor mitzuteilen. Bild 6.11 zeigt die implementierten Treiberfunktionen für das USB-Gerät ROBOCOMM. Eine ausführliche Erläuterung zu Aufbau und Funktionsweise dieser sog. applikationsgetriggerten Treiberfunktionen findet sich in [QK04].

usb_micron_open

Bei Aufruf des Systemcalls *open* durch die Applikation – im Falle der Mikromanipulationsstation durch die Software des Robotersteuerungssystems – wird anhand des übergebenen Dateinamens vom Betriebssystem erkannt, welcher Treiber für den Gerätezugriff verantwortlich ist. Der Kernel legt Speicher für die Datenstruktur vom Typ *struct file* an, die, eine sog. Treiberinstanz repräsentierend, u. a. auch Angaben über die Art des Zugriffs (lesend/schreibend, blockierend/nicht-blockierend) enthält. Weiterhin ruft der Kernel die *open*-Treiberfunktion (hier die Funktion *usb_micron_open*) auf, und übergibt dieser die zuvor initialisierte Datenstruktur *struct file*. *Usb_micron_open* überprüft daraufhin, ob die Applikation auf das Gerät zugreifen darf oder nicht. Die Applikation erhält durch den Betriebssystemkern einen entsprechenden Rückgabewert als Ergebnis des *open*-Systemcalls zurück.

Für den Fall eines erfolgreichen Öffnens inkrementiert die Funktion *usb_micron_open* den Verwendungszähler des Gerätes, um zu verhindern, dass das Modul entladen wird, bevor die Datei wieder geschlossen ist (dedizierter Zugriffsschutz [RC02]). Weiterhin initialisiert die treiberspezifische *open*-Funktion das Gerät, wenn es das erste Mal geöffnet wird, zusätzlich werden die als *private_data* deklarierten Datenstrukturen allokiert und entsprechend befüllt.

usb_micron_read und usb_micron_write

Konnte das Gerät geöffnet werden, so kann die Applikation nachfolgend über den beim Öffnen zurückgegebenen Dateideskriptor (*filehandle*) mittels der Systemaufrufe *read* und *write* lesend bzw. schreibend auf das Gerät zugreifen. Entsprechend werden innerhalb des ROBOCOMM-Treibers die Funktionen *usb_micron_read* bzw. *usb_micron_write* ausgeführt: Diese sind derart programmiert, dass auch zusammengesetzte USB-Datenrahmen (USB-RxFrames bzw. USB-TxFrames entsprechend den Kapiteln 4.7.4.2 und 4.7.5.3), die eine für High-Speed-Bulk-Transfers spezifizierte Rahmengröße von 512 Datenbytes übersteigen können, zwischen der Applikation bzw. Treiberinstanz und der ROBOCOMM-Hardware transferiert werden können, ohne dass hierfür zusätzlicher programmiertechnischer Aufwand seitens der Applikationssoftware notwendig ist.

Für die Applikationssoftware gestaltet sich der ROBOCOMM-Treiber somit vollständig transparent. Datenpakete bis zu 4096 Bytes können ohne weitere programmiertechnische "Kniffe" zwischen ROBOCOMM-Hardware und Softwareanwendung ausgetauscht werden. Hierzu werden die von der Applikation übernommenen Parameter, d. h. die Adresse eines Speicherbereiches (Buffer) im sog. User-Space und die maximal zu lesende bzw. schreibende Byteanzahl, direkt an die Treiberfunktion übergeben. Der Treiber darf aufgrund der strikten Trennung zwischen User- und Kernel-Space nicht direkt auf den von der Applikation übergebenen Buffer zugreifen. Vielmehr sieht das LINUX-Speichermanagement für den Datentransfer zwischen User- und Kernel-Space u. a. die speziellen Funktionen copy_to_user und copy_from_user vor [RC02], [QK04].

usb_micron_ioctl

Zur Konfiguration der USB-Function wird der Systemcall *ioctl* mit Übergabe der Parameter Dateideskriptor, *IoControl*-Kommando und Zeiger auf die mit dem Kommando assoziierten Daten (User-Space) eingesetzt. *Usb_micron_ioctl* als korrespondierende Treiberfunktion dient insbesondere der Konfiguration und Statusüberwachung von ROBOCOMM. Hierzu werden lesender und schreibender Zugriff auf die Konfigurations-Endpoints des ROBO-COMM-USB-Interfaces im Treiber realisiert – für die Umsetzung des Konfigurationsprotokolls aus Kapitel 4.7.2 ist dies insbesondere der Endpoint EP1-OUT des Interfaces 0. Weiterhin dient *usb_micron_ioctl* dazu, einen sich im Fehlerfall einstellenden *HALT*-Zustand für die Bulk-Transfer-IN-Endpoints, die für die Datenübertragung von ROBOCOMM zurück zum LINUX-PC bzw. Steuerungssystem verantwortlich sind, wieder aufzuheben. Schließlich kann per *IoControl*-Kommando jederzeit für das USB-Gerät ROBOCOMM ein *USB-Reset* ausgelöst werden, um im Falle eines unvorhergesehenen Fehlerzustands die Basisstation in einen definierten Ausgangszustand zurückzuversetzen. Die Umsetzung der *ioctl*-Funktionalität orientiert sich an der typischen Strukturierung mittels Switch-Case-Anweisung [QK04].

usb_micron_release

Soll die Treiberinstanz von der Applikationssoftware durch Aufruf des Systemcalls *close* wieder geschlossen werden, so wird die Treiberfunktion *usb_micron_release* (vgl. Bild

6.11) angestoßen. Diese sorgt vor dem Schließen der Gerätedatei für eine vollständige, fehlerfreie Durchführung zuvor angestoßener Schreibzugriffe durch die Systemaufrufe *usb_micron_write* bzw. *usb_micron_ioctl*. Weiterhin dekrementiert die *release*-Funktion wieder den durch die *open*-Funktion vormals inkrementierten Verwendungszähler. Sämtliche Datenstrukturen werden deallokiert.

6.3.3 Auswählen und Laden des Treibers

Um den Vorgang der Auswahl, des Ladens und des Konfigurierens des Treibers für den normalen Nutzer transparent zu gestalten, stehen in LINUX insbesondere zwei Mechanismen zur Verfügung:

- Die sog. Modutils, vor allem das Programm modprobe, sorgen für die Treiberauswahl, wenn eine Applikation auf eine Hardware zugreift, deren Treiber noch nicht geladen ist.
- Wird eine neue Hardware an den PC angeschlossen und als solche auch vom Betriebssystem erkannt, dann sorgt HotPlug für die Auswahl des passenden Treibers.

Greift eine Applikation auf eine Hardware zu, deren Treiber bisher nicht in das Betriebssystem geladen ist, dann startet der Kernel auf Applikationsseite das Programm *modprobe*. *Modprobe* erhält daraufhin vom Kernel die Mitteilung, auf welches Gerät, d. h. auf welche *Majornumber* und auf welchen Gerätetyp (*Character-* oder Blockgerät – im Falle von ROBOCOMM letzteres) zugegriffen werden soll. Damit der zugehörige Treiber geladen und betriebsbereit wird, müssen Treiber, eventuelle Modulabhängigkeiten, mögliche Optionen und ggf. notwendige benutzerspezifische Programme zur Konfiguration bzw. zum normalen Betrieb des Gerätes bekannt sein [QK04]. *Modprobe* findet alle erforderlichen Informationen in der Datei *modprobe.conf* im Verzeichnis */etc*.

Für die Modulabhängigkeiten wird zusätzlich die Datei *modules.dep* innerhalb des Modulverzeichnisses */lib/modules/<Kernelversion>/* herangezogen, die mittels des Programms *depmod* erstellt wird: Für den USB-Treiber der ROBOCOMM-Basisstation, der als Kernel-Modul realisiert ist, ergibt sich daher die Notwendigkeit, dass im Anschluss an das Kompilieren der Treiberquelldatei nacheinander die Befehle *"depmod -a"* und *"modprobe usb-Micron"* auszuführen sind, um den USB-Treiber im Betriebssystem bekannt zu geben und gleichzeitig die *Majornumber* 180 an die symbolische Gerätedatei anzubinden.

Da sämtliche USB-Treiber der Majornumber 180 zugeordnet sind, sind weitere Kriterien für eine Unterscheidung des zum jeweiligen USB-Gerät zugehörigen Treibers zu berück-

MODULE_DEVICE_TABLE (usb, micron_table);

Bild 6.12: Identifikation des zugehörigen ROBO-COMM-Gerätetreibers über Product-ID und Vendor-ID sichtigen. Für die Basisstation ROBO-COMM sind dies die *Product-ID* und die *Vendor-ID* (Bild 6.12). Durch den Programmaufruf *depmod* –a werden dem Kernel sämtliche durch den Treiber verwaltbare Geräte mitgeteilt: Neben der Hardware-Identifikation, in diesem Falle des USB-Subsystems, wird zusätzlich die

Geräte-Identifikation über die Struktur *usb_device_id* (vgl. Bild 6.12) mit angegeben. Durch das Makro *MODULE_DEVICE_TABLE* wird die Geräteidentifikation derart vom Linker zum Treiber gebunden, dass sie von *depmod* ausgewertet werden kann [QK04].

Für das USB-Subsystem wird durch *depmod* unterhalb des Verzeichnisses */lib/modu-les/<Kernelversion>* die Datei *modules.usbmap* erzeugt, in der sich schließlich auch die für das USB-Gerät ROBOCOMM essentiellen Einträge für Product-ID und Vendor-ID wiederfinden. *Modules.usbmap* wird vom HotPlug-Mechanismus immer dann ausgewertet, sobald ein USB-Gerät als neues angeschlossenes Gerät vom USB-Subsystem identifiziert worden ist. Auf diese Weise wird auch für das USB-Gerät ROBOCOMM garantiert, dass im Sinne von Plug&Play der für ROBOCOMM zuständige Treiber in das LINUX-Betriebssystem eingebunden wird, sobald die Basisstation ROBOCOMM aktiv mit dem LINUX-PC verbunden wird.

7 Ergebnisse und ihre Diskussion

Nach Fertigstellung der Komponenten *IRC* und ROBOCOMM-Basisstation wurden diese umfassend getestet. Dieses Kapitel stellt die wesentlichen Testergebnisse vor. Die Komponenten wurden zunächst einzeln geprüft; daran anschließend wurde ihr Zusammenwirken untersucht. Abschließend wurde das Kommunikationssystem innerhalb einer auf flexiblen, mobilen Mikrorobotern basierenden Mikromanipulationsstation erprobt.

7.1 ASIC-Modul IRC

7.1.1 Testhardware und Testverfahren

Zur Verifikation des *IRCs* wurde der ASIC *MXS* zunächst in ein PLCC84-Gehäuse eingebunden. Unter Berücksichtigung dieser Gehäuseform wurde eine ASIC-Testplatine entwickelt, die auf das bereits aus den Kapitel 5.3 und 6.1 bekannte FPGA-Entwicklungsboard aufgesteckt werden kann. Sowohl der Schaltplan als auch die Bestückungspläne sind dem



Bild 7.1: Die auf das FPGA-Board aufgesteckte ASIC-Testplatine wird mit einem *MXS* im PLCC-Gehäuse bestückt.

Anhang A.4 zu entnehmen. Bild 7.1 zeigt die mit einem gehäusten *MXS* bestückte ASIC-Testplatine zur Verifikation des *IRC*.

Die Platine kann bis zu zwei MXS-ASICs aufnehmen, deren Konfigurationssignale über das FPGA-Board eingestellt werden. Zusätzlich können über Jumper u. a. die Art des Resetsignals und die Quelle des Taktsignals angegeben werden: Beim Reset kann zwischen einem externen, per Taster auslösbaren, asynchronen Reset oder dem Resetsignal des MXS-internen Power-On-Reset-Blocks ausgewählt werden. Als Taktgeber können entweder die direkt auf der Testplatine angebrachten 40 MHz-Quarzoszillatoren genutzt werden, oder aber es wird auf ein vom FPGA erzeugtes Taktsignal zurückgegriffen – das FPGA-Taktsignal kann auf eine von 40 MHz abweichende Frequenz eingestellt werden, um die IR-Kommunikation bei differierenden Lokaloszillatoren testen zu können.

Die Transceivermodule werden an die ASIC-Testplatine über die bereits für die Hardware der Basisstation vorgestellte Lösung mit IEEE1394-Stecker und passendem FireWire[™]-Kabel angeschlossen (vgl. Kapitel 6.1). Dies erlaubt nicht nur eine störungsarme Verbindung, sondern gestattet aufgrund der steckbaren Lösung das einfache Testen des *IRCs* mit den drei verschiedenen, spezifizierten Transceivermodultypen. Dank der Anbindung über zwei Av140-Bus-Konnektoren können nicht nur die Konfigurationssignale für jeden ASIC individuell eingestellt werden, zusätzlich erlaubt die Verbindung der digitalen ASIC-Ausgänge mit entsprechend als Eingänge konfigurierten Pins des Xilinx-FPGAs eine elegante Möglichkeit, Soll- und Istwerte bereits on-Board miteinander zu vergleichen.

Die Prüfung des in den *MXS* integrierten ASIC-Moduls *IRC* wurde in drei Teilbereiche gegliedert. In einem ersten Schritt wurde überprüft, ob der *IRC* ein angeschlossenes Transceivermodul richtig programmieren kann. Danach wurden die bidirektionale IR-Verbindung und die Umsetzung des spezifizierten IR-Kommunikationsprotokolls untersucht. Abschließend wurde das *Data Exchange Interface* für den Datenaustausch mit den Komponenten des *MXS* analysiert.

Zur Überprüfung der IR-Kommunikationsfähigkeit wurde neben der ASIC-Testplatine auch die Hardware der ROBOCOMM-Basisstation auf das FPGA-Board aufgesetzt, um über diese die für die Verifikation notwendigen *IRC*-Befehle versenden zu können. Wenn nicht anders aufgeführt, wurden sämtliche Versuche in einer durch Tageslicht und/oder Leuchtstofflampen illuminierten Umgebung durchgeführt, wobei insbesondere bei den Leuchtstofflampen ein Abstand von mindestens 2 m zu den Transceivermodulen eingehalten wurde. Die IR-Übertragungsdistanz zwischen Sende- und Empfangstransceivermodul betrug i. d. R. 50 cm, wobei jeweils die unterschiedlichen Richtcharakteristika für Transmitter und Receiver berücksichtigt wurden (vgl. Kapitel 3.4.7.1). Wenn nicht anders angegeben, war die Sendestrombegrenzung für die Transceivermodule TFDU6108 und TFDU8108 sowohl seitens der ASIC-Testplatine als auch seitens der Basisstation abgeschaltet.

7.1.2 Programmierung des Transceivermoduls

Mit Hilfe eines Mixed-Signal-Oszilloskops wurden die Verläufe der zwischen dem *IRC* (bzw. *MXS*) und dem Transceivermodul auszutauschenden Signale direkt am IEEE1394-Stecker



Bild 7.2: Messung der *IRC*-Steuersignale bei Programmierung eines Transceivermoduls per SITC

abgegriffen. Bild 7.2 zeigt die durch den *MXS* (*IRC*) korrekt ausgegebene Initialisierungsfolge, die für die über eine SITC-Schnittstelle verfügenden Transceivermodule TFDU8108 und TFDU6108 spezifiziert ist: Nach einem manuellen Reset beginnt die in drei Sektionen unterteilte Programmierfolge (gut erkennbar durch das blaue Signal *SCLKO*). Zunächst führt der *IRC* in (1) einen Reset des TFDUs durch, TxD (grünes Analogsignal bzw. blaues Signal TxDO) bleibt auf logisch-0. Anschließend wird in (2) das Register MAIN-CNTRL-0 des Transceivers programmiert (TxD bleibt nicht mehr konstant auf logisch-0). Dadurch wird das low-aktive Transceivermodul eingeschaltet, das Ausgangssignal

RxD (rotes Analogsignal bzw. orangefarbenes Digitalsignal) geht auf HIGH-Pegel. Abschließend wird in (3) das Register MAIN-CNTRL-1 des TFDUs auf SIR-Modus eingestellt, RxD bleibt auf HIGH-Pegel.

Neben der korrekten Umsetzung der SITC-Schnittstelle wurde auch die vergleichsweise einfachere Konfigurationsprozedur für ein Transceivermodul vom Typ TFDU6102 bestätigt.

Problematisch gestaltete sich der Einsatz des im *MXS* integrierten Power-On-Resets: Bei gleichzeitigem Einschalten der Versorgungsspannungen für *MXS* und Transceivermodul wird die TFDU-Initialisierungsroutine durch den *IRC* schon zu einem Zeitpunkt ausgeführt, zu dem die Programmierschnittstelle des Transceivermoduls noch nicht über eine stabile Spannungsversorgung verfügt und daher nicht wie gewünscht die Programmierung der TFDU-internen Register zulässt. Dies hat zur Folge, dass unter den gegebenen Umständen

für den MiCRoN-Roboter vom Einsatz des Moduls TFDU8108 abgesehen werden muss, da dieses Modul eine korrekte Programmierung, insbesondere aber die explizite Aktivierung der Empfangselektronik, zu Beginn erfordert, diese aber nicht fehlerfrei durchgeführt würde. Glücklicherweise kann, um nicht auf die fernsteuerbare Sendestrombegrenzung verzichten zu müssen, auf das Modul TFDU6108 zurückgegriffen werden, da dieses Modul nach Anschalten der Spannungsversorgung automatisch im SIR-Modus empfangsbereit ist und daher auf die TFDU-Initialisierung verzichten kann. Um dennoch sicher sein zu können, dass die verzögerte Versorgungsspannungsstabilisierung keine Fehlprogrammierung durch die vom *IRC* automatisch ausgeführte Initialisierungsroutine verursacht, kann mit Hilfe des *IRC*-Befehls *set_ir_mode* die erneute TFDU-Initialisierung aus der Ferne (vom Host-PC) ausgelöst werden.

Für das Modul TFDU6102 existieren diese Schwierigkeiten nicht, da dieses nicht über eine SITC-Schnittstelle verfügt und daher "einfacher" zu konfigurieren ist – allerdings geht dies zu Lasten des Energiebedarfs beim Aussenden von IR-Pulsen.

7.1.3 IR-Kommunikation

Sämtliche IR-Modi und *IRC*-Spezialfunktionen wurden mit Hilfe des *IRC*-Befehls *get_echo* (vgl. Tabelle 4.4, Kapitel 4.6.2.2) getestet. Die über den Echo-Befehl zurückzusendenden Nutzbytes wurden mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators (PRNG, *PseudoRandom Number Generator*) erzeugt. Die Anzahl der jeweils zu sendenden Bytes wurde ebenfalls mittels Zufallsgenerators variiert, beginnend mit nur einem Echo-Byte bis hin zur maximal zulässigen Byteanzahl, die einerseits durch die *IRC*-FIFO-Tiefe von 128 Bytes und andererseits durch die vom IR-Modus abhängige CRC-Summe begrenzt ist.

7.1.3.1 IR-Modi

Zunächst wurde der SIR-Modus mit einer Übertragungsrate von 115,2 kbit/s getestet, da der IRC diese Konfiguration standardmäßig nach einem Reset einstellt. Als Roboter-ID



Bild 7.3: Reaktion des *IRC* auf die Instruktion *get_echo* im SIR-Modus bei 115,2 kbit/s

wurde die jeweils nach einem Reset eingestellte Broadcast-ID 0xFFFF gewählt. Bild 7.3 zeigt die Reaktion des *IRCs* auf einen Echo-Befehl: Die von der Basisstation gesendete IR-Pulsfolge (grüner Signalverlauf) wird von dem an den *IRC* (bzw. *MXS*) angeschlossenen Transceivermodul empfangen; der low-aktive RxD-Ausgang des Transceivermoduls ist als gelbes Analog- bzw. rotfarbenes Digitalsignal erkennbar. Der *IRC* antwortet mit einer Verzögerung von nur ca. 40 µs auf die Echo-Instruktion. Die von ihm über TxD ausgegebene IR-Pulsfolge (blauer Signalverlauf) löst zu Beginn der Rückübertragung noch

einige Spikes am RxD-Ausgang des *IRC*-Transceivermoduls aus – das RxD-Signal zeigt im mittleren rechten Bereich einen kurzen low-aktiven Puls: Dieser Spike ist hierbei nicht durch Übersprechen verursacht, sondern wird am Transceivermodulausgang RxD ausgegeben, bevor die sowohl in TFDU6108 als auch TFDU8108 integrierte Echo-Unterdrückung die als Echo empfangenen IR-Pulse ausblendet.

Mit Hilfe des *IRC*-Befehls *set_ir_mode* wurden sämtliche, für den SIR-Modus spezifizierten Baudraten nacheinander eingestellt und jeweils mit dem Echo-Befehl anstandslos bestätigt. Für die Prüfung des SIRpMiCRoN-Modus' wurde der *IRC*-Befehl *set_ir_mode* zusätzlich um die Instruktion *set_framesize* ergänzt, um die Datenpaketlänge gemäß den Überlegungen aus Kapitel 4.6.2.2 auf 15 Bytes zu begrenzen: Sämtliche Baudraten wurden vom *IRC* in diesem Übertragungsmodus fehlerfrei behandelt.

Auch für die synchronen Übertragungsmodi MIR und FIR konnte die korrekte Funktionalität des *IRCs* belegt werden, die durch den *IRC* auszuführende Programmierseguenz für



Bild 7.4: Antwort des IRCs im FIR-Modus

IRC auszuführende Programmiersequenz für die Transceivermodule wurde am IE-EE1394-Stecker mit dem Oszilloskop erfolgreich beobachtet. Eine Analyse der Puls- bzw. Chiplängen des *IRC*-Echos bestätigte die spezifizierten Bruttodatenraten von 576 kbit/s, 1,152 Mbit/s und 4 Mbit/s. Bild 7.4 zeigt einen Ausschnitt der IRC-Antwort nach Übertragung eines Echo-Befehls im FIR-Modus. Mit Hilfe des Mixed-Signal Oszilloskops wurde die vom *IRC* elektrisch modulierte FIR-Chipfolge sowohl per Analogtastkopf (grünes Signal) als auch direkt als 3,3 V Digitalsignal (blaufarbenes Signal IrTx) am Transceivermodul des *IRC*s abge-

griffen. Die übrigen Signale zeigen den Empfang der FIR-Chipfolge sowohl vor der Verarbeitung durch die in der Basisstation integrierte Echo-Unterdrückung (gelbes Analog- und blaufarbenes Digitalsignal IrRX) als auch nach Durchlaufen der Unterdrückungslogik (rotes Signal RxEcho) – mehr dazu in Kapitel 7.2.1.

7.1.3.2 IRC-Spezialfunktionen

Nach einem *IRC*-Reset wurde die jeweils zu untersuchende *IRC*-Spezialfunktion über den *IRC*-Befehl *set_rxtx_params* im *IRC* aktiviert. Im Anschluss daran wurde die Reaktion des *IRC* mittels Echo-Instruktion (in Analogie zu Bild 7.3) jeweils analysiert.

Die Handhabung der MIR-Präambel durch den *IRC* wurde als vollständig und korrekt bewertet: Von der Basisstation gesendete MIR-Datenpakete mit vorangestellter Präambel empfing der *IRC* fehlerfrei, weiterhin konnte die MIR-Präambel für vom *IRC* ausgesendete MIR-Pulsfolgen jederzeit per *IRC*-Befehl *set_rxtx_params* zugeschaltet werden. Die Vorteile der Präambel waren jedoch nur für einen recht kleinen Wirkungsbereich von wenigen Zentimetern messbar, innerhalb dessen im normalen MIR-Modus keine vollständige IR-Übertragung mehr möglich war, wohingegen mit Präambel die Kommunikation noch fehlerfrei funktionierte – hier limitiert die untere Grenze der Transceivermodulempfindlichkeit doch erheblich die positiven Effekte der MIR-Präambel.

Bei Aktivierung der FIR-Kurzpulsoption konnte die sonst bei 50 cm Distanz schon bereits teilweise fehlerbehaftete FIR-Übertragung – Datenpakete wurden in diesen Fällen nicht vom *IRC* zurückgesendet – noch bis zu einer Distanz von 85–100 cm (abhängig von der Anzahl der Nutzbytes) ohne Fehler durchgeführt werden – bei einer Distanz von 50 cm konnte mit aktivierter Kurzpulsoption trotz 200facher wiederholter Übertragung von jeweils 100 MByte-Nutzdaten überhaupt keine Bitfehlerrate ermittelt werden. Eine sehr exakte Ausrichtung von sender- und empfangsseitigem Transceivermodul vorausgesetzt, konnten Distanzen von über 2,5 m fehlerfrei im FIR-Modus überbrückt werden; noch größere Distanzen ließen sich mit dieser Versuchsanordnung leider nicht mehr realisieren, da dann die begrenzte Treiberleistung des TFDU-Ausgangs RxD in Verbindung mit den dann notwendigen FireWire[™]-Kabellängen das Verhalten der IR-Kommunikation maßgeblich verschlechterten – hier könnte Abhilfe geschaffen werden durch einen Treiberbaustein (Logikbuffer), der direkt auf den IR-Analog-Frontends der Basisstation integriert würde.

Die für SIR- und MIR-Unwrapper implementierten digitalen Phasenregelkreise (DLLs) wurden ebenfalls per *IRC*-Befehl zu- oder abgeschaltet. Im SIR-Modus wurden sowohl mit als auch ohne SIR-DLL die per Echo-Befehl übermittelten Nutzdaten fehlerfrei zurückgesendet. Dabei war festzustellen, dass bei stark reduzierter Sendeleistung der basisstationsseitigen Transceivermodule mit der eingeschalteten SIR-DLL mehr Datenpakete vom *IRC*

zurückgesendet wurden, als ohne SIR-DLL möglich war: Dies ist auf die in Kapitel 4.6.2.1 angesprochene Schwellenwertproblematik zurückzuführen: Bei harter Detektion, trotz der TFDU-Pulsformung und des Schmitt-Triggereingangs für das *IRC*-Eingangssignal *IR rxd* (vgl. Kapitel 5.4.2.2), können die von TFDU empfangenen (schwachen) IR-Pulse nur als stark verkürzte elektrische Pulse vom *IRC* detektiert werden. Weiterhin lieferte die SIR-DLL auch gute Ergebnisse bei voneinander abweichenden Lokaloszillatoren: Selbst nachdem der *IRC* durch einen vom FPGA ausgegebenen Takt versorgt wurde, der mit bis zu 5% von der 40 MHz-Nenntaktfrequenz abwich, konnte der *IRC* Datenpakete fehlerfrei empfangen und wieder zurücksenden – allerdings waren bei den höheren SIR-Übertragungsraten (38,4 kbit/s, 57,6 kbit/s und 115,2 kbit/s) zunächst mehrere Datenpakete unbeantwortet geblieben, da die DLL entsprechend Kapitel 5.2.4.4 erst noch die Grenzen für das Detektionsfenster neu "erlernen" und anpassen musste.

Die positiven Ergebnisse der SIR-DLL konnten leider nicht für die MIR-DLL des *IRCs* bestätigt werden. Ursächlich hierfür ist ein Hardwarefehler in der MIR-DLL bzgl. der Neuberechnung des Detektionsfensters, der jedoch nur für ganz spezielle Bytekonstellationen bei Datenpaketen mit ungerader Anzahl von Nutzbytes auftritt. Da während der *IRC*-Designverifikation mittels FPGA-Board (vgl. Kapitel 5.3) leider noch nicht auf einen vollautomatischen Zufallszahlengenerator zur Erzeugung der Datenpakete zurückgegriffen wurde, blieb dieser Fehler vor dem *MXS*-Tape-Out unentdeckt. Im Nachhinein konnte diese Fehlfunktion jedoch auch innerhalb der VHDL-Testbenchumgebung reproduziert und analysiert werden. Durch Modifikation zweier Konstanten im VHDL-Package IRDA_PHYS_LAYER wurde der Fehler schließlich behoben – dies konnte mit Hilfe der im Selbsttestmodus betriebenen ROBOCOMM-Basisstation verifiziert werden.

7.1.3.3 IRC-Befehle und fernsteuerbare Sendestrombegrenzung

Abschließend wurden die noch ausbleibenden *IRC*-Befehle auf ihre korrekte Umsetzung hin geprüft. Nach einem Reset des *IRC*s wurde seine Roboter-ID über *set_robotid* auf eine andere Adresse umprogrammiert und danach mit dieser neuen Roboter-ID die Echo-Instruktion fehlerfrei ausgeführt. Auf die Instruktion *get_status* reagiert der *IRC* wie spezifiziert und sendet die Statusinformationen gemäß der in Bild 4.22 angegebenen Struktur zurück. Nicht nur die nach einem *IRC*-Reset standardmäßig eingestellten Parameter wurden richtig zurückgegeben; auch veränderte *IRC*-Einstellungen, z. B. nach IR-Modusumschaltung durch *set_ir_mode* oder nach Sende- und Empfangsparametermodifikationen über die Instruktion *set_rxtx_params*, wurden entsprechend den dann eingestellten Werten richtig per *get_status*-Befehl vom *IRC* ausgegeben.

Zur Prüfung der *read_tfdu*-Instruktion wurde der *IRC* zunächst auf den IR-Modus MIR umgeschaltet, um den *IRC* zur Rekonfiguration des Transceivermoduls, d. h. zur Aktivierung der Pulsformung für den MIR-Modus zu veranlassen. Danach wurde über *read_tfdu* auf das TFDU-Register MAIN-CNTRL-1 zurückgegriffen: Der *IRC* sendete den Registerinhalt 0x02, entsprechend [Vis03c] bzw. [Vis03d] den MIR-Modus symbolisierend, an die Basisstation zurück. Zusätzlich wurde auch der Inhalt des TFDU-Registers MAIN-CNTRL-2 durch den *IRC* ordnungsgemäß wiedergegeben, sowohl vor als auch nach einer programmierten Sendestrombegrenzung.

Für die Verifikation der *write_tfdu*-Instruktion, die in Verbindung mit dem TFDU-Register MAIN-CNTRL-2 (siehe hierzu [Vis03c] bzw. [Vis03d]) für die ferngesteuerte Einstellung des Transceivermodulsendestroms durch die USB-Client-Software bzw. Steuerungseinheit vorgesehen ist, wurden zwei Verfahren unabhängig voneinander durchgeführt. In einem ersten Testverfahren wurde per *write_tfdu*-Instruktion der Wert 0x01 in das TFDU-Register MAIN-CNTRL-2 geschrieben. Im Anschluss daran wurde die Distanz zwischen den Transceivermodulen von Basisstation und *IRC* auf 20 cm reduziert und per *read_tfdu*-Instruktion wieder korrekt ausgelesen. In einem zweiten Testdurchlauf wurde der Abstand zwischen den beiden Transceivermodulen zunächst auf 100 cm erhöht und ein Echo-Befehl unmittelbar nach einem *IRC*-Reset abgesetzt: Das durch *IRC* zurückgesandte Echo wurde fehler-

frei durch die Basisstation empfangen. Nach Beschreibung des TFDU-Registers MAIN-CNTRL-2 mit dem Wert 0x01 wurde die Echo-Instruktion erneut ausgeführt: Aufgrund des reduzierten TFDU-Sendestroms konnte bei einer Distanz von 100 cm keine vollständige IRC-Rückantwort durch die Basisstation empfangen werden, allerdings konnte ein erneut ausgeführter Echo-Befehl nach Reduktion der Distanz auf 20 cm wieder fehlerfrei vom IRC empfangen werden. Diese Ergebnisse lassen zwei Schlüsse zu: zum einen, dass der IRC-Befehl write_tfdu korrekt umgesetzt wird, zum anderen, dass die fernsteuerbare Sendestrombegrenzung funktioniert.

