# Übertragungstechnologien, Simulation und Entwurf robuster Regelungen für drahtlose Feldgeräte in der Industrie

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

von

#### Thomas Stein, M.Sc.

geboren in Erlenbach am Main

Referent:	Prof. DrIng. Ulrich Konigorski
Korreferent:	Prof. DrIng. Christian Hochberger

Tag der Einreichung:28. Juni 2022Tag der Prüfung:10. November 2022



D 17 · Darmstadt 2022

Übertragungstechnologien, Simulation und Entwurf robuster Regelungen für drahtlose Feldgeräte in der Industrie

Genehmigte Dissertation von Thomas Stein, M.Sc. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2023 Tag der mündlichen Prüfung: 10. November 2022

D 17 · Darmstadt 2022

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als: URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-230411 URI: http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/23041

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUprints, E-Publishing-Service der TU Darmstadt http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative-Commons-Lizenz: Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International https://creativecommons.org/licenses/

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungstechnik und Mechatronik an der Technischen Universität Darmstadt sowie in Kooperation mit der Samson AG. Alle in dieser Forschungsarbeit dokumentierten Ergebnisse sind im Rahmen eines Forschungsprojektes zum Themengebiet Funkregelungen gewonnen worden.

Allen Beteiligten, die mich bei dieser Arbeit aktiv oder passiv unterstützt haben, danke ich herzlichst. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Konigorski für das Ermöglichen der Promotion und seiner großartigen und zuverlässigen Begleitung während des gesamten Bearbeitungszeitraums. Seine wertvollen Ratschläge und seine Geduld haben mich bei der Ausarbeitung außerordentlich unterstützt. Ebenfalls haben die hervorragende Atmosphäre und die Diskussionen am Institut maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Für die Finanzierung des Forschungsprojektes sowie für die regelmäßigen und ideenreichen Projekttreffen zum Thema Funkregelungen möchte ich mich vielmals bei der Samson AG bedanken.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hochberger für die Übernahme des Koreferats und seine nützlichen Tipps zur Finalisierung der Dissertation. Ein außerordentlicher Dank gilt meinen Ansprechpartnern Prof. Dr.-Ing. Kiesbauer und Dr.-Ing. Fuchs bei der Samson AG, sowie meinen ehemaligen Kollegen Frau Hoppe und Herrn Dr.-Ing. Gundlach für die Korrekturlesungen und Verbesserungsvorschläge. Besonders danken möchte ich auch meinem ehemaligem Pfadfinder-Gruppenleiter Dr. Mauthofer für seine Korrekturvorschläge und für seine positiven Rückmeldungen, welche mich zur Abgabe der Dissertation ermutigt haben.

Zusätzlich möchte ich allen Studierenden, die ich im Rahmen von Bachelor-, Masterarbeiten und Projektseminaren betreuen durfte, meinen Dank aussprechen. Die zahlreichen Diskussionen mit ihnen haben mich bei Erstellung der Dissertation ergänzend inspiriert und meine Zeit am Institut ausgesprochen bereichert.

Abschließend möchte ich meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden für ihre fortwährende Unterstützung während meiner gesamten Studien- und Promotionszeit von ganzem Herzen danken. Ohne sie wäre mein Studium und die Ausarbeitung der vorliegenden Promotion nicht möglich gewesen.

Frankfurt, Dezember 2022 Thomas Stein

# Inhaltsverzeichnis

Sy	mbole	e und Abkürzungen	VIII
Ku	ırzfass	sung	XIV
Ab	stract		XV
1	Einfi	ührung	1
	1.1	Aktueller Stand der Entwicklungen	2
		1.1.1 Drahtlose Kommunikation in der Hausautomation	3
		1.1.2 Drahtlose Kommunikation in der Industrie	5
		1.1.3 Drahtlose Kommunikation im Kontext zur Industrie 4.0	6
		1.1.4 Entwicklungsstand im Bereich von netzwerkbasierten Regelungen	8
	1.2	Problemdarstellung und Ziel der Arbeit	12
	1.3	Struktur der Arbeit	13
2	Vers	uchsstände und Ressourcen	16
	2.1	Vorstellung des Anlagenprüfstands	16
	2.2	Vorstellung des Drei-Tank-Versuchsstands	22
	2.3	Verwendete Hardware	25
	2.4	Begleitende und ergänzende Arbeiten	27
	2.5	Begriffsdefinitionen und Abtastungen in Funknetzwerken	29
		2.5.1 Begriffsdefinitionen	29
		2.5.2 Darstellung der Abtastung in Funknetzwerken	30
3	Funk	stechnologien, Netzwerkorganisationsformen und Funkstandards	32
	3.1	Begriffsdefinitionen	34
	3.2	Topologien von drahtlosen Netzwerken und mathematische Beschreibung	36
	3.3	Komponenten eines drahtlosen Netzwerks	39
	3.4	Open System Interconnection Modell (OSI-Model)	42
	3.5	Frequenzverfahren FHSS und DSSS	44
	3.6	Funkstandards	45
		3.6.1 IEEE 802.11 - Standard für Wireless Local Area Networks (WLANs)	46
		3.6.2 IEEE 802.15.1 - Standard für Personal Area Networks (PANs)	50
		3.6.3 IEEE 802.15.4 - Standard für Netzwerke mit niedrigen Datenraten	52
	3.7	Funkprotokolle	54
		3.7.1 WirelessHART	54
		3.7.2 Bluetooth	64
		3.7.3 MAC-Protokoll	78

	3.8	Frequenzmanagement und Koexistenz von drahtlosen Netzwerken	83
	3.9	Vergleich der vorgestellten Protokolle	86
4	Simu	lation von drahtlosen Übertragungsnetzwerken	90
	4.1	Simulationsgestützer Reglerentwurf	91
	4.2	Netzwerksimulatoren	93
	4.3	Aufbau einer Simulationsumgebung für WirelessHART	95
	4.4	HiL-Simulator	107
		4.4.1 Hardware-in-the-Loop-Simulation für WirelessHART	109
5	Verfa	hren für Regelungen mit drahtlosen Rückführungen	112
	5.1	Mathematische Beschreibung von dynamischen Systemen und Regelkreisen	112
		5.1.1 Beschreibung von Totzeiten in dynamischen Systemen	113
		5.1.2 Zeitverzögerungen bei der digitalen Übertragung von Daten	118
	5.2	Reglerentwurf für Systeme mit Übertragungsnetzwerken	120
	5.3	Zentrale und lokale Regelungskonzepte	122
	5.4	Synchronisation im Regelkreis mit drahtlosen Übertragungsstrecken	124
	5 5	Gain-Scheduling-PID-Regler	133
	5.6	Yokogawa-Konzept	137
	5.0	561 Grundstruktur	137
		5.6.1 Orundstruktur	140
	57	Predictive_Outage_Compensator	140
	5.7	5.7.1 Auslegung einer Durchflussregelung am Anlagenprüfstand	147
	58	Multiratenbeobachter	140
	5.0	Reglerentwurf om Beigniel eines Drei Tonk Systems	149
	5.9	Vorgleich der Pagelkonzente	150
	5.10		100
6	Simu	lationsergebnisse und Messungen an realen Versuchsaufbauten	164
	6.1	Gain-Scheduling-Durchflussregelung mit WirelessHART	164
	6.2	Yokogawa-Konzept mit WirelessHART	167
	6.3	Predictiv-Outage-Compensator mit WirelessHART	170
	6.4	Multiraten-Kalmanfilter	174
	6.5	Messergebnisse am Beispiel des Drei-Tank-Systems	179
	6.6	Simulation von Systemen mit veränderlichen Totzeiten	180
7	Zusa	mmenfassung und Ausblick	185
An	hang		191
	A.1	Zusatzinformationen zu Standards und Netzwerkprotokollen	191
		A.1.1 Topologieanordnung von Knoten eines WirelessHART-Netzwerks	191
		A.1.2 Befehlsstruktur eines WirelessHART-Kommandos	194
		A.1.3 Ergänzende Informationen zu Bluetooth 5.0 und Bluetooth-Mesh	195
		A.1.4 Kommando Strukur der Bluetooth Implementierung	199
	<b>B</b> .1	Scheduling der Übertragung in Funknetzwerken mit mehreren Regelkreisen	202

B.2 B.3	Prüfstand	205 205 206 210
Literatur	verzeichnis	213
Eigene V	eröffentlichungen	219
Studentis	sche Arbeiten	220
Technisc	he Unterlagen	223

# Symbole und Abkürzungen

#### Variablen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\Delta T$	Abtastzeit eines Systems	
$a_i$	Koeffizienten einer Differentialgleichung (DGL) oder des Nenners ei-	
	ner Übertragungsfunktion mit $i \in 0, 1, \ldots, n$	
$b_i$	Koeffizienten einer DGL oder des Zählers einer Übertragungsfunktion	
	mit $i \in 0, 1, \ldots, m$	
K <sub>D</sub>	Reglerverstärkung des D-Anteils eines Reglers	
KI	Reglerverstärkung des <i>I</i> -Anteils eines Reglers	
$K_{\mathrm{P}}$	Reglerverstärkung des P-Anteils eines Reglers	
N	Konstante des Realisierungspols des D-Anteils eines Reglers	

#### Physikalische Größen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\Delta p(t)$	Differenzdruck	bar
С	Geschwindigkeit	$\mathrm{ms^{-1}}$
h(t)	Ventilstellung	%
$h_i$	Füllstand des <i>i</i> -ten Tanks mit $i \in \{1, 2, 3\}$	m
p(t)	Druck	bar
q(t)	Durchfluss	$m^{3} h^{-1}$

#### Lateinische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
<u>A</u>	Systemmatrix	
<u>B</u>	Eingangsmatrix, Steuermatrix	
<u>C</u>	Ausgangsmatrix, Messmatrix	
<u>D</u>	Durchgangsmatrix	
<u>E</u>	Matrix zur Ermittlung von zusammenhängenden Mengen	
<u>e</u>	Vektor der Regelabweichung	
$e_{r,s}$	Matrixeintrag - Zeilenindex r und Spaltenindex s	
$\underline{H}$	Gewichtungsmatrix zum Gewichten des Eingangsvektors beim	
	Riccati-Entwurf	
<u>I</u>	Einheitsmatrix	
$\underline{J}$	Matrix in Jordanscher-Normalform oder Gütemaß	
<u>K</u>	Reglermatrix	
<u>P</u>	Riccati-Matrix des Reglers	

Symbol	Beschreibung	Einheit
<u>Q, S</u>	Gewichtungsmatrizen zur Gewichtung der Zustandsvektoren vom	
_	linear-quadratischen Regler (LQR)-Entwurf	
<u>R</u>	Allgemeine Rückführmatrix	
$r \times s$	Matrix mit <i>r</i> Zeilen und <i>s</i> Spalten	
<u>u</u>	p-dimensionaler Eingangsvektor / Stellgrößenvektor	
$\underline{w}$	Führungsgrößen-Vektor	
<u>x</u>	<i>n</i> -dimensionaler, allgemeiner Zustandsvektor	
$\underline{x}(t_0)$	Anfangszustandsvektor	
<u>y</u>	q-dimensionaler Ausgangsvektor	

## Dimensionen, ganzzahlige Parameter

Symbol	Beschreibung	Einheit
<i>i</i> , <i>j</i>	Zählindizes	
l	Angabe der Totzeit in ganzzahligen Abtastschritten	
т	Höchste auftretende Ableitung eines Systemeingangs	
n	Anzahl der Zustandsvariablen, Dimension eines Systems	
р	Anzahl der Eingangsgrößen bzw. Stellgrößen	
q	Anzahl der Ausgangsgrößen bzw. Messgrößen	
<i>r</i> , <i>s</i>	Zählindizes	

## Funktionen und Operatoren

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\deg(\bullet)$	Grad eines Polynoms	
$\det(\bullet)$	Determinante einer Matrix	
$f(\bullet)$	Vektor der differentiellen Gleichungen eines nichtlinearen Systems	
$\overline{g}(\bullet)$	Ausgangsvektoren eines nichtlinearen Zustandsraum-Systems	
$rang(\bullet)$	Rang einer Matrix	
$\underline{A}^{\mathrm{T}}$	Transponierte der Matrix <u>A</u>	
$\lfloor x \rfloor$	Abrundung des Wertes x	
$\lceil x \rceil$	Aufrundung des Wertes x	

## Griechische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
Δ	Abweichungen um einen Arbeitspunkt $(\underline{x}_{s}, \underline{v}_{s}, \underline{u}_{s})$	
λ	einzelner Eigenwert	
$\lambda_{\mathrm{R},i}$	<i>i</i> -ter Regelungseigenwert	
$\underline{\lambda}$	n-dimensionaler Vektor aller Eigenwerte eines Systems	
$\underline{\lambda}_R$	Vektor der vorzugebenden Regelungseigenwerte	

#### Separate Indizes

Symbol	Beschreibung	Einheit
AP	Arbeitspunkt	
В	Kennzeichnung eines Broadcast Graphen	
D	Kennzeichnung eines Downlink Graphen	
G	Kennzeichnung eines Netzwerk Graphen	
max	Kennzeichnung eines Maximalwertes	
Ν	Kennzeichnung eines Übertragungsmoduls als Abtaster	
Р	Prozesswert, Ausgangsgröße eines zu regelnden Prozesses	
R	Regler	
S	Regelstrecke	
Т	Kennzeichnung einer Totzeit	
U	Kennzeichnung eines Uplink Graphen	

\_\_\_\_\_

## Graphen und Mengen

Symbol	Beschreibung	Einheit
e <sub>ij</sub>	einzelne Kante vom Knoten <i>i</i> zum Knoten <i>j</i>	
Ε	Menge aller Kanten	
G(V, E)	Graph, der die Menge $V$ an Knoten und die Menge $E$ an Kanten	
	besitzt	
$v_i$	<i>i</i> -ter Knoten	
V	Menge, bestehend aus einer bestimmten Anzahl von Knoten	
8	Leere Menge	

## Mengenoperationen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A \cup B$ $A \cap B$	Vereinigungsmenge aus den beiden Mengen A und B Schnittmenge aus den beiden Mengen A und B	

## Sonstiges

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\mathbb{N}$	Natürliche Zahlen	
$\mathbb{N}^*$	Natürliche Zahlen ohne 0	
$\mathbb{R}$	Reelle Zahlen	
$\mathbb{R}_+$	Positive reelle Zahlen mit 0	
L	Laplace-Transformation	
Ľ	Z-Transformation	
$\wedge$	Und-Verknüpfung (Konjunktion)	
$\vee$	Oder-Verknüpfung (Disjunktion)	
$\forall$	"für alle"	
$V_1 \neq V_2$	$V_1$ ist ungleich $V_2$	

Symbol	Beschreibung	Einheit
$V_1 \approx V_2$	$V_1$ ist ungefähr $V_2$	
$V_1 \cup V_2$	Schnittmenge aus $V_1$ und $V_2$	
$V_1 \cap V_2$	Vereinigungsmenge aus $V_1$ und $V_2$	
Abkürzungei	n	
Kürzel	vollständige Bezeichnung	
ACK	<b>ack</b> nowledgement	
ACL	Asynchronous Connection-Oriented	
AD	Analog-Digital	
ADC	analog-to-digital converter	
AMA	Active Member Address	
AP	Access Point	
APAK	Amplified Passkey-Authenticated Key	
BGP	Border Gateway Protocol	
BLE	Bluetooth Low Energy	
BR	Basic Rate	
BSS	Basic Service Set	
CAN	Controller Area Network	
CPS	Cyber-physikalische Systeme	
CRC	Cyclic Redundancy Check	
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection	
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance	
CTS	Clear To Send	
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications	
DITS	Distributed Inter Frame Space	
DoS	Denial of Service	
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	
EDR	Enhanced Data Rate	
ERP	Enterprise-Resource-Planning	
eSCO	extended Synchronous Connection-Oriented	
FCS	frame check sequence	
FFD	Full Function Devices	
FHSS	Frequence Hopping Spread Spectrum	
GAP	Generic Access Protocol	
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying	
GPS	Global Positioning System	
GSM	Global System for Mobile Communications	
GW	Gateway	
HART	Highway Addressable Remote Transducer	
HiL	Hardware-in-the-Loop	
ID	Identification	

Kürzel	vollständige Bezeichnung
IE	information element
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
ISA	International Society of Automation
ISM	Industrial, Scientific and Medical
KNX-RF	Standard für drahtloses Kommunikationsprotokoll zur Gebäudeautomation
L2CAP	Logical Link Control and Adaption Protocol
LowPAN	IPv6 over Low-Power wireless Area Networks
MA	Master
MAC	Media Access Control
MATLAB	MATrix LABoratory
MES	Manufacturing Execution System
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MISO	Multiple Input, Single Output
MPDU	Media access control Protocol Data Unit
MV	Manipulated Variable
NED	Network Description
ns-2	<b>n</b> etwork <b>s</b> imulator - version <b>2</b>
ns-3	network simulator - version 3
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
PAN	Personal Area Network
PC	Personal Computer
PCF	Point Coordination Function
PHY	<b>phy</b> sical layer
PID	Proportional-Integral-Derivative
PIN	Personal Identification Number
PLC	Programmable Logic Controller
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PMA	Passive Member Address
POC	Predictiv Outage Compensator
PPP	Point-to-Point Protocol
PSDU	PHY service data unit
PV	Process Variable
RAM	Random-Access Memory
RFD	Reduced Function Devices
RTS	Request To Send

XII

Kürzel	vollständige Bezeichnung	
RWE	Kommunikationsprotokoll für Smart Homes von RWE (Lemonbeat)	
RX	Receiver	
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	
SCO	Synchronous Connection-Oriented	
SDP	Service Discovery Protocol	
SFD	start-of-frame delimiter	
SHR	synchronization header	
SIFS	Short Inter Frame Space	
SIG	Bluetooth Special Interest Group	
SISO	Single Input, Single Output	
SL	Slave	
SPAK	Simply Passkey-Authenticated Key	
SPS	Speicher Programmierbare Steuerung	
STK	Short Term Key	
SV	Setpoint Value	
ТСР	Transmission Control Protocol	
TDD	Time-Division Duplex	
TDMA	Time Division Multiple Access	
TK	Temporary Key	
TSN	Time Sensitive Networks	
TX	Transmitter	
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter	
UDP	Universal Powerline Bus	
UDP	User Datagram Protocol	
WLAN	Wireless Local Area Network	

# Kurzfassung

Nach über zwei Jahrzehnten seit dem Beginn der Verbreitung von Funktechnologien im alltäglichen Lebensumfeld gibt es zunehmend Bestrebungen, drahtlose Technologien auch im industriellen Bereich und insbesondere auf Feldebene einzusetzen. Begünstig wird dies durch die Einführung von energieverbrauchsarmen Funktechnologien und Protokollen wie beispielsweise WirelessHART, ISA100.11a, ZigBee und Bluetooth Low Energy. Zu Beginn dieser Arbeit und aktuell werden drahtlose Technologien von der Industrie hauptsächlich für Diagnose und Konfigurationszwecke genutzt. Die vorliegende Arbeit geht einen Schritt weiter und hat die Zielsetzung zu untersuchen, inwieweit drahtlose Technologien auch im geschlossenen Regelkreis betrieben werden können. Durch ihre hohe Flexibilität eignet sich die Funkkommunikation auch für das Themenfeld der "Industrie 4.0", was ebenfalls im Verlauf dieser Arbeit berücksichtigt wird.

Zunächst werden die für diese Arbeit relevanten Kommunikationsstandards sowie deren Aufbau allgemein betrachtet. Daraufhin werden die verwendeten Funkprotokolle WirelessHART, Bluetooth, Bluetooth Low Energy und ein auf dem MAC-Layer basierendes Protokoll vorgestellt. Es wird ein Vergleich der für die Regelungstechnik relevanten Eigenschaften, der Sicherheit und des Implementierungsaufwandes durchgeführt. Nachdem die Protokolle vorgestellt worden sind, wird eine Vorgehensweise zum Entwurf von Regelungen gezeigt. Damit verbunden wird ein in dieser Arbeit zusammengestellter Netzwerksimulator vorgestellt, mit dem es möglich ist, geregelte Systeme realistisch zu simulieren, die das WirelessHART-Protokoll zur Übertragung von Messwerten und/oder Stellgrößen nutzen. Schließlich wird eine Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation vorgestellt, die in Verbindung mit beliebigen Netzwerkprotokollen nutzbar ist.

Da drahtlose Netzwerke in Abhängigkeit vom verwendeten Protokoll bei der Werteübermittlung einer über der Zeit variierenden Totzeit unterliegen, wird eine Methode zur Nachbildung von Totzeiten für lineare Systeme beschrieben. Außerdem werden die Unterschiede zwischen zentraler und lokaler Regelung vorgestellt und insbesondere deren Eignung für Regelkreise mit drahtlosen Übertragungsstrecken diskutiert. Schließlich wird auf den Betrieb von mehreren Regelkreisen im selben Funknetzwerk eingegangen und besonders die Problematik hinsichtlich der Übertragungssynchronisierung bei MIMO-Systemen mit kommerziellen Produkten aufgezeigt. Gleichzeitig wird ein Ansatz vorgestellt, wie ein Protokoll aufgebaut sein kann, damit sowohl die Synchronisation der Messwertaufnahme als auch der Betrieb mehrerer Regelkreise in einem Multi-Hop-Funknetzwerk realisierbar sind. Nachdem eine Verbindung zwischen den Eigenschaften von drahtlosen Netzwerkprotokollen und den Anforderungen von Regelungen hergestellt ist, werden ausgewählte Regelungsverfahren vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen Gain-Scheduling-Regler, ein Konzept von Yokogawa, einen Predictive-Outage-Compensator und ein Multiraten-Konzept. All diese Regelungsverfahren werden am Beispiel eines Anlagenprüfstands anhand von Simulationen, HiL-Simulationen und Messungen am realen Versuchsstand veranschaulicht und bewertet.

## Abstract

After more than two decades since the beginning of the spread of wireless technologies in everyday life, there are increasing efforts to use wireless technologies also in the industrial sector and especially at field level. This is favoured by the introduction of low-energy wireless technologies and protocols such as WirelessHART, ISA100.11a, ZigBee and Bluetooth Low Energy. At the beginning of this work and currently, wireless technologies are mainly used by industry for diagnostics and configuration purposes. The present work goes one step further and has the objective of investigating the extent to which wireless technologies can also be operated in a closed control loop. Due to its high flexibility, wireless communication is also suitable for the topic of "Industry 4.0", which will also be considered in the course of this work.

First, the communication standards relevant to this work and their structure are considered in general. Then the wireless protocols used - WirelessHART, Bluetooth, Bluetooth Low Energy and a protocol based on the MAC layer - are presented. A comparison of the properties, security and implementation effort relevant to control engineering is carried out. After the protocols have been presented, a procedure for designing controls is shown. In connection with this, a network simulator configured in this work is presented, with which it is possible to realistically simulate controlled systems that use the WirelessHART protocol to transmit measured values and/or actuating variables. Finally, a hardware-in-the-loop (HiL) simulation that can be used in conjunction with any network protocol is presented.

Since wireless networks are subject to a dead time that varies over time during value transmission depending on the protocol used, a method for simulating dead times for linear systems is described. Furthermore, the differences between central and local control are presented and their suitability for control loops with wireless transmission paths is discussed. Finally, the operation of several control loops in the same wireless network is dealt with, and especially the problems regarding transmission synchronisation in MIMO systems with commercial products are pointed out. At the same time, an approach is presented as to how a protocol can be established so that both the synchronisation of the recording of measured values and the operation of several control loops in a multi-hop wireless network can be realised. After establishing a connection between the properties of wireless network protocols and the requirements of control systems, selected control methods are presented. These are a gain-scheduling controller, a concept from Yokogawa, a predictive outage compensator and a multi-rate concept. All these control methods are illustrated and evaluated using the example of an equipment stand by means of simulations, HiL simulations and measurements on the real test stand.

## 1 Einführung

Drahtlose Kommunikation hat in den letzten Jahren in vielen Bereichen des täglichen Lebens Einzug gehalten. Durch ihre Vorteile wie den verbindungslosen Datenaustausch, erhöht sie die Verfügbarkeit und die Verwendbarkeit von Daten und Messwerten deutlich. Die drahtlose Kommunikation ermöglicht beispielsweise im Fitnessbereich den Austausch von Daten zwischen einem Mobiltelefon und einer Smart-Watch, mit der die unterschiedlichsten Konditionsdaten, wie z.B. der Puls, an ein Handy übertragen und mit Geschwindigkeitsdaten und GPS-Daten abgeglichen und ausgewertet werden können. Weitere wichtige Anwendungsgebiete sind die Hausautomation und Verkehrsleitsysteme, die Kommunikation in Industrieanlagen, Datenübertragungen im medizinischen Umfeld [19], aber auch die neuen Herausforderungen rund um das Thema Industrie 4.0.

Drahtlose Technologien bieten für Anlagenbetreiber große Vorteile, da durch die Installation von drahtlosen Messstellen und Komponenten viele Ressourcen, wie zum Beispiel Kabel und Kabeltrassen und der dafür benötigte Platz eingespart werden kann. Dadurch verringern sich beim Bau von Anlagen die Material- und Arbeitskosten. Da keine Kabelwege und Verdrahtungen für die Anbindung von Messstellen vorbereitet werden müssen, reduziert dies ebenfalls die Installationszeit von Komponenten und demzufolge wird der Zeitraum bis zur Inbetriebnahme einer neuen Anlage verkürzt. Aber auch bestehende Anlagen lassen sich durch drahtlose Funkadapter oder -sensoren einfach erweitern und es zeigen sich insbesondere dann große Vorteile, wenn für weitere Kabel oder Kabelwege in einer bestehenden Anlage kein Platz vorhanden ist.

Bei Bestandsanlagen werden außerdem durch die aktuelle Einführung von Industrie 4.0 oder Systemen zur vorbeugenden Instandhaltung zusätzliche Daten aus den Prozessen oder von Anlagenkomponenten benötigt. Genau an dieser Stelle bieten sich Funktechnologien als zweiter Übertragungsweg an, wenn bestehende Kabelverbindungen die Übermittlung von zusätzlichen Informationen aus Kapazitätsgründen nicht zulassen. Vor allem auch bei bewegten oder rotierenden Anlageneinheiten zeichnen sich die Stärken einer drahtlosen Mess- und Datenübertragung aus. In diesem Szenario kann teilweise oder sogar ganz auf teure Energieführungsketten oder störanfällige Schleifkontakte zur Energie- und Datenübermittlung an rotierenden Teilen verzichtet werden.

Funkübertragungssysteme bieten insgesamt ein großes Potential, welches bislang nicht vollständig ausgeschöpft und erforscht ist. Die Akzeptanz von drahtlosen Kommunikationssystemen schwankt je nach Anwendungsgebiet. Während sie im häuslichen Bereich schon recht verbreitet sind, sind Industriebetriebe mit dem aktiven Einsatz in Produktionssystemen noch sehr zurückhaltend, obwohl bereits seit einigen Jahren unterschiedliche Produkte, wie beispielsweise drahtlose Sensoren, drahtlose Adapter zur Übermittlung eines Strommesswertes oder Gateways zur Organisation eines drahtlosen Netzwerks auf dem Markt verfügbar sind.

Derzeitig umgesetzte und angedachte Anwendungsgebiete umfassen nach [24] hauptsächlich die Bereiche der Konfiguration, der Diagnose, die Fehlererkennung, die Übermittlung von Messwerten sowie die Zustandsüberwachung von Systemen. Drahtlose Übertragungssysteme besitzen jedoch gegenüber einer drahtgebundenen Übermittlung von Messwerten und Daten auch Nachteile. So kann es bei der Übermittlung von Daten zu kurz- oder langfristigen Ausfällen kommen. Es können Interferenzen mit anderen Funktechnologien auftreten. Durch die offene Übertragung bei gleichzeitig mangelhafter Absicherung können sich Unbefugte Zugang in die Datennetze verschaffen und Prozesse manipulieren, Daten entwenden oder betriebliche Abläufe ausspionieren.

Im Weiteren wird sowohl der aktuelle Stand der Entwicklungen von drahtlosen Kommunikationsprotokollen sowie von Reglern beschrieben, die entweder eine drahtlose Rückführung nutzen, ihre Stellgröße oder sowohl Messwert als auch Stellgröße drahtlos übertragen.

## 1.1 Aktueller Stand der Entwicklungen

Derzeit existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Funkstandards, die zur drahtlosen Übertragung für Daten genutzt werden können. Einer der bekanntesten Standards ist IEEE 802.11 [35], auf dem WLAN basiert. Die erste Version dieses Standards wurde 1997 verabschiedet und spezifiziert den Medium-Zugriff (MAC-Layer) sowie die physikalische Schicht [67]. Dadurch wurde die Grundlage geschaffen, den Einsatz von lokalen Funknetzwerken durch vorgegebene Regeln, Definitionen zum Netzwerkaufbau und somit die Sicherstellung einer herstellerübergreifenden Produktkompatibilität weltweit rasant zu verbreiten. Ein weiterer wichtiger Standard bildet IEEE 802.15.1 [39], welcher in seiner ersten Version im Jahre 2002 verabschiedet wurde. Auf diesem basiert das Bluetooth-Protokoll. Im Mai 2003 wurde schließlich der IEEE 802.15.4 Standard [36] festgelegt, der von den Protokollen WirelessHART, ISA100.11a und ZigBee genutzt wird.

Es gibt jedoch noch eine große Zahl weiterer Protokolle, insbesondere auch proprietäre Protokolle, die auf diesem Standard aufbauen. All diese Standards definieren die untersten beiden PHY-Layer und MAC-Layer des OSI-Modells (Open Systems Interconnection), welches in Abschnitt 3.4 vorgestellt wird. Alle soeben beschriebenen Standards nutzen hauptsächlich das 2,4 GHz Frequenzband zur Übermittlung von Daten. IEEE 802.11 lässt jedoch auch das 5 GHz und IEEE 802.15.4 verschiedene niedrigere Frequenzbänder zu, die jedoch länderspezifisch festgelegt sind. Neben diesen Standards gibt es noch ein weiteres 2001 eingeführtes Protokoll mit der Bezeichnung Z-Wave, das ebenfalls bei drahtlosen Übertragungen verbreitet ist und durch den Standard G.9959 [40] international anerkannt ist. Z-Wave nutzt die Übertragungsfrequenzen zwischen 850 und 950 MHz.

Weiterhin verbreitet sind die Protokolle HomeMatic, RWE, EnOcean, DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications), ANT, ANT+ und LoRaWAN (Long Range Wide Area Network). Nähere und protokollspezifischere Details zu den wichtigsten der soeben aufgezählten Übertragungsprotokollen werden im nachfolgenden Kapitel 3 vorgestellt. Die beschriebenen Funkstandards werden fortlaufend um Funktionalitäten und im Hinblick auf ihre Übertragungsleistung, ihren Energieverbrauch und die Erfordernisse, insbesondere im Hinblick auf aktuelle Themen rund um Industrie 4.0, erweitert.

Bereich	Diagnose / Überwachung	Regelung / Steuerung	Datenübertragung / Sprache
Industrie	WirelessHART, ISA100.11a, ZigBee, GSM, EnOcean	_	WLAN, GSM
Hausautomation und Unterhal- tungselektronik	Z-Wave, HomeMatic, RWE, EnOcean, ZigBee, KNX-RF, ANT, ANT+	Z-Wave, HomeMatic, RWE, EnOcean, ZigBee, KNX-RF, Infrarot (IR)	WLAN, DECT, Bluetooth
Fahrzeugtechnik	GSM	Bluetooth	GSM

|--|

Neben den in diesem Abschnitt vorgestellten Standards gibt es eine Vielzahl weitere Standards, die allerdings nicht im Fokus dieser Arbeit stehen. In den folgenden Abschnitten werden die Anwendungsbereiche der einzelnen Protokolle beschrieben sowie die Bereiche ihrer Verbreitung. Tabelle 1.1 zeigt eine Matrix, die angibt, in welchen Gebieten, untergliedert nach industriellen Anwendungen, Hausautomation und Unterhaltungselektronik sowie Fahrzeugtechnik, die einzelnen Protokolle derzeit Verwendung finden.

#### 1.1.1 Drahtlose Kommunikation in der Hausautomation

Im häuslichen Umfeld ergeben sich bedeutende Vorteile im Bereich Komfort, Gesundheit und Ressourceneffizienz durch die Steuerung oder Regelung von Prozessen und den Betrieb von Diagnose- und Meldeeinrichtungen. Heute allgegenwärtige Bespiele für Steuer-, Melde- und Regelkreise in einem Haushalt sind der Betrieb von Heizanlagen, Raumtemperaturregelungen, Garagentor- und Rollladensteuerungen, Ein- und Ausschalten von Lampen, der Betrieb von Sicherheitseinrichtungen, wie Einbruchsschutz durch Tür- und Fensterüberwachung sowie Monitoring mittels Kameras oder Gas- und Brandmeldeeinrichtungen.

Für all diese Anwendungszwecke sind Drahtverbindungen zwischen Sensoren, Regel- und Steuereinrichtungen und den Aktoren bzw. Meldeeinrichtungen notwendig. Insbesondere im Bereich der Raumtemperaturregelungen und Brandmeldeeinrichtungen haben sich in den vergangenen Jahren zunehmend drahtlose Übertragungsmethoden durchgesetzt. Der drahtlose Betrieb wird begünstigt, weil inzwischen einige Funkstandards auf dem Markt sind, deren Energieverbrauch so gering ist, dass Sensoren über große Zeiträume mittels Batterien, Akkus oder gar durch Energiegewinnung aus der Umgebung autark betrieben werden können. Insbesondere durch das Internet of Things (kurz IoT) wird sich künftig die Anzahl der Geräte und Einrichtungen in einem Haushalt, welche mit dem Internet verbunden werden, noch deutlich erhöhen [73]<sup>1</sup>. So können beispielsweise generell sämtliche Haushaltsgeräte, die Lichtsteuerung, das Terminmanagement über Kommunikationsnetze mit dem IoT verbunden werden. Werden künftig alle Daten effektiv fusioniert, so ist es möglich, anhand von Termindaten den Tagesablauf einer oder mehrerer Personen zu planen und Prozesse wie die Alarmeinstellung des Weckers, Unterstützung im Haushalt, die Vorbereitung von Routeninformationen im Fahrzeug einer Person durchzuführen und dessen Nutzung vorzubereiten, ohne dass es manueller Aktionen der entsprechenden Person bedarf.

Derzeit ist in Haushalten das Protokoll WLAN (Wireless Local Area Network) eines der am meisten verbreiteten Protokolle. WLAN wird heute hauptsächlich dazu genutzt, um Geräten wie Personal Computer (PCs), Mobiltelefonen, Fernsehapparaten oder Tablets den Zugang zum Internet zu ermöglichen, ohne dass eine aufwendige Installation von Übertragungsleitungen notwendig ist. Gleichzeitig wird durch die drahtlose Anbindung die räumliche Flexibilität sichergestellt. Da WLAN in den heutigen Standards eine relativ große Energiezufuhr im Vergleich zu anderen Protokollen, wie ZigBee, Z-Wave, Bluetooth Low Energy benötigt, setzten sich ebenfalls Protokolle wie ZigBee und Z-Wave in den vergangenen Jahren für die Übertragung von kleinen Datenmengen, wie Sensordaten, durch. Diese Protokolle finden vor allem Anwendung zur Temperaturübermittlung bei Raumtemperaturregelungen, aber auch bei der Datenübertragung von Sicherheitseinrichtungen, wie Rauchmelder oder Schließüberwachungen von Fenstern und Türen oder auch zur Rollladen- oder Garagentorsteuerung.

Es ist jedoch zu erwarten, dass sich insbesondere durch das IoT (Internet of Things) die Anzahl von drahtlosen Übertragungen im häuslichen Umfeld noch deutlich erhöht. ZigBee und Z-Wave haben heute aufgrund ihrer möglichen Maschentopologie den größten Marktanteil bei Netzen, die aus mehr als nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen bestehen. Bei Punkt-zu-Punktverbindungen in Verbindung mit kurzen Übertragungsstrecken ist derzeit Bluetooth oder Bluetooth Low Energy ein verbreitetes Protokoll für Heim- und Freizeitanwendungen. So wird es beispielsweise bei Gesundheitsanwendungen, Lautsprechersystemen, Smart Watches, Monitoring Systemen oder Energiemanagementsystemen als Übermittlungsprotokoll genutzt. Bluetooth Low Energy besitzt jedoch für zukünftige Anwendungen im Heimbereich ein großes Potential, insbesondere seit dem Zeitpunkt, an dem Bluetooth Low Energy Mesh [68, 46] spezifiziert worden ist und somit auch eine zuverlässigere Multi-Hop-Übertragung im Vergleich zu heutigen Scatternets von Bluetooth BR/EDR realisiert werden kann.

Zusammenfassend für diesen Abschnitt lässt sich festhalten, dass die zentralen drahtlosen Protokolle für Heimanwendungen heute WLAN, ZigBee und Z-Wave sind. WLAN besitzt den Nachteil, dass es für Anwendungen nicht attraktiv ist, welche einen möglichst geringen Energieverbrauch

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Im Report des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Titel "SmartHome2Market" wird das durch die Marktuntersuchungsgruppen Transparency Market Research, Allied Market Research und MarketsandMarkets geschätzte globale Wachstumspotential des Marktes von Smart Home Geräten zusammengefasst. Bezogen auf das Jahr 2012 ergibt sich je nach Datengrundlage ein Wachstumspotential, bezogen auf den Umsatz, zwischen 100 % und 800 % bis 2020.

bei der Kommunikation voraussetzen. Weiterhin kommt es in dicht besiedelten Gebieten aufgrund einer Vielzahl von WLAN-Netzwerken, die sich überlappen, zu Interferenzen. Für energiesparsame Anwendungsgebiete werden derzeit hauptsächlich ZigBee und Z-Wave verwendet. Allerdings ergibt sich bei diesen Protokollen das Problem, dass Hausautomationsprodukte häufig nicht herstellerübergreifend kompatibel sind. Obwohl drahtgebundene Protokolle wie zum Beispiel X10 oder UPD (Universal Powerline Bus) in Heimanwendungen energiesparsamer sind, setzten sich drahtlose Komponenten aufgrund des niedrigen Installationsaufwands immer mehr durch.

Drahtlose Kommunikationsprotokolle ermöglichen insbesondere dem Endanwender, eine Installation der Komponenten ohne aufwendige und teure Verdrahtung durchzuführen. Außerdem begünstigt die heutige allgegenwärtige Verfügbarkeit von Smart Devices die Verbreitung drahtloser Technologien zusätzlich, denn durch geeignete Protokollwandler und Apps lassen sich eine Vielzahl von Informationen auf einem Gerät zusammenführen. Auch können von diesem Gerät Steueraufgaben durchgeführt werden, wie beispielsweise die Änderung der Lichtfarbe und Helligkeit einer Deckenlampe oder das Öffnen und Schließen von Rollläden [44].

#### 1.1.2 Drahtlose Kommunikation in der Industrie

Drahtlose Kommunikation in industriellen Anlagen gewinnt zunehmend an Bedeutung, wenn auch derzeit in geringerem Umfang als in Haushalten. Einer der am weitesten verbreiteten Standards ist IEEE 802.11.x [35]. Auf diesem basieren alle WLAN (wireless local area networks). Ein großer Nachteil ist jedoch der Energieverbrauch aufgrund der hohen Übertragungsbandbreite dieses Funkstandards. In der Feldebene industrieller Netzwerke wird eine derart große Bandbreite, welche der IEEE 802.11.x-Standard und die darauf basierenden Protokolle zur Verfügung stellen, für die meisten Anwendungsfälle nicht benötigt. Die Hauptanforderungen liegen in diesem Anwendungsfeld auf einer zuverlässigen Übertragung der Messwerte von Sensoren oder Stellgrößen zu Aktoren bei gleichzeitig niedrigem Energieverbrauch der Funkkomponenten. Hierdurch wird es ermöglicht, Sensoren ausschließlich mittels mobiler Energiespeicher und somit vollständig drahtlos zu betreiben.

Diese Anforderungen erfüllt der IEEE 802.15.4-Standard [36], welcher es ermöglicht, bis zu 250 kbits s<sup>-1</sup> zu übertragen, wenn alle der 16 zur Verfügung stehenden Kanäle im 2,4 GHz Frequenzband gleichzeitig für Übertragungsvorgänge genutzt werden. IEEE-802.15.4 wird von verschiedenen Protokollen wie ZigBee, ISA100.11a und WirelessHART genutzt. Drahtlose Netzwerktechnologien finden in den letzten Jahrzehnten eine immer größere Beachtung für industrielle Einsatzzwecke. Einige Beispiele sind in [62, 15, 79, 12, 41] zu finden. Derzeit liegt jedoch der Fokus auf dem Bereich der Konfiguration, des Monitorings und der Anlagenüberwachung. Seit der Einführung von Bluetooth Low Energy (BLE) gewinnt auch IEEE 802.15.1 [39] eine immer wichtigere Bedeutung im industriellen Bereich. Mit der Spezifizierung von BLE-Mesh wird Bluetooth eine immer größere Rolle für industrielle Anwendungen spielen. Schon heute gibt es Konfigurationsanwendungen in Form von Punkt zu Punkt Verbindungen für Anlagenkomponenten, wie am Beispiel [143]. Weiterhin stellen drahtlose Technologien im industriellen Einsatz Möglichkeiten bereit, in Bestandsanlagen zusätzliche Informationen über Prozesse, Anlagenzustände oder zu notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen zu liefern. Insbesondere dann, wenn bestehende Kommunikationssysteme an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen oder deren Leistungsfähigkeit zu niedrig ist, Anforderungen neuer Anwendungsfelder abzudecken, wie es beispielsweise bei der drahtgebundenen HART-Übertragung aufgrund deren geringen Bandbreite der Fall ist. Häufig ist auch in Bestandsanlagen nicht ausreichend Platz für weitere Kabelverbindungen oder der Installationsaufwand soll niedrig gehalten werden. Für all diese Zwecke bieten drahtlose Kommunikationsmedien ihre Vorteile.

Auch bei Neubauprojekten von industriellen Anlagen wird die drahtlose Kommunikation ein immer wichtigeres Element, denn drahtlose Kommunikation ermöglicht es Anlagenbedienern, nicht nur in einer Leitwarte Informationen über Prozesse zu erhalten, sondern direkt vor Ort an jeder beliebigen Stelle einer Anlage. So kann Wartungspersonal beim Austausch einer Anlagenkomponente wie eines Sensors, direkt per Tablet überprüfen, ob der Messwert des Ersatzsensors am Leitsystem ankommt, ob die Kalibrierung eines Sensors oder Stellgliedes die richtigen Resultate liefert, ohne dass ein Telefonat zwischen Anlage und Leitwarte erforderlich ist. Anlagenführer behalten durch drahtlose Anbindung an die Leitwarte die Prozesse im Blick, auch wenn sie mit der Reinigung von Anlagenteilen beschäftigt sind.

Heutigen Entwicklungen liegen häufig Tablets und Mobiltelefone zugrunde. Alle diese Vorteile lassen sich auch auf 3D-Brillen übertragen, auch unter den Begriffen "virtual reality" oder "argumented reality" bekannt, die drahtlos in einen Prozess eingebunden sind und dem Anlagenführer je nach Blickrichtung in eine Anlage alle benötigten Informationen zu einem Prozess aufzeigen. Weiterhin ist es möglich, dem Wartungspersonal alle notwendigen Schritte zu einem Reparaturvorgang direkt anzuzeigen. Ansätze hierfür gibt es derzeit vor allem in der Automobilindustrie [74]. Durch den neuen Modebegriff "Industrie 4.0" und die damit zusammenhängende durchgängige Kommunikation zwischen allen Unternehmensebenen, dem standortübergreifenden Datenaustausch und dem automatisierten Informationsaustausch über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg kommt drahtlosen Kommunikationsmedien eine immer größere Bedeutung zu, wie im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird.

#### 1.1.3 Drahtlose Kommunikation im Kontext zur Industrie 4.0

Die angestrebten Entwicklungen rund um den Begriff "Industrie 4.0" umfassen aus makroskopischer Sicht eine immer bessere Verknüpfung zwischen Produkten und Dienstleistungen im Hinblick auf die horizontale Vernetzung von Produktionsprozessen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Hinsichtlich der vertikalen Vernetzung gibt es Bestrebungen für alle Unternehmensebenen, angefangen von der Aktor- und Sensorebene bis hin zur Unternehmensplanungsebene, eine durchgehende und schnittstellenübergreifende Kommunikation zu schaffen. Außerdem wird angestrebt, Fertigungen von Einzelstücken genauso wie große Losgrößen flexibel zu ermöglichen. Insbesondere die Einzelteilfertigung im industriellen Maßstab fordert eine große Flexibilität und Modularität von Produktionsanlagen. Zur Realisierung der zuvor beschriebenen Anforderungen



Bild 1.1: Ventil in einer verfahrenstechnischen Anlage im Kontext zur Industrie 4.0

spielen Cyber-physikalische Systeme (CPS) eine zentrale Rolle. Aus mikroskopischer Sicht liegt ein Hauptaugenmerk bei der Umsetzung der "Industrie 4.0"-Idee auf der Vernetzung innerhalb der Produktion, einem autonomen Auftragsmanagement, einer mengen- oder energieoptimalen Produktion und einem effizienten und einfachen Wartungs- und Störmanagement.

Der Begriff "Industrie 4.0" kann sehr vielseitig interpretiert werden, und es kommt generell auf die Betrachtungsweisen an. Wird als Beispiel ein Unternehmen mit einer verfahrenstechnischen Anlage genommen, so bildet die Basis des Unternehmens zunächst einmal der Produktionsprozess und die Fertigung. Veranschaulicht wird ein Teil der Herausforderungen von "Industrie 4.0" in Bild 1.1. Die beispielhaft im Bild rechts unten dargestellte verfahrenstechnische Anlage beinhaltet eine Vielzahl von Sensoren und Aktoren zur Beobachtung und Beeinflussung eines Prozesses und soll dadurch die Prozesssicherheit des von ihr verkörperten Prozesses gewährleisten.

Heutzutage sind die Sensoren in industriellen Anlagen meistens fest verdrahtet, und es können, je nach verwendeter Übertragungstechnologie, nur eine begrenzte Menge an Daten durch die kabelgebundenen Übertragungsnetze gesendet werden. Am Weitesten verbreitet sind derzeit historisch bedingt Zwei- oder Vierleitersysteme. Bei den Feldbusgeräten macht nach [78, S. 50ff.] HART etwa 2/3 der installierten Feldgeräte aus. HART stellt eine maximale Kommunikationsgeschwindigkeit von 1,2 kBaud zur Verfügung. Somit ist die Übertragungsgeschwindigkeit sehr gering. Außerdem sind aus Sicherheitsgründen industrielle Anlagen häufig nicht mit dem allgemeinen Internet verbunden.

Durch "Industrie 4.0" soll jedoch eine Durchgängigkeit der Datenübertragung durch alle Unternehmensebenen in vertikaler Richtung erreicht werden. Weiterhin soll ebenfalls eine Durchgängigkeit der notwendigen und gewünschten Daten zu Lieferanten, Kunden sowie zu Maschinenund Ersatzteilherstellern geschaffen werden. Deshalb ist eine Vernetzung von den untersten bis zu den obersten Unternehmensebenen sowie die Schaffung von einheitlichen Schnittstellen zwischen den einzelnen Ebenen und den horizontal angeordneten Organisationseinheiten, wie Zulieferer, dem eigenen Unternehmen, Nachfolgeunternehmen und dem Endkunden der Wertschöpfungskette eines Produktes notwendig.

Bei kritischen Prozessen ist es sinnvoll, aus Sicherheitsgründen Daten zum Betrieb der Anlagen von Daten zur Diagnose, Produkt- und Prozessüberwachung physikalisch zu trennen. Dadurch wird sichergestellt, dass kein Einfluss seitens Dritter auf Prozesse genommen werden kann. Dies kann durch eine parallel zur kabelgebundenen Prozessregelung integrierten drahtlosen Kommunikation erreicht werden. Den eigentlich kabelgebunden betriebenen Sensoren werden drahtlose Adapter oder Erweiterungen zugeschaltet, welche deutlich mehr Daten übertragen können, als dies über die meisten heute verwendeten kabelgebundenen Übertragungswege möglich ist. Allerdings ist es auch praktikabel, Anlagen komplett mit drahtlosen Komponenten auszustatten, wie dies in Bild 1.1 dargestellt ist. Über dieses Netzwerk können sowohl Diagnose- und Konfigurationsdaten übertragen werden, aber es ist ebenfalls möglich, parallel dazu Prozessregelungen zu betreiben. Eine ausreichende Absicherung gegenüber Störungen und dem nicht autorisierten Zugriff Dritter muss jedoch jederzeit sichergestellt sein.

Durch die drahtlose Anbindung aller Anlagenkomponenten können Anlagen flexibel strukturiert werden. So können sie modular aufgebaut und je nachdem, welche Produkte hergestellt werden sollen, entsprechend der Prozessanforderungen zusammengestellt werden. Außerdem sind durch die flexiblen Übertragungsnetze und Übertragungsraten unzählige drahtlose Dienste vorstellbar, wie am Beispiel eines Stellventils dargestellt. So können die einzelnen Anlagenmodule einer Anlage durch lokale Regelungen eines vorgegebenen Prozesswertes ausgestattet sein. Eine Fernwartung ist jederzeit möglich, entweder durch die Instandhaltung des Unternehmens oder durch den Hersteller des Ventils, der durch sein Know-How erkennen kann, ab wann für ein Ventil Wartungseingriffe eingeplant werden müssen. Eine erleichterte Inbetriebnahme oder Reparatur mittels Anleitungen und Parameterprüfung über ein Tablet oder eine 3D-Brille können einfach und ohne zusätzlichen Verdrahtungsaufwand durch Nutzung desselben Übertragungsmediums von Prozessregelung und Fernwartung realisiert werden. Außerdem ist ein Monitoring von jedem vorstellbaren Ort möglich, solange er über ausreichend Kommunikationsanbindung verfügt. Zusätzlich können seitens der Hersteller von Anlagenkomponenten erweiterte Diagnosedienste, wie z.B. Verschleißerkennung, durchgeführt werden.

Da ein weiteres zentrales Thema dieser Arbeit die drahtlose Regelung von Prozessen ist, wird im Weiteren eine kurze Einführung in den aktuellen Stand der Forschung für die Umsetzung von Prozessreglern gegeben, die geeignet sind, auch in drahtlosen Netzen eingesetzt zu werden. Innerhalb der betrachteten Netzwerke werden Daten, wie Mess- und Stellgrößen, drahtlos übermittelt.

#### 1.1.4 Entwicklungsstand im Bereich von netzwerkbasierten Regelungen

Im industriellen Umfeld erfolgt heute die Steuerung und Regelung technischer Prozesse überwiegend über 4...20 mA-Signale, welche gegebenenfalls zusätzliche Informationen durch eine HART Kommunikation übermitteln können. Bei HART dient das analoge 4...20 mA-Signal zur Vorgabe von Sollwerten oder zur Übermittelung eines Sensormesswertes. Dem niederfrequentem 4...20 mA-Signal wird außerdem eine hochfrequente Schwingung mit einer Amplitude von 0,5 mA aufmodelliert, um zusätzlich digitale Informationen, wie Konfigurations- und Diagnosedaten zu übertragen. Neben HART kann jedoch die Kommunikation auch komplett digital über Feldbussysteme durchgeführt werden. Diese Bussysteme sind kabelgebunden und weisen bei geeignet gewählten Übertragungsprotokollen ein überwiegend deterministisches und dynamisch ausreichend schnelles Übertragungsverhalten auf. In der Forschung und Entwicklung wird intensiv am Einsatz von kabelgebundenen und drahtlosen Netzwerkprotokollen gearbeitet, welche für Echtzeitkommunikationen und somit insbesondere für den Einsatz im geschlossenen Regelkreis geeignet sind. Diese Protokolle sind unter den Begriffen von TSN (time sensitive networks) wie in den Arbeiten aus [31, 47] zu finden.

Bussysteme, wie beispielsweise PROFIBUS, CAN oder FOUNDATION Fieldbus bilden derzeit einen weit verbreiteten Standard. Ein neuer Trend führt dazu, die bisherige Kommunikation über kabelgebundene Feldgeräte durch drahtlose Kommunikationsmedien zu ersetzen. Gleichzeitig soll die Kommunikation möglichst energieverbrauchsarm erfolgen. Hierfür hat sich der IEEE 802.15.4 Standard etabliert, der unter anderem von den Übertragungsprotokollen ZigBee, ISA SP100.11a oder WirelessHART genutzt wird. Die WirelessHART Spezifikation wurde 2007 von der HART Communication Foundation festgelegt und sieht in der aktuellen Fassung in erster Linie Überwachungs- und Diagnoseaufgaben vor. Der ISA100.11a Standard wurde im September 2009 ratifiziert und ist ebenfalls für unkritische Überwachungs- und Steuerungsaufgaben ausgelegt.

Ein Vergleich zwischen WirelessHART und ISA100.11a wird in [63] vorgestellt. Aufgrund von Totzeiten, Paketausfällen, Umgebungs- und Störeinflüssen besitzen Funkkommunikationssysteme einen destabilisierenden Charakter. Die Übertragungszeit kann als eine Zufallsvariable angesehen werden. Weiterhin kommt es zu wechselseitigen Beeinflussungen zwischen den unterschiedlichen Funktechnologien. Die Koexistenz unterschiedlicher Funktechnologien wurde in [10] untersucht. Weiterhin lässt sich aufgrund der Arbeiten [72, 84, 89, 91, 92, 93] festhalten, dass Funktechnologien grundsätzlich dafür geeignet sind, für die Datenübermittlung in geschlossenen Regelkreisen eingesetzt zu werden. Hierbei wird jedoch für die eingesetzte Funktechnologie eine hohe Robustheit vorausgesetzt, welche zu geringeren Übertragungszeitschwankungen und Paketausfällen führt. In [65] wurden 37 Einflussgrößen vorgestellt, die das Übertragungsverhalten von Funklösungen beeinflussen können.

Inzwischen wird nach ersten Ansätzen gesucht, das WirelessHART und das ISA100.11a Übertragungsprotokoll auch für Steuerungs- und Regelungsaufgaben einzusetzen. Im Gegensatz zu kabelgebundenen Systemen, welche ein deterministisches Verhalten aufweisen, hängen drahtlose Kommunikationsmedien sehr stark von Zufallsvariablen ab. Hierzu gehören schwankende Totzeiten und Paketverluste. Dies stellt erhöhte Anforderungen an den Reglerentwurf.

Im Bereich der Simulation von Regelkreisen im Zusammenhang mit Netzwerktopologien, welche den Standard IEEE 802.15.4 nutzen, gibt es derzeit einige Arbeiten, die für dieses Vorhaben eine wertvolle Grundlage bilden. Durch die Arbeit [11] wird ein Simulationstool zur Verfügung gestellt, um beispielsweise in MATLAB/Simulink erstellte Systembeschreibungen und die zugehörigen Regelungen bzw. Steuerungen um Netzwerktopologien zu erweitern, welche den Netzwerk-



Bild 1.2: Aufbau der Simulationsumgebung MATLAB - PiccSIM - ns-2 [11]

simulator ns-2 nutzen. Werden Systeme simuliert, so wird die Simulation von MATLAB/Simulink mit den Simulationsabläufen im ns-2 Simulator synchronisiert und das in ns-2 hinterlegte Netzwerkverhalten wird beim Übertragen von Daten z.B. zwischen Sensoren und Regelung und zwischen Regelung und Aktuatoren nachgebildet.

Der prinzipielle Aufbau der Simulationsumgebung ist in Bild 1.2 veranschaulicht. In [85] wird eine Implementierung des WirelessHART-Stacks gezeigt, welche alle für die Simulation von WirelessHART notwendigen Layer des OSI Modells umfasst, wie den MAC Layer, den Network Layer mit Security Struktur, den Transport Layer und den Application Layer. Zudem wurde ein Wireless-HART Netzwerkmanager implementiert, der für die Kommunikationsabläufe und die Zuweisung von Zeitslots in einem WirelessHART Netzwerk zuständig ist.

Die in [11] und [85] vorgestellten Softwarekomponenten wurden im Rahmen dieser Arbeit zu einer Simulationsumgebung verbunden, mit der es nun möglich ist, dynamische Systeme zu simulieren, welche das WirelessHART-Protokoll als Übertragungsmedium nutzen. Hierdurch ist es für dieses Forschungsvorhaben möglich, Regelkreise kostengünstig und schnell zu untersuchen, ohne dass direkt ein Hardwareaufbau notwendig ist.

In [57] wurde der Aufbau eines Regelkreises vorgestellt, welcher für Systeme mit zwei Funkübertragungsstrecken geeignet ist. Diesem Konzept, welches in Bild 1.3 dargestellt ist, liegt eine Übertragung zwischen Sensor und Regler (PV = Prozess Value) und eine Übertragung zwischen Regler und Aktor (MV = Manipulated Value) sowie eine Rückmeldung zwischen Aktor und Regler zugrunde. Tritt bei der Übertragung ein Paketausfall zwischen Sensor und Regler auf, so kann entweder der letzte Wert gehalten oder der fehlende Wert beobachterbasiert ermittelt werden. Beides wird durch den PV-Komplementer realisiert. Fallen zwischen Regler und Aktor Pakete aus,



Bild 1.3: Yokogawa Konzept aus [59] und [60]

so wird beispielsweise durch den MV-Komplementer die letzte Stellgröße gehalten bis ein neuer Wert am Empfänger (E) des Aktors ankommt. Gleichzeitig registriert die Regeleinrichtung den Ausfall des Aktor-Sollwerts und es wird eine Kompensation des Sollwertes (SV = Set Value) durch den SV-Komplementer durchgeführt.

Weitere Methoden zum Regelungsentwurf für Funknetzwerke sind schaltende Ausgangsrückführungen [72] oder schaltende Beobachter, die in [72] und [84] vorgestellt werden. Hierbei wird die Zeitverzögerung ermittelt oder abgeschätzt, die während der Übertragung in einem drahtlosen Netzwerk auftritt. Die Paketverzögerungen werden durch die Erweiterung des Zustandsvektors abgebildet. Dadurch enthält der Zustandsvektor sowohl die aktuellen Systemzustände als auch diejenigen, die in der Vergangenheit liegen.

Für das System werden unterschiedliche Ausgangsmatrizen gebildet, welche den verschiedenen Zeitverzögerungen zugeordnet werden. Durch ein Umschalten zwischen den jeweiligen Ausgangsmatrizen kann auf unterschiedliche Totzeitlängen reagiert werden, die bei der Datenübertragung entstehen. Mittels dieser Methodik können Zustandsrückführungen entworfen werden, soweit alle Zustandsgrößen messbar sind. Sind nicht alle Zustandsgrößen messbar, so können für das System sowohl schaltende Ausgangsrückführungen als auch Beobachter entworfen werden. Eine prinzipielle Skizze für Systeme mit unterschiedlich starken Signalverzögerungen, zwischen denen umgeschaltet wird, ist Bild 1.4a zu entnehmen. Das Strukturschaltbild für den Beobachtereinsatz bei Systemen mit unterschiedlichen Signalverzögerungen ist in Bild 1.4b veranschaulicht.

Bisher wurde eine Übersicht über den Einsatz von Funktechnologien im Bereich der Hausautomation und im industriellen Umfeld sowie deren Bedeutung und Potential im Zusammenhang mit der Industrie 4.0 gegeben. Weiterhin wurde der derzeitige Stand der Forschung bezüglich sol-



Bild 1.4: Elemente von Modellen einer Regelung mit drahtloser Rückführung

cher Regelkreise beschrieben, die ein Netzwerk zur Übertragung von Informationen nutzen. Im Folgenden wird die Problemstellung, an der sich diese Arbeit ausrichtet, dargelegt.

## 1.2 Problemdarstellung und Ziel der Arbeit

Wie in vorherigen Abschnitten beschrieben wurde, erlangen drahtlose Kommunikationsprotokolle im industriellen Bereich eine immer größer werdende Bedeutung. Heute werden sie hauptsächlich in den Anwendungsfeldern der Konfiguration, Überwachung oder Diagnose eingesetzt. Ein Bereich, der bisher noch nicht umfangreich betrachtet wurde, ist die Nutzung von drahtlosen Kommunikationsprotokollen im Einsatz für Prozessregelungen. An diesen Bereich knüpft diese Arbeit an, und es sollen insbesondere die Protokolle WirelessHART und Bluetooth für den Einsatz im geschlossenen Regelkreis untersucht werden.

Gegenwärtig werden jedoch das Protokoll-Design und die Regelungstechnik unabhängig voneinander betrachtet. Protokolldesigner entwerfen ein Protokoll anhand von definierten Anforderungen und die Regelungstechnik nutzt dieses Protokoll, um für die Regelung erforderliche Informationen zu übermitteln. Bei drahtgebundenen Übertragungssystemen ist dies ausreichend. Allerdings kommt bei drahtlosen Systemen der Synchronisierung zwischen Regelung und dem verwendeten Übertragungsprotokoll eine große Bedeutung zu. Um hierfür ein Verständnis zu entwickeln, werden in dieser Arbeit sowohl Übertragungsprotokolle betrachtet, als auch damit verbunden die Regelung. Es werden regelungstechnische Methoden vorgestellt, die sich besonders für den Betrieb eines Regelkreises mit einer Funkübertragung eignen und am Beispiel der Funkprotokolle WirelessHART und Bluetooth veranschaulicht. Ein Vergleich zwischen WirelessHART und Bluetooth wird aufgestellt.

Neben diesen beiden Protokollen wird ein proprietäres Protokoll beschrieben, das insbesondere für die schnelle Regelung von Systemen mit einer hohen Dynamik geeignet ist. Weiterhin wird eine Methode zur Zusammenarbeit von Übertragungsprotokoll und Prozessregelung vorgestellt. Diese verbessert die Leistungsfähigkeit eines Reglers deutlich, der ein Netzwerk zur Übertragung von Prozesswerten oder Stellgrößen nutzt. Verbessert wird insbesondere die zeitliche Synchronisation und es wird zudem ermöglicht, Systeme mit mehreren Messstellen zuverlässig zu betreiben.

Da heutzutage in der Industrie meistens Prozessregelungen von einer zentralen Leitebene aus betrieben werden, aber insbesondere in vermaschten Netzwerken auch lokale Regelungen Vorteile aufweisen, wird in dieser Arbeit ein Vergleich von zentralen und lokalen Regelkonzepten im Hinblick auf Networked Controlled Systems aufgestellt. Schließlich werden verschiedene bestehende Regelkonzepte mit einem für diese Arbeit erstellten Regelkonzept verglichen und ihre Arbeitsweise am Beispiel eines Anlagenprüfstands sowohl durch Simulation als auch durch Implementierung und Messung am realen Versuchsstand gegenübergestellt. Weiterhin wird in dieser Arbeit auf die in drahtlosen Netzwerken auftretenden Totzeiten und ihre Bedeutung für den Regelkreis eingegangen.

## 1.3 Struktur der Arbeit

In dieser Arbeit wird zum einen WirelessHART als Übertragungsprotokoll sowohl theoretisch als auch im praktischen Einsatz in Prozessregelungen betrachtet. Zum anderen kommt Bluetooth Low Energy als Übertragungsprotokoll für industrielle Anwendungszwecke, insbesondere in den Bereichen Monitoring, Konfiguration und in geschlossenen Prozessregelkreisen eine besondere Bedeutung zu. Derzeit wird sowohl WirelessHART als auch Bluetooth Low Energy in industriellen Prozessen hauptsächlich für Monitoring und Konfigurationsaufgaben genutzt. In einigen Arbeiten, wie in [72, 11, 30, 32], werden Regelungen in drahtlosen Netzwerken untersucht und Methoden zur Paketausfallkompensation vorgestellt. Insbesondere in [5] wird aufgezeigt, dass WirelessHART im Uplink-Datenverkehr deterministisches Verhalten aufweist, aber nicht bei der Downlink-Übertragung von Daten. Die in drahtlosen Netzwerken möglichen Paketausfälle, Übertragungsunterbrechungen und Latenzen stellen an regelungstechnische Anwendungen hohe Anforderungen und diese sollen in dieser Arbeit untersucht werden. Weiterhin wird eine Methode an einem Beispiel veranschaulicht, mit der auch eine hohe Zahl von Paketverlusten kompensiert werden kann.

Es werden in dieser Ausarbeitung zur einen Hälfte Netzwerksstandards und -protokolle sowie dafür geeignete Übertragungsmethoden vorgestellt. Die andere Hälfte befasst sich schließlich mit Regelungsverfahren, welche mit den in Netzwerken auftretenden Besonderheiten auskommen. Die bei der praktischen Umsetzung der Verknüpfung zwischen drahtlosen Netzwerkprotokollen und Regelungen sowie die daraus resultierenden Herausforderungen werden beschrieben und Lösungsmöglichkeiten für das optimale Zusammenspiel zwischen Netzwerkprotokoll und Regler präsentiert. Um dieses Themenfeld ausführlich zu beschreiben, untergliedert sich diese Arbeit in die folgenden Abschnitte:

Damit die in dieser Abhandlung betrachteten Protokolle und Regelungsverfahren an einem praktischen Anwendungsbeispiel getestet werden können, dienen zwei Versuchsstände als Demonstratoren. Bei den betrachteten Versuchsständen handelt es sich um einen Anlagenprüfstand, der eine typische Einheit eines verfahrenstechnischen Prozesses bildet, mittels dessen Drücke, Durchflüsse oder Differenzdrücke in den Rohrleitungssystemen von Anlagen auf bestimmte Sollwerte geregelt werden. Als weiteres Beispiel dient ein Drei-Tank-Versuchsstand, dessen Füllstände auf ein vorgegebenes Niveau geregelt werden können. In Kapitel 2 werden die physikalische Modellbildung der Anwendungsbeispiele sowie deren Eigenschaften vorgestellt. Auf diese beiden Demonstratoren wird in vielen der nachfolgenden Kapitel zurückgegriffen.

Kapitel 3 beschreibt zunächst einige Grundlagen zur Übermittlung von Daten mittels drahtloser Übertragungsmedien. Es werden die grundlegenden Strukturen von Übertragungsprotokollen sowie die gängigen Topologien von drahtlosen Netzwerken vorgestellt. Weiterhin werden die Komponenten beschrieben, aus welchen ein drahtloses Netzwerk aufgebaut ist. Schließlich wird auf die einzelnen Protokolle WirelessHART, Bluetooth sowie ein im Rahmen dieser Arbeit erstelltes MAC-Protokoll eingegangen. Die Besonderheiten und der strukturelle Aufbau der Protokolle werden ebenfalls vorgestellt. Da die Schwerpunkte dieser Arbeit bei WirelessHART und Bluetooth liegen, wird der Detaillierungsgrad für diese beiden Protokolle besonders hoch sein und insbesondere auch das Routing von Daten in dem jeweiligen Netzwerk umfassen. Schließlich findet noch ein Vergleich der Protokolle WirelessHART, Bluetooth und einem MAC-Protokoll im Hinblick auf ihre Eignung und Chancen für einen bereichsübergreifenden industriellen Einsatz statt.

Das darauffolgende Kapitel 4 gibt zunächst einen Überblick über die Schritte für den simulationsbasierten Reglerentwurf für Prozesse, die ein drahtloses Übertragungsnetzwerk zur Übermittlung von für den Regler relevanten Daten nutzen. Daraufhin folgt ein kurzer Überblick über existierende Simulationsumgebungen für Netzwerke. Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl Regelungen als auch das Netzwerkverhalten bei der Übertragung von Messdaten in drahtlosen Netzwerken betrachtet. Für die Simulation von Regelungen bietet sich MATLAB/Simulink an und für die Simulation des Übertragungsverhaltens in Netzwerken sind Netzwerksimulatoren geeignet. Da keine Gesamtlösung zur detaillierten Simulation von WirelessHART als Übertragungsprotokoll in Kombination mit einem dynamischen System auf dem Markt verfügbar war, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine entsprechende Simulationsumgebung mittels verschiedener Softwarekomponenten erstellt. Diese Simulationsumgebung wird im Kapitel 4 beschrieben. Daraufhin wird der Aufbau eines Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulators für WirelessHART-Netzwerke vorgestellt. Dieser Simulator ermöglicht es, das zu regelnde System als Modell in MATLAB/Simulink zu hinterlegen und das Verhalten des Übertragungsnetzwerks mit realer Netzwerkhardware zu testen.

Nachdem drahtlose Protokolle und deren Simulationsmöglichkeiten vorgestellt sind, fehlen zur Realisierung eines Networked-Controlled-Systems noch geeignete Regelungsverfahren. Hierzu gibt Kapitel 5 einen ausführlichen Überblick. Es wird zwischen zentralen und lokalen Regelkonzepten für industrielle Anwendungen unterschieden. Darüber hinaus wird eine Methode vorgestellt, mit der zwischen Übertragungsprotokoll und Prozessregelung eine optimale Synchronisierung erreicht werden kann. Schließlich werden mehrere Regelkonzepte und insbesondere auf Networked-Controlled-Systeme angepasste Konzepte detailliert vorgestellt. Dazu zählen ein Konzept von Yokogawa, ein allgemeiner Gain-Scheduling-Regler, ein gegenüber Paketausfällen robuster Predictive-Outage-Compensator (POC) sowie ein Multiraten-Regelkonzept. Letzteres Konzept eignet sich insbesondere für Systeme, deren Messinformationen in unterschiedlich langen Abtastintervallen zur Verfügung stehen. Das Kapitel 5 endet mit einem Vergleich der in diesem Kapitel vorgestellten Regelungsverfahren.

In Kapitel 6 werden Simulationsergebnisse und Messungen am Beispiel der in Kapitel 2 beschriebenen Versuchsstände sowie der im vorherigen Kapitel beschriebenen Regelungen sowohl durch Simulation als auch durch Messungen am realen Versuchsstand veranschaulicht und die Leistungsfähigkeit der Regler nach verschiedenen Kriterien bewertet. Es wird schließlich noch auf die Herausforderungen an Hard- und Software bei Implementierung eines Regelkonzeptes mit drahtloser Rückführung in der Realität eingegangen.

Abschließend gibt Kapitel 7 eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit. Es wird eine Aussage darüber getroffen, in welchen Situationen Regelkreise mit drahtlosen Rückführungen betrieben werden können und mit welchen Methoden am besten Störungen zu behandeln sind. Schließlich gibt dieses Kapitel einen Ausblick für Nachfolgearbeiten und es werden Szenarien für den zukünftigen Einsatz drahtloser Datenübertragung insbesondere im Kontext zur Industrie 4.0 herausgearbeitet.

Die Anhänge A.1 und B.1 umfassen ergänzende Informationen zu den in den Kapiteln dieser Arbeit beschriebenen Funkstandards und -Protokollen, Simulationsumgebungen und Regelungsverfahren sowie technische Details wie Datenstrukturen von den durchgeführten Implementierungsarbeiten.

## 2 Versuchsstände und Ressourcen

Da während dieser Arbeit zwei Versuchsstände verwendet wurden, um die eingesetzten Funktechnologien sowie Regelkonzepte in der Praxis zu testen, werden diese hier vorgestellt. Alle weiteren Kapitel werden sich oft auf diese beiden Versuchsstände beziehen. Als Beispiel zur Demonstration der Wirksamkeit und Funktionsfähigkeit von Regelkonzepten wurde zum einen ein Anlagenprüfstand gewählt und zum anderen ein Drei-Tank-Versuchsstand. Beide Systeme werden vielfach in der Industrie als Funktionseinheiten genutzt, insbesondere in verfahrenstechnischen Anlagen.

Anhand des Anlagenprüfstands können Drücke, Differenzdrücke oder Durchflüsse geregelt werden, und ein wichtiges Merkmal dieses Versuchsstands ist, dass er eine hohe Dynamik besitzt. Dies bedeutet, dass sich die Istwerte der gemessenen Drücke und Durchflüsse innerhalb von Millisekunden verändern und ein neuer Sollwert innerhalb von einer Sekunde ausgeregelt werden kann. Beim zweiten System handelt es sich um einen Speicher von Fluiden oder anderen Stoffen, der Zuflüsse und Abflüsse hat. An diesem System können Füllstände geregelt werden, und es zeichnet sich durch seine langsame Dynamik aus.

Bei beiden Systemen handelt es sich jeweils um Einheiten, die Funktionsmodule aus industriellen, verfahrenstechnischen Anlagen repräsentieren sollen. Es gibt Anlagen, die sich aus hunderten von Tanks und Einheiten zur Druck- und Durchflussregelung zusammensetzen. Da in dieser Arbeit das zentrale Thema der Einsatz von Funktechnologien und damit betriebene Regelungen für verfahrenstechnische Anlagen ist, in denen mit Fluiden und anderen Stoffen gearbeitet wird, bieten sich diese beiden Versuchsstände als Demonstratoren hervorragend an. In den folgenden beiden Abschnitten wird auf die physikalische Modellbildung beider Versuchsstände eingegangen.

## 2.1 Vorstellung des Anlagenprüfstands

Zur Untersuchung der vorgestellten Regelungsverfahren wird ein am Fachgebiet für Regelungstechnik und Mechatronik vorhandener Versuchsstand genutzt. Es handelt sich dabei um einen Anlagenprüfstand, welcher eine typische Komponente aus einer verfahrenstechnischen Anlage darstellt. Strukturell ist der Anlagenprüfstand in Bild 2.1 dargestellt.

Der Anlagenprüfstand besteht aus einem Rohrleitungssystem und einer Pumpe, welche die Aufgabe hat, für einen Durchfluss und somit in Abhängigkeit des Widerstands im Rohrleitungssystem für einen Systemdruck zu sorgen. Weiterhin sind im Rohrleitungssystem zwei Ventile integriert. Das Ventil  $V_1$  dient zum Verändern des Rohrleitungswiderstands und somit des Durchflusses qbzw. Systemdruckes  $p_2$ . Ein zweites Ventil  $V_2$  dient zur Erzeugung von Störgrößen im System, während das erste Ventil zur Regelung eines Durchflusses q, eines Druckes  $p_2$  oder eines Differenzdruckes  $\Delta p = p_2 - p_1$  genutzt wird. Der Durchfluss q kann über einen an das Rohrleitungs-



Bild 2.1: Fließschema des Anlagenprüfstands [92]

system angebundenen Durchflusssensor erfasst werden und die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  werden jeweils durch einen vor und nach dem Ventil befindlichen Drucksensor gemessen. Alle drei Sensoren liefern ein analoges 4...20 mA-Stromsignal, welches entweder drahtgebunden oder drahtlos an den Anlagenrechner übertragen werden kann. Im Falle einer drahtlosen Übertragung sind die jeweiligen Sensoren mit einem Funkmodul zu verbinden. Kommerzielle WirelessHART-Adapter können direkt mit dem 4...20 mA-Signal beaufschlagt werden, während für alle weiteren in dieser Arbeit verwendeten Funkmikrocontroller zunächst eine Wandlungsschaltung notwendig ist, die das 4...20 mA-Stromsignal in ein für den AD-Wandler des verwendeten Mikrocontrollers geeignetes Spannungssignal überführt.

Bild 2.2 zeigt den zum zuvor strukturell beschriebenen Anlagenprüfstand gehörenden realen Versuchsstand, der als Aktoren eine Pumpe, ein Regelventil und ein Störventil besitzt. Weiterhin sind Sensoren zur Durchfluss- und zur Druckmessung abgebildet. Funkmodule waren zum Aufnahme-



Bild 2.2: Aufnahme vom Anlagenprüfstand ohne Funkmodule

zeitpunkt des Bildes nicht installiert. Die in der strukturellen Darstellung eingezeichneten Tanks für den Zufluss (e) und Abfluss (a) sind an der realen Anlage in einem Tank zusammengefasst.

Für den Reglerentwurf wird zunächst ein Modell des zu betrachtenden dynamischen Systems benötigt. Die Modellierung des Versuchsstands richtet sich nach dem in Bild 2.1 dargestellten Anlagenflussschema. Ein zusätzlich am Anlagenprüfstand vorhandenes Störventil wird jedoch bei der Modellbildung vernachlässigt. Es müsste allerdings berücksichtigt werden, wenn eine Störkompensation mittels eines Störgrößenbeobachters durchgeführt werden sollte. Im Fließschema steht  $p_0$  für den Umgebungsdruck,  $p_1$  für den Druck vor dem Ventil,  $p_2$  für den Druck nach dem Ventil und q für den Durchfluss. Den Ausgang für die Modellbildung bildet, wie in [27] beschrieben, die Eulersche Bewegungsgleichung, welche entlang einer Stromlinie zur Bernoulli Gleichung

$$\int_{e}^{a} g \cdot dz + \int_{e}^{a} \frac{1}{\rho} \cdot dp + \int_{e}^{a} c \cdot dc + \int_{e}^{a} \frac{\partial c}{\partial t} \cdot ds = E$$
(2.1)

führt. Damit die Bernoulli Gleichung für ein Teilchen in einer Rohrleitung verwendet werden kann, muss die Stromfadentheorie verwendet werden. Obige Gleichung gilt für Rohrleitungen und geschlossene Behältnisse unter Vernachlässigung der Reibung und besitzt die Größen g für die Gewichtskraft, dz für Änderung des Teilchenpotentials,  $\rho$  für die Teilchendichte, dp für die Druckänderung, c für den Volumenstrom bzw. die Strömungsgeschwindigkeit. Wird die Gleichung zwischen zwei Punkten e und a integriert und werden im System auftretende Reibungsverluste  $\Delta p_r$  berücksichtigt, so ergibt sich

$$\rho \cdot g \cdot (z_{a} - z_{e}) + p_{a} - p_{e} + \frac{\rho}{2} \cdot (c_{a}^{2} - c_{e}^{2}) + \rho \cdot \int_{e}^{a} \frac{\partial c}{\partial t} \cdot ds = \Delta p_{r}.$$
 (2.2)

Im betrachteten System treten drei Arten von Druckverlusten bzw. -quellen auf, die in  $\Delta p_r$  vereinigt werden. Dabei handelt es sich um die Druckerhöhung der Pumpe, die mit

$$\Delta p_{\rm p} = k_{\rm nn} \cdot n^2 - k_{\rm nv} \cdot n \cdot q - k_{\rm vv} \cdot q^2 \tag{2.3}$$

beschrieben werden kann. Die Parameter  $k_{nn}$ ,  $k_{nv}$  und  $k_{v,v}$  sind die Modellkonstanten und *n* die Drehzahl der Pumpe. Für Druckverluste sorgt zum einen die Rohrleitung mit

$$\Delta p_{\rm c} = \underbrace{\xi \cdot \frac{\rho}{2}}_{\frac{1}{K_{\rm v,c}^2}} \cdot c^2, \qquad (2.4)$$

die den  $K_v$ -Wert  $K_{v,c}$  hat. Außerdem tritt in der Gleichung die Durchflussgeschwindigkeit auf, welche direkt mit dem Durchfluss q gleichgesetzt werden kann. In obiger Gleichung steht  $\xi$  für den Widerstandsbeiwert. Zum anderen wird der Druckverlust am verwendeten Ventil mit

$$\Delta p_{\rm v}(h) = \frac{1}{K_{\rm v,v}(h)^2} \cdot q^2$$
(2.5)

beschrieben. Der Druckverlust  $\Delta p_v(h)$  am Ventil hängt von der Zustandsgröße der Ventilstellung *h* ab und wirkt auf die Größe des  $K_v$ -Wertes des Ventils, der im Weiteren mit  $K_{v,v}(h)$  bezeichnet wird. Der  $K_v$ -Wert liegt in Form einer nichtlinearen Kennlinie vor, welche sowohl in [27] als



Bild 2.3: Kv-Kennlinie der verwendeten Ventile

auch im Rahmen dieser Arbeit gemessen wurde. Die aus [27] anhand eines Ventils und einem Stellungsregler der 3730-3er Serie der Firma SAMSON und die in dieser Arbeit mit demselben Ventil und dem Stellungsregler 3793 ermittelten Kennlinien sind in Bild 2.3 dargestellt. Die in dieser Arbeit ermittelte Kennlinie wurde im Bereich einer Ventilstellung h von 16% bis 70% gemessen. Unterhalb einer Ventilstellung h von 16% ist ein Betrieb der Anlage nicht zulässig, da die Pumpe sonst mechanisch überlastet worden wäre und oberhalb von 70% ist die Fördermenge der Pumpe nicht mehr ausreichend, um die Kennlinie aufzuzeichnen. Beide Kennlinien stimmen jedoch im betrachteten Arbeitsbereich weitestgehend überein. Die soeben beschriebenen Anteile an der Druckerhöhung bzw. Absenkung führen auf die Gleichung

$$\Delta p_{\rm r} = \Delta p_{\rm p} - \Delta p_{\rm v} \left( h \right) - \Delta p_{\rm c}, \tag{2.6}$$

welche in Gleichung (2.2) eingesetzt wird und unter Berücksichtigung der Gleichungen (2.3), (2.4) und (2.5) auf

$$\rho \cdot g \cdot (z_{a} - z_{e}) + p_{a} - p_{e} + \frac{\rho}{2} \cdot (c_{a}^{2} - c_{e}^{2}) + \rho \cdot \int_{e}^{a} \frac{\partial c}{\partial t} \cdot ds = k_{nn} \cdot n^{2} - k_{nv} \cdot n \cdot q - k_{vv} \cdot q^{2} - \frac{1}{K_{v,v}(h)^{2}} \cdot q^{2} - \frac{1}{K_{v,c}^{2}} \cdot q^{2}.$$
(2.7)

führt. Gleichung (2.7) kann stark vereinfacht werden, da das am Anlagenprüfstand verwendete Fluid als inkompressible Strömung bei konstantem Rohrleitungsquerschnitt angenommen werden kann und die Strömungsgeschwindigkeit somit als

$$c = \frac{q}{A} \tag{2.8}$$

an jedem Punkt des Rohrleitungssystems am Versuchsstand konstant ist. Dadurch vereinfacht sich das in Gleichung (2.7) noch vorhandene Integral zu

$$\rho \cdot \int_{e}^{a} \frac{\partial c}{\partial t} \cdot ds = \underbrace{\frac{1}{c_{\text{SI}}} \cdot \frac{\rho \cdot L}{A}}_{a_{\text{b}}} \cdot \dot{q}.$$
(2.9)

Der Parameter  $a_b$  ist der Beschleunigungsbeiwert der Fluiddynamik und beinhaltet die Rohrleitungslänge L, über die integriert wird, und den Rohrleitungsquerschnitt A. Um den Beschleunigungsbeiwert der Fluiddynamik an das SI-Einheitensystem anzupassen, ist es notwendig einen Umrechnungsfaktor  $c_{SI}$  zu verwenden. Dieser ist in Gleichung (2.9) bereits integriert und besitzt den Wert  $c_{SI} = 3600 \cdot 10^5$ . Genauere Details zur Umrechnung lassen sich [27] entnehmen. Weitere wichtige Vereinfachungen von Gleichung (2.7) sind, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Anlagenprüfstand als konstant angenommen werden kann, weshalb  $c_a = c_e$  gilt. Einlauf e und Auslauf a befinden sich auf gleicher Höhe, womit  $z_a = z_e$  ist und die Drücke  $p_a$  und  $p_b$  entsprechen bei Ein- und Austritt aus dem Rohrleitungssystem dem Umgebungsdruck  $p_0$ . Damit entsteht der Zusammenhang  $p_a = p_b = p_0$ . Werden diese Annahmen gemeinsam mit Gleichung (2.9) in Gleichung (2.7) eingesetzt, so vereinfacht sich Gleichung (2.7) zu

$$a_{\rm b} \cdot \dot{q} = k_{\rm nn} \cdot n^2 - k_{\rm nv} \cdot n \cdot q - k_{\rm vv} \cdot q^2 - \frac{1}{K_{\rm v,v} (h)^2} \cdot q^2 - \frac{1}{K_{\rm v,c}^2} \cdot q^2.$$
(2.10)

Damit ist mit Gleichung (2.10) die erste nichtlineare Zustandsgleichung modelliert, welche das zeitliche Verhalten des Durchflusses q beschreibt. In dieser Gleichung sind die Zustandsgrößen q für den Durchfluss, h für die Ventilstellung und n für die Drehzahl der Pumpe vorhanden. Da es sich bei h und n um Zustandsgrößen handelt, werden auch deren mathematische Beschreibungen benötigt. Dabei werden sowohl das Stellverhalten des Ventils nach Änderung der Führungsgrößenvorgabe  $h_{soll}$  mit einem PT1-Glied der Form

$$\dot{h} = \frac{1}{T_{\rm h}} \cdot (h_{\rm soll} - h) \tag{2.11}$$

als auch das Verhalten der Pumpendrehzahl auf eine Veränderung der Führungsgröße  $n_{soll}$  mit einem PT1-Glied

$$\dot{n} = \frac{1}{T_{\rm n}} \cdot (n_{\rm soll} - n) \tag{2.12}$$

angenommen. Die Zeitkonstanten der PT1-Glieder sind  $T_h$  und  $T_n$ . Werden die Zustandsgleichungen (2.10), (2.11) und (2.12) zu geläufigen Vektorfunktionen zusammengefasst, so ergibt sich die nichtlineare Zustandsraumdarstellung des Systems zu

$$\underline{\dot{x}} = \underline{a}(\underline{x}) + \underline{B} \cdot \underline{u} \tag{2.13}$$

$$y = c\left(\underline{x}\right) \tag{2.14}$$

mit dem Systemvektor

$$\underline{a}(\underline{x}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{a_{b}} \left[ k_{nn} \cdot n^{2} - k_{nv} \cdot n \cdot q - \left( k_{vv} + \frac{1}{K_{v,v}(h)^{2}} + \frac{1}{K_{v,c}^{2}} \right) \cdot q^{2} \right] \\ -\frac{1}{T_{h}} \cdot h \\ -\frac{1}{T_{n}} \cdot n \end{pmatrix}$$
(2.15)

und den Ein- und Ausgangsvektoren

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0\\ \frac{1}{T_{\rm h}} & 0\\ 0 & \frac{1}{T_{\rm h}} \end{bmatrix}, \qquad (2.16)$$

$$c\left(\underline{x}\right) = q. \tag{2.17}$$
Der Zustandsvektor ist  $\underline{x} = \begin{bmatrix} q & h & n \end{bmatrix}^{T}$ . Dieses System besitzt nun die Eingangsgrößen  $h_{soll}$  und  $n_{soll}$ , die zum Eingangsvektor  $\underline{u} = \begin{bmatrix} h_{soll} & n_{soll} \end{bmatrix}^{T}$  zusammengefasst werden. Damit ist es möglich, sowohl Pumpendrehzahl als auch Ventilstellung vorzugeben und somit das System an einem energieoptimalen Betriebspunkt für Durchfluss-, Druck- oder Differenzdruckregelungen zu betreiben. In dieser Arbeit wird jedoch die Pumpendrehzahl im Weiteren auf einer konstanten Drehzahl von  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$  gehalten. Es wird angenommen, dass die Pumpe für jeden der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche bereits eine Drehzahl von  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$  besitzt und Einschwingvorgänge somit vernachlässigt werden können. Zu beachten ist, dass bei nachfolgenden Gleichungen die als konstant angenommene Drehzahl in den Parameter  $k_{nn}$  und  $k_{nv}$  aus obiger Zustandsraumdarstellung (2.13) mit

$$\tilde{k}_{nn} = k_{nn} \cdot n^2 = k_{nn} \cdot \left(3000 \,\mathrm{min}^{-1}\right)^2 \tag{2.18}$$

$$k_{\rm nv} = k_{\rm nv} \cdot n = k_{\rm nv} \cdot 3000 \,{\rm min}^{-1}$$
 (2.19)

eingerechnet wird. Unter dieser Annahme vereinfacht sich obige Zustandsraumdarstellung zur nichtlinearen Zustandsraumdarstellung

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{h} \end{pmatrix}}_{\underline{\dot{x}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{a_{b}} \left[ \tilde{k}_{nn} - \tilde{k}_{nv} \cdot q - \left( k_{vv} + \frac{1}{K_{v,c}^{2}} + \frac{1}{K_{v,v}^{2}(h)} \right) q^{2} \right]}_{\underline{\dot{x}}}_{\underline{\dot{x}}} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_{h}} \end{pmatrix}}_{\underline{b}} \cdot \underbrace{\dot{h}_{\text{soll}}}_{\underline{u}} = \underline{f}(\underline{x}, u) \quad (2.20)$$

mit der Ausgangsgleichung für den Durchfluss q

$$v_1 = q, \tag{2.21}$$

der Ausgangsgleichung für den Ausgangsdruck  $p_2$  nach dem Ventil

$$y_2 = p_2 = \tilde{k}_{nn} - \tilde{k}_{nv} \cdot q - k_{vv} \cdot q^2 - \frac{1}{K_{v,v}^2(h)}.$$
(2.22)

sowie für den Differenzdruck

$$y_3 = \Delta p = p_2 - p_1 = \frac{1}{K_{v,v}^2(h)} \cdot h \cdot q^2.$$
 (2.23)

Kann sowohl die Ventilstellung, als auch der Durchfluss gemessen werden, so ergibt sich der Ausgangsvektor

$$\underline{y} = \underline{g}\left(\underline{x}\right) = \begin{pmatrix} q \\ h \end{pmatrix}.$$
(2.24)

Die vorliegende Strecke ist nichtlinear und besitzt eine schnelle Dynamik, welche typischerweise unter einer Sekunde liegt.

