

Ronny Peter

Prozesstaugliche quantitative  
In-situ-Materialparameter-  
bestimmung mit  
Hohlraumresonatoren

# **Prozesstaugliche quantitative In-situ- Materialparameterbestimmung mit Hohlraumresonatoren**

Der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Ronny Peter, M.Sc.

aus

Kulmbach

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juli 2020

Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik

Universität Bayreuth

2020



Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik

Band 33

**Ronny Peter**

**Prozesstaugliche quantitative In-situ-Material-  
parameterbestimmung mit Hohlraumresonatoren**

Shaker Verlag  
Düren 2020

### **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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7644-8

ISSN 1862-9466

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)

## **Danksagung**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Bayreuth. Ohne die Unterstützung zahlreicher Personen hätte sie in dieser Form nicht realisiert werden können. Für die vielfältig erfahrene Hilfe möchte ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bedanken.

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater Prof. Gerhard Fischerauer für die hervorragende Betreuung und das in mich gesetzte Vertrauen danken. Er war während meiner gesamten Zeit am Lehrstuhl sowohl in fachlicher als auch menschlicher Hinsicht ein großes Vorbild.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie für die jahrelange aufmerksame, liebevolle und vielseitige Unterstützung in allen Lebenslagen und –phasen.

Meinem Bürokollegen und Trauzeugen Dr.-Ing. Mario Mösch möchte ich ganz besonders danken. Er stand mir nicht nur mit Rat und Tat zur Seite, sondern war auch stets eine moralische Stütze.

Danken möchte ich außerdem meinen Arbeitskolleginnen und -kollegen am Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik. Sie waren alle stets hilfsbereit und trugen zu einer Arbeitsatmosphäre bei, in der nicht nur Wissenschaft und Lehre, sondern auch Miteinander großgeschrieben wird.

Nicht unerwähnt möchte ich Frau Johanna Distler, B.Sc. und Herrn Alexander Fast, B.Sc. lassen. Sie leisteten durch Abschlussarbeiten bzw. durch HiWi-Tätigkeiten ebenfalls einen wertvollen Beitrag zu dieser Dissertation. Ihnen wünsche ich für ihre akademische und berufliche Zukunft alles Gute.



## Vorwort der Herausgeber

Viele verfahrenstechnische Prozess ließen sich effizienter, sicherer und kostengünstiger betreiben, wäre man in der Lage diese laufend direkt zu beobachten. Diese sogenannte In-situ-Überwachung lässt sich allerdings bisher nur für wenige Prozesse realisieren. Häufig ist man auf Messungen vor und nach dem Prozess, oder auf die Messung von Stichproben aus dem Prozess beschränkt. Es wird davon ausgegangen, dass die Methode der Hohlraumresonatorstörung hingegen bei viele Prozessen die Möglichkeit bietet, elektrische Materialparameter des Prozesses orts aufgelöst zu überwachen. Bisher beschränkt sich diese Methode aber noch auf einfache Labormessungen mit kleinen homogenen Proben.

Die hier vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, die Eignung der Methode der Hohlraumresonatorstörung zur echtzeitfähigen quantitativen In-situ Materialparameterbestimmung und damit zur Prozessüberwachung zu untersuchen und die dabei entstehenden Problemstellungen zu lösen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden vier Hauptprobleme identifiziert: Mathematische Modellierung inhomogen gefüllter Hohlraumresonatoren, Störung des Resonators durch Ankopplung an ein Messgerät, Rückrechnung auf zugrundeliegende Materialparameterverteilung anhand gemessener Resonanzparameter, Fehlen kostengünstiger Messsysteme. Für alle vier Probleme konnten Lösungen gefunden werden und die Methode damit ins Feld gebracht werden.

Parallel dazu wurde ein alternativer Weg zur Materialparameterbestimmung entwickelt. Durch kleinste Aperturen in der Resonatorwand konnte das elektrische und/oder magnetische Feld im Resonator direkt bestimmt werden. Anhand der dadurch möglichen Rekonstruktion der Feldverteilungen kann ebenfalls auf die zugrundeliegende Materialparameterverteilung geschlossen werden. Diese Methode kann für sich allein angewandt werden oder in Kombination mit der vorgenannten resonanzbasierten Methode um die Vorteile beider Methoden zu kombinieren.

