

Reihe 20

Rechnerunter-
stützte Verfahren

Axel Hald,
Herrenberg

Nr. 473

Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in mikro- elektromechanischen Systemen



Technische Universität Dresden
Institut für Feinwerktechnik
und Elektronik-Design
Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

ifte

Technische Universität Dresden

Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in mikroelektromechanischen Systemen

Axel Hald

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Scheible
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach

Tag der Einreichung: Dresden, den 2. Dezember 2019

Tag der Verteidigung: Dresden, den 17. März 2020

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte
Verfahren

Axel Hald,
Herrenberg

Nr. 473

Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in mikro- elektromechanischen Systemen



Technische Universität Dresden
Institut für Feinwerktechnik
und Elektronik-Design
Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig



Hald, Axel

Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in mikroelektromechanischen Systemen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 473. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

176 Seiten, 107 Bilder, 10 Tabellen.

ISBN 978-3-18-347320-5, ISSN 0178-9473,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

Für die Dokumentation: MEMS-Sensoren – Parasiten-Extraktion – Elektrostatik-Analyse – MEMS-Entwurf – Field-Solver – polygonbasierter Entwurf – parasitäre Kapazität – Prozess-Simulation – Quasistatische Analyse – regelbasierte Strukturerkennung

Im Entwurf von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) gewinnen die parasitären elektrostatischen Effekte immer mehr an Einfluss. Auslöser hierfür ist der wirtschaftlich bedingte Zwang zur Minimierung von Chipfläche, der neben einer ständigen Strukturverkleinerung auch dazu führt, dass die Anschlussleitungen in sehr enger Nachbarschaft zu den mechanisch aktiven MEMS-Strukturen geführt werden. Dies erfordert eine hochgenaue Analyse der elektrostatischen Verhältnisse.

Die vorliegende Arbeit liefert hierzu mehrere Beiträge. Eine 2.5D-Prozess-Simulation ermöglicht eine effiziente und präzise Extraktion von Kapazitätswerten auf Basis von Analyse-Werkzeugen aus dem IC-Entwurf. Mit einem neuartigen Verfahren zur Strukturerkennung lassen sich diese Werte, vergleichbar zu einem LVS bei ICs, erstmals lokal zuordnen, wodurch gezielte Layoutoptimierungen möglich werden. Eine weitere Neuerung ist die Berücksichtigung bewegungsabhängiger Parasiten..

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9473

ISBN 978-3-18-347320-5

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Scheible für die sehr gute Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Danken möchte ich auch Herrn Johannes Seelhorst für die sehr gute Betreuung und Führung während meiner Arbeit, die ich in seiner Fachgruppe für das Layout von mikroelektromechanischen Sensoren (MEMS) bei der Robert Bosch GmbH in Reutlingen durchführen durfte. Herrn Pekka Herzogenrath (Bosch) und Herrn Hartmut Marquardt (Mentor Graphics) möchte ich für die fachliche Unterstützung und Diskussionen herzlich danken. Ebenfalls gilt mein Dank allen Mitdoktoranden und Kollegen aus den MEMS-Entwicklungsbereichen der Robert Bosch GmbH für die Unterstützung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach danke ich für die Übernahme eines der Gutachten.

Weiter möchte ich meinen KorrekturleserInnen (Karen Kauselmann, Lisa Karl, Andreas Kauselmann und Hermann Hald) danken, die wesentlich zur Steigerung von Form, Stil und Rechtschreibung der Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Sabrina, die mich jederzeit unterstützt und zum Durchhalten motiviert hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)	1
1.2	Entwurfsprozess für MEMS	2
1.3	Ziele der Arbeit	7
2	Kapazitive MEMS-Inertialsensoren	10
2.1	Basis-Prozesstechnologie für Oberflächenmikromechanik	11
2.2	Aufbau kapazitiver MEMS-Inertialsensoren	15
2.2.1	Beschleunigungssensor: Aufbau und Funktionsprinzip	16
2.2.2	Drehratensensor: Aufbau und Funktionsprinzip	18
2.2.3	Statische und dynamische Kapazitäten	19
2.3	Zusammenfassung	24
3	MEMS-Entwurf	25
3.1	Entwurf der mikromechanischen Strukturen	25
3.2	Entwurf der Chip-Geometrie	31
3.3	Aktueller Stand der Elektrostatik-Analyse	31
3.4	MEMS-Entwurfsprozesse	35
3.4.1	Bibliotheksbasierter Entwurfsprozess ausgehend von einer Geometrie-Beschreibung	38
3.4.2	Bibliotheksbasierter Entwurfsprozess ausgehend von einer Schaltplan-Beschreibung	40
3.4.3	Polygonbasierter Entwurfsprozess	41
3.4.4	Vergleichende Betrachtung der Entwurfsprozesse	43
3.4.5	Bewertung der Entwurfsprozesse hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit	45
3.5	Zusammenfassung	46
4	Präzisierung der Aufgabenstellung	48
5	Methoden zur Modellierung von MEMS-Prozessen für eine auf 3D-Field-Solvern basierenden Elektrostatik-Analyse	51
5.1	MEMS-spezifische Elektrostatik-Analyse basierend auf 3D-Field-Solvern	52
5.2	2,5D-Prozess-Simulation	54
5.2.1	Modellierung: Reaktives Ionentieftiefenätzen	54
5.2.2	Modellierung: Gas-Phasen-Ätzen	57
5.2.3	Modellierung: Topographie im Schichtaufbau	59

5.3	Demonstration	66
5.4	Verifikation der Extraktions-Ergebnisse	68
5.5	Zusammenfassung	70
6	Methode zur polygonbasierten Schaltplan-Extraktion mit einer regelbasierten Strukturerkennung	71
6.1	Grundlegende Idee und Einordnung in den Extraktions-Fluss	73
6.2	Regelbasierter Strukturerkennungs-Algorithmus	80
6.2.1	Eingabe	81
6.2.2	Architektur-Analyse	82
6.2.3	Definition der Topologie-Elemente mit ihren zugehörigen Regeln	83
6.2.4	Ableitung der Topologie-Elemente und Regeln bezüglich einer spezifischen Architektur	88
6.2.5	Segmentierung der Chip-Geometrie in Topologie-Elemente durch Anwenden der abgeleiteten Regeln	96
6.2.6	Ausgabe	96
6.3	Elektrostatistische RC-Analyse und Ersatzschaltplan-Synthese	97
6.4	Demonstration	100
6.5	Verifikation der Extraktions-Ergebnisse	109
6.6	Zusammenfassung	111
6.7	Anhang zu Kapitel 6	112
7	Methode zur Analyse bewegungsabhängiger elektrostatischer Effekte bei lateraler Auslenkung	115
7.1	Grundlegende Idee und Einordnung in den Extraktions-Fluss	116
7.2	Auslenkungs-Algorithmus	118
7.3	Demonstration	126
7.4	Verifikation	128
7.5	Zusammenfassung	131
8	Kombination der Methoden zur Analyse bewegungsabhängiger elektrostatischer Effekte bei lateraler Auslenkung mit der regelbasierten Strukturerkennung	132
8.1	Demonstration	133
8.2	Zusammenfassende Bewertung	136
9	Gesamtzusammenfassung und weiterführende Aufgaben	138
	Glossar	141
	Literaturverzeichnis	145

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden neue Methoden zur Analyse elektrostatischer parasitärer Effekte in mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) beschrieben.

In der Regel entwickelt man hoch optimierte MEMS immer noch in einem polygonbasierten Entwurfsprozess, aus dem nur eine reine 2D-Polygon-Beschreibung der MEMS-Strukturen resultiert. Auf dieser Basis wird eine 2,5D-Prozess-Simulation erarbeitet, die ein Modell für eine hochgenaue 3D-Field-Solver-basierte Elektrostatik-Analyse mit einer kommerziellen Software aus dem Elektronik-Entwurf ermöglicht.

Aufgrund der Polygon-Beschreibung der MEMS-Strukturen lassen sich bei der Elektrostatik-Analyse mit den bislang verfügbaren Werkzeugen immer nur die Kapazitäten zwischen den einzelnen Netzen extrahieren. Damit können insbesondere die extrahierten Werte keinen Komponenten zugeordnet und damit in der Geometrie nicht lokalisiert werden.

Die vorliegende Arbeit erweitert die Elektrostatik-Analyse um eine regelbasierte Strukturerkennung, die diese Schwachstelle beseitigt. Diese Strukturerkennung ermöglicht die Erkennung für den Entwickler relevanter Funktionselemente wie Federn, Elektroden oder seismische Massen, denen sich die extrahierten Werte nun zuordnen lassen.

Neben den elektrostatischen parasitären Effekten in der Ruhelage können in MEMS-Elementen aufgrund der beweglichen Strukturen auch bewegungsabhängige parasitäre Kapazitäten entstehen. Für die Analyse dieser Kapazitäten wird die entwickelte Elektrostatik-Analyse um eine Methode zur quasi-statischen Analyse ergänzt. Diese kann man zudem auch in Kombination mit der Strukturerkennung einsetzen.

Die neu entwickelten Methoden ermöglichen die präzise Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in MEMS-Elementen, die in einem polygonbasierten Entwurfsprozess entwickelt werden. Damit ermöglichen diese neuen Methoden, den Einfluss der elektrostatischen parasitären Effekte durch gezielte Layout-Anpassungen zu minimieren und die Elemente des Gesamtsystems schon während des Entwurfs besser aufeinander abzustimmen.

Abstract

In this thesis, new methods for the analysis of parasitic electrostatic effects in micro-electromechanical systems (MEMS) are presented.

Due to the lack of sophisticated component libraries for MEMS, highly optimized MEMS sensors are currently designed using a polygon-driven design flow. Hence, the resulting sensor structure is only given as plain 2D polygon data. Based on this polygon model a 2.5D fabrication-process simulation is developed, which enables the usage of commercial 3D field-solvers for a satisfactory analysis of the electrostatic parasitic effects.

Due to the plain polygon model of the MEMS structures, the extracted parasitic capacitances can be only analyzed between the nets of the MEMS. Particularly, the extracted capacitances cannot be associated with any functional components of the MEMS element, which hinders the localization of the parasitics in the geometry.

In order to solve this problem, the electrostatic analysis is extended by a rule-based recognition algorithm. This algorithm allows the identification of MEMS components such as springs, electrodes, or the seismic masses. Based on this data, the algorithm maps the extracted capacitances to these identified elements.

Beside the MEMS' parasitic capacitance in resting position, there can be additional changing parasitics arising from movements/deflections of the MEMS structures. To enable the analysis of such dynamic capacitances, the developed electrostatic analysis is extended by a method for the quasi-static analysis. This supplemental method can also be combined with the structure recognition approach.

The developed new methods allow the precise analysis of electrostatic parasitic effects in MEMS, which are designed using a polygon-driven design flow. All in all, the new methods enable specific optimization steps in the polygon structures in order to effectively minimize the impact of electrostatic parasitic effects. This also facilitates the tuning of the MEMS parts and their synchronisation within the entire system in early design stages.

1 Einleitung

1.1 Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)

In den letzten dreißig Jahre haben mikroelektromechanische Systeme (*MEMS*) eher unbemerkt Einzug in unseren Alltag gehalten.

Der große Durchbruch mit dem Übergang in die Massenfertigung fand bereits Anfang der 1990er Jahre statt, hauptsächlich in Sicherheits- und Motormanagement-Anwendungen im Automobil-Bereich (Abb. 1.1). Eine viel größere Anzahl an MEMS wird heute in der Consumer-Elektronik eingesetzt, wie beispielsweise in Smartphones, Smartwatches oder Tablets [1].

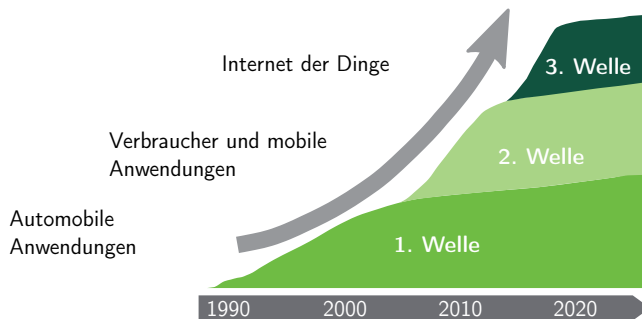


Abbildung 1.1: Haupttreiber der MEMS-Entwicklung [2].

In den kommenden Jahren ist noch einmal eine deutliche Steigerung der MEMS-Anwendungen im Bereich des „Internets der Dinge“ (engl. IoT - Internet of Things) zu erwarten. Ziel dabei ist es, Geräte miteinander zu vernetzen und „intelligent“ miteinander interagieren zu lassen. Damit die Geräte auf ihre Umgebung reagieren können, sind auch hier u. a. zahlreiche MEMS-Sensoren nötig [1].

Ein mikroelektromechanisches System (MEMS) besteht im Allgemeinen aus einem mikromechanischen Element, dem mechanischen Sensor oder Aktor und einem separaten mikroelektronischen Element, der Auswerteschaltung. Diese Schaltung ist grundsätzlich anwendungsspezifisch ausgelegt und wird daher auch als ASIC-Element (engl. application specific integrated circuit) bezeichnet (Abb. 1.2). Sie enthält in

der Regel analoge und digitale Schaltungen und Schnittstellen. Mit diesen werden je nach Anwendung die elektrischen Signale des MEMS-Elements verarbeitet und / oder die MEMS-Strukturen durch die elektrischen Signale des ASICs stimuliert und dadurch bewegt.

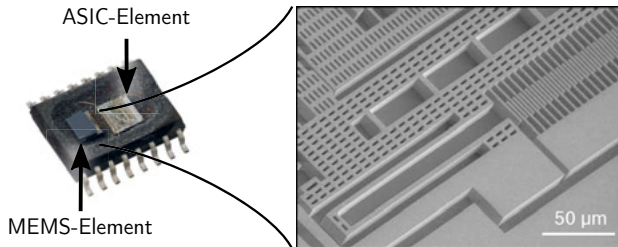


Abbildung 1.2: Links: MEMS-Inertialsensor mit seinem MEMS-Element und der Auswerteschaltung (ASIC). Rechts: REM-Foto einer typischen MEMS-Struktur [2].

Betrachtet man MEMS-Elemente, so kann man MEMS-Sensoren und MEMS-Aktoren unterscheiden, wobei es auch MEMS-Elemente gibt, die Aktoren und Sensoren zugleich sind.

Bei MEMS-Sensoren lassen sich die Strukturen in der Regel durch eine äußere Kraft bewegen, wie beispielsweise bei einem Beschleunigungssensor. Die Bewegung der MEMS-Strukturen wird dabei durch eine geeignete Auswerteschaltung detektiert.

Bei MEMS-Aktoren, wie beispielsweise einem DLP-Mikrospiegel (engl. Digital Light Processing) [3], werden die MEMS-Strukturen durch eine Auswerteschaltung über elektrische Impulse aktiv angeregt.

Ein Beispiel für ein MEMS-Element, das Sensor und Aktor zugleich ist, stellt der MEMS-Mikrospiegel der Firma Bosch Sensortec dar [4]. Dieses Element enthält sowohl Piezo-Widerstände für die Lageerkennung des Mikrospiegels als auch Aktoren, die den Mikrospiegel auslenken.

MEMS-Elemente sind also uni- oder bidirektionale mechanisch-electrische Signalkonverter.

1.2 Entwurfsprozess für MEMS

Beim Entwurf von MEMS muss hinsichtlich der Entwurfsdomänen ein heterogenes System gehandhabt werden, welches wiederum heterogene Teilsysteme enthält (Abb. 1.3). Für den Entwurf hochoptimierter MEMS wird in jeder dieser Domänen eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden benötigt, die man bisher nicht in einer gemeinsamen Entwicklungsumgebung betrachten kann.

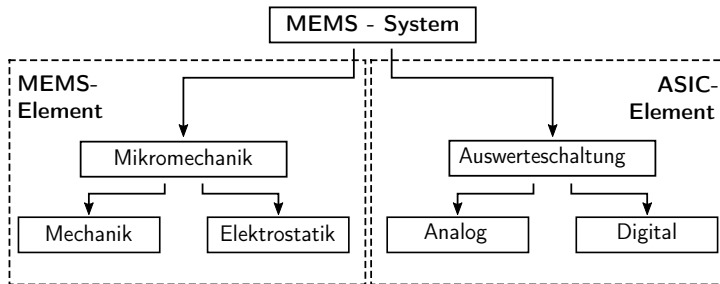


Abbildung 1.3: Aufbau eines MEMS als heterogenes System mit heterogenen Teilsystemen.

Aus diesem Grund wird das MEMS- und das ASIC-Element in der Regel in getrennten Entwicklungsumgebungen parallel entworfen. Durch manuelle Prüfungen oder System-Simulationen sichert man die Funktionalität des Gesamtsystems ab (Abb. 1.4).

Das mikromechanische Element selbst ist ebenfalls ein heterogenes System, das aus mechanischen (z. B. federnde Anschläge), mechanisch-elektronischen (z. B. Federn als elektrischer Leiter und mechanisches Element, vgl. nachfolgende Abb. 1.5) und rein elektronischen Komponenten (z. B. Elektroden) besteht. Bisher gibt es noch kein Entwurfswerkzeug, das den parallelen Entwurf einer komplexen Mikromechanik in beiden Domänen ermöglicht. Für den Entwurf solch komplexer MEMS-Elemente hat sich daher ein sequenzieller Entwurfsprozess durchgesetzt, in dem zuerst die mechanischen und anschließend die elektronischen Komponenten entworfen und optimiert werden (Abb. 1.4).

In den letzten Jahren hat sich die Forschung darauf konzentriert, einen Entwurfsprozess für mikroelektromechanische Systeme (MEMS) zu entwickeln, der dem Elektronik-Entwurf ähnlich und zu diesem kompatibel ist. Grundlegende Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung einer prozessspezifischen, voll parametrisierten Komponentenbibliothek, die die elementaren Komponenten, wie z. B. Federn, perforierte Platten, Balken und Kämme eines MEMS enthält. Mit einer speziellen 3D-CAD-Software kann damit ein MEMS konstruiert, simuliert und verifiziert werden. Dies ermöglicht insbesondere kleineren MEMS-Entwicklungsfirmen, für die eine eigene MEMS-Fabrik nicht wirtschaftlich ist, die Entwicklung von anwendungsspezifischen Kleinserien.

Mit der Einführung einer Komponentenbibliothek geht eine Standardisierung der elementaren Komponenten einher. Diese Standardisierung ermöglicht es, einerseits den Entwurfsprozess durch Softwarewerkzeuge zu unterstützen, schränkt aber andererseits die Entwurfsfreiheitsgrade ein.

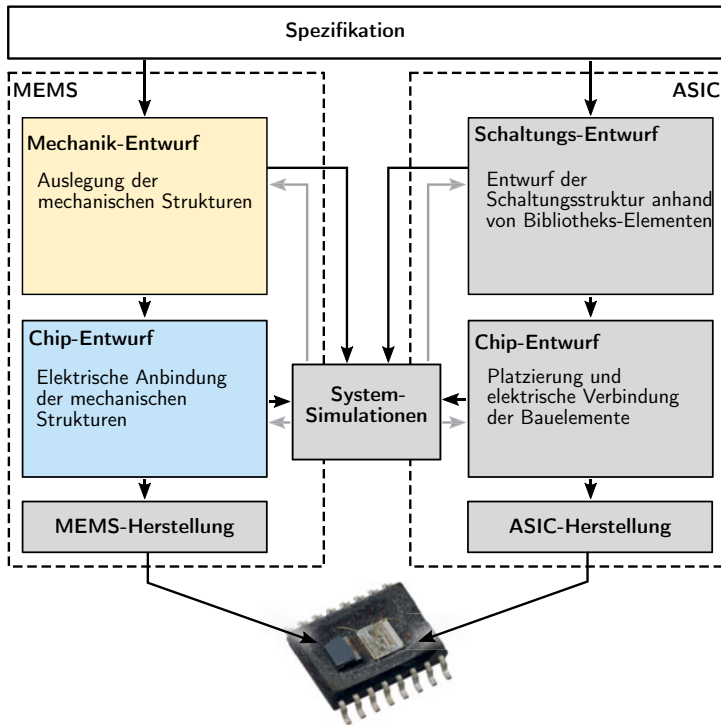


Abbildung 1.4: Überblick über den MEMS-Entwurfsprozess.

Für die Entwicklung von MEMS-Elementen in Großserien müssen hohe Anforderungen an Robustheit, Zuverlässigkeit und Empfindlichkeit unter der Bedingung minimaler Kosten realisiert werden. Dabei stehen die Kosten in direktem Verhältnis zu der Größe des MEMS-Elements. Durch die Einschränkung der Entwurfsfreiheitsgrade im bibliotheksbasierten Entwurf ist es nicht möglich, die hohen Anforderungen einzuhalten und die Größe so zu optimieren, dass man das MEMS-Element wirtschaftlich in Großserie herstellen kann.

Der benötigte Grad an Optimierung zwischen den hohen Anforderungen und der Größe des MEMS-Elements lässt sich bisher nur mit einem rein polygonbasierten Entwurfsprozess erreichen.

Im Fall eines kapazitiven MEMS-Sensors wird die mechanische Struktur in der Regel durch eine von außen einwirkende Kraft ausgelenkt. Dabei verändert sich der Abstand

zwischen den beweglichen Strukturen und den fixierten Elektroden. Proportional zu diesem Abstand steigt bzw. fällt die Koppelkapazität. Die Änderung dieser Kapazität kann von der Auswerteschaltung sensiert und in eine physikalische Größe, wie beispielsweise Beschleunigung, Drehung oder Druck, umgerechnet werden (vgl. Beispiel eines Beschleunigungssensors in Abb. 1.5).

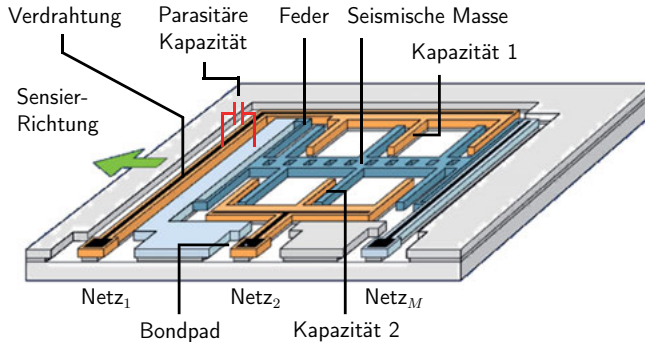


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung eines kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensors.

Aufgrund der immer kleiner werdenden MEMS-Strukturen gewinnen neben den mechanischen auch die elektrostatischen parasitären Effekte zunehmend an Einfluss. Der Grund hierfür liegt in der elektrischen Anbindung der mechanischen Elemente durch Verdrahtungs-Strukturen bzw. Leiterbahnen. Aufgrund der sehr kleinen Bauformen liegen diese dicht nebeneinander oder auch teilweise unterhalb beweglicher Strukturen. Deshalb bilden sich zum einen zwischen Leiterbahnen und zum anderen zwischen Leiterbahnen und beweglichen Strukturen unerwünschte Kapazitäten, sogenannte *parasitäre Kapazitäten*. In komplexen, mechanisch hochoptimierten MEMS-Sensoren sind derartige parasitäre Kapazitäten unvermeidbar. Diese können beispielsweise ein Rauschen im Ausgangs-Signal verursachen, weshalb sie einen direkten Einfluss auf die Funktionalität des Systems haben. Sie müssen daher detailliert analysiert und angepasst werden, sodass sie die Anforderungen der Auswerteschaltung bestmöglich erfüllen und sich ggf. auch durch diese kompensieren lassen. Daraus ergeben sich für einen kapazitiven MEMS-Sensor die wichtigen Anforderungen, dass die parasitären Kapazitäten möglichst klein und bei Detektions-Netze-Paaren gleich groß sind. In der schematischen Darstellung eines Beschleunigungssensors in Abb. 1.5 wäre die Gleichheit der parasitären Kapazitäten für die Detektions-Netze Netz_1 und Netz_2 nicht gegeben, da Netz_1 im Gegensatz zu Netz_2 sehr lange parallel zu Netz_M verläuft. Um diese besonders kritische Anforderung an die parasitären Kapazitäten bestmöglich zu erfüllen, wird versucht, in realen MEMS-Elementen die Verdrahtung

möglichst symmetrisch anzuordnen, so dass die Gleichheit unabhängig vom Absolutwert gegeben ist. In Abb. 1.6 ist dies an einem einachsigen Drehratensensor sehr gut ersichtlich. An Stellen, wo eine geometrische Symmetrie nicht möglich ist (wie im Beispiel der Abb. 1.5), strebt man eine quantitative Gleichheit der Kapazitätswerte an. Hierzu ist man darauf angewiesen, die auftretenden Kapazitätswerte möglichst exakt bestimmen zu können.

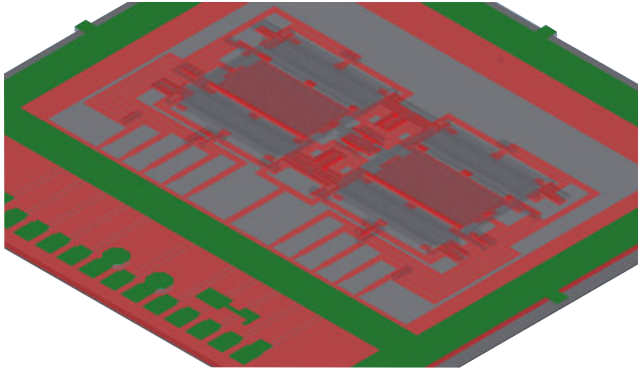


Abbildung 1.6: Einachsiger Drehratensensor [5], simuliert mit SEMulator3D von Coventor [6]. Unter der transparent dargestellten mechanischen Struktur (grau) kann man sehr gut die symmetrische Anordnung der Verdrahtung erkennen (rot).

Bei komplexeren MEMS-Sensoren ist aus Platzgründen oft keine symmetrische Verdrahtung mehr möglich. In diesen Fällen können die Anforderungen an die parasitären Kapazitäten der *Netze* ausschließlich über eine *Elektrostatik-Analyse* überprüft werden. Falls die parasitären Kapazitäten die Anforderungen nicht erfüllen, muss man diese durch manuelle Anpassungen in der Verdrahtung reduzieren bzw. angleichen. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der vorgenommen Anpassungen ist eine erneute Elektrostatik-Analyse durchzuführen.

Die Funktionalität des Gesamtsystems kann zusätzlich durch eine Ko-Simulation des MEMS-Elements mit der Auswerteschaltung sichergestellt werden. Voraussetzung für solch eine Simulation ist eine präzise Elektrostatik-Analyse des MEMS-Elements, die dessen elektrostatische Eigenschaften, bestehend aus Kapazitäten (C) und Widerständen (R), in eine *RC-Netzliste* extrahiert.

1.3 Ziele der Arbeit

Modellierung MEMS-spezifischer Prozessschritte für die Elektrostatik-Analyse

Damit das MEMS-Element und die Auswerteschaltung während des Entwurfs aufeinander abgestimmt werden können, sind die elektrostatischen Eigenschaften und die auftretenden parasitären Kapazitäten des MEMS-Elements sehr genau (und voneinander unterscheidbar) zu berechnen. Beispielsweise fordern aktuelle Spezifikationen der Auswerteschaltungen für kapazitive Drehratensensoren eine maximale *relative Abweichung* der parasitären Kapazitäten von unter einem Prozent [2].

Mit den bisher verwendeten analytischen Näherungen ist solch eine Genauigkeit für die MEMS-typischen komplexen 3D-Strukturen nur schwer erreichbar. Die nach derzeitigem Stand der Technik am besten geeignete Alternative für eine effiziente und hochgenaue Elektrostatik-Analyse ist der Einsatz eines kommerziellen *3D-Field-Solver* s. Derartige Werkzeuge werden bereits bei der Elektrostatik-Analyse integrierter Schaltkreise (engl. integrated circuits (IC)) in komplexen Regionen eingesetzt [7].

Das erste Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung von Methoden für die Modellierung der MEMS-spezifischen Prozessschritte, die es ermöglichen, die Field-Solver aus dem Elektronik-Entwurf auch für die MEMS-typischen 3D-Strukturen einsetzen zu können.

Methode zur Struktureerkennung

Aus dem heute üblichen MEMS-Entwurf resultiert eine graphische Repräsentation der Strukturen durch Polygone. Eine schematische Repräsentation der MEMS-Komponenten in einem Schaltplan ist bisher nicht üblich. Ein Abgleich der Polygon-Repräsentation mit dem Schaltplan, wie er bei der Elektrostatik-Analyse im IC-Entwurf gebräuchlich ist, kann daher nicht durchgeführt werden.

Die Konsequenz ist, dass ein Field-Solver nur die summarischen Koppelkapazitäten zwischen der Gesamtheit der jeweils zusammenhängenden Strukturen bzw. Netzen berechnen kann. Eine geometrische Zuordnung der extrahierten Werte sowie eine Trennung zwischen funktionellen und parasitären Kapazitäten ist bei diesem Ansatz zunächst nicht möglich.

Beispielsweise bedeutet dies, dass in einer Elektrostatik-Analyse des sehr stark vereinfachten Sensors aus Abb. 1.5 nur die gesamte Koppelkapazität zwischen dem $Netz_1$ und dem $Netz_M$ angegeben wird. Eine Unterscheidung und damit eine Trennung der funktionellen Kapazität zwischen den Elektroden und der parasitären Kapazität zwischen der Aufhängung als Teil des $Netz_M$ und der Verdrahtung als Teil des $Netz_1$ ist nicht möglich.

Für eine tiefere Analyse der elektrostatischen Eigenschaften ist daher insbesondere eine geometrische Zuordnung und damit auch eine Trennung von parasitären und funktionellen Kapazitäten notwendig, um ein höheres Optimierungspotenzial dieser Eigenschaften zu erreichen.

Das zweite Ziel dieser Arbeit ist es, diese Lücke im Entwurfsprozess durch die Entwicklung eines Strukturerkennungs-Algorithmus zu schließen. Dieser soll die wesentlichen Komponenten (z. B. Federn, Elektroden und seismische Massen) eines MEMS-Elements anhand vordefinierter Regeln erkennen. Die erkannten Komponenten kann man dann so aufbereiten, dass sie als Sub-Netze des ursprünglichen Netzes in den Extraktions-Ergebnissen repräsentiert werden. Dies ermöglicht auf Basis der erkannten Komponenten eine erste geometrische Zuordnung der aus der Elektrostatik-Analyse extrahierten Werte.

Methode zur Analyse bewegungsabhängiger parasitärer Kapazitäten

Im Allgemeinen enthalten MEMS bewegliche Strukturen, die an federnden Strukturen aufgehängt sind. Durch Bewegungen können diese beim ungünstigen Überstreichen von Leiterbahnen positionsabhängige parasitäre Kapazitäten erzeugen. Aufgrund der Trägheit ist die zeitliche Änderung der Position so gering, dass die elektrischen Felder als quasi-statisch betrachtet werden können.

Die bisher verfügbaren Simulations- und Analyse-Verfahren zur Extraktion positionsabhängiger parasitärer Kapazitäten sind für den Entwurf eines komplexen MEMS entweder zu einschränkend oder nicht hinreichend effizient einsetzbar. Das dritte Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Verfahrens für eine genaue und effiziente quasi-statische Analyse der positionsabhängigen parasitären Kapazitäten.

Kombination der Methoden

Abschließend sollen die Verfahren für die Strukturerkennung und der quasi-statischen Analyse miteinander kombiniert werden. Dies ermöglicht dann eine geometrische Zuordnung der bewegungsabhängigen parasitären Kapazitäten für eine gezielte Optimierung.

Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich damit folgende wissenschaftliche Erkenntnisgewinne:

- Bereitstellung stark vereinfachter Modelle für die MEMS-typischen Herstellungsprozess-Schritte, die bei einer ausreichenden Genauigkeit eine sehr schnelle Herstellungsprozess-Simulation ermöglichen. Diese Simulation ist die Voraussetzung für den Einsatz kommerzieller Field-Solver aus dem Elektronik-Entwurf für eine effiziente Elektrostatik-Analyse von MEMS-Elementen.
- Bereitstellung eines neuen Strukturerkennungs-Algorithmus, der eine regelbasierte Erkennung von Elementen in einer polygonbasierten Chip-Geometrie ermöglicht. Diese Methode kann mit einer Elektrostatik-Analyse kombiniert werden, wodurch die Lokalisierung von extrahierten Werten in der Chip-Geometrie möglich ist.
- Bereitstellung einer neuen Methode zur Analyse bewegungsabhängiger Kapazitäten in einem MEMS-Element, die ohne ein aufwändiges 3D-FEM-Modell der gesamten Chip-Geometrie auskommt.
- Kombination der entwickelten Methoden, wodurch es ermöglicht wird, die extrahierten bewegungsabhängigen Kapazitäten in der Chip-Geometrie zu lokalisieren.

2 Kapazitive MEMS-Inertialsensoren

Kapazitive MEMS-Inertialsensoren - dies sind Sensoren zur Erfassung von Beschleunigung oder Drehrate - haben einen relativ großen Marktanteil von ca. 25% (Abb. 2.1). Sie sind neben den MEMS-Drucksensoren die schon am längsten in Serienfertigung produzierten MEMS-Sensoren.

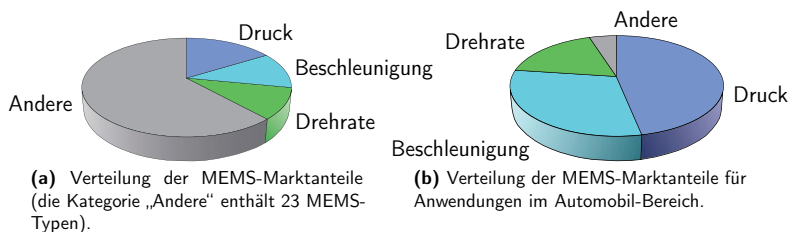


Abbildung 2.1: Verteilung der Marktanteile nach Sensor-Typen (Prognose aus dem Jahr 2015 für das Jahr 2017 von IHS [8]).

Die schon sehr ausgereiften kapazitiven Inertialsensoren haben daher mittlerweile eine Vorreiterstellung in der MEMS-Entwicklung, weshalb neue Verfahren für die Entwurfsautomatisierung in der Regel zuerst an diesen Sensoren zum Einsatz kommen. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit werden daher die in dieser Arbeit zu entwickelnden Methoden zur Entwurfsautomatisierung bzw. Entwurfsunterstützung anhand von MEMS-Inertialsensoren entwickelt, demonstriert und soweit wie möglich verifiziert. Die Methoden sind so allgemein gehalten, dass man sie unter jeweils definierten Voraussetzungen auch auf andere MEMS-Typen anwenden oder übertragen kann.

Gängige MEMS-Elemente werden aus Silizium hergestellt, da dieses Material neben seinen vorteilhaften Halbleitereigenschaften auch hervorragende mechanische Eigenschaften aufweist. Beispielsweise ist seine Biegegrenze viermal höher und sein thermischer Ausdehnungskoeffizient dreimal kleiner als der von Stahl. Zudem ist es ein sprödes Material, dass sich plastisch nicht verformt [9].

Die MEMS-Herstellungsverfahren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: Bulk-Micromachining und Surface-Micromachining (z. B. [9, 10, 11]). Ausgangspunkt für beide Herstellungs-Verfahren ist ein (einkristalliner) Silizium-Wafer, wie er auch für die Herstellung von integrierten Schaltungen verwendet wird.

Das ältere der beiden Verfahren ist das Bulk-Micromachining-Verfahren. Hierbei werden mehrere Silizium-Wafer durch selektive Ätzungen strukturiert und aufeinander „gestapelt“ (gebondet) (Abb. 2.2). Die Strukturgrößen sind in diesem Verfahren durch die Waferdicken beschränkt, wobei sich diese durch den Einsatz von Schleifprozessen reduzieren lassen.

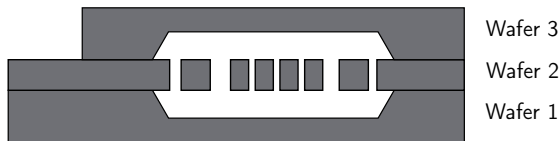


Abbildung 2.2: Schematischer Querschnitt eines MEMS-Elements, das durch mehrere strukturierte Wafer zusammengesetzt wurde (Bulk-Micromachining).

In den 1990er Jahren wurde das Surface-Micromachining zur Herstellung von Oberflächenmikromechaniken entwickelt. Dieses Verfahren ermöglicht es, sehr feine mikromechanische Strukturen herzustellen, indem dünne Schichten auf die Oberfläche eines Wafers abgeschieden und anschließend strukturiert werden. Zudem ist das Verfahren, im Gegensatz zur Bulk-Mikromechanik, in weiten Teilen kompatibel zu gängigen Verfahren zur Herstellung von integrierten Schaltungen, wodurch sich die Herstellungskosten reduzieren lassen. Aus diesen Gründen wird ein Großteil der kapazitiven MEMS-Inertialsensoren mittlerweile als Oberflächenmikromechanik realisiert.

In Abschnitt 2.1 wird ein vereinfachter MEMS-Herstellungsprozess für die Herstellung von Oberflächenmikromechaniken dargestellt. Alle in den folgenden Kapiteln verwendeten MEMS-Sensoren werden nach diesem Verfahren gefertigt.

Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.2 die Erklärung des Aufbaus typischer kapazitiver MEMS-Inertialsensoren und ihrer Funktionsprinzipie.

2.1 Basis-Prozesstechnologie für Oberflächenmikromechanik

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Prozess-Schritte für die Herstellung von oberflächenmikromechanischen Strukturen beschrieben.

Ausgangspunkt ist ein Silizium-Wafer, wie man ihn auch für die Herstellung von integrierten Schaltungen verwendet. Auf diesem werden abwechselnd Siliziumdioxid, poly-kristalline Silizium- und Metall-Schichten aufgebracht und strukturiert.