Data Exchange Interface 7.1.4

Über die IRC-Befehle write DMA und read DMA tritt der IRC in Interaktion mit den MXS-Schaltungskomponenten CLOCKGEN, WAVEGEN und ACTUATOR, einerseits zur Erzeugung der von den Roboteraktoren benötigten Ansteuersignale, anderseits zum Auslesen von Roboterstatus und Messwerten. Die für die Aktorsignale notwendigen Parameter wurden per write DMA-Instruktion an den IRC übermittelt: Für den MXS sind dies die Signalform (sägezahn-, trapez- oder dreiecksförmig), die Amplitude (mit einer Auflösung von 10 Bit), die Anzahl der Samples pro Periode (9 Bit), die Samplingfrequenz und schließlich die Phasenlage der einzelnen Ausgangssignale zueinander (0°, 90°, 180° und 270°).

In Bild 7.5 ist die Aktivierung des Digital-/Analogwandlers DAC1 per IR-Kommunikation dargestellt. Der gelbe Signalverlauf entspricht der aus mehreren IR-Datenpaketen zusammengesetzten Programmiersequenz (das gelbfarbene Analogsignal wurde am TxD-Pin des sendenden Transceivermoduls abgegriffen): Nach Einstellen einer Roboter-ID und Deaktivieren des nach einem Reset automatisch eingestellten Testmodus mit Hilfe des IRC-



Bild 7.5: Nach Übermittlung mehrerer IR-Datenpakete wird ein trapezförmiges Ausgangssignal an einem D/A-Wandler des MXS generiert.





Bild 7.6: Ausschnittsvergrößerung des in Bild 7.5 Bild 7.7: Der MXS erzeugt nach mehreren writedargestellten trapezförmigen Ausgangssignals (Frequenz: etwa 600 Hz, V_{min} = 1 V, V_{max} = 2,4 V). 90° phasenverschobene trapezförmige Signale



DMA-Befehlen über DAC1 und DAC2 zwei um

schnittsvergrößerung des DAC1-Aktorsignals. In Bild 7.7 ist zusätzlich zum Analogausgang DAC1 das Ausgangssignal eines zweiten D/A-Wandlers (DAC2) gelbfarben abgebildet. DAC2 gibt ebenfalls ein trapezförmiges, allerdings zu DAC1 um 90° phasenverschobenes Signal aus – mittels dieser beiden Signale lässt sich beispielsweise, nach entsprechender Verstärkung durch den ASIC *PAA*, der in Bild 4.9 (Kapitel 4.1.3) dargestellte Roboterarm des MiCRoN-Roboters rotieren [MiC05].

Für *read_DMA* wurde an den A/D-Wandlereingang des *MXS* ein Netzgerät angeschlossen, dessen Ausgangsspannung zwischen 1 V und 2,4 V variiert wurde. Nach Programmierung der für die Messung benötigten *MXS*-internen Register mit Hilfe der *write_DMA*-Instruktion wurde über *read_DMA* zunächst der Inhalt der programmierten *MXS*-Register abgefragt. Die Analyse der von *IRC* daraufhin zurückgesendeten Datenpakete bestätigte die Programmierung dieser Register. Im Anschluss daran wurde am Netzgerät jeweils ein Spannungswert eingestellt und daraufhin per *read_DMA*-Instruktion ein Messwert angefordert: Der vom *IRC* daraufhin zurückgesendete 10-bit-Wert konnte dem eingestellten Spannungswert jeweils zweifelsfrei zugeordnet werden.

Bild 7.6 und Bild 7.7 bekräftigen die korrekte Umsetzung des *Data Exchange Interfaces* für den Downstream, d. h. den Datentransfer von per IR-Kommunikation empfangenen Signalformparametern an die oben benannten *MXS*-Komponenten, die für die Erzeugung und Ausgabe der Aktoransteuersignale benötigt werden. Da auch die umgekehrte Datenflussrichtung (Upstream) zum Auslesen von Messwerten oder Roboterstatus fehlerfrei funktioniert, lässt dies den Schluss zu, dass das für den *IRC* spezifizierte *Data Exchange Interface* vollständig und korrekt realisiert wurde.

7.2 Basisstation RoboComm

7.2.1 IR-Kommunikation

Wie in Kapitel 7.1.1 erläutert, wurde die Hardware der Basisstation bereits für die Prüfung der IR-Kommunikation mit dem ASIC-Modul *IRC* erfolgreich eingesetzt. Sowohl die verschiedenen **IR-Modi** als auch die *IRC-Spezialfunktionen* wurden von der Basisstation vollständig unterstützt. Die beim *IRC* noch fehlerhafte MIR-DLL wurde nach Analyse und Identifikation der Fehlerursache für die Basisstation in der korrigierten Version eingesetzt und in ihrer Funktionsfähigkeit mit Hilfe der Echo-Instruktion bestätigt.

Die für die Basisstation spezifizierte **Empfangsdatenanalyse** wurde ebenfalls während der *IRC*-Prüfung mitgetestet. Auf fehlerhafte Roboter-IDs und ausbleibende *IRC*-Reaktionen (Timeout) hin wurden Fehlermeldungen entsprechend Kapitel 4.7.5.2 erzeugt, auch auf abweichende CRC-Summen (für die Basisstation kann per *IoControl*-Schreibzugriff über EP1 die fehlerhafte Berechnung der CRC explizit eingeschaltet werden) reagierte die Basisstation mit der passenden Fehlermeldung.

Für den Test des **Multiempfängerbetrieb**s wurden die vier Transceivermodule der Basisstation parallel übereinander angeordnet und in Richtung des *MXS*-Transceivermoduls ausgerichtet. Zwischen *MXS*-Transceivermodul und den TFDUs der Basisstation wurde ein Abstand von 50 cm gewählt. Über das Modul TFDU0 wurden Echo-Datenpakete versendet. Im Anschluss an den Empfang der *IRC*-Rückantwort wurde das ROBOCOMM-Antwortpaket ausgewertet, genauer die Kontrollbytes: diese geben die für den Empfang verantwortliche Empfangseinheit (bestehend aus Transceivermodul und IR-RX-Unit) an. In einer ersten Versuchsreihe wurde die Funktion der einzelnen Empfangseinheiten durch gezieltes Abdecken eines oder mehrerer Module nachgewiesen. In einer weiteren Testreihe wurden die Transceivermodule der Basisstation in unterschiedlichen Abständen zum *MXS*-Transceivermodul angeordnet, die *IRC*-Anworten wurden dann jeweils von der nächstgelegenen Empfangseinheit empfangen. Einzige Auffälligkeit: Wenn TFDU0 das zu *MXS* nächstgelegene Transceivermodul war, wurde die *IRC*-Antwort dennoch nicht immer durch die Empfangseinheit 0 empfangen, sondern z. T. durch die nächst weiter entfernt gelegene Empfangseinheit. Ursache hierfür ist die in die Module TFDU6108 und TFDU8108 integrierte Echo-Unterdrückung: Diese verhindert gelegentlich den fehlerfreien Empfang der *IRC*-Antwort, wenn die Elektronik des sendenden Transceivermoduls zur Deaktivierung der eigenen Echo-Unterdrückung mehr Zeit beansprucht, als der *IRC* aufgrund seiner kurzen Turnaround Time von ca. 40 µs als Reaktionszeit bis zum Aussenden der IR-Antwort benötigt. Beim TFDU6102 besteht diese Problematik nicht, da dieses Transceivermodul über keine integrierte Schaltungstechnik zur Echo-Unterdrückung verfügt: sämtliche ausgesendete IR-Pulse werden auch durch TFDU6102 wieder empfangen.

Bild 7.8 lässt die **synchrone Übertragung** von sieben Echo-Paketen im FIR-Modus mit einem Zeitabstand von jeweils 1 ms erkennen. Das gelbe Signal zeigt den IR-Downlink von



Bild 7.8: Die Basisstation initiiert synchrone FIR-Übertragungen mit einer 1-ms-Periode.

der Basisstation an *IRC*, ausgesendet über TFDU0. Der IR-Uplink vom *IRC* zurück zur Basisstation wird über TFDU3 empfangen (grünfarbener Signalverlauf). Das rote Signal zeigt das durch das FPGA digitalisierte TFDU3-Empfangssignal nach Durchlaufen der im Block MUXCNTRL integrierten Logikschaltung zur Echo-Unterdrückung (vgl. Bild 6.9) – Näheres dazu findet sich in den Erläuterungen zum nachfolgenden Bild 7.9. Das blaue Digitalsignal *FrmRdy* zeigt mit einer logisch-1 jeweils den Empfang des vom *IRC* zurückgesendeten Echo-Datenpakets an. Der weiße 8-bit-Bus zeigt die über das

OCDS (vgl. Bild 6.6 in Kapitel 6.2.1) ausgegebenen Zustände der IRDA_DATA_CNTRL-FSM: "01" entspricht dem Idle-Zustand, "08" zeigt das Warten auf den Überlauf des Synchronisations-Zählers an. Das blaue Signal *IspIRQ* lässt nur einen vom ISP1581 ausgegebenen Interrupt vor Beginn der ersten IR-Übertragung erkennen, d. h. es wurde ein aus mehreren ROBOCOMM-Frames bestehender USB-TxFrame vom Host an die Basisstation übertragen.

In Bild 7.9 ist eine Ausschnittvergrößerung von Bild 7.8 mit einer der im FIR-Modus initiierten Echo-Sequenzen abgebildet. Wie zuvor bereits für Bild 7.8 erläutert, zeigt das gelbe



Bild 7.9: Die Basisstation sendet ein IR-Datenpaket mit aktivierter Echo-Unterdrückung.

Analogsignal eine über TFDU0 gesendete FIR-Pulsfolge. Über TFDU3 der Basisstation wird (in grün dargestellt) zunächst diese ausgesendete IR-Pulsfolge und anschließend die *IRC*-Rückantwort auf den Echo-Befehl empfangen. Die im Modul MUXCNTRL (vgl. Bild 6.9) aktivierte **Echo-Unterdrückung** blendet die von der Basisstation gesendete Pulsfolge vollständig aus: Das rote Digitalsignal zeigt während des Sendens (gelbes Signal ist nicht konstant LOW) einen konstanten HIGH-Pegel an. Die Rückantwort des *IRC*s (gelbes Signal ist konstant LOW) wird dagegen unverändert empfangen und an die zu-

gehörige IR-RX-Unit weitergereicht – das rotfarben dargestellte, digitalisierte TFDU3-Empfangssignal wurde für diese Messung, nach Durchlaufen der im FPGA integrierten Echo-Unterdrückungslogik, wieder an einem Pin des FPGA-Boards ausgegeben.

7.2.2 USB2.0-Kommunikation

Bereits in Kapitel 6.3.2.1 wurde mit Bild 6.10 die erfolgreiche und vollständige Enumeration der USB-Basisstation ROBOCOMM belegt: Die physikalisch an USB angeschlossene Basisstation wurde erfolgreich mit dem für das LINUX-Betriebssystem entwickelten USB-Treiber verknüpft; die zwei USB-Geräte (USB-Interfaces) *usbMicron_XCV2001_0* und *usbMicron_XCV2001_1* wurden im /proc-Dateisystem eingerichtet. Da die USB-Basisstation während dieser Enumerationsphase verschiedene Standard-Device-Requests verarbeiten musste, ist der Schluss zulässig, dass die Konzeption des FPGA-Designs, insbesondere der modulare Aufbau des USB-BASISINTERFACES (vgl. Kapitel 6.2.1) zur Realisierung der USB2.0-Grundfunktionalität, richtig umgesetzt wurde. Die Komponenten IRQ CONTROL, FIRMWARE CONTROL, UBUS CONTROL und EPO CONTROL teilen sich ihre Aufgaben in Kooperation und interagieren über das ISP INTERFACE jeweils mit dem USB2.0-Controller ISP1581.

Für alle zuvor vorgestellten Testreihen, sowohl den *IRC* als auch die Basisstation betreffend, wurden die notwendigen IR-Datenpakete und Basisstationskonfigurationen erfolgreich per USB von einem LINUX-PC an die USB-Basisstation übermittelt. Dies belegt, dass, zusätzlich zur Realisierung der USB2.0-Grundfunktionalität, auch das Zusammenspiel zwischen dem USB-BASISINTERFACE, dem Bindeglied EP17 CONTROL und der eigentlichen USB-Applikation funktioniert. Weiterhin werden erfolgreich Datenpakete über die Stream-Pipes zwischen der USB-Applikation (USB-Interface mit EP1 und EP2) und dem ROBOCOMM-Treiber transferiert.

Aufgrund dieser positiven Ergebnisse soll in den nachfolgenden Ausführungen weniger auf die korrekte Umsetzung der USB-Schnittstelle an sich, als vielmehr auf das Verhalten der USB-Basisstation ROBOCOMM und die Auswirkungen auf den IR-Kommunikationskanal eingegangen werden, wenn die USB-Client-Software über den ROBOCOMM-Treiber Datentransfers initiiert.

7.2.2.1 USB Client Testsoftware

Seitens des Hosts wurden für Tests zur Charakterisierung des IR-Kommunikationsverhaltens zwei verschiedene Strategien verfolgt. Zum einen wurden textbasierte Skripte in einer LINUX-Konsole ausgeführt, zum anderen wurde im Sinne einer komfortableren Testdurchführung eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) realisiert.

Für die Ausführung der Testskripte wurde das Programm *SendlR* in der Programmiersprache C entwickelt. *SendlR* arbeitet die Skripte zeilenweise ab und initiiert über die Systemcalls *read*, *write* und *ioctl* die notwendigen Zugriffe auf das gewünschte USB-Gerät, im Falle der Basisstation auf das USB-Gerät *usbMicron_XCV2001_0*. Die Gerätezugriffe erzwingen ihrerseits die Ausführung der entsprechenden ROBOCOMM-Treiberfunktionen. In Anhang A.6 ist ein Testskript beispielhaft aufgeführt: Zu Beginn wird das USB-Gerät geöffnet, hiernach folgt mit "wi" ein *ioctl*-Schreibzugriff, der für die Basisstation per *Io-Control*-Datentransfer (über EP1) IR-Synchronübertragungen mit einer Periode von 1 ms einstellt. Die Bedeutung der einzelnen an "wi" angefügten Hexadezimalwerte erschließt sich leicht mit Hilfe von Anhang A.3. Im Anschluss an die Konfiguration der Basisstation werden im Beispielskript des Anhangs A.6 ausschließlich Schreib- und Lesezugriffe durchgeführt, die über den ROBOCOMM-Treiber die Ausführung entsprechender OUT- bzw. IN-Transfers erzwingen.

Die Erstellung der Testskripte stellte sich jedoch als recht aufwändig heraus: insbesondere erwies sich die Ermittlung der korrekten Rahmenlänge für die USB-TxFrames bei zusammengesetzten ROBOCOMM-Frames als recht fehleranfällig. Daher wurde mittels GNU-C++-Compiler, Qt 3.3.4 (C++ Toolkit for multiplatform GUI & application development) und den Softwareentwicklungswerkzeugen KDevelop 3.2.1 und QtDesigner 3.3.4 eine Graphische Testoberfläche für GENTOO-LINUX (2.6.12 Release 10) entwickelt. Diese GUI bietet ein komfortabel per Mausklick bedienbares Benutzerinterface, um die Konfiguration der Basisstation jederzeit einstellen und verändern zu können (Bild 7.10). Weiterhin genügt es nun vollkommen, nur die Datenbytes des ROBOCOMM-Frames, d. h. die an die Ba-

• MicronGUI – Ø 🕱	MicronGUI	- 6 X
Eile Help	Eile Help	
Konfiguration Transfer Framefehler-Analyse	Konfiguration Transfer Framefehler-Analyse	
IR Mode Control IR Mode Control IMMa BaudRate SIR Line Control #Stopbits 1 #Stopbits 1 #DataBits 6 ParityEnable ParityEnable IR Tx/Rx Unit Control Enable LimitDil FrameSize 0xFF Enable LimitDil FIR ShortPulses TDFU Conf TOFU 2 TDFU 0 TDFUx108 7 TDFU 1 TDFUx108 7 TDFU 1 TDFUx108 7 IR-USB Device Configuration Isochrack SyncReset RgTxEnable IoCtrlAck MultITdfuRx EnableSynchTransfer EnableTxEchoReject Delay After IR-Rx IR Tx Synchron Timer 0x12 IR Rx Timeout Ix4000 IR Tx Echo Rejection IR Rx Timeout Ix4000	Improve Improve Improve I	



Bild 7.11: Kontrolle des Nutzdatentransfers zwischen der Basisstation und dem *IRC* bzw. *MXS*

sisstation zu übersendenden Nutzdaten, anzugeben (Bild 7.11). Die Oberfläche generiert daraus automatisch die entsprechenden USB-TxFrames gemäß Kapitel 4.7.4 – es werden sowohl einzelne als auch verkettete ROBOCOMM-Frames unterstützt. Die linke Spalte in Bild 7.11 gibt sowohl Reihenfolge als auch Art der während des Testdurchlaufs auszuführenden USB-Transaktionen vor: *Write* erzeugt einen OUT-Transfer, *Collect* initiiert die Vorbereitung der ROBOCOMM-Antwortpakete, und *Read* liest diese letztendlich per IN-Transfer aus. Jedem Eintrag auf der linken Seite wird jeweils ein eigenes Textfenster auf der rechten Seite zugeordnet. Wird linksseitig ein "write"-Eintrag angeklickt, so können im rechten Teil des Fensters die an die Basisstation zu übermittelnden ROBOCOMM-Frames angegeben werden. Wird linksseitig "read" angeklickt, so zeigt der rechte Fensterbereich nach der Testdurchführung die zum jeweiligen Zeitpunkt von der Basisstation erhaltenen *ROBO-COMM-* Antwortpakete an.

7.2.2.2 USB-Kommunikation ohne verkettete Datenpakete

In Bild 7.12 ist die einfachste Art der USB-Kommunikation zwischen dem Host-PC und der Basisstation bzw. dem *IRC* dargestellt: Es wurden USB-TxFrames mit jeweils nur einem RO-BOCOMM-Frame an die Basisstation übertragen. Das Flag *ValidateRxFIFO* wurde gesetzt,



Bild 7.12: Initiierung von IR-Übertragungen mit einem ROBOCOMM-Frame je USB-TxFrame und direktem Auslesen der *IRC*-Antwort per USB-IN-Transfer

um nach Ausführung des Echobefehls das generierte ROBOCOMM-Antwortpaket in das EP2-IN-FIFO zu übertragen und für einen USB-IN-Transfer freizugeben. Der gelbe Signalverlauf spiegelt die vom ISP ausgelösten Endpoint-Interrupts wider. Die im FIR-Modus von der Basisstation ausgesandte und vom MXS-Transceivermodul empfangene IR-Pulsfolge ist grünfarben abgebildet. Das rote Signal zeigt durch eine logisch-1 den Empfang der IRC-Rückantwort an. Der zeitliche Abstand zwischen dem ersten und dem dritten gelben Peak entspricht vier USB2.0-Mikro-Frames (500 µs). Der zweite gelbe Peak zeigt das erfolgreiche Lesen des Echo-Antwortpakets (USB-IN-Transfer) durch den Host-PC. In dieser Konstellation mit aufeinanderfolgenden USB-TxFrames, die jeweils nur einen



Bild 7.13: Sukzessive Übertragung von Reset-By-IR-Sequenzen mit nicht verketteten ROBOCOMM-Frames

ROBOCOMM-Frame umfassen, und einer auszulesenden Rückantwort unmittelbar nach dem Aussenden eines jeden USB-TxFrames, ist kein kürzerer Zeitabstand als 500 µs zwischen zwei auszusendenden IR-Datenpaketen möglich.

Auch das Bild 7.13 verdeutlicht diesen Sachverhalt: Es zeigt die sukzessive FIR-Übertragung sogenannter Reset-By-IR-Sequenzen [MiC05], die im Abstand von etwa 500 µs übermittelt werden – auf die Reset-By-IR-Sequenz wird in Verbindung mit der MXS-Integration in den MiCRoN-Mikroroboter noch ausführlicher in Kapitel 7.3.3 eingegangen.

7.2.2.3 USB-Kommunikation mit verketteten Datenpaketen

Werden statt nur eines ROBOCOMM-Frames gleich mehrere miteinander in einem USB-TxFrame entsprechend Kapitel 4.7.4.2 verkettet, so lässt sich beispielsweise die Wiederholrate für das Aussenden der Reset-by-IR-Sequenz erheblich steigern. Dies belegen Bild 7.14 und Bild 7.15 eindrucksvoll. In Bild 7.14 sind nahezu keine Unterbrechungen bzw. Zeitabstände zwischen zwei Reset-By-IR-Datenpaketen zu erkennen, erst beim Vergrößern (Bild 7.15) werden kurze Sendeunterbrechungen zwischen zwei IR-Sequenzen sichtbar.



Bild 7.14: FIR-Übertragung von Reset-By-IR-Frames innerhalb eines USB-TxFrames

Bild 7.15: Ausschnittsvergrößerung von Bild Seguenzen bei Verkettung mehrerer ROBOCOMM- 7.14: Nur kurze Sendepausen sind zwischen den einzelnen Reset-By-IR-Datenpaketen erkennbar.

Abschließend wird an dieser Stelle nochmals auf Bild 7.8 des Kapitels 7.2.1 verwiesen, da das dortige Messergebnis anschaulich belegt, dass die USB-Basisstation in Verbindung mit ihrem LINUX-USB-Treiber die Verkettung von ROBOCOMM-Frames unterstützt: Auf den Empfang nur eines USB-TxFrames hin werden gleich mehrere Datenpakete im FIR-Modus synchron, mit einer Zeitdifferenz von jeweils 1 ms ausgesendet. Der Geschwindigkeitsvorteil durch die Frame-Verkettung, wie er z. B. bei der Übermittlung der Reset-By-IR-Sequenzen deutlich wird, spielt in Bild 7.8 allerdings eine nur untergeordnete Rolle: Dort garantiert die Frame-Verkettung vielmehr, dass der Zeitabstand zwischen zwei Übertragungen äguidistant eingehalten wird. Jitter, bedingt durch Zeitvarianz beim Datenaustausch zwischen USB2.0-Controller und USB-Applikation ROBOCOMM, wird vermieden, da ein nächstes zu sendendes Datenpaket schon bereits bei Aussenden des aktuellen vorliegt.

7.3 Einsatz in der Mikromanipulationsstation

Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel 7.1 und 7.2, wurde das Mikroroboter-Kommunikationssystem ROBOCOMM, unverändert in Konzeption und Realisierung, innerhalb der in Kapitel 4.1 ausführlich vorgestellten Mikromanipulationsstation MiCRoN eingesetzt und seine Funktionsfähigkeit analysiert.

Integration in den MiCRoN-Mikroroboter 7.3.1

Die Elektronikkomponenten des MiCRoN-Roboters verteilen sich insgesamt auf vier Platinen, die mit ihren Abmessungen zugleich die Außenabmessungen des MiCRoN-Roboters vorgeben. Drei dieser Platinen besitzen eine guadratische Form mit einer Seitenlänge von 12 mm. Die vierte Platine, die u. a. als Montageplattform zur Befestigung der vom globalen Sensorsystem MPS benötigten Moiré-Marker dient (siehe hierzu Kapitel 4.1.2.2), besitzt zwar dieselbe Länge, ist aber nur halb so breit.



Bild 7.16: Die ASIC-PCB (12x12 mm²) ist mit dem Bild 7.17: Das Transceivermodul TFDU6108 wird MXS (betrieben über einen 40 MHz-Quarzoszillator) und zwei PAAs bestückt [MiC05].

auf der Platine ISC (Input Sensing for Control) neben zwei Potentiometern positioniert [MiC05].

Diese Platinen wurden von der spanischen Gruppe um Dr. M. Puig-Vidal (Lehrstuhl für Elektronik, Universität Barcelona) entwickelt [TNS+05]. Mit Ausnahme der für den POWER PACK benötigten Elektronikkomponenten (vgl. Kapitel 4.1.2.3) finden sich auf diesen Platinen sämtliche elektronischen Baugruppen des MiCRoN-Roboters, insbesondere die ASICs MXS und PAA, aber auch DC/DC-Spannungswandler und Messverstärkerschaltungen. Bild 7.16 zeigt eine dieser Platinen, die sog. ASIC-PCB, die neben einem 40 MHz-Quarzoszillator ausschließlich mit den Full-Custom-ASICs zur Steuerung bzw. Kontrolle des MiCRoN-Roboters bestückt ist: Der Kontroll- und Kommunikations-ASIC MXS wird ebenso wie zwei zur Verstärkung und Verteilung der MXS-Ausgangssignale dienende PAA-ASICs auf der Platine montiert und durch Drahtbonden elektrisch kontaktiert. Das Transceivermodul TFDU6108 wird auf der Platine ISC (Input for Sensing Control) neben zwei Potentiometern montiert (Bild 7.17), die zur Feineinstellung der Messschaltung für sowohl SyringeChip als auch AFM-Werkzeug dienen.

Bild 7.18 zeigt einen vollständig montierten MiCRoN-Mikroroboter, der über vier Freiheitsgrade verfügend, mit einer Grundfläche von 12x12 mm² und einer Gesamthöhe von 28,6 mm, ein Volumen von ca. 4,12 cm³ für sich beansprucht. Der MiCRoN ist hier in der Ausführung als Injektionsroboter abgebildet: In Bild 7.18 ist an seinem Roboterarm der vom FRAUNHOFER IBMT entwickelte Injektionschip "SyringeChip" erkennbar.


Bild 7.18: Der 4,12 cm³ kleine MiCRoN mit TFDU6108, POWER PACK, Moiré-Markern und "Syringe-Chip" als Roboterwerkzeug

Der rechte Bildbereich von Bild 7.18 erlaubt einen Blick auf den POWER PACK (unteres Roboterdrittel) und vermittelt zugleich einen ersten Eindruck über die Anordnung von Transceivermodul TFDU6108 und Moiré-Marker für das in Kapitel 4.1.2.2 bereits ausführlich vorgestellte globale Sensorsystem MPS zur Roboter-Positionsbestimmung.

Aufgrund der gewählten Anordnung bzw. Positionierung der Moiré-Marker besteht für das Transceivermodul und damit den IR-Kommunikationskanal die Gefahr einer möglichen



Bild 7.19: Das Sichtfeld (FOV) des TFDU6108 ist teilweise eingeschränkt.

Beeinträchtigung des Sichtbereiches (FOV) – Bild 7.19 lässt jedoch, unter Berücksichtigung der durch den IrDA-Standard [IrDA01] vorgegebenen Richtcharakteristika (Halbwinkelvorgaben) für Transmitter und Receiver (siehe hierzu auch Kapitel 3.4.7.1), die Vermutung zu, dass sich die Sichtbereichseinschränkungen noch in einem akzeptablen Rahmen bewegen dürften. Hier könnte durch ein Platinen-Redesign Abhilfe geschaffen werden, insbesondere wenn der vertikale Abstand zwischen TFDU6108 und Moiré-Marker reduziert würde, beispielsweise durch Anheben bzw. "Unterfüttern" des Transceivermoduls.

7.3.2 IR-Kommunikation mit dem MiCRoN-Roboter

Der MiCRoN-Roboter wurde zunächst mit einem speziellen POWER PACK bestückt, welcher über sehr dünne Kupferdrähte an ein Netzteil angeschlossen wurde. Durch die drahtgebundene Energieversorgung konnten Spannungsschwankungen während der Erstinbetriebnahme der Roboterelektronik ausgeschlossen werden: Auftretende Fehler wären dadurch unmittelbar auf Bauteilfehler oder Fehler im Platinendesign zurückzuführen. Mit der Basisstation ROBOCOMM und der für Ihre Verifikation eingesetzten USB Client Testsoftware (Kapitel 7.2.2.1) wurde die IR-Kommunikationsschnittstelle des MiCRoN untersucht. Hierbei wurde insbesondere wieder auf den *IRC*-Befehl *get_echo* zurückgegriffen.

7.3.2.1 IR-Modi

Im SIR-Modus konnte für alle unterstützten Baudraten (von 9,6 kbit/s bis hin zu den standardmäßig nach einem POR eingestellten 115,2 kbit/s) erfolgreich mit dem Mikroroboter kommuniziert werden. Auch der synchrone MIR-Modus wurde sowohl mit 576 kbit/s als auch mit 1,152 Mbit/s vollständig durch den MiCRoN unterstützt.

Im FIR-Modus konnte jedoch keine Verbindung mit dem Roboter aufgebaut werden. Nach Übermittlung und Bestätigung der *set_ir_mode*-Instruktion zum Umschalten in den FIR-Modus war im Anschluss weder eine Reaktion auf einen Echo-Befehl, noch eine Reaktion seitens der Roboteraktorik, z. B. auf einen *write_DMA*-Befehl, festzustellen. Messungen am Transceivermodul des Roboters ergaben insbesondere am Pin *Vlogic* statt der geforderten 3,3 V viel zu niedrige Spannungspegel von 1,8 V bis maximal 2,1 V – dies lässt auf einen Platinenfehler schließen, da sowohl der ASIC *MXS* als auch die Energieversorgung als Fehlerquelle ausgeschlossen werden können. Ein zu niedriger Spannungswert für *Vlogic* führt dazu, dass die von TFDU6108 ausgegebenen elektrischen Pulse zu niedrige Spannungspegel aufweisen. Dies verhindert die korrekte Detektion der low-aktiven FIR-Chipfolgen, da der im Vergleich zu 3,3 V erheblich niedrigere Spannungspegel von maximal 2,1 V in Verbindung mit der Schwellenwertproblematik (vgl. Kapitel 4.6.2.1) keine saubere Reproduktion der "verzerrten" FIR-Pulse mehr zulässt – selbst nicht bei aktivierter FIR-Kurzpulsoption.

Dass trotz eines "Verdrahtungsfehlers" überhaupt noch eine Kommunikation mit dem MiCRoN in den IR-Modi SIR, SIRpMiCRoN und MIR möglich war, spricht für die Robustheit des realisierten Mikroroboter-Kommunikationssystems, vor allem für die *IR-RX-Unit* des *IRCs*.

7.3.2.2 Reset-Verhalten

Wurde die Versorgungsspannung nach einem Roboter-Reset, d. h. nach Abschalten und Wiederanschalten des Netzteiles, sehr schnell auf einen Spannungswert von etwa 5 V eingestellt, so konnte ein Echo-Befehl i. d. R. erst im Anschluss an eine Übertragung des *IRC*-Befehls *set_ir_mode* vollständig und korrekt durch den MiCRoN beantwortet werden. Ursächlich hierfür ist die bereits in Kapitel 7.1.2 angesprochene POR-Problematik.

Bei langsamem "Hochfahren" der Versorgungsspannung konnte dagegen direkt mit der Ausführung der Echo-Instruktionen begonnen werden. Das langsame Ansteigen der Spannungsversorgung befähigt das Transceivermodul, das schon ab ca. 2,6 V einsatzfähig ist, auf seinen POR reagieren und die internen Schaltungskomponenten gezielt zurücksetzen zu können, bevor der POR-Block des *MXS* überhaupt eine stabile 3,3 V Versorgungsspannung detektieren kann. Durch diesen "Vorsprung" des Transceivermoduls gegenüber dem *MXS* wird die langsamere POR-Sequenz des Moduls ausgeglichen: TFDU6108 kann auf die nach dem *MXS*-POR ausgelöste Programmierung per SITC fehlerfrei reagieren.

Für den Einsatz des MiCRoN-Roboters auf dem POWER FLOOR (Kapitel 4.1.2.3) bedeutet dies, dass entweder der POWER FLOOR langsam hochzufahren oder der Roboter sehr langsam auf die Arbeitsfläche aufzusetzen ist, um dem Transceivermodul ausreichend Zeit für seine POR-Sequenz zu bieten. Darüber hinaus sollte aus Sicherheitsgründen vor Einstellung der Roboter-ID zunächst einmalig set_ir_mode an den Mikroroboter übertragen werden.

