

## Informatik-Fachberichte 139

---

Herausgegeben von W. Brauer  
im Auftrag der Gesellschaft für Informatik (GI)

Michael Marhöfer

# Fehlerdiagnose für Schaltnetze aus Modulen mit partiell injektiven Pfadfunktionen



Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo

**Autor**

Michael Marhöfer  
Institut für Informatik IV, Universität Karlsruhe  
Zirkel 2, 7500 Karlsruhe 1

CR Subject Classifications (1987): B.5.3, B.6.2, B.7.3, I.1.2

ISBN-13: 978-3-540-17938-2      e-ISBN-13: 978-3-642-72757-3

DOI: 10.1007/978-3-642-72757-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1987

Repro- u. Druckarbeiten: Weihert-Druck GmbH, Darmstadt

2145/3140-543210

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Informatik IV der Universität Karlsruhe (TH). Unter dem ursprünglichen Titel "Digitale Fehlerdiagnose durch Anwendung von Modultests aufgrund partiell injektiver Pfadfunktionen" wurde sie von der Fakultät für Informatik als Dissertation angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 12. November 1986 statt.

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Görke bin ich für die Betreuung dieser Arbeit und wertvolle Anregungen zu großem Dank verpflichtet. Ihm verdanke ich auch einen großen Forschungsfreiraum und eine sehr förderliche Arbeitsumgebung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. M. Lipp danke ich für die Übernahme des Korreferats und für seine nützlichen Hinweise, die zur Abrundung der Arbeit beitrugen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die gute Zusammenarbeit und die Entlastung von manchen Pflichten. Ein besonderer Dank gebührt Herrn Dr. K. Echtele, der die Entstehung dieser Arbeit als kritischer Diskussionspartner förderte, und Herrn A. Pfitzmann für manchen Ratschlag. Frau D. Tautz und Herrn H. Seitz danke ich für die saubere und prompte Ausführung der Zeichenarbeiten. Mein Dank gilt auch Herrn B. Gengel und Herrn R. Lepold, die beide durch ihre Diplomarbeiten zu dieser Arbeit beitrugen, sowie Herrn K. Furmans und Herrn Th. Beutel für die sorgfältige Software-Erstellung.

Meine Frau Barbara und meine Tochter Marie-Luise brachten dieser Arbeit auch in schwierigen Phasen Verständnis und Geduld entgegen, wofür ich ihnen herzlich danke.

Karlsruhe, März 1987

Michael Marhöfer

## Kurzfassung

Die digitale Fehlerdiagnose hat die Aufgabe, in Digitalschaltungen Fehler, wie sie bei der Herstellung oder im Betrieb auftreten, zu erkennen und zu lokalisieren. Vielfältige Fehlermechanismen und umfangreiche Schaltungen stellen gerade bei integrierten Schaltungen hohe Anforderungen an die Fehlerdiagnose. Dies gilt besonders für die Bestimmung geeigneter Testmuster.

Vorhandene Verfahren zur Testmusterbestimmung verwenden entweder ein realisierungsbezogenes, sehr präzises Schaltungs- und Fehlermodell und eignen sich nur für relativ kleine Schaltungen oder sie verwenden ein eher abstraktes Schaltungs- und Fehlermodell und können dann sehr große Schaltungen bearbeiten. Abstriche an der Qualität des Tests sind im letzteren Fall unvermeidlich, so daß die Anforderungen hochintegrierter Schaltungen von keinem Verfahren voll erfüllt werden.

Um die Vorteile (präzises Fehlermodell, Eignung für große Schaltungen) beider Verfahrensklassen zu verbinden, wird in dieser Arbeit ein Verfahren zur modularen Testmusterbestimmung vorgeschlagen. Es basiert auf einem modularen Modell des Testobjekts, das die Struktur der Schaltung auf Modulebene und die Funktion der Module umfaßt, sowie einem ebenfalls modularen Fehlermodell und geht von realisierungsbezogenen Tests für die einzelnen Module aus. Zur Anwendung eines Modultests wird zusammen mit dem Einstellen der Modultestmuster ein mehrere Bit breiter Beobachtungspfad durch die nachfolgenden Module eingerichtet. Für den Beobachtungspfad wird die in den Modulfunktionen vorhandene partielle Injektivität in zwei Ausprägungen ("Transparenz" und "Relativtransparenz") ausgenutzt.

