

# **Funksignalanalyse**

Von Priv.-Doz. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Jondral  
TELEFUNKEN SYSTEMTECHNIK GMBH, Ulm

Mit 106 Abbildungen und 5 Tabellen



**B. G. Teubner Stuttgart 1991**

Priv.-Doz. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Jondral

Jahrgang 1950. 1970–1975 Studium der Mathematik mit dem Nebenfach Physik. 1975–1979 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Angewandte Mathematik der Technischen Universität Braunschweig, im Wintersemester 1977/78 Forschungsaufenthalt an der Universität Nagoya (Japan), 1979 Promotion. 1984 Habilitation für das Lehrgebiet Angewandte Mathematik an der Universität Ulm. Seit 1979 Mitarbeiter der TELEFUNKEN SYSTEMTECHNIK GMBH in Ulm, Leiter der Abteilung Methoden und Konzepte im Fachgebiet Funk-EloKa.

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

**Jondral, Friedrich:**

Funksignalanalyse / von Friedrich Jondral

Stuttgart : Teubner, 1991

(Teubner Studienbücher : Elektrotechnik)

ISBN-13:978-3-519-06132-8 e-ISBN-13: 978-3-322-84851-2

DOI: 10.1007/978-3-322-84851-2

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Stuttgart 1991

Satz: Elsner & Behrens GmbH, Oftersheim

Einband: P.P.K.,S-Konzepte Tabea Koch, Ostfildern/Stuttgart

## Vorwort

Die Funksignalanalyse stellt Verfahren, mit denen Funksignale beschrieben und solche mit denen sie zerlegt werden können, zur Verfügung. In der Systementwicklung finden beide Prozesse zunächst auf dem Papier, etwa in Form funktionalanalytischer oder statistischer Überlegungen, statt. Danach muß der Übergang von den theoretisch erarbeiteten Modellen und Simulationen zu Geräten oder Systemen vollzogen werden. Genau dieser Übergang verläuft im allgemeinen nicht problemlos, weil Praktiker und Theoretiker häufig verschiedene Dialekte der Technikersprache sprechen. Zur Überwindung dieser Verständigungsschwierigkeiten soll das vorliegende Buch beitragen. Es handelt sich dabei um die Ausarbeitung des Manuskripts zu einer Vorlesung, die ich über das Wintersemester 1988/89 und das Sommersemester 1989 an der Universität Ulm gehalten habe. Die Vorlesung verfolgte das Ziel, für Studenten technischer Fachrichtungen (zu denen hier auch einmal die Mathematik gezählt werden soll) die Signalanalyse als eine Anwendung mathematischer Methoden darzustellen. Dementsprechend soll das Buch Mathematikern eine Anwendung ihrer Wissenschaft näher bringen und Ingenieure daran erinnern, daß ihre Arbeit auf exakten Theorien fußt. Zum Verständnis werden Grundkenntnisse der höheren Mathematik, wie sie im Vordiplomstudium technischer Fachrichtungen an den Universitäten vermittelt werden, vorausgesetzt. Der Stoff wurde bewußt so dargestellt, daß es auch praktisch arbeitenden Ingenieuren und Mathematikern möglich sein sollte, das Buch in endlicher Zeit zu lesen. Daher konnte hier auch nur eine Einführung in ausgewählte Teilgebiete der Funksignalanalyse gegeben werden, die jedoch den aufmerksamen Leser in die Lage versetzen sollte, sich anhand der im Literaturverzeichnis angegebenen Veröffentlichungen in das Thema zu vertiefen.

Dem Verlag danke ich für die Aufnahme des Buches in seine Reihe Teubner Studienbücher. Die technische Herstellung des Buches wurde von der TELEFUNKEN SYSTEMTECHNIK GMBH großzügig unterstützt. Diese Unterstützung spiegelt die guten Arbeitsbedingungen in der Firma, die auch seit einigen Jahren meine Vorlesungstätigkeit an der Universität Ulm fördert, wider. Darüber hinaus haben mir viele Fachdiskussionen, insbesondere mit Kollegen aus „unserem“ Fachbereich Empfänger und Peiler, bei der Formulierung des Textes geholfen.