7.3.3 Ansteuersignalerzeugung – Reset-By-IR

In Bild 7.20 ist der Testaufbau dargestellt, mit Hilfe dessen die Erzeugung der Ansteuersignale insbesondere für die 3-DOF-Stick-Slip-Positioniereinheit analysiert und bewertet wurde. Der MiCRoN wurde auf die Seite gelegt, um einen Zugang zu den Anschlusspins des Stick-Slip-Aktuators zu erhalten. Auf diese Weise konnte mit einem Tastkopf das vom *MXS* generierte und per *PAA* entsprechend verstärkte Signal abgegriffen und am Oszilloskop analysiert werden. Die Signalformparameter wurden jeweils per IR-Kommunikation an den über ein Netzteil spannungsversorgten MiCRoN-Roboter übermittelt. Der IR-Transfer der Signalformparameter an den *IRC* bzw. *MXS* verlief fehlerfrei. Dies belegt Bild 7.21 anschaulich: Nach Übermittlung der Signalformparameter per IR-Übertra-



Bild 7.20: Messaufbau zur Überprüfung der Ansteuersignalerzeugung mittels Oszilloskops

gung (grünes Messsignal) wurde ein Sägezahnsignal (gelbfarben dargestellt) direkt an der Positioniereinheit des MiCRoN-Roboters abgegriffen. Die Analyse der generierten Signale ergab jedoch erhebliche Unterschiede in der Qualität bzw. Steilheit der Signalflanken bei den für die Stick-Slip-Positioniereinheit erforderlichen Sägezahnfunktionen (siehe hierzu die ausführliche Beschreibung in Anhang B.3.3): Für die Auslenkung in positive Y-Richtung konnten Sägezahnfunktionen ausreichender Frequenz und Steilheit erzeugt werden. Jedoch waren die für eine Auslenkung in negative Y-

Richtung generierten Signale unbrauchbar, da sie keine ausreichend steilen Flanken für die Slip-Phase aufwiesen. Grund hierfür ist ein systematischer Hardwarefehler in den für die Erzeugung der Aktoransteuersignale zuständigen *MXS*-Blöcken: Statt eines fallenden Sägezahns wird lediglich ein zum "normalen" positiven Sägezahn um eine Achtelperiode phasenverschobenes (positives) Ausgangssignal erzeugt (Bild 7.22).





Bild 7.21: Die per IR-Kommunikation an einen MiCRoN übertragenen Signalformparameter erzeugen ein Sägezahnsignal.

Bild 7.22: Der *MXS* generiert für die negative Y-Richtung kein fallendes Sägezahnsignal (vgl. die Signalformen in Bild 7.24).

Um dennoch eine Translation in negativer Y-Richtung erzielen zu können, wurde von den Mitarbeitern des Lehrstuhls LABORATOIRE DE SYSTÈMES ROBOTIQUES (LSRO) der ECOLE PO-LYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL) die Reset-By-IR-Strategie entwickelt: Per IR-Kommunikation (über *write_DMA*) wird der *MXS* zur Erzeugung eines (falschen) Sägezahnsignals aufgefordert. Sobald das Ausgangssignal dieses falschen Sägezahnsignals den Wert 0



Bild 7.23: Erzeugung eines fallenden Sägezahnsignal durch zeitgenaue IR-Übertragung eines *MXS*-ACTUATOR-Resets ([MiC05], mod.)

erreicht, wird der *MXS*-Block ACTUATOR durch eine erneute IR-Übertragung (wiederum über *write_DMA*) zurückgesetzt. Unmittelbar daran anschließend wird wieder eine *write_DMA*-Instruktion gesendet, um den ACTUATOR ein weiteres Mal für die Ausgabe eines "falschen Sägezahnsignals" einzuschalten (Bild 7.23).

Diese sog. Reset-By-IR-Sequenz lässt sich entsprechend der Anzahl der erforderlichen Einzelschritte beliebig wiederholen. Für die Steuerungseinheit bzw. die Basisstation bedeutet dies jedoch, dass zwei

Image: Control of the second secon

Bild 7.24: Zeitbegrenzte Erzeugung eines fallenden Sägezahnsignals mit Hilfe der Reset-By-IR-Strategie, gefolgt von einem "normal" programmierten steigenden Sägezahnverlauf.

auch gerade der Wert 0 erreicht ist.

0 🖓 100₩ 💥 20₩ 200₩ 😤

Roboter zu übertragen sind. Der IR-Kommunikationskanal ist in diesem Falle stark belastet. Das Oszillogramm in Bild 7.24 zeigt die achtmalige Ausführung der Reset-By-IR-Sequenz.

> Soll die Bewegungsrichtung schließlich wieder in positive Y-Richtung wechseln, so kann die normale *MXS*-Programmiersequenz zum Berechnen der Samples verwendet werden. Der IR-Kommunikationskanal wird wieder entlastet (rechte Bildhälfte von Bild 7.24).

> Begrenzt wird die Frequenz des künstlichen fallenden Sägezahnsignals durch die IR-Datenrate: Nach Aktivierung des falschen Sägezahns kann frühestens nach vollständiger Übertragung der *write_DMA*-Instruktion zum Zurücksetzen des ACTUATOR-Blocks dieser falsche Sägezahn ausgeschaltet werden. Die Zeit für die vollständige Übertragung dieses *MXS*-Reset-Kommandos begrenzt die für das falsche Sägezahnsignal maximal einstellbare Samplingfrequenz: Diese muss so eingestellt sein, dass bei Eintreffen des *MXS*-Reset-Kommandos

Im normalen SIR-Modus bei 115,2 kbit/s lässt sich mit Reset-By-IR eine Wiederholfrequenz von lediglich ca. 760 Hz erzielen – für Stick-Slip-Piezoaktoren im Stepping-Modus (vgl. Anhang B.3.3) ein sehr kleiner Wert: Bei einer SIR-Übertragung mit einem Stoppbit sind pro zu übertragendem Byte 10 Bit notwendig (1 Startbit, 8 Nutzbits, 1 Stoppbit). Da für die Übertragung des *MXS*-Reset-Kommandos gemäß IR-Kommunikationsprotokoll 15 Bytes (150 Bit) zu übertragen sind (bestehend aus Startbyte, 11 Nutzbytes, 2 CRC-Bytes und Stoppbyte), beansprucht die Übertragung insgesamt 1,3 ms an reiner IR-Sendezeit.

MXS-Datenworte (Roboterkommandos) immer abwechselnd über den IR-Kanal an den

Mit Hilfe des SIRpMiCRoN-Modus wurde die Wiederholfrequenz um etwa 25 % auf ca. 960 Hz gesteigert: Da Adresse und Control-Byte im SIRpMiCRoN-Modus zu einem Byte zusammengefasst sind (vgl. Bild 4.18 in Kapitel 4.6.2.2), weiterhin die CRC auf ein Byte verkürzt ist und das Stoppbyte aufgrund der festen Rahmenlänge entfällt, waren nur noch 12 Bytes (120 Bit) erforderlich, die innerhalb von 1,04 ms übertragen wurden.

Abschließend zeigen Bild 7.25 und Bild 7.26 die übertriebene Erhöhung der Frequenz, die bei Verwendung des MIR-Übertragungsmodus möglich ist; Bild 7.26 zeigt eine Aus-

E +/-25.0V 🚔 💿 💾



Bild 7.25: Einer zu schnellen Übertragung der Reset-By-IR-Sequenz im MIR-Modus kann der *MXS*-Signalgenerator nicht mehr folgen



Bild 7.26: Die Ausschnittvergrößerung von Bild 7.25 zeigt die achtfache Wiederholung der Reset-By-IR-Sequenz im MIR-Modus

schnittsvergrößerung während der Übertragung der Reset-By-IR-Sequenz (grünes Signal): Man erkennt, dass der *MXS*-Signalgenerator dem per IR-Kommunikation ferngesteuerten Ein-/Ausschalten nicht mehr folgen kann. Wie für Bild 7.24 sind auch in diesem Beispiel acht Reset-By-IR-Sequenzen nacheinander ausgeführt worden. Um dieser Generator-Überlastung entgegenzuwirken, kann auf den synchronen Übertragungsmodus (entsprechend Bild 7.8) zurückgegriffen werden. Dieser erlaubt die schnelle Übertragung der für die Reset-By-IR-Sequenz erforderlichen Roboterkommandos unter Einhaltung einer (synchronen) Mindestverzögerung. Eine ausführlichere Beschreibung der Reset-By-IR-Strategie einschließlich der damit erzielten Messergebnisse bzgl. Geschwindigkeit und Genauigkeit der MiCRoN-Positioniereinheit findet sich in [MiC05].

7.3.4 Integration in die MiCRoN-Manipulationsstation

Nach den recht vielversprechenden Ergebnissen des vorigen Kapitels wurde das Mikroroboter-Kommunikationssystem ROBOCOMM abschließend vollständig in die auf drahtlosen, mobilen Mikrorobotern basierende Mikromanipulationsstation MiCRoN integriert. Insbesondere die Kompatibilität zu POWER FLOOR und den lokalen und globalen Sensorsystemen galt es dabei zu prüfen. Softwareseitig musste darüber hinaus die Integrierbarkeit des RO-BOCOMM-Treibers innerhalb der Manipulationssteuerungseinheit verifiziert werden.

7.3.4.1 Basisstation ROBOCOMM mit POWER FLOOR

In einem ersten Szenario wurde das Kommunikationssystem ROBOCOMM in Verbindung mit dem am FRAUNHOFER IBMT entwickelten POWER FLOOR, zur drahtlosen Energieversorgung der MiCRoN-Roboter, getestet (siehe auch Kapitel 4.1.2.3). Hierzu wurden die IR-Analog-Frontends der Basisstation ROBOCOMM an den POWER FLOOR, der als Mikroskoptisch



Bild 7.27: Die IR-Analog-Frontends der Basisstation wurden, mit dem POWER FLOOR verbunden, in ein Auflicht-Lichtmikroskop integriert.

eines Auflicht-Lichtmikroskops fungieren kann, angebunden (Bild 7.27). Über flexibel in Höhe und Winkel einstellbare Klemmvorrichtungen wurden die IR-Analog-Frontends jeweils an einem Rundstahl fixiert, der seinerseits wiederum an einer der Ecken der Roboterarbeitsfläche starr mit dem POWER FLOOR verbunden wurde.

Nach langsamem Aufsetzen (vgl. Kapitel 7.3.2.2) eines drahtlosen MiCRoN-Roboters konnte, wie für die per Netzteil betriebenen MiCRoNs, eine IR-Verbindung aufgebaut werden. Sowohl im Modus SIR als auch im MIR-Modus wurden Echo-Instruktionen erfolgreich vom MiC-RoN-Roboter beantwortet. Der Versuch einer FIR-Übertragung blieb dagegen, entsprechend den Ergebnissen aus Kapitel 7.3.2.1, weiterhin erfolglos.

Mit Ausnahme von FIR-Modus und MIR-DLL wurden sämtliche die IR-Verbindung betreffende Optionen, einschließlich der *IRC*-Spezialfunktionen erneut getestet und als einsatzfähig bewertet. Dies schließt auch die per *write_tfdu*-Befehl initiierte Sendestrombegrenzung des MiCRoN-Transceivermoduls mit ein, die mit Hilfe der in Kapitel 7.1.3.3 vorgestellten Verfahren nachgewiesen wurde. Auch die Übermittlung von Signalformparametern funktionierte fehlerfrei, so dass ein drahtloser MiCRoN-Roboter per IR-Kommandos erfolgreich über den POWER FLOOR manöv-



Bild 7.28: Drahtloser MiCRoN kommuniziert auf dem Power Floor nach Überqueren der für das Mikroskop vorgesehenen Öffnung. riert werden konnte: Bild 7.28 zeigt eine Momentaufnahme aus einer Videosequenz, die während der Überquerung der für die Auflichtmikroskopie vorgesehenen Öffnung im POWER FLOOR aufgezeichnet wurde. Der graue Fleck am Transceivermodul ist dabei die Reaktion des CCD-Chips der Videokamera auf ein vom Roboter ausgesendetes *IRC*-Antwortpaket, das den Empfang eines Roboterkommandos zur Änderung der Signalformparameter und damit der Bewegungsrichtung quittierte.

Zum Zeitpunkt der Integrationsphase lagen nur drei gefertigte MiCRoN-Mikroroboter vor. Zwei diese Roboter wurden mit einem "SyringeChip" als Roboterwerkzeug ausgestattet,

der Roboterarm des dritten Mikroroboters wurde mit einem in Kapitel 4.1.3 bereits vorgestellten Mikrogreifer versehen (Bild 7.29). Leider konnte nur einer der "SyringeChip"-MiCRoNs drahtlos per POWER FLOOR betrieben und über die Roboterarbeitsfläche bewegt werden. Der Energiebedarf der beiden anderen Roboter konnte, unmittelbar nach der IR-Datenübertragung zur Aktivierung der Piezoaktoren bzw. ihrer treibenden Elektronik, nicht mehr vom POWER FLOOR abgedeckt werden [MiC05] – dieses Verhalten wurde in Analogie zu Kapitel 7.3.2.1 auf "Verdrahtungsfehler" (durch Mikroschlüsse oder Parasitärkapazitäten) bzw. zu hohe Fertigungstoleranzen bei der Bestückung der jeweiligen Roboterplatinen zurückgeführt. Für diese beiden MiCRoN-Mikroroboter wurde daher auf den in Kapitel 7.3.2 bereits angesprochenen kabelgebundenen POWER PACK zurückgegriffen, der die Anbindung an ein Netzteil über sehr dünne Kupferdrähte gestattet.

Messungen ergaben für den drahtlosen MiCRoN-Roboter einen mittleren Leistungsbedarf von etwa 115,5 mW (ca. 55 mA) im sog. Standby-Betrieb bei kontinuierlicher IR-



Bild 7.29: Drei zum "Foto-Shooting" versammelte MiCRoN-Mikroroboter auf dem als Mikroskoptisch fungierenden POWER FLOOR

Übertragung von Echo-Datenpaketen. Mit "Standby" wird dabei der Zustand des MiC-RoN nach Anschalten der Spannungsversorgung, d. h. nach Aufsetzen auf den POWER FLOOR, beschrieben: Die Roboterelektronik einschließlich Messverstärkerschaltung wird über die On-Board-DC/DC-Wandler mit Spannung versorgt, der *MXS* arbeitet mit 40 MHz, d. h. das Transceivermodul wurde initialisiert und der integrierte *IRC* ist empfangsbereit; die MXS-internen Blöcke einschließlich des A/D-Wandlers sind allerdings noch deaktiviert, ebenso die vier D/A-Wandler und die daran angeschlossenen *PAA*-ASICs.

Wurde die Positioniereinheit des drahtlosen MiCRoNs nach Übermittlung der passenden Signalformparameter für Bewegungen in X-Y-Richtung aktiviert, stieg die Leistungsaufnahme auf Werte zwischen 296–365 mW je nach Bewegungsrichtung. Bei Ansteuerung des Roboterarms war dagegen nur ein Anstieg auf ca. 126 mW zu verzeichnen.

Die über das Netzteil versorgten Roboter zeigten dagegen schon im Standby-Modus einen höheren Leistungsbedarf zwischen 130 mW und 142 mW an, ein vom POWER FLOOR noch bedienbarer Bedarf – im Standby-Modus konnte mit allen drei MiCRoNs auch bei induktiver Energieversorgung kommuniziert werden. Wurden jedoch die Aktoren der verdrahteten MiCRoNs aktiviert, stieg der Leistungsverbrauch auf Werte von ca. 390 mW bis hinauf auf 550 mW – zu viel für eine drahtlose Energieversorgung mit dem POWER FLOOR.

7.3.4.2 RoboComm mit lokalem und globalem Sensorsystem

Als finaler Integrationsschritt wurde das Kommunikationssystem ROBOCOMM zusammen mit den für die Manipulationsstation essentiellen Sensorsystemen zur Überwachung des Manipulationsvorganges eingesetzt. Hierzu wurden zunächst die für das globale Positi-



Bild 7.30: Manipulationsstation mit Power Floor, globalem Sensorsystem MPS der RoboComm-Basisstation und zwei MiCRoN-Mikrorobotern

onsbestimmungssystem MPS essentiellen Hardwarekomponenten an den Po-FLOOR montiert (vgl. Kapitel WER 4.1.2.2): Die CCD-Kamera wurde mit Hilfe von Messingstäben und einer Plexiglasscheibe in einer Höhe von etwa 70 cm mittig über der Arbeitsfläche positioniert. Zur gleichmäßigen Ausleuchdes Mikroroboterarbeitsraumes tuna wurden vier 25 W Niedervolthalogenstrahler in einer Höhe von 40-50 cm an den Eckpfeilern des Power FLOORs positioniert. Der Testaufbau mit POWER FLOOR, dem globalem Sensorsystem MPS, zwei MiCRoNs und der Basisstation ROBOCOMM, ist in Bild 7.30 abgebildet - die Hardware der Basisstation, bestehend aus FPGA-Board mit sowohl aufgesteckter ROBOCOMM-Erweiterungskarte als auch aufgesetzter ASIC-Testplatine ist linksseitig, leicht unterhalb der Bildmitte gut durch rote LEDs zu erkennen. Die Analog-Frontends wurden unterhalb der Halogenstrahler über flexible Klemmvorrichtungen ebenfalls an den Messingstäben fixiert. In dieser Testkonstellation war mit ein-

geschalteten Halogenlampen keine IR-Kommunikation zwischen MiCRoN und ROBOCOMM mehr möglich. Sobald jedoch die Beleuchtung für das globale Sensorsystem abgeschaltet wurde, konnte sofort wieder eine IR-Verbindung zwischen Roboter und Basisstation aufgebaut werden. Ursächlich hierfür sind die Infrarotanteile im Licht der Halogenlampen in Kombination mit der geringen Distanz zu den Transceivermodulen der MiCRoN-Roboter. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Lichtanteile, aufgrund der roboterseitig nach oben ausgerichteten Transceivermodule, nahezu senkrecht auf diese Module auftreffen und damit innerhalb des Transceivermodul-Sichtbereiches (FOV) einfallen. Wurde ein per Netzteil betriebener MiCRoN z. B. von Hand in einem Winkel von etwa 45° zu den Halogen-lampen positioniert, so konnten IR-Datenpakete wieder ungestört ausgetauscht werden.



Bild 7.31: Spektralkurve des Wärmeschutzfilters PGO57400 zur Abschirmung von IR-Lichtanteilen [Lot05]

In daran anknüpfenden Tests wurde zunächst die Lichtquelle variiert: Neben Neonlampen und den für die Lichtmikroskopie häufig eingesetzten Kaltlichtlampen mit flexibler Lichtführung wurden 15–20 cm lange Energiesparlampen (11 W Osram Dulux S G23) mit entsprechendem Vorschaltgerät getestet. Die Neonlampen brachten, in Übereinstimmung mit den Überlegungen aus Kapitel 3.4.4, keinen Erfolg. Auch vom Einsatz von Energiespar- oder Kaltlichtlampen wurde abgesehen, da weder die Ausleuchtung noch die IR-Kommunikation befriedigende Ergebnisse lieferte. Um dennoch einerseits das Kommunikationssystem einsetzen und gleichzeitig eine ausreichende Ausleuchtung der Arbeitsfläche erzielen zu können, wurde schließlich auf ein Wärmeschutzfilter der LOT-ORIEL GRUPPE EUROPA zurückgegriffen [Lot05]: Die Spektralkurve des eingesetzten Filters ist Bild 7.31 zu entnehmen. Die in quadratischer Form verfügbaren Wärmeschutzfilter wurden unmittelbar unterhalb der Halogenlampen montiert. Die IR-Kommunikation funktionierte daraufhin wieder ohne Einschränkungen.

In Bild 7.32 ist die endgültige Version der auf mobilen Mikrorobotern basierenden Mikromanipulationsstation MiCRoN abgebildet, allerdings aufgrund des fehlenden Lichtmik-



Bild 7.32: MiCRoN-Manipulationsstation mit zwei MiC-RoN-Mikrorobotern, Power Floor, Basisstation ROBOCOMM und sowohl lokalem als auch globalem Sensorsystem



Bild 7.33: GUI zur Simulation und Überwachung des Manipulationsprozesses für die mikroroboterbasierte Mikromanipulationsstation MiCRoN [MiC05]

fen [MiC05]. Daher kann neben der hardwaretechnischen Realisierung auch die Konzeption und Umsetzung des LINUX-USB-Treibers für das Mikroroboter-Kommunikationssystem ROBOCOMM als erfolgreich bewertet werden.

roskops in der nicht für biologische Experimente vorgesehenen Version. Hierzu wurde der in Bild 7.30 bereits vorgestellte Testaufbau, bestehend aus MiCRoN-Robotern, POWER FLOOR, Kommunikationssystem ROBOCOMM und globalem Sensorsystem MPS, neben den Wärmeschutzfiltern insbesondere durch ein mobiles, lokales Sensorsystem, den drahtgebundenen, mobilen Kameraroboter vom Typ *MINIMAN IV*, ergänzt (vgl. Kapitel 4.1.2.1).

Mit bis zu 1,152 Mbit/s konnten Datenpakete zwischen der Steuerungseinheit und den Mikrorobotern ausgetauscht werden.

Das GUI zur Kontrolle des Manipulationsablaufes zeigte in dieser Konstellation drei Fenster zur Steuerung der beiden MiCRoNs und des zum lokalen Sensorsystem zugehörigen Mikroroboters MINI-MAN IV an (Bild 7.33). Softwaretechnisch betrachtet stellen diese **Roboterkontrollfenster** einzelne Robotertreiber-Instanzen innerhalb des Manipulationssteuerungssystems dar (vgl. Seite 39 des Kapitels 2.4.3.3). Diese tauschen voneinander unabhängig Daten mit dem jeweils zugeordneten Mikroroboter aus. Während der einzelnen Testläufe zur Bewertung der auf mobilen, drahtlosen Mikrorobotern basierenden Mikromanipulationsstation MiCRoN konnten diese Instanzen unabhängig voneinander und ohne (softwaretechnische) Kollisionen auf den gemein-**IR-Kommunikationskanal** samen über die USB-Basisstation zugrei-

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Mikroroboter-Kommunikationssystem entwickelt, d. h. konzipiert, realisiert, erprobt und bewertet, das nichtautonome, mobile, drahtlose, cm³-große Mikroroboter mit der Steuerungseinheit einer flexiblen, mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation verbindet.

Die Anforderungen an eine Mikromanipulations-Tischstation sind vielfältig, um insbesondere die durch Skalierungseffekte ausgelösten Unwägbarkeiten bei der Handhabung und Manipulation durch kooperierenden Mikrorobotereinsatz auszugleichen. Für die geforderten Genauigkeiten für Positionier- und Manipulationseinheit sind Kabelverbindungen zu vermeiden, da vor allem die Präzision der Antriebsaktoren durch Kabelkräfte erheblich beeinträchtigt wird. Dies wiederum erfordert den Einsatz kleinstmöglicher Roboter, um für die Aktoren (derzeit vornehmlich Piezoaktuatoren) nicht nur das zu bewegende Robotergewicht, sondern – vor dem Hintergrund des systemimmanenten Energiedilemmas – den für die Fortbewegung erforderlichen Energiebedarf beherrschbar zu halten.

Gegenwärtige Tischstationen sind noch weit davon entfernt, auf autonome, zu Inferenzprozessen fähige Mikroroboter mit Nanometerpräzision zurückgreifen zu können. Daher erfordert es eine informationstechnische Anbindung der Mikroroboter an eine übergeordnete Steuerungseinheit mit Hilfe eines drahtlosen Kommunikationssystems zur Kommando- und Datenübertragung.

Aufgrund der Komplexität der Mikromanipulationsstation, hauptsächlich aber wegen der stark miniaturisierten Mikroroboter, lässt sich ein umfangreicher Leistungskatalog für ein drahtloses Kommunikationssystem für den Einsatz in einer Multiroboter-Mikromanipulationsstation ableiten. Die Anforderungen sind dabei nicht nur zahlreich, sondern teilweise auch gegensätzlich: So wurde für die Umsetzung des Kommunikationssystems neben einem robusten und dennoch schnellen Kommunikationsverfahren zusätzlich, bedingt durch Energiedilemma und die Beschränkung des Robotervolumens auf nur wenige cm³, eine geringe Leistungsaufnahme bei zugleich sehr geringem Platzbedarf gefordert.

Die Einsetzbarkeit für ein drahtloses Mikroroboter-Kommunikationssystem ist insbesondere von der Kompatibilität zu bereits bestehenden Tischstationen bzw. Ihren essentiellen Funktionseinheiten, wie Energieversorgung, Positionier- und Manipulationseinheiten oder globalen und lokalen Sensorsystemen, abhängig. Daher mussten in der Konzeptionsphase, zusätzlich zu den kommunikationsspezifischen Anforderungen, auch die gegenwärtig für Mikromanipulationsstationen erforderlichen Komponenten Berücksichtigung finden.

8.1 Zusammenfassung

Basierend auf einem **Single-Master-Multi-Slave-Konzept** wurde ein Mikroroboter-Kommunikationssystem mit einem globalen Kommunikationskanal ohne (lokale) Interroboterkommunikation entworfen, hergestellt und schließlich im Rahmen einer flexiblen, mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation validiert. Das für den Multirobotereinsatz konzipierte Kommunikationssystem gliedert sich in zwei Komponenten: den **InfraRed Core IRC**, ein neu entwickeltes ASIC-Modul, das in jede Mikroroboterelektronik entweder in Form eines Hybrids oder aber direkt in einen Mikroroboter-Kontroll-ASIC integriert wird, und die mittels FPGA-Design realisierte **Basisstation ROBOCOMM**, die als Schaltzentrale zwischen den einzelnen *IRCs* und der übergeordneten Steuerungseinheit (Host) fungiert. Das Kommunikationssystem zeichnet sich durch **standardisierte Schnittstellen** sowohl für die roboterseitige Anbindung der Mikroroboterelektronik als auch den Anschluss an die Manipulationssteuerungs- und Kontrolleinheit aus: Der *IRC* bietet im Rahmen seines *Data Exchange Interfaces* eine DMA-Schnittstelle für den Datenaustausch mit der Roboterelektronik; die Kommunikationszentrale ROBOCOMM wird über eine USB2.0-Schnittstelle mit der Manipulationssteuerungs- und Kontrolleinheit verbunden. Als USB-Composite-Gerät konzipiert, tauscht ROBOCOMM über seinen zugehörigen USB-Treiber Daten mit der USB-Client-Software zur Bedienung des Kommunikationssystems aus.

Der IRC sollte für Mikroroboter eine robuste und schnelle Schnittstelle zur Manipulationssteuerungseinheit bieten. Nach ausführlicher Analyse gegenwärtiger Kommunikationsverfahren wurde für die drahtlose Kommunikationsverbindung zwischen ROBOCOMM und IRC eine optische Übertragungstechnik mit Intensitätsmodulation und direkter Detektion (IM/DD) im nahen Infrarotbereich gewählt. Hierzu wurde ein IR-Kommunikationsprotokoll entwickelt, das in Anlehnung an den IrDA-Standard sowohl asynchrone als auch synchrone Übertragungsverfahren unterstützt: In den asynchronen IR-Modi SIR und SIRpMiC-RoN sind Datenraten von 9,6–115,2 kbit/s wählbar – dabei ist SIRpMiCRoN ein Übertragungsmodus für kurze Datenpakete mit fester Rahmenlänge. Die synchronen IR-Modi unterstützen Bruttodatenraten von 576 kbit/s und 1,152 Mbit/s im sog. MIR-Modus; FIR schließlich erlaubt eine Übertragung mit 4 Mbit/s. Die Steuerungseinheit kann jederzeit zwischen den unterstützten Datenraten und Übertragungsmodi auswählen und auf diese Weise in Abhängigkeit von der jeweiligen Prozesssituation sowohl die Übertragungsgeschwindigkeit als auch den Energiebedarf des Mikroroboters dynamisch an die nachfolgend zu übertragenden Datenmengen anpassen. Weiterhin kann die Kapazität eines z. B. im SIR-Modus bereits stark ausgelasteten IR-Übertragungskanals durch Wechsel in einen schnelleren IR-Modus (MIR oder gar FIR) erweitert werden für zusätzliche, innerhalb der Manipulationsstation einzusetzende Mikroroboter.

Um einen robusten IR-Kommunikationskanal zu erhalten und insbesondere das Empfangsverhalten sowohl für die Basisstation, insbesondere aber den *IRC* zu verbessern, wurde der durch das IR-Protokoll vorgegebene Funktionsumfang der anwendungsspezifischen Schaltungen um die sog. *IRC-Spezialfunktionen* erweitert. Der implementierte Phasenregelkreis (DLL) verbessert das Empfangsverhaltens in den IR-Modi SIR, SIRpMiCRoN und MIR: Er unterstützt die Reproduktion der empfangenen Pulsfolgen insbesondere bei harter Detektion (optoelektrischer Demodulation) der IR-Pulse. Darüber hinaus werden durch die DLL sender- und empfangsseitig voneinander abweichende Lokaloszillatoren ausgeglichen. Im MIR-Modus kann zusätzlich eine Präambel dem eigentlichen MIR-Bitstrom vorausgeschickt werden, um bei roboterseitig stark reduzierter IR-Sendeleistung die Empfangselektroniken (Verstärkerschaltungen) der seitens der Basisstation eingesetzten Transceivermodule rechtzeitig auf eine unmittelbar nachfolgende MIR-Pulsfolge vorzubereiten. Für den Modus FIR schließlich wurde eine Kurzpulsoption implementiert, die das Empfangsverhalten bei harter Detektion trotz Schwellwertproblematik erheblich verbessern konnte.

Bei der **Schaltungsrealisierung** sowohl für den *IRC* als auch das ROBOCOMM-FPGA-Design wurden neben der Entwurfsmodularität weiterhin die für die Entwicklung von integrierten Schaltkreisen essentiellen Aspekte Entwurfsregularität (Wiederverwendbarkeit) und Entwurfslokalität (leichte Ersetzbarkeit) berücksichtigt. Hierdurch ließ sich das Mikroroboter-Kommunikationssystem trotz seiner Vielschichtigkeit auf zahlreiche, in ihrer Komplexität jedoch beherrschbare Teilkomponenten aufteilen. Zugleich konnten wesentliche Komponenten für die Umsetzung des spezifizierten IR-Kommunikationsprotokolls sowohl seitens des *IRCs* als auch für die Kommunikationszentrale instanziiert werden. Der modulare Aufbau der Kommunikationszentrale mittels konfigurierbarem FPGA-Design und USB 2.0-Schnittstellen-Controller gestattet jederzeit eine Erweiterung und Anpassung des Funktionsumfangs. Für eine Erweiterung der *IRC*-Funktionalität ist dagegen immer ein sehr aufwändiger Entwicklungsturnus zu durchlaufen. Fehler in einem ASIC-Design sind nicht einfach durch "Rekonfiguration" zu beheben. Vielmehr müssen arbeitsintensive Backend-Entwicklungsschritte durchlaufen werden und diese vor dem Tape-Out mit Hilfe von Backannotation in zeit- und rechenintensiven Timingsimulationen verifiziert werden.