Im Verlauf der Arbeit werden die grundlegenden Operationen zur Anwendung von Modultests eingeführt, insbesondere das Einstellen von Modultest-Mustern und das Beobachten von Modultest-Ergebnissen. Auch dazu adäquate Mittel für den prüfgerechten Entwurf werden angegeben. Der Ablauf des eigentlichen Testbestimmungsverfahrens wird beschrieben. Abschließend werden zur Bewertung des vorgeschlagenen Verfahrens eine Reihe von quantitativen Daten angegeben, die mittels einer Teil-Implementierung aus praktischen Schaltungsbeispielen gewonnen wurden.

## Stichworte

Digitale Fehlerdiagnose, Fehlermodellierung, prüfgerechter Entwurf, Fehlererkennung, modulare Testbestimmung, Rechnen mit Schaltfunktionen.

## Abstract

The task of digital fault diagnosis is to detect and localize faults which occur in the production and operation of digital circuits. Especially demanding is the fault diagnosis of complex integrated circuits because of the large variety of failure mechanisms and the poor accessibility of interior circuit parts. In general, faults are diagnosed by application of suitable test patterns, which are generated by a process called test generation.

Test generation methods currently available are based either on models close to the physical realization of the circuit or on more abstract models which lack information about the circuit realization. Only the latter methods can be applied to large circuits but generate test sets of questionable completeness.

This thesis intends to combine the advantages of both approaches by proposing a modular test generation method. Our method is based on a modular model of a circuit and its faults and is operating partly on the module-level-structure of the whole circuit and partly on the function of the modules. Starting with a prepared test for a single module, the module test is applied by setting the module test pattern and establishing an observation path which is usually several bits wide. To establish the observation path, the method exploits the partially available injectivity of module functions.

In this thesis, the definition of the circuit and fault model is followed by the description of the basic operations for applying a module test through the surrounding circuit. A corresponding approach for design for testability is described. A procedure for modular test generation concludes the theoretic part. For evaluation of the presented theory the proposed method has been partially implemented. Results of application to examples of practical circuits are given in the concluding chapter.

## Keywords

Digital fault diagnosis, fault modelling, design for testability, fault detection, modular test generation, injectivity of truth functions, calculating with truth functions

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>0 Einleitung</b>	1
<b>1 Testen digitaler Schaltungen</b>	3
1.1 Testvorbereitung und Testdurchführung	4
1.2 Modellierung des Testobjekts	5
1.3 Bestimmung von Testmustern	8
1.3.1 Allgemeine Vorgehensweise	9
1.3.2 Testbestimmung anhand einer Struktur elementarer Verknüpfungselemente	11
1.3.3 Testbestimmung anhand einer Struktur funktionell beschriebener Module	12
1.4 Verbesserung der Testbarkeit	13
1.5 Abgrenzung der Aufgabenstellung	14
<b>2 Entwicklung des Testkonzepts</b>	17
2.1 Anforderungen an das Testkonzept	17
2.2 Im Testkonzept verwendete Voraussetzungen	18
2.3 Testkonzept	20
2.3.1 Modell und Beschreibung des Testobjekts	21
2.3.2 Anwendung von Modultests aufgrund partiell injektiver Pfadfunktionen	24
<b>3 Mathematische Grundlagen und Hilfsmittel</b>	27
3.1 Grundbegriffe	27
3.2 Schaltfunktionen	28
3.3 Logische Gleichungen	34
<b>4 Beobachtung von Modul-Testergebnissen</b>	35
4.1 Pfadfunktionen und Injektivität	36
4.2 Transparente Pfade	40
4.2.1 Transparenzbestimmung für einen t-Einzelpfad	45
4.2.2 Heuristische Transparenzbestimmung für einen K-fachen t_Einzelpfad	46
4.2.3 Transparenzbestimmung für einen K-fachen t-Mehrfachpfad	55
4.3 Relativtransparente Pfade	60
4.3.1 Punktweise Injektivität und Relativtransparenz	61
4.3.2 Bestimmung der Relativtransparenz eines Pfades bei einer Beobachtung	63
4.3.3 Bestimmung der sequentiellen Relativtransparenz eines Pfades bei mehreren Beobachtungen	68
4.4 Modulare Beobachtungspfade	78
4.4.1 Fortsetzung des Beobachtungspfades in Abhängigkeit vom Verbindungstyp	79
4.4.2 Wahlentscheidungen bei der Fortsetzung eines Beobachtungspfades	82