Bayreuth im August 2020

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer, Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos





# Inhaltsverzeichnis

Seite

<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Stand der Technik bei der In-Prozess-Materialparameterbestimmung .....	2
1.3 Motivation, Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	5
<b>2 Hohlraumresonatorverfahren zur Prozessüberwachung</b> .....	<b>7</b>
2.1 Prinzip .....	7
2.1.1 Hohlraumresonatoren und deren Eigenschaften .....	7
2.1.2 Messtechnische Anwendung .....	13
2.2 Modellierung des gekoppelten Resonators .....	14
2.3 Modellierung inhomogen gefüllter Resonatoren.....	21
2.4 Grenzen des Stands der Technik.....	25
2.4.1 De-Embedding .....	25
2.4.2 Inverses Problem bei inhomogener Füllung.....	26
<b>3 Ein robustes Verfahren zur Lösung des Vorwärtsproblems bei längs- inhomogen gefüllten Resonatoren</b> .....	<b>27</b>
3.1 Lösungsansatz .....	27
3.2 Implementierung .....	31
3.3 Validierung und Bewertung .....	39
<b>4 Ein De-Embedding-Verfahren für geometrisch große Koppelstrukturen</b> .....	<b>45</b>
4.1 Lösungsansatz .....	45
4.2 Implementierung .....	51
4.3 Validierung und Bewertung .....	55
4.3.1 Numerische Experimente.....	56
4.3.2 Laborexperimente .....	59
<b>5 Lösung des inversen Problems bei inhomogen gefüllten Resonatoren</b> .....	<b>63</b>
5.1 Lösungsansatz .....	63
5.2 Implementierung .....	72

5.3 Validierung und Bewertung .....	74
5.3.1 Analytische Experimente .....	74
5.3.2 Numerische Experimente .....	78
5.3.3 Laborexperimente .....	81
<b>6 Entwurf feldtauglicher Systemarchitekturen .....</b>	<b>84</b>
6.1 VNA .....	84
6.1.1 Architektur .....	85
6.1.2 Software .....	87
6.2 Feldsondenarray .....	88
6.2.1 Prinzip der Feldmessung .....	89
6.2.2 Theorie der Feldmessung .....	90
6.2.3 Theorie des inversen Problems .....	98
6.2.4 Software .....	100
6.3 Hybridverfahren .....	102
<b>7 Implementierung und experimentelle Validierung .....</b>	<b>104</b>
7.1 VNA .....	104
7.1.1 Hardwarerealisierung eines Demonstrators .....	104
7.1.2 Validierung und Bewertung .....	105
7.1.2.1 Vergleich mit kommerziellen VNAs im Hinblick auf Resonanz- parameterextraktion .....	105
7.1.2.2 Beispielhafte Bestimmung der Materialverteilung und Vergleich mit Simulationsergebnissen .....	107
7.2 Feldsondenarray .....	108
7.2.1 Hardwarerealisierung eines Demonstrators .....	108
7.2.2 Validierung und Bewertung .....	110
7.2.2.1 Beispielhafte Bestimmung der Materialverteilung und Vergleich mit Simulationsergebnissen .....	111
7.2.2.2 Beispielhafte Bestimmung von Resonanzmoden und Vergleich mit Simulationsergebnissen .....	120
7.3 Hybridverfahren .....	124

<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>127</b>
<b>9 Summary .....</b>	<b>130</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>133</b>
A Elektromagnetische Felder in Hohlraumresonatoren .....	133
A.1 Grundlagen .....	133
A.2 Eigenfunktionsentwicklung .....	137
A.3 Greensche Funktionen .....	138
A.4 Abbildungen .....	140
B Das Resonanzfrequenzparadoxon .....	142
C Feldbilder .....	144
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>146</b>
<b>Eigene Publikationen .....</b>	<b>157</b>