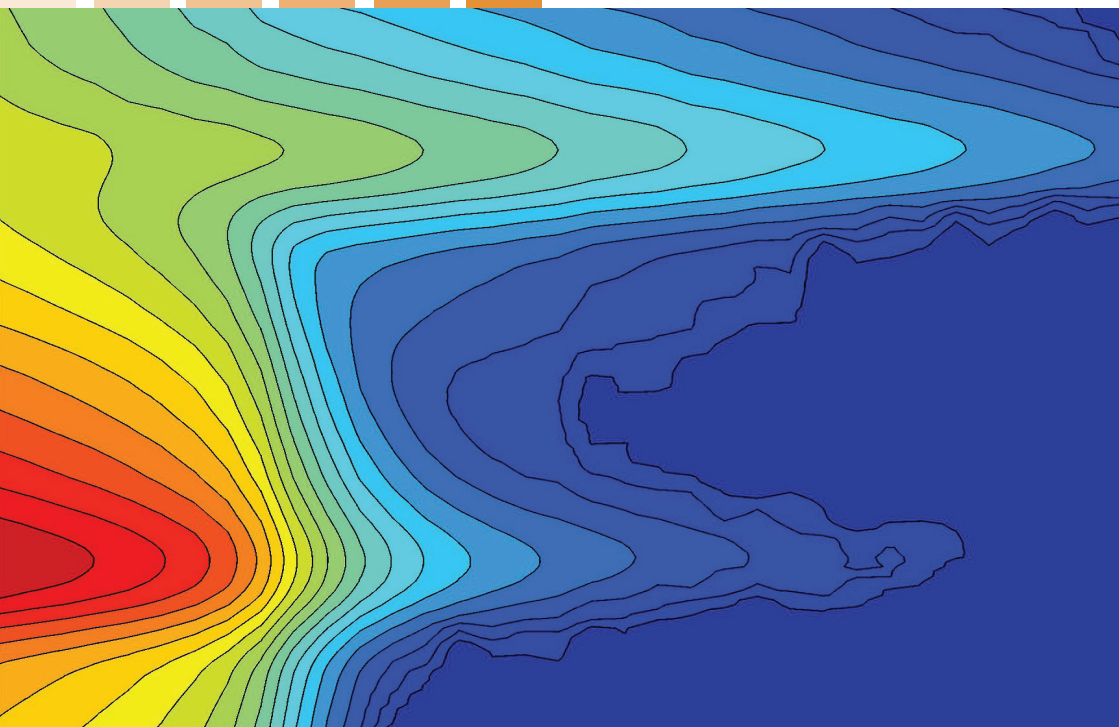


Theoretische und experimentelle
Untersuchungen zu Signalisierungs- und
Überwachungsverfahren für faseroptische
Zugangsnetze der nächsten Generation

Sebastian Gäde



Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu Signalisierungs- und Überwachungsverfahren für faseroptische Zugangsnetze der nächsten Generation

Von der Fakultät für Elektrotechnik
der Helmut-Schmidt-Universität/ Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Sebastian Gäde
aus Itzehoe

Hamburg 2018

Gutachter: Univ. Prof. Dr.-Ing. Christian G. Schäffer
(Helmut-Schmidt-Universität/
Universität der Bundeswehr Hamburg)

Prof. Dr. em. Ernst Brinkmeyer
(Technische Universität Hamburg-Harburg)

Tag der mündlichen Prüfung: 26.01.2018

Berichte aus der Kommunikationstechnik

Sebastian Gäde

**Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu
Signalisierungs- und Überwachungsverfahren für
faseroptische Zugangsnetze der nächsten Generation**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6166-6

ISSN 0945-0823

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

»» *We must not forget that when radium was discovered no one knew that it would prove useful in hospitals. The work was one of pure science. And this is a proof that scientific work must not be considered from the point of view of the direct usefulness of it. It must be done for itself, for the beauty of science, and then there is always the chance that a scientific discovery may become like the radium a benefit for humanity.* ‹‹

Marie Curie, 1921

Vorwort

Ich danke Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Christian Schäffer für die Betreuung meiner Arbeit, für die vielen Anregungen und die zahlreichen fachlichen Diskussionen. Ich bedanke mich außerdem bei Herrn Prof. Dr. em. Ernst Brinkmeyer für die Übernahme des Zweitgutachtens und dafür, dass er überhaupt erst mein Interesse für das spannende Feld der optischen Kommunikationstechnik während meines Studiums an der Technischen Universität Hamburg-Harburg geweckt hat.