An dieser Stelle möchte ich auch zu bedenken geben, daß jeder auf wissenschaftlichem Gebiet arbeitende stark von Lehrern und Vorbildern geprägt wird. Auf meine persönliche Entwicklung hat in diesem Zusammenhang Prof. Dr. Ernst Henze, an den ich aus diesem Grund hier erinnern möchte, den bleibenden Einfluß ausgeübt.

Meine Frau Brigitte und meine Töchter Isabel und Annabel haben sich, glaube ich, inzwischen wohl daran gewöhnt, daß das Hobby, neben dem Beruf Hochschullehrer zu sein, manchmal auf Kosten gemeinsamer Freizeit geht. In Dankbarkeit widme ich dieses Buch meiner Mutter Marie Jondral, geborene Puchebuhr, und dem Gedenken an meinen Vater Erich Jondral.

Ulm im Juni 1990

Friedrich Jondral

# Inhalt

<b>1 Einleitung</b> .....	7
<b>2 Signale</b> .....	11
2.1 Signalformen .....	11
2.2 Verallgemeinerte Funktionen und Bandbegrenzung .....	19
2.3 Hilberttransformation und analytisches Signal .....	23
2.4 Modulation .....	27
2.4.1 Analoge Modulationsverfahren .....	28
2.4.2 Digitale Modulationsverfahren .....	33
2.5 Die Bandspreiztechnik .....	42
<b>3 Zufallsprozesse</b> .....	51
3.1 Einführung .....	51
3.2 Spezielle stochastische Prozesse .....	57
3.2.1 Poissonprozesse .....	57
3.2.2 Telegraphiesignale .....	63
3.2.3 Irrfahrt .....	66
3.2.4 Brownsche Bewegung .....	68
3.2.5 Binäre Signale .....	70
3.3 Begriffe .....	72
3.4 Stationäre Prozesse .....	77
<b>4 Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung</b> .....	82
4.1 Das Abtasttheorem .....	83
4.2 Transformationen .....	94
4.2.1 Die $z$ -Transformation .....	95
4.2.2 Die diskrete Fouriertransformation .....	102
4.2.3 Komplexwertige zeitdiskrete Signale .....	112
4.2.4 Koordinatentransformation .....	114
4.3 Systeme .....	115
4.3.1 Definitionen .....	116
4.3.2 Lineare zeitinvariante Systeme .....	118
4.3.3 Die Übertragungsfunktion .....	121
<b>5 Empfang und Peilung</b> .....	125
5.1 Digitale Signalverarbeitung beim Funkempfang .....	125
5.2 Zur Definition des Dynamikbereichs digitaler Empfänger .....	130

6 Inhalt

5.3	Der digitale Vielkanalempfänger .....	132
5.3.1	Die digitale Vielkanalempfangstechnik .....	133
5.3.2	Die Realisierung digitaler Vielkanalempfänger .....	136
5.4	Die wichtigsten Prinzipien der Funkpeilung .....	138
5.4.1	Der Doppler-Peiler .....	139
5.4.2	Der Watson-Watt-Peiler .....	142
5.4.3	Der Interferometer-Peiler .....	145
<b>6</b>	<b>Parametrische digitale Spektralschätzverfahren .....</b>	<b>148</b>
6.1	Zeitdiskrete Zufallsprozesse .....	148
6.2	AR-, MA- und ARMA-Prozeßmodelle .....	152
6.3	Funkpeilung und Prozeßmodelle .....	155
6.3.1	Das Kompensationsprinzip .....	156
6.3.2	Wullenwever-Systeme .....	163
6.3.3	Antennengruppen und digitale Spektralschätzverfahren ..	166
<b>7</b>	<b>Signalanalyse in der Funkaufklärung .....</b>	<b>175</b>
7.1	Die Bandsegmentierung .....	175
7.2	Automatische Klassifikation von Kurzwellensignalen .....	178
7.2.1	Komponenten des Signalklassifikators .....	178
7.2.2	Die Vorverarbeitung .....	179
7.2.3	Die Merkmalsextraktion .....	182
7.2.4	Die Klassifikation .....	185
7.2.5	Ergebnisse eines Klassifikations-Experiments .....	188
7.2.6	Ein Anwendungsbeispiel .....	192
7.3	Erfassung von Frequenzsprungsendern .....	192
7.3.1	Entdeckung durch Frequenz Scan .....	193
7.3.2	Einsatz einer Empfängerbank .....	194
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>196</b>
<b>9</b>	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>199</b>