Für die optische (De-)Modulation wurden **kommerzielle Infrarot-Transceivermodule** ausgewählt, deren Bauformen eine Integration innerhalb eines nur einen Kubikzentimeter umfassenden Mikroroboters zulassen. Die bereits vom Hersteller getesteten Module garantieren IrDA-Konformität, sodass – bei entsprechender Umsetzung des IR-Kommunikationsprotokolls durch *IRC* bzw. ROBOCOMM – auch sehr geringe Bitfehlerraten erzielbar sind. Die Module zeichnen sich neben den für die IR-Kommunikation essentiellen optischen Konzentratoren bzw. Filtern und einer IrDA-konformen Pulsformung insbesondere durch eine SITC-Schnittstelle aus. Diese gestattete in Verbindung mit dem entwickelten IR-Kommunikationsprotokoll, den IR-Sendestrom des Transceivermoduls gezielt durch die Steuerungseinheit fernzusteuern und auf diese Art den Energiebedarf des Mikroroboters flexibel an die Prozesssituation in der Mikromanipulationsstation anzupassen.

Erstmals wurde das Mikroroboter-Kommunikationssystem in der **Mikromanipulationsstation MiCRoN** eingesetzt. Für die auf dem Betriebssystem LINUX basierende Manipulationskontroll- und Steuerungssoftware wurde ein LINUX-USB-Treiber realisiert, der die Datentransfers zwischen USB-Client-Software und Basisstation koordiniert und darüber hinaus, im Sinne der Untergliederung und Verteilung der Steuerungssoftware auf einzelne Robotertreiber, eine Mehrfachnutzung des USB-Gerätes ROBOCOMM unterstützt. Der *IRC* wurde in den Mikroroboter-Kontroll-ASIC *MXS* integriert, welcher nach Fertigung in einer 0,35-µm-CMOS-Technologie in ungehäuster Form auf mehreren MiCRoN-Mikrorobotern eingesetzt wurde. Für den *IRC* ergab sich bei Schaltungsauslegung für einen Arbeitstakt von 40 MHz eine Chipfläche von 945 x 2989 µm² – dieser Flächenbedarf von etwa 2,825 mm² erlaubt auch die Integration des *IRC*s in zukünftige Mikroroboter der nächsten Generationen. Im Sinne kurzer Turnaround-Zeiten wurde der *IRC* für Datenpakete mit einer maximalen Byteanzahl von 128 Bytes ausgelegt. Die daraus resultierende Größe der für die Zwischenspeicherung der Nutzdaten benötigten Dual-Port-RAMs beanspruchte in der 0,35-µm-Technologie etwa ein Viertel der gesamten *IRC*-Chipfläche.

Die sehr zufriedenstellenden Resultate der Versuche zur Erprobung bestätigen die **erfolgreiche Konzeption und Umsetzung des Kommunikationssystems**. Dies gilt sowohl für das IR-Kommunikationsprotokoll als auch die spezifischen Sonderfunktionen zur Realisierung einer robusten drahtlosen Verbindung zwischen der Kommunikationszentrale ROBOCOMM und den innerhalb der Mikroroboterelektronik eingesetzten *IRC*-ASIC-Modulen. Darüber hinaus belegen die Ergebnisse, nicht zuletzt im Zusammenhang mit der Reset-by-IR-Strategie, die Leistungsfähigkeit, aber auch die vielschichtigen Einsatzmöglichkeiten des Mikroroboter-Kommunikationssystems innerhalb einer flexiblen mikroroboterbasierten Mikromanipulationsstation, die auf drahtlose, mobile, nur wenige Kubikzentimeter umfassende Mikroroboter zurückgreift. Dies schließt die geforderte Kompatibilität zu den essentiellen Funktionsgruppen einer Mikromanipulations-Tischstation mit ein.

8.2 Ausblick

Bereits bei der Inbetriebnahme im Labor als auch während der Erprobung innerhalb der Mikromanipulationsstation zeichneten sich mögliche Entwicklungsschritte zur Optimierung oder Erweiterung der Funktionalität der Teilkomponenten des Mikroroboter-Kommunikationssystems ab. An dieser Stelle werden insbesondere die roboterseitig einzusetzenden Komponenten Analog-Frontend und *IRC* betrachtet werden, da diese den für Mikroroboter typischen Beschränkungen (Energiedilemma und Platzangebot) unterliegen – seitens der Basisstation existieren diese Einschränkungen dagegen nicht.

8.2.1 Weiterentwicklung des IRCs

Sollte das ASIC-Modul *IRC*, wie im Falle des Mikroroboter-Kontroll-ASICs *MXS*, erneut in die Roboterelektronik eines drahtlosen, mobilen Mikroroboters eingebunden werden, so bietet sich in diesem Falle ein Redesign des *IRCs* an. In einem ersten Schritt würde der Fehler in der MIR-DLL behoben werden, zusätzlich würde eine Verzögerungsschaltung implementiert werden, um die POR-Problematik in Verbindung mit der Initialisierungsroutine für das Transceivermodul TFDU8108 zu beheben. Weiterhin ließe sich für die *IRC*-CPU eine dynamische Taktanpassungsschaltung implementieren, die während der Standby-Phase, d. h. während des Wartens auf ein neues IR-Datenpaket, die Taktfrequenz für den finiten Zustandsautomaten der *IRC*-CPU automatisch verringern würde: Erst mit dem korrekten Empfang eines IR-Datenpakets würde der Arbeitstakt wieder gesteigert werden, um weiterhin, im Sinne kurzer Turnaround-Zeiten, eine schnelle Verarbeitung des Datenpakets zu garantieren. Durch diese Maßnahme ließe sich die dynamische Leistungsaufnahme der sonst konstant mit 40 MHz arbeitenden IRC-CPU erheblich reduzieren.

Darüber hinaus bieten sich interessante Funktionserweiterungen für das Kommunikationssystem und damit den *IRC* an. So sollte für zukünftige Mikrorobotersysteme eine drahtlose Übertragung von Kamerabildern der als lokale Sensoren fungierenden Mikroro-



Bild 8.1: Größenvergleich zwischen Kameraroboter MINIMAN IV und MiCRoN

boter ins Auge gefasst werden. Bisherige Realisierungen von mikroroboterbasierten Mikromanipulationssystemen weisen noch beträchtliche Größenunterschiede auf zwischen den eigentlich mikromanipulierenden Robotern und den lokalen, mobilen Sensorsystemen. Bild 8.1 zeigt dies eindrucksvoll am Beispiel der MiCRoN-Manipulationsstation, bei der ein mit einem Kamerasystem ausgestatteter, drahtgebundener mobiler Miniaturroboter den Manipulationsvorgang des kleinen drahtlosen MiCRoN-Mikroroboters beobachten soll. Jedoch löst die Positioniereinheit des großen und schweren Kameraroboters MI-NIMAN IV bei jeder Bewegung zur Nachjustage der Kameraposition erhebliche Erschütterungen auf der Roboterarbeitsfläche aus, die die Manövrierfähigkeit bzw. Genauigkeit der Positioniereinheiten der MiCRoN-Mikroroboter erheblich beeinträchtigen.

Um dies für zukünftige Manipulationsstationen zu vermeiden, muss für die nächsten Generationen von Mikromanipulationsstationen die Zielsetzung formuliert werden, nicht nur kleine drahtlose Mikroroboter mit Endeffektoren zur Manipulationsdurchführung einzusetzen, sondern zusätzlich auch Mikroroboter mit einem Kamerasystem zur Prozessbeobachtung auszustatten. Allerdings verschärfen sich hierdurch unmittelbar auch die Anforderungen an ein drahtloses Mikroroboter-Kommunikationssystem: Selbst bei Einsatz von Videokompressionsverfahren würde

sich das zu übermittelnde Datenaufkommen erheblich steigern. Um dennoch nicht den bei der IR-Kommunikation systemimmanenten Vorteil der Lokalität, d. h. die Begrenzung auf einen lokal überschaubaren Wirkbereich, einzubüßen, ergäbe sich hierdurch unmittelbar die Forderung nach höheren Bruttodatenraten für den (globalen) IR-Kommunikationskanal. Demzufolge wäre das Kommunikationssystem, insbesondere der *IRC*, um weitere IR-Hochgeschwindigkeitsmodi zu ergänzen. Zusätzlich müssten das Kommunikationsprotokoll und die FIFOs des *IRC*s (insbesondere das *IRC*-Sende-FIFO) an das vergrößerte Datenvolumen angepasst werden, auch wenn dies gemäß [BBV00] zulasten kurzer Turnaround-Zeiten gehen sollte, und zudem auch noch die *IRC*-Herstellungskosten aufgrund der größeren Dual-Port-RAMs ansteigen würden.

In einem ersten Schritt könnte der vom IrDA-Konsortium verabschiedete Übertragungsmodus VFIR mit einer Bruttodatenrate von 16 Mbit/s zusätzlich in das IR-Kommunikationsprotokoll mit aufgenommen werden. Das vom Kommunikationssystem unterstützte Transceivermodul TFDU8108 kann bereits die für VFIR spezifizierten IR-Pulse mit einer Nominalpulslänge von 41,7 ns verarbeiten. Daher müssten hauptsächlich die Sende- und Empfangseinheiten von *IRC* und Basisstation ROBOCOMM um entsprechende (Un-)Wrapper erweitert werden. Allerdings wäre insbesondere für den VFIR-Unwrapper eine Erhöhung des Arbeitstaktes auf mindestens 72 MHz (besser 96 MHz) erforderlich. Um den hierdurch sich für den *IRC* zusätzlichen ergebenden dynamischen Energiebedarf noch überschaubar zu halten, wird – in Ergänzung zu der oben bereits angesprochenen dynamischen Taktanpassungsschaltung für die *IRC*-CPU – die Entwicklung einer PLL vorgeschlagen, um aus dem spezifizierten 40 MHz-Taktsignal den für den VFIR-Unwrapper benötigten Takt zu erzeugen. Alternativ könnte der gesamte *IRC* mit einem schnelleren Quarzoszillator mit 72 MHz oder gar 96 MHz betrieben werden, dann allerdings wären sowohl für die *IRC*-CPU als auch sämtliche (Un-)Wrapper neue Taktgeneratorschaltungen zu entwerfen.

In einem zweiten Schritt könnten weitere effiziente IR-Übertragungsverfahren, wie beispielsweise in [Lüf05] vorgestellt, implementiert werden, um bis zur Verabschiedung des UFIR-Standards (mit Datenraten bis 100 Mbit/s), die derzeit durch kommerzielle Transceivermodule gegebenen Übertragungsmöglichkeiten weitestgehend auszuschöpfen.

Schließlich sollte im Sinne einer weiteren Platzersparnis die signalverarbeitende Elektronik des Transceivermoduls (einschließlich Verstärkerschaltung und Umgebungslichtunterdrückung) mit dem *IRC* innerhalb eines ASIC-Designs zusammengefasst werden. In diesem Zusammenhang könnten einerseits die Schaltungskomponenten des Transceivermoduls angepasst werden: Beispielsweise ließe sich die Umgebungslichtunterdrückung auf die in einer Mikromanipulationsstation zu erwartenden Lichtverhältnisse abstimmen, um hierdurch die Empfangsempfindlichkeit weiter zu steigern. Andererseits könnte durch die Verknüpfung von Transceivermodulelektronik und *IRC* die derzeit eingesetzte harte Detektion der IR-Pulsfolgen durch genauere und empfindlichere Verfahren ersetzt werden: Auf diese Weise könnte entweder die Sendeleistung bei gegebener Datenmenge weiter reduziert werden, oder aber es lassen sich noch schnellere Übertragungsverfahren, die eine höhere Empfangssensitivität erfordern, realisieren.

8.2.2 Analog-Frontend

Die gegenwärtig für das Mikroroboter-Kommunikationssystem vorgesehenen Transceivermodulalternativen TFDU6108 und TFDU8108 zur Realisierung des auf den Mikrorobotern einzusetzenden Analog-Frontends erfüllen zwar die elektrischen und informationstechnischen Anforderungen, weisen aber mit ca. 0,182 cm³ noch einen sehr hohen Volumenbedarf auf, wenn man davon ausgeht, dass für zukünftige Mikroroboterrealisierungen ein Bauvolumen von einem Kubikzentimeter und weniger angestrebt wird.

Daher ist die Entwicklung der kommerziell erhältlichen Transceivermodule aufmerksam zu beobachten, um – im Sinne der für die Mikroroboter essentiellen Anforderungen an Modulgröße, unterstützte IR-Modi (Datenraten) und erforderliche Leistungsaufnahme – das für die jeweilige Mikrorobotergeneration optimale Analog-Frontend auszuwählen. Insbesondere im Bereich der Bauformen zeichnen sich hier interessante Alternativen ab: Betrachtet man z. B. die Gehäusevolumina der Transceivermodule TFBS6614 und TFBS6712 (mit (0,071 cm³ bzw. 0,035 cm³) von VISHAY SEMICONDUCTORS, so zeigen diese,

im Vergleich zu den derzeit für das Kommunikationssystem ROBOCOMM eingesetzten Transceivermodulen, eine Volumenreduktion um 61 Prozent bzw. für TFBS6712 sogar 81 Prozent. Allerdings unterstützen diese bisher weder FIR oder VFIR, noch besitzen sie eine SITC-Schnittstelle. Aber es ist wahrscheinlich nur eine Frage der Zeit, bis sämtliche für das Analog-Frontend essentiellen Forderungen von einem noch kleineren Transceivermodul erfüllt werden.

Alternativ kann auch über eine Neuentwicklung des Analog-Frontends zur Realisierung höherer Datenraten nachgedacht werden. Gegenwärtige miniaturisierte IR-Emitter und PIN-Dioden unterstützen ohne weiteres Bandbreiten von 20 MHz und mehr. Jedoch gestaltet sich eine proprietäre Realisierung des Analog-Frontends als recht aufwändig, da hierbei Konzentratoren und IR-Filter ebenso zu berücksichtigen sind, wie schaltungstechnische Maßnahmen zur Umgebungslichtunterdrückung oder zur Begrenzung des IR-Sendestroms.

8.2.3 Weitere Einsatzszenarien

Primär für den multifunktionalen Mikrorobotereinsatz innerhalb von Mikromanipulations-Tischstationen ausgelegt, zeichnet sich das Kommunikationssystem durch standardisierte Schnittstellen sowohl für die roboterseitige Anbindung (Mikroroboterelektronik) als auch den Anschluss an die Manipulationssteuerungs- und Kontrolleinheit aus. Hierdurch bietet sich ein hohes Maß an Flexibilität für aktuelle aber auch zukünftige Einsatzszenarien.

Gegenwärtige mikroroboterbasierte Mikromanipulationssysteme werden nicht selten innerhalb der Vakuumkammer eines Rasterelektronenmikroskops realisiert, um den Manipulationsprozess hoch aufgelöst beobachten zu können. Allerdings sind die bisher eingesetzten Mikroroboter allesamt kabelgebunden und anhand ihrer Größe den Miniaturrobotern, wenn nicht sogar Mesoskalarobotern zuzuordnen (siehe hierzu Kapitel 2.4.3.2 bzw. den Anhang B.1.1). Aufgrund der meist nur geringen Größe der Vakuumkammern scheinen drahtlose, mobile Mikroroboter geradezu prädestiniert für den REM-Einsatz. Das infrarotbasierte Mikroroboter-Kommunikationssystem ROBOCOMM könnte in diesem Zusammenhang gute Dienste leisten, da IR-Licht das Auflösungsvermögen von insbesondere Sekundärelektronendetektoren nicht beeinflusst [Fat04].

Allerdings verhindert das bisher noch ungelöste Energiedilemma den REM-Einsatz von drahtlosen mobilen Mikrorobotern: Mikrobatterien liefern für die gegenwärtig verwendeten piezoaktorischen Antriebssysteme zu wenig Energie, induktive Energieversorgungssysteme könnten zwar genügend Energie liefern, würden aber mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit den Elektronenstrahl und damit das Auflösungsvermögen des REMs negativ beeinflussen. Daher bleibt der Einsatz des Mikroroboter-Kommunikationssytems derzeit auf Mikromanipulationsstationen beschränkt, die den durch mobile, drahtlose Mikroroboter ausgeführten Manipulationsprozess entweder mit einem Lichtmikroskop oder mit Hilfe verteilter Kamerasysteme beobachten.

Das Kommunikationssystem ist auch für zukünftige, aufgabenorientierte oder vollautomatisierte Mikromanipulationsstationen mit drahtlosen, mobilen Mikrorobotern der übernächsten Generation noch durchaus interessant: Intelligente, zu Inferenzprozessen geeignete Service-Mikroroboter erhalten dann per IR-Kommunikation nur noch eine Umschreibung der nächsten auszuführenden Manipulationsaufgaben. Diese würden dann von den Mikrorobotern, sich selbstständig organisierend, in Kooperation durchgeführt werden. Weiterhin könnten Statusmeldungen, z .B. bzgl. der Funktionsgruppen der Roboterkomponenten, zyklisch per IR-Verbindung abgefragt werden, um einerseits den Bediener der Manipulationsstation ständig über die Leistungsfähigkeit der einzelnen Roboter in Kenntnis zu setzen und andererseits, im Fall eines Defektes, selbstständig einen Techniker oder gar Service-Roboter für die Reparatur zu beauftragen.

Weiterhin ist das infrarotbasierte Kommunikationssystem auch gut vorstellbar für ein Mikromanipulationssystem mit mehreren hierarchisch organisierten Roboterclustern. Jedes Cluster setzt sich dabei aus einem Mesoskala- oder großen Miniaturroboter als Master und mehreren kubikzentimeterkleinen Mikrorobotern (Slaves), die letztendlich die gewünschten Mikromanipulationen durchführen, zusammen. Der Masterroboter verfährt die Mikroroboter in einer Art Huckepackverfahren zunächst an eine geeignete Startposition – diese könnte von einer übergeordneten Prozessüberwachungsstation inklusive einer Beschreibung der durchzuführenden Manipulationsvorgänge beispielsweise per Funkverbindung (Bluetooth, WLAN) übermittelt werden, da die Datenübertragung zum Masterroboter an dieser Stelle nicht unbedingt deterministisches Echtzeitverhalten aufweisen muss. Nach Erreichen der Startposition werden die Mikroroboter entsandt, um die geforderten Mikromanipulationsschritte durchzuführen. Der z. B. mit einem leistungsfähigen Prozessorsystem (PC104, etc.) ausgestattete Mesoskalaroboter würde hierbei einerseits die Steuerung der Mikroroboter übernehmen und könnte bei entsprechender Gestaltung auch zugleich als globales Sensorsystem fungieren. Zusätzlich könnten mobile lokale Sensorsysteme die Prozessüberwachung unterstützen. Hier könnte das in dieser Arbeit entwickelte Kommunikationssystem die mobilen Mikroroboter über einen globalen IR-Kommunikationskanal an den Masterroboter anbinden. Bei ausreichender Kapazität des IR-Übertragungskanals könnten zudem auch die mobilen lokalen Sensorsysteme bedient werden. Die IR-Kommunikation böte hierbei den Vorteil, dass Daten nur über einen lokal überschaubaren Wirkungsbereich transferiert werden würden. Eine ungewollte Beeinflussung eines benachbarten mobilen Mikroroboterclusters wäre dadurch sicher zu vermeiden. Das Kommunikationssystem ROBOCOMM könnte hierbei in weiten Bereichen unverändert Einsatz finden. Die IRCs wären ohne Modifikationen in die Mikroroboterelektronik integrierbar. Die Hardware des Miniaturroboters müsste um eine FPGA-Platine zur Umsetzung des IR-Protokolls inkl. Multiempfängerbetriebs ergänzt werden. Über die USB-Schnittstelle böte sich zudem eine einfache Anbindungsmöglichkeit an das Prozesssystem des Mesoskalaroboters an. Aufgrund des modularen Aufbaus des FPGA-Designs und dank der Realisierung als USB-Composite-Gerät ließe sich darüber hinaus eine weitere USB-Function zur Realisierung der Funkverbindung per Bluetooth oder WLAN mit überschaubarem Aufwand innerhalb der "mobilen" Kommunikationszentrale realisieren.

Literaturverzeichnis

- [AF01] AOYAMA, H. UND FUCHIWAKI, O.: Flexible micro-processing by multiple micro robots in SEM. Proceedings zu IEEE Int. Conference on Robotics & Automation (ICRA), Seoul, Korea, 2001, S. 3429-3434.
- [AH99] AOYAMA, H. UND HAYASHI, A.: Multiple Micro Robots for Desktop Precise Production. Proceedings zu 1st Int. Conference of European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, Bremen, 1999, Vol. 1, S. 60-63.
- [AKB96] AUDEH, M.D.; KAHN, J.M. UND BARRY, J.R.: Performance of Pulse-Position Modulation on Measured Non-Directed Indoor Infrared Channels. IEEE Transactions on Communications, Vol. 44, Nr. 6, Juni 1996, S. 654-659.
- [Ams06a] AUSTRIAMICROSYSTEMS: *Standardzellen Technologie HIT-KIT 3.51*. Austriamicrosystems AG, Österreich, http://asic.austriamicrosystems.com/hitkit/index.html, zuletzt besucht im Mai 2006.
- [Ams06b] AUSTRIAMICROSYSTEMS: AMS Memory Generation. Austriamicrosystems AG, Österreich, http://asic.austriamicrosystems.com/databooks/digital/index.html, zuletzt besucht im Mai 2006.
- [Ams06c] AUSTRIAMICROSYSTEMS: *Memory Compiler for Dual Port RAM in 0.35 µm CMOS (C35)*. Austriamicrosystems AG, Österreich, http://asic.austriamicrosystems.com/databooks/digital/index.html, zuletzt besucht im Mai 2006.
- [And01] ANDERSON, D.: Universal Serial Bus System Architecture. Second Edition, Addison Wesley Professional, 2001.
- [Aoy98] AOYAMA, H.: *Precise Miniature Robots and Desktop Flexible Production*. Proceedings zu Int. Workshop on Microfactories, Tsukuba, Japan, 1998, S. 145-156.
- [ATST99] AOYAMA, H.; TADOKORO, S.; SHIGENO, T. UND TAKAYUKI, O.: Automatic Precise Micro-Drilling System by Distributed Insect Robots. Proceedings zu 14th ASPE Annual Meeting, Monterey, CA, USA, 1999, S. 283-286.
- [Avn02] AVNET DESIGN SERVICES: *Xilinx Virtex-II Development Kit User's Guide*. Avnet Incorporation. http://www.ads.avnet.com, November 2002.
- [Avn03] AVNET: Xilinx Virtex-II Development Kit Data Sheet. Avnet Incorporation. http://www.ads.avnet.com, Januar 2003.
- [Axe01] AXELSON, J.: USB Complete: Everything You Need to Develop Custom USB Peripherals. Second Edition, Lakeview Research, Madison, USA, 2001.

[Axe05]	AXELSON, J.: USB Complete: Everything You Need to Develop Custom USB Pe- ripherals. Third Edition, Lakeview Research, Madison, USA, 2005.
[BAE+02]	BYRNE, R.H.; ADKINS, D.R.; ESKRIDGE, S.E.; HARRINGTON, J.J.; HELLER, E.J. UND HUR- TADO, J.E.: <i>Miniature mobile robots for plume tracking and source localization</i> <i>research</i> . Journal of Micromechatronics, Vol. 1, Nr. 3, VSP, 2002, S. 253-261.
[Bar05]	BARTELS, O.: <i>UWB: Störer oder Helfer</i> . Heise mobil. www.heise.de/mobil/arti- kel/57048, März 2005, Seite zuletzt besucht Januar 2006.
[BBV00]	BARKER, P.; BOUCOUVALAS, A.C. UND VITSAS, V.: <i>Performance modelling of the IrDA infrared wireless communications protocol.</i> Int. Journal of Communication Systems, Vol. 13, Nr. 7, November 2000, S. 589-604.
[BC98]	BREGUET, JM. UND CLAVEL, R.: <i>Stick and Slip Actuators: design, control, per-formances and applications</i> . Proceedings zu IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, Japan, November 1998, S. 89-95.
[BDL+04]	BERGANDER, A.; DRIESEN, W.; LAL, A.; VARIDEL, T.; MEIZOSO, M.; BLEULER, H. UND BREGUET; JM.: <i>Position Feedback for Microrobots based on Scanning Probe</i> <i>Microscopy</i> . Proceedings zu IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Sendai, Japan, 2004, Vol. 2, S. 1734-1739.
[BDVB03]	BERGANDER, A.; DRIESEN, W.; VARIDEL, T. UND BREGUET, JM.: Development of <i>Miniature Manipulators for Applications in Biology and Nanotechnologies</i> . Proceedings zu Workshop "Microrobotics for Biomanipulation", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IEEE/RSJ IROS 2003), Las Vegas, USA, Oktober 2003, S. 11-35.
[BDV+04]	BERGANDER, A.; DRIESEN, W.; VARIDEL, T.; MEIZOSO, M. UND BREGUET, JM.: <i>Mo-bile cm³-microrobots with tools for nanoscale imaging and micromanipula-tion</i> . Proceedings zu International Conference Mechatronics & Robotics (MechRob), Aachen, Germany, September 2004, S. 1041-1047.
[Ber03]	BERGANDER, A.: Control, wear testing & integration of stick-slip microposition- ing. Thèse Nr. 2843, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur STI, Section de microtechnique, IPR (Institut de production et robotique), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Schweiz, 2003.
[BF99]	BÜRKLE, A. UND FATIKOW, S.: Computer vision based control system of a piezo- electric microrobot. Proceedings zu Computational Intelligence of Modelling, Control and Automation (CIMCA): Intelligent Image Processing, Data Analysis & Information Retrieval, IOS Press, Wien, Österreich, 1999, S. 104-109.
[Blu01]	BLUETOOTH SIG: Specification of the Bluetooth System, Version 1.1. http://www.bluetooth.com, Februar 2001.

[Blu03] BLUETOOTH SIG: Specification of the Bluetooth System, Master Table of Contents & Compliance Requirements, incl. Core Package version 1.2. http://www.bluetooth.com, November 2003.

- [BMR04] BREGUET, J.-M.; MAZEROLLE, S. UND RABE, R.: *The laboratory in scanning electron microscope concept: Lab-in-SEM.* Proceedings zu International Conference Mechatronics & Robotics (MechRob), Aachen, Germany, September 2004, S. 1362-1367.
- [BPL+05] Brufau, J.; Puig-Vidal, M.; López-Sánchez, J.; Samitier, J.; Driesen, W.; Breguet, J.-M.; Snis, N.; Simu, U.; Johansson, S.; Gao, J.; Velten, T.; Seyfried, J.; Estaña, R. und Wörn, H.: *MICRON: Small Autonomous Robot for Cell Manipulation Applications*. Proceedings zu IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Barcelona, Spanien, 2005, S. 856-861.
- [BPNP02] BIELER, T.; PERROTTET, M.; NGUYEN, V. UND PERRIARD, Y.: Contactless Power and Information Transmission. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, Nr. 5, September/Oktober 2002, S. 1266-1272.
- [BS02] BAHAI, A.R.S. UND SALTZBERG, B.R.: *Multi-Carrier Digital Communications, Theory and Applications of OFDM*. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moskau, 2002.
- [BWBK02] BROWN, JR., H.B.; WEGHE, J.M.V.; BERERTON, C.A. UND KHOSLA, P.K.: Millibot Trains for Enhanced Mobility. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 7, Nr. 4, Dezember 2002, S. 452-461.
- [Cap03] CAPRARI, G.: Autonomous Micro-Robots: Applications and Limitations. Dissertation, Thèse n° 2753, Faculté Sciences et Techniques de l'Ingénieur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Schweiz, 2003.
- [Car02] CARRUTHERS, J.B.: *Wireless Infrared Communications*. J.G. Proakis (Hrsg.): Encyclopedia of Telecommunications, John Wiley, New York, 2002.
- [CES02] CAPRARI, G.; ESTIER, T. UND SIEGWART, R.: *Fascination of Down Scaling Alice the Sugar Cube Robot*. Journal of Micro-Mechatronics, VSP, Utrecht, Vol. 1, Nr. 3, 2002, S. 177-189.
- [CFK97] CAO, Y.U.; FUKUNAGA, A.S. UND KAHNG, A.: Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. Autonomous Robots, Kluwer Academic Publishers, Vol. 4, Nr. 1, März 1997, S. 7-27.
- [CLD+05] CASANOVA, R.; LACORT, J.; DIEGUEZ, A.; ARBAT, A.; PUIG, M.; SAMITIER, J.; NIERLICH, M.; STEINMETZ, O. UND SCHOLZ, O.: A specific integrated controller for nanomicroscopy and cellular manipulation. Proceedings zu IEEE/CAS International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Kobe, Japan, Mai 2005, Vol. 1, S. 141-144.
- [CDL+05a] CASANOVA, R.; DIEGUEZ, A.; LACORT, J.; ARBAT, A.; SAMITIER, J.; NIERLICH, M. UND STEINMETZ, O.: A Digital Control Circuit for a Biomedical Microrobot. Proceedings zu IEEE IDAACS 2005, Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Sofia, Bulgarien, September 2005, S. 381-387.
- [CDL+05b] CASANOVA, R.; DIEGUEZ, A.; LACORT, J.; ARBAT, A.; PUIG-VIDAL, M.; SAMITIER, J.; NIERLICH, M. UND STEINMETZ, O.: A monolithic control circuit for a 1cm³ microrobot for biological experiments. IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC), Hsinchu, Taiwan, November 2005, S. 93-96.

[CMS+04]	CASANOVA, R.; MIRIBEL-CATALA, P.; SAIZ, A.; PUIG-VIDAL, M. UND SAMITIER, J.: <i>Design of a step-up 400 mW@ 40 V charge-pump for microrobotics applications in a 100 V-0.7 /spl mu/m intelligent interface technology</i> . Proceedings zu IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Ajaccio, Frankreich, Mai 2004, Vol. 2, S. 1227-1229.
[Col05]	COLIBRYS: <i>MEMS capacitive accelerometers - MS8000 Series Product Descrip- tion</i> . Colibrys (Switzerland) Ltd., http://www.colibrys.com/e/page/312, zuletzt besucht im November 2005.
[Cou97]	Соисн, II, L.W.: <i>Digital and Analog Communication Systems</i> . 5. Ausgabe, Prentice Hall, Inc., 1997.
[CRP97]	CODOUREY, A.; RODRIGUEZ, M. UND PAPPAS, I.: A task-oriented teleoperation sys- tem for assembly in the Microworld. Proceedings zu Int. Conference on Ad- vanced Robotics (ICAR), Monterey, USA, 1997, S. 235-240.
[CS05]	CAPRARI, G. UND SIEGWART, R.: <i>Mobile Micro-Robots Ready to Use: Alice</i> . Proceedings zu IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Edmonton, Canada, 2005, S. 3295-3300.
[Cum01]	CUMMINGS, C.E.: Synthesis and Scripting Techniques for Designing Multi- Asynchronous Clock Designs. Proceedings zu SNUG-2001, San Jose, CA, USA, 2001, S. 2-4.
[Cyb06]	CYBERBOTICS: Webots 5, fast prototyping and simulation of mobile robots. Cyberbotics Ltd., http://www.cyberbotics.com, zuletzt besucht Juni 2006.
[DVBB03]	DRIESEN, W.; VARIDEL, T.; BERGANDER, A. UND BREGUET, JM.: <i>Energy Consump-</i> <i>tion of Piezoelectric Actuators for Inertial Drives</i> . Proceedings zu IEEE Interna- tional Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, Japan, Oktober 2003, S. 51-58.
[Dei05]	DEICKE, F.: <i>IPMS_IRHSP - IrDA Controller</i> . Telefonischer Ansprechpartner des Fraunhofer-Institut Photonische Mikrosysteme IPMS, Telefonat August 2005.
[DEM+01]	DARIO, P.; EISINBERG, A.; MENCIASSI, A.; FRANCABANDIERA, P.; STEFANINI, C.; SCA- LARI, G. UND CARROZZA, M.C.: <i>A micro-electro discharge machined, superelastic</i> <i>alloy microgripper for micromanipulation</i> . Proceedings zu EUSPEN'S 2 nd Inter- national Conference, Turin, Italien, Mai 2001, S. 852-855.
[Dre91]	DREXLER, K.E.; PETERSON, C. UND PERGAMIT, G.: Unbounding the future: The Nanotechnology Revolution. William Morrow, New York, 1991.
[Dre92]	DREXLER, K.E.: Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Com- putation. John Wiley & Sons, New York, 1992.
[DLM+03]	DONALD, B.R.; LEVEY, C.G.; MCGRAY, C.D.; RUS, D. UND SINCLAIR, M.: <i>Power de-</i> <i>livery and locomotion of untethered microactuators</i> . Journal of Microelectro- mechanical Systems, Vol. 12, Nr. 6, Dezember 2003, S. 947-959.