## 2.2 Vorstellung des Drei-Tank-Versuchsstands

Ein weiterer Versuchsstand, der in dieser Arbeit zur Demonstration eines Systems mit mehreren Ein- und Ausgängen verwendet wird, die untereinander verkoppelt sind, ist ein Drei-Tank-Versuchsstand. Der Drei-Tank-Versuchsstand ist in Bild 2.4 skizziert und besteht aus drei Tanks, die als Speicher eines Fluids dienen. Jeder Tank besitzt die Grundfläche  $A_i$ , die Höhe  $H_i$  und zu jedem Zeitpunkt einen Füllstand  $x_i$  mit i = 1, 2, 3. Die Grundflächen und Höhen aller Tanks sind gleich, sodass  $A_1 = A_2 = A_3 = A$  und  $H_1 = H_2 = H_3 = H$  gilt. Damit ergibt sich für jeden Tank ein vom Füllstand  $h_i$  abhängiges Volumen mit

$$V_i = A \cdot h_i. \tag{2.25}$$

Tank 1 und Tank 3 besitzen jeweils einen Zufluss (Quelle), über den mittels einer Pumpe ein Fluid in den entsprechenden Tank eingebracht werden kann. Die Fördervolumen  $q_1$  und  $q_2$  der Pumpen  $P_1$  und  $P_2$  können über ein Spannungssignal vorgegeben werden. Das von den Pumpen geförderte Fluid wird aus einem Reservoir entnommen, welches sich unter den Tanks befindet. Fluide, die das Drei-Tank-System verlassen, werden wiederum im Reservoir gesammelt.

Die Füllstände  $h_i$  der Tanks werden mittels Sensoren erfasst, die die Druckwirkung des in den Tanks befindlichen Fluids messen. Die Sensoren liefern ein 4...20 mA-Stromsignal. Tank 1 und Tank 2 sowie Tank 2 und Tank 3 sind jeweils mit einem kurzen Rohr verbunden, über das sich die Füllstände zweier benachbarter Tanks ausgleichen können. In den Verbindungsrohren entstehen die Ausgleichsdurchflüsse  $q_{12}$  und  $q_{23}$ . Zusätzlich besitzt jeder der Tanks einen Abfluss. Die Verbindungsleitungen zwischen den Tanks sowie die Abflüsse können mittels der Ventile  $V_{12}$ ,  $V_{23}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  und  $V_{ab}$  manuell geöffnet oder geschlossen werden. Bei den Ventilen  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  und  $V_{ab}$  handelt es sich um Abflussventile in das Reservoir von den Tanks 1, 2 und 3.



Bild 2.4: Fließschema des Drei-Tank-Versuchsstands



Bild 2.5: Aufnahme vom Drei-Tank-Versuchsaufbau

Bild 2.5 zeigt den zum zuvor skizzierten Drei-Tank-Versuchsstand gehörenden realen Versuchsaufbau. Im Bild befinden sich auf der linken Seite die beiden Pumpen, ebenfalls zu sehen sind die beiden Ventile, die die Tanks miteinander verbinden sowie die vier Abflussventile. Weiterhin ist der abgebildete Versuchsaufbau mit drei Funkmodulen ausgestattet, die der Übertragung der Füllstandsmessungen dienen.

Durch die vorhandenen Ventile kann das Gesamtsystem für verschiedene Verwendungszwecke konfiguriert werden. So ist es zum Beispiel möglich, aus dem Drei-Tank- ein Zwei-Tank-System zu konfigurieren. Durch Öffnen von Abflüssen (Senken) können verschiedene Anwendungsszenarien erprobt werden. So können Regler entworfen werden, die mit verschiedenen Abflüsseschwindigkeiten auskommen. Auch ist es möglich, durch das Öffnen von Abflüssen die Wirkung von Störungen auf das System zu betrachten. Obwohl das System drei Füllstände besitzt, können aufgrund der beiden Systemeingänge immer nur zwei Füllstände gleichzeitig geregelt werden. Das System besitzt außerdem die Eigenschaft, dass seine Dynamik sehr langsam ist und für die Pumpen eine Stellgrößenbegrenzung vorliegt und somit nicht beliebig hohe Durchflüsse eingestellt werden können.

Für alle Beispiele dieser Arbeit wird das Drei-Tank-System so konfiguriert, dass die Ventile  $V_{12}$ und  $V_{23}$  ganz geöffnet sind, sowie das Ventil  $V_{ab}$  teilweise geöffnet ist. Die Ventile  $V_1$ ,  $V_2$  und  $V_3$ sind immer geschlossen. Zur Vereinfachung der mathematischen Beschreibung wird angenommen, dass für die Füllstände der Tanks  $h_1 \ge h_2 \ge h_3$  gilt. Dabei ist gegeben, dass die Zuflüsse  $q_1$ und  $q_2$  in einem Zeitintervall deutlich mehr Fluid in die Tanks einbringen können, als durch die Leitungsverbindungen zwischen den Tanks mit den Durchmessern  $d_{12}$  und  $d_{23}$  sowie den Abfluss mit dem Durchmesser  $d_{ab}$  im gleichen Zeitintervall abfließen kann. Dadurch sind keine Fallunterscheidungen hinsichtlich positiver und negativer Ausgleichdurchflüsse  $q_{12}$  und  $q_{23}$  notwendig. Im Weiteren wird die mathematische Beschreibung des genutzten Drei-Tank-Systems anhand der Bernoulli-Gleichung hergeleitet. Die zeitliche Veränderung der Füllhöhe eines Tanks ergibt sich aus der Differenz zwischen den Zu- und Abflüssen der Tanks. Für das in Bild 2.4 dargestellte System ergeben sich somit die Beschreibungen

$$\dot{h}_{1} = \frac{q_{1} - q_{12}}{A}$$

$$\dot{h}_{2} = \frac{q_{12} - q_{23}}{A}$$

$$\dot{h}_{3} = \frac{q_{2} + q_{23} - q_{ab}}{A}.$$
(2.26)

Um obige Gleichungen auflösen zu können, ist es notwendig die Durchflüsse zu bestimmen. An dieser Stelle bietet sich die in Abschnitt 2.1 vorgestellte stationäre Bernoulli-Gleichung (2.2) an. Zur Beschreibung des Systemverhaltens wird eine erste Systemgrenze um Tank 1, die zweite um Tank 2 und die dritte Systemgrenze um Tank 3 gelegt. Auf diese Teilsysteme wird schließlich die Bernoulli-Gleichung (2.2) angewendet, wobei einige Vereinfachungen angenommen werden können. Für die verwendeten Fluide mit der Dichte  $\rho$  wird angenommen, dass sie inkompressibel sind und ihre Reibung vernachlässigbar ist. Die Erdgravitation g wird zu jedem Zeitpunkt und bei jeder Füllhöhe als konstant betrachtet. Außerdem wird die Dynamik der Stellglieder  $P_1$  und  $P_2$  vernachlässigt. In jedem einzelnen Tank herrscht Umgebungsdruck, wodurch  $p_1 = p_2 = p_3 = p$  gilt und sich somit die beiden Drücke  $p_a$  und  $p_e$  in der Bernouilli-Gleichung aufheben. Es ergeben sich somit aus Gleichung (2.2) die drei Zusammenhänge

$$0 = \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_{12}^2}{2} + g \cdot h_1 - g \cdot h_2$$
  

$$0 = \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_{23}^2}{2} + g \cdot h_2 - g \cdot h_3$$
  

$$0 = \frac{c_3^2}{2} - \frac{c_{ab}^2}{2} + g \cdot h_3 - g \cdot q_{ab}.$$
(2.27)

Weiterhin gilt der Zusammenhang  $q_i = d_i \cdot c_i$  zwischen Durchfluss  $q_i$ , Durchflussquerschnitt  $d_i$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $c_i$ . Da die Querschnitte der Rohrleitungen zwischen den Tanks  $d_{12}$ ,  $d_{23}$  und des Ablaufs  $d_{ab}$  deutlich kleiner als die Querschnitte der Tanks  $d_1$ ,  $d_2$  und  $d_3$  sind, können die Geschwindigkeiten der Füllstände mit  $c_1 = c_2 = c_3 \approx 0$  approximiert werden. Dadurch vereinfachen sich die Gleichungen (2.27) und es können die Durchflüsse  $q_{12}$ ,  $q_{23}$  und  $q_{ab}$  zu

$$q_{12} = d_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad \text{mit} \quad h_1 \ge h_2 q_{23} = d_{23} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_2 - h_3)} \quad \text{mit} \quad h_2 \ge h_3 q_{ab} = d_{ab} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_3} \quad \text{mit} \quad h_3 \ge 0$$
(2.28)

bestimmt werden. Diese in die Gleichungen (2.26) eingesetzt, führt auf die nichtlinearen Zustandsgleichungen

$$\dot{h}_{1} = \frac{q_{1} - d_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{1} - h_{2})}}{A} \quad \text{mit} \quad h_{1} \ge h_{2}$$

$$\dot{h}_{2} = \frac{d_{12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{1} - h_{2})} - d_{23} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{2} - h_{3})}}{A} \quad \text{mit} \quad h_{1} \ge h_{2} \ge h_{3} \quad (2.29)$$

$$\dot{h}_{3} = \frac{q_{2} + d_{23} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{2} - h_{3})} - d_{ab} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{3}}}{A} \quad \text{mit} \quad h_{2} \ge h_{3}.$$

Insgesamt zeichnet sich das Drei-Tank-System durch seine langsame Dynamik aus und eignet sich dadurch hervorragend für den Einsatz in Regelkreisen mit drahtlosen Rückführungen. Im Verlauf dieser Arbeit wurde das Drei-Tank-System mit verschiedenen Funktechnologien ausgestattet, die zu einem späteren Zeitpunkt vorgestellt werden. Somit sind die mathematischen Beschreibungen der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten und in den nachfolgenden Kapiteln referenzierten Versuchsaufbauten vorgestellt worden. Der folgende Abschnitt wird zunächst einen Überblick darüber geben, welche Funkhardware-Komponenten und Mikrocontroller insgesamt für die durchgeführten Untersuchungen zum Einsatz gekommen sind.

## 2.3 Verwendete Hardware

Jeder Funkstandard erfordert eigene Hardwarelösungen und bietet einen spezifischen Grad an Flexibilität bei der Integration und im Betrieb. Die Auswahl eines für einen Anwendungszweck geeigneten Funkstandards sowie des darauf aufbauenden Protokolls führt auf ein Spannungsfeld zwischen der benötigten Reichweite, der zu übertragenden Datenmenge, der zur Verfügung stehenden Energie, der auftretenden Latenzen und der notwendigen Skalierbarkeit des zu realisierenden Netzwerks.

Im Verlauf dieser Arbeit kamen für Untersuchungen verschiedene Hardwarekomponenten zum Einsatz. Auf der einen Seite wurden fertige, am Markt erhältliche Produkte eingesetzt, aber auf der anderen Seite auch Mikrocontroller, die frei programmiert werden konnten. Fertige und in sich geschlossene Funklösungen verschiedener Hersteller, die ebenfalls zum Einsatz kamen, wiesen neben ihrer Einfachheit in der Handhabung häufig große Nachteile beim Betrieb und der Anpassung für den Betrieb im geschlossenen Regelkreis auf. Im Folgenden werden kurz die verschiedenen Hardwarekomponenten vorgestellt und die wichtigsten Daten angegeben.

Für Untersuchungen rund um das Übertragungsprotokoll WirelessHART kamen WirelessHART-Adapter des Typs SWA70 [136] (siehe Bild 2.6a) der Firma Endress+Hauser, ein WirelessHART-



Bild 2.6: Hardwarekomponenten WirelessHART



(a) Cypress PSoC4



(b) Cypress USB BLE-Modul



(c) Nordic Semiconductor nRF52832 Evaluation Board



(d) nRF52832-Modul von aconno



(e) deRFmega256rfr2



(f) deRFnode

Bild 2.7: Hardwarekomponenten Bluetooth und IEEE 802.15.4

Gateway des Typs SWG70<sup>1</sup> [137] (siehe Bild 2.6b) ebenfalls von Endress+Hauser sowie ein WirelessHART-Gateway des Typs WHA-GW-F2D2-0-AB-Z2-ETH.EIP<sup>1</sup> [141] (siehe Bild 2.6c) der Firma Pepperl & Fuchs zum Einsatz. Die WirelessHART-Adapter wurden mit den Sensoren der in dieser Arbeit genutzten Beispielversuchsstände verbunden und die Messwerte, welche als 4-20 mA-Signal vorlagen, wurden über einen AD-Wandler digitalisiert und im WirelessHART-Netzwerk übertragen. Auf der Empfängerseite kam bei der Untersuchung von lokalen Regelkonzepten ein WH-D-Modul [142] der Firma Softing (siehe Bild 2.6d) zum Einsatz. Dieses Modul konnte über eine serielle Schnittstelle mit einem Computer verbunden werden und über eine passende Software konnten damit WirelessHART Kommandos ausgelesen oder versendet werden.

Bluetooth wurde in zwei Stufen untersucht. Dabei war es ein Ziel, eine Mehrgerätekommunikation aufzubauen, sodass ein Netzwerk mit einer Sterntopologie entsteht und alle im Netzwerk vorhandenen Teilnehmer miteinander kommunizieren können. Das Bluetooth-Modul im Mittelpunkt der Sterntopologie übernimmt die Rolle des Masters und koordiniert die Kommunikation mit den restlichen Bluetooth-Teilnehmern der Sterntopologie, die wiederum die Rolle der Slaves einnehmen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Alle Messungen wurden mit der Gateway-Firmware in der Version 2.0 durchgeführt. Einzige Ausnahme bilden die Messungen aus Abschnitt 6.5 am Drei-Tank-Versuchsstand. Hier kam die Gateway-Firmware in der Version 3.0 zum Einsatz, die ab dem 08.05.2018 zur Verfügung stand und leichte Verbesserungen an der Benutzeroberfläche und dem Kommunikationsverhalten bereit stellt.

Zunächst wurden BLE Module der Firma Cypress verwendet. Es wurde sowohl ein Evaluation Board [132] (siehe Bild 2.7a) der Firma Cypress genutzt als auch ein programmierbarer Bluetooth USB-Stick [132] (siehe Bild 2.7b). Mittels der von Cypress zur Verfügung gestellten Basissoftware konnte eine Punkt-zu-Punkt-Kommunikation aufgebaut werden. Alle Versuche, eine sternförmige Kommunikation zu realisieren, scheiterten jedoch, da dies die von Cypress zur Verfügung gestellte Basissoftware nicht zuließ. Die einzige Möglichkeit war, die einmal aufgebaute Punkt-zu-Punkt-Verbindung wieder zu trennen und daraufhin eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung mit einem anderen Modul aufzubauen. Dieser Prozess benötigte jedoch mehr als eine Sekunde und war deshalb für den Betrieb eines Reglers, der Messwerte von zwei Messstellen benötigt, nicht geeignet.

Eine Alternative zu den Cypress BLE Modulen bot die Firma Nordic Semiconductor, welche den Chip nRF52832 [139] anbietet. Es wurden Evaluation Boards verwendet, die in Bild 2.7c zu sehen sind. Dieser BLE-Chip (Bluetooth Low Energy) stellt 512 kB Flash-Speicher zur Softwarentwicklung zur Verfügung. Ein Teil des Flash-Speichers wird durch die Basissoftware mit der Bezeichnung Softdevice belegt, welche alle für BLE notwendigen Funktionen beinhaltet. Mittels der durchgeführten Implementierungen konnte eine sternförmige Topologie inklusive aller benötigten Routing Funktionalitäten und eine auf diese Arbeit angepasste Kommandostruktur realisiert werden. Detaillierte Informationen hierzu sind in Abschnitt 3.7.2 zu finden.

Zu Testzwecken wurde zusätzlich noch das auf Bild 2.7d dargestellte Funkmodul von aconno mit einem nRF52382 Chip eingesetzt. Inzwischen wurden bereits erste Versionen eines Nachfolgechips mit der Bezeichnung nRF52840 [140] auf den Markt gebracht. Dieser Chip ermöglicht einen höheren Datendurchsatz, unterstützt BLE 5.0 und es ist zusätzlich möglich, mit ihm Kommunikationsprotokolle zu betreiben, die auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4 basieren.

Neben der Hardware von Bluetooth standen noch Funkmodule der Firma Dresden Elektronik mit der Bezeichnung deRFmega256 [134] für den Einsatz als Sensormodul zur Verfügung und deRFnode [133] für den Einsatz als Koordinator. Beide Komponenten nutzen den Chip Atmega256rfr2 [130] der Firma Atmel mit 256 kB Flash-Speicher und 32 kB RAM. Auf Bild 2.7e und 2.7f sind Fotos der beiden Funkkomponenten zu sehen. Mit diesen Modulen wird das in Abschnitt 3.7.3 beschriebene, auf dem MAC-Layer basierende Funkprotokoll realisiert.

Mit den soeben beschriebenen Versuchsständen und Hardwarekomponenten beschäftigen sich ebenfalls die im Verlauf dieser Arbeit betreuten studentische Arbeiten erweiternd oder ergänzend. Diese werden im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

# 2.4 Begleitende und ergänzende Arbeiten

Die nachfolgenden Kapitel wurden durch eine Vielzahl von studentischen Arbeiten begleitet, die die Zielsetzung hatten, allgemeine Voruntersuchungen durchzuführen, fertige Konzepte an den soeben in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschriebenen realen Versuchsständen zu testen oder Themengebiete abzudecken, die nicht direkt im Fokus dieser Arbeit standen. Es wurden einige Ver-

fahren getestet, die aufgrund ihres Umfangs in dieser Arbeit keine große Beachtung finden, jedoch für weitergehende Untersuchungen durchaus interessant sein können. In diesem Abschnitt soll ein Kurzüberblick über die betreuten und unter "Studentische Arbeiten" referenzierten studentischen Arbeiten gegeben werden.

In der Arbeit [97] wurde eine Android App entworfen, mit der es möglich ist, mittels Bluetooth LE Konfigurationen an Versuchsständen durchzuführen oder Diagnosedaten auszulesen. Als Beispiel zur Veranschaulichung wurde der Drei-Tank-Versuchsstand genutzt. Bei Durchführung der Kommunikation kamen die im Rahmen dieser Arbeit eingeführten und in Kapitel 3.7.2 beschriebenen Befehlssätze zum Einsatz. Übertragen und weiterentwickelt wurde die App in [114] für den Anlagenprüfstand. Die entworfene App greift parallel beim Betrieb einer drahtlosen Regelung auf Anlagendaten zu und ermöglicht die Durchführung von Konfigurationen und das Auslesen von Diagnoseinformationen. Auch die Visualisierung von Messwerten wurde in dieser App ermöglicht. Eine Anwendung zur einfachen Erstellung von Anlagenflussbildern, die drahtlos durch WirelessHART oder BLE empfangene Daten visualisiert und ebenfalls Konfigurationsmöglichkeiten bietet, wurde in [125] erstellt. Die Grundlage für diese Anwendung, die sich aus konfigurierbaren Benutzersteuerelementen zusammensetzt, bildete [126].

Die Arbeiten [94, 103, 112, 119] beschäftigten sich allgemein mit den Themen drahtloser Kommunikation mittels der ausgewählten Funkstandards IEEE 802.15.1 oder IEEE 802.15.4 sowie der darauf basierenden Protokollen Bluetooth, ZigBee, WirelessHART oder ISA 100.11a. In [102, 104, 116, 128] bestand die Zielsetzung darin, Routingstrategien in Funknetzwerken zu betrachten, auszuarbeiten oder bestehende Algorithmen zu visualisieren. Schließlich wurden in den Arbeiten [113, 117, 120] Implementierungen auf Basis des MAC-Layers vom IEEE 802.15.4 vorgenommen und bildeten somit die Grundlage des in Abschnitt 3.7.3 vorgestellten MAC-Protokolls. In [122] wurden Modelle der Funkwellenausbreitung zusammengefasst und in [124] ein Tool vorgestellt, mit dem es möglich ist, Daten zu visualisieren und zu analysieren, die in einem drahtgebundenen oder drahtlosen Netzwerk übermittelt werden. Bestehende Verfahren zur Zeitsynchronisierung in drahtlosen Netzwerken wurden in [114] zusammengetragen und [115] beschäftigt sich mit vorhandenen Netzwerksimulatoren sowie deren Vor- und Nachteilen. Die externe Arbeit [129] behandelt die Sicherheitsanalyse mit Anomalie-Detektoren in geregelten Systemen.

Den Themenbereich zu Regelungen mit drahtlosen Rückführungen decken die Arbeiten [95, 99, 100, 101, 107, 108, 109, 110, 118, 123] ab. [109] betrachtet die einfache drahtlose Regelung eines Zwei-Tank-Systems. [99, 101] thematisieren die drahtlose Regelung eines Zwei- bzw. Drei-Tank-Systems mit WirelessHART als Übertragungsprotokoll unter Nutzung einer Entkopplungsregelung. Die Arbeiten [100, 107] verwenden einen Deadbeat-Regler zur Regelung des Durchflusses am Anlagenprüfstand. Beide Arbeiten wurden rein simulativ durchgeführt. Auch wenn die daraus gewonnenen Ergebnisse vielversprechend sind, bedarf es noch eines großen Aufwands, sie am realen Anlagenprüfstand applikabel zu machen. Die Arbeiten [94, 100, 107, 123] beschäftigen sich mit Verfahren zur Kompensation von Paketausfällen oder der Handhabung von durch die drahtlose Übermittlung entstehenden Übertragungstotzeiten am Beispiel des Anlagenprüfstands. Schließ-lich wurde in [110] ein Multiratenregler für WirelessHART am Anlagenprüfstand implementiert und in [108] anhand einer HiL-Simulation Regelkonzepte im Einsatz bei der Messwertübertragung in Multi-Hop-Netzwerken mit dem Übertragungsprotokoll WirelessHART untersucht.

Weiterhin wurden die themenfremden Arbeiten [98, 105] betreut, die sich mit Regelungen und Bedienkonzepten für einen Parallelroboter beschäftigen. Darüber hinaus behandeln zwei weitere Arbeiten die Modellierung von Fluidsystemen [121] und die Modellierung von zweidimensionalen mechanischen Systemen [106] mit OpenModelica [25], deren Grundlage [75] bildete. Des Weiteren wurde die externe Arbeite zum Thema Entwicklung einer Simulationsumgebung für Scheduling-Algorithmen zur Simulation der optimalen Maschinenauslastung, -verteilung und -nutzung bei Produktionsprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen anhand festgelegter Randbedingungen in [96] begleitet. Eine weitere externe Arbeit umfasste das Thema Modellbildung des Strömungsverhaltens von Luft in pneumatischen Aktoren [127].

# 2.5 Begriffsdefinitionen und Abtastungen in Funknetzwerken

Nachfolgend werden einige für diese Arbeit zentralen Begriffe zur Beschreibung der Dynamik von zu regelnden Systemen eingeführt. Außerdem wird die Struktur von drahtlosen Übertragungsstrecken aus regelungstechnischer Sicht beschrieben. Dabei wird die Übertragungsstrecke als Abtastsystem betrachtet, über das im geschlossenen Regelkreis Messwerte, Stellgrößen oder Sollwerte übermittelt werden können. Die Kenntnis des Abtastverhaltens in einem System mit ein oder mehreren drahtlosen Übertragungsstrecken ist von grundlegender Bedeutung für alle nachfolgenden Kapitel. Diese Darstellungsart wird als Teilsystem in vielen Strukturbildern verwendet.

### 2.5.1 Begriffsdefinitionen

Im Weiteren werden häufig die Begriffe System mit kleinen, mittleren oder großen Zeitkonstanten verwendet. Um diese Begriffe zu konkretisieren, werden im Folgenden Werte dafür angegeben, die in Relation zu den soeben genannten Begriffen für die gesamte Arbeit gelten.

**Definition 2.1** Unter "Systeme mit großer Zeitkonstante bzw. langsamer Dynamik" sind Systeme zu verstehen, deren Zeitkonstante bei t > 30 s liegt.

**Definition 2.2** Unter "Systeme mit mittlerer Zeitkonstante bzw. mittlerer Dynamik" sind Systeme zu verstehen, deren Zeitkonstante zwischen  $0.5 \text{ s} < t \leq 30 \text{ s}$  liegt.

**Definition 2.3** Unter "Systeme mit kleiner Zeitkonstante bzw. einer hohen Dynamik" sind Systeme zu verstehen, deren Zeitkonstante  $t \le 0.5$  s ist. Bei sehr kleinen Zeitkonstanten gilt im Folgenden  $t \le 0.02$  s.

Beispielsweise fällt der in Abschnitt 2.1 vorgestellte Anlagenprüfstand in die Kategorie von Definition 2.3 und der in Abschnitt 2.2 beschriebene Drei-Tank-Versuchsstand unter die Definition 2.1.

#### 2.5.2 Darstellung der Abtastung in Funknetzwerken

Nachdem die drei wichtigen Begriffe der kleinen, mittleren und großen Zeitkonstanten genauer definiert wurden, wird das für drahtlose Übertragungsstrecken typische Abtastverhalten in Bild 2.8 als Blockschaltbild dargestellt. Der drahtlose Übertragungsweg wird in diesem Abschnitt sowie im kompletten Verlauf dieser Arbeit durch eine gestrichelte Linie zwischen zwei Antennen angedeutet.



Bild 2.8: Blockschaltbild einer drahtlosen Übertragungsstrecke

In einigen Blockschaltbildern sind aus Platzgründen wie in Bild 2.9 nur zwei Antennen zu sehen, die eine Übertragungsstrecke symbolisieren sollen. Diese vereinfachte Darstellung gilt als Ersatz der Darstellung aus Bild 2.8. Zur Vervollständigung muss Bild 2.9 durch Bild 2.8 substituiert werden.

Während bei kabelgebundenen Systemen ein Signal bei dessen Diskretisierung nur von einem Abtastglied abgetastet werden muss, verhält sich dies bei drahtlosen Übertragungsstrecken anders. Für diese Art der Signalübermittelung muss ein Signal zuerst vom Sender eines Paketes mit den Intervallen  $\Delta T_N$ , mit denen es übertragen werden soll, abgetastet werden. Weiterhin besitzt ein drahtloses Übertragungssystem bei der Übermittlung des abgetasteten Wertes eine Totzeit  $t_T$ , die zwischen verschiedenen übermittelten Werten variieren kann. Sobald der Wert eines Paketes bei der Empfängerseite eintrifft, muss er von einem Halteglied solange gehalten werden, bis ein neuer und damit nachfolgender Messwert eintrifft, der dann wiederum gehalten wird. Um auf der Seite des Reglers eine äquidistante Abtastung zu erreichen, wird das eingetroffene und gehaltene Signal mit der Abtastzeit  $\Delta T_R$  abgetastet und so von der Regelung verwendet. Es kann vorkommen,



Bild 2.9: Blockschaltbild einer drahtlosen Übertragungsstrecke (vereinfacht)

dass nach  $\Delta T_{\rm R}$  kein neuer Wert bei der Regeleinrichtung eingetroffen ist. In diesem Fall bietet sich die Möglichkeit, entweder den immer noch vom Halteglied gehaltenen Wert aus dem letzten Abtastschritt zu nutzen oder einen auf Beobachterbasis, geschätzten Ersatzwert zu verwenden.

In diesem Kapitel wurden die für diese Arbeit genutzten Versuchsstände beschrieben sowie auf deren Modellbildung und mathematische Beschreibung eingegangen. Weiterhin wurden die in dieser Arbeit verwendeten Funkkomponenten kurz vorgestellt. Darüber hinaus wurde ein Überblick der im Rahmen dieser Arbeit betreuten studentischen Arbeiten gegeben und es wurden Begriffsdefinitionen eingeführt. Das nachfolgende Kapitel soll nun im Detail auf Kommunikationsprotokolle, Netzwerktopologien, die gängigsten Komponenten eines Funknetzwerks, auf die in dieser Arbeit genutzten Funkstandards sowie die darauf aufbauenden Kommunikationsprotokolle eingehen. Weiterhin wird die Frequenznutzung und -überlagerung verschiedener Funkstandards beschrieben und ein Vergleich der in dieser Arbeit betrachteten Protokolle durchgeführt.

# 3 Funktechnologien, Netzwerkorganisationsformen und Funkstandards

Im letzten Jahrzehnt wurden verschiedene Funktechnologien am Markt eingeführt. Diese lassen sich unterteilen, in welchem Frequenzbereich sie betrieben werden, der verfügbaren Sendeleistung, der Datenrate, die sie zur Übermittlung von Daten bereitstellen, in ihre Netzwerkstruktur und Organisationsform sowie ihre Robustheit gegenüber äußeren Störeinflüssen. Einer der am meisten verbreiteten Funkstandards ist IEEE 802.11.x, auf dem WLAN (Wireless Local Area Network) basiert. Ein großer Vorteil davon ist, dass WLAN heute in nahezu allen mobilen Geräten verfügbar ist und sich in den meisten Heim-, Instituts- und Firmennetzen Router zum Verbinden von mobilen Geräten befinden. Der zentrale Nachteil von WLAN ist dessen hoher Energieverbrauch aufgrund der großen zur Verfügung stehenden Übertragungsbandbreite.

Neben WLAN haben sich in den vergangenen Jahren noch WirelessHART, ISA100.11a und Zig-Bee am Markt etabliert. Diese Protokolle basieren auf dem Standard IEEE 802.15.4. Die Protokolle WirelessHART, ISA100.11a und ZigBee ermöglichen den Aufbau von vermaschten Netzwerken. Hierdurch werden für die Übertragung von Daten zwischen zwei Netzwerkteilnehmern mehrere mögliche Übertragungspfade geschaffen und es entsteht somit je nach verwendetem Routingalgorithmus eine Redundanz. Falls es im Netzwerk zu einer Störung kommt und ein Übertragungspfad ausfällt, kann ein anderer Übertragungspfad die Aufgaben des ausgefallenen Übertragungsweges übernehmen.

Neben den bisher genannten Protokollen bietet auch der Kommunikationsstandard IEEE 802.15.1, auf dem die Protokolle Bluetooth BR/EDR und Bluetooth Low Energy (LE) aufbauen, eine Alternative zur drahtlosen Übermittlung von Informationen. Allerdings ist die Netzwerkstruktur von Bluetooth anfälliger für Störungen als diejenige der zuvor genannten Protokolle. Der Grund hierfür liegt in dessen Struktur. Ein Bluetooth-Netzwerk besteht nach der Spezifikation 4.0 [13] aus einer Sternstruktur, welche aus einem Master und bis zu sieben Netzwerkteilnehmern, den Slaves, besteht. Diese Netzform wird als Piconet bezeichnet.

Mehrere Piconets können wiederum über bestimmte Routing-Knoten miteinander verbunden werden. Diese Verbindung bildet jedoch die Schwachstelle, da eine Störung der Verbindung, anders als bei vermaschten Netzwerken, häufig zu einer Unterbrechung der Kommunikation zwischen zwei Piconetzen führt. Die Stärke speziell von Bluetooth LE ist im Vergleich zu WLAN dessen geringer Energieverbrauch. An dieser Stelle ist es wichtig, zwischen Bluetooth BR/EDR und Bluetooth Low Energy (LE) zu differenzieren, welche sich im Hinblick auf ihre Topologie und ihren Energieverbrauch unterscheiden. Bluetooth zeichnet sich weiterhin im Gegensatz zu WirelessHART, ISA100.11a und ZigBee durch seine große Verbreitung in mobilen Geräten aus.

Technologiestandard [MHz]		Protokolle	Bandbreite [MHz]	Kanalbreite [MHz]	Kanalzahl	
IEEE 802.11a	5150-5350	W/LAN	5	22	13	
IEEE 802.11b	2401-2483	WLAN	5	22	13	
IEEE 802.11g	2401-2483			22	13	
IEEE 802.15.1	2402-2480	Bluetooth		1	79	
	2402-2480	Bluetooth LE		2	40	
IEEE 802.15.4	868-868,6	ZigBee	0,3		1	
IEEE 802.15.4	2402-2480	Wireless- HART, ZigBee, ISA100.11a	5	2	16	
ISO/IEC 14543-3-10	868	EnOcean				
ITU-T G.9959	868,4-869,85	Z-Wave				
keiner	2403-2480	ANT/ANT+			78	

Tabelle 3.1: Übersicht Technologien, Frequenzen, Protokolle, Kanäle

Zur Datenübermittlung stehen in Deutschland derzeit die lizenzfreien Frequenzbänder in den Bereichen 868 bis 868,6 MHz, 2,4 GHz bis 2,4845 GHz, den 5,150 GHz bis 5,350 GHz, 5,470 GHz bis 5,725 GHz und im 57,0 GHz bis 66,0 GHz Band zur Verfügung. Im Folgenden werden die einzelnen Frequenzbänder mit 868 MHz-, 2,4 GHz-, 5 GHz sowie mit 57 GHz-Frequenzband bezeichnet. Einige Funkstandards und die darauf basierenden Protokolle sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Für die aufgelisteten Protokolle sind außerdem die Bandbreite, die Kanalbreite sowie die Kanalanzahl für die jeweilige Betriebsfrequenz aufgeführt.

Es ist wichtig zu beachten, dass je höher die Frequenz ist, die von einer Sendetechnologie zur Übermittlung von Daten genutzt wird, desto stärker die Dämpfung des ausgesendeten Signals wird und sich damit die maximale Übertragungsreichweite bei gleichbleibender Sendeleistung und Antennentechnologie verringert. Nach [48] besteht der Zusammenhang

$$P_{\rm D} = P_{\rm T} - 10 \cdot n \cdot \log f - 10 \cdot n \cdot \log D + 30 \cdot n - 32,44$$
(3.1)

zwischen Empfangsleistung  $P_D$  in dBm, Sendeleistung  $P_T$  in dBm, Frequenz f in Hz, Entfernung D in m und Pfadverlustexponenten n. Der Verlustexponent ist experimentell zu bestimmen und hängt maßgeblich von der Umgebung ab, in der eine drahtlose Kommunikation betrieben wird. Einflüsse auf die Wellenausbreitung und -qualität haben nach [9, 28] die Dämpfungen, Absorptionsverluste, Beugungsverluste, Verluste durch Mehrwegausbreitung, Einflüsse der Erdoberfläche, Hindernisse, wie Gebäude oder Vegetationen sowie die Atmosphäre. Diese Signalbeeinflussungen werden durch Materialien hervorgerufen, die Funkwellen auf ihrem Weg vom Sender zum Empfänger durchdringen müssen.

Eine besondere Bedeutung kommt hierbei der Dämpfung zu. Materialien, die eine besonders hohe Dämpfung von Funksignalen hervorrufen, sind nach [28, S. 65] armierter Beton, der bei einer Dicke von weniger als 30 cm schon zu einer Dämpfung von 30 % bis 90 % führt. Noch stärker wirken sich Metallgitter aus, mit einer Dämpfung von 90 % bis 100 % bei einer Dicke, die geringer als 1 cm ist. Metall und Alukaschierungen rufen bereits bei einer Dicke von weniger als 1 cm eine Dämpfung von 100 % hervor und haben somit die extremsten Auswirkungen auf die Funkwellenausbreitung. Aber auch Wetterbedingungen, wie Nebel, Regen oder Schneefall, können mit einer Dämpfung von 60 % bis 90 % auf die Wellenausbreitung einen enormen Einfluss nehmen.

Bei der Auslegung von Funkkommunikationsverbindungen ist somit darauf zu achten, dass sich zwischen Sender und Empfänger möglichst keine oder nur wenige Materialien mit großen Dämpfungswerten befinden und wenn dies nicht vermeidbar ist, sollten die Hindernisse wenigstens lokal beschränkt sein. Weiterhin ist bei Funkverbindungen, die im freien Gelände in Betrieb genommen werden, darauf zu achten, dass die Signalstärke von Sendern und Empfängern ausreichend hoch ist bzw. die Entfernungen zwischen Sendern und Empfängern kurz genug sind, damit auch bei ungünstigen Wetterlagen noch eine Kommunikation stattfinden kann. Bei der Montage von Funkkomponenten sind Antennen derart anzubringen, dass sie in einen möglichst dämpfungsarmen Raumbereich abstrahlen und dass sie einen ausreichend großen Abstand von reflektierenden Materialien, wie Metallflächen und Rohrleitungen besitzen. In [135, S. 15] wird ein Abstand von mindestens 6 cm von Rohrleitungen, Wänden und anderen reflektierenden Materialien sowie 1 m von Böden empfohlen.

Für die zuvor genannten Übertragungsumgebungen muss der Pfadverlustexponent experimentell bestimmt werden. In Freiräumen gilt nach [26, S. 199] für den Pfadverlustexponenten n der Wert 2. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird zur Vereinfachung ausschließlich die Wellenausbreitung im Freiraum betrachtet. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick darüber, von welcher Kommunikationstechnologie welche Frequenzbänder genutzt werden, welche Kommunikationsprotokolle auf welchem Standard basieren und wie für die verschiedenen Protokolle die Kanalanzahl und -breite durch Standards und Spezifikationen festgelegt sind.

Nach diesem kurzen technologischen Überblick zu Funktechnologien und den Eigenschaften der Funkübertragung sowie den wichtigsten Funkstandards und -protokollen sollen zunächst einige häufig verwendete Begriffe eingeführt, danach die in drahtlosen Netzwerken auftretenden Topologien vorgestellt und mathematisch beschrieben werden. Schließlich wird auf die typischen Komponenten eines drahtlosen Netzwerks eingegangen.

# 3.1 Begriffsdefinitionen

An dieser Stelle werden einige Begriffe definiert, die hauptsächlich im Kontext der Funktechnologien Verwendung finden. Zunächst sind die grundlegenden Begriffe Unicast, Broadcast, Multicast, Downlink und Uplink zu klären.

**Unicast:** Hierunter ist zu verstehen, dass eine Nachricht von einem einzelnen Sender in einem Netzwerk an genau einen einzelnen Empfänger (Endpunkt) übermittelt wird.

**Broadcast:** Bei einem Broadcast wird eine Nachricht von einem Sender an alle Teilnehmer eines Netzwerks übermittelt. Eine Nachricht muss dabei vom Sender nur einmalig abgeschickt werden und erreicht trotzdem jeden einzelnen Empfänger.

**Multicast:** Unter einem Multicast wird die Übertragung einer Nachricht von einem einzelnen Sender eines Netzwerks an mehrere zu einer Gruppe zusammengefassten Empfänger verstanden. Eine Multicast-Nachricht muss dabei vom Sender nur einmalig übermittelt werden.

**Downlink:** Hierunter wird die Übertragung einer Nachricht aus einem Netzwerk oder ausgehend von einem zentralen Punkt (z.B. einem Gateway) im Netzwerk in Richtung eines Endgerätes (Endpunkt) verstanden.

**Uplink:** Eine Uplink-Übertragung liegt vor, wenn eine Nachricht, ausgehend von einem Endgerät (Endpunkt), in Richtung eines Netzwerks oder an einen zentralen Punkt (z.B. einem Gateway) im Netzwerk übertragen wird.

Wird ein Netzwerk grafisch betrachtet, so stellen Empfänger, Endpunkte, Gateways allesamt einen Knoten dar. Deshalb bildet der Netzwerkknoten im weiteren Verlauf dieser Arbeit einen wichtigen Begriff.

**Knoten:** Unter einem Knoten wird ein Verbindungspunkt im Netzwerk verstanden, der sowohl einen Endpunkt einer Datenübertragung darstellen als auch der Weiterleitung von Daten an einen oder mehrere weitere Knoten dienen kann.

Knoten können Verbindungen untereinander besitzen, die auch mit Kanten bezeichnet werden. Werden die Knoten inklusive ihrer Verbindungen untereinander als Ganzes betrachtet bzw. aufgezeichnet, so entsteht dadurch ein Gesamtbild, das auch mit Graph bezeichnet wird. Der Weg zwischen zwei Knoten kann auch über mehrere dazwischenliegenden Knoten führen. In Bezug auf ein Netzwerk und der dafür relevanten Graphen werden die nachfolgenden Begrifflichkeiten eingeführt.

**Netzwerk-Graph:** In einem Netzwerk-Graph sind alle physikalisch möglichen Verbindungen zwischen allen zu einem Netzwerk gehörenden Knoten eingezeichnet.

**Uplink-Graph:** Unter einem Uplink-Graph wird eine gerichtete Verbindung von einem Sende-Knoten zu einem zentralen Knoten eines Netzwerks verstanden, wie beispielsweise zu einem Gateway.

**Downlink-Graph:** Dabei handelt es sich um einen Graphen, der dazu dient eine gerichtete Verbindung von einem zentralen Knoten desselben Netzwerks zu einem einzelnen Empfangsknoten eines Netzwerks darzustellen. Ein Downlink-Graph führt immer genau zu einem einzelnen Empfangsknoten.

**Broadcast-Graph:** Er geht von einem Knoten ab, der fähig ist, eine Nachricht ("Broadcast-Nachricht") an alle in einem Netzwerk teilnehmenden Knoten zu übermitteln. In diesen Graphen werden alle gerichteten Verbindungen eingezeichnet, die notwendig sind, damit die Broadcast-Nachricht eines absendenden Knotens alle anderen Knoten im Netzwerk erreichen kann.

Schließlich soll noch ein Begriff eingeführt werden, der den Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nachrichten betrifft, die über ein Netzwerk gesendet werden.

Übertragungsintervall: Unter einem Übertragungsintervall wird im Kontext dieser Arbeit der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nachrichten mit Messwerten verstanden, die unter Nutzung eines Übertragungsmediums übertragen werden sollen. Hierbei wird für diese Arbeit einschränkend festgelegt, dass ein Übertragungsintervall so zu wählen ist, dass innerhalb eines Regelkreises im Idealfall erst dann ein neuer Messwert übertragen wird, wenn der zuvor vom Sensor erfasste Messwert erfolgreich bei der Regeleinrichtung eingetroffen ist, von der Regeleinrichtung verarbeitet wurde und schließlich die vom Regler ermittelte Stellgröße an den Aktor übergeben ist.

Die Länge eines Übertragungsintervalls hängt maßgeblich vom Übertragungsmedium, dem Übertragungsprotokoll und den nachfolgend beschriebenen Netzwerktopologien ab.

# 3.2 Topologien von drahtlosen Netzwerken und mathematische Beschreibung

In diesem Abschnitt werden alle möglichen Topologien von drahtlosen Netzwerken vorgestellt, die durch die in dieser Arbeit verwendeten Protokolle realisiert werden können. Hierfür werden zunächst einige für alle weiteren Betrachtungen gültige Beschreibungen eingeführt. Netzwerkgeräte werden mit Knoten  $v_i$  bezeichnet, die wie in Bild 3.1 als ausgefüllter Kreis dargestellt sind, während die Verbindungslinien zwischen zwei Knoten  $v_i$  und  $v_j$  als Kanten  $e_{i,j}$  bezeichnet werden. Die gesamte, endliche Menge aller Teilnehmer eines Netzwerkes ist n und es gilt somit für die Zählindizes  $i, j \in 1, ..., n$  mit  $n \in \mathbb{N}$ . Alle Knoten eines Netzwerks bzw. eines Graphen werden in der Menge  $V_G = \{v_1, ..., v_n\}$  und alle existierenden Kanten in der Menge  $E_G$  vereinigt. Die Kantenbezeichnung  $e_{1,2}$  gibt somit an, dass eine Datenkommunikation von Knoten  $v_1$  nach Knoten  $v_2$  möglich ist, aber um auch in umgekehrter Richtung kommunizieren zu können, bedarf es ebenfalls der Kante  $e_{2,1}$ . Graphisch ist dies in Bild 3.1 (links) dargestellt. Um die Darstellung von komplexeren Graphen zu vereinfachen, wird anstelle der beiden Verbindungspfeile aus Bild 3.1 (links) zwischen zwei Knoten ausschließlich eine Verbindungslinie gezeichnet, unabhängig davon, ob es sich dabei um eine gerichtete oder eine ungerichtete Verbindung handelt. Die Übertragungsrichtungen werden wie in Bild 3.1 (rechts) mit einem Doppelt- oder

$$V_{1} \longrightarrow V_{2} \quad V_{G} = \{v_{1}, v_{2}\}$$

$$E_{G} = \{e_{1,2}\}$$

Bild 3.1: Darstellung Knoten, Kanten und Graphen



(d) Vollkommen vermaschte To-<br/>pologie(e) Unvollständig vermaschte To-<br/>pologie(f) Mischung aus vermaschter und Baum-<br/>topologie

Bild 3.2: Basis Topologien von drahtlosen Netzwerken

Einfachpfeil in Richtung der Datenübermittlung gekennzeichnet. Gerichtete Verbindungen treten in der Praxis dann auf, wenn beispielsweise zwei verschiedene Netzwerkteilnehmer unterschiedliche Sendeleistungen (TX) und/oder für den Datenempfang verschiedene Empfangssensitivitäten (RX) aufweisen. Aber auch richtungsabhängige Reflexionseigenschaften sowie Signalbrechungen der Umgebung können zu einer gerichteten Verbindung zwischen zwei Knoten führen.

Zu den grundlegendsten Topologien zählt die Punkt-zu-Punkt-Verbindung, welche in Bild 3.2a zu sehen ist. Diese Verbindung stellt eine elementare Beziehung zwischen zwei Knoten dar und wird später auch mit dem Begriff *"Link"* bezeichnet. Weiterhin tritt häufig die Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung auf, welche in Bild 3.2b als Sterntopologie dargestellt ist. Bei einer Sterntopologie existiert ein zentraler Knoten, welcher mehrere elementare Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zu seinen umliegenden Knoten aufbaut. In dieser Netzstruktur können zunächst ausschließlich die umliegenden Knoten.

In Bild 3.2c ist eine Baumtopologie dargestellt. Diese Graphen Struktur besitzt einen zentralen Knoten, von dem aus Kanten zu jedem Unterknoten verlaufen und dieser kann wiederum zu seinen Unterknoten Kanten besitzen. Dadurch entsteht eine astförmige Struktur. Jeder Knoten ist

somit einer bestimmten Ebene im Netzwerk zugeordnet. Darüber hinaus besitzt jeder Knoten einer Ebene nur eine einzige Verbindung zu seinem Elternknoten in der nächsthöheren Hierarchieebene. Diese Struktur ist aufgrund fehlender Redundanz in den Übertragungspfaden anfällig für Ausfälle, da im Fall eines Fehlers bei einem der Elternknoten die Kommunikation im gesamten Netzwerkzweig zum Erliegen kommt, bis die Fehlerursache behoben oder das Netzwerk neu organisiert ist. Baumstrukturen werden derzeit für die Übertragung von Daten in vereinfachten ZigBee-Netzwerken genutzt, nach [48] auch mit "Stackprofil ZigBee" bezeichnet. In diesem Netzwerk benötigen die einzelnen Knoten, abgesehen vom zentralen Knoten, nur eine begrenzte Kenntnis über die Netzwerktopologie und beschränkte Routing Funktionen. Hiermit lassen sich sehr einfache Anwendungen realisieren, welche Messwerte und Diagnosedaten zu einer zentralen Leitwarte übermitteln sollen. Weiterhin können Konfigurationsdaten von einer Leitwarte zu einem bestimmten Netzwerkteilnehmer gesendet werden. Sollen Daten zwischen zwei Knoten unterschiedlicher, vom zentralen Knoten abgehender Äste ausgetauscht werden, so müssen sämtliche Daten über den zentralen Knoten geleitet und geroutet werden. Dies kann sehr schnell zu Ressourcenengpässen bei hohem Daten- bzw. Paketaufkommen führen.

Für die vollkommen vermaschte Topologie aus Bild 3.2d muss jeder Knoten eines Netzwerkes eine Kommunikationsverbindung zu jedem anderen Knoten des Netzwerkes besitzen. Somit müssen sämtliche Sendeleistungen groß genug und die Empfängersensitivitäten entsprechend fein sowie die Umgebungsbedingungen geeignet sein, um auch den entferntesten Knoten zu erreichen und von ihm Daten empfangen zu können. Um den zugehörigen Netzwerkgraphen aufzubauen, muss für jeden Knoten  $v_i$  mit i = 1, ..., n aus der Menge  $V_G$  zu jedem Nachbarn  $v_j$  aus  $V_G \setminus \{v_i\}$  eine Kante  $e_{i,j}$  gebildet werden und zur Menge aller Kanten  $E_G$  hinzugefügt werden.

Eine weitere verbreitete Topologie in drahtlosen Netzwerken ist die in Bild 3.2e dargestellte und im Folgenden als unvollständig vermaschte Topologie bezeichnete Netzwerkstruktur. Bei dieser Topologie besitzt nicht jeder Knoten eine Verbindung zu allen anderen Knoten eines Netzwerkes, da Netzwerke in vielen Fällen räumlich weit ausgedehnt sind, die Sendeleistungen und Empfängerempfindlichkeiten der Knoten begrenzt sind oder Umgebungseinflüsse eine direkte Verbindung zwischen zwei voneinander entfernten Knoten unmöglich machen. Um diesen Graphen zu realisieren, müssen für jeden Knoten  $v_i$  mit i = 1, ..., n aus der Menge  $V_G$  für jede existierende physikalische Verbindung zu seinen Nachbarn  $v_j$  aus  $V_G \setminus \{v_i\}$  eine Kante  $e_{i,j}$  gebildet und zur Menge aller Kanten  $E_G$  hinzugefügt werden. Diese Topologie wird beispielsweise von den Protokollen WirelessHART und ISA100.11a genutzt.

Schließlich existiert noch, wie in Bild 3.2f dargestellt, eine Mischung aus der vollkommen vermaschten Topologie aus Bild 3.2d und der Baumtopologie aus Bild 3.2c. Diese wird nach [48] von ZigBee für das "Stackprofil ZigBee PRO" genutzt. Bei dieser Topologie gibt es einen Koordinator für das ZigBee-Netzwerk, welcher sich in diesem Beispiel im Zentrum des Netzwerkes befindet und es sind weitere Routing-Geräte vorhanden. Knoten, für die ein energiesparender Betrieb notwendig ist, und die daher keine Routing-Funktion besitzen sollen, sind über einzelne Äste mit benachbarten Knoten mit Routing-Funktion verbunden. Es wird in diesem Zusammenhang von full function field devices (FFD) und reduced function field devices (RFD) gesprochen. Die soeben beschriebenen Topologien spannen allesamt einen Netzwerk-Graphen  $G(V_G, E_G)$  auf, der aus der Menge aller Knoten  $V_G$  und aller Kanten  $E_G$  eines Netzwerkes besteht. Es hängt vom verwendeten Kommunikationsprotokoll ab, welche Art von Routing genutzt wird. Bei drahtlosen Netzwerken wird die Weiterleitung von Paketen im Netzwerk entweder mit Source-Routing oder Graph-Routing realisiert. Im Weiteren wird das Graph-Routing betrachtet, da es insbesondere beim Übertragungsprotokoll WirelessHART benötigt werden wird. Zunächst wird angenommen, dass ein Netzwerkprotokoll keine zentrale Koordinationsstelle besitzt und somit jeder Knoten  $v_i$ eines Netzwerks für jeden beliebigen anderen Knoten  $v_j$  im Netzwerk erreichbar sein muss. In diesem Fall benötigt jeder Knoten einen Graphen zu jedem anderen Knoten im Netzwerk. Somit müssen für ein Netzwerk bestehend aus n Knoten für jeden Knoten  $v_i$  insgesamt n - 1 Graphen  $G_{D,v_i,v_j}(V_{D,v_i,v_j}, E_{D,v_i,v_j})$  mit  $j \in \{1, \ldots, i - 1, i + 1, \ldots, n\} \land V_{D,v_i,v_j} \cap V_G \land E_{D,v_i,v_j} \cap E_G$ erstellt werden. Dies bedeutet, dass die Teilgraphen  $G_{D,v_i,v_j}(V_{D,v_i,v_j}, E_{D,v_i,v_j})$  ausschließlich die Knoten v und die Verbindungen e umfassen dürfen, die auch im Netzwerkgraphen  $G(V_G, E_G)$ vorhanden sind.

Die Hinterlegung aller möglichen Wege in einem Netzwerkknoten führt zu einer hohen Speicherauslastung in dessen Mikrocontroller und nicht auf allen Anwendungsgebieten ist es notwendig, zwischen sämtlichen unterschiedlichen Knoten eine Kommunikation durchzuführen. In heutigen industriellen Anwendungsfeldern existieren meist zentrale Leitwarten und Steuerungseinrichtungen, die dazu führen, dass Daten von oder zu einem zentralen Knoten übermittelt werden sollen. Für diesen Fall reduziert sich die Anzahl der notwendigen Graphen, denn alle Daten, wie beispielsweise Messwerte, müssen entweder zum zentralen Knoten gesendet werden oder dieser zentrale Knoten übermittelt Nachrichten an bestimmte oder alle ihm zugeordnete Knoten bzw. Feldgeräte. Für dieses Szenario wird ebenfalls ein Netzwerkgraph  $G(V_G, E_G)$  benötigt. Anhand des Netzwerkgraphen werden die für eine Kommunikation innerhalb des vereinfachten Netzwerks notwendigen Broadcast-Graphen  $G_{\rm B}(V_{\rm B}, E_{\rm B})$ , Uplink-Graphen  $G_{\rm U}(V_{\rm U}, E_{\rm U})$  sowie Downlink-Graphen  $G_{D,v_i}(V_{D,v_i}, E_{D,v_i})$  erstellt. Bei dieser Netzwerkstruktur muss der Downlink-Graph  $G_{D,v_i}(V_{D,v_i}, E_{D,v_i})$  vom zentralen Knoten zu jedem, dem Netzwerk zugehörigen Knoten  $v_i$ aus der Menge  $V_{\rm G}$  bestimmt werden. Alle Downlink-Graphen beginnen am Routing Knoten des betrachteten Netzwerks. Da sich die jeweiligen Graphen je nach Protokoll und der Implementierung von den Herstellern unterscheiden, wird an dieser Stelle von der Angabe einer allgemeinen Methode zur Ermittlung der Graphen abgesehen und zu einem späteren Zeitpunkt bei der Implementierung einer eigenen Strategie wieder auf die in diesem Abschnitt eingeführte mathematische Notation zurückgegriffen.

### 3.3 Komponenten eines drahtlosen Netzwerks

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, besteht ein drahtloses Netzwerk aus einer Vielzahl von Knoten und Kanten. Im praktischen Einsatz besitzen diese Knoten unterschiedliche Eigenschaften und Aufgabenbereiche. In diesem Abschnitt sollen nun die verschiedenen Arten von Knoten allgemeingültig beschrieben werden. Grundsätzlich wird nach [17] am Beispiel des WirelessHART Protokolls zwischen den Gerätetypen Feldgerät, Adapter, Router, Handheld, Accesspoint und Ga-



**Bild 3.3:** Beispiel eines WirelessHART-Netzwerks [17]

teway unterschieden. Diese speziell für WirelessHART getroffene Einteilung lässt sich jedoch auf jedes beliebige drahtlose Netzwerkprotokoll übertragen. Allerdings muss nicht jedes Protokoll jeden Gerätetyp unterstützen. Weiterhin kann ein physikalisches Gerät mehrere der oben genannten Typen beinhalten. So kann ein Feldgerät gleichzeitig mit einer Routing-Eigenschaft ausgestattet sein. In Bild 3.3 ist ein Beispiel für ein typisches drahtloses Netzwerk dargestellt, welches unter anderem über ein Gateway eine Verbindung zu einem drahtgebundenen Netzwerk besitzt. Im Folgenden werden die einzelnen Gerätetypen kurz beschrieben und voneinander abgegrenzt.

**Feldgerät:** Unter einem Feldgerät ist eine technische Einrichtung zu verstehen, die gewünschte Werte, wie zum Beispiel Temperatur, Durchfluss oder Druck aus einem Prozess erfasst, diese über einen geeigneten Messwandler umformt und einem Mikrocontroller übergibt, der einen drahtlosen Kommunikationsstandard und ein dafür geeignetes Übertragungsprotokoll, wie beispielsweise WirelessHART, ISA100.11a oder ZigBee zur drahtlosen Datenübermittlung zur Verfügung stellt. Bei einem Feldgerät kann es sich im Kontext von Funkkomponenten um jeden beliebigen Sensor handeln, der eine integrierte Einrichtung zur drahtlosen Datenübermittlung besitzt.

Adapter: Ein Adapter ist eine technische Einrichtung, die aus einem Messwandler und einem Mikrocontroller besteht. Der Mikrocontroller unterstützt einen drahtlosen Kommunikationsstandard und ein dafür geeignetes Übertragungsprotokoll, wie beispielsweise WirelessHART, ISA100.11a oder ZigBee zur drahtlosen Datenübermittlung. Mit ihm kann eine bestehende Messeinrichtung um die Fähigkeit der drahtlosen Übermittlung von Messwerten erweitert werden. Adapter eignen sich durch ihre einfache Integration insbesondere für die Erweiterung von bestehenden Anlagen, zur Übermittlung zusätzlicher Prozesswerte oder -informationen, zur Konfiguration oder Diagnose. Die heute am Markt befindlichen WirelessHART-Adapter werden meist mit 4 mA bis 20 mA-Stromsignalen von Messeinrichtungen am Messwerteingang beaufschlagt. Technisch betrachtet können jedoch auch alle anderen Arten von analogen und digitalen Signalen sowie Informationen durch Adapter gewandelt und drahtlos übermittelt werden, soweit sie über eine passende Elektronik zur Erfassung der gewünschten Signalarten verfügen.

**Router:** Router sind technische Geräte, die Pakete von einem mit ihnen in Verbindung stehenden sendenden Gerät, dessen Pakete nicht an sie adressiert sind, an ein weiteres mit ihnen in Verbindung stehendes Gerät weiterleiten können. Zur Weiterleitung von Paketen benötigt ein Router Adress- und gegebenenfalls Topologie-Informationen über einen Teil oder das gesamte Netzwerk. Diese Informationen werden meist in lokalen Routingtabellen abgelegt. Die in drahtlosen Netzwerken eingesetzten Routingverfahren werden grundsätzlich nach [17] in Graph-Routing und Source-Routing unterteilt. In [1, 16, 64] werden einige grundlegende Routingverfahren für drahtlose Kommunikationsnetze vorgestellt. Bei vielen Netzwerkprotokollen, wie beispielsweise WirelessHART, ISA100.11a und ZigBee Pro können auch Feldgeräte oder Adapter als Router fungieren. Die Routing-Funktion einer drahtlosen Komponente stellt einen zentralen Faktor für den Energieverbrauch eines Gerätes dar, da hierdurch die Anzahl der Sende- (TX) und Empfangsvorgänge (RX) erhöht wird. Dies beeinflusst insbesondere bei batteriebetriebenen Geräten die Batterielebensdauer. Aber auch die Umsetzung eines Routing-Algorithmus und die Datenübertragungspfade in einem Netzwerk haben großen Einfluss auf den Energieverbrauch und die Leistungsfähigkeit eines drahtlosen Netzwerks.

Handheld: Bei dieser Komponente handelt es sich um ein Gerät zur Konfiguration, Überwachung, Bedienung oder Diagnose einzelner Komponenten eines drahtlosen Netzwerks. Ein Handheld ist ein tragbares Gerät und kann deswegen mobil in einer Anlage eingesetzt werden. Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten bei der Handhabung. Entweder ein Handheld nimmt eine Verbindung zu genau einem Knoten eines drahtlosen Netzwerks auf und kann nur auf diesen zugreifen oder es verbindet sich mit dem Gesamtnetzwerk als gleichberechtigter Teilnehmer. Unter einem Handheld kann auch ein Mobiltelefon verstanden werden, welches sich mit einem Bluetooth oder WLAN-Netzwerk verbindet und über eine geeignete Software zur Durchführung von bestimmten Aufgaben verfügt, wie beispielsweise ein Konfigurationstool zur Konfiguration von Komponenten einer Anlage oder eines Versuchsstands. Ein Handheld muss zwingend über den Kommunikationsstandard und das für das drahtlose Netzwerk verwendete Protokoll verfügen.

Accesspoint: Ein Accesspoint (AP) bildet den Übergang von einem drahtlosen Netzwerk auf einen kabelgebundenen Übertragungsweg und reicht die empfangenen Daten drahtgebunden meist an ein Gateway weiter und umgekehrt.

**Gateway:** Das Gateway (GW) setzt Daten von einem Protokoll in ein anderes um. Dies können die Daten von zwei drahtgebundenen Protokollen wie TCP in Modbus, die Daten von zwei drahtlosen Protokollen wie WirelessHART in Bluetooth oder die Daten zwischen einem drahtlosen Protokoll und einem drahtgebundenen Protokoll wie HART in WirelessHART sein. Um

Ebene	Schicht
7	Anwendungsschicht (application layer)
6	Darstellungsschicht (presentation layer)
5	Sitzungsschicht (session layer)
4	Transportschicht (transport layer)
3	Vermittlungsschicht (network layer)
2	Sicherungsschicht (data link layer)
1	Bitübertragungsschicht (physical layer)

Fabelle 3.2:	OSI-Schichten-Modell
--------------	----------------------

eine Datenumsetzung zu realisieren, muss das Gateway mit entsprechender Hardware ausgestattet sein, den benötigten Protokoll-Stacks, und es müssen sinnvolle Übersetzungsregeln zwischen den beiden Protokollen vorhanden sein. Schwierigkeiten könnte beispielsweise bereiten, ein TCP Protokoll in ein WirelessHART oder Modbus Protokoll umzusetzen, da sich die Datenstrukturen der beiden Protokolle grundlegend unterscheiden. Ein Tunneln von gesamten WirelessHART-Paketen über TCP, UDP oder ein vergleichbares Protokoll ist hingegen problemlos möglich.

Die soeben vorgestellten Komponenten eines drahtlosen Netzwerks haben alle eines gemeinsam, egal welchen Funkstandard und welches Kommunikationsprotokoll sie nutzen, ihnen liegt allen das OSI-Modell (open system interconnection model) zugrunde. Dieses Modell wird als zentrales Element zur Betrachtung von Funkstandards und Protokollen im Weiteren beschrieben.

# 3.4 Open System Interconnection Modell (OSI-Model)

Tabelle 3.2 gibt die Struktur des OSI-Modells an, welches als eine Richtlinie für das Design und die Entwicklung von Netzwerkprotokollen dient. Die Einteilung in verschiedene Schichten, welche über fest definierte Schnittstellen miteinander verbunden werden, erleichtert den Austausch, die Änderung und Erweiterung von Teilen eines bereits implementierten Protokollstapels. In diesem Abschnitt wird kurz auf die Funktionsweisen und Aufgaben der einzelnen Ebenen eingegangen. Bei der Erklärung wird bei der obersten Ebene, der Anwendungsschicht begonnen und Schritt für Schritt bis zur physikalischen Schicht vorgegangen.

Die oberste Ebene zur Übermittlung von Daten bildet die Anwendungsschicht. Hierbei muss zwingend zwischen den Begriffen der Anwendung, welche Benutzerinteraktionen entgegennimmt und diese verarbeitet, der Anwendungsschicht und dem eigentlichen Protokoll unterschieden werden. Die Anwendung kann als Client Datentransfers initiieren oder als Server auf Anfragen nach Daten reagieren. Ein Client sendet eine Anfrage an den Server, dieser empfängt die Anfrage, wertet sie aus und sendet schließlich die angeforderten Daten an den Client zurück. Der Client empfängt letztendlich die angeforderten Daten. Versendet der Client eine Anfrage oder der Server eine Antwort, so nimmt die Anwendungsschicht die entsprechenden Daten entgegen und verpackt sie gemäß der festgelegten Regeln und Formate zur Datenbehandlung in eine Nachricht, die an eine darunterliegende Schicht weitergeleitet wird.

Empfängt hingegen der Server eine Anfrage des Clients oder der Client die Antwort des Servers, so wird die Anwendungsschicht in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen. Die Anwendungsschicht empfängt die Nachrichten aus der darunterliegenden Ebene des OSI-Modells. Diese Daten werden gemäß den Regularien des genutzten Protokolls extrahiert und an die zugeordnete Anwendung weitergeleitet. Somit ist die Anwendungsschicht aus Sicht der Anwendung als Schnittstelle zum Netzwerk anzusehen.

Die Hauptaufgaben der darunterliegenden Darstellungsschicht bestehen darin zu prüfen, ob die Daten eines Senders von der Anwendungsschicht im Empfangsgerät verarbeitet werden können. Weiterhin besteht die Aufgabe darin, Daten zu komprimieren bzw. beim Empfänger zu dekomprimieren sowie sie zu ver- bzw. entschlüsseln. Darüber hinaus kümmert sich die Darstellungsschicht um die strukturierte Darstellung der Daten, was sowohl die plattformunabhängige als auch einheitliche Darstellung, die Übersetzung zwischen Datenformaten sowie die Serialisierung von Binärdaten umfasst.

Aufgabe der Sitzungsschicht ist es, Dialoge zwischen Sende- und Empfangsanwendung zu erzeugen bzw. zu verarbeiten. Direkt unter der Sitzungsschicht befindet sich die Transportschicht, welche es unterschiedlichen Anwendungen ermöglichen soll, Daten quasi parallel und durch Nutzung des gleichen Netzwerkknotens über ein Netzwerk zu übermitteln. Die Transportschicht stellt verbindungslose und verbindungsorientierte Transportmechanismen bereit. Außerdem stellt sie Fehlererkennungs- und Fehlerbehandlungsroutinen zur Verfügung, splittet Telegramme in Segmente, fügt ihnen einen Header hinzu und versendet sie.

Zu den verbindungslosen (stream-orientierten) Transportmechanismen zählt beispielsweise das UDP-Protokoll. Beim Empfang der Segmente der verbindungslosen Protokolle werden diese mittels einer Portnummer zur Identifizierung einer Anwendung an die richtige Zielanwendung in den übergeordneten Schichten weitergeleitet. Bei dieser Art der Übertragung ist nicht sichergestellt, dass Segmente in der richtigen Reihenfolge ankommen. Auch bekommt der Empfänger nicht mit, falls bei der Übertragung Segmente verloren gehen.

Dagegen zählt zu verbindungsorientierten (datagram-orientierten) Protokollen beispielsweise das TCP-Protokoll. Beim Empfang der Segmente der verbindungsorientierten Protokolle werden diese aufgrund ihrer Header-Informationen am Ziel in der richtigen Reihenfolge zum vollständigen Telegramm zusammengesetzt und, meist mittels einer Portnummer zur Identifizierung einer Anwendung, an die richtige Zielanwendung in den übergeordneten Schichten weitergeleitet. Die Ankunft von übertragenen Segmenten wird vom Empfänger bestätigt, es ist möglich fehlende Segmente einer Übertragung zu identifizieren und diese erneut anzufordern.

Eine weitere wichtige Schicht eines jeden Knotens ist die Vermittlungsschicht, die sich direkt unterhalb der Transportschicht befindet und deren Aufgaben es ist, aus einem Segment der Transportschicht ein Paket zu erzeugen, indem durch die Zuweisung der Quell- und Zieladresse ein zusätzlicher Header hinzugefügt wird. Des Weiteren ist das Routing eine Aufgabe dieser Ebene, falls ein Knoten Routingeigenschaften besitzt. Um ein Routing durchzuführen, muss bei Ankunft eines Pakets die Zieladresse aus dem Header in der Vermittlungsschicht ausgelesen und anhand verfügbarer Routinginformationen geprüft werden, über welche Verbindung das empfangene Paket weitergeleitet werden muss. Trifft das Paket am Ziel ein, so wird der Header entfernt und die Daten werden an die höhere Transportschicht gereicht. Die Vermittlungsschicht ist unabhängig vom Medium, über das die Daten übertragen werden sollen. Sie benötigt lediglich die Information, welche maximale Paketgröße das Übertragungsmedium in einem Paket versenden kann.

Unter der Vermittlungsschicht befindet sich die Sicherungsschicht, die abhängig vom verwendeten Übertragungsmedium ist. Für unterschiedliche Übertragungsmedien bedarf es verschiedener Sicherungsschichten. Ihre Aufgabe ist es, den Transport von Daten im Netz sicherzustellen. Die übertragenen Daten werden auch mit Frame bezeichnet und die Sicherungsschicht formatiert die Daten entsprechend der vom Übertragungsmedium gestellten Anforderungen und stellt sie der Bitübertragungsschicht zur Verfügung.

Die unterste Ebene des OSI-Modells nimmt die Bitübertragungsschicht ein. Ihre Aufgabe ist es, die über ein Kommunikationsmedium übertragenen Daten zu kontrollieren und sie in für ihren Transport geeignete binäre Bits zu kodieren. Beim Empfang über das physikalische Übertragungsmedium werden sie schließlich wieder dekodiert und an die darüber liegende Sicherungsschicht weitergeleitet.

Mittels des soeben beschriebenen Schichtenmodells ist es möglich, aus topologischer Sicht komplexe Netzwerke zu betreiben. Um Daten durch ausgedehnte Multi-Hop-Netzwerke zu leiten, kommt der Vermittlungsschicht durch ihre Routingfähigkeit bei Protokollen, wie beispielsweise WirelessHART, ISA100.11a und ZigBee, eine zentrale Bedeutung zu. Um die im weiteren Verlauf relevanten Protokolle zu beschreiben, werden im folgenden Abschnitt zunächst relevante Frequenzverfahren beschrieben und im übernächsten Abschnitt die Funkstandards IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 und IEEE 802.11 vorgestellt. Daraufhin wird auf die in dieser Arbeit betrachteten Funkprotokolle WirelessHART und Bluetooth eingegangen. Für Bluetooth wurde ein Netzwerkmanagement und eine Routing-Strategie entwickelt und erfolgreich implementiert, welche ebenfalls vorgestellt wird.

# 3.5 Frequenzverfahren FHSS und DSSS

Dieser Abschnitt stellt kurz die Frequenzverfahren vor, die in den betrachteten Funkstandards und Übertragungsprotokollen Verwendung finden. Dabei handelt es sich sowohl um das Frequenzsprungverfahren (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum) als auch um das Frequenzspreizverfahren (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum).

Beim FHSS-Verfahren wird zu vorgegebenen Zeitpunkten die Frequenz und somit der Funkkanal gewechselt. Es ist bei diesem Verfahren notwendig, dass dem Sender und Empfänger die Wechselzeitpunkte und die zugehörigen Frequenzen bekannt sind, auf die gewechselt werden soll. Generell gilt das FHSS-Verfahren gegenüber Interferenzen, Schwankungen in der Empfangsfeldstärke und dem Hintergrundrauschen als nicht störanfällig [49, S. 30f]. Sollte ein Frequenzband gestört sein, auf dem übertragen wird, so kommt es zwar auf diesem Übertragungskanal zu Ausfällen des Übertragungsinhaltes, aber beim nächsten Kanalwechsel auf ein anderes Frequenzband ist wieder eine fehlerfreie Übertragung möglich. Ein Mithören durch Außenstehende bei der Übertragung ist ebenfalls nicht einfach, solange die dafür notwendigen Frequenzwechselsequenzen nicht bekannt sind. Unterstützt wird dieses Verfahren beispielsweise vom IEEE 802.15.1 Standard, auf dem Bluetooth aufbaut.

Im Gegensatz zum FHSS-Verfahren werden beim DSSS-Verfahren keine Kanalwechsel durchgeführt, sondern es wird immer im gleichen Frequenzband gesendet und stattdessen wird durch eine vorgegebene Bitfolge, die auch mit Spreizcode bezeichnet wird, das Signal über das Frequenzspektrum des genutzten Kanals gespreizt. Für die Spreizung des Signals auf Senderseite und die Rekonstruktion des Signals auf Empfängerseite kommt der Spreizcode zum Einsatz. Dadurch ist dieses Verfahren robuster gegenüber schmalbandigen Störungen. Von außen ist ein Mithören der Übertragung nur dann möglich, wenn der verwendete Spreizcode bekannt ist. Im Vergleich zu FHSS ist DSSS abhörsicherer. Genutzt wird dieses Verfahren beispielsweise von WLAN, UMTS, UWB (Ultra-wideband), Wireless USB, dem IEEE 802.15.4 Standard sowie einigen Versionen des IEEE 802.11x Standards (WLAN).

Weiterhin ist es möglich, eine Kombination aus DSSS- und FHSS-Verfahren zu verwenden. So kann die Übertragung des Signals auf der untersten physikalischen Ebene unter Nutzung des DSSS-Verfahrens durchgeführt und zusätzlich können in einer höheren Ebene des OSI-Modells zu definierten Zeitpunkten die Frequenzen (Übertragungskanäle) gewechselt werden. Hierdurch werden die Stärken aus beiden Verfahren kombiniert. Dies wird beispielsweise durch Wireless-HART [17, S. 139] oder ISA 100.11a auf Paketbasis genutzt. Nach jedem Paket wird der Kanal gewechselt.

# 3.6 Funkstandards

Funkstandards dienen als Regelwerke, welche von der IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) herausgegeben werden. Generell werden durch die im Folgenden betrachteten Standards für Kommunikationsprotokolle vor allem die Bitübertragungsschicht und der Datenlink-Layer beschrieben und alle notwendigen Verfahren und Schnittstellen definiert, damit unterschiedliche und voneinander unabhängige Hersteller von Kommunikationshardware Geräte entwerfen und auf den Markt bringen können, welche herstellerübergreifend miteinander kommunizieren können. Zentrale Regelwerke, auf denen dieser Abschnitt und insbesondere auch der Abschnitt 3.7 über Protokolle für drahtlose Netzwerke aufbauen, sind die Standards IEEE 802.11 [35] für WLAN, IEEE 802.15.1 [39] für Bluetooth und IEEE 802.15.4 [36] für drahtlose Netzwerke mit einer geringen Datenrate. Auf der Definition der einzelnen Standards, die die ersten beiden Layer des OSI-Modells beschreiben, bauen schließlich die verschiedenen Protokolle auf, welche in den meisten Fällen ebenfalls standardisiert oder spezifiziert sind.

### 3.6.1 IEEE 802.11 - Standard für Wireless Local Area Networks (WLANs)

WLAN basiert auf dem IEEE 802.11-Standard, welcher in den vergangenen drei Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt wurde. IEEE 802.11 umfasst sowohl die Bitübertragungsschicht als auch die Sicherungsschicht des OSI-Modells. Die möglichen Datenraten erstrecken sich über einen sehr großen Bereich. Während die erste Version von IEEE 802.11 noch eine Datenrate in Abhängigkeit des genutzten Frequenzmodulationsverfahrens von bis zu 1, 2 oder 3 Mbits s<sup>-1</sup> besaß, ermöglicht der neueste Standard IEEE 802.11ad sogar eine Datenrate bis über 3 Gbits s<sup>-1</sup>. Bei heutigen Standards wird meistens das OFDM-Verfahren (orthogonal frequency division multiplexing) zur Übertragung von Paketen genutzt.

Alle in dieser Arbeit angegebenen Datenraten sind Brutto-Datenraten. Abzüglich aller Headerdaten, welche Verwaltungsinformationen der einzelnen Schichten des OSI-Modells beinhalten, beträgt die Netto-Datenrate im Durchschnitt 50 % der Brutto-Datenrate. Ein WLAN kann in einer Sterntopologie organisiert sein, bei der ein zentraler Access-Point als Knoten dient, an dem alle Informationen zusammenlaufen. Diese Topologie wird auch als Zellstruktur (Basic Service Set, BSS) bezeichnet [42]. Eine Topologie kann aus mehreren Zellen bestehen, von denen jede einen Access Point besitzt. Die Access Points werden in der Regel über ein LAN (Local Area Network) als Backbone-Netz oder auch mit Distributed System (DS) bezeichnet, miteinander verbunden.

Weiterhin ist für WLAN die Bustopologie bekannt, in der jeder Knoten im Netzwerk seine Daten an alle anderen Knoten im Netzwerk sendet. In diesem Fall wird auch von einem Ad-hoc Netzwerk gesprochen. Da das Adressierungsschema von WLAN gemäß IEEE 802.11 auf der Ebene der Sicherungsschicht dem Adressierungsschema von LAN beruhend auf Standard IEEE 802.3 entspricht, können Daten einfach zwischen kabelgebundenem und drahtlosem Netzwerk über einen Access Point geroutet werden. Auf die Struktur der zu übertragenden Daten haben die Übertragungsmedien Kabel und Luft keinen Einfluss, da sie in beiden Fällen identisch ist.

Für die Kommunikation in einem WLAN wird meistens das CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) Verfahren verwendet [42]. Dieses Verfahren ist ein Zugriffsverfahren, welches mehreren Netzwerkteilnehmern den Zugriff auf ein Übertragungsmedium ermöglicht (multiple access) und sicherstellt, dass die Daten an ihren Zielknoten gelangen. Der Kommunikationsablauf und die Funktionsweise von CSMA/CA wird im Folgenden genauer beschrieben.

Zu Beginn einer Kommunikation wird von einem Netzwerkknoten mit Sendeaufträgen geprüft, ob das Übertragungsmedium für eine Kommunikation frei ist (carrier sense). Ist das Übertragungsmedium frei, so informiert der Sender zunächst alle erreichbaren Netzwerkteilnehmer, dass er einen Übertragungsvorgang starten möchte (collision avoidance)<sup>1</sup>. Daraufhin wird das Datenpaket übertragen und der Empfängerknoten bestätigt die vollständige und fehlerfreie Übertragung mit einem Acknowledgement (ACK). Falls die Übertragung nicht erfolgreich war, wird der Sendevorgang

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Ein weiteres Verfahren ist das CSMA/CD (carrier sense multiple Access with collision detection). Dieses unterscheidet sich nur darin, dass es nicht das Netzwerk darüber informiert, das eine Übertragung beabsichtigt ist, sondern die Übertragung direkt startet. Bei der Übertragung wird ständig geprüft, ob es zu einer Kollision gekommen ist. Ist dies der Fall, so wird die Übertragung abgebrochen und nach einer zufälligen Wartezeit erneut gestartet. Dieses Verfahren findet vor allem bei kabelgebundenen Übertragungssystemen wie Ethernet Verwendung.



Bild 3.4: Virtual Carrier Sense Verfahren WLAN

wiederholt. Es gibt jedoch nur eine endliche Anzahl an Wiederholungen, die in den Headern des Datenpakets festgelegt sind. Falls bei der vorbereitenden Prüfung zur Kommunikation das Übertragungsmedium nicht frei ist, so wird die Übertragung um eine zufällige Zeit verschoben und zum späteren Zeitpunkt wird erneut geprüft, ob das Übertragungsmedium für einen Sendevorgang frei ist.

Es kann jedoch vorkommen, dass ein Knoten nicht alle Knoten im Netzwerk erreichen kann, so wie dies in Bild 3.4 dargestellt ist. In diesem Bild ist ein Netzwerk zu sehen, dass aus vier Knoten besteht und in dem jeder Knoten eine bestimmte Reichweite hat. Knoten 1 kann den Sender einer Nachricht erreichen, der Sender kann sowohl Knoten 1 als auch den Empfänger erreichen, der Empfänger erreicht den Sender und Knoten 2 und Knoten 2 besitzt ausschließlich eine Verbindung zum Empfänger. Dies bedeutet, dass Knoten, die nicht mitbekommen, dass ein Sendevorgang zwischen Sender und Empfänger gestartet wird und gegebenenfalls ihren Sendevorgang zur gleichen Zeit ebenfalls starten, zwangsläufig eine Kollision der beiden Paketübertragungen auslösen würden.

Um dies zu verhindern, wird das Verfahren Virtual Carrier Sense genutzt. Bei diesem Verfahren sendet zunächst der Sender-Knoten, wie in Bild 3.4 dargestellt, ein RTS (request to send) aus. Dieses Paket erhalten alle Knoten, die in Reichweite der Quelle sind, also Knoten 1 und der Empfänger. Daraufhin antwortet der Empfänger mit einem CTS (clear to send), welches sowohl der Sender als auch Knoten 2 erhalten. In diesen Paketen wird die Information über den Sender, den Zielknoten (Senke) für die Sendung und die Dauer (NAV, network allocation vector) übertragen, welche sowohl für den Sendevorgang des Paketes als auch des ACKs benötigt wird. Alle nicht in den anstehenden Übertragungsvorgang involvierten Knoten, die entweder RTS und/oder CTS erhalten, warten mit dem Senden eigener Pakete bis die im CTS bzw. RTS übermittelte Zeitdauer abgelaufen ist. RTS und CTS Pakete sind nur dann sinnvoll, wenn der Inhalt der zu übermittelnden Pakete deutlich größer als RTS und CTS ist und somit eine deutlich schnellere Erkennung von Kollisionen möglich wird, als wenn ein vollständiges Paket versendet werden würde. Es ist



Bild 3.5: Kontrollierter Medienzugang mit RTS und CTS [42]

zu beachten, dass RTS Pakete eine Länge von 20 Bytes und sowohl CTS- als auch ACK-Pakete eine Länge von 14 Bytes besitzen.

Der Vorteil des soeben vorgestellten Verfahrens ist, dass dadurch Kollisionen schon früh erkannt und Kollisionen im drahtlosen Netzwerk deutlich verringert werden können. Der zeitliche Ablauf des soeben beschriebenen Verfahrens ist nochmals in Bild 3.5 veranschaulicht. Unter "Andere Stationen" sind in diesem Bild Knoten 1 und Knoten 2 zu verstehen. Die Zeiten DIFS (distributed inter frame space) sind die Zeiten, für die ein Übertragungsmedium frei sein muss, bevor mit der Übermittlung eines Paketes begonnen werden kann und SIFS (short inter frame space) trennt zwei Sendeaktionen bei einem Übertragungsrichtungswechsel voneinander.

Nach den in den vorangegangenen Absätzen beschriebenen Übertragungsverfahren in WLAN-Netzen wird nun kurz auf die einzelnen nach IEEE 802.11 definierten Übertragungsrahmen von WLAN eingegangen. Generell werden Pakete in Daten-, Steuer- und Managementrahmen unterteilt. Zu Steuerrahmen zählen beispielsweise die weiter oben aufgeführten RTS, CTS und ACK Pakete. Der grundlegende Rahmen eines IEEE 802.11 Datenpakets sowohl für die Bitübertragungsschicht als auch den MAC-Layer ist in Bild 3.6 dargestellt.

Auf physikalischer Ebene besitzt ein Paket eine Präambel, welche ein SYNC-Feld besitzt, das zur Übertragungssynchronisation dient. Darüber hinaus ist ein SFD-Feld (start frame delimiter) vorhanden, das für ein korrektes Timing des zu übertragenden Rahmens sorgt. Im PLCP-Headerfeld (physical layer convergence protocol) werden über das Feld PLCP\_PDM Informationen für die Bitübertragungsschicht, wie z.B. die Rahmenlänge eines Pakets, übermittelt. Das PLCP-Signaling Feld gibt die Datenrate in 0,5 Mbit/s Schritten an, mit der eine Übertragung durchgeführt wird. Schließlich können mittels des CRC-Felds Übertragungsfehler erkannt werden.

In der zweiten Schicht, dem Data-Link-Layer, werden alle Informationen zur Verfügung gestellt, die für die Übertragung in einem Adhoc- oder Access-Point-basierten WLAN notwendig sind. Insbesondere für ein Access-Point-basiertes WLAN, welches mehrere Access-Points umfasst und das über ein Backbone LAN oder WLAN betrieben wird, sind zusätzliche Adressfelder notwendig. Aus diesem Grund umfasst der Header auf Ebene des Data-Link-Layers insgesamt vier Adressfelder, deren Funktionsweise [42] entnommen werden können. Weiterhin existiert ein Frame Control,  $Bit \ddot{u} bertragungsschicht:$ 

10 By	tes								
Pream	ble	PLCP-	Header						
SYNC	SFD	PLCP_PDM	PLCP CI	RC	MAC-Frame				
Data-Link Layer:									
$2\mathrm{Bytes}$	2 Byte	es 6 Bytes	$6\mathrm{Bytes}$	$6\mathrm{Bytes}$	$2\mathrm{Bytes}$	$6\mathrm{Bytes}$	0 - 2312 Bytes	$4\mathrm{Bytes}$	
Frame Control	Destin tion I	a- Address D 1	Address 2	Address 3	Sequence Control	Address 4	Frame Body	FCS	

Bild 3.6: Paketstruktur eines IEEE 802.11 Paketes

Destination ID, Sequence Control und ein FCS (frame check sequence) Feld sowie das Feld für die Daten, welche von der Netzwerkschicht zur Übermittlung zur Verfügung gestellt werden.

Die in diesem Abschnitt dargestellte Beschreibung von WLAN dient als Grundlage für alle anderen betrachteten drahtlosen Netzwerkprotokolle. Darüber hinaus ist WLAN durch seine weite Verbreitung eines der wichtigsten Protokolle sowohl für den Heim- als auch im industriellen Einsatz. Mit Veröffentlichung des Standards IEEE 802.11s 2007 ist es zudem möglich, mit WLAN ein Mesh-Netzwerk aufzubauen. Dadurch sind auf den einzelnen Knoten im Netzwerk Routing Algorithmen notwendig, die Pakete von einem Gerät zum anderen weiterleiten können. Hierdurch ist es ebenfalls möglich, die Reichweite eines BSS deutlich zu erhöhen. Der praktische Einsatz wurde in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet, da ein auf WLAN basierendes Funkmodul aufgrund seines relativ hohen Energieverbrauchs für ein batteriebetriebenes Sensornetzwerk keine große Relevanz hatte.

Derzeit wird jedoch am WLAN-Standard IEEE 802.11ah gearbeitet, der speziell für Sensornetzwerke geeignet sein soll. Der Betrieb des ihm zugrundeliegenden WLANs soll im 900 MHz Frequenzbereich stattfinden und zudem wird aufgrund einer geringen zur Verfügung stehenden Übertragungsbandbreite auf Energiesparsamkeit geachtet. Eine größere Effizienz soll außerdem erreicht werden, indem Headerlängen und damit die zu übertragenden Daten zur Übermittlung eines Paketes reduziert werden.

Jedoch gibt es auch bei jetzigen Standards die Möglichkeit, Teilnehmer in einen Schlafmodus zu versetzen. Dies wird heute hauptsächlich für mobile Anwendungen wie beispielsweise WLAN im Smartphone umgesetzt, bei dem Energie eine knappe Ressource darstellt. Allerdings kommt mit dieser Methode der Energieverbrauch nicht an Bluetooth Low Energy oder Protokolle heran, welche den Funkstandard IEEE 802.15.4 nutzen.

WLAN stellt auch eine Funktion PCF (point coordination function) zur Verfügung, mittels derer zeitkritische Dienste, wie beispielsweise Sprachdienste oder Voice over IP betrieben werden können. Durch diese Funktion werden Pakete mit einer hohen Priorität versehen und bevorzugt behandelt. In diesem Fall stellt jedoch der Access Point eines BSS sicher, dass trotz der Übermittlung von Paketen mit hoher Priorität der Datenverkehr mit niedriger Priorität nicht zum Erliegen kommt. Diese Funktion kann ebenfalls zum Betrieb eines geschlossenen Regelkreises mit WLAN als Übertragungsprotokoll für Messwerte oder Stellgrößen genutzt werden.

Generell ist WLAN für den Betrieb im geschlossenen Regelkreis geeignet, wie am Beispiel eines inversen Pendels in [71] gezeigt wurde, dessen Zeitkonstanten im Millisekunden-Bereich liegen. Allerdings ergab sich in dieser Arbeit auch das Resultat, dass Interferenzen mit anderen existierenden WLAN-Netzwerken starken Einfluss auf die Übertragung von Messwerten und somit die Übertragungsgeschwindigkeit haben. Während der Übertragungsvorgänge kommt es zu Interferenzen mit anderen Netzwerken, die sich im gleichen Frequenzband befinden. Dadurch waren die Auswirkungen beim Parallelbetrieb zweier oder mehrerer WLAN-Netzwerke auf die Regelgüte sehr deutlich wahrzunehmen.

