

Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Lisa Underberg

**Hybrid Wired-Wireless
Communication Networks
for Factory Automation**

Hybrid Wired-Wireless Communication Networks for Factory Automation

von der Fakultät
für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Lisa Underberg

Dortmund, 2019

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2019

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Korreferent: Prof. Dr.-Ing Rolf Kraemer

Dortmunder Beiträge zur Kommunikationstechnik

Band 16

Lisa Underberg

**Hybrid Wired-Wireless Communication Networks
for Factory Automation**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7207-5

ISSN 1863-9054

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Kommunikationstechnik der Technischen Universität Dortmund.

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays, Inhaber des Lehrstuhls, für die Ermöglichung und Betreuung dieser Arbeit. Durch seine fachlichen Hinweise und seinen menschlichen Rat hat er in vielen Diskussionen nicht nur zum Gelingen dieser Arbeit, sondern ebenso zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Kraemer, Inhaber des Lehrstuhls Systeme des Instituts für Informatik an der BTU Cottbus-Senftenberg und Abteilungsleiter System Design des Leibniz-Instituts für innovative Mikroelektronik (IHP) in Frankfurt (Oder), für das Interesse an dieser Arbeit, hilfreiche Kommentare und die Übernahme des Korreferats.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Kolleginnen und Kollegen sowie Studierenden für ihr Engagement, ihre Hilfsbereitschaft und ein wunderbares Arbeitsklima. Sie alle standen mir stets mit Humor und Rat zur Seite und haben so meine Zeit am Lehrstuhl unvergesslich gemacht. Ebenso danke ich Projektkolleginnen und -kollegen aus Industrie und Forschung für die fachlich übergreifende Diskussion meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinem Mann Stephan für Geduld, Unterstützung und Zuversicht. Zudem danke ich Freunden und Familie für Motivation und Rückhalt.

Dortmund, im Januar 2020

Lisa Underberg

Contents

Abstract	ix
1 Introduction	1
2 Industrial Applications and their Requirements	5
2.1 The Automation Pyramid	6
2.2 Diversity within the Field Level	7
2.3 Diversity within Factory Automation	13
2.4 Summary	13
3 Industrial Communication Technologies	17
3.1 Industrial Ethernet-based Networks	17
3.1.1 Physical and Logical IEN Topology	18
3.1.2 IEN State Diagram	19
3.1.3 IEN Cycle and Summation Telegrams	22
3.2 Wireless Industrial Communication	27
3.2.1 Related to IEEE 802.15.1	27
3.2.2 Related to IEEE 802.15.4	28
3.2.3 Related to IEEE 802.11	29
3.2.4 5th Generation New Radio	31
3.2.5 Other Medium Access Protocols	34
3.3 Summary	35
4 Hybrid Wired-Wireless Networks	37
4.1 Generic Topology of Hybrid Wired-Wireless Networks	37
4.2 Gateway Approaches: Tunnel and Proxy	39
4.3 Mandatory Properties of Industrial Communication Networks	40
4.4 Clock Synchronization in Distributed Systems	43
4.5 Suitability of Existing Wireless Industrial Communication Networks	45
4.6 Optimized Design of an Intermediate Wireless Network	46
4.6.1 Intermediate Wireless Network's Design Choices	47
4.6.2 Recommendation for Intermediate Wireless Network Design	50
5 Novel PHY Approach: Parallel Sequence Spread Spectrum	53
5.1 Basic Principle of PSSS	54
5.2 PSSS Parameter Set Options	57

5.3	Related Work	59
5.4	Simulation Setup	60
5.5	PSSS PHY Performance in AWGN Channels	61
5.5.1	PSSS BER with exact synchronization	61
5.5.2	Iterative Symbol Detection in a PSSS system	66
5.5.3	PSSS BER with temporal misalignment	68
5.5.4	Iterative Symbol Detection Gain	73
5.6	PSSS PHY Performance in Fading Channels	75
5.7	Summary	79
6	Data Link Layer for Intermediate Wireless Network	81
6.1	Resource Allocation in Intermediate Wireless Network	81
6.1.1	Multiple Access Options in Two Domains	82
6.1.2	Multiple Access Recommendation	89
6.1.3	Optimized Resource Allocation in Cascaded Hybrid Networks	90
6.2	Constraints and Tasks of the Data Link Layer	95
6.2.1	State Diagram of Hybrid Wired-Wireless Network	95
6.2.2	Gateway Concept and Data Processing	97
6.2.3	DLL-IEN Interface	100
6.2.4	DLL Control Channel Concept	103
6.2.5	DLL Protocol and Sequence Charts	105
6.3	Summary	108
7	Performance Evaluation	109
7.1	Security Module and FEC Configuration	109
7.2	Intermediate Wireless Network PHY Parametrization	112
7.2.1	PHY Parameter Set	112
7.2.2	PHY Frame Structure	116
7.2.3	PHY and DLL Overhead Evaluation	118
7.2.4	PHY Coexistence Challenges	120
7.3	Selected FA Scenario: Bottle Filling Machine	121
7.3.1	Bottle Filling Scenario Description	121
7.3.2	PHY Utilization in Bottle Filling Scenario	124
7.3.3	Coverage Range Estimation	124
7.4	Summary	130
8	Conclusion	131
	List of Abbreviations	137
	List of Symbols	143
	Bibliography	153

Author's publications	167
A DCC Command Payload Specification	171
B Additional Intermediate Wireless Network Sequence Charts	173
Curriculum Vitae	177