

Daniel Miek

Ein Beitrag zu Millimeter- und  
Mikrowellenfiltern für  
Kommunikations- und  
Satellitenanwendungen

# Ein Beitrag zu Millimeter- und Mikrowellenfiltern für Kommunikations- und Satellitenanwendungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)



der Technischen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

**Daniel Miek**

aus Minden

Kiel 2022

1. Berichtstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael Höft
2. Berichtstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. Holger Maune
3. Berichtstatter: Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt

Datum der mündlichen Prüfung: 24.11.2022

Berichte aus der Hochfrequenztechnik

**Daniel Miek**

**Ein Beitrag zu Millimeter- und Mikrowellenfiltern für  
Kommunikations- und Satellitenanwendungen**

Shaker Verlag  
Düren 2023

**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.: Kiel, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8888-5

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)

# Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Höft für die Betreuung dieser Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen, diese Herausforderung bewältigen zu können. Die Zeit am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und alle gesammelten Erfahrungen waren sehr lehrreich und prägend für meine Zukunft. Bedanken möchte ich mich zudem bei Prof. Dr.-Ing. habil. Holger Maune sowie Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt für die Anfertigung des Zweit- und Drittgutachtens.

Ferner möchte ich insbesondere meinen Kollegen und Freunden Patrick Boe, Fynn Kamrath und Kennet Braasch danken, welche ebenfalls im Themengebiet Filter tätig sind bzw. waren. Gegenseitige Unterstützung durch Diskussionen vielfältiger Themen sowie das Gegenlesen diverser Schriftstücke hat konstruktiv zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen. Dies gilt ferner für Sebastian Simmich, der sporadisch sein eigenes Forschungsgebiet verlassen hat, um ebenfalls im Themengebiet Filter tätig zu werden. Zudem möchte meinen Kollegen Chad Bartlett sowie Abdulrahman Widaa danken, die ebenfalls im Themengebiet Filter tätig sind und viele neue Denkanstöße eingebracht haben.

Überdies möchte ich meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Alwin Reinhardt sowie Dr.-Ing. Alexander Telyuk danken, die mich insbesondere zum Anfang meiner Tätigkeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt zudem Wolfgang Taute, der stets um die Sicherheit aller bemüht ist. Für die in Kap. 4.2 durchgeführten Galvanisierungsarbeiten war dies von besonderer Bedeutung. Hierfür ist ferner Daniel Bruhn ein großes Lob auszusprechen, der sich als Absolvent und HiWi über Jahre hinweg dieser Tätigkeit verschrieben hat und von dem ich vielseitige Unterstützung erhalten habe. Dank gilt zudem allen weiteren im Zeitraum meiner Tätigkeit am Lehrstuhl tätigen (auch ehemaligen) Kollegen: Melanie Bork, Dr.-Ing. Frank Daschner, Florian Stern, Henrik Wolfram, Dr.-Ing. Mevlüt Yalaz, Dr.-Ing. Sebastian Toxværd und Dr.-Ing. Phillip Durdaut sowie allen Absolventen, die durch ihre Abschlussarbeiten ebenfalls einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Zudem soll eine erfolgreiche Kooperation mit Prof. Dr. Jorge A. Ruiz Cruz sowie Dr. Ana Morán-López von der Universidad Autónoma de Madrid nicht unerwähnt bleiben. Viele Erkenntnisse der in Kap. 4.4 dargestellten Sachverhalte fußen auf gemeinsamen Überlegungen.

Eine weitere Forschungsk Kooperation bestand mit dem Institut für Mikrowellentechnik

---

und Photonik der TU Darmstadt, wo Prof. Dr.-Ing. Rolf Jakoby, Dr.-Ing. Christian Schuster sowie Ersin Polat für eine gute und konstruktive Zusammenarbeit zu danken ist.

Der Firma Lithoz und insbesondere Dr. Martin Schwentenwein sowie Dominik Brouczek ist für die Beantwortung vieler Fragen den keramischen 3-D Druck betreffend sowie für die Fertigung der in Kapitel 5.4 verwendeten Keramiken zu danken.