### 3.6.2 IEEE 802.15.1 - Standard für Personal Area Networks (PANs)

Der IEEE 802.15.1 Standard [39] aus dem Jahr 2005 beschreibt die unteren Layer und die Funktionsweise des Bluetooth Protokolls, welche in diesem Abschnitt in stark verkürzter Form zusammengefasst werden sollen. IEEE 802.15.1 nutzt zur Funkübertragung grundlegend das in Abschnitt 3.5 beschriebene Frequenzsprungverfahren (FHSS) in Kombination mit dem Time-Division Duplex (TDD) Verfahren. Bei diesem Verfahren findet eine periodische Umschaltung der Übertragungsfrequenzen statt. Allerdings nutzen die aufeinanderfolgenden und zusammengehörenden Downlink- und Uplink-Übertragungen die gleiche Übertragungsfrequenz. Unter Downlink-Übertragung ist in diesem Zusammenhang die Übermittlung von Daten vom Master zum Slave und unter Uplink-Übertragung vom Slave zum Master zu verstehen. Dieser Zusammenhang ist auch in Bild 3.7 veranschaulicht.

Ein IEEE 802.15.1 Paket besitzt die in Bild 3.8 dargestellte Struktur [39, S. 53, S. 81 und S. 85]. Es besteht aus einem Feld mit einem Access Code, einem Header und dem eigentlichen Payload. Der Accesscode ist genau dann 68 bits groß, wenn es sich um ein Synchronisierungs-, Paging-, Inquiry- oder Park-Paket handelt. Für alle Pakete, die zur Datenübermittlung genutzt werden,



Bild 3.7: Slot- und Zeitverhalten in einem Bluetooth-Netzwerk [39, S. 68]

]	Bitübertragungsso	chicht:						
	LSB 68/72 Bits	$54\mathrm{Bits}$				0 - 274	5 Bits	MSB
	Access Code	Header						
	Data-Link Layer:							
	Dies	e Felder wiede	rholen s	sich 3 Mal				
		$3\cdot 18\mathrm{Bits}$	$= 54 \operatorname{Bi}$	$^{ m ts}$				
Ì	$3\mathrm{Bits}$	$4\mathrm{Bits}$		$1\mathrm{Bit}$	$1\mathrm{Bit}$	$1\mathrm{Bit}$	$8\mathrm{Bits}$	
	Logical Trans- port Address	Type Coo	le	Flow Control	Acknowl- edge Indication	Sequence Number	Header Error Check	

Bild 3.8: Struktur eines IEEE 802.15.1 Pakets

beträgt die Länge des Access Codes 72 bits. Der Access Code untergliedert sich wiederum in die Präambel und das Sync Word, welches zur Zeitsynchronisation im IEEE 802.15.1 Netzwerk genutzt wird. Alle Pakete, die den gleichen Funkkanal nutzen, besitzen den gleichen Access Code.

Der Paket-Header beinhaltet sechs Felder, von denen das erste für die logische Transport Adresse genutzt wird. Das zweite Feld enthält einen Typ-Code, welcher angibt, um welche Art von Paket es sich bei dem zu übertragenden Paket handelt. Hierbei wird zwischen SCO (synchronous connection-oriented)-, eSCO (extended synchronous connection-oriented)- und ACL (asynchronous connection-oriented)-Paketen unterschieden. Außerdem enthält dieses Feld eine Angabe dazu, wie viele Slots zur Übertragung genutzt werden sollen. Weiterhin umfasst der Header ein Feld zur Flusskontrolle, ein Feld, das angibt, ob ein Acknowledgement bei erfolgreichem Empfang des Paketes gesendet werden soll und ein Feld, mit dem eine Unterstützung beim Sortieren von Paketen ermöglicht werden soll. Schließlich verfügt der Header noch über einen acht Bit großen Datenbereich zur Prüfung der Paketintegrität. Die soeben beschriebenen Felder wiederholen sich im Header eines Bluetooth-Paketes insgesamt drei Mal. Hierdurch ist es möglich, aus der Übertragung resultierende Fehler abzufangen.

Der Austausch von Daten wird in IEEE 802.15.1 Netzen in Slots aufgeteilt. Ein Slot umfasst eine Länge von 625 µs. In diesem Slot ist entweder ein Sende- oder ein Lesevorgang möglich, weiter oben auch mit Uplink- oder Downlink-Vorgang bezeichnet. Da für einen Übertragungsvorgang aus Sicht des Masters mindestens ein Sende- und ein Lesevorgang notwendig ist, werden für einen Übertragungsvorgang mindestens zwei Slots aneinandergereiht. Die Kombination aus einem Sende- und einem Lesevorgang wird im Weiteren als Kommunikationsfenster bezeichnet. Somit beträgt die Länge eines Kommunikationsfensters mindestens 1,25 ms oder ein Vielfaches davon.

Ein Beispiel zur Veranschaulichung des Kommunikationsablaufs in BLE-Netzwerken ist Bild 3.7 zu entnehmen. Der erste Teil eines verbindungsorientierten Kommunikationsvorgangs findet immer vom Master zum Slave statt. In diesem können entweder Daten übermittelt oder Anfragen nach neuen Daten an das Slave gestellt werden. Dieser Übertragungsvorgang zwischen Master und Slave beginnt im Beispiel aus Bild 3.7 zu den Slot-Nummern k, k + 2 und k + 6. Generell startet ein Sendevorgang vom Master zum Slave immer zu geradzahligen Slot-Nummern. Sind die zu übertragenden Datenmengen größer, als ein Slot, so kann der Übertragungsvorgang zwischen Master und Slave mehrere Slots umfassen. Dabei muss es sich jedoch immer um eine ungerade Anzahl an Slots  $n_{\text{Slots,Master}}$  handeln, wie z.B.  $n_{\text{Slots,Master}} = 1, 3, 5, \dots, 2 \cdot i + 1$  mit  $i \in \mathbb{N}$ .

Nach einer Anfrage bzw. Datenübermittlung vom Master antwortet ein Slave entweder mit vorhandenen zu sendenden Daten oder mit einem ACK, falls der Master zuvor Daten an das Slave übertragen hatte. Der letzte Slot eines Übertragungsvorgangs wird immer dazu genutzt, dass das Slave-Gerät eine Bestätigung oder Daten an den Master übermittelt. Dies findet im Beispiel aus Bild 3.7 zu den Zeitpunkten k + 1, k + 5 oder k + 11 statt. Ist die zu übertragende Datenmenge größer als ein Slot, so kann die Übertragungsdauer aus einer ungeraden Anzahl von Slots  $n_{\text{Slots,Slave}} = 1, 3, 5, \dots, 2 \cdot i + 1$  mit  $i \in \mathbb{N}$  bestehen, wie dies im Beispiel für  $f_{k+6}$  im Zeitraum von k + 11 bis k + 13 veranschaulicht wird.

Wird Bluetooth mit festen Verbindungen zwischen Master und Slave betrieben, so ist es möglich von einem Master zu einem Slave periodisch Daten zu übertragen. Hierfür wird bei der Implementierung einer Bluetooth-Anwendung das Verbindungsintervall definiert. Das Verbindungsintervall dient im Kontext von Bluetooth als Information für den Master, in welchen festen zeitlichen Abständen er mit einem Slave kommunizieren und somit die Übertragung von Daten ermöglichen soll. Zu jedem Zeitpunkt ist eine Übertragung nur zwischen zwei Knoten möglich. Sollen zwischen unterschiedlichen Slaves und dem Master Übertragungen stattfinden, so ist zwischen diesen Knoten zu multiplexen.

#### 3.6.3 IEEE 802.15.4 - Standard für Netzwerke mit niedrigen Datenraten

Bei diesem IEEE-Standard werden ebenfalls die beiden unteren Schichten des OSI-Modells definiert. Alle wichtigen Informationen sind dem Hauptdokument [36] zum Standard zu entnehmen. Ergänzungsdokumente sind IEEE 802.15.4n [37], welche sich auf der Ebene der physikalischen Schicht mit der Nutzung der Frequenzbänder 174-216 MHz, 407-425 MHz und 608-630 MHz auseinandersetzen, die in China zur Übertragung von medizinischen Informationen dienen. Darüber hinaus gibt es mit IEEE 802.15.4q [38] ein Ergänzungsdokument für die Nutzung einer Ultra-Low Power physikalischen Schicht. In diesem Abschnitt werden nur die für diese Arbeit notwendigen Informationen aufgeführt.

Für Europa sind die beiden in [36] definierten Frequenzbänder 868 - 868,6 MHz mit einem Funkkanal der Kanalnummer 0 und das 2,4 GHz Band mit 16 Kanälen mit den Bezeichnungen 11 bis 26 von Bedeutung. Im 868 MHz Band sind Bruttoübertragungsraten von bis zu 20 kbits s<sup>-1</sup> möglich, wohingegen im 2,4 GHz Band bis zu 250 kbits s<sup>-1</sup> bei Nutzung aller 16 zur Verfügung stehenden Kanälen erreicht werden können. Zur Übertragung von Nachrichten wird zunächst das für WLAN bereits beschriebene CSMA/CA-Verfahren zur Vermeidung von Kollisionen genutzt. Dies geschieht dadurch, dass ein Sender vor dem Sendevorgang auf einem zur Übertragung beabsichtigten Kanal überprüft, ob dieser frei ist und bei positivem Ergebnis die Übertragung der Nachricht startet.

Ausgehend vom IEEE 802.15.4 Standard ist es grundsätzlich möglich, Stern- oder Peer-to-Peer-Topologien aufzubauen. Peer-to-Peer-Topologien bestehen grundsätzlich aus mehreren einzelnen

$6\mathrm{By}$	ytes	$1\mathrm{Byte}$									
Synchro Header SYNC	SFD	PHY heade (PHR) Frame Length	er	PHY payload (PSDU)							
Data-Link Layer:											
2 Bytes	$1\mathrm{Byte}$	$0/2\mathrm{Bytes}$	0/2/8 Bytes	$0/2\mathrm{Bytes}$	0/2/8 Bytes	variable	vari	able	0 - 2312 Byte	es 4 Bytes	
Frame Control	Sequence number	Destination PAN identifier	Destination address	Source PAN identifier	Source address	Auxiliary Security Header	IE		Frame Body	FCS	
			Addressi	ng fields		Header	Header IEs	Payload IEs			
			MHR					Payload		MFR	
l I											
Bit: 0-2	Bit: 3	Bit: 4	Bit: 5	Bit: 6	Bit: 7	Bit: 8	Bit: 9	Bit: 10-11	Bit: 12-13	Bit: 14-15	
Frame type	Security enabled	Frame pending	ACK request	Intra- PAN	Reserved	Sequence Number Suppression	IE Present	Dest. Addressing mode	Frame Version	Source. Addressing mode	

Bitübertragungsschicht:

Bild 3.9: Struktur eines IEEE 802.15.4 auf PHY- und MAC-Ebene

Punkt-zu-Punktverbindungen (siehe Bild 3.2a) zwischen in direkter Verbindung stehenden Knoten. Mehrere Punkt-zu-Punktverbindungen, die zu einem Knoten führen, formieren eine Sterntopologie (siehe Bild 3.2b). Die Astknoten einer Sterntopologie können wiederum Angehörige einer weiteren Sterntopologie sein. Diese Struktur führt dann auf eine Peer-to-Peer-Topologie. Wichtig ist jedoch, dass bei einer Peer-to-Peer-Topologie nur die Knoten miteinander kommunizieren können, die in einer direkten Funkverbindung stehen.

Ein Routing ist in den vom IEEE 802.15.4 Standard definierten Schichten nicht vorgesehen und muss von den Protokollen behandelt werden, die auf dem IEEE 802.15.4 Standard aufbauen und somit die über der Sicherungsschicht liegenden Schichten definieren. Die Ziele dieses Standards sind es, eine möglichst energieverbrauchsarme Kommunikation im Gegensatz zu WLAN oder dem klassischen Bluetooth zu gewährleisten und eine möglichst einfache Kommunikation zu ermöglichen. Dadurch eignet er sich hervorragend für Sensornetzwerke, deren Sensoren batteriebetrieben sind. Im Netzwerk können Geräte mit eingeschränktem Funktionsumfang (RFD, reduced function devices) und Knoten mit vollem Funktionsumfang (FFD, full function devices) eingesetzt werden. Dies ermöglicht den energieeffizienten Betrieb von ausgewählten Knoten. Ein Gerät mit FFD im Netzwerk hat immer die Aufgabe des PAN-Koordinators und legt ebenfalls die Netzwerkkennung fest, über die ein Netzwerk von anderen Netzwerken abgegrenzt werden kann.

Die Header- bzw. Paketstrukturen der unteren beiden Protokoll-Layer eines IEEE 802.15.4 Paketes sind in Bild 3.9 zu sehen. Ein IEEE 802.15.4 Paket besteht aus dem Synchronisationsheader (SHR), welcher dazu dient, zwei oder mehrere Knoten in einem Netzwerk zeitlich zu synchronisieren. Daraufhin folgt der PHY-Header, welcher die Frame-Länge beinhaltet. Es folgt der PHY-Payload (PSDU), welcher die Daten aus dem Data-Link Layer aufnimmt. Die Ebene der Sicherungsschicht umfasst ebenfalls einen Header mit einer Vielzahl von Informationen, wie ein Frame Control Feld, eine Sequenznummer, ein Ziel- und Sendenetzwerksidentifikationsfeld sowie die Ziel- und Sendeadresse, die eine Länge von 0, 2 oder 8 Bytes haben kann. Zusätzlich ist ein Feld bezüglich der bei der Übertragung genutzten Sicherheitsmethoden vorhanden, ein Information Element (IE) Feld<sup>2</sup>, sowie das eigentliche Datenfeld "Frame Body", welches einen Payload von 0 bis 2312 Bytes aus höheren Netzwerkschichten aufnehmen kann. Zur Sicherstellung der fehlerfreien Übertragung hat die Datenübertragungsschicht am Ende ein Feld mit einer Prüfsumme (FCS).

# 3.7 Funkprotokolle

Auf die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Standards bauen die nachfolgend verwendeten Übertragungsprotokolle WirelessHART, Bluetooth sowie ein eigenes auf dem MAC-Layer basierendes und in dieser Arbeit neu entworfenes Protokoll auf.

### 3.7.1 WirelessHART

WirelessHART wurde von der HART Communication Foundation als Erweiterung des seit Ende der 80er Jahren verbreiteten drahtgebundenem HART Protokolls [24] eingeführt. Im Jahr 2007 wurde es durch die HART Spezifikation 7.0 spezifiziert, welche auch WirelessHART als Übertragungsprotokoll umfasst. Grundsätzlich ist WirelessHART zu HART kompatibel, wurde jedoch um eine große Zahl von Kommandos zur Organisation und Verwaltung des drahtlosen Netzwerks erweitert. Von WirelessHART werden die im vorangegangenen Abschnitt 3.3 beschriebenen Feldgeräte, Adapter, Router, Handhelds, Accesspoints (AP) und Gateways (GW) unterstützt. Darüber hinaus besitzt jeder einzelne Teilnehmer eines WirelessHART-Netzwerks eine Routing Funktion.

Der Aufbau des WirelessHART-Protokolls orientiert sich nach [63] am in Abschnitt 3.4 beschriebenen OSI-Modell. Ein wichtiges Merkmal von WirelessHART ist hierbei, dass sich die Sicherungsschicht in die Unterschichten MAC-Sublayer und Logical Link Control untergliedert. Darüber hinaus wird die Vermittlungsschicht nochmals in die eigentliche Vermittlungsschicht und die Services der Vermittlungsschicht unterteilt. Sowohl die Sitzungsschicht als auch die Darstellungsschicht sind bei WirelessHART nicht definiert.

Die Bitübertragungsschicht von WirelessHART entspricht dem in Abschnitt 3.6.3 beschriebenen IEEE 802.15.4-2015 Standard [36]. WirelessHART nutzt 15 von 16 zur Verfügung stehenden Kanäle im lizenzfreien 2,4 GHz Frequenzband. Der 16-te Kanal ist nicht in allen Ländern, wie z.B. Japan verfügbar. Die Kanäle sind mit den Nummern 11 bis 25 durchnummeriert und die Kanalbreite beträgt 2 MHz mit einem Kanalabstand von 5 MHz. Es können somit bis zu 15 Gerätepaare gleichzeitig auf jeweils unterschiedlichen Kanälen kommunizieren, ohne sich gegenseitig

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Das Information Element (IE) ermöglicht es ebenfalls Payload zu übertragen. Hierzu muss das Bit "IE Present" im "Frame Control" Feld gesetzt werden. Strukturen für das IE sind im IEEE 802.15.4 Funkstandard definiert, wie beispielsweise das "Channel Information Query IE" [36, S. 215] oder das "Vendor Specific Nested IE" [36, S. 221].

zu beeinflussen. Zur Datenübermittlung wird die in Abschnitt 3.5 vorgestellte Kombination aus Frequenzspreizverfahren (DSSS) und Frequenzsprungverfahren (FHSS) genutzt. Hiermit wird die Störanfälligkeit bei der Übertragung reduziert.

#### Netzwerkstruktur eines WirelessHART-Netzwerks

Das zentrale Element eines WirelessHART Netzwerks bildet das Gateway, welches mit einem Netzwerkmanager und einem Sicherheitsmanager verbunden ist. Netzwerk- und Sicherheitsmanager können eigenständige Rechner oder direkt in das Gateway integriert sein. Bei kommerziellen Produkten sind beide Einheiten sowie Accesspoints im Gateway vereint. Die Aufgabe des Netzwerkmanagers ist es, die Organisation des gesamten Netzwerks zu übernehmen und somit benötigt er die Kenntnis über die gesamte Netzwerktopologie.

WirelessHART-Netzwerke mit mehr als zwei Knoten besitzen meist einen Netzwerkgraphen  $G(V_G, E_G)$ , der die Struktur einer unvollständig vermaschten Topologie aus Bild 3.2e annimmt. Bei kleineren und räumlich begrenzten Netzwerken kann jedoch auch die vollständig vermaschte Topologie aus Bild 3.2d oder bei ungünstiger Konfiguration des Netzwerks die Mischform aus Maschen und Baumstruktur nach Bild 3.2f auftreten. Die Topologie wird dem Netzwerkmanager dadurch bekannt, dass sich jeder einzelne Knoten im Netzwerk bei ihm, im sogenannten Joining-Prozess anmelden muss. Hierzu muss ein Knoten der richtigen 32-Bit Netzwerk ID zugeordnet sein und den richtigen 256 Bit langen Join-Key besitzen.

Bei Überprüfung der Join-Daten erhält der Netzwerkmanager vom Sicherheitsmanager Unterstützung bei der Authentifizierung eines neuen Netzwerkteilnehmers, welcher der Generierung und Aufbewahrung von Keys dient. Erst nach erfolgreichem Join-Prozess kann ein Netzwerkteilnehmer an der Kommunikation im WirelessHART-Netzwerk teilhaben und je nach Netzwerkkonfiguration unverschlüsselt oder mittels einer 128 Bit AES Verschlüsselung kommunizieren.

Dem Netzwerkmanager ist die komplette Struktur des Netzwerks bekannt, indem er von jedem einzelnen Knoten des Netzwerks Informationen über die Signalqualität zu jedem erreichbaren Nachbarknoten übermittelt bekommt. Mit Hilfe dieser Informationen werden die für die Datenübertragung im Netzwerk notwendigen Graphen, der Broadcast-Graph  $G_B(V_B, E_B)$ , der Uplink-Graph  $G_U(V_U, E_U)$  und zu jedem einzelnen Knoten *i* mit i = 1, ..., n eines Netzwerks der Downlink-Graph  $G_{D,i}(V_{D,i}, E_{D,i})$  bestimmt. Die Struktur und Leistungsfähigkeit der Graphen hängt alleine von dem im Netzwerkmanager implementierten Algorithmus zur Berechnung der Graphen ab.

Falls auf geplanten Übertragungspfaden Fehler auftreten, so erfährt dies der Netzwerkmanager mittels Health Reports, die von jedem Netzwerkteilnehmer in regelmäßigen Abständen versendet werden. Hierdurch können auch Geräteausfälle erkannt und die Netzwerkgraphen entsprechend angepasst oder gegebenenfalls für Übertragungsfehler anfällige Funkkanäle durch ein sogenanntes Blacklisting für weitere Übertragungsplanungen gesperrt werden. Beim Ausfall einer Verbindung würde eine gewisse Zeit vergehen bis ein neuer Übertragungspfad in Form eines Graphen fest-gelegt wäre, wenn Uplink- und Downlink-Graphen nur einen einzigen Übertragungsweg bereit-

stellen würden. Für den Einsatz im Regelkreis würde dies einen kompletten Informationsverlust bedeuten bis das Netzwerk reorganisiert wäre.

Aus diesem Grund werden in Implementierungen wie in [29] immer zwei mögliche Wege eingeplant und auch genutzt. Für die erste Übertragung wird Pfad 1 genutzt und für die darauffolgende Pfad 2 und schließlich wieder Pfad 1. Für jeden Übertragungsvorgang findet somit ein Wechsel zwischen den beiden Pfaden statt. Dadurch ist sichergestellt, dass beim Ausfall eines Knotens oder einer räumlich begrenzten Kommunikationsstörung jedes zweite Paket am Ziel eintreffen kann. Dies wird erreicht, indem jeder Knoten im Netzwerk zwei gerichtete Verbindungen zu weiteren Knoten besitzt. Falls es während der Übertragung zu einer Störung kommen sollte, wird die Alternativroute, ausgehend vom sendenden Knoten, gewählt.

Störungen im Netzwerk können durch ein Acknowledgement des Empfängers eines Sendevorgangs zwischen zwei direkt benachbarten Knoten erkannt werden. Das Ackknowledgement zum Sender wird am Ende eines jeden 10 ms-Timeslots übermittelt. Wird dieses ACK nicht empfangen, so verwendet der Sendeknoten seine Alternativroute im Netzwerk. Ausfälle aus globaler Sicht können durch ein Ausbleiben des auf ein Request-Paket folgenden Response-Pakets oder durch die Health-Berichte der einzelnen Netzwerkknoten erkannt werden.

Im Folgenden werden anhand eines Beispielnetzwerks die Graphen in einem WirelessHART-Netzwerk veranschaulicht. Den erstellten Graphen liegt der Algorithmus aus [29] und die Implementierung aus [85, 86] zugrunde. Von der in Bild 3.10a dargestellten Topologie ist nach vollständiger Inbetriebnahme eines jeden Netzwerkteilnehmers bekannt, welcher Knoten mit welchem Knoten in Verbindung steht. Daraus erhält der Netzwerkmanager seinen unvollständig vermaschten Netzwerkgraphen  $G_G(V_G, E_G)$  mit den Einträgen

$$V_{\rm G} = \{v_{\rm GW}, v_{\rm AP1}, v_{\rm AP2}, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}\}$$
(3.2)  

$$E_{\rm G} = \{e_{\rm GW,AP1}, e_{\rm GW,AP2}, e_{\rm AP1,GW}, e_{\rm AP1,AP2}, e_{\rm AP1,1}, e_{\rm AP2,GW}, e_{\rm AP2,1}, e_{\rm AP2,AP1}, e_{\rm AP1,2}, e_{\rm AP2,2}, e_{\rm AP1,3}, e_{\rm AP2,3}, e_{\rm AP1,6}, e_{\rm AP2,6}, e_{1,\rm AP1}, e_{1,\rm AP2}, e_{1,3}, e_{2,\rm AP1}, e_{2,3}, e_{2,4}, e_{2,5}, e_{2,6}, e_{2,8}, e_{2,10}, e_{3,1}, e_{3,\rm AP1}, e_{3,\rm AP2}, e_{3,2}, e_{3,4}, e_{3,6}, e_{3,8}, e_{3,9}, e_{4,2}, e_{4,3}, e_{4,5}, e_{4,7}, e_{4,8}, e_{4,9}, e_{5,2}, e_{5,4}, e_{5,7}, e_{5,8}, e_{5,9}, e_{6,\rm AP1}, e_{6,\rm AP2}, e_{6,2}, e_{6,3}, e_{6,8}, e_{6,10}, e_{7,4}, e_{7,5}, e_{7,9}, e_{8,2}, e_{8,3}, e_{8,4}, e_{8,5}, e_{8,6}, e_{8,10}, e_{9,3}, e_{9,4}, e_{9,5}, e_{9,7}, e_{10,2}, e_{10,6}, e_{10,8}\}$$

Auf Grundlage dieses Graphen wird mit den Algorithmen aus [85, 86] schließlich der Uplink-Graph  $G_{\rm U}(V_{\rm U}, E_{\rm U})$  zu

$$V_{\rm U} = \{ v_{\rm GW}, v_{\rm AP,1}, v_{\rm AP,2}, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10} \}$$
(3.4)

$$E_{\rm U} = \{e_{\rm AP1,GW}, e_{\rm AP2,GW}, e_{1,\rm AP1}, e_{1,\rm AP2}, e_{2,\rm AP1}, e_{2,3}, e_{3,\rm AP1}, e_{3,\rm AP2}, e_{4,2}, e_{4,3}, e_{5,2}, e_{5,8}, e_{6,\rm AP1}, e_{6,\rm AP2}, e_{7,4}, e_{7,9}, e_{8,3}, e_{8,6}, e_{9,3}, e_{9,4}, e_{10,2}, e_{10,6}\}$$
(3.5)

bestimmt, der in Bild 3.10b zu sehen ist. Werden die Kanten des Uplink-Graphen invertiert, so ergibt sich der Broadcast-Graph  $G_{\rm B}(V_{\rm B}, E_{\rm B})$  mit

$$V_{\rm B} = \{ v_{\rm GW}, v_{\rm AP,1}, v_{\rm AP,2}, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10} \}$$
(3.6)


Bild 3.10: (a) Netzwerk-Graph, (b) Uplink-Graph (c) Downlink-Graph zu Knoten D9

$$E_{\rm B} = \{e_{\rm AP1,GW}, e_{\rm AP1,1}, e_{\rm AP2,1}, e_{\rm AP1,2}, e_{3,2}, e_{\rm AP1,3}, e_{\rm AP2,3}, e_{2,4}, e_{3,4}, e_{2,5}, e_{3,5}, e_{\rm AP1,6}, e_{\rm AP2,6}, e_{4,7}, e_{5,7}, e_{3,8}, e_{6,8}, e_{3,9}, e_{4,9}, e_{2,10}, e_{6,10}\}$$
(3.7)

der die gleiche Kantenstruktur aufweist, wie in Bild 3.10b dargestellt. Schließlich sind noch die Downlink-Graphen  $G_{D,i}(V_{D,i}, E_{D,i})$  zu jedem einzelnen Knoten als Empfänger im Netzwerk zu bestimmen. Für ein Netzwerk bestehend aus *n*-Knoten, wobei einer der Knoten das Gateway ist, müssen genau n - 1 Downlink-Graphen erzeugt werden. Ein Beispiel für den i = 9-ten Knoten mit

$$V_{\rm D,9} = \{v_{\rm GW}, v_{\rm AP,1}, v_2, v_3, v_4, v_9\}$$
(3.8)

$$E_{D,9} = \{e_{GW,AP1}, e_{AP1,3}, e_{AP1,2}, e_{2,3}, e_{2,4}, e_{3,4}, e_{3,9}, e_{4,3}, e_{4,9}\}.$$
(3.9)

ist in Bild 3.10c zu sehen.

#### Scheduling im WirelessHART-Netzwerk

Im Zusammenhang mit dem Scheduling soll zunächst der im Weiteren häufig genutzte Begriff Burst eingeführt werden. Unter einem Burst wird im Kontext von Funkprotokollen (insbesondere in Bezug auf das WirelessHART-Protokoll) das Versenden von Messwerten bzw. Daten eines Gerätes in gleichmäßigen zeitlichen Abständen verstanden, ohne das Daten vom Empfänger ausdrücklich angefordert werden müssen [22, S. 11]. Die Bursteinstellungen des WirelessHART-Adapters aus Bild 2.6a können beispielsweise derart festgelegt werden, das ausgewählte Geräteparameter als Burst-Nachricht in konfigurierbaren Burst-Zeitintervallen (Burst-Intervall) an das Gateway übermittelt werden. Bei Feldgeräten für die der Burst-Modus aktiviert ist, wird im Folgenden auch von "Das Gerät befindet sich im Burst Modus" gesprochen.

Sobald alle der weiter oben beschriebenen Graphen erzeugt sind und die einzelnen Knoten ihre Kommunikationseigenschaften, wie Bursteinstellungen, an den Netzwerkmanager übermittelt haben, wird vom Netzwerkmanager die Kommunikationsplanung durchgeführt. Für jeden Kommunikationsvorgang stehen Zeitslots zur Verfügung, die jeweils eine Länge von 10 ms haben. Außerdem stehen theoretisch 16, in der Praxis 15 Kommunikationskanäle bereit, über die somit im gleichen Zeitslot insgesamt 15 Gerätepaare kommunizieren können. Um eine reibungslose Kommunikation zu gewährleisten, ist es notwendig, dass jedem Netzwerkteilnehmer bekannt ist, zu welchem Zeitschlitz er auf welchem Kanal Daten senden bzw. empfangen soll. Für die Planung ist der Netzwerkmanager zuständig, der einen Gesamtüberblick über das Netzwerk hat.

Eine beispielhafte Planung ist in Tabelle 3.3 zu sehen. In dieser sind vertikal in der ersten Spalte eine begrenzte Menge an Timeslots aufgetragen, von denen jeder eine Zeitspanne von 10 ms in Anspruch nimmt. Horizontal in der Kopfzeile sind die von einem Kommunikationsvorgang genutzten Funkkanäle im 2,4 GHz-Frequenzband aufgelistet. In den darunterliegenden Feldern der Tabelle sind immer eine Kombination aus Sendeadresse, Linkart und Zieladresse visualisiert. Beispielsweise bedeutet (2  $\rightarrow$  permanent  $\rightarrow$  3), wie in Slot 2 auf Channel 13 dargestellt, dass Knoten 2 ein Kommunikationsvorgang zu Knoten 3 zugewiesen ist. Einen Sonderfall bildet die

	Channel 11	Channel 12	Channel 13	Channel 14	Channel 15
Slot 1	$10 \rightarrow \text{discovery} \rightarrow 252$	unused	unused	unused	unused
Slot 2	$ $ GW $\rightarrow$ broadcasting $\rightarrow$ 252	$5 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$2 \rightarrow \text{permanent} \rightarrow 3$	$9 \rightarrow \text{permanent} \rightarrow 7$	$10 \rightarrow \text{permanent} \rightarrow 6$
Slot 3	$GW \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$4 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$1 \rightarrow \text{permanent} \rightarrow \text{AP1}$	$3 \rightarrow \text{permanent} \rightarrow \text{AP2}$	$7 \rightarrow \text{permanent} \rightarrow 5$
Slot 4	$  252 \rightarrow advertising \rightarrow GW$	$252 \rightarrow advertising \rightarrow 4$	$1 \rightarrow \text{normal} \rightarrow \text{AP1}$	$2 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 3$	$8 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 6$
Slot 5	$  AP1 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$252 \rightarrow advertising \rightarrow 5$	$  AP2 \rightarrow permanent \rightarrow GW$	$3 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 1$	$4 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 2$
Slot 6	$\begin{vmatrix} 252 \rightarrow \text{advertising} \rightarrow \text{AP1} \end{vmatrix}$	$5 \rightarrow broadcasting \rightarrow 252$	$1 \rightarrow \text{normal} \rightarrow \text{AP2}$	$2 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 3$	unused
Slot 7	AP1 $\rightarrow$ broadcasting $\rightarrow$ 252	$7 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$4 \rightarrow normal \rightarrow 3$	unused	$9 \rightarrow normal \rightarrow 5$
Slot 8	$  AP2 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$252 \rightarrow advertising \rightarrow 7$	$10 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$  AP1 \rightarrow normal \rightarrow GW$	$5 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 8$
Slot 9	$\begin{vmatrix} 252 \rightarrow \text{advertising} \rightarrow \text{AP2} \end{vmatrix}$	$7 \rightarrow broadcasting \rightarrow 252$	$AP1 \rightarrow normal \rightarrow GW$	$8 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 6$	unused
Slot 10	AP2 $\rightarrow$ broadcasting $\rightarrow$ 252	$9 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	unused	$5 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 4$	unused
Slot 11	$1 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$8 \rightarrow advertising \rightarrow 252$	$AP2 \rightarrow normal \rightarrow GW$	$2 \rightarrow \text{normal} \rightarrow \text{AP1}$	$7 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 5$
Slot 12	$252 \rightarrow advertising \rightarrow 1$	$252 \rightarrow advertising \rightarrow 8$	$AP2 \rightarrow normal \rightarrow GW$	$4 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 3$	$7 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 5$
Slot 13	$1 \rightarrow \text{broadcasting} \rightarrow 252$	$252 \rightarrow advertising \rightarrow 9$	$4 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 2$	$5 \rightarrow \text{normal} \rightarrow 8$	unused

 Tabelle 3.3: Scheduling Beispiel f
 ür ein WirelessHART-Netzwerk

Nummer 252, denn sie bedeutet, dass ein Knoten entweder eine Linkart von Nachrichten beliebiger Knoten, die auf einem Kanal aktiv sind, empfangen kann (z.B. 252  $\rightarrow$  advertising  $\rightarrow$  5) oder Nachrichten einer Linkart an alle Knoten senden kann (z.B. 5  $\rightarrow$  broadcasting  $\rightarrow$  252). Diese tabellarische Darstellung wurde mittels eines selbst entwickelten Simulationstools für Algorithmen zur Graphen- und Kommunikationsplanung in MATLAB/Simulink erstellt. Für diese Simulation wurden durch den Simulator die Algorithmen<sup>3</sup> aus [29] verwendet und grafisch aufbereitet.

In jeder Zelle, die jeweils einem Timeslot und einem Kommunikationskanal zugeordnet ist, ist die im Zeitslot zu übertragende Paketart angegeben. In diesem Beispiel werden Discovery Links zur Entdeckung weiterer Netzwerkteilnehmer, Broadcast-Links zur Übermittlung einer Nachricht an jeden Netzwerkteilnehmer, Advertising Links zur Erkennung neuer Teilnehmer im Umfeld verwendet. Eine wichtige Linkart ist jedoch der Normal Link, welcher der standardmäßigen Kommunikation und somit der Nachrichtenweiterleitung im Netzwerk dient. Unter Normal Links fallen auch Burst-Vorgänge. Weiterhin existieren Permanent Links, welche zur Übertragungswiederholung und zum Verwalten des Netzwerks dienen. In allen Feldern, die mit "unused" gekennzeichnet sind, findet im entsprechenden Kanal und Slot keine Übertragung statt.

Neben den Links ist in den Zellen die Kommunikationsrichtung angegeben. Diese hier im Gesamten dargestellte Tabelle wird schließlich vom Netzwerkmanager in Teiltabellen für jeden Knoten im Netzwerk aufbereitet und diesen mittels eines Superframes zugewiesen. Dieses Superframe besteht aus einer vom Netzwerkmanager definierten Anzahl an Zeitslots. Somit ist jedem Knoten im Netzwerk zu jeder Zeit bekannt, zu welchem Zeitpunkt er aktiv sein muss. Zu Zeiten, in denen keine Kommunikation stattfindet, können Knoten in einen Tiefschlafmodus versetzt werden, was den Energieverbrauch und damit zusammenhängend die Stromaufnahme auf wenige µA reduziert.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Im ursprünglichen C++-Code des vom Simulator genutzten WirelessHART-Stacks aus [85] kam es in Einzelfällen zu fehlenden redundanten Kanten bei der Erstellung der in [29] beschriebenen Downlink-Graphen. Die Ursache lag an einem Bug bei der Implementierung, welcher in dieser Arbeit korrigiert wurde.

Solange sich die Netzwerkstruktur und die Verbindungseigenschaften zwischen den Knoten nicht verändern, ist es nicht notwendig, neue Kommunikationstabellen zu generieren und zu übermitteln. Jeder Knoten nutzt somit seine Kommunikationstabelle solange, bis eine neue vom Netzwerkmanager übermittelt wird. Dieses Planungskonzept hat den Vorteil, dass jeder Knoten fest zugewiesene Sendezeiten besitzt. Allerdings ist ein großer Nachteil, dass bei Netzwerken mit vielen Teilnehmern die zur Verfügung stehenden Slot- und Übertragungskanalressourcen recht schnell erschöpft sind. Dies ist mitunter ein Grund, weshalb Burst-Intervalle in kommerziellen Produkten (siehe Bildern 2.6a bis 2.6d) auf Minimalwerte von 100 Timeslots (entspricht einer Sekunde) begrenzt sind.

Ein großer Nachteil bei den in dieser Arbeit genutzten kommerziellen WirelessHART-Produkten ist, dass als Anwender kein Einfluss auf das Scheduling genommen werden kann. Dadurch ergibt sich keine Möglichkeit das Kommunikationsverhalten dem Anwendungszweck entsprechend zu optimieren.

#### Kommunikations- und Übertragungszeitmessung

Die Kommunikations- und Schedulingstruktur mittels Graphen und Superframes in einem WirelessHART-Netzwerk beeinträchtigt maßgeblich die Leistungsfähigkeit der Kommunikation im Netzwerk, was insbesondere in späteren Kapiteln zum Betrieb von Reglern von großer Bedeutung sein wird. Aus den zuvor zum Routing von Paketen beschriebenen Graphen, die in ähnlicher Weise auch in kommerziellen WirelessHART-Produkten eingesetzt werden, ist sehr deutlich zu sehen, dass jede Kommunikation immer von bzw. zu einem zentralen Knoten durchgeführt wird. Bei WirelessHART wird dieser Knoten mit Gateway bezeichnet. Sollen in einem WirelessHART-Netzwerk Daten oder Messwerte von einem Sensor- zu einem Empfangsknoten übermittelt werden, so liegt dem Netzwerk die in Bild 3.11 dargestellte Kommunikationsstruktur zugrunde. Anhand dieser Kommunikationsstruktur wurden zunächst Untersuchungen durchgeführt, in welchen kürzesten Intervallen Messwerte über diese Netzwerkstruktur übertragen werden können.

Bei den Untersuchungen, die in den Veröffentlichungen [92] und [93] dokumentiert sind, kamen die in Abschnitt 2.3 vorgestellten kommerziellen WirelessHART-Geräte zum Einsatz, durch die es notwendig war, einige Besonderheiten beim Versuchsaufbau zu beachten. Ein wichtiger Punkt ist, dass WirelessHART nach der derzeitigen Spezifikation keine direkte Kommunikation zwischen



Bild 3.11: Kommunikationsstruktur [93]



Bild 3.12: Topologie 1, Funkübertragung am Versuchsstand (maßstabsgetreu) [93]

zwei Feldgeräten zulässt. Dies bedeutet, dass Messwerte zunächst mittels Uplink-Graphen (siehe Bild 3.10b) zum Gateway übertragen werden müssen. Um die Übermittlung von Daten zum Gateway zu realisieren, bestehen zwei Möglichkeiten bzw. Optionen:

- 1. Burst-Nachricht vom Feldgerät zum Gateway: die Werte müssen mittels HART-IP aus den Registern des Gateways ausgelesen werden.
- 2. Direkte Anfrage eines Wertes mit einem Command Request vom Gateway aus an das Feldgerät.

Die vom Gateway-Rechner empfangenen Werte werden schließlich in ein neues HART-IP Paket gepackt und über das Gateway mittels des entsprechenden Downlink-Graphen (siehe Bild 3.10c) an das zuvor im Gateway-Rechner adressierte Feldgerät gesendet. An dieser Stelle ist es wichtig hervorzuheben, dass bei Nutzung des Burst-Modus (Möglichkeit 1) vom Netzwerkmanager Timeslots zur Übertragung eingeplant werden, die sich nach der vorgegebenen Burst-Zeit richten. Somit kann ein deterministischer Uplink-Datentransport stattfinden.

Die übertragenen Variablen werden in den Registern des Gateways abgelegt. Es ist wichtig zu beachten, dass bei den kommerziellen WirelessHART-Produkten, die für diese Untersuchung genutzt wurden, lediglich ein minimales Burst-Intervall von 1 s einstellbar ist, obwohl die Wireless-HART-Spezifikation auch Burst-Intervalle von 0,25 s und 0,5 s zulässt [17].

Bei der zweiten Option hingegen ist keine deterministische Uplink-Übertragung möglich. Es werden genau die Zeitslots genutzt, welche am frühesten frei sind und die vom Netzwerkmanager zum allgemeinen Datenaustausch eingeplant sind. Zuerst wird das Request-Kommando vom Gateway-Rechner gesendet und das Feldgerät antwortet im nächstmöglichen Zeitslot mit einem Response-Kommando und übermittelt somit die angeforderten Daten. Bei kommerziellen Gateways liegen



Bild 3.13: Topologie 2, zwei Gebäude überspannendes Netzwerk [93]

die Request- und Response-Timeslots immer sehr nah beieinander. Auch bei Nutzung von Methode 2 ist es nicht möglich, Abfrageintervalle von unter einer Sekunde zu erreichen. Bei der Downlink-Übertragung ist bei WirelessHART generell keine deterministische Übertragung möglich, da es nicht vorgesehen ist, eine Burst-Nachricht von Feldgerät zu Feldgerät oder von Gateway zu Feldgerät zu senden und somit auch keine entsprechende Kommunikationsplanung seitens des Netzwerkmanagers realisiert wird. Die gesamte Kommunikationsstruktur, welche für diese Arbeit genutzt wird, ist in Bild 3.11 dargestellt.

Bei der Implementierung des Regelkonzepts wurde auf Möglichkeit 2 zurückgegriffen, da hierdurch sichergestellt werden konnte, dass immer die aktuellsten gemessenen Daten genutzt werden. Außerdem ist es hierbei möglich, mit dem WirelessHART Kommando 9 einen Zeitstempel zu übermitteln und somit Paketausfälle zu erkennen. Der Zeitstempel enthält die aktuelle Systemzeit des WirelessHART-Netzwerks, die für jedes Feldgerät synchronisiert ist. Bei Möglichkeit 1 werden immer die zuletzt empfangenen Werte aus dem Register des Gateways gelesen und es ist somit nicht möglich, eine Aussage darüber zu treffen, ob es zu Paketausfällen gekommen ist.

Zur Übertragung der an den Gateway-Rechner übermittelten Werte zum Aktor wurde ein Kommando 129 Request genutzt. Von der Aktorseite ausgehend wird wiederum mit einem Kommando 129 Response geantwortet. So können Paketausfälle bei der Übertragung zwischen Gateway und Aktor erkannt werden. Um die maximalen Übertragungsintervalle der in Bild 3.11 dargestellten Kommunikationsstruktur zu ermitteln, wurden Simulationen und Messungen an WirelessHART-Netzwerken durchgeführt. Hierbei kamen die beiden Topologien aus Bild 3.12 und Bild 3.13 zum Einsatz.

Für Topologie 2 werden ein WirelessHART-Gateway vom Typ "WHA-GW-F2D2-0-A\*-Z2-ETH" (Bild 2.6c), sechs WirelessHART-Module vom Typ "SWA-70" (Bild 2.6a) und drei "WD-H"-Module (Bild 2.6d) genutzt. Die mit den beschriebenen Netzwerkkonfigurationen gewonnenen Messergebnisse sind Bild 3.14 zu entnehmen. In den Balkengraphen sind auf der Abszisse die Paketlaufzeiten aufgetragen. Als Laufzeit wird die Zeit angegeben, die ein Messwert vom Sensor zum Aktor benötigt. Alle Laufzeiten, die innerhalb eines 100 ms Intervalls liegen, sind zu einem Balken zusammengefasst. Jeder Balken gibt somit die Anzahl der Pakete an, die eine ähnliche Laufzeit besitzen.

Bei der einfacheren Netzwerktopologie 1 tritt eine Häufung der Paketlaufzeiten bei  $t_{T,w} = 0.6 \text{ s}$ und  $t_{T,w} = 1.3 \text{ s}$  auf. Bei der komplexeren Topologie 2 vergrößern sich die Übertragungszeiten der Pakete deutlich und auch die Verteilung der Paketlaufzeiten erstreckt sich über ein viel längeres Intervall  $t_{T,w} = [1,2 \text{ s}, \ldots, 7,8 \text{ s}]$ . In Topologie 2 ist ebenfalls zu erkennen, dass es aus Sicht der Paketlaufzeit ein großer Nachteil ist, wenn in einem Netzwerk mit vielen Teilnehmern zuerst die Messwerte zum Gateway und dann vom Gateway zum Aktor bzw. dem lokalen Regler übertragen werden müssen, obwohl sich Sensor und Aktor in direkter Nachbarschaft befinden.

In diesem Abschnitt wurde auf die Eigenschaften und die Kommunikationsstruktur des Übertragungsprotokolls WirelessHART eingegangen, welche für die Regelungstechnik relevant sind. In späteren Kapiteln dieser Arbeit wird auf diese Grundlagen zurückgegriffen, um WirelessHART als Übertragungsprotokoll im geschlossenen Regelkreis einzusetzen. Folgender Abschnitt widmet sich einem weiteren Protokoll, welches sowohl im Bereich der Unterhaltungselektronik und der Fahrzeugtechnik eine sehr große Bedeutung hat, aber auch für den industriellen Einsatz einen zunehmend höheren Stellenwert einnimmt und deshalb ebenfalls im Fokus dieser Arbeit steht. Dabei handelt es sich um Bluetooth, für das zunächst eine Einführung in dessen Eigenschaften, Kommunikationsstrukturen und den auf diesem Gebiet durchgeführten Entwicklungen gegeben wird.



Bild 3.14: Messung der Paketlaufzeiten in einem WirelessHART-Netzwerk [93]

## 3.7.2 Bluetooth

Im Jahr 1994 wurde von der Firma Ericsson ein Konzept zur Funkverbindung technischer Geräte entworfen, welches als Ersatz für die bis dahin vorhandene Infrarot Technik dienen sollte. Dieses Konzept mündete in den Bluetooth Standard IEEE 802.15.1, der in Abschnitt 3.6.2 beschrieben und der durch die SIG (Bluetooth Special Interest Group), ein Zusammenschluss mehrerer Unternehmen, vorangetrieben wurde. Bluetooth nutzt das frei verfügbare ISM-Band (Industrial, Scientific and Medical Band), welches, wie in Tabelle 3.1 zu entnehmen ist, ebenfalls von vielen anderen Funktechnologien und Protokollen, wie WLAN, WirelessHART, ISA100.11a, ZigBee und LowPAN verwendet wird. Hierbei besteht die Gefahr, dass es zu Kollisionen bei Paketübertragungen kommt.

In der ersten Version von Bluetooth stehen 79 Übertragungskanäle mit jeweils 1 MHz Kanalbreite im Frequenzbereich von 2402 - 2480 MHz zur Verfügung. Für die Übertragung wird eine Frequenz-Sprung-Technik genutzt, durch die jede Sekunde 1600 Mal zwischen den zur Übertragung verfügbaren Kanälen gesprungen wird. Dadurch soll die Anzahl der Kollisionen im stark frequentierten 2,4 GHz Frequenzband verringert werden. Zur Modulation auf der Bitübertragungsschicht kommt das Modulationsverfahren GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) zum Einsatz. Damit kann eine Übertragungsrate von bis zu 721 kB s<sup>-1</sup> erreicht werden. Die Bitfehlerrate darf laut Spezifikation bei maximal 0,1 % liegen, wodurch ein mindestens –70 dBm klares Signal zur Übertragung vorliegen muss.

Darüber hinaus wird Bluetooth in drei Leistungsklassen in Abhängigkeit von ihrer Sendeleistung und damit Reichweite eingeteilt. Bei Klasse I wird mit maximal 20 dBm gesendet und es ist eine Reichweite von bis zu 100 m möglich. Klasse II ermöglicht eine Verbindung von bis zu 10 m bei einer Sendeleistung von maximal 4 dBm und Klasse III ist für Reichweiten kleiner als 1 m mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

Die Übertragungsdistanzen sind jedoch sehr stark von den Umgebungsbedingungen, wie Raumtopologien, Interferenzen, Reflektionen, im Übertragungsweg befindliche Hindernisse und weiteren Einflussgrößen abhängig. Im Data Link Layer von Bluetooth sind sowohl asynchrone als auch synchrone Übertragungen möglich und in der darüber liegenden Ebene stehen für viele Anwendungszwecke verschiedene Protokolle und Dienste wie L2CAP (Logical Link Control and Adaption Protocol), SDP (Service Discovery Protocol) und GAP (Generic Access Protocol) zur Verfügung.

Mit der zweiten Version von Bluetooth wurde die Übertragungsrate durch Änderung der Modulationsverfahren verbessert. So wurden die Verfahren Quadraturphasenumtastung (pi/4-QPSK) eingeführt, mit der bis zu 2 Mbit s<sup>-1</sup> möglich sind und zusätzlich die differentielle Phasenumtastung (8DPSK), mit der bis zu 3 Mbit s<sup>-1</sup> übertragen werden können. Mit Version 3 wurde durch Einführung eines Hochgeschwindigkeitskanals eine Übertragungsrate von bis zu 24 Mbit s<sup>-1</sup> erreicht.

Durch Version 4 wurden große Neuerungen mit der Einführung von Bluetooth Low Energy (BLE) erreicht, auch bekannt unter Bluetooth Smart. Die Version 4 besitzt grundlegende Änderungen, so

sind ab dieser Version 40 Kanäle mit einer Kanalbreite von 2 MHz vorhanden und es steht eine Übertragungsbandbreite von 1 Mbit s<sup>-1</sup> zur Verfügung. BLE besitzt drei Advertising Kanäle, die derart angeordnet sind, dass möglichst geringe Interferenzen mit WLAN auftreten. Version 4.x ist nicht abwärtskompatibel zu niedrigeren Versionen. Es gibt jedoch Chips, die alle existierenden Bluetooth Versionen unterstützen und aus diesem Grund einen Dual-Stack besitzen. Sie sind unter dem Begriff Bluetooth Smart Ready bekannt. Diese Chips werden in der Regel von Smart Phones genutzt.

Im Dezember 2016 ist die neue Bluetooth Spezifikation 5.0 [14] erschienen. Einige Besonderheiten der neuen Spezifikation sind zum einen höhere mögliche Datenraten sowie eine größere Übertragungsreichweite. Im Juli 2017 wurden schließlich drei Ergänzungsspezifikationen [56, 55, 54] zu Bluetooth 5 [14] veröffentlicht, welche erstmals eine vermaschte Netzwerktopologie für Bluetooth vorsehen. In den Dokumenten wird der Aufbau des Protokollstacks, welcher den Mesh-Service beinhaltet, sowie die Struktur und der Aufbau eines Bluetooth-Mesh-Netzwerks beschrieben. Somit nähert sich Bluetooth aus Sicht der Topologie den Übertragungsprotokollen ZigBee, WirelessHART und ISA 100.11a an und wird für eine Vielzahl von Anwendungsfelder noch weitaus interessanter. Hierzu zählen insbesondere drahtlose Sensornetzwerke, die Hausautomation und alle Bereiche von drahtlosen Übertragungen zum Thema IoT und Industrie 4.0. Weiterführende Details zu Bluetooth 5.0 und Bluetooth-Mesh sind im Anhang A.1.3 zu finden.

Auch das Thema Sicherheit stellt für den Einsatz im industriellen Umfeld einen zentralen Punkt dar, insbesondere bei Nutzung in Prozessregelkreisen. Generell können heutige Bluetooth Versionen entweder im "Non-Secure-Mode", also mit keiner Sicherheit, oder im "Service-Level Enforced Security Mode" betrieben werden. Bei letzterem liegt es in der Verantwortung des Entwicklers eines Dienstes für ausreichende Sicherheit zu sorgen. Eine weitere Möglichkeit besteht im "Link-Level Enforced Security Mode". Hierbei ist die Sicherheit direkt auf der Ebene des Data Link Layers integriert. Diese drei Sicherheitsmechanismen betreffen die laufende Kommunikation im Bluetooth-Netzwerk. Das größte Risiko entsteht beim Verbindungsaufbau, dem sogenannten Pairing zweier Bluetooth-Geräte. Das Pairing erfolgt in drei Schritten:

- Das initiierende Gerät sendet im ersten Schritt einen Pairing-Request und die Geräte, welche eine Verbindung aufbauen wollen, tauschen ihre Eigenschaften aus. Dieser Vorgang wird unverschlüsselt durchgeführt.
- Im zweiten Schritt erzeugen oder tauschen zwei Geräte ihren temporären Key (TK) aus. Weiterhin werden von den Geräten Bestätigungen und Zufallswerte ausgetauscht, um den übermittelten temporären Key zu überprüfen. Ist diese Überprüfung erfolgreich, so werden Kurz-Keys (STK) generiert, die zur Verschlüsselung der Verbindung verwendet werden.
- Der dritte Schritt im Pairing-Prozess ist optional und er dient zum Austausch von Listen mit unterschiedlichen Schlüsseln.

Für das Pairing sind vier mögliche Methoden definiert, welche die Bezeichnungen Just Works, Out of Band Pairing, Passkey und Numeric Comparison besitzen. Die letztgenannte Pairing-Methode

steht erst ab der Bluetooth-Spezifikation 4.2 [13, S242ff. (Vol. 1, Part A)] und ebenfalls in der Bluetooth-Spezifikation 5.0 [14] zur Verfügung. Am häufigsten wird derzeit die Methode des Passkeys verwendet [66]. Schon um eine Verbindung aufbauen zu können, muss eine Authentifizierung mit einem vier- bis sechzehnstelligem PIN stattfinden. In der Praxis werden häufig vier bis sechsstellige PINs genutzt, so dass die Sicherheit auf einer kurzen PIN beruht. Wenn diese überwunden bzw. mitgelesen ist sowie alle weiteren Schritte des Pairing-Prozesses verfolgt und entschlüsselt sind, so hat ein Angreifer freien Zugang zu den übertragenen Daten im Bluetooth-Netzwerk.

Wie in [69] und [66] beschrieben, ist ein Eindringen während der Pairing-Phase in ein Bluetooth-Netzwerk nicht schwierig. Durch geeignete Ausrüstung und Software, die ebenfalls frei zur Verfügung steht<sup>4</sup>, ist es nach [66] möglich, sich innerhalb einer Sekunde während der Pairing-Phase Zugang zu einem BLE-Netzwerk zu verschaffen. Weit verbreitete Angriffsmethoden sind Man-inthe-Middle-Attacken, Denial-of-Service-(DoS)-Attacken, Bluejacking, Bluenarfing, Bluebugging oder Car Whispering auf Bluetooth-Geräte wie Autoradios, IoT-Geräte oder Mobiltelefone. Dadurch liegt es zwangsläufig in der Verantwortung eines jeden Entwicklers, für mehr Sicherheit in der Profil- bzw. Dienstebene des Bluetooth-Stacks zu sorgen.

Bezüglich der Verschlüsselung von zu übertragenden Daten stehen heutzutage viele Werkzeuge zur Verfügung. Moderne Funkmikrocontroller verfügen außerdem über Cryptoeinheiten, wie [140], die eine Verschlüsselung der zu übertragenden Daten ohne eine Mehrbelastung der Recheneinheit des Mikrocontrollers ermöglichen.

In der Publikation [18] wurde eine Erweiterung der Sicherheit durch die Protokolle SPAK und APAK vorgestellt, die derzeitige Schwachstellen hinsichtlich der Sicherheit von Bluetooth beseitigen könnten. Diese Protokolle nutzen Passwörter mit kryptographischer Hashfunktion zum Verbindungsaufbau und könnten in zukünftigen Bluetooth Spezifikationen als Sicherheitsmechanismen Einzug halten. Im Weiteren wird die Topologie sowohl für Bluetooth BR/EDR als auch für das energiesparsame Bluetooth Low Energy betrachtet.

#### Netzwerkstruktur eines Bluetooth Netzwerks

Nach der Bluetooth Spezifikation [13] kann ein Bluetooth BR/EDR Netzwerk aus einer beliebigen Anzahl von Piconetzen bestehen. Ein Beispiel für ein Bluetooth Netzwerk ist in Bild 3.15 zu sehen. Die Gesamtheit eines Bluetooth-Netzwerkes mit mehreren Piconetzen wird mit Scatternet bezeichnet. Jedes Piconetz besteht aus einem Mastergerät und bekommt bis zu sieben Slaves, die aktiv sind, und eine 3 Bit aktive Mitgliedsadresse (AMA) zugewiesen. Darüber hinaus können einem Piconetz theoretisch bis zu 256 weitere Slaves zugeordnet werden, die nicht aktiv an der Kommunikation beteiligt sind und somit den Zustand "Standby" oder "Parked" sowie eine 8 Bit passive Mitgliedsadresse (PMA) zugeordnet bekommen.

Slaves können in einem Piconetz ausschließlich eine Verbindung zum Master besitzen. Zwei oder mehrere Slaves eines Piconetzes nutzen bei gleichen Eigenschaften hinsichtlich des Frequenz-

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>http://lacklustre.net/projects/crackle/



Bild 3.15: Netzwerktopologie von Bluetooth [91]

verhaltens und somit zur gleichen Zeit immer den gleichen physikalischen Übertragungskanal. Die zur Übertragung genutzten physikalischen Kanäle für ein Piconetz unterliegen einem ständigen Wechsel durch das von Bluetooth verwendete Frequenzsprungverfahren. Unterscheiden sich Frequenzeigenschaften von Slaves, wie z.B., dass eine Gruppe Slaves kein adaptives Frequenzhopping unterstützt und die andere schon, so kann es vorkommen, dass in einem Piconetz unterschiedliche physikalische Übertragungskanäle genutzt werden [13, S. 73 (Vol 1, Part A)].

Außerdem können aktive Geräte als Verbindung zwischen zwei Piconetzen dienen. So kann beispielsweise ein Master eines Piconetzes gleichzeitig ein Slave eines benachbarten Piconetzes sein und der Slave eines Piconetzes kann ebenfalls ein Slave eines benachbarten Piconetzes bilden. Allerdings kann kein Master des einen Piconetzes auch Master eines weiteren Piconetzes sein, da sonst in beiden Piconetzen die gleiche Frequenzsprung-Sequenz genutzt und dies dauerhaft zu Übertragungskollisionen führen würde. Im Betrieb schalten Feldgeräte, die gleichzeitig Teilnehmer zweier Piconetze sind, immer zwischen beiden Netzen hin und her. Die soeben beschriebene Topologie gilt für Bluetooth BR (Basic Rate) und EDR (Enhanced Data Rate).

Bei BLE (Bluetooth Low Energy) hat sich gemäß der Spezifikation [13, S. 74 (Vol 1, Part A)] die Definition der Topologie leicht geändert. Die verbindungsorientierte Topologie-Anordnung für BLE entspricht der Sterntopologie aus Bild 3.2b. Weiterhin können Daten mittels Advertisingund Scan-Response-Nachrichten übermittelt werden. Ein Master und alle dem Master zugehörigen Slaves bilden weiterhin ein Piconet. Durch BLE wird es ermöglicht, ein Piconet mit mehr als sieben Slaves zu betreiben. Dies hängt von der Hardware und den Basisstacks eines jeden Herstellers ab<sup>5</sup>. Weiterhin ist kein "Standby" oder "Parked"-Modus mehr möglich, sondern Geräte können über einen bestimmten Zeitraum in Abhängigkeit ihrer Aufgaben in einen Tiefschlafmodus versetzt werden. Trotzdem befinden sie sich noch aktiv im Netzwerk. Der zentrale Unterschied ist jedoch, dass zwei oder mehrere Slaves eines Piconetzes von BLE anders als bei BR/EDR nicht mehr den gleichen physikalischen Übertragungskanal nutzen.

Für beide Bluetooth-Varianten befinden sich in der Spezifikation keine Informationen zum Routing von Datenpaketen durch das Netzwerk. Gemäß der Spezifikation ist Routing nicht Teil von Bluetooth, sondern die Aufgabe der höheren Layer, welche durch die Bluetooth-Spezifikation nicht abgedeckt werden. Dies bedeutet, dass Anwender, die mit Bluetooth eine Slave-zu-Slave-Kommunikation oder ein gesamtes Scatternet realisieren möchten, sich selbst um geeignete Routing-Algorithmen und -Methoden kümmern und diese implementieren müssen.

Die Einführung von Bluetooth-Mesh wird viele Neuerungen bezüglich des Routings innerhalb eines Bluetooth Netzwerkes mit sich bringen. Derzeit gibt es jedoch noch keine auf dem Markt befindliche Lösung, die eine technische Gesamtlösung dafür bietet, wenn auch Hersteller intensiv an deren Entwicklungen arbeiten. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit war jedoch noch keine geeignete Hardware zur Realisierung eines Projekts mit Bluetooth 5.0 verfügbar. Aus diesem Grund wird im Weiteren zur Demonstration einer Prozessregelung ausschließlich die Bluetooth 4.0 Spezifikation genutzt und die Leistungsfähigkeit und Möglichkeiten präsentiert, die Bluetooth LE im geschlossenen Regelkreis bietet.

#### Kommunikation innerhalb eines Piconetzes

Bluetooth verwendet zur Datenübermittlung in einem Piconet und damit bei einer Mehrgerätekommunikation ein Multiplexing. Dies bedeutet, dass der Master, wie in Bild 3.16 für ein Piconet mit sieben Teilnehmern dargestellt, zunächst die Kommunikation mit dem ersten Slave, danach mit dem zweiten, dritten bis zum siebten Slave durchführt. Wie in Abschnitt 3.6.2 beschrieben, wird der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kommunikationsfenstern mit dem gleichen Slave, als Verbindungsintervall bezeichnet. Es ist wichtig zu beachten, dass der Begriff Verbindungsintervall ausschließlich im Kontext zur Organisation der Kommunikation innerhalb des BLE-Stacks Verwendung findet. In Bild 3.16 wurde das Verbindungsintervall am Beispiel der Kommunikation zwischen Master und Slave 1 (MA  $\rightleftharpoons$  SL1) eingezeichnet. Die Länge der Verbindungsintervalle können für jedes Slave individuell konfiguriert werden. So ist es beispielsweise möglich für Slave 1 ein Verbindungsintervall von 7,5 ms und für Slave 2 ein Verbindungsintervall von 1 s zu konfigurieren.

Bei der verwendeten Hardware muss das Verbindungsintervall mindestens einen Wert von 7,5 ms besitzen, so dass innerhalb eines 7,5 ms langen Verbindungsintervalls maximal sechs BLE-Geräte

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Die in dieser Arbeit verwendete Hardware aus den Bildern 2.7c, 2.7d und aus [140] mit dem Bluetooth-Stack "Softdevice 3" unterstützt bis zu sieben Verbindungen, die Nachfolge-Stacks "Softdevice 4 und 5" unterstützen bis zu 20 Verbindungen.



Bild 3.16: Verbindungsintervall von Bluetooth

kommunizieren können, die jeweils genau ein Kommunikationsfenster zur Kommunikationsdurchführung und das kürzest mögliche Verbindungsintervall nutzen. Soll eine größere Anzahl von Slaves kommunizieren können, so muss das minimale Intervall entsprechend in 1,25 ms Schritten pro zusätzlichem Slave erhöht werden. Ist die Zeit des Verbindungsintervalls länger gewählt, als von den kommunizierenden Geräten benötigt, so bleiben Kommunikationsfenster ungenutzt.

Wie in Abschnitt 3.6.2 beschrieben, beträgt die Mindestlänge eines Kommunikationsfensters 1,25 ms. Innerhalb eines Kommunikationsfensters findet im ersten 625 µs andauernden Slot zunächst die Kommunikation vom Master zum Slave statt. Der zweite 625 µs andauernde Slot steht dann für die Kommunikation vom Slave zum Master zur Verfügung (siehe auch Andeutung in Bild 3.16). Bei maximal sieben Slaves ergibt sich somit das weiter oben genannte kürzest mögliche Verbindungsintervall von 8,75 ms. Laut Bluetooth 4.0 Spezifikation ist das kürzest mögliche Verbindungsintervall 7,5 ms und das größtmögliche auf 4 s begrenzt [13, S. 76 (Vol 6, Part B)]. Je länger das Verbindungsintervall gewählt wird, desto langsamer wird die Kommunikation im BLE-Netzwerk. Damit sinkt ebenfalls der Energieverbrauch eines BLE-Gerätes. Bei der vorliegenden Arbeit wird ein Verbindungsintervall von 7,5 ms gewählt, da zunächst keine Einschränkungen für den Energieverbrauch bestanden, im Gegensatz dazu ist jedoch für den Reglerbetrieb ein möglichst kurzes Übertragungsintervall notwendig.

### Implementierung einer Paketmanagement- und Routing-Strategie

Zur Umsetzung des Bluetooth Netzwerks wurden die Evaluationboards der Firma Nordic Semiconductor nrf52832 aus Bild 2.7c und [139] verwendet, welche einem Mastergerät die Möglichkeit bieten, mit bis zu sieben Slaves eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung einzugehen. Allerdings stellten sie mit ihrem integrierten Basis-Stack mit dem Namen "Softdevice" in der Version 3.0.0<sup>6</sup> ausschließlich die Möglichkeit des Aufbaus einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung bereit. Somit kann

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Inzwischen steht "Softdevice 6.0.0" zur Verfügung.



Bild 3.17: Implementierte Bluetooth-Topologie [91]

zwar der Master mit einem Slave und umgekehrt kommunizieren, allerdings ist keine Slave-zu-Slave Kommunikation mit dem Master als Zwischenstation möglich. Außerdem ist die maximale Paketgröße, welche übertragen werden kann, auf 20 Bytes beschränkt.

Bei Paketen, welche die 20 Bytes überschreiten, wie dies häufig für Konfigurations- und Diagnose-Anwendungen notwendig ist, müssten zunächst Pakete vom sendenden Gerät in Teilpakete zerlegt und am Ziel wieder zusammengesetzt werden, falls keine anderweitigen ressourcenintensive Veränderungen am Scheduling der genutzten Hardware durchgeführt wird. Um ein Bluetooth-Netzwerk, wie es in Bild 3.17 am Beispiel des betrachteten Anlagenprüfstands aus Abschnitt 2.1 dargestellt ist, zu betreiben, muss sowohl für das Mastergerät (MA) eine Methode zum Paketrouting implementiert werden als auch für jedes Bluetooth-Gerät (SL), das Pakete empfangen bzw. senden kann, ein Paketmanagement zur Zerlegung und Zusammensetzung der Pakete entwickelt werden. Für das Routing müssen den Feldgeräten außerdem eindeutige Adressen zugewiesen werden, damit ein Paket vom Sendeslave über den Master zum Empfangsslave übertragen werden kann. Die Zuweisung einer eindeutigen Adresse wird direkt, nachdem sich ein Slave mit dem Master gepaired hat vom Mastergerät übertragen. Die für dieses Anwendungsszenario genutzte Topologie ist eine Sterntopologie (siehe Bild 3.2b), wie sie auch in Bild 3.17 veranschaulicht ist.

Im abgebildeten Netzwerk, welches auch als Piconet bezeichnet wird, existiert ein als Master gekennzeichneter Knoten, der für das Routing zwischen Paketen sowie der Netzwerkorganisation verantwortlich ist. Erst wenn ein Slave mit dem Master eine Verbindung aufgebaut und von diesem eine Adresse zugewiesen bekommen hat, kann er über das Netzwerk kommunizieren. Das im Rahmen dieser Arbeit implementierte Beispielnetzwerk umfasst mehrere Knoten, von denen drei jeweils mit einem Sensor verbunden sind und deren Stromsignale mittels Bluetooth an ein Zielgerät übertragen werden.

Die Übertragung eines Messwertes kann entweder mittels eines Bursts oder durch eine von einem beliebigen Knoten im Netzwerk abgesandte Abfrage durchgeführt werden. Zur Kommunikati-

Cmd	Art	Bez.	Erklärung	
3	Req.	Prozesswert	Wird an ein Netzwerkgerät gesendet, um von diesem den am ADC an-	
		lesen	liegenden Prozesswert als Response zu erhalten.	
3	Resp.	Prozesswert	Gibt den Messwert als float und einen Zeitstempel als unsigned int32	
		lesen	zurück. Im Fehlerfall erfolgt die Rückgabe eines Fehlercodes.	
103	Req.		Übermittelt einen Burstintervall und ein Burstziel an das adressierte	
		Burstintervall	Zielgerät. Ist der Wert für den Intervall null, so wird der Burst am Zielge-	
		setzen	rät deaktiviert. Es wird vom Zielgerät mit einem Response geantwortet,	
			der angibt, ob das Kommando erfolgreich ausgeführt wurde.	
103	Resp.	Burstintervall	Übermittelt einen Statuscode, der angibt, ob das Setzen des Burstinter-	
		setzen	valls erfolgreich war.	
	Req.		Übermittelt einen Namen für ein Bluetooth-Gerät, mittels dessen ein	
104		Gerätenamen	Gerät später identifiziert werden kann. Der Gerätenamen wird im Flash	
104		setzen	gespeichert und kann auch, nachdem die Energieversorgung für einen	
			Knoten unterbrochen war, wieder ausgelesen werden.	
104	Resp.	Gerätenamen	Gibt einen Statuscode über das Setzen des Gerätenamens zurück.	
101		setzen		
105	Req.	Gerätenamen	Anfrage an einen Knoten, um den Gerätenamen auszulesen.	
105		lesen		
105	Resp.	Gerätenamen	Gibt den Gerätenamen an den Initiator der Anfrage zurück	
		lesen	Giot den Geracehanien an den initiator der Annage zurdek.	
122	Req.	Sollwert set-	Übermittelt einen Sollwert, der von einer Regelungseinrichtung zum	
122		zen	Soll-/Istwert-Vergleich genutzt werden soll.	
122	Resp.	Sollwert set-	Gibt einen Statuscode zur Übermittlung des Sollwerts zurück.	
		zen		
999	Req.	Synchro-	Rücksetzen der Uhr eines Slaves auf den vom Master übertragenen Wert	
222		nisation	zuzüglich eines Offsetwertes	

Tabelle 3.4: Befehlsübersicht zur Bluetooth-Implementierung

on innerhalb des Bluetooth-Netzwerks wurden aus diesem Grund einige Kommandos definiert, die in Tabelle 3.4 aufgelistet sind. Wie auch bei WirelessHART umfasst jedes Kommando die Kommando-Nummer sowie ein Bit, das angibt, ob es sich bei dem Kommando um einen Request oder einen Response handelt. Nur für Messwerte, die periodisch mittels Burst übertragen werden, bedarf es keiner Request-Nachricht.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Implementierung umfasst derzeit sechs Kommandos, welche in Tabelle 3.4 aufgeführt und kurz erklärt werden. Eine detaillierte Struktur des jeweiligen Kommandos ist dem Anhang A.1.4 zu entnehmen. Mit den aufgelisteten Kommandos wird eine einfache Kommunikation innerhalb eines Netzwerkes ermöglicht und es kann damit bereits eine Regelung betrieben werden. Die durchgeführte Implementierung lässt sowohl den Betrieb von zentralen als auch lokalen Reglern zu.



Bild 3.18: Paketstruktur der implementierten Netzwerk- und Anwendungsschicht

Ebenfalls können die Informationen von mehreren Regelkreisen über dasselbe Bluetooth-Netzwerk übertragen werden. In diesem Fall würden sich die Daten der verschiedenen Regelkreise bei ihrer Übertragung gegenseitig beeinflussen und es würde eine Verkopplung hinsichtlich des Übertragungsverhaltens im Netzwerk vorliegen. Die soeben vorgestellten Kommandos bilden ausschließlich die Datenstruktur zur Übermittlung von Werten und Informationen. Sie besitzen jedoch noch keine für die Durchführung von Routing nützlichen Informationen und beinhalten somit ausschließlich Informationen, welche auf Ebene der Anwendungsschicht nützlich sind. Auch Managementinformationen für Pakete, die mehr als 20 Bytes umfassen, sind nicht vorhanden. Aus diesem Grund wurde bei Implementierung der Bluetooth-Kommunikation die Netzwerkschicht realisiert, welche für Routing- und Netzwerkmanagement-Aufgaben verantwortlich ist. Hierzu wird das zu übertragende Bluetooth-Paket mit einem weiteren Header sowie einer Checksumme (CRC) versehen. Die Struktur des Datenpakets auf Ebene des Netzwerk-Layers ist in Bild 3.18 zu sehen.

Die Headerinformationen umfassen ein Adressbyte, welches sämtliche Adressierungsinformationen, wie Sende- und Empfangsadresse und zusätzlich zwei Hilfsbits enthält, welche zur Unterscheidung von vordefinierten Anwendungsszenarien genutzt werden. Weiterhin enthält der Header zwei Paketmanagementbytes, in denen sowohl die Sequenznummer als auch die Sequenzanzahl eines Datenstroms enthalten sind. Die Sequenznummern sind von besonderer Bedeutung, wenn die zu übertragenden Daten umfangreicher sind als der von BLE maximal zulässiger Payload eines Paketes. In diesem Fall werden die Daten beim Sender in einzelne Sequenzen unterteilt und jede Sequenz erhält eine fortlaufende Nummer. Zusätzlich wird in jedem Paket die Information mit übertragen, in wie viele Sequenzen ein Paket unterteilt worden ist. Diese Informationen werden vom Empfangsknoten benötigt, um zu erkennen, dass alle Sequenzen eines Datenstroms in der Empfangswarteschlange eingetroffen sind und somit das Paket wieder zusammengesetzt werden kann.

Die Transmission-Identifikationsnummer wird dazu genutzt, um zu erkennen, zu welchem Datenstrom ein Paket gehört, denn es kann vorkommen, dass von verschiedenen Geräten sequentielle Daten an einen Empfänger übertragen werden und diese in die Warteschlange eingereiht werden. Anhand der Transmission-Identifikationsnummer kann erkannt werden, welchem Übertragungsvorgang eine Paketsequenz angehört. Zur Realisierung der Transmission-Identifikationsnummer bestehen die folgenden Möglichkeiten:

• Jedes Gerät besitzt eine eindeutige Transmission ID, z.B. die Geräte Adresse. In diesem Fall ist die maximale Anzahl von Geräten im Netzwerk auf

#### 2Bitzahl des Transmission ID-Feldes

beschränkt. Außerdem darf jedes Gerät nur einen einzigen Übertragungsstream zur gleichen Zeit durchführen und Verzögerungen im Netzwerk und damit die Überholung von Sequenzen zweier aufeinanderfolgender Streams müssen ausgeschlossen sein oder es müssen ausreichend große Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Paketen vorhanden sein.

 Jedes Gerät inkrementiert seine interne Transmission ID für jeden neuen Übertragungsstream um eins. Ist der Maximalwert erreicht, welcher von der maximalen Bitanzahl des Transmission ID Feldes abhängt, so wird der Imkrementiervorgang ausgehend vom niedrigsten Wert neu gestartet. Bei diesem Verfahren können beliebig viele Teilnehmer im Netzwerk sein. Es kann jedoch zu Fehlern kommen, falls zwei Geräte Datenströme mit der gleichen Transmission ID an ein Zielgerät senden, deren Sequenzanzahl den gleichen Wert besitzt und ungleich eins ist. Je größer die zur Nutzung zur Verfügung stehende Bitzahl des Transmission ID Feldes ist, desto unwahrscheinlicher ist das Auftreten dieser soeben beschriebenen Fehlersituation. Auch kann die Berücksichtigung der Quell-Adresse eines Paketes in der Queue Abhilfe schaffen und in nahezu jedem Fall eine eindeutige Identifizierung eines Pakets ermöglichen. Dies wurde jedoch im Rahmen der Arbeit nicht implementiert.

Sollen Daten übermittelt werden, deren Bytelänge größer ist als die maximal in einem BLE Paket zulässige Byteanzahl, so wird dieses in Sequenzen aufgeteilt und die einzelnen Sequenzen werden nacheinander über das Bluetooth-Netzwerk zum Empfangsknoten gesendet. Vom Mastergerät existieren Links zu jedem seinem Pico-Netzwerk angehörenden Slave-Gerät. Jeder Master kann gemäß der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Hardware maximal sieben aktive Links besitzen. Werden nun Daten zwischen den unterschiedlichen Netzwerkteilnehmern ausgetauscht, so verwaltet der Masterknoten auf Ebene der Bitübertragungsschicht die Datenströme, indem er bei der genutzten Hardware jedem Link eine definierte Kommunikationszeit zuordnet, in der genau nur über diesen einen Link kommuniziert werden kann.

Nachdem über den ersten Link kommuniziert wurde, schaltet der Master zum zweiten Link, zum dritten, usw. Die Übertragungen zwischen den einzelnen Funkkomponenten finden somit durch



Queue Überwachung:

ID = Nummer eines Übertragungsstreams

Bild 3.19: Aufbau der Empfangsqueue im Empfängerknoten

Multiplexing statt. Dadurch wird in jedem Kommunikationsfenster, dem eine Verbindung zu einem Slave zugeordnet ist, genau eine Sequenz eines Datenstroms übertragen. Die einzelnen Sequenzen erreichen am Ende ihres Übertragungsweges das Empfangsgerät und werden in einer implementierten Queue abgelegt, deren Funktionsweise beispielhaft in Bild 3.19 veranschaulicht ist. Die Queue setzt sich aus dem eigentlichen Sequenzspeicher zusammen, welcher die Daten und Paketmanagementinformationen enthält und einer Queueüberwachung. Alle neuen, ankommenden Pakete werden in einem freien Eintrag in der Queue gespeichert und entsprechende Informationen in der Queueüberwachung angepasst.

Die Queueüberwachung listet die einzelnen aktiven Datenströme<sup>7</sup> sowie deren Sequenzanzahl und die Anzahl der für einen Datenstrom eingetroffenen Sequenzen auf. Sobald alle Sequenzen eines Datenstroms eingetroffen sind, wird die Queue nach den einzelnen Paketen des entsprechenden Streams durchsucht und die Daten werden in ihre ursprüngliche Reihenfolge zusammengesetzt und weiterverarbeitet oder, wie auf Bild 3.19 zu sehen, an eine Schnittstelle, wie beispielsweise UART übergeben.

Falls eine Übertragung nicht erfolgreich sein sollte und der Wert im Feld "Arrived Pkt" nach einer vorgegebenen Zeit nicht mit dem Wert im Feld "Max. Pkt" übereinstimmt, so wird ein Timeout ausgelöst und der entsprechende Übertragungsvorgang aus der Warteschlange entfernt und die Übertragung somit verworfen.

Im betrachteten Gesamtnetzwerk hat ausschließlich der Master eine Routingfunktion. Der Ablauf des Routings ist in Bild 3.20 veranschaulicht. Slaves können Daten ausschließlich empfangen, versenden und managen. Sobald im Master ein BLE Event ausgelöst wird und somit ein Datenpaket von einem Slave ankommt, wird die Zieladresse des neu eingetroffenen Pakets im Header mit den Informationen für die Netzwerkschicht gelesen. Falls das Paket die Geräteadresse des Masters besitzt, so wird es in seine Empfangswarteschlange eingereiht. Für den Fall, dass das Paket

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Unter Datenstrom wird in diesem Zusammenhang eine Datenmenge verstanden, die in mehrere Pakete aufgeteilt ist.



Bild 3.20: Routingstrategie PicoNet

die Broadcast-Adresse besitzt, wird es durch den Master an jedes Slave Gerät weitergeleitet, welches sich im Piconetz befindet, mit Ausnahme des sendenden Slaves. Ist als Zieladresse weder die Adresse des Masters noch die Broadcast Adresse angegeben, so leitet das Mastergerät das Paket an das der Zieladresse entsprechende Slave Gerät weiter. Da jedes Gerät über einen Link mit dem Mastergerät verbunden und jeder Link mit einer Geräteadresse verknüpft ist, sucht der Master anhand seiner Adresstabelle nach dem zur Adresse zugehörigen Link und leitet das Paket mittels der Link-Information an das Zielgerät weiter.

Bei der in dieser Arbeit vorgenommenen Implementierung ist das Routing ausschließlich innerhalb eines Pico-Netzwerks möglich. Dieses Routingschema mittels Adresstabellen lässt sich jedoch für weitere Entwicklungen auf weitere Netzformen und -topologien mit einer Vielzahl von Knoten übertragen. Hierzu müssten zum einen andere Adressierungsschemen eingeführt werden und zum anderen ist ein Austausch von Adressierungs- sowie Routinginformationen je nach Netzwerkstruktur zwischen Mastergeräten oder allen Geräten eines Netzwerks notwendig. Für das Beispiel eines Scatternets<sup>8</sup> aus Bild 3.15 sind beispielsweise Verfahren zum Aufbau des Netzwerkverbunds einzuführen, da sich die verschiedenen Master-Knoten aus den unterschiedlichen Pico-Netzwerken zunächst finden und ihre Adress- und Routinginformationen austauschen müssen. Hierbei können die Routinggeräte, die zwischen zwei Pico-Netzen platziert sind, unterstützend wirken. Außerdem sind Anpassungen im Adressschema aus der Netzwerkschicht notwendig, was zwangsläufig zur Reduzierung der nutzbaren Payload-Größe aus Bild 3.18 führt.

Soll beispielsweise ein Messwert mittels des soeben beschriebenen Bluetooth Netzwerks übertragen werden, so reicht aufgrund der geringen Datenmenge ein einzelnes Paket aus, allerdings ist bei Konfigurationsdaten eine Zerlegung der Pakete in 20 Bytes Einheiten abzüglich definierter Headerinformationen notwendig. Der Header für die vorliegende Bluetooth-Übertragung umfasst

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Scatternets sind nach der Bluetooth LE Spezifikation nicht vorgesehen, theoretisch ist jedoch deren Aufbau ebenfalls möglich.



Bild 3.21: Messung der Paketlaufzeiten in einem Bluetooth-Netzwerk

die Informationen Zieladresse, Senderadresse, Hilfsbits, Sequenznummer des zu übertragenden Pakets, maximale Sequenzanzahl und eine Identifikationsnummer der Übertragung sowie eine Checksumme.

Um die Leistungsfähigkeit der Bluetooth Implementierung zu testen, war es notwendig zu ermitteln, in welchen Übertragungsintervallen Pakete mit der fertiggestellten Implementierung minimal übertragen werden können, ohne dass es zu Paketausfällen oder langen Verzögerungszeiten kommt. Speziell für diesen Test wurden drei Bluetooth-Module genutzt. Eines davon hatte die Funktion des Masters (MA) und die anderen beiden bildeten die Slave-Geräte und wurden mittels UART mit einem Rechner verbunden und mit einer Testsoftware gekoppelt. Diese Software übergab in einem vordefinierten Intervall jeweils ein Paket mit einem Zeitstempel an den Sendeknoten (S1) und dieser sendete es an das Zielgerät (S2), welches es wiederum an den Mess-PC übergab. Anhand der aktuellen Systemzeit und des Zeitstempels konnte die Paketlaufzeit ermittelt werden.

Die Messergebnisse zweier Messungen mit verschiedenen Sendeintervallen sind in Bild 3.21 als Balkendiagramme veranschaulicht. Für die Messung (rechts) wurden 1000 Pakete in einem Intervall von 50 ms an das Bluetooth-Modul übergeben und in der linken Messung mit einem Intervall von 100 ms. Auf der Abszisse beider Diagramme sind die Laufzeiten abgebildet, während auf der Ordinate die Anzahl der Pakete aufgetragen ist. Die Balken geben somit an, wie viele Pakete eine Laufzeit x besitzen. Es sind alle Pakete zu einem Balken zusammengefasst, deren Laufzeit innerhalb eines 2 ms Sekundenintervalls  $[b \cdot 2 ms, (b + 1) \cdot 2 ms[$  mit  $b \in 1, ..., n$  lag. Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass sowohl bei einem Intervall von 50 ms als auch bei einem Intervall von 100 ms eine große Streuung bei der Übertragungsdauer der Pakete auftritt. Viele der Übertragungen im rechten Diagramm benötigen eine größere Zeitspanne als das 50 ms Übertragungsintervall. Somit wäre in diesem Fall eine Abtastung mit 50 ms ungünstig. Insgesamt kam es bei den durchgeführten Tests zu keinen Paketausfällen. Die Übertragung auf dem linken Balkendiagramm mit einem Intervall von 100 ms liefert aus regelungstechnischer Sicht schon deutlich bessere Ergebnisse. Alle abgesendeten Pakete treffen am Ziel ein und zudem liegen die meisten Werte im 100 ms Intervall. Dadurch kann die Übertragungstotzeit durch das Netzwerk konstant mit einem Abtastschritt von 100 ms angenommen werden. Somit ist die Wahl einer Abtastzeit von 100 ms sinnvoll und es zeigt sich auch, dass die implementierte Bluetooth Software leistungsfähiger sein wird als die in Abschnitt 3.7.1 und in [92] und [93] vorgestellte WirelessHART-Übertragung.

#### Zeitsynchronisation für regelungstechnische Anwendungen

Für die weitere Arbeit ist neben dem eigentlichen Routing auch eine Zeitsynchronisation der einzelnen Teilnehmer im Bluetooth-Netzwerk notwendig, da auf die Synchronisationsmechanismen der Kommunikation auf Ebene der physikalischen Schicht der Funkmikrocontroller nicht zugegriffen werden konnte. Aus diesem Grund wurden Zähler verwendet, die über einen Timer im 1 ms-Takt einen Wert inkrementieren. Die Timer verwenden einen Quarz zur Zeitmessung, welcher jedoch einen Drift im Vergleich zur realen Zeit besitzt. Durch Fertigungstoleranzen und weitere Effekte fallen die Drifte verschiedener Netzwerkteilnehmer unterschiedlich groß aus. Die Zählerwerte der einzelnen Slaves und des Masters, deren Wert jede Millisekunde um eins inkrementiert wird, werden dafür genutzt, um Zeitstempel in Paketen zum Sendezeitpunkt bzw. zum Zeitpunkt der Messwertaufnahme (z.B. Kommando 3 aus Tabelle 3.4) zu übertragen. Zudem wird dieser Zeitwert dazu verwendet, um zu bestimmten Zeitpunkten am Analog-Digital-Wandler des Funkmikrocontrollers anliegende Messwerte einzulesen.

Damit jedes Gerät die gleiche Basiszeit besitzt, ist es notwendig, die Zeiten bzw. die Zähler eines jeden Netzwerkteilnehmers zu synchronisieren. Eine Zeitsynchronisation kann dadurch realisiert werden, indem ein Kommando (im vorliegenden Fall Kommando 999, siehe Tabelle 3.4) eingeführt wird und dieses regelmäßig vom Mastergerät an alle Slave-Geräte mit der aktuellen Zeit des Masters gesendet wird. Dabei müssen bei Bluetooth Übertragungsverzögerungen und der Übertragungsversatz berücksichtigt werden. Der Übertragungsversatz kommt bei Bluetooth dadurch zustande, weil Bluetooth ein Multiplexing bei der Kommunikation nutzt und somit die übertragenen Pakete beispielsweise bei einer Master zu Slave 1 und Master zu Slave 2 Kommunikation, wie in Bild 3.16 dargestellt, immer um 1,25 ms versetzt sind. Außerdem muss die Signallaufzeit berücksichtigt werden, die für Kommando 999 für einen Sendeslot im schlimmsten Fall bis zu 625 µs lang sein kann.

Beim verwendeten Versuchsaufbau werden die Uhren der Slaves alle 100 s dadurch synchronisiert, indem der Master ein Paket mit dem Kommando 999 an die Slaves überträgt. Dieses beinhaltet den Zeitwert für den jeweiligen Slave, der bereits den Kommunikationsversatz und die maximale

Übertragungszeit berücksichtigt. Sobald das Paket beim Slave eingetroffen ist, wird dessen Uhr auf den im Kommando 999 enthaltenen Wert gesetzt. Auf diese Weise ist es möglich, die Uhren der unterschiedlichen Geräte im Netzwerk für die in Bild 3.17 veranschaulichte Sterntopologie mit einer Abweichung von  $\pm 1$  ms synchron zu halten.

Obwohl durch die soeben beschriebene umgesetzte Methodik alle Uhren der Geräte im Netzwerkverbund synchron laufen, nehmen sie dennoch den Drift des Masterknotens an. Um diesen auch mit der realen Weltzeit synchron zu halten, gibt es die Möglichkeit, dies entweder durch hochwertige Quarze und Korrekturmechanismen oder durch Synchronisation mit einer exakten Uhr zu gewährleisten. Das soeben beschriebene und für die Sterntopologie eines Netzwerks implementierte Verfahren ist zunächst ausschließlich für diese Topologie nutzbar. Mit dieser Methode ist es möglich, dass alle Geräte eines Netzwerks Aktionen, wie die Aufzeichnung eines Messwertes, nahezu gleichzeitig durchführen können. Für Multi-Hop Netzwerke muss das Verfahren um eine noch zu entwickelnde Methode zur zuverlässigen und dynamischen Ermittlung der Paketlaufzeit erweitert werden.

Nachdem in diesem Abschnitt ein Routing-Konzept für ein Bluetooth Pico-Netzwerk und eine Methode zur Zeitsynchronisation vorgestellt sowie die Leistungsfähigkeit für den Einsatz im geschlossenen Regelkreis hinsichtlich der kürzest möglichen Abtastzeit untersucht wurden, wird im folgenden Abschnitt ein MAC-Protokoll für kurze Übertragungsintervalle vorgestellt.

