



Fabian Welsch

Digitaler Hörfunk: Lokale Datendienste in DAB+-Gleichwellennetzen



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik

Digitaler Hörfunk: Lokale Datendienste in DAB+-Gleichwellennetzen

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
Fabian Welsch, M.Sc.
aus Hildesheim

eingereicht am: 28.10.2022
mündliche Prüfung am: 24.03.2023

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers
Technische Universität Braunschweig
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Robert
Technische Universität Ilmenau
Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner
Technische Universität Braunschweig

Druckjahr: 2024

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

Mitteilungen aus dem Institut für Nachrichtentechnik der
Technischen Universität Braunschweig

Band 80

Fabian Welsch

**Digitaler Hörfunk:
Lokale Datendienste in DAB+-Gleichwellennetzen**

Shaker Verlag
Düren 2024

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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9336-0

ISSN 1865-2484

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

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Braunschweig. Grundlegende Teile dieser Arbeit entstanden durch meine Aktivität im Rahmen eines Projektvorhabens mit der *Niedersächsischen Landesmedienanstalt* gefördert durch das *Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur*.

Besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers aussprechen. Seine fachliche Beratung, vertrauensvolle persönliche Betreuung und Ratschläge darüber hinaus haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ich danke zudem Prof. Dr.-Ing. Jörg Robert für die Übernahme des Koreferats und Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Mein Dank richtet sich außerdem an alle Kollegen und Kolleginnen des Instituts für Nachrichtentechnik. Die gemeinsame Zeit wird mir nicht nur wegen des fachlichen Austauschs im Gedächtnis bleiben, sondern auch aufgrund des äußerst sozialen Miteinanders gekrönt durch zahlreiche gemeinsame Aktivitäten.

Den Abteilungskollegen danke ich für die gemeinsame Arbeit an dem *IfN Generic SDR Toolkit*, das intensiv für die Untersuchungen in dieser Arbeit genutzt wurde. Bedanken möchte ich mich auch bei Jonas von Beöczy, Stefan Ilsen, Florian Jackisch und Lucca Richter für die Durchsicht der Arbeit.

Besonderer Dank gilt meiner Familie. Auf die Unterstützung meiner Eltern konnte ich mich jederzeit verlassen. Mein herzlicher Dank gilt meiner Frau Cora und meinen Kindern Harry und Lewis für das Verständnis, das sie während der Abende und Wochenenden aufgebracht haben, an denen ich die Arbeit angefertigt habe.

Braunschweig, April 2023

Fabian Welsch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hörfunkübertragung mittels DAB+	3
2.1	Übertragungskanäle beim mobilen Empfang	3
2.1.1	AWGN-Kanalmodell	3
2.1.2	Mobiler Mehrwegeempfang	4
2.2	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	5
2.3	Übertragung im Gleichwellennetz	5
2.4	Differentielle Modulation	6
2.4.1	Differentielle Detektion	7
2.5	Kanalcodierung	8
2.6	Rahmenstruktur	9
2.6.1	Synchronisation Channel	10
2.6.2	Fast Information Channel	10
2.6.3	Main Service Channel	11
2.7	Interleaving	11
2.8	Audiocodec	12
3	Ansätze zur Integration von lokalen Datendiensten	13
3.1	Service Multiplexing und dessen Anwendung bei DAB+	13
3.1.1	Raummultiplex	14
3.1.2	Frequenzmultiplex	14
3.1.3	Zeitmultiplex	15
3.1.4	DAB-Ressourcenallokation	16
3.2	Ansätze und deren Nutzbarkeit bei DAB+	16
3.2.1	Dynamische Rekonfiguration und Parallelausstrahlung	17
3.2.2	Überlagerung unterschiedlicher Signale	20
3.2.3	Nutzung der Schutzbänder	22
3.2.4	Orthogonale Subträger und Sendermuting	24
3.2.5	Hybridempfänger mit Seitenkanal	26
3.2.6	Layered Division Multiplexing und Hierarchische Modulation	27
3.2.7	Future Extension Frames	29
3.3	Bewertung der Ansätze	30
4	Vorschlag zur Umsetzung lokaler Dienste in DAB+-Gleichwellennetzen	33
4.1	Entscheidungskriterien zur Varianten-Auswahl	33
4.2	Systemvorschlag basierend auf der Überlagerung unterschiedlicher Signale	34
4.2.1	Positionierung der lokalen Daten im Übertragungsrahmen	35
4.2.2	Signalisierung der lokalen Datendienste im FIC	37
4.2.3	Optionen zum Erzielen einer lückenlosen Programmabdeckung	39

4.2.4	Sender-Zuführung	41
5	Evaluation des Vorschlags und möglicher Alternativen	43
5.1	Auswirkung Interferenz betroffener DQPSK-Referenzen	43
5.1.1	SFN-konformes Nachfolgesymbol	43
5.1.2	Nachfolgesymbol mit lokalen Servicedaten	44
5.2	Analyse mittels Simulation	46
5.2.1	Simulationsumgebung	46
5.2.2	Simulationsmodell	46
5.2.3	Leistungsfähigkeit des SFN-weiten Services	48
5.2.4	Leistungsfähigkeit des Lokalprogramms	52
5.2.5	Versorgungsabschätzung der lokalen Services	58
5.3	Vergrößerung des Versorgungsgebiets mittels Sendermuting	64
5.4	Benötigte Multiplexkapazität zum Einbringen lokaler Datendienste	66
6	Untersuchung mittels Feldmessungen	71
6.1	Das Sendernetzwerk	71
6.1.1	Realisierung der Sender	72
6.1.2	Multiplexkonfiguration	74
6.2	Realisierung des Messempfängers	75
6.3	Messergebnisse	76
6.3.1	SNR und SINR	76
6.3.2	Abdeckung der Lokalprogramme	79
6.3.3	Abdeckung der Lokalprogramme mit Sendermuting-Variante	81
6.3.4	Bitfehlerrate	82
6.3.5	Auswirkung des Phasenreferenzsymbols	84
6.4	Diskussion	87
7	Untersuchung verschiedener Empfängerarchitekturen	89
7.1	Antennendiversität mit zwei Antennen ohne Interferenzberücksichtigung	89
7.1.1	Empfängerarchitektur	89
7.1.2	Simulationsergebnisse	90
7.1.3	Feldversuchsergebnisse	92
7.1.4	Diskussion	95
7.2	Empfänger mit Interferenzberücksichtigung	95
7.2.1	Empfängerarchitektur	96
7.2.2	Simulationsergebnisse	97
7.2.3	Feldversuchsergebnisse	99
7.2.4	Diskussion	102
7.3	Iterative Kanalverzerrung und Decodierung	102
7.3.1	Empfängerarchitektur	103
7.3.2	Simulationsergebnisse	105
7.3.3	Feldversuchsergebnisse	110
7.3.4	Diskussion	112
8	Zusammenfassung und Ausblick	115

A Anhang	117
A.1 Link Budget der Ausbreitungssimulation	117
A.2 SNR-Karte der Feldmessungen in Braunschweig	118
A.3 Empfangsgebiete mit Interferenz berücksichtigendem Empfänger	119
Abkürzungsverzeichnis	121
Symbolverzeichnis	123
Literaturverzeichnis	125
Veröffentlichungen und Vorträge des Autors	133
Vom Autor betreute studentische Arbeiten	135