Schließlich muss auch die Unterstützung der Zentralen Werkstatt der Technischen Fakultät unter Leitung von Matthias Burmeister erwähnt werden. Eine gute Zusammenarbeit hat einen überwältigenden Anteil der hier dargestellten Ergebnisse überhaupt erst ermöglicht. Dies trifft in besonderem Maße auf die in Kap. 4.3 vorgestellten Komponenten zu.

Abschließend muss erwähnt sein, dass diese Arbeit ohne die Unterstützung meiner Familie, insbesondere meiner Frau Laura Miek, nicht möglich gewesen wäre.





# Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Synthese und Realisierung von analogen hochfrequenztechnischen Filtern. Diese finden unter anderem Anwendung in der digitalen Datenübertragung wie beispielsweise dem Mobilfunk oder der Satellitenkommunikation sowie in Radarsystemen und der Sensorik. Die stetig wachsenden Datenraten und die dadurch knapper werdende Ressource Bandbreite hat Auswirkungen auf die Spezifikationen der in jedem Kommunikationssystem erforderlichen analogen Filter. Um den Anforderungen zukünftiger Kommunikationssysteme zu genügen, müssen die verwendeten Filter oftmals eine hohe Selektivität bei gleichzeitig geringen Einfügeverlusten sowie Herstellungskosten aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Konzepte vorgestellt, wie den Anforderungen an analoge Filter in zukünftigen informationstechnischen Systemen sowie der Sensorik begegnet werden kann.

Hierzu werden zunächst modulare Filter vorgestellt. Diese erlauben unter anderem die Analyse einzelner Komponenten eines Filters hinsichtlich Güte, Störmodenverhalten und Abstimmbarkeit, bevor diese in einem festen Filteraufbau Verwendung finden. Die Untersuchung von Teilkomponenten kann den Aufbau und die anschließende Verwerfung eines Konzepts vermeiden und so ggf. Kosten und Entwicklungsaufwand reduzieren. Anschließend werden zukunftsweisende Konzepte auf Basis des 3-D Drucks mit Fokus auf Hohlleiterfilter erarbeitet. Additive Fertigungsverfahren erlauben eine nahezu beliebige Gestaltung von kostengünstig herstellbaren Komponenten, die zudem durch ihr geringes Gewicht auffallen. Dem Trend zu höheren Trägerfrequenzen sowie die daraus resultierende erforderliche mechanische Fertigungsgenauigkeit wird ebenfalls Rechnung getragen. So werden Filter im WR-3 Frequenzband (220-325 GHz) mit modernen Fräsmaschinen gefertigt und untersucht. Ferner werden Konzepte vorgestellt, wie die Dämpfungseigenschaften von Hohlleiterfiltern durch eine Kopplung des Quell- und Lastknotens profitieren können. So können insbesondere asymmetrische Dämpfungseigenschaften erzielt werden, ohne asymmetrische Filteraufbauten nutzen zu müssen, was besonders im höherfrequenten Bereich vorteilhaft sein kann. Neben Hohlleiterfiltern werden ferner unterschiedliche keramische Filter untersucht. Es werden Konzepte vorgestellt, mit welchen der störmodenfreie Bereich eines TM-Mode Extracted-Pole Filters vergrößert werden kann. Ferner wird der Aspekt der Miniaturisierung durch die Verwendung Y-förmiger Dual-Mode Resonatoren aufgegriffen. Ein Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen sowie erste Ergebnisse werden überdies für den keramischen 3-D Druck präsentiert.

# Abstract

This thesis deals with the synthesis and realization of analogue filters in the high frequency region. These filters are key components in e.g. mobile or satellite communication systems as well as radar systems or sensors in general. The growing demand on higher data rates and the scarce resource bandwidth effects the required performance of the high frequency filters. Important specifications to be considered are e.g. the selectivity between passband and stopband, the insertion losses as well as the manufacturing costs. Within this thesis, different concepts to fulfil the stringent filter requirements with respect to future communication systems and sensor systems are proposed.