## 3.7.3 MAC-Protokoll

Mit den bisher beschriebenen Übertragungsprotokollen, die allesamt im 2,4 GHz Frequenzband betrieben werden, konnten für regelungstechnische Anwendungen minimale Übertragungsintervalle für Messwerte von 100 ms erreicht werden. Für Systeme mit einer langsamen Dynamik, wie beispielsweise einer Füllstandregelung des in Abschnitt 2.2 vorgestellten Drei-Tank-Systems, ist dies vollkommen ausreichend. Allerdings existieren viele Systembeispiele, welche deutlich schnellere Dynamiken aufweisen, wie beispielsweise Durchfluss-, Druck- und Differenzdruckregelungen. Zum Entwurf derartiger Regelungen unter Nutzung der maximal möglichen Performanz, sind die weiter oben beschriebenen Protokolle nicht geeignet. Jedes dieser Protokolle besteht aus mehreren Schichten des OSI-Modells und mit jeder Schicht werden neue Header- und Trailer-Informationen zum Datenpaket hinzugefügt. Beispielsweise benötigt der Basisstack von Bluetooth aus Abschnitt 3.7.2 einen Header der Länge von neun Bytes, hinzukommen durch die Implementierung der Routing Strategie vier bis sechs weitere Bytes für Adress- und Managementinformationen. Damit besitzt ein Bluetooth-Paket Header 13 bis 15 Bytes, während nur 16 bis 18 Bytes Nutzdaten zur Verfügung stehen. Header und Trailer sind zwar für den Transport und die Zuordnung von Daten wichtig, jedes zusätzlich zu übertragende Bit benötigt jedoch Energie und reduziert den möglichen Datendurchsatz von Nutzdaten in einem drahtlosen Netzwerk.

An dieser Stelle soll anders als in den vorherigen Abschnitten 3.7.1 und 3.7.2, welche die Kommunikation unter Nutzung eines existierenden Protokolls betrachteten, nun eine neue, minimalisierte Art der Übertragung gezeigt werden. Auch wenn dieser Abschnitt den Titel "MAC-Protokoll"



**Bild 3.22:** Topologieanordnung des implementierten MAC-Protokolls für regelungstechnische Anwendungen

trägt und im Weiteren häufig von "MAC-Protokoll" gesprochen wird, geht es nicht darum ein neues Kommunikationsprotokoll zu entwickeln. Es soll vielmehr aufgezeigt werden, dass es möglich ist, mit bestehenden Funkstandards und der in dieser Arbeit implementierten Firmware, deutlich kürzere Kommunikationsintervalle und daher eine für Regelungssysteme vorteilhaftere Kommunikation zu erreichen, als dies mit den in den vorherigen Abschnitten betrachteten Funkprotokollen möglich war. Für diesen Ansatz wird eine möglichst einfache Netzwerkstruktur aufgebaut und diese wird auf Paketdurchsatz sowie im Hinblick auf den Einsatz im Regelkreis für Systeme optimiert, die eine hohe Dynamik besitzen und somit schnelle Abtastzeiten erfordern. Ein einfacher Regelkreis besteht aus einem oder mehreren Sensoren, aus einer Sollwert-Übermittlung sowie der eigentlichen Regeleinrichtung. Sollen ausschließlich Daten innerhalb des Regelkreises übermittelt werden, so eignet sich eine sternförmige Netzwerktopologie, wie sie in Bild 3.2b dargestellt ist. Nach IEEE 802.15.4 besteht ein derartiges Netzwerk aus einem Koordinator und mehreren Slaves, welches in Bild 3.22 veranschaulicht ist.

Dieses Bild zeigt die verwendete Art der Kommunikation, welche der vorgenommenen Implementierung zugrunde liegt. Als Mikrocontroller wird der Atmega256rfr2 verwendet und es kommen das mit diesem Mikrocontroller bestückte Koordinator Board aus Bild 2.7f sowie die Sensorknoten aus Bild 2.7e zum Einsatz. Das implementierte Kommunikationsprotokoll nutzt ausschließlich einen Kanal. Somit ist es möglich, bis zu j sich nicht gegenseitig störende und beeinflussende Inselnetzwerke im 2,4 GHz-Frequenzband mit  $j \in 1, ..., 16$  einzusetzen. Jedes j-te Netzwerk aus der Menge von maximal 16 Netzwerken kann aus  $n_j$  Knoten bestehen, wobei die Maximalzahl aufgrund der implementierten Datenstruktur auf 256-Knoten begrenzt ist. Alle Knoten können ausschließlich mit dem Koordinator kommunizieren, der sich direkt an der Regeleinrichtung befindet und somit besonders für lokale Regelkreise geeignet ist. Der Koordinator kommuniziert nur zum Zweck des Verbindungsaufbaus und des Adressaustauschs sowie der Zeitsynchronisierung mit den Knoten. Der Sollwert für die Regeleinrichtung kann entweder drahtgebunden von der Leitwarte an den Koordinator übermittelt werden oder ebenfalls drahtlos über einen Sollwertgeber-Knoten.

Da die implementierte Struktur ausschließlich Regelungsaufgaben dient, ist eine Netzwerkeinheit in sich geschlossen und in der derzeitigen Form nicht fähig, Diagnose oder Konfigurationsda-



Bild 3.23: Zeitslot-Verhalten bei der Übertragung innerhalb einer Netzwerkeinheit

ten zu übermitteln. Auch ist in dieser Netzwerkstruktur kein Routing erforderlich. Sollwerte- und Messwerte können direkt übertragen werden und es muss bekannt sein, welche Daten von welchem Knoten abgesendet wurden. Unter diesen Voraussetzungen ist es möglich, direkt auf dem Data-Link-Layer zu arbeiten und auf dieser Ebene die Messwerte und gegebenenfalls Sender-Informationen in ein Paket mit minimalem Header zu verpacken. Dadurch reduziert sich die Daten tenlast sehr stark, was einem deutlich kürzeren Übertragungsintervall zu Gute kommt. Dies ermöglicht es Druck-, Differenzdruck- und Durchflussregelungen mit einer großen Performance zu realisieren.

Das für diese Arbeit neu entwickelte Protokoll besitzt einen Header von 21 Bytes und es können maximal 2312 Bytes an Nutzdaten versendet werden. Für die Sollwert- und Messwertübermittelung werden 3 Bytes Nutzdaten versendet. Die Kommunikation im Netzwerk ist in einzelne Slots eingeteilt. Jeder Slot besitzt eine Länge von 5 ms. In jedem Slot kann genau ein einziger Übertragungsvorgang stattfinden. Durch den Koordinator wird bestimmt, welcher Netzwerkknoten in welchem Sendeslot Daten senden und empfangen darf. Jeder einzelne Knoten besitzt einen Timer, der über einen externen Quarz getaktet wird. Da die Quarze eine Abweichung von  $\pm 10$  ppm besitzen, ist eine regelmäßige Synchronisation seitens des Koordinators des Netzwerks notwendig. Dieser sendet periodisch im 10 s Takt (d.h. in den Zeitslots  $t_k = 0, 2000, 4000, \ldots$ ) ein Synchronisierungspaket an alle Netzwerkteilnehmer, die ihren Timer damit entsprechend anpassen. Somit ist sichergestellt, dass Sende- und Empfangsvorgänge immer aufeinander abgestimmt sind.

Damit einem Netzwerk im Betrieb weitere Knoten oder Knoten, deren Verbindung abgebrochen ist, beitreten können, existiert alle 10 s ein Zeitslot für Joining-Anfragen seitens des Slaves<sup>9</sup> und darauffolgend ein Zeitslot für Joining-Antworten seitens des Masters. Die Kommunikationsstruktur ist in Bild 3.23 anhand der Zeitslots für die Netzwerkteilnehmer  $v_{j,0}, v_{j,1}, v_{j,2}, \ldots, v_{j,n_j}$  für das *j*-te Netzwerk aus Bild 3.22 veranschaulicht. Der Koordinator des *j*-ten Netzwerks besitzt immer die Adresse 0, während die anderen Teilnehmer des Netzwerks nach der Anmeldereihenfolge am Koordinator fortlaufende Nummern zugewiesen bekommen.

Dem Koordinator ist bekannt, wie viele Teilnehmer im Netzwerk vorhanden sind und dementsprechend weist er jedem Teilnehmer einen Sendeslot zu, der sich nach dessen Adresse richtet. Somit sendet der Teilnehmer mit der Adresse 1 im ersten Zeitslot an den Master  $(v_{j,1} \rightarrow v_{j,0})$ ,

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Aufgrund des derzeit implementierten Joining-Verfahrens kann es vorkommen, das sich die Nachrichten zweier oder mehrerer Sensorknoten in einem Joining-Timeslot überlagern, wenn zwei oder mehr Sensorknoten innerhalb eines Zeitraums von 10 ms gestartet werden.

der Teilnehmer mit der Adresse 2 im zweiten Zeitslot  $(v_{j,2} \rightarrow v_{j,0})$  usw. bis zum  $n_j$ -ten Slot  $(v_{j,n_j} \rightarrow v_{j,0})$ . Danach ist der Teilnehmer mit der ersten Adresse wieder an der Reihe. Dieser Vorgang wiederholt sich kontinuierlich.

Eine Ausnahme bilden die Slots nach jeweils 10 s, denn in diesen Slots wird vom Koordinator ein Synchronisationspaket an alle Netzwerkteilnehmer gebroadcastet  $(v_{j,0} \rightarrow v_{j,i})$  mit  $i \in 1, 2, ..., n_j$ , das die Zeit des Koordinators sowie die aktuelle Zahl der Netzwerkteilnehmer umfasst. Dies ist auch der Grund dafür, dass beim Beitritt eines neuen Netzwerkteilnehmers bis zu zehn Sekunden benötigt werden, bis dieser mit allen anderen Netzwerkteilnehmern bekannt gemacht ist und einen eigenen Sendezeitslot zugewiesen bekommen hat. Weiterhin findet die Messwertaufzeichnung durch die Sensorknoten  $v_{j,1}, v_{j,2}, ..., v_{j,n_j}$  immer synchronisiert zu dem Zeitpunkt statt, zu dem Sensor  $v_{j,n_j}$  seinen Messwert abgesendet und bevor das Gerät  $v_{j,1}$ seinen Sendezeitslot zugewiesen bekommen hat.

Für eine Regelung, die das soeben vorgestellte Netzwerkkonzept nutzt, bedeutet dies, dass mittels der vorliegenden Implementierung alle 5 ms ein neuer Messwert dem Regler zur Verfügung steht, wenn genau eine Messgröße übertragen wird. Alle zehn Sekunden werden jedoch drei Zeitslots zur Synchronisierung der Zeitgeber im Funknetzwerk benötigt, was Paketausfällen gleichzusetzen ist. Werden zwei Messwerte übertragen, wie beispielsweise bei einer Differenzdruckregelung, so stehen alle 10 ms neue Messwerte zur Verfügung. Somit ergeben sich für Netzwerkeinheiten mit  $n_j$  Knoten Übertragungsintervalle von  $n_j \cdot 5$  ms. Es ist zu beachten, dass in jedem Oten bis 2ten Slot Messwertausfälle stattfinden, da diese vom Koordinator zur Übermittlung eines Synchronisierungspakets und für Joining-Vorgänge genutzt werden.

Diese Implementierung hat gegenüber den Protokollen Bluetooth und WirelessHART große Geschwindigkeitsvorteile, da aufgrund der deutlich niedrigeren Header- und Payload-Längen, der kleineren Netzwerkeinheiten und auch der überwiegend gerichteten Kommunikation vom Sensor zum Koordinator sehr kurze Übertragungsintervalle erreicht werden können. Jedoch ist die Übertragungsreichweite topologiebedingt stark eingeschränkt und hängt stark von der Einbaulage der Geräte ab. Weiterhin ist keine Redundanz bei der Übertragung aufgrund fehlender Routing-Eigenschaften der Netzknoten möglich. Im freien Feld können Daten bei guten Witterungsbedingungen zuverlässig bis zu 60 m übertragen werden. Im Raum liegen die Reichweiten bei 20 bis 30 m. Wichtig ist jedoch, dass metallische Gegenstände wie Rohre und Stahlträger, wie sie häufig in Produktionsanlagen zu finden sind, das Übertragungsverhalten stark beeinflussen, wie bereits am Anfang dieses Kapitels beschrieben wurde. Generell ist das soeben vorgestellte Kommunikationsprotokoll für alle geschlossenen Systeme gut geeignet, bei denen der Fokus darauf liegt, sie ausschließlich zur Übertragung von Messwerten innerhalb eines kleinen Areals zu nutzen. Für die in dieser Arbeit weiter hinten betrachteten lokalen Druck-, Durchfluss- und Differenzdruckregelungen bietet sich dieses Protokoll aus regelungstechnischer Sicht besonders gut an, da Sensoren und Aktoren meist nicht weit voneinander entfernt installiert sind.

Auch für dieses Übertragungssystem wurde dessen Leistungsfähigkeit wie bei den zuvor beschriebenen Protokollen getestet. Die Ergebnisse sind als Balkendiagramm in Bild 3.24 dargestellt. Anders als bei den Diagrammen aus den Bildern 3.14 und 3.21 werden im Bild 3.24 nicht die Paket-



Bild 3.24: Messung der Paketabstände in einem Netzwerk mit zwei Sensoren

laufzeiten dargestellt, sondern die zeitlichen Abstände zweier aufeinanderfolgender Pakete. Dabei handelt es sich um die Zeit, die ausgehend von der Ankunft des k-ten Pakets vergeht, bis das k + 1-te Paket vollständig eingetroffen ist. Da im betrachteten Netzwerk kein Routing vorhanden ist, ist zu jedem Zeitpunkt sichergestellt, dass ein Messwert innerhalb eines 5 ms Zeitslots vom Sender zum Empfänger gelangt. Würden für diese Netzwerkstruktur mit enorm kurzen Laufzeiten Laufzeitmessungen durchgeführt, so käme es bei den Auswertungen aufgrund der zur Verfügung stehenden messtechnischen Ausstattung zu Abweichungen von bis zu 4 ms vom tatsächlichen Wert.

Bei den durchgeführten Messungen werden zwei Sendeknoten verwendet, die ihre Messwerte gemäß Bild 3.22 und dem Verfahren aus Bild 3.23 abwechselnd an den Empfänger senden, der über die serielle Schnittstelle mit dem Rechner verbunden ist. Bei der Paketabstandsmessung entfallen außerdem konstant bleibende Fehler, die für alle Pakete zutreffen. Hierzu zählen vor allem Übertragungs- und Interrupt-Zeiten der Kommunikation zwischen Empfänger und Rechner. Die Kommunikation zwischen dem Empfänger und dem Rechner findet mittels UART über die serielle Schnittstelle statt. Es ist sehr wichtig den, der seriellen Schnittstelle zugeordnete COM-Port (Communication Port) des Rechners derart zu konfigurieren, dass bei Ankunft eines jeden Bytes der Übertragung spätestens nach 1 ms ein Interrupt ausgelöst wird. Standardmäßig sind diese Zeiten deutlich größer. Durch diese Einstellungen wird sichergestellt, dass ankommende Pakete einer eigens für diese Messung entwickelten Analysesoftware immer sehr zeitnah zur Verfügung stehen. Beide Sensorknoten senden in ihrem drei Byte umfassenden Payload, der an den Data-Link-Layer übergeben wird, ihre Geräteadresse und einen Wert, der mit jeder neuen zu versendenden Nachricht um eins inkrementiert wird. Dadurch konnten im Rahmen dieser Messung beim Empfänger Paketausfälle erkannt und ausgewertet werden. Auf der linken Seite von Bild 3.24 sind die Paketabstände der Pakete von Knoten 1 aufgetragen und auf der rechten Seite die von Knoten 2. Die der Auswertung zugrundeliegende Messung umfasste einen Zeitraum von 10 min. Da die Anzahl der Knoten zwei beträgt, kann somit alle 10 ms von jedem Knoten ein Paket übermittelt werden. Die durchgeführten Messungen zeigen, dass die meisten aufeinanderfolgenden Pakete einen Zeitabstand von genau 10 ms besitzen. Messtechnisch bedingt können jedoch Abweichungen von  $\pm 2$  ms auftreten.

Für Knoten 1 liegen 85,015 % und für Knoten 2 84,177 % der Pakete in diesem Bereich. Insgesamt hatten aufeinanderfolgende Pakete für Knoten 1 in 8,920 % der Messungen und für Knoten 2 in 8,863 % der durchgeführten Messungen einen kleineren oder größeren Abstand. Zu beachten ist, dass jeder Paketausfall einen größeren Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Paketen verursacht. Ausfälle von Paketen können durch die Synchronisierungsvorgänge zwischen dem Netzwerk-Koordinator und den Sensoren entstehen. Außerdem wurde die Firmware für die Mikrocontroller der Sensoren und dem Empfänger nur zu Testzwecken implementiert und an dieser Stelle besteht daher noch ein großer Optimierungs- und Verbesserungsbedarf. Die vorliegenden Messungen weisen eine Paketausfallquote von 6,065 % für Knoten 1 und 6,960 % für Knoten 2 auf.

Zusammenfassend zeigen die Messergebnisse, dass bei Funknetzwerken generell eine deterministische Übertragung im unteren ein- oder zweistelligen Millisekunden-Bereich möglich ist, auch wenn heutige kommerzielle Produkte wie WirelessHART oder Bluetooth LE nur minimale Zeitintervalle von über 100 ms abdecken, wie in den Abschnitten 3.7.1 und 3.7.2 gezeigt wurde. Generell lässt sich das entworfene Übertragungsverfahren nach einigen weiteren Verbesserungen und Optimierungen hervorragend für lokale Regelkreise einsetzen. Nachdem die in dieser Arbeit verwendeten, angepassten und entworfenen Protokolle und Kommunikationsabläufe vorgestellt wurden und deren Funktechnologien allesamt im gleichen Frequenzband operieren, wird im folgenden Abschnitt ein Überblick zum Frequenzbandmanagement im 2,4 GHz-Band gegeben.

## 3.8 Frequenzmanagement und Koexistenz von drahtlosen Netzwerken

In den vorherigen Abschnitten wurden ausführlich die gängigsten Funkstandards sowie die von ihnen genutzten Frequenzbänder beschrieben. Allen betrachteten Standards ist gemein, dass sie sich das 2,4 GHz-ISM Band teilen. Diese Funkstandards bilden die Basis für eine Vielzahl von Protokollen, von denen ebenfalls einige der wichtigsten, wie WirelessHART, Bluetooth, WLAN oder das implementierte MAC-Protokoll vorgestellt wurden. Die vorgestellten Standards und die darauf basierenden Protokolle teilen sich mindestens einen gemeinsamen Frequenzbereich. Anders als bei kabelgebundenen Systemen sind bei drahtlosen Übertragungsstrecken die zur Verfügung stehenden Ressourcen physikalisch begrenzt.

Bei kabelgebundenen Systemen ist es sehr einfach möglich, Ressourcen durch die Verlegung zusätzlicher Übertragungsleiter zu erhöhen. Bei drahtlosen Systemen mit vorgegebenen Standards ist



Bild 3.25: Darstellung der Frequenznutzung verschiedener Protokolle im 2,4 GHz Frequenzband

dies nicht der Fall. Die Folgen davon sind, dass es grundlegend wichtig ist, die Frequenzressourcen so zu planen, dass Engpässe bei der Übertragung und Interferenzen unterschiedlicher Protokolle, die den gleichen Frequenzbereich nutzen und sich die gleiche Umgebung teilen, vermieden werden. Dies kann einerseits durch Zuweisung von Kommunikationskanälen für jede Netzwerkeinheit erfolgen, soweit es vom entsprechenden Protokoll unterstützt wird. Andererseits besteht die Möglichkeit, in bestimmten Arealen, wie Firmengeländen, die Nutzung ausschließlich eines Funkprotokolls mit einer oder mehreren nicht interferierenden Netzwerkeinheiten zuzulassen. Allerdings muss bei diesen Punkten immer sichergestellt sein, dass zu den regulierten Bereichen keine anderweitigen drahtlosen Kommunikationsmedien und -technologien, wie Mobiltelefone, Tablets oder anderweitige Funkquellen Zugang besitzen.

Bezüglich der Frequenzplanung gibt dieser Abschnitt einen kurzen Überblick darüber, welches Protokoll bzw. welche Technologien welche Frequenzen nutzen und wie die Anordnung der Kanäle in diesen Frequenzbereichen ist. Die Kenntnis über die Anordnung der Kanäle ist elementar für eine gezielte Zuweisung bzw. Sperrung von Funkkanälen für bestimmte Funkkommunikationen.

In Bild 3.25 sind die drei wichtigsten Funktechnologien mit ihren genutzten Frequenzen, deren Kanalbreite und ihrer Kanalanordnung dargestellt. WLAN (IEEE 802.11g) besitzt insgesamt 13 Kanäle, die jeweils 22 MHz breit sind und sich überlagern. Damit sich mehrere im gleichen Areal betriebene WLAN-Netze nicht stören, werden häufig nur die Kanäle 1, 6 und 11 belegt. Neuere WLAN-Installationen nutzen vermehrt das 5 GHz-Frequenzband. Obiges Bild zeigt auch, dass zwischen den Kanälen 1, 6 und 11 von WLAN bestimmte Frequenzbereiche ungenutzt sind. Diese können somit bei einer starken Frequentierung des 2,4 GHz-Bandes von den Funktechnologien Bluetooth, Bluetooth LE und einem auf IEEE 802.15.4 basierenden Protokoll verwendet werden.

Bluetooth verwendet grundsätzlich 79 Kanäle, die jeweils 1 MHz breit sind. Hiervon können beim Betrieb von WLAN auf den Kanälen 1, 6 und 11 nach Messungen aus [61, S. 6] mindestens 23 Kanäle störungsfrei genutzt werden. Da jedoch Bluetooth BR/EDR jede Sekunde 1600-Mal

den Frequenzkanal wechselt, kommt es zwangsläufig zu Kollisionen, falls Übertragungsvorgänge in WLAN-Netzen und dem Bluetooth-Netz kollidieren bzw. es treten große Verzögerungen und somit eine starke Abschwächung der Bandbreiten auf. Es ist zwar denkbar, nur bestimmte, störungsfreie Kanäle zu nutzen, aber bei den meisten auf dem Markt erhältlichen Bluetooth BR/EDR-Geräten wird dies nicht realisiert. Das gleiche Problem wie bei Bluetooth BR/EDR tritt auch bei Bluetooth Low Energy auf. Bluetooth LE nutzt 40 Kanäle, die jeweils 2 MHz breit sind. Die Kanalnummern 37, 38 und 39 werden für Advertising Zwecke verwendet und sind derart angeordnet, dass es mit Kommunikationsvorgängen im WLAN-Netzwerk zu keinen Kollisionen kommen kann. Allerdings nutzt auch Bluetooth LE das Frequenzsprungverfahren, welches beim Parallelbetrieb mit dem WLAN-Netzwerk und gleichzeitiger Kommunikation beider Technologien im gleichen Frequenzbereich zu Kollisionen von Paketen führen kann.

Der IEEE 802.15.4 Standard besitzt im 2,4 GHz-Frequenzband 16 Kanäle, die jeweils einen Abstand von 5 MHz haben und 2 MHz breit sind. Mit WLAN können sowohl der Kanal 15, 20, 25 als auch 26 koexistieren, wobei dem Kanal 26 in der Praxis nur wenig Bedeutung zukommt, da er nicht weltweit zur Verfügung steht. Durch den IEEE 802.15.4 Standard ist es möglich, ein Kanal-Blacklisting<sup>10</sup> durchzuführen, welches beispielsweise von den Protokollen WirelessHART und ISA100.11a aktiv genutzt werden kann. Dadurch steht zwar eine geringere Übertragungsbandbreite zur Verfügung, aber es kann vermieden werden, dass es zu großen Sendeverzögerungen durch die Kollisionen kommen kann. Auch wenn generell ein Blacklisting von Kanälen zulässig ist, so gibt es jedoch Regeln, wie beispielsweise [21], die angeben, wie viele Kanäle in welchem Frequenzbereich und unter welchen Bedingungen zum Betrieb einer Funkkommunikation mindestens zur Verfügung stehen müssen.

Bild 3.25 zeigt, dass es generell möglich ist, Frequenzen zu planen und somit die Koexistenz verschiedener Funktechnologien zu gewährleisten. Bei gängigen Hardwarekomponenten von WLAN lassen sich aus Anwendersicht Funkkanäle manuell einstellen. Auch bei dem in dieser Arbeit betrachteten WirelessHART-Protokoll und bei ISA100.11a ist es möglich, entweder alle Funkkanäle zu nutzen oder nur bestimmte Funkkanäle auszuwählen, die störungsfrei sind oder für den Betrieb des Netzwerks zugelassen werden sollen. Somit können sowohl WirelessHART, ISA 100.11a und WLAN durch ein gezieltes Management miteinander im 2,4 GHz-Frequenzband koexistieren, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Bei Bluetooth ist dies jedoch derzeit bei den meisten Geräten aus Anwendersicht nicht möglich, da bei Bluetooth bisher der Fokus auf Plug & Play Betrieb ohne schwierige und aufwendige Konfigurationsvorgänge liegt. Anwender müssen sich an dieser Stelle auf die Hersteller von Bluetooth-Komponenten verlassen, dass diese geeignete Verfahren zum automatischen Kanal-Blacklisting implementiert haben. Da dies jedoch einen erheblichen Entwicklungsaufwand bedeutet, wird es nur selten bei preislich günstigen Bluetooth-Produkten umgesetzt. Außerdem wurden bisher mit Bluetooth hauptsächlich Punkt-zu-Punkt-Verbindungen aufgebaut, bei denen Master und Slave in nächster Nähe positioniert sind und über diese Verbindung gewünschte Informationen übermitteln.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Unter **Kanal-Blacklisting** ist das sperren eines einzelnen oder mehreren, von einem Funkstandard genutzten, Funkkanälen innerhalb eines Frequenzbandes zu verstehen, um entweder Störungen auf Kanälen zu umgehen oder ein gezieltes Funkkanalmanagement zu betreiben.

Bisher waren auch die Reichweiten und Signalstärken von Bluetooth recht gering. Mit der Weiterentwicklung von Bluetooth, den Einstieg in neue Anwendungsszenarien und damit bedingt der Entwicklung neuer leistungsstärkerer Hardware-Komponenten werden von Bluetooth zum einen die Sendeleistungen erhöht und zum anderen auch der Einfluss und die Störwirkung von Bluetooth auf andere Funktechnologien gesteigert. Deshalb wird in Zukunft, insbesondere im Zusammenhang mit Bluetooth Mesh und dem dadurch begünstigten Einsatz von Bluetooth für industrielle Anwendungsgebiete sowie die Nutzung von Bluetooth in IoT-Geräten, dem Funkkanalmanagement bei Bluetooth-Geräten eine erhebliche Bedeutung zukommen.

## 3.9 Vergleich der vorgestellten Protokolle

In den Arbeiten [92], [93] und [91] wurden bereits ausführlich die Vor- und Nachteile von WirelessHART und Bluetooth behandelt. In diesem Abschnitt sollen die Protokolle WirelessHART, Bluetooth BR/EDR, Bluetooth LE und das in Abschnitt 3.7.3 vorgestellte MAC-Protokoll anhand von Erfahrungen aus den durchgeführten Untersuchungen verglichen und eine kurze Wertung durchgeführt werden. Tabelle 3.5 zeigt eine Gegenüberstellung der Stärken und Schwächen der in dieser Arbeit untersuchten Protokolle in ausgewählten Bereichen. Für die Angabe von Werten in der Tabelle wurde ein Referenznetzwerk, bestehend aus zwei Sensorknoten, dem Koordinator und einem Empfängerknoten für die übertragenen Messwerte verwendet. Eine Ausnahme bildet das MAC-Protokoll, welches keinen Empfängerknoten nutzt, da sich aufgrund des Protokolldesigns und damit der Optimierung auf lokale Regelkreise der Koordinator immer an der Regeleinrichtung befindet.

Bei WirelessHART ist durch dessen Maschentopologie eine weite räumliche Ausdehnung möglich, wodurch viele Teilnehmer an einem Netzwerk teilhaben können und gleichzeitig entsteht durch diese Topologie eine Redundanz bei der Paketübertragung und damit eine Robustheit gegenüber Störungen. Dies ist bei Bluetooth eine Schwachstelle. Bluetooth ist zunächst einmal auf Piconetze begrenzt, welche zwar, wie in Abschnitt 3.7.2 beschrieben, über ihre Grenzen hinweg zu einem Scatternet formiert werden können, allerdings wird mit ihrer Größe ein Routing aufwendiger und die Auslastung einzelner Geräte nimmt stark zu. Außerdem ist Bluetooth aufgrund seiner Sterntopologie innerhalb eines Piconetzes deutlich anfälliger gegenüber Störungen. Bei Bluetooth Low Energy ist die Ausdehnung des Netzwerkes gemäß der Spezifikation noch weiter eingeschränkt, da es ausschließlich in einer Sterntopologie betrieben werden kann. Diese Schwachstelle wird jedoch durch die kürzlich veröffentlichten Zusatzdokumente über Bluetooth-Mesh zur Spezifikation 5.0 voraussichtlich ausgeglichen. Das implementierte MAC-Protokoll lässt aufgrund seiner Optimierung bezüglich der zu übertragenden Datenmengen derzeit keine Ausdehnung zu. Die sichere Reichweite bei Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger ist auf etwa 30 m begrenzt. Eine Anpassung des Protokolls auf Multi-Hop-Netzwerke und Maschentopologien ist vorstellbar, erhöht jedoch die Header-Datenmenge aufgrund der Notwendigkeit von höheren Schichten aus dem OSI-Modell, die ein Routing zulassen. Außerdem würde zusätzlicher Datenverkehr, bedingt durch das Netzwerkmanagement, in einer vermaschten Topologie entstehen, wodurch das eigentliche Ziel dieses Protokolls der kurzen Übertragungsintervalle zwischen aufeinanderfolgen-

Kategorie	WirelessHART	$egin{array}{c} { m Bluetooth} \ { m BR/EDR} \end{array}$	Bluetooth LE	MAC-Protokoll
Mögliche Spannweite	einige km	mehrere $100\mathrm{m}$	$7~{\rm bis}~100{\rm m}$	$7~{\rm bis}~100{\rm m}$
Minimale Burstintervalle	$2\mathrm{s}$	$100\mathrm{ms}$	$100\mathrm{ms}$	$10\mathrm{ms}$
Min. Zeitkonstante eines dyn. Systems	$> 20\mathrm{s}$	$> 500 \mathrm{ms}$	$> 500 \mathrm{ms}$	$> 40 \mathrm{ms}$
Eignung lokale Regelkreise	schlecht, keine deterministische Downlinkübertragung	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Mehrere Regelkreise pro Netzwerk	Ja	Ja	bedingt	Nein
Handhabung / Implementierung	einfach	mittel schwierig	mittel schwierig	Expertenwissen
Netzwerkorganisation	starr / zentral	flexibel	flexibel	sehr flexibel
Anschaffungskosten	hoch	niedrig	niedrig	niedrig
Sicherheit	sehr gut	mittel	mittel	möglich
Störanfälligkeit	niedrig	hoch	hoch	sehr hoch
Konnektivität zu mobilen Geräten	aufwendig	sehr einfach	sehr einfach	aufwendig

Tabelle 3.5: Ve	ergleich der untersuchten Protokolle WirelessHART, Bluetooth BR/EDR, Bluetoo	th
LE und das MA	AC-Protokoll	

den Messwerten nicht mehr erreicht werden würde. Kurze Übertragungsintervalle im Zusammenhang mit lokalen Anlagenreglern ist eine große Stärke des implementierten MAC-Protokolls.

Für WirelessHART gibt es komplett fertige Produkte am Markt, während für Bluetooth häufig erst Dienste und Anwendungen auf einem Mikrocontroller implementiert werden müssen. Hierfür muss entsprechendes Knowhow vorhanden sein. Dies ist allerdings kein Nachteil, da hierdurch im Vergleich zu WirelessHART eine große Flexibilität bei Entwicklungsaufgaben sowie für die unterschiedlichsten Anwendungszwecke geboten wird. Der Gestaltungsspielraum umfasst ein sehr großes Spektrum. Hersteller von Bluetooth Hardwarekomponenten bieten den Basis-Stack an und der Anwender implementiert seine gewünschten Dienste, wie dies auch in dieser Arbeit durch den in Abschnitt 3.7.2 vorgestellten Dienst für regelungstechnische Anwendungen geschehen ist. Dies ist bei WirelessHART nicht gegeben, da hier alle bisher am Markt befindlichen Produkte geschlossene Systeme darstellen, die nahezu keinerlei Anpassungs- und Optimierungsspielraum bieten. Dafür kann WirelessHART nahezu ohne zusätzliches Fachwissen, außer der Kenntnisse über Schnittstellen und Kommunikationsprinzipien, in Produkte integriert werden. Die MAC-Layer Kommunikation ist mit WirelessHART und Bluetooth nicht vergleichbar, da der Fokus in dieser Arbeit ausschließlich auf der Realisierung eines möglichst kurzen Übertragungsintervalls lag. Somit muss bei der Entwicklung direkt auf der untersten Softwareebene, dem MAC-Layer, angesetzt werden und alle Kommunikationsregeln des Protokolls sind vom Entwickler zu entwerfen.

Bezüglich der Netzwerkorganisation ist bei WirelessHART alles starr und zentral vorgegeben, außerdem sind derzeitige Module sehr teuer<sup>11</sup> in ihrer Anschaffung und unterstützen keine deterministische Downlink- oder Device-to-Device-Kommunikation, was sie unattraktiv für lokale Prozessregelungen macht. Darüber hinaus können in einem Regelkreis, der WirelessHART als Übertragungsprotokoll für Messwerte nutzt, nur sehr große Abtastzeiten realisiert werden, wodurch sich die Verwendung von WirelessHART aus regelungstechnischer Sicht vornehmlich für Systeme mit einer geringen Dynamik (>  $20 \, \text{s}$ ), wie Temperaturregelungen oder den meisten Füllstandsregelungen anbietet. Bei Bluetooth kann die Netzwerkorganisation bei einer Vielzahl von Mikrocontrollern selbst gestaltet sowie eine Vielzahl von Parametern angepasst werden und bietet, auch durch die Formierung von Scatternets, eine große Flexibilität und viele, auf bestimmte Anwendungen angepasste Verwendungsmöglichkeiten. Durch die umfangreichen Implementierungsmöglichkeiten eignet sich Bluetooth aus regelungstechnischer Sicht auch für Systeme, welche eine mittlere Dynamik besitzen, die theoretisch größer als 50 ms sind. Im Praktischen hat sich jedoch für Bluetooth LE eine Zeit von > 500 ms ergeben. Auch für Bluetooth LE treffen die für Bluetooth beschriebenen Eigenschaften bis auf die Formation von Scatternets zu. Außerdem sind Bluetooth-Module im Vergleich zu WirelessHART kostengünstig in ihrer Anschaffung. Allerdings führt die Umsetzung von Bluetooth auch dazu, dass jeder Hersteller seine proprietären Dienste entwickelt und sich Geräte unterschiedlicher Hersteller nur verständigen können, wenn diese sich auf eine einheitliche Implementierung von Schnittstellen und Kommunikationsregeln verständigt haben. Mit der in dieser Arbeit implementierten MAC-Kommunikation ist eine große Flexibilität in der Gestaltung der Kommunikationsabläufe gegeben, sie eignet sich, übertragen auf obiges Referenzsystem, sehr gut zur Regelung von dynamischen Systemen mit Zeitkonstanten bis zu minimal 40 ms. Hardwarekomponenten, auf denen das verwendete MAC-Protokoll implementiert werden kann, sind günstig in ihrer Anschaffung.

Hinsichtlich der Sicherheit bietet WirelessHART Vorteile, da sich jeder Netzwerkteilnehmer durch eindeutige Keys authentifizieren muss, welche bei der initialen Konfiguration eines Knotens zusammen mit der Netzwerk ID manuell über eine Kabelverbindung eingetragen werden müssen. Diese Authentifizierungsschlüssel werden von einem zentralen Sicherheitsmanager geprüft und erst, wenn die Keys der Netzwerkteilnehmer mit den vom Sicherheitsmanager erwarteten Keys übereinstimmen, können sich neue Geräte mit dem Netzwerk verbinden. Weiterhin wird die komplette Funkkommunikation mit AES-128 verschlüsselt durchgeführt. Obwohl auch Bluetooth eine sichere Kommunikation zulässt, so ist es in der Pairing-Phase mittels entsprechender Ausrüstung angreifbar, wie in Abschnitt 3.7.2 beschrieben wurde. Es ist jedoch möglich, die Sicherheit durch Zusatzimplementierungen auf höherer Ebene wie im genutzten Bluetooth-Service zu erhöhen. Beim MAC-Protokoll findet derzeit keine Verschlüsselung bei der Kommunikation und ebenfalls keine Authentifizierung bei der Anmeldung von neuen Netzwerkknoten am Koordinator statt. Es lassen sich jedoch problemlos Sicherheitsmechanismen auf dem Mikrocontroller implementieren. Auch bezüglich Störanfälligkeit und Kollisionen bietet WirelessHART Vorteile

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Unter der Voraussetzung, dass keine Eigenimplementierung von WirelessHART vorgenommen wird. Eine Eigenimplementierung von WirelessHART ist jedoch verglichen mit der vorgestellten Bluetooth-Kommunikation und dem MAC-Protokoll aufgrund dessen Komplexität mit deutlich höherem Aufwand verbunden, weshalb dieser Punkt bei der Kostenbetrachtung vernachlässigt wird.

durch sein Frequenz-, bzw. Kanalmanagement und Kanal-Blacklisting. Bluetooth hingegen führt ständige Wechsel des Sendekanals durch. Dies kann leicht zu Kollisionen mit anderen Bluetooth-Netzwerken oder Piconetzen bzw. der Kommunikation anderer Netzwerkprotokolle führen. Die Störanfälligkeit des MAC-Protokolls ist derzeit sehr hoch, falls andere Funktechnologien den gleichen Kanal nutzen, da immer nur ein einziger Kanal für ein Netzwerk zum Senden und Empfangen von Daten verwendet wird. An dieser Stelle können jedoch auch durch die Implementierung einer dynamischen Kanalauswahl Verbesserungen erzielt werden.

Durch die neuen Entwicklungsschwerpunkte zur Industrie 4.0 und dem IoT nimmt auch die Konnektivität von Funktechnologien zu mobilen Geräten, wie Mobiltelefonen und Tablets eine immer größere Bedeutung ein. Sowohl WLAN als auch Bluetooth haben eine weite Verbreitung in den meisten mobilen Geräten. Daher ist es einfach möglich, sich mit bestehenden WLAN oder Bluetooth-Netzwerken zu verbinden. WirelessHART und das MAC-Protokoll bieten diese Möglichkeiten zunächst nicht. Hierfür ist ein gesonderter Protokollwandler notwendig.

Wie sich in diesem Abschnitt gezeigt hat, besitzt jedes der betrachteten Protokolle Vor- und Nachteile. Es kann nicht abschließend gewertet werden, welches Protokoll das leistungsfähigste ist, sondern dies hängt vielmehr vom Verwendungszweck ab. Für den Einsatz im Regelkreis für Systeme mit einer sehr langsamen Dynamik sind alle vorgestellten Protokolle geeignet. Sollen Regelungen für Systeme entworfen werden, welche eine schnelle Dynamik besitzen, so bietet sich das MAC-Protokoll an. Dieses wiederum ist aufgrund seiner begrenzten Topologie-Spannweite für viele Industrie 4.0 Anwendungen nicht geeignet. An dieser Stelle zeigen WirelessHART und Bluetooth Mesh wiederum ihre Stärken. Je nach Anwendungszweck ist auch eine Kombination aus verschiedenen Protokollen denkbar. An dieser Stelle ist es jedoch wieder eine der Herausforderungen, dass - wie im Konzeptpapier zur Industrie 4.0 [43] beschrieben - Kommunikationsmedien einheitliche Schnittstellen besitzen sollen, um eine technologieübergreifende Interoperabilität zu gewährleisten. Nachdem sich dieses Kapitel mit den für diese Arbeit relevanten Übertragungsprotokollen und deren Eignung für regelungstechnische Anwendungen beschäftigt hat, widmet sich das nachfolgende Kapitel der Simulation von geregelten, dynamischen Systemen, deren Regelkreise eines der soeben vorgestellten Übertragungsprotokolle zur Übermittlung von Mess- oder/und Sollwerten nutzen.

# 4 Simulation von drahtlosen Übertragungsnetzwerken

Beim Entwurf von Regelungen bildet die Simulation von dynamischen Systemen in Kombination mit einem passenden Regelungsverfahren eine wichtige Grundlage. Dadurch soll anhand des mathematischen Modells eines physikalischen Systems geprüft und sichergestellt werden, dass ein Regler die an ihn gestellten Anforderungen erfüllt. Durch Simulation können Regelungsentwürfe kurzfristig und kostengünstig erprobt, verbessert und optimiert werden. Ein in der Regelungstechnik weit verbreitetes Tool ist hierbei MATLAB/Simulink. Mit diesem können zwar dynamische Systeme einfach erstellt werden, aber bei komplexeren Netzwerkprotokollen, wie z.B. Wireless-HART und ISA100.11a, stehen keine geeigneten intuitiven Methoden zur Verfügung, eine realistische Simulation aufzubauen, welche auch das Netzwerkmanagement und das Verhalten einzelner Netzwerkknoten berücksichtigt. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit stellt MATLAB ausschließlich eine Toolbox zur Simulation von WLAN-Übertragungen zur Verfügung. Allerdings unterscheidet sich WLAN in seinem Verhalten sehr stark von WirelessHART, weshalb es im Rahmen dieser Arbeit notwendig war, eine Simulationsumgebung zu finden, welche die parallele Simulation eines dynamischen Systems in Kombination mit der Simulation des Netzwerkverhaltens bei der Übertragung von Messwerten ermöglicht.

Während der Simulation ist es erforderlich, dass beide Simulationsumgebungen einen ständigen und auf die Simulationszeit abgestimmten Datenaustausch durchführen. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit Simulationsumgebungen, die Regelkreise mit drahtloser Rückführung simulieren können. Hierzu wird zunächst eine anhand dieser Arbeit definierte und allgemeine Vorgehensweise für den Entwurf von Reglern für Systeme vorgestellt, die drahtlose Kommunikationsmedien zur Übertragung von Mess- und Stellgrößen im geschlossenen Regelkreis nutzen. Daraufhin wird eine Einführung in die derzeit am Markt befindlichen Netzwerksimulatoren gegeben und es wird der Aufbau einer Simulationsumgebung für das WirelessHART-Protokoll mit dem ns-2 Simulator beschrieben.

Die bisherige Vorgehensweise bei klassischen, drahtgebundenen Übertragungssystemen ist, dass Regler häufig direkt an Versuchsständen oder an realer Hardware implementiert und getestet werden, nachdem sie erfolgreich simuliert wurden. Die Nutzung realer Hardware setzt voraus, dass die gesamte Anlage oder der Versuchsstand aufgebaut und somit vorhanden sind und alle notwendigen Softwarekomponenten bereits in ihrer Version für den Betrieb des betrachteten Systems implementiert sind. Dies bedeutet in der Praxis einen großen zeitlichen Aufwand, somit hohe Kosten und birgt Risiken, insbesondere bei komplexen Systemen, die ein drahtloses Netzwerk zur Übertragung von Informationen wie Mess- und Stellgrößen nutzen. Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, spielen bei diesen Systemen nicht deterministisches Verhalten, Paketausfälle, Störungen durch Umgebungseinflüsse, variable Totzeiten und Verarbeitungszeiten, z.B. durch Konvertierung von Daten oder der Übergabe von Daten an Schnittstellen, eine wichtige Rolle.

Zur effizienten Entwicklung ist es sinnvoll, bei der Auslegung und Untersuchung von Reglern schrittweise vorzugehen. Von der anfänglich reinen Simulation des betrachteten Systems werden schließlich Teilsysteme und -komponenten gebildet. Die Komponenten, deren Verhalten die größte Wirkung auf das System besitzt, werden real aufgebaut. Hierzu bietet sich eine Hardware-inthe-Loop-Simulation an. Bei dieser Simulationsart werden die realen Komponenten des Systems über Kommunikationsschnittstellen zum Datenaustausch in die Simulationsumgebung eingebunden. Alle übrigen Elemente eines Systems werden weiterhin durch Simulation abgebildet. Bei einem System, das ein drahtloses Netzwerk zur Übertragung von Mess- und Stellgrößen nutzt, ist es sinnvoll, nur das Netzwerk real zu betrachten und sowohl das zu regelnde System als auch den eigentlichen Regler rein durch Simulation nachzubilden. Dadurch wird es zunächst ermöglicht, den Regler so anzupassen, dass er unter Verwendung des realen Netzwerkes und des Systems als Modell eine gute Leistung erzielt. Außerdem bedeutet dies eine große Zeitersparnis, da nicht für jeden Test ein Versuchsstand oder eine Anlage in Betrieb genommen werden muss. Weiterhin wird dadurch verhindert, dass bei Produktionsanlagen unnötig in den laufenden Prozess eingegriffen werden muss. Mit dem realen Netzwerk und dem modellierten System ist es nun einfach möglich, einen Regler zu entwerfen. Je genauer das Modell des Systems, umso besser ist die später am realen System zu erwartende Regelgüte. In der vorliegenden Arbeit wurde die soeben beschriebene Hardware-in-the-Loop Simulation für das Übertragungsprotokoll WirelessHART realisiert und ihre Implementierung wird in Abschnitt 4.4 vorgestellt. Zunächst werden jedoch in den folgenden Abschnitten zum einen ein Vorgehen zum simulationsbasierten Reglerentwurf für Funkübertragungssysteme und zum anderen die heute weit verbreiteten Netzwerksimulatoren vorgestellt.

## 4.1 Simulationsgestützer Reglerentwurf

In Bild 4.1 ist das in dieser Arbeit ermittelte Vorgehen zum simulationsgestützten Reglerentwurf für dynamische Systeme, die ein drahtloses Übertragungsnetzwerk zur Übermittlung von Messund/oder Stellgrößen nutzen, in acht Schritte untergliedert. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die im Simulator vorhandenen Modelle der Funkwellenausbreitung bereits getestet sind und die im Simulationsmodell vorgegebenen Umgebungsbedingungen zuverlässige Werte liefern. Die Schritte 1 und 2 müssen nur dann durchgeführt werden, wenn das verwendete Simulationstool keine getesteten Softwareelemente zur Nachbildung einer Netzwerktechnologie mit dem betrachteten Übertragungsprotokoll umfasst. In Schritt 1 wird an dieser Stelle ein Simulationstool für das Netzwerk im Simulator integriert, an diesen angepasst oder erstellt und im darauffolgenden Schritt 2 mit einem realen Netzwerkaufbau validiert. Bei der Validierung sind die Ergebnisse einer Simulation des Netzwerks mit einer Messung an einem realen Netzwerkaufbau zu überprüfen und gegebenenfalls bei großen Abweichungen Anpassungen an der Simulationsumgebung des Netzwerks oder der Parametrierung durchzuführen. Geeignete Signale für die Bestimmung von Latenz und Übertragungsverhalten sind kontinuierliche Sinus- oder Sägezahn-Signale, die vom Sensorknoten zum Empfängerknoten übermittelt werden. Es wird solange zwischen den Schritten 1 und



Bild 4.1: Schritte zur Auslegung eines Funknetzwerk basierten Regelungssystems

2 iteriert bis der Vergleich zwischen realem und simuliertem Netzwerkprotokoll zufriedenstellende Ergebnisse liefert.

Für erste Validierungsversuche bieten sich am besten Übertragungen im Freiraum ohne Hindernisse zwischen den einzelnen Sende- und Empfangsknoten an. Bei Multi-Hop-Verbindungen muss auf jeder Teilstrecke zwischen ihren Sende- und Empfangsknoten eine freie Übertragungsstrecke vorhanden sein. Werden Funknetzwerke in Räumen mit Hindernissen betrieben, so ist es notwendig, auch diese zu simulieren und mit den realen Versuchsaufbauten zu vergleichen. Auch Stahlträger, Rohrleitungen und Gitter, wie sie beispielsweise in großem Umfang in verfahrenstechnischen Anlagen vorkommen, haben entscheidenden Einfluss und müssen deshalb aus topologischer Sicht möglichst genau modelliert und mit dem realen Verhalten abgeglichen werden.

In Schritt 3, nachdem das zu betrachtende Netzwerk entsprechend der Realität simuliert werden kann, muss nun das Modell des dynamischen Systems erstellt werden, für das ein Regler entworfen werden soll. Hierfür können die aus der Regelungstechnik verbreiteten Methoden verwendet werden. Nachdem das Netzwerkverhalten simuliert und das Modell des zu regelnden Systems vorhanden ist, kann aus den Erfahrungswerten der Paketlaufzeiten, der Leistungsfähigkeit des simulierten Netzwerks sowie der Eigenschaften des dynamischen Systems in Schritt 4 ein passendes Regelungsverfahren ausgewählt und mittels dieses Verfahrens ein Regler für das dynamische System mit Netzwerk entworfen werden. In diesem Regler müssen insbesondere die Erfahrungswerte hinsichtlich des Übertragungsverhaltens und der -totzeiten sowie deren zeitliche Schwankungen im Netzwerk aus den Schritten 1 und 2 berücksichtigt werden.

Nach Auslegung des Reglers in Schritt 4 sind in Schritt 5 ausführliche Tests durch Simulation für das Zusammenspiel zwischen Regler, dynamischem System und dem Übertragungsnetzwerk durchzuführen. Für das Modell eines dynamischen Systems gilt, dass es über einen längeren Zeit-
raum ein immer ähnliches Verhalten aufweist. Anders ist dies bei einem drahtlosen Netzwerk, dessen Verhaltensweisen sich durch jeden neuen Verbindungsaufbau und jede neue Netzwerkorganisation oder bei Änderung der Umgebungsbedingungen stark verändern kann. Auch Erweiterungen und Topologieänderungen im Betrieb führen zu entscheidenden Änderungen der Latenzen und der Übertragungswege. Je genauer das Simulationsmodell des Netzwerkprotokolls mit dem auf der realen Hardware implementierten Protokoll übereinstimmt, umso genauer entspricht die Verhaltensweise des simulierten Netzwerks der Verhaltensweise des realen Netzwerks. Bei den Simulationen sollte darauf geachtet werden, dass sowohl Worst-Case-Situationen, mögliche zukünftige Änderungen an der Topologie, als auch zeitweise Wartungseingriffe an Anlagenkomponenten, welche ebenfalls die Aufgaben eines Knotens des Netzwerks übernehmen, berücksichtigt werden. Zusätzlich ist die Robustheit des Netzwerks und des Reglers beim Ausfall einzelner Knoten zu betrachten.

Nachdem im 5-ten Schritt alle Funktionsprüfungen rein durch Simulation durchgeführt wurden, bietet es sich in Schritt 6 an, eine Hardware-in-the-Loop-Simulation durchzuführen, bei der der Regler und der betrachtete Prozess rein virtuell als Modell laufen, aber das Netzwerk bereits (soweit wie möglich) unter Einsatzbedingungen installiert ist. Bei einem oder zwei Sensoren ist dieser Schritt noch recht einfach zu bewerkstelligen, bei einer Vielzahl von Sensoren bedeutet dieser Schritt einen großen Aufwand und kann bei einem sehr zuverlässigen und den Umgebungsbedingungen angepassten Simulationsmodell entfallen. In diesem Schritt kann bei einer komplett neuen Netzwerkinstallation überprüft werden, ob die Simulationsmodelle der Umgebungsbedingungen einer Anlage zuverlässig sind. Bei einer Netzwerkerweiterung sollten die Umgebungsbedingungen bereits bei früheren HiL-Simulationen geprüft sein, aber es können in dieser Situation das Zusammenspiel und die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Datenströmen im drahtlosen Netzwerk betrachtet und somit insbesondere die Wirkungen auf die im Netzwerk betriebenen Regler geprüft werden. Schließlich sind im Schritt 7 Extremsituationen, wie Paketausfälle und Verbindungsabbrüche und deren Wirkungsweise zu testen sowie die Reaktionen der Regeleinrichtungen darauf. Der letzte Schritt 8 beinhaltet nach allen vorangegangenen erfolgreichen Tests schließlich die Inbetriebnahme des Funknetzwerks für den produktiven und zuverlässigen Einsatz.

### 4.2 Netzwerksimulatoren

Netzwerksimulatoren dienen hauptsächlich der Abbildung von Kommunikationsstandards und Protokollen in einer virtuellen Umgebung. In dieser Umgebung kann das Zusammenspiel einer Vielzahl von Geräten bzw. Knoten unter bestimmten und auch veränderlichen Umweltbedingungen simuliert werden. Durch die Simulation wird es ermöglicht, das Verhalten von Netzwerken unter Verwendung einer vorgegebenen Testkonfiguration nachzubilden und zu untersuchen. Es können sowohl Netzwerktopologien durch die Platzierung von Sendern und Empfängern konfiguriert werden, aber auch Protokolle lassen sich in ihrem Funktionsumfang variieren und deren Funktionsfähigkeit kann im Entwicklungsstadium effektiv, zeitsparend und kostengünstig getestet werden. Umweltbedingungen können durch Modelle der Funkwellenausbreitung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Materialien bei der Übertragung von Paketen berücksichtigt werden. Unterschiedliche Materialien besitzen verschiedene Dämpfungseigenschaften oder rufen Reflexionen der Funksignale hervor, zum Beispiel an Wänden. Genauso lassen sich Störungen, Paketstaus und -verzögerungen sowie -ausfälle modellieren und in die Simulation integrieren. Netzwerksimulatoren ermöglichen eine Vielzahl von Parametervariationen, um jegliche Situationen zu simulieren, die im Betrieb eines Netzwerks auftreten können. Bei Netzwerksimulatoren handelt es sich in der Regel um Ereignissimulatoren. Die bekanntesten aktuell weit verbreiteten und im Folgenden kurz vorgestellten Simulatoren sind der ns-2- und ns-3-Simulator sowie OMNET++ und OPNET.

Bei ns-2 handelt es sich um einen älteren Simulator, der in C++ geschrieben wurde und 2006 zur freien Nutzung zur Verfügung gestellt worden ist. Die Beschreibung der Netzwerktopologien sowie der Knoteneigenschaften wird mittels tcl-Skripte durchgeführt. Die Ausgabe von Simulationsergebnissen erfolgt mittels Konsolenfenster und gleichzeitig werden die Ergebnisse in Tracefiles geschrieben. Diese können zu einem späteren Zeitpunkt in einem einfachen, grafischen Fenster visualisiert werden. Aus Sicht der Bedienbarkeit ist der ns-2 Simulator nicht einfach verwendbar, sondern es müssen seitens des Bedieners gute Programmierkenntnisse vorhanden sein. Der Hauptnachteil am ns-2 Simulator ist, dass er nicht mehr weiterentwickelt wird, da er vom Nachfolgesimulator ns-3 abgelöst worden ist, der allerdings keine Kompatibilität zu ns-2 besitzt. Die großen Vorteile von ns-2 sind viele zur Verfügung stehende Tools und die Unterstützung des IEEE 802.15.4 Standards. In [11] wurde eine Schnittstelle unter dem Projekt "PiccSIM" zwischen Netzwerksimulator und MATLAB/Simulink erstellt und in der Arbeit [85] ist ein WirelessHART-Stack entwickelt worden, der in den ns-2 Simulator integriert werden kann.

Im Gegensatz zu ns-2 ist ns-3 ein Simulator, der sich noch im Entwicklungsstadium befindet und für den zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht viele Tools zur Verfügung standen. Die Erstellung von Simulationsszenarien wird mittels C++ und Python-Skripten durchgeführt. Der ns-3-Simulator ermöglicht es, die einzelnen Schichten des OSI-Models abzubilden. Außerdem sind umfangreiche Modelle zur Simulation des Energieverbrauchs von Netzwerkknoten vorhanden. Die Datenraten von Netzwerkpfaden und auch Paketverlustwahrscheinlichkeiten lassen sich einstellen und Netzwerke sind skalierbar. Funktionen und Optionen einzelner Knoten können, je nach Untersuchungsschwerpunkt, aktiviert bzw. deaktiviert werden. Nachteil dieser Simulationsumgebung ist vor allem, dass keine grafische Bedienoberfläche vorhanden ist. Simulationsergebnisse werden wie auch mit dem ns-2 Simulator in sogenannten Trace-Files abgelegt, die schließlich mit Wireshark, einem Netzwerkanalyseprogramm, betrachtet und analysiert werden können. ns-3 beinhaltet eine Klasse für Layer 2 Mesh-Netzwerke. Weiterhin ist eine Integration in MATLAB/Simulink möglich [20]. Für diese Arbeit war hauptsächlich von Nachteil, dass ns-3 den Funkstandard IEEE 802.15.4 nicht abbilden kann.

Ein weiterer Simulator ist OMNET++ (Objective Modular Network Testbed in C++), der ebenfalls wie alle zuvor beschriebenen Simulatoren auf C++ basiert und umfangreiche Klassenbibliotheken mit verschiedenen Simulationsmodulen beinhaltet. Die zu simulierenden Topologien werden mit einer Network Description, kurz NED, beschrieben. Als Basisentwicklungsumgebung dient Eclipse und der Netzwerksimulator beinhaltet die beiden Grundgerüste Internet (INET) und Mobile Ad-

hoc Networking (MANET). INET umfasst Modelle des Internet Stacks wie TCP, UDP, IPv4, IPv6, OSPF, BGP sowie drahtgebundene und drahtlose Protokolle auf Link-Layer-Ebene wie Ethernet, PPP, IEEE 802.11. usw. [80]. MANET für OMNET++ [7] beschäftigt sich mit mobilen Ad-hoc Netzwerken, deren Teilnehmer sich untereinander beim Aufbau des Netzwerks nicht kennen und eine zentrale Aufgabenstellung bildet bei diesen Netzwerken das Routing [34]. OMNET++ unterstützt das OSI-Modell und besitzt eine mit ns-3 vergleichbare Simulationsleistungsfähigkeit. Die Ergebnisse von Simulationen werden in Log-Daten gespeichert und können mit externen Programmen wie MATLAB weiterverarbeitet werden. Der Funkstandard IEEE 802.15.4 wird noch nicht direkt unterstützt, aber es gibt bereits Entwicklungsansätze, wie in [45] vorgestellt.

Neben OMNET++ ist der Simulator OPNET eine weitere leistungsstarke und verbreitete Simulationsumgebung für Netzwerke. OPNET zeichnet sich dadurch aus, dass für die Verwendung keine Programmierkenntnisse vorhanden sein müssen und eine grafische Bedienoberfläche zur Verfügung steht. Simulationszenarien lassen sich einfach editieren und an Benutzer- und Anwendungsbedürfnisse anpassen. Bei der Simulation können viele Details, wie Verzögerungen und Rauschen sowie Umgebungsbedingungen, abgebildet werden. Insgesamt stehen etwa 400 Modelle zum Aufbau einer Simulation zur Verfügung und Simulationsergebnisse lassen sich sowohl grafisch veranschaulichen als auch in Trace-Files ablegen. Für IEEE 802.15.4 gibt es für ZigBee eine Simulationsunterstützung.

Weiterhin existieren die Simulatoren für Netzwerksysteme Global Mobile Information System Simulator (GloMoSim), GloudSim, Jist/Swans, Peersim und The One, die allerdings aufgrund ihrer geringen Bedeutung im Kontext zu dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

# 4.3 Aufbau einer Simulationsumgebung für WirelessHART

Der vorherige Abschnitt gab einen Überblick über die heute am meist verbreiteten Netzwerksimulatoren, deren Besonderheit und Leistungsfähigkeit. Er ist außerdem wegweisend für alle weiteren Arbeitsschritte. Ein zentrales Ziel ist der Entwurf von Reglern für ein System, welches die in Abschnitt 3.7 betrachteten Protokolle WirelessHART, Bluetooth oder das MAC-Protokoll zur Übermittlung von Messwerten nutzt. Um Regler ohne reale Hardware entwerfen zu können, die eines der zuvor genannten Übertragungsprotokolle nutzen, war es notwendig, eine Möglichkeit zu schaffen, Simulationen des Übertragungsverhaltens der verwendeten Netzwerktechnologie durchzuführen. Das Verhalten von Bluetooth LE oder des MAC-Protokolls lässt sich recht einfach in MATLAB/Simulink abbilden, da die Komplexität einer Sterntopologie hinsichtlich des Netzwerkmanagements und Routings recht gering ist.

Bei WirelessHART ist es jedoch notwendig, das Routing, die verwendeten Algorithmen sowie das Netzwerkmanagement zu berücksichtigen. Damit reicht es für die Simulation von Wireless-HART nicht aus, ausschließlich die untersten Schichten des OSI-Modells zu berücksichtigen, da die zentrale Rolle für das Netzwerkmanagement durch den Netzwerkmanager übernommen wird, der sich auf Ebene der Netzwerkschicht befindet. Durch ihn werden, wie in Abschnitt 3.7.1 beschrieben, die Übertragungszeitslots für jeden einzelnen Netzwerkteilnehmer und die zugehörigen Übertragungsrouten anhand von Graphen geplant. Diese zentrale Organisation wirkt bestimmend auf die Übertragungszeiten in einem Mesh-Netzwerk und muss somit von einem Netzwerksimulator entsprechend berücksichtigt werden.

Auch wenn die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Simulatoren teilweise den Funkstandard IEEE 802.15.4 unterstützen, der die untersten Netzwerkschichten aus dem OSI-Modell beschreibt, so ist dies für eine realistische Simulation von WirelessHART bei weitem nicht ausreichend. Es werden von den Simulatoren nur die Bit-Übertragungsschicht und die Sicherungsschicht abgebildet sowie physikalisch der Übertragungsweg bzw. die Funkwellenausbreitung mit stochastischen Paketausfällen. Weiterhin ist es notwendig, das dynamische System mit dem entworfenen Regler, welches in MATLAB/Simulink erstellt wird, parallel und synchronisiert zum Netzwerk zu simulieren. Während der Simulation müssen somit Pakete an den Netzwerksimulator übergeben und durch das simulierte Netzwerk geleitet werden. Nach erfolgreicher Übertragung sind die Pakete wieder vom Netzwerksimulator an das Simulationsmodell in Simulink an entsprechender Stelle zu übergeben. Für die drei modernen Netzwerksimulatoren ns-3, OMNET++ und OPNET standen nach umfangreicher Recherche keine geeigneten Protokoll-Stacks und Softwaremodule zur Verfügung, um die soeben beschriebene Aufgabenstellung in absehbarer Zeit umsetzen zu können.

Für den Netzwerksimulator ns-2 standen jedoch zwei Pakete zur Verfügung, welche Teilbereiche der für diese Arbeit benötigten Eigenschaften eines Netzwerkssimulators für regelungstechnische Anwendungszwecke abdecken konnten. Es handelte sich um einen in [85] implementierten WirelessHART-Stack, welcher für den ns-2 Simulator ausgelegt war und auf das IEEE 802.15.4 Basismodul des ns-2 Simulators aufsetzte. Dieser Stack implementiert WirelessHART sehr detailliert mit allen Protokoll-Layern. Weiterhin umfasst er ein komplettes WirelessHART-Netzwerkmanagement, welches in einem virtuellen Gateway integriert ist. Darüber hinaus sind Access-Points vorhanden, welche die Verbindung zwischen drahtlosem Netzwerk und dem Gateway herstellen. Schließlich können im Netzwerk eine Vielzahl von Netzwerkknoten platziert werden, welche Sensoren und Aktoren darstellen. Beim Starten des Netzwerkes wird der komplette Joining-Prozess durchgeführt, der auch beim Start eines realen WirelessHART-Netzwerks stattfindet.

Eine Einschränkung stellt jedoch dar, dass genau zwei Accesspoints im Netzwerk vorhanden sein müssen. Darüber hinaus enthielt der Programmcode des WirelessHART-Stacks einige Fehler, die behoben werden mussten. Die Anzahl der Knoten ist ausschließlich durch die dem Scheduler zur Verfügung stehenden Zeitslots begrenzt und wird somit durch den an den Netzwerkknoten eingestellten Burst-Intervallen begrenzt. Werden die Burst-Intervalle sehr klein gewählt, so können nur wenige Knoten an einem Netzwerk teilhaben. Werden sie dagegen sehr groß gewählt, so erhöht sich die Anzahl der Netzwerkteilnehmer, die einem Netzwerk angehören können. Eine wichtige Abweichung vom realen WirelessHART besitzt der in [85] implementierte WirelessHART-Stack jedoch. Reale WirelessHART-Geräte lassen ausschließlich einen Burst von einem Knoten im Netzwerk zum Gateway zu. In der vorliegenden Implementierung sind auch Bursts von einem WirelessHART-Knoten zu einem beliebigen WirelessHART-Knoten im Netzwerk möglich. Allerdings müssen aufgrund der implementierten Routing-Strategie, welche aus Uplink- und Downlink-Graphen besteht, alle Pakete über den Uplink-Graphen an das Gateway geleitet und dann mittels des Downlink-Graphen an den Zielknoten übermittelt werden. Somit stellt dieser

Unterschied für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen keine Einschränkungen dar. Mit diesem Protokoll-Stack ist es möglich, das WirelessHART-Protokoll ziemlich detailliert mit ein paar kleinen Abweichungen zu simulieren und dessen Netzwerkverhalten zu testen.

Um ein dynamisches System in Kombination mit einem WirelessHART-Netzwerk zu simulieren, fehlt somit nur noch eine Anbindung des ns-2 Netzwerksimulators. Dieser kann auf einem Linux-System in einer virtuellen Maschine oder über eine Netzwerkverbindung auf einem Linux-Rechner<sup>1</sup> betrieben werden. Auf einem Rechner mit Windows<sup>2</sup> läuft MATLAB/Simulink<sup>3</sup> zur Simulation des zu betrachtenden dynamischen Systems. Eine Lösung, um das Windows-seitige MATLAB/Simulink mit dem Linux-seitigen ns-2 Simulator zu verbinden, bot die in [11] entwickelte Toolbox mit dem Namen "PiccSIM" (Platform for integrated communications and control design, simulation, implementation and modeling). Die Verbindung kann sowohl über den Localhost eines Rechners als auch über ein Netzwerk aufgebaut werden. Der Server von PiccSIM befindet sich auf dem Ubuntu-System, auf dem auch der ns-2 Simulator betrieben wird. Auf dem Windows System mit MATLAB/Simulink zur Simulation des dynamischen Systems befindet sich der PiccSIM-Client. Wird diese Toolbox verwendet, ist es zwar möglich, die Bit-Übertragungsund Sicherungsschicht des IEEE 802.15.4 Standards zu simulieren, aber nicht das WirelessHART-Protokoll.

Um dieses nutzen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Modifikationen am WirelessHART-Stack und an PiccSIM durchgeführt, so dass PiccSIM als Schnittstelle zwischen MATLAB/Simulink und dem im ns-2 Simulator integrierten WirelessHART-Stack genutzt werden konnte. Es dient somit der Übermittlung von Konfigurations- und Simulationsdaten zwischen beiden Simulationsumgebungen. Auch war es notwendig, die tcl-Script Generierung von PiccSIM an die vom WirelessHART-Stack gestellten Anforderungen anzupassen. Es wurde auf Konfigurationsbefehle aus [131, 138, 144] zurückgegriffen. Weiterhin wurden Algorithmen definiert, die den optimalen Startzeitpunkt eines Knoten bestimmen. Dies war notwendig, da die Simulationsumgebung derzeit noch Probleme damit hat, wenn zwei oder mehrere Knoten gleichzeitig gestartet werden und diese sich mit dem Netzwerk verbinden wollen. Weiterhin wird ein Fehler erzeugt, wenn ein Knoten gestartet wird, dieser jedoch durch seinen Joining-Prozess keine Verbindung zu einem aktiven Netzwerk aufbauen kann.

In Bild 4.2 sind die PiccSIM-Blöcke dargestellt, die in Simulink platziert werden können und eine Verbindung zum Netzwerksimulator herstellen. Für jeden Block können dessen Eigenschaften konfiguriert werden, indem festgelegt wird, ob er Daten empfangen, senden oder beides können soll. Weiterhin werden Paket IDs konfiguriert, für die ein Block als Sender oder Empfänger dienen soll. Eine ID stellt somit einen Datenstrom mit einer festen Quelle und Senke dar. Jeder Block kann mehrere Datenströme durch das simulierte drahtlose Netzwerk senden und empfangen. Ein jeder Sender besitzt einen Eingang, über den Daten von MATLAB/Simulink aufgenommen wer-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Getestet wurde das Setting mit Ubuntu in der Version 13.0.4.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Getestet wurde das Setting mit Windows 7 und Windows 10.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Es ist ebenfalls möglich, MATLAB/Simulink auf einem Linux-System zu verwenden. Dieses Setting wurde jedoch in dieser Arbeit in Kombination mit dem ns-2 Simulator nicht getestet.



Bild 4.2: Simulationsoberfläche in MATLAB/Simulink mit PiccSIM

den. Zusätzlich ist ihm eine eindeutige Port-Adresse zugewiesen, über die Datenströme an den Netzwerksimulator weitergeleitet und an den zugehörigen Knoten im Netzwerksimulator übergeben werden. Genauso verhält es sich mit dem Empfänger in Simulink. Auch ihm ist eine eindeutige Port-Adresse zugewiesen, über die er Daten vom simulierten Knoten im Netzwerksimulator empfangen und über seinen Ausgang innerhalb von Simulink zur Verfügung stellen kann.

In der Einleitung 1.1.4 wurde bereits der Aufbau von PiccSIM anhand von Bild 1.2 beschrieben. Nachdem diese Systemstruktur mit dem WirelessHART-Stack in dieser Arbeit verknüpft worden ist, führt dies auf das Gesamtsystem, welches in Bild 4.3 dargestellt ist. Weiterhin ist in diesem Bild ebenfalls der Kommunikationsablauf im Gesamtsystem beispielhaft anhand eines Sende- und Empfangsknotens mittels Pfeile eingezeichnet. Auf der linken Seite befindet sich die Simulationsumgebung für MATLAB/Simulink und es wurden symbolisch ein Sende- und ein Empfangsblock dargestellt. Jedem Block ist eine eindeutige Portnummer zugeordnet, unter deren Nutzung Daten an den Simulator übergeben bzw. von ihm empfangen werden können. Darüber hinaus befindet sich im Aufbau ein Synchronisationsblock, mittels dessen die Zeiten beider Simulationsumgebungen synchron gehalten werden können.

Der obere Block auf der MATLAB/Simulink Seite bildet den Sender oder auch technisch betrachtet den Sensor einer technischen Einrichtung, der z.B. einen Durchflussmesswert überträgt. Im Block weiter unten werden Daten von Simulink empfangen. Es könnte sich dabei um einen Empfänger vor der Regeleinrichtung handeln, der einen vom oberen Sensor versendeten und durch das simulierte, drahtlose Netzwerk übermittelten Messwert empfängt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist der reine Netzwerksimulator mit implementiertem WirelessHART-Stack dargestellt. Die Simulatorseite umfasst den PiccSIM-Server, welcher unmittelbar vor dem Simulationsstart für den Empfang eines tcl-Skriptes, für die Weiterleitung der Daten und die Synchronisation zwischen



Bild 4.3: Datenfluss an einem Beispielsnetzwerk

Simulink und dem ns-2 Simulator verantwortlich ist. Das tcl-Skript enthält die Konfiguration und die Topologie für das zu simulierende drahtlose Netzwerk.

Während des Simulationsablaufs wird über die Synchronisierung veranlasst, dass sowohl MATLAB/Simulink als auch der Netzwerksimulator mit der gleichen Taktung laufen und es zu keinen Abweichungen durch asynchrones Verhalten kommen kann. Die Synchronisation hängt von der Einstellung der Simulationsschrittweite in MATLAB/Simulink ab. Zum Zeitpunkt k tauschen Simulink und der Netzwerksimulator ihre Daten aus. Daraufhin führen beide Simulationsungebungen unabhängig voneinander ihre Simulation bis zum nächsten Abtastschritt k + 1 durch und tauschen schließlich zum Zeitpunkt k + 1 ihre während des Simulationsschrittes erzeugten Daten aus. Die Simulationsumgebung, die einen Simulationsschritt schneller abgearbeitet hat, muss solange warten, bis auch der zweite Simulator den gleichen Schritt abgeschlossen hat. Dieser Prozess wiederholt sich solange, bis das Simulationsende erreicht ist.

Alle von der MATLAB Seite zu jedem Simulationsschritt gesendeten und vom PiccSIM-Server empfangenen Daten werden vom PiccSIM-Server an den ns-2-Simulator übergeben. Da jedem Block in MATLAB/Simulink ein Netzwerkknoten in ns-2 zugeordnet ist, werden die vom PiccSIM-Server an den ns-2 Simulator weitergeleiteten Daten direkt an die Anwendungsschicht des im Netzwerksimulator abgebildeten Knoten aus Simulink übergeben. Jeder Knoten im ns-2 Simulator verfügt über alle gemäß dem Standard IEEE 802.15.4 und der WirelessHART-Spezifikation definierten Schichten des OSI-Modells. Die im Application-Layer ankommenden Daten werden schließlich in ein WirelessHART-Paket beim schrittweisen Durchlaufen der einzelnen Schichten des an WirelessHART angepassten OSI-Modells verpackt. Bei Erreichen der Bit-Übertragungsschicht wird das vollständige WirelessHART-Paket schließlich über den simulierten physikalischen Übertragungsweg vom Sendeknoten (Knoten 3) zum nächsten Empfangsknoten, im angegebenen Beispiel AP1, übermittelt.

Dieser Knoten entpackt das Paket bis zur Netzwerkschicht und stellt auf der Ebene der Netzwerkschicht anhand der Zieladresse fest, dass das Paket nicht für ihn bestimmt ist und leitet es über einen fiktiven drahtgebundenen Übertragungsweg an den Gateway weiter. Das Gateway überprüft das Paket ebenfalls bezüglich der Zieladresse und daraufhin wird es über den Accesspoint (AP2) unter Nutzung des zugehörigen Downlink-Graphen weiter an den Zielknoten (Knoten 4) übermittelt. Dieser stellt bei seiner Überprüfung der Adressinformationen fest, dass das Paket für ihn bestimmt ist und leitet es durch das gesamte Schichtenmodell weiter bis zur Anwendungsschicht. Dabei werden Schicht für Schicht die entsprechenden Header entfernt und der Dateninhalt an den PiccSIM-Server übergeben. Dieser besitzt die Portinformationen zum Empfangsknoten auf der Simulink-Seite und leitet das Paket zum zugehörigen Simulink-Block weiter. Dieser stellt die ankommenden Daten somit der in Simulink laufenden Simulation zum aktuellen Simulationsschritt zur Verfügung. Die Weiterleitung der Daten im Netzwerksimulator erfolgt gemäß des im Gateway-Knoten implementierten Netzwerkmanagers und der von ihm verwendeten Algorithmen. Somit werden Verzögerungen, welche durch das eingesetzte Routing-Verfahren und den genutzten Scheduling-Algorithmus entstehen, entsprechend mit simuliert.

Alle Simulationen der drahtlosen Paketübertragung wurden mit einem Modell zur Übertragung im freien Raum ohne Gegenstände auf der Funkübertragungsstrecke durchgeführt. Dies war auch bei den in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschriebenen Versuchsständen gegeben, denn zwischen jeder einzelnen Funkverbindung bestand ein direkter Sichtkontakt. Soll jedoch eine Simulation von Funknetzwerken und der Datenübermittlung in einem industriellen Umfeld vorgenommen werden, so sind die räumlichen Gegebenheiten mit entsprechenden Dämpfungsfaktoren zu berücksichtigen. In Raffinerien oder chemischen Anlagen ist Stahl beispielsweise das bevorzugte Baumaterial. Es befinden sich viele Stahlträger in den Anlagen und einzelne Ebenen einer Anlage sind meistens durch Gitter zum Betreten und Erreichen einzelner Apparaturen sowie Anlagentopologien eine enorm große Wirkung auf die Funkwellenausbreitung und somit auf die Reichweiten der Knoten. Aus diesem Grund müssen die räumliche Lage, Art, Anordnung und Dämpfungseigenschaften von Stahlkonstruktionen in Simulationsmodellen von Funkübertragungsnetzwerken sehr detailliert berücksichtigt werden.

#### Durchführung der Simulation

Da die Simulationsumgebung jedes einzelne Netzwerkgerät mit all seinen Layern und der kompletten Netzwerkorganisation nachbildet, wird die Simulation aufgrund ihres hohen CPU-Ressourcenbedarfs entsprechend langsam durchgeführt. Zusätzlich wird auch der komplette Verbindungsaufbau des Netzwerks mitsimuliert. Somit wird in Abhängigkeit von der Netzwerkgröße eine entsprechend große Vorlaufzeit benötigt bis das Netzwerk initialisiert und die Netzwerkkomponenten betriebsbereit sind. Daten können erst dann zuverlässig übertragen werden, wenn das komplette Netzwerk aufgebaut ist. Wird das Topologie-Design des Netzwerks fehlerhaft durch-



Bild 4.4: Durchführung einer Simulation

geführt und die Fehler erst während der Simulation entdeckt, so wäre dies extrem zeitaufwendig und würde den Entwicklungsprozess für eine Regelung stark verzögern.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit in die Bedienoberfläche von PiccSIM ein Tool integriert, über das die vom Netzwerksimulator genutzten Algorithmen zur Netzwerkstruktur ausgeführt werden können. Damit können bereits vor der eigentlichen Simulation des Netzwerks die Graphen für das WirelessHART-Netzwerk visualisiert und geprüft werden. Somit kann im Vorfeld bereits eine Aussage darüber getroffen werden, ob die angestrebte Topologie überhaupt funktionsfähig ist. Diese Anwendung wurde anders als der eigentliche Netzwerksimulator mit Java umgesetzt. Die soeben vorgestellten Tools werden in richtiger Kombination dazu benötigt, die Simulation eines WirelessHART-Netzwerks in Kombination mit einem dynamischen System und eines zugehörigen Reglers durchzuführen. Angelehnt an den in Abschnitt 4.1 und Bild 4.1 vorgestellten Prozess zur Auslegung eines auf Funknetzwerke basierten Regelungssystems unterteilt sich der dort angegebene Schritt 5 zur Simulation des Netzwerks, des dynamischen Systems und des Reglers für die erstellte und soeben vorgestellte Simulationsumgebung in die in Bild 4.4 dargestellten Teilschritte.

Zunächst sind in das aus Schritt 3 von Bild 4.1 modellierte dynamische System und für den in Schritt 4 entworfenen Regler die benötigten Netzwerk-Knoten aus der in Bild 4.2 dargestellten PiccSIM-Toolbox einzufügen. Das Simulink Modell muss als \*.mdl Datei gespeichert und in die PiccSIM-Oberfläche geladen werden. Schließlich sind das betrachtete Netzwerk und dessen Topologie auf ihre Funktionsfähigkeit und Realisierbarkeit hin zu überprüfen. In dieser Oberfläche können zusätzliche Knoten zur Generierung von zusätzlichem Traffic platziert werden. Ist das Netzwerk in Ordnung, so kann direkt aus dieser Visualisierungsoberfläche heraus das \*.tcl-Script erzeugt werden, welches speziell für die Simulation von WirelessHART benötigt wird. Ist das \*.tcl-Script erzeugt, so kann über den Simulator die Simulation des Netzwerks gestartet werden. In Abhängigkeit von der Netzwerkgröße, dem verwendeten Rechner und dessen Prozessortechnologie kann sich die Simulation über einen Bereich von Minuten bis Stunden erstrecken.

Die Leistungsfähigkeit des Simulators ist derzeit auf maximal 100 Knoten, die Daten senden können und 100 Knoten, die Daten empfangen können begrenzt. Dies wird dadurch verursacht, weil PiccSIM für jede Sende- und Empfangsstelle einen eigenen Port verwendet. Wird die zulässige

			0.0				
Trans. Nr.:	Start:	Ziel:	Burst:	Entfernung min. Hops	(min.)	Delay: (avg.)	(max.)
1	Knoten 3 ( $v_1$ )	Knoten 4 $(v_2)$	1000 ms	1	110 ms	329 ms	1580 ms
2	Knoten 4 ( $v_2$ )	Knoten 3 ( $v_1$ )	1000 ms	1	520 ms	540 ms	560 ms
3	Knoten 5 $(v_3)$	Knoten 6 $(v_4)$	1000 ms	2	600 ms	945 ms	2600 ms
4	Knoten 6 $(v_4)$	Knoten 5 $(v_3)$	1000 ms	2	130 ms	777 ms	1610 ms
5	Knoten 7 ( $v_5$ )	Knoten 8 ( $v_6$ )	1000 ms	2	520 ms	826 ms	1710 ms
6	Knoten 8 ( $v_6$ )	Knoten 7 $(v_5)$	1000 ms	2	170 ms	778 ms	940 ms
7	Knoten 9 $(v_7)$	Knoten 10 ( $v_8$ )	2000 ms	4	800 ms	848 ms	1240 ms
8	Knoten 10 $(v_8)$	Knoten 9 $(v_7)$	1000 ms	4	920 ms	947 ms	1940 ms
9	Knoten 11 ( <i>v</i> <sub>9</sub> )	Knoten 12 ( $v_{10}$ )	2000 ms	4	1150 ms	1160 ms	1170 ms
10	Knoten 12 ( $v_{10}$ )	Knoten 11 ( <i>v</i> <sub>9</sub> )	1000 ms	4	160 ms	906 ms	2610 ms

**Tabelle 4.1:** Datenübertragung im Simulationsbeispiel

Menge an Ports erhöht oder auf eine portunabhängige Methode umgestellt, so ist es problemlos möglich, Netzwerke mit Knoten im vierstelligen Bereich zu simulieren. Eine weitere Einschränkung der Simulationsoberfläche ist, dass derzeit nur ein einziges WirelessHART-Netzwerk mit einem Gateway und zwei Access Points simuliert werden kann. Interessant wäre jedoch auch die Simulation von mehreren WirelessHART-Netzwerken, die entweder über ein Backbone-Netzwerk zur Erhöhung der Flächenabdeckung zusammenarbeiten oder konkurrieren. Darüber hinaus wäre die Simulation von WirelessHART in Kombination mit weiteren Netzwerktechnologien wie WLAN oder Bluetooth sinnvoll, die die gleiche Umgebung und das gleiche Frequenzband zur Kommunikation nutzen.

#### Simulationsbeispiel

Im Folgenden soll die Leistungsfähigkeit der Simulationsumgebung mit dem in Abschnitt 3.7.1 vorgestellten Kommunikationsprotokoll WirelessHART demonstriert werden, für das zu Veranschaulichungszwecken im Folgenden die beispielhafte Netzwerkstruktur aus Bild 3.10 als Simulationsszenario verwendet werden soll. Die räumliche Anordnung der Knoten kann Tabelle A.1 in Anhang A.1.1 entnommen werden. In der zugrundeliegenden Netzwerkstruktur werden die in Tabelle 4.1 angegebenen Übertragungen durchgeführt. Jede Übertragung fängt bei einem Startknoten an und endet bei einem Zielknoten. Wiederholende Nachrichten bzw. periodische Messwerte sollen mit den in der Tabellenspalte "Burst" angegebenen zeitlichen Intervallen vom Sendeknoten zum Empfangsknoten übermittelt werden.

Die dem Netzwerk zugrundeliegende Netzwerktopologie sowie einige ausgewählte Netzwerkgraphen sind ebenfalls in Bild 3.10 eingezeichnet. Die Gesamtheit aller Netzwerkgraphen ist nochmals in Bild A.1 dargestellt, welches sich in Anhang A.1.1 befindet. Zusätzlich wurden für das Simulationsszenario Übertragungswege definiert, für die im simulierten Netzwerk ein Burst konfiguriert worden ist. Tabelle 4.1 gibt die ausgewählten Übertragungswege an. Insgesamt wurden zehn Knoten-zu-Knoten-Übertragungen festgelegt. Jeder sendende Knoten schickt mit dem in Tabelle 4.1 angegebenen Burst-Intervall Burstnachrichten, deren Datenlänge einen gesamten Zeitslot von 10 ms ausfüllt. Für das vorliegende Beispielnetzwerk wurden Burst-Intervalle von einer bzw. zwei Sekunden gewählt. Die zu sendenden Nachrichten werden von MATLAB/Simulink mittels eines PiccSIM-Blocks an den Netzwerksimulator übergeben und nach Durchlaufen des virtuellen Netzwerkes gemäß Bild 4.3 wieder an MATLAB/Simulink zurückgegeben.

Der Inhalt der Nachrichten umfasst neben dem Payload ebenfalls einen Zeitstempel, der den Zeitpunkt der Übergabe von MATLAB/Simulink an den Netzwerksimulator angibt. Jedem Knoten im virtuellen Netzwerk sind durch den Netzwerkmanager bestimmte Sendezeitschlitze zugewiesen. Zu jedem Zeitschlitz kann eine Nachricht vom entsprechenden Knoten zu einem in Reichweite befindlichen und für den Kommunikationsvorgang vorgesehenen Knoten übermittelt werden. Zudem besitzt jeder Knoten einen Buffer, in den Nachrichten solange zwischengespeichert werden können, bis sie versendet sind. Kommen in einem Knoten mehr Nachrichten zur Weiterleitung oder zum Versenden vom Application-Layer an, als tatsächlich versendet werden können, so füllt sich der Buffer im Knoten. Sobald wieder ein freier Sendezeitslot vorhanden ist, wird die unterste Nachricht aus dem Buffer versendet und somit das Paket, welches bereits am längsten im Buffer liegt.

Für das soeben beschriebene Netzwerk mit der vorgestellten Konfiguration wurden mittels des Netzwerksimulators in Kombination mit MATLAB/Simulink Simulationen durchgeführt. Für die Funkwellenausbreitung im Simulator wird das Zweiwegemodell verwendet. Hierfür sind aus dem Modell ermittelte, entfernungsabhängige Werte angegeben, die Tabelle A.2 im Anhang A.1.1 zu entnehmen sind.

Die aus der Simulation des Netzwerkes resultierenden Ergebnisse hinsichtlich der Paketlaufzeiten veranschaulichen Tabelle 4.1 und Bild 4.5. In Tabelle 4.1 wurden die Laufzeiten der einzelnen Pakete von den unterschiedlichen Übertragungsvorgängen aufgelistet. Es sind sowohl die minimalen, die durchschnittlichen als auch die maximalen Übertragungszeiten im simulierten Netzwerk dargestellt. Weiterhin ist die Mindestanzahl an Zwischenstationen aufgeführt, die ein Paket bei seiner Übertragung von einem Sender zu einem Empfänger zurücklegen muss. Wird die durchschnittliche Laufzeit betrachtet, so ist abgesehen von Transfer Nr. 3 ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Zwischenstationen und der Laufzeit zu erkennen. Die Simulation wurde insgesamt über einen Zeitraum von 1000s durchgeführt, innerhalb dieses je nach Burst-Einstellung 1000 oder 500 Pakete übermittelt wurden. Es wurden weder Paketausfälle noch Ausfälle von Knoten für dieses Simulationsbeispiel im Simulationszeitraum erzeugt. Um die Paketstreuung etwas genauer zu betrachten, wurden die einzelnen Übertragungsströme auf Bild 4.5 anhand von Balkendiagrammen dargestellt. Es wurden jeweils Werte, die in einem Intervall von 50 ms auftraten, analog wie auf den Bildern 3.14 und 3.21 zu einem Balken zusammengefasst. Jeder Übertragungsstrom wird in einer eigenen Farbe dargestellt und die zehn Übertragungsströme wurden auf vier Bildbereiche zur besseren Übersichtlichkeit verteilt.