- [DJ97] DUNLOP, G.R. UND JUFER, M.: Design of magnetic steering sensors for a serpentine driverless vehicle. Proceedings zu IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Boston, USA, 1997, S. 385-390.
- [DVC+92] DARIO, P.; VALLEGGI, R.; CARROZZA, M.C.; MONTESI, M.C. UND COCCO, M.: Microactuators for microrobots: a critical survey. Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 2, Nr. 3, September 1992, S. 141-157.
- [EMF05] EMF-SYSTEMS: Produktkatalog mikrotechnische Bausteine und miniaturisierte Systeme. emf-systems GmbH, http://www.efm-systems.de, Vol. efm-ep-0105, Januar 2005, S. 3-21.
- [EMKS99] EBEFORS, T.; MATTSSON, J.; KÄLVESTEN, E. UND STEMME, G.: A Walking Silicon Micro-robot. Proceedings zu 10th Int. Conference on Solid-State Sensors and Actuators (TRANSDUCERS), Sendai, Japan, Juni 1999, S. 1202-1205.
- [EMM+01] EISINBERG, A.; MENCIASSI, A.; MICERA, S.; CAMPOLO, D.; CARROZZA, M.C. UND DARIO, P.: *PI force control of a microgripper for assembling biomedical microdevices*. IEE Proceedings Circuits, Devices & Systems, Vol. 148, Nr. 6. Dezember 2001, S. 348-352.
- [EPR+03] EDD, J.; PAYEN, S.; RUBINSKY, B.; STOLLER, M.L. UND SITTI, M.: Biomimetic propulsion for a swimming surgical micro-robot. Proceedings zu IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robotics and Systems, Las Vegas, Nevada, USA, 2003, Vol. 3, S. 2583-2588.
- [Eur96] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG, CEN: Industrieroboter Wörterbuch, DIN EN ISO 8373. Brüssel, 1996.
- [EurO6a] EUROPRACTICE: *Europractice Services*. Gegründet durch EU Information Society Technologies (IST) Work Program. http://www.europractice.com/, zuletzt besucht im März 2006.
- [EurO6b] EUROPRACTICE-IC: Europractice IC Manufacturing Service. Austriamicrosystems Standardzellen. http://www.europractice-ic.com/standard_cell_libraries.php, zuletzt besucht im Mai 2006.
- [FA02a] FUCHIWAKI, O. UND AOYAMA, H.: Micromanipulation by miniature robots in a SEM Vacuum Chamber. Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, Nr.3, 2002, S. 221-226.
- [FA02b] FUCHIWAKI, O. UND AOYAMA, H.: Piezo based micro robot for microscope instrument. Proceedings zu 6th Int. Conference on Mechatronics Technology (ICMT), Kitakyushu, Japan, Oktober 2002, S. 499-504.
- [Fat00] FATIKOW, S.: *Mikroroboter und Mikromontage*. B.G. Teubner Stuttgart Leipzig, 2000.
- [Fat04] FATIKOW, S.: *Mikrorobotik II*. Vorlesungsskript, 2. Auflage 2004, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fakultät 2, Department für Informatik, Abteilung für Mikrorobotik und Regelungstechnik (AMiR), 2004.

- [Fea95] FEARING, R.S.: *Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling*. Proceedings zu Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Pittsburgh, USA, 1995, Vol. 2, S. 212-217.
- [FFSB99] FAHLBUSCH, S.; FATIKOW, S.; SEYFRIED, J. UND BÜRKLE, A.: Flexible Microrobotic System MINIMAN: Design, Actuation Principle and Control. Proceedings zu IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Atlanta, Georgia, USA, 1999, S. 156-161.
- [FGM+99] FLOREANO, D.; GODJEVAC, J.; MARTINOLI, A.; MONDADA, F. UND NICOUD, J.-D.: Design, Control, and Applications of Autonomous Mobile Robots. S.G. Tzafestas (Hrsg.): Advances in Intelligent Autonomous Agents, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston, 1999, S. 159-186.
- [FhG05] FHG-IPMS: *IPMS_IRHSP IrDA Controller*. Fraunhofer Institut Photonische Mikrosysteme, User Manual, Ver. 0.1, Dresden, Deutschland, Februar/März 2005.
- [Fin02] FINKENZELLER, K.: *RFID-Handbuch*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2002.
- [FKAM94] FUKUDA, T.; KAWAMOTO, A.; ARAI, F. UND MATSUURA, H.: Mechanism and Swimming Experiment of Micro Mobile Robot in Water. Proceedings zu International Conference on Robotics & Automation (ICRA), 1994, S. 814-819.
- [FMSA99] FUKUDA, T.; MIZOGUCHI, H.; SEKIYAMA, K. UND ARAI, F.: Group Behavior Control for MARS (Micro Autonomous Robotic System). Proceedings zu IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Detroit, MI, USA, Mai 1999, S. 1550-1555.
- [FN94] FUKUDA, T. UND NAKAGAWA, S.: Dynamically reconfigurable robotic system. Journal of Robotics and Mechatronics, Fuji Technology Press Ltd., Vol. 6, Nr. 5, 1994, S. 351-355.
- [For03] FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE IN DER HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT.: Wissenschaftliche Berichte - Ergebnisbericht über Forschung und Entwicklung 2003. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Angewandte Informatik, 2003, ISSN 0948-4310, S. 16.
- [FSF+99] FATIKOW, S.; SEYFRIED, J.; FAHLBUSCH, S.; BÜRKLE, A. UND SCHMOECKEL, F.: Entwicklung flexibler Mikroroboter zur Handhabung von Mikroobjekten. Tagungsband der 4. Chemnitzer Fachtagung "Mikromechanik & Mikroelektronik", Chemnitz, Deutschland, 1999, S. 138-143.
- [FR97] FATIKOW, S. UND REMBOLD, U.: *Microsystem Technology and Microrobotics*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
- [FSF+00] FATIKOW, S.; SEYFRIED, J.; FAHLBUSCH, S.; BÜRKLE, A. UND SCHMOECKEL, F.: A flexible micro-robot-based microassembly station. Journal of Intelligent & Robotic Systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Vol. 27, 2000, S. 135-169.
- [Gao05a] GAO, J.: Device and Procedure for Inductive Energy Transfer. Deutschland Patent, Nr. 10 2004 027 847.4, 2005.

- [Gao05b] GAO. J.: Inductive Power Transmission for Untethered Micro-Robots. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON), North Carolina, USA, November 2005, S. 6 ff.
- [GB79] GFELLER, F.R. UND BAPST, U.H.: Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. IEEE Proceedings, Vol. 67, Nr. 11, November 1979, S. 1474-1486.
- [Gra59] GRASSE, P.-P.: La Reconstruction du nid et les Coordinations Inter-Individuelles chez Bellicositermes Natalensis et Cubitermes sp. La theorie de la stigmergie: essai d'interpretation du comportement des termites constructeurs, Insectes Sociaux, 1959.
- [Gra06] GRABOWSKI, B.: *Small Robot Classes*. http://www.andrew.cmu.edu/user/rjg/ webrobots/small_robots_metric.html, zuletzt besucht im Mai 2006.
- [GGW03] GANZ, A.; GANZ, Z. UND WONGTHAVARAWAT, K.: *Multimedia Wireless Networks: Technologies, Standards, and QoS.* Prentice Hall Professional Technical Reference, New Jersey, 2003.
- [GH00] GHASSEMLOOY, Z. UND HAYES, A.R.: *Digital pulse interval modulation for IR communication systems a review*. Int. Journal of Communication Systems, Vol. 13, 2000, S. 519-536.
- [GNC+01] GUTIERREZ, J.A.; NAEVE, M.; CALLAWAY, E.; BOURGEOIS, M.; MITTER, V. UND HEILE, B.: IEEE802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks. IEEE Network, Vol. 15, Nr. 5, September/Oktober 2001, S. 12-19.
- [GNPK00] GRABOWSKI, R.; NAVARRO-SERMENT, L.E.; PAREDIS, C.J.J. UND KHOSLA, P.K.: *Heterogeneous Teams of Modular Robots for Mapping and Exploration*. Autonomous Robots, Vol. 8, Nr. 3, Juni 2000, S. 293-308.
- [GSN05] GREMINGER, M.A.; SEZEN, A.S. UND NELSON, B.J.: A four degree of freedom *MEMS microgripper with novel bi-directional thermal actuators*. Proceedings zu Int. IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Edmonton, Alberta, Kanada, 2005, S. 2814-2819.
- [Haa00] HAARTSEN, J.C.: *The Bluetooth Radio System*. IEEE Personal Communications Magazine, Vol. 7, Februar 200, S. 28-36.
- [Har03] HARTING, D.: *Die Strategie der Vernetzung.* Technologiemarketing, IVAM NRW e.V., Dortmund, Mai 2003, S. 24-27.
- [HBP03] HOLLAR, S.; BERGBREITER, S. UND PISTER, K.S.J.: *Bidirectional Inchworm Motors and Two-DOF Robot Leg Operation*. Int. Conference on Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, USA, Juni 2003, Vol. 1, S. 262-267.
- [Hei03a] HEILE, B.: *The ZigBee Alliance*. Präsentation des ZigBee Alliance Chairman Bob Heile, Open House, Seattle, Mai 2003.

- [Hei03b] HEILE, B.: *The ZigBee Alliance*. Präsentation des ZigBee Alliance Chairman Bob Heile, Open House, Berlin, Juni 2003.
- [HFBP03] HOLLAR, S.; FLYNN, A.; BELLEW, C. UND PISTER, K. S. J.: Solar powered 10 mg silicon robot. Proceedings zu IEEE Int. Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Kyoto, Japan, Januar 2003, S. 706-711.
- [HHH01] HIRT, W.; HASSNER, M. UND HEISE, N.: *IrDA-VFIr (16 Mb/s): Modulation Code and System Design*. IEEE Personal Communications, Vol. 8, Nr. 1, Februar 2001, S. 58-71.
- [HHL01] HUMBLE, P.H.; HARB, J.N. UND LAFOLLETTE, R.: *Microscopic nickel-zinc batteries for use in autonomous microsystems*. Journal of the Electrochemical Society, Vol. 148, Nr. 12, December 2001, S. 1357-1361.
- [HKKV98] HU, H.; KELLY, I.; KEATING, D. UND VINAGRE, D.: Coordination of Multiple Mobile Robots via Communication. Proceedings zu SPIE'98, Mobile Robots XIII Conference and Intelligent Transportation Systems, Boston, USA, November 1998, S. 94-103.
- [HWNC98] HEATLEY, D.J.T.; WISELY, D.R.; NEILD, I. UND COCHRANE, P.: *Optical Wireless: The story so far.* IEEE Communications Magazine, Vol. 36, Nr. 12, Dezember 1998, S. 72-74, 79-82.
- [IEEE97] IEEE: IEEE 802.11 standard for Local Area Networks. IEEE Press New York, 1997.
- [IEEE03] IEEE: IEEE 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). IEEE Computer Society, New York, USA, Oktober 2003.
- [IrDA96a] INFRARED DATA ASSOCIATION: IrDA Link Management Protocol (IrLMP). Version 1.1, Januar 1996, http://www.irda.org.
- [IrDA96b] INFRARED DATA ASSOCIATION: IrDA Serial Infrared Link Access Protocol (IrLAP). Version 1.1, Juni 1996, http://www.irda.org.
- [IrDA96c] INFRARED DATA ASSOCIATION: *Minimal IrDA Protocol Implementation (IrDA Lite)*. Version1.0, November 1996, http://www.irda.org.
- [IrDA00] INFRARED DATA ASSOCIATION: IrDA Recommended Serial Interface for Transceiver Control. Version 1.0a, März 2000, http://www.irda.org.
- [IrDA01] INFRARED DATA ASSOCIATION: IrDA Serial Infrared Physical Layer Specification. Version 1.4, Mai 2001, http://www.irda.org.
- [Iri06] IRIDIUM SATELLITE LLC.: *Satellitentelefonie*. http://www.iridium.com, zuletzt besucht Mai 2006.
- [ITSM02] IKEHARA, T.; TANAKA, M.; SHIMADA, S. UND MATSUDA, H.: *Optically driven actuator using photo-induced phase-transition polymer*. Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 96, 2002, S. 239-243.

- [IVAM04] IVAM FACHVERBAND: Innovative Technik Anwendungen aus Nordrhein-Westfalen. IVAM - Fachverband für Mikrotechnik, Dortmund, 9. Jahrgang, Nr. 27, August 2004, S. 13.
- [JA01] JANTAPREMJIT, P. UND AUSTIN, D.: Design of modular self-reconfigurable robot. In Proceedings zu Australian Conference on Robotics & Automation (ACRA), Sydney, Australien, November 2001, S. 38-43.
- [JCG+96] JUFER, M.; CARDOLETTI, L.; GERMANO, P.; ARNET, B.; PERROTTET, M. UND MACABREY, N.: Induction Contactless Energy Transmission System for an Electric Vehicle. Proceedings zu International Conference on Electrical Machines, Vigo, Spanien, September 1996, Vol. 2, S. 343-347.
- [Jun04] JUNGNICKEL, U.: *Miniaturisierte Positioniersysteme mit mehreren Freiheitsgraden auf der Basis monolithischer Strukturen*. Dissertation, TU Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, 2004.
- [Kte05] K-TEAM SA CORP., LAUSANNE, SCHWEIZ: *Khepera II Robot Base*. http://www.k-team.com/robots/khepera/base.html, zuletzt besucht im Dezember 2005.
- [KB97] KAHN, J.M. UND BARRY, J.R.: *Wireless infrared communications*. Proceedings zu IEEE, Vol. 85, Nr. 2, Februar 1997, S. 265-298.
- [KBD+03] Kratochvil, B.; Burt, I.T.; Drenner, A.; Goerke, D.; Jackson, B.; McMillen, C.; Olson, C.; Papanikolopoulos, N.; Pfeifer, A.; Stoeter, S.; Stubbs, K.; und Waletzko, D.: *Heterogeneous implementation of an adaptive robotic sensing team.* Proceedings zu IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Taipei, Taiwan, September 2003, S. 4264-4269.
- [KBHL99] KLADITIS, P.E.; BRIGHT, V.M.; HARSH, K.F. UND LEE, Y.C.: Prototype microrobots for micro positioning in a manufacturing process and micro unmanned vehicles. Proceedings zu IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Orlando, USA, Januar 1999, S. 570-575.
- [KC04] KOOPMAN, P. UND CHAKRAVARTY, T.: Cyclic redundancy code (CRC) polynomial selection for embedded networks. Proceedings zu International Conference on Dependable Systems and Networks, Florenz, Italien, Juli 2004, S. 145-154.
- [KCB00] KNOLL, A.; CHRISTALLER, T. UND BURGARD, W.: *Robotik.* G. Görz, C.-R. Rollinger, J. Schneeberger (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz, Oldenburg, 2000.
- [Kel03] KELM, H.-J.: USB 2.0. 2. aktualisierte Auflage, Franzis' Verlag GmbH, Poing, Deutschland, 2003.
- [Kna82] KNAURS: Wörterbuch der Synonyme. Lexikographisches Institut, München, Clausen & Bosse, Leck, 1982, S. 339.
- [KIOK97] KAWAKITA, S.; ISOGAI, T; OHYA, N. UND KAWAHARA, N.: Multi-Layered Piezoelectric Bimorph Actuator. Proceedings zu International IEEE Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, Japan, 1997, S. 73-78.
- [KK02] KRAL, A. UND KREFT, H.: *Wireless LANs Networker's Guide*. Markt+Technik, 1. Auflage, Dezember 2002.

- [Kow06] KOWALK, W.P.: CRC Cyclic Redundancy Check Analyseverfahren mit Bitfiltern. Fachbereich Informatik, Universität Oldenburg, 2006.
- [Krä03] KRÄMLING, A.: Kanalvergabe und Sendeleistungssteuerung bei HiperLAN/2. Dissertation, Wissenschaftsverlag Mainz, 2003.
- [Kri00] KRISHNAN, R.: *Method and apparatus for wireless powering and recharging*. GTE Internetworking Inc., USA patent, Nr. [6127799], Oktober 2000.
- [KSTF05] KORTSCHACK, A.; SHIRINOV, A.; TRÜPER, T. UND FATIKOW, S.: Development of mobile versatile nanohandling microrobots: design, driving principles, haptic control. Robotica, Vol. 23, 2005, S. 419-434.
- [KTA01] KURONITA, T.; TADOKORO, S. UND AOYAMA, H.: *Swarm control for automatic drilling operation by multiple micro robots*. Proceedings zu Australian Conference on Robotics and Automation (ACRA), Sydney, Australien, November 2001, S. p7-p12.
- [KYHN04] KRATOCHVIL, B.E., YESIN, K.B., HESS, V. UND NELSON, B.J.: Design of a Visually Guided 6 DOF Micromanipulator System for 3D Assembly of Hybrid MEMS. Proceedings zu. 4th Int. Workshop on Microfactories, Shanghai, China, Oktober 2004, S. 128-133.
- [KYD+98] KAHN, J.M.; YOU, R.; DJAHANI, P.; WEISBIN, A.G.; TEIK, B.K. UND TANG, A.: Imaging Diversity Receiver for High-Speed Infrared Wireless Communication. IEEE Communications Magazine, Vol. 36, Nr. 12, Dezember 1998, S. 88-94.
- [Lat00] LATUSKE, R.: USB (Universal Serial Bus), IEEE1394 (FireWire), IrDA (Infrared Data Association) und Bluetooth für embedded Systeme. ARS Software GmbH, München, http://www.ars2000.com, 2000.
- [Lat04] LATUSKE, R.: Bluetooth, ZigBee und IrDA. Vergleich und Industrieanwendungen. ARS Software GmbH, München, http://www.ars2000.com, 2004.
- [LCB+05] LACORT, J.; CASANOVA, R.; BRUFAU, J.; ARBAT, A.; DIEGUEZ, A.; NIERLICH, M.; STEINMETZ, O.; PUIG, M. UND SAMITIER, J.: An integrated controller for a flexible and wireless atomic force microscopy. J. F. Lopez, F. V. Fernandez, J. M. Lopez-Villegas, J. M. de la Rosa, (Hrsg.): VLSI Circuits and Systems II, Proceedings of SPIE Vol. 5837, Juni 2005, S. 321-328.
- [Lio05] LIONIX BV: *MATAS Modular lab-on-a-chip systems*. Lionix BV, Enschede, Niederlande, http://www.lionixbv.nl/microfluidics/matas.html, zuletzt besucht im Oktober 2005.
- [LK99] LEE, D.C.M. UND KAHN, J.M.: Coding and equalization for PPM on wireless channels. IEEE Transactions on Communications, Vol. 47, Nr. 2, Februar 1999, S. 255-260.
- [LKA97] LEE, D.C.; KAHN, J.M. UND AUDEH, M.D.: Trellis-Coded Pulse-Position Modulation for Indoor Wireless Infrared Communications. IEEE Transactions on Communications, Vol. 45, Nr. 9, September 1997, S. 1080-1087.

[LKP04] LIN, T.-H.; KAISER, W.J. UND POTTIE, G.J.: Integrated Low-Power Communication System Design for Wireless Sensor Networks. IEEE Communications Magazine, Dezember 2004, S. 142-150. [Lot05] LOT-ORIEL: Wärme-Kontroll-Filter. LOT-Oriel Gruppe Europa, http://www.LOT-Oriel.de, zuletzt besucht im Juni 2005. [Lüf05] LÜFTNER, T.: Edge Position Modulation for Wireless Infrared Communications. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, 2005. [Mal03] MALLICK, M.: Mobile and Wireless Design Essentials. Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana, USA, 2003. [Mar99] MARTINOLI, A.: Swarm Intelligence in Autonomous Collective Robotics: From Tools to the Analysis and Synthesis of Distributed Collective Strategies. Dissertation, Thèse Nr. 2069, Département d'Informatique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Schweiz, 1999. [Mat05] MATCH-X: Arbeitsgemeinschaft Match-X im VDMA. http://www.match-x.org, zuletzt besucht im Oktober 2005. [MB03] MARTEL, S. UND BAUMANN, G.: Infrared positioning and communication unit for a nanorobotics platform operating in a cold helium atmosphere. Proceedings zu IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IE-EE/RSJ IROS 2003), Las Vegas, USA, Oktober 2003, Vol. 2, S. 1876-1881. [MBL+01] MONTANE, E.; BOTA, S.A.; LOPEZ-SANCHEZ, J.; MIRIBEL-CATALA, P.; PUIG-VIDAL, M. UND SAMITIER, J.: Smart power integrated circuit for piezoceramic-based microrobot. Proceedings zu European Solid-Sate Circuits Conference (ESSCIRC), Sept. 2001, Villach, Österreich, S. 249-252. [MECD03] MENCIASSI, A.; EISINBERG, A.; CARROZZA, M.C. UND DARIO, P.: Force sensing microinstrument for measuring tissue properties and pulse in microsurgery. IE-EE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 8, Nr. 1, März 2003, S. 10-17. [MEID04] MENCIASSI, A.; EISINBERG, A.; IZZO, I. UND DARIO, P.: From Macro to Micro Manipulation: Models and Experiments. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 9, Nr. 2, Juni 2004, S. 311-320. MENTOR GRAPHICS: ModelSim SE. Mentor Graphics Corporation Company, [Men06] Homepage http://www.mentor.com, zuletzt besucht im Mai 2006. MARTEL, S.; EMBLER, J.; RIEBEL, S.; GIBBONS, J. UND HUNTER, I.: A novel heat dissi-[MER+01] pation approach for high-powered miniature robots. Proceedings zu SPIE: Microrobotics and Microassembly, Vol. 4568, Newton, MA, USA, Oktober 2001, S. 241-251. [MES+01] MENCIASSI, A.; EISINBERG, A.; SCALARI, G.; ANTICOLI, C.; CARROZZA, M.C. UND DARIO, P.: Force Feedback-based Microinstrument for Measuring Tissue Prop-

erties and Pulse in Microsurgery. Proceedings zu IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seoul, Korea, Mai 2001,

S. 626-631.

- [MFI93] MONDADA, F.; FRANZI, E. UND IENNE, P.: Mobile Robot Miniaturization: A Tool for Investigation in Control Algorithms. Experimental Robotics III: The 3rd International Symposium, T. Yoshikawa und F. Miyazaki (Hrsg.): Vol. 200 of Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Verlag, 1994, S. 501-513.
- [MFO+01] MARTEL, S.; FERRANDO, J.B.C.; OLAGUE, L.C.; FOFONOFF, T. UND HUNTER, I.: Implementing frequency modulated piezo-based locomotion for achieving further miniaturization for wireless robots. Proceedings zu SPIE: Microrobotics and Microassembly, Vol. 4568, Newton, MA, USA, Oktober 2001, S. 210-220.
- [MFSO95] MITSUMOTO, N.; FUKUDA, T.; SHIMOJINA, K. UND OGAWA, A.: Micro autonomous robotic system and biologically inspired immune swarm strategy as a multi agent robotic system. Proceedings zu IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Nagoya, Japan, Mai 1995, S. 2187-2192.
- [MGEF02] MOLL, M.; GOLDBERG, K.; ERDMANN, M.A. UND FEARING, R.: *Aligning Parts for Micro Assemblies*. Assembly Automation, Vol. 22, Nr. 1, Februar 2002, S. 46-54.
- [MGF+05] MONDADA, F.; GAMBARDELLA, L.M.; FLOREANO, D.; NOLFI, S.; DENEUBOURG, J.-L. UND DORIGO, M.: *SWARM-BOTS: Physical Interactions in Collective Robotics*. IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 12, Nr. 2, Juni 2005, S. 21-28.
- [MGH00] MARTEL, S.; GARCIA DE QUEVEDO, W. UND HUNTER, I.: Techniques for continuous power delivery to a group of 15-Watt +3.3 to ±150 VDC miniature wireless instrumented and fast stepping robots through several thousand intermittent contacts per second between the robots' legs and the walking surface. Proceedings zu SPIE Microrobotics and Microassembly, Vol. 4194, Boston, MA, USA, Nov. 2000, S. 168-177.
- [MiC02] MICRON: *Miniaturised Co-operative Robots advancing towards the Nano Range*. MiCRoN Projekt-Homepage. http://wwwipr.ira.uka.de/~micron/, zuletzt besucht Mai 2007.
- [MiC04] MICRON: *Miniaturised co-operative Robots advancing towards the Nano Range*. Europäisches Projekt der Information Society Technologies (IST-2001-33567), Periodic Progress Report Nr. 2, Februar 2004.
- [MiC05] MICRON: *Miniaturised co-operative Robots advancing towards the Nano Range*. Europäisches Projekt der Information Society Technologies (IST-2001-33567), Final Progress Report, Version 1.1, November 2005.
- [MiC06] MICRON: *Miniaturised co-operative Robots advancing towards the Nano Range*. Europäisches -Projekt der Information Society Technologies (IST-2001-33567), Public Report, Version 1.0, Februar 2006.
- [Mil03] MILLER, L.E.: *Why UWB? A Review of Ultrawideband Technology*. National Institute of Standards and Technology, Report to NETEX Project Office, DARPA, April 2003.

- [Min05] MINIMOS SYSTEMBAUKASTEN: *Miniaturisiertes, modulares System mit standardisierten Schnittstellen*. MiLaSys Technologies GmbH, http://www.milasys.de, zuletzt besucht im Oktober 2005.
- [MKH01] MARTEL, S.; KOKER, T. UND HUNTER, I.: Main design issues for embedding onto a wireless miniature robot, a scanning tunneling positioning system capable of atomic resolution over a half-meter diameter surface area. Proceedings zu SPIE Microrobotics and Microassembly, Vol. 4568, Newton, MA, USA, Oktober 2001, S. 68-77.
- [MKR+01] MARTEL, S.; KOKER, T.; RIEBEL, S.; SHERWOOD, M.; SUURKIVI, J. UND HUNTER, I.: An infrastructure suited for supporting a fleet of wireless miniature robots designed for atomic-scale operations. Proceedings zu SPIE Microrobotics and Microassembly, Vol. 4568, Newton, MA, USA, Oktober 2001, S. 221-230.
- [MMF+04] MARTEL, S.; MATHIEU, J.-B.; FELFOUL, O.; MACICIOR, H.; BEAUDOIN, G.; SOULEZ, G. UND YAHIA, L.H.: Adapting MRI systems to propel and guide microdevices in the human blood circulatory system. Proceedings zu International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), San Francisco, CA, USA, September 2004, Vol. 2, S. 1044-1047.
- [MMS+99] MARTEL, S.; MADDEN, P.; SOSNOWSKI, L.; HUNTER, I. UND LAFONTAINE, S.: NanoWalker: a fully autonomous highly integrated miniature robot for nanoscale measurements. Proceedings zu European Optical Society (EOS) und SPIE International Symposium on Environsense, Microsystems Metrology and Inspection, Vol. 3825, München, Deutschland, Juni 1999, S. 64-76.
- [MRH00] MARTEL, S.; ROUSHDY, O. UND HUNTER, I.: *Miniature instrumented robots for mass-scale synthesis and characterization*. Proceedings zu 1st Annual International IEEE EMBS Special Topic Conference on Microtechnology in Medicine and Biology: MicroInstrumentation, Lyon, Frankreich, Oktober 2000, S. 160-164.
- [MRK+01] MARTEL, S.; RIEBEL, S.; KOKER, T.; SHERWOOD, M. UND HUNTER, I.: Large-scale nanorobotic factory automation based on the NanoWalker technology. Proceedings zu 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Special Session on Microrobotics in Manufacturing, Antibes-Juan les Pins, Frankreich, Oktober 2001, Vol. 2, S. 591-597.
- [MRSH00] MARTEL, S.; ROUSHDY, O.; SHERWOOD, M. UND HUNTER, I.: *Optical high resolution positioning system for miniature robot*. Proceedings zu SPIE Microrobotics and Microassembly, Vol. 4194, Boston, USA, November 2000, S. 121-128.
- [MSH00] MARTEL, S.; SARASWAT, A. UND HUNTER, I.: Fundamentals of piezo-ceramic actuation for micrometer and sub-micrometer motions for the NanoWalker robot. Proceedings zu SPIE: Microrobotics and Microassembly, Vol. 4194, Boston, USA, November 2000, S. 82-93.
- [MSH+01] Martel, S.; Sherwood, M.; Helm, C.; Garcia de Quevedo, W.; Fofonoff, T.; Dyer, R.; Bevilacqua, J.; Kaufman, J.; Roushdy, O. und Hunter, I.: *Three-legged wireless miniature robots for mass-scale operations at the sub-atomic scale*. Proceedings zu IEEE Int. Conference on Robotics and Automation: From Microrobotics to NanoRobotics (ICRA), Seoul, Süd-Korea, Mai 2001, Vol. 4, S. 3423-3428.

- [MSMH00] MARTEL, S.; SARASWAT, A.; MICHEL, A. UND HUNTER, I.: Preliminary Evaluation and Experimentation of the Push-slip Method for Achieving Micrometer and sub-micrometer step sizes with a Miniature Piezo-actuated Three-legged Robot Operating Under High Normal Forces. Proceedings of SPIE: Microrobotics and Microassembly, Vol. 4194, Boston, USA, November 2000, S. 141-148.
- [MTSK01] MITSUMOTO, N.; TSURUTA, K.; SHIBATA, T. UND KAWAHARA, N.: *Wireless link system for communication and energy transmission of microrobot.* Proceedings zu International Symposium on Micromechatronics and Human Science (MHS), Nagoya, Japan, September 2001, S. 57-62.
- [MVD96] MOREIRA, A.; VALADAS, R. UND DUARTE, A.: *Reducing the Effects of Artificial Light Interference in Wireless Infrared Transmission Systems*. Proceedings zu IEE Colloquium on Optical Free Space Communication Links, London, UK, Februar 1996, S. 5/1-5/9.
- [Mul02] MULLER, J.-P.: *Wireless LAN: techniques RF, Wifi, Bluetooth*. http://www.ta-formation.com, Mai 2002.
- [Mul00] MULLER, N.J.: Bluetooth Demystified. McGraw-Hill Professional Publishing, September 2000.
- [NAK96] NARASIMHAN, R.; AUDEH, M.D. UND KAHN, J.M.: Effect of electronic-ballast fluorescent lighting on wireless infrared links. IEE Proceedings-Optoelectronics, Vol. 143, Nr. 6, Dezember 1996. S. 347-354.
- [Nan05] NANOTRON: *nanoNET Chirp Based Wireless Networks White Paper*. Nanotron Technologies GmbH, Dokumentennummer NA-04-0000-0298-1.03, Version 1.03, Oktober 2005, http://www.nanotron.com, zuletzt besucht Mai 2006.
- [NGPK02] NAVARRO-SERMENT, L.E.; GRABOWSKI, R.; PAREDIS, C.J.J. UND KHOSLA, P.K.: *Millibots: The Development of a Framework and Algorithms for a Distributed Heterogeneous Robot Team.* IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 9, Nr. 4, Dezember 2002, S. 31-40.
- [Neh02] NEHMZOW, U.: *Mobile Robotik: Eine praktische Einführung*. Springer, Berlin, 2002.
- [Nek05] NEKOOGAR, F.: Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications. Prentice Hall PTR, Indiana, USA, 2005.
- [NFC05] NFC FORUM: *The Near Field Communication (NFC) Forum*. http://www.nfc-forum.org, zuletzt besucht im Oktober 2005.
- [Nie01] NIERLICH, M.: Entwicklung eines synthetisierbaren JTAG-IO-Controller-Verifikations-Blockes. Diplomarbeit für die Firma Infineon Technologies AG. Universität des Saarlandes, Juni 2001.
- [PhiO1] PHILIPS SEMICONDUCTORS: *ISP1581: Using the DMA Controller*. Philips Semiconductors, Niederlande, http://www.flexiusb.com, Juni 2001.