In a first step, two modular filters are discussed. These filter platforms can be used to analyze and validate the performance of sub-structures of typical coaxial or waveguide filters (as e.g. the quality factor, spurious mode performance and tunability), before the development or realization of a complete filter takes place. This may serve costs and increases the development speed. Subsequently, the 3-D printing approach is used for the realization of low-cost and lightweight waveguide filter structures. These filters may have a complex shape, which cannot be realized by classical production techniques as e.g. milling. The trend of using higher carrier frequencies is investigated as well. For the realization of high frequency filters, the manufacturing technique is often in the focus of interest due to the small size of the components. Therefore, filters are designed in the WR-3 frequency band (220-325 GHz) and are investigated with respect to manufacturing accuracy and losses. In order to fulfil advanced rejection specifications, waveguide filters which reveal a direct source to load cross-coupling are subsequently investigated. Asymmetric rejection specifications might be easily fulfilled without requiring asymmetric filter set-ups, which is especially important for mm-wave filter components. Besides waveguide filters, the synthesis and realization of dielectric resonators and filters is addressed in this thesis as well. Concepts for the realization of wide-spurious free range filters based on the extracted-pole principle are proposed. Additionally, miniaturization properties based on Y-shape dielectric dual-mode resonators are discussed. A further approach for the realization of ceramic filters is defined by utilizing advanced 3-D printing techniques, where first results are discussed and an outlook for future research topics is given.

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation mit dem Titel

## **Ein Beitrag zu Millimeter- und Mikrowellenfiltern für Kommunikations- und Satellitenanwendungen**

nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist und von mir selbst verfasst wurde. Dabei stand mir mein Betreuer Herr Prof. Dr.-Ing. Michael Höft beratend zur Seite. Die Arbeit war weder in Teilen noch im Ganzen Bestandteil eines früheren Prüfungsverfahrens und ist an keiner anderen Stelle zur Prüfung eingereicht. Der Inhalt der Arbeit wurde in Teilen bereits in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Dies ist in der Arbeit entsprechend vermerkt. Diese Arbeit ist nach bestem Wissen und Gewissen konform mit den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis, welche durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft festgelegt sind.

Kiel, 23. Mai 2022

Ort, Datum

---

Daniel Miek



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Schwerpunkte und Aufbau dieser Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Tiefpass-Prototypen . . . . .	5
2.1.1	Butterworth-Prototyp . . . . .	8
2.1.2	Tschebyscheff-Prototyp . . . . .	10
2.1.3	Gaußscher Prototyp . . . . .	12
2.1.4	Weitere Prototypen . . . . .	13
2.2	Transformationen des Prototyps . . . . .	13
2.2.1	Impedanztransformation . . . . .	14
2.2.2	Frequenztransformationen . . . . .	14
2.2.3	Immitanzinverter . . . . .	17
2.3	Verallgemeinerter Tschebyscheff-Prototyp . . . . .	19
2.3.1	Streuparameter des verallgemeinerten Tschebyscheff-Prototyps . . . . .	20
2.3.2	Bestimmung des Zählerpolynoms $F(s)$ . . . . .	21
2.3.3	Bestimmung des Zählerpolynoms $P(s)$ . . . . .	21
2.3.4	Bestimmung der Normierungskonstanten . . . . .	22
2.3.5	Bestimmung des Nennerpolynoms $E(s)$ . . . . .	23
2.4	Koppelmatrix . . . . .	23
2.4.1	Synthese der transversalen Koppelmatrix . . . . .	24
2.4.2	Berechnung der S-Parameter aus der Koppelmatrix . . . . .	27
2.4.3	Ähnlichkeitstransformationen . . . . .	31
2.4.4	Extracted-Pole Prinzip . . . . .	35
2.5	Realisierung von Hochfrequenzfiltern auf Basis der Koppelmatrix . . . . .	39
2.5.1	Inter-Resonator Kopplung . . . . .	40
2.5.2	Externe Güte . . . . .	42
2.5.3	Resonator-Dimensionierung . . . . .	44
2.6	Abstimmen von Filtern mit dem Koppelmatrixabgleich . . . . .	45
2.6.1	Cauchy-Methode . . . . .	45
2.6.2	Weitere Abstimmverfahren . . . . .	48