Bei Betrachtung der einzelnen Transfers in den Balkendiagrammen ist zu erkennen, dass die meisten Pakete eines Übertragungsstroms eine etwa gleiche Übertragungszeit besitzen und somit nahezu deterministisch erfolgt. Die meisten Pakete erreichen ihr Ziel mit einer Abweichung von



Bild 4.5: Zeitverzögerungen in einem WirelessHART-Netzwerk

 $\pm 100 \text{ ms}$  von dem in Tabelle 4.1 angegebenen Durchschnittswert. Dieses Verhalten tritt insbesondere bei den Übertragungsnummern 2, 6, 7, 8 und 9 auf. Bei den Übertragungen 4 und 5 kommt es zu leichten Streuungen, während bei den Übertragungen 1, 3 und 10 starke Streuungen auftreten. Dies kann durch die Überlagerungen mit anderen Übertragungsströmen und die dadurch hervorgerufenen Verzögerungen verursacht werden. Insgesamt unterscheidet sich die Übertragung im Simulator etwas von der Übertragung in kommerziellen WirelessHART-Geräten. Während im Simulator eine Knoten-zu-Knoten Kommunikation möglich ist, ist dies bei derzeit am Markt vorhandenen kommerziellen Geräten nicht möglich. Einige der verwendeten kommerziellen Geräte sind in den Bildern 2.6a, 2.6b, 2.6c und 2.6d dargestellt. Dort kann entweder der Downlink Pfad zur Übermittlung von Konfigurationswerten oder der Uplink Pfad zur Übermittlung von DiagnoTaballa 1 2. Unatanavalatuna

senachrichten verwendet werden. Durch die Knoten-zu-Knoten Kommunikation im Simulator und die darauf abgestimmte Kommunikationsplanung durch den Netzwerkmanager sind die Übertragungszeiten in der Regel besser als in einem realen WirelessHART-Netzwerk mit derzeit am Markt vorhandenen Hardwarekomponenten.

Tabelle 4.2: Knotenauslastung			islastung	Tabelle 4.5: Kanalauslastung			
Knoten:	Freie Slots	Belegte Slots	Auslastung	Kanal:	Freie Slots	Belegte Slots	Auslastung
v <sub>GW</sub>	3120	80	2,50 %	11	712	2488	77,75%
$v_{ m AP1}$	928	2272	71,00 %	12	872	2328	72,75%
$v_{ m AP2}$	1928	1272	39,75 %	13	1840	1360	42,50 %
$v_1$	2912	288	9,00 %	14	2544	656	20,50 %
$v_2$	688	2512	78,5 %	15	3008	192	6,00 %
$v_3$	1160	2040	63,75 %	16	3160	40	1,25 %
$v_4$	1800	1400	43,75 %	17	3184	16	0,5 %
$v_5$	2240	960	30,00 %	18	3200	0	0,00~%
$v_6$	1368	1832	57,25 %	19	3200	0	0,00~%
$v_7$	2936	264	8,25 %	20	3200	0	0,00~%
$v_8$	2392	808	25,25 %	21	3200	0	0,00~%
$v_9$	2688	512	16,00 %	22	3200	0	0,00~%
$v_{10}$	2912	288	9,00 %	23	3200	0	0,00~%

Auslastungsdaten der einzelnen Knoten im Netzwerk sind in Tabelle 4.2 und die Auslastung der im Abschnitt zum Frequenzmanagement in Bild 3.8 abgebildeten 16 Funkkanäle sind in Tabelle 4.3 aufgeführt. Die Kanäle 24 bis 26 wurden in der Tabelle aus Platzgründen weggelassen. Ihre Auslastung liegt genauso wie bei den Kanälen 18 bis 23 bei 0 %. Die Grundlage zur Beurteilung der Auslastung einzelner Knoten und Funkkanäle bildet das vom Netzwerkmanager erstellte Superframe mit der Struktur aus Tabelle 3.3. In diesem sind, wie in Abschnitt 3.7.1 beschrieben, alle benötigten Kommunikationsvorgänge zur Nutzdatenübermittlung sowie für das Netzwerkmanagement berücksichtigt. Das vom Netzwerkmanager erstellte Superframe umfasst insgesamt 3200 Zeitslots, was einer zeitlichen Länge von 32 s entspricht. In diesem Superframe sind für jeden Netzwerkknoten die Informationen vorhanden, ob er in einem Zeitslot empfangen (RX) oder senden (TX) soll. Außerdem sind der zu verwendende Funkkanal sowie die Art des Kommunikationsvorgangs angegeben.

Diese vom Simulator für die Netzwerktopologie aus Bild 3.10 generierten Informationen bilden die Grundlage für die Auswertungen in den Tabellen 4.2 und 4.3. In Tabelle 4.2 ist sehr deutlich zu sehen, dass die Knoten  $v_{AP1}$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  und  $v_6$  eine recht hohe Auslastung mit über 50% aufweisen. Dies bedeutet, dass mehr als die Hälfte der nutzbaren Zeitslots bereits für Kommunikationsvorgänge verplant sind. Bei dem im Zentrum der Netzwerktopologie stehenden Knoten  $v_2$ liegt die Auslastung bei 78,5%. Dies zeigt, dass für weitere Übertragungen mit diesem Knoten als Zwischenstation zur Weiterleitung der Daten nur sehr wenige Ressourcen bereitstehen. Der

Taballa 4 2. Kanalauslastuna

hohe Auslastungsgrad ist auch daher plausibel, da jeder Übertragungsstrom zunächst über den Uplink-Graphen immer zuerst zum Gateway übermittelt werden muss und daraufhin erst über den entsprechenden Downlink-Graphen an den Empfangsknoten übertragen werden kann.

Verifiziert werden kann die hohe Auslastung auch durch die vom Netzwerkmanager anhand der Topologie des Netzwerks erzeugten und den in Bild A.1 im Anhang A.1.1 dargestellten Uplinkund Downlink-Graphen. Somit wird insbesondere im Hinblick auf die stark ausgelasteten Knoten  $v_2$  und  $v_3$  in diesem Simulationsbeispiel ersichtlich, dass der Anordnung von Knoten in einem WirelessHART-Netzwerk eine große Bedeutung zukommt. Es muss verhindert werden, dass einzelne Knoten für die Weiterleitung der Pakete von vielen anderen Knoten, wie beispielsweise den Paketen von  $v_7$ ,  $v_9$ ,  $v_5$  und  $v_4$  sowie  $v_8$ , verantwortlich sind. Ein weiterer Freiheitsgrad bildet die Wahl des Burst-Intervalls. In diesem Szenario wurde er mit einer bzw. zwei Sekunden sehr klein gewählt. Längere Burst-Intervalle reduzieren ebenfalls die Auslastung der Knoten im gesamten Netzwerk, da weniger Pakete pro Zeiteinheit übertragen werden müssen. Auch die Nutzung weiterer und räumlich verteilter Accesspoints führen zu Verbesserungen und erhöhen gleichzeitig die Robustheit des Gesamtnetzwerks.

Nach Tabelle 4.3 werden durch die vom Netzwerkmanager verwendeten Algorithmen zunächst die freien Zeitslots auf Frequenzen mit niedrigen Kanalnummern für Übertragungsvorgänge eingeplant. Voraussetzung hierfür ist, dass der entsprechende Kanal nicht gesperrt bzw. geblacklistet ist und somit genutzt werden darf. Wie im vorliegenden Beispiel zu sehen ist, besteht bei der Nutzung dieser Netzwerktopologie für die simulierten Übertragungsvorgänge hinsichtlich der Funkkanäle kein Engpass, denn es werden ausschließlich die Kanäle 11 und 12 mit einer Auslastung von über 50 % stark beansprucht. Für die Kanäle 13 bis 17 liegt eine schwache Auslastung vor und die Kanäle 18 bis 26 werden derzeit noch gar nicht für Kommunikationsvorgänge genutzt. Somit besteht hinsichtlich der Kanäle mit dieser Topologie derzeit kein Ressourcenmangel, solange keine weiteren Funknetzwerke im gleichen Frequenzbereich und in unmittelbarer Nähe betrieben werden. Durch ein gezieltes Frequenzmanagement, wie in Abschnitt 3.8 beschrieben, könnte jedoch das in diesem Beispiel simulierte WirelessHART-Netzwerk problemlos mit anderen Netzwerken koexistieren.

In diesem Abschnitt wurde eine erstellte Simulationsumgebung vorgestellt und deren Leistungsfähigkeit und Detaillierungsgrad anhand eines Beispiels für ein WirelessHART-Netzwerk veranschaulicht. Diese Simulationsumgebung wurde durch Anpassung und Verknüpfung verschiedener, vorhandener Softwarekomponenten und -pakete realisiert. Bisher wurde ausschließlich ein Netzwerk simuliert, das Werte aus MATLAB/Simulink erhält und diese überträgt. Später wird der Simulator in Kombination mit einem Regler und einem Modell des zu regelnden Prozesses betrieben werden. Zunächst soll jedoch eine weitere in dieser Arbeit erstellte und verwendete Simulationsart beschrieben werden. Dabei handelt es sich um die Hardware-in-the-Loop-Simulation von dynamischen Systemen mit einem drahtgebundenen oder drahtlosen Übertragungsnetzwerk.

### 4.4 HiL-Simulator

Hinsichtlich der Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation bestehen zwei mögliche Umsetzungen, die ganz davon abhängen, welches Teilsystem real und welches durch Simulation betrachtet werden soll. So kann es in einem Fall notwendig sein, das zu betrachtende dynamische System real aufzubauen und ein Übertragungsnetzwerk zu simulieren. Diese Methode wird im Folgenden mit der Abkürzung (HiL-1) bezeichnet. Im Fall von HiL-1 werden Messwerte y(k), die vom realen Versuchsstand abgegriffen werden, durch ein simuliertes Netzwerk zu einer Regeleinrichtung übertragen. Der Regler ermittelt eine Stellgröße u(k), welche im Falle eines zentralen Reglers ebenfalls über ein simuliertes Netzwerk oder eine feste Verdrahtung an einen realen Aktor übermittelt werden kann. Falls ein lokaler Regler verwendet wird, so wird die Stellgröße direkt von der Regeleinrichtung an den realen Aktor übergeben. Die Vorteile dieser HiL Simulation sind, dass ein Netzwerk beliebiger Größe modelliert und anhand der Gesetzmäßigkeiten des zu betrachtenden Übertragungsprotokolls simuliert werden kann. Gleichzeitig verhält sich das als Hardware vorhandene dynamische System so, als würden alle Datenübermittlungen durch ein reales Netzwerk erfolgen. Zusätzlich können sehr einfach Umgebungsbedingungen modelliert werden, die eine Netzwerkübertragung beeinflussen und Paketfehler bzw. Paketausfälle aufgrund von Interferenzen hervorrufen. Darüber hinaus lassen sich auch Wände, Hindernisse sowie Signalreichweiten parametrieren. Es ist sinnvoll, die soeben beschriebene Methodik zur Hardware-in-the-Loop Simulation (HiL-1) in den nachfolgend aufgelisteten Situationen zu verwenden.

- Untersuchung von Datenflüssen in unterschiedlichen Netzwerktopologien und daraus resultierendes Verhalten des betrachteten dynamischen Systems.
- Untersuchung des Netzwerkverhaltens, falls keine reale Netzwerkhardware oder nur begrenzte Hardwareressourcen vorhanden sind, aber dennoch ein großes Netzwerk betrachtet werden soll.
- Auslastungstests des Netzwerks durch Erzeugung künstlicher Datenströme.
- Simulation von variierenden Umgebungs- und Umweltbedingungen sowie deren Auswirkungen auf die Datenübermittlung und das Regelverhalten am Versuchsstand.
- Untersuchung des Netzwerkmanagementverhaltens.
- Auslegung und Optimierung von Netzwerkprotokollen sowie deren Netzwerkmanagement-Funktionen.

Darüber hinaus besteht generell die Möglichkeit, einen Teil der Netzwerke durch reale Knoten und den anderen Teil virtuell im Simulator abzubilden. An dieser Stelle kommt es vor allem darauf an, dass zwischen dem verwendeten Simulator und dem realen Netzwerkknoten eine Schnittstelle zur Organisation des Netzwerkes existiert und die Datenstrukturen zwischen realen Knoten und virtuellen Knoten konsistent sind. Dies stellt insbesondere an die Simulation von Netzwerken, die auf dem IEEE 802.15.4 Funkstandard basieren, hohe Anforderungen. Der Grund dafür ist, dass bei diesen Netzwerken der Koordinator bzw. Gateway mit dem Netzwerkmanager entweder im realen Teil des Netzwerks existieren kann oder im simulierten Teil und alle Prozesse, die auch in einem realen Netzwerk stattfinden, ebenfalls im Simulator stattfinden müssen. Dies bedeutet,

dass der Koordinator, der sich im realen Teil des Netzwerks befindet, auch die simulierten Knoten verwalten und ihnen Zugang zum Netzwerk ermöglichen muss. Wäre der Koordinator umgekehrt im simulierten Netzwerk platziert, so müsste er in dieser Situation die realen Knoten verwalten. Außerdem müssen alle Prozesse im Simulator in Echtzeit durchgeführt werden, da sonst eine Koexistenz des realen und des virtuellen Netzwerks nicht möglich ist. Bei vermaschten Netzwerken besteht außerdem die Schwierigkeit der Abbildung von Verbindungen zwischen virtuellen und realen Knoten, welche entweder durch Funkschnittstellen zum Simulator oder durch entsprechende Modellierung des Netzwerks, mit möglichst wenigen direkten Funkverbindungen zwischen realem und virtuellem Netzwerk wäre ein Zusatzknoten notwendig, der an entsprechender räumlicher Position platziert ist. Dieser Knoten muss mit einem ihm entsprechenden virtuellen Knoten im Simulator gemappt werden und dient somit als Router für die Daten bzw. Pakete zwischen realem und virtuellem Netzwerk.

Die zweite Möglichkeit zur Umsetzung eines HiL-Prüfstandes ist, das Netzwerk real aufzubauen und das zu betrachtende dynamische System zu simulieren. Diese Methode wird im Folgenden mit der Abkürzung (HiL-2) bezeichnet. Bei HiL-2 müssen alle Sensoren, die sich an einem virtuellen Versuchsstand befinden, über Schnittstellen an entsprechende Netzwerkgeräte geführt werden und alle Empfänger von Stellgrößen oder Messwerten sind ebenfalls über Schnittstellen mit einem Simulationsrechner verbunden. Die Simulation des dynamischen Systems muss in Echtzeit ausgeführt werden, da es sonst nicht synchron mit dem realen Netzwerk arbeiten würde. Die zentralen Vorteile und Einsatzmöglichkeiten dieser Art von Simulation sind:

- Entwurf von Regelungen und Durchführung von Regler Tests mittels realer Netzwerke ohne Betrieb einer Anlage oder eines Versuchsstands. Dies ist insbesondere dann geeignet, wenn durch die Übertragung in einem Netzwerk der größte Totzeit-Anteil innerhalb eines zu regelnden Systems verursacht wird.
- Entwicklung und Validierung von an den Regelkreis und das dynamische System angepasster Firmware für Kommunikationsmodule.
- Test und Anpassung der Leistungsf\u00e4higkeit vom Netzwerkmanagement eines zu betrachtenden Kommunikationsstandards und eines daf\u00fcr passenden \u00fcbetragungsprotokolls.
- Vermeidung von Störeinflüssen bei Untersuchungen des Netzwerkverhaltens, die von einem realen dynamischen System verursacht werden.
- Auslegung von Simulationsmodellen eines Netzwerkprotokolls für einen Netzwerksimulator.
- Entwicklung und Validierung von Modellen der Funkwellenausbreitung.

Aufgrund der Komplexität des Entwurfs einer Regelung, welche ein drahtloses Übertragungsnetzwerk zur Übermittlung von Messwerten nutzt, in welchem zusätzlich noch andere Datenflüsse stattfinden, wurde die zuletzt beschriebene HiL-2 Methode sowohl für WirelessHART als auch für Bluetooth als Übertragungsprotokoll implementiert. Im nachfolgenden Abschnitt werden kurz die Realisierungen der HiL-Testumgebungen für die beiden untersuchten Kommunikationsprotokolle beschrieben.

### 4.4.1 Hardware-in-the-Loop-Simulation für WirelessHART

In dieser Arbeit wurden die in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschriebenen Versuchsstände zur Veranschaulichung der entworfenen Regelungsverfahren verwendet. Beide Versuchsstände verwenden drahtlose Übertragungswege zur Übermittlung von Messwerten. Dieser Abschnitt bezieht sich im Weiteren auf den Anlagenprüfstand aus Abschnitt 2.1, ist jedoch auf alle weiteren vorstellbaren Anwendungsszenarien übertragbar. Für die entworfenen Regler gestaltet sich die Überprüfung am Anlagenprüfstand als sehr aufwendig und durch die am Versuchsstand vorhandene Hardwareausstattung auch schwierig. Dies war der Grund, weshalb im Rahmen dieser Arbeit ein HiL-Versuchstand aufgebaut wurde. Das Ziel war es, die Regelungen mit einem Simulationsmodell des Versuchsstands, aber dennoch unter möglichst realen Bedingungen zu testen. Da das Netzwerk mit WirelessHART als Übertragungsprotokoll durch seine großen Übertragungstotzeiten und möglichen Paketausfällen den Haupteinfluss auf die entworfenen Regelungen besitzt, war es sinnvoll, zunächst ausschließlich das WirelessHART-Netzwerk beim Entwurf als reales System zu betrachten.

Begünstigt wird der HiL-Aufbau dadurch, dass das am Institut vorhandene Modell des Anlagenprüfstands sehr genau ist. Somit kann ausgeschlossen werden, dass in der Simulation auftretendes Fehlverhalten vom Modell des Versuchsstands verursacht wird. Im Folgenden wird auf den strukturellen Aufbau der HiL-Simulation eingegangen, um dann im Weiteren einen kurzen Überblick der Schnittstellen zur Kernsoftware zu geben. In Bild 4.6 ist die Struktur des HiL-Aufbaus für WirelessHART dargestellt. Die Gesamtstruktur besteht aus zwei Computern. Ein Rechner wird als Gateway-Rechner bezeichnet und auf diesem läuft eine C#-Anwendung, welche die Kommunikation über das reale Netzwerk und bei Bedarf ebenfalls die Kommunikation mit MATLAB auf demselben Rechner durchführt. Die Daten aus dem Netzwerk werden über Request- und Response-Kommandos in einer fest vorgegebenen Abtastfolge ausgetauscht. Weiterhin existiert ein zweiter



Bild 4.6: Struktureller Aufbau der Hardware-in-the-Loop Simulation mit WirelessHART (HiL-2)

Rechner, auf dem die virtuelle Anlage als Simulationsmodell hinterlegt ist. Das Modell ist in MATLAB/Simulink aufgebaut und es ist möglich, auf diesem Rechner zusätzliche Regelkonzepte zu testen. Dieser Anlagenrechner ist über zwei serielle Schnittstellen mit zwei Funkmodulen von Softing (siehe auch Bild 2.6d) verbunden.

Mittels zweier in C# entwickelten Anwendungen, welche eine HART-Bibliothek beinhalten, kann mit über den in der Bibliothek definierten Request- und Response-Befehlen über das Netzwerk mit WirelessHART fähigen Geräten kommuniziert werden. Hierbei wird in der in Bild 4.6 dargestellter Grundstruktur ein WirelessHART-Modul für die drahtlose Verbindung zum Sensor und ein zweites Modul für die drahtlose Verbindung zum Aktor verwendet. Sollen im Netzwerk mehr als ein Sensor und ein Aktor betrieben werden, so können weitere Funkmodule mit WirelessHART an den Anlagenrechner angebunden werden. Auf den Anlagenprüfstand bezogen, lässt sich beispielsweise statt einer Durchflussregelung auch eine Differenzdruckregelung realisieren. Grundsätzlich lässt sich der Aufbau um eine beliebige Anzahl an weiteren Kommunikationsmodulen erweitern, die Sensoren und Aktoren darstellen.

Analog zum HiL-Versuchsstand von WirelessHART kann auch das in Abschnitt 3.7.2 vorgestellte Bluetooth-Protokoll zur Hardware-in-the-Loop Simulation genutzt werden. Die Kommunikation zwischen Anlagenrechner und Funkmodul wird in diesem Fall mittels UART durchgeführt und es ist für die Module aus Bild 2.7c eine spezielle Implementierung notwendig, um Signale aus Simulink heraus an die Funkmodule zu übermitteln. Zur Reglerauslegung und zum Zweck der Paketlaufzeitmessungen nach Bild 3.21 wurden hierfür alle notwendigen Implementierungen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Es kommen bei der Kommunikation innerhalb des Netzwerkes nicht die in Bild 4.6 eingezeichneten Befehle bzw. Kommandos zum Einsatz, sondern anstelle dieser der in Tabelle 3.4 angegebene, implementierte Befehlssatz. Auch für das in Abschnitt 3.7.3 beschriebene auf dem MAC-Layer basierende Protokoll mit dem Funkmodul aus Bild 2.7e ist eine Hardware-in-the-Loop Simulation gemäß des obigen Bildes 4.6 unter Nutzung der UART-Schnittstelle möglich. Diese Implementierung wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt und getestet. Wichtig ist zu beachten, dass für das auf dem MAC-Layer basierende Protokoll Übertragungsintervalle von 5 ms ermöglicht werden. Eine zusätzliche UART-Kommunikation würde aufgrund von Verzögerungen zu einer zusätzlichen Totzeit bei Betrieb eines simulierten Reglers mit entsprechend hoher Abtastrate führen. Eine Nachricht von 3 Bytes bei einer gewählten Baudrate von 115 200 Baud benötigt bereits 0,2 ms bis 0,3 ms, um vollständig von einem Sender zu einem Empfänger geschickt zu werden. Dabei bleiben Übergabe- und Verarbeitungsverzögerungen unberücksichtigt.

Dieses Kapitel stellt zunächst eine in acht Schritten eingeteilte Vorgehensweise zur Auslegung von Regelungen vor, deren Rückführungen drahtlose Übertragungsstrecken zur Übermittlung von Messgrößen nutzen und/oder deren Stellgrößen drahtlos übertragen werden. Daraufhin wurde eine Übersicht über Netzwerksimulatoren gegeben und es wurde eine Hardware-in-the-Loop-Simulation mit dem Netzwerkprotokoll WirelessHART am Beispiel des Anlagenprüfstands präsentiert. Die in diesem Kapitel beschriebenen Simulationen wurden anhand eines Beispiels für ein vorgegebenes dynamisches System und dessen Funkprotokolle durchgeführt. Ein neuer Trend geht dazu über, Simulationsmodelle von gesamten Prozessen, z.B. von Produktionsanlagen, von

gesamten Produktions- und Reaktionsprozessen in der chemischen Industrie zu modellieren. Dadurch können Anlagen vollständig auf einen bestimmten Prozess abgestimmt und die Inbetriebsetzungszeiten stark reduziert werden. Hierfür werden Anlagen, Rohrleitungen, Rohrleitungsgeometrien, Sensoren und Aktoren, Regeleinrichtungen und Stellvorgänge und das Zusammenspiel sämtlicher Komponenten in einem Prozess vollumfänglich durch Simulation getestet, bevor eine Anlage real aufgebaut wird.

Dies führt zu einer enormen Zeit- und Kostenersparnis und verbessert die Qualität von Produkten. Für den zukünftigen Einsatz von Funktechnologien im Planungsprozess von Anlagen bedeutet dies, dass nicht nur aktive Komponenten für einen Prozess simuliert werden, sondern die gesamte Anlagentopologie mit Anordnung von Anlagenkomponenten, Rohrleitungen, Stahlträger, Gittern und Wänden virtuell abgebildet werden müssen. Für jede Komponente in einer Anlage müssen Geometrien vorhanden sein sowie Material und Dämpfungs- und Reflexionseigenschaften auf die Funkwellenausbreitungen in den verwendeten Frequenzbändern berücksichtigt werden. Außerdem müssen Einflussfaktoren, wie elektromagnetische Felder, welche beispielsweise in Bereichen von Kabelkanälen und durch den Betrieb von Elektromotoren sowie elektrisch beheizte Ofenanlagen verursacht werden, ebenfalls abgebildet werden. Somit wird es eine der zukünftigen Herausforderungen sein, für alle Komponenten, die in einem Planungsprozess verwendet werden, ein digitales Abbild zu kreieren. Dies fängt bei der Planung der Gebäude einer Produktionsstätte an und endet bei der Nutzung von Bus- und Funkübertragungsstrecken sowie bei den physikalischen Effekten und Wirkungen, die durch die Nutzung einzelner Komponenten auf deren Umfeld verursacht werden. Das folgende Kapitel wird sich mit Regelkonzepten für Regelkreise mit drahtlosen Übertragungsstrecken beschäftigen.

# 5 Verfahren für Regelungen mit drahtlosen Rückführungen

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die Grundlagen für Netzwerkprotokolle, deren Übertragungseigenschaften und -charakteristiken sowie die Simulation von Netzwerken in Kombination mit einem dynamischen System vorgestellt wurden, befasst sich dieses Kapitel mit Verfahren zur Steuerung und Regelung dynamischer Systeme. Bei einem dynamischen System kann es sich um ein SISO-System (Single Input, Single Output), ein MISO-System (Multiple Input, Single Output) oder MIMO-System (Multiple Input, Multiple Output) handeln. In dieser Arbeit werden im Folgenden ausschließlich SISO- oder MIMO-Systeme betrachtet.

# 5.1 Mathematische Beschreibung von dynamischen Systemen und Regelkreisen

In der Praxis werden häufig P-, PD-, PI- oder PID-Regler zur Regelung eines technischen Systems eingesetzt. Diese können beispielsweise nach den Einstellregeln von Ziegler/Nichols [50, S. 443f.] und [87], Chien/Hrones und Reswick [76], den Einstellregeln nach Oppelt [88, S. 211f.] oder nach Rosenberg [76] entworfen werden, ohne eine detaillierte Modellierung durchführen zu müssen. Diese Art des Reglerentwurfs ist jedoch nicht immer verwendbar, insbesondere dann, wenn anspruchsvollere Verfahren wie Zustandsregler [53, 4] oder beobachterbasierte Systeme [53, 4] genutzt werden sollen. Wird ein hoher Anspruch auf bestimmte Eigenschaften gelegt, wie eine gewünschte, einstellbare Geschwindigkeit, Genauigkeit und Dämpfung, so bietet sich beispielsweise der Entwurf mit dem Wurzelortskurvenverfahren [50, S. 455ff.] an. Dafür ist es zwangsläufig notwendig, ein Modell des Regelkreises zu verwenden, um dessen Pole durch geeignete Wahl der Reglerparameter möglichst genau im Hinblick auf die geforderten Eigenschaften der Regelung auszulegen. Bei der physikalischen Modellbildung eines dynamischen Systems ergeben sich lineare oder nichtlineare Differentialgleichungen. Ein Beispiel für die lineare Systembeschreibung eines SISO-Systems im Zeitbereich vom Grad n stellt die Gleichung

$$a_{n}y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \dots + a_{2}\ddot{y}(t) + a_{1}\dot{y}(t) + a_{0}y(t)$$
  
=  $b_{m}u^{(m)}(t) + b_{m-1}u^{(m-1)}(t) + \dots + b_{1}\dot{u}(t) + b_{0}u(t)$  (5.1)

dar. y(t) ist die Ausgangsgröße des Systems, während u(t) das Eingangssignal ist. Im linearen MIMO-Fall würden mehrere Gleichungen (5.1) existieren, die sich gegenseitig beeinflussen und somit miteinander verkoppelt sind. Das Gleichungssystem besteht aus p voneinander verschiedenen Eingängen und q Ausgängen. Einen Sonderfall stellen MIMO-Systeme dar, für die p = q gilt. Für ein SISO-System kann obige Gleichung (5.1) mittels der Laplace-Transformation [82] in

den Bildbereich transformiert werden. Nach erfolgter Transformation liegt Gleichung (5.1) in der Form

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \ldots + b_m s^m}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \ldots + a_n s^n}$$
(5.2)

vor. Obige Differentialgleichung (5.1) *n*-ter Ordnung lässt sich ebenso als ein System von *n* Differentialgleichungen erster Ordnung darstellen. Das daraus entstehende Differentialgleichungssystem wird auch als Zustandsraumdarstellung bezeichnet. Als SISO-System lässt sich diese in der Form

$$\underline{\dot{x}}(t) = \underline{A} \cdot \underline{x}(t) + \underline{b} \cdot u(t)$$
(5.3)

$$y(t) = \underline{c}^{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}(t) + \underline{d} \cdot u(t)$$
(5.4)

oder für MIMO-Systeme als

$$\underline{\dot{x}}(t) = \underline{A} \cdot \underline{x}(t) + \underline{B} \cdot \underline{u}(t)$$
(5.5)

$$y(t) = \underline{C} \cdot \underline{x}(t) + \underline{D} \cdot \underline{u}(t)$$
(5.6)

angeben [23, S. 392]. Werden die Gleichungen (5.3) und (5.4) bzw. (5.5) und (5.6) diskretisiert, so ergibt sich ihre Differenzenform für SISO-Systeme zu

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A} \cdot \underline{x}(k) + \underline{b} \cdot u(k)$$
(5.7)

$$y(k) = \underline{c}^{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}(k) + d \cdot u(k)$$
(5.8)

oder für MIMO-Systeme zu

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A} \cdot \underline{x}(k) + \underline{B} \cdot \underline{u}(k)$$
(5.9)

$$y(k) = \underline{C} \cdot \underline{x}(k) + \underline{D} \cdot \underline{u}(k).$$
(5.10)

#### 5.1.1 Beschreibung von Totzeiten in dynamischen Systemen

Bei technischen Systemen können sogenannte Totzeiten auftreten. Diese resultieren beispielsweise aus dem Transport von Masse, Energie oder Informationen [58, S. 9]. Totzeiten bei der Übermittlung von Informationen betreffen insbesondere Regelkreise, welche ein Netzwerk zur Übertragung von Messwerten, Sollwerten oder Stellgrößen nutzen. Aus diesem Grund ist es wichtig, diese Übertragungsverzögerungen bei der Modellierung eines Systems zu berücksichtigen. Dazu soll zunächst die allgemeine Beschreibung von Totzeiten aus mathematischer Sicht eingeführt werden. Im Zeitbereich ruft eine Totzeit in einem System eine Verschiebung des Signals u(t) um die Zeit  $t_T$  auf der Zeitachse nach rechts hervor, so dass

$$y(t) = u(t - t_{\rm T}) \quad \text{mit } t_{\rm T} > 0$$
 (5.11)

gilt. Auf ein reines Netzwerk übertragen, wäre dies die Zeit  $t_T$  zwischen der Übergabe eines Wertes an einen Sendeknoten und dem Empfang dieses Wertes an der Übergabeschnittstelle des Empfangsknotens. Gleichung (5.11) führt nach [23, S. 37] im Bildbereich auf

$$Y(s) = e^{-t_{\mathrm{T}} \cdot s} \cdot U(s). \tag{5.12}$$



Bild 5.1: Modellbildung einer variablen Totzeit für SISO-Systeme

Bei einem Totzeitglied handelt es sich um ein lineares zeitinvariantes Übertragungsglied. Da es sich bei einem Totzeitglied lediglich um eine zeitliche Verschiebung nach rechts handelt, lässt es sich auch sehr einfach im  $\mathscr{Z}$ -Bereich als

$$Y(z) = z^{-n_{\rm T}} \cdot U(z) \tag{5.13}$$

darstellen, wobei angenommen wurde, dass  $t_T = n_T \cdot \Delta T$  gilt.  $n_T$  ist dann die Anzahl der Abtastschritte, um die eine Verschiebung nach rechts stattfindet. Ist die Abtastung eines Systems ausreichend schnell, so stellt diese Annahme keine Einschränkung dar.

Bei zeitdiskretisierten Systemen lassen sich variable Totzeiten, die durch Netzwerke entstehen, hervorragend abbilden. Mit dem nachfolgend beschriebenen Verfahren lassen sich sowohl SISOals auch MIMO-Systeme modellieren, deren Messwerte über totzeitbehaftete drahtlose- oder drahtgebundene Netzwerke übermittelt werden. Wichtig ist für folgende Modellierung, dass Totzeiten nur in einem Vielfachen der Abtastzeit  $\Delta T$  eines Systems vorliegen dürfen. Für diesen Abschnitt liegt die Systembeschreibung eines beliebigen, linearen oder linearisierten dynamischen Systems in Form der Gleichungen (5.3) und (5.4) vor.

Weiterhin ist es notwendig, einen Maximalwert für die in einem Netzwerk auftretende Totzeit  $t_{T,max}$  festzulegen, da Zustandsraummodelle endlich dimensional sein müssen und je größer ein Zustandsraummodell ist, umso größer wird auch die Rechenzeit und die Komplexität des Modells. Aus der maximalen Totzeit  $t_{T,max}$  der totzeitbehafteten Übertragung des Messwertes vom Ausgang eines dynamischen Systems und der Abtastzeit  $\Delta T$  kann mit

$$n_{\rm T} = \left| \frac{t_{\rm T,max}}{\Delta T} \right| \tag{5.14}$$

die Anzahl der Zustände bestimmt werden, welche die Totzeiten eines Übertragungssystems abbilden. Zunächst wird die Modellierung der Totzeiten für SISO-Systeme betrachtet. Ein Zustandsraumsystem, welches um Zustände für die Totzeit einer Netzwerkübertragung erweitert wird, ist

$$u_{\mathrm{T},k} = y_{k} \qquad \qquad \underbrace{1_{z}} \qquad y_{\mathrm{T},k-1} \qquad \underbrace{1_{z}} \qquad y_{\mathrm{T},k-2} \qquad \underbrace{1_{z}} \qquad y_{\mathrm{T},k-3} \qquad \underbrace{y_{\mathrm{T},k-n_{\mathrm{T}}+1}} \qquad \underbrace{1_{z}} \qquad \underbrace{y_{\mathrm{T},k-n_{\mathrm{T}}}} \qquad \underbrace{y_{$$

Bild 5.2: Modellierung der Totzeit durch die Aneinanderreihung von Speichern

in Bild 5.1 dargestellt. Im Grunde kann die Übertragungstotzeit eines Netzwerks als ein eigenes Zustandsraummodell mit  $n_T$  Zuständen im SISO-Fall modelliert werden, die alle Speicher darstellen und ihren aktuellen Wert beim nächsten Abtastschritt an den nächsten Zustand weitergeben. Die zur Zustandsraumdarstellung des Totzeitsystems aus Bild 5.1 äquivalente Darstellung als Verkettung von Speichern zeigt Bild 5.2. Als Eingang  $u_T(k)$  für das Totzeitmodell wird der Ausgang y(k) des Zustandsraummodells verwendet, sodass  $u_T(k) = y(k)$  gilt. Somit ergibt sich für die Darstellung der Übertragungstotzeit des Zustandsraumsystems (5.3) und (5.4) das Gleichungssystem

$$\underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) = \underline{A}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + \underline{b}_{\mathrm{T}} \cdot u_{\mathrm{T}}(k)$$

$$y_{\mathrm{T},0}(k) = d_{\mathrm{T}} \cdot u_{\mathrm{T}}(k)$$

$$y_{\mathrm{T},1}(k) = \underline{c}_{\mathrm{T},1} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k)$$

$$\vdots$$

$$y_{\mathrm{T},n_{\mathrm{T}}}(k) = \underline{c}_{\mathrm{T},n_{\mathrm{T}}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k).$$
(5.15)

Zu jedem Abtastzeitpunkt k kann für den Ausgang y(k) eines dynamischen Systems immer genau ein Ausgang  $y_{T,i}$  mit  $i \in 0, ..., n_T$  vom Totzeitmodell aus Gleichung (5.15) gewählt werden, der die zum Abtastzeitpunkt k resultierende Totzeit repräsentiert. Die Matrix <u>A</u><sub>T</sub> wird durch  $n_T$ Zustände, die jeweils einen Wert um einen Abtastschritt verzögern und ihn schließlich an den nächsten Zustand weiterreichen, mit

$$x_{T,1}(k+1) = u_{T}(k) = y(k)$$

$$x_{T,2}(k+1) = x_{T,1}(k)$$

$$x_{T,3}(k+1) = x_{T,2}(k)$$

$$\vdots$$

$$x_{T,n_{T}-1}(k+1) = x_{T,n_{T}-2}(k)$$

$$x_{T,n_{T}}(k+1) = x_{T,n_{T}-1}(k)$$
(5.16)

realisiert, wodurch sich die Strukturen für die  $n_{\rm T} \times n_{\rm T}$ -dimensionale Matrix <u>A</u><sub>T</sub> und den  $n_{\rm T}$ dimensionalen Vektor <u>b</u><sub>T</sub>

$$\underline{A}_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \qquad \underline{b}_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(5.17)



Bild 5.3: Umschaltung zwischen unterschiedlichen Totzeiten

ergeben. Die Ausgangsmatrizen werden gemäß der aktuell auf einem Übertragungsweg vorhandenen Totzeit  $t_{\rm T}$  gewählt. Hierfür ist es notwendig, die Totzeit in einem Netzwerk kontinuierlich zu überwachen. Dies kann über Zeitstempel in Kombination mit synchronisierten Uhren in einem Netzwerk erfolgen. Hierzu werden genauere Details in Abschnitt 5.4 vorgestellt. Die Auswahl der Ausgangsmatrizen erfolgt gemäß Bild 5.3. Einem Schalter ist die aktuelle Totzeit bekannt und er wählt die Ausgangsmatrix dergestalt, dass die Totzeit des Modells mit der aktuellen Totzeit übereinstimmt, die bei der realen Netzwerkübertragung auftritt. Hieraus ergibt sich für den Ausgang eines dynamischen Systems gemäß den Gleichungen (5.7) und (5.8) unter Berücksichtigung des Ausgangsvektors  $\underline{c}^{\mathrm{T}}$ , die mögliche, zum Abtastzeitpunkt k um  $l_k$  Abtastschritte zeitverzögerte Ausgangsgröße

$$y_{\mathrm{T},l_{k}}(k) = \begin{cases} d_{\mathrm{T}} \cdot u_{\mathrm{T}}(k) & \text{für } l_{k} = 0, \\ \underline{c}_{\mathrm{T},l_{k}}^{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) & \text{für } 0 < l_{k} \le n_{\mathrm{T}}, \\ 0 & \text{für } l_{k} > n_{\mathrm{T}}. \end{cases}$$
(5.18)

Werden für den Ausgang y(k) eines dynamischen Systems alle möglichen Kombinationen der Ausgänge  $y_{T,l_k}$  für das Modell der Übertragungszeitverzögerungen ausgeschrieben, so ergeben sich die Gleichungen

$$y_{T,0}(k) = d_{T} \cdot u_{T}(k)$$

$$y_{T,1}(k) = \underline{c}_{T,1}^{T} \cdot \underline{x}_{T}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{x}_{T}(k)$$

$$y_{T,2}(k) = \underline{c}_{T,2}^{T} \cdot \underline{x}_{T}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{x}_{T}(k)$$

$$y_{T,3}(k) = \underline{c}_{T,3}^{T} \cdot \underline{x}_{T}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{x}_{T}(k)$$

$$\vdots \qquad (Fortsetzung auf nächster Seite)$$

(Fortsetzung auf nächster Seite)

(Fortsetzung von vorheriger Seite)  $y_{T,n_T-1}(k) = \underline{c}_{T,n_T-1}^T \cdot \underline{x}_T(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{x}_T(k)$  $y_{T,n_T}(k) = \underline{c}_{T,n_T}^T \cdot \underline{x}_T(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \underline{x}_T(k).$ 

Tritt im System keine Totzeit auf, so wirkt für  $y_{T,0}$  der in Bild 5.3 über  $d_T = 1$  geführte Durchgriffszweig. Für den realistischen Fall, in dem bei einer Netzwerkübertragung eine Totzeit auftritt, wird immer derjenige Ausgang gewählt, dessen Index  $l_k$  multipliziert mit der Abtastzeit  $\Delta T$  der aktuellen Übertragungstotzeit  $t_{T,k}$  des betrachteten Messwerts zum k-ten Abtastschritt am nächsten liegt. Das Produkt aus Index  $l_k$  und Abtastzeit  $\Delta T$  muss jedoch immer größer als  $t_{T,k}$  sein, so dass die Berechnungsvorschrift

$$l_k = \left\lceil \frac{t_{\mathrm{T},k}}{\Delta T} \right\rceil \tag{5.20}$$

gilt. Damit kann schließlich immer der einer Totzeit entsprechende Ausgangsvektor  $c_{T,l_k}(k)$  im Modell ausgewählt werden. Sollte jedoch  $l_k$  größer als  $n_T$  sein, so ist der Messwert als Paketausfall zu behandeln, da für diesen Fall das Modell nicht zur Nachbildung dieser Totzeit geeignet ist. Das Zustandsraummodell für die Modellierung der Totzeit eines Systems zum k-ten Abtastschritt lautet somit

$$\underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) = \underline{A}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + \underline{b}_{\mathrm{T}} \cdot u_{\mathrm{T}}(k)$$
(5.21)

$$y_{\mathrm{T}}(k) = \underline{c}_{\mathrm{T},l_k} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + d_{\mathrm{T}} \cdot u_{\mathrm{T}}(k).$$
(5.22)

Das vorliegende durch die Gleichungen (5.21) und (5.22) beschriebene System zur Nachbildung der Totzeit ist nur dann vollständig beobachtbar, wenn die Zeitdauer der Totzeit  $n_{\rm T}$ -Abtastschritten entspricht. Entspricht die Zeitdauer der Totzeit genau  $l_k$  Abtastschritten mit  $0 \le l_k < n_{\rm T}$ , so befinden sich  $n_{\rm T} - l_k$  Polstellen in 0 und das Modell der Totzeit ist somit für  $n_{\rm T} - l_k$  Zustände unbeobachtbar, aber dennoch stabil.

Die Gleichungen (5.21) und (5.22) können ebenfalls mit der Zustandsraumdarstellung des dynamischen Systems verknüpft werden. Um dies zu realisieren, muss jedoch zunächst auf die Form des Ausgangsvektors  $\underline{\tilde{c}}^{T}(k)$  eingegangen werden, dessen Grundstruktur

$$\underline{\tilde{c}}^{\mathrm{T}}(k) = \begin{bmatrix} d_{\mathrm{T}} \cdot \underline{c}^{\mathrm{T}} & \underline{c}_{\mathrm{T},l_{k}}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \operatorname{mit} \begin{cases} d_{\mathrm{T}} = 1 \wedge \underline{c}_{\mathrm{T},l_{k}}^{\mathrm{T}} = \underline{0} & \text{für } l_{k} = 0, \\ d_{\mathrm{T}} = 0 \wedge \underline{c}_{\mathrm{T},l_{k}}^{\mathrm{T}} \neq \underline{0} & \text{für } 0 < l_{k} \leq n_{\mathrm{T}}, \\ d_{\mathrm{T}} = 0 \wedge \underline{c}_{\mathrm{T},l_{k}}^{\mathrm{T}} = \underline{0} & \text{für } l_{k} > n_{\mathrm{T}}. \end{cases}$$
(5.23)

ist. In  $\underline{\tilde{c}}^{\mathrm{T}}(k)$  ist immer genau dann der Eintrag aus der ersten Spalte ungleich 0, wenn, wie durch Gleichung (5.20) beschrieben,  $l_k = 0$  gilt und für den entsprechenden Übertragungsvorgang somit eine Totzeit von 0 Abtastschritten  $\Delta T$  vorliegt. Gleichzeitig muss dann der zugehörige Eintrag  $\underline{c}_{\mathrm{T},l_k}^{\mathrm{T}}$  entsprechend 0 sein. Wenn umgekehrt die Totzeit  $t_{\mathrm{T},k}$  des k-ten Übertragungsvorgangs größer als 0 Abtastschritten  $\Delta T$  ist, so ist der Eintrag der ersten Spalte 0 und der Eintrag  $\underline{c}_{\mathrm{T},l_k}^{\mathrm{T}}$  ungleich 0. Der Ausgangsvektor  $\underline{\tilde{c}}^{\mathrm{T}}(k)$  kann sich mit jedem Abtastschritt verändern. Verantwortlich hierfür ist die Auswahl des zum jeweiligen Abtastschritt passenden Skalars  $d_{\mathrm{T}} = 1$  bzw. Vektors

 $\underline{c}_{\mathrm{T},l_k}^{\mathrm{T}} \neq \underline{0}$ . Hierzu wird die Übertragungstotzeit durch Gleichung (5.20) in  $l_k$  ganzen Abtastschritten bestimmt. Ist  $l_k > n_{\mathrm{T}}$ , so liegt ein Paketausfall vor oder es wurde  $n_{\mathrm{T}}$  und somit  $t_{\mathrm{T,max}}$  beim Entwurf des Modells nicht ausreichend groß genug gewählt. Somit ist  $l_k$  in jedem Abtastschritt zu überwachen und für den Fall, das  $l_k > n_{\mathrm{T}}$  wird, eine geeignete Methode auszuwählen, um auf den anzunehmenden Paketausfall zu reagieren. Der  $n + n_{\mathrm{T}}$ -dimensionale Vektor  $\underline{\tilde{c}}^{\mathrm{T}}(k)$  im Gesamtsystem berücksichtigt, führt auf

$$\begin{bmatrix} \underline{x}(k+1) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{0} \\ \underline{b}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{c}^{\mathrm{T}} & \underline{A}_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{x}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{b} \\ \underline{0} \end{bmatrix} \cdot u(k)$$
(5.24)

$$y_{\mathrm{T}}(k) = \left[\underline{\tilde{c}}^{\mathrm{T}}(k)\right] \cdot \left[\underline{\underline{x}}(k) \\ \underline{\underline{x}}_{\mathrm{T}}(k)\right].$$
(5.25)

Für lineare MIMO-Systeme nach den Gleichungen (5.5) und (5.6) ist das soeben für SISO-Systeme beschriebene Vorgehen identisch. Hier ist jedoch die Ausgangsmatrix

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} \underline{c}_1 & \underline{c}_2 & \dots & \underline{c}_q \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \underline{c}_1^{\mathrm{T}} \\ \vdots \\ \underline{c}_q^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$
(5.26)

in ihre Zeilenvektoren aufzuteilen und für jede Zeile, d.h. für jeden totzeitbehafteten Ausgang muss analog zum zuvor beschriebenen SISO-Fall ein Totzeitmodell erstellt werden. Das für SISO-Systeme beschriebene Totzeitmodell wird somit maximal *q*-Mal benötigt.

Die soeben beschriebenen, grundlegenden mathematischen Darstellungsformen werden in allen weiteren Abschnitten benötigt.

### 5.1.2 Zeitverzögerungen bei der digitalen Übertragung von Daten

Für jedes System, das gesteuert oder geregelt werden soll, ist es notwendig, Informationen zu übermitteln. Bei einer Steuerung müssen Stellgrößen übertragen werden, allerdings entfällt die Rückführung von Messwerten, da eine Steuerung keine Informationen über den Istzustand des zu steuernden Systems benötigt. Bei einer Regelung hingegen ist die Rückführung von einem Messwert bei SISO-Systemen bzw. *q* Messwerten bei MIMO-Systemen notwendig. In der Praxis können drei Arten von Übertragungswegen für Stellgrößen, Messwerte oder Sollwerte unterschieden werden.

Bei der ersten Art handelt es sich um Zweidrahtsysteme, welche einen Messwert von einem Sensor zu einer Regelungseinrichtung, eine Stellgröße von einem Regler zu einem Aktor oder eine Steuer- oder Stellgröße von einem Bedienstand zum Aktor bzw. zur Regeleinrichtung übermitteln können. Zweileitersysteme sind die am meisten eingesetzten Systeme, erfordern jedoch einen großen Platzbedarf, es ist ein großer Verdrahtungsaufwand notwendig und die Kosten für Materialund Installation, die Fehlersuche im Störfall und die Umsetzung in einer Leitwarte sind sehr hoch.

Durch die Entwicklung von leistungsstarken Mikrocontrollern setzen sich in den letzten Jahren immer mehr Bussysteme und somit Netzwerke zur Übertragung von Mess-, Steuer- und Stellgrößen als zweite Art von Übertragungssystemen durch. Die Besonderheit bei einem Bussystem ist im Gegensatz zur Zweileiterübertragung, dass sich eine Vielzahl von Sensoren, Aktoren und Regeleinrichtungen dieselbe Leitung teilen. Einige Beispiele für gängige Bussysteme auf Sensorebene sind ModBus/TCP, Ethernet/IP, PROFINET IO, EtherCAT, Sercos III, Powerlink und CC-Link IE. Durch Nutzung eines gemeinsamen Übertragungsweges von einer Vielzahl an Teilnehmern kommt es je nach Netzwerkgröße zu Wartezeiten bei der Übertragung von Informationen. Weiterhin verursachen mikrocontrollerbasierte Systeme Verzögerungszeiten bei der Bereitstellung von Informationen an den Empfänger, da Daten statt analog wie beim Zweileitersystem, digital und damit die einzelnen Bits als Aneinanderreihung sequentiell, gruppenweise zusammengefasst in einzelnen Paketen übertragen werden. Diese Empfangs- und Verarbeitungszeit wird im Folgenden mit Stack-Zeit bezeichnet.

Die Stack-Zeit beim Empfänger  $t_{\text{stack,receive}}$  ist genau die Zeit, welche vom Interrupt im Mikrocontroller, das durch das erste empfangene Byte ausgelöst wird, bis zur Bereitstellung einer Information an das Zielsystem verstreicht. Als Zielsystem wird in Bezug auf die Stackzeit entweder die Anwendung im obersten Layer des genutzten Protokolls bezeichnet oder die Übergabe an eine weitere Kommunikationsschnittstelle. Beim Versenden eines Paketes verhält es sich umgekehrt. In diesem Fall ist die Stack-Zeit  $t_{\text{stack,send}}$  diejenige Zeit, die zwischen Übergabe von zu versendenden Daten an den oberen Layer des Protokollstacks bis zum Versand des letzten Bytes eines Pakets verstreicht. Die Stack-Zeit enthält außerdem die Wartezeit von Daten bis zum Versand oder bis zur Weiterleitung an ein Zielsystem. Dazu kommt die Übertragungszeit  $t_{\text{network}}$  auf dem Kommunikationsmedium. Somit setzt sich die gesamte Zeit in einem drahtgebundenen Bussystem aus

$$t_{\rm T,w} = t_{\rm stack,send} + t_{\rm network} + t_{\rm stack,receive}$$
(5.27)

zusammen. Die Stackzeit kann je nach Implementierung und Protokoll ohne Wartezeiten im einstelligen Millisekundenbereich liegen.

Bisher wurden ausschließlich kabelgebundene Übertragungssysteme beschrieben. Eine dritte Art, mit der eine Rückführung von Messwerten oder die Übertragung von Steuer- und Stellgrößen realisiert werden kann, ist ein drahtloses Kommunikationsmedium. In den vorangegangenen Abschnitten wurden bereits die in heutiger Zeit wichtigsten Funkstandards und die darauf aufbauenden Protokolle beschrieben. Bei der Funkübertragung verhält sich die Übermittlung genauso wie bei Bussystemen, außer dass eine verbindungslose Übermittlung von Paketen erfolgt. Genauso wie bei Bussystemen kann von einer Vielzahl von Geräten dasselbe Übertragungsmedium genutzt werden. Der zentrale Unterschied besteht jedoch darin, dass ein Kommunikationssystem nun nicht mehr geschlossen für sich auf dem Übertragungsmedium Luft agiert, sondern sich dieses Übertragungsmedium mit gegebenenfalls einer Vielzahl von Netzwerkeinheiten teilt.

Diese Einheiten können zwar im Idealfall nicht über ihre Grenzen hinweg kommunizieren, aber sich durchaus beeinflussen, indem sie interferieren. Dadurch kann es zu Paketausfällen kommen und eine Kommunikation kann im schlimmsten Fall unmöglich sein. Aus diesem Grund ist beim Entwurf eines Netzwerkes, wie im Kapitel 3 beschrieben, eine genaue vorherige Planung und Frequenzzuordnung notwendig. Außerdem sind Störquellen möglichst zu vermeiden bzw. bestmöglich einzudämmen oder zu umgehen. Erst dann wird es möglich, eine Regelung oder Steuerung mit drahtlosen Übertragungswegen zuverlässig zu betreiben. Die Übertragungszeit von einem Senderknoten zu einem Empfangsknoten setzt sich ebenfalls aus den Anteilen von Gleichung (5.27) zusammen. Die Auswahl eines geeigneten Regelungsverfahrens, das ein Bussystem oder Netzwerk als Übertragungsmedium verwendet, richtet sich danach, welches Medium zur Übertragung von Sollwerten, Stell- oder Messgrößen genutzt wird und welche Zeitkonstante(n) das zu regelnde System besitzt.

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick darüber, in welchen Anwendungsfällen sich welche der drei soeben beschriebenen Übertragungsarten zur Nutzung im geschlossenen Regelkreis eignen.

## 5.2 Reglerentwurf für Systeme mit Übertragungsnetzwerken

Für dynamische Systeme mit großen Zeitkonstanten in Relation zur Abtastzeit, welche mitunter durch die erreichbaren bzw. konfigurierten Sendeintervalle und Übertragungstotzeiten eines Paketes im Netzwerk beeinflusst werden, kann der Reglerentwurf als quasikontinuierlich betrachtet werden. Das bedeutet, dass für das System zunächst ein kontinuierlicher Regler entworfen [23, S. 56] werden kann. Es ist jedoch wichtig, die Übertragungstotzeiten von Bus- und Netzwerkübertragungssystemen bei der Modellbildung des zu betrachtenden dynamischen Systems zu berücksichtigen, da sonst die Regelgüte negativ beeinflusst wird und es zu Überschwingungen oder Instabilitäten kommen kann. Weiterhin ist es wichtig, dass die Übertragung von Werten in einem regelungstechnisch genutzten Netzwerk deterministisch stattfindet und zu jedem Abtastschritt aktuelle Messwerte zur Verfügung stehen.

Bei drahtgebundenen Bus- und Netzwerksystemen ist dies meist gegeben, da bei richtiger Auslegung nahezu sichergestellt ist, dass es zu keinem oder nur wenigen Paketausfällen kommt. Außerdem ist bei drahtgebundenen Systemen die Übertragungs- und Verarbeitungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Abtastzeit für die meisten Anwendungszwecke sehr klein, während die Zeitkonstante des zu regelnden Prozesses, insbesondere bei vielen Systemen aus der Verfahrenstechnik, in Relation zur Übertragungszeit sehr groß ist. Für diese Anwendungszwecke bieten sich Reglerentwurfsverfahren, wie P-, PD-, PI-, PID-, Deadbeat- oder Zustandsregler an, ohne dass variable Übertragungstotzeiten oder Paketausfälle beim Entwurf eines Reglers berücksichtigt werden müssen. Der Reglerentwurf ist somit relativ einfach in bekannter Weise durchzuführen. Anders verhält es sich bei hoch dynamischen Systemen mit sehr kleinen Zeitkonstanten, die über ein drahtgebundenes Netzwerk oder Bussystem als Übertragungsmedium betrieben werden sollen. Netzwerke können, je nach eingesetztem Protokoll, nur ein minimales Abtast- und Sendeintervall garantieren. Außerdem sind Auswirkungen von Übertragungszeitschwankungen stärker bemerkbar, da beim Betrieb von Regelungen höhere Anforderungen an die Einhaltung von Übertragungszeiten und -zeitschwankungen gestellt werden.

Als Alternative zu drahtgebundenen Netzwerken können Mess- und Stellgrößen auch drahtlos übermittelt werden. Bei allen derzeit am Markt vorhandenen Übertragungssystemen treten hierbei

	Abtastintervall schnell	Abtastintervall mittel	Abtastintervall langsam
Systeme mit hoher Dynamik	<ul> <li>analoge</li> <li>Zweileiterübertragung</li> </ul>	• nicht möglich	• nicht möglich
Systeme mit mittlerer Dynamik	<ul> <li>analoge Zweileiterübertragung</li> </ul>	<ul> <li>analoge Zweileiterübertragung</li> <li>drahtgebundene Bus- und Netzwerksysteme</li> <li>begrenzt: MAC-Protokoll</li> </ul>	• nicht möglich
Systeme mit langsamer Dynamik	<ul> <li>analoge</li> <li>Zweileiterübertragung</li> </ul>	<ul> <li>analoge Zweileiterübertragung</li> <li>drahtgebundene Bus- und Netzwerksysteme</li> <li>begrenzt: MAC-Protokoll</li> </ul>	<ul> <li>analoge Zweileiterübertragung</li> <li>drahtgebundene Bus- und Netzwerksysteme</li> <li>drahtlose Übertragung</li> </ul>

 Tabelle 5.1: Übertragungsmedien in Abhängigkeit von der Systemdynamik und den Abtastzeiten

teils erhebliche Übertragungstotzeiten auf und es kommt zu Schwankungen bei der Übertragungszeit, die von der Netzwerkstruktur, dem Netzwerkmanagement, der Auslastung des Netzwerks und den Umgebungs- und Witterungsbedingungen sowie der Beeinflussung durch weitere Funknetzwerke und andere Funktechnologien im gleichen Frequenzbereich abhängen. Soeben genannte äußere Einflussfaktoren können zu Datenverlust führen oder übertragene Pakete können dadurch zur Nutzung in einem Regelkreis unbrauchbar werden. Dieser Punkt stellt erhöhte Anforderungen an die Auslegung einer Regelung. Einige Messungen zu Paketlaufzeiten und Übertragungszeitschwankungen in drahtlosen Netzwerken mit vorgegebener Struktur wurden bereits in Kapitel 3 für WirelessHART, Bluetooth und dem auf dem MAC-Layer basierenden Übertragungsprotokoll durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind dem Bild 3.14 für WirelessHART, Bild 3.21 für Bluetooth und Bild 3.24 für das MAC-Protokoll zu entnehmen. Einzig durch das in dieser Arbeit entworfene, auf dem MAC-Layer basierende Übertragungsintervalle erzielt werden, die mit denen von drahtgebundenen Netz- oder Bussystemen vergleichbar sind.

In Tabelle 5.1 wird kurz skizziert, für welche Konstellationen aus Abtastzeiten und vorliegenden Systemdynamiken welches Übertragungsmedium für die Übermittelung von Informationen im geschlossenen Regelkreis geeignet ist. Es wird dabei von der Verwendung der weiter oben genannten Standardregler ausgegangen und die Totzeiten des dynamischen Systems werden bei der Modellierung als konstant berücksichtigt. Wie in dieser Tabelle zu sehen ist, kann die analoge Übertragung in allen aus regelungstechnischer Sicht sinnvollen Kombinationen aus Systemdynamik und Abtastung verwendet werden. Zentrale Einflussfaktoren bilden bei diesem Übertragungsmedium Störeinflüsse und Anstiegs- bzw. Abfallzeiten in den elektronischen Schaltkreisen des Senders und Empfängers. Wie weiter oben beschrieben, treten in drahtgebundenen Bus- und Netzwerksystemen bei der Übertragung Totzeiten auf. Dadurch sind sie unter Verwendung der oben beschriebenen Regler nicht für Systeme geeignet, welche eine sehr große Dynamik besitzen. Das kleinste Anwendungsspektrum bei den obigen Regelungen bieten drahtlose Übertragungssysteme. Sie eignen sich mittels obiger Standardregler ausschließlich für unkritische Systeme mit einer langsamen Dynamik und selbst dort ist es notwendig, Zusatzmethoden zu implementieren, die bei Paketausfällen einspringen können und dafür sorgen, dass das zu regelnde System in keinen unerwünschten Zustand versetzt wird.

Eine Ausnahme bildet das in dieser Arbeit entworfene, auf dem MAC-Layer basierende Protokoll, durch das Übertragungsintervalle von 5 ms erreicht werden können. Dadurch kann dieses Konzept in Kombination mit einer Methode zur Kompensation für Paketausfälle auch für Systeme mit mittlerer und langsamer Dynamik genutzt werden, die mittel schnell abgetastet werden. Um die Anwendungsräume von drahtgebundenen Bus- und Netzwerksystemen sowie von drahtlosen Übertragungssystemen zu erweitern, besteht die Möglichkeit, Regler entsprechend langsamer auszulegen. Damit muss jedoch ein langsames Ausregeln als Reaktion auf eine Sollwertänderung oder eine auftretende Störung am dynamischen System in Kauf genommen werden und dadurch verlangsamt sich das gesamte Verhalten eines dynamischen Systems. Allerdings können durch diese Vorgehensweise keine Paketausfälle kompensiert werden. Die Übermittlung eines Signals in einem analogen Zweileitersystem kann aus regelungstechnischer Sicht als ausreichend schnell angenommen werden.<sup>1</sup>

Aufgrund des eingeschränkten Anwendungsfeldes von drahtlosen Technologien im industriellen Einsatz sollen in den folgenden Abschnitten Methoden betrachtet und vorgestellt werden, die die Eignung von drahtlosen Übertragungssystemen im Regelkreis deutlich erweitern können. Außerdem bieten drahtlose Netzwerke in Abhängigkeit von ihrer Netzwerktopologie ganz neue Möglichkeiten in der Strukturierung von Regelkreisen. Diese werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt. Zunächst werden jedoch die Unterschiede zwischen zentralen und lokalen Regelkonzepten diskutiert und ihre Eignung im Hinblick auf drahtgebundene und drahtlose Übertragungssysteme ausgearbeitet.

### 5.3 Zentrale und lokale Regelungskonzepte

Derzeit werden Regelungen in Industrieanlagen meist zentral über eine Leitwarte betrieben. Dies war in Zeiten von analogen Signalübertragungen oder bei Bussystemen sinnvoll, da von der Leitwarte bzw. der Hauptverteilung einer Anlage auf alle Messgrößen zugegriffen werden konnte

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Vakuum kann als Übertragungsgeschwindigkeit Lichtgeschwindigkeit  $c_{Vakuum} = 299792458 \text{ m s}^{-1}$  [83, S. XI] angenommen werden. Für die Übermittlung von Signalen auf Leitungen unter idealen Umgebungsbedingungen werden aufgrund von Dielektrika Signallaufzeiten von  $c_{Leiter} = 0, 67 \cdot c_{Vakuum} \approx 2 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$  erreicht.



Bild 5.4: Regelkonzept 1, zentraler Regler

und somit Messgrößen aus unterschiedlichsten Orten der Anlage von Regelungen zur Ermittlung von Stellgrößen genutzt werden konnten. In Abschnitt 3.2 wurden die Topologien von drahtlosen Übertragungsnetzwerken beschrieben. Bei dem aus Abschnitt 3.7 vorgestellten WirelessHART-Protokoll, aber auch bei Netzwerkprotokollen, wie ISA100.11a und ZigBee Pro und somit in der Industrie verbreiteten Übertragungsprotokollen, die auf dem Übertragungsstandard IEEE 802.15.4 basieren, liegt eine Maschentopologie vor. Dies bedeutet, dass theoretisch jeder Knoten im Netzwerk mit jedem beliebigen anderen Knoten kommunizieren könnte. Diese Fähigkeit hängt ganz alleine von der Spezifizierung bzw. Umsetzung von Routing Strategien im Netzwerk ab. Netzwerke mit Übertragungswegen zwischen jedem beliebigen, erreichbaren Knoten in einem Netzwerk begünstigen den Entwurf von lokalen Regelungssystemen, für die keine zentrale Stelle in einer Leitwarte benötigt wird, um Informationen weiterzuleiten bzw. zu verarbeiten. Dies erleichtert es, Anlagen modularer aufbauen und bei Bedarf schneller umrüsten zu können und somit flexibel zu agieren. Dieser Punkt wird häufig im Hinblick auf die Umsetzung der Industrie 4.0 Idee gefordert. Zunächst werden die Struktur sowie die mathematische Notation von zentralen und lokalen Regelkreisen beschrieben, die entweder ein Bussystem, ein Netzwerk oder eine drahtlose Kommunikation zur Übermittlung von Messwerten, Stellgrößen oder Sollwerten nutzen. Für die im Weiteren angegebenen Formelzeichen wird der Index P zur Kennzeichnung der Ausgangsgröße vom zu regelnden Prozess verwendet. Der Index T wird zur Kennzeichnung des Modells der Übertragungstotzeit von Signalen bzw. Paketen genutzt und der Index R dient der Kennzeichnung von Größen, die die Regeleinrichtung betreffen. Außerdem steht der Index S für die Kennzeichnung der Regelstrecke. x(k) bezeichnet den Wert des Signals x(t) zum Abtastzeitpunkt  $t_k = k \cdot \Delta T$ mit der konstanten Abtastzeit  $\Delta T$ . Diese Notation der angegebenen Größen wird im Weiteren in dieser Arbeit verwendet.

Bei Anlagen, deren Regeleinrichtungen zentral über eine Leitwarte betrieben werden, werden alle Messwerte  $y_P(k)$  zunächst zur Leitwarte übertragen, wie in Bild 5.4 dargestellt. Dort erfolgt ihre Verarbeitung und aus den ermittelten Regelabweichungen e(k) werden die jeweiligen Stellgrößen  $u_R(k)$  für die Aktoren generiert, die dann ebenfalls über einen Übertragungsweg an den Aktor geleitet werden müssen. Während der Übertragung treten Übertragungstotzeiten auf, weshalb die zu übertragenden Größen verzögert ankommen und somit im Folgenden, wie auch durch die Gleichungen (5.21) und (5.22) modelliert, mit dem Index  $T(y_P(k) \rightarrow y_T(k), u_R(k) \rightarrow u_T(k))$ gekennzeichnet werden. Das soeben beschriebene Konzept ist in Bild 5.4 als diskretes System



Bild 5.5: Regelkonzept 2, lokaler Regler

dargestellt. Eine zeitdiskrete Systembeschreibung ist bei Netzwerken und insbesondere drahtlosen Übertragungsstrecken unumgänglich und wird in Abschnitt 2.5.2 eingeführt.

Ein weiteres Konzept bildet das lokale Regelkonzept, für das es nicht notwendig ist, Aktorbefehle von einem Leitstand zu übertragen. Die Anlagenregler befinden sich bei dieser Struktur direkt am Feldgerät beziehungsweise am Aktor, wie in Bild 5.5 dargestellt ist. Die Messwerte werden direkt von den Sensoren an den Regler im Aktor übertragen. Von der Leitwarte müssen ausschließlich die Sollwerte w(k) an den Regler am Aktor übermittelt werden und dies muss erst dann erfolgen, wenn es zu einer gewünschten Änderung dieses Wertes kommt. Der große Vorteil dieses Konzeptes ist, dass Messwerte direkt vom Sensor an den Aktor übertragen werden können und sie somit keinen Umweg über die Leitwarte nehmen müssen. Außerdem tritt im geschlossenen Regelkreis beim lokalen Konzept nach Bild 5.5 im Gegensatz zum zentralen Konzept nach Bild 5.4 nur noch eine Funkübertragungsstrecke vom Sensor zum Regler auf und somit ergibt sich eine geringere Gesamtübertragungstotzeit und eine niedrigere Störanfälligkeit.

Die Funktionsfähigkeit und Qualität eines Regelkreises hängt von vielen Faktoren ab, wie der Reglerauslegung, den Systemeigenschaften des zu regelnden Systems, aber auch von den Übertragungswegen und deren Eigenschaften. Bei der analogen Übertragung mittels Leitungen und Kabeln und auch in den meisten Fällen bei der drahtgebundenen digitalen Übertragung von Werten kommt letzterem Punkt meist nur eine geringe Bedeutung zu. Allerdings sind die Eigenschaften eines Übertragungssystems bei der drahtlosen Übermittlung von Messwerten meist nicht zu vernachlässigen, da sie im schlimmsten Fall die Erreichung bestimmter Regelziele unmöglich macht.

# 5.4 Synchronisation im Regelkreis mit drahtlosen Übertragungsstrecken

Der Zeitsynchronisation bei der Erfassung von Messwerten kommt bei Regelkreisen eine wichtige Bedeutung zu. Während bei kabelgebundenen und analogen Übertragungssystemen ein Signal für die in der Industrie gängigen Anwendungen ohne nennenswerte Zeitverzögerungen bei einer Regeleinrichtung eintrifft, so treten bei digitalen Übertragungssystemen und insbesondere bei drahtlosen Übertragungsstrecken für Regelungen, welche mehr als eine Messgröße zur Erfüllung einer Regelungsaufgabe nutzen, deutlich größere Verzögerungen und Verschiebungen der Erfassungszeitpunkte von Signalen unterschiedlicher Messstellen auf. Bei drahtgebundenen Systemen sind in den gängigsten Automatisierungssystemen analoge Signalleitungen an die Analogeingänge einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) geführt. Durch die SPS werden Werte zu gleichen Zeitpunkten in Form von Eingangsabbildern aufgenommen, sodass alle an die SPS angebundenen Signale quasi zum gleichen Zeitpunkt eingelesen sind. Es tritt nur eine für die meisten Regelungen unbedeutende Zeitverzögerung auf, welche durch die Verarbeitungsgeschwindigkeit des im Automatisierungssystem verwendeten Prozessors hervorgerufen wird. Bei analogen, kabelgebundenen Systemen treten somit hinsichtlich der Synchronisation von Messwerten keine Herausforderungen auf.

Anders ist es bei kabelgebundenen Bussystemen wie PROFINET IO, Profibus, HART, Feldbus und allen anderen am Markt existierenden Bussystemen. Benötigt eine Regelung mehr als eine Messgröße, so kommt es auf das verwendete Bussystem an, ob die Messgrößen zeitgleich erfasst werden. Beispielsweise ist bei HART keine zeitgleiche Messwerterfassung vorgesehen. Bei PRO-FINET IO [70, S. 224ff] oder Profibus findet hingegen eine zeitgleiche Erfassung der Messgrößen statt. Bei Nutzung eines Protokolls, das die gleichzeitige Erfassung von Messwerten nicht sicherstellt, können sich im Zeitraum zwischen der Erfassung beider Messungen die Zustände des zu regelnden Systems aufgrund seiner Dynamik soweit verändert haben, dass beide Messungen nicht mehr zusammenpassen und das Regelergebnis, welches durch diese zeitversetzten Messungen erzielt wird, somit ungünstig beeinflussen. Werden Bussysteme mit drahtlosen Übertragungssystemen verglichen, so ist das Thema der synchronen Aufnahme von Messwerten bei drahtlosen Übertragungen aufgrund der begrenzten Bandbreite des Übertragungsmediums Luft in den einzelnen Frequenzbändern von noch weitaus größerer Bedeutung.

Wie bereits im Kapitel 3 zu den Funkprotokollen beschrieben und durch Messungen veranschaulicht wurde, gestaltet es sich bei Funkübertragungssystemen schwierig, ausreichend schnell abzutasten, um die Regeleinrichtung von Systemen mit einer hohen Dynamik ausreichend häufig mit Messwerten zu versorgen. Außerdem treten im Gegensatz zu kabelgebundenen Systemen und Bussystemen deutlich größere Totzeiten bei der Übermittlung eines Messwerts auf. Am Beispiel von WirelessHART wird dies besonders deutlich, da für zentrale Regelungen (siehe Bild 5.4), je nach Realisierung, bei einem einfachen Netzwerk minimal nur jede Sekunde ein Messwert von einer Messstelle aus übertragen werden kann und bei einem lokalen Regler (siehe Bild 5.5) nur minimal alle zwei Sekunden<sup>2</sup>. Da in dieser Arbeit kommerzielle WirelessHART-Produkte genutzt wurden, war der Zeitpunkt zur Aufnahme eines Messwertes von außen nicht beeinflussbar und deshalb kann es vorkommen, dass zwei von unterschiedlichen Messstellen aufgenommene Messwerte in einem so großen zeitlichen Abstand erfasst wurden, dass bei einem System mit hoher Dynamik bei gleichzeitig langen Abtastintervallen keine sinnvolle Regelung mehr möglich ist.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Bei zentralen Prozessreglern werden die Messwerte bei WirelessHART direkt über HART-IP vom Gateway abgefragt und müssen daher nur über den Uplink-Graphen zum Gateway übermittelt werden. Es wird vom Gateway aus keine weitere Downlink-Übertragung benötigt. Bei lokalen Reglern ist hingegen eine Downlink-Übertragung notwendig.



Bild 5.6: Synchronisationsproblem in einem Netzwerk (links), Gewünschtes Verhalten (rechts)

In Bild 5.6 (links) ist dieses Problem veranschaulicht. Das Bild soll das Abtastverhalten von den drei Messstellen "Sensor 1", "Sensor 2" und "Sensor 3" aufzeigen. Die Abszisse ist die Zeit t und im System sollen während eines jeden Abtastschrittes k Messwerte von allen drei Messstellen abgefragt werden. Bei Netzwerksystemen, die das TDMA-Verfahren (Time Division Multiple Access) zur Übertragung nutzen, weiß jeder Sensor, zu welchem Zeitpunkt er ein Paket versenden soll. Bei WirelessHART kann, wie in Abschnitt 3.7.1 beschrieben, beispielsweise ein Burst eingestellt werden. Das bedeutet, es wird ein immer gleichbleibendes Intervall vorgegeben und somit ein Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messwerten gewählt, gemäß dem jeweils ein Messwert in einem Paket über den Uplink-Graph an das Gateway gesendet wird. Die Übertragungszeitpunkte werden den Sensoren derart zugewiesen, dass eine deterministische Übertragung mit möglichst gleichbleibenden Zeitabständen vorliegt. Es kann jedoch vorkommen, dass Sensor 1 seine Daten zu einem anderen Zeitpunkt wie Sensor 2 oder 3 versendet und damit auch die Messwerte zu voneinander verschiedenen Zeitpunkten aufgezeichnet werden und somit nicht zusammenpassen. Dies ist jedoch für die in dieser Arbeit betrachtete Differenzdruckregelung problematisch, für die die Differenz zwischen zwei Drücken  $\Delta p = p_1 - p_2$  gebildet werden muss.

Dieses Verhalten ist ebenfalls in Bild 5.6 (links) zu sehen. Es wurden beispielhafte Verläufe der Drücke  $p_1$  und  $p_2$  eingezeichnet und die Zeitpunkte, an denen die Sensoren  $p_1$  und  $p_2$  ihre Werte aufgenommen haben. Die Abtastung der Werte ist um die Zeit  $\Delta t_{abtast}$  verschieden. Wird die Abtastung von Messwert  $p_1$  als Bezugspunkt genommen, so tritt ein Fehler von  $\Delta_{mess}$  zwischen dem zuerst aufgezeichneten Wert  $p_1$  und dem um  $\Delta t_{abtast}$  später abgetasteten Wert  $p_2$  auf. Außerdem ist in diesem Beispiel eine Zeitverzögerung vorhanden, die sowohl vom Zeitpunkt der Aufzeichnung von  $p_1$  bis zum nächsten Abtastschritt als auch vom Zeitpunkt der Aufzeichnung von  $p_2$  bis zur nächsten Abtastung reicht und somit ebenfalls eine Verfälschung der Messgröße hervorruft. Übertragungstotzeiten wurden bei dieser Betrachtung zunächst nicht berücksichtigt. Somit ist der abgetastete Wert  $\Delta p_{\text{mess}}$  der Wert, der von der Regelung verwendet wird, aber der eigentliche Wert, welcher theoretisch zum nächsten Abtastschritt richtig wäre, ist  $\Delta p_{\text{abtast}}$ . Dadurch stellt der aus den Drücken  $p_1$  und  $p_2$  berechnete Wert  $\Delta p$  eine Fehlinformation dar und somit führt die Regelung anhand dieses Wertes zu keinem sinnvollen Ergebnis.

Um dieses soeben beschriebene Problem zu umgehen, ist es erforderlich, Messwerte in einem Netzwerk synchronisiert aufzunehmen. Für Netzwerkkomponenten, deren Funkprotokolle TD-MA nutzen, ist es grundsätzlich notwendig, deren Zeiten zu synchronisieren. Bei Funkprotokollen, die ausschließlich CSMA/CA verwenden, bedarf es eines gesonderten Timing-Dienstes, der die Uhren der einzelnen Netzwerkknoten synchron hält, indem er in regelmäßigen Abständen Synchronisierungsnachrichten versendet. Dies wird grundsätzlich von einer zentralen Organisationseinheit des Netzwerks durchgeführt. Bei WirelessHART ist dies das Gateway mit seinem integrierten Netzwerkmanager.

Um einen sehr guten Regler entwerfen zu können, muss auch die Abtastung des Reglers auf die Synchronisationszeit im Netzwerk abgestimmt werden, was wiederum bedeutet, dass die Regeleinrichtung eine direkte Verbindung zum zur Übertragung genutzten Protokoll benötigt. Im synchronisierten Fall würde eine Abtastung wie in Bild 5.6 (rechts) aussehen. Idealerweise kommt es zu keiner Abweichung zwischen den Aufnahmezeitpunkten zweier Messwerte von voneinander verschiedenen Messstellen. Praktisch ist dies jedoch nicht umsetzbar, da es bei drahtlosen Kommunikationseinrichtungen immer zu Abweichungen von einigen Mikrosekunden kommen wird. Diese sehr kleinen Abweichungen sind jedoch für die meisten in der Praxis genutzten Anwendungen wie auch für das Beispiel der Differenzdruckregelung hinnehmbar.

Die zu gleichen Zeitpunkten aufgenommenen Messwerte verbleiben solange im sendenden Knoten, bis bei Verwendung des TDMA-Verfahrens ein Sendezeitslot für den Sensorknoten eingeplant oder bei Nutzung des CSMA-Verfahrens das Übertragungsmedium für den Versand eines Paketes frei ist. In Bild 5.6 (rechts) ist das für einen Regelkreis optimale Zeitverhalten zwischen der Netzwerkübertragung und der Abtastung des Reglers dargestellt. Dieses Verhalten kann nur durch eine Synchronisation zwischen den einzelnen Netzwerkknoten untereinander, zwischen Netzwerk und Regeleinrichtung (Regler), zwischen Netzwerk und Sensoren und zwischen Regler und Sensoren erreicht werden, wie dies in Bild 5.7 dargestellt ist.

In regelmäßigen Abständen synchronisieren sich alle Netzwerkknoten  $v_i \in V$  eines Netzwerkes G(V, E). Das Netzwerk G(V, E) besitzt insgesamt  $r_{Anz}$  Regelkreise und zu jedem der  $r_{Anz}$  Regelkreise gehören  $n_r$  Knoten mit  $r \in 1, 2, ..., r_{Anz}$ , die als Sensoren, Regler oder Aktoren fungieren. Die  $n_r$  Knoten eines jeden r-ten Regelkreises werden den Mengen  $V_{Rr}$ , mit  $r \in 1, 2, ..., r_{Anz}$  zugeordnet, wobei sich die Mengen der Knoten unterschiedlicher Regelkreise überschneiden können. Eine zeitliche Synchronisation findet zwischen der Regeleinrichtung (Regler) und dem zugehörigen Netzwerkknoten (Funkmodul)  $v_{r,0}$  sowie zwischen jeder Messstelle (Sensor) und dem der Messstelle zugehörigen Netzwerkknoten (Funkmodul) statt.

Es ist wichtig, dass ebenfalls die Sensoren im Netzwerk auf die Abtastzeitpunkte des Reglers abgestimmt werden. Diese Abstimmung wird von der Regeleinrichtung durchgeführt. Übertra-



**Bild 5.7:** Synchronisation des Netzwerks und des Abtastzeitpunktes zwischen Regeleinrichtung und Sensoren

gungstotzeiten, die durch den Transfer von Messwerten über das Netzwerk entstehen, müssen von der Regeleinrichtung berücksichtigt werden. Dies ist jedoch im soeben vorgestellten Netzwerk problemlos möglich, da alle Netzwerkteilnehmer, Regeleinrichtungen und Sensoren in einem synchronisierten Netzwerk die gleiche Zeitbasis nutzen. Bei Aufnahme eines Messwertes kann somit ebenfalls der Messzeitpunkt ermittelt und gemeinsam mit dem zu übermittelnden Messwert an den Empfänger gesendet werden. Der Messwert kommt somit mit einer durch die Netzwerktopologie, dem Übertragungsprotokoll, dem Übertragungsverfahren und der Auslastung des Netzwerks hervorgerufenen Zeitverzögerung bzw. Totzeit bei der Regelungseinrichtung an. Die Regler sind entweder entsprechend auf die maximal möglichen Übertragungstotzeiten auszulegen oder passen sich adaptiv an sich verändernde Übertragungstotzeiten an, welche bei Netzwerken mit vielen Teilnehmern und sich über mehrere Routing-Knoten erstreckende Übertragungswegen sehr variieren können.

In einem synchronisierten Netzwerk müssen sowohl Sensoren als auch Regler zum gleichen Zeitpunkt ihre Eingänge abtasten und, sobald die Messwerte durch die Sensoren aufgenommen wurden, werden diese durch das drahtlose Netzwerk übermittelt, kommen schließlich bei der Regelungseinrichtung an und können dort weiterverarbeitet werden. Die Zeitspanne zwischen dem Aufnahmezeitpunkt eines Messwertes und seinem Ankunftszeitpunkt bei der Regeleinrichtung wird im Folgenden unter Annahme einer konstanten Totzeit als die Totzeit der Netzwerkübermittlung  $t_{T,r,i}$  bezeichnet. Kann die Totzeit in Abhängigkeit des aktuellen k-ten Abtastschrittes variieren, so wird sie mit  $t_{T,r,i,k}$  für den r-ten Regelkreis, der i-ten Knoten im Regelkreis und zum k-ten Abtastschritt ausgedrückt.

Das soeben beschriebene Synchronisationsverfahren im Netzwerk kann auch für Netzwerke genutzt werden, in denen viele unterschiedliche Regelkreise betrieben werden, wie dies beispielsweise in Bild 5.8 dargestellt ist. Die Situation, dass ein Netzwerk mehrere Regelkreise umfasst, wird in dieser Arbeit rein theoretisch betrachtet und die in den kommenden Absätzen entwickelten und vorgestellten Algorithmen wurden ausschließlich in Matlab simuliert. Bei einer derartigen Realisierung, wie in Bild 5.8 gezeigt, würde jede Regelung ihre Abtastintervalle und Zeitpunk-


Bild 5.8: Mehrere Regelkreise in einem Netzwerk

te mit allen für sie relevanten Funkknoten<sup>3</sup> teilen und mit diesen eine Gruppe bilden. Wird eine Netzwerkressource von mehreren Regelkreisen beansprucht, wie bei den Funkknoten  $v_4$ ,  $v_5$  und  $v_8$  aus Bild 5.8, so müssen diese das Zeitverhalten aller anderen Regelkreise berücksichtigen, die sich mit ihnen eine gemeinsame Ressource teilen.

Dies kann mitunter bedeuten, dass ein Sensor sehr häufig Messungen durchführen muss, wenn er zu verschiedenen Organisationseinheiten gehört, um immer zeitgetreu die richtigen Messwerte zur Verfügung stellen zu können. Beim Betrieb mehrerer Regelkreise innerhalb eines Netzwerks ist daher eine Abstimmung bzw. Synchronisation der verschiedenen Regelkreise untereinander wünschenswert, da hierdurch für das Netzwerk vorteilhafte Synergieeffekte erzielt werden können. So können beispielsweise Mehrfachmessungen von Sensoren, die zu mehreren Einheiten gehören, soweit wie möglich reduziert werden. Dies ist immer dann der Fall, wenn bei Bildung der Schnittmengen aus den Mengen der Sensoren des *r*-ten mit dem *s*-ten Regelkreis von  $V_{\text{Rr}} \setminus \{v_{r,0}\} \cap V_{\text{Rs}} \setminus \{v_{s,0}\}$  mit  $r, s \in 1, 2, ..., r_{\text{Anz}} \land r > s$  sich für einen Vergleich zwischen den Mengen  $V_{\text{Rr}} \setminus \{v_{r,0}\} \cap V_{\text{Rs}} \setminus \{v_{s,0}\}$  keine leere Menge  $V_{\text{Rr}} \setminus \{v_{r,0}\} \cap V_{\text{Rs}} \setminus \{v_{s,0}\} = \{\}$  ergibt.

Für den Vergleich müssen die Knoten der beiden Mengen  $V_{Rr}$  und  $V_{Rs}$  durch ihre übergeordnete netzwerkspezifische Bezeichnung ersetzt werden. So werden beispielsweise die in Bild 5.8 dargestellten regelkreisspezifischen Knotenbezeichnungen  $v_{2,2}$  aus der Menge  $V_{R2}$  und  $v_{1,1}$  aus der Menge  $V_{R1}$  beide in ihrer jeweiligen Menge durch  $v_4$  ersetzt. Wenn ein oder mehrere Vergleiche

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Unter Funkknoten oder Sensorknoten können Feldgeräte mit einem oder mehreren physikalischen Sensoren, Regeleinrichtungen oder Aktoren verstanden werden. Der in Bild 2.6a dargestellte WirelessHART-Adapter kann beispielsweise über HART mehrere Sensoren und Aktoren mit seiner Funkschnittstelle verbinden. Weiterhin besitzen moderne IoT-Geräte eine Vielzahl von Sensoren, beispielsweise zur Messung von Beschleunigung, Druck, Durchfluss, Temperatur usw., deren Daten über eine einzige Funkschnittstelle übertragen werden und von verschiedenen Regelkreisen zur Erreichung unterschiedlicher Regelziele genutzt werden können.

der Mengen  $V_{Rr} \setminus \{v_{r,0}\}$  und  $V_{Rs} \setminus \{v_{s,0}\}$  mit  $r, s \in 1, ..., r_{Anz} \land r > s$  eine gemeinsame Schnittmenge aufweisen, so wird dies in einer  $r_{Anz} \times r_{Anz}$ -dimensionalen Matrix <u>E</u> mit einer 1 für den entsprechenden Eintrag  $e_{r,s}$  vermerkt. Die *r*-te der  $r_{Anz}$  Zeilen von <u>E</u> steht für den *r*-ten Regelkreis, während die *s*-te Spalte der  $r_{Anz}$ -Spalten von <u>E</u> für den *s*-ten Regelkreis steht. Besitzt das Element am Schnittpunkt der *r*-ten Zeile mit der *s*-ten Spalte eine 1, so besitzen der *r*-te und der *s*-te Regelkreis mindestens einen gemeinsamen Sensor-Knoten. Algorithmus 1 gibt die Vorgehensweise zur Bestimmung der Matrix <u>E</u> an. <u>E</u> ist somit eine Matrix, deren Diagonale mit Einsen gefüllt ist und deren Einträge in der oberen Dreiecksmatrix angeben, ob Schnittmengen zwischen einzelnen Regelkreisen existieren oder nicht. Aufgrund der Symmetrie muss die untere Dreiecksmatrix aus <u>E</u> nicht betrachtet werden.

Algorithmus 1	Ermittlung gei	meinsam	verwendeter S	Sensoren	verschiedener	Regelkreise

1: Initialisiere die Matrix  $\underline{E} = \underline{0}_{r_{Anz} \times r_{Anz}}$ 2: Ausführung des Algorithmus: 3: for all r from 1 to  $r_{Anz}$  do 4: for all s from r to  $r_{Anz}$  do 5: if  $V_{Rr} \setminus \{v_{r,0}\} \cap V_{Rs} \setminus \{v_{s,0}\} \neq \{\}$  then 6: Setze in Matrix  $\underline{E}$  den Eintrag  $e_{r,s} = 1$ . 7: end if 8: end for 9: end for

Nutzen Regelkreise Sensoren gemeinsam, so können Messungen mehreren Einheiten zur Verfügung gestellt werden und es kann außerdem durch den geschickten Einsatz von Multicast-Nachrichten die Netzwerkauslastung und der Energieverbrauch einzelner Knoten reduziert werden, indem die Nachricht erst dann in zwei Pakete aufgesplittet und somit über unterschiedliche Wege gesendet wird, wenn in der Netzwerktopologie kein gemeinsamer Weg zu den adressierten Reglern möglich ist. Außerdem kann durch eine gezielte Abstimmung der Abtastintervalle unterschiedlicher, voneinander unabhängiger Regelkreisgruppen  $N_s$  auch eine gleichmäßigere Auslastung des Gesamtnetzwerks erzielt werden. Dies bietet sich insbesondere in Fällen an, in denen Einheiten keine gemeinsamen Ressourcen wie Sensoren verwenden. Der soeben beschriebene Multicast-Ansatz wird jedoch aktuell durch keines der in dieser Arbeit betrachteten Protokolle unterstützt und ist daher ein rein theoretischer Vorschlag zur Verbesserung künftiger Kommunikationsprotokolle.