<b>5 Entwurfsmaßnahmen zur Verbesserung der partiellen Injektivität</b>	<b>86</b>
5.1 Verbesserung der Transparenz eines Moduls	86
5.1.1 Bestimmung der Ist-Transparenz	87
5.1.2 Modulexterne Schaltungszusätze	88
5.1.3 PLA-spezifische Maßnahmen	92
5.2 Verbesserung der Relativtransparenz eines Moduls	98
<b>6 Ein Verfahren zur Anwendung von Modultests aufgrund partiell injektiver Pfadfunktionen</b>	<b>101</b>
6.1 Operationen zum Einstellen von internen Wertebelegungen	101
6.1.1 Durchführung der Implikation	102
6.1.2 Durchführung der Vervollständigung	106
6.2 Beschreibung des modularen Testbestimmungsverfahrens	108
6.3 Effizienzsteigernde Maßnahmen	111
6.3.1 Erweiterung der Modulbeschreibung	112
6.3.2 Verwendung von Heuristiken	112
6.3.3 Speicherung von Zwischenergebnissen	113
<b>7 Bewertung ausgewählter Verfahren und der partiellen Injektivität anhand praktischer Schaltungsbeispiele</b>	<b>114</b>
7.1 Vergleich mit anderen Ansätzen	114
7.1.1 D-Algorithmus mit mehrwertigem Signalmodell	114
7.1.2 Ansatz von Somenzi et al.	115
7.2 Bewertung anhand praktischer Beispiele	115
7.2.1 Merkmale der Funktionsdarstellung	116
7.2.2 Ergebnisse aus der Bestimmung der Relativtransparenz	117
7.2.3 Ergebnisse aus der Bestimmung der Transparenz	128
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>133</b>
<b>9 Literatur</b>	<b>134</b>
<b>Anhang A: Rechnen mit Schaltfunktionen im System CUBICALC</b>	<b>142</b>
<b>Anhang B: Anteile der Einfach- und Mehrfachbeobachtungen an den bei der Relativtransparenzbestimmung untersuchten Fällen</b>	<b>159</b>
<b>Anhang C: Mittlerer Erfüllungsgrad der RTB und der STB in Abhängigkeit von der Pfadkenngröße <math>BDD_p</math></b>	<b>164</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>169</b>

## Liste der verwendeten Abkürzungen

	Definition/Erklärung	Seite
a	Belegung der Modulausgänge	21
A	m-Tupel der Modulausgänge	21
AF	abstrahierendes Modulfehlermodell	22
$\alpha$	Element einer Indexmenge	
ATB	anteilige Relativtransparenzbedingung	51
$B^k$	Menge $\{0,1\}^k$	28
$B_{EP,s}$	Ergebnis des ersten Schritts der Berechnung von $RTB_s$	63
$BD_{i,j}$	Boolesche Differenz der j-ten Pfadausgangsfunktion nach $ET_i$	119
$BDD_p$	eine der Pfadkenngrößen	119
$BR_{EP,s}$	Ergebnis des ersten Schritts der Berechnung von $ETB_s$	67
$BTD_p$	eine der Pfad-Kenngrößen	119
cB	charakteristische Funktion des Modul-Bildbereichs	112
$\Delta, \Delta_j$	Indexmengen	
DF	disjunktive Form	31
DNF	disjunktive Normalform	31
e	Belegung der Moduleingänge	21
E	n-Tupel der Moduleingänge	21
$E(f)$	Erfüllungsgrad einer Schaltfunktion f	29
$E_M$	Menge der Modulkanten	21
$E_{vB}$	Menge der Verbindungskanten der Gesamtschaltung	23
$EAQ_p$	eine der Pfadkenngrößen	119
ep	Belegung der pfadeinstellenden Moduleingänge EP	36
EP	(n-p)-Tupel der pfadeinstellenden Moduleingänge	36
$E(RB)$	Erfüllungsgrad der Randbedingung für die Pfadeingänge	123
$E(RTB)$	Erfüllungsgrad der Relativtransparenzbedingung	122
$E(STB)$	arithmetisches Mittel der Erfüllungsgrade der $STB_{s,i}$	122
et	Belegung der Pfadeingänge ET eines Moduls	36
ET	p-Tupel der Pfadeingänge eines Moduls	36
$ETB_s$	Bedingung für eingeschränkte Relativtransparenz	66
F	m-Tupel der Modulfunktionen	21
$FP_k$	q-Tupel der durch k bestimmten Pfadfunktionen	37
G	Modulgraph	21
GA	Menge der Anschlüsse in der Gesamtschaltung	23
GE	Menge der Kanten von GS	23
GN	Menge der Verbindungsnetze	23
GPA	Menge der Primärausgänge der Gesamtschaltung	23
GPE	Menge der Primäreingänge der Gesamtschaltung	23
GS	Graph der Gesamtschaltung	23
GV	Menge der Knoten von GS	23
I	Implikant	31
IP	Teilimplikant, bestehend aus EP-Literalen	74
IT	Teilimplikant, bestehend aus ET-Literalen	74
IX	Teilimplikant, bestehend aus X-Literalen	57
IY	Teilimplikant, bestehend aus Y-Literalen	57