- [PhiO2a] PHILIPS SEMICONDUCTORS: *Power-Up Considerations in ISP1581*. Application Note AN10002-01, Rev. 1.0, Philips Semiconductors, Niederlande, http://www.semiconductors.philips.com/buses/usb, Februar 2002.
- [PhiO2b] PHILIPS SEMICONDUCTORS: *ISP1581 Usign The Odd Bit Indicator for DMA*. Application Note AN10009-01, Rev. 1.0, Philips Semiconductors, Niederlande, http://www.semiconductors.philips.com/buses/usb, März 2002.
- [PhiO3] PHILIPS SEMICONDUCTORS: ISP1581 Hi-Speed Universal Serial Bus interface device. Rev. 05, Dokumentenbestellnummer 9397 750 10766, Philips Semiconductors, Niederlande, http://www.semiconductors.philips.com, Februar 2003.
- [Phi04a] PHILIPS SEMICONDUCTORS: *ISP1581 Programming Guide*. Application Note AN10004_4, Rev. 04, Philips Semiconductors, Niederlande, http://www.semi-conductors.philips.com, März 2004.
- [Phi04b] PHILIPS SEMICONDUCTORS: ISP1581 Hi-Speed Universal Serial Bus peripheral controller. Rev. 06, Dokumentenbestellnummer 9397 750 13462, Philips Semiconductors, Niederlande, http://www.semiconductors.philips.com, Dezember 2004.
- [Phi05] PHILIPS SEMICONDUCTORS: How 802.11b/g WLAN and Bluetooth Can Play. White Paper, Dokumentenbestellnummer: 9397 750 13426, Philips Semiconductors, Niederlande, http://www.semiconductors.philips.com, September 2005.
- [Put06] PUTZMEISTER AG: *Mobiler Flugzeugwaschroboter*. http://www.putzmeister.de, zuletzt besucht Mai 2006.
- [PW02] PENG, L. UND WOO, P.-Y.: *Neural-Fuzzy Control System for Robotic Manipulators*. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 22, Nr. 1, Februar 2002, S. 53-63.
- [QK04] QUADE, J. UND KUNST, E.-K.: *LINUX-Treiber entwickeln Eine systematische Einführung in Gerätetreiber für den Kernel 2.6.* 1. Auflage, Dpunkt Verlag, Heidelberg, Deutschland, 2004.
- [RAK+02] RABAEY, J.; AMMER, J.; KARALAR, T.; LI, S.; OTIS, B.; SHEETS, M. UND TUA, T.: Pico-Radios for Wireless Sensor Networks: The Next Challenge in Ultra-Low-Power Design. Digest aus technischen Papern zu IEEE Int. Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, USA, Februar 2004, Vol. 1, S. 200-201.
- [RC02] RUBINI, A. UND CORBER, J.: *LINUX-Gerätetreiber*. 2. Auflage, O'Reilly Verlag, April 2002.
- [Reg03] REGITNIG-TILLIAN, N.: *Minifabriken*. Voestalpine Magazin, voestalpine AG, Linz, Schweiz, 2003, S. 42-45.
- [RFDM95] REMBOLD, U.; FATIKOW, S.; DÖRSAM, T. UND MAGNUSSEN, B.: The use of actuation principles for micro robots. M. Welland und J. Gimzewski (Hrsg.): The Ultimate Limits of Fabrication and Measurement, Kluwer, Dordrecht, 1995, S. 33-40.
- [Rod04] RODRÍGUEZ, F. (SENIOR MANAGER APPL. SUPPORT GROUP): Telefonat bzgl. Empfindlichkeit der Transceivermodule TFDU6108 und TFDU8108. VISHAY Semicon-

ductors GmbH, Theresienstr. 2, D-74072 Heilbronn, Deutschland, Tel. +49 7131 673 067, E-Mail: felix.rodriguez@vishay.com, 2004.

- [Roo06] ROOMBA: *Staubsaugerroboter der Firma iRobot*. http://saugrobot.de/irobot-roomba.html, zuletzt besucht Juli 2006.
- [RPG+03] RODRIGUEZ PEREZ, S.; PEREZ JIMENEZ, R.; GONZALEZ HERNANDEZ, O.B.; RABADAN BORGES, J.A. UND RODRIGUEZ MENDOZA, B.: Concentrator and lens models for calculating the impulse response on IR-wireless indoor channels using a raytracing algorithm. Microwave and optical technology letters, Vol. 36, Nr. 4, 2003, S. 262-267.
- [RPS+00] Rybski, P.E.; Papanikolopoulos, N.P.; Stoeter, S.A.; Krantz, D.G.; Yesin, K.B., Gini, M.; Voyles, R., Hougen, D.F.; Nelson, B. und Erickson, M.D.: *Enlisting Rangers and Scouts for Reconnaissance and Surveillance*. IEEE Robotics & Automation Magazine, Dezember 2000, S. 14-24.
- [RSG+02] RYBSKI, P.E.; STOETER, S.A.; GINI, M.; HOUGEN, D.F. UND PAPANIKOLOPOULOS, N.: Performance of a distributed robotic system using shared communications channels. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Spezialausgabe über Multirobotersysteme, Vol. 18, Nr. 5, Oktober 2002, S. 713-727.
- [Rump03] RUMP, H.: Mikrosystemtechnik und Mittelstand Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Aspekte der Mikrosystemtechnik. Technologiemarketing, IVAM NRW e.V., Dortmund, Mai 2003, S. 11-17.
- [Sand01] SANDIA NATIONAL LABORATORIES: News Release Mini-robot research: What may be world's smallest mini-robot being developed at Sandia. Albuquerque, USA, Januar 2001, www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2001/minirobot.htm, zuletzt besucht im Juni 2006.
- [SBBC00] SCHMITT, C.; BREGUET, J.M.; BERGANDER, A. UND CLAVEL, R.: *Stick and slip actuators (SSA)*. Proceedings zu SPIE: Microrobotics and Microassembly, Vol. 4194, Boston, MA, USA, November 2000, S. 65-74.
- [SBD+04] ST-JACQUES, D.; BOITANI, T.; DUMAS, P.-A.; DUCAS, M.-A.; FORTIN, M.-A. UND MARTEL, S.: Atomic-scale positioning reference grid system for miniature robots with embedded scanning tunnelling capability. Proceedings zu IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'04), Montreal, Kanada, 2004, Vol. 2, S. 1339-1344.
- [SBP04] SALZMAN, P.J.; BURIAN, M. UND POMERANTZ, O.: *The LINUX Kernel Module Programming Guide*. Kernel Version 2.6. LINUX Documentation Project (LDP). Version. 2.6.0, Mai 2004
- [Sch00] SCHOLZ, O.: Konzeption und Entwicklung eines Datenübertragungssystems für den Einsatz in der Neuroprothetik. Dissertation, IRB-Verlag, 2000.
- [SES+03] SEYFRIED, J.; ESTAÑA, R.; SCHMOECKEL, F.; THIEL, M.; BÜRKLE, A. UND WÖRN, H.: Controlling cm³ sized autonomous micro robots operating in the micro and nano world. Proceedings zu Int. Conference Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies (CLAWAR), Catania, Italien, September 2003, S. 627-634.

- [Sey99] SEYFRIED, J.: Control and Planning System of a Micro Robot-based Microassembly Station. Proceedings zu 30th Int. Symposium Robotics (ISR). Tokyo, Japan, 1999, S. 153-160.
- [Sey03] SEYFRIED, J.: *Planungs- und Steuerungssystem für die Mikromontage mit Mikrorobotern.* Dissertation, Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik, Universität Karlsruhe, Logos Verlag Berlin, 2003.
- [SF00] SCHMOECKEL, F. UND FATIKOW, S.: Smart flexible microrobots for Scanning Electron Microscope (SEM) Applications. Proceedings zu SPIE Cart Structures and Materials, Newport Beach, CA, USA, 2000, S. 142-151.
- [SFF99] SANTA, K.; FATIKOW, S. UND FELSO, G.: Control of microassembly-robots by using fuzzy-logic and neural networks, Journal Computers in Industry, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Vol. 39, 1999, S. 219-227.
- [SFF+00] SEYFRIED, J.; FATIKOW, S.; FAHLBUSCH, S.; BÜRKLE, A. UND SCHMOECKEL, F.: *Manipulating in the Micro World: Mobile Micro Robots and their Applications*. Proceedings zu Int. Symposium on Robotics (ISR), Montreal, Kanada, 2000, S. 102-107.
- [SFFW99] SEYFRIED, J.; FATIKOW, S.; FAIZULLIN, A. UND WÖRN, H.: Assembly Planning in a Flexible Micro-assembly Station. Proceedings zu Int. Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Leuven, Belgien, 1999, S. 487-496.
- [Sin05] SINGER, M.: Intracytoplasmatische Spermieninjektion (ICSI). Praxis Dr. Med. Michael Singer, FMH Gynäkologie und Geburtshilfe, speziell Fortpflanzungsmedizin, Zürich, Schweiz, http://www.singer.ch, zuletzt besucht Oktober 2005.
- [SITK97] SAKAKIBARA, T.; IZU, H.; TARUI, H. UND KIYAMA, S.: Development of High Voltage Photovoltaic Micro-Devices for Driving Micro Actuators. IEICE Transactions on Electronics, Vol. 80, Nr. 2, Februar 1997, S. 309-313.
- [SJST02] SINGH, C.; JOHN, J.; SINGH, Y.N. UND TRIPATHI, K.K.: A Review of Indoor Optical Wireless Systems. IETE Technical Review, Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, Vol. 19, Nr. 1-2, S. 3-17.
- [SJST05] SINGH, C.; JOHN, J.; SINGH, Y.N. UND TRIPATHI, K.K.: Design aspects of high-performance indoor optical wireless transceivers [LAN applications]. Proceedings zu IEEE Int. Conference on Personal Wireless Communications (ICPWC), Neu-Delhi, Indien, Januar 2005, S. 14-18.
- [Ska96] SKAHILL, K.: VHDL for Programmable Logic. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1996
- [SK99] SHIU, D.S. UND KAHN, J.M.: Differential Pulse-Position Modulation for power-Efficient Optical Communication. IEEE Transactions on Communications, Vol. 47, Nr. 8, August 1999, S. 1201-1210.
- [SN01] SUN, Y. UND NELSON, B.J.: Autonomous Injection of Biological Cells Using Visual Servoing. D. Rus und S. Singh (Hrsg.): Experimental Robotics VII, Springer Verlag London Ltd., 2001, S. 169-178.

- [SN03] SUN, Y. UND NELSON, B.J.: *Biological Cell Injection Using an Autonomous Microrobotic System*. International Journal of Robotics Research, Vol. 21, Nr. 10-11, 2003, S 861868.
- [Son06] SONY ENTERTAINMENT ROBOTIC EUROPE: Sony AIBO Europe Offizielle Webseite. Europäische AIBO Homepage http://www.aibo-europe.com, zuletzt besucht im Februar 2006.
- [SRS+02] STOETER, S.A.; RYBSKI, P.E.; STUBBS, K.; MCMILLEN, C.P.; GINI, M.; HOUGEN, D.F. UND PAPANIKOLOPOULOS, N.: A robot team for surveillance tasks: design and architecture. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 40, Nr. 2-3, September 2002, S. 173-183.
- [Stü02] STÜBER, G.L.: *Principles of Mobile Communication, Second Edition*. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moskau, 2002.
- [SWR+03] SUN, Y.; WAN, K.-T.; ROBERTS, K.P.; BISCHOF, J.C. UND NELSON, B.J.: Mechanical property characterization of mouse zona pellucida. IEEE Transactions on NanoBioscience, Vol. 2, Nr. 4, Dezember 2003, S. 279-286.
- [SZK04] SAVIA, M.; ZHOU, Q. UND KOIVO, H.N.: Simulating Adhesion Forces between Arbitrarily Shaped Objects in Micro/Nano-Handling Operations. Proceedings zu International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Sendai, Japan, 2004, S. 1722-1727.
- [Tag05] TAGLIARENI, F.: Entwicklung mikrofluidischer Chips zur Injektion von Flüssigkeiten und Partikelsuspensionen in biologische Zellen. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland, 2005.
- [TNS+05] TAGLIARENI, F.; NIERLICH, M.; STEINMETZ, O.; VELTEN, T.; BRUFAU, J.; LOPEZ-SAN-CHEZ, J.; PUIG-VIDAL, M. UND SAMITIER, J.: *Manipulating biological cells with a micro-robot cluster*. Proceedings zu Int. IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Edmonton, Alberta, Kanada, 2005, S. 426-431.
- [Tou03] TOUMINEN, J.: Wireless power transmission. Patria Ailonoy, USA Patent, Nr. 20012062 [20030075670], 2003.
- [Trim89] TRIMMER, W.S.N.: *Microrobots and micromechanical systems*. Sensors and Actuators, Vol.19, Nr. 3, 1989, S. 267-287.
- [TV05] TSE, D. UND VISWANATH, P.: *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, New York, 2005
- [TVO98] TAVARES, A.M.; VALADAS, R.J. UND OLIVEIRA DUARTE, A.M.: Performance of wireless infrared transmission systems considering both ambient light interference and inter-symbol interference due to multipath dispersion. Proceedings zu SPIE Int. Society for Optical Engineering, Vol. 3532, Boston, USA, November 1999, S. 82-95.
- [Uch97] UCHINO, K.: *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 1997.

- [UDSM05] UMMAT, A.; DUBEY, A.; SHARMA, G. UND MAVROIDIS, C.: *Chapter 19: Bio-Nano-Robotics: State of the Art and Future Challenges.* Tissue Engineering and Artificial Organs, CRC Press, 2005.
- [USB00] USB IMPLEMENTERS FORUM, INC.: Universal Serial Bus Specification, Revision 2.0. Compaq, Hewlett-Packard, Intel, Lucent, Microsoft, NEC, Philips (Hrsg.), http://www.usb.org, 27. April 2000.
- [UWB06] UWB FORUM: *http://www.uwbforum.org*, zuletzt besucht Juni 2006.
- [Vis02] VISHAY SEMICONDUCTORS: *TFDU 6102*. Vishay Semiconductors, Dokumentennummer 82550, Rev. A1.1, September 2002, Homepage zuletzt besucht März 2004, http://www.vishay.com/docs/82550/82550.pdf.
- [Vis03a] VISHAY SEMICONDUCTORS: *IrDA Protocol Stack*. Vishay Semiconductors, Dokumentennummer 82504, Rev. 1.3, September 2003, Homepage zuletzt besucht Juni 2006, http://www.vishay.com/docs/82504/82504.pdf.
- [Vis03b] VISHAY SEMICONDUCTORS: *Symbols and Terminology*. Vishay Semiconductors, Dokumentennummer 82512, Rev. 1.2, Oktober 2003, Homepage zuletzt besucht Juni 2006, http://www.vishay.com/docs/82512/82512.pdf.
- [Vis03c] VISHAY SEMICONDUCTORS: *TFDU 6108*. Vishay Semiconductors, Dokumentennummer 82537, Rev. 1.3, November 2003, Homepage zuletzt besucht März 2005, http://www.vishay.com/docs/82537/82537.pdf.
- [Vis03d] VISHAY SEMICONDUCTORS: *TFDU 8108*. Vishay Semiconductors Dokumentennummer 82558, Rev. 1.3, November 2003, Homepage zuletzt besucht März 2005, http://www.vishay.com/docs/82558/82558.pdf.
- [War03] WARNEKE, B.A.: Ultra-Low Energy Architectures and Circuits for Cubic Millimeter Distributed Wireless Sensor Networks, Dissertation, UC Berkeley, USA, Mai 2003.
- [Wim06] WIMEDIA ALLIANCE: http://www.wimedia.org, zuletzt besucht November 2006.
- [WK03] WOLF, M. UND KRESS, D.: Short-range wireless infrared transmission: the link budget compared to RF. IEEE Wireless Communications, Vol. 10, Nr. 2, April 2003, S. 8-14.
- [WMW05] WILLIG, A.; MATHEUS, K. UND WOLISZ, A.: *Wireless Technology in Industrial Networks*. Proceedings des IEEE, Vol. 93, Nr. 6, Juni 2005, S. 1130-1151.
- [Woo06] WOODINGS, R.: A 2.4 GHz WirelessUSB Radio-on-a-chip For Human Interface Devices. Cypress Semiconductor Corporation. Technischer Artikel TA1148, Oktober 2006, http://www.cypress.com, zuletzt besucht Dezember 2006.
- [WP02] WARNEKE, B.A. UND PISTER, K.S.J.: *MEMS for distributed wireless sensor networks*. Proceedings zu Int. Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Dubrovnik, Kroatien, September 2002, Vol. 1, S. 291-294.
- [WP04] WARNEKE, B.A. UND PISTER, K.S.J.: An Ultra-Low Energy Microcontroller for Smart Dust Wireless Sensor Networks. Digest aus technischen Papern zu IEEE

Int. Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, USA, Feb. 2004, Vol. 1, S. 316-317.

- [WSB+01] WÖRN, H.; SCHMOECKEL, F.; BÜRKLE, A., SAMITIER, J.; PUIG-VIDAL, M.; JOHANSSON, S.; SIMU, U.; MEYER, J.-U. UND BIEHL, M.: From decimeter to centimetersized mobile microrobots – the development of the miniman system. Proceedings zu SPIE Microrobotics and Microassembly III, Boston, MA, USA, 2001, Vol. 4568, S. 175-186.
- [WSB+03] WÖRN, H.; SEYFRIED, J.; BÜRKLE, A.; ESTAÑA, R.; SCHMOECKEL, F. UND THIEL, M.: Kubikzentimeter-große autonome Mikroroboter für die Mikro- und Nanowelt. R. Dillmann; H. Wörn; T. Gockel. (Hrsg.): Autonome mobile Systeme 2003, Vol. Informatik aktuell, Springer Verlag, 2003, S. 281-291.
- [WSL+02] WARNEKE, B.A.; SCOTT, M.D.; LEIBOWITZ, B.S.; ZHOU, L.; BELLEW, C.L.; CHEDIAK, J.A.; KAHN, J.M.; BOSER, B.E. UND PISTER, K.S.J.: An Autonomous 16mm³ Solar-Powered Node for Distributed Wireless Sensor Networks. Proceedings zu IEEE Int. Conference on Sensors, Orlando, USA, Juni 2002, Vol. 2, S. 1510-1515.
- [WSF+00] WÖRN, H.; SEYFRIED, J.; FAHLBUSCH, S.; BÜRKLE, A. UND SCHMOECKEL, F.: Flexible Micro-robots for Micro Assembly Tasks. Proceedings zu Int. Symposium on Micromechatronics and Human Science (MHS 2000), Nagoya, Japan, 2000, S. 135-143.
- [Xil01] XILINX: Virtex-II Platform FPGA Handbook. Xilinx Inc., http://www.xilinx.com, Vol. 1.3, Dezember 2001.
- [Xil02] XILINX: Virtex-II Platform FPGA User Guide. Xilinx Inc., http://www.xilinx.com, Vol. 1.5, Dezember 2002.
- [YN05] YESIN, K.B. UND NELSON, B.J.: A CAD model based tracking system for visually guided microassembly. Robotica, 2005, Vol. 23, S. 409-418.
- [YNP+99] YESIN, K.B.; NELSON, B.J.; PAPANIKOLOPOULOS, N.; VOYLES, R.M. UND KRANTZ, D.: *A* system of launchable mesoscale robots for distributed sensing. Proceedings zu SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly, Boston, MA, USA, September 1999, S. 85-92.
- [YGN01] YANG, G.; GAINES, J.A. UND NELSON, B.J.: A flexible experimental workcell for efficient and reliable wafer-level 3D microassembly. Proceedings zu Int. Conference on Robotics & Automation (ICRA), Seoul, Korea, 2001, S. 133-138.
- [YGN03] YANG, G.; GAINES, J.A. UND NELSON, B.J.: A Supervisory Wafer-Level 3D Microassembly System for Hybrid MEMS Fabrications. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2003, Vol. 37: S. 43-68.
- [ZAC+04] ZHOU, Q.; AURELIAN, A.; CHANG, B.; DEL CORRAL, C. UND KOIVO, H.N.: *Microassembly system with controlled environment*. Journal of Micromechatronics, 2004, Vol. 2, Nr. 3, S. 227-248.
- [Zes97] ZESCH, W.: Multi-Degree-of-Freedom Micropositioning Using Stepping Principles. Dissertation, Institut für Robotik, ETH Zürich, Nr. 12318, 1997.
- [ZBS95] ZESCH W.; BÜCHI R. UND SIEGWART R.: Inertial mechanisms for positioning microobjects: Two novel mechanisms. Proceedings zu SPIE Conference. on Microrobots and Micromechanical Systems, Philadelphia, USA, Oktober 1995, S. 80-88.
- [ZBW97] ZESCH, W.; BRUNNER, M. UND WEBER, A.: Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot. Proceedings zu International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Albuquerque, USA, April 1997, S. 1761-1766.
- [ZF98] ZESCH W. UND FEARING R.S.: Alignment of microparts using force controlled pushing. Proceedings zu SPIE Conference on Microrobotics and Micromanipulation, Boston, MA, USA, November 1998, Vol. 3519, S. 148-156.
- [Zig02] ZIGBEE ALLIANCE: ZigBee and Bluetooth Competitive or Complementary?. The ZigBee Alliance Inc., September 2002, http://www.zigbee.org, zuletzt besucht November 2005.
- [Ziv03] ZIVADINOVIC, D.: *Privatfunk Bluetooth als Netzwerk- und Schnittstellenmodul*. Heise mobil. http://www.heise.de/mobil/artikel/50868/0, Februar 2003, Seite zuletzt besucht November 2006.
- [Ziv05] ZIVADINOVIC, D.: *Kabel kappen*. Heise mobil. http://www.heise.de/mobil/artikel/56596/0, Februar 2005, Seite zuletzt besucht November 2005.
- [ZKA+99] ZHOU, Q.; KALLIO, P.; ARAI, F.; FUKUDA, T. UND KOIVO, H.N.: A model for operating spherical micro objects. Proceedings zu International Symposium on Micromechatronics and Human Science 1999 (MHS'99) Nagoya, Japan, November 1999, S. 79-85,
- [ZKK00] ZHOU, Q.; KALLIO, P. UND KOIVO, H. N.: Model-based handling and planning in micro assembly. Proceedings zu 2nd International Workshop on Microfactories (IWMF), Fribourg, Schweiz, Oktober2000, S. 13-16.
- [ZKP03] ZHOU, L.; KAHN, J.M. UND PISTER, K.S.J.: Corner-Cube Retroreflectors based on Structure-Assisted Assembly for Free-Space Optical Communication. IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 12, Nr. 3, Juni 2003, S. 233-242.
- [ZVEI03] ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E.V.: Erfolgsfaktoren für eine industrielle Mikrosystemtechnik in Deutschland – Positionspapier. Fachverband Bauelemente der Elektrotechnik im Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie (ZVEI) e.V., Frankfurt am Main, Juni 2002, S. 7f.

Anhang

Anhang A Systementwicklung

A.1 ASIC-/FPGA-Design





Bild A.1: Beschreibung des Digitaldesigns in der Hardwarebeschreibungssprache VHDL

Bild A.2: Logiksynthese mit LeonardoSpectrum Level 3 (Version 2004a 30) [Men06]



Bild A.3: Logiksimulation mit *ModelSim* SE 5.8c von Mentor Graphics [Men06]

A.2 Herstellerangaben zu TFDU6108

	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	Mode	Txd-IRED (mA)	Remark
8xh- Fxh	1	x	x	x	x	x	x	x	FIR > 1 m, not for SIR!	550 (switch, ext. R1!)	FIR standard, serial resistor is necessary for V _{CC2} > 4 V
7xh ¹⁾	0	1	1	1	x	x	x	x	SIR >1 m FIR > 0.7 m	250	SIR More Ext. FIR LP
6xh	0	1	1	0					SIR > 0.70 m FIR > 0.45 m	125	Extended FIR Low Power
5xh	0	1	0	1					SIR > 0.50 m FIR > 0.30 m	60	FIR Low Power
4xh	0	1	0	0						(45)	
3xh	0	0	1	1					SIR > 0.35 m FIR > 0.20 m	30	SIR Low Power
2xh	0	0	1	0					SIR > 0.25 m FIR > 0.15 m	15	e.g. Docking station
1xh	0	0	0	1					SIR > 0.15 m FIR > 0.10 m	8	e.g. Docking station
0xh	0	0	0	0	x	x	x	х		0	

1) default setting

Tabelle A.1: Richtwerte zur Reichweite in Abhängigkeit vom per SITC programmierbaren Sendestrom für das Transceivermodul TFDU6108 [Vis03c].

А.3 ROBOCOMM-USB-Konfiguration

In diesem Kapitel wird der Aufbau des für die USB-Konfiguration von ROBOCOMM essentiellen Datenpakets detailliert beschrieben. Mittels *loControl*-Schreibzugriff über Endpoint 1 (EP-1-OUT) wird ein 20 Byte umfassendes Datenpaket an ROBOCOMM transferiert.

A.3.1 Register IR Mode Control

Über das 8-Bit-breite Register *IR Mode Control* werden der Infrarot-Modus und die zugehörige Baudrate für die IR-Sende- und Empfangseinheiten festgelegt (Bild A.4). Die hierbei



Bild A.4: IR Mode Control Bitkonfiguration

zulässigen Werte sind in Analogie zur IR-Datenstruktur aus Tabelle 4.8 (Kapitel 4.6.2.2) zu entnehmen, die nicht nur die für die ver-

schiedenen Modi jeweils zulässigen Übertragungsraten, sondern auch die entsprechende hexadezimale Codierung angibt. Die MiCRoN-Roboter arbeiten nach dem Anschalten der Versorgungsspannung im SIR Modus mit 115.2 kBit/s (Standardeinstellung). Für dieses Register ist daher bei der Erstkonfiguration von ROBOCOMM der Hex-Wert *0x15* zu wählen.

A.3.2 Register SIR Line Control

Das *SIR Line Control* Register (SIR LCR) erlaubt spezifische Einstellungen für die beiden asynchronen Datenübertragungsmodi SIR und SIRpMiCRoN (Bild A.5). Die entsprechenden

-	SIR Line Control						
7	6	5	4	3	2	1	0
DC	DC	Stick Parity	Even Parity	Parity enable	NrStopBits	NrDa	taBits

Bild A.5: Bitkonfiguration für das Register SIR Line Control

Werte und Codierungen sind Tabelle 4.6 in Kapitel 4.6.2.2 zu entnehmen. Per Default-Einstellung verarbeiten die MiCRoN-Ro-

boter nach dem Anschalten 8-Bit-breite Zeichen, die ohne Parität mit nur einem Stoppbit versehen übertragen werden. Daher ist für die Erstkonfiguration von ROBOCOMM der Hex-Wert *0x03* einzustellen.

A.3.3 Register IR Tx-/Rx-Unit Control

Dieses 2-Byte-breite Register (Bild A.6) spezifiziert einige Zusatzparameter sowohl für die IR-Sendeeinheiten als auch die IR-Empfangseinheiten von ROBOCOMM. Für den Übertra-

IR Tx-/Rx-Unit Control 0							
7	6	5	4	3	2	1	0
IR-Pmicron-Frame Size (7:0)							
			R Tx-/Rx-Ur	nit Control	1		
7	6	5	4	3	2	1	0
BadCRC	MIR Preamble	FIR Short Pulses	enable Limit-DLL	IR-Pmicron-Frame Size (11:8)			

Bild A.6: Bitkonfiguration für *IR Tx-/Rx-Unit Control*

gungsmodus SIRpMiCRoN wird als 12-Bit-Wert die konstante Datenrahmenlänge festgesetzt, die für die MiCRoN-Roboter einen Wert von 127 Datenbytes (als Hex-Wert *0x07F*) nicht überschreiten darf. In *Control0* werden die

acht niederwertigen Bits geschrieben, während in das untere Halbbyte von *Control1* die vier höchstwertigen Bits einzutragen sind. Mit den Flags *enableLimit-DLL*, *FIRShortPulses* und *MIRPreamble* können bei Festlegen auf den Wert logisch-1 für die Sende- und Empfangseinheiten implementierte Zusatzschaltungen eingeschaltet werden, die den Datenempfang robuster machen und auch bei erschwerten Übertragungsbedingungen (helles Umgebungslicht, große Distanz, niedrige Sendeleistung) noch einen fehlerfreien Empfang erlauben.

Das Flag **BadCRC** dient nur für Testzwecke und ist für den Normalbetrieb auf logisch-0 zu setzen. Als Defaultwerte werden die Hex-Werte 0x7F für Control0 und 0x30 für Control1 empfohlen. EnableLimit-DLL synchronisiert in den Modi SIR, SIRpMiCRoN und MIR innerhalb jedes empfangenen Bytes die IR-Empfangseinheiten jeweils auf den zuletzt empfangenen Lichtpuls, d. h. das zuletzt empfangene Bit, mit dem Wert logisch-O. Hierdurch werden Unterschiede bei den einzelnen Taktgebern (Oszillatoren) der Roboter, die bedingt durch Bauteiltoleranzen, Temperaturdrift oder Spannungsschwankungen auftreten können, selbst bei Abweichungen von über 5% der Nenntaktfrequenz ausgeglichen. Das Flag FIRShortPulses verbessert den Empfang im Modus FIR. Mit einer logisch-1 für dieses Flag werden Kurzpulse mit einer minimalen Dauer von 50 ns von den FIR-Empfangseinheiten zugelassen. Somit werden Lichtpulse, die bzgl. der IrDA-Spezifikation als zu kurz gelten und somit eigentlich als fehlerhaft eingestuft werden müssten, dennoch akzeptiert. Insbesondere bei Distanzen von mehr als 60 cm bei voller Sendeleistung der IR-Transceivermodule bzw. bei kürzeren Distanzen und reduzierter Sendeleistung treten diese kurzen Pulse an den Ausgängen der IR-Transceivermodule im FIR-Modus auf und erschweren bzw. verhindern eine den IrDA-Spezifikationen entsprechende Datenübertragung mit 4 MBit/s (vgl. hierzu auch die Erläuterungen zu Bild 4.16). Mit dem Flag **MIRPreamble** wird für den MIR Modus vor der Übertragung des Startbytes zusätzlich eine 1-Byte-lange Präambel übertragen, die dazu dient, die in den Empfangstransceivermodulen integrierten Signalverstärkerstufen bereits vor Beginn der eigentlichen Datenübertragung an das eintreffende Infrarotsignal anzupassen. Insbesondere bei größeren Distanzen zwischen Sender und Empfänger und/oder niedriger Sendeleistung ermöglicht diese Option einen fehlerfreien Datenempfang, insbesondere den korrekten Empfang des Start-Bytes.

A.3.4 Register IR-USB-Device Configuration

Dieses Register (Bild A.7) übernimmt die Konfiguration mehrerer hardwarespezifischer Funktionen von ROBOCOMM. Über das Flag **sync reset** werden bei Setzen auf logisch-1

IR-USB-Device Configuration							
7	6	5	4	3	2	1	0
IR_RX neg_pos_sel	enable TxEchoReject	enable sync IR-transfer	MultiTFDURx	DC	IOCntrl ACK (reserved)	Selftest (RxTxEnable)	sync reset
Bild A.7: Bitkonstellation für IR-USB-Device Configuration							

einmalig alle Zustandsmaschinen der IR-Sende- und Empfangseinheiten in ihren Startzustand zurückgesetzt, sämtliche Sende- und

Empfangsspeicher werden gelöscht (Noch nicht gesendete bzw. bereits empfangene Datenpakete gehen verloren!). Es wird empfohlen, insbesondere bei einem Wechsel des Übertragungsmodus dieses Flag zu setzen.