Bevor auf die einzelnen Herstellungsschritte näher eingegangen wird, erfolgt zunächst die Beschreibung einiger grundlegender allgemeiner Prozess-Schritte.

Bei der Herstellung von oberflächenmikromechanischen Strukturen kommen die selben grundlegenden Prozess-Schritte wie bei der Herstellung von integrierten Schaltkreisen (engl. IC, integrated circuit) zum Einsatz. Nach [12] lassen sich diese Prozess-Schritte in drei Gruppen gliedern: Material aufbringen, Material einbringen und Material abtragen.

Material aufbringen: Beim Aufbringen von Material wird oben auf den bereits in vorherigen Prozess-Schritten aufgebrachten Materialien auf dem Wafer eine weitere Schicht hinzugefügt. Zur Anwendung kommen hierfür Prozesse wie Oxidation, Epitaxie, Abscheiden (CVD) oder Sputtern (z. B. [12, 13, 14]).

Material einbringen: In oberflächenmikromechanischen MEMS-Elementen werden u. a. epitaktisch aufgewachsene poly-kristalline Silizium-Schichten eingesetzt. Wie alle Halbleiter ist dieses Material im Grundzustand nur sehr schlecht leitend. Um die Leitfähigkeit des poly-kristallinen Siliziums zu erhöhen, bringt man Fremdatome, sogenannte Dotier-Stoffe, in das Material ein (z. B. [14, 13]).

Material abtragen: Das Abtragen von Material erfolgt entweder durch Ätzen oder durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP). Letzteres spielt für das Grundverständnis des Schichtaufbaus eines MEMS eine eher untergeordnete Rolle und wird daher nicht weiter betrachtet.

Bei der Herstellung von MEMS-Elementen kommen verschiedene Ätz-Verfahren zum Einsatz. Das wohl wichtigste Verfahren ist das von Bosch entwickelte *reaktive Ionentieftätzen* (engl. Deep Reactive Ion Etching - DRIE) (z. B. [15, 16, 1, 10, 11]). Bei diesem Verfahren wird abwechselnd eine anisotrope reaktive Ionen-Ätzung mit SF_6 durchgeführt und ein Schutz der Seitenwände mit C_4F_8 aufgetragen [1]. Mit diesem Verfahren kann man sehr feine Strukturen herstellen, deren Aspektverhältnis (Verhältnis zwischen Breite und Höhe) weit über 1:10 liegt [1]. Dadurch ist es insbesondere möglich, in einer 10 bis 20 μm dicken poly-kristallinen Silizium-Schicht die für MEMS typischen feinen mechanischen Strukturen in der Größenordnung von wenigen Mikrometern zu erhalten.

Alle drei beschriebenen Gruppen von Prozess-Schritten wirken zunächst global auf den gesamten Wafer. Durch Fotolithographie kann deren Wirkung auf definierte Regionen auf dem Wafer eingeschränkt werden (z. B. [17, 14]).

Das zugrunde liegende Funktionsprinzip der Fotolithographie besteht darin, beispielsweise eine Ätzung oder Dotierung durch eine Maske einzuschränken. Diese Maske wird erzeugt, indem man auf eine bereits aufgetragene Schicht einen dünnen strahlungsempfindlichen Fotolack aufträgt. Durch eine Fotomaske wird der Lack selektiv belichtet und anschließend während der Entwicklung an diesen Stellen entfernt. Der zurückgebliebene Fotolack dient als Maske für den nachfolgenden Prozess-Schritt. In Abb. 2.3 ist das Grundprinzip einer selektiven Ätzung mit solch einer Lackmaske anhand eines poly-kristallinen Siliziums veranschaulicht.

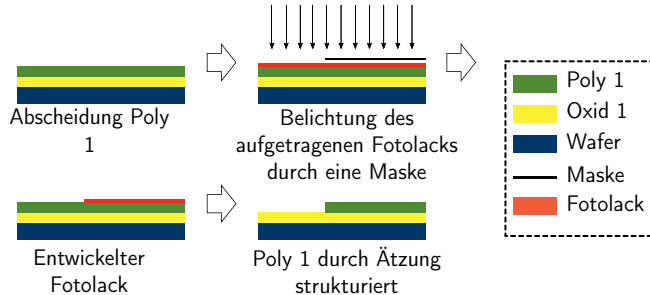


Abbildung 2.3: Strukturierung eines poly-kristallinen Siliziums mit Hilfe von Fotolithographie und einer Ätzung [17, 14]. **Oben links:** Abscheidung des Poly 1. **Oben rechts:** Der auf dem Poly 1 aufgetragene Fotolack wird durch eine Maske hindurch belichtet. **Unten links:** Der belichtete Fotolack ist entfernt. **Unten rechts:** An den Stellen, an denen der Fotolack entfernt wurde, ätzt man das Poly 1. Anschließend wird der restliche Fotolack entfernt.

Im Folgenden werden nun die wesentlichen Prozess-Schritte für die Herstellung von oberflächenmikromechanischen Strukturen beschrieben. Ausgangspunkt ist, wie in Abb. 2.4 (obere Reihe links) dargestellt, ein Silizium-Wafer.

Auf den Wafer wird zunächst ein Siliziumdioxid abgeschieden (Abb. 2.4, obere Reihe Mitte). Da Siliziumdioxid (im Folgenden Oxid) ein Dielektrikum ist, werden so die folgenden Strukturen elektrisch vom Wafer isoliert. Auf dieses Oxid wird ein dünnes poly-kristallines Silizium abgeschieden (im Folgenden Poly 1). Mit Hilfe von Fotolithographie und einer Ätzung strukturiert man das Poly 1 (Abb. 2.3 und Abb. 2.4, obere Reihe rechts).

In der Regel wird das Poly 1 für Leiterbahnen und Detektions-Elektroden eingesetzt. Um seine Leitfähigkeit zu erreichen, muss man es wie oben beschrieben hoch dotieren.

Im nächsten Schritt wird eine Oxid-Schicht auf das Poly 1 abgeschieden, welches man ebenfalls mit Fotolithographie und einer Ätzung strukturiert (Abb. 2.4, mittlere Reihe links). Abschließend wird ein sehr dickes Polysilizium (Poly 2) auf das Oxid

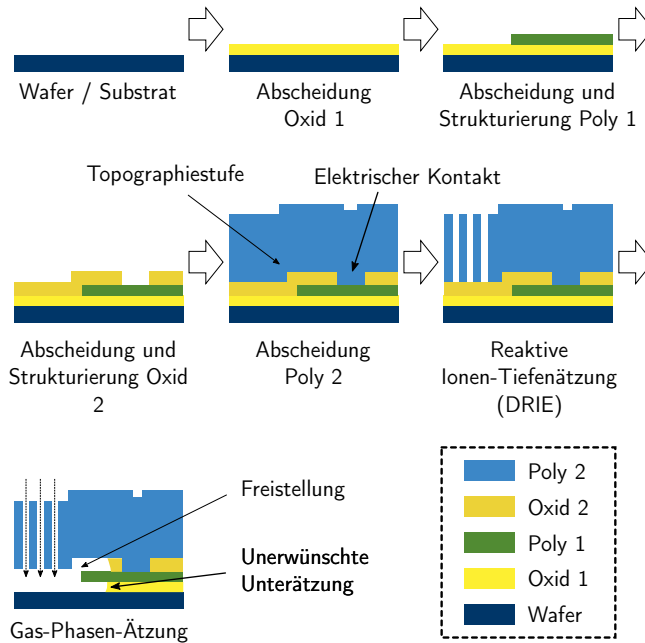


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der wesentlichen Prozess-Schritte für die Herstellung von oberflächenmikromechanischen Strukturen im Querschnitt.

abgeschieden (Abb. 2.4, mittlere Reihe Mitte). An allen Stellen, an denen das darunterliegende Oxid durch die vorherige selektive Ätzung entfernt wurde, liegt das Poly 2 direkt auf dem Poly 1 auf. So lassen sich die Strukturen in Poly 1 (insbesondere Verdrahtungen) mit den Strukturen in Poly 2 (insbesondere Ankerpunkte von mechanischen Strukturen wie Federn und Brücken für die Kreuzung zweier Leiterbahnen) elektrisch verbinden.

Das Poly 2 strukturiert man wie die anderen Schichten durch Fotolithographie und anschließendes Ätzen (Abb. 2.4, mittlere Reihe rechts). Wie oben beschrieben, wird hierfür als Ätzverfahren das von Bosch entwickelte Reaktive Ionentiefätzen eingesetzt [15, 16].

Wie in Abb. 2.4 (mittlere Reihe rechts) dargestellt, liegen die Strukturen in Poly 2 noch auf dem Oxid auf und sind daher noch fixiert. Die Freistellung der Strukturen in Poly 2 erfolgt durch eine *Gas-Phasen-Ätzung* (z. B. [18]). Bei diesem Verfahren wird von oben durch alle Öffnungen in der Poly 2 Schicht Ätzgas eingeleitet. Das Gas greift nur die Oxide an, wodurch diese in einer definierten Umgebung um alle

Das Diagramm zeigt zwei Querschnitte von Halbleiterstrukturen. Der obere Querschnitt ist für IC (integrierte Schaltungen) und der untere für MEMS (mikroelektromechanische Systeme) beschriftet. Eine Legende rechts ordnet die Farben den Schichten zu: Blau für Schicht 2, Grün für Schicht 1, Hellblau für Vias und Gelb für das Dielektrikum. Im IC-Struktur sind Vias durch die Schichten in einer Reihe angeordnet. Im MEMS-Struktur ist ein zentraler Bereich der Schicht 2 abgesenkt, um eine Vertiefung zu erzeugen.

2.2 Aufbau kapazitiver MEMS-Inertialsensoren

15

welchen Einfluss statische und bewegungsabhängige parasitäre Kapazitäten auf die Ausgangs-Signale eines MEMS-Sensors haben können.

Alternative Sensier-Prinzipie und Auswerteverfahren werden sehr ausführlich, beispielsweise in [19], beschrieben.

2.2.1 Beschleunigungssensor: Aufbau und Funktionsprinzip

Ein typischer Aufbau eines kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensors ist in Abb. 2.6 schematisch dargestellt.

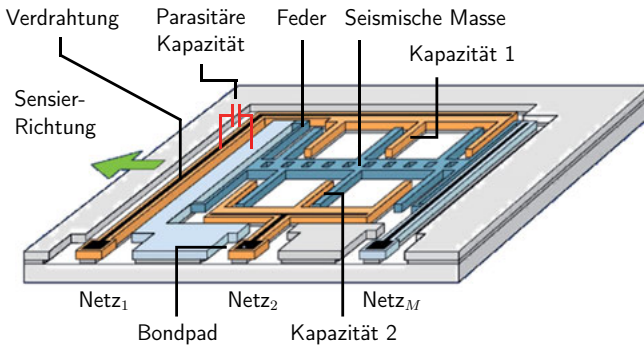


Abbildung 2.6: Typischer Aufbau eines kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensors.

Charakteristisch ist die zwischen zwei Federn aufgehängte seismische Masse, die durch eine von einer Beschleunigung verursachten Kraft aus der Ruhelage ausgelenkt wird. Dabei verändert sich der Abstand zwischen den Elektroden-Fingern der seismischen Masse (in Abb. 2.6 blau) und der Detektions-Elektroden (in Abb. 2.6 orange) differenziell.

Wie in Abb. 2.6 dargestellt, befinden sich die seismische Masse als bewegliche Mittel-Elektrode und die Detektions-Elektroden in separaten Netzen, d. h. sie haben insbesondere unterschiedliche elektrische Potentiale. Dadurch bilden sich zwischen den Elektroden Koppelkapazitäten aus, die sich in Abhängigkeit vom Abstand der Elektroden verändern (in Abb. 2.6 durch „Kapazität 1“ und „Kapazität 2“ markiert).

Die Veränderung der Kapazitäten zwischen den Elektroden wird in der Auswerteschaltung gemessen und ausgewertet.

Um eine lineare Abhängigkeit zwischen der Beschleunigung und der damit zusammenhängenden Auslenkung sowie der Änderung der Kapazitäten zu erhalten, kann

man eine Auswerteschaltung nach dem im Folgenden beschriebenen grundlegenden Prinzip realisieren.

In Gleichung 2.1 (z. B. [20]) wird eine mögliche Relation zwischen den Kapazitäten (C_1 und C_2), deren Abstand in Ruhelage (x) und der Auslenkung der seismischen Masse (Δx) beschrieben:

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\Delta x}{x}. \quad (2.1)$$

Nach dem Hookeschen Gesetz für Federsysteme gilt (Gleichung 2.2)

$$F = k \cdot \Delta x \quad \xleftrightarrow{F=m \cdot a} \quad m \cdot a = k \cdot \Delta x, \quad (2.2)$$

wobei F die Kraft, k die Federsteife und Δx die Auslenkung der Feder beschreiben. Weiter steht m für die Masse und a für die Beschleunigung.

Durch Auflösung der Gleichungen 2.1 und 2.2 nach Δx und anschließendem Gleichsetzen erhält man Gleichung 2.3, welche die Abhängigkeit zwischen einer Kapazitätsänderung und der äußeren Beschleunigung beschreibt:

$$a = \frac{k}{m} \cdot x \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}. \quad (2.3)$$

In einem idealen Beschleunigungssensor können die Nutz-Kapazitäten C_1 und C_2 mit der Kapazität eines idealen Plattenkondensators approximiert werden (Gleichung 2.4)

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}, \quad (2.4)$$

wobei A für die Fläche der gegenüberliegenden Platten und d für deren Abstand stehen. Des Weiteren ist ϵ_0 die elektrische Feldkonstante des Vakuums und ϵ_r die relative Permittivität des zwischen den Platten liegenden Dielektrikums [21].

Mit den Gleichungen 2.3 und 2.4 erhält man somit eine lineare Abhängigkeit zwischen der Beschleunigung und den Änderungen der Kapazitäten. In Abb. 2.7 ist dieser Zusammenhang an Beispielwerten dargestellt.

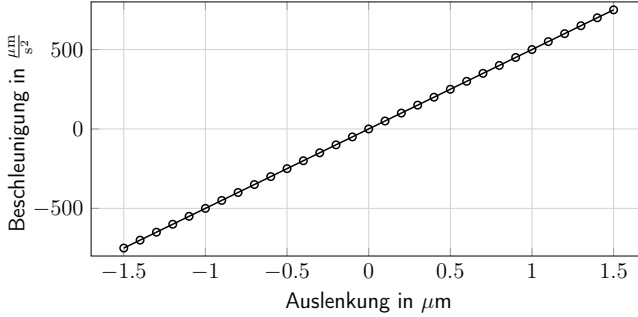


Abbildung 2.7: Lineare Abhängigkeit zwischen der Auslenkung bzw. der damit verbundenen Änderung der Nutz-Kapazitäten und der daraus berechneten Beschleunigung nach Gleichung 2.3. Verwendete Parameter: $x = 2 \mu\text{m}$, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$, $\epsilon_0 = 1$, $A = 44944 \mu\text{m}^2$.

2.2.2 Drehratensensor: Aufbau und Funktionsprinzip

Der typische Aufbau eines kapazitiven MEMS-Drehratensensors ist in Abb. 2.8 an einem Beispiel dargestellt.

Kapazitive Drehratensensoren detektieren eine Drehung um eine Raumachse. Das hierfür angewandte Messprinzip nutzt in der Regel die dabei auftretende Corioliskraft (z. B. [20]). Die Corioliskraft wirkt auf Körper, die sich relativ zu einem rotierenden Bezugssystem bewegen. Daher wird die mechanische Struktur eines Drehratensensors in Schwingung versetzt, damit diese immer in Bewegung ist. Diese „Antriebs-Schwingung“ wird durch die elektrostatische Kraft erzeugt, indem man an ineinandergreifende Elektroden-Kämme eine Wechsel-Spannung anlegt. In Abb. 2.8 sind die Antriebs-Kämme an den Seiten des Sensors angeordnet. Durch Anlegen einer Wechsel-Spannung wird der Antriebs-Rahmen (in Abb. 2.8 rot eingefärbt) zusammen mit dem Coriolis-Rahmen (in Abb. 2.8 gelb eingefärbt) in Schwingung versetzt.

Wird das schwingende System gedreht (in Abb. 2.8 geht die Rotationsachse durch die Sensor-Ebene, gelber Pfeil), so wirkt die Corioliskraft auf den Coriolis-Rahmen des Sensors ein und lenkt diesen im 90° -Winkel zur Antriebs-Bewegung aus (vgl. Abb. 2.8). Zusammen mit dem Coriolis-Rahmen wird auch der Detektions-Rahmen ausgelenkt. Dieser enthält viele Elektroden, die parallel zu jeweils einer festen Detektions-Elektrode angeordnet sind (vgl. Aufbau eines Beschleunigungssensors, Abschnitt 2.2.1). Durch die Auslenkung des Detektions-Rahmens verändert sich der Abstand zwischen diesen Elektroden. Die damit einhergehende Kapazitätsänderung zwischen den Elektroden kann in der Auswerteschaltung detektiert und ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 2.2.1).

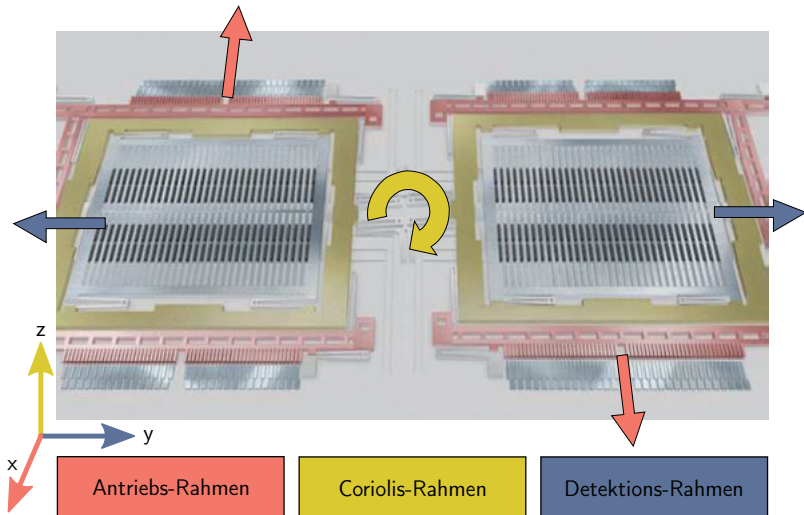


Abbildung 2.8: Kapazitiver MEMS-Drehratensensor [2]. Die roten Pfeile zeigen die Richtung der Antriebs-Schwingung an und der gelbe Pfeil die Drehachse, um die eine Drehung detektiert werden kann. Dreht man das System, so werden die Detektions-Rahmen durch die Corioliskraft in Richtung der blauen Pfeile nach außen, bzw. bei einer Antriebs-Schwingung in die Gegenrichtung nach innen bewegt.

2.2.3 Statische und dynamische Kapazitäten

In idealen kapazitiven Beschleunigungs- bzw. Drehratensensoren kann man die Nutzkapazität zwischen den Elektroden als die Kapazität eines idealen Plattenkondensators annehmen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Wie in Abschnitt 2.2.1 am Beispiel eines Beschleunigungssensors gezeigt, kann mit dieser Annahme ein linearer Zusammenhang zwischen einer Beschleunigung und der durch die damit verbundenen Auslenkung verursachten Kapazitätsänderung hergestellt werden.

Ein realer MEMS-Sensor enthält aber neben den mechanischen Strukturen auch Verdrahtungs-Strukturen. Mit diesen werden die mechanischen Elemente elektrisch an die Bondpads des Chips angebunden (vgl. Abb. 2.6). Zwischen den Verdrahtungs-Strukturen und den Verdrahtungs- und mechanischen Strukturen bilden sich ebenfalls *parasitäre Kapazitäten*. Diese haben einen direkten Einfluss auf die Ausgangs-Signale

des MEMS-Sensors.

Am in Abschnitt 2.2.1 dargestellten Auswerteprinzip eines kapazitiven Beschleunigungssensors lässt sich der Einfluss der parasitären Kapazitäten einfach veranschaulichen.

Die parasitären Kapazitäten C_{1P} und C_{2P} liegen zwischen dem $Netz_1$ bzw. $Netz_2$ und dem $Netz_M$, d. h. jeweils zwischen den Netzen mit den festen Detektions-Elektroden und der beweglichen Mittel-Elektrode (vgl. Abb. 2.6). Dann erweitert sich Gleichung 2.3 zu Gleichung 2.5:

$$a = \frac{k}{m} \cdot x \cdot \frac{C_1 - C_2 + C_{1P} - C_{2P}}{C_1 + C_2 + C_{1P} + C_{2P}}. \quad (2.5)$$

In Abb. 2.9 ist die Gleichung 2.5 mit Standardwerten aufgetragen, mit dem Zusatz, dass $C_{1P} = C_{2P}$.

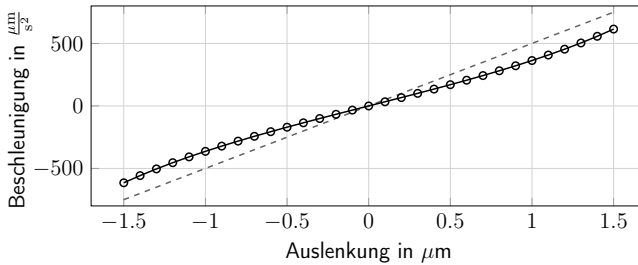


Abbildung 2.9: Einfluss parasitärer Kapazitäten auf das Ausgangs-Signal eines kapazitiven Beschleunigungssensors nach Gleichung 2.5. Die grau gestrichelte Gerade ist die Referenz aus Abb. 2.7 ohne parasitäre Kapazitäten. Verwendete Parameter: $x = 2 \mu\text{m}$, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$, $\epsilon_0 = 1$, $A = 44944 \mu\text{m}^2$, $C_{1P} = C_{2P} = 100 \text{ fF}$.

Sind die parasitären Kapazitäten ungleich, so verschiebt sich zusätzlich das Ausgangs-Signal, wie in Abb. 2.10 dargestellt.

Damit ein MEMS-Sensor korrekt sensiert, müssen die parasitären Kapazitäten in der Auswerteschaltung kompensiert oder ausgegletzt werden. In beiden Fällen ist es schon während der Entwurfsphase notwendig, die parasitären Kapazitäten genau zu charakterisieren, wofür eine präzise und effiziente Methode zur Elektrostatik-Analyse notwendig ist.

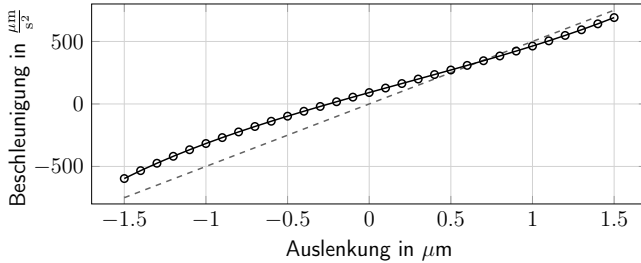


Abbildung 2.10: Einfluss asymmetrischer parasitärer Kapazitäten auf das Ausgangs-Signal eines kapazitiven Beschleunigungssensors nach Gleichung 2.5. Die grau gestrichelte Gerade ist die Referenz aus Abb. 2.7 ohne parasitäre Kapazitäten. Verwendete Parameter: $x = 2 \mu\text{m}$, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$, $\epsilon_r = 1$, $A = 44944 \mu\text{m}^2$, $C_{1P} = 100 \text{ fF}$ und $C_{2P} = 50 \text{ fF}$.

Eine typische Besonderheit hochoptimierter MEMS-Sensoren ist, dass sie auch Verdrahtungs-Strukturen unterhalb beweglicher Strukturen enthalten. Eine Ursache hierfür ist, dass durch die Verformung des Sensor-Packages ein mechanischer Stress auf die mechanischen Strukturen einwirkt, der zu einem Fehlsignal bzw. zu einer Verschiebung des Ausgangs-Signals führen kann. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, werden die Aufhängungspunkte der mechanischen Struktur möglichst dicht beieinander, d. h. in das Zentrum des Sensors platziert. In Abb. 2.11 ist dies schematisch am Beispiel eines Beschleunigungssensors dargestellt.

Zum elektrischen Anschluss der mechanischen Struktur ist es daher im Allgemeinen notwendig, dass Verdrahtungs-Strukturen teilweise unter der mechanisch beweglichen Struktur verlaufen (vgl. Abb. 2.11).

Durch die Verdrahtungs-Strukturen unterhalb der beweglichen Sensor-Strukturen können bewegungsabhängige parasitäre Kapazitäten entstehen. Im Folgenden werden diese parasitären Kapazitäten *dynamische parasitäre* Kapazitäten genannt.

Dynamische parasitäre Kapazitäten entstehen, wenn die bewegliche Struktur die Verdrahtungs-Struktur ungünstig überstreicht. Wenn bei einer solchen Überstreichung durch eine laterale Bewegung zusätzlich eine vertikale Bewegung der MEMS-Struktur auftritt, so vergrößert oder verringert sich der Abstand zwischen der Verdrahtungs- und der MEMS-Struktur. Das heißt, eine vertikale Bewegung verstärkt oder vermindert in diesem Fall nur diese dynamischen parasitären Kapazitäten. Neue dynamische parasitäre Kapazitäten können durch die vertikale Bewegung nicht entstehen, da die MEMS-Struktur durch die vertikale Bewegung keine neuen Verdrahtungs-Strukturen

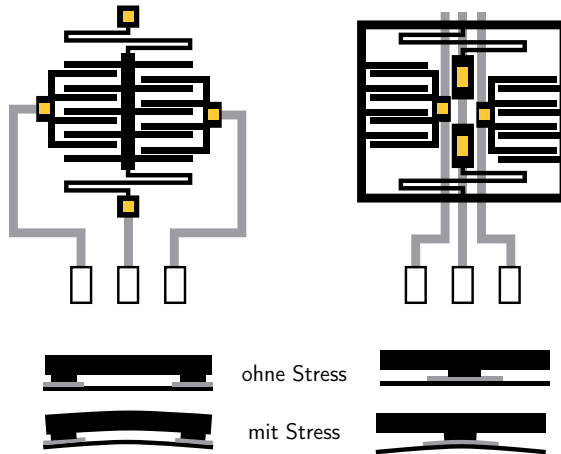


Abbildung 2.11: Oben: Schematische Darstellung eines einfachen MEMS-Beschleunigungssensors mit außen liegenden Aufhängungspunkten (links) und zentralen Aufhängungspunkten (rechts). Die Verdrahtung ist in grau, die mechanische Struktur ist in schwarz und die Übergänge zwischen den Schichten sind in gelb dargestellt. Unten: Schematische Darstellung von äußerer Stress-Einwirkung im Querschnitt durch den Schichtaufbau bei außen liegenden Aufhängungspunkten (links) und zentral liegenden Aufhängungspunkten (rechts).

überstreichen kann. Um die Verdrahtungs-Strukturen hinsichtlich dynamischer parasitärer Kapazitäten optimieren zu können, müssen diese Stellen bekannt sein. Zur ihrer Lokalisierung ist es daher ausreichend, nur die lateralen Verschiebungen zu betrachten.

Im Folgenden werden zwei Fälle von dynamischen parasitären Kapazitäten bei einer lateralen Auslenkung betrachtet. Im ersten Fall bewegt sich eine Struktur über eine Verdrahtung, wie in Abb. 2.12 dargestellt.

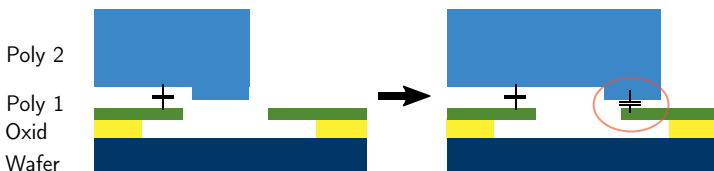


Abbildung 2.12: Dynamische parasitäre Kapazität, die durch eine Verschiebung einer Struktur in Poly 2 über eine Verdrahtungs-Struktur in Poly 1 entsteht.

Im zweiten Fall entstehen die dynamischen parasitären Kapazitäten durch dem

Herstellungsprozess inhärente Topographie-Stufen (vgl. Abschnitt 2.1). Abb. 2.13 zeigt eine solche Topographie-Stufe in einem REM-Schliffbild.

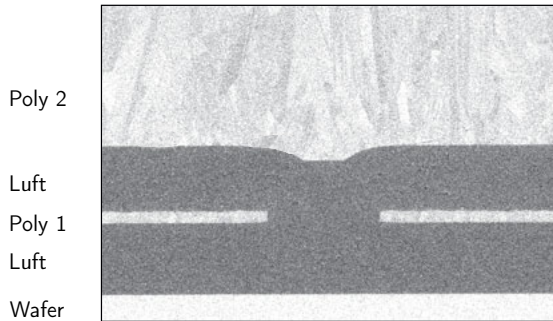


Abbildung 2.13: REM-Aufnahme eines Querschnitts eines gefertigten MEMS-Elements, das in der Prozesstechnologie aus Abschnitt 2.1 gefertigt wurde.

Bewegt sich solch eine Topographie-Stufe über eine Leiterbahn, so verändert sich der Abstand zwischen der Leiterbahn und der beweglichen Struktur und damit die Kapazität zwischen diesen, wie in Abb. 2.14 dargestellt.

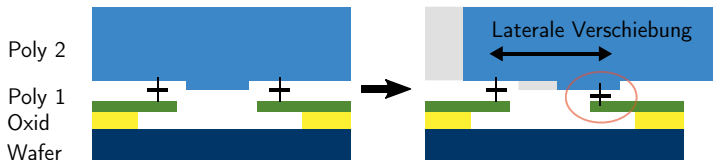


Abbildung 2.14: Dynamische parasitäre Kapazität, die durch Topographie an der Unterseite des Poly2 Layers verursacht wird.

Diese dynamischen parasitären Kapazitäten können ein Rauschen auf dem Ausgangs-Signal erzeugen und sind daher durch Anpassungen in den Verdrahtungs-Strukturen zu verhindern.

Mit den bisherigen Analyseverfahren (vgl. Kapitel 3) können solche dynamischen parasitären Kapazitäten nicht erfasst werden. Daher ist es für einen robusten MEMS-Entwurf notwendig, eine neue Analyse-Methode zur Erfassung dieser dynamischen parasitären Kapazitäten zu entwickeln.

2.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden grundlegende Verfahren für die Herstellung eines MEMS-Elements als Oberflächenmikromechanik dargestellt. In dem in Abschnitt 2.1 beschriebene Herstellungsprozess sind alle MEMS-Elemente entworfen worden, die als Beispiele zur Demonstration neu entwickelter Methoden in den folgenden Kapiteln herangezogen werden.

In den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2 wurde jeweils das grundlegende Funktionsprinzip kapazitiver Beschleunigungs- und Drehratensensoren beschrieben. In Abschnitt 2.2.3 folgte anschließend die Beschreibung möglicher Auswirkungen von statischen und dynamischen parasitären Kapazitäten auf das Ausgangssignal solcher MEMS-Sensoren. Aus den beschriebenen negativen Einflüssen dieser parasitären Kapazitäten motiviert sich die Entwicklung neuer Methoden zur Elektrostatik-Analyse, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden.

3 MEMS-Entwurf

Wie bereits in Abschnitt 1.1 erläutert, besteht ein mikroelektromechanisches System (MEMS-System) in der Regel aus einem mikromechanischen Element (MEMS-Element) und einem separaten mikroelektronischen Element (ASIC-Element). Aufgrund der sehr hohen Komplexität im Entwurf (vgl. Abschnitt 1.2), werden das MEMS-Element und das ASIC-Element in der Regel parallel in zwei getrennten Entwurfsumgebungen entwickelt (Abb. 3.1).

Im Folgenden ist nur der Entwurfsprozess des MEMS-Elements näher betrachtet und die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden sind darin eingeordnet.

Wie in Abb. 3.1 dargestellt, werden nach der Definition der System-Spezifikationen zuerst die mikromechanischen Strukturen entworfen. Anschließend folgt der Chip-Entwurf mit der Platzierung und der elektrischen Anbindung der zu diesem Zeitpunkt bereits fest definierten mechanischen Strukturen innerhalb eines Chips. Der MEMS-Entwurf wird aus diesem Grund typischerweise sehr stark vom Entwurf der mechanischen Strukturen geprägt und damit insbesondere durch die dort verwendeten Entwurfsmethoden eingeschränkt.

In den folgenden Abschnitten werden die in den Entwurfsschritten „Mechanik-Entwurf“ (Abschnitt 3.1) und „Chip-Entwurf“ (Abschnitt 3.2) eingesetzten Methoden allgemein beschrieben. In Abschnitt 3.3 ist die Elektrostatik-Analyse als Bestandteil des Chip-Entwurfs detailliert dargestellt. Aus diesem Abschnitt folgt insbesondere die grundlegende Motivation dieser Arbeit für die Entwicklung neuer Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in MEMS. Nach der allgemeinen Betrachtung der Entwurfsschritte folgt in Abschnitt 3.4 eine Beschreibung der derzeit eingesetzten Entwurfsansätze. Abschließend werden diese in Abschnitt 3.4.5 verglichen und hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bewertet.

3.1 Entwurf der mikromechanischen Strukturen

Geometrie

Eine zentrale Herausforderung beim Entwurf eines MEMS-Elements ist, dass die mikromechanischen Strukturen die Spezifikationen des Gesamt-Systems hinsichtlich

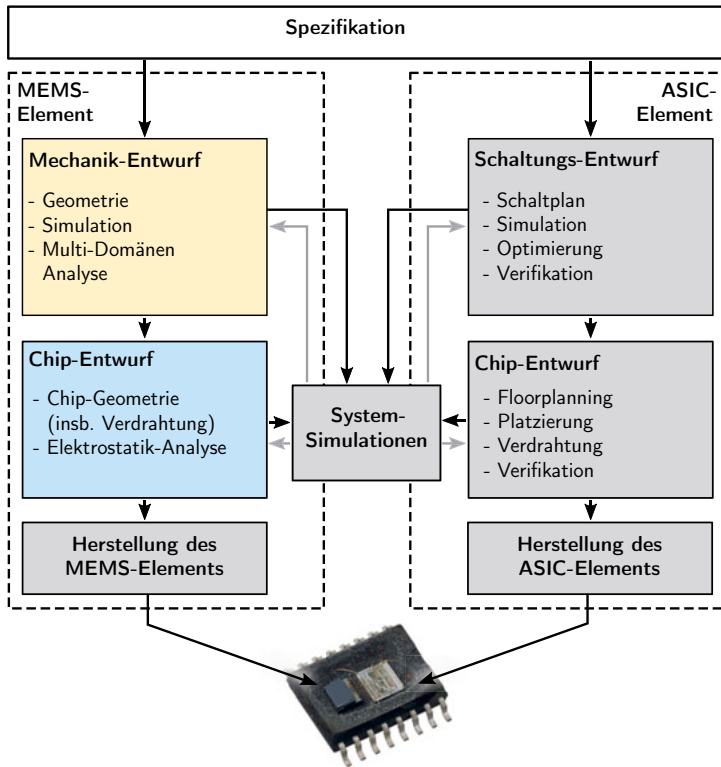


Abbildung 3.1: Überblick über den MEMS-ASIC-Entwurfsprozess.

Kriterien wie Sensitivität, Größe, Zuverlässigkeit oder Robustheit erfüllen. Aus diesem Grund beginnt ein MEMS-Entwurfsprozess typischerweise mit dem Entwurf der mechanischen Strukturen. In diesem Entwurfsschritt ist die Simulation des mechanischen Verhaltens essentiell, wobei die Simulationsmethoden zunächst unabhängig von der internen Repräsentation und dem Verfahren zur Definition der Geometrien sind. Auf diese Aspekte wird später in Abschnitt 3.4 näher eingegangen.

Simulation

Für die Simulation des mechanischen Verhaltens werden typischerweise auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basierende Verfahren eingesetzt. Je nach Anwendungsfall

setzt man beispielsweise eine 3D-FE-Analyse, eine 2D-FE-Analyse auf einem abstrahierten Modell oder eine FE-Modal-Analyse ein. Im Folgenden wird näher auf diese drei Simulations-Verfahren und ihre Anwendung im Entwurfsprozess eingegangen.

Die höchste Genauigkeit lässt sich mit einer (transienten) 3D-FE-Analyse erreichen. Aufgrund des sehr hohen Rechenaufwands wird diese Simulation bei komplexen mikromechanischen Strukturen nur in Einzelfällen durchgeführt, beispielsweise für die abschließende Verifikation.

Ausgehend von einem ersten Entwurf müssen die mikromechanischen Strukturen in der Regel angepasst und optimiert werden, bis ihr mechanisches Verhalten die System-Anforderungen erfüllt. Während der Optimierung ist daher das mechanische Verhalten für verschiedene Parameterkonfigurationen der Strukturen zu simulieren. Da dies mit einem 3D-FE-Ansatz zu aufwändig wäre, wird hierfür üblicherweise ein abstrahiertes 2D-FE-Modell eingesetzt. Dieses Modell ist aus sogenannten *atomaren Elementen*, wie beispielsweise Balken, Platte und Ankerpunkten, zusammengesetzt. Für jedes dieser atomaren Elemente ist ein entsprechendes FE-Modell verfügbar, wie beispielsweise für einen Balken ein Euler-Bernoulli- [22] oder Timoshenko-Balkenmodell [23].

Entscheidend für die Genauigkeit und Geschwindigkeit der Simulation ist die Wahl der atomaren Elemente bei der Modellierung der mikromechanischen Struktur im 2D-FE-Modell. Am Beispiel der perforierten Platte (Abb. 3.2), einer typischen MEMS-Struktur, lässt sich dies gut veranschaulichen.