In mindestens gleichem Maße möchte ich mich bei allen Kollegen des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik für ihre Hilfe und Unterstützung bedanken. Besonders hervorheben möchte ich dabei das Engagement von Reinhold Herschel und Anshu Gupta, die zu jeder Zeit ein offenes Ohr für Diskussionen hatten und wichtige Denkanstöße lieferten. Besonderer Dank gilt außerdem allen Studenten, die mich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl durch ihre Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten unterstützt haben, wobei ich hierbei insbesondere die erfolgreiche Zusammenarbeit mit Marcel Jastram herausstellen möchte.

Außerdem danke ich meiner Familie für den stetigen Zuspruch, den un-nachgiebigen Rückhalt und die aufgebrauchte Geduld sowie meinen Freunden für die vielen ausgleichenden Momente.

München, im Juni 2018

Sebastian Gäde

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2	Faseroptische Zugangsnetze	9
2.1	Evolution faseroptischer Netze	9
2.2	Zugangsnetzwerke der nächsten Generation	11
2.3	Monitoring in faseroptischen Netzen	15
2.4	Ursachen für Netzstörungen	16
2.5	Signalisierung in optischen Zugangsnetzen	18
2.6	Stand der Technik	20
3	Faseroptische Netze als Messobjekt	23
3.1	Eigenschaften der Singlemode-Faser	23
3.1.1	Intrinsische Verlustmechanismen	24
3.1.2	Extrinsische Verlustmechanismen	41
3.1.3	Fresnelreflexionen	43
3.1.4	Polarisationseigenschaften	47
3.2	Eigenschaften des Zugangsnetzes	54
3.2.1	Einfluss der Netzarchitektur	54
3.2.2	Punkt- zu Multipunkt-Problem	58
3.2.3	Einsatz optischer Verstärker in PONs	60
3.3	Anforderungen an das Monitoringsystem	60
4	Optische Monitoringverfahren	63
4.1	Ortsaufgelöste reflektometrische Messungen	63
4.2	Optische Zeitbereichsreflektometrie	67
4.3	Optische Frequenzbereichsreflektometrie	73
4.3.1	Allgemeines Messprinzip	75

4.3.2	Zusammenhang des frequenzmodulierten Eingangssignals mit der Autokorrelationsfunktion	77
4.3.3	Eigenschaften der Frequenzmodulationsfunktion	78
4.3.4	Modulation mit linearem Chirp	79
4.3.5	Einfluss der Sendeeinheit	88
4.4	Optisches Korrelationsmonitoring	96
4.4.1	Allgemeines Messprinzip	98
4.4.2	Einfluss einer endlichen Pulsfolge	100
4.5	Vergleich der Verfahren	102
5	Monitoringkonzepte und experimentelle Ergebnisse	103
5.1	Charakterisierung des Übertragungskanals	103
5.1.1	Rayleigh-Rückstreuung	103
5.1.2	Stimulierte Brillouin-Streuung	105
5.2	Charakterisierung der Laserquelle	112
5.2.1	Bestimmung des optimalen Arbeitspunktes	112
5.2.2	Analyse des Chirpverhaltens	113
5.3	Konventionelles optisches FMCW	119
5.4	Optisches FMCW mit variabler Chirprate	124
5.4.1	Experimentelle Ergebnisse	129
5.5	Optisches FMCW mit Auslöschung von Phasenrauschen	131
5.5.1	Experimentelle Ergebnisse	134
5.6	Unterscheidbarkeit äquidistanter Reflexionen	146
5.6.1	Messung ortsabhängiger PDL	151
5.6.2	Experimentelle Ergebnisse	153
5.7	Korrelationsmonitoring in rekonfigurierbaren Netzen	156
5.7.1	Experimentelle Ergebnisse	158
6	Feldversuche im Testnetzwerk	163
6.1	Charakteristik des Testnetzes	163
6.2	Optisches FMCW mit variabler Chirprate	164
6.3	Optisches FMCW mit Auslöschung von Phasenrauschen	167
6.4	Unterscheidbarkeit äquidistanter Reflexionen	169
7	Signalisierung in faseroptischen Zugangsnetzen	173
7.1	Signalisierung basierend auf der Auswertung der Chirpsteigung	174
7.2	Aufbau und experimentelle Ergebnisse	176
7.2.1	Detektion der binären Chirpsteigung	177

7.2.2	Detektion der mehrstufigen Chirpsteigung	180
8	Zusammenfassung und Ausblick	183
	Anhang	189
A	Allgemeiner Ausdruck für die Beatfrequenz	191
B	Amplitudenänderung	193
C	Geisterreflexionen	195
D	Bestimmung polarisationsabhängiger Verluste	199
E	Komponentenliste	203
	Abkürzungsverzeichnis	209
	Symbolverzeichnis	213
	Literaturverzeichnis	221
	Eigene Publikationen	233
	Lebenslauf	235