	Definition/Erklärung	Seite
ILA	'iterative logic array'	7
KF	konjunktive Form	31
KNF	konjunktive Normalform	31
m	Anzahl der Ausgänge eines Moduls	21
M	ein Modul	21
$M_P$	ein Modul des Beobachtungspfads (Pfadmodul)	78
$M_T$	ein zu testendes Modul	109
$MB_s$	s-Mischbereich	70
$MB_{s,ep}$	Mischbereich zu ep	70
$MB_{s,PM}$	Mischbereich zu einer Menge PM	71
n	Anzahl der Eingänge eines Moduls	21
N-Modul	Nachfolger-Modul im Beobachtungspfad	79
p	Anzahl der Pfadeingänge	36
P	ein Pfad	36
PLA	'programmable logic array'	92
PM	Menge von EP-Belegungen ep	70
pmin	Mindestanzahl von Pfadeingängen	120
pmax	Höchstanzahl von Pfadeingängen	120
q	Anzahl der Pfadausgänge	36
qconst	konstante Anzahl von Pfadausgängen	120
qr	Anzahl der von min. einem $ET_i$ abhängigen Pfadausgangsfunktionen	119
$qr_i$	Anzahl der vom Pfadeingang $ET_i$ abhängigen Pfadausgangsfunktionen	119
rani	Initialisierung des Pseudozufallszahlen-Generators	120
$R_s$	Randbedingung der Beobachtungsaufgabe	66
RB	Randbedingung für die Pfadeingänge ET	120
ROM	Nur-Lese-Speicher, 'read-only memory'	92
RP	Randbedingung für die pfadeinstellenden Eingänge EP	86
$RTB_s$	Relativtransparenzbedingung	61
s	Sollwert einer Testantwort an den Pfadeingängen	38
$SP_P$	eine der Pfadkenngrößen	119
st-0	ständig 0	6
st-1	ständig 1	6
$STB_{s,i}$	Bedingung der (eingeschränkten) sequentiellen Relativtransparenz	69
t	eine Testantwort als Belegung der Pfadeingänge	38
T	Modultest	22
TB	Transparenzbedingung	41
$TB^+$	Bedingung für die positiv gerichtete Transparenz	48
$TB^-$	Bedingung für die negativ gerichtete Transparenz	48
TD	Menge der Modul-Testdaten	22
TE	Menge der Modul-Testergebnisse	22
$TEQ_P$	eine der Pfadkenngrößen	119
TM	Menge der Modul-Testmuster	22
TRM	Transparenzmodus	86
$UB_s$	s-Unterscheidungsbereich	69
$UB_{s,ep}$	Unterscheidungsbereich zu ep	70
$UB_{s,PM}$	Unterscheidungsbereich zur Menge PM	71

	Definition/Erklärung	Seite
V	Menge der Knoten des Modulgraphs	21
V-Modul	Vorgänger-Modul	79
V1, ..., V8	Voraussetzungen zum Testkonzept	18
X, Y	Tupel unabhängiger Variablen	

### Liste der verwendeten Formelzeichen und Symbole

$ \dots $	Betrag, Mächtigkeit einer Menge	
$\cup, \bigcup$	Vereinigung von Mengen	
$\cap, \bigcap$	Schnitt von Mengen	
-	Differenz, Mengendifferenz	
$\vee, \bigvee$	Disjunktion	27
$\wedge, \bigwedge$	Konjunktion	27
$\neg, \bar{\phantom{x}}$	Negation	27
$\leftrightarrow$	Äquivalenz	28
$\nleftrightarrow$	Antivalenz	28
#	Relativkomplement, Kreuzoperation	28
$\Rightarrow$	Implikation	28
$\rho$	ein Operator	
$\rightarrow$	Abbildungspfeil	
$\equiv$	Gleichheit von Funktionen, Abbildungen	55
$\neq$	Ungleichheit von Funktionen, Abbildungen	55
$[\dots]_{DF}$	Darstellung einer Funktion in disjunktiver Form	31
/	Bildung einer Teilfunktion, die von einem Teil der Variablen der Funktion unabhängig ist	51
	bei Modulen: Restriktion auf einen Pfad	36
$\exists$	Existenzquantor, "Es gibt <b>mindestens</b> ein..."	30
$\exists_1$	Existenzquantor, "Es gibt <b>genau</b> ein..."	
$\forall$	Allquantor, "Für alle..."	30