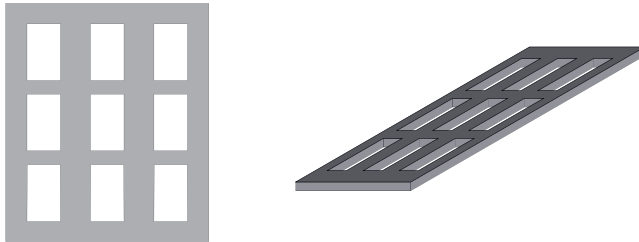


Abbildung 3.2: Perforierte Platte: **Links:** Aufsicht, **rechts:** 3D-Ansicht.

Wie in Abb. 3.3 dargestellt, kann eine solche perforierte Platte für die Simulation durch verschiedene atomare Elemente und damit unterschiedliche FE-Modelle beschrieben werden. Je nach gewähltem Modell variiert die Anzahl der Freiheitsgrade in der Simulation. Mit der Anzahl der Freiheitsgrade skaliert der Aufwand für die Simulation und die Genauigkeit der Ergebnisse.

Aufgrund der immer kleineren Abmessungen der MEMS-Elemente gewinnen die nichtlinearen mechanischen Effekte zunehmend an Einfluss, wie beispielsweise die Versteifung bei höheren Moden. Daher wurde in den letzten Jahren viel Aufwand

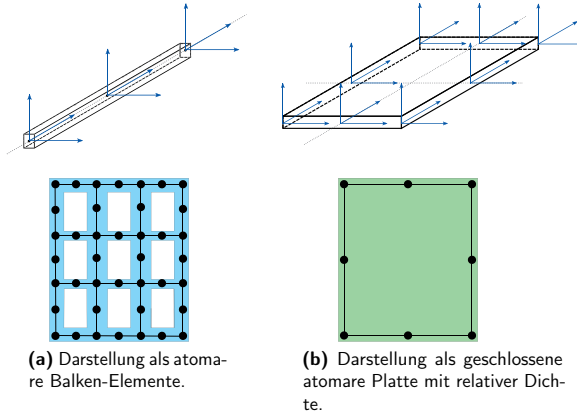


Abbildung 3.3: Darstellung der perforierten Platte aus Abb. 3.2 mit verschiedenen Modellen bzw. atomaren Elementen [24, 25].

betrieben, diese nichtlinearen Effekte in die zugrundeliegenden FE-Modelle mit einzu-
beziehen und damit in der Mechanik-Simulation zu berücksichtigen (z. B. [26, 27, 28,
29]). Auf Basis dieser Arbeiten ist es möglich, das mechanische Verhalten mit dem
abstrahierten 2D-FE-Modell des MEMS-Elements effizient bei hoher Genauigkeit zu
simulieren. In Kombination mit einem iterativen Optimierungs-Ansatz kann man so
das MEMS-Element sehr hoch optimieren.

Das abstrahierte 2D-FE-Modell des MEMS-Elements kann als Netzwerk aufgefasst
werden. Dabei entsprechen die atomaren Elemente den Komponenten des Netzwerks.
Des Weiteren lässt sich zur Berechnung des mechanischen Verhaltens eine Analogie
zu einem elektrischen Netzwerk ausnutzen. Dieser Ansatz wird beispielsweise in [30,
31, 32, 33, 34, 35] beschrieben.

Die grundlegende Idee bei diesem Ansatz besteht darin, dass ein Netzwerksimulator
mit Hilfe einer Transferfunktion F den Komponenten anhand einer Differenzgröße
eine Flussgröße zuordnet (Gleichung 3.1):

$$F(\text{Differenzgröße}) = \text{Flussgröße}. \quad (3.1)$$

Beispielsweise gilt für einen ohmschen Widerstand in einem elektrischen Netzwerk
die Beziehung aus Gleichung 3.2:

$$F(U) = I \quad \text{mit} \quad F(U) = \frac{U}{R}. \quad (3.2)$$

Für eine gegebene Spannungsquelle wird also durch den Simulator der entsprechende Spannungsabfall und Stromfluss über die Komponenten berechnet. Dies geschieht mit der Randbedingung, dass an den Knoten zwischen den Komponenten die Kirchhoff'schen Gesetze eingehalten sind.

Analog können die 2D-FE-Modelle der mechanischen Elemente eines MEMS als Komponenten in einem Netzwerk aufgefasst werden [30]. Die Verschiebung der Knoten der einzelnen Komponenten ergibt sich dabei aus der von außen einwirkenden Differenzgröße Geschwindigkeit oder Weg und der damit zusammenhängenden Flussgröße Kraft. Als Transferfunktion wird der in den Komponenten jeweils hinterlegte FE-Ansatz genutzt. Dadurch ist es möglich, die Kräfteverteilung und damit die Deformation der gesamten mechanischen Struktur anhand der Knotenverschiebungen abzubilden [30].

In Abb. 3.4 ist dieses Prinzip an einem einfachen Masse-Balken-System dargestellt, wobei der gemeinsame Knotenpunkt in Abb. 3.4 (Mitte) die Position der drei Elemente definiert.

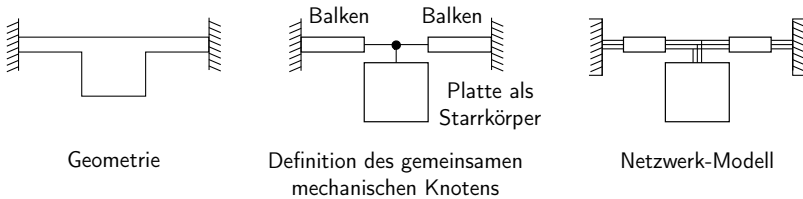


Abbildung 3.4: Eine schematische Darstellung des netzwerkbasierten Simulationsansatzes nach [30].

Neben den Translationen lassen sich in diesem Ansatz auch Rotationen abbilden, wobei damit jeder Knoten insgesamt sechs Freiheitsgrade besitzt (x -, y -, z -Koordinate, α , β , γ Kardanwinkel) [30].

Für die Simulation eines Netzwerk-Modells können Simulatoren aus dem Elektronik-Entwurf (z. B. SABER (Analogy Inc.)), aber auch einschlägige FEM-Software-Plattformen wie ANSYS [36] eingesetzt werden. Wie oben beschrieben, hängt die Genauigkeit und die Komplexität der Simulation von den gewählten atomaren FE-Modellen ab.

Das lineare mechanische Verhalten kann man auf dem abstrahierten 2D-FE-Modell auch mit einer FE-Modal-Analyse simulieren [37]. In dieser Simulation werden die Eigenschwingungsformen - auch Eigenmoden genannt - des Systems berechnet, indem die Bewegungsgleichungen der Strukturmechanik als Eigenwertproblem formuliert und gelöst werden. Die daraus resultierenden Eigenvektoren beschreiben die Eigenschwingungsformen des Systems.

Diese Eigenmoden spielen insbesondere bei kapazitiven MEMS-Drehratensensoren eine sehr große Rolle, da die Detektions- und Antriebs-Schwingungen gerade zwei Eigenmoden entsprechen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Damit der Sensor robust funktioniert, ist bei der Optimierung der Mechanik unter anderem sicherzustellen, dass keine höhere Mode diese beiden beeinflusst bzw. mit diesen koppelt.

Die ersten n Eigenvektoren repräsentieren die n Eigenschwingungsformen mit den niedrigsten Frequenzen und bilden eine Basis eines n -dimensionalen Teilraums, dem Modal-Raum. Durch eine Basistransformation lässt sich das MEMS-Modell in diesen niedriger dimensionalen Modal-Raum überführen. Diese Methode ist als Modale-Superposition bekannt [38, 39, 40]. Das daraus resultierende ordnungsreduzierte Modell (engl. ROM, reduced-order model) wird insbesondere für die Multi-Domänen Analyse eingesetzt.

Multi-Domänen-Analyse

In der sogenannten Multi-Domänen-Analyse (oft auch Multiphysik-Analyse genannt), wird das elektrostatische und das mechanische Verhalten zusammen simuliert. Diese Methode gewinnt aufgrund der immer kleiner werdenden MEMS-Strukturen an Bedeutung. Dies liegt daran, dass je kleiner das MEMS-Element ist, desto größer wird zum einen der Einfluss der Rückkopplungseffekte der elektrostatischen Kräfte auf das mechanische Verhalten und zum anderen der Einfluss der mechanischen Bewegung auf die elektrostatischen Eigenschaften.

Eine Multi-Domänen-Analyse kann man durch Einkopplung der elektrostatischen Eigenschaften als nichtlineare Kraft mit elektrostatischer Rückkopplung im Modal-Raum durchführen. Sie kann also auf Basis einer linearen Analyse des mechanischen Verhaltens erfolgen, bei der in die Differentialgleichung der Strukturmechanik die elektrostatischen Eigenschaften der Komponenten als nichtlineare Kräfte eingekoppelt werden [34].

Die aus der Multi-Domänen-Analyse resultierende dynamische Analyse des mechanisch-elektrischen Verhaltens ist die Grundlage für das System-Modell. Da die Multi-Domänen-Simulation in der Regel nur auf den mechanischen Strukturen basiert, enthält das aus der Multi-Domänen-Analyse berechnete System-Modell inhärent keine parasitären Kapazitäten, die beispielsweise durch erst später in der *Chip-Geometrie* hinzugefügte Verdrahtungen entstehen.

Diese parasitären elektrostatischen Effekte lassen sich nicht ohne Weiteres in die Multi-Domänen-Analyse mit einbeziehen, da für eine präzise Modellierung die Polygon-Struktur erheblich komplexer werden würde. Daher sind die parasitären Koppelkapazitäten aus der Elektrostatik-Analyse in die System-Simulation manuell mit eingebunden. Diese kann man aber nur als Konstanten berücksichtigen, da die Elektrostatik-Analyse bisher nur in der Ruhelage des MEMS-Elements durchgeführt werden kann (siehe Abschnitte 3.2 und 3.3). Dynamische parasitäre Effekte, wie sie

beispielsweise beim Überstreichen von Verdrahtungen entstehen können, sind daher vernachlässigt.

3.2 Entwurf der Chip-Geometrie

Erst nachdem die mechanischen Elemente optimal ausgelegt sind, werden sie in einem Layout-Editor in einen Chip platziert. Es folgt die manuelle elektrische Anbindung der mechanischen Komponenten an die Bondpads des Chips. Da der Entwurf der mechanischen Komponenten zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen ist, sind diese dabei nicht mehr zu verändern.

Ausgehend vom Layout-Editor kann auf Basis der polygonbasierten Beschreibung der Chip-Geometrie eine Elektrostatik-Analyse durchgeführt werden, wobei die zusätzlichen Prozess-Parameter für die Verdrahtung und den Chip mit zu berücksichtigen sind. Außerdem ist es notwendig, eine Prozess-Simulation zu implementieren, die das 2D-Modell aus dem Layout-Editor entsprechend für die Elektrostatik-Analyse aufbereitet. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden beinhalten neben dieser Prozess-Simulation auch weiterführende Methoden zur Elektrostatik-Analyse eines MEMS-Elements auf Basis der Chip-Geometrie. Aus diesem Grund ist die Elektrostatik-Analyse in Abschnitt 3.3 ausführlicher dargestellt.

Für die Verifikation der Chip-Geometrie werden Design Rule Checks (DRC) eingesetzt. Mit diesen ist überprüfbar, ob alle Randbedingungen des Herstellungsprozesses beim Entwurf der Mechanik und der Verdrahtung eingehalten wurden. Im Gegensatz zum Elektronik-Entwurf von analogen bzw. digitalen Schaltkreisen steht für den MEMS-Entwurf bisher noch keine ausgereifte Methode für eine abschließende Verifikation der Chip-Geometrie gegenüber einem Schaltplan (Layout versus Schematic (LVS)) zur Verfügung (mehr dazu im folgenden Abschnitt 3.4.2).

Wenn das MEMS-Element hinsichtlich seiner elektrostatischen Eigenschaften optimiert ist und alle Entwurfsregeln eingehalten sind, folgt das Schreiben der Masken (tape out) und die Herstellung des MEMS-Elements in einer speziellen MEMS-Halbleiterfabrik (vgl. Abschnitt 2.1).

3.3 Aktueller Stand der Elektrostatik-Analyse

Im MEMS-Entwurf findet das vorhandene 3D-Modell aus der Simulation des mechanischen Verhaltens (Abschnitt 3.1) auch für eine Elektrostatik-Analyse Verwendung. Allerdings werden in der Regel die Verdrahtungs-Strukturen und die umgebenden Chip-Strukturen nicht während des Entwurfs der mechanischen Strukturen erzeugt, sondern erst später im Entwurf der Chip-Geometrie (Abschnitt 3.2). Bei dieser

Vorgehensweise werden gerade die kritischen parasitären Kapazitäten, die durch die später hinzugefügten Verdrahtungs-Strukturen entstehen, vernachlässigt (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Für eine Elektrostatik-Analyse auf Basis der polygonbasierten Chip-Geometrie war es bisher ausreichend, die gängige Methode aus dem Elektronik-Entwurf zu übernehmen. Bei dieser Methode werden die elektrostatischen Eigenschaften anhand einer 2D-musterbasierten Methode, wie in [41] beschrieben, berechnet. Verfügbare kommerzielle Software-Werkzeuge für diese Aufgabe sind beispielsweise Cadence Assura [42] oder Mentor Graphics xRC [43].

Bei dieser Extraktionsmethode sind zunächst analytische Näherungen für die Berechnung der Kapazität zwischen allen möglichen Schicht-Konfigurationen zu entwickeln. Beispielsweise müssen, wie in Abb. 3.5 dargestellt, die lokalen Koppel- und Streufelder zwischen benachbarten, übereinanderliegenden oder sich kreuzenden Strukturen analytisch modelliert werden.

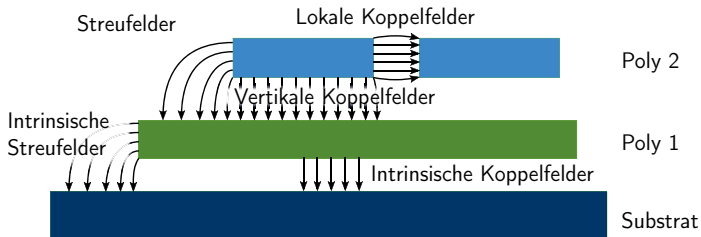


Abbildung 3.5: Querschnitt durch einen Schicht-Stapel, der aus einem Substrat (Wafer) und zwei Polysilizium-Schichten besteht. Zwischen allen möglichen Schicht-Konfigurationen müssen analytische Näherungen für die Berechnung der Kapazitäten definiert werden (Bezeichnung der verschiedenen Koppelfelder nach Calibre xRC [43]).

Für eine möglichst genaue Berechnung sind die analytischen Näherungen zusätzlich jeweils auf typisch auftretende geometrische Strukturen - wie Leiterbahnen, perforierte Platten oder Fachwerk-Strukturen - zu optimieren. Diese nur in definierten Schicht-Konfigurationen und Strukturen gültigen analytischen Näherungen müssen in der Extraktion auf die Regionen angewendet und eingeschränkt werden, in denen die zugrundeliegenden geometrischen Strukturen auftreten. Diese Einschränkung erfolgt anhand von Erkennungs-Mustern.

Für eine einfache Leiterbahn (Abb. 3.6) könnte man die analytische Näherung wie folgt durchführen:

Die Kapazität zwischen zwei benachbarten Leiterbahnen kann näherungsweise mit Hilfe der Formel zur Berechnung der Kapazität eines idealen Plattenkondensators

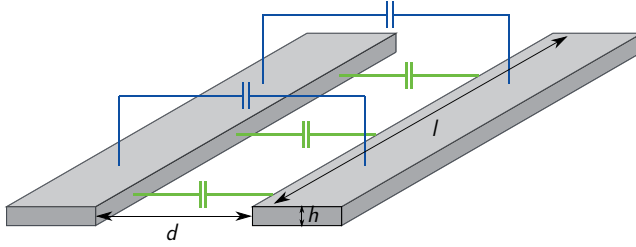


Abbildung 3.6: Kapazität zwischen zwei parallelen Leiterbahnen; grün: Plattenkapazität, blau: Streufeldkapazität.

[21] und einem zusätzlichen Streufeldfaktor bestimmt werden (Gleichung 3.3):

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{l \cdot h}{d} \cdot s. \quad (3.3)$$

Die Variablen l und h beschreiben die Länge und Höhe der gegenüberliegenden Leiterbahnen und d deren Abstand zueinander (vgl. Abb. 3.6). Des Weiteren stehen ϵ_0 für die elektrische Feldkonstante des Vakuums, ϵ_r für die relative Permittivität des zwischen den Leiterbahnen liegenden Dielektrikums und s für einen zu bestimmenden Streufeldfaktor.

Bisher wurde bei der Robert Bosch GmbH [2] solch eine 2D-musterbasierte Elektrostatik-Analyse im MEMS-Entwurf eingesetzt. Die Geometrie im Kernbereich der MEMS-Elemente ist durch perforierte Platten dominiert. Daher wurde für diese Elektrostatik-Analyse eine analytische Näherung an eine Kapazität zwischen einer perforierten und einer geschlossenen Platte anhand eines FEM-Modells entwickelt ([44], Abb. 3.2).

Für die Verifikation einer Elektrostatik-Analyse für MEMS wurden im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts MEMS2015 [45] eine Reihe von Teststrukturen entworfen, die typische MEMS-Strukturen enthalten (vgl. Abb. 3.7).

Die 2D-musterbasierte Elektrostatik-Analyse wurde auf diese Teststrukturen (Abb. 3.7) angewendet. In Tabelle 3.1 sind die gemittelten Abweichungen der Extraktions-Ergebnisse von den gemessenen Werten angegeben. Neben den insgesamt sehr hohen Abweichungen heben sich die Abweichungen bei den Fachwerk-Teststrukturen - mit im Durchschnitt über 36% - noch einmal hervor. Dies liegt daran, dass, wie oben erwähnt, die analytische Näherung ursprünglich für eine perforierte Platte erstellt wurde.

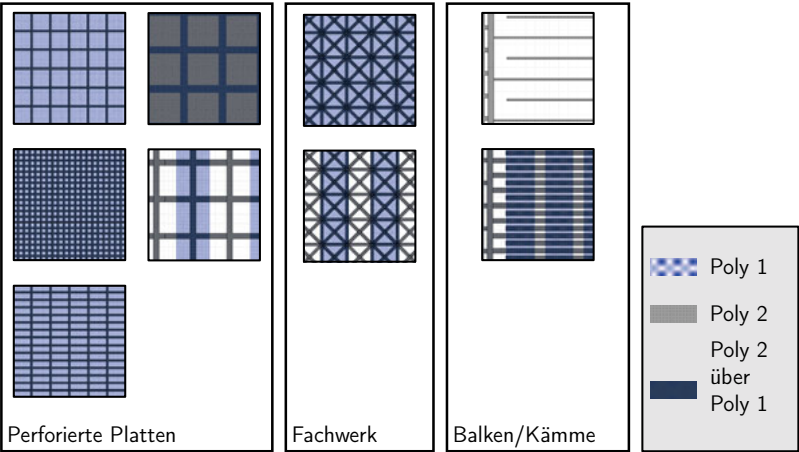


Abbildung 3.7: Auszug der Teststrukturen für die Verifikation einer Elektrostatik-Analyse für MEMS, die im Rahmen des ÖgPs *MEMS2015* entwickelt wurden. Die Teststrukturen sind auf einzelnen Chips separiert und enthalten neben verschiedenen typischen Strukturen wie perforierten Platten, Balken oder Fachwerk-Strukturen jeweils eine größere Anzahl an Struktur-Variationen. Die Teststrukturen wurden in der Basis-Prozesstechnologie gefertigt, die in Abschnitt 2.1 beschrieben ist.

Tabelle 3.1: Gemittelte Abweichungen der Extraktions-Ergebnisse der 2D-musterbasierten Elektrostatik-Analyse am Beispiel der Teststrukturen aus Abb. 3.7. In der ersten Spalte sind alle Extraktions-Ergebnisse der insgesamt 57 Teststrukturen zusammengefasst. In den weiteren Spalten sind die Ergebnisse der einzelnen Geometrie-Strukturen aufgeschlüsselt (nicht alle Strukturen sind einzeln aufgeführt).

2D-musterbasierte Extraktion	Gesamt	Perforierte Platten	Fachwerk-strukturen	Balken
Gemittelte Abweichung zu den Messwerten in %	24,83	18,48	36,42	5,68

Aufgrund der steigenden Anforderungen müssen die MEMS-Strukturen immer höher optimiert werden. Dies führt zu immer feineren und komplexeren Strukturen, bei denen die Varianz der eingesetzten Geometrien steigt. So enthalten aktuelle MEMS-Drehratensensoren nicht mehr nur rechtwinklig perforierte Strukturen, sondern auch beliebig verwinkelte Fachwerk-Strukturen (vgl. Abb. 3.7, [2]). Wie oben beschrieben, führt diese Entwicklung dazu, dass die Extraktions-Ergebnisse immer stärker von den tatsächlichen Werten abweichen.

Dieser Entwicklung könnte man mit hohem Aufwand entgegenwirken, indem man weitere Muster und analytische Näherungen in die Berechnung einbezieht. Allerdings bleibt dabei weiterhin das Problem bestehen, dass die Kapazitäten zwischen den durch die Muster definierten Regionen schwer zu charakterisieren sind [41] (Abb. 3.8).

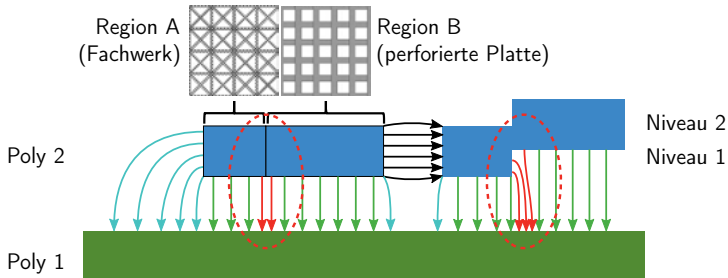


Abbildung 3.8: In den Grenzregionen zwischen den Mustern/Regionen bzw. Topographie-Stufen (rot eingekreist) können die Kapazitäten nur mit großem Aufwand allgemein analytisch beschrieben werden.

Aufgrund der kleineren Strukturen nehmen die Einflüsse der parasitären Kapazitäten auf das Verhalten des MEMS-Elements überproportional zu. Dazu kommt, dass auch die inhärenten Herstellungsprozess-Effekte, wie beispielsweise die Topographie (vgl. Abschnitt 2.1), stark an Einfluss auf die parasitären Kapazitäten gewinnen und in der bisher angewandten Elektrostatik-Analyse nicht berücksichtigt werden.

Die bestehende Elektrostatik-Analyse auf Basis von 2D-Modellen ist daher nicht mehr ausreichend für die Auslegung aktueller MEMS-Elemente.

Um insbesondere den sicheren, robusten und effizienten Entwurf von hochoptimierten MEMS-Elementen im polygonbasierten Entwurf weiterhin sicherstellen zu können, ist es notwendig, eine allgemeinere Extraktionsmethode für den MEMS-Entwurf zu adaptieren. Diese neue Methode soll es ermöglichen, die Elektrostatik-Analyse anhand der gesamten Chip-Geometrie in einem 3D-Modell inklusive der Herstellungsprozess-Effekte mit einer Finite-Elemente- oder Randbedingungen-Methode (unter dem Einsatz eines Field-Solvers) durchzuführen (siehe Kapitel 4, Präzisierung der Aufgabenstellung).

3.4 MEMS-Entwurfsprozesse

In den vorherigen Abschnitten 3.1 bis 3.3 wurden die MEMS-Entwurfsschritte und die darin typischerweise eingesetzten Simulations- und Analyse-Methoden allgemein

beschrieben. In diesem Abschnitt wird nun, wie in Abschnitt 3.1 angekündigt, auf die heute etablierten Entwurfsprozesse eingegangen, mit besonderem Augenmerk auf die Methoden für den Entwurf und die Beschreibung der mechanischen Strukturen.

Die Entwicklung der mechanischen Strukturen findet immer noch weitgehend in einem rein polygonbasierten Entwurfsprozess statt. Die hohe Flexibilität und Individualität dieses historisch entwickelten Entwurfsansatzes erlaubt eine bestmögliche Ausnutzung der Entwurfsfreiheitsgrade für ein spezifisches mikroelektromechanisches Element. Demgegenüber ist er aber mit einem enormen Aufwand für die Weiterentwicklung der Entwurfs- und Simulationsmethoden verbunden. Daher wurde in den letzten Jahren viel an einem zum Elektronik-Entwurf ähnlichen, bibliotheksbasierten Entwurfsprozess geforscht. In diesem soll der MEMS-Entwurf durch die Bereitstellung parametrisierter Komponenten in einer Bibliothek auf eine höhere Abstraktionsebene gehoben und dadurch vereinfacht werden.

Charakteristisch für ein MEMS-Element sind seine typischerweise symmetrischen mechanischen Strukturen, die sich aus wiederkehrenden leicht variierten *Grundkomponenten* - wie Federn oder Kamm-Strukturen - zusammensetzen. Diese Grundkomponenten bestehen wiederum aus wenigen atomaren Elementen, wie beispielsweise einem Balken (Beispiele sind in Abb. 3.9 dargestellt, vgl. Abschnitt 3.1).

Es gibt zwei grundlegende Ansätze für einen bibliotheksbasierten Entwurf. Im ersten wird die mechanische Struktur des MEMS-Elements nur anhand der hinterlegten Kompaktmodelle als Systemmodell beschrieben (Abb. 3.9, grün hinterlegt). Auf Basis dieses „Schaltplans“ wird das mechanische und elektrostatische Verhalten des MEMS anhand der Modelle der einzelnen Grundkomponenten simuliert und optimiert. Anschließend erzeugt man in einem Synthese-Schritt mit den Polygon-Generatoren der einzelnen Komponenten und atomaren Elemente die Geometrie der mechanischen Strukturen.

Der aktuellere bibliotheksbasierte Ansatz geht genau andersherum vor (Abb. 3.9, blau hinterlegt). Zuerst wird die Geometrie der mechanischen Struktur anhand vordefinierter Komponenten beschrieben und anschließend aus dieser eine äquivalente Darstellung anhand der hinterlegten Kompaktmodelle extrahiert. Durch die Abstraktionen in den Kompaktmodellen der Grundkomponenten kann man die Simulation des mechanischen Verhaltens im Vergleich zum polygonbasierten Ansatz beschleunigen.

Der historische polygonbasierte Ansatz besteht darin, nur eine Geometrie-Beschreibung der MEMS-Struktur zu verwenden (Abb. 3.9, rot hinterlegt). Auf Basis dieser rein geometrischen Beschreibung wird das mechanische Verhalten des MEMS-Elements mit verschiedenen Finite-Elemente-basierten Methoden (FEM) simuliert. Um alle

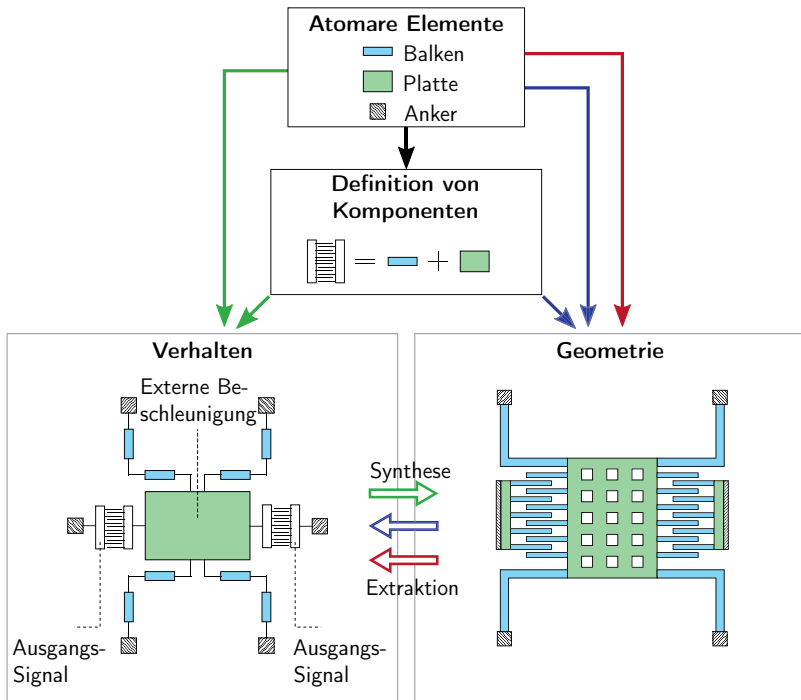


Abbildung 3.9: Überblick über die elementaren MEMS-Entwurfsmethoden. Mit roten Pfeilen ist der Fluss des polygonbasierten Entwurfs dargestellt und mit blauen der Fluss des bibliotheksbasierten Entwurfs. Die grünen Pfeile markieren eine Variante des bibliotheksbasierten Entwurfs, in dem sich aus einer schematischen Beschreibung der Komponenten eine Geometrie synthetisieren lässt.

Entwurfsfreiheitsgrade voll ausnutzen zu können, sind bei diesem Entwurf die mikromechanischen Strukturen typischerweise nur durch atomare Elemente beschrieben.

In den folgenden Unterabschnitten werden die Entwurfsmethoden der drei angesprochenen Entwurfsansätze näher betrachtet. In Abschnitt 3.4.4 folgt dann eine Zusammenfassung und eine abschließende Bewertung hinsichtlich der Einsetzbarkeit der verschiedenen Ansätze.

3.4.1 Bibliotheksbasierter Entwurfsprozess ausgehend von einer Geometrie-Beschreibung

In den letzten Jahren wurde intensiv daran gearbeitet, einen zum Elektronik-Entwurf ähnlichen bibliotheksbasierten Entwurfsprozess zu entwickeln. In Abb. 3.10 ist dieser schematisch dargestellt. In [34] und [46] wird der bibliotheksbasierte Ansatz anhand der MEMS-Entwicklungsplattform MEMS+ von Coventor [47] ausführlich beschrieben.

Ähnliche, aber noch nicht so weit ausgereifte Entwurfsansätze sind beispielsweise in [48, 49] vorgeschlagen.

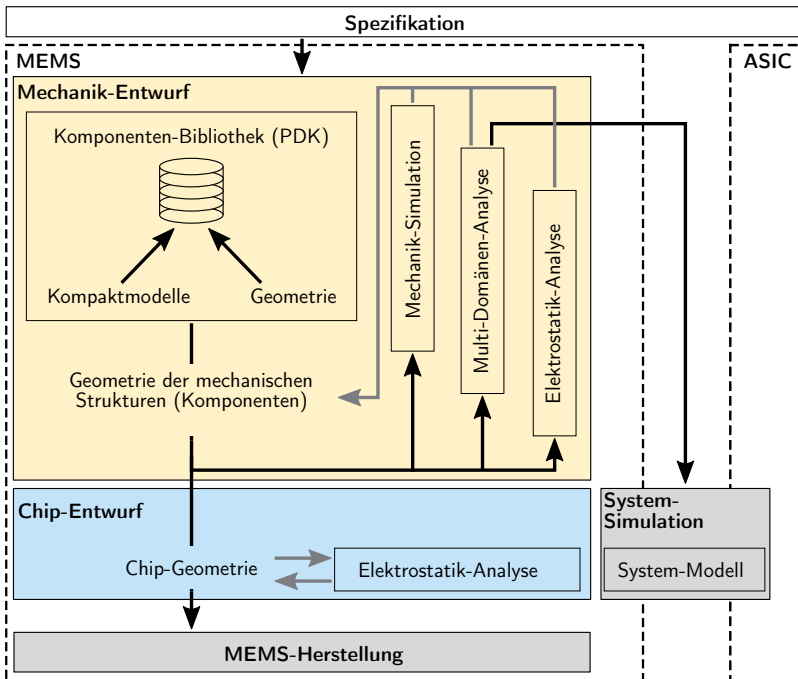


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des bibliotheksbasierten Entwurfsprozesses ausgehend von einer Geometriebeschreibung für MEMS. Aus Gründen der Lesbarkeit wurde auf die Markierung der Rückkopplungen der System-Simulation auf die Geometrien verzichtet. Diese sind in Abb. 3.1 dargestellt.

Die Entwicklung eines MEMS-Elements in diesem Entwurfsprozess beginnt mit dem Entwurf der mechanischen Strukturen in einem 3D-CAD-System auf Basis einer Komponenten-Bibliothek. Bekannte CAD-Systeme für MEMS sind beispielsweise Coventor MEMS+ [47] oder IntelliSense IntelliSuite [50]. Ein größerer Überblick ist in [51] gegeben.

Die eingesetzte Komponenten-Bibliothek enthält atomare Elemente wie beispielsweise Balken, Federn und perforierte Platten. Außerdem stellt sie parametrisierte Grundkomponenten wie Federn oder Kamm-Strukturen bereit, die aus mehreren atomaren Elementen zusammengesetzt sind (vgl. Abb. 3.9).

Mittlerweile können erste Komponenten-Bibliotheken als Process Design Kit (PDK) von MEMS-Halbleiterherstellern lizenziert werden (z. B. XFAB: XMS10, 1-Achsig-Inertial-Sensoren oder SMB10, 3-Achsig-Inertial-Sensoren [52]).

Die Schwierigkeit bei der Definition von Komponenten ist die Auswahl der atomaren Elemente mit ihren jeweils zugehörigen FE-Modellen und damit verfügbaren Freiheitsgraden für die anschließende Simulation des mechanischen Verhaltens (vgl. Abschnitt 3.1). Für eine möglichst schnelle Simulation müssen atomare Elemente mit möglichst wenig Freiheitsgraden für eine Komponente ausgewählt werden. Durch diese Annahmen kann es aber zu Ablagen in der Simulation zum realen Verhalten kommen. Beispielsweise kann eine Struktur ohne Einschränkung nur dann als Starrkörper in der Simulation angenommen werden, solange seine Eigenfrequenzen deutlich über den Eigenfrequenzen des Gesamtsystems liegen. [30]. Diese Annahme hängt aber entscheidend von der tatsächlichen Geometrie ab, d. h. der Zusammenstellung der Komponenten. Da diese nicht von vornherein festgelegt ist, kann diese Annahme nicht allgemeingültig sein und somit zu Abweichungen in der Simulation führen.

Außerdem können die bisherigen Komponenten aus den verfügbaren Komponenten-Bibliotheken nicht auf ihre Umgebung reagieren und damit ihr Verhalten in der Simulation nicht kontextabhängig verändern. Daher ist es notwendig, eine homogene und wohldefinierte Umgebung für die Komponenten festzulegen. Dies wird durch Einschränkungen der Entwurfsfreiheitsgrade erreicht, sodass beispielsweise im Chip-Entwurf keine Leiterbahnen unter den beweglichen Strukturen platziert werden dürfen, da diese eine Rückkopplung auf die darüberliegenden Strukturen haben (vgl. Kapitel 2).

Alternativ bieten die oben genannten Entwurfsumgebungen auch die Möglichkeit, eigene technologiespezifische Komponenten-Bibliotheken zu erstellen. Dafür stehen eine Reihe von atomaren Elementen zur Verfügung (z. B. Balken, flexible/starre/-massive/perforierte Platten oder gebogene Balken). Durch Kombination dieser atomaren Elemente können größere anwendungsspezifische Komponenten erzeugt werden (z. B. Feder- oder Kamm-Strukturen, vgl. Abb. 3.9). Die Auswahl der atomaren Elemente beinhaltet dabei immer ein Abwägen zwischen der Genauigkeit und der

Laufzeit der nachfolgenden Simulation des mechanischen Verhaltens (vgl. Abschnitt 3.1).

3.4.2 Bibliotheksbasierter Entwurfsprozess ausgehend von einer Schaltplan-Beschreibung

Alternativ zu dem geometrisch getriebenen bibliotheksbasierten Entwurfsprozess wird beispielsweise in [53, 54, 55, 56] ein schaltplangetriebener, bibliotheksbasierter MEMS-Entwurfsprozess beschrieben, der in Abb. 3.11 schematisch dargestellt ist.

Dieser Entwurfsprozess unterscheidet sich vom vorherigen Ansatz (Abschnitt 3.4.1) in der Form, dass die mechanischen Strukturen des MEMS-Elements zunächst auf einer sehr abstrakten Ebene durch Kompaktmodelle der einzelnen Komponenten aus der Bibliothek als Netzwerk beschrieben werden (vgl. Abb. 3.9, links, grün hinterlegt).

Voraussetzung für die Synthese der mechanischen Struktur ist, dass diese schon „vorgedacht“ wurde. Das heißt insbesondere, dass die Topologie des MEMS-Elements parametrisiert, aber festgelegt ist und im Synthese-Schritt nur noch entsprechend den Anforderungen angepasst wird. In [57, 58, 59] ist dieser Ansatz mit dem Prinzip von „LEGO-Steinen“ verglichen, die kombiniert und aneinandergesetzt werden.

Nach Abschluss der Synthese der mechanischen Strukturen und der folgenden Erstellung der Chip-Geometrie kann man diese wieder mit dem ursprünglichen Schaltplan vergleichen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Chip-Geometrie als Polygon-Repräsentation das im Schaltplan vorgesehene Verhalten abbildet. Im Elektronik-Entwurf ist diese Methode zur Verifikation einer Schaltung als Layout versus Schematic (LVS) bekannt.

Grundlegende Idee dieser Verifikations-Methode ist es, die Bibliotheks-Komponenten aus der zweidimensionalen Chip-Geometrie zu extrahieren und hieraus eine neue Netzliste zu generieren. Diese Netzliste kann anschließend mit dem ursprünglichen Schaltplan verglichen werden, der die Basis für die Erstellung der Chip-Geometrie war.