Besitzen die Mengen  $V_{\text{R}r} \setminus \{v_{r,0}\} \cap V_{\text{R}s} \setminus \{v_{s,0}\}$  mit  $s \in 1, 2, ..., r_{\text{Anz}} \wedge r \neq s$  aus Netzwerkgeräten, die dem *r*-ten und *s*-ten Regelkreis angehören, keine gemeinsamen Schnittmengen, so sind sie voneinander unabhängig. Damit der *r*-te Regelkreis im Netzwerk global von allen im Netzwerk existierenden Regelkreisen unabhängig ist und sich demnach keine Ressourcen wie Sensoren, mit einem anderen Regelkreis teilt, darf er keine einzige Schnittmenge mit allen weiteren das Netzwerk nutzenden Regeleinheiten besitzen. Es können jedoch Abhängigkeiten zwischen den Ressourcen unterschiedlicher Regelkreise auftreten. Unter der Annahme, dass alle Regelkreise mit der gleichen Abtastrate  $\Delta T$  betrieben werden, ist es notwendig, Mengen  $N_s$  mit  $s = 1, 2, ..., s_{\text{max}}$ zu bilden, die jeweils die Regelkreise beinhalten, die sich Ressourcen teilen. Jede der Mengen  $N_s$ 

Al	gorithmus 2 Ermittlung der Mengen voneinander abhangiger Regelkreise
1:	Initialisierung: Matrix $\underline{E}$ in $r_{\text{Anz}}$ Zeilenvektoren $\underline{E} = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & \dots & e_{r_{\text{Anz}}} \end{bmatrix}^{\text{T}}$ unterteilen.
2:	Initialisierung: Setze Skalar $s = 1$ .
3:	Initialisierung: Des $r_{Anz}$ -dimensionalen Vektor $\underline{x}_{R} = \underline{0}_{r_{Anz} \times 1}$ .
4:	Vergleichsmengen erzeugen:
5:	for all $i$ from 1 to $r_{Anz}$ do
6:	<i>i</i> -te Menge $M_i = \{\}$ mit leerer Menge initialisieren.
7:	for all $j$ from $i$ to $r_{Anz}$ do
8:	if $e_{i,j} \neq 0$ then
9:	<i>j</i> -ter Regelkreis zur <i>i</i> -ten Menge hinzufügen: $M_i = M_i \cup \{V_{Rj}\}$ .
10:	end if
11:	end for
12:	end for
13:	Mengenmäßiger Vergleich und Verknüpfung in s Mengen.
14:	for all $i$ from 1 to $r_{Anz}$ do
15:	if $x_{R,i}$ ist 0 then
16:	Setze $N_s = M_i$ und setze Element $x_{R,i} = 1$ aus dem Vektor $\underline{x}_R$ .
17:	for all $j$ from 1 to $r_{Anz}$ do
18:	if $x_{\mathbf{R},j}$ ist 0 then
19:	if $M_i \cap M_j \neq \{\}$ then
20:	Setze Element $x_{R,j} = 1$ aus dem Vektor $\underline{x}_R$ .
21:	Vereinige Mengen $N_s = N_s \cup M_j$ .
22:	end if
23:	end if
24:	end for
25:	Setze $s = s + 1$ .
26:	end if
27:	end for
28:	Setze ermittelte Anzahl $s_{max}$ voneinander unabhängiger Regelkreisgruppen $s_{max} = s - 1$ .

muss wiederum von allen weiteren Mengen  $N_i$  mit  $i = 1, 2, ..., s_{max} \land i \neq s$  unabhängig sein. Um dies zu gewährleisten, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Algorithmus 2 entworfen.

Durch ihn ist es nun möglich, die durch den Algorithmus 1 ermittelten Abhängigkeiten zwischen den Regelkreisen zu gruppieren, so dass sich für  $N_s$  beim anschließenden Vergleich mit allen Mengen  $N_i$  mit  $i = 1, 2, ..., s_{max}$  leere Mengen ergeben und die Regelkreisgruppen somit voneinander unabhängig sind. In Bild 5.8 könnte der Regelkeis r = 3 unabhängig von den Regelkreisen r = 1, 2, 4 betrieben werden, da keine Schnittmenge mit  $V_{R1}$ ,  $V_{R2}$  und  $V_{R4}$  existiert. Unter der Annahme dass für jeden Regelkreis im Netzwerk die gleiche Abtastrate  $\Delta T$  gilt, ist es nun möglich, jedes Element eines jeden Regelkreises aus den Mengen  $N_i$  mit  $i = 1, 2, ..., s_{max}$ um  $\Delta T/s_{max}$  versetzt abzutasten und die Daten somit zeitversetzt zu übertragen bei gleichzeitiger Nutzung von Multicast Synergien bei zwei oder mehreren Regelkreisen, die die Messwerte des gleichen Sensorknotens verwenden. Ein Beispiel für die Abtastung von  $s_{max}$  voneinander unabhängiger Regelkreismengen ist Bild 5.9 zu entnehmen. Darüber hinaus ist ein umfangreicheres



**Bild 5.9:** Sendezeitpunkte unabhängiger Regelkreismengen  $N_i$  mit  $i = 1, 2, ..., s_{max}$ 

Beispiel von einem Netzwerk, über welches 11 Regelkreise kommunizieren, von denen sich einige Funkknoten teilen, in Anhang B.1 zu finden.

Es ist wichtig zu beachten, dass Knoten, die sowohl Sensoren als auch Aktoren bzw. Regler umfassen, im praktischen Einsatz zu einem Zeitpunkt entweder Messwerte senden oder empfangen können. Die Planung der Sende- und Empfangsvorgänge obliegt jedoch dem vom genutzten Protokoll abhängigen Algorithmus zur Netzwerkorganisation. Bei WirelessHART wäre dies beispielsweise die Aufgabe des in Abschnitt 3.7.1 beschriebenen Netzwerkmanagers.

Reale Systeme erfordern aufgrund verschiedener systemspezifischer Dynamiken unterschiedliche Abtastzeiten  $\Delta T$ . Dies hat zur Folge, dass obiger Algorithmus 2 so anzupassen ist, dass er unterschiedliche Abtastzeiten zu verschiedenen Mengen bzw. Gruppen sortieren kann. In diesem Fall ist außerdem nicht mehr sichergestellt, dass Sensoren für zwei verschiedene Regelkreise mit sich unterscheidenden Abtastzeiten gleichzeitig die zur Regelung eines Systems benötigten Messwerte aufnehmen können. Realisierbar wäre dies ausschließlich dann, wenn die Abtastzeiten ein Vielfaches von der kleinsten Abtastzeit  $\Delta T$  betragen würden.

Obwohl das soeben beschriebene Verfahren zur Synchronisation zwischen Netzwerk und Regeleinrichtung sehr vorteilhaft für den Betrieb von Regelungen ist, gibt es derzeit kein drahtloses Übertragungsprotokoll am Markt, welches ein derartiges Verfahren grundsätzlich ermöglicht. Um die zuvor beschriebene Differenzdruckregelung aus regelungstechnischer Sicht zuverlässig und exakt umsetzen zu können, sind vielmehr Eigenimplementierungen notwendig. Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit mit einem Regelkreis, bestehend aus einem Netzwerk mit einem Regler und drei Sensoren, durchgeführt. Da für WirelessHART ausschließlich kommerzielle Produkte zur Verfügung standen und es sich bei diesen um geschlossene Systeme handelt, war es nicht möglich, eine geeignete Regelung für Differenzdrücke zu entwerfen, bei der sichergestellt ist, dass die Messwerte zweier Messstellen zum gleichen Abtastzeitpunkt übernommen werden. Da es sich bei Bluetooth LE um ein offenes System handelt, konnte bei diesem Protokoll eine Zeitsynchronisation gemäß Bild 5.6 (rechts) implementiert und somit sichergestellt werden, dass die Drücke vor und nach dem Ventil nahezu gleichzeitig gemessen werden. Ebenfalls möglich war ein derartiges Verfahren mit dem in Abschnitt 3.7.3 vorgestellten MAC-Stack zur Messwertübertragung in sehr kurzen Intervallen und reduziertem Payload. Der MAC-Stack nutzt das TDMA-Verfahren, um Daten bzw. Messwerte über das drahtlose Netzwerk zu verschicken. Bluetooth LE nutzt hingegen Sendeintervalle, welche jedoch ähnlich dem TDMA-Verfahren sind, allerdings auf eine einfache

Topologie, die Sterntopologie, beschränkt sind. Obwohl WLAN CSMA als Verfahren zur Übermittlung von Paketen verwendet, ist das soeben beschriebene Verfahren auch hierfür geeignet, wobei sich lediglich die Methode zur Zeitsynchronisation zwischen den einzelnen Teilnehmern im Netzwerk unterscheidet.

In diesem Abschnitt wurde das ideale Zusammenspiel zwischen einem drahtlosen Netzwerk und einer oder mehreren Regeleinrichtungen beschrieben. Eine Synchronisation der Abtastung ist vor allem für Regelungssysteme wichtig, welche mehr als eine Messgröße für die Erreichung eines Regelziels nutzen. Aber auch bei Systemen mit nur einer Messgröße können durch das soeben beschriebene Verfahren bedeutende Vorteile erreicht werden. Es eignet sich ebenfalls für drahtgebundene Systeme, die Busse oder Netzwerke zur Übermittlung von Messwerten nutzen und bei denen jeweils immer nur ein Teilnehmer gleichzeitig Daten und Messwerte versenden kann. In den folgenden Abschnitten sollen verschiedene Regelkonzepte betrachtet werden, die entweder das lokale oder zentrale Regelkonzept nutzen. Dabei wird auf die theoretische Auslegung von Reglern für eine nichtlineare Regelstrecke eingegangen und abschließend werden die Stärken und Schwächen der einzelnen Konzepte für den Einsatz in Systemen mit drahtlosen Rückführungen beschrieben.

### 5.5 Gain-Scheduling-PID-Regler

Der in Abschnitt 2.1 beschriebene Versuchsstand ist nichtlinear. Dies ist besonders anhand seiner Ventilkennlinie und des Durchflusses zu sehen, der quadratisch in der Gleichung (2.10) vorkommt. Dieser Abschnitt lehnt sich an die Veröffentlichung des Autors [92] an und wird einen Gain-Scheduling-Regler in Kombination mit der Nutzung einer Funkübertragungsstrecke für Messwerte vorstellen. Ein Gain-Scheduling-Regler eignet sich insbesondere für Systeme, die eine immer gleichbleibende Totzeit aufweisen und bei denen keine oder nur sehr wenige Paketausfälle vereinzelt auftreten. Wird jedoch die Totzeit eines Systems für das Scheduling berücksichtigt, so kann der Gain-Scheduling-Regler zwar auch für Systeme mit variablen Totzeiten genutzt werden, jedoch erhöht dies die Komplexität des Systems, für das ein Regler entworfen werden soll. Wird beispielsweise ein nichtlineares System an  $n_{AP}$  Arbeitspunkten linearisiert und werden zusätzlich  $n_{\rm AP,T}$  mögliche Totzeiten um jeden der  $n_{\rm AP}$  Arbeitspunkte für das System berücksichtigt, so erhöht sich die Menge der Arbeitspunkte, für die jeweils ein Regler entworfen werden muss, auf  $n_{AP} \cdot n_{AP,T}$ Arbeitspunkte. Außerdem muss dem Regler die Totzeit exakt bekannt sein, um anhand der Totzeit ein Scheduling durchführen zu können. Ein Verfahren zur Ermittlung der Totzeit wurde im Zusammenhang mit Bluetooth hinsichtlich der Zeitsynchronisierung zwischen verschiedenen Knoten in Abschnitt 3.7.2 vorgestellt. Dennoch ist der Entwurf eines Reglers mit einer großen Menge von Arbeitspunkten sehr aufwendig, solange dieser nicht automatisiert durchgeführt werden kann. Daher wurde in dieser Arbeit auf ein Scheduling mit der Totzeit als einer der Scheduling-Parameter verzichtet.

Die Idee eines Gain-Scheduling-Reglers besteht grundsätzlich darin, ein nichtlineares System in mehrere Arbeitspunkte zu unterteilen, für die jeweils ein linearer Regler entworfen wird. Die Un-



Bild 5.10: Arbeitspunkte am Beispiel des Anlagenprüfstandes

terteilung erfolgt anhand festzulegender nichtlinearer Zustandsgrößen des zu regelnden Systems, wie beispielsweise dem Durchfluss q(t) oder dem Differenzdruck  $\Delta p(t)$  des in Abschnitt 2.1 vorgestellten Anlagenprüfstands. Die Besonderheit des Schedulings ist es, in Abhängigkeit vom aktuellen Istzustand des dynamischen Systems zwischen den Arbeitspunkten umzuschalten. Im Gegensatz zum harten Umschalten zwischen zwei Arbeitspunkten besteht dabei auch die Möglichkeit zwischen benachbarten Arbeitspunkten zu interpolieren bzw. zu gewichten. Jeder Arbeitspunkt besitzt einen Einzugsbereich, innerhalb dessen er gültig ist. Die Aufteilung der Arbeitspunkte am Beispiel des Anlagenprüfstands könnte für eine Durchflussregelung beispielhaft wie in Bild 5.10 dargestellt durchgeführt werden.

Als Arbeitspunkte werden im Folgenden die Ruhelagen des Systems genutzt. Diese setzen sich aus einem Durchflusswert  $q_{AP}$  und dem zugehörigen  $K_v$ -Wert zusammen. Die möglichen Einzugsbereiche der Arbeitspunkte sind ebenfalls um jeden Arbeitspunkt als Ellipsen dargestellt. Als Scheduling-Parameter wird für die Durchflussregelung der Durchfluss q(t) und für die Differenzdruckregelung der Differenzdruck  $\Delta p(t)$  verwendet. Wird das Gain-Scheduling-Konzept auf den Anlagenprüfstand übertragen, so wird die nichtlineare Systembeschreibung aus Gleichung (2.20) zunächst um  $n_{AP}$  Arbeitspunkte linearisiert und diskretisiert. Hieraus folgt die Systembeschreibung im  $\mathscr{Z}$ -Bereich für den j-ten Arbeitspunkt zu

$$G_{\mathrm{S},j}(z) = \frac{b_{\mathrm{S}1,j}z + b_{\mathrm{S}0,j}}{a_{\mathrm{S}2,j}z^2 + a_{\mathrm{S}1,j}z + a_{\mathrm{S}0,j}} \text{ mit } j \in 1, \dots, n_{\mathrm{AP}}.$$
(5.28)

Die vorliegende Systembeschreibung (5.28) berücksichtigt noch keine Totzeiten. Allerdings treten im vorliegenden System mehrere Totzeiten auf. Dies ist zum einen die Zeit  $t_{T,v}$ , die ein Ventil benötigt, um einen vom Regler vorgegeben Sollwert  $h_{soll}(t)$  zu übernehmen. Zum anderen entsteht durch die Rohrleitung und die Trägheit des Durchflussmessgeräts eine Totzeit, welche bei der Modellierung als  $t_{T,q}$  angenommen wurde. Den größten Anteil an der Totzeit liefert die Übertragung von Messwerten im WirelessHART-Netzwerk. Nach den Messergebnissen aus Bild 3.12 für die Topologie 1 weisen die meisten Übertragungsvorgänge im Netzwerk eine Übertragungstotzeit  $t_{T,w}$ im Bereich von 0,7 s und 1,4 s auf. Aufgrund der damit insgesamt auftretenden Totzeit

$$t_{\rm T} = t_{\rm T,v} + t_{\rm T,q} + t_{\rm T,w}$$
(5.29)

wird das Modell aus (5.28) um eine Totzeit von d Abtastschritten erweitert. Daraus folgt die totzeitbehaftete, diskrete Übertragungsfunktion

$$G_{\mathrm{S},j}(z) = \frac{b_{\mathrm{S}1,j}z + b_{\mathrm{S}0,j}}{a_{\mathrm{S}2,j}z^2 + a_{\mathrm{S}1,j}z + a_{\mathrm{S}0,j}} \cdot z^{-d}.$$
(5.30)

Um die System- und Übertragungstotzeiten zu berücksichtigen, wurde unter Nutzung von WirelessHART als Übertragungsprotokoll d auf 1 gesetzt, denn die Gesamttotzeit  $t_T$  für über 90% der Messwerte im System ist kleiner als 2 s, so dass gilt  $t_T < 2$  s. Hierbei wird die Abtastzeit  $\Delta T_R$  zu zwei Sekunden gewählt. Für das Bluetooth-Protokoll kann für  $\Delta T_R$  eine Schrittweite von 100 ms und für das MAC-Protokoll von 20 ms gewählt werden. In dieser Arbeit wurde das Gain-Scheduling-Verfahren ausschließlich mit WirelessHART als Übertragungsprotokoll für die Messwerte verwendet, um zu zeigen, dass auch ein System mit einer hohen Dynamik bei aus der Funkübertragung resultierenden großen Abtastzeiten geregelt werden kann.

Für das totzeitbehaftete System wurden mittels des Wurzelortskurvenverfahrens  $n_{AP}$  diskrete PID-Regler entworfen, deren Polstellen und Verstärkungen derart gewählt sind, dass der geschlossene Regelkreis langsam genug ist, um mit einer Abtastzeit  $\Delta T_R$  von 2 s betrieben zu werden. Die Struktur eines PID-Reglers im *j*-ten Arbeitspunkt ist in Polynomdarstellung sowie in additiver Form

$$G_{\mathrm{R},j}(z) = \frac{b_{\mathrm{R}2,j}z^2 + b_{\mathrm{R}1,j}z + b_{\mathrm{R}0,j}}{a_{\mathrm{R}2,j}z^2 + a_{\mathrm{R}1,j}z + a_{\mathrm{R}0,j}}$$
  
=  $K_{\mathrm{P},j} + K_{\mathrm{I},j} \cdot \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} \frac{z+1}{z-1} + K_{\mathrm{D},j} \cdot \frac{2 \cdot N_j \cdot (z-1)}{(2+N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}) z + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}} - 2}.$  (5.31)

Die Bestimmung der Koeffizienten der Polynomdarstellung wird in Anhang B.2.2 ausführlich behandelt. Für den geschlossenen Regelkreis ergibt sich

$$G_j(z) = \frac{G_{R,j}(z) \cdot G_{S,j}(z)}{1 + G_{R,j}(z) \cdot G_{S,j}(z)}.$$
(5.32)

Alle in dieser Arbeit für die Simulationen und Messungen mit dem Gain-Scheduling-Regler verwendeten Parameter sind für die Durchflussregelung den Tabellen B.2 und B.3 und für die Differenzdruckregelung der Tabelle B.4 aus Anhang B.2.2 zu entnehmen. Im Regelkreis wird der Durchfluss durch den Durchflusssensor gemessen, abgetastet und drahtlos zur Regeleinrichtung übertragen. Nach einer Übertragungstotzeit  $T_t$  trifft der Durchflussmesswert  $q_{\text{mess},T}$  an der Regeleinrichtung ein und wird dort vom Regler abgetastet, der mit einer Abtastzeit von  $\Delta T_R$  arbeitet.



Bild 5.11: Regelkreisstruktur mit Gain-Scheduling-Regler am Anlagenprüfstand [92]

Der Durchflussmesswert  $q_{\text{mess},T}$  dient als Scheduling-Parameter zur Durchführung der Arbeitspunktwechsel. Die Reglerverstärkungen  $K_{\text{I}}$ ,  $K_{\text{P}}$ ,  $K_{\text{D}}$  und N werden zwischen benachbarten Arbeitspunkten linear, gemäß der implementierten und durch den Scheduling-Vektor repräsentierten Regeln aus Anhang B.2.2 interpoliert. Um ein ständiges Umschalten (Flattern) zu vermeiden, welches durch Messrauschen hervorgerufen werden kann, wurde für die Größe  $h_{\text{soll}}$  eine Hysterese eingeführt.

Die Struktur des Gain-Scheduling-Reglers, für den die lokale Regelkreisstruktur aus Bild 5.5 genutzt wird, ist in Bild 5.11 dargestellt. Das Strukturbild zeigt eine Durchflussregelung, für die der Messwert  $q_{mess}(t)$  zurückgeführt wird. Soll der Ein- oder Ausgangsdruck mittels eines Stellventils über dessen Ventilstellung geregelt werden, so ist die Struktur des Regelkreises identisch. Der einzige Unterschied ist, dass als Messgrößen entweder  $p_1(t)$  oder  $p_2(t)$  (siehe Bild 2.1) zurückgeführt werden und die Reglerparameter sowie Arbeitspunkte angepasst werden müssen. Bei der Umsetzung einer Differenzdruckregelung müssen die beiden Messgrößen  $p_1(t)$  und  $p_2(t)$ an den lokalen Regler übermittelt werden, wobei die in Bild 5.11 dargestellte Regelkreisstruktur um die Rückführung einer zweiten Messgröße erweitert werden muss. Aufgrund der beiden in Gleichung (2.23) benötigten Messwerte  $p_1(t)$  und  $p_2(t)$  zur Differenzdruckberechnung hat die in Abschnitt 5.4 vorgestellte Synchronisierung der Messwertaufnahme eine hohe Bedeutung. Diese kann jedoch im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit implementierten Bluetooth-Dienst und dem MAC-Protokoll mit den vorhandenen WirelessHART-Komponenten nicht erreicht werden.

Der Gain-Scheduling-Regler wurde während dieser Arbeit ausschließlich im Zusammenhang mit WirelessHART getestet. Durch die langen Übertragungsintervalle müssen Regler für Systeme mit einer hohen Dynamik so ausgelegt werden, dass sie für einen ausreichend langsamen geschlossenen Regelkreis sorgen. Paketausfälle werden in obiger Struktur, die ausschließlich einfache P-, PI-, PD- oder PID-Regler verwendet, nicht berücksichtigt. Treten bei obiger Struktur einzelne Paketausfälle auf, so kann dies der Regler noch bewältigen. In diesem Fall kommt es jedoch zum Überschwingen der Regelgröße  $q_{mess}(t)$ . Durch den Entwurf eines Beobachters ist es jedoch möglich, auch Paketausfälle zu berücksichtigen. Längerfristige Übertragungsausfälle können somit beobachterbasiert abgefangen werden.

Auch wenn der Gain-Scheduling-Regler in dieser Arbeit ausschließlich für WirelessHART als Übertragungsprotokoll ausgelegt wurde, so kann er jedoch problemlos für Bluetooth oder das entworfene MAC basierte Protokoll genutzt werden. Bei Nutzung in Kombination mit einem leistungsfähigeren Übertragungsprotokoll kann allerdings die Performanz durch Neuauslegung der Einzelregler in jedem Arbeitspunkt gesteigert werden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es in den Arbeitspunkten einfache Standardregler verwendet, wie sie für industrielle Anwendungen vielfach eingesetzt werden. Nachteilig an diesem Verfahren ist jedoch, dass die Einzelregler mittels des Wurzelortskurvenverfahrens entworfen werden und bei jeder Systemänderung oder Änderung des Netzwerkverhaltens die Regler manuell mittels des Wurzelortskurvenverfahrens neu ausgelegt bzw. angepasst werden müssen, solange das Zeitverhalten des Netzwerks nicht als zusätzlicher Scheduling-Parameter berücksichtigt wird. Dies stellt somit einen großen Zeitaufwand dar.

Im nächsten Abschnitt soll ein bekanntes und im Zusammenhang mit WirelessHART implementiertes Verfahren vorgestellt werden, welches sich auch für den Einsatz in Regelkreisen eignet, deren Mess- und Stellgrößenübertragungen über kurze oder längere Zeiträume ausfallen können.

# 5.6 Yokogawa-Konzept

## 5.6.1 Grundstruktur

In diesem Abschnitt wird ein aus der Literatur bekanntes Regelkonzept beschrieben, welches in [59] und [60] vorgestellt wurde. Es handelt sich dabei um ein Regelkonzept, welches für zentrale Anlagenregler genutzt werden kann. Der abgetastete Messwert y(z) wird von einem Sensor zu einem zentralen Anlagenregler übertragen. Auf Basis des Messwerts wird die Stellgröße u(z)ermittelt, die wiederum von der Regeleinrichtung zum Aktor übermittelt wird. Die Übertragung der Messwerte y(z) und/oder Stellgrößen u(z) kann sowohl drahtgebunden als auch über drahtlose Netzwerke erfolgen. Bei der Übertragung können Verzögerungen und Paketausfälle auftreten, die von der jeweiligen Empfangseinrichtung behandelt werden müssen. Die verzögerten Signale am Ende einer Übertragungsstrecke sind mit dem Index T und der Kurzform ihres Signalnamens gekennzeichnet. Die Struktur des in diesem Abschnitt betrachteten Regelkreises ist in Bild 5.12 dargestellt.

In diesem Bild sind Sender mit (S) und Empfänger mit (E) gekennzeichnet. Bei realen Funknetzwerken befinden sich Sender und Empfänger in einem Funkmodul. Es wird mittels einer Antenne, je nach Bedarf zwischen Sende- und Empfangsbetrieb umgeschaltet. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs von Funkeinrichtungen ist darauf zu achten, die Sende- und Empfangszeiträume



Bild 5.12: Regelkreisstruktur nach dem Verfahren aus [59] und [60]

möglichst kurz zu halten. Zusätzlich sollte das Funkmodul in Zeiträumen, in denen keine Sendeund Empfangsvorgänge sowie Verarbeitungsprozesse stattfinden, in einen Schlafmodus gesetzt werden, soweit dies von der genutzten Hardware unterstützt wird. Das dynamische System  $G_S(s)$ , welches sowohl ein SISO- als auch ein MIMO-System sein kann, ist in Bild 5.12 im Bildbereich dargestellt.

Für diese Darstellungsart ist nach dem Aktor ein Halteglied und im Sensor ein Abtastglied notwendig, welche in diesem Bild nicht gesondert eingezeichnet sind. Am lokalen Anlagenregler befindet sich ein Prozesswert (PV) Kompensator, der genau dann einspringt, wenn ein oder mehrere Prozesswerte nicht an der Regelungseinrichtung eintreffen. Zusätzlich wird ein Sollwert (SV) Kompensator genutzt, der den Sollwert w(z) beim Verlust von Paketen anpasst, wenn die Stellgröße u(z) fehlerhaft übermittelt wurde. Ein Ausfall oder ein fehlerhaft übermitteltes Paket wird immer dann erkannt, wenn kein ACK-Paket  $u_{ACK,T}(z)$  mit der zuvor versendeten Stellgröße am Empfänger (E) der Regeleinrichtung zu einem definierten Zeitpunkt eingetroffen ist.

Die Anpassung der Führungsgröße w(z) ist immer dann wichtig, falls ein Regler mit *I*-Anteil zum Einsatz kommt, da dieser die Regeldifferenz  $e(z) = w(z) - y_{\text{TPV}}(z)$  kontinuierlich aufintegrieren würde. Durch die Sollwert-Kompensation kann dies jedoch vermieden werden. Auf Seiten des Aktors findet eine Stellgrößen-Kompensation dann statt, falls u(z) nicht beim Aktor als  $u_{\text{TMV}}(z)$  ankommt und somit ausfällt. In den Blöcken des Prozesswert (PV) Kompensators und des Stellgrößen (MV) Kompensators können beliebige bekannte Methoden zur Kompensation von Paketausfällen realisiert werden. Eine der einfachsten Methoden ist es, den letzten Wert so lange zu halten, bis ein neuer Wert  $u_{\text{TMV}}(z)$  oder  $y_{\text{TPV}}(z)$  an der jeweiligen Empfangseinrichtung eintrifft. Weiterhin können beobachterbasierte Methoden, wie z.B. Zustandsbeobachter, Predictive Outage Compensator oder Kalmanfilter zur Kompensation genutzt werden. Allerdings sind für die letzteren möglichst genaue Modelle des zu regelnden Prozesses und des Netzwerkverhaltens hinsichtlich Übertragungstotzeiten notwendig.

In Bild 5.12 ist der Regelkreis als Abtastsystem dargestellt. Während eines Abtastschrittes  $\Delta T$  ist es notwendig, dass der Messwert y(z) vom Sensor zum Regler übertragen, dort verarbeitet und das daraus resultierende Ergebnis, die Stellgröße u(z), vom Regler zum Aktor übertragen wird. Der Aktor muss schließlich mit  $u_{ACK}(z)$  bestätigen, dass u(z) als  $u_{TMV}(z)$  erfolgreich beim Aktor eingetroffen war und dies somit dem Regler mitteilen. Da alle Abläufe während eines Abtastschrittes durchgeführt werden müssen, ist es notwendig diese Vorgänge zu koordinieren. Dies kann entweder ereignisgesteuert oder zeitgesteuert erfolgen. Unter ereignisgesteuert ist zu verstehen, dass, nachdem ein Schritt aus einer Schrittkette erfolgreich abgeschlossen ist, in den nachfolgenden Schritt übergegangen wird und nachdem der Nachfolgeschritt abgeschlossen ist, wiederum zum Nächsten gegangen wird. Im Fall des getriggerten (zeitgesteuerten) Ablaufs wird zu einem festen Zeitpunkt durch einen Trigger ein Ereignis ausgelöst und somit vom aktuellen Schritt einer Schrittkette in den Nachfolgeschritt übergegangen. Zu diesem Zeitpunkt muss dem Folgeschritt der erwartete Wert ( $y_{TPV}(z)$ ,  $u_{TMV}(z)$  oder  $u_{ACK,T}(z)$ ) zur Verarbeitung zur Verfügung stehen. Ist dies nicht der Fall, kommt ein der Übertragungsstrecke hinter der Empfangseinrichtung zugeordneter Kompensator zum Einsatz, der für die weitere Schrittkette einen Ersatzwert liefert.

Im folgenden Absatz werden Ereignissteuerung und Triggerung am Beispiel des in Bild 5.12 abgebildeten Regelkreises beschrieben. Im Fall der Ereignissteuerung wird ein Messwert y(z), sobald er am Regler als  $y_{\text{TPV}}(z)$  eingetroffen ist, direkt am Regler verarbeitet und die Stellgröße u(z) direkt nach der Verarbeitung an den Aktor gesendet. Daraufhin setzt der Aktor die Stellgröße  $u_{\text{TMV}}(z)$  um und bestätigt die Ankunft durch Versand der zuvor erhaltenen Stellgröße als  $u_{\text{ACK}}(z)$ an den Regler. Dort trifft sie als  $u_{\text{ACK},\text{T}}(z)$  ein. Der ereignisgesteuerte Ablauf kommt somit ohne Verzögerungen durch Wartezeiten aus. Falls am Ende eines Abtastschritts  $t = t_i + \Delta T$  ein Wert nicht erfolgreich sein Ziel erreicht hat, wird dies am jeweiligen Ziel als Ausfall gewertet. In diesem Fall springen für die ausgefallenen Werte  $y_{\text{TPV}}(z)$ ,  $u_{\text{TMV}}(z)$  und/oder  $u_{\text{ACK},\text{T}}(z)$  die zugehörigen Kompensatoren ein.

Anders als beim ereignisgesteuerten Ablauf verhält es sich mit dem zeitlich gesteuerten Ablauf, welcher in Bild 5.12 mit mehreren Triggerblöcken dargestellt ist. Bei diesem Vorgehen wird ein Abtastschritt in drei Teile untergliedert, deren zeitliche Aufteilung davon abhängt, wieviel Übertragungs- und Verarbeitungszeit im jeweiligen Schritt benötigt werden. In dieser Arbeit hat sich die äquidistante Aufteilung der Abtastschritte bewährt, da in jedem Schritt die gleiche Übertragungstechnologie zum Einsatz kommt. Aus diesem Grund wird im Weiteren ein Abtastschritt in drei Zeitabschnitte  $\frac{\Delta T}{3}$  unterteilt. Im ersten Zeitabschnitt  $t = t_i$ , wobei  $t_i$  für den Zeitpunkt des aktuellen, also *i*-ten Abtastschritts steht, wird der Messwert y(z) aufgenommen und an den Regler gesendet. Dort wird dieser zum Zeitpunkt  $t_{i,\text{TPV}}$  als  $y_{\text{TPV}}(z)$  eingetroffene Wert schließlich zum Zeitpunkt  $t = t_i + \frac{1}{3} \cdot \Delta T$  abgetastet und durch die Regeleinrichtung verarbeitet, welche die daraus resultierende Stellgröße  $u_{\text{MV}}(z)$  an den Aktor sendet. Dieser tastet den Wert  $u_{\text{TMV}}(z)$ schließlich zum Zeitpunkt  $t = t_i + \frac{2}{3} \cdot \Delta T$  ab, schaltet ihn auf die Strecke und sendet ein Bestätigungspaket mit dem Wert  $u_{\text{ACK}}(z)$  an den Regler zurück. Zum Zeitpunkt  $t = t_i + \Delta T$  wird schließlich am Regler geprüft, ob die Stellgröße  $u_{\text{ACK},\text{T}}(z)$  erfolgreich übertragen wurde oder es dabei zu einem Fehler kam. Im Fehlerfall würde im nächsten Abtastschritt die Führungsgröße w(z) durch den SV-Komplementer angepasst. Im Folgenden wird die zeitgesteuerte Version des Systems weiterverfolgt.

Dem in diesem Abschnitt vorgestellten Regelkonzept liegt ein diskreter Reglerentwurf zugrunde. Im Folgenden wird für das zeitgesteuerte Prinzip die in Bild 5.12 gezeigte Ablaufkette in Schritte eingeteilt und detailliert beschrieben.

- 1. Der Messwert y(z) wird zum Zeitpunkt  $t = t_i$  vom Sensor über das Netzwerk zur Regeleinrichtung übertragen.
- 2. Liegt der mit der Übertragungszeitverzögerung  $t_{i,\text{TPV}}$  übermittelte Messwert y(z) nach der Zeit  $t = t_i + \frac{1}{3} \cdot \Delta T$  als  $y_{\text{TPV}}(z)$  am Eingang des Reglers an, so wird die Regeldifferenz  $e(z) = w(z) y_{\text{TPV}}(z)$  gebildet und durch einen vorgegebenen Regelalgorithmus die Stellgröße u(z) berechnet. Sollte zum Zeitpunkt  $t = t_i + \frac{1}{3} \cdot \Delta T$  kein neuer Wert  $y_{\text{TPV}}(z)$  am Empfänger der Regeleinrichtung eingetroffen sein, so wird dies als Paketausfall gewertet und es kommt der Messwert-Kompensator (PV) zum Einsatz, welcher einen Ersatzwert  $\tilde{y}(z)$  liefert, mit dem der zuvor beschriebene Soll-Istwert-Vergleich  $e(z) = w(z) \tilde{y}(z)$  durchgeführt werden kann.
- 3. Die berechnete Stellgröße u(z) wird über ein Netzwerk an den Aktor übermittelt, welcher nach der Zeit  $t_{i,\text{TMV}}$  als  $u_{\text{TMV}}(z)$  am Empfänger des Aktors zur Verfügung steht und schließlich zum Zeitpunkt  $t = t_i + \frac{2}{3} \cdot \Delta T$  verarbeitet und auf die Strecke aufgeschaltet wird. Wurde die Stellgröße nicht ordnungsgemäß übermittelt, so springt der Stellgrößen-Kompensator ein und stellt eine Ersatzstellgröße  $\tilde{u}(z)$  zur Verfügung.
- 4. Ist im vorherigen Schritt  $u_{\text{TMV}}(z)$  erfolgreich am Aktor eingetroffen, so sendet der Aktor eine Bestätigungsnachricht  $u_{\text{ACK}}(z)$  an die Regeleinrichtung, die signalisieren soll, dass die Stellgröße erfolgreich und richtig übermittelt wurde.
- 5. Trifft die Bestätigungsnachricht  $u_{ACK,T}(z)$  nach der Übertragungszeit  $\tilde{t}_{i,TMV}$  als  $u_{ACK,T}(z)$  an der Regeleinrichtung ein und wird dort zum Zeitpunkt  $t = t_i + \Delta T$  erfolgreich abgetastet, so ist alles in Ordnung. Steht die Bestätigungsnachricht jedoch nicht der Regeleinrichtung zur Verfügung, so wird durch den Sollwert-Kompensator eine Anpassung des Sollwerts w(z) durchgeführt, da davon ausgegangen wird, dass die Stellgröße nicht erfolgreich an den Aktor übermittelt worden ist.

Jeder der soeben beschriebenen Schritte muss einmal pro Abtastschritt k im Zeitraum  $\Delta T$  durchlaufen werden. Die Abtastschritte müssen so groß gewählt werden, dass dies mit dem zu regelnden dynamischen System  $G_{\rm S}(s)$  sowie den Totzeiten der Übertragungsstrecke möglich ist.

#### 5.6.2 Anwendung am Anlagenprüfstand

In diesem Abschnitt wird das soeben beschriebene Verfahren auf den am Institut vorhandenen und in Abschnitt 2.1 beschriebenen Anlagenprüfstand angewendet und das Vorgehen zum Entwurf ei-

nes diskreten Reglers  $G_R(z)$  sowie dessen Führungsgrößen-Kompensation beschrieben. Bei Paketausfällen wird immer der letzte Mess- bzw. Stellgrößenwert gehalten. Zur Regelung des Anlagenprüfstands wird der Gain-Scheduling-Regler aus Abschnitt 5.5 eingesetzt, welcher PID-Regler an den jeweiligen Arbeitspunkten nutzt. Beim Übergang zwischen den Arbeitspunkten wird zwischen den Reglerverstärkungen  $K_P$ ,  $K_D$ ,  $K_I$  sowie der Zeitkonstante des PT1-Glieds vom realen D-Anteil des PID-Reglers interpoliert. Die Interpolation erfolgt linear. Der Gain-Scheduling-Regler wurde als digitaler Regler, abgestimmt auf die Verwendung des WirelessHART-Protokolls für die Netzwerk-Topologie aus Bild 3.12, mit einer Abtastzeit von  $\Delta T = 2$  s realisiert. Der Differentiator des realen PID-Reglers wird in der folgenden Rechnung mit Vorwärts- und der Integrator mit Rückwärtsintegration betrieben. Es hat sich jedoch im Verlauf der Untersuchungen gezeigt, dass die Trapezintegration in Kombination mit längeren Abtastintervallen  $\Delta T$ , wie es bei der Nutzung von WirelessHART als Übertragungsprotokoll der Fall ist, zu einer höheren Genauigkeit führt. Wird der reale PID-Regler als Parallelstruktur im z-Bereich dargestellt, so ergibt sich

$$G_{\rm R}(z) = K_{\rm P} + K_{\rm I} \cdot \Delta T \cdot \frac{z}{z-1} + K_{\rm D} \cdot \frac{N}{1+N \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{z-1}} = \frac{U_{\rm R}(z)}{E(z)}.$$
 (5.33)

Die Stellgröße des Reglers setzt sich aus den einzelnen Regleranteilen

$$U_{\rm R}(z) = U_{\rm P}(z) + U_{\rm I}(z) + U_{\rm D}(z)$$
(5.34)

zusammen. Für die einzelnen Anteile gelten die Gleichungen

$$U_{\rm P}(z) = K_{\rm P} \cdot E(z) \tag{5.35}$$

$$U_{\rm I}(z) = K_{\rm I} \cdot \Delta T \cdot \frac{z}{z-1} \cdot E(z)$$
(5.36)

$$U_{\rm D}(z) = K_{\rm D} \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{z-1}} \cdot E(z).$$
(5.37)

Werden diese Gleichungen in ihre Differenzen-Darstellung transformiert, so ergeben sich

$$u_{\mathrm{P},k} = K_{\mathrm{P}} \cdot e_k \tag{5.38}$$

$$u_{\mathrm{I},k} = K_{\mathrm{I}} \cdot \Delta T \cdot e_k + u_{\mathrm{I},k-1} = K_{\mathrm{I}} \cdot \Delta T \cdot \sum_{i=0}^{n} e_i$$
(5.39)

$$u_{\mathrm{D},k} = K_{\mathrm{D}} \cdot N \cdot e_k - K_{\mathrm{D}} \cdot N \cdot e_{k-1} - (N \cdot \Delta T - 1) \cdot u_{\mathrm{D},k-1}$$
(5.40)

und weiterhin gilt für die Gesamtstellgröße die Berechnungsvorschrift

$$u_{\mathrm{R},k} = u_{\mathrm{P},k} + u_{\mathrm{I},k} + u_{\mathrm{D},k}.$$
 (5.41)

Bei der Übertragung von Paketen über ein drahtloses Netzwerk können Paketausfälle auftreten. Für diesen Fall wurde in [59] ein Konzept vorgestellt, welches es ermöglicht, bei Nutzung eines idealen PID-Reglers den Sollwert  $w_k$  derart anzupassen, dass die Regelabweichung  $e_k$  möglichst niedrig wird, falls es bei der Stellgrößenübertragung  $u_k$  zu einem Paketausfall kommt. Dadurch wird verhindert, dass der Integrator des PID-Reglers große Stellgrößen erzeugt, die bei der nächsten erfolgreichen Paketübertragung auf das zu regelnde System aufgeschaltet werden. In diesem Schritt soll der reale PID-Regler, dessen Integrator mit einem Rückwärtsintegrationsverfahren arbeitet, an dieses Konzept von [59] angepasst werden. Hierzu werden zunächst die Gleichungen (5.38), (5.39) und (5.40) in (5.41) eingesetzt, was auf

$$u_{\mathrm{R},k} = K_{\mathrm{P}} \cdot e_k + K_{\mathrm{I}} \cdot \Delta T \cdot e_k + u_{\mathrm{I},k-1} + K_{\mathrm{D}} \cdot N \cdot e_k - K_{\mathrm{D}} \cdot N \cdot e_{k-1} - (N \cdot \Delta T - 1) \cdot u_{\mathrm{D},k-1}$$
(5.42)

führt. Diese Gleichung wird nach der Regeldifferenz

$$e_{k} = \frac{u_{\mathrm{R},k} - u_{\mathrm{I},k-1} + K_{\mathrm{D}} \cdot N \cdot e_{k-1} + (N \cdot \Delta T \cdot -1) \cdot u_{\mathrm{D},k-1}}{K_{\mathrm{P}} + K_{\mathrm{I}} \cdot \Delta T + K_{\mathrm{D}} \cdot N}.$$
(5.43)

zum Abtastschritt k umgestellt. Die Regeldifferenz wird andererseits durch die Subtraktion zwischen Soll- und Istwert zum Abtastschritt k gebildet  $e_k = w_k - x_k$ . Der Ersatzsollwert  $\tilde{w}_k$  wird im Folgenden mit einer Tilde gekennzeichnet und ergibt sich aus

$$\tilde{w}_{k} = \frac{u_{\mathrm{R},k} - u_{\mathrm{I},k-1} + K_{\mathrm{D}} \cdot N \cdot e_{k-1} + (N \cdot \Delta T - 1) \cdot u_{\mathrm{D},k-1}}{K_{\mathrm{P}} + K_{\mathrm{I}} \cdot \Delta T + K_{\mathrm{D}} \cdot N} + x_{k}.$$
(5.44)

In Kombination mit dem Gain-Scheduling-Verfahren ist es bei vorliegender Implementierung mit einem einzelnen Regler, dessen Parameter beim Arbeitspunktwechsel angepasst werden, sehr wichtig, das bei einem Wechsel zwischen zwei Arbeitspunkten der Wert  $u_{1,k-1}$  neu initialisiert wird. Diese Neuinitialisierung könnte vermieden werden, indem mehrere Regler parallel betrieben würden, die jeweils einen I-Anteil haben und zwischen den umgeschaltet werden würde. Die Initialisierung wird über

$$\tilde{u}_{I,k-1} = h_{AP,k-1} - h_{AP,k} + u_{I,k}$$
(5.45)

durchgeführt.  $h_{AP,k-1}$  steht in dieser Gleichung für die Ventilstellung im Arbeitspunkt des vorherigen Abtastschrittes k-1 und  $h_{AP,k}$  für den Wert der Ventilstellung im Arbeitspunkt des aktuellen Abtastschrittes k. In dem Konzept von [59] findet sowohl zwischen Sensor und Regler als auch zwischen Regler und Aktor eine drahtlose Übertragung statt. Zwischen Sensor und Regler wird die PV und zwischen Regler und Aktor die MV übertragen. Der Aktor gibt wiederum eine Rückmeldung an den Regler, ob und welcher Wert übertragen wurde. Um die Auswirkungen eines Paketausfalls zu minimieren, wird die Stellgröße des Reglers in zwei Teile zerlegt. Ein Anteil umfasst den Einfluss des D-Anteils bei einer Veränderung der Führungsgröße, welcher mit

$$u_{\text{Dw},k} = K_{\text{D}} \cdot N \cdot (w_k - w_{k-1}) - (N \cdot \Delta T - 1) \cdot u_{\text{Dw},k-1}$$
(5.46)

angegeben wird und schließlich den D-Anteil, welcher durch die Veränderung der Messgröße zwischen zwei Abtastschritten hervorgerufen und mit

$$u_{\text{Dx},k} = K_{\text{D}} \cdot N \cdot (x_k - x_{k-1}) - (N \cdot \Delta T - 1) \cdot u_{\text{Dx},k-1}$$
(5.47)

berechnet wird. Die Addition von (5.46) und (5.47) führt wiederum auf (5.40). Die MV, die zwischen Regler und Aktor übertragen wird, umfasst zwei Werte, welche im Folgenden mit den beiden Gleichungen

$$\bar{u}_k = u_{\rm P,k} + u_{\rm I,k} + u_{\rm Dx,k} \tag{5.48}$$

$$\hat{u}_k = u_{\mathrm{Dw},k} \tag{5.49}$$

bezeichnet werden. Bei einer erfolgreichen Übertragung im Abtastschritt k werden bei der vorliegenden Implementierung beide Werte im Speicher des Aktors gehalten und es wird die Stellgröße

$$u_k = \bar{u}_k + \hat{u}_k \tag{5.50}$$

aufgeschaltet. Kommt es im darauffolgenden Abtastschritt k = k + 1 zu einem Paketausfall, wodurch am Empfänger des Aktors keine neuen Pakete eintreffen, so wird auf den im Speicher abgelegten Wert aus (5.48) zurückgegriffen und somit

$$u_k = \bar{u}_{k-1} \tag{5.51}$$

an den Eingang des Aktors angelegt.

Dieses Verfahren ist in seinen Grundzügen aus [59] übernommen und in seiner Grundform für Standardregler wie PI- oder PID-Regler geeignet. Weiterhin ist es damit möglich, Paketausfälle sowohl auf der Übertragungsstrecke der Messwerte als auch auf der Übertragungsstrecke des Sollwertes zu kompensieren. Für die Kompensation von Paketausfällen bieten sich genauso wie bei Verwendung des Gain-Scheduling-Verfahrens mit gewöhnlichen PID-Reglern auch beobachterbasierte Methoden an. Diese werden am Ende einer drahtlosen Übertragungsstrecke in den entsprechenden Komplementern aus Bild 5.12 integriert und bei Ausfall eines Paketes liefern sie einen geschätzten Ersatzwert.

Da in dieser Arbeit ein nichtlineares System betrachtet wird, wurde das vorliegende Verfahren mit dem in Abschnitt 5.5 vorgestellten Gain-Scheduling-Verfahren kombiniert. Beim Übergang zwischen zwei Arbeitspunkten ist es notwendig, den Speicher des Integrators mittels Gleichung (5.45) zu initialisieren. Dadurch wird ein zuverlässiger Betrieb des Reglers während und unmittelbar nach einem Arbeitspunktwechsel gewährleistet. Ein Vorteil dieses Verfahrens im Gegensatz zum reinen Gain-Scheduling-Verfahren ist es, dass bei der fehlerhaften Übertragung der Stellgröße eine Korrektur des Sollwerts stattfindet. Dadurch wird verhindert, dass der Integrator des Reglers dauerhaft die anliegende Reglerabweichung aufintegriert und somit durch den I-Anteil eine hohe Stellgröße verursacht wird. In der Literatur werden mit Anti-Windup-Maßnahmen weitere Möglichkeiten beschrieben, durch die verhindert wird, dass die Stellgröße durch den I-Anteil aufgrund einer bleibenden Regelabweichung über physikalisch mögliche Werte hinaus aufintegriert wird. Die Verwendung von Anti-Windup-Verfahren in Kombination mit PID-Reglern wird beispielsweise in [2, S. 117ff] behandelt. Durch die geeignete Wahl der Minimal- und Maximalwerte der Ventilstellung für das Anti-Windup-Verfahren im Falle eines Paketausfalls oder Kommunikationsabbruchs kann die unbegrenzte Aufintegration des I-Anteils verhindert werden.

Eine Stellgröße kann jedoch nur dann eine Wirkung auf das zu regelnden System entfalten, wenn sie erfolgreich von der zentralen Regeleinrichtung an den Aktor übertragen werden kann. Tritt ein längerfristiger Ausfall der Stellgrößenübertragung auf, so wird zum einen das System nicht auf den gewünschten Sollwert ausgeregelt und zum anderen hat eine prozessbedingte Anpassung des Sollwerts keine Wirkung auf das dynamische System. Aus dieser Sichtweise ist es sinnvoll, den Aktor ebenfalls mit einem Beobachter auszustatten, der die Stellgröße beim Ausfall von Paketen schätzen kann. Zusätzlich ist es sinnvoll, dem Beobachter zukünftige Sollwertänderungen

in Kombination mit den Änderungszeitpunkten bekanntzumachen, so dass das System auch bei einem längerfristigen Ausfall der Stellgrößenübertragung einen Prozess gesteuert führen kann. In diesem Zustand findet jedoch keine Korrektur von Störungen statt, die im System auftreten.

Für diesen Aufbau ist die in Abschnitt 5.4 beschriebene zeitliche Synchronisation zwischen der Sensorik, der Regeleinrichtung und dem Aktor von besonderer Bedeutung, da jedes Teilsystem seine Aufgaben zeitgenau abgestimmt auf alle anderen Teilsysteme ausführen muss. Ebenfalls muss für alle Stellen bekannt sein, zu welchem Zeitpunkt ein neuer Abtastschritt beginnt. Nachteilig an der vorliegenden Methode ist, dass die Übertragung einer Stellgröße durch ein ACK-Paket bestätigt werden muss. Dies führt zum einen zu einem erhöhten Datenaufkommen im Netzwerk und zu größeren Zykluszeiten im Regelkreis und zum anderen besteht die Gefahr, dass die Stellgröße fehlerfrei beim Aktor angekommen ist und aufgeschaltet wurde, aber der Regler trotzdem eine Sollwertkorrektur vornimmt, da das ACK-Paket ausgefallen ist.

Hinsichtlich der Stabilität des geschlossenen Regelkreises wird in [59, S. 1128] die Aussage getroffen, das ein Zusammenhang zwischen den Paketausfallhäufigkeiten, den Parametern des PID-Reglers und der Charakteristik des zu regelnden Systems besteht. Ist der geschlossene Regelkreis ohne Paketausfälle stabil, so ist ebenfalls sichergestellt, dass der geschlossene Regelkreis mit Paketausfällen stabil ist. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Kommunikation nach einem oder einer Serie von Paketausfällen wieder vollständig hergestellt wird.

Ergänzend sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Yokogawa-Konzept mit einem Gain-Scheduling-Regler kombiniert wurde und diesbezüglich kann laut [3, S. 300] die Stabilität des aus allen Einzelreglern bestehenden gesamten Regelsystems im Allgemeinen nicht analytisch sichergestellt werden.

## 5.7 Predictive-Outage-Compensator

Ein weiteres geeignetes Regelkonzept für den Einsatz mit drahtlosen Netzwerken als Übertragungstechnologie ist der Predictive Outage Compensator (POC). Dieser ist speziell dafür ausgelegt, Paketausfälle in Übertragungsnetzwerken zu kompensieren, die das Regelverhalten verschlechtern oder eine Regelung von Systemen unmöglich machen. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit dieses Konzept im Zusammenhang mit zentralen und lokalen Reglern näher betrachtet. Dabei wird auf der Empfängerseite einer jeden Funkübertragungsstrecke ein POC eingeführt, welcher in [32] und [33] beschrieben wird. Der POC kann im Fall von Paketausfällen anhand eines Modells der Strecke und des bekannten Reglers sowie dessen Reglerparameter die Meßoder Stellgröße bei einem Übertragungsausfall rekonstruieren. Alle geschätzten Größen werden im Folgenden mit einer Tilde gekennzeichnet.

Die grundlegende Struktur des POC ist in Bild 5.13 dargestellt. Hinsichtlich der Paketausfallkompensation weist der lokale Regler gegenüber dem zentralen Regler Vorteile auf. Während beim zentralen Regelungskonzept (Bild 5.14) sowohl ein POC zur Schätzung der Messgröße als auch ein weiterer POC zur Schätzung der Stellgröße betrieben werden müssen, ist beim lokalen



**Bild 5.13:** Struktur eines Predictive Outage Compensators [93]

Regelungskonzept (Bild 5.15) lediglich ein POC zur Schätzung der Messgröße notwendig. Im Folgenden wird allgemein der in [32] beschriebene und an diese Arbeit angepasste Entwurf des POCs für lineare bzw. um einen Arbeitspunkt linearisierte SISO-Systeme dargestellt.

Der Entwurf wurde dahingehend vereinfacht, dass Störungen und Messrauschen nicht in das Modell des POCs einfließen. Dafür werden aber Totzeiten, die im System auftreten, in der Struktur des POCs berücksichtigt. Grundlegend für den POC ist zunächst die diskrete Systembeschreibung der zu regelnden Strecke  $G_S$ , welche in der Zustandsdarstellung

$$\underline{x}_{\mathbf{P}}(k+1) = \underline{A}_{\mathbf{P}} \cdot \underline{x}_{\mathbf{P}}(k) + \underline{b}_{\mathbf{P}} \cdot u_{\mathbf{R}}(k), \qquad (5.52)$$

$$y_{\mathbf{P}}(k) = \underline{c}_{\mathbf{P}}^{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathbf{P}}(k), \qquad (5.53)$$

angegeben wird. Den Eingang des Prozesses bildet die durch den Regler ausgegebene Stellgröße  $u_{\rm R}(k)$ . Die Beschreibung der Totzeit des Systems sowie der Totzeit für die Übertragung der Messwerte über das drahtlose Netzwerk, welche bei einem SISO-System  $n_{\rm T}$  Abtastschritte umfasst, wird durch die  $n_{\rm T}$  Zustandsgleichungen

$$x_{T,1}(k+1) = y_{P}(k) = \underline{c}_{P} \cdot \underline{x}_{P}(k)$$
  

$$x_{T,2}(k+1) = x_{T,1}(k)$$
  

$$\vdots$$
  

$$x_{T,n_{T}}(k+1) = x_{T,n_{T}-1}(k)$$
  
(5.54)

berücksichtigt und führt auf

$$\underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) = \underline{A}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + \underline{b}_{\mathrm{T}} \cdot y_{\mathrm{P}}(k), \qquad (5.55)$$

$$y_{\mathrm{T}}(k) = \underline{c}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k).$$
(5.56)

Weiterhin muss der verwendete Regler in Zustandsdarstellung

$$\underline{x}_{\mathbf{R}}(k+1) = \underline{A}_{\mathbf{R}} \cdot \underline{x}_{\mathbf{R}}(k) + \underline{b}_{\mathbf{R}} \cdot e(k), \qquad (5.57)$$

$$u_{\mathrm{R}}(k) = \underline{c}_{\mathrm{R}}^{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) + d_{\mathrm{R}} \cdot e(k), \qquad (5.58)$$

mit  $e(k) = w(k) - y_T(k) = x_\sigma(k) - y_T(k) + \sigma(k)$  vorliegen. Dabei ist  $w(k) = x_\sigma(k) + \sigma(k)$  und somit  $\sigma(k)$  die Veränderung des Sollwerts w(k) zwischen zwei aufeinanderfolgenden



Bild 5.14: Regelkonzept 1, zentraler Regler mit POC [93]



Bild 5.15: Regelkonzept 2, lokaler Regler mit POC [93]

Abtastschritten k und k + 1. Wird der Sollwert w(k) ebenfalls drahtlos übertragen, so kann dieser als Zustand  $x_{\sigma}(k)$  gespeichert und bei Paketausfällen auf ihn zurückgegriffen werden. Hierfür wird die Differenzengleichung

$$x_{\sigma}(k+1) = x_{\sigma}(k) + \sigma(k), \qquad (5.59)$$

$$\tilde{w}(k) = x_{\sigma}(k). \tag{5.60}$$

genutzt. Werden obige Gleichungen (5.52) bis (5.60) ineinander eingesetzt und in den Zustandsvektor  $\underline{x}_{POC}(k) = \begin{bmatrix} \underline{x}_{P}(k) & \underline{x}_{T}(k) & \underline{x}_{R}(k) & x_{\sigma}(k) \end{bmatrix}^{T}$  vereinigt, so folgt die Systembeschreibung des POC mit

$$\begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k+1) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k+1) \\ \underline{x}_{\sigma}(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{A}_{\mathrm{P}} & -\underline{b}_{\mathrm{P}}\underline{d}_{\mathrm{R}}\underline{c}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{T}} & \underline{b}_{\mathrm{P}}\underline{c}_{\mathrm{R}}^{\mathrm{T}} & \underline{b}_{\mathrm{P}}d_{\mathrm{R}} \\ \underline{b}_{\mathrm{T}}\underline{c}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{T}} & \underline{A}_{\mathrm{T}} & 0 & 0 \\ 0 & -\underline{b}_{\mathrm{R}}\underline{c}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{T}} & \underline{A}_{\mathrm{R}} & \underline{b}_{\mathrm{R}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) \\ \underline{x}_{\sigma}(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{b}_{\mathrm{P}}d_{\mathrm{R}} \\ 0 \\ \underline{b}_{\mathrm{R}} \\ 1 \end{bmatrix}}_{\underline{b}_{\mathrm{POC}}} \sigma(k) \qquad (5.61)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{y}_{\mathrm{T}}(k) \\ \tilde{w}(k) \end{bmatrix}}_{(k)} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{0}^{\mathrm{T}} & \underline{c}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{T}} & \underline{0}^{\mathrm{T}} & 0 \\ \underline{0}^{\mathrm{T}} & \underline{0}^{\mathrm{T}} & \underline{0}^{\mathrm{T}} & 1 \end{bmatrix}}_{\underline{C}_{\mathrm{POC}}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) \\ \underline{x}_{R}(k) \\ x_{\sigma}(k) \end{bmatrix}}. \qquad (5.62)$$

Die Rückführmatrix K lässt sich nun wie in [32, S. 28], in [8, S. 1748] und in [6] beschrieben durch Lösen der zeitdiskreten algebraischen Riccati-Gleichung (DARE)

$$\underline{\underline{P}} = \underline{\underline{A}}_{POC} \cdot \underline{\underline{P}} \cdot \underline{\underline{A}}_{POC}^{T} - (\underline{\underline{A}}_{POC} \cdot \underline{\underline{P}} \cdot \underline{\underline{C}}_{POC}^{T}) \cdot (\underline{\underline{C}}_{POC} \cdot \underline{\underline{P}} \cdot \underline{\underline{C}}_{POC}^{T} + R)^{-1} \cdot (\underline{\underline{C}}_{POC} \cdot \underline{\underline{P}} \cdot \underline{\underline{A}}_{POC}^{T}) + \underline{\underline{Q}}$$
(5.63)

und

$$\underline{K} = \left(\underline{A}_{\text{POC}} \cdot \underline{P} \cdot \underline{C}_{\text{POC}}^{\text{T}}\right) \cdot \left(\underline{C}_{\text{POC}} \cdot \underline{P} \cdot \underline{C}_{\text{POC}}^{\text{T}} + R\right)^{-1}$$
(5.64)

bestimmen. Obige Gleichungen enthalten die Matrizen  $\underline{Q} = \underline{b}_{POC} \cdot R_1 \cdot \underline{b}_{POC}^T$  zur Gewichtung der Zustände und <u>R</u> zur Gewichtung der Ausgangsgröße sowie die zu lösende Matrix <u>P</u>. Der in den Referenzen [32, 8, 6] beschriebene Kalmanfilterentwurf zur Berücksichtigung von Systemstörungen wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da der Schwerpunkt darin bestand, Paketausfälle zu kompensieren. Die Kompensation von Störungen mittels Kalmanfilter würde die Regelqualität des entworfenen Regelers weiter verbessern.

Damit wurde in diesem Abschnitt ein Verfahren beschrieben, welches in Abhängigkeit von der zugrundeliegenden Modellgenauigkeit des zu regelnden Systems auch bei einer sehr hohen Prozentzahl von Paketausfällen noch zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Dieses Verfahren wird im Folgenden dazu genutzt, eine Durchflussregelung mit WirelessHART als Übertragungsprotokoll für den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Anlagenprüfstand zu realisieren.

#### 5.7.1 Auslegung einer Durchflussregelung am Anlagenprüfstand

Für den Anlagenprüfstand wird in diesem Abschnitt angenommen, dass der POC in Kombination mit einem lokalen Regelkonzept, wie in Bild 5.15 dargestellt, betrieben wird. Außerdem wird festgelegt, dass der POC, anders als bei den Regelkonzepten in den vorherigen Kapiteln, ausschließlich an einem Arbeitspunkt verwendet wird.

Wie bereits im Kapitel 2.1 beschrieben und auch der Gleichung (2.20) zu entnehmen, ist die Strecke des Anlagenprüfstands nichtlinear, stabil und besitzt eine schnelle Dynamik, welche typischerweise unter einer Sekunde liegt. Im Folgenden wird das nichtlineare System um den Arbeitspunkt  $\underline{x}_{AP} = [q_{AP} \ h_{AP}]^T$  linearisiert. Die linearisierte zeitkontinuierliche Zustandsraumdarstellung aus Anhang B.2.1 lässt sich schließlich mit der für das WirelessHART-Protokoll in Abschnitt 3.7.1 festgelegten Abtastzeit von  $\Delta T_R = 2 \text{ s}$  diskretisieren. Wegen der Linearisierung wird im Weiteren das System durch die jeweiligen Abweichungen vom ausgewählten Arbeitspunkt  $\underline{x}_{AP} = [q_{AP} \ h_{AP}]^T$  beschrieben. Sowohl der Sollwert für die Ventilstellung  $h_{\text{soll}}(k)$ , Zustände des Modells vom Anlagenprüfstand  $x_{Pi}(k)$  als auch die Ausgangsgröße  $q_{\text{mess}}(k)$  des Systems beziehen sich also auf den Arbeitspunkt und es handelt sich somit um Relativwerte bezüglich des ursprünglichen Koordinatensystems vor der Linearisierung. Um den relativen Charakter der Eingangsund Ausgangsgrößen des Systems hervorzuheben, werden diese im Weiteren mit  $\Delta h_{\text{soll}}(k)$  und  $\Delta q_{\text{mess}}(k)$  gekennzeichnet. Die Übertragungsfunktion des linearisierten, diskretisierten Systems besitzt in seiner Zustandsraumdarstellung die Form

$$\begin{bmatrix} x_{P1}(k+1) \\ x_{P2}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{P11} & a_{P12} \\ a_{P21} & a_{P22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{P1}(k) \\ x_{P2}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{P1} \\ b_{P2} \end{bmatrix} \cdot \Delta h_{\text{soll}}(k)$$
(5.65)

mit der Ausgangsgleichung

$$\Delta q_{\text{mess}}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{\text{P1}}(k) \\ x_{\text{P2}}(k) \end{bmatrix}$$
(5.66)

wobei wie zuvor die sich auf den Arbeitspunkt beziehenden Zustände des Systems mit  $x_{P1}(k) = \Delta q(k)$  für den Durchfluss und  $x_{P2}(k) = \Delta h(k)$  für die Ventilstellung angegeben sind. Die vorliegende Systembeschreibung berücksichtigt noch keine Totzeiten. Allerdings treten, wie schon in Abschnitt 5.5 beschrieben, im vorliegenden System mehrere Totzeiten auf, die sich gemäß Gleichung (5.29) zu

$$t_{\rm T} = t_{\rm T,v} + t_{\rm T,q} + t_{\rm T,w} \tag{5.67}$$

addieren. Wegen  $t_T < \Delta T_R$  wird analog zu Kapitel 5.5 aus (5.54) das Modell aus Gleichung (5.65) bei Verwendung des WirelessHART-Protokolls um eine konstante Totzeit von einem Abtastschritt erweitert. Somit ergibt sich für die Totzeit die Zustandsdifferentialgleichung

$$x_{\rm T,1}(k+1) = \Delta q_{\rm mess}(k) = x_{\rm P1}(k)$$
(5.68)

mit dem totzeitbehafteten Systemausgang

$$y_{\rm T}(k) = \Delta \tilde{q}_{\rm mess}(k) = x_{\rm T,1}(k).$$
 (5.69)

Für das totzeitbehaftete System wurde mit dem Wurzelortskurvenverfahren ein diskreter PID-Regler entworfen, mittels dem die Polstellen des geschlossenen Regelkreises derart gewählt sind, dass der geschlossene Regelkreis langsam genug ist, um mit einer Abtastzeit  $\Delta T_{\rm R}$  von zwei Sekunden betrieben zu werden. Die Struktur eines zeitdiskreten PID-Reglers für den Arbeitspunkt  $x_{\rm AP}$  ergibt sich in Differenzenform zu

$$\begin{bmatrix} x_{R1}(k+1) \\ x_{R2}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{R11} & a_{R12} \\ a_{R21} & a_{R22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{R1}(k) \\ x_{R2}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{R1} \\ b_{R2} \end{bmatrix} \cdot e(k)$$
(5.70)

$$\Delta h_{\text{soll}}(k) = \begin{bmatrix} c_{\text{R1}} & c_{\text{R2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{\text{R1}}(k) \\ x_{\text{R2}}(k) \end{bmatrix} + d_{\text{R}} \cdot e(k)$$
(5.71)

mit der Regelabweichung  $e(k) = \Delta w(k) - \Delta q_{\text{mess}}(k)$ . Außerdem ist es sinnvoll, einen Speicher für den Sollwert  $\Delta w(k)$  einzuführen, falls dieser bei einem Übertragungsvorgang ausfällt<sup>4</sup>. Gemäß (5.59) und (5.60) führt dies auf

$$\left[x_{\sigma}(k+1)\right] = x_{\sigma}(k) + \sigma(k), \qquad (5.72)$$

$$\Delta \tilde{w}(k) = x_{\sigma}(k). \tag{5.73}$$

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Unter Annahme das der Sollwert, genauso wie die Messgröße, drahtlos an die lokale Regeleinrichtung übermittelt wird.



Bild 5.16: Regelkreisstruktur am Anlagenprüfstand mit POC [93]

 $\sigma(k)$  ist dabei die Differenz zwischen  $\Delta w(k)$  und  $\Delta \tilde{w}(k)$ . Werden alle Zustände in einem Vektor vereint, so ergibt sich  $\underline{x}_{POC}(k) = \begin{bmatrix} x_{P1}(k) & x_{P2}(k) & x_{T,1}(k) & x_{R1}(k) & x_{R2}(k) & x_{\sigma}(k) \end{bmatrix}^{T}$  und die Systemmatrizen des POC werden nach Gleichung (5.61) und (5.62) aufgestellt. Da in diesem Beispiel beim Entwurf des POC keinerlei Störungen berücksichtigt werden, werden die Gewichtungsmatrizen für das Lösen der Riccati-Gleichung (5.63) zu

$$\underline{R} = \underline{I} \text{ und } Q = \underline{b}_{\text{POC}} \cdot 10 \cdot \underline{b}_{\text{POC}}^{\mathrm{T}}$$
(5.74)

gewählt und der Riccati-Entwurf nach den Gleichungen (5.63) und (5.64) durchgeführt. Die Struktur des Reglers mit Paketausfallskompensator, für den die Regelkreisstruktur aus Bild 5.15 genutzt wird, ist in Bild 5.16 dargestellt.

Simulationsergebnisse und Messungen mit diesem Regelkonzept werden am Beispiel des Anlagenprüfstands im folgenden Kapitel 6 dargestellt. Zuvor wird jedoch abschließend noch ein weiteres Regelkonzept vorgestellt, das für Messgrößen geeignet ist, die von Messstellen stammen, von denen ein Teil mittels elektrischer oder optischer Leiter mit der Regeleinrichtung kommunizieren und der verbleibende Teil drahtlos mittels elektromagnetischer Wellen in einem definierten Frequenzbereich mit der Regeleinrichtung kommuniziert.

### 5.8 Multiratenbeobachter

Bisher wurde am Anlagenprüfstand ausschließlich eine Messgröße zur Regelung des Durchflusses verwendet. Jedoch handelt es sich beim Anlagenprüfstand um ein dynamisches System zweiter Ordnung, in dessen Modell sowohl der Durchfluss als auch die Ventilstellung als Zustandsgrößen vorhanden sind. Beide Größen können gemessen werden, wobei sich der Sensor für die Ventilstellung direkt am Ventil befindet und der Durchflusssensor räumlich vom Ventil entfernt ist. Aus diesem Grund ist es relativ einfach möglich, die Ventilposition direkt drahtgebunden zum lokalen Regler zu führen, wobei der etwas weiter entfernte Sensor für den Durchfluss seine Messwerte drahtlos an den lokalen Regler am Ventil übermitteln kann. Damit wird der Verdrahtungsaufwand beim Aufbau einer Anlage reduziert und Platz eingespart. Wie bereits beschrieben, hat die drahtgebundene, analoge Übertragung den großen Vorteil, dass Signale unmittelbar nach Erfassung vom Regler abgetastet werden können, wohingegen bei der Übermittelung von drahtlosen Messwerten von ihrer Erfassung bis zu ihrer Ankunft am Regler ein von der Netzwerkgröße, der Netzwerkauslastung und der Netzwerktechnologie sowie -topologie abhängiger Zeitraum verstreicht und die Werte deswegen nur innerhalb eines minimalen Intervalls übermittelt werden können.

In den Abschnitten 5.5 und 5.6 wurden die Regler langsam genug ausgelegt, damit eine zufriedenstellende Ausregelung des Systems erreicht werden konnte. Dafür war es nicht notwendig, ein Modell des zu regelnden Systems parallel zum Anlagenregler zu betreiben. Das in diesem Abschnitt betrachtete Multiratenkonzept nutzt hingegen sowohl die Eigenschaften der drahtgebundenen Übertragung der Ventilstellung als auch die der drahtlosen Übertragung des Durchflusses bestmöglich aus, indem die Messgrößen mit den jeweils schnellstmöglichen Abtastraten erfasst werden. Dieses Prinzip lässt sich auf alle in der Praxis vorhandenen Regelungsaufgaben übertragen, die Sensoren verwenden, deren maximal mögliche oder gewünschte Abtastungen sich voneinander unterscheiden oder die unterschiedlich schnelle und leistungsfähige Übertragungsmedien nutzen.

Bei der drahtlosen Übertragung von Messwerten ist das Intervall, welches zwischen zwei Messwerten für den Durchfluss  $q_{m,k}$  und  $q_{m,k+1}$  liegt, im Vergleich zur Zeitkonstanten des Anlagenprüfstands ein Vielfaches. Für ein WirelessHART-Netzwerk unter Einsatz eines lokalen Prozessreglers ging aus Untersuchungen in [92] und [93] sowie den Messungen aus Abschnitt 3.7.1 hervor, dass zwischen zwei Messwerten aufgrund von Einschränkungen bei der Implementierung bzw. des Übertragungsmanagements von Übertragungsprotokollen ein minimales Abtastintervall nicht unterschritten werden kann. Beispielsweise kann bei derzeit am Markt befindlichen WirelessHART-Modulen und -Adaptern das minimale Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messwerten nicht kleiner als zwei Sekunden für Anwendungen mit lokalen und eine Sekunde bei zentralen Prozessreglern sein. Anhand der Messungen zu den für Regelkreise erreichbaren minimalen Übertragungsintervallen aus den Abschnitten 3.7.1, 3.7.2 und 3.7.3 geht hervor, dass jedes in dieser Arbeit betrachtete Netzwerkprotokoll sein spezifisches minimales Übertragungsintervall hat.

Für ein dynamisches System, dessen Zeitkonstante kleiner ist als die zur Verfügung stehenden Übertragungsintervalle, muss somit durch einen Reglerentwurf dessen Systemdynamik verlangsamt werden, damit es stabil geregelt werden kann. Am Beispiel der Untersuchung von Wireless-HART als Übertragungsprotokoll muss somit für die in den Abschnitten 5.5 und 5.6 vorgestellten Verfahren ein sehr langsamer Prozessregler entworfen werden, der ausschließlich den Durchfluss  $q_{\rm m}$  als Regelgröße im zwei Sekundentakt nutzt. Wie bereits weiter oben beschrieben, besitzt der vorhandene Anlagenprüfstand einen externen Wegaufnehmer, mit dem der Ventilhub  $h_{\rm m}$  gemessen werden kann. Dieser befindet sich direkt am Stellventil. Aufgrund der drahtgebundenen Übertragung können die Messwerte über die Ventilstellung in kurzen Abtastintervallen  $T_{\rm s} = \Delta T_{\rm R1}$  erfasst werden. Da Messwerte bei einer drahtgebundenen Übertragung deutlich schneller abgetastet wer-



Bild 5.17: Regelkreisstruktur in einem Multiratensystem [91]

den können, ist es sinnvoll dies auch für die Regelungsaufgabe zu nutzen. Hierfür bietet sich ein in [81] vorgestelltes Konzept mit Multiraten-Beobachter an. Dieses Konzept soll im Folgenden unter Nutzung einer drahtgebundenen sowie einer drahtlosen Übertragungsstrecke für Messwerte auf das Anwendungsbeispiel des Anlagenprüfstands übertragen und veranschaulicht werden. Ziel ist es, die Reglerperformanz für den Anlagenprüfstand im Vergleich zu den Abschnitten 5.5 und 5.6, zu steigern.

Bei Nutzung der beiden Messgrößen  $q_m$  und  $h_m$  zur Regelung ergibt sich die in Bild 5.17 dargestellte Regelkreisstruktur. Im Bild ist beispielhaft für die drahtlose Übertragungsstrecke das in Abschnitt 3.7.2 beschriebene Bluetooth Protokoll und der dazu passende Abtastintervall  $\Delta T_{R2} = 100 \,\mathrm{ms}$  eingezeichnet. Dieser Wert kann durch jeden anderen Abtastintervall substituiert und damit an jedes andere Protokoll angepasst werden. Im Rückführzweig für den Durchflussmesswert  $q_{\rm m}$  treten zwei Totzeitanteile auf. Dabei handelt es sich um die konstante Totzeit  $t_{T,q}$ , welche bei Ermittlung des Durchflusses  $q_{mess}$  durch Trägheit des Durchflusssensors verursacht wird und zum anderen um die variable Totzeit  $t_{T,w,i}$ , die durch die drahtlose Übertragung des Messwertes entsteht. Diese Totzeit wird von vielen Faktoren beeinflusst, wie das verwendete Netzwerkprotokoll, die momentane Auslastung eines Netzwerks, durch die Topologie oder auch anderweitige Störungen. Ein weiterer Zweig bildet der Messwert für den Ventilhub  $h_{\rm m}$ , dessen Totzeit im Vergleich zur Abtastzeit vernachlässigt werden kann, da  $t_{T,kabel,k} \ll \Delta T_{R1}$ . Beide Messinformationen werden vom Block der Regelstrategie verarbeitet. In diesem Block befinden sich sowohl ein Multiraten-Beobachter, ein Smith-Prädiktor zur Kompensation der Totzeit  $t_{T,v}$  als auch ein um einen Arbeitspunkt linearisierter PI-Regler zur Regelung des Durchflusses  $q_{ist}$  am Anlagenprüfstand. Die vom Regler im k-ten Abtastschritt berechnete Stellgröße  $h_{\text{soll},k}$ , der Sollwert für die Ventilstellung, wird zum Stellungsregler übertragen, welcher sie mit einer als konstant anzunehmenden Zeitverzögerung  $t_{T,v}$  übernimmt und den Istwert  $h_{ist}$  auf den Sollwert  $h_{soll}$  der Ventilstellung ausregelt.



Bild 5.18: Ermittlung von Residuen anhand von Durchflussmessung und Schätzung [91]

Der Regelung stehen zwei Messgrößen mit unterschiedlichen Abtastzeiten zur Verfügung. Mit den in [81] vorgestellten Methoden für Multiratenabtastsysteme, die bereits in obigem Abschnitt vorausgesetzt wurden, ist es möglich, beide Größen mit ihren speziellen Abtastzeiten zu nutzen und somit wirkt die Regelgröße q, welche sehr langsam abgetastet wird, nicht mehr beschränkend auf die Geschwindigkeit des Regelkreises. Im Folgenden wird kurz auf das Prinzip der entworfenen Multiraten-Regelstrategie eingegangen. Hierzu werden zunächst ein paar Begriffe eingeführt. Die Formel

$$N = \frac{T_1}{T_s} = \frac{\Delta T_{R2}}{\Delta T_{R1}}$$
(5.75)

gibt das Multiratenverhältnis N an, welches sich aus dem längsten Abtastintervall  $T_1$  und dem kürzesten Abtastintervall  $T_s$  (siehe Bild 5.18) ergibt. Dies bedeutet für das betrachtete Beispiel, dass die Ventilstellung  $h_{m,k}$  zu jedem Abtastschritt k zur Verfügung steht und der Messwert für den Durchfluss  $q_{m,k}$  nur zu jedem N-ten Abtastschritt. Bei der Übertragung des Datenpakets  $q_{mess,k}$  kommt es zu einer variablen Übertragungstotzeit  $t_{T,w,j}$ , die mit

$$n_{\rm d,j} = \left\lfloor \frac{t_{\rm T,w,j}}{T_{\rm s}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{t_{\rm T,w,j}}{\Delta T_{\rm R1}} \right\rfloor$$
(5.76)

als ein  $n_{d,j}$  abgerundetes Vielfaches von der Grundabtastzeit  $T_s$  des Multiraten-Systems angenommen wird. Die soeben beschriebenen Größen sind in Bild 5.18 veranschaulicht. In diesem Bild wird der Zeitpunkt der Ankunft einer jeden Durchflussmessung zum Abtastschritt  $k_j$  dargestellt, wobei nach jeder durchgeführten Messung *j* inkrementell erhöht wird. Der Zählindex *j* dient im vorliegenden Beispiel somit als Zähler für die Anzahl der Messungen, die für die Messgröße mit dem längsten Abtastintervall  $T_1$  aufgenommen werden. In Bild 5.17 wird die Ankunft der beiden Messwerte für den Durchfluss  $q_{m,k}$  und den Ventilhub  $h_{m,k}$  veranschaulicht. Die Auswahl der größten Abtastzeit  $T_1$  des Multiraten-Systems hängt vom verwendeten drahtlosen Übertragungsprotokoll ab. Wird das WirelessHART-Protokoll genutzt, so wurde das minimal mögliche Übertragungsintervall anhand der Paketübertragungszeiten  $t_{T,w}$  in Abschnitt 3.7.1 experimentell zu  $\Delta T_N = 2$  s ermittelt. Dadurch kann  $T_1$  zu 2 s gewählt werden, so dass sich ein Multiratenverhältnis von N = 200 ergibt. Für Bluetooth LE wurde in Abschnitt 3.7.2 das minimale Abtastintervall für das implementierte Protokoll anhand von  $t_{T,w}$  zu  $\Delta T_N = 100$  ms ermittelt, wodurch auch für  $T_1 = 100$  ms gilt und somit ein Multiratenverhältnis von N = 10 bestimmt wird.

Für WirelessHART und Bluetooth LE gelten die ermittelten Zeiten zunächst unabhängig von der Anzahl an Netzwerkteilnehmern und somit von der Netzwerkgröße, solange sich die Länge des Übertragungsweges hinsichtlich der Anzahl an zurückzulegenden Hops gegenüber der zugrundeliegenden Topologie aus Bild 3.12 nicht ändert. Die Netzwerkgröße ist vielmehr von den beiden Protokollen beschränkt. Bei WirelessHART liegt die Beschränkung bei der Anzahl der für Übertragungsvorgänge zur Verfügung stehenden Zeitslots vor. Werden mehr Timeslots benötigt als zu Verfügung stehen, so liegt der Fehler bei der Auslegung des Netzwerks. Bei Bluetooth LE wird, wie in Abschnitt 3.7.2 beschrieben, die Anzahl der am Netzwerk teilhabenden Geräte über den Bluetooth-Stack eingeschränkt. Anders verhält es sich mit dem in Abschnitt 3.7.3 entworfenen, auf dem MAC-Layer basierendem Protokoll. Bei diesem hängt  $T_1$  von der Anzahl  $n_{\text{Devices}}$  der einer Netzwerkeinheit angehörenden Geräte ab und kann mit  $T_1 = n_{\text{Devices}} \cdot 5$  ms angegeben werden. Am Beispiel des Anlagenprüfstands mit dem auf dem MAC-Layer basierenden Protokoll könnte bei bis zu zwei Sensorkonten in einem Netzwerk auf den Multiratenbeobachter verzichtet werden, da für diesen Fall  $T_1 = 10$  ms gilt.

Für alle Systemkonfigurationen mit  $T_1 > T_s$  wurden Multiratenbeobachter entworfen, die sowohl den Messwert für den Ventilhub  $h_{m,k}$  zu jedem Abtastschritt  $T_s$  als auch den Messwert für den Durchfluss  $q_{m,k}$  erhalten.  $q_{m,k}$  steht allerdings nur in jedem Intervall aus N Abtastschritten bei erfolgreicher Übertragung zur Verfügung. Außerdem tritt eine Übertragungstotzeit von  $t_{T,w,j}$  auf. Für die Zeitspanne, während der kein neuer Messwert  $q_{m,k}$  vorliegt, schätzt der Multiratenbeobachter einen Ersatzwert  $\hat{q}_i$  für den Durchfluss. Da jeder neu eingetroffener Wert aufgrund von Totzeiten um  $n_{d,j}$  Abtastschritte (siehe Gleichung (5.76)) aus der Vergangenheit stammt, ist es notwendig, dies bei der Korrektur des Schätzers durch den neu eingetroffenen Messwert  $q_{m,k_j-n_{d,j}}$  zu berücksichtigen. Somit muss das Multiraten-Kalmanfilter ausgehend von  $n_{d,j}$  Abtastschritten in der Vergangenheit seinen Wert für  $\hat{q}_{j\cdot N}^{-5}$  durch den neu eingetroffenen Messwert  $q_{m,k_j-n_{d,j}}$  aktualisieren und schließlich für  $i \in j \cdot N, j \cdot N + 1, j \cdot N + 2, \dots, j \cdot N + \left\lfloor \frac{T_i + t_{T,w,(j+1)}}{T_s} \right\rfloor$  die Ersatzwerte  $\hat{q}_i$  für den Durchfluss schätzen<sup>6</sup>. Hierfür muss das Multiraten-Kalmanfilter in den Schritten  $i = j \cdot N, j \cdot N + 1, \dots, j \cdot N + \left\lfloor \frac{t_{T,w,j}}{T_s} \right\rfloor$  auf die gespeicherten, historischen Werte für die Ventil-

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Mit  $i = j \cdot N$  wird im Weiteren immer der Abtastschritt bezeichnet, zu dem ein über ein drahtloses Netzwerk übermittelter und nach der Totzeit  $t_{T,w,j}$  an der Regeleinrichtung eingetroffener Durchflusswert  $q_{m,k_j-n_{d,j}}$  durch Messung erfasst wurde.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Treten  $n_p$  aufeinanderfolgende Paketausfälle nach der letzten erfolgreichen Übertragung von  $q_{m,k_j-n_{d,j}}$  auf, so verlängert sich die Anzahl der Abtastschritte, für die ausgehend von  $q_{m,k_j-n_{d,j}}$  eine Schätzung notwendig ist. Es



Bild 5.19: Ablauf der Schätzung und der Messwertverarbeitung

stellung  $h_{m,i}$  zurückgreifen. Für die Abtastschritte<sup>7</sup>  $i = j \cdot N + \left\lfloor \frac{t_{T,w,j}}{T_s} \right\rfloor, \dots, j \cdot N + \left\lfloor \frac{T_1 + t_{T,w,(j+1)}}{T_s} \right\rfloor$ werden die gemessenen Werte  $h_{m,k}$  verwendet, da es sich dann um die Schätzung von gegenwärtigen Durchflusswerten  $q_{m,i}$  handelt und die Stellgrößen  $h_{\text{soll},k}$  in diesem Zeitraum ebenfalls an den Stellungsregler übergeben werden. Für diesen Zeitraum entspricht *i* wieder *k*, wie in Bild 5.19 dargestellt. Mittels des geschätzten Durchflusses kann für jeden Abtastschritt die Regelabweichung  $e_i = q_{\text{soll},i} - \hat{q}_i$  ermittelt werden.

Bei Bluetooth LE kann die Übertragungstotzeit aufgrund des Zeitstempels des Erfassungszeitpunktes eines Messwerts bei Ankunft des Pakets am Ziel ermittelt werden. Mit WirelessHART konnte aufgrund von Einschränkungen der zur Verfügung stehenden Hardware nur eine grobe Abschätzung der Totzeit getroffen werden. Durch die Kenntnis der Erfassungszeitpunkte der Durchflussmesswerte kann dieser wiederum dem entsprechenden Messwert für die Ventilstellung  $h_{m,k_j-n_{d,i}}$  aus der Vergangenheit zugeordnet werden. Bei Nutzung von WirelessHART kann aufgrund von Einschränkungen bei kommerziellen Produkten nur die in Abschnitt 3.7.1 ermittelte, durchschnittliche Übertragungszeit angenommen werden. Das auf dem MAC-Layer basierende Protokoll garantiert eine Übertragungszeit von 5 ms, da ein Paket aufgrund der Netzwerkstruktur innerhalb eines Zeitslots vom Sender zum Empfänger übertragen wird. Berücksichtigt werden muss außerdem die Wandlungszeit des ADC's und die Wartezeit bis zum Start der Übertragung eines Messwertes. Über die beiden Messwerte  $h_{m,j}$  und  $q_{m,j}$  wird schließlich das Residuum  $\underline{\tilde{e}}$ , die Abweichung zwischen Mess- und Schätzwert zum k-ten Abtastzeitpunkt ermittelt. Diese Werte

ergibt sich somit ein Zeitraum von  $i = j \cdot N + 1, j \cdot N + 2, \dots, j \cdot N + \left\lfloor \frac{(n_p+1) \cdot T_1 + t_{T,w,(j+n_p+1)}}{T_s} \right\rfloor$  Abtastschritten, für die Ersatzwerte für  $\hat{q}_i$  geschätzt werden müssen.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Bei  $n_p$  Paketausfällen läuft der Multiraten-Kalmanfilter bis  $\left\lfloor \frac{(n_p+1)\cdot T_1+t_{T,w,(j+n_p+1)}}{T_s} \right\rfloor$ , um auch für den Zeitraum der Paketausfälle, ausgehend von  $q_{m,k_j-n_{d,j}}$  Ersatzwerte für  $\hat{q}_i$  zu schätzen.



Bild 5.20: Schätzung durch den digitalen Kalmanfilter [91]

nutzt der Beobachter, um ausgehend von den Werten aus der Vergangenheit zukünftige Werte zu schätzen. Das Prinzip ist in Bild 5.18 veranschaulicht.

Die grundlegende Funktionsweise des verwendeten diskreten erweiterten Kalman Filters wird in Bild 5.20 dargestellt.

