

Frequenzmanagement für die Bereitstellung von dynamischen TV White Spaces

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Piotr Palka
aus Szczecin

Eingereicht am: 05.04.2016

Mündliche Prüfung am: 12.01.2017

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Schöbel
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner

Druckjahr: 2017

Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik

this is white space

Mitteilungen aus dem Institut für Nachrichtentechnik der
Technischen Universität Braunschweig

Band 52

Piotr Palka

**Frequenzmanagement für die Bereitstellung
von dynamischen TV White Spaces**

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5368-5

ISSN 1865-2484

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner wissenschaftlichen Mitarbeit am Institut für Nachrichtentechnik (IfN) der Technischen Universität Braunschweig. Sie ist nicht nur auf meine eigene ca. fünf Jahre dauernde Forschung zurückzuführen, sondern ist vor allem das Resultat einer engen Zusammenarbeit mit Professoren, Kollegen, Projektpartnern und Studierenden.

Das Forschungsprojekt „Dynamic Broadcast“ wurde von meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers ins Leben gerufen. Nachdem er bereits maßgeblich an der Entwicklung und Einführung des digitalen Fernsehens beteiligt war, sollte nun die nächste große „Broadcast-Revolution“ beginnen. Um sein anfängliches Konzept eines dynamischen Rundfunksystems auszubauen, stellte er drei wissenschaftliche Mitarbeiter ein: Junge Qi, Peter Neumann und mich. Mittlerweile haben alle auf ihrem jeweiligen Spezialgebiet promoviert. Ich danke Prof. Reimers für die ausgezeichnete fachliche Betreuung, sein Vertrauen und sein Bemühen, den besonderen „Spirit“ des Instituts stets aufrecht zu erhalten.

Mit meiner Zeit am IfN verbinde ich nicht nur die Forschung, sondern auch eine ganze Menge abwechslungsreicher und schöner Momente. Kollegen wurden zu Freunden, begleiteten mich in dieser Lebensphase und begleiten mich auch heute noch. Dafür möchte ich Euch danken (in alphabetischer Reihenfolge): Samy Elshamy, Alexander Fricke, Daniel Gast, Thomas Jansen, Marc-André Jung, Peter Neumann, Jörg Nuckelt, Moritz Schack, David Scheler, Jan Zöllner.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie für ihre Unterstützung. Mein ganz besonderer Dank gilt Constanze Abeltshauer, weil sie eine wundervolle Frau ist und weil sie mich in den heißen Phasen meiner Arbeit so verständnisvoll entlastet hat.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 - Einleitung	1
1.1 Zielsetzungen und Methoden	3
1.2 Struktur der Arbeit	4
Kapitel 2 - Frequenzplanung in klassischen Broadcast-Netzen	5
2.1 Regulierung des Broadcast-Spektrums	6
2.2 Grundlagen der Frequenzplanung in Broadcast-Netzen	8
2.2.1 Die Technik des digital-terrestrischen Fernsehens	8
2.2.2 Frequenzplanung in Single Frequency Networks	9
2.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der Frequenznutzung im terrestrischen TV-Spektrum	11
Kapitel 3 - TV White Spaces	15
3.1 Grundlagen der TV White Spaces	16
3.1.1 Definitionen	17
3.1.2 Überblick über die Regulierung von TV White Spaces	20
3.1.3 Abschätzungen zur Verfügbarkeit von TV White Spaces	21
3.2 Methoden für Dynamic Spectrum Access	23
3.2.1 Cognitive Radio	24
3.2.2 Spectrum Sensing	24
3.2.3 TV-White-Space-Datenbanken	26
3.2.4 Überblick über die Standardisierung von White-Space- Systemen	31
3.3 Technische Systeme für die Nutzung von TV White Spaces	32