In [60] ist eine LVS-Methode für MEMS mit einer Manhattan-Chip-Geometrie vorgestellt. Für die Extraktion bzw. Erkennung der Komponenten in der Chip-Geometrie wird diese zunächst in die minimale Anzahl überdeckender Rechtecke unterteilt. Auf Basis ihrer Nachbarschaftsbeziehungen werden diese Rechtecke anschließend kombiniert, bis sie zu einer Struktur einer Komponente aus der Bibliothek passen [61, 62]. Danach charakterisiert man die Komponenten mit Hilfe eines Field-Solvers. Der so extrahierte Ersatzschaltplan mit den charakterisierten Komponenten kann dann mit dem Schaltplan aus dem Entwurf verglichen werden. Für die Erkennung der Komponenten aus der Chip-Geometrie ist in [63] ein effizienter Algorithmus vorgestellt, sodass die Extraktion in moderater Zeit möglich ist. Nach [60] und [64]

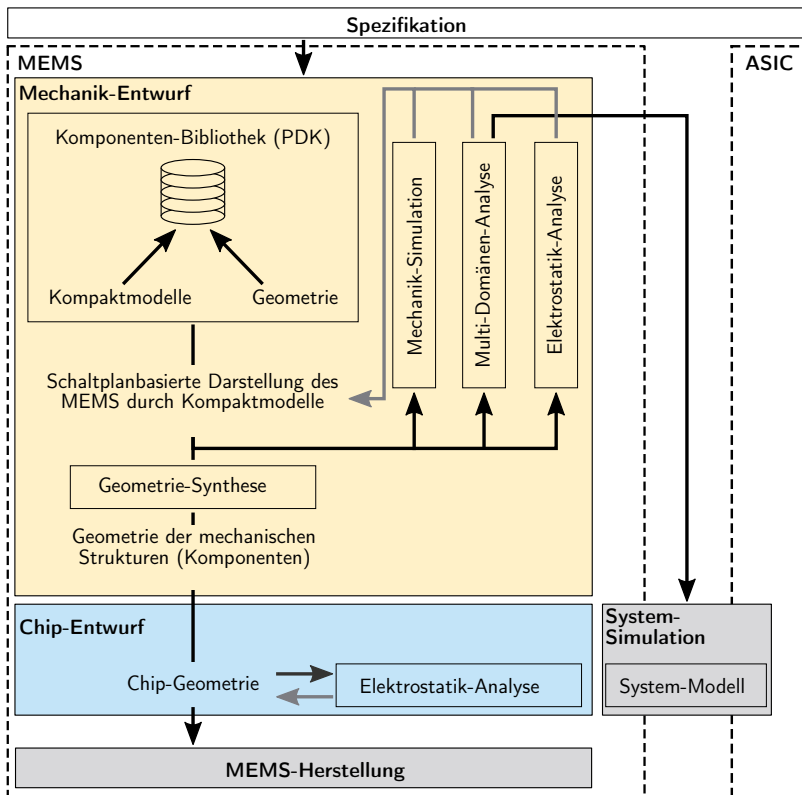


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung des bibliotheksbasierten Entwurfsprozesses ausgehend von einem Schaltplan für MEMS. Aus Gründen der Lesbarkeit wurde auf die Markierung der Rückkopplungen der System-Simulation auf die Geometrien verzichtet. Diese sind in Abb. 3.1 dargestellt.

lässt sich der Ansatz auch auf Nicht-Manhattan-Strukturen erweitern.

3.4.3 Polygonbasierter Entwurfsprozess

Der polygonbasierte Entwurfsprozess für MEMS-Elemente ist in Abb. 3.12 schematisch dargestellt.

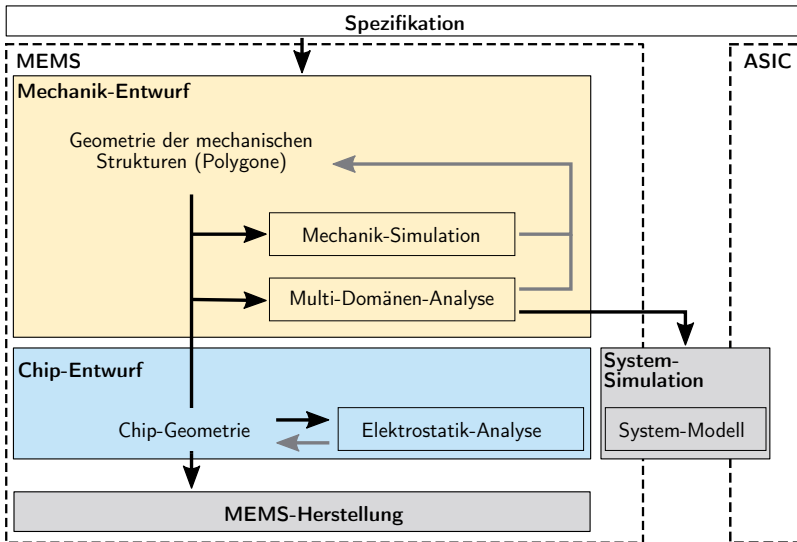


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung des polygonbasierten Entwurfsprozesses für MEMS. Aus Gründen der Lesbarkeit wurde auf die Markierung der Rückkopplungen der System-Simulation auf die Geometrien verzichtet. Diese sind in Abb. 3.1 dargestellt.

Der wesentliche Unterschied des polygonbasierten gegenüber einem bibliotheksbauierten Entwurfsansatz besteht darin, dass die Entwurfsumgebung in der Regel auf Eigenentwicklungen basiert in Kombination mit vorhandenen Software-Werkzeugen. Dies ermöglicht auf der einen Seite eine individuelle Anpassung der Entwurfsumgebungen und damit der Simulationmethoden an die zu entwickelnden MEMS-Elemente. Auf der anderen Seite ist es mit sehr großem Aufwand verbunden, eine durchgehende Entwicklungsumgebung zunächst aufzubauen und anschließend weiterzuentwickeln.

Beim polygonbasierten MEMS-Entwurf wird zunächst nur die mechanische Komponente des MEMS-Elements in einem (3D) CAD-System entworfen. Dabei erstellt man neben dem polygonbasierten „Zeichnen“ der Geometrie ein abstrahiertes 2D-FE-Modell der Struktur, das typischerweise nur aus atomaren FE-Balken-Elementen besteht (vgl. Abb. 3.9, rot hinterlegt). Die Idee ist dabei, durch diese minimale Abstraktion den Fehler in der Simulation des mechanischen Verhaltens bestmöglich zu reduzieren (vgl. Abschnitt 3.1). Außerdem ist es in diesem Entwurfsansatz auch möglich, für die MEMS-Struktur optimierte FE-Modelle in den atomaren Elementen einzusetzen.

3.4.4 Vergleichende Betrachtung der Entwurfsprozesse

In diesem Abschnitt werden die Entwurfsprozesse aus den Abschnitten 3.4.1, 3.4.2 (bibliotheksbasiert) und 3.4.3 (polygonbasiert) miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten bewertet.

Die meisten Veröffentlichungen zum schaltplanbasierten Entwurfsprozess (Abschnitt 3.4.2) sind deutlich über zehn Jahre alt. In der Praxis hat sich dieser bisher nicht etabliert. Dies liegt vermutlich an dem sehr einschränkenden Synthese-Schritt, der es nur erlaubt, „vorgedachte“ MEMS-Topologien beim Entwurf zu verwenden. Eine allgemeine System-Synthese, wie sie für den Entwurf digitaler Schaltungen zur Verfügung steht, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht realisierbar.

Die Autoren von [34] nehmen eher Abstand von diesem Ansatz, da er sehr weit von der klassischen polygonbasierten Entwurfsstrategie von MEMS-Designern entfernt ist. In der folgenden vergleichenden Betrachtung wird er nicht separat einbezogen, sondern mit dem geometriegetriebenen bibliotheksbasierten Entwurfsprozess zusammengefasst.

Für den von einer Geometriebeschreibung ausgehenden bibliotheksbasierten Entwurfsprozess (Abschnitt 3.4.1) steht eine durchgehende Software-Werkzeugkette zur Verfügung (z. B. Coventor [47] oder IntelliSense [50]). Aufgrund der vordefinierten parametrisierten Bibliothekselemente kann der Entwurf des MEMS-Elements in diesem Entwurfsprozess schneller durchgeführt werden als im polygonbasierten Entwurfsprozess (Abschnitt 3.4.3), in dem man die Strukturen mittels Polygonen aus vielen atomaren Elementen „zeichnet“. Um das zeitintensive Zeichnen der Polygone im polygonbasierten Entwurf zu beschleunigen, kommen mittlerweile immer mehr parametrisierte Polygon-Generatoren (ähnlich zu PCells im IC-Entwurf [65]) zum Einsatz, die elementare Komponenten, wie z. B. Federn, erzeugen können.

Damit die Kompaktmodelle der Komponenten im bibliotheksbasierten Ansatz gültig sind, ist es notwendig, eine homogene und wohldefinierte Umgebung für die Komponenten festzulegen. Dies wird durch Einschränkungen der Entwurfsfreiheitsgrade erreicht. Hierzu gehört insbesondere das im polygonbasierten Entwurfsprozess nicht existierende Verbot, Verdrahtungen unter beweglichen Komponenten durchzuführen, da diese das mechanische Verhalten verändern und unerwünschte konstante oder dynamische parasitäre Kapazitäten erzeugen können (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Für sehr kleine hochoptimierte MEMS-Sensoren wird es immer wichtiger, die mechanische Einheit von äußerem mechanischem Stress zu entkoppeln (vgl. Abschnitt 2.2.3). Damit die mechanischen Strukturen dennoch elektrisch angebunden werden können, ist es im Allgemeinen notwendig, dass Verdrahtungen teilweise unter den mechanisch

beweglichen Strukturen verlaufen. Daraus folgt, dass die Entwurfsrandbedingungen im bibliotheksbasierten Entwurf in der Regel zu einschränkend sind für den Entwurf von hochoptimierten MEMS-Sensoren.

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, kann in allen Entwurfsansätzen das 3D-Modell der mechanischen Struktur für eine Elektrostatik-Analyse eingesetzt werden. Im bibliotheksbasierten Ansatz steht dafür neben der Geometrie der Komponenten auch Prozess-Information aus der zugrundeliegenden Komponenten-Bibliothek zur Verfügung. Im polygonbasierten Ansatz ist dies separat zu modellieren und an die Extraktions-Software weiterzugeben. Für die Elektrostatik-Analyse können Field-Solver wie z. B. CoventorWare [66], QRC [67] oder xAct3D [68] eingesetzt werden. Durch die vorhandene Information über die Komponenten im bibliotheksbasierten Entwurf kann man die aus der Extraktion resultierende, detaillierte RC-Netzliste hierarchisch auf die einzelnen Komponenten zusammenfassen. Im polygonbasierten Entwurf liegen die Strukturen nur als Polygone vor, sodass eine solche Zuordnung der extrahierten Werte auf definierte Geometrien nicht möglich ist. Aus diesem Grund enthält die extrahierte RC-Netzliste nur die Kapazitäten zwischen den zusammenhängenden, auf unterschiedlichen Potenzialen liegenden, Strukturen.

Insbesondere beim polygonbasierten Entwurf ist eine Elektrostatik-Analyse auf Basis der mechanischen Strukturen nicht ausreichend, da man bei dieser Vorgehensweise gerade die kritischen parasitären Kapazitäten vernachlässigt, die erst aufgrund später hinzugefügter Verdrahtungs-Strukturen entstehen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Aus diesem Grund ist es, wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, notwendig, eine Elektrostatik-Analyse auf Basis der Chip-Geometrie durchzuführen.

In Tabelle 3.2 werden einzelne Schritte der verschiedenen Entwurfsprozesse in Kurzfassung noch einmal gegenübergestellt.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Entwurfselemente des bibliotheksbasierten und des polygonbasierten Entwurfsprozesses.

	Bibliotheksbasierter Entwurfsprozess	Polygonbasierter Entwurfsprozess
Erstellung des Geometrie-Modells	Parametrisierte Komponenten aus einer (lizenzierten) Bibliothek (PDK)	Polygonbasiertes „Zeichnen“ der Strukturen
Mechanik-Simulation	(Transiente) (nicht)lineare 3D-Finite-Elemente-Analyse Modal Analyse Auf Basis von FE-basierten Kompaktmodellen der Komponenten	
Elektrostatik-Analyse der mechanischen Strukturen	Netzliste ist hierarchisch auf die Komponenten reduziert	Auf Basis eines FE-Balkenmodells der Struktur Netzliste der Netz-zu-Netz-Kapazitäten ohne Hierarchie
Elektrostatik-Analyse der Chip-Geometrie	Mit analytischen Näherungen auf Basis der Chip-Geometrie und einer vereinfachten Simulation des Herstellungsprozesses (Netzliste enthält nur Netz-zu-Netz-Koppelkapazitäten)	

3.4.5 Bewertung der Entwurfsprozesse hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit

Für den von einer Geometrie-Beschreibung ausgehenden bibliotheksbasierten Entwurfsprozess steht, wie in Abschnitt 3.4.1 beschrieben, eine durchgehende Kette von Entwurfswerkzeugen zur Verfügung, die darüber hinaus sehr gut in die Entwicklungsumgebungen aus dem Elektronik-Entwurf integriert sind. Der Einsatz von Komponenten aus einer lizenzierten Bibliothek vereinfacht den MEMS-Entwurf stark, da er auf eine höhere Abstraktionsebene gehoben wird. Wie im Elektronik-Entwurf ist darüber hinaus durch die Komponenten der Entwurf der mechanischen Geometrie weitgehend von Einflüssen der Herstellungstechnologie entkoppelt. Dies führt allerdings zu Einschränkungen der Entwurfsfreiheitsgrade.

Dieser Entwurfsansatz ermöglicht insbesondere kleineren MEMS-Entwicklungshäusern, für die eine eigene MEMS-Fabrik nicht wirtschaftlich ist, die Entwicklung von anwendungsspezifischen Kleinserien.

Der auf einem Schaltplan basierende, bibliotheksbasierte Entwurfsprozess (Abschnitt

3.4.2) ist aufgrund der noch sehr eingeschränkten Struktur-Synthese-Verfahren nicht ausgereift genug für eine breite industrielle Anwendung.

Der polygonbasierte Entwurfsansatz aus Abschnitt 3.4.3 bietet gegenüber den bibliotheksbasierten Ansätzen deutlich mehr Entwurfsfreiheitsgrade und anwendungsspezifische Simulations- und Analyse-Methoden. Dies ermöglicht es vor allem, die technologischen Möglichkeiten voll auszunutzen, um eine bestmögliche Optimierung des MEMS-Elements zu erreichen. Bisher können nur mit diesem Ansatz die hohen Anforderungen vieler Endkunden an die Funktionalität, Robustheit und Größe eines MEMS-Elements erreicht werden.

Demgegenüber steht, dass der polygonbasierte Entwurfsprozess ein aufwändiger und sehr komplexer Entwurfsprozess ist, für den individuell verschiedene Softwarelösungen mit großem Aufwand anzupassen oder zu implementieren sind. Insgesamt eignet sich daher dieser Entwurfsprozess bisher nur für Großunternehmen, die in einer eigenen Halbleiterfertigung MEMS-Elemente in Großserien entwickeln und herstellen. Insbesondere fehlen noch Methoden zur präzisen Berechnung und Analyse elektrostatischer Eigenschaften auf Basis der Chip-Geometrie.

Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, ist zunächst eine Prozess-Simulation zu entwickeln. Diese muss die 2D-Chip-Geometrie für einen 3D-Field-Solver aufbereiten, sodass eine, im Vergleich zur verfügbaren analytischen Methode, deutlich genauere Elektrostatik-Analyse ermöglicht wird. Zusätzlich ist es für eine gezielte Analyse notwendig, eine geometrische Zuordnung der extrahierten Kapazitäten auf definierte Regionen in der Chip-Geometrie zu entwickeln (Abschnitt 3.4.4). Für eine vollständige Analyse der elektrostatischen Eigenschaften eines MEMS-Elements fehlt zudem noch eine quasialektrostatische Analyse (Abschnitt 3.3), mit der man auch auslenkungsabhängige parasitäre Kapazitäten erfassen kann. Die Präzisierung dieser Aufgabenstellungen folgt in Kapitel 4.

3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden in den Abschnitten 3.1 und 3.2 die Entwurfsschritte und Simulationsmethoden für die Entwicklung eines MEMS-Elements allgemein beschrieben. In Abschnitt 3.3 folgte eine detaillierte Darstellung der bisher verfügbaren Methode zur Analyse der elektrostatischen Eigenschaften. In diesem Abschnitt wurde insbesondere hervorgehoben, dass es für den Entwurf von zukünftigen MEMS-Elementen notwendig ist, eine genauere, auf einem Field-Solver basierende Elektrostatik-Analyse auf Basis der 2D-Chip-Geometrie zu entwickeln.

In Abschnitt 3.4 wurden in den Unterabschnitten 3.4.1 bis 3.4.3 die aktuellen bibliotheks- und polygonbasierten Entwurfsansätze zur Entwicklung von MEMS-Elementen beschrieben. Es folgte in Abschnitt 3.4.4 eine vergleichende Betrachtung

mit einer abschließenden Bewertung der Entwurfsansätze hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit in Abschnitt 3.4.5.

4 Präzisierung der Aufgabenstellung

Wie in den vorherigen Kapiteln dargestellt, führt die technische Entwicklung zu immer kleineren und gleichzeitig leistungsfähigeren MEMS-Systemen. Dies hat zur Folge, dass neben den nichtlinearen mechanischen Effekten auch die parasitären elektrostatischen Effekte an Einfluss gewinnen. Dies wird vor allem durch die hohe Packungsdichte der mechanischen Strukturen und der damit verbundenen Verdrahtung verursacht. Grund dafür ist, dass zwischen Verdrahtungen sowie zwischen Verdrahtungen und mechanischen Strukturen unerwünschte, sogenannte parasitäre Kapazitäten, entstehen.

In kapazitiven MEMS-Inertialsensoren können diese parasitären Kapazitäten zu Verzerrungen von Signalen führen, wie beispielsweise eine Signal-Verschiebung (vgl. Abschnitt 2.2.3). In aktuellen, hochoptimierten MEMS-Inertialsensoren lassen sich parasitäre Kapazitäten aufgrund der Chip-Geometrie nicht vermeiden. Daher müssen diese während des Entwurfs minimiert und optimiert werden, sodass symmetrisch angeordnete Netze jeweils gleiche und minimale parasitäre Kapazitäten zu den benachbarten Netzen haben. Spezifikationen aktueller kapazitiver Drehratensensoren für den Einsatz sowohl im Automobilbereich (z. B. ESP) als auch im „Consumerbereich“ (z. B. Augmented Reality) fordern, dass die relative Abweichung der parasitären Kapazitäten symmetrisierter Netze bei unter 1% liegen muss, damit die Auswerteschaltung korrekt arbeitet [2].

Um solche hohen Anforderungen zu erfüllen, ist eine hochgenaue und effiziente Methode für die Elektrostatik-Analyse notwendig. Hierfür werden in dieser Arbeit Methoden zur Modellierung von MEMS-spezifischen Prozesstechnologie-Schritten entwickelt (Kapitel 5). Diese sollen in einem ersten Schritt die netzbasierte Elektrostatik-Analyse der Chip-Geometrie mit einem kommerziellen 3D-Field-Solver ermöglichen (Abb. 4.1, Mitte (blau)).

Aufgrund der Polygon-Repräsentation der Chip-Geometrie enthält die extrahierte RC-Netzliste neben den Widerständen nur die parasitären und funktionellen Koppelkapazitäten zwischen den Netzen. Für eine gezielte Analyse und Optimierung der parasitären Kapazitäten ist auch eine geometrische Zuordnung der extrahierten

Werte in der Chip-Geometrie notwendig.

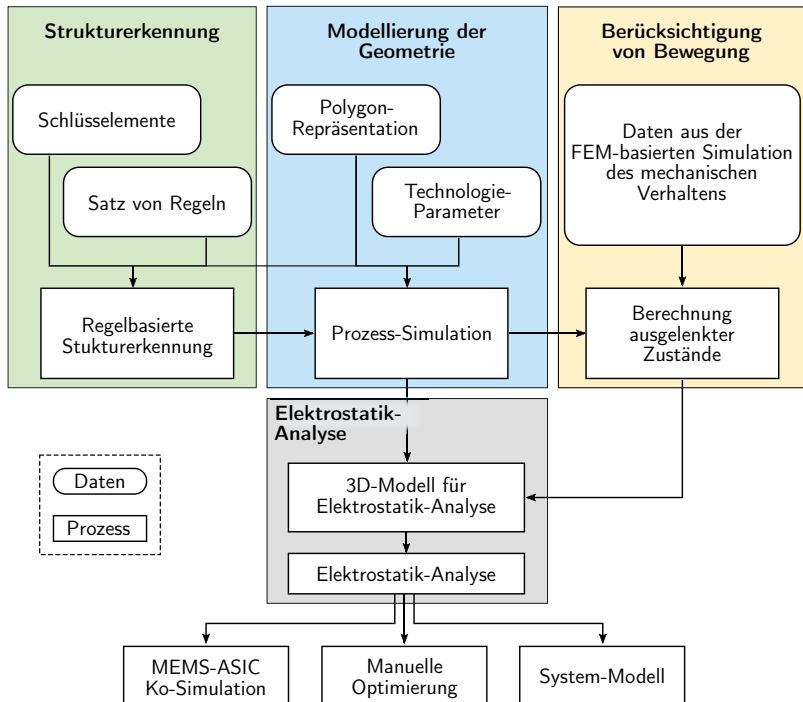


Abbildung 4.1: Überblick über die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methoden (farbig hinterlegt) für die Elektrostatik-Analyse für MEMS.

Um dies zu ermöglichen, ist es nötig, eine Methode zur Strukturerkennung bei MEMS bereitzustellen. Die Entwicklung einer solchen Methode wird in Kapitel 6 beschrieben. Ziel ist es, die wesentlichen Komponenten, wie beispielsweise Federn, Elektroden und seismische Massen, aus der Chip-Geometrie abzuleiten. Dies erfolgt anhand vom Nutzer allgemein definierter Regeln, einer initialen Zerlegung, der Prozesstechnologie und des zugrundeliegenden Funktionsprinzips des MEMS-Elements. Für die Ableitung bzw. Erkennung der Komponenten werden durch einen Algorithmus aus diesen allgemein definierten Regeln dann spezielle Regeln für das tatsächlich vorliegende MEMS-Element erzeugt. Die erkannten Komponenten lassen sich anschließend in der Elektrostatik-Analyse verarbeiten, sodass sie als Sub-Netze ihrer ursprünglichen Netze in der RC-Netzzliste repräsentiert werden (Abb. 4.1, links (grün)). Dies er-

möglicht eine erste geometrische Zuordnung der extrahierten Werte auf Basis der erkannten Komponenten und liefert damit einen Ansatz für die gezielte Analyse und Optimierung der parasitären elektrostatischen Effekte.

Verdrahtungen, die unterhalb beweglicher Strukturen verlaufen, können auch bewegungsabhängige parasitäre Kapazitäten erzeugen. Diese verursachen beispielsweise ein Rauschen auf einem Ausgangs-Signal. Für die Analyse derartiger bewegungsabhängiger parasitärer Kapazitäten wird in Kapitel 7 eine Methode zur quasi-elektrostatischen Analyse entwickelt. Ziel ist es dabei, die Daten aus der Mechanik-Simulation mit der Chip-Geometrie zu verknüpfen und daraus eine Sequenz ausgelenkter Zustände des MEMS zu berechnen. Anschließend kann man für jeden Zustand eine Elektrostatik-Analyse durchführen, wodurch das Verhalten bewegungsabhängiger parasitärer Kapazitäten quasi-statisch abgebildet werden kann (Abb. 4.1, Mitte und rechts (blau/gelb)).

Durch die Kombination der Strukturerkennung und der quasi-elektrostatischen Analyse können die bewegungsabhängigen parasitären Kapazitäten auf Basis der erkannten Komponenten betrachtet werden. Dies ermöglicht die gezielte Analyse und Optimierung der bewegungsabhängigen parasitären Kapazitäten (Abb. 4.1) (Kapitel 8).

Abschließend folgen eine Gesamtzusammenfassung und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten (Kapitel 9).

5 Methoden zur Modellierung von MEMS-Prozessen für eine auf 3D-Field-Solvern basierenden Elektrostatik-Analyse

Für die Entwicklung zuverlässiger und robuster MEMS-Elemente ist eine neue Methode für die Elektrostatik-Analyse notwendig. Damit sich zuverlässige Aussagen über die elektrostatischen Eigenschaften eines MEMS-Elements treffen lassen, muss die Analyse eine Genauigkeit erreichen, die besser ist als die typisch zu erwartenden 5-10% Schwankungen in der Herstellung. In Abschnitt 3.3 wurde gezeigt, dass die bisher verwendete 2D-Muster-basierte Methode mit analytischen Näherungen nicht mehr ausreichend ist für den Entwurf hochoptimierter MEMS-Elemente.

Ein naheliegender Ansatz wäre, eine hochgenaue Elektrostatik-Analyse mit einer Finiten-Elemente-Methode (FEM) auf einem 3D-Modell der Chip-Geometrie durchzuführen. Bei diesem Ansatz ist es notwendig, neben der Oberfläche der MEMS-Strukturen auch alle mit Luft gefüllten Zwischenräume für die FEM zu diskretisieren. Bei komplexen MEMS-Elementen führt dieser Ansatz zu sehr großen Netzwerken für die FEM und damit zu einer sehr langen Berechnungszeit.

Ein alternativer, sehr schneller Ansatz wäre, die Elektrostatik-Analyse auf Basis der vorhandenen reduzierten Modelle, also der Kompaktmodelle, der einzelnen Komponenten durchzuführen. Wie in Kapitel 3 beschrieben, beinhalten diese Modelle nur die mechanischen Strukturen. Die kritischen parasitären Kapazitäten, die durch die später hinzugefügten Verdrahtungs-Strukturen verursacht werden, lassen sich daher in diesem Ansatz nicht analysieren.

Im Rahmen dieser Arbeit hat sich der Einsatz eines Field-Solvers aus dem Elektronik-Entwurf als bester Ansatz für eine schnelle und präzise Elektrostatik-Analyse gezeigt. Diese Field-Solver lösen für gewöhnlich die Maxwell'schen Gleichungen in Integralform auf der Oberfläche eines 3D-Modells der gegebenen Struktur mit einer Rand-Element-Methode (engl. Boundary Element Method (BEM)) [69]. Durch diesen Ansatz ist es möglich, auch die komplexe 3D-Chip-Geometrie eines MEMS-Elements in einem sehr hohen Detailgrad in der Berechnung zu verwenden. Dies ermöglicht eine hochgenaue

Elektrostatik-Analyse der gesamten Chip-Geometrie, deren Genauigkeit besser ist als die typisch zu erwartenden 5-10% Schwankungen in der Herstellung.

Für eine Elektrostatik-Analyse von MEMS mit einem Field-Solver aus dem Elektronik-Entwurf ist eine effiziente Modellierungs-Methode für die MEMS-typischen Herstellungsprozess-Schritte Voraussetzung. Diese muss die Herstellungsprozess-Schritte, wie Schichtabscheidung mit Topographie, Gas-Phasen-Ätzen oder Reaktives Ionentiefenätzen (vgl. Abschnitt 2.1), simulieren. Ein Field-Solver aus dem Bereich des Elektronik-Entwurfs kann diese MEMS-typischen Prozess-Schritte nicht nativ abbilden [70].

In Abschnitt 5.1 wird ein Überblick über den entwickelten MEMS-spezifischen Extraktions-Fluss gegeben. Anschließend folgt in Abschnitt 5.2 die Beschreibung der neuen Modellierungs-Methoden für die MEMS-typischen Herstellungsprozess-Schritte. In den weiteren Abschnitten 5.3 und 5.4 folgt eine Demonstration der neuen Elektrostatik-Analyse an einem MEMS-Drehratensensor und abschließend die Verifikation der Extraktions-Ergebnisse an Teststrukturen.

5.1 MEMS-spezifische Elektostatik-Analyse basierend auf 3D-Field-Solvern

Die MEMS-spezifische Elektrostatik-Analyse ist in Abb. 5.1 als Flussgraph dargestellt.

Neben der Chip-Geometrie benötigt man für eine Elektrostatik-Analyse Prozess-Parameter wie beispielsweise Schichtdicken. Diese Eingabedaten lassen sich anschließend in einer Herstellungsprozess-Simulation verarbeiten, die die 2D-Chip-Geometrie in ein 3D-Modell des Chips überführt. In dieser müssen die drei folgenden MEMS-typischen Prozess-Schritte simuliert werden (vgl. Abschnitt 2.1):

1. Reaktives Ionentiefenätzen zur Abbildung der mechanischen Strukturen
2. Gas-Phasen-Ätzen zur Freistellung der mechanischen Strukturen
3. Schichtabscheidung zur Modellierung von Topographien im Schicht-Aufbau

Im MEMS-Entwurf führt man in der Regel während des Zeichnens und Optimierens der Verdrahtungs-Strukturen mehrere Rekursionen durch, in denen man jeweils eine Elektrostatik-Analyse ausführt. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Prozess-Simulation, die die Basis für die anschließende Elektrostatik-Analyse darstellt, im Optimum zwischen Detailgrad des Modells und Simulationszeit liegt.

Kommerzielle Prozess-Simulatoren, wie SEMulator3D von Coventor [6], können einen MEMS-Herstellungsprozess sehr genau abbilden. Aufgrund der längeren Laufzeiten der 3D-Simulationen und der vielen Rekursionen beim Optimieren der Verdrahtungs-Strukturen ist eine Einbindung in den Entwurf nicht sinnvoll.

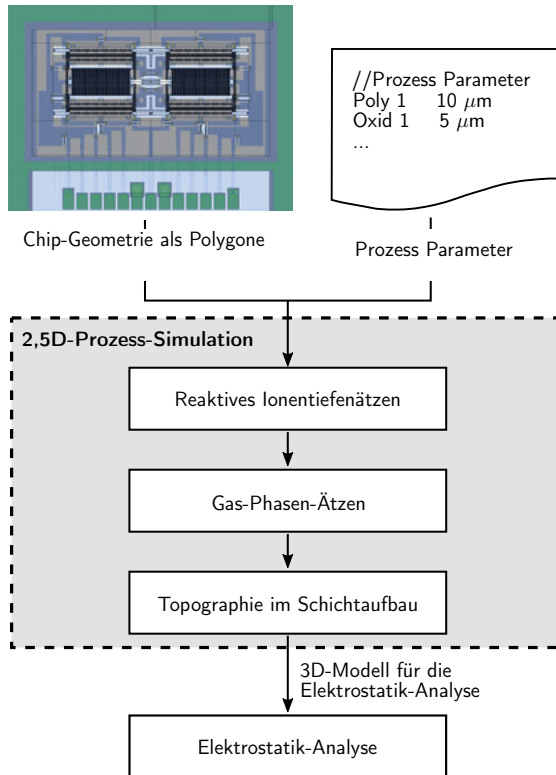


Abbildung 5.1: Flussgraph der MEMS-spezifischen Elektostatik-Analyse, mit der neu zu entwickelnden 2,5D-Prozess-Simulation (Abschnitt 5.2).

Wie in Abschnitt 5.4 gezeigt wird, ist es für eine sehr genaue Elektostatik-Analyse ausreichend, den Herstellungsprozess durch relativ einfache Modelle - im Vergleich zu kommerziellen 3D-Simulatoren - zu approximieren. Dies ermöglicht den Einsatz einer neuen sehr schnellen 2,5D-Prozess-Simulation, die im folgenden Abschnitt 5.2 beschrieben wird. Diese bereitet die 2D-Chip-Geometrie so auf, dass sie für einen kommerziellen Field-Solver, wie beispielsweise Calibre xAct3D von Mentor Graphics [68], interpretierbar ist. Im Field-Solver lässt sich auf Basis dieser Daten ein 3D-Modell der Chip-Geometrie berechnen, auf dem dieser anschließend die Elektostatik-Analyse durchführt.

Im polygonbasierten Entwurf enthält ein kapazitiver MEMS-Inertialsensor in der

Regel keine definierten Bibliotheks-Elemente. Insbesondere liegt die Chip-Geometrie nur als reine Polygonbeschreibung vor. Aus diesem Grund ist es in der Elektrostatik-Analyse nicht möglich, zwischen der Verdrahtung und beispielsweise einer Detektions-Elektrode zu unterscheiden. Ein Field-Solver interpretiert deshalb alle Polygone der Chip-Geometrie als Verdrahtung, wodurch die extrahierte Netzliste keine „Struktur“ erhält. Die einzelnen Netze - definiert durch Textmarkierungen auf den Bondpads - haben für die Extraktions-Software nur einen „Anfang“ (Port, definiert durch die Textmarkierung), aber kein „Ende“, da keine Bibliotheks-Elemente in der Chip-Geometrie definiert sind. Im Folgenden werden solche Netze als „offene Netze“ bezeichnet.

Aufgrund des fehlenden zweiten Anschlusses der Netze enthält die extrahierte Netzliste nur die Koppelkapazitäten zwischen den Netzen. Die Widerstände der „offenen Netze“ werden bei der Extraktion ignoriert.

Indem man der Extraktions-Software künstlich eine „Struktur“ der Netzliste vorgibt, kann man eine gültige RC-Netzliste aus der Chip-Geometrie extrahieren. Solch eine Struktur lässt sich entweder durch sogenannte „Probe Points“ oder explizit definierten Elementen, wie beispielsweise 0Ω Widerständen, vorgeben (vgl. Kapitel 6). Mit diesen zusätzlichen Maßnahmen lässt sich eine RC-Netzliste aus der Chip-Geometrie mit einem Field-Solver extrahieren, die man nach einer Reduktion für weitere Simulationen einsetzen kann, wie z. B. die Simulation der „Settling Time“.

5.2 2,5D-Prozess-Simulation

Abbildung 5.1 zeigt die wesentlichen Schritte der entwickelten 2,5D-Prozess-Simulation, die in den folgenden Unterabschnitten detailliert beschrieben werden.

5.2.1 Modellierung: Reaktives Ionentiefenätzen

Die Prozess-Simulation beginnt mit der Modellierung des Prozesses, der die mechanischen Strukturen des MEMS abbildet (Abb. 5.1). Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, wird hierfür das reaktive Ionentiefenätzen nach [15] eingesetzt. Dieses Verfahren ermöglicht es, sehr schmale Gräben bzw. Löcher mit einem sehr hohen Aspekt-Verhältnis in Polysilizium zu ätzen. Die Ätz-Geschwindigkeit variiert dabei in der Regel in erster Näherung mit der Breite der zu ätzenden Öffnungen. In Relation zur Ätz-Geschwindigkeit ziehen sich auch die Kanten der Öffnungen zurück. Diese Verschiebung wird auch als *Kantenverlust* bezeichnet. Die Konsequenz ist, dass dieses Ätzverfahren die Polygon-Beschreibung der mechanischen Strukturen in der Chip-Geometrie nicht exakt im Silizium abbildet. Das reaktive Ionentiefenätzen hat folglich einen direkten Einfluss auf die mechanischen Strukturen und damit auch auf die funktionellen und parasitären Kapazitäten. In der Modellbeschreibung für den Field-Solver ist es daher notwendig, den Einfluss des reaktiven Ionentiefenätzens

mitzubücksichtigen.

Im Mikroelektronik-Entwurf stellt die Chip-Fertigung sicher, dass das Layout exakt im Silizium abgebildet wird. Dafür verändert man in der Nachverarbeitung (engl. post-processing) des Layouts die Geometrie so, dass Fehler beim Belichten in der Photolithographie (engl. „Optical Proximity Correction“ (OPC)) und Einflüsse aus Ätzverfahren durch Technologievorhalte kompensiert werden. Voraussetzung für diese Techniken ist ein ausgereifter und über den gesamten Wafer stabiler Herstellungsprozess. Aufgrund der noch sehr „jungen“ MEMS-Prozesse (z. B. DRIE, 1996) und dem MEMS-typischen Paradigma „one product one process“ (jedes Produkt hat einen eigenen spezifischen Herstellungsprozess), hat sich noch keine analoge Technik zur Nachverarbeitung der Chip-Geometrie bei der Entwicklung und Herstellung von MEMS-Elementen etabliert.

Daraus folgt, dass man die Einflüsse des reaktiven Ionentieftätzens schon während der Entwurfsphase simulieren und in die Modelle miteinbeziehen muss.

In der Prozess-Simulation für die Elektrostatik-Analyse lässt sich das Aufweiten der Öffnungen durch das reaktive Ionentieftätzen durch Verschieben der Kanten in der Chip-Geometrie approximieren. Dabei ist die Verschiebung der Kanten näherungsweise abhängig vom jeweils minimalen Abstand zu einer gegenüberliegenden Kante. Dieser Ansatz ist in Abb. 5.2 dargestellt.

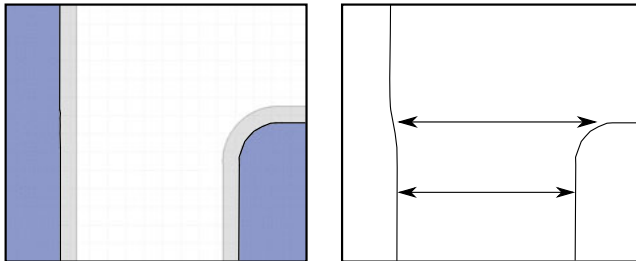


Abbildung 5.2: Simulation des reaktiven Ionentieftätzens durch Verschiebung der Kanten in der Chip-Geometrie; Die Verschiebung ist dabei abhängig vom minimalen Abstand in Normalenrichtung zu einer gegenüberliegenden Kante. **Links:** Darstellung der Chip-Geometrie in grau vor und in blau nach der Simulation **Rechts:** schematische und stark überhöhte Darstellung der Verschiebung der Kanten in der Simulation.

Die Abhängigkeit zwischen dem Abstand zweier Kanten und der daraus resultierenden Verschiebung der Kanten ist in der sogenannten *Kantenverlust-Funktion* beschrieben.

Diese muss man für jeden Prozess individuell anhand von Messungen charakterisieren. Ein Beispiel für eine Kantenverlustfunktion f ist in Gleichung 5.1 gegeben

$$f(x) = \text{nomKV} + (a \cdot \text{nomKV} - \text{nomKV}) \cdot \tanh(b \cdot (x - c)), \quad (5.1)$$

wobei nomKV für die nominale Kantenverschiebung bei einer definierten Stützstelle c (z. B. $3 \mu\text{m}$ breiter Graben) steht, a und b aus Messungen zu bestimmen sind und x der Abstand zur jeweilig gegenüberliegenden Kante ist.