Für die erste Schätzung müssen dem Multiraten-Kalmanfilter zunächst der initiale Zustandsvektor  $\underline{\hat{x}}_{0}^{+}$ , die Stellgröße  $u_{0}$  und die initiale Fehlerkovarianz  $\underline{P}_{0}^{+}$  zur Verfügung stehen. Für k gilt im ersten Schätzschritt k = 1 und es findet die Abschätzung der Fehlerkovarianz nach Gleichung (5.78) aus Bild 5.20 statt. Hierfür werden die linearisierte Systemmatrix

$$\underline{A}_{k-1} = \left. \frac{\partial \underline{f}_{k-1}(\underline{x}_{k-1}, u_{k-1})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{\hat{x}}_{k-1}^+},\tag{5.83}$$

sowie die Gewichtungsmatrix für die Zustandsgrößen

$$\underline{\mathcal{Q}}_{k-1} = \begin{bmatrix} 0, 1 & 0\\ 0 & 0, 1 \end{bmatrix}$$
(5.84)

benötigt. Nachdem die Fehlerkovarianz abgeschätzt wurde, wird im zweiten Schritt nach Gleichung (5.79) die Zustandsschätzung von  $\underline{\hat{x}}_{k}^{-}$  durchgeführt. Hierzu werden der nichtlineare Systemvektor  $\underline{f}_{k-1}\left(\underline{\hat{x}}_{k-1}^{+}, \underline{u}_{k-1}\right)$  des betrachteten dynamischen Systems vom vergangenen Abtastschritt sowie die aktualisierte Schätzung des Zustandsvektors  $\underline{\hat{x}}_{k-1}^{+}$  und die Stellgröße  $\underline{u}_{k-1}$  verwendet (beide Vektoren stammen ebenfalls aus dem letzten Abtastschritt k-1, bzw. für den Schätzschritt beim Anlauf des Kalmanfilters sind sie die Initialwerte  $\underline{\hat{x}}_0^+$  und  $\underline{u}_0$ ). Mittels der Fehlerkovarianz aus Gleichung (5.78) sowie der linearisierten Systemausgangsmatrix

$$\underline{C}_{k} = \left. \frac{\partial g_{k}(\underline{x}_{k})}{\partial \underline{x}_{k}} \right|_{\underline{\hat{x}}_{k}^{-}}$$
(5.85)

und der Gewichtungsmatrix für die Systemeingänge

$$\underline{R}_k = \begin{bmatrix} 0, 1 & 0\\ 0 & 0, 1 \end{bmatrix}$$
(5.86)

kann mittels Gleichung (5.80) die Beobachtermatrix  $\underline{L}_k$  bestimmt werden. Mithilfe des Messvektors

$$\underline{y}_{k} = \begin{cases} \begin{bmatrix} q_{k} & h_{k} \end{bmatrix}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{T}}, & \text{für } k = j \cdot N \\ \begin{bmatrix} \hat{q}_{k} & h_{k} \end{bmatrix}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{T}}, & \text{für } k \neq j \cdot N \end{cases}$$
(5.87)

wird des Weiteren über Gleichung (5.81) die Abschätzung mittels der Messung aktualisiert. Ebenfalls wird schließlich durch Gleichung (5.82) die Fehlerkovarianz  $\underline{P}_k^+$  aktualisiert. Die für die Berechnungen eingesetzten Gewichtungsmatrizen (5.84) und (5.86) wurden durch Simulation und Versuche bestimmt. In Gleichung (5.81) wird das Residuum

$$\underline{\hat{\varepsilon}}_{k} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \varepsilon_{q,k} & \varepsilon_{h,k} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, & \text{für } k = j \cdot N \\ \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{q,k} & \varepsilon_{h,k} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, & \text{für } k \neq j \cdot N \end{cases}$$
(5.88)

genutzt. Bei jedem neuen, verzögerten Messwert  $\tilde{q}_{m,k}$  muss das Residuum beginnend von der Vergangenheit  $k - n_{d,j}$  bis zum gegenwärtigen Abtastschritt k neu berechnet werden. Das Vorgehen lässt sich in folgende Schritte untergliedern:

- 1. Messwerte  $q_{k-n_{d,j}}$  und  $h_{k-n_{d,j}}$  werden gleichzeitig durch die entsprechenden Sensoren aufgenommen.
- 2.  $h_{k-n_{d,j}}$  liegt sofort am Reglereingang an, wird vom Multiraten-Beobachter genutzt und gespeichert, für alle Werte  $h_i$  mit  $i = k n_{d,j}, \dots, k$ .
- 3. Sobald der Messwert  $q_{k-n_{d,j}}$  zum Abtastzeitpunkt k an der Regeleinrichtung anliegt, wird dieser gemeinsam mit dem Wert  $h_{k-n_{d,j}}$  als Vektor  $\underline{y}_{k-n_{d,j}} = \begin{bmatrix} q_{k-n_{d,j}} & h_{k-n_{d,j}} \end{bmatrix}^T$  genutzt, um das Residuum  $\hat{\underline{\varepsilon}}_{k-n_{d,j}} = \underline{y}_{k-n_{d,j}} \underline{g}(\hat{\underline{x}}_{k-n_{d,j}})$  zu bestimmen.
- 4. Es werden schließlich alle Residuen  $\tilde{\varepsilon}_i$  mit  $i = k n_{d,j} + 1, ..., k$  bestimmt, bevor der Wert  $h_{k+1}$  eintrifft.
- 5. Danach wird zu jedem Abtastschritt das entsprechende Residuum bestimmt, bis ein neuer Messwert eintrifft und sich alle soeben beschriebenen Vorgänge wiederholen.



Bild 5.21: Struktur aus EKF, Smithprädiktor und PI-Zustandsregler [91]

Bei Nutzung der in diesem Abschnitt beschriebenen Algorithmen ist es notwendig, den Wert  $h_k$ , den Vektor  $\hat{\underline{x}}_k^+$  und die Matrizen  $\underline{L}_k$  und  $\underline{A}_k$  über mindestens N Abtastschritte hinweg in einem Puffer zu speichern.

Der gesamte Regelkreis ist in Bild 5.21 dargestellt und besteht aus der nichtlinearen Regelstrecke, einem Multiraten-Kalmanfilter sowie einem Smith-Prädiktor, der für kontinuierliche Systeme in [52, S. 571ff.] und [58, S. 131ff.] und dessen Struktur für diskrete Systeme in [77, S. 18] beschrieben wird. Für die Regelung des Systems wird ein PI-Zustandsregler verwendet. Da das System des Anlagenprüfstands totzeitbehaftet ist, wird der Smithprädiktor dafür genutzt, um die Wirkung der Regelgröße schneller zu ermitteln. Hierfür wird die Totzeit vom Streckenmodell separiert. Somit kann der Ausgang des Streckenmodels ohne Totzeit abgefragt werden. Dadurch wird es ermöglicht, den Regler so auszulegen als würde das System keine Totzeit besitzen. Die Folge davon ist, dass ein schnelleres Ausregelverhalten realisiert werden kann. Der in [77, S. 18] für lineare Systeme vorgestellte Smithprädiktor wurde für das nichtlineare System des Anlangenprüfstands modifiziert. Der PI-Zustandsregler wurde für einen Arbeitspunkt (AP) ausgelegt und besitzt die Form

$$\Delta u_{k} = \underline{K}_{\mathrm{P}} \cdot \left( \underline{x}_{\mathrm{soll},k} - \underline{\tilde{x}}_{k+\mathrm{d}_{1}} - \Delta \underline{x}_{k} \right) + \frac{K_{\mathrm{I}}}{z-1} \left( q_{\mathrm{soll},k} - \underline{C} \cdot \left( \underline{\tilde{x}}_{k+\mathrm{d}_{1}} + \Delta \underline{x}_{k} \right) \right) + u_{\mathrm{AP},k}.$$
 (5.89)

 $K_{\rm P}$  und  $K_{\rm I}$  sind die Verstärkungen des *P*- bzw. *I*-Anteils,  $d_1$  ist die Anzahl der Abtastschritte der Regelstreckentotzeit. Es handelt sich dabei um die Zeit  $t_v$ , die das Ventil benötigt, um einen neuen Sollwert  $h_{\rm soll,k}$  zu übernehmen.  $d_1$  ergibt sich aus  $d_1 = \frac{t_v}{T_s}$ . Die Größe  $\underline{x}_{\rm AP,k}$  ist der linearisierte Zustandsvektor und  $u_{\rm AP,k}$  der linearisierte Stellgrößenvektor um den Arbeitspunkt AP zum Abtastschritt *k*.

In diesem Abschnitt wurden der Entwurf sowie das Grundprinzip der verwendeten Regelstrategie beschrieben. Messergebnisse unter Nutzung des Multiraten-Kalmanfilters mit den Übertragungsprotokollen BLE werden in Kapitel 6 gezeigt und diskutiert. Im Folgenden wird das Regelkonzept für das Drei-Tank-System unter Verwendung von WirelessHART als Übertragungsprotokoll zur Messwertübermittlung vorgestellt.

## 5.9 Reglerentwurf am Beispiel eines Drei-Tank-Systems

Als weiteres drahtloses Regelungssystem wurde das Beispiel des in Abschnitt 2.2 vorgestellten Drei-Tank-Systems getestet. Dabei handelt es sich um ein MIMO-System, welches an den beiden äußeren Tanks jeweils einen Zufluss hat, dessen Zuflussmenge geregelt werden kann. Jeder der drei vorhandenen Tanks besitzt außerdem einen Drucksensor zur Erfassung des Füllstands. Somit kann auch der Füllstand des mittleren Tanks gemessen werden. Über Verbindungsrohre zwischen den Tanks kann ein Fluidaustausch zwischen zwei benachbarten Tanks stattfinden. Der Tank mit dem Füllstand  $h_3$  hat außerdem einen Abfluss, über den kontinuierlich Fluid in das Reservoir entweicht. Im Weiteren sollen die beiden Füllstände  $h_1$  und  $h_3$  geregelt werden. Durch die geöffneten Verbindungsrohre zwischen den Tanks handelt es sich um ein verkoppeltes System. Da die Systemzeitkonstanten des Drei-Tank-Systems ausreichend groß sind, eignet sich das WirelessHART-Protokoll recht gut zur Übertragung der Messwerte. Für die Regelung des Drei-Tank-Systems wurde ein zentrales Regelkonzept verwendet, dessen Struktur Bild 5.4 zu entnehmen ist. Jedoch wird die Stellgröße zwischen dem zentralen Regler und den Aktoren kabelgebunden übertragen. Für diesen Aufbau ermöglicht es WirelessHART, Werte im ein Sekunden Takt zu übermitteln. In diesem Abschnitt soll auf die für das Drei-Tank-System verwendete Reglerstruktur eingegangen werden, um schließlich im folgenden Kapitel eine Regelung sowie eine am Drei-Tank-System umgesetzte Beispielanwendung zur Demonstration moderner sowie drahtloser Diagnose- und Steuerungssysteme zu veranschaulichen.

Der Kommunikationsaufbau des Drei-Tank-Systems ist in Bild 5.22 dargestellt. Die erfassten Messwerte der drei Drucksensoren, über die der Füllstand des jeweiligen Tanks ermittelt werden kann, werden über den zugehörigen, in Bild 2.6a dargestellten, WirelessHART-Adapter an den in Bild 2.6b veranschaulichten WirelessHART-Gateway übermittelt. Das WirelessHART-Gateway



Bild 5.22: Drahtlose Kommunikationsstruktur am Drei-Tank-System



Bild 5.23: Regelkreisstuktur des Drei-Tank-Systems

ist über das auf Ethernet basierende HART-IP-Protokoll mit dem Anlagenrechner verbunden, auf dem die Regelung ausgeführt wird. Die durch den Anlagenregler bestimmten Stellgrößen werden drahtgebunden an die Ansteuerkarten der Aktoren, zwei Pumpen, übermittelt. Der Anlagenrechner verfügt außerdem über das in Bild 2.7b dargestellte Bluetooth-Modul, mittels dessen es möglich ist, sich über ein Mobiltelefon oder ein Tablet mit dem Versuchsstand zu verbinden. Über eine in dieser Arbeit entworfene Software kann eine begrenzte Menge von Befehlssätzen zwischen Bluetooth und WirelessHART konvertiert werden. Dadurch können beispielsweise mit einer App auf einem Smartphone oder Tablet Messwerte mittels Bluetooth-Kommunikation über den Anlagenrechner als Vermittler und Protokollwandler aus dem WirelessHART-Netzwerk abgefragt werden. Es ist vorstellbar, diese Methodik ebenfalls im Feld mittels Adapter oder Router zu realisieren, die eine Sende- und Empfangseinrichtung sowohl für WirelessHART als auch für Bluetooth besitzen. Über die Wandlung oder Tunnelung von Kommandos, könnte somit von allen benötigten örtlichen Positionen einer Anlage eine Kommunikation mit dem WirelessHART-Netzwerk hergestellt werden. Hierfür wäre jedoch entsprechende Hardware und Software notwendig, die derzeit nicht für industrielle Anwendungszwecke auf dem Markt zur Verfügung steht.

Die Struktur des am Drei-Tank-Versuchsstand genutzten Reglers ist in Bild 5.23 zu sehen. In diesem Beispiel werden über den Vektor  $\underline{h}_{soll}$  die Führungsgrößen  $h_{soll,1}$  und  $h_{soll,3}$  vorgegeben. Somit werden die Füllstände  $h_1(t)$  und  $h_3(t)$  geregelt. Über die Differenz zwischen dem Führungsgrößenvektor  $\underline{h}_{soll}(k)$  mit dem Vektor  $\underline{h}_{R}(k)$ , welcher über  $\underline{h}_{R}(k) = \underline{C}_{R} (\underline{h}_{est}(k) + \Delta \underline{h}_{T}(k))$  gebildet wird und die für die Regelung relevanten Füllstände  $h_{R,1}$  und  $h_{R,3}$  der Tanks 1 und 3 enthält, wird der Vektor der Regeldifferenz  $\underline{e}(k)$  gebildet.<sup>8</sup> Jede der beiden Regelabweichungen  $e_1(k)$ und  $e_3(k)$  hat einen eigenen PI-Regler, deren Stellgrößen im Stellgrößenvektor  $\underline{u}_{PI}(k)$  zusammengefasst werden. Durch die exakte Linearisierung kann das Regelverhalten des Gesamtsystems als linear betrachtet werden und es wird durch die exakte Linearisierung [2, S. 179ff.] der Stellgrößenvektor  $\underline{u}(k)$  erzeugt, welcher schließlich über eine Steuerkarte die Drehzahl der Aktoren, in diesem Fall der Pumpen zum Befüllen der Tanks 1 und 3 vorgibt.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Die Matrix  $\underline{C}_{R}$  überführt den aus  $\underline{h}_{est}(k) + \Delta \underline{h}_{T}(k)$  entstehenden dreidimensionalen Vektor in einen zweidimensionalen Vektor der Regelgrößen und ist somit für dieses Beispiel als  $\underline{C}_{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  zu wählen.

Das Drei-Tank-System besitzt insgesamt die drei Zustände  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$  und  $h_3(t)$ , die im Zustandsvektor  $\underline{x}(t) = \underline{h}_{mess}(t)$  vereint werden. Alle drei Zustände werden über Drucksensoren gemessen und jeweils mittels eines WirelessHART-Adapters aus Bild 2.6a an den WirelessHART-Gateway aus Bild 2.6b übertragen. Im vorherigen Satz wurde WirelessHART genannt, allerdings kann die Messwertübermittlung auch durch jede andere Funktechnologie ersetzt werden, wie beispielsweise dem vorgestellten Bluetooth Low Energy Protokoll oder dem auf dem MAC-Layer basierenden Protokoll. Wichtig ist an dieser Stelle zu beachten, dass es sich bei dem Drei-Tank-System um ein MIMO-System handelt und drei Messstellen vorhanden sind.

An diesem Punkt kommt der in Abschnitt 5.4 beschriebenen Synchronisation der Messwerterfassung eine besondere Bedeutung zu, die jedoch bei den genutzten WirelessHART-Modulen nicht gegeben ist. Jedoch ist anders als beim Anlagenprüfstand aufgrund der langsamen Dynamik des Drei-Tank-Systems die Auswirkung einer nicht gleichzeitigen Abtastung bei einem Abtastintervall von  $\Delta T_{\rm N} \approx 1$  s gering. Sobald die Messwerte bei der Regeleinrichtung eingetroffen sind, werden sie solange gehalten, bis sie durch einen neuen eintreffenden Messwert ersetzt werden. Der Regelkreis wird mit einer Abtastung von  $\Delta T_{\rm R} = 0.1$  s betrieben. Das nichtlineare erweiterte Kalman Filter [2, S. 312ff.] übernimmt genau dann einen neuen Messwert aus dem Vektor  $h_{\rm T}(k)$ , wenn er seit der letzten Abtastung neu eingetroffen ist. Dies wird anhand von Zeitstempeln ermittelt, die mit jedem neuen Messwert übertragen werden. Zwischen zwei neuen aufeinanderfolgenden, drahtlos übermittelten Messwerten, läuft das EKF weiter und schätzt anhand des ihm bekannten Stellgrößenvektors u(k) weitere Zwischenwerte, die von der Regeleinrichtung dazu genutzt werden, anhand der Regeldifferenz  $\underline{e}(k)$  neue Stellgrößenvektoren  $\underline{u}_{PI}(k)$  zu ermitteln. Zusätzlich werden von einem vorhanden Smith-Prädiktor die Totzeiten berücksichtigt, die beim Drei-Tank-System sowohl bei der Netzwerkübertragung sowie beim Befüllen der Tanks entstehen. Insgesamt ist es für dieses Regelkonzept von besonderer Wichtigkeit, dass das für das EKF genutzte Modell des Drei-Tank-Systems möglichst exakt mit dem realen System übereinstimmt. Abweichungen führen zu einer Differenz zwischen Messwert  $\underline{h}_{mess,T}(k)$  und Schätzwerk  $\underline{h}_{est}(k)$ , was wiederum Abweichungen zwischen Soll- und Istfüllstand zur Folge hat.

Einige Messungen und das Zusammenwirken zwischen Regelkreis und Diagnose sowie Steueranwendungen werden in Abschnitt 6.5 veranschaulicht.

## 5.10 Vergleich der Regelkonzepte

In diesem Kapitel wurden verschiedene Regelkonzepte, wie der Gain-Scheduling-Regler, das Yokogawa-Konzept, ein Predictive-Outage-Compensator und schließlich ein Multiratenkonzept vorgestellt. Alle Regelkonzepte wurden am Beispiel des am Institut vorhandenen Anlagenprüfstands getestet und die Leistungsfähigkeit der einzelnen Regelkonzepte wird im nachfolgenden Kapitel 6 anhand von Simulationen und Messungen veranschaulicht. Zuvor sollen jedoch in diesem Abschnitt die Vor- und Nachteile der einzelnen Regelkonzepte allgemein beschrieben werden. Als Referenz für die Auslegung dient ein PID-Regler, der im einfachsten Fall für ein als linear angenommenes System durch die in Abschnitt 5.1 genannten Einstellregeln entworfen werden

Kategorie	PID-Regler	Gain- Scheduling	Yokogawa- Konzept	Deadbeat- Regler	POC	Multiraten- Konzept
Auslegung:	einfach	mittel	mittel / schwer	einfach	aufwendig	aufwendig
Auslegungsdauer:	mittel	hoch	hoch	niedrig	hoch	hoch
Regelkonzepte: - Drahtgebunden: - Drahtlos:	lokal / zentral lokal	lokal / zentral lokal	zentral zentral	lokal / zentral lokal	lokal / zentral lokal / zentral	lokal / zentral lokal / zentral
Robustheit bei - einzelnen Paketausfällen - langfristigen Paketausfällen	keine bzw. (bedingt bei langsamen Systemen) keine	keine bzw. (bedingt bei langsamen Systemen) keine	gut gut	keine keine	sehr gut sehr gut (Steuerung bei langfristigen Ausfällen)	sehr gut sehr gut (Steuerung bei langfristigen Ausfällen)
Ausregel- geschwindigkeit	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	sehr schnell (wie drahtgebunden)

						••	
T I II <b>F A</b> '	<b>T</b> 7 1 1 1	. 1.	D 1	C 1	• 1 1 1	T T1 /	. 1
	Varalaich de	r untarcuchtan	Pagalung	avartahran r	mit drohtlacan	hortrogung	octracizan
			<b>NEVENINY</b>	venament	нні паннояси		SSHEUKEH
I as one cill	, or grotten ac		regerang	, or and on i		Coornagang	obti eenten

kann. Hierfür sind zunächst keinerlei Modellkenntnisse des zu regelnden Systems erforderlich. Ist jedoch ein Modell des zu regelnden Systems vorhanden, so bieten sich Verfahren wie das Wurzelortskurvenverfahren an, über das gezielt Pole und Nullstellen des geschlossenen Regelkreises beeinflusst werden können. Tabelle 5.2 gibt einen Schnellüberblick über die Eigenschaften, Stärken und Schwächen in den Teilbereichen Auslegung, Auslegungsdauer, Regelkonzepte, Robustheit bei Paketausfällen und der Ausregelungsgeschwindigkeit bei einer Sollwertänderung oder plötzlich auftretenden Störung von den in dieser Arbeit betrachteten Regelungsverfahren.

Zuerst wurde der in dieser Arbeit entworfene Gain-Scheduling-Regler vorgestellt. Er zeichnet sich durch seine zu anderen Verfahren relativ leichte Auslegung aus. Die Totzeit eines Systems wie die Übertragungszeit in einem Netzwerk kann als Scheduling Parameter berücksichtigt werden. Darüber hinaus eignet er sich sowohl für den Einsatz in lokalen als auch zentralen Regelungen. Nachteilig ist, dass die Umschaltung zwischen zwei Arbeitspunkten die Neuinitialisierung des I-Anteils erfordert, sofern zur Regelung ein PI- oder PID-Regler genutzt wird. Weiterhin ist es erforderlich, jeden einzelnen Regler für jeden Arbeitspunkt manuell auszulegen, was einen hohen Zeitaufwand erfordert. Da drahtlose Systeme ein minimales Übertragungsintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Paketen besitzen, müssen bei Systemen mit schneller Dynamik im Vergleich zum minimalen Übertragungsintervall des eingesetzten Funkprotokolls beim Entwurf des Reglers besondere Maßnahmen getroffen werden. Entweder wird beim diskreten Entwurf der geschlossene Regelkreis durch geeignete Wahl der Polstellen langsam genug ausgelegt oder die Übermittlung der benötigten Informationen wird als Totzeit modelliert, die ein Vielfaches der Abtastzeit ist. Dafür muss dann in jedem Paket eine der Abtastzeit entsprechende Anzahl von Messwerten oder Stellgrößen versendet werden. Treten beim Betrieb der Regelung Paketausfälle auf, so führt dies zu Überschwingungen oder eine Regelung wird gar ganz unmöglich.

Das in dieser Arbeit betrachtete Yokogawa-Konzept wurde mit dem zuvor beschriebenen Gain-Scheduling-Verfahren kombiniert. Zuerst wird jedoch auf die Vor- und Nachteile des reinen Yokogawa-Konzepts eingegangen, das ursprünglich einfache PID-Regler verwendete. In diesem Konzept wird es ermöglicht, Regelungen auch dann zu betreiben, wenn über längere Zeiträume Paketausfälle auftreten. In diesem Fall wird der Sollwert so angepasst, dass bei Ausfall von Paketen ein ständiges Aufintegrieren des I-Anteils vom Regler verhindert wird. Wird dieses Konzept mit Modellen des zu regelnden Systems ausgestattet, so können Paketausfälle außerdem durch geeignete, aus den Modellen geschätzten Ersatzwerte kompensiert werden.

Der große Nachteil an diesem Konzept ist zum einen, dass über die Bestätigung der Stellgrößen-Übertragung Fehlinformationen erzeugt werden können, indem die tatsächliche Stellgröße am Ziel eingetroffen ist, auf den Aktor aufgeschaltet wurde, aber dafür die Bestätigungsnachricht ausgefallen ist. Somit wird vom Regler angenommen, dass der Wert nicht angekommen ist und definierte Maßnahmen ergriffen wurden, obwohl die Stellgröße tatsächlich über den Aktor auf das zu regelnde System aufgeschaltet wurde. Weiterhin ist beim Betrieb des Yokogawa-Konzepts ein sehr genaues Timing bei den Abläufen im Regelkreis erforderlich.

Speziell auf den Einsatz in Kombination mit dem Gain-Scheduling übertragen, ergeben sich ebenfalls einige spezielle Vor- und Nachteile. Der Hauptnachteil in Kombination mit dem Gain-Scheduling-Regler ist, dass die mögliche Ausregelgeschwindigkeit im geschlossenen Regelkreis von der Leistungsfähigkeit der Netzwerkübertragung abhängt. Vorteilhaft ist, dass die Veränderung des Sollwerts auch bei Übertragungsausfällen anpassbar ist. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Übertragung der Stellgröße intakt ist. Sollte sie ausgefallen sein, so ist eine Regelung auf den neuen Sollwert nur dann möglich, wenn die Übertragung der Stellgröße wieder einwandfrei funktioniert.

Als drittes Verfahren wurde der Predictive Outage Compensator (POC) vorgestellt. Ein Verfahren, welches ein Modell des zu regelnden Systems nutzt, um damit bei Ausfall eines oder mehrerer Messwerte einen Ersatzwert zu ermitteln. Der POC kann sowohl als lokaler als auch als zentraler Regler betrieben werden. Ein großer Vorteil des POCs ist, dass er auch bei längerfristigen Paketausfällen für stabile Systeme eine Steuerung der Regelgröße ermöglicht. Der Nachteil in diesem Fall ist jedoch, dass der POC keine Störungen oder nicht modellierte Systemeinflüsse ausregeln kann. Weiterhin ist für den Betrieb des POCs ein möglichst genaues Modell des zu regelnden Systems erforderlich. Wird der POC als lokaler Regler ausgelegt, so ist der Sollwert stets anpassbar, auch wenn die Messwertübertragung ausfällt. Voraussetzung ist jedoch, dass die Verbindung zwischen Sollwertgeber und Regeleinrichtung intakt ist. Das System wird in diesem Fall auf den neuen Sollwert gesteuert. Bei einem lokalen Regler funktioniert die Sollwertanpassung noch, solange auch die Stellgröße an den Aktor übertragen werden kann.

Zuletzt wurde ein Multiraten-Konzept betrachtet. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass sich das System schnell ausregeln lässt, soweit eine Messgröße schnell genug abgetastet werden kann. Auch in Zeiträumen, in denen viele Paketausfälle auftreten, ist die Funktion der Regeleinrichtung gegeben. Fällt beispielsweise eine Messgröße aus, so ist durch eine oder mehrere weitere Messgrößen sichergestellt, dass das System recht gut ausgeregelt werden kann. Beim Anlagenprüfstand wurde dies beispielsweise durch den drahtlos übertragenen Durchflussmesswert als Regelgröße und durch die drahtgebunden übermittelte Ventilstellung aufgezeigt. Fällt beispielsweise der Durchfluss aus, so kann zur Regelung noch die drahtgebunden übertragene Ventilstellung verwendet werden. Der Durchfluss wird weiterhin über den Beobachter im System geschätzt. Die Regelung läuft zuverlässig weiter, kann allerdings den Durchfluss betreffende Störungen und Abweichungen nicht ausregeln, solange kein neuer Messwert vom Durchflusssensor an der Regeleinrichtung eintrifft. Auch ein Betrieb bei Ausfall aller Messgrößen ist möglich. In diesem Fall liegt jedoch eine Steuerung vor. Auch der Sollwert kann bei Ausfall einer, mehrerer oder aller Messgrößen weiterhin angepasst werden, solange die Stellgröße vom Regler an den Aktor weitergegeben wird. Das Multiratenkonzept eignet sich sowohl für zentrale als auch lokale Regelungssysteme. Nachteilig an dieser Methodik ist, dass ein recht genaues Modell des Systems vorhanden sein muss. Weiterhin ist die Auslegung der Regelung im Vergleich zum Gain-Scheduling-Regler aufwendiger.

Zusammenfassend lässt sich aus den Vor- und Nachteilen der einzelnen Regelkonzepte festhalten, dass sich die Auslegung des Gain-Scheduling-Reglers am einfachsten gestaltet. Die Regelung des Systems wird jedoch in Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit des verwendeten Übertragungsprotokolls langsam. Bei diesem Verfahren dürfen zudem zu keinem Zeitpunkt längerfristige Paketausfälle auftreten, da in solch einer Situation eine Regelung des zu regelnden dynamischen Systems nicht mehr möglich ist. Das Yokogawa-Konzept lässt zwar längerfristige Paketausfälle zu, aber auch hier ist die Ausregelung des Systems langsam. Für den Einsatz in Regelungen mit drahtlosen Rückführungen sind besonders diejenigen Regelkonzepte geeignet, die bei Ausfällen von Paketen die Schätzung eines Ersatzwertes zulassen. Somit lieferten bei den durchgeführten Untersuchungen die besten Ergebnisse der POC und das Multiraten-Konzept. Der Vorteil des Multiratenkonzepts ist außerdem, dass damit dynamische Systeme im Gegensatz zu anderen vorgestellten Regelkonzepten, wie z.B. der Gain-Scheduling-Regler, das Yokogawa-Konzept und der POC, bei Verwendung der gleichen Netzwerktopologie und dem gleichen Protokoll deutlich schneller ausgeregelt werden können.

Das folgende Kapitel 6 veranschaulicht die in diesem Kapitel vorgestellten und bewerteten Regelkonzepte anhand von Simulationen und Messungen.

# 6 Simulationsergebnisse und Messungen an realen Versuchsaufbauten

Nachdem im Kapitel 5 einige der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Regelungsverfahren für Systeme mit drahtlosen Rückführungen und/oder Stellgrößenübertragungen beschrieben wurden, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit der Simulation der behandelten Regelungsverfahren am Beispiel des in Abschnitt 2.1 vorgestellten Anlagenprüfstands. Um zu zeigen, inwieweit die betrachteten Verfahren für den praktischen Einsatz geeignet sind, werden einige am realen Anlagenprüfstand implementiert und Messungen unter realen Bedingungen durchgeführt. Das Vorgehen zur Auswahl der Regelungsmethoden, die am Anlagenprüfstand implementiert wurden, richtete sich nach den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Schritten zum simulationsgestützten Reglerentwurf. Nur Methodiken, die bereits bei ihrer Simulation aus Schritt 5 (siehe Bild 4.1) und bei der Hardware-in-the-Loop Simulation aus Schritt 6 (siehe Bild 4.1) ihre grundsätzliche Eignung bewiesen haben, wurden schließlich am realen Anlagenprüfstand implementiert. Große Auswirkungen auf den Reglerentwurf besitzen am Anlagenprüfstand der Durchflusssensor, dessen Messwerte stark verrauscht sind, aber auch variierende Übertragungstotzeiten. Für die Durchführung der Simulationen, werden die in Kapitel 4 vorgestellten Simulatoren verwendet. Einige der in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse wurden bereits im Rahmen der Arbeiten [92], [93] und [91] veröffentlicht.

## 6.1 Gain-Scheduling-Durchflussregelung mit WirelessHART

Im Folgenden wird der in Abschnitt 5.5 vorgestellte Gain-Scheduling-Regler dazu genutzt, um den Durchfluss des in Abschnitt 2.1 beschriebenen Anlagenprüfstands zu regeln. Dies wird sowohl anhand einer Simulation, als auch anhand von Messungen am Anlagenprüfstand unter der Voraussetzung von konstanten Übertragungstotzeiten durchgeführt. Zur Übertragung der Messwerte wird das Übertragungsprotokoll WirelessHART verwendet und der Regelkreis wird lokal aufgebaut (siehe Bild 5.5). Zur Umsetzung von WirelessHART am Anlagenprüfstand kamen das WirelessHART-Gateway aus Bild 2.6c, drei WirelessHART-Adapter aus Bild 2.6a und das WD-H-Modul aus Bild 2.6d zum Einsatz. Am Versuchsstand werden die Messwerte der Sensoren zur Erfassung der Drücke  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$  und des Durchflusses q(t) in Intervallen von  $\Delta T_N \approx 2$  s drahtlos an das WirelessHART-Gateway übertragen. Die Kommunikationstopologie am Anlagenprüfstand kann Bild 3.12 entnommen werden. Zur Regelung wird ausschließlich der Durchfluss q(t)benötigt und in Abhängigkeit des aktuellen Durchflussmesswertes werden Arbeitspunktwechsel zwischen den Einzelreglern des Gain-Scheduling-Konzeptes durchgeführt. Da die verwendeten kommerziellen Produkte keine Möglichkeit boten, den Durchflussmesswert direkt an das Empfangsgerät im Feld zu übermitteln, mussten die Werte zunächst über HART-IP aus dem Gateway ausgelesen und in ein neues WirelessHART-Paket verpackt werden, bevor sie an die Regeleinrich-


Bild 6.1: Simulation und Messung einer Durchflussregelung (Sprünge)

tung übertragen werden konnten. Die Regeleinrichtung befindet sich direkt am Stellungsregler des Regelventils. Hieraus ergibt sich die in Abschnitt 3.7.1 beschriebene und in Bild 3.11 dargestellte Kommunikationsstruktur. Unter diesen Voraussetzungen wurden sowohl Simulationen mit dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen Simulator als auch Messungen am Versuchsstand durchgeführt.

In Bild 6.1 und Bild 6.2 sind Simulations- und Messergebnisse der Durchflussregelung mit dem entworfenen Gain-Scheduling-Regler und WirelessHART als Übertragungsprotokoll dargestellt. In Bild 6.1 wurden mehrere Sollwertsprünge  $q_{soll}(t)$  auf das System geschaltet. Das System wird anfangs mit dem Regler für Arbeitspunkt 3 ( $q = 7.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) geregelt. Nach dem ersten Sprung wird auf den Regler von Arbeitspunkt 4 ( $q = 12,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) und nach einem weiteren Sprung zum Regler von Arbeitspunkt 5 ( $q = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) umgeschaltet. Der Verlauf von  $q_{sim}(t)$  gibt das Ergebnis der Simulation des dynamischen Systemens in Kombination mit dem simulierten WirelessHART-Netzwerk an. Die Simulation wurde mittels der zusammengestellten und in Abschnitt 4.3 beschriebenen Simulationsumgebung für dynamische Systeme durchgeführt, die WirelessHART als Übertragungsprotokoll zur Übermittlung von Messwerten verwenden. Bei der Simulation wird eine ideale Messung vorausgesetzt und es wird kein Messrauschen berücksichtigt. Der Verlauf  $q_{\text{mess}}(t)$  gibt das Verhalten der Regelung mit dem identischen Gain-Scheduling-Regler am realen Versuchsstand aus Bild 2.1 an. Sowohl  $q_{sim}(t)$  als auch  $q_{mess}(t)$  sind nach der Übertragung durch das WirelessHART-Netzwerk aufgezeichnet, aber noch vor der Abtastung durch den verwendeten Prozessregler. Die schwarzen Balken am unteren Teil der Plots zeigen an, wenn dem Regler zu einem Abtastzeitpunkt keine neuen Messwerte zur Verfügung stehen. Es ist an dieser Stelle wichtig anzumerken, dass es bei den durchgeführten Messungen zu keinen Paketausfällen gekommen ist. Es ist jedoch vorgekommen, dass Messwerte nicht innerhalb eines  $\Delta T_{\rm R} = 2$  s Abtastintervalls ankamen. Vom Regler wird diese Situation als Paketausfall gewertet. In Bild 6.1 ist zu erkennen, dass die Verläufe von  $q_{sim}(t)$  und  $q_{mess}(t)$  in den meisten Bereichen nahezu identisch sind. Dem in dieser Arbeit für den nichtlinearen Anlagenprüfstand entworfenen Regler gelingt es,



Bild 6.2: Simulation und Messung einer Durchflussregelung (Sprünge und Rampe)

trotz der im Verhältnis zur Systemzeitkonstanten relativ großen Abtastzeit, Sollwertvorgaben relativ genau zu folgen. Auch Störungen können durch den im Regelkonzept vorhandenen *I*-Anteil gut ausgeregelt werden. Bei den Messungen am realen Versuchsstand kommt es allerdings zu einigen Überschwingungen. Dies lag zum einen an der Konfiguration des Stellungsreglers sowie an den am Versuchsstand verspätet ankommenden Paketen mit Messwerten.

Alle Beschreibungen für Bild 6.1 gelten auch für Bild 6.2, außer dass eine andere Führungsgröße vorgegeben wird. Diesmal enthält die Führungsgröße nicht nur Sprünge, sondern auch eine Rampe. Anhand dieser Simulation ist zu erkennen, dass es dem entworfenen Regelkonzept gelingt, einer vorgegebenen Rampe mittels WirelessHART als Übertragungsprotokoll zu folgen. Der Istwert folgt jedoch sowohl beim Simulator als auch am realen Versuchstand der Führungsgröße mit einer Verzögerung, die durchschnittlich bei ungefähr 10 s liegt. Dieser Schleppfehler kann mit einem zusätzlichen *I*-Anteil im Regler vermieden werden [51, S. 361].

In diesem Abschnitt wurde sowohl mittels Simulation als auch am realen Versuchsstand gezeigt, dass generell die Realisierung einer Regelung mit WirelessHART als Übertragungsprotokoll für Messwerte, auch für Systeme mit im Vergleich zur Abtastzeit kleinen Streckenzeitkonstanten, möglich ist. Des Weiteren ist das in Abschnitt 5.5 beschriebene Gain-Scheduling-Konzept zur Regelung des Anlagenprüfstands in Kombination mit WirelessHART als Übertragungsprotokoll geeignet, sofern der geschlossene Regelkreis langsam genug ausgelegt wird. Mit einzelnen Paketausfällen kommt der Gain-Scheduling-Regler mit seinen PID-Reglern in den Arbeitspunkten zu Recht, wie dies die in diesem Abschnitt durchgeführten Simulationen und Messungen zeigen. Treten jedoch Paketausfälle über größere Zeiträume auf, so führt dies zur längerfristigen Aufintegration der Regelabweichung e(t) durch den im PID-Regler vorhandenen I-Anteil und somit öffnet das Ventil bei negativer Regelabweichung e(t) oder schließt bei positiver Regelabweichung e(t). Zu Paketausfällen kann es sowohl bei der drahtlosen Übermittlung von Messwerten als auch von Stellgrößen kommen. Abhilfe schafft an dieser Stelle das Yokogawa-Konzept, welches die Aufintegration der Regelabweichung durch den *I*-Anteil des in diesem Abschnitt beschriebenen Gain-Scheduling-Reglers verhindern kann.

### 6.2 Yokogawa-Konzept mit WirelessHART

Im vorherigen Abschnitt wurden Simulationen und Messungen mit dem Gain-Scheduling-Regler vorgestellt. Auf diesem Konzept aufbauend wird nun eine Durchflussregelung gezeigt, die den Gain-Scheduling-Regler aus Abschnitt 5.5 mit dem Yokogawa-Konzept, wie in Abschnitt 5.6 beschrieben, vereint. In diesem Beispiel wird der Gain-Scheduling-Regler zentral (siehe Bild 5.4) betrieben. Weiterhin wird der Anlagenprüfstand aus Abschnitt 2.1 als Demonstrator verwendet. Es wird sowohl eine Simulation mittels des in Abschnitt 4.3 vorgestellten WirelessHART-Simulators durchgeführt als auch eine Messung/Simulation mit dem in Abschnitt 4.4 beschriebenen HiL-Prüfstand. Das vorliegende Konzept wird ausschließlich in Kombination mit WirelessHART aus Abschnitt 3.7.1 untersucht, da es sich bei WirelessHART um das Protokoll mit den größten Einschränkungen bezüglich der minimalen Abtastrate  $\Delta T$  handelt. Die Prinzipien des in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahrens lassen sich problemlos auf alle Weiteren, in dieser Arbeit untersuchten sowie auf die meisten derzeit am Markt existierenden drahtlosen Kommunikationsprotokolle übertragen, die eine schnellere Abtastrate als WirelessHART ermöglichen.

Bild 6.3 zeigt die Simulation eines Durchflussregelkreises unter Nutzung des Yokogawa-Konzeptes am Beispiel des Anlagenprüfstands. In Bild 6.3 (Oben) sind der diskrete Sollwert  $q_{\text{soll},k}$ , der kontinuierliche Istwert für den Durchfluss  $q_{\text{ist}}(t)$  direkt an der Messstelle des Anlagenprüfstands, der mit  $\Delta T$  abgetastete und um die Zeit  $t_{i,\text{TPV}}$  (siehe auch Bild 5.12) verzögerte Istwert  $q_{\text{T,ist},k}$  (entspricht  $y_{\text{TPV}}$  in Bild 5.12) nach Übertragung mittels WirelessHART sowie der beim Auftritt von Paketausfällen zwischen Regler und Aktor nach Gleichung (5.44) korrigierte Sollwert  $\tilde{q}_{\text{soll},k}$  bzw.  $\tilde{w}_k$  aufgetragen. Immer, wenn Paketausfälle auftreten, weicht  $\tilde{q}_{\text{soll},k}$  von  $q_{\text{soll},k}$ ab und verhindert dadurch die Aufintegration des *I*-Anteils vom Regler. Als Sollwerte werden unterschiedliche Sollwertsprünge für die Durchflusswerte aufgeschaltet.

Das Yokogawa-Konzept wurde um den in Abschnitt 5.5 beschriebenen Gain-Scheduling-Regler erweitert, so dass in Abhängigkeit vom aktuellen Durchfluss zwischen den einzelnen zu einem Durchflussbereich gehörenden PID-Reglern umgeschaltet bzw. an den Übergängen interpoliert wird. Direkt unter dem ersten Graphen von Bild 6.3 (Mitte) sind die Paketausfälle abgebildet, die während der Simulation künstlich erzeugt wurden. Diese Simulation umfasst ausschließlich Paketausfälle, die bei der Sollwertübertragung zwischen zentralem Regler und dem Aktor auftreten. Dadurch soll die Arbeitsweise der Sollwertkorrektur veranschaulicht werden und ebenfalls aufgezeigt werden, dass der zuvor vorgestellte Gain-Scheduling-Reglerentwurf für den Anlagenprüfstand auch mit dem in Abschnitt 5.6 vorgestellten Konzept funktionsfähig ist und auf Ausfälle der Sollwertübertragung durch die Sollwertkorrektur angemessen reagieren kann. Immer, wenn der Verlauf aus Bild 6.3 (Mitte) für die Paketausfälle mit "Ja" angegeben ist, liegt ein Paketausfall vor und eine Stellgröße oder eine Stellgrößenbestätigung wurde nicht zwischen Regeleinrichtung und Aktor bzw. umgekehrt übertragen. Ist dagegen der Verlauf der Paketausfälle mit "Nein" an-



**Bild 6.3:** Simulation eines Durchflussverlaufs (Oben), Paketausfälle (Mitte), Ventilstellung (Unten)

gegeben, so wurden zum entsprechenden Zeitpunkt die Pakete erfolgreich übertragen und es muss keine Sollwertkorrektur durchgeführt werden.

Bild 6.3 (Unten) zeigt den Verlauf der Ventilstellung während der Simulation in Abhängigkeit von den Durchflusssollwerten an. Es ist der durch Gleichung (5.48) beschriebene Sollwertanteil  $\overline{h}_{\text{soll},k}$ bzw.  $\overline{u}_k$  dargestellt, ohne den durch die Sollwertänderung hervorgerufenen *D*-Anteil. Zusätzlich ist die Stellgröße  $\hat{h}_{\text{soll},k}$  bzw.  $\hat{u}_k$  aus Gleichung (5.49) aufgetragen, die durch den D-Anteil bei einer Sollwertänderung verursacht wird. Obige Simulation zeigt, dass das Yokogawa-Konzept



Bild 6.4: Durchflussverlauf Simulation und HiL (Oben), Paketausfälle (Unten)

generell zur Regelung von Systemen, bei denen die Stellgrößen ausfallen, geeignet ist. Dies ist auch dann noch der Fall, wenn Pakete über einen längeren Zeitraum ausfallen. Allerdings kann in diesen Zeiträumen der Istwert nicht den gewünschten Sollwert erreichen. Dies ist erst dann der Fall, wenn die Übertragung der Stellgrößen wieder intakt ist.

Auf Ausfälle bei der Übertragung des Messwertes wurde in diesem Beispiel verzichtet. Bei Ausfall dieser Werte kann jedoch problemlos ein Beobachter zur Schätzung von Ersatzwerten eingesetzt werden. Außerdem wurde nicht dargestellt, welche Auswirkungen es hat, wenn die Stellgröße erfolgreich übertragen wird, aber die Rückmeldung zur Bestätigung der erfolgreichen Übertragung ausfällt. In diesem Fall würde der Sollwert korrigiert werden und somit das Verhältnis zwischen Sollwert, Messwert und Stellgröße zunächst nicht mehr stimmen. Je mehr Paketausfälle in einem System auftreten, umso mehr Zeit wird durch die Sollwertkorrektur benötigt, bis der Istwert eines zu regelnden Systems seinen Sollwert erreicht.

In Bild 6.4 wird die Simulation des Anlagenprüfstands mit der in Abschnitt 4.3 vorgestellten reinen Simulation und der in Abschnitt 4.4 vorgestellten HiL-Simulation durchgeführt und gegenüber gestellt. Für die HiL-Simulation wird das WirelessHART-Netzwerk mit der Topologie aus Bild 3.12 und den Hardwarekomponenten aus den Bildern 2.6b, 2.6a und 2.6d real aufgebaut. In Bild 6.4 (Oben) sind der Sollwertverlauf für den Durchfluss  $q_{soll}$ , der Durchflussverlauf für die reine Simulation  $q_{ist,SIM}$  (entspricht in Bild 5.12  $y_{TPV}$ ) und der Durchflussverlauf  $q_{ist,HiL}$  (entspricht in Bild 5.12  $y_{TPV}$ ) für die HiL-Simulation abgebildet.

Insgesamt fallen 25 % der Pakete aus, die ebenfalls in Bild 6.4 (Unten) dargestellt sind. Die Zeitpunkte der Paketausfälle sind sowohl bei reiner Simulation als auch bei der HiL-Simulation identisch. Dies wurde dadurch erreicht, indem sowohl bei der reinen Simulation als auch bei der HiL-Simulation die Paketausfälle künstlich mittels Matlab erzeugt wurden. Gleichzeitig wurde mittels Zeitstempel sichergestellt, dass es bei der HiL-Simulation im realen WirelessHART-Netzwerk zu keinen zusätzlichen Paketausfällen gekommen war. Nur durch diese Maßnahmen war es möglich, die Ergebnisse von der reinen Simulation und von der HiL-Simulation miteinander vergleichbar zu machen. Sowohl Simulation als auch HiL-Simulation liefern nahezu identische Ergebnisse.

Eine Regelung ist trotz Paketausfällen mittels des Gain-Scheduling-Reglers in Kombination mit dem Yokogawa-Konzept zuverlässig möglich. Längerfristige oder dauerhafte Paketausfälle, können jedoch von diesem Konzept nicht abgedeckt werden, da der Istwert den gewünschten Sollwert erst dann erreichen kann, wenn Stellgrößen wieder erfolgreich übertragen werden.

Um zu veranschaulichen, dass der Nachteil der langsamen Ausregelung der Regelgröße während Paketausfällen beim Yokogawa-Konzeptes mit einem anderen Verfahren vermieden werden kann, werden im nächsten Abschnitt die Simulations- und Messergebnisse des Predictive-Outage-Compensators vorgestellt.

## 6.3 Predictiv-Outage-Compensator mit WirelessHART

In den vorherigen Abschnitten 6.1 und 6.2 war zu sehen, dass eine Durchfluss-Regelung des Anlagenprüfstands generell mit dem WirelessHART-Protokoll möglich ist. Das Konzept aus Abschnitt 6.2 ermöglicht auch bei einer längerfristigen Unterbrechung des Regelkreises durch Paketausfälle eine zuverlässige Regelung. Der Grund dafür ist, dass während des Auftretens von Paketausfällen die Regeldifferenz zu null wird und es daher durch den *I*-Anteil nicht zur Aufintegration der Regelabweichung kommt. Der Nachteil ist jedoch, dass der Istwert auf den gewünsch-



Bild 6.5: Messergebnisse einer Durchflussregelung mit Paketausfallkompensation (Teil 1)



**Bild 6.6:** Messergebnisse einer Durchflussregelung mit Paketausfallkompensation (Teil 2)

ten Sollwert erst dann ausgeregelt werden kann, sobald die Kommunikation im Regelkreis wieder ordnungsgemäß funktioniert.

Um diesen Nachteil auszugleichen, wurde in Abschnitt 5.7 mit dem Predictive-Outage-Compensator (POC) ein weiteres Verfahren als lokales Regelkonzept vorgestellt. Es arbeitet rein modellbasiert, indem zu jeder Zeit das Modell des geregelten Systems mitläuft. Das Modell des geregelten Systems springt immer dann ein, wenn Messwerte an der Regeleinrichtung nicht eintreffen und ein Ersatzwert für den eigentlichen Messwert benötigt wird. Für den POC am Anlagenprüfstand wurden sowohl Messungen als auch Simulationen durchgeführt. Der topologische Aufbau ist in Bild 3.12 dargestellt. Der Kommunikationsablauf im Funknetzwerk ist identisch mit dem in Abschnitt 6.1 beschriebenen und in Bild 3.11 dargestellten Ablauf. Anders als in den vorangegangenen Abschnitten, in denen das Gain-Scheduling-Konzept genutzt wurde, um zwischen verschiedenen Arbeitspunkten und speziell darauf abgestimmten PID-Reglern umzuschalten, wird der POC im Folgenden nur um einen einzigen Arbeitspunkt mit einem PID-Regler betrieben.

In den Bildern 6.5, 6.6, 6.7 und 6.8 sind Simulations- und Messergebnisse der Durchflussregelung mit dem entworfenen Regler und einem POC mit WirelessHART als Übertragungsprotokoll dargestellt. Für die beiden Bilder 6.5 und 6.6 wurden mehrere Sollwertsprünge um den Arbeitspunkt  $q_{AP,3}$  (siehe Bild 5.10) auf das System geschaltet. Gleichzeitig wird bei jeder Messung die Häufigkeit von Paketausfällen variiert. So wird je eine Messung am realen Versuchsstand mit 0 %, 25 % und 50 % (siehe Bild 6.5) sowie mit 75 % und 100 % (siehe Bild 6.6) Paketausfällen durchgeführt. Alle geplotteten Messwerte  $q_{mess,xx}$  (xx steht als Platzhalter für den prozentualen Anteil der Paketausfälle an der Gesamtzahl der übertragenen Messwerte) wurden nach der Funkübertragung mit WirelessHART aufgezeichnet. Die Paketausfällen kommt, läuft der POC und schätzt die aktuellen Messwerte. Im Fall von 100 % Paketausfällen wird die Anlage ausschließlich modellbasiert gesteuert. In diesem Fall ist es daher nicht möglich, Störungen und Modellungenauigkeiten auszuregeln.

In der Praxis ist es nur sehr schwer möglich, eine Anlage ohne Abweichungen zu modellieren. Auch verändert sich das Anlagenverhalten über die Zeit, zum Beispiel durch Verschleiß von Bauteilen, durch Änderung der Umgebungstemperatur oder durch sich ändernde hydraulische Eigenschaften von zu fördernden Fluiden. Genauso ist es auch am zur Messung genutzten Versuchsstand und es treten Abweichungen zwischen dem Modell und dem realen Versuchsstand auf, wie deutlich aus der Messreihe mit 100 % Paketausfällen ersichtlich ist. Diese Abweichungen könnten durch adaptive Parameterschätzungen reduziert werden, allerdings ist dies nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Abweichungen im Modell werden in diesen Messungen dazu genutzt, um zu zeigen, dass trotz der Modellabweichungen und einer hohen Paketausfallrate eine Regelung mittels einer drahtlosen Rückführung grundsätzlich möglich ist.

Durch die Bilder 6.5 und 6.6 ist sehr deutlich sichtbar, dass diese Abweichungen im Betrieb des POCs bei allen anderen Messungen mit Paketausfällen korrigiert werden können und somit ein Anlagenbetrieb auch noch bei 75 % Paketausfällen möglich ist. Bei 75 % treten jedoch im Gegensatz zu 25 % und 50 % zeitweise deutlich größere Abweichungen vom Sollwert  $q_{soll}$  auf. Die Zeitabschnitte der Paketausfälle für die Messung mit 75 % Paketausfällen sind ebenfalls in Bild 6.6 als zweite *Y*-Achse auf der rechten Seite aufgetragen. Alle Zeitabschnitte, zu denen ein Paketausfall vorliegt sind mit einem "Ja" angegeben. Zeitabschnitte, in denen Messwerte erfolgreich ankommen, sind mit einem "Nein" gekennzeichnet.

Bild 6.7 zeigt Simulationen und Messungen der Durchflussregelung bei denen 50 % aller Pakete bei der Übermittlung von Messwerten durch die drahtlose Rückführung ausfallen. Es werden



Bild 6.7: Durchflussregelung mit einer Paketausfallrate von 50 %



Bild 6.8: Simulation und Messung einer Durchflussregelung (Sprünge und Rampe)

insbesondere die Unterschiede zwischen einem stand-alone PID-Regler und einem PID-Regler in Kombination mit dem POC aufgezeigt. Im Falle des reinen PID-Reglers wird in Zeiten von Paketausfällen bei gleichzeitiger Änderung der Führungsgröße die Regelabweichung aufintegriert und es kommt zu großen Abweichungen zwischen Ist- und Sollwert. Die Messreihen  $q_{sim,POC}$  und  $q_{mess,POC}$  zeigen, dass der Betrieb von drahtlosen Rückführungen auch mit vielen Paketausfällen ohne nennenswerte Abweichungen vom Sollwert  $q_{soll}$  möglich ist.

Insgesamt ist zu erkennen, dass die Verläufe von  $q_{sim,POC}$  und  $q_{mess,POC}$  in den meisten Bereichen nahezu identisch sind. Dem in dieser Arbeit für den nichtlinearen Anlagenprüfstand entworfenen Regler gelingt es, den Sollwertvorgaben trotz der im Verhältnis zur Systemzeitkonstanten großen Abtastzeit sehr genau zu folgen. Die Kompensation von Paketausfällen erfolgt zuverlässig und auch Störungen wie Modellungenauigkeiten können durch den im Regelkonzept vorhandenen *I*-Anteil gut ausgeregelt werden.

Zum Schluss wird die Messung einer weiteren Trajektorie mit einer rampenförmigen Änderung in Bild 6.8 gezeigt. Sowohl bei der Messung als auch bei der Simulation treten ebenfalls 50 % Paketausfälle auf. Wie auch hier zu sehen ist, stimmen sowohl Simulation als auch Messung sehr gut überein. Dem POC gelingt es, die Paketausfälle zu überbrücken. Aus den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Gründen, tritt auch bei der abgebildeten Rampe ein Schleppfehler auf. Der Istwert eilt somit dem Sollwert während der ansteigenden Rampe mit einem horizontalen Abstand von ungefähr 10 s deutlich hinterher.

Insgesamt konnte in diesem Abschnitt gezeigt werden, dass WirelessHART als Übertragungsprotokoll für Messwerte im geschlossenen Regelkreis in Kombination mit dem POC sehr gut geeignet ist. Im Gegensatz zum Yokogawa-Konzept aus Abschnitt 5.6 kann der Istwert trotz Paketausfällen den Sollwert immer gleichbleibend schnell erreichen. Einzig Störungen oder Modellungenauigkeiten können nicht ausgeregelt werden, solange ein Ausfall der Übertragung von Messwerten bestehen bleibt und somit keine neuen Messwerte an der Regeleinrichtung eintreffen. Deshalb ist es notwendig, dass das vom POC genutzte Modell des zu regelnden Systems möglichst genau dem realen zu regelndem dynamischem System entspricht. Somit können die Auswirkungen von Paketausfällen durch geeignete Maßnahmen minimiert werden. Allerdings ist durch die relativ lange Abtastzeit im Vergleich zur Systemdynamik die erreichbare Geschwindigkeit der entworfenen Regelung genauso wie bei dem Gain-Scheduling-Verfahren aus Abschnitt 5.5 und dem Yokogawa-Konzept aus Abschnitt 5.6 eingeschränkt.

Um auch die Ausregelgeschwindigkeit von Systemen zu erhöhen, deren Regler aufgrund langer Übertragungsintervalle von Messwerten nur langsam abtasten können, wird im folgenden Abschnitt die Leistungsfähigkeit des in Abschnitt 5.8 beschriebenen Multiraten-Konzeptes anhand von Simulationen und Messungen veranschaulicht.

## 6.4 Multiraten-Kalmanfilter

Durch den in Abschnitt 5.8 beschriebenen Multiraten-Entwurf ist es möglich, die Dynamik von Systemen, bei denen eine oder mehrere Zustandsgrößen in langen Zeitintervallen und mindestens eine oder mehrere Zustandsgrößen in kurzen Zeitintervallen abgetastet werden, schneller zu machen. Dynamische Systeme, bei denen ausschließlich eine langsam abtastbare Regelgröße zurückgeführt wird, verhalten sich bezüglich ihrer Ausregelung entsprechend der Abtastung langsam. Dies ist beispielsweise bei den Methoden aus den Abschnitten 5.5 bis 5.7 der Fall. Dabei besteht die Problematik darin, dass die Abtastintervalle durch die minimalen Übertragungsintervalle der verwendeten drahtlosen Technologie zur Übermittelung der Messwerte begrenzt werden. Eine bessere Performanz bietet der Multiraten-Entwurf. Der Multiraten-Entwurf wurde sowohl anhand einer Simulation, als auch am realen Versuchsstand mittels WirelessHART und der implementierten Bluetooth-Routing-Strategie sowie mittels der Übertragung durch das MAC-Protokoll getestet. In diesem Abschnitt werden Messungen unter Nutzung des Bluetooth Low Energy Protokolls am Beispiel des Anlagenprüfstands vorgestellt. Die Ergebnisse mit den Übertragungsprotokollen WirelessHART und dem MAC-Protokoll sind nahezu identisch. Der zentrale Unterschied liegt darin, dass unter Verwendung von WirelessHART wesentlich seltener und mit dem auf dem MAC-Layer basierenden Protokoll in deutlich kürzeren Zeitintervallen Messwerte zur Korrektur der Schätzung zur Verfügung stehen. Es hat sich außerdem gezeigt, dass das Multiraten-Konzept sehr einfach auf verschiedene Übertragungsprotokolle mit sich unterscheidenden Übertragungscharakteristiken skalierbar ist, solange die Grundabtastzeit des Systems gleichbleibt.

In Bild 6.9 ist die Messung der implementierten Durchflussregelung mit Bluetooth als Übertragungsprotokoll für die drahtlose Rückführung der Messwerte dargestellt. Die sprungförmige Führungsgröße entspricht  $q_{soll}$ . Die Messwerte werden im  $\Delta T_N = 100 \text{ ms}$  Takt vom Durchflusssensor drahtlos zum Regler übertragen. Die zweite Messgröße, die von der Regeleinrichtung mit  $\Delta T_{R1} = 10 \text{ ms}$  abgetastet wird, ist die Ventilstellung, die über einen externen Wegsensor erfasst wird. Gleichzeitig befinden sich, wie in Bild 6.10 zu sehen, im betrachteten BLE-Netzwerk



Bild 6.9: Sollwertsprünge Durchfluss q unter Nutzung des Multiraten-Kalmanfilters

noch zwei BLE-Module, die die relativen Drücke vor und nach dem Ventil messen und im  $\Delta T = 500$  ms Takt jeweils an ein Mobiltelefon übermitteln. Dies dient dazu, im Netzwerk gleichzeitig zum Datenaustausch der Prozessregelung eine größere Auslastung des Master-Gerätes zu generieren.

Bezüglich der Regelung ist zu erkennen, dass das Multiraten-Kalmanfilter aufgrund der Ventilpositionsmessung den Durchflusswert  $\hat{q}$  am Versuchsstand sehr gut schätzen kann. Zum Vergleich dazu ist auch der Messwert für die Ventilstellung  $h_m$  in Bild 6.11 gezeigt. Die gemessenen Werte des Durchflusses  $q_m$  treffen erst nach einer Totzeit am Durchflussregler ein. Dieses Beispiel veranschaulicht, dass bei Regelkreisen, welche sowohl drahtlose als auch drahtgebundene Übertragungswege besitzen, ein Multiratenentwurf zu einer sehr guten Regelperformanz führen kann. Insbesondere in Bild 6.9 ist deutlich zu sehen, dass der geschätzte Wert für  $\hat{q}$  schon lange bevor überhaupt der Messwert  $q_m$  eintrifft, nahezu dem Sollwert  $q_{soll}$  entspricht. Verantwortlich hierfür ist der Messwert  $h_m$ , der drahtgebunden übertragen wird und in diesem Beispiel beliebig schnell abgetastet werden kann. Anhand der Modellkenntnis des Anlagenprüfstands kann daraus ein sehr genauer Schätzwert  $\hat{q}$  gebildet werden. Tritt jedoch eine Modellungenauigkeit oder eine Störung im System auf, so wird der geschätzte Wert von  $\hat{q}$  entsprechend vom Sollwert  $q_{soll}$  abweichen. Sobald ein gemessener Wert  $q_m$  eintrifft, kann dieser vom Multiraten-Kalmanfilter zur Korrektur des Fehlers genutzt werden.

In Bild 6.12 sind die parallel zur Durchflussregelung aufgezeichneten Druckverläufe der Drücke  $p_1$  und  $p_2$  aus der Android App dargestellt. Es ist wichtig zu beachten, dass in der Aufzeichnung aus Bild 6.12 die Druckmesswerte im Gegensatz zur Durchflussmessung aus Bild 6.9 und der Ventilstellung aus Bild 6.11 um ungefähr 10s versetzt aufgetragen sind. Das BLE-Modul eines jeden Drucksensors überträgt alle 500 ms einen neuen Druckmesswert. Somit wurde das Netzwerk mit drei Datenströmen beaufschlagt. Einmal zwischen Durchflusssensor und Regeleinrichtung mit dem Master als Zwischenstation, der Zweite verläuft zwischen dem Drucksensor vor dem Ventil



Bild 6.10: Netzwerk- und Kommunikationstopologie am Versuchsstand

über den Masterknoten zum Mobiltelefon und der dritte Datenstrom zwischen dem Drucksensor nach dem Ventil über den Master ebenfalls zur Android App. In diesem Anwendungsbeispiel kamen die Messwerte zu jedem Zeitpunkt im Regelbetrieb sowohl am Mobiltelefon als auch bei der Prozessregelung an.

Die großen Vorteile von einer App, wie sie in Bild 6.12 dargestellt ist, zeigen sich insbesondere in den Bereichen der Diagnose, Konfiguration und Inbetriebnahme von Anlagenkomponenten. Durch die weite Verbreitung von Bluetooth können sich mobile Geräte sehr einfach mit Sensoren



Bild 6.11: Ventilstellungen für die Soll- und Ist-Wertverläufe aus Bild 6.9



**Bild 6.12:** Bluetooth-Übertragung von  $p_1$  und  $p_2$  an eine App

und Aktoren verbinden und direkt vor Ort Informationen über den Zustand der Feldgeräte liefern. Musste bisher Service-Personal mit einer Person in der Leitwarte telefonieren, um mehr über die Richtigkeit der Einstellungen und Funktionsweise eines Sensors zu erfahren, können diese Informationen durch drahtlose Technologien direkt vor Ort ohne spezielle Programmiergeräte oder drahtgebundene Instrumente gewonnen werden. Diese Vorteile haben sich bereits bei der Inbetriebnahme der am Anlagenprüfstand vorhandenen Bluetooth-Module gezeigt. Allerdings stehen der grenzenlosen drahtlosen Konnektivität von Komponenten in industriellen Anlagen, aber auch im Heimbereich immer Risiken durch den Zugriff unbefugter Dritter gegenüber. Nur wenn Sicherheitsaspekte ausreichende Beachtung finden und drahtlose Komponenten entsprechend abgesichert werden, ist ein Betrieb mit minimiertem Risiko von Systemen mit drahtlosen Komponenten möglich.

In Bild 6.13 (links) wird ein vergrößerter Ausschnitt aus Bild 6.9 gezeigt. Gut zu erkennen ist, dass der geschätzte Wert für den Durchfluss  $\hat{q}$  deutlich schneller der Regeleinrichtung zur Verfügung steht, als der reale Messwert. Der reale Messwert trifft etwa 1 s verzögert bei der Regeleinrichtung ein. Grund hierfür sind die bereits in den vorherigen Kapiteln genannten Totzeiten für die Messwertaufnahme mittels des Durchflusssensors und die eigentliche Zeitdauer  $t_{T,w,k}$  der Netzwerkübertragung, die für ein Übertragungsintervall von  $\Delta T_N = 100 \text{ ms}$  in Bild 3.21 aufgeführt ist und für den vorliegenden Versuchsaufbau zwischen 24 ms und 116 ms liegt. Da dem Muliraten-Kalmanfilter in jedem Abtastschritt  $\Delta T_{R1}$  der Messwert der Ventilstellung  $h_m$  zur Verfügung steht, gelingt es ihm recht gut, den Schätzwert des Durchflusses zu rekonstruieren. Es würde ihm mit dem vorliegenden Aufbau jedoch nicht gelingen, auf Störungen zu reagieren, die auf die Durchflussstrecke wirken. Hierfür sind im Aufbau weitere Maßnahmen erforderlich. Außerdem ist es äußerst wichtig, dass das zur Schätzung der Zustandsgrößen des Systems verwendete Modell möglichst genau das reale System abbildet.

Weiterhin sind in Bild 6.13 (rechts) Messungen gegenübergestellt, denen jeweils voneinander verschiedene Abtastraten  $\Delta T_N$  zugrunde liegen. Jede Messreihe basiert jedoch auf einer BLE Über-



**Bild 6.13:** Sollwertsprung Durchfluss *q* unter Nutzung des Multiraten-Kalmanfilters (Ausschnitt) (links), Messungen mit verschiedenen Übertragungsintervallen (rechts)

tragung. Bei der Darstellung handelt es sich wieder um einen Ausschnitt von der Trajektorie aus Bild 6.9. Obwohl die einzelnen Messreihen mit den verschiedenen Abtastzeiten  $\Delta T_{\rm N} = 0.1$  s,  $\Delta T_{\rm N} = 0.5$  s,  $\Delta T_{\rm N} = 1$  s und  $\Delta T_{\rm N} = 2$  s durchgeführt wurden, gelingt es dem Regler unabhängig von der Abtastzeit durch Verwendung des durch den Multiraten-Kalmanfilter geschätzten Zustandsvektors, das System in diesem Beispiel immer in einem Zeitraum von etwa 3 s auf seinen neuen Sollwert auszuregeln. Im Vergleich zu den Messungen bei Verwendung des Gain-Scheduling-Reglers mit dem Durchfluss als Regelgröße ist dies eine Verbesserung um den Faktor 10.

Schließlich wurde eine gesonderte Messung zur Ermittlung der Abstände  $t_{abstand}$ , in denen Pakete hintereinander bei der Regeleinrichtung eintreffen, durchgeführt. Wie in Bild 6.14 veranschaulicht ist, erreicht ein Großteil der Pakete einen Abstand von 100 ms  $\pm$  15 ms. Es gibt nur wenige Pakete, die von diesem Wert abweichen. Es kam bei den Messungen der gleiche Versuchsaufbau wie zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben zum Einsatz. Ebenfalls wurde das Netzwerk durch eine App belastet, die parallel zur Durchflussübermittlung die Druckmesswerte aufgezeichnet hat. Die Paketabstände wurden anhand der Übermittlung von Durchflussmesswerten erfasst.

Die soeben präsentierten Messergebnisse am Beispiel des Anlagenprüfstands haben gezeigt, dass durch die Nutzung mehrerer zur Verfügung stehender Messgrößen, die unterschiedlich schnell abgetastet werden können, die Ausregelgeschwindigkeit durch Verwendung des Multiraten-Konzeptes deutlich erhöht werden kann. Dieses Konzept setzt jedoch eine möglichst genaue Modellierung des zu regelnden Systems voraus. Auch ist es nicht möglich, damit auf Störungen zu reagieren, solange kein neuer Messwert eintrifft. Die Verwendung eines Störgrößenbeobachters kann hier jedoch Abhilfe schaffen. Im nächsten Abschnitt wird eine drahtlose Regelung am Beispiel



Bild 6.14: Paketabstände bei der durchgeführten Durchflussregelung

eines Mehrgrößensystems vorgestellt. Dabei handelt es sich um den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Drei-Tank-Versuchsstand.

## 6.5 Messergebnisse am Beispiel des Drei-Tank-Systems

Bild 6.15 zeigt die mit dem in Abschnitt 5.9 beschriebenen Regelkonzept durchgeführten Messungen. Es wurden mehrere Sollwertsprünge für Tank 1 und Tank 3 aufgeschaltet. Die Verläufe der Soll-, Ist- und Schätzwerte für Tank 1 sind die in der Abbildung oberen (i = 1) dargestellten Füllstandswerte, für Tank 2 die mittleren (i = 2) und für Tank 3 die niedrigsten (i = 3)Füllstandsverläufe. Da nur zwei Pumpen und somit zwei Eingangsgrößen vorhanden waren, wurden in diesem Beispiel ausschließlich die Füllstände der beiden Tanks 1 und 3 geregelt, während der Füllstand von Tank 2 nicht geregelt wurde. In schwarz ist der Sollwert dargestellt, in blau die Messwerte vom Sensor zur Erfassung der Füllstände und in rot die Schätzung des erweiterten Kalmanfilters. Dieses Bild zeigt, dass sowohl der Entkopplungsentwurf seine Funktion erfüllt, indem sich die Füllstände der Tanks bei einer Änderung des Sollwerts eines der beiden geregelten Füllstände nahezu nicht gegenseitig beeinflussen. Ebenfalls funktioniert die Schätzung aller Zwischenwerte, da Messwerte nur im Sekundentakt über das WirelessHART-Netzwerk am Regler eintreffen. Ein analoges Verhalten ist mit Bluetooth und dem MAC-Protokoll zu beobachten. Da die Verläufe für die beiden anderen Protokolle nahezu identisch sind, werden die Ergebnisse in diesem Abschnitt nicht zusätzlich dargestellt. Grund für die identischen Verläufe ist die langsame Dynamik des Drei-Tank-Systems sowie die Stellgrößenbeschränkung der Zuläufe durch die begrenzte Fördermenge der zur Verfügung stehenden Pumpe. Aus diesem Grund wäre - anders als beim Anlagenprüfstand - das WirelessHART-Protokoll mit einem Messwertübertragungsintervall von 1 s völlig ausreichend für eine sehr gut funktionierende Füllstandsregelung.



Bild 6.15: Messung an der realen Strecke mit EKF und Smith-Prädiktor

Ebenfalls wie für den Anlagenprüfstand kam auch für den Drei-Tank-Versuchsstand eine App zum Einsatz, durch die sowohl Messwerte der aktuellen Füllstände angezeigt, als auch Sollwerte vorgegeben werden können. Außerdem ist es damit möglich, die Pumpen manuell anzusteuern. Eine Ansicht der Eingabefenster der App ist in Bild 6.16 zu sehen. Am Drei-Tank-Versuchsstand wurden im Rahmen dieser Arbeit die Funkprotokolle WirelessHART, Bluetooth und das MAC-Protokoll verwendet. Die App bzw. das Mobiltelefon, auf dem diese App betrieben wird, nutzt jedoch Bluetooth als Kommunikationsprotokoll zur Datenübermittlung mit dem Versuchsstand. Solange der Versuchsstand mit Bluetooth betrieben wird, kann sich das Mobiltelefon direkt mit dem Netzwerk des Versuchsstands verbinden. Nutzt eine Anlage jedoch das WirelessHART-Protokoll zur Übermittlung von Mess-, Konfigurations- und Diagnosedaten, so ist ein Protokollwandler zwischen den verschiedenen Netzwerkprotokollen zwingend erforderlich. Dies war auch in diesem Beispiel der Fall. Den Protokollwandler stellte in diesem Beispiel der Regelungsrechner dar, der mit einem Bluetooth-Modul ausgestattet ist und auf dem eine neu entwickelte Software betrieben wird, die die Bluetooth-Befehle aus Tabelle 3.4 mit der Struktur aus Bild 3.18 in äquivalente WirelessHART-Befehle gemäß der in Bild A.2 aus Anhang A.1.2 dargestellten Struktur und umgekehrt konvertiert. Die Topologie am Versuchsstand wurde bereits in Bild 5.22 gezeigt. Zusätzlich wird für die Übermittlung von Soll- und Steuerwerten eine Schnittstelle zu MATLAB/Simulink hergestellt. Die Vorteile der für den Drei-Tank-Versuchsstand verwendeten App sind identisch mit den Vorteilen der App für den Anlagenprüfstand.

## 6.6 Simulation von Systemen mit veränderlichen Totzeiten

Dieser Abschnitt zeigt die Simulation des um einen Arbeitspunkt linearisierten und mit der Schrittweite  $\Delta T$  diskretisierten Modells des Anlagenprüfstands aus Abschnitt 2.1. Die Übertragungszeit der Durchflussmesswerte ist variabel gestaltet. Die theoretischen Grundlagen der Modellierung



Bild 6.16: App für Diagnose und Steuerungsanwendungen [97]

wurden in Abschnitt 5.1.1 vorgestellt. Es wurden bei den vorliegenden Simulationen insbesondere die typischen Übertragungseigenschaften hinsichtlich der Totzeiten von den Netzwerkprotokollen WirelessHART, Bluetooth LE und des MAC-Protokolls betrachtet. Um eine möglichst vergleichbare Situation zu schaffen, werden für alle Protokolle die gleichen Übertragungstotzeiten verwendet. Es variiert hierbei jedoch in Abhängigkeit vom betrachteten Protokoll die Anzahl der erforderlichen Abtastschritte, um ein Modell der Übertragungstotzeit zu erzeugen. Wird beispielsweise WirelessHART mit einer Abtastung von  $\Delta T$  von 2 s verwendet, das im vorliegenden Fall eine Übertragungstotzeit der Messwerte von  $t_{T,max} = 4$  s haben soll, so muss ein Modell der Totzeit mindestens zwei Abtastschritte  $n_{\rm T}$  umfassen und somit zweiter Ordnung sein. Bei BLE führt dieselbe Totzeit bei einer Abtastung von  $\Delta T = 100 \,\mathrm{ms}$  bereits zu einem Modell 40-ter Ordnung und bei dem MAC-Protokoll mit einer Abtastung von 10 ms liegt insgesamt ein Totzeitmodell mit 400 Abtastschritten vor. Somit entstehen je nach verwendetem Protokoll im zeitdiskreten Totzeitmodelle nach den Gleichungen (5.21) und (5.22) Systeme hoher Ordnung. Über die geeignete Wahl des in Gleichung (5.19) dargestellten Ausgangsvektors ist es möglich, zwischen variierenden Totzeiten umzuschalten. In diesem Simulationsbeispiel kommt ein PI-Regler zum Einsatz, dessen Reglerverstärkungen  $K_{P,l_k}$  und  $K_{I,l_k}$  umso schwächer zu wählen sind, je größer die im System auftretende Totzeit ist. Um ein System möglichst schnell aber dennoch stabil regeln zu können, ist es notwendig, bei sich verändernden Totzeiten zwischen den Verstärkungen umzuschalten. Für den I-Anteil ist es genauso wie beim Gain-Scheduling-Regler erforderlich, bei jeder Umschaltung den gespeicherten Zustand auf die neuen Reglerverstärkungen anzupassen. Hierzu wird zunächst der I-Anteil in seine Differenzenform

$$x_{\mathrm{I}}(k+1) = \underbrace{A_{\mathrm{I},l_k}}_{1} \cdot x_{\mathrm{I}}(k) + \underbrace{B_{\mathrm{I},l_k}}_{1} \cdot e(k) + \Delta x_{\mathrm{init}}(k)$$
(6.1)

$$u_{\rm I}(k) = C_{{\rm I},l_k} \cdot x_{\rm I}(k) + D_{{\rm I},l_k} \cdot e(k)$$
(6.2)



Bild 6.17: Simulationsmodell für variable Übertragungstotzeiten



Bild 6.18: Zeitverzögerung im Rückführzweig eines Regelkreises (Szenario 1)

überführt. Bei jeder Veränderung der Totzeit  $l_k$  auf  $l_{k+1}$  Abtastschritten, sind für Gleichung (6.2) die passenden Matrizen  $A_{I,l_{k+1}}$ ,  $B_{I,l_{k+1}}$ ,  $C_{I,l_{k+1}}$  und  $D_{I,l_{k+1}}$  zu wählen. Es ist jedoch bei jeder Umschaltung im nächsten Abtastschritt k = k + 1 notwendig über

$$\Delta x_{\text{init}}(k) = \begin{cases} \frac{1}{C_{\text{I},l_k}} \cdot \left( u_{\text{I}}(k-1) - D_{\text{I},l_k} \cdot e(k-1) \right) - x_{\text{I}}(k) & \text{für } l_{k-1} \neq l_k, \\ 0 & \text{für } l_{k-1} = l_k, \end{cases}$$
(6.3)

den gespeicherten Zustand des Integrators vom Regler um  $\Delta x_{init}(k)$  zu korrigieren. Je größer die Totzeiten  $t_T$  sind, umso langsamer ist der zu verwendende Regler auszulegen. Dies gilt insbesondere für den *I*-Anteil des Reglers. Für das vorliegende Beispiel wurden die Reglerverstärkungen  $K_{I,l_k}$  und  $K_{P,l_k}$  durch Simulation ermittelt. Die Simulation wurde für das System mit der minimalen Totzeit ( $K_{I,min}, K_{P,min}$ ) und für dasselbe System mit der maximalen Totzeit ( $K_{I,max}, K_{P,max}$ ) bei der Netzwerkübertragung durchgeführt. Alle Regler, die sich zwischen der kleinsten und größten Totzeit befinden, wurden interpoliert und zusätzlich wurde der Regelkreis auf Stabilität überprüft. Der *I*-Anteil wurde mit den Gleichungen (6.1) und (6.2) beschrieben. Die in diesem Abschnitt verwendete Regelkreisstruktur für die totzeitbehaftete Simulation des Anlagenprüfstands ist dem Blockschaltbild aus Bild 6.17 zu entnehmen. Mit der soeben beschriebenen Struktur wurden zwei Szenarien umgesetzt. Das erste Szenario beinhaltete Totzeitschwankungen zwischen zwei und sechs Sekunden, die in Bild 6.18 dargestellt sind. Das zweite Szenario umfasst deutlich größere Totzeitschwankungen, die zwischen zwei und 24 Sekunden liegen. Der Verlauf der Totzeiten ist in



Bild 6.19: Simulation einer Druchflussregelung mit WHART, BLE, MAC (Szenario 1)



Bild 6.20: Zeitverzögerung im Rückführzweig eines Regelkreises (Szenario 2)

Bild 6.20 dargestellt. Diese Totzeitverläufe wurden auf die Rückführung des Durchflusses in der Simulation sowohl bei WirelessHART, Bluetooth Low Energy als auch für das MAC-Protokoll vorgegeben. Die aus den Szenarien resultierenden Ergebnisse sind den Bildern 6.19 und 6.21 zu entnehmen.

Wie in beiden Bildern zu sehen ist, funktioniert die Umschaltung der Totzeiten für alle Protokolle im geschlossenen Regelkreis. Je größer die Totzeiten sind, umso langsamer wird die Ausregelung des Durchflusses auf den vorgegebenen Sollwert. Dies gilt sowohl bei Totzeitmodellen niedriger Ordnung, wie sie für das WirelessHART-Protokoll erforderlich sind, als auch für Modelle hoher Ordnung, wie für das MAC-Protokoll. Unterschiede zwischen den einzelnen Verläufen resultieren aus der Wahl der Reglerverstärkungen  $K_{I,l_k}$  des *I*-Anteils und  $K_{P,l_k}$ , mit  $l_k \in 1, 2, ..., n_T$ .

Es ist bei den durchgeführten Simulationen zu beachten, dass sich die Totzeiten eines Systems nur langsam verändern dürfen. So sollte zu jedem Abtastschritt die Totzeit nur um den Zeitwert  $\Delta T$ 



Bild 6.21: Simulation einer Druchflussregelung mit WHART, BLE, MAC (Szenario 2)

einer Abtastung erhöht oder verkürzt werden, da sonst das vorliegende System zum Überschwingen neigt oder im schlimmsten Fall instabil werden könnte. Eine weitere Herangehensweise wäre, die Regler langsamer auszulegen, damit sie auch bei sprungartigen Veränderungen der Totzeiten über mehrere Abtastschritte hinweg ohne ein Überschwingen der Regelgröße betrieben werden können. Dies würde jedoch dazu führen, dass der Zeitbedarf zur Ausregelung der Regelgröße noch größer wird. Da bei Netzwerksystemen davon ausgegangen werden kann, dass sich Totzeiten nicht schlagartig verändern, soweit die Netzwerkkomponenten räumlich fest angeordnet sind, die Auslastung des Netzwerks geplant wurde und im Betrieb gleichmäßig ist, wurden in diesem Beispiel die Regler möglichst schnell hinsichtlich der Ausregelung der Regelgröße entworfen. Die Voraussetzung zum Betrieb der Regeleinrichtung ist jedoch, dass sich die Totzeiten zwischen den Abtastschritten k und k + 1 um maximal  $\Delta T$  verändern. Unter diesen Annahmen konnten die in diesem Abschnitt veranschaulichten Ergebnisse erzielt werden.

In diesem Kapitel wurden Simulationen, Hardware-in-the-Loop-Simulationen sowie Messungen von Durchflussregelungen am Beispiel des Anlagenprüfstands mittels der in Kapitel 5 vorgestellten Regelungsverfahren betrachtet. Die in Abschnitt 5.10 diskutierten Vor- und Nachteile der einzelnen Regelungsverfahren wurden in diesem Kapitel anhand von Simulationen und Messungen am Beispiel eines Anlagenprüfstands veranschaulicht. Weiterhin wurde die Messung einer Füllstandregelung für ein Drei-Tank-System vorgestellt, bei dem es sich um ein Mehrgrößensystem handelt, das drei Messeinrichtungen mit drahtloser Übermittlung der Messwerte umfasst. Weiterhin wurde die Modellbildung von variablen Übertragungstotzeiten anhand von Simulationen veranschaulicht. Im nächsten Kapitel werden die Ergebnisse der gesamten Arbeit zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen für den Einsatz von drahtloser Kommunikation im industriellen Umfeld gegeben.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden drahtlose Regelkonzepte untersucht, die zur Regelung von Systemen mit einer hohen Dynamik geeignet sind. Die Herausforderung bestand darin, dass die Übertragung von Messwerten mittels Funktechnologien realisiert wurde und die eingesetzten Übertragungsprotokolle im Hinblick auf die Dynamik der zu regelnden Systeme nur einen langen minimalen Übertragungsintervall zuließen. Zur Demonstration der Ergebnisse aller Untersuchungen dieser Arbeit wurden zwei Beispielsysteme ausgewählt. Dabei handelte es sich um einen Anlagenprüfstand mit einer hohen Dynamik und einem Drei-Tank-Versuchsstand mit einer langsamen Dynamik.

Zur Realisierung der drahtlosen Übertragungsstrecken der Regelkreise wurden Protokolle verwendet, die auf den Funkstandards IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 aufbauten. Bei den Protokollen handelte es sich um WirelessHART, Bluetooth und einer auf dem MAC-Layer basierenden Implementierung.

Insbesondere für den industriellen Einsatz spielte WirelessHART als Übertragungsprotokoll im geschlossenen Regelkreis im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit eine zentrale Rolle. Es stellte sich heraus, dass sein großer Nachteil ist, dass ausschließlich kommerzielle Produkte zur Verfügung stehen und diese ein geschlossenes System bildeten. Damit war es nicht möglich, Veränderungen am Kommunikationsverhalten durchzuführen. Selbst die zuverlässige und exakte Bereitstellung von Zeitstempeln gestaltete sich schwierig.

Als ein weiteres Übertragungsprotokoll für Regelkreise mit drahtlosen Übertragungsstrecken wurde Bluetooth näher betrachtet. Der große Vorteil bei den am Markt zur Verfügung stehenden Bluetooth-Modulen war, dass sie meist das Basisprotokoll zur Verfügung stellten und der Entwickler dafür verantwortlich ist, Dienste und Services zu entwickeln und zu implementieren. Dies ermöglicht einen großen Einfluss auf die Kommunikationsabläufe und -umsetzungen sowie in Grenzen auf die vom Funkmodul benötigte Energie zu nehmen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für Bluetooth funktionsfähige Dienste implementiert. Diese Implementierungen umfassten eine Mehrgeräte-Kommunikation inklusive einer Routing-Strategie sowie das Adressmanagement in einer Sterntopologie. Vergleichbare Softwarekomponenten für Bluetooth-Module, die für die Zielsetzung dieses Projektes genutzt werden konnten, standen nicht bei am Markt erhältlichen Bluetooth-Modulen zur Verfügung. Aufgrund der durchgeführten Implementierung ist der Betrieb von mehreren Netzwerkteilnehmern in der gleichen Netzwerkeinheit möglich, die untereinander kommunizieren können. Gleichzeitig konnten damit Funktionen zur Synchronisierung im Netzwerk integriert werden.

Um die Übertragungsintervalle in Funknetzwerken weiter zu reduzieren wurde auf einem Mikrocontroller eine stark vereinfachte Kommunikation basierend auf dem MAC-Layer des IEEE 802.15.4-Standards implementiert. Dadurch können Übertragungsintervalle einer minima-

len Länge von bis zu 5 ms erreicht werden. Dies stellt im Vergleich zu den minimal erreichbaren Übertragungsintervallen von WirelessHART oder Bluetooth eine enorme Verbesserung dar.

Außerdem wurde zur ganzheitlichen Betrachtung von Regelkreisen und des Übertragungsverhaltens von Mess- und Stellgrößen, die drahtlose Übertragungswege nutzen, eine Simulationsumgebung erstellt. Denn anders als bei der reinen Betrachtung des Netzwerkverhaltens, der Übertragungsraten, des Zusammenspiels einzelner Netzwerkkomponenten und der Beeinflussung unterschiedlicher Funknetzwerke untereinander ist für regelungstechnische Anwendungen das Zeitverhalten und die Zeitabstimmung zwischen Regler und Sensoren mit dem Zeitverhalten des Netzwerks eine sehr wichtige Voraussetzung zum optimalen Betrieb eines Regelkreises.

Da kein geeignetes Konzept zur Simulation von dynamischen Systemen in Kombination mit Netzwerkprotokollen zur Verfügung stand, wurde aus bestehenden und frei zur Verfügung stehenden Softwarekomponenten eine Simulationsumgebung geschaffen. Für die Simulationsumgebung wurde mit ns-2 ein älterer Simulator gewählt, da die zur Verfügung stehenden Softwarekomponenten auf diesen abgestimmt waren und es ein unverhältnismäßig hoher Aufwand dargestellt hätte, sie in Simulationsumgebungen wie den Nachfolgesimulator ns-3 oder OMNeT++ zu migrieren. Die realisierte Simulationsumgebung umfasst derzeit ausschließlich das Übertragungsprotokoll WirelessHART. Andere Übertragungsprotokolle, wie Bluetooth, WLAN, ISA100.11a, müssten zuerst noch implementiert und getestet werden.

Im Verlauf dieser Arbeit wurden wiederholt unterschiedliche Regelungsverfahren am Beispiel eines Anlagenprüfstands mit verschiedenen Übertragungsprotokollen getestet. Da jeder Test eines Reglers am Versuchsstand einen großen zeitlichen Aufwand darstellt, wurde eine Hardware-inthe-Loop-Methodik entwickelt und aufgebaut, mit der das zu regelnde dynamische System in MATLAB nachgebildet werden kann und nur das Netzwerk physikalisch existiert. Dadurch ist es möglich, auch ohne reine Simulationsumgebung das Verhalten von Übertragungsnetzwerken und deren Einfluss auf ein zu regelndes dynamisches System zu untersuchen. Untersuchungen mit dieser Hardware-in-the-Loop-Umgebung lassen sich mit beliebigen Netzwerk-Protokollen und unabhängig von der örtlichen Platzierung des zu untersuchenden dynamischen Systems durchführen.

Insgesamt wurden vier verschiedene Regelungsmethoden im Zusammenhang mit der drahtlosen Übertragung von Messwerten untersucht. Dabei wurde ein Gain-Scheduling-Regler-Konzept, ein Konzept von Yokogawa, ein Predictive-Outage-Compensator (POC) sowie ein Multiraten-Regelkonzept betrachtet. Der theoretische Entwurf und die Besonderheiten beim Einsatz in Netzwerken wurden beschrieben und sie wurden am Beispiel eines Anlagenprüfstands verifiziert. Abschließend fand ein Vergleich der verschiedenen Regelkonzepte statt. Eine Voraussetzung war, dass die Regler auch bei Paketausfällen Systeme sicher ausregeln können.

Es wurden in dieser Arbeit die Unterschiede sowie deren Vor- und Nachteile zwischen zentralen und lokalen Regelkonzepten vorgestellt. Eine Erkenntnis daraus war, dass sich insbesondere für die drahtlose Übertragung von Messwerten und Stellgrößen die lokalen Regelkonzepte eignen, da dabei die gemessenen Werte nicht zu einer in vielen Fällen weit entfernten Leitwarte übermittelt werden müssen, um dann von einem zentralen Regler verarbeitet zu werden. Eine Übertragung zu einer zentralen Stelle erhöht die Totzeiten und es werden Netzwerkstrukturen benötigt, bei denen Zwischenstationen zum Routen der Daten existieren. Der Grund dafür ist, dass bei Funkmodulen die Reichweiten in Abhängigkeit der Sendeleistung und der eingesetzten Antennen eingeschränkt ist.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass sich durch Nutzung von lokalen Reglern die Auslastung eines Netzwerkes verringert, da es bei geeigneter Implementierung des Netzwerkmanagements keine Engstellen im Netzwerk geben muss. Müssen alle Daten über einen zentralen Knoten übermittelt werden, wie dies beispielsweise für WirelessHART aufgrund dessen Gateways gezeigt wurde, so wird dadurch die Leistungsfähigkeit des Netzwerks stark eingeschränkt. Die Vermeidung von Engstellen in einem Netzwerk hängt ausschließlich von der Leistungsfähigkeit des Netzwerkmanagements und der dort eingesetzten Planungsalgorithmen ab. Um eine Regelung bestmöglich umzusetzen, kommt der Synchronisation zwischen Reglern, Netzwerk und Sensoren sowie der Kenntnis von Übertragungstotzeiten der Messwerte, die von verschiedenen Messstellen aus übermittelt werden, eine sehr große Bedeutung zu. Hierzu wurde ein Lösungskonzept vorgestellt, welches teilweise im Rahmen dieser Arbeit innerhalb eines Bluetooth-Netzwerkes praktisch umgesetzt wurde.

