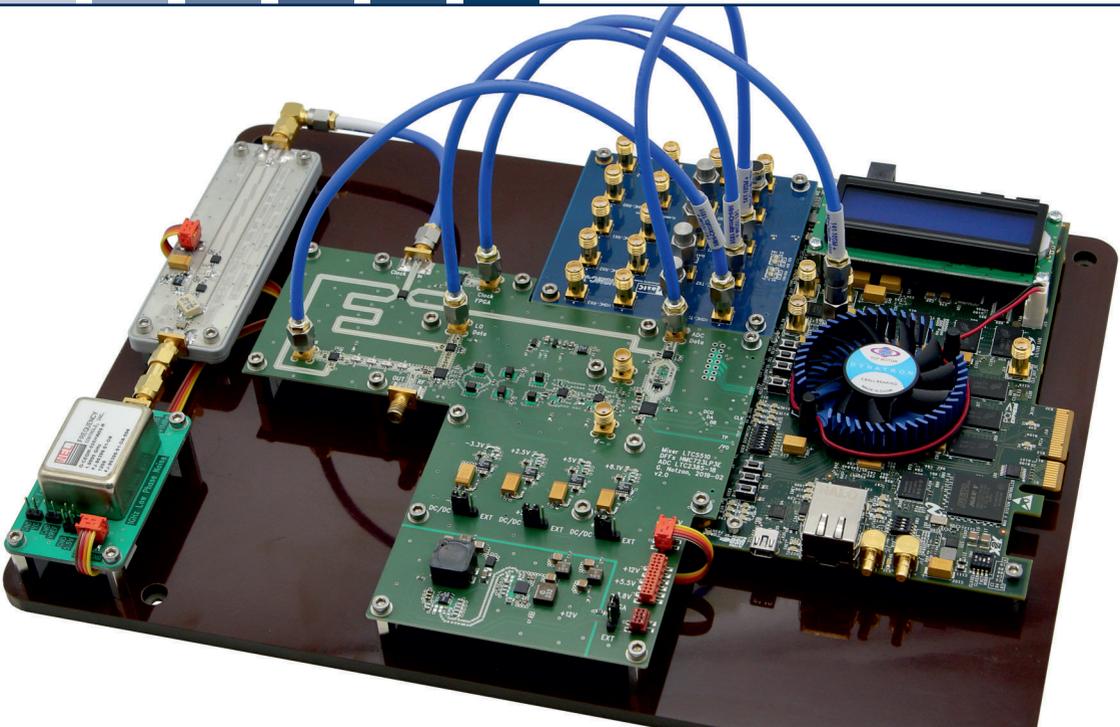


# Breitbandiges Zeitbereichsreflektometrie-System auf Basis binär codierter Signale

Gordon Notzon



# **Breitbandiges Zeitbereichsreflektometrie-System auf Basis binär codierter Signale**

**Dissertation**

**zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs  
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
an der Ruhr-Universität Bochum**

**von**

**Gordon Notzon**

**aus Hamm**

**2021**

**Tag der Einreichung**

**28.04.2021**

**Tag der mündlichen Prüfung**

**19.11.2021**

**Berichter**

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Musch**

**Prof. Dr.-Ing. Michael Vogt**



Berichte aus der Hochfrequenztechnik

**Gordon Notzon**

**Breitbandiges Zeitbereichsreflektometrie-System  
auf Basis binär codierter Signale**

Shaker Verlag  
Düren 2022

**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.: Bochum, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8598-3

ISSN 0945-0793

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ziel und Gliederung der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Systemkonzept</b>	<b>5</b>
2.1	Zeitbereichsreflektometrie . . . . .	5
2.1.1	Kenngrößen . . . . .	6
2.1.2	Reflexionsmessung . . . . .	9
2.1.3	Optimaler Empfänger im Fall von AWGN . . . . .	11
2.1.4	Korrelator . . . . .	15
2.2	Binär codierte Signale . . . . .	17
2.2.1	Signalbeschreibung und Signalanforderungen . . . . .	18
2.2.2	Geeignete Binärsequenzen . . . . .	21
2.2.3	Autokorrelationsfunktion und Leistungsdichtespektrum . . . . .	23
2.3	Übersicht Korrelatoren . . . . .	25
2.3.1	Digitaler Korrelator . . . . .	25
2.3.2	Analoger Schritt-Korrelator . . . . .	27
2.3.3	Analoger Schiebe-Korrelator . . . . .	30
2.4	Ein hybrider Korrelator . . . . .	33
2.5	Signalverarbeitung . . . . .	38
2.6	Kapitelzusammenfassung . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Systemfehlerbetrachtung</b>	<b>43</b>
3.1	Additives Rauschen . . . . .	43
3.1.1	Frequenzabhängiges additives Rauschen . . . . .	44
3.1.2	Einfluss auf die Messpräzision . . . . .	48
3.2	Deterministische Störungen . . . . .	50
3.2.1	Einfluss von Nebenmaxima auf die Messrichtigkeit . . . . .	50
3.2.2	Deterministische Störungen des Taktsignals . . . . .	52

3.3	Phasenrauschen . . . . .	64
3.3.1	Konstantes Phasenrauschen . . . . .	64
3.3.2	Frequenzabhängiges Phasenrauschen . . . . .	70
3.4	Nichtlinearitäten . . . . .	73
3.5	Filter und Abtastrate des ADU . . . . .	79
3.5.1	HF-Tiefpassfilter . . . . .	79
3.5.2	NF-Tiefpassfilter . . . . .	80
3.5.3	Abtastrate des ADU . . . . .	82
3.5.4	Hochpassfilter . . . . .	83
3.6	Kapitelzusammenfassung . . . . .	85
<b>4</b>	<b>Realisierung eines Messsystems</b>	<b>87</b>
4.1	Übersicht . . . . .	87
4.2	Binärsignalgenerator . . . . .	90
4.2.1	FPGA-System . . . . .	90
4.2.2	Algorithmen zur Anregungs- und Referenzsignalgenerierung	94
4.3	Taktgenerator . . . . .	97
4.4	Transceiver . . . . .	100
4.5	Kapitelzusammenfassung . . . . .	105
<b>5</b>	<b>Messtechnische Validierung des realisierten Messsystems</b>	<b>107</b>
5.1	Einzelkomponenten . . . . .	107
5.1.1	Binärsignalgenerator . . . . .	107
5.1.2	Taktgenerator . . . . .	109
5.1.3	Transceiver . . . . .	111
5.2	Gesamtsystem . . . . .	116
5.2.1	Hybrider Korrelator . . . . .	116
5.2.2	Identifikation und Korrektur linearer Verzerrungen . . . . .	117
5.2.3	Dynamikbereich . . . . .	119
5.2.4	Messpräzision . . . . .	123
5.2.5	Messrichtigkeit . . . . .	125
5.3	Kapitelzusammenfassung . . . . .	129
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>135</b>
A.1	Mathematische Zusammenhänge . . . . .	135

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>147</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>149</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>155</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>159</b>
<b>Algorithmenverzeichnis</b>	<b>161</b>
<b>Danksagung</b>	<b>163</b>