Die abstandsabhängige Verschiebung von Kanten lässt sich beispielsweise mit Calibre YieldAnalyzer und Calibre YieldEnhancer [43] implementieren. Diese Module stellen Methoden für die paarweise Berechnung von minimalen Kantenabständen und Verschiebung von einzelnen Kanten zur Verfügung.

Neben dem oben beschriebenen Effekt beeinflusst auch die mikroskopische (benachbarte Strukturen im Chip) sowie die makroskopische (Position auf dem Wafer, benachbarte Chips) Umgebung das Ätz-Verhalten [71]. Aus diesem Grund ist es sehr schwierig, den Einfluss des reaktiven Ionentieffenätzens ganzheitlich und präzise zu charakterisieren.

Der Einfluss des reaktiven Ionentieffenätzens lässt sich nur bedingt in einer REM-Aufnahme als Aufsicht abbilden, da REM-Mikroskope die Kanten der Strukturen überzeichnen. Die Flanken der Strukturen sind zudem im Allgemeinen weder exakt rechtwinklig noch glatt und plan. Des Weiteren sorgt schon eine minimale Verkipfung der zu messenden Struktur gegenüber dem REM-Mikroskop für eine Verzerrung der Aufnahme. Diese Einflüsse sorgen dafür, dass mithilfe eines REM-Mikroskops eine Kantenverschiebung von wenigen 100 Nanometern, wie sie beim DRIE auftritt, nicht exakt abbildbar und messbar ist. In Abb. 5.3 ist dennoch als Plausibilisierung des Ansatzes eine REM-Aufnahme abgebildet, wobei die Aufnahme durch die zugehörige Chip-Geometrie nach der Simulation überlagert ist. Beim Vergleich der Chip-Geometrie mit der REM-Aufnahme ist zumindest gut die Verrundung von Ecken durch das DRIE sichtbar, das die Simulation aus der Chip-Geometrie nachbildet.

Der positive Einfluss des verwendeten Approximations-Verfahren auf die Genauigkeit der Extraktions-Ergebnisse wird in Abschnitt 5.4 dargestellt.

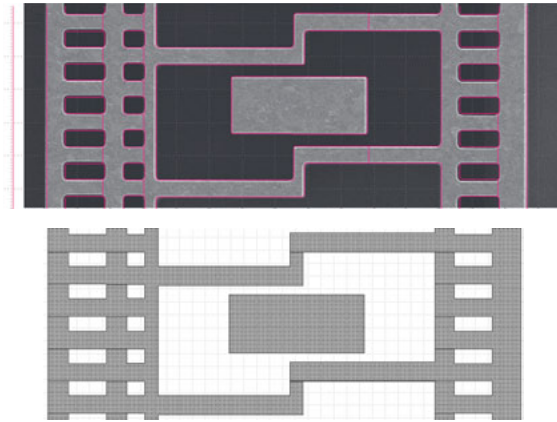


Abbildung 5.3: Oben: Überlagerung der Chip-Geometrie nach der Simulation des reaktiven Ionentiefenätzens (in rot) mit einer REM-Aufnahme (in grau). Unten: zugehöriger Ausschnitt aus der Chip-Geometrie.

5.2.2 Modellierung: Gas-Phasen-Ätzen

Als nächster Schritt folgt die Modellierung des Gas-Phasen-Ätzens (vgl. Abschnitt 2.1). Mit der Gas-Phasen-Ätzung lässt sich durch Ausräumen der Oxide die mechanische Struktur freistellen (vgl. Abb. 5.4)

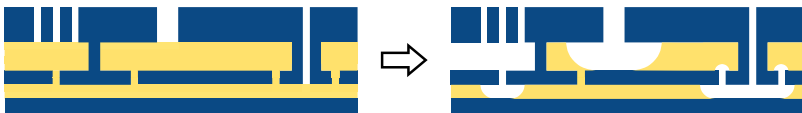


Abbildung 5.4: Links: Schichtaufbau im Querschnitt ohne Topographie. Rechts: Schichtaufbau im Querschnitt nach der Gas-Phasen-Ätzung. Poly-Silizium und Silizium sind in blau und Oxide in gelb dargestellt.

In der Simulation des Gas-Phasen-Ätzens ist es notwendig, die Ausbreitung des eingeleiteten Ätzgases im Schichtstapel zu modellieren. Für eine schnelle Berechnung bei einer relativ hohen Genauigkeit wird ein 2,5D-Ansatz für diese Simulation eingesetzt. Dazu lassen sich zunächst, wie in Abb. 5.4 dargestellt, alle Materialien als planare Schichten mit einer konstanten Dicke annehmen. Der Algorithmus der 2,5D-Gas-Phasen-Ätzung ist in Abb. 5.5 als Flussgraph gegeben.

Beim Gas-Phasen-Ätzen dringt das Ätzgas durch alle Öffnungen im Polysilizium an der Oberfläche des Wafers ein. Bei kapazitiven MEMS-Inertialsensoren sind diese Öffnungen gerade die Zwischenräume in der mechanischen Struktur. Daraus folgt,

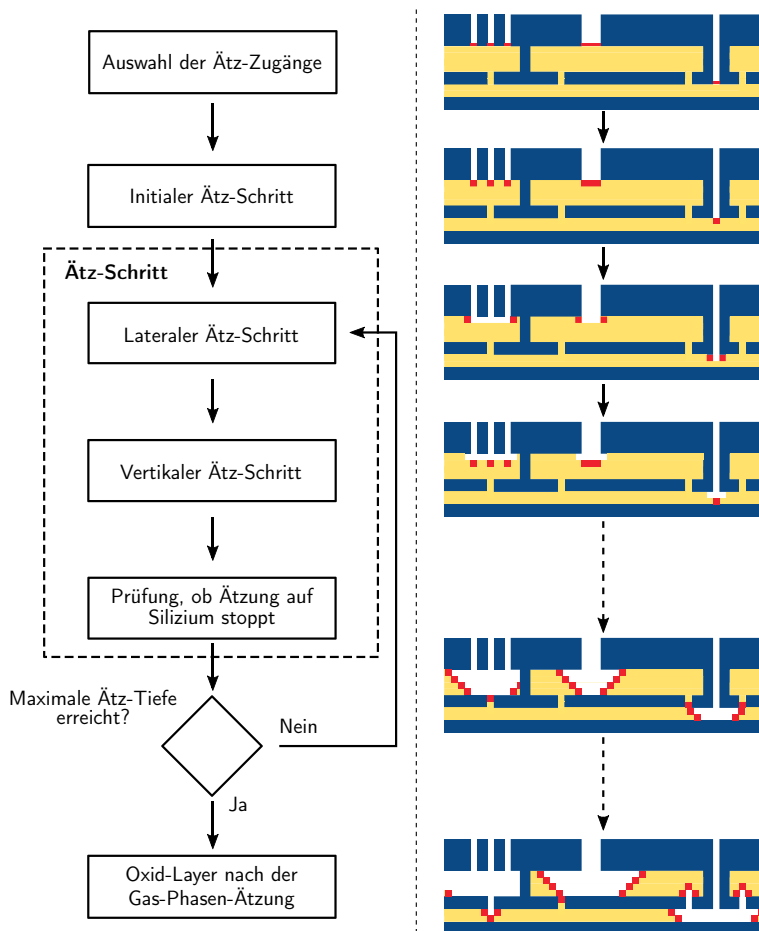


Abbildung 5.5: Links: Algorithmus zur Simulation des Gas-Phasen-Ätzens als Flussgraph. Rechts: Schematische Demonstration des Algorithmus', wobei dunkelblaue Strukturen aus Poly-Silizium und Silizium sind und gelbe aus Oxid. In rot ist jeweils der aktuelle Ätz-Schritt markiert.

dass die Simulation des reaktiven Ionentiefenätzens zur Abbildung der mechanischen Strukturen (vgl. Abschnitt 5.2.1) gerade die initiale *Ätz-Maske* für die Simulation des Gas-Phasen-Ätzens definiert.

Die Gas-Phasen-Ätzung lässt sich für eine 2,5D-Prozess-Simulation diskretisieren, indem man den Ätzvorgang in einzelne Schritte mit einer vordefinierten Schrittweite abbildet. Mit Eingabe einer Ätztiefe ergibt sich daraus, dass nach n Ätz-Schritten die maximale Ätz-Tiefe erreicht ist.

Für die Synchronisation der Ätz-Schrittweite in horizontaler wie vertikaler Richtung lassen sich die Oxid-Schichten in feine Streifen unterteilen, deren Höhen gerade der Ätz-Schrittweite entsprechen.

In einem initialen Ätz-Schritt wird die durch das reaktive Ionentieftätzen definierte Ätz-Maske ausgewählt und auf die entsprechenden Oxid-Schichten übertragen (vgl. Abb. 5.5). Anschließend wiederholt man die drei folgenden Schritte (vgl. Abb. 5.5) wie oben beschrieben n -mal, bis die maximale Ätz-Tiefe erreicht ist.

1. Horizontaler Ätz-Schritt: Vergrößern aller Ätz-Masken um die vordefinierte Ätz-Schritt-Weite.
2. Vertikaler Ätz-Schritt: Kopieren aller vorherigen Ätz-Masken zum jeweils darüber und darunter liegenden Layer.
3. Material-Analyse: Prüfen, welche Materialien von den Ätz-Masken gerade überdeckt sind. Falls eine Ätz-Maske mit Oxid überlappt, kann die Ätzung an dieser Stelle mit Schritt eins fortgesetzt werden, ansonsten stoppt die Ätzung an dieser Stelle.

Im Modell für die spätere Elektrostatik-Analyse ist es bisher ausreichend, die Oxide durch eine einzelne Schicht abzubilden. Insbesondere heißt dies, dass die schräge Ätz-Front in der Elektrostatik-Analyse nicht berücksichtigt ist. Für die Approximation der Oxid-Schichten wird im Folgenden der oberste Streifen eines jeden Oxids verwendet.

5.2.3 Modellierung: Topographie im Schichtaufbau

Die Ergebnisse aus den beiden vorherigen Simulations-Schritten beschreiben zunächst nur, an welchen Stellen welches Material definiert ist. Das heißt insbesondere, dass die Ergebnisse der vorherigen Schritte nur eine 2D-Information im Sinne einer Aufsicht liefern (vgl. Abb. 5.6).

Im nun folgenden dritten Schritt wird das bisherige 2D-Modell der Chip-Geometrie in ein 3D-Modell überführt, indem man den einzelnen Schichten eine Schichtdicke und damit eine Z-Koordinate zuordnet. Da die Schichten nacheinander auf einem Wafer abgeschieden und strukturiert werden (vgl. Abschnitt 2.1), entstehen *Topographie-Stufen*. Diese lassen sich modellieren, indem man einen Layer entsprechend der verschiedenen Z-Niveaus seiner zugehörigen Schicht aufteilt (Abb. 5.7).

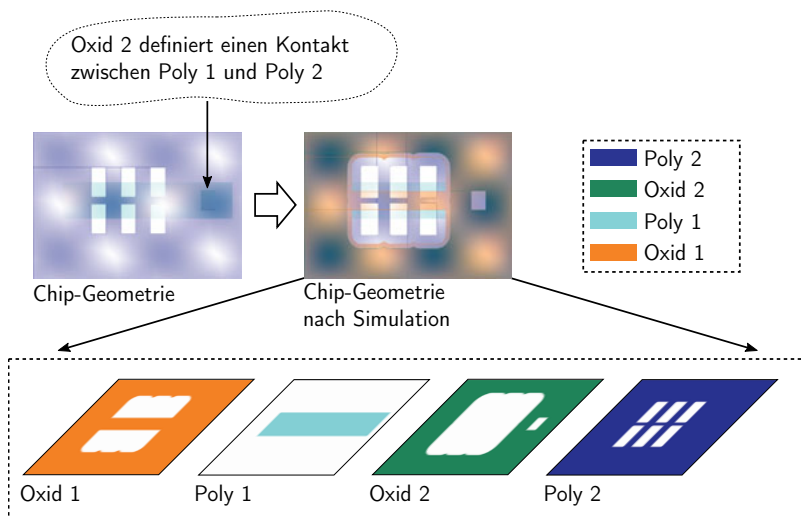


Abbildung 5.6: Links oben: Chip-Geometrie, wobei die Oxid-Layer invertiert gezeichnet sind. Das heißt, an Stellen, an denen ein Oxid in der Chip-Geometrie gezeichnet ist, wird es durch Strukturierung entfernt. Dadurch entsteht ein Kontakt zwischen der darüber- und darunterliegenden Schicht. Mitte oben: Chip-Geometrie nach der Simulation des reaktiven Ionentieftätzens und der Gas-Phasen-Ätzung. Unten: 2D-Geometrien der einzelnen Schichten (Siehe auch Abb. 5.7). Die Substrat-Schicht wurde in dieser Abbildung nicht gezeichnet.

Die verschiedenen Z-Niveaus und damit die Aufteilung der einzelnen Layer lassen sich durch den in Abb. 5.8 als Flussgraphen dargestellten Algorithmus berechnen, der alle möglichen Schicht-Konfigurationen nach ihrem Auftreten testet.

Sei $S_i, i = 1, \dots, n$, die Menge der nacheinander abgeschiedenen Schichten zu den entsprechenden Layern $L_i, i = 1, \dots, n$, mit der Relation $S_i < S_j$ für $i < j$, wobei diese bedeutet, dass die Schicht S_i vor der Schicht S_j auf den Wafer abgeschieden wird, sich also unterhalb von dieser befindet.

Grundlegende Idee des Algorithmus' ist es, aus der geordneten Menge $S = S_1, \dots, S_n$ der Schichten alle im Schichtstapel möglichen geordneten Teilmengen zu berechnen. Das heißt, dass jede dieser Teilmengen wiederum das Ordnungskriterium $S_i < S_j$ für $i < j$ erfüllen muss. Diese Teilmengen entsprechen dann gerade den möglicherweise auftretenden Schicht-Konfigurationen im Schichtstapel.

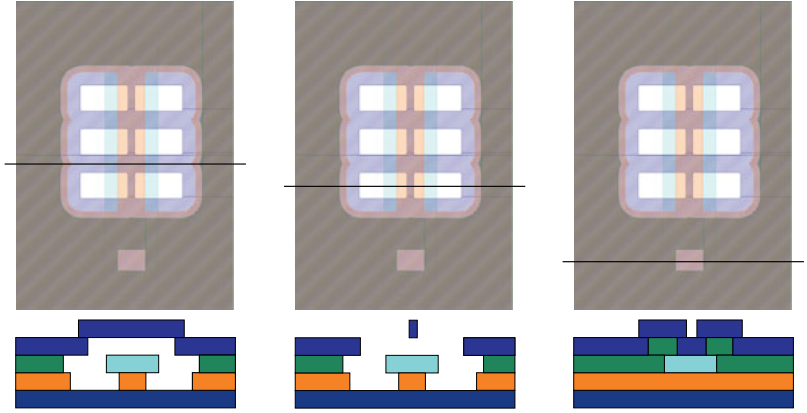


Abbildung 5.7: Oben: Chip-Geometrien nach der Simulation des reaktiven Ionen-tiefenätzens und der Gas-Phasen-Ätzung (vgl. Abb. 5.6). Unten: Querschnitte durch den Schichtaufbau mit Aufteilung des *Poly 2* Layers entsprechend der Z-Niveaus in die Schichten $Poly_2^1$ und $Poly_2^2$. Die Position des Schnittes durch den Schichtstapel ist jeweils durch die schwarze Linie im oberen Teil der Graphik markiert.

Die Berechnung der geordneten Teilmengen folgt dem Schema aus Abb. 5.8.

1. $S = \{\{S_1\}\}$
2. $S = \{\{S_1, S_2\}, \underbrace{\{S_1\}}_{\text{Schritt 1}}\}$
3. $S = \{\{S_1, S_2, S_3\}, \{S_1, S_3\}, \underbrace{\{S_1, S_2\}}_{\text{Schritt 2}}, \underbrace{\{S_1\}}_{\text{Schritt 1}}\}$
4. $S = \{\{S_1, S_2, S_3, S_4\}, \{S_1, S_3, S_4\}, \{S_1, S_2, S_4\}, \{S_1, S_4\}, \underbrace{\{S_1, S_2, S_3\}}_{\text{Schritt 3}}, \underbrace{\{S_1, S_3\}}_{\text{Schritt 2}}, \underbrace{\{S_1\}}_{\text{Schritt 1}}\}$
- n. $S = \{\{\text{Teilmengen aus vorherigen Schritten} \cup S_n\}, \{\text{Teilmengen aus vorherigen Schritten}\}\}$

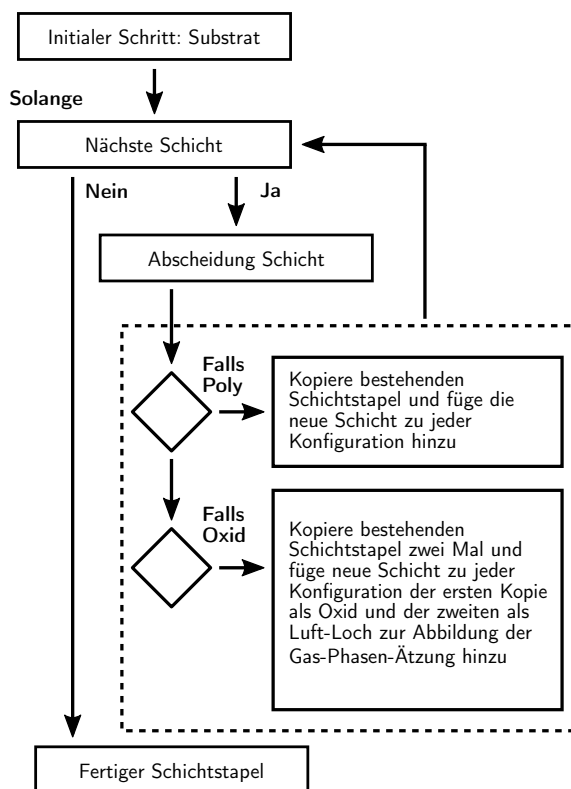


Abbildung 5.8: Flussgraph des Algorithmus' zur Berechnung der verschiedenen Z-Niveaus jedes Layers, indem er alle möglichen Schicht-Konfigurationen berechnet.

Aus dieser geordneten Mengenbeschreibung der Schicht-Kombinationen lassen sich logische Verknüpfungen für die zugehörigen Layer ableiten. Mit diesen lassen sich die Layer wiederum auf die verschiedenen Z-Niveaus ihrer zugehörigen Schicht aufteilen.

$$\begin{array}{lll}
\{S_1, S_2, S_3, S_4\} & \rightarrow & L_1 \wedge L_2 \wedge L_3 \wedge L_4 = S_4^1 \\
\{S_1, S_3, S_4\} & \rightarrow & L_1 \wedge L_3 \wedge L_4 \wedge \neg L_4^1 = S_4^2 \\
\{S_1, S_2, S_4\} & \rightarrow & L_1 \wedge L_2 \wedge L_4 \wedge \neg L_4^2 = S_4^3 \\
\{S_1, S_4\} & \rightarrow & L_1 \wedge L_4 \wedge \neg L_4^3 = S_4^4 \\
\\
\{S_1, S_2, S_3\} & \rightarrow & L_1 \wedge L_2 \wedge L_3 = S_3^1 \\
\{S_1, S_3\} & \rightarrow & L_1 \wedge L_3 \wedge \neg L_3^1 = S_3^2 \\
\\
\{S_1, S_2\} & \rightarrow & L_1 \wedge L_2 = S_2^1 \\
\\
\{S_1\} & \rightarrow & L_1 = S_1^1
\end{array}$$

Im Allgemeinen sind nicht alle Schicht-Kombinationen in der gegebenen Chip-Geometrie vorhanden. In diesen Fällen resultiert aus den logischen Verknüpfungen zwischen den zugehörigen Layern die leere Menge, woraufhin man die entsprechende Schicht-Kombination aus der Schichtstapel-Beschreibung für den Field-Solver entfernen kann.

Durch den beschriebenen Algorithmus werden die Layer entsprechend der Z-Niveaus ihrer zugehörigen Schichten in sogenannte *Topographie-Layer* aufgeteilt. Diese lassen sich auf Field-Solver interne Layer abbilden. Diese Field-Solver internen Layer beschreiben u. a. das Material der zugehörigen Schicht mit seinen elektrischen Eigenschaften, wie Widerstandswert oder Permittivität und seine Z-Koordinaten, d. h. damit auch die Dicke des Materials. Durch die Abbildung der berechneten Topographie-Layer auf die Field-Solver internen Layer sind automatisch die Übergänge zwischen den einzelnen Schichtstapel-Konfigurationen modelliert.

In Abb. 5.9 wird der Algorithmus zur Berechnung der Topographie-Layer an der Prozesstechnologie aus Abschnitt 2.1 visualisiert.

Um die Abscheidung eines Materials besser anzunähern, werden die aufgeteilten Layer entsprechend des darunterliegenden Layers vergrößert (vgl. Abb. 5.10). Der Field-Solver vereinigt diese überlappenden Materialien und behandelt diese in der Elektrostatik-Analyse als ein zusammenhängendes Material.

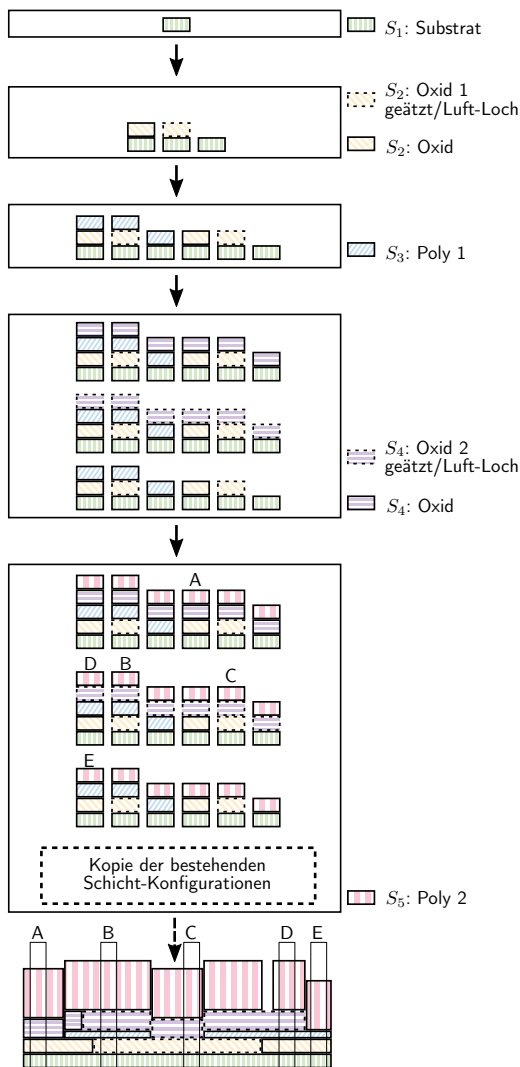


Abbildung 5.9: Visualisierung des Algorithmus' zur Berechnung der Topographie während der Prozessierung anhand der Prozesstechnologie aus Abschnitt 2.1. Die Querschnitte A, B, C,... sind typische Schichtstapel-Konfigurationen.

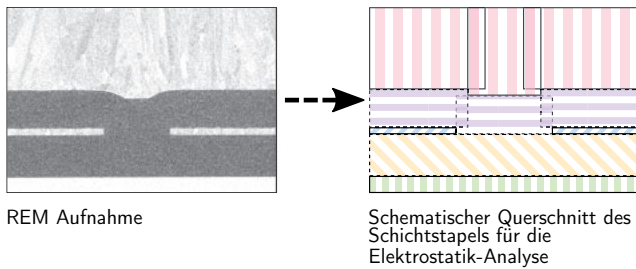


Abbildung 5.10: Zur besseren Approximation der Schichtabscheidung werden die in Topographie-Layer aufgeteilten Layer entsprechend des darunterliegenden Topographie-Layers vergrößert.

5.3 Demonstration

Die entwickelte Elektrostatik-Analyse wird im Folgenden an dem in Abb. 5.11 abgebildeten einachsigen Drehratensensor demonstriert.

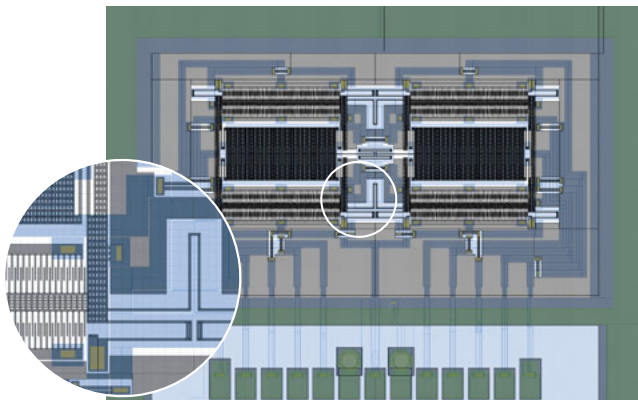


Abbildung 5.11: Einachsiger Drehratensensor nach [5], hergestellt mit der Prozesstechnologie aus Abschnitt 2.1. Layer-Reihenfolge von oben nach unten: grün: Metall, grau: Poly₂, gelb: Oxid₂ (invertiert gezeichnet), blau: Poly₁.

Neben der Chip-Geometrie (Abb. 5.11) benötigt man noch eine Technologie-Beschreibung, in der die einzelnen Schichtdicken und Ätz-Parameter definiert werden (vgl. Abschnitt 5.1).

Die 2,5D-Prozess-Simulation aus Abschnitt 5.2 simuliert auf Basis dieser Eingabedaten den Herstellungs-Prozess und bereitet die Daten entsprechend auf, sodass sie von einem Field-Solver interpretierbar sind (Abb. 5.12).

Zur Demonstration wurde die 2,5D-Prozess-Simulation in Calibre [43] implementiert. In diesem Beispiel ist der MEMS-Sensor aus Abb. 5.11 mit einer Gas-Phasen-Ätzschrittweite von 200 nm simuliert worden. Zum Vergleich wurde die Prozess-Simulation für den Demonstrations-Sensor mit SEMulator3D [6] mit einer Voxel-Größe von 200 nm durchgeführt. In Abb. 5.13 ist die Aufsicht auf einen Ausschnitt des Demonstrations-Sensors abgebildet, nachdem die Gas-Phasen-Ätzung in den beiden Simulationen durchgeführt wurde. SEMulator3D benötigte ungefähr sieben Minuten für die Berechnung, die vereinfachte 2,5D-Prozess-Simulation, implementiert in Calibre, nur ungefähr eine Minute. Der bereits bei diesem einfachen Beispiel auftretende Unterschied in der Laufzeit wird sich bei komplexeren MEMS-Strukturen, wie sie heutzutage üblich sind, deutlich vergrößern.

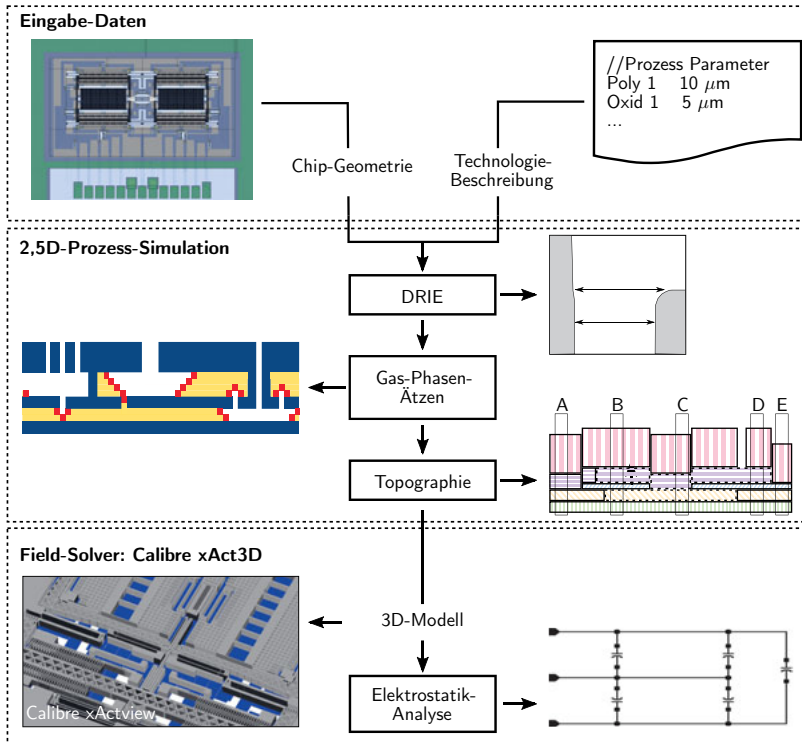


Abbildung 5.12: Extraktions-Fluss der Elektrostatik-Analyse.

Wie in Abb. 5.12 dargestellt, enthält die 2,5D-Prozess-Simulation auch die Abbildung der Topographie im Schichtaufbau durch separate Topographie-Layer. Ein Beispiel für die durch die Simulation berechneten Topographie-Layer ist in Abb. 5.14 mit Calibre xActview visualisiert, das in den Field-Solver Calibre xAct3D integriert ist.

Das Modell von SEMulator3D enthält deutlich mehr Details (z. B. die Oberflächen-Rauigkeit der Seitenwände beim DRIE) als die beschriebene 2,5D-Prozess-Simulation, wodurch sich die längere Laufzeit begründet. In Abschnitt 5.4 wird gezeigt, dass der entwickelte Ansatz dennoch geeignet ist für eine aussagekräftige Elektrostatik-Analyse.

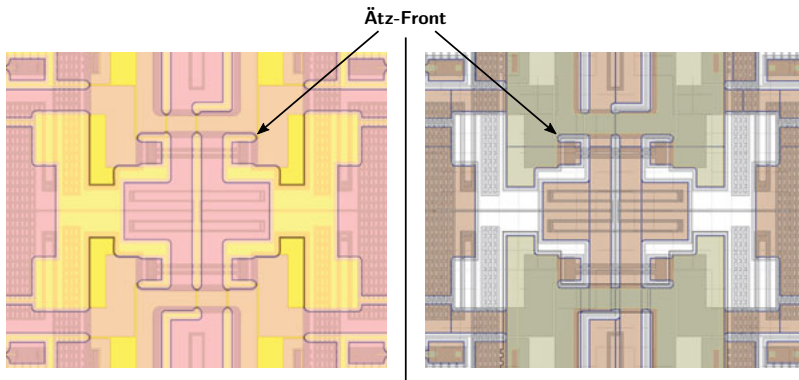


Abbildung 5.13: Links: Aufsicht auf das SEMulator3D-Modell. Rechts: Aufsicht auf das Modell der 2,5D-Prozess-Simulation. In schwarz ist die Ätz-Front des Gas-Phasen-Ätzens hervorgehoben.

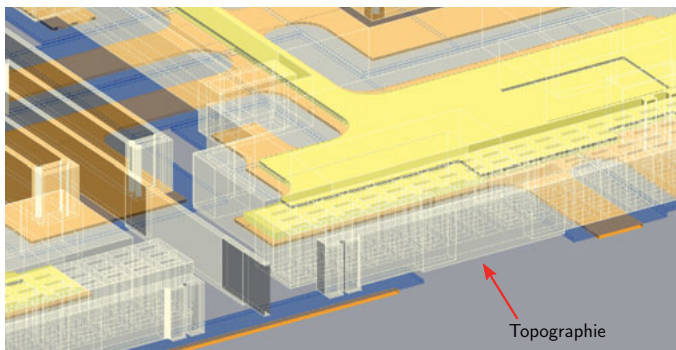


Abbildung 5.14: Visualisierung des Calibre xAct3D internen 3D-Modells mit Calibre xActview. Die Abbildung zeigt einen Querschnitt durch den 3D-Schichtstapel. Der Pfeil markiert die Topographie in der Poly2 Schicht, die durch die 2,5D-Prozess-Simulation berechnet wurde.

5.4 Verifikation der Extraktions-Ergebnisse

Für eine Vergleichbarkeit zur bisherigen 2D-musterbasierten Elektrostatik-Analyse (vgl. Abschnitt 3.3) werden für die Verifikation der neuen Elektrostatik-Analyse die gleichen charakterisierten Teststrukturen eingesetzt (Abb. 3.7 in Abschnitt 3.3). Diese enthalten typische MEMS-Strukturen, wie perforierte Platten, Fachwerk- und

Kamm-Strukturen in verschiedenen Schichtstapel Konfigurationen (vgl. Abschnitt 5.2 und 2.1). In Tab. 5.1 sind die gemittelten Abweichungen der Extraktions-Ergebnisse von den Messwerten gegeben.

Tabelle 5.1: Gemittelte Abweichungen der Extraktions-Ergebnisse der neuen Elektrostatik-Analyse mit der 2,5D-Prozess-Simulation aus Abschnitt 5.2 und dem Field-Solver Calibre xAct3D am Beispiel der Teststrukturen aus Abb. 3.7. In der ersten Spalte sind alle Extraktions-Ergebnisse zusammengefasst. In den weiteren Spalten sind die Ergebnisse der einzelnen Geometrie-Strukturen aufgeschlüsselt (nicht alle Strukturen sind einzeln aufgeführt). In der ersten Zeile wurde für die Simulation des reaktiven Ionentiepenätzens (DRIE) eine konstante Verschiebung der Kanten (Kantenverlust) über die gesamte Chip-Geometrie angenommen. In der zweiten wurde der Kantenverlust durch das reaktive Ionentiepenätzen über die in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Methode approximiert. Zum Vergleich sind in der letzten Zeile die Werte aus Tab. 3.1 angegeben.

3D-Field-Solver-basierte Extraktion	Gesamt	Perforierte Platten	Fachwerkstrukturen	Balken
Gemittelte Abweichung zu den Messwerten [%] (konstanter Kantenverlust)	3,27	3,56	2,18	3,7
Gemittelte Abweichung zu den Messwerten [%] (Kantenverlust über Sim des DRIE)	2,71	2,86	2,12	3,79
2D-musterbasierte Extraktion	24,83	18,48	36,42	5,68

Bei der ersten Extraktion (Ergebnisse in Zeile 1 in Tab. 5.1) wurde für die Simulation des reaktiven Ionentiepenätzens (DRIE) eine konstante Verschiebung der Kanten (Kantenverlust) über die gesamte Chip-Geometrie angenommen. In Zeile 2 in Tab. 5.1 sind die Ergebnisse einer zweiten Extraktion mit der Simulation des DRIE, wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, gegeben. Wie in Tab. 5.1 Zeile 2 zu sehen, lässt sich unter Berücksichtigung der abstandsabhängigen Verschiebung der einzelnen Kanten die Extraktion verbessern, sodass im Demonstrationsbeispiel die absolute Abweichung der Extraktions-Ergebnisse von den Messwerten im Schnitt unter drei Prozent liegt.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine MEMS-spezifische Elektrostatik-Analyse-Methode beschrieben. Diese enthält eine sehr schnelle 2,5D-Prozess-Simulation, die ein Technologie-Modell eines MEMS-Elements erzeugt. Dieses Modell ist so aufbereitet, dass es den Einsatz von Field-Solvern aus dem Elektronik-Entwurf für die Elektrostatik-Analyse von MEMS-Elementen ermöglicht.

Die Elektrostatik-Analyse wurde mit dem Field-Solver Calibre xAct3D von Mentor Graphics an einem MEMS-Drehratensensor demonstriert.

Die von Calibre xAct3D berechneten Werte wurden anhand von charakterisierten Teststrukturen verifiziert. Die gemittelte Abweichung der extrahierten Werte von den gemessenen Werten lag bei der Field-Solver-basierten Elektrostatik-Analyse mit der neuen 2,5D-Prozess-Simulation bei unter drei Prozent. Im Vergleich dazu weichen die extrahierten Werte der früheren 2D-musterbasierten Methode aus Abschnitt 3.3 im Mittel um fast 25% von den Messwerten ab.

Die beschriebene MEMS-spezifische Elektrostatik-Analyse ermöglicht eine effiziente Analyse eines MEMS-Elements auf Basis der gesamten Chip-Geometrie unter Einbezug von Einflüssen aus der Prozesstechnologie, mit einer Genauigkeit die besser ist als die typisch zu erwartenden 5-10% Toleranzen in den einzelnen Herstellungsprozess-Schritten. Dadurch eignet sie sich als Basis für eine Optimierung der parasitären elektrostatischen Effekte während der Entwurfsphase, wie beispielsweise die Symmetrisierung von parasitären Kapazitäten.

6 Methode zur polygonbasierten Schaltplan-Extraktion mit einer regelbasierten Strukturerkennung

Im polygonbasierten Entwurfsprozess liegen die MEMS-Strukturen nur als Polygon-Beschreibung vor (vgl. Abschnitt 3.4.3). Aus diesem Grund lassen sich bei der Elektrostatik-Analyse mit den bislang verfügbaren Werkzeugen immer nur die Kapazitäten zwischen den einzelnen Netzen extrahieren (Kap. 5). Eine geometrische Zuordnung der extrahierten Werte, sowie eine Trennung zwischen funktionellen und parasitären Kapazitäten, ist bei diesem Ansatz zunächst nicht möglich. Dies bedeutet beispielsweise, dass sich anhand einer Elektrostatik-Analyse eines kapazitiven Beschleunigungssensors (vgl. Abb. 1.5) nur die gesamten Koppelkapazitäten zwischen den Netzen analysieren lassen. Diese extrahierten Kapazitäten enthalten die Summe aus den funktionellen Kapazitäten zwischen den Detektions-Elektroden sowie die parasitären Kapazitäten zwischen den restlichen Strukturen, wie beispielsweise Verdrahtungen (Abb. 6.1, oben). Dadurch ist es nicht möglich, die funktionellen und parasitären Kapazitäten gezielt zu analysieren und zu optimieren.