Insgesamt wiesen die modellbasierten Verfahren wie der Predictive-Outage-Compensator (POC) und der Multiratenbeobachter klare Vorteile auf, da sie aufgrund der Modellkenntnis des zu regelnden Systems zu jedem Zeitpunkt einen Ersatzwert für die ausgefallenen Messgrößen zur Verfügung stellen konnten. Dies wird jedoch durch einen höheren Aufwand bei der Modellbildung des zu regelnden, dynamischen Systems erkauft. Je genauer die Modelle sind, desto kleiner werden die Fehler, die bei der Regelung des Systems auftreten. Dies gilt auch dann, wenn über einen größeren Zeitraum keine Pakete von einer oder mehreren Messstellen eintreffen. Im Gegensatz zum POC besitzt der Multiraten-Beobachter den großen Vorteil, dass er ein System deutlich performanter ausregeln kann, falls ihm Messwerte mit unterschiedlichen Abtastraten zur Verfügung stehen. Die schnellste Abtastrate hat auf die erreichbare Schnelligkeit des Ausregelverhaltens eine große Wirkung.

Einen deutlich niedrigeren Realisierungs- und Umsetzungsaufwand dagegen erfordern der Gain-Scheduling-Regler, da bei ihm kein Modell im Regelkreis betrieben werden muss. Allerdings muss der Gain-Scheduling-Regler langsam genug entworfen werden, damit auch dann noch geregelt werden kann, wenn es zu vereinzelten Paketausfällen kommt. Treten mehrere Paketausfälle hintereinander auf, so ist ein Regelbetrieb nicht möglich.

Zusätzlich wurde ein bestehendes Konzept von Yokogawa implementiert und bewertet. Grundsätzlich ist die Funktion des Konzeptes gegeben. Es nutzt jedoch einen zentralen Prozessregler und übermittelt nicht nur den Messwert, sondern auch die Stellgröße drahtlos an einen Aktor. Der Ausfall der Stellgröße wird erkannt, falls vom Aktor keine Acknowledgement (ACK) zurückkommt. In diesem Fall wird der Sollwert angepasst, um zu verhindern, dass der im Regelkonzept eingesetzte *I*-Anteil die Regelabweichung weiter aufintegriert. An dieser Stelle kann es jedoch vorkommen, dass die Stellgröße angekommen, aber das drahtlos versandte ACK ausgefallen ist. Dies ist eine identifizierte Schwachstelle an der Konzeption des Verfahrens. Generell haben sich beobachterbasierte Regelkonzepte für Regelkreise mit drahtlosen Übertragungsstrecken in den vorgenommenen Untersuchungen am geeignetsten erwiesen. Für Regelkreise, welche Messstellen nutzen, deren Werte ausschließlich mit denselben Abtastintervallen abgerufen werden können, eignet sich das Regelkonzept mit POC zur Kompensation von Paketausfällen. Stehen Messgrößen zur Verfügung, welche mit unterschiedlichen Abtastraten abgefragt werden können, so ist es sinnvoller ein Multiratenkonzept zu verwenden, da hierdurch die Ausregelzeit und somit die Performanz deutlich erhöht werden kann.

Drahtlose Kommunikation bildet eine Technik mit Zukunft, insbesondere im Hinblick auf die Industrie 4.0 und der damit verbundenen Zunahme an Datenströmen in industriellen Anlagen. Der derzeitige Trend ist, dass drahtlose Kommunikationstechniken hauptsächlich zur Diagnose oder zur Konfiguration verwendet werden. In vielen Fällen kommen einfache Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zum Einsatz, beispielsweise bei der Konfiguration von Sensoren, die an räumlich ungünstigen Positionen von Fertigungsanlagen installiert sind. Im Einsatz von industriellen Regelkreisen sind drahtlose Übertragungsstrecken heute noch sehr selten zu sehen. Doch auch dies wird sich zukünftig ändern, wenn sich drahtlose Kommunikationstechniken hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, ihrer Sicherheit, ihrer Koexistenz mit anderen Funknetzwerken und -technologien sowie ihrer Robustheit bewährt haben.

Durch diese Arbeit wurde gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, Regelkreise mit drahtlosen Rückführungen zu betreiben. Es hat sich jedoch auch herausgestellt, dass heutige Funkprotokolle sowohl hinsichtlich der zeitlichen Synchronisierung als auch der minimalen Übertragungsintervallen je nach Anwendungszweck nur bedingt für den Einsatz im Regelkreis geeignet sind. Durch die Entwicklung neuer oder die Optimierung bestehender Protokolle ist es jedoch möglich, dies deutlich zu verbessern und die Funkübertragung noch attraktiver zu machen. Dies kommt insbesondere Systemen zugute, die eine hohe Dynamik besitzen.

Aus diesem Grund wurde ein Ansatz zur Realisierung der Synchronisation zwischen den einzelnen Komponenten wie der Regeleinrichtung, den Sensoren und den Funkmodulen mit ihren Übertragungsprotokollen auf theoretischer Basis entwickelt und vorgestellt. Zusätzlich wurde ein Konzept für den Betrieb mehrerer Regelkreise in einem Netzwerk bei möglichst sparsamen Ressourceneinsatz gezeigt. Durch eine intelligente, regelkreisübergreifende Planung von Abtastzeitpunkten können eine gleichmäßigere Netzwerkauslastung erreicht und somit Übertragungstotzeiten reduziert werden. Im Folgenden werden einige Punkte genannt, welche in zukünftigen Arbeiten aufgegriffen werden können und weitere interessante Forschungsgebiete darstellen.

Sowohl die Migration des Übertragungsprotokolls WirelessHART als auch die MATLAB-Anbindung zur Simulation von dynamischen Systemen mit Funkübertragungsstrecken in moderneren und einfacher zu bedienenden Netzwerksimulatoren wäre eine wichtige Aufgabenstellung für zukünftige Arbeiten, damit in Zukunft die Entwicklung von Netzwerkanwendungen in Kombination mit Regeleinrichtungen besser aufeinander abgestimmt werden können. Erkenntnisse bezüglich der Synchronisierung von Reglern und Sensoren mit Netzwerken sollten bei der zukünftigen Spezifizierung von Funk- und Netzwerkprotokollen besser berücksichtigt und bereits auf Protokollbasis entsprechende Schnittstellen bereitgestellt werden, auf die von Regeleinrichtungen zugegriffen werden kann. Außerdem sollten Netzwerkprotokolle auf Anfrage von übergeordneten Anwendungen, wie Regeleinrichtungen, Informationen zu aktuellen Übertragungstotzeiten für angefragte Übertragungspfade zur Verfügung stellen. Erst dann können Regeleinrichtungen entworfen werden, die im Einklang mit verschiedenen Netzwerktechnologien ihre volle Leistungsfähigkeit zur Verfügung stellen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, welcher noch vieler Bemühungen bedarf, ist die Sicherheit von drahtlosen Übertragungssystemen. Während bei kabelgebundenen Systemen, die autark ohne Verbindung zur Außenwelt betrieben werden, kein Zugriff von außen möglich ist, außer ein Angreifer befindet sich innerhalb eines Kommunikationssystems und hat physikalischen Zugriff auf die Kommunikationsinfrastruktur, so ist bei drahtlosen Kommunikationssystemen keine Beschränkung der Signale auf Übertragungsleitungen mehr gegeben. Die Funkwellen befinden sich entsprechend der Sendeleistung vom Sender in einem bestimmten Radius um den Sender herum und können somit von Dritten mitgelesen werden, wenn keine Sicherheitsmechanismen, wie Keys, zur Absicherung des Zugriffs oder Verschlüsselungsverfahren zur sicheren Übertragung berücksichtigt und ausgeschlossen werden muss, ist die Platzierung von Störsendern, welche die Kommunikation in einem drahtlosen Kommunikationsnetzwerk stark beeinflussen und bis hin zum völligen Erliegen bringen können. Dies würde einen Totalausfall der Kommunikation bedeuten und Anlagen könnten in dieser Situation nur noch modellbasiert gesteuert werden.

Insgesamt zeigte diese Arbeit auch anhand praktischer Beispiele und Einsatzmöglichkeiten, dass Regelungen über drahtlose Systeme generell möglich sind und trotz einiger Nachteile ein großes Potential besitzen, das heute noch nicht vollständig erkundet und ausgeschöpft ist. Besonders die Digitalisierung von Produktionsprozessen, IoT-Anwendungen sowie kontinuierliche Verbesserungsprozesse heutiger Technologien durch Vorhaben, wie dies unter Begriffen wie Industrie 4.0 geschieht, aber auch die Bestrebungen nach mehr Ressourceneinsparung, Komfort, Vernetzung, Flexibilität und Modularisierung von Prozessen, werden in den kommenden Jahren Entwicklungstreiber auf diesem Gebiet sein.

## Anhang

## A.1 Zusatzinformationen zu Standards und Netzwerkprotokollen

In diesem Kapitel sind Zusatzinformationen zu Funkstandards und Netzwerkprotokollen sowie ergänzende Informationen zu durchgeführten Untersuchungen zu finden, die im Hauptteil dieser Arbeit nicht notwendig sind, aber zum tiefer gehenden Verständnis und zur Rekonstruktion von durchgeführten Simulationen und Messungen dennoch hilfreich sind.

#### A.1.1 Topologieanordnung von Knoten eines WirelessHART-Netzwerks

In Abschnitt 3.7.1 wurde durch Bild 3.10 ein WirelessHART-Netzwerk vorgestellt. Auf dieses Netzwerk wird im Laufe der Kapitel mehrmals zurückgegriffen. Da es zur Bildung der Topologie notwendig ist, die Koordinaten der einzelnen Knoten zu kennen, gibt nachfolgende Tabelle die räumliche Anordnung der Knoten in der Einheit m in x- und y-Richtung an. Als Höhe der Knoten wird einheitlich 0 m angenommen. Der Verlauf der x-Achse ist horizontal, während die Anordnung der y-Achse vertikal ist.

Um die Übertragungsvorgänge im Netzwerk durchführen zu können, bedarf es wie in Kapitel 3 beschrieben Netzwerkgraphen sowie geeigneter Routing-Algorithmen. Für das für Simulations-

Nr.:	Funktion:	Kurzbezeichnung	Math. Bezeichnung:	X Koord.:	Y Koord.:
Knoten 0	Gateway	GW	$v_{ m GW}$	45,0 m	20,0 m
Knoten 1	Access Point	AP1	$v_{ m AP1}$	41,4 m	23,4 m
Knoten 2	Access Point	AP2	$v_{ m AP2}$	41,4 m	17,9 m
Knoten 3	Feldgerät	D1	$v_1$	37,7 m	11,7 m
Knoten 4	Feldgerät	D2	$v_2$	26,9 m	22,4 m
Knoten 5	Feldgerät	D3	$v_3$	30,0 m	14,2 m
Knoten 6	Feldgerät	D4	$v_4$	20,8 m	14,7 m
Knoten 7	Feldgerät	D5	$v_5$	13,6 m	19,8 m
Knoten 8	Feldgerät	D6	$v_6$	33,4 m	27,0 m
Knoten 9	Feldgerät	D7	$v_7$	6,9 m	15,4 m
Knoten 10	Feldgerät	D8	$v_8$	21,0 m	24,8 m
Knoten 11	Feldgerät	D9	$v_9$	15,7 m	10,6 m
Knoten 12	Feldgerät	D10	$v_{10}$	27,0 m	29,0 m

Tabelle A.1: Räumliche Anordnung der WirelessHART-Knoten aus Bild 3.10

Entfernung:	Faktor:		
5 m	7,69113e-06		
9 m	2,37381e-06		
10 m	1,92278e-06		
11 m	1,58908e-06		
12 m	1,33527e-06		
13 m	1,13774e-06		
14 m	9,81011e-07		
15 m	8,54570e-07		
16 m	7,51087e-07		
20 m	4,80696e-07		
25 m	3,07645e-07		
30 m	2,13643e-07		
35 m	1,56962e-07		
40 m	1,20174e-07		

 Tabelle A.2: Faktoren zur Funkwellenausbreitung aus dem Zweiwegemodell der Ausbreitung

zwecke verwendete Beispielnetzwerk aus Bild 3.10 sind in Bild A.1 aus Vollständigkeitsgründen alle in Bild 3.10 nicht gezeigten und durch den Netzwerksimulator generierten Netzwerkgraphen dargestellt. Hierbei handelt es sich um alle Downlink-Graphen. Für diese Topologie wurden in Kapitel 4.3 Simulationen von Paketübertragungen durchgeführt und dabei hatte sich ergeben, dass die Knoten  $v_{AP1}$ ,  $v_2$  und  $v_3$  besonders stark ausgelastet sind. Diese Erkenntnis wird auch durch die Downlink-Graphen in Bild A.1 gestützt. Über die Knoten  $v_{AP1}$ ,  $v_2$  und  $v_3$  werden die meisten Downlink-Kommunikationen geleitet. Anhand der Downlink-Graphen ist ebenfalls zu erkennen, dass die Downlink-Graphen redundant geplant werden. Dies bedeutet, dass von jedem für den Graphen verwendeten Knoten immer zwei Kanten in Richtung des Zielknotens abgehen. Somit sind beim Ausfall eines Knotens ausreichend Möglichkeiten vorhanden, mindestens jedes zweite Paket vom Gateway zum Empfangsknoten zu übermitteln. Sobald über die Health-Reports der einzelnen Knoten Probleme durch den Netzwerkmanager erkannt werden und diese durch Rekonfiguration des Netzwerks beseitigt sind, funktioniert die Übertragung wieder fehlerfrei. Die Knoten  $v_{AP1}$  und  $v_{AP2}$  sind über Kabel mit dem Gateway verbunden bzw. im Gateway integriert, so dass es unter Annahme, dass diese Verbindung immer einwandfrei funktioniert, keiner Redundanz zwischen  $v_{\rm GW}$  und  $v_{\rm AP1}$  bzw.  $v_{\rm AP2}$  bedarf.

Der Simulation der Paketübertragung im Funknetzwerk liegt das Zweiwegemodell zur Ausbreitung von Funkwellen zugrunde. Hierfür werden im Simulator die in Tabelle A.2 dargestellten Werte in Abhängigkeit von der Übertragungsentfernung genutzt. Im Folgenden wird in Bild A.2 die Struktur eines WirelessHART Paketes angegeben.



Bild A.1: Darstellung aller Netzwerkgraphen des Beispielnetzwerkes aus Bild 3.10

#### A.1.2 Befehlsstruktur eines WirelessHART-Kommandos

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über die Struktur der einzelnen Datenfelder eines Wireless-HART Paketes. Die Darstellung ist nach den einzelnen Layern des OSI-Modells aus Abschnitt 3.4 unterteilt. Die linke Spalte gibt an, wie viel Bytes ein Feld umfassen kann. Sind mehrere Zahlen angegeben, wie z.B. bei "Source" mit "2/8", so können die Längen der entsprechenden Feldern je nach Konfiguration der Übertragung variieren. Dieses als Beispiel angegebene Feld kann die Größe von 2 Bytes oder 8 Bytes umfassen. Der Physical- und der Data-Link-Layer wurden in Abschnitt 3.6.3 bereits ausführlich beschrieben.

No. Bytes	Description			
	Physical Layer			
4	→Preamble			
1	→Delimiter			
1	→Byte Count			
	Data-Link-Layer			
1	→0x41			
1	→Address Specifier			
1	→Sequence Number			
2	→Network ID			
2/8	→Destination			
2/8	→Source			
1	→DLPDU Specifier			
	Network Layer			
1	→Control			
1	→TTL			
2	→ASN snippet			
2	→Graph ID			
2/8	→Destination			
2/8	→Source			
2/4/6/8/10	→(Optional) Proxy/Source Routing			
	Security			
1	→Security Control			
1/4	→Counter			
4	→MIC			
	Transport Layer			
1	→Transport Control			
1	→Device Status			
1	→Extended Device Status			
	Application Layer			
2	→Command			
1	→Byte Count			
	→Data			
1	→ MIC			
1	→Check Byte			

Bild A.2: Struktur eines WirelessHART PDUs

#### Neuerungen durch Bluetooth 5.0

Durch Bluetooth 5.0 wurden einige Neuerungen eingeführt. Hierzu zählt eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit von bis zu 2 Mbits s<sup>-1</sup>. Dadurch wird es im Vergleich zu Bluetooth 4.x möglich, identische Datenpakete bei gleicher Sendeleistung energiesparsamer zu übertragen, da bei Nutzung von Bluetooth 5.0 Sender und Empfänger ihre Sende- bzw. Empfangsmodule eine kürzere Zeit lang eingeschaltet lassen müssen. Es werden Energieeinsparungen zwischen 15 % und 50 % genannt. Weiterhin wurde durch Bluetooth 5.0 die Größe von Advertising-Nachrichten erhöht. Diese können nun eine Länge von bis zu 254 Bytes besitzen im Gegensatz zu 30 Bytes in Bluetooth Version 4.0. Bei Bluetooth 4.0 standen genau drei Kanäle (Kanal 38, 39 und 40) für Advertising zur Verfügung. Diese Kanäle werden durch Bluetooth 5.0 als primäre Advertising-Kanäle bezeichnet und die Nachrichtengröße auf diesen Kanälen bleibt weiterhin auf 30 Bytes beschränkt, um weiterhin einen ausreichend schnellen Verbindungsaufbau bei neuen Netzwerkteilnehmern zu gewährleisten. Neu ist jedoch, dass nun alle anderen existierenden Kanäle ebenfalls für Advertising-Zwecke genutzt werden können. Diese werden als sekundäre Advertising-Kanäle bezeichnet und unterstützen Advertising-Nachrichten mit einer Länge von bis zu 254 Bytes. Außerdem wurde durch Bluetooth 5.0 das minimale Advertising-Intervall auf 20 ms reduziert. Die Paketlänge einer Bluetooth-Nachricht kann nun zwischen 0 und 257 Bytes groß sein. Dies entspricht Übertragungszeiten von 80 µs bis 2,12 ms.

#### Bluetooth-Mesh

Ein weiterer wichtiger Schritt zur Sicherung der Konkurrenzfähigkeit von Bluetooth gegenüber den Protokollen WirelessHART, ISA 100.11a und ZigBee, ist die für Bluetooth im Juli 2017 veröffentlichte Bluetooth-Mesh Spezifikation. Bluetooth-Mesh ist zunächst unabhängig von Bluetooth 4.0 oder Bluetooth 5.0. Es nutzt vielmehr die Bluetooth Low Energy Spezifikationen als Basis auf der Bitübertragungs- und Sicherungsschicht.

Dieser Abschnitt verschafft einen Überblick, über die wichtigsten Eigenschaften von Bluetooth-Mesh. Auf der rechten Seite von Bild A.3 ist eine beispielhafte Topologie eines Bluetooth-Mesh Netzwerks dargestellt. Insgesamt können einem einzelnen Bluetooth-Mesh Netzwerke bis zu 32.767 Teilnehmer angehören. In jedem Paket können bis zu 12 Bytes Nutzdaten übertragen werden. Durch Segmentierung können Nachrichtenlängen von bis zu 384 Bytes erreicht werden. Es werden sowohl Unicast-, Multicast- als auch Broadcast-Nachrichten unterstützt. Die Übertragung wird in der aktuellen Spezifikation mit einem Flooding-Verfahren durchgeführt. Dieses Verfahren wird etwas später anhand des in Bild A.3 dargestellten Beispielnetzwerks vorgestellt.

Ein Bluetooth-Mesh Netzwerk besteht aus verschiedenen Komponenten, die eine Mischung aus vermaschtem Netzwerk und einer Baumtopologie aufspannen (siehe auch Bild 3.2f). In Bild A.3 sind die einzelnen Netzwerkteilnehmer farblich gekennzeichnet und jede Farbe steht für spezielle Zusatzfunktionen eines Netzwerkgerätes. Grundlegend ist, das jedes der dargestellten Geräte



Bild A.3: Topologiebeispiel von Bluetoth-Mesh

Netzwerkknoten sind. Die in hellblau dargestellten Knoten sind Knoten ohne spezielle Funktionen. Alle Knoten, die in roter Farbe angezeigt werden, besitzen eine Routing Eigenschaft. Knoten die mit grün eingefärbt sind, sind Low-Energy-Knoten. Das bedeutet, dass sie nur in spezifischen und kurzen Intervallen kommunizieren können. Weiterhin ist in der Darstellung aus Bild A.3 ein in orange eingefärbter Knoten vorhanden, der die Funktion eines Freundes besitzt. Freundknoten besitzen Verbindungen zu Low-Energy-Knoten. Weil Low-Energy-Knoten nur kurze Zeiträume aktiv sind, muss ein Knoten mit Freundschaftsfunktion für die Low-Energy-Knoten bestimmte Nachrichten Zwischenpuffern.

Da nur Routing Knoten Nachrichten eines sendenden Knotens weiterleiten können, muss jeder Knoten des Netzwerks mindestens eine Verbindung zu einem Knoten mit Routing-Eigenschaft besitzen. Zu Advertising-Zwecken kann jede beliebige Verbindung im Netzwerk genutzt werden. Um den Verbindungsaufbau neuer Knoten zu managen ist auch ein Knoten mit Gateway-Funktion in jedem Bluetooth-Mesh Netzwerk vorhanden. In Bild A.4 wird der Ablauf für die Übertragung einer Nachricht mit dem Flooding-Verfahren vorgestellt und veranschaulicht. Hierzu wird ein Knoten als Sender gewählt, der ein Datenpaket an einen Empfangsknoten senden soll. Im vorliegenden Beispiel handelt es sich bei dem Empfänger um einen Knoten der Bluetooth-Low-Energy als Übertragungsprotokoll nutzt. Alle für das Beispiel relevanten Symbole sind in Bild A.4a beschrieben. Zunächst sendet der Sende-Knoten, wie in Bild A.4b dargestellt, seine Nachricht an alle für ihn erreichbaren Knoten des Netzwerks. Jeder Knoten der seine Nachricht empfängt, prüft, ob die Nachricht für ihn bestimmt ist. Ist dies nicht der Fall, so wird die Nachricht von normalen Knoten verworfen. Die Knoten mit Routing-Funktion akzeptieren die Nachricht, wenn sie noch nicht aufgrund eines vorherigen Übertragungsschritts in ihrem Cache vorhanden ist und legen sie in ihrem Cache ab. Die im Cache abgelegte Nachricht ist in Bild A.4b und allen weiteren Darstellungen anhand des kleinen schwarzen Rechtecks auf der rechten Seite eines jeden Knotens mit Routing-Eigenschaft zu erkennen. Jeder Knoten, der die Nachricht akzeptiert, hat in diesem Bild einen grünen Haken und jeder, der die Nachricht verwirft ein rotes Kreuz.



Bild A.4: Beispielübertragung mit einem Flooding-Verfahren in Bluetooth-Mesh

Im zweiten Übertragungsschritt leitet gemäß Bild A.4c der Routing-Knoten, welcher zu sendende Daten in seinem Cache hat und als nächstes senden soll, seine Nachricht, an alle ihm erreichbaren Knoten weiter. Im dargestellten Beispiel ist es der obere Routing Knoten auf der linken Seite der Netzwerktopologie. Alle Knoten für die die Nachricht nicht bestimmt ist und die keine Routing-Eigenschaft besitzen, verwerfen sie. Dies ist durch rote Kreuze nahe der Knoten gekennzeichnet. Der untere Routing-Knoten auf der linken Seite von Bild A.4c erkennt, dass er die Nachricht bereits im Geräte-Cache hat und verwirft die neu ankommende Nachricht (rotes Kreuz). Der Routing-Knoten auf der rechten Seite von Bild A.4c kennt die Nachricht noch nicht und legt sie somit in seinem Cache ab (schwarzes Rechteck). Alle Routing-Knoten halten die Nachricht einen begrenzten Zeitraum im Cache vor. Damit soll vermieden werden, das Knoten die gleiche Nachricht mehrmals weiterleiten.

Daraufhin sendet in Übertragungsschritt 3, wie in Bild A.4d dargestellt, der auf der linken Seite, unten befindliche Routing-Knoten die aus seinem Cache zu sendende Nachricht, an alle für ihn erreichbare Knoten. Keiner der Knoten, außer der in orange dargestellte Knoten mit Freundschaftsfunktion nimmt die Nachricht an. Der Knoten mit Freundschaftsfunktion erkennt, dass die Nachricht für einen ihm angehörenden Low-Energy-Knoten bestimmt ist und puffert sie somit in seinem Cache.

Zwischenzeitlich, in Übertragungsschritt 4, leitet der in Bild A.4e auf der rechten Seite befindliche Routing-Knoten die Nachricht an alle ihm bekannten Knoten weiter. Keiner der Knoten nimmt die Nachricht an. Alle in der Netzwerktopologie befindlichen Routing-Knoten haben die Nachricht bereits in ihrem Cache und erkennen dies.

Nach einiger Zeit, auch Verbindungsintervall genannt, wachen die Low-Energy-Knoten aus ihrem Schlaf-Modus auf und Fragen, wie in Bild A.4f in Übertragungsschritt 5 dargestellt, bei dem Knoten mit Freundschaftsfunktion nach neuen Daten an, dem sie zugeordnet sind. Jeder Low-Energy Knoten kann nur einem Freundschaftsknoten zugeordnet sein. Erhält der Knoten mit Freundschaftsfunktion die Anfrage der Low-Energy Knoten und es befinden sich für einen oder mehrere Low-Energy Knoten bestimmte Daten in seinem Chache, so sendet er die Nachrichten schließlich in Übertragungsschritt 7, wie in Bild A.4h dargestellt, an den entsprechenden Zielknoten weiter. Dieser erkennt, dass die Daten für ihn bestimmt sind und nimmt sie schließlich an. Nach Ablauf einer festgelegten Zeit werden schließlich die Caches der Routing-Knoten sowie Knoten mit Freundschaftseigenschaft geleert.

Dieses einfache Beispiel soll die Arbeitsweise von Bluetooth-Mesh veranschaulichen. Bluetooth-Mesh besitzt keine Routing-Funktion, die es ermöglicht Daten gerichtet an ihr Ziel zu bringen. Eine Nachricht breitet sich somit durch das gesamte Netzwerk aus, soweit der Wert ihres TTL-Felds nicht zu 0 wird.

In Bild A.5 ist der Aufbau des Bluetooth-Mesh-Stacks zu sehen. Er orientiert sich am OSI-Modell. Die Bitübertragungsschicht bildet die Bluetooth Low Energy Spezifikation. Darauf baut schließlich die Bluetooth-Mesh-Spezifikation auf. Diese setzt sich aus der Träger Schicht (Sicherungsschicht), der Netzwerk Schicht, der unteren und oberen Transport Schicht, der Verbindungsschicht, der Basis Modellschicht (Darstellungsschicht) und der Modellschicht (Anwendungsschicht) zusammen. Die Segmentierung von Paketen wird von der unteren Transportschicht durchgeführt. Die Aufgabe des Routings obliegt der Netzwerk Schicht. Wichtig ist zu erwähnen, dass mehrere Möglichkeiten existierten, um Daten zu verschlüsseln. Der Netzwerkschlüssel gilt für das gesamte Netzwerk. Geräteschlüssel können sich eine Gruppe von Geräten Teilen. Einzelne Anwendungen auf verschiedenen Geräten, die miteinander kommunizieren können sich den Anwendungsdaten Schlüssel teilen. Jedes Gerät kann mehrere, voneinander unabhängige Anwendun-



Bild A.5: Stack Aufbau von BLE-Mesh

gen ausführen, die jeweils einen eigenen Schlüssel nutzen. So kann ein Knoten einer Gruppe für Regelungsaufgaben und einer Gruppe für Diagnoseaufgaben angehören, die jeweils einen voneinander verschiedenen Schlüssel besitzen. Durch die neue Mesh-Spezifikation nähert sich Bluetooth den Protokollen WirelessHART, ISA100.11a und ZigBee an.

Bluetooth-Mesh verwendet heute das Verfahren Controlled flooding zur Nachrichtenübermittelung. In Zukunft ist jedoch eine Erweiterung von Bluetooth-Mesh geplant, durch die auch ein Routing im Mesh-Netzwerk ermöglicht werden soll. Die nächsten Mesh-Spezifikationen für Bluetooth sind für 2018 mit Bluetooth-Mesh 1.1 und 2019 mit der Bluetooth-Mesh Spezifikation 2.0 geplant.

## A.1.4 Kommando Strukur der Bluetooth Implementierung

In diesem Abschnitt werden die in dieser Arbeit für BLE eingeführten Datenstrukturen der einzelnen Kommandos veranschaulicht. Dabei handelt es sich um die Daten, welche in die Paketstruktur aus Bild 3.18 in Byte 3 bis Byte 19 gepackt werden. Die Aufgaben der einzelnen Befehle wurden bereits in Tabelle 3.4 aus Abschnitt 3.7.2 beschrieben. Außer Kommando 999 besteht jedes der angegebenen Kommandos aus einem Request (Anfrage) und einem Response (Antwort) Teil.

#### Kommando Process Value (3)



\* PDU-Feld der Länge ist nur bei Sequenz 1 vorhanden! (Seq. Num. = 1)



#### Kommando Set Burst (103)



\* PDU-Feld der Länge ist nur bei Sequenz 1 vorhanden! (Seq. Num. = 1)

#### Bild A.7: Kommando 103 zum festlegen des Burst-Intervalls eines Gerätes

#### Kommando Set Device Name (104)



\* PDU-Feld der Länge ist nur bei Sequenz 1 vorhanden! (Seq. Num. = 1)


#### Kommando Read Device Name (105)



\* PDU-Feld der Länge ist nur bei Sequenz 1 vorhanden! (Seq. Num. = 1)



#### Kommando Set Value (122)



\* PDU-Feld der Länge ist nur bei Sequenz 1 vorhanden! (Seq. Num. = 1)

#### Bild A.10: Kommando 122 zur Vorgabe eines Sollwertes

#### Kommando Round Trip Test (999)

#### Request:



#### Bild A.11: Kommando 999 zur Durchführung von Paketlauftests



Bild B.1: Beispiel für mehrere Regelkreise in einem Funknetzwerk

## B.1 Scheduling der Übertragung in Funknetzwerken mit mehreren Regelkreisen

In diesem Abschnitt werden die Algorithmen 1 und 2 aus Abschnitt 5.4 anhand eines Beispiels veranschaulicht. Gegeben sei das in Bild B.1 angegebene Netzwerk, das von insgesamt 11 Regelkreisen genutzt wird. Die Bezeichnung der einem Regelkreis angehörenden Knoten erfolgt gemäß der Notation aus Abschnitt 5.4. Das Beispielnetzwerk besteht aus ingesamt 21 Knoten mit den Bezeichnungen  $v_j$  mit  $j \in 1, 2, ..., 21$ . Zusätzlich sind an jeden Knoten noch die Zugehörigkeiten zu den verschiedenen Regelkreisen durch Bezeichnungen  $v_{r,i}$  eingetragen. Der Index r gibt die Nummer des Regelkreises mit  $r \in 1, 2, ..., r_{Anz}$  und i gibt die Knoten-Nummer im r-ten Regelkreis mit  $i \in 0, 1, ..., n_r$  an. Alle Knoten für die i = 0 ist haben die Aufgabe eines Empfangsknotens und stellen somit den Knoten dar, der mit dem lokalen Prozessregler verbunden ist und der die Messwerte von allen Sensorknoten mit den Nummern  $i \in 1, 2, ..., n_r$  empfängt.

Im ersten Schritt sind aus dem betrachteten Netzwerk mit den  $r_{Anz}$ -Regelkreisen für jeden Regelkreis die Mengen  $\overline{V}_{Rj}$  mit  $j \in 1, 2, ..., r_{Anz}$  aus den zugehörigen Knoten aufzustellen. Der Empfangsknoten mit dem Index i = 0 der jeweiligen Regelkreise wird dabei nicht berücksichtigt. Die regelkreisspezifischen Bezeichnungen der Knoten werden durch die eigentlichen Knotenbezeichnungen innerhalb des in Bild B.1 dargestellten Kreises substituiert. Daraus ergeben sich die nachfolgenden Mengen.

$$\overline{V}_{R1} = \{v_{1,1}, v_{1,2}\} = \{v_2, v_3\}$$
(B.1)

$$\overline{V}_{R2} = \{v_{2,1}, v_{2,2}\} = \{v_8, v_{10}\}$$

$$\overline{V}_{R2} = \{v_{2,1}, v_{2,2}\} = \{v_{14}, v_{18}, v_{17}\}$$
(B.2)
(B.3)

$$V_{R3} = \{v_{3,1}, v_{3,2}, v_{3,3}\} = \{v_{14}, v_{18}, v_{17}\}$$
(B.3)

$$\overline{V}_{R4} = \{v_{4,1}\} = \{v_{16}\}$$
(B.4)

$$V_{\rm R5} = \{v_{5,1}, v_{5,2}\} = \{v_7, v_{10}\}$$
(B.5)

$$V_{\rm R6} = \{v_{6,1}\} = \{v_5\} \tag{B.6}$$

$$V_{R7} = \{v_{7,1}\} = \{v_7\}$$
(B.7)

$$V_{R8} = \{v_{8,1}\} = \{v_{10}\}$$
(B.8)

$$V_{R9} = \{v_{9,1}, v_{9,2}, v_{9,3}\} = \{v_{12}, v_{18}, v_{19}\}$$
(B.9)

$$V_{\rm R10} = \{v_{10,2}, v_{10,1}\} = \{v_{20}, v_{21}\}$$
(B.10)

$$V_{R11} = \{v_{11,1}\} = \{v_{16}\}$$
(B.11)

Die dadurch erhaltenen Mengen werden nach Algorithmus 1 in die obere Dreiecksmatrix der Abhängigkeitsmatrix  $\underline{E}$  der Regelkreise eingetragen, deren Diagonale komplett mit 1 gefüllt ist. Hierdurch lassen sich im Weiteren Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Regelkreisen ermitteln. Auf die Praxis übertragen wird damit ermittelt, welche Regelkreise Sensoren gemeinsam verwenden.

	$\overline{V}_{R1}$	$\overline{V}_{R2}$	$\overline{V}_{R3}$	$\overline{V}_{R4}$	$\overline{V}_{R5}$	$\overline{V}_{ m R6}$	$\overline{V}_{ m R7}$	$\overline{V}_{R8}$	$\overline{V}_{R9}$	$\overline{V}_{R10}$	$\overline{V}_{R11}$	
$\overline{V}_{R1}$	Γ1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 T	
$\overline{V}_{R2}$	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	
$\overline{V}_{R3}$	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
$\overline{V}_{R4}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
$\overline{V}_{R5}$	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	
$\overline{V}_{R6}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	(B.12)
$\overline{V}_{ m R7}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
$\overline{V}_{R8}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
$\overline{V}_{R9}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
$\overline{V}_{R10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
$\overline{V}_{R11}$	Lο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	

Schließlich wird die Diagonale und die obere Dreiecksmatrix von <u>E</u> mittels Algorithmus 2 (Zeile 5 - 12) zeilenweise durchlaufen. Insgesamt existieren für jeden *i*-ten Regelkreis eine Zeile mit  $i \in 1, 2, ..., r_{Anz}$  und es werden alle Regelkreismengen  $\overline{V}_{Rj}$  der Spalte *j*, deren Eintrag  $e_{i,j}$  in der *i*-ten Zeile eine 1 ist, der Menge  $M_i$  zugeordnet. Dadurch ergeben sich die folgenden Mengen  $M_i$  mit  $i \in 1, 2, ..., r_{Anz}$ .

$$M_1 = \left\{ \overline{V}_{R1} \right\} \tag{B.13}$$

$$M_2 = \left\{ \overline{V}_{R2}, \overline{V}_{R5}, \overline{V}_{R8} \right\}$$
(B.14)

$$M_3 = \left\{ \overline{V}_{R3}, \overline{V}_{R9} \right\} \tag{B.15}$$

$$M_4 = \left\{ \overline{V}_{R4}, \overline{V}_{R11} \right\} \tag{B.16}$$

$$M_5 = \left\{ \overline{V}_{R5}, \overline{V}_{R7}, \overline{V}_{R8} \right\}$$
(B.17)

$$M_6 = \left\{ \overline{V}_{R6} \right\} \tag{B.18}$$

$$M_7 = \left\{ V_{\mathrm{R7}} \right\} \tag{B.19}$$

$$M_8 = \left\{ V_{\mathrm{R8}} \right\} \tag{B.20}$$

$$M_9 = \left\{ \overline{V}_{R9} \right\} \tag{B.21}$$

$$M_{10} = \left\{ \overline{V}_{R10} \right\} \tag{B.22}$$

$$M_{11} = \left\{ \overline{V}_{R11} \right\} \tag{B.23}$$

Schließlich werden die Mengen  $M_i$  mit  $i \in 1, 2, ..., r_{Anz}$  durch Algorithmus 2 in den Zeilen 14 bis 27 miteinander verglichen und es wird geprüft, ob Schnittmengen existieren. Wenn Schnittmengen existieren, werden die entsprechenden Regelkreismengen der Mengen  $N_s$  mit  $s \in 1, 2, ..., s_{max}$  hinzugefügt. Somit werden alle Regelkreise gruppiert. Die Regelkreise innerhalb einer Gruppe  $N_s$  nutzen Knoten gemeinsam und zwischen den Gruppen  $N_s$  mit  $s \in 1, 2, ..., s_{max}$  existieren keine Abhängigkeiten. Es gibt somit insgesamt  $s_{max}$  voneinander unabhängige Regelkreisgruppen. Für obiges Beispiel ergeben sich folgende Gruppen.

$$N_1 = \left\{ \overline{V}_{R1} \right\} = \{ v_2, v_3 \}$$
(B.24)

$$\underline{x}_{R1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(B.25)

$$N_2 = \left\{ \overline{V}_{R2}, \overline{V}_{R5}, \overline{V}_{R7}, \overline{V}_{R8} \right\} = \left\{ v_7, v_8, v_{10} \right\}$$
(B.26)

$$N_4 = \left\{ \overline{V}_{R4}, \overline{V}_{R11} \right\} = \left\{ v_{16} \right\} \tag{B.30}$$

$$\underline{x}_{R4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(B.31)

$$N_5 = \left\{ \overline{V}_{R6} \right\} = \left\{ v_5 \right\} \tag{B.32}$$

$$N_6 = \left\{ \overline{V}_{R10} \right\} = \{ v_{20}, v_{21} \}$$
(B.34)

Anhand dieser Gruppen können Netzwerkplanungen wie in Abschnitt 5.4 beschrieben auf die Anforderungen der Regelkreise angepasst und optimiert werden.

### B.2 Prüfstand

In diesem Abschnitt werden Zusatzinformationen sowie Parameter für die entworfenen und verwendeten Regler aus Kapitel 5 angegeben.

### B.2.1 Linearisierung der Systemgleichungen des Anlagenprüfstands

Nachfolgend wird die linearisierten Systemmatrix aus Gleichung (2.15), die linearisierte Eingangsmatrix aus Gleichung (2.16) sowie die linearisierte Ausgangsmatrix aus Gleichung (2.17) des Anlagenprüfstands aus Abschnitt 2.1 aufgeführt, die für alle Reglerentwurfsverfahren eine wichtige Bedeutung haben. Wird die Systemgleichung um den Arbeitspunkt  $q_{AP}$  und  $h_{AP}$  linearisiert, so ergibt sich durch

$$\frac{\partial \underline{a}(x)}{\partial q}\Big|_{q_{\mathrm{AP}},h_{\mathrm{AP}}} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_{\mathrm{b}}} \cdot \left(k_{\mathrm{nv}} - 2 \cdot q_{\mathrm{AP}} \cdot \left(k_{\mathrm{vv}} + \frac{1}{K_{\mathrm{v,v}}(h)^2} + \frac{1}{K_{\mathrm{v,c}}^2}\right)\right) \\ 0 \end{pmatrix}$$
(B.36)

$$\frac{\partial \underline{a}(x)}{\partial h}\Big|_{q_{\mathrm{AP}},h_{\mathrm{AP}}} = \begin{pmatrix} \frac{2}{a_{\mathrm{b}}} \cdot \frac{q_{\mathrm{AP}}^2}{K_{\mathrm{v},\mathrm{v}}(h_{\mathrm{AP}})^3} \cdot \frac{\partial K_{\mathrm{v},\mathrm{v}}(h)}{\partial h} \\ -\frac{1}{T_{\mathrm{h}}} \end{pmatrix}$$
(B.37)

die lineare Systemdarstellung

Die Größe  $K_{v,v}(h)$  wurde durch ein Polynom 10-ter Ordnung der Form

$$K_{v,v}(h) = c_1 \cdot h^{10} + c_2 \cdot h^9 + c_3 \cdot h^8 + c_4 \cdot h^7 + c_5 \cdot h^6 + c_6 \cdot h^5 + c_7 \cdot h^4 + p_8 \cdot h^3 + p_9 \cdot h^2 + p_{10} \cdot h + c_{11}$$
(B.39)

angenähert. Für das System gültige Systemparameter sind in Tabelle B.1 aufgeführt. Der Verlauf des Wertes für  $K_{v,v}$  wurde bereits in Bild 2.3 dargestellt.

Tabelle B.1: Parameter des Anlagenprüfstands

$a_{b}$	0,02	
$k_{nv}$	$9,309 \cdot 10^{-8}$	
$k_{\rm vv}$	$2,150 \cdot 10^{-3}$	
$K_{\rm v,c}$	294, 117	
$T_{\rm h}$	0, 3	

### B.2.2 Gain-Scheduling-Regler

#### Umformung der Reglergleichungen

In Abschnitt 5.5 wurde ein realer, diskreter PID-Regler beschrieben. In den verwendeten Darstellungen und Beschreibungen kam die additive Form des PID-Reglers zum Einsatz. Für Simulationen wurde in dieser Arbeit jedoch auch hin und wieder seine Polynomdarstellung verwendet. Aus diesem Grund wird in diesem Absatz der Vollständigkeit halber die Überführung des realen, diskreten PID-Reglers von seiner additiven Form in seine Polynomdarstellung für den *j*-ten Arbeitspunkt beschrieben.

Dies Ausgangsgleichung aus Abschnitt (5.31) lautete

$$\begin{aligned} G_{\mathrm{R},j}(z) &= \frac{b_{\mathrm{R}2,j}z^2 + b_{\mathrm{R}1,j}z + b_{\mathrm{R}0,j}}{a_{\mathrm{R}2,j}z^2 + a_{\mathrm{R}1,j}z + a_{\mathrm{R}0,j}} \\ &= K_{\mathrm{P},j} + K_{\mathrm{I},j} \cdot \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} \frac{z+1}{z-1} + K_{\mathrm{D},j} \cdot \frac{N_j}{1 + \frac{N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}}{2} \frac{z+1}{z-1}} \\ &= K_{\mathrm{P},j} + K_{\mathrm{I},j} \cdot \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} \frac{z+1}{z-1} + K_{\mathrm{D},j} \cdot \frac{2 \cdot N_j \cdot (z-1)}{(2 + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}) z + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}} - 2}. \end{aligned}$$

Hierfür werden zunächst zur Vereinfachung der Rechnung die folgenden Kurzbezeichnungen

$$a = 2 + N_j \cdot \Delta T_{\rm R},\tag{B.40}$$

$$b = N_j \cdot \Delta T_{\rm R} - 2, \tag{B.41}$$

$$c = \frac{\Delta T_{\rm R}}{2} \cdot K_{{\rm I},j} \text{ und} \tag{B.42}$$

$$d = 2 \cdot N_j \cdot K_{\mathrm{D},j} \tag{B.43}$$

eingeführt. Mit diesen Abkürzungen lässt sich die nachfolgende Übertragungsfunktion aufstellen und umformen.

$$\begin{split} G_{\mathrm{R},j}(z) &= K_{\mathrm{P},j} + c \cdot \frac{z+1}{z-1} + \frac{d \cdot (z-1)}{a \cdot z+b} \\ &= \frac{K_{\mathrm{P},j} \cdot (z-1) \cdot (az+b) + c \cdot (z+1) \cdot (az+b) + d \cdot (z-1)^2}{(z-1) \cdot (az+b)} \\ &= \frac{K_{\mathrm{P},j}(az^2 + bz - az-b) + c(az^2 + bz + az+b) + d(z^2 - 2z+1)}{az^2 + bz - az-b} \\ &= \frac{K_{\mathrm{P},j}az^2 + K_{\mathrm{P},j}bz - K_{\mathrm{P},j}az - K_{\mathrm{P},j}b + caz^2 + cbz + caz + cb + dz^2 - 2dz + d}{az^2 + bz - az - b} \\ &= \frac{(K_{\mathrm{P},j}a + ca + d) \cdot z^2 + (K_{\mathrm{P},j}b - K_{\mathrm{P},j}a + cb + ca - 2d) \cdot z - K_{\mathrm{P},j}b + cb + d}{az^2 + (b-a) \cdot z - b} \end{split}$$

$$G_{\mathrm{R},j}(z) = \frac{\overbrace{\left(K_{\mathrm{P},j}+c+\frac{d}{a}\right)}^{b_{\mathrm{R}2,j}} \cdot z^2 + \overbrace{\left(K_{\mathrm{P},j}\frac{b}{a}-K_{\mathrm{P},j}+\frac{cb}{a}+c-2\frac{d}{a}\right)}^{b_{\mathrm{R}1,j}} \cdot z + \overbrace{\left(\frac{cb}{a}+\frac{d}{a}-K_{\mathrm{P},j}\frac{b}{a}\right)}^{b_{\mathrm{R}0,j}}}{\underbrace{1_{a_{\mathrm{R}2,j}}}^{1} \cdot z^2 + \underbrace{\frac{(b-a)}{a_{\mathrm{R}1,j}}}^{c} \cdot z + \underbrace{\left(-\frac{b}{a}\right)}^{a_{\mathrm{R}0,j}}}_{a_{\mathrm{R}0,j}}}$$

Schließlich sind durch einsetzen der Gleichungen (B.40) bis (B.43) die einzelnen Koeffizienten zu bestimmen.

Auflösen des Koeffizienten  $b_{R2,j}$ :

$$b_{R2,j} = K_{P,j} + c + \frac{d}{a} = K_{P,j} + \frac{\Delta T_R}{2} \cdot K_{I,j} + \frac{2 \cdot N_j \cdot K_{D,j}}{2 + N_j \cdot \Delta T_R}$$

Auflösen des Koeffizienten  $b_{R1,j}$ :

$$\begin{split} b_{\mathrm{R1},j} &= K_{\mathrm{P},j} \cdot \frac{b}{a} - K_{\mathrm{P},j} + \frac{c \cdot b}{a} + c - 2 \cdot \frac{d}{a} \\ &= K_{\mathrm{P},j} \frac{N_j \Delta T_{\mathrm{R}} - 2}{2 + N_j \Delta T_{\mathrm{R}}} - K_{\mathrm{P},j} + \frac{\frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} K_{\mathrm{I},j} (N_j \Delta T_{\mathrm{R}} - 2)}{2 + N_j \Delta T_{\mathrm{R}}} + \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} K_{\mathrm{I},j} - 2 \cdot \frac{2N_j K_{\mathrm{D},j}}{2 + N_j \Delta T_{\mathrm{R}}} \\ &= \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} K_{\mathrm{I},j} - K_{\mathrm{P},j} + \frac{K_{\mathrm{P},j} (N_j \Delta T_{\mathrm{R}} - 2) + \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} K_{\mathrm{I},j} (N_j \Delta T_{\mathrm{R}} - 2) - 4N_j K_{\mathrm{D},j}}{2 + N_j \Delta T_{\mathrm{R}}} \\ &= \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} \cdot K_{\mathrm{I},j} - K_{\mathrm{P},j} + \frac{(K_{\mathrm{P},j} + \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} \cdot K_{\mathrm{I},j}) \cdot (N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}} - 2) - 4 \cdot N_j \cdot K_{\mathrm{D},j}}{2 + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}} \\ &= \frac{2}{2 + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}} \cdot \left( K_{\mathrm{I},j} \cdot N_j \cdot \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} - 2 \cdot K_{\mathrm{P},j} - 2 \cdot K_{\mathrm{D},j} \cdot N_j \right) \end{split}$$

Auflösen des Koeffizienten  $b_{R0,j}$ :

$$b_{\mathrm{R}0,j} = -K_{\mathrm{P},j} \cdot \frac{b}{a} + \frac{c \cdot b}{a} + \frac{d}{a} = \frac{1}{a} \cdot \left(-K_{\mathrm{P},j} \cdot b + c \cdot b + d\right)$$

$$= \frac{1}{2 + N_j \Delta T_{\mathrm{R}}} \cdot \left(-K_{\mathrm{P},j}(N_j \Delta T_{\mathrm{R}} - 2) + \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} K_{\mathrm{I},j}(N_j \Delta T_{\mathrm{R}} - 2) + 2N_j K_{\mathrm{D},j}\right)$$

$$= \frac{1}{2 + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}} \cdot \left(\left(\frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} \cdot K_{\mathrm{I},j} - K_{\mathrm{P},j}\right) \cdot (N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}} - 2) + 2 \cdot N_j \cdot K_{\mathrm{D},j}\right)$$

$$= \frac{2}{2 + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}} \cdot \left(\left(\frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} \cdot K_{\mathrm{I},j} - K_{\mathrm{P},j}\right) \cdot \left(N_j \cdot \frac{\Delta T_{\mathrm{R}}}{2} - 1\right) + N_j \cdot K_{\mathrm{D},j}\right)$$

Auflösen des Koeffizienten  $a_{R2,j}$ :

$$a_{R2,i} = 1$$

Auflösen des Koeffizienten  $a_{R1,j}$ :

$$a_{\mathrm{R}1,j} = \frac{(b-a)}{a} = \frac{\left(N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}} - 2 - 2 - N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}\right)}{2 + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}} = \frac{-4}{2 + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}}$$

Auflösen des Koeffizienten  $a_{R0,j}$ :

$$a_{\mathrm{R0},j} = -\frac{N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}} - 2}{2 + N_j \cdot \Delta T_{\mathrm{R}}}$$

#### Reglerparameter

Insgesamt wurden für den Gain-Scheduling-Regler anhand der Kv-Kennlinien aus Bild 2.3 für die Ventiltypen 3730-3 und 3793 sowohl für die Durchfluss- als auch für die Differenzdruckregelung sieben Arbeitspunkte ausgewählt. Nachfolgende Tabellen B.2, B.3 und B.4 geben nähere Informationen zu den gewählten Arbeitspunkten. Hierzu zählen der zum *j*-ten Arbeitspunkt zugehörige Durchfluss oder Differenzdruck und die anhand des Wurzelortskurvenverfahrens gewählten Koeffizienten der Reglerübertragungsfunktion (5.31). Weiterhin sind die Verstärkungen für den *P*-, *I*- und *D*-Anteil des verwendeten PID-Reglers und der Parameter *N* für den Realisierungspol aufgeführt. Durch Umrechnung wurden diese Verstärkungen aus der mittels des Wurzelortskurvenverfahren ermittelten Reglerübertragungsfunktion (5.31) extrahiert. Für das Simulationsmodell und den am Versuchsstand eingestellten Regler konnten die gleichen Reglerparameter verwendet werden. Tabelle B.2 gibt sowohl die Reglerparameter für die Durchflussregelung mit einem Simulationsmodell als auch für den Versuchsstand an. Die der Ermittelung der Reglerparameter zugrundeliegende Abtastzeit betrug 2 s, es wurde eine Totzeit von einem Abtastschritt und die zum Stellungsregler 3730 zugehörige Ventilkennlinie  $Kv_{3730}$  aus Bild 2.3 angenommen.

$n_{\mathrm{AP},j}$	$q_{\mathrm{AP},j}$	Р	Ι	D	N
1	1,0	0,419	0,494	0,035	0,597
2	2,5	0,213	0,242	0,016	0,597
3	7,5	0,164	0,186	0,013	0,597
4	12,5	0,174	0,198	0,013	0,597
5	15,0	0,198	0,225	0,015	0,597
6	17,5	0,230	0,262	0,018	0,597
7	19,0	0,272	0,309	0,021	0,597

Tabelle B.2: Parameter für q-Regelung in den einzelnen Arbeitspunkten

In den Tabellen B.3 und B.4 sind die Regelparameter für eine Durchflussregelung und eine Differenzdruckregelung am Anlagenprüfstand aufgetragen. Hierfür wurde die Ventilkennlinie  $Kv_{3793}$ für den Stellungsregler 3793 aus dem Bild 2.3 angenommen. Die Abtastung ist auch hier 2 s und die Totzeit beträgt einen Abtastschritt. Die ermittelten Parameter gelten sowohl für das Simulationsmodell als auch für den realen Versuchsstand.

$n_{\mathrm{AP},j}$	$q_{\mathrm{AP},j}$	Р	Ι	D	N
1	1,0	-0,283	-0,769	-0,257	0,597
2	2,5	0,419	0,494	0,035	0,597
3	7,5	0,156	0,184	0,013	0,597
4	12,5	0,134	0,158	0,011	0,597
5	15,0	0,137	0,161	0,011	0,597
6	17,5	0,179	0,211	0,015	0,597
7	19,0	0,267	0,196	0,027	2,333

Tabelle B.3: Parameter für q-Regelung in den einzelnen Arbeitspunkten

$n_{\mathrm{AP},j}$	$\Delta p_{\mathrm{AP},j}$	Р	Ι	D	N
1	1,000	-10,610	-6,605	-1,219	2,333
2	1,500	-3,297	-2,423	-0,337	2,333
3	1,903	-2,301	-1,691	-0,235	2,333
4	2,207	-2,053	-1,509	-0,210	2,333
5	2,659	-1,952	-1,435	-0,199	2,333
6	3,041	-2,199	-1,610	-0,224	2,333
7	3,598	-4,161	-3,058	-0,425	2,333

**Tabelle B.4:** Parameter für  $\Delta p$ -Regelung in den einzelnen Arbeitspunkten

## B.3 Herleitung der POC-Gleichungen mit Durchgriff

Dieser Abschnitt gibt die Herleitung der zusammengesetzten Gleichung für den POC mit Durchgriff an. Die Grundlage bildet das zu betrachtende dynamische System

$$\underline{x}_{\mathbf{P}}(k+1) = \underline{A}_{\mathbf{P}} \cdot \underline{x}_{\mathbf{P}}(k) + \underline{B}_{\mathbf{P}} \cdot \underline{u}_{\mathbf{R}}(k), \tag{B.44}$$

$$\underline{y}_{\mathbf{P}}(k) = \underline{C}_{\mathbf{P}} \cdot \underline{x}_{\mathbf{P}}(k) + \underline{D}_{\mathbf{P}} \cdot \underline{u}_{\mathbf{R}}(k).$$
(B.45)

Weiterhin wird die auftretende Totzeit im System mit

$$\underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) = \underline{A}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{u}_{\mathrm{T}}(k), \qquad (B.46)$$

$$y_{\mathrm{T}}(k) = \underline{C}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) \tag{B.47}$$

beschrieben. Es ist zu beachten, dass dieses System keinen Durchgriff  $\underline{D}_{T}$  besitzen kann, da dieses Modell ausschließlich für Totzeiten genutzt werden soll, die größer als  $l_{j,k} > 0$ -Abtastschritte sind. Der Eingang des die Totzeit beschreibenden Systems bildet der Ausgang  $\underline{y}_{T}$  des Prozesses. Neben dem Totzeitmodell ist noch ein Regler erforderlich, der die Form

$$\underline{x}_{\mathbf{R}}(k+1) = \underline{A}_{\mathbf{R}} \cdot \underline{x}_{\mathbf{R}}(k) + \underline{B}_{\mathbf{R}} \cdot \underline{e}(k), \tag{B.48}$$

$$\underline{u}_{\mathrm{R}}(k) = \underline{C}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) + \underline{D}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{e}(k).$$
(B.49)

mit der Regeldifferenz

$$\underline{e}(k) = \underline{w}(k) - y_{\mathrm{T}}(k) \tag{B.50}$$

besitzt. Der Regler besitzt aufgrund seines Proportionalanteils in allen Fällen einen Durchgriff  $\underline{D}_{R}$ . Weiterhin soll im POC auch die Führungsgröße  $\underline{w}(k)$  gespeichert werden. Hierfür wird immer die Veränderung  $\underline{\sigma}$  der Führungsgröße im Vergleich zum vorherigen Abtastschritt benötigt. Ermittelt wird sie aus  $\underline{\sigma}(k) = \underline{w}(k) - \underline{x}_{\sigma}$  werden. Daraus entsteht das Gleichungssystem

$$\underline{x}_{\sigma}(k+1) = \underline{A}_{\sigma} \cdot \underline{x}_{\sigma}(k) + \underline{B}_{\sigma} \cdot \underline{\sigma}(k), \tag{B.51}$$

$$\underline{\tilde{w}}(k) = \underline{C}_{\sigma} \cdot \underline{x}_{\sigma}(k) + \underline{D}_{\sigma} \cdot \underline{\sigma}(k).$$
(B.52)

Im Weiteren soll dieses System in seine Matrizenschreibweise überführt werden. Dazu müssen einige Gleichungen in andere Gleichungen eingesetzt werden. Zunächst ist Gleichung (B.45) in Gleichung (B.46) einzusetzen. Dies führt auf Gleichung

$$\underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) = \underline{A}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{u}_{\mathrm{R}}(k).$$
(B.53)

Daraufhin wird Gleichung (B.47) in Gleichung (B.50) eingesetzt und es folgt daraus

$$\underline{e}(k) = \underline{w}(k) - \underline{C}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k).$$
(B.54)

Geichung (B.54) ersetzt schließlich  $\underline{e}(k)$  in den Gleichungen (B.48) und (B.49) zu

$$\underline{x}_{R}(k+1) = \underline{A}_{R} \cdot \underline{x}_{R}(k) + \underline{B}_{R} \cdot \underline{w}(k) - \underline{B}_{R} \cdot \underline{C}_{T} \cdot \underline{x}_{T}(k),$$
(B.55)

$$\underline{u}_{\mathbf{R}}(k) = \underline{C}_{\mathbf{R}} \cdot \underline{x}_{\mathbf{R}}(k) + \underline{D}_{\mathbf{R}} \cdot \underline{w}(k) - \underline{D}_{\mathbf{R}} \cdot \underline{C}_{\mathbf{T}} \cdot \underline{x}_{\mathbf{T}}(k).$$
(B.56)

Die neu ermittelte Gleichung (B.56) wird wiederum in die Gleichungen (B.44) und (B.53) eingesetzt und dies führt auf die Gleichungen

$$\underline{x}_{\mathrm{P}}(k+1) = \underline{A}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{w}(k) - \underline{B}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k), \quad (B.57)$$

$$\underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) = \underline{A}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{R}}(k)$$

$$(B.58)$$

$$+ \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{w}(k) - \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{w}_{\mathrm{T}}(k).$$

Wird  $\underline{w}(k) = \underline{x}_{\sigma} + \underline{\sigma}$  aus Gleichung (B.52) in die Zustandsgleichungen (B.57), (B.58), (B.55) und (B.51) eingesetzt und sie daraufhin nach den vorhandenen Zustandsgrößen sortiert, so ergeben sich die vier Gleichungen

$$\underline{x}_{P}(k+1) = \underline{A}_{P} \cdot \underline{x}_{P}(k) - \underline{B}_{P} \cdot \underline{D}_{R} \cdot \underline{C}_{T} \cdot \underline{x}_{T}(k) + \underline{B}_{P} \cdot \underline{C}_{R} \cdot \underline{x}_{R}(k) + \underline{B}_{P} \cdot \underline{D}_{R} \cdot \underline{x}_{\sigma} + \underline{B}_{P} \cdot \underline{D}_{R} \cdot \underline{\sigma},$$
(B.59)

$$\underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) = \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) + (\underline{A}_{\mathrm{T}} \cdot -\underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{T}}) \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{x}_{\sigma} + \underline{B}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{P}} \cdot \underline{D}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{\sigma},$$
(B.60)

$$\underline{x}_{\mathrm{R}}(k+1) = -\underline{B}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{C}_{\mathrm{T}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) + \underline{A}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) + \underline{B}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{x}_{\sigma} + \underline{B}_{\mathrm{R}} \cdot \underline{\sigma}, \tag{B.61}$$

$$\underline{x}_{\sigma}(k+1) = \underline{A}_{\sigma} \cdot \underline{x}_{\sigma}(k) + \underline{B}_{\sigma} \cdot \underline{\sigma}(k).$$
(B.62)

Die Gleichungen (B.59), (B.60), (B.61) und (B.62) lassen sich in die Matrizenschreibweise

$$\begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k+1) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k+1) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k+1) \\ \underline{x}_{\sigma}(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{A}_{\mathrm{P}} & -\underline{B}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}}\underline{C}_{\mathrm{T}} & \underline{B}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}} & \underline{B}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}} \\ \underline{B}_{\mathrm{T}}\underline{C}_{\mathrm{P}} & (\underline{A}_{\mathrm{T}} - \underline{B}_{\mathrm{T}}\underline{D}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}}\underline{C}_{\mathrm{T}}) & \underline{B}_{\mathrm{T}}\underline{D}_{\mathrm{P}}\underline{C}_{\mathrm{R}} & \underline{B}_{\mathrm{T}}\underline{D}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) \\ \underline{x}_{\sigma}(k) \end{bmatrix} \\ \underline{A}_{\mathrm{POC}} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{B}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}} \\ \underline{B}_{\mathrm{T}}\underline{D}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}} \\ \underline{B}_{\mathrm{R}} \\ 1 \end{bmatrix}}_{\underline{B}_{\mathrm{POC}}} \sigma(k)$$
(B.63)

überführen. Besitzt der betrachtete Prozess keinen Durchgriff  $\underline{D}_{P}$  so wird Gleichung (B.63) zu

$$\begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k+1) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k+1) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k+1) \\ \underline{x}_{\sigma}(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{A}_{\mathrm{P}} & -\underline{B}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}}\underline{C}_{\mathrm{T}} & \underline{B}_{\mathrm{P}}\underline{C}_{\mathrm{R}} & \underline{B}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}} \\ \underline{B}_{\mathrm{T}}\underline{C}_{\mathrm{P}} & \underline{A}_{\mathrm{T}} & 0 & 0 \\ 0 & -\underline{B}_{\mathrm{R}}\underline{C}_{\mathrm{T}} & \underline{A}_{\mathrm{R}} & \underline{b}_{\mathrm{R}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\underline{A}_{\mathrm{POC}}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) \\ \underline{x}_{\sigma}(k) \end{bmatrix}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{B}_{\mathrm{P}}\underline{D}_{\mathrm{R}} \\ 0 \\ \underline{B}_{\mathrm{R}} \\ 1 \\ \underline{B}_{\mathrm{POC}} \end{bmatrix}}_{\underline{B}_{\mathrm{POC}}} \sigma(k) \quad (B.64)$$

vereinfacht. Für die Wahl des Ausgangs muss zwischen den Fällen, bei denen keine Totzeit  $l_{j,k} = 0$  oder eine Totzeit vorliegt  $l_{j,k} > 0$  (siehe Abschnitt 5.1.1). Je nachdem, welcher Fall vorliegt,

muss entweder die Ausgangsbeschreibung

$$\begin{bmatrix} \underline{\tilde{y}}_{\mathrm{T}}(k) \\ \underline{\tilde{w}}(k) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \underline{C}_{\mathrm{T}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\underline{C}_{\mathrm{POC}}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) \\ \underline{x}_{\sigma}(k) \end{bmatrix}$$
für  $l_{j,k} = 0$  (B.65)

oder die Ausgangsbeschreibung

$$\begin{bmatrix} \underline{\tilde{y}}_{\mathrm{T}}(k) \\ \underline{\tilde{w}}(k) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{C}_{\mathrm{P}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\underline{C}_{\mathrm{POC}}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{x}_{\mathrm{P}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{T}}(k) \\ \underline{x}_{\mathrm{R}}(k) \\ \underline{x}_{\sigma}(k) \end{bmatrix}$$
für  $l_{j,k} = 0$  (B.66)

gewählt werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] Abdel Hamid, S., Hassanein, H. S. und Takahara, G.: *Routing for Wireless Multi-Hop Networks*. 2013.
- [2] Adamy, J.: Nichtlineare Regelungen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [3] Adamy, J.: *Nichtlineare Systeme und Regelungen*. 3. aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [4] Adamy, J.: Systemdynamik und Regelungstechnik II. 5. Auflage. Aachen, 2016.
- [5] Åkerberg, J., Gidlund, M., Neander, J., Lennval, T. und Björkman, M.: Deterministic Downlink Transmission in WirelessHART Networks enabling Wireless Control Applications. In: *Proceedings of the 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. IEEE (2010), S. 2120–2125.
- [6] Anderson, B. D. O. und Moore, J. B.: *Optimal filtering*. Hrsg. von T. Kailath. Prentice-Hall information and system sciences series. Englewood Cliffs, N.J., 1979.
- [7] Ariza-Quintana, A., Casilari, E. und Triviño-Cabrera, A.: Implementation of MANET routing protocols on OMNeT++. In: (2008).
- [8] Arnold, W. F. und Laub, A. J.: Generalized Eigenproblem Algorithms and Software for Algebraic Riccati Equations. In: *PROCEEDINGS OF THE IEEE* 72 (1984), S. 1746– 1754.
- [9] Balanis, C. A.: Antenna theory : analysis and design. 3. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- Bentje, H. u. a.: Koexistenz von Funksystemen in der Automatisierungstechnik.
   Techn. Ber. ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V., 2008.
- [11] Björkbom, M.: Wireless control system simulation and network adaptive control. Diss. Aalto University School of science, technology, Department of automation und systems technology: Helsinki University of Technology Control Engineering, Okt. 2010.
- [12] Blevins, T. und Jensen, K.: Valve control via wireless There are ways to overcome the significant and variable delays in signal transmission. Techn. Ber. Emerson Process Management, 2015.
- [13] Bluetooth Core Spec v4.2. Version 4.2. Bluetooth SIG. Dez. 2014.
- [14] Bluetooth Core Spec v5.0. Version 5. Bluetooth SIG. Dez. 2016.
- [15] Bölderl-Ermel, W.: Funktechnologien in der Industrie. In: *elektrotechnik & automation* 6 (2010).
- [16] Campista, M. E. M. und Rubinstein, R. M. G.: *Advanced Routing Protocols for Wireless Networks*. 2014.

- [17] Chen, D., Nixon, M. und Mok, A.: *WirelessHART Real-Time Mesh Network for Industrial Automation*. Springer Science+Business Media, 2010, S. 276.
- [18] Das, M. L. und Mukkamala, R.: Revisiting Bluetooth Security (Short Paper). In: 4th International Conference on Information Systems Security (ICISS), Hyderabad, Andhra Pradesh, India (2008).
- [19] Dembowski, K.: EKG per Bluetooth. In: *Elektronik Fachmedium für industrielle Anwender und Entwickler* 15 (2017).
- [20] Dmitry, K.: Integration of NS-3 with MATLAB/Simulink. Masterthesis. Luleå University of Technology, Dept. of Computer Science und Electrical Engineering, Communication Networks Research Group, 2010.
- [21] FCC rules part 15 Radio frequency devices, Section 15.247: Operation within the bands 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz, and 5725-5850 MHz. GPO's Federal Digital System (FDsys). Aug. 2017.
- [22] FieldComm Group: *HART Communication Protocol, Token-Passing Data Link Layer* Specification, HCF\_SPEC-081, Revision 9.1. Dez. 2019.
- [23] Föllinger, O.: *Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung.* 10., durchgesehene Auflage. Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2008.
- [24] Foundation, H. C.: HART. 2016. URL: http://de.hartcomm.org/.
- [25] Fritzson, P.: *Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 2.1. 2.* rev. pr. Piscataway, NJ [u.a.], 2006.
- [26] W. Frohberg, Hrsg.: *Taschenbuch der Nachrichtentechnik: mit 57 Tabellen*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl., 2008.
- [27] Fuchs, J.: Optimierungspotentiale bei der Volumenstromregelung von fluidtechnischen Anlagen durch Kombination der Stellgeräte Ventil und Pumpe. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [28] Gebhardt, W. und Wollert, J. F.: *Das Funkbuch: Evolution und Kommunikation*. steute Schaltgeräte GmbH & Co. KG, Löhne, Geschäftsbereich Wireless, 2010.
- [29] Han, S., Zhu, X., Mok, A. K., Chen, D. und Nixon, M.: Reliable and Real-time Communication in Industrial Wireless Mesh Networks. In: 17th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (2011).
- [30] Han, S., Zhu, X., Mok, A. K., Nixon, M., Blevins, T. und Chen, D.: Control over WirelessHART Network. In: Proceedings of the 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) (2010), S. 2114–2119.
- [31] Hennecke, A.: Time Sensitive Networks (TSN) in modularen Industrie 4.0 Anlagen. In: *Automation 2017 - "Methods - Kommunikationsprotokolle"*. Baden-Baden, Juni 2017.
- [32] Henriksson, E.: Predictive Control for Wireless Networked Systems in Process Industry. Diss. KTH Royal Institute of Technology, Department of Automatic Control, Stockholm, 2014.

- [33] Henriksson, E., Sandberg, H. und Johansson, K. H.: Reduced-Order Predictive Outage Compensators for Networked Systems. In: *Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai* (2009), S. 3775–3780.
- [34] Hinds, A., Ngulube, M., Zhu, S. und Al-Aqrabi, H.: A Review of Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc NETworks (MANET). In: *International Journal of Information and Education Technology* 3 (2013), S. 1–5.
- [35] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. In: *IEEE Std* 802.11-2012 (2012).
- [36] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. In: IEEE Std 802.15.4-2015 (2015).
- [37] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment 1: Physical Layer Utilizing China Medical Bands. In: *IEEE Std 802.15.4n-2016* (2016).
- [38] IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment 2: Ultra-Low Power Physical Layer. In: *IEEE Std 802.15.4q-2016* (2016).
- [39] IEEE Standard for wireless personal area networks (WPANs) Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. In: *IEEE Std* 802.15.1-2005 (2005).
- [40] ITU-T: Short range narrow-band digital radiocommunication transceivers PHY, MAC, SAR and LLC layer specifications. Recommendation G.9959. Geneva: International Telecommunication Union, Jan. 2015.
- [41] Jensen, K.: Wireless valves for control. In: *Valve World Control & Smart Valves* (2014), S. 73–74.
- [42] Kafka, G.: *WLAN : Technik, Standards, Planung und Sicherheit für Wireless LAN.* München [u.a.]: Carl Hanser Verlag, 2005.
- [43] Kagermann, H., Wahlster, W. und Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen f
  ür das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.
   Forschungsber. Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft -Wissenschaft, Apr. 2013.
- [44] Kassner, M. und Guastella, S.: Vernetzte LED-Leuchten über Bluetooth Mesh. In: *Elektronik Praxis - Sonderheft LED- und OLED-Lichttechnik II* 17 (Okt. 2017).
- [45] Kirsche, M. und Schnurbusch, M.: A New IEEE 802.15.4 Simulation Model for OMNeT++ / INET. Sep. 2014.
- [46] Knoll, A.: Mesh-Netzwerke jetzt auch über Bluetooth. In: *Markt&Technik Die unabhängige Wochenzeitung für Elektronik* 33 (2017).
- [47] Koubaa, A., Alves, M. und Tovar, E.: *i-GAME: An Implicit GTS Allocation Mechanism* in IEEE 802.15.4 for Time-Sensitive Wireless Sensor Networks. Techn. Ber. IPP-HURRAY! Research Group, Polytechnic Institute of Porto, 2006.
- [48] Krauße, M. und Konrad, R.: *Drahtlose ZigBee-Netzwerke : Ein Kompendium*. 2014. URL: http://scans.hebis.de/HEBCGI/show.pl?35084314\_aub.html.

- [49] Labiod, H., Afifi, H. und Santis, C. D.: *Wi-Fi(tm), Bluetooth(tm), Zigbee(tm) and Wimax(tm)*. SPRINGER NATURE, Juni 2007.
- [50] Lunze, J.: *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen.* 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Lehrbuch, 2008.
- [51] Lunze, J.: Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. 9., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Lehrbuch, 2013.
- [52] Lunze, J.: Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. 11., überarb. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg, 2016.
- [53] Lunze, J.: Regelungstechnik 2: Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung. 8., Überarb. Aufl.
   2014. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg, 2014.
- [54] Mesh Device Properties. Specification 1.0. Bluetooth SIG. Juli 2017.
- [55] Mesh Model. Specification 1.0. Bluetooth SIG. Juli 2017.
- [56] Mesh Profile. Specification 1.0. Bluetooth SIG. Juli 2017.
- [57] NAGASHIMA, A., Ohtani, T. und Okano, R.: Network Control System. Englisch. US 2011/0044331 A1. Feb. 2011.
- [58] Normey-Rico, J. und Camacho, E.: *Control of Dead-Time Processes*. Springer-Verlag London, Jan. 2007.
- [59] OKANO, R., OHTANI, R. und NAGASHIMA, A.: Networked Control Systems by PID Controller - Improvement of Performance Degradation Caused by Packet loss. In: *IEEE International Conference on Industrial Informatics* (2008), S. 1126–1132.
- [60] OKANO, R., OHTANI, R. und NAGASHIMA, A.: PID Controller which Compensates the Packet Loss in Networked Control System. In: 46 (2010).
- [61] Pape, A. und Weczerek, J.: White paper: Coexistence mechanisms of Factory Line Bluetooth for interference-free parallel operation with wireless LAN. Techn. Ber. Blomberg: Phoenix Contact, 2015.
- [62] Pereira, C. E. und Neumann, P.: "Industrial Communication Protocols". In: Springer Handbook of Automation. Hrsg. von S. Y. Nof. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 981–999.
- [63] Petersen, S. und Carlsen, S.: WirelessHART Versus ISA100.11a: The Format War Hits the Factory Floor. In: *Industrial Electronics Magazine* (2011), S. 23–34.
- [64] Rani, S. und Ahmed, S. H.: *Multi-hop Routing in Wireless Sensor Networks : An Overview, Taxonomy, and Research Challenges.* 2015.
- [65] Rauchhaupt, L., Hintze, E. und Gnad, A.: Über die Bewertung der Zuverlässigkeit industrieller Funklösungen - Die theoretischen Grundlagen. In: *atp edition -Automatisierungstechnische Praxis* Ausgabe 3 (2007), S. 38–47.

- [66] Ryan, M.: Bluetooth: With Low Energy comes Low Security. In: *Presented as part of the 7th USENIX Workshop on Offensive Technologies* (2013).
- [67] Schnabel, P.: *Netzwerktechnik-Fibel : Grundlagen, Übertragungstechnik, TCP/IP, Dienste, Sicherheit.* 4., überarb. Aufl. Ludwigsburg: Schnabel, 2016.
- [68] Schubert, H.: Bluetooth Mesh Funknetzwerk auf Bluetooth Basis. In: *Elektronik Fachmedium für industrielle Anwender und Entwickler* 17 (2017).
- [69] Shaked, Y. und Wool, A.: Cracking the Bluetooth PIN. In: *The Third International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services* (2005).
- [70] Siemens: Funktionshandbuch, SIMATIC PROFINET mit STEP 7. Mai 2021.
- [71] Singer, M.: Entwicklung und Adaption von Methoden zur Synthese von Regelungen für funkbasierte dynamische Systeme. Zugl.: Technische Universität Darmstadt, Diss., 2014. Diss. Berlin, 2015.
- [72] Singer, M. und Konigorski, U.: Netzwerkbasierte Regelung bei zeitvarianten Verzögerungen und zufälligen Paketausfällen. In: Automation 2012. 13. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik. VDI-Berichte 2171. Düsseldorf: VDI Verlag, 2012.
- [73] SmartHome2Market Marktperspektiven für die intelligente Heimvernetzung. Forschungsber. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2016.
- [74] Stanimirovic, D., Damasky, N., Webel, S., Koriath, D., Spillner, A. und Kurz, D.: [Poster] A Mobile Augmented reality system to assist auto mechanics. In: 2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). Sep. 2014, S. 305– 306.
- [75] Stein, T.: Automatisierter Entwurf regulärer Deskriptorsysteme. Darmstadt, Techn. Univ., Masterarbeit. Diss. 2013.
- [76] Stiny, L.: Regelungstechnik Crashkurs. 1. Auflage. Konstanz: Verl. Christiani, 2013.
- [77] Tan, K., Lee, T. und Leu, F.: Predictive PI versus Smith control for dead-time compensation. In: *ISA Transactions 40* (2001), S. 17–29.
- [78] J. M. Udo Enste, Hrsg.: *Datenkommunikation in der Prozessindustrie*. Deutscher Industrieverlag, 2007.
- [79] Van der Bent, H.: *Wireless Technology in Industrial Automation*. Techn. Ber. YOKOGAWA.
- [80] Varga, A. und Hornig, R.: AN OVERVIEW OF THE OMNeT++ SIMULATION ENVIRONMENT. In: (2008).
- [81] Voigt, T. A.: Entwurf von Zustandsschätzern für Multiratenabtastsysteme zur Lageregelung eines Roboterarms. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014. Diss. Düsseldorf, 2014.
- [82] Weber, H. und Ulrich, H.: Laplace-Transformation : Grundlagen Fourierreihen und Fourierintegral - Anwendungen. 8. Aufl. Lehrbuch Elektrotechnik. Wiesbaden: Teubner, 2007.

- [83] Weißgerber, W.: Elektrotechnik für Ingenieure ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium: Formelsammlung. 5., durchgesehene Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden, 2015.
- [84] Yang, A., Irwin, G. W., Naeem, W. und Li, K.: Application of wireless network control to a two inverted pendulum system. In: *ISSC 2011, Trinity College Dublin, June 23-24* (2011).
- [85] Zand, P., Dilo, A. und Havinga, P.: Implementation of WirelessHART in NS-2 simulator. In: Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (Sep. 2012).
- [86] Zand, P., Mathews, E., Havinga, P., Stojanovski, S., Sisinni, E. und Ferrari, P.: Implementation of WirelessHART in the NS-2 Simulator and Validation of Its Correctness. In: Sensors 14 (Apr. 2014), S. 36.
- [87] Ziegler, J. G. und Nichols, N. B.: Optimum Settings for Automatic Controllers. In: *Transactions of ASME* 64 (1942), S. 759–768.
- [88] Zur Megede, W.: Einführung in die Technik selbsttätiger Regelungen. 1968.

# Eigene Veröffentlichungen

- [89] Stein, T., Konigorski, U. und Fuchs, J.: WirelessHart im Kontext von Industrie 4.0. In: *SPS-MAGAZIN* 1+2 (2017).
- [90] Stein, T., Konigorski, U. und Fuchs, J.: WirelessHart im Kontext von Industrie 4.0. In: *Industrie 4.0 Magazin* 5 (März 2017), S. 10–11.
- [91] Stein, T., Konigorski, U., Kiesbauer, J. und Fuchs, J.: Bluetooth als
   Übertragungsprotokoll für Prozessregelungen. In: *Automation 2017 "Process Industries* & *Kommunikations-Infrastruktur"*. Baden-Baden, Juni 2017, S. 330–345.
- [92] Stein, T., Konigorski, U., Kiesbauer, J. und Fuchs, J.: WirelessHART als Übertragungsprotokoll für regelungstechnische Anwendungen. In: Automation 2016 -"Secure & reliable in the digital world". Baden-Baden, Juni 2016.
- [93] Stein, T., Konigorski, U., Kiesbauer, J. und Fuchs, J.: wirelessHART in der Prozessregelung. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* Ausgabe 10 (Okt. 2016), S. 56–69.

# **Studentische Arbeiten**

In diesem Abschnitt werden alle, während Erstellung dieser Dissertation betreuten studentischen Arbeiten aufgeführt.

- [94] Almstetter, D.: "Drahtlose Netzwerktechnologien und geeignete Regelkonzepte". Proseminar. Okt. 2015.
- [95] Almstetter, D.: "Entwurf und Simulation eines Regelkonzepts zur Kompensation von Paketausfällen für eine drahtlose Regelstrecke". Bachelorthesis. Apr. 2016.
- [96] Appel, M.: "Entwicklung einer Simulationsumgebung für Schedulingalgorithmen". Masterthesis (extern, Bosch). Apr. 2016.
- [97] Cake, A., Bayrak, S. und Eduardo, H.: "Drahtlose Konfiguration und Diagnose für regelungstechnische Anwendungen mit Android". Projektseminar. Sep. 2016.
- [98] Gaida, M.: "Parametrierung von Regelverfahren für einen Parallelroboter und Erweiterung einer GUI". Bachelorthesis. Okt. 2014.
- [99] Geweth, D., Hügle, C. und Revelo, S.: "Implementierung eines digitalen Mehrgrößenreglers mit funkbasierter Rückkopplung an einem Drei-Tank-System". Projektseminar. Sep. 2015.
- [100] Hellwig, S.: "Entwurf eines gegenüber Paketausfällen und variablen Übertragungstotzeiten robusten Gain-Scheduling-Reglers". Bachelorthesis. Apr. 2016.
- [101] Hörner, P. und Zheng, J.: "Implementierung eines digitalen Reglers mit Funkübertragungsstrecke am Drei-Tank-Versuchsstand". Projektseminar. März 2015.
- [102] Hüttl, F.: "Scheduling Algorithmen in Drahtlosnetzwerken". Proseminar. Juli 2016.
- [103] Klein, S. R.: "Ein Vergleich der Kommunikationsprotokolle WirelessHART und ISA100.11a". Proseminar. Jan. 2015.
- [104] Klein, S. R.: "Entwurf eines Visualisierungstools für Algorithmen von drahtlosen Kommunikationsnetzwerken". Bachelorthesis. Juli 2015.
- [105] Kneuper, D.: "Entwicklung eines Benutzerkonzepts sowie einer neuen Benutzeroberfläche für einen Parallelroboter". Bachelorthesis. Aug. 2016.
- [106] Koch, P.: "Entwurf einer Bibliothek für mechanische Komponenten mit drei Freiheitsgraden in OpenModelica". Masterthesis. Okt. 2014.
- [107] Kreutz, K.: "Entwurf eines diskreten Gain-Scheduling-Reglers unter Berücksichtigung von System und Übertragungstotzeiten". Bachelorthesis. Sep. 2015.

- [108] Lenz, J., Porschen, M., Weigand, F. und Ziegler, C.: "Regelkonzepte für Versuchsaufbauten in drahtlosen Netzwerken mit variablen Totzeiten und Paketausfällen". Projektseminar. Sep. 2016.
- [109] Li, Y. und Gu, Y.: "Aufbau einer Funkregelstrecke nach IEEE 802.15.4 zur Füllstandregelung an einem bestehenden Demonstrator". Projektseminar. Sep. 2014.
- [110] Lin, J.: "Entwurf und Implementierung eines Multiratenbeobachters mit drahtloser Rückkopplung für einen Anlagenprüfstand". Masterthesis. Nov. 2016.
- [111] Müller, C.: "Entwicklung einer Android App zur Konfiguration und Visualisierung in Bluetooth-Netzwerken am Beispiel eines Anlagenprüfstands". Bachelorthesis. Apr. 2017.
- [112] Müller, C.: "Netzwerktopologien und Kommunikationsstrukturen in Bluetooth-Netzwerken". Proseminar. Aug. 2016.
- [113] Müller, F.: "Implementierung und Test einer drahtlosen Kommunikation für eine Regelung an einem Drei-Tank-Versuchsstand". Bachelorthesis. Okt. 2016.
- [114] Müller, F.: "Verfahren zur Zeitsynchronisation in WirelessHART-Netzwerken". Proseminar. Jan. 2016.
- [115] Münch, K.: "Vergleich von Netzwerksimulatoren hinsichtlich der Simulation von drahtlosen Netzwerken". Proseminar. März 2017.
- [116] Petzoldt, D. R.: "Algorithmen zur Planung von Übertragungspfaden in vermaschten drahtlosen Netzwerken". Proseminar. Jan. 2016.
- [117] Petzoldt, D. R.: "Aufbau eines Moduls zur Übertragung von Strommesswerten mittels IEEE 802.15.4 sowie IEEE 802.15.1 Funkkommunikation". Bachelorthesis. Apr. 2017.
- [118] Piraban, N., Wegener, L., Kuntschar, A. und Eisenhauer, R.: "Umrüstung und Regelung eines Drei-Tank-Systems mit drahtloser Rückkopplung". Projektseminar. März 2016.
- [119] Qiu, B.: "Ein Vergleich der Kommunikationsprotokolle ZigBee und WirelessHART". Proseminar. Mai 2017.
- [120] Qiu, B.: "Untersuchung und Anpassung einer IEEE 802.15.4 Kommunikation zur Messwertübertragung im Regelkreis". Bachelorthesis. Dez. 2017.
- [121] Rafiie, N.: "Entwurf einer Fluidtechnischen Bibliothek für Modelica". Masterthesis. Dez. 2014.
- [122] Schmidberger, T.: "Untersuchung und Vergleich von Modellen zur Funkwellenausbreitung im 2,4 GHz Frequenzband". Proseminar. Okt. 2015.
- [123] Schuhmacher, L.: "Entwurf und Implementierung eins adaptivern Gain-Scheduling-Reglers f
  ür variable, drahtlose Multi-Hop-Netzwerke mit Paketausf
  ällen". Bachelorthesis. Nov. 2016.
- [124] Schuhmacher, L.: "Methoden und Softwaremodule zur Analyse und Auswertung des Datenverkehrs in drahtlosen Kommunikationsnetzwerken". Proseminar. Feb. 2016.
- [125] Schulze, S.: "Datenvisualisierung in drahtlosen Netzwerken". Bachelorarbeit. Feb. 2017.

- [126] Schulze, S.: "Objektorientierte Programmierung in der Automatisierungstechnik mit C#". Proseminar. Juli 2016.
- [127] Sun, B.: "Modellbildung des Strömungsverhaltens von Luft in pneumatischen Aktoren". Masterthesis (extern, SAMSON AG). Aug. 2014.
- [128] Tran, D. V.: "Entwicklung einer Simulationsumgebung für Scheduling-Algorithmen von Funknetzwerken". Masterthesis. Okt. 2015.
- [129] Umsonst, D.: "Security Analysis of Control System Anomaly Detectors". Masterthesis (extern, KTH Royal institute of technology, School of electrical engineering). 2016.

# Technische Unterlagen

In diesem Abschnitt werden alle für diese Arbeit relevanten technischen Dokumente aufgelistet.

- [130] Atmel: 8-bit AVR Microcontroller with Low Power 2.4GHz Transceiver for ZigBee and IEEE 802.15.4.
- [131] Björkbom, M., Nethi, S. und Kohtamäki, T.: *PiccSIM Manual Version 1.16 Toolchain Version 0.81*. Wireless Sensor Systems group School of Electrical Engineering Aalto University. Dez. 2013.
- [132] Cypress Semiconductor Corp.: CY8CKIT-042-BLE QUICK START GUIDE -BLUETOOTH LOW ENERGY PIONEER KIT.
- [133] dresden elektronik: deRFnode for AVR and ARM based radio modules Datasheet.
- [134] dresden elektronik: Funkmodule deRFmega256, 23M00 | 23M10 Datenblatt.
- [135] Endress+Hauser: Betriebsanleitung WirelessHART Adapter SWA70 Intelligentes Funkmodul mit Spannungsversorgung für Feldgeräte.
- [136] Endress+Hauser: Technical Information WirelessHART Adapter SWA70.
- [137] Endress+Hauser: Technical Information WirelessHART-Fieldgate SWG70.
- [138] Fall, K. und Varadhan, K.: *The ns Manual*. UC Berkeley, LBL, USC/ISI und Xerox PARC. Nov. 2011.
- [139] NORDIC SEMICONDUCTOR: nRF52832 Product Specification v1.0.
- [140] NORDIC SEMICONDUCTOR: nRF52840 Objective Product Specification v0.5.
- [141] PEPPERL+FUCHS: Manual WHA-GW-F2D2-0-AB-Z2-ETH.EIP WirelessHART Gateway.
- [142] Softing AG: WirelessHART Module WD-H WD-H Das WirelessHART-Module für die Prozessautomatisierung.
- [143] VEGA: Produktinformation, Druckmessumformer VEGABAR 81. 2016.
- [144] Zand, P., Dilo, A. und Havinga, P.: WirelessHART commands lookup table. interner Bericht. Pervasive Systems Group, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics und Computer Science, University of Twente, Netherlands. 2014.

# Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name	Thomas Stein
Nationalität	deutsch

### Schulausbildung

1991–1995	Grundschule (Erich Kästner-Grundschule, Alzenau)
1995–1997	Hauptschule (Karl-Amberg-Mittelschule, Alzenau)
1997–2001	Wirtschaftsschule (Paul-Gerhardt-Schule, Kahl)
2005–2007	Berufliche Oberschule (FOSBOS, Aschaffenburg)

### **Berufliche Ausbildung**

2001–2004	Fachausbildung zum Mechatroniker bei der Industriepark Wolfgang GmbH (Hanau Wolfgang)
Hochschulausbil	dung
2007–2013	Studium der Mechatronik an der Technischen Universität Darmstadt, Vertiefungsrichtung Simulation and Control of Mechatronic Systems
Berufstätigkeit	
2004–2005	Instandhalter bei der Bodycote Wärmebehandlung GmbH, Langenselbold
2013–2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- technik der TU Darmstadt bei Prof. DrIng. Ulrich Konigorski	