3.3.1	Auswahl eines Kandidaten-Systems für die Evaluation	32
3.3.2	Systemspezifische Eigenschaften des Kandidaten-Systems	34
3.3.3	Nutzungsspezifische Eigenschaften des Kandidaten-Systems	36
Kapitel 4	- Entwicklung eines Maßes für die Nutzbarkeit von TV White Spaces	39
4.1	Herleitung eines Nutzbarkeitsmaßes	40
4.1.1	Festlegung einer Referenz-Geometrie für die Kommunikation zwischen White Space Devices.....	40
4.1.2	Der Effekt kumulierter Interferenzen auf Broadcast-Empfänger ...	42
4.1.3	Skalierungseffekte bei hohen WSD-Dichten	43
4.2	Definition der Nutzbarkeit von TV White Spaces	46
4.2.1	Berechnung der Nutzbarkeit ohne systemspezifische Randbedingungen.....	47
4.2.2	Berechnung der Nutzbarkeit unter systemspezifischen Randbedingungen.....	48
Kapitel 5	- Dynamic Broadcast.....	51
5.1	Systemüberblick	53
5.1.1	Broadcaster.....	54
5.1.2	User Terminal.....	54
5.1.3	Decision Logic	55
5.1.4	Packaging of Media Content.....	56
5.1.5	Multiplexing and Content Distribution	56
5.1.6	Joint Control of Transmission Parameters	57
5.1.7	Monitoring and Signalling	58
5.1.8	Dynamic White Space Database	58
5.2	Dynamische Konfiguration des Übertragungssystems.....	59
5.3	Bereitstellung von dynamischen TV White Spaces	61
5.3.1	Möglichkeiten der Bereitstellung dynamischer TV White Spaces.....	63
5.3.2	Vergleich zwischen statischen und dynamischen TV White Spaces.....	63
Kapitel 6	- Optimierung der Nutzbarkeit von TV White Spaces in Dynamic- Broadcast-Netzen	65
6.1	Systematische Klassifizierung der Optimierungsansätze.....	66

6.2	Optimierung in der Frequenzdimension	66
6.2.1	Optimierung der Frequenzbelegung.....	67
6.2.2	Berücksichtigung von WSD-Mindest-Bandbreiten	68
6.2.3	Ansätze für die Optimierung	68
6.3	Optimierung in der Ortsdimension.....	69
6.3.1	Die makroskopische Sicht.....	69
6.3.2	Die mikroskopische Sicht	70
6.3.3	Ansätze für die Optimierung.....	71
6.4	Optimierung in der Leistungsdimension	72
6.4.1	Variante 1: Reduktion der TV-Sendeleistung	73
6.4.2	Variante 2: Erhöhung der WSD-Sendeleistung	74
6.4.3	Ansätze für die Optimierung.....	74
6.5	Optimierung in der Zeitdimension	75
6.5.1	Methode der zeitlichen Entzerrung	77
6.5.2	Untersuchung des Frequenzbedarfsverlaufs über der Zeit.....	81
6.5.3	Ansätze für die Optimierung.....	83
Kapitel 7 - Simulationsumgebung zur Analyse der Nutzbarkeit von dynamischen TV White Spaces		85
7.1	Prädiktion der TV-Versorgung durch Computer-Simulationen.....	86
7.1.1	Basisdaten und Versorgungsplanung	86
7.1.2	Berechnung der Ausbreitungsverluste und Empfangspegel	87
7.1.3	Bestimmung der TV-Versorgungsgebiete und Validierung der Prädiktionsergebnisse.....	89
7.2	Identifikation von potenziellen TV White Spaces	92
7.2.1	Nachbearbeitung der TV-Versorgungskarten	92
7.2.2	Berechnung der maximal zulässigen Sendeleistung des Kandidaten-Systems.....	93
7.3	Berechnung der Nutzbarkeit von TV White Spaces	97
7.3.1	Das WSD-Kommunikationsmodell	98
7.3.2	Berechnung lokaler WSD-Dichten	99
7.3.3	Darstellung der Ergebnisse	100
7.4	Evaluationsszenarien	101
7.4.1	Das Essen-Szenario	103

7.4.2 Das Uetze-Szenario	103
Kapitel 8 - Ergebnisse der Analyse und Optimierung der Nutzbarkeit von TV White Spaces	107
8.1 Analyse des statischen Falls	108
8.2 Optimierung in der Frequenzdimension	110
8.2.1 WSD-Bandbreitenanforderungen	111
8.2.2 Optimierte Ausschaltung von TV-Multiplexen	112
8.3 Optimierung in der Ortsdimension	116
8.3.1 Vergleich unterschiedlicher Standorte	116
8.3.2 Einfluss weit entfernter TV-Sendernetze	118
8.3.3 Anpassung der TV-Servicekontur	121
8.4 Optimierung in der Leistungsdimension	123
8.5 Optimierung in der Zeitdimension	126
8.5.1 Ausgangslage vor der Anwendung einer zeitlichen Entzerrung ...	127
8.5.2 Zeitabhängige Frequenzbelegung in Dynamic-Broadcast- Netzen	128
8.5.3 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	132
8.6 Vorschlag einer optimierten Bereitstellung von dynamischen TV White Spaces	133
Kapitel 9 - Zusammenfassung	137
9.1 Ergebnisse	137
9.2 Ausblick	139
Abkürzungsverzeichnis	141
Symbolverzeichnis	145
Literaturverzeichnis	148