Wird Selftest (RxTxEnable) auf logisch-1 gesetzt, so kann ROBOCOMM zum Testen der Sende- und Empfangseinheiten an sich selbst Daten per Infrarotverbindung übertragen. Für den Normalbetrieb, d. h. für den Datentransfer zwischen Host und den Robotern, muss dieses Flag ebenso auf logisch-0 gesetzt sein wie IOCntrlAck, das in der jetzigen Version von ROBOCOMM ohne Funktion bleibt. Eine logisch-1 für das Flag MultiTFDURx schaltet den Multiempfängerbetrieb ein: Die derzeit vier angeschlossenen Transceivermodule und ihre jeweils zugehörigen IR-Empfangseinheiten arbeiten parallel. Dies ermöglicht, die aufgrund der räumlichen Verteilung der Transceivermodule¹ auftretenden unterschiedlich langen Übertragungswege auszugleichen, sodass auch bei stark reduzierter roboterseitiger Sendeleistung von mindestens einer IR-Empfangseinheit Daten empfangen werden können. Weiterhin wird die eingeschränkte räumliche Abdeckung bedingt durch die Richtwirkung (Richtungsgewinn) der Transceivermodule ausgeglichen. Enable synclRtransfer schaltet den synchronen Übertragungsmodus für ROBOCOMM ein: Die einzelnen Datenübertragungen werden daraufhin in zeitlich äguidistanten Abständen von ROBO-COMM initiiert. Die Zeitdifferenz wird hierbei durch das 32-bit-breite Register IR-Tx-SynchonTimer vorgegeben (siehe auch Kapitel A.3.9). Über das Flag enableTxEchoReject wird die dynamische IR-Echo-Unterdrückung aktiviert. Sie verhindert, dass die von ROBO-COMM gesendeten IR-Datenpakete nicht über (Mehrfach-)Reflexion wieder von den eigenen Transceivermodulen und ihren zugehörigen IR-Empfangseinheiten empfangen und, bedingt durch die im IR-Datenpaket implementierte Fehler erkennende Codierung, als fehlerhaft interpretiert werden. Je nach eingesetztem Transceivermodul wird ein empfangener IR-Lichtpuls herstellerbedingt entweder in einen high-aktiven oder aber in einen lowaktiven elektrischen Puls umgewandelt. Das Flag IR_RX_neg_pos_sel zeigt den IR-Empfangseinheiten an, welcher Pulssignaltyp von dem eingesetzten Transceivermodul zu erwarten ist: Logisch-1 steht für high-aktiv, logisch-0 symbolisiert ein Transceivmodul mit low-aktiven Ausgangspulsen. Für die derzeit für ROBOCOMM eingesetzten Transceivermodule TFDU6108, TFDU8108 und TFDU6102 der Firma Vishay Semiconductors ist das Flag auf logisch-O zu setzen. Für die Erstkonfiguration ist dieses Register für asynchronen Transfer mit dem Hex-Wert 0x51 bzw. für synchronen Transfer mit 0x71 zu beschreiben.

A.3.5 Register TFDU CONF

ROBOCOMM kann derzeit mit den drei verschiedenen Transceivermodulen TFDU6108, TFDU8108 und TFDU6102 betrieben werden, wobei gleichzeitig verschiedene Module an

TFDU CONF							
7	6	5	4	3	2	1	0
Type TFDU 3	Type TFDU 2	Type TFDU 1	Type TFDU 0	Enable TFDU 3	Enable TFDU 2	Enable TFDU 1	Enable TFDU 0
Dild A Q. Ditkenfiguration des Degisters TEDU CONF							

Bild A.8: Bitkonfiguration des Registers TFDU CONF

ROBOCOMM angeschlossen sein dürfen. Die Module TFDU6108 und TFDU8108 werden beide per SITC-Schnittstelle programmiert

bzw. initialisiert. Das Modul TFDU6102 erfordert jedoch eine davon abweichende Behandlung hinsichtlich Initialisierung und/oder Wechsel des Übertragungsmodus. Über das 8-Bit-Register *TFDU CONF* (Bild A.8) wird angegeben, ob ein Transceivermodul an die jeweilige IR-Empfangseinheit angeschlossen ist und um welchen Typ es sich handelt. Die binäre Codierung ist Tabelle A.2 zu entnehmen. In der jetzigen Konfiguration für ROBOCOMM ist dieses Register mit dem Hex-Wert *0xFF* zu beschreiben.

Bezeichnung Binär		Beschreibung		
Enable TEDU V	0	Transceivermodul X nicht angeschlossen		
LINDUR IT DU A	1	Transceivermodul X angeschlossen		
	0	Transceivermodul X vom Typ TFDU6102		
Type IIDO X	1	Transceivermodul X vom Typ TFDU6108 / TFDU8108		

Tabelle A.2: Binärcodierung zur Spezifikation der angeschlossenen Transceivermodule

¹ Für MiCRoN sind die Transceivermodule an den vier Ecken der Roboterarbeitsfläche positioniert.

A.3.6 Register Tx Current TFDU

Über dieses 2-Byte-umfassende Register (Bild A.9) lässt sich die Stromstärke für die IR-Sendedioden der an ROBOCOMM angeschlossen Transceivermodule einstellen. Diese Funktion



wird nur für die Module TFDU6108 und TFDU8108 unterstützt. Die jeweils einstellbaren Stromstärken und die sich hieraus bei 3.3 V Versorgungsspannung ergebenden Leistungen je Lichtpuls sind in Tabelle A.3 aufgelis-

Bild A.9: Bitkonfiguration für das Register Tx Current TFDU

tet. Zusätzlich sind der zulässige Übertragungsmodus und ein vom Hersteller angegebener Richtwert bzgl. der Signalreichweite für die Modi SIR und FIR angefügt. Als Default-Wert wird für beide Register jeweils *0x77* empfohlen.

Bezeichnung	Hex	I _{Tx} [mA]	P _{Tx} [mW]	SIR Reichweite	FIF	R Reichweite
	0x8	550	1815	Keine Angabe		FIR > 1 m
	0x7	250	825	SIR > 1 m	FIR >0,7 r	
	0x6	125	412,5	SIR > 0,7 m		FIR >0,45 m
Ty Curront	0x5	60	198	SIR > 0,5 m	FIR >0,30 m	
	0x4	45	148,5	Keine Herstellerangabe		e
II DO X	0x3	30	99	SIR > 0,35 m		FIR >0,20 m
	0x2	15	49,5	SIR > 0,25 m		FIR >0,15 m
	0x1	8	26,4	SIR > 0,15 m		FIR >0,10 m
	0x0	0	0	Keine Überti	agung	

Tabelle A.3: Einstellbare Stromstärken für die Module TFDU6108 und TFDU8108 (P_{Tx} ist die Pulsleistung unter der Annahme einer Versorgungsspannung von 3,3 V_{DC})

A.3.7 Register IR TxEcho Rejection

Dieses 2-Byte-breite Register (siehe Bild 4.23) wird für die dynamische Echo Unterdrückung benötigt. In Tabelle A.4 sind die für die verschiedenen Übertragungsmodi und zugehörigen Baudraten zu wählenden Hex-Werte angegeben. Für die Erstkonfiguration nach dem Anschalten von ROBOCOMM ist der Wert *0x0020* (Default) einzustellen.

IR-Modus	Baudrate	Hex-Wert
SIR	9600 - 115200	0×0020
SIRpMiCRoN	9000 - 119200	0x0020
MIR	576000	0x0016
IVIIIX	1152000	0x0014
FIR	4000000	0x0010

Tabelle A.4: IR TxEcho Rejection Parameter

A.3.8 Register IR-RxTxDelay

Über dieses Register (siehe Bild 4.23) kann eine Wartezeit eingestellt werden, um die, nach Abschluss einer Datenübertragung, der Beginn der nachfolgenden Übertragung verzögert wird. Die Zeit errechnet sich dabei nach Formel (A.1). Diese Option ist dann zu nutzen, falls ein Roboter, der zuvor eine Empfangsbestätigung (Acknowledge) oder Datenpaket an ROBOCOMM übertragen hat, wiederholt nicht auf ein neues unmittelbar im Anschluss von ROBOCOMM gesendetes Datenpaket reagiert. Als Standardwert für die Erstkonfiguration ist das Register auf den Hex-Wert *0x0000* zu initialisieren, wodurch die Verzögerungsfunktion ausgeschaltet wird.

$$t_{delay} = \text{Registerwert} \bullet 25 \ ns$$
 (A.1)

A.3.9 Register IR-Tx-Synchron Timer

Dieses 32-Bit-umfassende Register (vgl. Bild 4.23) spezifiziert die Zeitdifferenz für die synchrone Datenübertragung (siehe auch Kapitel A.3.4). Der Registerinhalt stellt den Referenzwert für einen in ROBOCOMM integrierten Timer dar, bei dessen Überlauf jeweils eine Datenübertragung initiiert wird. Sollte der Zeitbedarf für die Übertragung eines Datenpaketes größer sein als es die Zeitdifferenz zwischen zwei Timerüberläufen vorsieht, wird das nachfolgende Datenpaket nicht direkt im Anschluss sondern erst nach erneutem Timerüberlauf übertragen. Der einzustellende Registerwert kann mit Hilfe der Gleichung (A.1) unter Vorgabe der gewünschten Wartezeit errechnet werden. So bewirkt z.B. der Hex-Wert *0x00009C40* bei eingeschaltetem Synchrontransfer eine Übertragung zu jeder Millisekunde.

A.3.10 Register IR-RxTimeout

Die Wartezeit, die ROBOCOMMS IR-Empfangseinheiten bei Anforderung von Roboterdaten bzw. einer Empfangsquittierung empfangsbereit abwarten müssen, bevor sie wegen ausbleibender Daten per USB eine Fehlermeldung für den Host generieren dürfen, wird über dieses Register eingestellt. Der Registerwert errechnet sich über die Gleichung (A.1). Als Startwert sollte für dieses Register *0x02625A00* (entspricht 1 s) gewählt werden.

A.4 ASIC-Testplatine

A.4.1 Schematic



Bild A.10: ASIC-Test-PCB (Teil1): ASIC-1, 2xAV-Bus140, ASIC-0 (von links nach rechts)





A.4.2 Bestückungspläne



Bild A.12: ASIC-Test-PCB - Top-Layer



Bild A.13: ASIC-Test-PCB – Bottom-Layer

А.5 **ROBOCOMM-PCB**

A.5.1 Schematic



Bild A.14: ROBOCOMM-PCB mit ISP1581, Av140-Bus, Typ-B-USB-Konnektor und LEDs



Bild A.16: Schematic für die über eine SITC-Schnittstelle verfügenden Transceivermodule TFDU8108 und TFDU6108

Bild A.17: Anschlüsse der IR-Transceivermodule (mittels IEEE1394-Konnektoren) auf der Robo-COMM-PCB





Bild A.18: ROBOCOMM-PCB – Top-Layer







Bild A.20: PCB für ROBOCOMM-Transceivermodule TFDU8108, TFDU6108 und TFDU6102

A.6 Teilausschnitt eines SENDIR-Testskripts

sync-transmission with 250ms delay #wi 15 03 0F 30 51 FF 77 77 20 00 FF 00 80 96 98 00 00 5A 62 02 # sync-transmission with 10ms delay #wi 15 03 0F 30 51 FF 77 77 20 00 FF 00 80 1A 06 00 00 5A 62 02 # sync-transmission with 1ms delay wi 15 03 0F 30 71 FF 77 77 20 00 FF 00 40 9C 00 00 00 5A 62 02 # wait 400 µs wa 400 # Broadcast - SetIRMode SIR115.2 - Acknowledge wd 0B 00 09 00 02 FF FF 03 00 03 95 #Broadcast - SetRobotID 07 - Acknowledge wd 0B 00 09 00 02 07 FF 03 03 07 00 # ID07 - SetTxParams - Acknowledge wd 0B 00 09 00 02 07 FF 03 04 0C 00 #wd 0B 00 09 00 02 07 FF 03 04 08 00 # ID07 - GetStatus - Data Request wd 0B 00 09 00 04 07 07 05 02 00 00 # Compose IR-RxData (USBdevice prepares received IrData) wd 00 00 # wait 1000 µs wa 1000 # USB read access rd # ID07 - Read TFDU TxCurrent - Data Request wd 0B 00 09 00 04 07 07 05 07 12 00 # BroadCast - Set TFDU TxCurrent (command "write TFDU") - no Acknowledge wd 0B 00 09 00 00 07 FF 01 06 72 80 # ID07 - Read TFDU TxCurrent - Data Request wd 0B 00 09 00 04 07 07 05 07 12 00 # BroadCast - Set TFDU TxCurrent (command "write TFDU") - no Acknowledge wd 0B 00 09 00 00 07 FF 01 06 72 70 # ID07 - Read TFDU TxCurrent - Data Request wd 0B 00 09 00 04 07 07 05 07 12 00 # Compose IR-RxData (USBdevice prepares received IrData) wd 00 00 # wait 1000 µs wa 1000 # USB read access rd # close USB-Device cl

Anhang B Mikroroboter

B.1 Drahtgebundene stationäre Systeme

B.1.1 AoLAB Miniroboter-Tischstation



Bild B.1: AOLAB Miniroboter-Tischstation zur automatischen Erzeugung eines Bohrlocharrays, bestehend aus Bohrlöchern mit jeweils nur 50 µm Durchmesser ([Aoy98], [ATST99], [KTA01], mod.).

Bild B.1 zeigt eine Übersicht über die am FORSCHUNGSLABOR FÜR MIKROROBOTER-TISCHSTA-TIONEN AOLAB der UNIVERSITÄT FÜR ELEKTRO-TELEKOMMUNIKATION VON TOKIO (Japan) entwickelte Miniroboter-Tischstation: Mittels kabelbetriebener mobiler Miniroboter wird vollautomatisch ein Bohrlocharray hergestellt, das aus jeweils nur 50 µm Durchmesser fassenden Bohrlöchern, angeordnet in nahezu äquidistanten Abständen, besteht (rot umrandeter Bereich in der oberen Bildmitte). Die linke Bildhälfte zeigt den Gesamtaufbau der Tischstation, bestehend aus Arbeitsfläche und den auf ihr agierenden Mikrorobotern, die mit Hilfe eines visuellen Sensorsystems überwacht und über ein modulares Steuerungssystem kontrolliert werden. In der Bildmitte sind die für die Tischstation entwickelten kabelbetriebenen Miniroboter blau umrandet abgebildet: Während das obere der vier Bilder einen Grö-Benvergleich mit einer 9 V-Blockbatterie erlaubt, zeigen die drei darunter liegenden Photos (von oben nach unten) zunächst den Miniroboter für das Halten der Probe, den Miniroboter mit Bohrerantrieb und schließlich den Miniroboter mit dem 50 µm-Bohrer. Das rechte Bilddrittel vermittelt neben einer schematischen Darstellung der Miniroboteranordnung einen Eindruck über die Anforderungen an das Steuerungssystem, trotz des vorhandenen Kabelgewirrs Verknotungen möglichst vorzeitig zu erkennen und zu vermeiden, zumal die Größe der Miniroboter und ihrer Zuleitung eine flexible Koordination und Kooperation erschweren oder gar vermeiden. Die Positioniereinheit der Mikroroboter ist als Kriechantrieb, bestehend aus Piezoaktoren und Elektromagneten, realisiert. Während die Piezoaktoren für die präzise Bewegung der einzelnen, an der Lokomotion beteiligten Beine sorgen, verhindern die zugehörigen elektromagnetischen Aktoren in Verbindung mit der metallischen Roboterarbeitsfläche nach einem piezoaktorisch durchgeführten Einzelschritt das unkontrollierte Verschieben durch Festklemmen des zuvor bewegten Beines. Für eine detaillierte Beschreibung der Tischstation, der verschiedenen lokalen und globalen Sensorsysteme und des Zusammenwirkens der eingesetzten Miniroboter wird auf [Aoy98], [AH99], [ATST99] und [KTA01] verwiesen.

B.2 Verteilte, kooperative Roboter

Bei den verteilten, kooperierenden Robotersystemen wird versucht, die begrenzten Fähigkeiten des einzelnen mobilen Roboters auszugleichen und durch kooperatives Verhalten die Arbeitsproduktivität gegenüber der eines einzelnen zu steigern. Verteilte, kooperierende Systeme basieren auf mobilen, (teil-)homogenen, autonomen Robotern, die ohne Vorhandensein von a-priori-Wissen auf einem für die Roboter unbekannten Terrain dezentral organisiert zusammenarbeiten – teilhomogen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Roboter, bestehend aus einer homogenen, d. h. für alle Roboter gleichen Basis, je nach gewünschter Zusammensetzung des Roboterteams, mit verschiedenen Zusatzkomponenten (Kommunikationsschnittstellen, Manipulatoren, Sensoren, etc.) individuell ausgestattet werden können. Auf diese Weise lassen sich im Multirobotereinsatz gleichzeitig verschiedenartige Aufgaben durchführen. Die von den Robotern zu bewältigenden Kollektivaufgaben sind z. B. das Transportieren schwerer Objekte, das Einsammeln und Anordnen von Bauteilen (häufig übergeordnet als "Nahrungssuche" bezeichnet) oder aber Erkundungen in unterschiedlich stark strukturierten und dynamischen, ggf. auch unbekannten Umgebungen.

Die Roboterrealisierungen können erheblich hinsichtlich ihrer Abmaße variieren, angefangen beispielsweise bei der Makroroboterarchitektur *CEBOT* [FN94], über die bisherigen zahlreichen Mesoskalalösungen wie z. B. *SCOUT* [KBD+03], *MILLIBOT* [NGPK02]oder *KHE-PERA* [FGM+99], bis hinab zu den Miniaturrobotersystemen *MARS* [FMSA99] oder *ALICE*. Ausgestattet sind die Roboter mit unterschiedlichen Sensoren, die häufig nach verschiedenen Wirkungsprinzipien arbeiten (Kameras, Ultraschall-Echolote, Laser-Scanner, Radwinkelgeber). Zur Verbindung dieser unterschiedlichen Domänen bedarf es einer geschickten Methodik zur Sensordatenfusion, die mit der begrenzten Leistung der mitgeführten On-Board-Elektronik (Mikrocontroller, DSP, etc.) auskommen kann. Für mobile, autonome Systeme sind Architekturen für eine zeitnahe Sensor-Aktor-Kopplung essentiell; auch hier stellt die begrenzte Rechenleistung eine besondere Herausforderung für die Implementierung dar [KCB00].

Bei den verteilten, kooperativen Systemen werden nicht selten Lösungskonzepte aus der Biologie, insbesondere aus dem Verhalten von sozialen Insekten, abgeleitet, da bei diesen die dezentral organisierte Kooperation einer Vielzahl (teil-)homogener Individuen nahezu perfekt funktioniert; als Beispiel sei in diesem Zusammenhang auf die am FUKUDA LAB der japanischen UNIVERSITÄT NAGOYA entwickelten autonomen Miniaturroboter *MARS* verwiesen [MFSO95]. Aber auch der umgekehrte Weg wird beschritten: So erhoffen sich Biologen und Verhaltensforscher, z. B. in Armeisenkolonien entdeckte Verhaltensmuster bzw. auf neuronale Netze abgebildete Kontrollmechanismen mittels mobiler autonomer Miniaturroboter besser zu verstehen bzw. verifizieren zu können [FGM+99].

Bewertet wird die Leistungsfähigkeit verteilter, kooperativer Systeme mittels Analyse sowohl des *emergierenden Individualverhaltens* als auch des *emergierenden Gruppenverhaltens* [Mar99]: Ersteres beschreibt die beim einzelnen Roboter beobachtbaren Verhaltensweisen, die nicht explizit in seine funktionalen Blöcke hineinprogrammiert wurden, sondern sich nur aufgrund der Interaktionen einerseits zwischen den Roboterfunktionsblöcken untereinander und andererseits zwischen den Roboterkomponenten und der Umgebung ergeben. Analog spricht man von emergierendem Gruppenverhalten, wenn das erhaltene bzw. gewünschte Verhalten nicht explizit in die individuellen Robotercontroller einprogrammiert wurde, sondern sich die Roboter aufgrund von Roboter-Roboter- und Roboter-Umgebungs-Interaktionen selbständig organisieren.

Die Notwendigkeit, trotz räumlicher Beschränkungen eine Vielzahl autonomer, mobiler Roboter gleichzeitig für ihre Experimente einsetzen zu müssen, offenbart den Wunsch der Forscher nach möglichst kleinen, kompakten mobilen Robotern. Jedoch bestimmen die Fähigkeiten und die individuelle Intelligenz der Roboter maßgebend die Art und den Umfang des kooperativen Zusammenwirkens, sodass es einen Kompromiss zu finden gilt zwischen Größe und Ausstattungsmerkmalen der Roboter: Man unterscheidet daher zwischen homogenen und heterogenen Gruppenstrukturen. Für eine Vielzahl verschiedener Aufgabenstellungen können bereits homogene Roboter ausreichen, die ohne direkte Kommunikation zur Teamarbeit fähig sind, obwohl die begrenzten Rechenkapazitäten on-Board eine Identifikation benachbarter "Kollegen" lediglich als Hindernisse zulassen und keinerlei Modelle hinsichtlich nächstgelegener Teammitglieder extrahiert werden können die kooperativen Inferenzprozesse ergeben sich nur aufgrund der für jeden Roboter individuellen sensorischen Umgebungswahrnehmung (implizite Kommunikation), d. h. dass ausschließlich die Robotercontroller in Verbindung mit den On-Board-Sensordaten für das Verhalten des Individuums verantwortlich sind. Komplexe Problemstellungen können insbesondere heterogene Roboterteams erfordern, die Teambildung durch explizite, lokale und/oder globale Kommunikation erwirken und, wie z. B. im Falle der Roboterarchitektur ALLIANCE, die Fähigkeit der Roboter zur bewussten Wahrnehmung der Nachbarn und/oder zur On-Board-Modellierung der Teammitglieder voraussetzen [CFK97]. [Mar99] – während bei der globalen Kommunikation ein Übertragungskanal ohne räumliche Begrenzung von allen Robotern und einer Basisstation gemeinsam genutzt wird, bezeichnet Lokale Kommunikation den Datenaustausch durch direkte Interroboterkommunikation, wobei hier die Reichweite eingeschränkt ist und dadurch nur räumlich begrenzt zwischen benachbarten Robotern kommuniziert werden kann. Für weitere Ausführungen bzgl. des Forschungsgebiets der verteilten, autonomen Systeme bieten [CFK97] und [JA01] einen guten Einstieg. Diesen kurzen Exkurs über verteilte, kooperative, autonome Robotersysteme abschließend, wird exemplarisch auf die am schweizerischen EPFL entwickelten, miniaturisierten Roboter ALICE und KHEPERA verwiesen – letzterer wird mittlerweile als KHEPE-RA II kommerziell von K-TEAM CORPORATION vertrieben [Kte05]. Diese stellen zwei interessante Roboterplattformen für den Aufbau verteilter, kooperativer, autonomer Miniaturrobotersysteme dar: Bereits ohne explizite Kommunikation sind diese Roboter zur Teamarbeit befähigt. Für komplexe Aufgaben, beispielsweise für die "Nahrungssuche" in unbekanntem Gelände, können die homogenen Basisplattformen durch zahlreiche, verschiedenartige Komponenten (Greifer, Kommunikationsmodule, CCD-Kamera, etc.) in ihrem Funktionsumfang erweitert werden. Versuche mit teilweise inhomogenen Roboterstrukturen sind mit diesen Systemen ebenfalls denkbar.

B.3 Mikroroboterantriebe

Das Verhalten von Positionier- und Manipulationseinheit, insbesondere Präzision, Stellweg und Geschwindigkeit betreffend, wird maßgeblich durch die eingesetzten Aktoren vorgegeben. Viele Aktorprinzipien, die auf verschiedenartigen physikalischen Phänomenen beruhen, sind seit Beginn der Robotik konzipiert und umgesetzt worden. Verbunden mit dem Übergang von Makrorobotern zu Mesoskala- bzw. Miniaturrobotern kommen neben den Makromanipulatoren auch vermehrt Mikroaktoren zum Einsatz. Die Auswirkungen der Miniaturisierung auf die Aktoren sind dabei abhängig von der Art der für die Aktuation verantwortlichen Kräfte [Trim89], [CES02]. Aktoren können nach ihrem Wirkprinzip in Feldantriebe, Festkörperantriebe, fluidische oder thermische Antriebe untergliedert werden. Für eine detaillierte Übersicht über die verschiedenen Antriebsprinzipien wird auf [Zes97] und [Jun04] verwiesen.

Vom derzeitigen Stand der Technik betrachtet, sind Strömungsfelder als Antriebsmöglichkeit (vgl. Robotertyp (e) auf Seite 29, Bild 2.26), z. B. Feldkräfte im Innern eines Kernspintomographen [MMF+04], für jetzige Mikroroboter noch als vernachlässigbar zu betrachten. Thermische, photostriktive und magnetostriktive Aktoren, wie z. B. in [DVBB03] beschrieben, werden hier nicht weiter ausgeführt, obgleich diese Aktorprinzipien verglichen mit elektrischer Energie leichter zu transportierende bzw. zu übertragende Energieformen erlauben. Nachteilig bei optisch induzierter, thermischer Aktuation ist das sehr langsame Ansprechverhalten insbesondere bei miniaturisierten Systemen; thermisch ansteuerbare Formgedächtnislegierungen (Shape Memory Alloy, kurz SMA), bei denen die Krafterzeugung durch die Phasentransformation in einer Metall-Legierung geschieht, erlauben bei kleinem Gewicht und Volumen einfache und robuste Aktuation, die jedoch auf zwei Positionen (für hohe und niedrige Temperaturzustände) beschränkt ist [Neh02]. Magnetostriktive Aktoren (Giant Magnetostrictive Alloy, kurz GMA), deren Antriebsprinzip (analog zur piezoelektrischen Aktuation) auf einer durch Magnetfeldeinwirkung hervorgerufenen Formänderung beruht, weisen langsames Zeitverhalten auf und sind daher z. B. nicht adäquat zu piezoelektrischen Massenträgheitsantrieben (vgl. Kapitel B.3.3) einsetzbar [DVBB03]. Ähnlich verhält es sich mit photostriktiven Aktoren, die Energie von Photonen direkt in mechanische Bewegung umwandeln: Trotz ihrer Stellwege in der Größenordnung von Piezoaktoren [ITSM02] sind sie aufgrund großer Zeitkonstanten (einige Sekunden) derzeit noch nicht für drahtlose Mikroroboterantriebe geeignet [DVBB03].

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf Mikroroboter mit elektrisch betriebenen, kinematischen Aktoren, da diese derzeit eine höhere Positioniergenauigkeit bei hoher Aktuationsgeschwindigkeit bzw. Bandbreite erlauben. Insgesamt ist festzustellen, dass neben Aktoren, die auf elektrostatischen und elektromagnetischen Kräften basieren (siehe hierzu auch [DVC+92]), vorwiegend funktionale Elemente, insbesondere Piezoaktoren, eingesetzt werden.

Nicht selten wird auf Komponenten und Prinzipien aus der Mikrosystemtechnik zurückgegriffen. So finden in mesoskalaren Systemen im Milli- bis Zentimeterbereich Mikroaktoren bereits häufige Verwendung, obgleich ihre Effizienz bei Systemen dieser Größenordnung nicht vergleichbar ist mit der Effektivität in der ursprünglich vorgesehenen Mikrodomäne. Bei mobilen Miniatur- und Mikrorobotern gestaltet sich der Mikroaktoreinsatz immer noch schwierig, da die Aktoren entweder zu unpräzise sind, zu niedrige Kräfte erlauben oder zu hohe Spannungen bzw. Ströme benötigen [YNP+99].

B.3.1 Elektrostatische Aktoren

Die elektrostatische Kraft zwischen zwei Elektroden verhält sich proportional zu der Oberfläche der Elektroden und antiproportional zum Quadrat des Elektrodenabstandes. Da diese beiden gegensätzlich wirkenden Eigenschaften die Auswirkung einer Miniaturisierung egalisieren, bleiben die elektrostatischen Kräfte nahezu unbeeinflusst von einer Aktorverkleinerung. MEMS-Strukturen sind daher besonders für die Realisierung miniaturisierter, elektrostatischer Aktoren interessant [DLM+03].

Bild B.2 zeigt einen Ausschnitt des Antriebssystems für den in Bild 2.39 vorgestellten Mikroroboter des *Berkeley Sensor and Actuator Centers* (Universität von Kalifornien, USA). Elektrostatische Aktoren scheinen insbesondere für die Roboteraktuation im Bereich der



Bild B.2: REM-Aufnahme des elektrostatischen MEMS-Aktors zum Antrieb eines mikrotechnisch gefertigten Roboters ([HBP03], mod.)

Mikroroboter, bei denen Schwerkraft und elektrostatische Kraft die gleichen Größenordnungen aufweisen (vgl. Bild 2.4 in Kapitel 2.2), geeignet. Allerdings sind für ihren Antrieb derzeit noch sehr hohe Spannungen, nicht selten bis zu 100 V und höher, erforderlich. Aufgrund des in Kapitel 2.4.3.3 beschriebenen Energiedilemmas gestaltet sich der Einsatz dieser Mikroaktoren im Bereich der Mikrorobotik nach wie vor als sehr schwierig. Für Miniatur- und Mesoskalaroboter sind die elektrostatischen Kräfte zu schwach, um mechanische Aktuation, z. B. für die Feinpositionierung "schwerer" Roboterplattformen, zu generieren.

B.3.2 Elektromagnetische Aktoren

Elektromagnetische Kräfte, die gemeinhin in sämtlichen Arten elektrischer Motoren wirken, sind im Gegensatz zu den elektrostatischen Kräften abhängig von der größenspezifischen Realisierung des entsprechenden Aktors – die Kraft verhält sich dabei proportional zum Quadrat der linearen Dimension [YNP+99]. Elektromagnetische Aktoren sind die am häufigsten in der mobilen Robotik eingesetzten Antriebskomponenten, die entweder als einfach zu steuernde Gleichstrommotoren, oder als präzisiere, aber auch komplexere Schrittmotoren Verwendung finden. Für mesoskalare Systeme werden hohe Magnetfelddichten, die sich typischerweise in Motoren mit Seltenerd-Permanentmagneten finden, vorausgesetzt. Für den Einsatz in miniaturisierten Systemen sind Elektromotoren (z. B. Uhrenantriebe) mit Dimensionen von nur wenigen Millimetern Durchmesser und Länge erforderlich. Vermehrt wird daher zur Fertigung der Motorkomponenten auf Mikrotechniken zurückgegriffen – für eine Übersicht wird auf [Cap03] verwiesen. Trotz kleinster Dimensionen ist der Leistungsbedarf bis zu einigen 10 mW noch recht hoch für den Langzeiteinsatz in mobilen Systemen mit eigener Energieversorgung.