---

2.7	Grafische Benutzeroberfläche . . . . .	55
2.8	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Modulare Filter für Komponententests und Lehrzwecke</b>	<b>60</b>
3.1	Einleitung . . . . .	60
3.2	Modulares Koaxialresonatorfilter . . . . .	61
3.2.1	Aufbau . . . . .	61
3.2.2	Entwurf von Ein-/ Aus-/ und Kreuzkoppelaperturen . . . . .	64
3.2.3	Aufbau diverser Filtertopologien . . . . .	73
3.2.4	Realisierung eines Diplexers . . . . .	78
3.3	Modulares Hohlleiterfilter . . . . .	80
3.3.1	Aufbau . . . . .	80
3.3.2	Topologien und Komponententests . . . . .	83
3.3.3	Realisierung eines Filters mit frequenzabhängiger Kopplung . . . . .	92
3.3.4	Spalt-Hohlleiterfilter . . . . .	94
3.3.5	Diplexer . . . . .	94
3.4	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	95
<b>4</b>	<b>Hohlleiterfilter</b>	<b>97</b>
4.1	Einleitung . . . . .	97
4.2	3-D gedruckte Hohlleiterfilter . . . . .	98
4.2.1	Einleitung . . . . .	98
4.2.2	Extracted-Pole Filter . . . . .	105
4.2.3	Dual-Mode Filter . . . . .	109
4.2.4	Monolithische Filter . . . . .	120
4.2.5	Diplexer . . . . .	133
4.2.6	Zusammenfassung . . . . .	133
4.3	WR-3 Hohlleiterfilter . . . . .	135
4.3.1	Einleitung . . . . .	135
4.3.2	Vergleich mehrfach gefertigter kaskadierter Triplets . . . . .	137
4.3.3	Breitband Dual-Mode Filter mit E-Schnittebene . . . . .	148
4.3.4	Zusammenfassung . . . . .	153
4.4	Hohlleiterfilter mit zusätzlichen Übertragungsnullstellen . . . . .	154
4.4.1	Einleitung . . . . .	154
4.4.2	Symmetrisches vierpoliges Filter mit sechs Übertragungsnullstellen . . . . .	156
4.4.3	Vergleich dreier Filter mit vielfachen Übertragungsnullstellen . . . . .	170
4.4.4	Verschiedene Konfigurationen des H-Plane Filters im Ku-Frequenzband . . . . .	183
4.4.5	Zusammenfassung . . . . .	194
4.5	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	195

<b>5</b>	<b>Dielektrische Filter</b>	<b>197</b>
5.1	Einleitung . . . . .	197
5.1.1	Übersicht über dielektrische Filter und Stand der Technik . . . . .	197
5.1.2	Aufbau dieses Kapitels . . . . .	201
5.2	Dielektrische Extracted-Pole Filter . . . . .	201
5.2.1	Extracted-Pole Filter mit einer Übertragungsnullstelle . . . . .	202
5.2.2	Extracted-Pole Filter mit zwei Übertragungsnullstellen . . . . .	210
5.2.3	Zusammenfassung . . . . .	212
5.3	Dual-Mode Filter . . . . .	214
5.3.1	Filter basierend auf planaren Y-förmigen Dual-Mode Resonatoren . . . . .	214
5.3.2	Filter basierend auf nicht-planaren Y-förmigen Dual-Mode Resonatoren . . . . .	232
5.3.3	Filter basierend auf monolithischen Y-förmigen Keramiken . . . . .	247
5.3.4	Zusammenfassung . . . . .	261
5.4	Filter basierend auf additiv hergestellten Keramiken . . . . .	263
5.4.1	Einleitung . . . . .	263
5.4.2	Dual-Mode Filter basierend auf additiv hergestellten Keramiken . . . . .	267
5.4.3	Zusammenfassung . . . . .	275
5.5	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	277
<b>6</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>279</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	279
6.2	Fazit und Ausblick . . . . .	282
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>286</b>
	Publikationen mit Eigenbeteiligung . . . . .	286
	Liste studentischer Abschlussarbeiten . . . . .	289
	Vollständiges Literaturverzeichnis . . . . .	290
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>345</b>
	<b>Anhang</b>	<b>349</b>
<b>A</b>	<b>Konstruktionszeichnung modulares Koaxialresonatorfilter</b>	<b>350</b>
<b>B</b>	<b>Bemaßung Hohlleiterfilter</b>	<b>351</b>
<b>C</b>	<b>Bemaßung Dielektrische Filter</b>	<b>356</b>
<b>D</b>	<b>Koppelmatrizen</b>	<b>362</b>