Im Folgenden wird ein regelbasierter Strukturerkennungs-Algorithmus beschrieben, der diese Lücke im Entwurfsprozess schließt [72]. Mit Hilfe des Strukturerkennungs-Algorithmus lassen sich wesentliche Komponenten (z. B. Federn, Elektroden und seismische Massen) eines MEMS-Elements anhand von Regeln in der Chip-Geometrie erkennen (Abb. 6.1, links unten). Diese Regeln werden vom Benutzer auf Basis eines gegebenen Katalogs definiert. Die erkannten Komponenten kann man dann so aufbereiten, dass sie als Sub-Netze der ursprünglichen Netze in den Extraktions-Ergebnissen repräsentiert werden. Dadurch sind die von der Elektrostatik-Analyse extrahierten Werte in der Chip-Geometrie lokalisierbar (Abb. 6.1, rechts unten). Damit ist die Voraussetzung geschaffen, dass man die parasitären elektrostatischen Effekte gezielt analysieren und optimieren kann.

Zunächst wird in Abschnitt 6.1 die grundlegende Idee der entwickelten regelbasierten Strukturerkennung dargestellt und in den Extraktions-Fluss der Elektrostatik-Analyse

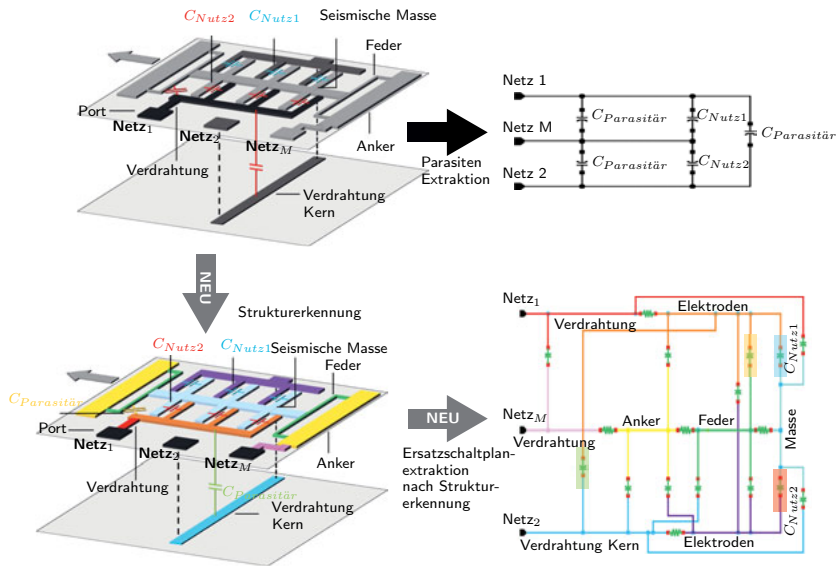


Abbildung 6.1: Links oben: Schematische Darstellung eines kapazitiven Beschleunigungssensors. Rechts oben: Ergebnis einer klassischen Netz-zu-Netz Elektrostatik-Analyse nach Kapitel 5. Links unten: Beschleunigungssensor nach der neuen Strukturerkennung, wobei die erkannten Komponenten in verschiedenen Farben dargestellt sind. Rechts unten: Ergebnis der Elektrostatik-Analyse nach der Strukturerkennung. Die erkannten Komponenten sind als Sub-Netze im Schaltplan in der jeweiligen Farbe dargestellt. Die Sub-Netze sind durch Hilfswiderstände (grün) getrennt.

aus Kap. 5 eingeordnet. In Abschnitt 6.2 wird der Strukturerkennungs-Algorithmus mit seinen einzelnen Schritten dargestellt. Anschließend folgt in Abschnitt 6.3 die Beschreibung der Schnittstelle zwischen Strukturerkennung und Elektrostatik-Analyse. Der Strukturerkennungs-Algorithmus wird in Abschnitt 6.4 an verschiedenen MEMS-Inertialsensoren demonstriert. In Abschnitt 6.5 folgt die Verifikation bzw. Plausibilisierung der neuen Methode. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 6.6.

6.1 Grundlegende Idee und Einordnung in den Extraktions-Fluss

Veranschaulicht wird das Prinzip der regelbasierten Strukturerkennung am Beispiel kapazitiver MEMS-Inertialsensoren. Wie in Abb. 6.2 dargestellt, können zwischen zwei Sensor-Generationen große geometrische Unterschiede auftreten.

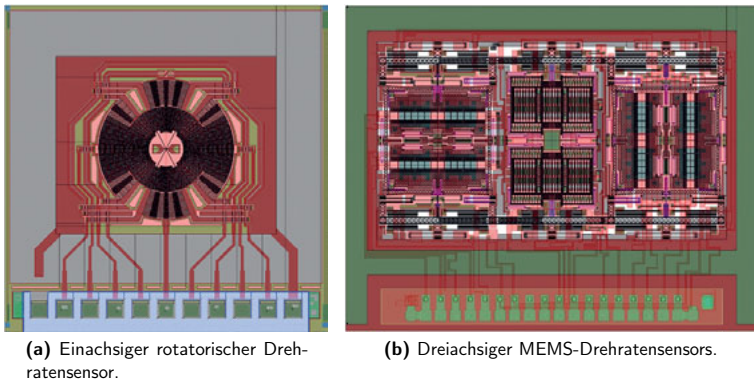


Abbildung 6.2: In den Abbildungen sind zwei Drehratensensoren zu sehen. Obwohl sie sich in ihrem äußeren Erscheinungsbild stark unterscheiden, basieren sie beide auf demselben charakteristischen Funktionsprinzip.

Invariant zwischen den Sensor-Generationen ist aber das zugrundeliegende Funktionsprinzip (vgl. Abschnitt 2.2). Im direkten Zusammenhang mit dem charakteristischen Funktionsprinzip stehen die Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen, die sich durch Regeln beschreiben lassen.

Jeder kapazitive MEMS-Beschleunigungssensor enthält eine seismische Masse, die frei schwingend zwischen zwei Federn aufgehängt ist. Damit man eine durch eine äußere Beschleunigung verursachte Kapazitätsänderung detektieren kann, müssen zudem sehr nahe an der seismischen Masse Detektions-Elektroden angebracht sein. Diese müssen sich außerdem auf einem anderen elektrischen Potential befinden als die seismische Masse (Abb. 6.3 und Abschnitt 2.2.1).

Diese grundlegende charakteristische Struktur kapazitiver MEMS-Beschleunigungssensoren ist immer vorhanden, auch wenn sich die geometrischen Formen zwischen den verschiedenen Generationen teilweise stark unterscheiden. Im Folgenden wird diese charakteristische Struktur als die *Architektur* des MEMS-Elements bezeichnet.

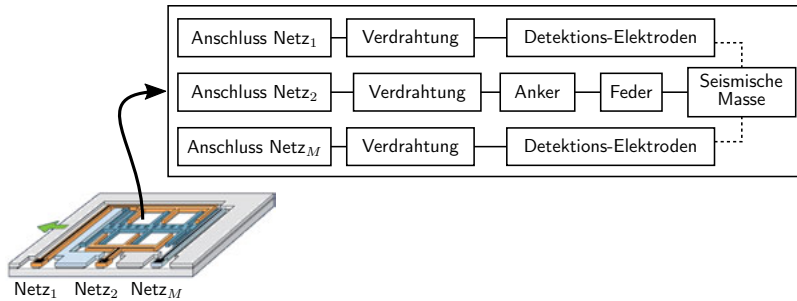


Abbildung 6.3: Grundlegende charakteristische Struktur (Architektur) eines typischen MEMS-Beschleunigungssensors. Zwischen Elementen, die durch eine durchgezogene Linie verbunden sind, besteht eine materielle Verbindung. Die gestrichelten Linien symbolisieren eine Beziehung zwischen Elementen, die nicht materiell verbunden sind.

Diese kann innerhalb eines *MEMS-Typs* in gewissen Grenzen variieren. Beispielsweise werden in kapazitiven MEMS-Interialsensoren der Robert Bosch GmbH [2] die im Anhang (Kap. 6.7) in Abb. 6.34 dargestellten Architektur-Varianten eingesetzt und kombiniert.

Aufgrund der kontinuierlichen Änderungen der MEMS-Strukturen muss der Strukturerkennungs-Algorithmus unabhängig von der geometrischen Form der MEMS-Elemente funktionieren. Dies lässt sich durch den Einsatz einer regelbasierten Strukturerkennung erreichen. Die dafür notwendigen Regeln basieren auf den durch den Entwurf bekannten Architekturen eines MEMS-Typs und beschreiben ausschließlich die Beziehungen zwischen den Strukturen der zu erkennenden Komponenten.

Im Folgenden werden diese strukturellen Komponenten als *Topologie-Elemente* bezeichnet. Dies soll verdeutlichen, dass die Komponenten nicht aus einer Bauelemente-Bibliothek stammen (vgl. Abschnitt 3.4.1 und 3.4.2).

Die zu erkennenden Topologie-Elemente sind also nicht durch ihre äußere Form, sondern ausschließlich durch ihre Beziehungen, die sie untereinander haben, charakterisiert. Insbesondere bedeutet dies, dass eine direkte polygonbasierte Erkennung von Topologie-Elementen bei diesem Ansatz nicht möglich ist, denn damit ließe sich die Invarianz der Strukturerkennung bezüglich der Geometrie der zu erkennenden Topologie-Elemente nicht gewährleisten.

Der entwickelte algorithmische Ansatz zur Erkennung der Topologie-Elemente macht Gebrauch vom Expertenwissen des Benutzers. Dieses bringt er in zwei Schritten ein:

beim Aufsatz der Strukturerkennung und bei der anschließenden Anwendung der Strukturerkennung.

Für den Aufsatz der Strukturerkennung, dargestellt in Abb. 6.4, muss der Benutzer zwei Eingaben tätigen:

- Er legt sinnvolle Topologie-Elemente fest.
- Er legt sogenannte *Schlüsselemente* in der Chip-Geometrie fest.

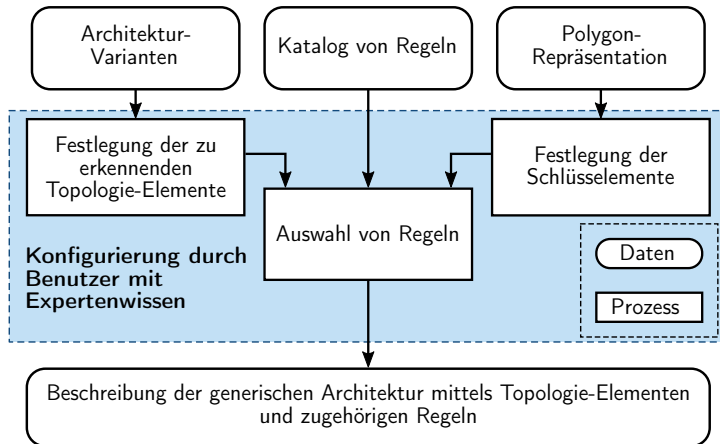


Abbildung 6.4: Aufsatz der regelbasierten Strukturerkennung aus Sicht des Benutzers für einen MEMS-Typ.

Die Festlegung sinnvoller Topologie-Elemente geschieht implizit, indem er aus einem gegebenen Katalog von Regeln eine Teilmenge von Regeln, die im Algorithmus angewendet werden sollen, auswählt. Die Anwendung der Regeln aus dem Katalog bewirkt dort die Ausführung logischer Polygon-Operationen, wie beispielsweise Vereinigung, Schnitt, Inklusion oder Interaktion, zwischen den Polygonen der Chip-Geometrie. Mit diesen Operationen werden Gebiete in der Chip-Geometrie separiert und diese als Topologie-Elemente für die Strukturerkennung definiert.

Mit der Regelauswahl beschreibt der Benutzer die zu erwartenden Architekturvarianten als eine generische Architektur (Details hierzu folgen in Abschnitt 6.2). Erst bei der Anwendung der Strukturerkennung werden diese Regeln durch den entwickelten Algorithmus für die tatsächlich vorliegende spezifische Architektur in eine ausführbare Form gebracht. Insbesondere wird dabei die generische Architekturbeschreibung in eine für das MEMS-Element spezifische Architekturbeschreibung überführt.

Damit der Algorithmus die Topologie-Elemente für die Strukturerkennung robust, d. h. unabhängig von den realen geometrischen Formen eines MEMS-Typs erkennen

kann, ist es notwendig, dass der Benutzer sogenannte Schlüsselemente vorgibt. Die Schlüsselemente, die er auf einem extra dafür vorgesehenen Layer markiert, bilden den Ausgangspunkt für die durch die Regeln separierten Topologie-Elemente (Abb. 6.5). Diese zweite Vorgabe benötigt weniger Expertenwissen als die erste.

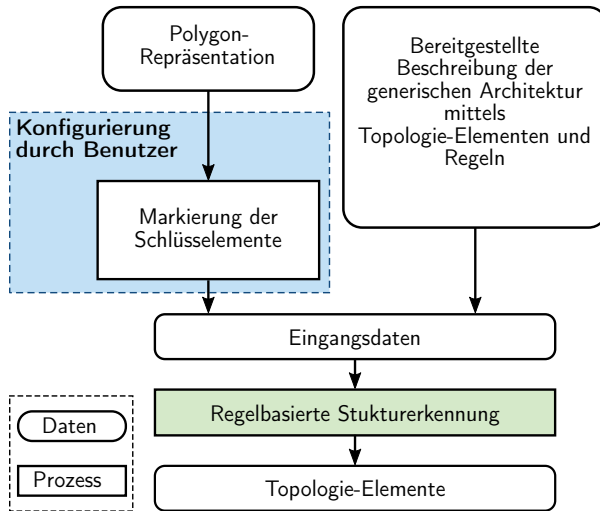


Abbildung 6.5: Anwendung der regelbasierten Strukturerkennung aus Sicht des Benutzers.

Der Strukturerkennungs-Algorithmus lässt sich anhand eines graphenbasierten Modells, das den Zusammenhang zwischen den Topologie-Elementen, Polygonen und Regeln beschreibt, auf einer hohen Abstraktionsebene darstellen.

Die Topologie-Elemente und ihre Beziehungen werden in einem gerichteten Graph $G_T = (V_T, E_T)$ abgebildet, wobei die Knoten V_T des Graphen jeweils ein Topologie-Element und die Kanten E_T die Beziehungen zwischen den Topologie-Elementen beschreiben (Abb. 6.6). Jeder Knoten $v_i \in V_T$ des Graphen G_T enthält wiederum einen gerichteten bipartiten Graphen $G_{R,i}$, der die Abhängigkeiten zwischen den Strukturen der zu erkennenden Topologie-Elemente anhand von Regeln beschreibt.

Die Knoten $V_{R,i}$ des Graphen $G_{R,i}$ lassen sich in zwei disjunkte Teilmengen $V_{I,i}$ und $V_{II,i}$ unterteilen. Die Knoten der Teilmenge $V_{I,i}$ repräsentieren jeweils eine Regel. Die Knoten der Teilmenge $V_{II,i}$ repräsentieren (in einem Layer gespeicherte) geometrische Strukturen. Aufgrund der bipartiten Eigenschaft des Graphen $G_{R,i}$ verbinden die Kanten $E_{R,i}$ des Graphen $G_{R,i}$ ausschließlich die Knoten von $V_{I,i}$ mit denjenigen von $V_{II,i}$. Sie repräsentieren die Abhängigkeiten zwischen Regeln und geometrischen Strukturen. Letztere sind somit nichts anderes als die Ein- und Ausgangsdaten der

Regeln. Im Folgenden werden die Struktur-Knoten aus $V_{II,i}$ als Layer bezeichnet und die Regel-Knoten aus $V_{I,i}$ einfachheitshalber als Regel.

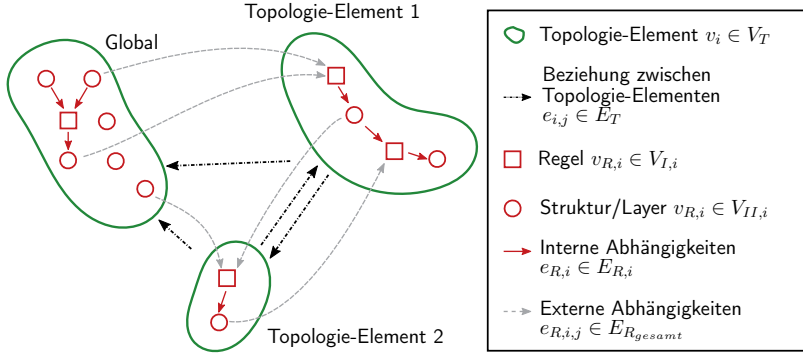


Abbildung 6.6: Darstellung der Topologie-Elemente und ihrer Beziehungen in einem gerichteten Graphen $G_T = (V_T, E_T)$ (grün) mit zugehörigen Sub-Graphen $G_{R,i} = (V_{R,i}, E_{R,i})$ (rot). Die Sub-Graphen $G_{R,i}$ enthalten die Regeln zwischen den Strukturen der zu erkennenden Topologie-Elemente.

Neben den internen Abhängigkeiten der Regeln und Layer innerhalb eines Topologie-Elements gibt es auch externe Abhängigkeiten zwischen Layern verschiedener Topologie-Elemente. Das heißt insbesondere, dass es auch benachbarte Knoten zwischen den Sub-Graphen $G_{R,i}$ und $G_{R,j}$ ($i \neq j$) des Graphen G_T gibt. Daraus folgt, dass man die Sub-Graphen $G_{R,i}$ des Graphen G_T als einen Graphen $G_{R_{gesamt}}$ auffassen muss, der aus der Vereinigung der Sub-Graphen $G_{R,i}$ über alle i besteht (Abb. 6.6). Der Graph $G_{R_{gesamt}}$ erbt die bipartite Eigenschaft der Graphen $G_{R,i}$, d. h. die Menge der Knoten lässt sich ebenfalls in die disjunkten Teilmenge V_I der Regeln und V_{II} der Layer zerlegen.

Wie bereits erwähnt, muss bei der Anwendung der Strukturerkennung die generische Architekturbeschreibung durch die Topologie-Elemente im Graphen G_T mit den zugehörigen Regeln im Graph $G_{R_{gesamt}}$ in eine ausführbare Form für die tatsächlich vorliegende spezifische Architektur überführt werden. Dieser Vorgang wird im Rahmen dieser Arbeit als *Ableiten der Topologie-Elemente und Regeln* bezeichnet.

Mit dem Ableiten der Topologie-Elemente und Regeln anhand der spezifischen Architektur des zugehörigen MEMS-Elements erzeugt der Strukturerkennungs-Algorithmus einen für das MEMS-Element spezifischen und ausführbaren Satz an Regeln. Mit diesem kann man die, während des Aufsatzes der Regeln festgelegten, Topologie-Elemente in der Chip-Geometrie des vorliegenden MEMS-Elements erkennen.

Die Idee der Ableitung von Topologie-Elementen anhand einer vorliegenden Architektur ist in Abb. 6.7 dargestellt. Die Ableitung der Regeln erfolgt nach der Ableitung der spezifischen Topologie-Elemente. Zunächst überträgt der Algorithmus die Regeln und Layer auf die abgeleiteten Topologie-Elemente und verknüpft sie anschließend bezüglich der Beziehungen zwischen den abgeleiteten Topologie-Elementen untereinander neu (Abb. 6.7, unten). Dabei bringt der Algorithmus die Regeln in eine ausführbare Form, sodass sie sich auf die vorliegende Chip-Geometrie anwenden lassen.

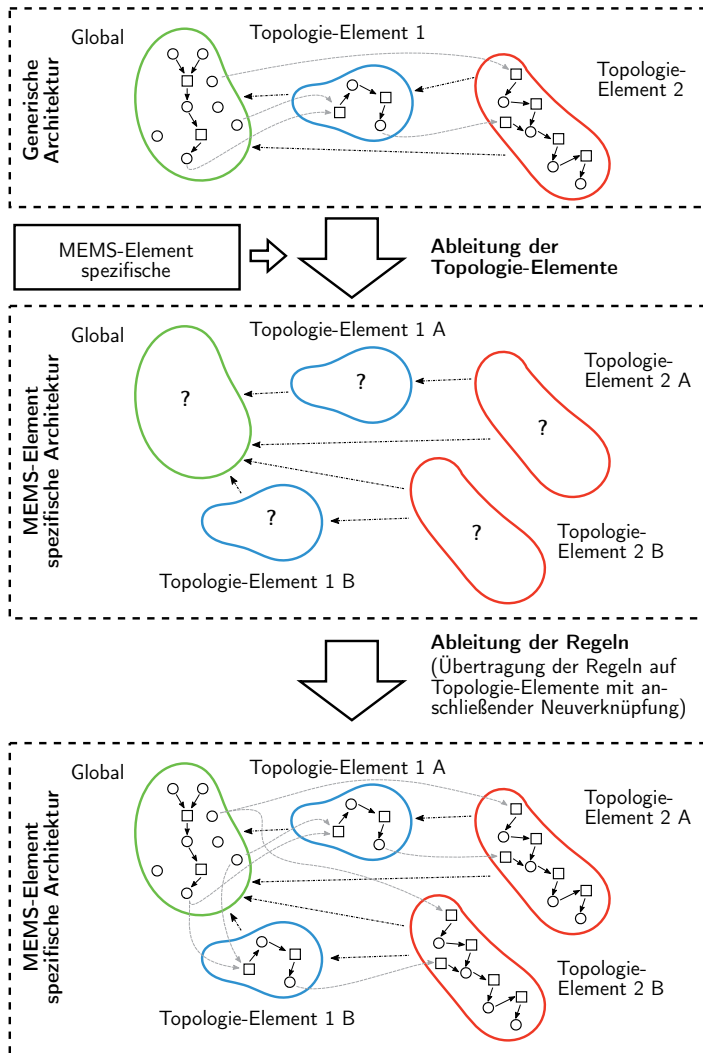


Abbildung 6.7: Beispiel für die Ableitung einer generischen zu einer spezifischen Architekturbeschreibung. Die abgeleiteten Topologie-Elemente beinhalten zunächst noch keine Regeln (Mitte). Diese werden erst im nachfolgenden Schritt abgeleitet und neu verknüpft (unten).

Die erkannten Topologie-Elemente lassen sich dann in die nachfolgende Elektrostatik-Analyse einbeziehen (Abb. 6.8). Dies bewirkt, dass die ursprünglichen Netze des MEMS anhand der erkannten Topologie-Elemente in Sub-Netze zerteilt werden. In der resultierenden Netzliste entspricht jedes Sub-Netz dadurch genau einem Topologie-Element, wodurch die parasitären Kapazitäten der Sub-Netze anhand der Topologie-Elemente in der Chip- Geometrie lokalisierbar sind. Dies wiederum ermöglicht die gezielte Analyse und Optimierung der parasitären Kapazitäten im Entwurf.

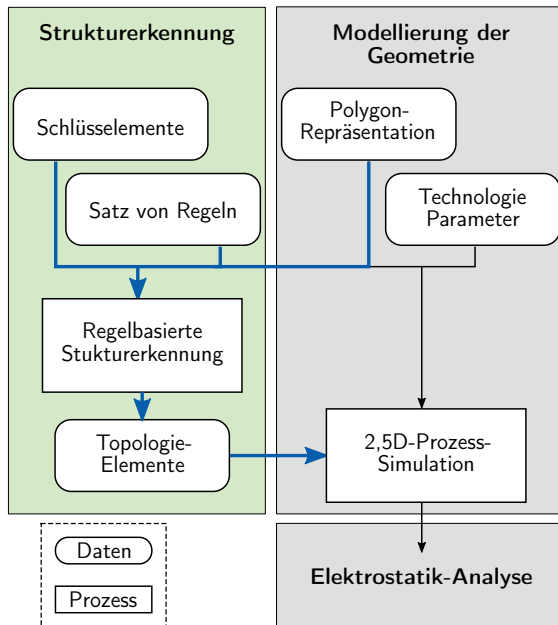


Abbildung 6.8: Einbindung der Strukturerkennung (grün hinterlegt) in den Fluss der Elektrostatik-Analyse.

6.2 Regelbasierter Strukturerkennungs-Algorithmus

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Schritte des Strukturerkennungs-Algorithmus detailliert beschrieben. In Abb. 6.9 zeigt ein Flussdiagramm die einzelnen Schritte des Strukturerkennungs-Algorithmus.

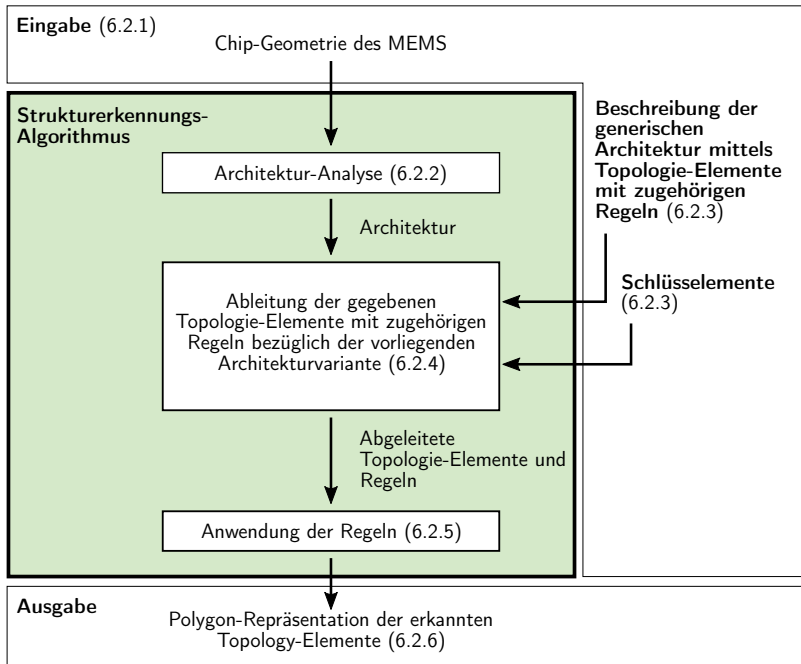


Abbildung 6.9: Flussdiagramm der einzelnen Schritte des regelbasierten Strukturerkennungs-Algorithmus. In Klammern sind jeweils die entsprechenden Unterabschnitte zu den einzelnen Punkten angegeben.

6.2.1 Eingabe

Für die Anwendung benötigt der Strukturerkennungs-Algorithmus als Eingabe die durch den Aufsatz bereitgestellte Beschreibung der generischen Architektur mittels Topologie-Elementen mit zugehörigen Regeln und die Chip-Geometrie als Polygon-Repräsentation. Die Chip-Geometrie muss für die Architektur-Analyse die Netz-Informationen als Textmarkierungen enthalten. Zusätzlich muss der Benutzer die notwendigen Schlüsselemente für die bereitgestellten Regeln (vgl. Abschnitt 6.1) in der Chip-Geometrie durch Markierungs-Layer hinterlegen.

6.2.2 Architektur-Analyse

In der Architektur sind die Netze eines MEMS-Typs hinterlegt. Diese Netze sind wiederum allgemeinen Kategorien zugeordnet, den sogenannten *Netz-Typen*. Beispielsweise beinhaltet ein kapazitiver Beschleunigungssensor immer ein Netz vom Typ „CM“, das die bewegliche Mittelelektrode enthält. Daneben hat solch ein Sensor immer mindestens zwei weitere Netze vom Typ „C1“, die die Detektions-Elektroden enthalten. Bei kapazitiven Drehratensensoren kommen typischerweise Netz-Typen wie Antrieb (A) und Quadratur (Q) hinzu.

Zusätzlich ist in der Architektur hinterlegt, welche Netze miteinander interagieren. In einem kapazitiven Beschleunigungssensor interagieren beispielsweise die Netze vom Typ „CM“ mit ihren jeweiligen Detektions-Netzen vom Typ „C1“.

Neben der Information, welche Netze miteinander interagieren, ist in der Architektur außerdem die „Art der Interaktion“ hinterlegt. Die möglichen Interaktionen zwischen Netzen sind in Tab. 6.1 aufgeführt.

Tabelle 6.1: Mögliche Arten der Interaktion zwischen Netzen.

Art der Interaktion	Beschreibung
keine	Ein Netz interagiert mit keinem anderen Netz.
lateral	Die interagierenden Strukturen der Netze befinden sich auf demselben Layer (Fall Abb. 6.34a). Beispielsweise tritt dieser Fall in kapazitiven x/y-Beschleunigungssensoren zwischen der seismischen Masse und den Detektions-Elektroden auf (vgl. Abschnitt 2.2).
vertikal	Die interagierenden Strukturen der Netze befinden sich auf unterschiedlichen Layern (Fall Abb. 6.34a). Beispielsweise tritt dieser Fall in kapazitiven z-Beschleunigungssensoren auf, bei denen sich die Detektions-Elektroden typischerweise unterhalb der seismischen Masse befinden.
lateral & vertikal	Die interagierenden Strukturen der Netze befinden sich sowohl auf unterschiedlichen Layern als auch auf dem gleichen Layer (Fall Abb. 6.34b und 6.34c). Beispielsweise tritt dieser Fall bei xz-Beschleunigungssensoren auf.

Die Architektur-Analyse (vgl. Abb. 6.9) extrahiert im ersten Schritt die Netz-Namen aus der Chip-Geometrie, die dort als Textmarkierungen hinterlegt sind. Aufgrund von Namenskonventionen lassen sich MEMS-Typ (z. B. Beschleunigungssensor oder Drehratensensor) und die Netz-Typen der einzelnen Netze bestimmen (z. B. Detektions-, Antriebs- oder Quadratur-Netz).

Anhand der Zuordnung der erkannten Netze zu den Netz-Typen lassen sich im zweiten Schritt durch logische Polygon-Operationen die jeweilige Anordnung der

einzelnen Sensorkerne detektieren. Im gleichen Zuge erfolgt auch die Zuordnung der Netze zu den jeweiligen Kernen.

Im abschließenden dritten Schritt bestimmt die Architektur-Analyse noch die Beziehungen der Netze untereinander.

Für jeden Sensortyp und jede Layer-Konfiguration, d. h. insbesondere für jede Prozesstechnologie, muss man die Architektur-Analyse neu implementieren. In der industriellen Praxis setzt man aus diesem Grund eine universelle semi-automatische Architektur-Analyse ein, die sich durch den Benutzer innerhalb weniger Minuten zuverlässig in einem graphischen Editor durchführen lässt (Abschnitt 6.4).

Auf der Konferenz SMACD 2016 in Lissabon wurde eine voll-automatische Architektur-Analyse im oben beschriebenen Sinn an einem Beschleunigungssensor live demonstriert und damit gezeigt, dass man das beschriebene Verfahren mit größerem Aufwand umsetzen kann [72].

6.2.3 Definition der Topologie-Elemente mit ihren zugehörigen Regeln

Für den Aufsatz der Strukturerkennung muss der Benutzer im ersten Schritt die zu erkennenden Topologie-Elemente festlegen. Voraussetzung für diese Arbeit ist Expertenwissen des Benutzers über den Aufbau und die verschiedenen Architekturvarianten des zu analysierenden MEMS-Typs. Nachdem der Benutzer sinnvolle Topologie-Elemente festgelegt hat, muss er diesen jeweils einen Netz-Typ zuordnen. Beispielsweise ordnet man bei einem kapazitiven Beschleunigungssensor ein Topologie-Element „seismische Masse“ typischerweise dem Netz-Typ „CM“ zu.

Anschließend muss der Benutzer noch die möglichen Interaktionen zwischen den Topologie-Elementen definieren. Dies ist notwendig, damit später beim Ableiten der Topologie-Elemente (vgl. Abschnitt 6.1 und Abb. 6.7) deren Zuordnung anhand des Netz-Typs zu den in der spezifischen Architektur vorhandenen Netzen mit ihren Interaktionen eindeutig ist (vgl. Abschnitt Architektur-Analyse und Tab. 6.1). Beispielsweise kann ein zweikanaliger kapazitiver xz-Beschleunigungssensor einen lateral sowie einen vertikal sensierenden *Sensorkern* enthalten, die jeweils ihre eigenen Detektions-Netze („C1“ und Mittel-Elektroden-Netze („CM“) haben (Abb. der Architektur in Abb. 6.34a im Anhang, Kap. 6.7). Für die korrekte Erkennung der seismischen Massen beider getrennten Sensorkerne muss man im Allgemeinen unterschiedliche Regeln anwenden. Aus diesem Grund muss der Benutzer ein Topologie-Element „seismische Masse“ mit lateralen und ein zweites mit vertikalen Interaktionen definieren, die beide dem Netz-Typ „CM“ zugeordnet sind. Nur so kann der Strukturerkennungs-Algorithmus während der Ableitung der Topologie-Elemente dann für das eine Netz „CM“ in der spezifischen Architektur das Topologie-Element

mit lateralen und für das zweite Netz das Topologie-Element mit vertikalen Interaktionen auswählen. Diese allgemeine Beschreibung der verschiedenen zu erwartenden Topologie-Elemente und damit der zu erwartenden Architekturvarianten wird im Rahmen dieser Arbeit als generische Architekturbeschreibung bezeichnet.

Neben den erwähnten lateralen und vertikalen Interaktionen, kann ein Topologie-Element auch gleichzeitig vertikal und lateral mit anderen Topologie-Elementen interagieren. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der Sensor im obigen Beispiel keine getrennten Sensorkerne hätte. In solch einem Fall sensiert eine seismischen Masse eine Beschleunigung sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung.

Erst nachdem die Topologie-Elemente vollständig definiert sind, wählt der Benutzer die eigentlichen Regeln zur Erkennung der Topologie-Elemente aus der Chip-Geometrie aus einem vorgegebenen Katalog aus und ordnet sie jeweils den Topologie-Elementen zu (vgl. Darstellung als Graph in Abb. 6.6). Im Folgenden werden die Regeln, die für die Erkennung der Topologie-Elemente zur Verfügung stehen, formal eingeführt.

Sei ein MEMS-Sensor-Element S eine Menge von $n \in \mathbb{N}$ Layern L

$$S := \{L^1, \dots, L^n\}. \quad (6.1)$$

Die Layer L^1, \dots, L^n enthalten $m_i \in \mathbb{N}$ Polygone p

$$L^i := \{p_1^i, \dots, p_{m_i}^i\} : p_j^i = \{p_{j_1}^i, \dots, p_{j_t}^i\} : p_{j_v}^i \in \mathbb{R}^2, \quad (6.2)$$

mit $1 \leq j \leq m_i$, $t \in \mathbb{N}$, $1 \leq v \leq t$.

Hierbei gilt, dass Strukturen, die auf einem Layer zusammenhängend sind, auch durch ein zusammenhängendes Polygon beschrieben werden. Des Weiteren gilt, dass sich jedes Polygon p_j^i auf dem Layer L^i eindeutig einem Netz zuordnen lässt, das durch eine Textmarkierung auf einem Bondpad definiert ist (vgl. Kapitel 3).

Die Menge der Topologie-Elemente T eines Layer L^i ist definiert durch

$$t^i \in T^i : t^i \subseteq p_j^i \in L^i, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m_i, \quad (6.3)$$

wobei die Topologie-Elemente $t^i \in T^i$ eine disjunkte Zerlegung der Polygone p_j^i , $1 \leq j \leq m_i$ sind. Das heißt, die Topologie-Elemente sind zunächst eine beliebige disjunkte Zerlegung der Layer L^i :

$$\bigcup_{t^i \in T^i} t^i = L^i, 1 \leq i \leq n. \quad (6.4)$$

Die Aufgabe ist nun, mithilfe einer Menge von Regeln sinnvolle Topologie-Elemente t^i aus der Polygon-Repräsentation des MEMS-Sensor-Elements S abzuleiten.

Sei hierfür die Menge R , eine beliebige Menge mit $s \in \mathbb{N}$ Regeln vom Typ r^1, r^2 und r^3 , wobei

$$R = \{r_1^1, \dots, r_{s_1}^1, r_1^2, \dots, r_{s_2}^2, r_1^3, \dots, r_{s_3}^3\}, \quad (6.5)$$

mit $s_1 + s_2 + s_3 = s$.

Die Regeln vom Typ r^1, r^2 und r^3 sind wie folgt definiert, wobei gilt $1 \leq i, j \leq n$.

i) Beziehung/Kombination von Polygonen verschiedener Layer:

$$r^1 : (L^i, L^j) \rightarrow L^{neu}$$

ii) Auswahl von Polygonen auf einem Layer:

$$r^2 : (L^i, \text{Bedingung}) \rightarrow L^{neu}$$

iii) Deformation von Polygonen auf einem Layer:

$$r^3 : (L^i, \text{Operator}) \rightarrow L^{neu}$$

Dieser Katalog von Regel-Typen r^1, r^2 und r^3 ermöglichen es, dem Benutzer anhand der Beziehungen zwischen den Geometrien sinnvolle Topologie-Elemente in der Chip-Geometrie zu erkennen. Durch die Eigenschaft der Regeln, dass sie keine definierten geometrischen Formen, wie z. B. Rechteck, Kreis, Quadrat, etc., beschreiben, ist die Erkennung der Topologie-Elemente anhand dieser Regeln unabhängig von ihrer tatsächlichen Geometrie. Aus diesem Grund muss aber dafür eine initiale Zerlegung der Geometrie anhand von Schlüsselementen durch den Benutzer vorgegeben werden (siehe auch Abschnitt 6.1). Ausgehend von diesen Schlüsselementen kann der Benutzer anhand der Regeln aus dem vorgegebenen Katalog die Zerlegung verfeinern, bis die endgültige Zerlegung in Topologie-Elemente erreicht ist. Daraus folgt, dass die Wahl der Schlüsselemente die Strukturerkennung beeinflusst, weshalb diese wohldefiniert sein müssen.

Die Auswahl der Schlüsselemente für die regelbasierte Strukturerkennung ergibt sich typischerweise direkt aus dem Entwurf. So eignen sich beispielsweise bei Beschleunigungs- und Drehratensensoren insbesondere die Federn als Schlüsselemente.