Allen Elektromotoren gemeinsam ist das geringe Drehmoment im Bereich einiger µN. Eine präzise Steuerung wird insbesondere bei Gleichstrommotoren durch hohe Drehzahlen von 20 000 U/min und mehr erschwert. Daher werden häufig (Reduktions-)Getriebe zur Vergrößerung des Drehmoments und/oder zur Reduktion der Geschwindigkeit an der Antriebswelle des Elektromotors angekoppelt. Die Getriebe implizieren jedoch zusätzlichen Platzbedarf und führen, um diesem Nachteil etwas entgegenzuwirken, zum Einsatz platzsparender, aber aufwändig herzustellender Mikro-Planetengetriebe: Die nur wenige Mikrometer kleinen Zahnräder lassen sich nicht mehr mit herkömmlichen Herstellungsverfahren fertigen; wie auch bei der Motorfertigung werden aufwändige Mikrotechniken, wie z. B. das EDM- oder das LIGA-Verfahren, notwendig. Doch auch trotz des großen Fertigungsaufwandes und den Einsatz von Schrittmotoren und Mikrogetrieben ist eine sicher kontrollierbare Präzisionsbewegung bis in den Nanometerbereich, wie sie für Mikroroboter essentiell gefordert wird, derzeit noch nicht möglich.

B.3.3 Piezoelektrische Aktoren

Verglichen mit anderen Aktortechnologien sind Piezoaktoren sehr attraktiv für miniaturisierte Roboter, beispielsweise den autonomen, 4,7 cm³ kleinen Miniatur-Röhrenroboter der *Denso Corporation* [KIOK97]: Diese Aktoren haben keine beweglichen Komponenten zu tragen oder abzusetzen, zeichnen sich durch hohe Ansprechgeschwindigkeiten aus und stellen darüber hinaus (vereinfacht betrachtet) keine reellen Leistungsverbraucher dar [MMS+99]. Piezoaktuatoren beruhen auf dem inversen piezoelektrischen Effekt, der die mechanische Verformung spezieller Piezomaterialen bei Anlegen einer Spannung beschreibt – eine Materialübersicht findet sich z. B. in [Ber03] . Diese zu den Festkörperantrieben zu zählenden Aktoren zeichnen sich durch große Kräfte und Bewegungsauflösungen im (Sub-)Nanometerbereich aus (Tabelle B.1). Ein wichtiges Einsatzgebiet von Piezoaktoren, das an dieser Stelle allerdings nicht weiter vertieft werden soll, liegt im Bereich der Ultraschallmotoren, die, eine kontinuierliche Bewegung erzeugend, in linearen oder rotierenden Motoren für exakte Positionieraufgaben Verwendung finden [Uch97].

Antriebsprinzip	Reichweite	Auflösung	Bemerkungen
Piezoelektrisches Element ohne Verstärkung	0,05 ~ 0,5 µm	0,01 ~ 0,1 nm	Transversal-, Axial- oder Scher-Modus, (Sche- rung erzielt größte Deformation)
Piezostapel (Multilayer)	2 ~ 20 µm	0,5 ~ 0,5 nm	Große elektrische Kapazitäten, teuer
Bimorph oder Monomorph	50 ~ 1000 µm	10 ~ 250 nm	Kleine Kräfte, niedrige Resonanzfrequenzen
Monolithische Biege- schwingungen	1 ~ 5 µm	0,2 ~ 2 nm	Monolithisch piezoelektrische Aktoren (MPA), kleine Kräfte, zerbrechlich
Ultraschallmotor	einige cm	50 ~ 500 nm	Große Schubkräfte
Inchworm-Motor (Kriech- antrieb)	einige cm	≤ 1 nm	Große Schubkräfte, 3 Aktoren erforderlich, teuer
Laufmechanismus	einige cm	0,1 ~ 10 nm vom Aktortyp abhängig (einfa- ches Element oder Biegeaktor)	Zwei oder mehr Aktoren erforderlich
Stoßantrieb (<i>Impact Driv</i> e)	einige cm	einige nm (abhängig von Aktor, Masse, u. Oberflächenbeschaffenheit)	Sehr einfach, Auflösung auf Größe eines Ein- zelschritts beschränkt
"Stick-Slip" (u. a. "Push-Slip")	einige cm	≤ 1 nm	Sehr einfach

Tabelle B.1: Vergleich von Reichweite und Auflösung bei Positionierung mittels piezoelektrischer Aktoren (oberer Bereich: lineare Aktoren, unterer Bereich: piezoelektrische Motoren) [BDVB03]

Bei Piezoaktuatoren beläuft sich die relative Verformung (Dehnung) nur auf etwa 0,1%. Zur Erzielung größerer Wirkbereiche (Hubwege) ist eine mechanische Verstärkung der Deformation erforderlich [YNP+99]. Jedoch ist diese nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Daher werden mit Piezoaktoren insbesondere auf Schrittmechanismen basierende Direktantriebe realisiert, die bei vergrößertem Wirkungsbereich des Aktors dennoch nicht den Vorteil einer hohen lokalen Auflösung einbüßen: Entweder kann die Schrittweite sehr klein gehalten und/oder der Einzelschritt aufgrund präziser Deformierbarkeit des Piezomaterials in mehrere Schritte weiter untergliedert werden. Verschiedene Schrittmechanismen sind in [Zes97] aufgeführt. Für die Mikrorobotik sind hierbei insbesondere Kriechantriebe, Laufmechanismen und die auf dem Prinzip der Massenträgheit basierenden Aktoren interessant. Nicht immer ist hierbei eine eindeutige Zuordnung möglich. So kann die piezoaktorische Antriebseinheit des 3-DOF-Mikroroboters *NanoWalker* je nach Ansteuersignal mit seinen sich verbiegenden Roboterbeine (PZT-Röhrchen) in verschiedenen Modi arbeiten: entweder sequentiell angesteuert in einer Art Gehbewegung oder bei simultaner Aktuation aller Roboterbeine als Trägheitsantrieb [Ber03].

Als Schrittantriebe realisiert, erlauben Piezoaktoren, eine hohe Schrittgeschwindigkeit, da die Einzelschritte mit Frequenzen von einigen kHz wiederholt werden können. Ein Problem besteht jedoch in den hohen Spannungen: So werden z. B. bei PZT-Piezokeramiken für relative Deformationen von nur 0,015% typischerweise Spannungen von etwa 100 V benötigt [SBBC00]. Um diese hohen Spannungen aus den für mobile Roboter üblichen Batteriespannungen zu erzeugen, ergeben sich für die On-Board-Elektronik nicht nur hinsichtlich des Platzbedarfs zahlreiche Problemstellungen, wie sich am Beispiel des mobilen, drahtlosen *NanoWalkers* (vgl. Kapitel 2.4.3.3) belegen lässt.

Vereinfacht betrachtet stellen Piezoaktoren für die Ansteuerelektronik eine kapazitive Last im Bereich von bis zu einigen 100 nF dar [Ber03]. Für jeden Einzelschritt eines piezoaktorischen Massenträgheitsantriebes muss diese Kapazität auf- und wieder entladen werden. In einer ersten Näherung kann die Energie *W* zum Aufladen der Piezoaktorkapazität *C* mit der Spannung *U* durch (B.1) beschrieben werden.

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \tag{B.1}$$

Würde zum Laden dieser Kapazität eine lineare Verstärkerstufe eingesetzt werden, so würde etwa nur die Hälfte der Ausgangsenergie des Verstärkers in der Kapazität gespeichert und die übrige Energie von den Transistoren des Verstärkers selbst verbraucht werden. Umgekehrt würde dies bedeuten, dass der Energieverbrauch bei Einsatz linearer Verstärker im Vergleich zu (B.1) nahezu doppelt so groß wäre. Erschwerend würden die hohen erforderlichen Ansteuerspannungen zu einem hohen Energiebedarf der Leistungselektronik und damit zu einer hohen Wärmeentwicklung führen. Daher sind spezielle schaltungstechnische Maßnahmen, beispielsweise stromgegengekoppelte Verstärkerschaltungen (*Current-Mode Controller*) oder SC¹-Verstärkertechniken notwendig, welche die Energieeffizienz der Treiberstufen im Vergleich zu linearen Verstärkerschaltungen erheblich steigern können [DVBB03]. Weiterhin sind aufgrund der hohen Schrittfrequenzen und Ansteuerspannungen insbesondere bei hoch integrierten Schaltkreisen erheblicher schaltungstechnischer Aufwand und der Einsatz spezieller Halbleitertechnologien erforderlich, um auf konventionelle, "Platz verschwendende" DC/DC-Konverter für die hohen Spannungsebenen verzichten zu können [CMS+04].

Kriechantriebe

Der Kriechvorgang beschreibt ein Schrittprinzip, das auf der Kontrolle der Reibungskräfte zwischen den Beinen und einer Unterlage (Roboterarbeitsfläche) beruht. Bild B.3 zeigt ei-



Bild B.3: Grundprinzip des Kriechantriebes nen Schrittmotor bestehend aus zwei fixierbaren Beinen, die über einen dazwischen liegenden Aktor miteinander verbunden sind. Während der Vorwärtsbewegung ist ein Bein auf der Unterlage festgeklemmt (a). Hat der Aktor seine Endposition erreicht, wird die Klemmbedingung gewechselt (b). In der folgenden Phase wird der nächste Halbschritt durchgeführt (c), und das Bein anschließend wieder fixiert (d). Der Einzelschritt ist damit abgeschlossen. Um die Richtung zu invertieren, ist lediglich in umgekehrter Reihenfolge zu verfahren.

Eine einfache Möglichkeit, die Beine festzuklemmen, besteht in der mechanischen Fixierung mittels Greifmechanismus. Dies allerdings erfordert enge Fertigungstoleranzen und reduziert die Bewegungsmöglichkeiten normalerweise auf nur einen Freiheitsgrad: So läuft der

Inchworm[®] beispielsweise mit Hilfe röhrenförmiger Piezoaktoren entlang eines sehr präzise gefertigten Keramikpleuels. Aber nicht nur durch Greifmechanismen, sondern auch durch elektrostatische oder, wie bereits in Kapitel 2.4.3.2 vorgestellt, durch magnetische Feldkräfte lassen sich Klemmmechanismen realisieren. Durch Kriechantriebe können einfache und robuste Systeme aufgebaut werden. Nachteilig ist die höhere Zahl an benötigten Aktoren je Freiheitsgrad und damit verbunden erhöhter Kontrollaufwand und zusätzlicher Energie- und Platzbedarf.

¹ Switched Capacitor-Technik, zu deutsch Schalter-Kondensator-Technik

Massenträgheitsantriebe – "Impact Drive" oder "Stick-Slip"

Auf der Massenträgheit basierende Schrittantriebe kombinieren hohe Auflösungen mit großen Stellwegen durch Wiederholung vieler Einzelschritte des Kurzbereichaktors. Dieser ist mit einem Körper, dem sog. Gleitstück verbunden, welches in der Lage ist, auf der Basisplattform in Richtung der Aktordeformation entlang zu rutschen. Aufgrund des "einfachen" mechanischen Aufbaus sind Massenträgheitsantriebe für die Mikrorobotik sehr interessant; theoretisch genügt ein einziger Aktor je Freiheitsgrad. Grundsätzlich kann zwischen dem Stoßantrieb ("Impact Drive") [ZBS95] und dem "Stick-Slip"-Antriebsmechanismus¹ [BC98] unterschieden werden. Beiden Verfahren gemeinsam ist das asymmetrische Ansteuersignal (meist eine Sägezahnspannung) für die unterschiedlichen Bewegungsphasen "Haften" und "Durchrutschen" (Bild B.4 Mitte).

Stoßantriebe werden aus zwei über einen piezoelektrischen Aktor verbundenen, massebehafteten Körpern aufgebaut (Bild B.4 rechts). Einer dieser Körper dient als Gleitstück,



das die Arbeitsfläche berührt und aufgrund seiner Masse (Normalkraft) für ausreichend Reibung auf der Arbeitsfläche sorgt. Eine durch eine schnelle Aktordeformation hervorgerufene, stoßartige Kraft überwindet die durch das Gleitstück hervorgerufen Reibungskraft und versetzt beide Körper gemeinsam um einen Einzelschritt. Danach bewegt eine nachfolgende, langsame Aktorverformung in Gegenrichtung ausschließlich den nicht

Bild B.4: Massenträgheitsantriebe: Stick-Slip und Impact Drive

mit der Arbeitsfläche verbundenen Antriebskörper. Durch Wiederholen dieser Sequenz wird ein schrittweises Fortbewegen erzwungen. Die Auflösung ist hierbei allerdings auf die Größe eines Einzelschrittes beschränkt. Als Einsatzbeispiel für Stoßantriebe sei hier auf den Nanoroboter der ETH Zürich verwiesen [ZBS95], [CRP97], [Zes97] (vgl. Kapitel 2.3.3.2).

Die vielfältigen Realisierungsmöglichkeiten mit monomorphen oder bimorphen Piezostrukturen (siehe hierzu auch [Ber03]) sprechen für die Anwendung von "Stick-Slip"-Aktoren bei mobilen Mikrorobotern. Beispiele wie der MINIMAN-Roboter [FSF+00] oder die Miniaturroboter der Universität Oldenburg [KSTF05] sind hierzu ebenso zu zählen, wie der mittels "Push-Slip"-Verfahren angetriebene NanoWalker [MSMH00]. Bei Stick-Slip-Antrieben wird der als träge Masse zu betrachtende Roboter (mobiler Part) durch verformbare Beine, die elektrische Energie in mechanische umwandeln, auf der Arbeitsfläche getragen und geführt (Bild B.4 links). Dabei kommt, verbunden mit dem Führungssystem zum Abblocken sämtlicher unerwünschter Verschiebungen, dem mechanischen Interface zwischen Beinen und Arbeitsfläche besondere Bedeutung zu: Die Materialien müssen derart gewählt werden, dass die sich berührenden Oberflächen trotz erhöhten Anpressdruckes immer glatt sind, um eine kontrollierte Bewegung garantieren zu können – u. a. werden harte, verschleißarme Edelsteinmaterialien wie z. B. (halb-)kugelförmige Rubine als mechanische Kontaktelemente an den Beinen befestigt [MSH00]. Man unterscheidet zwei verschiedene Operationsmodi, den Stepping-Modus und den Scanning-Modus [BC98]. In der erstgenannten Betriebsart besteht jeder Schritt aus einer langsamen Verformung der Beine, gefolgt von einer abrupten Rückwärtsbewegung. Während der langsamen Deformation (Rampe der Sägezahnfunktion) folgt die Masse des Roboters den Piezobeinen aufgrund der vorherrschenden Reibungskräfte mit der Arbeitsfläche ("Stick"- oder Haft-Phase). Bei der plötzlichen Rückwärtsbewegung der Piezobeine (senkrechte Flanke des Sä-

¹ Zu deutsch: "Haften und Durchrutschen"

gezahnsignals) kann die Robotermasse aufgrund ihrer Trägheit dieser Bewegung nicht folgen ("Slip"- oder Durchrutsch-Phase) – der Roboter hat sich um einen Einzelschritt fortbewegt. Der *Stepping*-Modus erlaubt Versetzungen über lange Distanzen bei hoher Geschwindigkeit (typisch 5 mm/s); die Auflösung ist dabei auf eine Schrittweite von etwa 200 nm bis 400 nm begrenzt. Sobald die aktuelle Position weniger als ein Einzelschritt von der Zielposition entfernt liegt, wird in den *Scanning*-Modus umgeschaltet: Die Beine werden langsam verformt, bis die gewünschte Endposition erreicht ist. Die Auflösung, die maßgeblich durch das Rauschverhalten der Treiberelektronik, durch Auflösung und Linearität der D/A-Wandler und durch die Auflösung der Sensorrückkopplung beeinflusst wird, liegt in dieser Betriebsart bei nur einem Bruchteil des Einzelschritts (typisch 5 nm). Im *Scanning*-Modus offenbart sich der Vorteil der Stick-Slip-Aktoren gegenüber den Stoßantrieben, da die Bewegungsauflösung nicht mehr auf einen Einzelschritt beschränkt ist [MiC05].

B.4 Energieversorgung

Für die Energieversorgung drahtloser, mobiler Mikroroboter sind mehrere Optionen denkbar, zum einen der Einsatz erneuerbarer (wieder aufladbarer oder austauschbarer) On-Board-Energiespeicherelemente, zum anderen die Energiegewinnung aus einer externen Quelle (kabellose Energieübertragung), oder aber eine Kombination dieser Möglichkeiten. Tabelle B.2 führt einige Energiequellen auf. Der zusätzlich angegebene Skalierungsfaktor kann als Maß für weiteres Miniaturisierungspotential verstanden werden: Umso geringer die Größenabhängigkeit, desto geringer sind die Energieverluste bei weiterer Miniaturisierung der Energiequelle.

Energiequelle	Energie [Wh/l]	Skalierungsfaktor
Brennstoffzelle	31000 (ungekapselt)	L3
Benzin	9100	L3
Batterie	230 – 1300	L3
Akkumulator	40 - 210	L ³
SuperCap (mit 9 cm ³)	1,8	~L ⁴
Feder	0,07	L ³
Solarzelle	0 – 150 W/m²	L ²

Tabelle B.2: Vergleich verschiedener Energiequellen bzgl. ihrer Energie und ihrer Größenabhängigkeit [CES02]: Die Solarzelle als kabellose Energiequelle ist farblich hervorgehoben.

Batterien, Akkumulatoren, SuperCaps (Kondensatoren im Faradbereich), Federelemente und Treibstoffe stellen die gängigsten Optionen derzeitiger Energiespeicher dar. Treibstoffe haben hierbei die höchste Energiedichte, aber Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen sind für den Bereich der Miniatur- oder Mikroroboter noch nicht verfügbar. Elektrische Energiespeicher in Form von Batterien, Akkus und SuperCaps stehen dagegen schon in verschiedenen Bauformen im Millimeterbereich zur Verfügung und finden daher bei verschiedenen mobilen Mesoskala- und Miniaturrobotern bereits Anwendung, z. B. bei KHEPERA, ALICE oder MARV (vgl. Kapitel 2.4.3.3). In [MGH00] werden verschiedene Batterie- und Akkutechnologien im Hinblick auf ihre Einsatzfähigkeit für mit Präzisionsaktoren versehene, leistungshungrige Roboter untersucht. Batterien weisen die höchste Energiedichte auf, sind jedoch im Vergleich zu Akkumulatoren und SuperCaps nicht wieder aufladbar. Dies gestaltet den Einsatz bei miniaturisierten Robotern sehr problematisch, da der Austausch erschöpfter Batterien kompliziert und teuer ist – allerdings scheint sich hier eine (wenn auch ökologisch fragwürdige) Lösung des Batterieproblems abzuzeichnen, nicht zuletzt begünstigt durch die im letzten Jahrzehnt erzielten Fortschritte im Bereich der Massenfertigung von Mikrostrukturen: die Entwicklung von Mikrorobotern als Wegwerfartikel [DVBB03]. Die Energiedichte von SuperCaps ist sehr begrenzt, aber verglichen mit Akkumulatoren erlauben sie höhere Lade- und Entladeströme.

Obwohl sogar bereits erste Mikrobatterien für autonome MEMS-Systeme mittels MST-Technologien gefertigt worden sind [HHL01], ist in absehbarer Zeit nicht damit zu rechnen, über eine für Mikroroboter geeignete, leistungsstarke Mikrobatterie verfügen zu können [Fat04]. Neue Konzepte sind notwendig, um den Energiebedarf leistungshungriger, schneller Präzisionsantriebe zukünftiger Robotersysteme abdecken zu können.

B.4.1 Kabellose Energieübertragung

Neben ersten Ansätzen, Mikroroboter durch Feldkräfte im Innern eines Kernspintomographen mit Energie zu versorgen [MMF+04], sind insbesondere Schleifkontakte, Solarzellen, Mikrowellen, induktive Kopplung und Licht für photostriktive Antriebe (vgl. Kapitel B.3) im Zusammenhang mit Techniken für die drahtlose Energieübertragung zu benennen [DVBB03]. Die größte Herausforderung bei der Implementierung besteht dabei in einer geeigneten Kopplung von Roboter und Umgebung, um eine Energieübertragung für jede Pose des Roboters ohne Einschränkung seiner Mobilität zu ermöglichen.

Schleifkontakte – Power Floor

Während Schleifkontakte für lineare Systeme eine einfache und praktische Lösung zur elektrischen Kontaktierung bewegter Objekte darstellen, gestaltet sich ihr Einsatz bei mobilen Robotern mit zwei oder drei Freiheitsgraden zunehmend kompliziert. Für planare Bewegungen stellt die Kontaktierung des Roboters an Boden und Oberteil, einem Autoskooter gleich, einen interessanten Lösungsansatz dar. Allerdings könnten aus den hierfür notwendigen mechanischen Aufbauten oberhalb der Roboterarbeitsfläche erhebliche Einschränkungen besonders für visuelle Sensorsysteme zur Roboterbeobachtung resultieren.

Daher beschränken sich Miniatursysteme wie der NanoWalker oder der ursprünglich per Kabel versorgte Mesoskalaroboter *KHEPERA* auf eine ausschließlich bodenseitige Kontakteirung. Aufgrund seiner vier Schleifkontakte ist *KHEPERA* bei entsprechender Gestaltung bzw. Fertigung seiner leitfähigen (kupfernen) Roboterarbeitsfläche eine nahezu uneingeschränkte Bewegungsfreiheit gestattet [Mar99].

Komplizierter verhält es sich beim dreibeinigen NanoWalker, für den deshalb ein spezielles Power Floor System konzipiert worden ist [MGH00]: Der Power Floor besteht aus positiv bzw. negativ geladenen Energiebändern, die durch Isolationszonen voneinander getrennt werden, um auf diese Weise Kurzschlüssen vorzubeugen: Die könnten auftreten, wenn ein Roboterbein z. B. vom positiven zum negativen Energieband überwechseln würde. Zusätzlich werden im Power Floor neutrale Zonen implementiert, um zumindest in diesen Bereichen eine weitestgehend ungestörte Funktionsfähigkeit des integrierten Rastertunnelmikroskops zu erzielen. Aufgrund der hochpräzisen Bewegungsmöglichkeiten des NanoWalkers erfordert die Fertigung des Power Floors, nicht zuletzt wegen des hohen Energiebedarfs des Miniaturroboters, aufwändige mikrotechnische Herstellungsverfahren. Die Dreibeinstruktur des NanoWalkers stellt zusätzlich erhebliche Anforderungen an das Robotersteuerungssystem, da dieses jederzeit sicherstellen muss, dass der Roboter mit einem Bein die positive und einem weiteren die negative Energieversorgungsebene kontaktiert [DVBB03]. Darüber hinaus steigt die Komplexität der Roboterelektronik, da nicht nur jedes Roboterbein sowohl eine positive als auch eine negative Versorgungsspannung verkraften muss, sondern auch ein kurzfristiger Versorgungsspannungsausfall beim Übergang über eine neutrale Zone hinweg gepuffert werden muss [MFO+01].

Solarzellen

Solarzellen könnten die Anforderungen an eine homogene Energieübertragung erfüllen, aber leider schränkt ihre niedrige Energieausbeute unter Standard-Lichtbedingungen den Einsatz in vielen Bereichen ein. Für die Energieversorgung von Mikrorobotern und kleinsten Miniaturrobotern scheinen Solarzellen gut geeignet zu sein, da sich ihre lieferbare Energie lediglich mit dem Quadrat ihrer Längenausdehnung verringert (vgl. Tabelle B.2). Darüber hinaus können sie durch Mikrotechniken mit kleinen Strukturgrößen im Sinne einer Massenproduktion gefertigt werden. Die Ausgangsspannung von Solarzellen liegt typischerweise im Bereich einiger Volt und ist daher allerdings z. B. nicht für die direkte Versorgung piezoelektrischer Aktuatoren ausreichend. Durch die serielle Verbindung mehrer Zellen müssen photovoltaische Hochspannungselemente aufgebaut werden (siehe z. B. Bild 2.39), um auch Piezoaktoren mit ausreichend Energie versorgen zu können [SITK97].

Problematisch ist die niedrige Energieausbeute unter Standard-Lichtbedingungen. Daher ist meist, wie z. B. beim Miniaturroboter *ALICE*, eine höheren Platzbedarf implizierende Kombination von Solarzellenplatte und Energiespeicher (Akku oder SuperCap) notwendig [Cap03]. Die Verwendung starker, ungerichteter, externer Lichtquellen stellt leider keine Lösung dieses Problems dar, da insbesondere auf Infrarotsensoren basierende externe und/oder On-Board-Systeme in ihrer Funktionsfähigkeit stark beeinträchtigt werden können [CS05]. Hier könnte das direkte Nachführen eines fokussierten Lichtstrahles hoher Intensität, wie z. B. in [Tou03] vorgestellt, Abhilfe schaffen; jedoch erscheint ein solches Konzept insbesondere für mobile Multiroboterapplikationen als zu aufwändig.

Mikrowellen

Mikrowellen stellen eine weitere Methode dar, Energie drahtlos zu übertragen [Kri00]. Im Rahmen einer Kooperation der Firmen *Denso, Sanyo* und *Toshiba* ist für den Röhren inspizierenden, ca. 4,7 cm³ kleinen Miniaturroboter (9,5 mm Durchmesser, 66 mm Länge) ein Konzept zur Energieversorgung mit Mikrowellen im Frequenzbereich von 22–24 GHz erfolgreich umgesetzt worden: Die zu inspizierende Röhre, die als Hohlleiter fungiert, erlaubt neben einer Leistungsübertragung von 480 mW im 22 GHz-Band gleichzeitig eine Datenkommunikation bei 24 GHz zur Übertragung der On-Board-Kamerabilder bei einer Datenrate von 2,5 Mbit/s [MTSK01]. Trotz dieser ersten erfolgreichen Entwicklung sind Mikrowellen derzeit noch keine Ultimativlösung, da sich der Mikrowelleneinsatz für miniaturisierte Roboter, die im "Freiraum" und somit außerhalb einer Hohlleiter-Röhre arbeiten, nur sehr aufwändig realisieren lässt, zumal ein Kontakt des Operators (Beobachters) mit der gesundheitsschädlichen Strahlung unbedingt vermieden werden muss.

Induktive Energieübertragung

Drahtlose Energieübertragung durch magnetische Kopplung zweier Spulen hat sich bereits in verschiedenen Einsatzgebieten etabliert, sei es bei biomedizinischen Implantaten [Sch00] oder im Bereich der RFID-Technik [Fin02]. Ursächlich hierfür ist nicht zuletzt, dass sich selbst energiehungrige Systeme mittels induktiver Kopplung äußerst effizient drahtlos versorgen lassen und dabei gleichzeitig noch Daten im Sinne einer Kommunikationsschnittstelle übertragen werden können [BPNP02].

Die induktive Energie- und Datenübertragung beruht auf einem sich verändernden, i. d. R. durch eine Sendespule erzeugten Magnetfeld und einer Empfangsspule, die sich innerhalb dieses Magnetfeldes befindet (siehe auch Bild 3.1). Ändert sich der magnetische Fluss durch die Empfangsspule, wird in dieser eine Spannung induziert. Verglichen mit elektrischen Schleifkontakten treten bei der induktiven Energieübertragung zwischen Roboter und Arbeitsfläche keine zusätzlichen Reibungseffekte auf, die z. B. die für autonome Roboter essentielle Weglängenmessung negativ beeinflussen oder das Kontrollsystem zusätzlich verkomplizieren könnten. Weiterhin sind keine (mechanischen) Maßnahmen vorzusehen, um zu jeder Zeit, unabhängig von Roboterbewegung und Roboterpose, eine sichere Kontaktierung zwischen Roboter und z. B. *Power Floor* herstellen zu können.

Eine wesentliche Schwierigkeit der induktiven Verbindung stellt die hohe Empfindlichkeit gegenüber Abstandsänderungen zwischen Sender- und Empfangsspule dar. Da derzeitig existierende Sendeeinheiten kein großflächig homogen verteiltes, sich veränderndes Magnetfeld zur Verfügung stellen können, wird für bisherige Applikationen ein möglichst stationärer Empfänger gefordert. Versuche, mobile Systeme mit Hilfe von über den gesamten Arbeitsbereich verteilten Spulen energetisch zu versorgen, blieben daher meist auf nichtholonome 2-DOF-Fahrzeuge (mit weitestgehend linearer Bewegungsrichtung) begrenzt [JCG+96].

Für miniaturisierte Robotersysteme, die über mindestens drei Freiheitsgrade verfügen sollen (vgl. Kapitel 2.4.1), ist die induktive Energieübertragung bisher nicht umgesetzt

worden. Ein wesentlicher Grund hierfür ist in der Tatsache begründet, dass induktive Energieübertragungssysteme erheblich aufwändiger und teurer sind als die zuvor erwähnten Schleifkontaktsysteme: Der *Power Floor*, dessen Layout sich aufgrund des zu implementierenden Mehrspulensystems viel komplizierter gestaltet, muss statt an ein gewöhnliches Gleichspannungsnetzteil an einen Hochfrequenzgenerator mit besonderer Verstärkertechnik (z. B. Klasse-E-Verstärker) angeschlossen werden. Darüber hinaus gestaltet sich auch die Miniaturisierung derartiger Systeme zunehmend schwieriger, da der Durchmesser der Empfängerspule nicht so klein werden darf, dass der durch den Skin-Effekt bedingte Widerstandsanstieg dominiert [Mar99]. Bisherige Systeme leiden, je nach geometrischer Anpassung zwischen Primär- und Sekundärspule, erheblich unter der stark ortsabhängigen Variation des übertragenen Energieflusses. Sekundärseitige, Platz verschwendende Spannungsregler sind erforderlich und erschweren die Roboterminiaturisierung zusätzlich.

Diese Punkte verdeutlichen den existierenden Forschungsbedarf, um durch spezielle Spulendesigns und Spulentreibersysteme dem Problem der Positions- bzw. Abstandsabhängigkeit zu begegnen. Weiterhin gilt es, die Methodik zum Verändern des magnetischen Flusses zu überdenken. Gängigstes Verfahren, den magnetischen Fluss durch die Empfangsspule zu variieren, besteht im Treiben der Sendespule mit einem sich ständig verändernden (alternierenden) Strom. Alternativ kann die magnetische Flussänderung in der Empfängerspule aber auch dadurch erreicht werden, dass diese Spule einem wandernden magnetischen Feld ausgesetzt wird [Gao05a]. Dieses neuartige Konzept ist für miniaturisierte mobile Mikroroboter erstmals im Rahmen des Mikrorobotersystems MiC-RoN umgesetzt worden (Kapitel 4.1.2.3).

Danksagung

Die vorliegende Doktorarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut Biomedizinische Technik (IBMT), Abteilung Mikrosysteme / Lasermedizin, in St. Ingbert. An dieser Stelle darf ich allen Beteiligten danken, die mir behilflich waren, diese Dissertation im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes zu erstellen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Günter Fuhr, der die Betreuung meiner Arbeit übernommen und mit seinen Anregungen zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen hat. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Prof. Fuhr in seiner Funktion als Institutsleiter des Fraunhofer IBMT für die Bereitstellung und Nutzung der entsprechenden Infrastruktur, wodurch mir die Verwirklichung eigener Ideen, insbesondere die Konzeption und Installation der für die ASIC-Entwicklung benötigten Ausstattung ermöglicht wurde.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Alfons Blum für sein Interesse sowie seine Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats. Schon während meines Studiums waren mir seine fachlichen Ratschläge und Unterstützungen sehr wertvoll. Herr Prof. Blum hat mich maßgeblich in meinem Beschluss bestärkt, weiter wissenschaftlich zu arbeiten.

Herrn Dr. Oliver Scholz danke ich für die fachliche und persönliche Betreuung der Doktorarbeit, für seine wissenschaftlichen Ratschläge und Diskussionsbeiträge sowie seine organisatorische Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. Josep Samitier i Martí und Herrn Dr. Manel Puig i Vidal möchte ich meinen Dank aussprechen für die konstruktive Zusammenarbeit während der ASIC-Integration an der UNIVERSITÄT BARCELONA. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Dr. Sowada von VISHAY SEMI-CONDUCTORS für die Unterstützung bei der Charakterisierung und Auswahl geeigneter Infrarot-Transceivermodule.

Saarbrücken, den 14. April 2009

Marc Nierlich