Im Folgenden wird die Idee der regelbasierten Erkennung von Topologie-Elementen anhand eines kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensor veranschaulicht.

Ein einkanaliger kapazitiver Beschleunigungssensor enthält typischerweise ein Netz vom Typ „CM“ ($Netz_M$) mit der beweglichen Elektrode (seismische Masse) und zwei Netzen vom Typ „C1“ ($Netz_1, Netz_2$) mit Detektions-Elektroden (vgl. Abb.6.3). Zudem ist durch die Prozesstechnologie (Abschnitt 2.1) der Layer L^i definiert, dessen Polygone des Netzes $Netz_M$ die Federn, eine oder mehrere seismische Massen und die Ankerpunkte repräsentieren. Im Falle einer lateral beweglichen seismischen Masse (vgl. Abschnitt 2.2), müssen sich die Detektions-Elektroden auf den Netzen $Netz_1$ und $Netz_2$ sehr nahe und parallel zur beweglichen Elektrode auf dem Netz $Netz_M$ befinden.

Mit den Federn als Schlüsselementen ist es möglich einen Beschleunigungssensor in sinnvolle Topologie-Elemente zu unterteilen, da diese die fixierten und die beweglichen Strukturen trennen. Beispielsweise lässt sich ein Topologie-Element „seismische Masse“, das die bewegliche Elektrode auf $Netz_M$ enthält, durch die unten folgenden Regeln in der Chip-Geometrie erkennen. In Abb. 6.10 sind die Regeln den jeweils entsprechenden Stellen in der Geometrie zugeordnet.

Topologie-Element: Seismische Masse

1. Die seismische Masse muss die Federn berühren (Regel r_1^2 : L^i berührt $L^{Feder} = L^{neu}$).
2. Die seismische Masse darf nicht mit einer Struktur auf einem anderen Layer verbunden sein (Regel r_2^2 : $L^{neu} \cap L^j = \emptyset$).

Nachdem die Geometrie des Topologie-Elements „seismische Masse“ in der Chip-Geometrie erkannt wurde, lassen sich anhand dieser die Detektions-Elektroden als Topologie-Element auf den Netzen $Netz_1$ und $Netz_2$ erkennen.

Topologie-Element: Detektions-Elektrode

3. Der Abstand zwischen der seismischen Masse und den Detektions-Elektroden ist minimal
(Regel r_3^2 : (L^i , Abstands-Bedingung) = $L^{\text{Elektroden Spalte}}$).
4. Auswahl aller Polygone des Layers L^i , die zu den Netzen $Netz_1$ oder $Netz_2$ gehören (Regel r_4^2 : (L^i , Konnektivität) = $L^{i/Netz_1 \text{ oder } Netz_2}$).
5. Detektions-Elektroden sind die Polygone der beiden Ausgabe-Layern der Regeln r_3^2 und r_4^2 , die sich berühren (Regel r_5^1 : $L^{\text{Elektroden Spalte}}$ berührt $L^{i/Netz_1 \text{ oder } Netz_2} = L^{\text{Detektions-Elektrode}}$).

Neben den vom Benutzer definierten Topologie-Elementen mit ihren zugehörigen Regeln gibt es immer eine spezielle Gruppe von Regeln, die global gültig sind. Diese Gruppe von Regeln ist hilfreich, um allgemein gültige Polygon-Operationen durchzuführen, deren Ausgabe-Layer notwendig für die Erkennung vieler Topologie-Elemente sind. Des Weiteren hat es sich bei der Entwicklung des Algorithmus als sinnvoll erwiesen, nur in dieser Gruppe eine Regel zu erlauben, die es ermöglicht, Polygone auf einem Layer zu extrahieren, die einem definierten Netz zugeordnet sind.

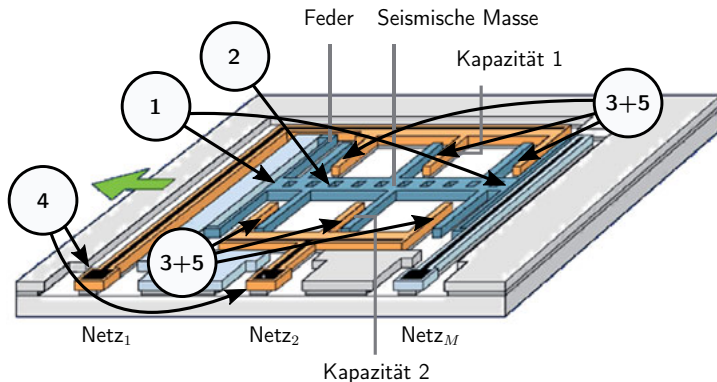


Abbildung 6.10: Geometrische Zuordnung der im Beispiel angegebenen Regeln 1-5 in der Chip-Geometrie. Anhand der beschriebenen Regeln ist es möglich, die seismische Masse und die Detektions-Elektroden eines kapazitiven Beschleunigungssensors als Topologie-Elemente in der Chip-Geometrie zu erkennen.

Zur Vollständigkeit der Beschreibung der Topologie-Elemente und Regeln muss noch das Konzept der *Sub-Topologie-Elemente* eingeführt werden. Diese Sub-Topologie-Elemente muss der Benutzer definieren, wenn ein Netz mehrere unterschiedliche Instanzen eines Topologie-Elements enthalten kann. Veranschaulicht wird das Konzept wieder am Beispiel eines kapazitiven Beschleunigungssensors. Solch ein Sensor kann in einem Netz vom Typ „CM“ mehrere seismische Massen in getrennten Sensorkernen enthalten. Diese können Beschleunigungen in lateraler sowie in vertikaler Richtung detektieren (Abb. der Architektur in Abb. 6.34b). In solch einem Fall würde das zugehörige Netz zwei Instanzen eines klassischen Topologie-Elements „seismische Masse“ enthalten, die aber nur als eine Instanz erkannt würden. Damit sich diese als getrennte Topologie-Elemente erkennen lassen, muss der Benutzer für das Topologie-Element „seismische Masse“ zwei Sub-Topologie-Elemente definieren, wobei das eine lateral und das andere vertikal mit den weiteren Topologie-Elementen interagiert (Abb. 6.11). Ein Sub-Topologie-Element hat die gleichen Eigenschaften wie ein klassisches Topologie-Element, erhält aber automatisch Zugriff auf alle Regeln des Eltern-Topologie-Elements und wird in der Ableitung der Topologie-Elemente gesondert behandelt (siehe Abschnitt 6.2.3).

Die Definition der (Sub-)Topologie-Elemente und Regeln erfolgt durch den Benutzer in einem speziell für diese Anwendung entwickelten graphischen Editor und wird in Abschnitt 6.4 demonstriert.

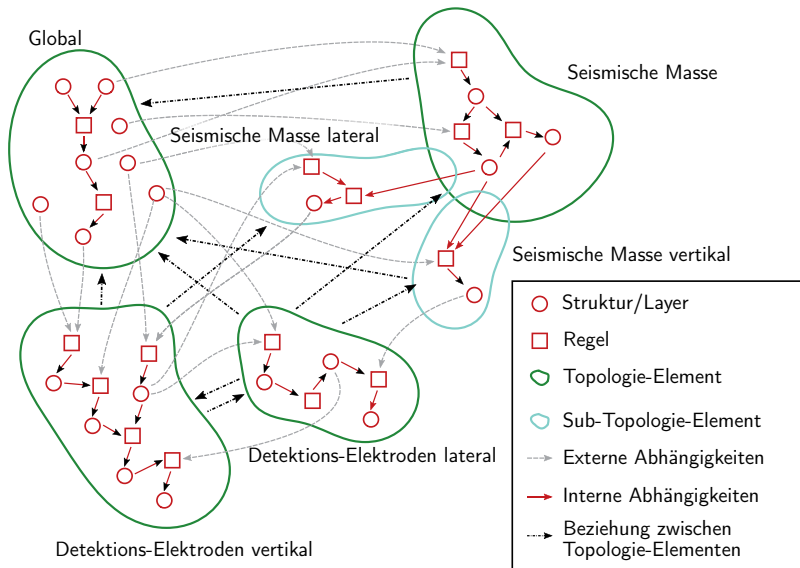


Abbildung 6.11: Darstellung der Beziehungen zwischen Topologie- und Sub-Topologie-Elementen mit den zugehörigen Regeln in den Graphen G_T (grün, türkis) und den Sub-Graphen $G_{R,i}$ (rot).

6.2.4 Ableitung der Topologie-Elemente und Regeln bezüglich einer spezifischen Architektur

Wie bereits in Abschnitt 6.1 beschrieben, muss bei der Anwendung der Strukturerkennung die generische Architekturbeschreibung durch die Topologie-Elemente im Graphen G_T mit den zugehörigen Regeln im Graph $G_{R_{gesamt}}$ in eine ausführbare Form für die tatsächlich vorliegende spezifische Architektur überführt werden. Dieser Vorgang wird im Rahmen dieser Arbeit als Ableiten der Topologie-Elemente und Regeln bezeichnet.

Mit dem Ableiten der Topologie-Elemente und Regeln anhand der spezifischen Architektur des zugehörigen MEMS-Elements erzeugt der Strukturerkennungs-Algorithmus einen MEMS-Element spezifischen und ausführbaren Satz an Regeln. Mit diesem kann man die, während des Aufsatzes der Regeln festgelegten, Topologie-Elemente in der Chip-Geometrie des vorliegenden MEMS-Elements erkennen.

Wie in Abb. 6.7 in Abschnitt 6.1 bereits dargestellt, beginnt der Algorithmus mit

dem Ableiten der Topologie-Elemente bezüglich einer gegebenen spezifischen Architektur. Diese liefert für jedes Netz folgende Daten: Name, Typ, Sub-Netz(e), Symmetrie-Netz(e) und die Interaktionen zu anderen Netzen. Die Sub-Netze korrespondieren dabei eins-zu-eins mit den Sub-Topologie-Elementen aus Abschnitt 6.2.3. Sub-Topologie-Elemente sind notwendig, wenn ein Netz mehrere unterschiedliche Instanzen eines Topologie-Elements enthalten soll. Die in der spezifischen Architektur definierten Sub-Netze definieren beim Ableiten die Netze, für die der Algorithmus Sub-Topologie-Elemente erzeugen muss.

Beim Ableiten eines Topologie-Elements wird zunächst überprüft, ob die Interaktionen des Topologie-Elements und des aktuell ausgewählten Netzes vom entsprechenden Typ zusammenpassen. Tabelle 6.2 gibt eine Übersicht der möglichen Kombinationen und der daraus folgenden Interaktionen des abgeleiteten Topologie-Elements.

Tabelle 6.2: Mögliche Kombinationen der Interaktionen eines Netzes und eines Topologie-Elements. In allen weiteren Kombinationen lässt sich das Topologie-Element mit dem Netz nicht ableiten.

Netz	Topologie-Element		Abgeleitetes Topologie-Element
keine	keine	⇒	keine
lateral	lateral	⇒	lateral
vertikal	vertikal	⇒	vertikal
lateral & vertikal	lateral	⇒	lateral
lateral & vertikal	vertikal	⇒	vertikal
lateral	lateral & vertikal	⇒	lateral
vertikal	lateral & vertikal	⇒	vertikal
lateral & vertikal	keine	⇒	nicht möglich
lateral & vertikal	lateral & vertikal	⇒	lateral & vertikal

Nachdem eine gültige Kombination der Interaktion nach Tabelle 6.2 gefunden ist, wird ein abgeleitetes Topologie-Element nach den Regeln aus Tabelle 6.3 erzeugt.

Tabelle 6.3: Mögliche Kombinationen von Netzen und Sub-Netzen mit Topologie- und Sub-Topologie-Elementen.

Fall	Netz hat Sub-Netz	Top-El hat Sub-Top-El	Abgeleitete(s) (Sub-)Top-Element(e)
1	nein	nein	⇒ Top-El(Netz)
2	nein	ja	⇒ Top-El(Netz), Sub-Top-El(Netz)
3	ja	nein	⇒ Logik-Fehler, vgl. Abb. 6.12 in nachfolgendem Beispiel
4	ja	ja	⇒ Top-El(Netz), Sub-Top-El(Sub-Netz)

Die Ableitung von Topologie- und Sub-Topologie-Elementen wird im Folgenden am Beispiel eines kapazitiven, zweiachsigen Beschleunigungssensors veranschaulicht. Dieser enthalte einen Kern, der Beschleunigungen in lateraler Richtung (Kern „A“) und einen zweiten Kern, der Beschleunigungen in vertikaler (Kern „B“) Richtung detektieren kann. Die Abb. 6.34 in Abschnitt 6.7 zeigt die drei möglichen Architektur-Varianten. An dieser Stelle wird die Ableitung von Topologie-Elementen nur für die Architektur-Variante mit getrennten Sensorkernen und gemeinsamen Netz „CM“ exemplarisch durchgeführt (Abb. 6.12, links). Für die beiden anderen Architektur-Varianten ist die Ableitung von Topologie-Elementen im Anhang (Abschnitt 6.7) dargestellt.

In Abb. 6.12 ist auf der linken Seite noch einmal die Architektur-Variante graphisch dargestellt. Die vollständige Beschreibung der vorliegenden Architektur ist in Tab. 6.12 gegeben. Die Ableitung von zwei möglichen Topologie-Elementen mit Sub-Topologie-Elementen bezüglich der gegebenen Architektur-Variante ist auf der rechten Seite in Abb. 6.12 dargestellt.

Tabelle 6.4: Auszug aus der Architektur-Beschreibung der Architektur-Variante 2 (Abb. 6.34b und Abb. 6.12 (links)) eines kapazitiven zweiachsigen Beschleunigungs-sensors.

Netz- Name	Netz-Typ	Sub- Netz(e)	Symmetrie- Netz(e)	Bezie- hung(en)	„Art“ der Beziehung
C1A	Detektion	-	C2A	CM	lateral
C2A	Detektion	-	C1A	CM	lateral
CM	Mit.-Elek.	CM:A, CM:B	-	C1A, C2A, C1B, C2B	lateral / vertikal
C1B	Detektion	-	C2B	CM	vertikal
C2B	Detektion	-	C1B	CM	vertikal

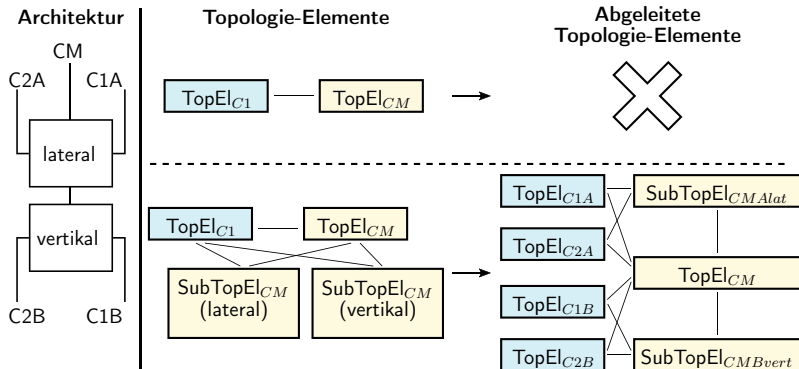


Abbildung 6.12: Beispiel für die Ableitung von (Sub-)Topologie-Elementen bezüglich der Architektur-Variante aus Tab. 6.6. **Links:** Schematische Darstellung der Architektur. **Oben Mitte:** Topologie-Elemente ohne Sub-Topologie-Elemente. **Unten Mitte:** Allgemeinere Definition der Topologie-Elemente mit Sub-Topologie-Elementen, die man auch auf andere Architekturen anwenden kann. **Oben rechts:** Im oberen Fall sind keine Sub-Topologie-Elemente definiert. Deshalb ist es nicht möglich, die Sub-Netze von „CM“ in abgeleitete Topologie-Elemente abzubilden (vgl. Tab. 6.3, Fall 3). **Unten rechts:** Durch die allgemeinere Definition durch Topologie- und Sub-Topologie-Elemente lassen sich die Sub-Netze von „CM“ auf abgeleitete Sub-Topologie-Elemente abbilden (vgl. Tab. 6.3, Fall 4).

Nachdem die Topologie-Elemente entsprechend der gegebenen spezifischen Architektur abgeleitet sind, ist der nächste Schritt die mit den Topologie-Elementen verknüpften Regeln ebenfalls abzuleiten. Dabei muss der Algorithmus diese entsprechend der Beziehungen zwischen den abgeleiteten Topologie-Elementen neu verknüpfen.

Im Allgemeinen sind die Abhängigkeiten zwischen den Topologie-Elementen und deren Regeln bidirektional, wie es in Abb. 6.13 dargestellt ist.

Diese Abhängigkeiten können zu Konflikten während der Ableitung der Regeln führen. Da der Graph in der Regel deutlich weniger als 100 Elemente enthält, lassen sich diese Konflikte bzw. Abhängigkeiten durch rekursive Aufrufe der Ableitungs-Methode auflösen. Das heißt, falls die Regel eines Ausgabe-Layers, der als Eingangs-Layer in der aktuellen Regel benötigt wird, noch nicht aktualisiert ist, dann wird zuerst die Regel des Ausgabe-Layers abgeleitet.

In der Praxis hat sich folgende einfache Heuristik bewährt:

1. Ableiten der global gültigen Regeln.

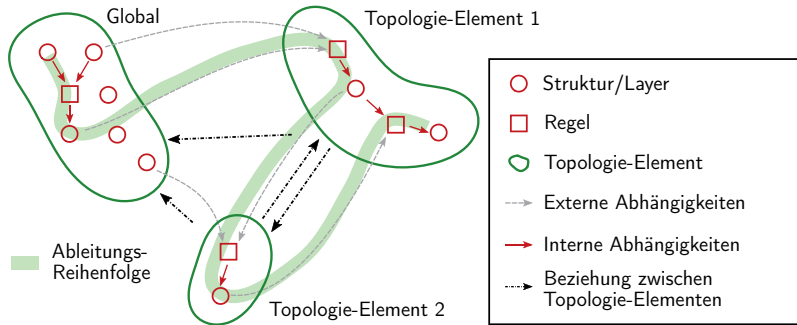


Abbildung 6.13: Darstellung der Beziehungen zwischen Regeln, Layern und Topologie-Elementen in den Graphen G_T und den Sub-Graphen $G_{R,i}$. Die Abhängigkeit zwischen den Topologie-Elementen 1 und 2 sind bidirektional. Nachdem Ableiten der globalen Regeln ist daher zuerst die erste Regel des Topologie-Elements 1 abzuleiten, anschließend die Regel von Topologie-Element 2 und erst dann die zweite Regel von Topologie-Element 1 (grüner Pfad).

2. Ableiten der Regeln der Topologie-Elemente, die keine Sub-Topologie-Elemente enthalten.
3. Ableiten der Regeln der Topologie-Elemente, die Sub-Topologie-Elemente enthalten.
4. Ableiten der Regeln der Topologie-Elemente, die bisher noch nicht abgeleitet wurden.

Der Algorithmus leitet nach der beschriebenen Heuristik zuerst die globalen Regeln ab. Diese beschreiben entweder allgemeine Polygon-Operationen, deren Ausgabe-Layer in vielen Topologie-Elementen benötigt werden, oder die Auswahl aller Polygone eines Layers, die zu einem Netz-Typ gehören. Im ersten Fall (Abb. 6.14) muss der Algorithmus beim Ableiten der Regeln nichts machen. Im zweiten muss er für jedes Netz aus der gegebenen Architektur mit dem definierten Netz-Typ eine Regel ableiten (Abb. 6.15). Alle abgeleiteten Layer haben den gleichen Eingangs-Layer und jeweils netzspezifische Ausgabe-Layer.

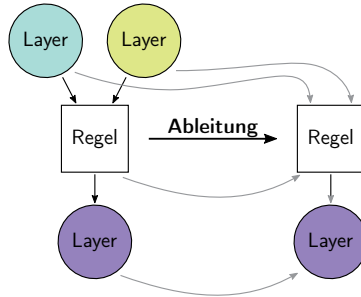


Abbildung 6.14: Ableitung einer globalen Regel, mit Eingabe- und/oder Markierungs-Layern als Eingangs-Layer.

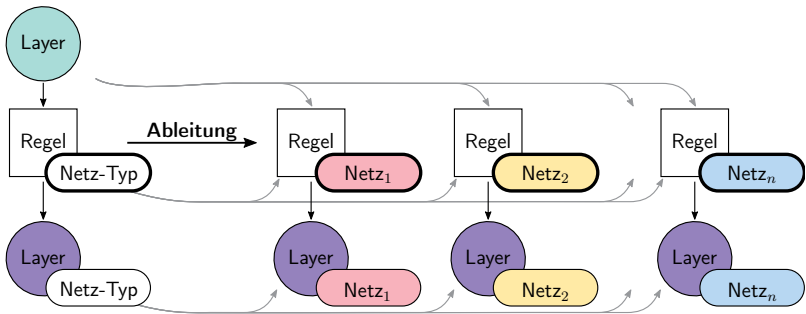


Abbildung 6.15: Ableitung einer globalen Regel, mit Eingabe- und/oder Markierungs-Layern als Eingangs-Layer und jeweils netzspezifische Ausgabe-Layer.

Damit ist die Ableitung der globalen Regeln abgedeckt. Es folgt nun die Ableitung der Regeln in den Topologie-Elementen. Die im Folgenden beschriebenen Methoden zur Ableitung der Regeln in Topologie-Elementen gelten auch für die Sub-Topologie-Elemente.

Wie in Abb. 6.16 dargestellt, wird zunächst die Ableitung einer Regel in einem Topologie-Element mit einem Eingangs-Layer betrachtet (in Abb. 6.16 als *TopEl1* bezeichnet), der zunächst unabhängig von einem Netz oder einem weiteren Topologie-Element ist.

Analog zum vorherigen Fall muss der Algorithmus für jedes schon Netz-spezifisch abgeleitete Topologie-Element (d.h. *TopEl1:A*, ..., *TopEl1:N*), eine Regel ableiten (vgl. Ableitung Topologie-Elemente). Alle diese Regeln haben denselben Eingangs-Layer und Topologie-Element-spezifische, d. h. insbesondere netzspezifische, Ausgabe-Layer. Der Algorithmus muss analog vorgehen, wenn solch eine Regel zwei Topologie-

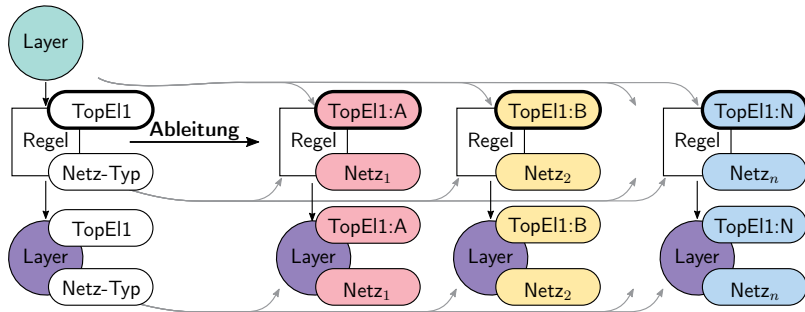


Abbildung 6.16: Ableitung einer Regel in einem Topologie-Element, mit Eingabe- und/oder Markierungs-Layern als Eingangs-Layer und jeweils Topologie-Element- und netzspezifische Ausgabe-Layer.

Elemente bzw. Netz-unabhängige Eingangs-Layer hat.

Wenn eine Regel eines Topologie-Elements einen oder mehrere netzspezifische Eingangs-Layer hat, so muss der Algorithmus beim Ableiten dieser Regeln immer der entsprechende (netzspezifische) Ausgabe-Layer der vorherigen Regel als Eingangs-Layer auswählen (Abb. 6.17). Dieser Fall tritt beispielsweise bei einer Verkettung der Regeln aus Abb. 6.15 und 6.17 auf.

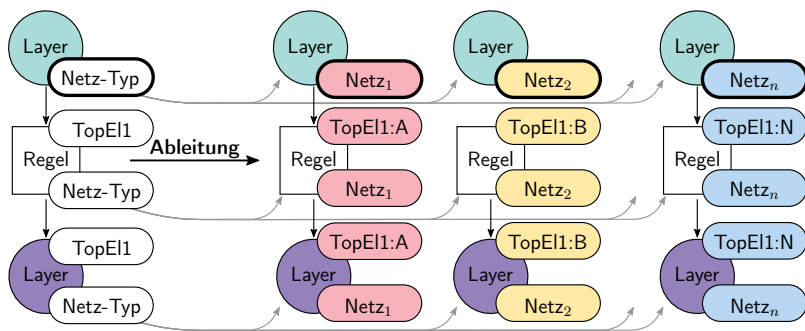


Abbildung 6.17: Ableitung einer Regel in einem Topologie-Element, mit netzspezifischem aber globalen Eingangs-Layer und jeweils Topologie-Element- und damit netzspezifischem Ausgabe-Layer.

Im nächsten Fall wird die Ableitung einer Regel eines Topologie-Elements betrachtet,

deren Eingangs-Layer ein Ausgabe-Layer einer Regel aus dem selben Topologie-Element ist. Hier kann der Algorithmus, wie in Abb. 6.18 dargestellt, analog zum vorherigen Fall vorgehen. Einziger Unterschied ist, dass beide Layer im selben abgeleiteten Topologie-Element liegen.

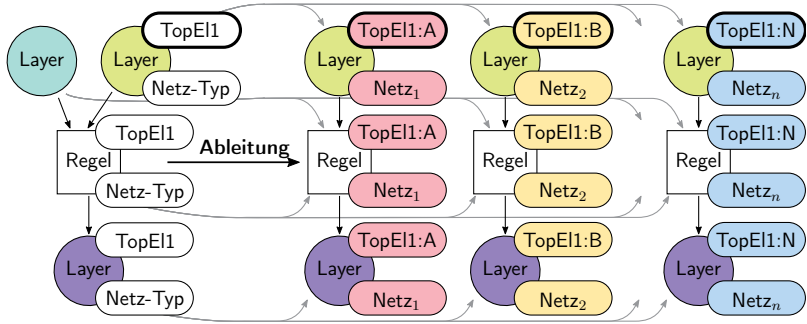


Abbildung 6.18: Ableitung einer Regel in einem Topologie-Element, deren Eingangs-Layer ein Ausgabe-Layer einer Regel aus demselben Topologie-Element ist.

Ist der Eingangs-Layer in einem anderen Topologie-Element (in Abb. 6.19 als *TopELX* bezeichnet) hergeleitet worden, dem derselbe Netz-Typ zugeordnet ist, so muss der Algorithmus den Eingangs-Layer anhand der Netz-Zugehörigkeit des Topologie-Elements bestimmen. Ist dem anderen Topologie-Element ein anderer Netz-Typ zugeordnet, dann muss der Algorithmus anhand der Netz-Interaktionen - definiert in der Architektur - entscheiden, aus welchem Topologie-Element er den Eingangs-Layer auswählen muss (Abb. 6.19).

Beim Ableiten der Regeln kann es dazu kommen, dass diese abgeleitete Topologie-Elemente referenzieren, die aufgrund der gegebenen Architektur nicht definiert sind. Falls einer der Eingangs-Layer definiert ist, wird dieser unverändert als Ausgabe-Layer ausgegeben. Falls alle Eingangs-Layer nicht definiert sind, kann der Algorithmus die Regel und alle davon abhängigen Regeln nicht ableiten. Falls es dadurch zu Fehlern bei der Erkennung der tatsächlich vorhandenen Topologie-Elemente kommt, muss der Benutzer die Regeln allgemeiner formulieren.

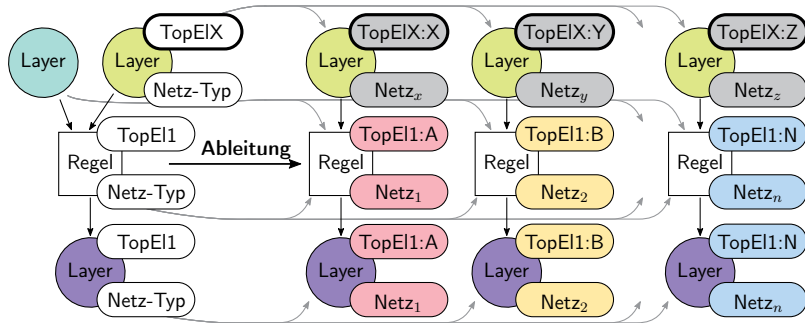


Abbildung 6.19: Ableitung einer Regel in einem Topologie-Element, deren Eingangs-Layer ein Ausgabe-Layer einer Regel aus einem anderen Topologie-Element ist.

6.2.5 Segmentierung der Chip-Geometrie in Topologie-Elemente durch Anwenden der abgeleiteten Regeln

Nachdem alle Topologie- und Sub-Topologie-Elemente mit ihren zugehörigen Regeln entsprechend der gegebenen Architektur abgeleitet sind, kann man diese auf die Chip-Geometrie des MEMS anwenden. Dadurch wird diese anhand der Regeln in die (Sub-)Topologie-Elemente segmentiert.

Die Anwendung der abgeleiteten Regeln zur Segmentierung der Chip-Geometrie erfolgt durch eine kommerzielle Layout-Verifikations-Software (beispielsweise Mentor Graphics Calibre [43] oder Cadence Assura [42]). Dafür ist in jeder Regel der entsprechende Quellcode hinterlegt, in den sich automatisch die entsprechenden Eingangs- und Ausgabe-Layer einfügen lassen.

6.2.6 Ausgabe

Durch die beschriebene Segmentierung lassen sich die (Sub-)Topologie-Elemente aus der Chip-Geometrie herauslösen und jeweils auf separate Markierungs-Layer verschieben. Dadurch wird die Beziehung zwischen der Polygon-Repräsentation eines Topologie-Elements und dessen regelbasierter Definition hergestellt (Abb. 6.20).

In der folgenden Elektrostatis-Analyse (siehe Kapitel 5) gehen die (Sub-)Topologie-Elemente als Markierungs-Layer in die Prozess-Simulation ein (vgl. Abb. 6.8).

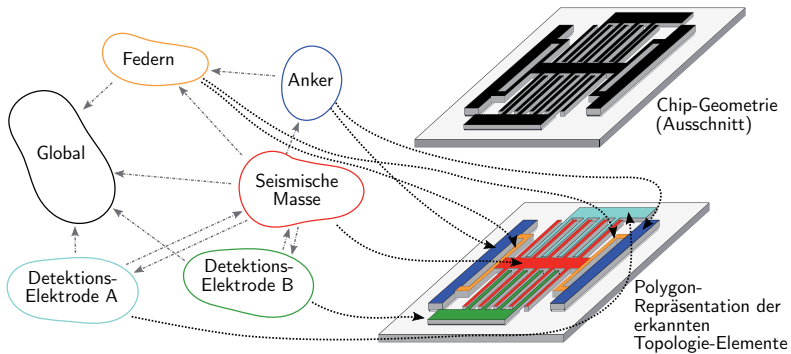


Abbildung 6.20: Die Abbildung zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen der regelbasierten Definition der Topologie-Elemente und deren Polygon-Repräsentation nach der Segmentierung.

6.3 Elektrostatische RC-Analyse und Ersatzschaltplan-Synthese

Die Ausgabe der Strukturerkennung besteht aus den erkannten (Sub-)Topologie-Elementen zusammen mit ihrer Geometrie (Abschnitt 6.2.6). Die Geometrie der erkannten Elemente ist auf Markierungs-Layern hinterlegt, sodass sie kompatibel ist mit der bisherigen Chip-Geometrie. Wie in Abb. 6.8 dargestellt, gehen die Geometrien der (Sub-)Topologie-Elemente in die Prozess-Simulation aus Kapitel 5 ein. Dies geschieht in Form der Markierungs-Layer, anhand derer sich das MEMS-Modell für die Elektrostatik-Analyse zerlegen lässt, sodass die anschließende Elektrostatik-Analyse die (Sub-)Topologie-Elemente als eigenständige Netze erkennt. Damit die ursprüngliche Konnektivität der Netze bestehen bleibt, verbindet der Strukturerkennungs-Algorithmus entsprechend die (Sub-)Topologie-Elemente, d. h. in der Elektrostatik-Analyse die neuen Netze, mit $0\ \Omega$ Widerständen.

Die in Kapitel 5 beschriebene Elektrostatik-Analyse extrahiert die Koppelkapazitäten zwischen allen Netzen, d. h. insbesondere auch die Kapazitäten zwischen den erkannten (Sub-)Topologie-Elementen, da diese als eigenständige Netze in der Extraktion modelliert sind. Dadurch ist es möglich, die extrahierten Kapazitäten anhand der erkannten (Sub-)Topologie-Elemente in der Chip-Geometrie zu lokalisieren (Abb. 6.21). Dies erlaubt unter anderem die gezielte Analyse und Optimierung von Verdrahtungen und damit der parasitären Kapazitäten.

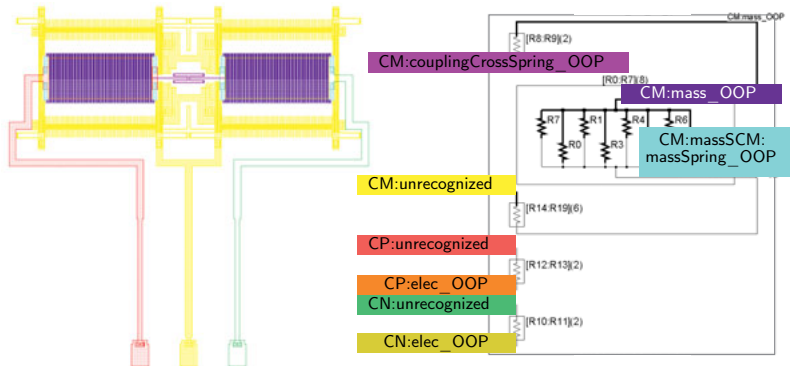


Abbildung 6.21: Links: Teilansicht eines Drehratensensors, der mit dem beschriebenen Strukturerkennungs-Algorithmus in Topologie-Elemente zerlegt wurde (Geometrie der Topologie-Elemente ist farblich hervorgehoben, vollständige Chip-Geometrie in Abb. 5.11, Demonstration der Strukturerkennung im folgenden Abschnitt 6.4). Rechts: Von der Elektrostatik-Analyse erkannte Netze und Verbindungs-Widerstände in einer Schaltplan-Repräsentation. Diese Darstellung enthält nur die erkannten Topologie-Elemente als Netze ohne Koppelkapazitäten zwischen benachbarten Netzen, bzw. Topologie-Elementen.

In Kapitel 5.3 wurde erwähnt, dass man durch das Setzen von sogenannten „Probe Points“ in der Chip-Geometrie neben den Kapazitäten auch die Widerstände in eine RC-Netzliste extrahieren kann.

Die durch die Strukturerkennung eingefügten 0Ω Widerstände zwischen den erkannten Topologie-Elementen erfüllen die gleiche Funktion wie die manuell definierten „Probe Points“ (Abb. 6.22), wobei sich durch die Aufteilung der extrahierten Kapazitäten auf die Topologie-Elemente eine deutlich klarere und damit bessere Trennung der zu analysierenden Kapazitäten erreichen lässt.

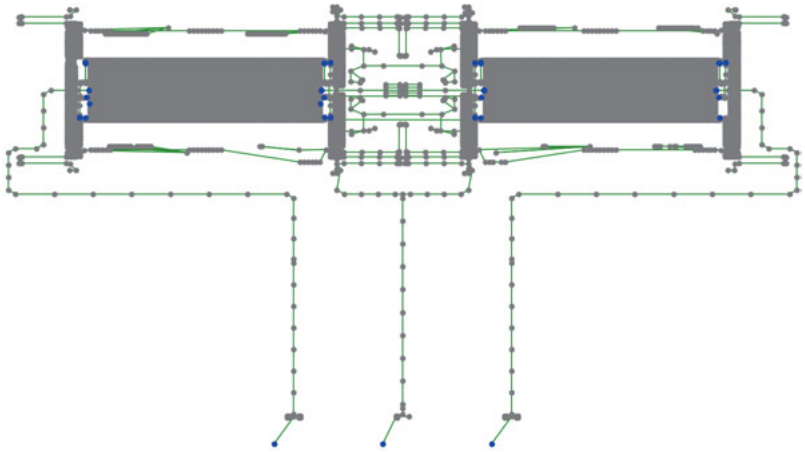


Abbildung 6.22: Ausschnitt einer extrahierten RC-Netzliste aus der Chip-Geometrie. Zur besseren Sichtbarkeit sind nur die Widerstände zwischen den Knoten als grüne Kanten abgebildet. Die hervorgehobenen blauen Knoten markieren die Ports der Netze (im unteren Bereich) und die Pins der erkannten Verbindungs-Widerstände.

6.4 Demonstration

In diesem Abschnitt wird der beschriebene regelbasierte Strukturerkennungs-Algorithmus an verschiedenen MEMS-Inertialsensoren demonstriert, die in der Basis-Prozesstechnologie aus Abschnitt 2.1 entwickelt wurden.

Zunächst wird für die Demonstration ein kapazitiver dreiachsiger MEMS-Beschleunigungssensor verwendet (Abb. 6.23). Die Regeln für die Strukturerkennung lassen

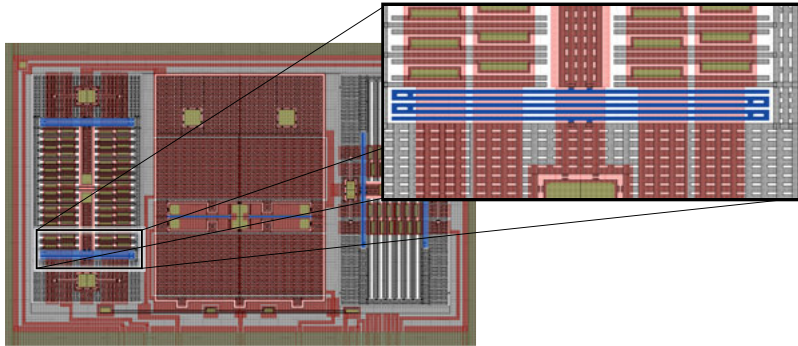


Abbildung 6.23: Abbildung des Kerns eines kapazitiven dreiachsigen MEMS-Beschleunigungssensors (Poly 1: blau, Poly 2: grau, Verbindungen zwischen Poly 1 und Poly 2: grün, Beschreibung des Schichtaufbaus in Abschnitt 2.1) [2]. Die initiale Segmentierung für die Strukturerkennung ist durch die Markierung der Feder-Geometrien gegeben (blau).

sich anhand von diesem definieren und anschließend auf dessen Chip-Geometrie anwenden. Um die allgemeine Gültigkeit der Regeln zu demonstrieren, werden diese anschließend noch auf einen weiteren kapazitiven Beschleunigungssensor mit einer anderen Architektur angewandt.

Ausgangspunkt für die regelbasierte Strukturerkennung ist neben der Technologie-Beschreibung die initiale Segmentierung, die durch Schlüsselemente definiert ist. Für Beschleunigungssensoren ist es ausreichend, wenn die Geometrien der Federn als Schlüsselemente durch einen Markierungs-Layer gegeben sind (vgl. Abb. 6.23).

Die Definition der (Sub-)Topologie-Elemente und Regeln für die Strukturerkennung (Abschnitt 6.2) erfolgt in einer speziell entwickelten Nutzeroberfläche (Abb. 6.24).

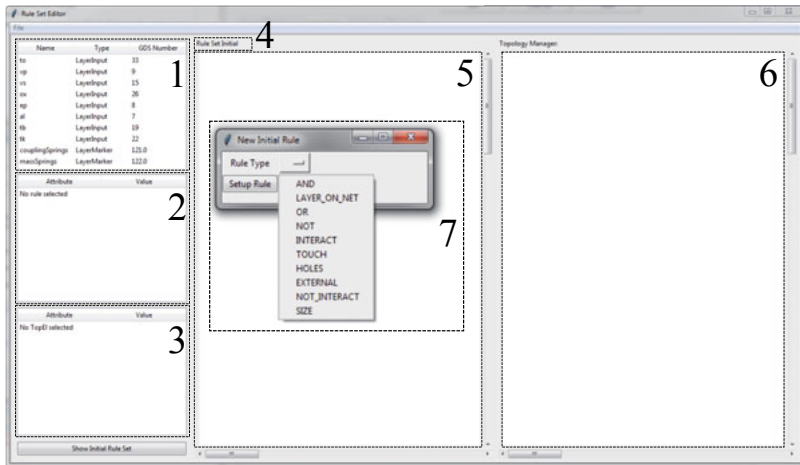


Abbildung 6.24: Nutzeroberfläche für die Definition von (Sub-)Topologie-Elementen und Regeln. 1: Liste aller Eingabe-, Markierungs- und Erzeugten-Layer. 2: Informationen zur aktuell ausgewählten Regel. 3: Informationen zum aktuell ausgewählten (Sub-)Topologie-Element. 4: Gibt an, zu welchem Element die angezeigten Regeln in 5 gehören. 5: Definition und Darstellung der Regeln. 6: Definition und Darstellung der (Sub-)Topologie-Elemente. 7: Kontextmenü für die Definition einer neuen Regel.

In der folgenden Abb. 6.25 ist dieselbe Nutzeroberfläche mit einem Topologie-Element („springs“) und einer zugehörigen Regel (logische UND-Verknüpfung von zwei Layern) dargestellt.

Die Federn kann man sehr einfach durch den gegebenen Markierungs-Layer (vgl. Abb. 6.23) erkennen und damit aus dem Poly 2 Layer herauslösen (siehe Abschnitt 2.1 für eine Beschreibung des Schichtaufbaus). Alle restlichen Strukturen auf dem Poly 2 Layer, die zum Netz einer beweglichen Mittel-Elektrode (vgl. Abschnitt 2.2) gehören und nicht mit einer Via-Struktur mit dem darunterliegenden Poly 1 Layer verbunden sind, müssen bewegliche seismische Massen sein. Allerdings kann man noch nicht zwischen lateral oder vertikal beweglichen seismischen Massen, d. h. insbesondere der Detektions-Richtung der Sensorkerne, unterscheiden.

Aus den bisher abgeleiteten Informationen lassen sich aber die Detektions-Elektroden eindeutig bestimmen. Aufgrund des bekannten Funktionsprinzips (Abschnitt 2.2) müssen sich bei einem in lateraler Richtung detektierenden Sensorkern die Detektions-Elektroden im Poly 2 Layer befinden. Diese müssen einen minimalen Abstand zur seismischen Masse haben. Die Detektions-Elektroden befinden sich zudem auf einem anderen Netz als die Mittel-Elektrode mit dem Netz-Typ „C1“ (vgl. Abschnitt 6.2).

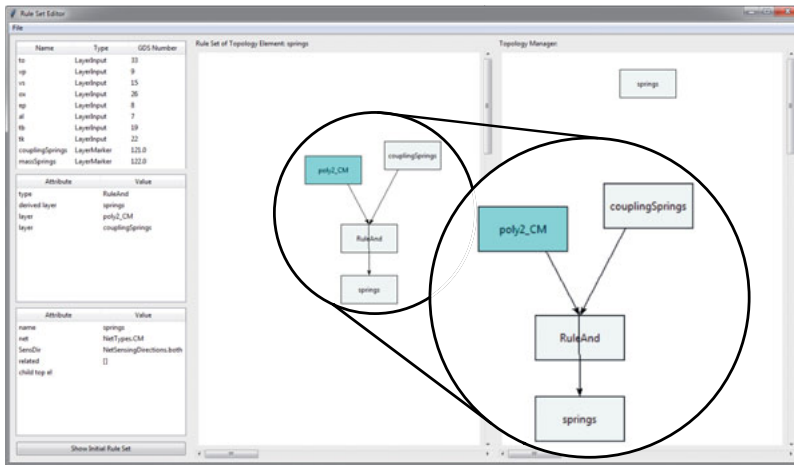


Abbildung 6.25: Beispiel eines Topologie-Elements („springs“) und einer zugehörigen Regel. Die türkisfarbene Hervorhebung des einen Eingangs-Layers gibt an, dass dieser in den globalen Regeln definiert wird. Layer aus anderen Topologie-Elementen wären in der gleichen Farbe hervorgehoben.

Damit kann man die lateral sensierenden Detektions-Elektroden eindeutig erkennen (Abb. 6.26).

Bei einem vertikal detektierenden Sensorkern müssen aufgrund des Funktionsprinzips die Detektions-Elektroden unterhalb der seismischen Masse liegen. Die vertikal sensierenden Detektions-Elektroden befinden sich außerdem jeweils auf einem Netz desselben Typs wie die lateralen Detektions-Elektroden.

Die seismischen Massen sind in der Regel perforiert (siehe Abb. 6.23). Daher ist es sinnvoll, für die korrekte Erkennung dieser Elektroden die Löcher der seismischen Massen zu füllen (Abb. 6.27).

Für die bisher definierten Topologie-Elemente „springs“ und „masses“ gibt es keine Einschränkungen bezüglich der Interaktionen ihrer Netze (vgl. Abschnitt 6.2). Damit die Detektions-Elektroden erfolgreich erkannt werden können, darf der Ableitungs-Algorithmus das Topologie-Element für die lateral sensierenden Detektions-Elektroden nur für Netze vom entsprechenden Typ mit lateralen Netz-Interaktionen ableiten. Für das Topologie-Element der vertikal sensierenden Detektions-Elektroden gilt Entsprechendes.

Nachdem die lateral und vertikal sensierenden Detektions-Elektroden erkannt sind, kann man jetzt auch die seismischen Massen unterscheiden. Für die Erkennung

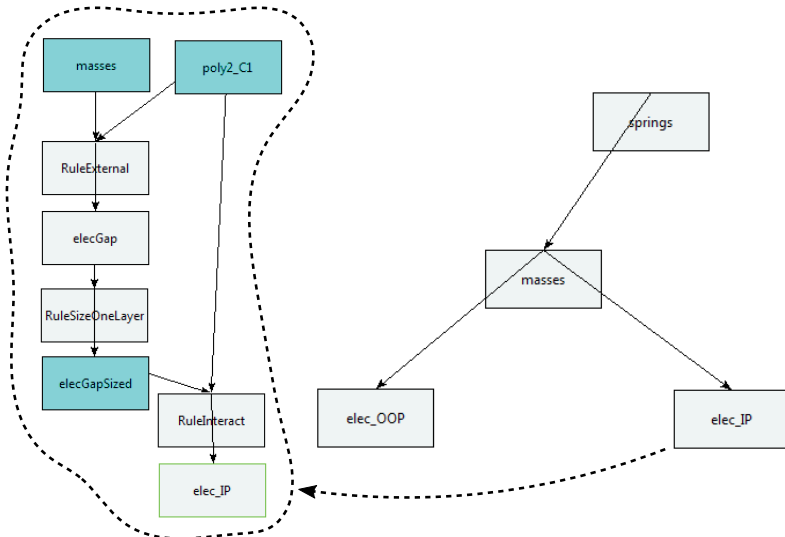


Abbildung 6.26: Links: Regeln zur Erkennung von lateralen sensierenden Detektions-Elektroden. **Rechts:** Topologie-Elemente, deren Beziehungen durch Pfeile dargestellt sind. **Abkürzungen:** masses: seismische Massen, poly2_C1: jeweils alle Polygone des Poly2-Layers der Netze vom Typ „C1“ (Detektion), elec-Gap: Abstand zwischen den seismischen Massen und den lateral sensierenden Detektions-Elektroden, springs: Federn, elec_IP/elec_OOP: lateral/vertikal sensierende Detektions-Elektroden (IP = in plane, OOP = out of plane).

der seismischen Massen wurde schon das Topologie-Element „masses“ definiert, das allgemeine Regeln zur Erkennung von seismischen Massen enthält. Die spezifischen Regeln für die Erkennung einer sich lateral bzw. vertikal bewegenden seismischen Masse muss man jeweils in einem Sub-Topologie-Element definieren. Diese gelten wiederum nur für Netze mit lateralen bzw. vertikalen Netz-Interaktionen (Abb. 6.28).

Anschließend kann man die Federn den jeweiligen lateral bzw. vertikal sensierenden seismischen Massen zuordnen. Dafür müssen wieder Sub-Topologie-Elemente des „springs“ Topologie-Elements mit entsprechenden Regeln definiert werden.

Für die Anwendung dieses ersten Satzes an Regeln (u. a. Abb. 6.26 - 6.28) auf die Chip-Geometrie aus Abb. 6.23 fehlt noch die entsprechende Sensor-Architektur.

Die semi-automatische Architektur-Analyse erkennt anhand von Textmarkierungen in der Chip-Geometrie alle Netze mit deren Namen, Typ und falls vorhanden jeweils

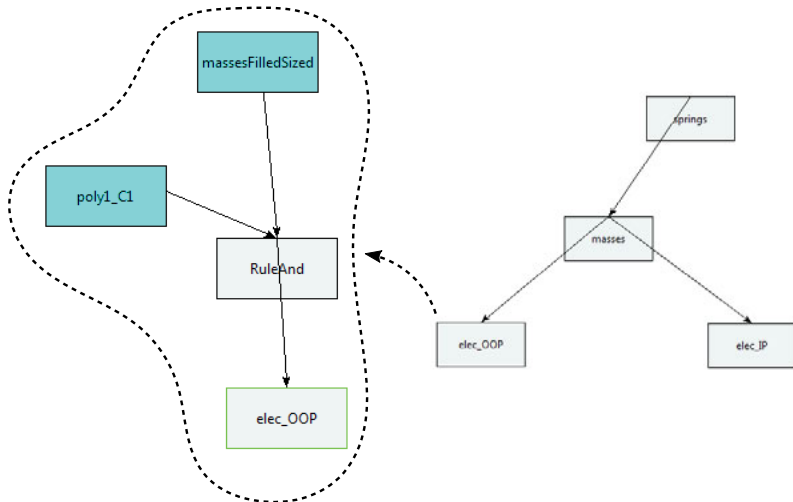


Abbildung 6.27: Links: Regeln zur Erkennung von vertikal sensierenden Detektions-Elektroden. **Rechts:** Topologie-Elemente, deren Beziehungen durch Pfeile dargestellt sind. **Abkürzungen:** massesFilledSized: vergrößerte seismische Massen mit geschlossener Perforation zur logischen Ableitung der darunterliegenden flächigen Detektions-Elektroden, poly1_C1: jeweils alle Polygone des Poly1-Layers der Netze vom Typ *Detektion*, springs: Federn, elec_IP/elec_OOP: lateral/vertikal sensierende Detektions-Elektroden (IP = in plane, OOP = out of plane).

deren Symmetrie-Netze (Abb. 6.29, links). Der Nutzer muss nur noch die Netz-Interaktionen definieren (lateral = in plane (IP), vertikal = out of plane (OOP)) (Abb. 6.29, rechts oben). Diese Eigenschaft überträgt sich automatisch auf die symmetrischen Netze.

Der für die Demonstration verwendete Sensor aus Abb. 6.23 hat nur ein Netz vom Typ Mittel-Elektrode („CM“), auf dem sich alle drei seismischen Massen in den drei separaten Sensorkernen befinden (Architektur-Variante zwei in Abb. 6.34b). Daraus folgt, dass das Netz „CM“ in drei Sub-Netze, entsprechend der drei separaten Sensorkerne, unterteilt werden muss.

Jetzt kann man die definierten Regeln auf die Chip-Geometrie anwenden. Die erkannten Topologie- bzw. Sub-Topologie-Elemente sind in unterschiedlichen Farben in Abb. 6.30 dargestellt.

Der große Vorteil der entwickelten regelbasierten Strukturerkennung ist, dass die Topologie-Elemente und Regeln unabhängig von der MEMS-Geometrie sind. Die

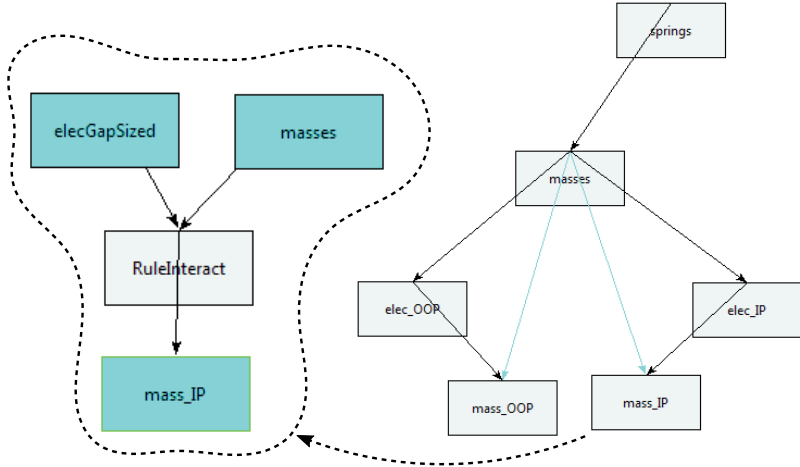


Abbildung 6.28: Links: Regel des Sub-Topologie-Elements `mass_IP` zur Erkennung einer lateral detektierenden seismischen Masse. Rechts: zugehörige Topologie-Elemente. Die Beziehungen zwischen dem Topologie-Element `masses` und seinen Sub-Topologie-Elementen `masses_OOP` und `masses_IP` sind mit türkisfarbenen Pfeile hervorgehoben. **Abkürzungen:** `elecGapSized`: Abstand zwischen den seismischen Massen und den lateral sensierenden Detektions-Elektroden, `masses`: seismische Massen, `mass_IP`/`mass_OOP`: lateral/vertikal detektierende seismische Massen (IP = in plane, OOP = out of plane).

während der Demonstration definierten Regeln lassen sich daher auf jeden kapazitiven MEMS-Beschleunigungssensor anwenden, dem dasselbe Funktionsprinzip zugrunde liegt. Nur die Schlüsselemente (Markierung der Feder-Geometrien) und die Architektur muss man bei der Eingabe entsprechend anpassen. Dies wird mit einem leicht erweiterten Satz an Regeln in Abb. 6.31a an zwei MEMS-Beschleunigungssensoren demonstriert.

Am Beispiel der beiden Drehratensensoren aus Abb. 6.2 kann man noch deutlicher sehen, dass die entwickelte regelbasierte Strukturerkennung unabhängig von der Chip-Geometrie ist (Abb. 6.31b).

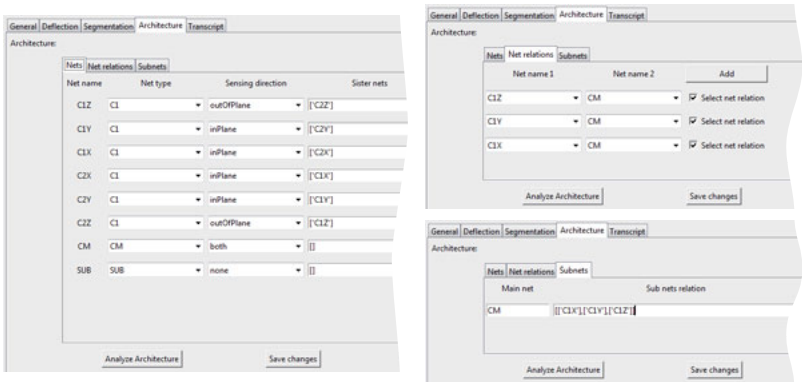


Abbildung 6.29: Definition der Architektur des Demonstrations-Sensors aus Abb. 6.23. **Links:** Definition von Netz-Namen, -Typ, Art der Netz-Beziehung(en) und Symmetrie-Netz. **Rechts oben:** Definition der Netz-Beziehungen. **Rechts unten:** Definition von Sub-Netzen, falls sich mehrere Sensorkerne oder seismische Massen ein Netz von Typ Mittel-Elektrode teilen.

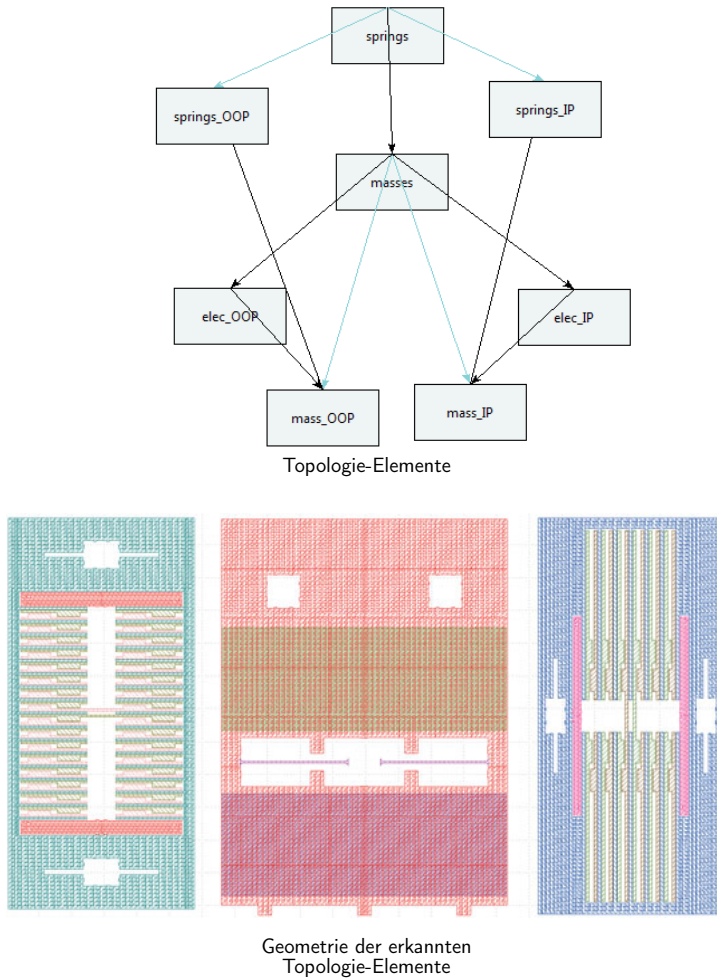


Abbildung 6.30: Demonstration der Strukturerkennung mit den oben definierten (Sub-)Topologie-Elementen und Regeln. Beispielsweise sind die beiden vertikal detektierenden seismischen Massen *mass_IP* (IP = in plane) rechts in grün und blau dargestellt, die vertikal detektierende *mass_OOP* (OOP = out of plane) in rot.

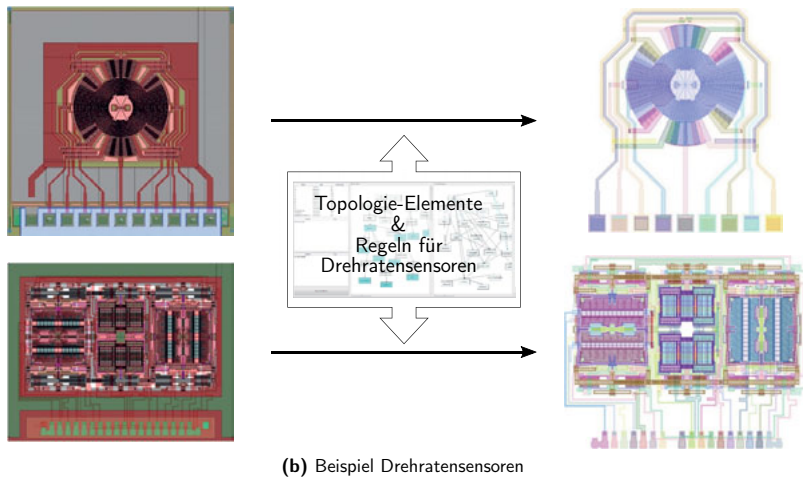
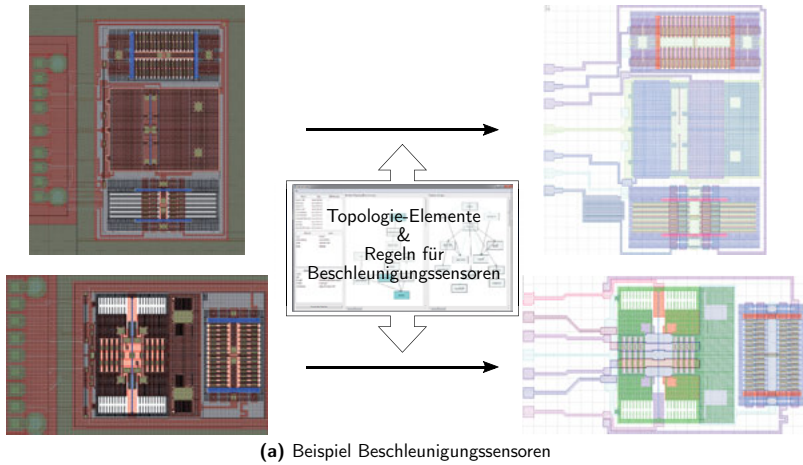


Abbildung 6.31: Auf die Chip-Geometrien der Beschleunigungs- (a) und Drehratensensoren (b) wurden jeweils dieselben Regeln zur Strukturerkennung angewendet. Obwohl sich die Geometrien der jeweiligen Sensorpaare und deren Architektur deutlich unterscheiden, erkennt der vorgestellte regelbasierte Strukturerkennungs-Algorithmus alle definierten Topologie-Elemente, wie seismische Massen, Federn, Detektions-Elektroden, etc., erfolgreich.

6.5 Verifikation der Extraktions-Ergebnisse

Die Topologie-Elemente sind keine physikalisch abgeschlossenen Netze, die man mit einem Messwerkzeug separat kontaktieren kann. Damit ist eine Messung von Teststrukturen zur Verifizierung, der in der Extraktion auf die Topologie-Elemente eingeschränkten Kapazitäten, ausgeschlossen.

Das Problem lässt sich an einer Teststruktur, wie in Abb. 6.32 dargestellt, verdeutlichen. In der Elektrostatik-Analyse erfolgt durch den Strukturerkennungs-Algorithmus

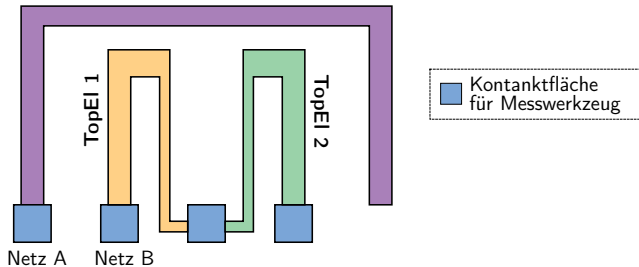


Abbildung 6.32: Aufsicht auf eine Teststruktur mit zwei Netzen (A und B). Das Netz B kann an drei Stellen mit einer Messnadel kontaktiert werden. Analog dazu erfolgt in der Extraktion eine Zerlegung des Netzes in die Topologie-Elemente „TopEl 1“ und „TopEl 2“.

eine Zerlegung des zusammenhängenden „Netz B“ in zwei Topologie-Elemente („TopEl 1“ und „TopEl 2“). In der extrahierten Netzliste sind diese dadurch als separate Netze repräsentiert (Abb. 6.33a). Auch mit den zusätzlichen Kontaktflächen ist es bei dieser



Abbildung 6.33: a: Ersatzschaltplan, wie ihn die Elektrostatik-Analyse aus der Chip-Geometrie aus Abb. 6.32 extrahieren würde. b: Ersatzschaltplan der Messung, wenn die Kontaktfläche des Netzes A und eine beliebige Kontaktfläche des Netzes B bei einer Messung kontaktiert werden würde.

Teststruktur unmöglich, nur die Kapazität zwischen einem der Topologie-Elemente und dem benachbarten „Netz A“ zu messen. Eine Messung kann immer nur die gesamte Kapazität zwischen zwei zusammenhängenden Netzen messen, wie in Abb.

6.33b dargestellt.

Die Extraktions-Ergebnisse lassen sich aber mit folgender Annahme plausibilisieren:

Durch die Zerlegung in (Sub-)Topologie-Elemente, bleibt die Chip-Geometrie unverändert. Daher muss die Summe aller Kapazitäten über die (Sub-)Topologie-Elemente eines Netzes annähernd gleich der Gesamtkapazität aus der klassischen Elektrostatik-Analyse sein. Kleinere Unterschiede in den Extraktions-Ergebnissen können beispielsweise durch den veränderten Verlauf der Feldlinien im Grenzbereich zweier Topologie-Elemente entstehen, die ursprünglich zum gleichen Netz gehört haben.

Die Ergebnisse eines solchen Vergleichs sind am Beispiel eines Beschleunigungssensors in der Tabelle 6.5 gegeben.

Tabelle 6.5: Die Werte der Tabelle zeigen die Abweichung zwischen den extrahierten Kapazitäten der klassischen Elektrostatik-Analyse eines Beschleunigungssensors und der Elektrostatik-Analyse mit der regelbasierten Strukturerkennung in Prozent zu den Werten aus der klassischen Extraktion. Die einzelnen Kapazitäten der Topologie-Elemente sind aufsummiert, sodass sie vergleichbar sind mit den Netz-zu-Netz Kapazitäten aus der klassischen Elektrostatik-Analyse. Die extremen Ausreißer kommen bei sehr kleinen Gesamtkapazitäten zustande. In der Tabelle sind daher alle Abweichungen, die im Absolut-Wert kleiner als ein femto Farad sind, grün markiert.

%	C _{1X}	C _{1Y}	C _{1Z}	C _{2X}	C _{2Y}	C _{2Z}	C _M	C _{SUB}
C _{1X}	0,00	0,01	0,48	0,00	0,00	-36,70	0,02	0,65
C _{1Y}	0,01	0,00	-0,09	0,00	-0,03	0,00	0,05	1,30
C _{1Z}	0,48	-0,09	0,00	-0,13	0,00	-7,12	0,10	-0,03
C _{2X}	0,00	0,00	-0,13	0,00	-0,03	0,34	0,19	0,67
C _{2Y}	0,00	-0,03	0,00	-0,03	0,00	0,74	0,07	0,16
C _{2Z}	-36,70	0,00	-7,12	0,34	0,74	0,00	0,07	-0,08
C _M	0,02	0,05	0,10	0,19	0,07	0,07	0,00	4,12
C _{SUB}	0,65	1,30	0,00	0,67	0,16	0,00	4,12	0,00

Wie in Tabelle 6.5 angegeben, sind die Abweichungen der Kapazitäten zwischen den Netzen sehr klein. Allein die sehr große Kapazität der Mittel-Elektrode (Netz C_M) zum Substrat (Netz C_{SUB}) weicht um ungefähr vier Prozent ab. Die Abweichungen erklären sich zum Einen durch die Übergänge zwischen den Topologie-Elementen und zum Anderen durch numerische Ungenauigkeiten in der Extraktions-Software.

Die Extraktions-Ergebnisse der klassischen Elektrostatik-Analyse wurden in Abschnitt 5.4 anhand von Teststrukturen verifiziert. Wie oben plausibilisiert wurde, beeinflusst die Strukturerkennung die Elektrostatik-Analyse nur in sehr geringem

Umfang und lässt sich daher zur Lokalisierung von parasitären Kapazitäten in der Chip-Geometrie einsetzen.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine neue Methode zur regelbasierten Strukturerkennung für MEMS-Elemente vorgestellt. Für die Anwendung benötigt der Strukturerkennungs-Algorithmus als Eingabe eine in einem separaten Schritt definierte generische Architekturbeschreibung mittels Topologie-Elementen mit zugehörigen Regeln und die Chip-Geometrie. Zusätzlich muss der Benutzer die notwendigen Schlüsselemente für die bereitgestellten Regeln in der Chip-Geometrie durch Markierungs-Layer hinterlegen.

Die große Stärke dieses Ansatzes ist, dass beim Aufsatz der Strukturerkennung die Regeln zur Beschreibung der generischen Architektur nur Beziehungen zwischen Strukturen beschreiben. Dadurch kann man eine einmal definierte generische Architekturbeschreibung mittels der Topologie-Elemente und Regeln auf die Chip-Geometrie eines beliebigen anderen MEMS-Element des gleichend Typs anwenden, unter der Voraussetzung, dass dieser in der gleichen Technologie entwickelt wurde und ihm das gleiche Funktionsprinzip zugrunde liegt. Dies wurde am Beispiel von jeweils zwei MEMS-Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren demonstriert.

Nach der Strukturerkennung gehen die erkannten Topologie-Elemente als Markierungs-Layer in die Prozess-Simulation aus Kapitel 5 ein. Anhand dieser Markierungs-Layer lässt sich das MEMS-Modell für die Elektrostatik-Analyse zerlegen, sodass die Topologie-Elemente als eigenständige Netze in der Extraktion erkannt werden. Damit die ursprüngliche Konnektivität der Netze bestehen bleibt, verbindet der Strukturerkennungs-Algorithmus entsprechend die Topologie-Elemente, d. h. in der Elektrostatik-Analyse die neuen Netze, mit $0\ \Omega$ Widerständen.

Die Elektrostatik-Analyse liefert alle Kapazitäten zwischen den Netzen und damit insbesondere zwischen den Topologie-Elementen. Dadurch ist es möglich, die extrahierten Kapazitäten anhand der erkannten Topologie-Elemente in der Chip-Geometrie zu lokalisieren. Dies ermöglicht u. a. die gezielte Analyse und Optimierung von Verdrahtungs-Strukturen, wie beispielsweise der Ausgleich (Symmetrisierung) der parasitären Kapazitäten.

Durch adäquate Definition der Topologie-Elemente (siehe Abschnitt 6.4, Demonstration) kann man die Detektions-Elektroden und die bewegliche Mittel-Elektrode als Topologie-Elemente erkennen. Gegenüber der klassischen Elektrostatik-Analyse aus Kapitel 5 ist es dadurch insbesondere möglich, in erster Näherung zwischen funktionellen und parasitären Kapazitäten zu unterscheiden und diese damit gezielt zu analysieren und zu optimieren.

6.7 Anhang zu Kapitel 6

Architektur-Varianten kapazitiver Inertial-Sensoren

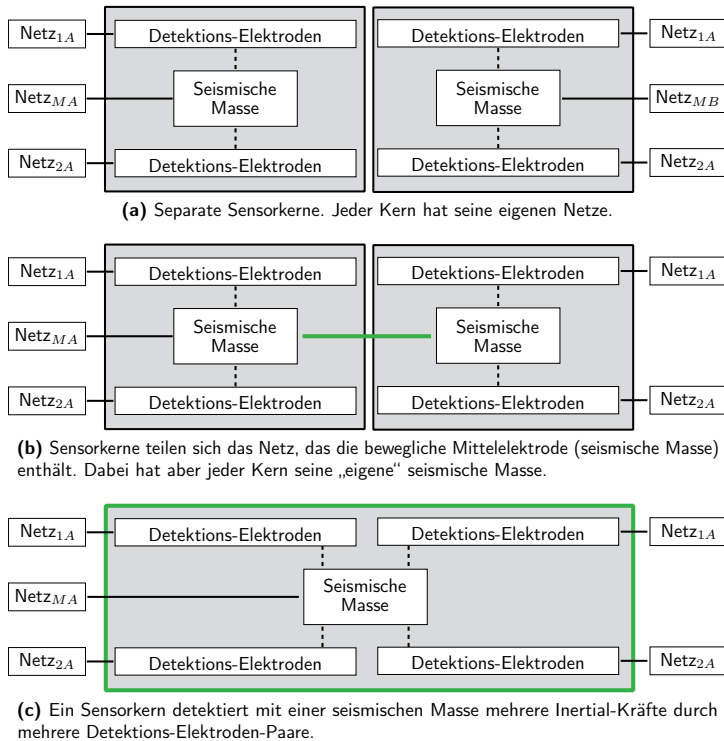


Abbildung 6.34: Architektur-Varianten kapazitiver Inertial-Sensoren der Robert Bosch GmbH [2].

Beispiele: Ableitung Topologie-Elemente

Tabelle 6.6: Auszug aus der Architektur-Beschreibung der Architektur-Variante 1 (Abb. 6.34a) eines kapazitiven zweiachsigen Beschleunigungssensors.

Netz-Name	Netz-Typ	Sub-Netz(e)	Symmetrie-Netz(e)	Beziehung(en)	„Art“ der Beziehung
C1A	Detektion	-	C2A	CMA	lateral
C2A	Detektion	-	C1A	CMA	lateral
CMA	Mit.-Elek.	-	-	C1A, C2A	lateral
C1B	Detektion	-	C2B	CMB	vertikal
C2B	Detektion	-	C1B	CMB	vertikal
CMB	Mit.-Elek.	-	-	C1B, C2B	vertikal

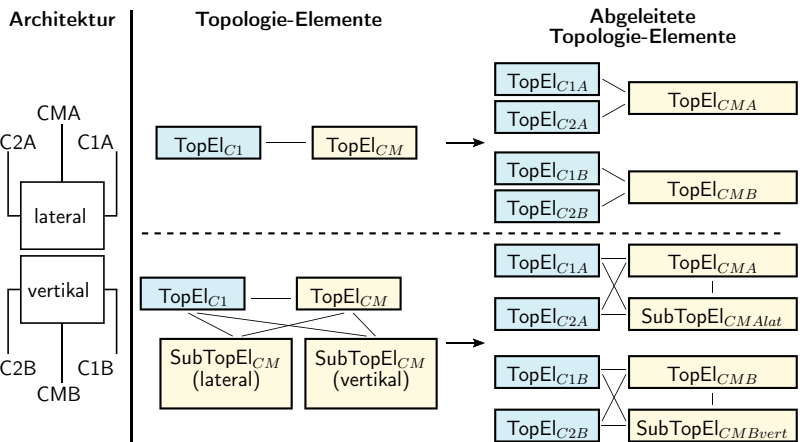


Abbildung 6.35: Beispiel für die Ableitung von (Sub-)Topologie-Elementen bezüglich der Architektur-Variante aus Tab. 6.6. **Links:** Schematische Darstellung der Architektur. **Oben Mitte:** Topologie-Elemente ohne Sub-Topologie-Elemente. **Unten Mitte:** Allgemeiner Definition der Topologie-Elemente mit Sub-Topologie-Elementen, die man auch auf andere Architekturen anwenden kann (siehe Abb. 6.12 und 6.36). **Rechts:** Jeweils abgeleitet Topologie-Elemente mit ihren Beziehungen.

Tabelle 6.7: Auszug aus der Architektur-Beschreibung der Architektur-Variante 3 (Abb. 6.34c) eines kapazitiven zweiachsigen Beschleunigungssensors.

Netz-Name	Netz-Typ	Sub-Netz(e)	Symmetrie-Netz(e)	Beziehung(en)	„Art“ der Beziehung
C1A	Detektion	-	C2A	CM	lateral
C2A	Detektion	-	C1A	CM	lateral
CM	Mit.-Elek.	CM:AB	-	C1A, C2A, C1B, C2B	lateral / vertikal
C1B	Detektion	-	C2B	CM	vertikal
C2B	Detektion	-	C1B	CM	vertikal

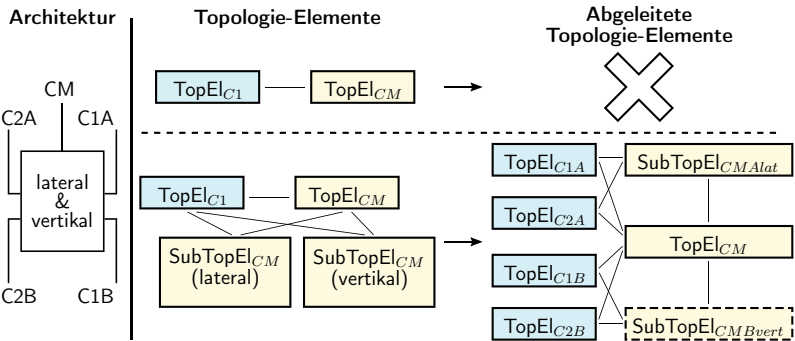


Abbildung 6.36: Beispiel für die Ableitung von (Sub)-Topologie-Elementen bezüglich der Architektur-Variante aus Tab. 6.7. **Oben:** Es ist wie im Fall in Abb. 6.12 nicht möglich, die Sub-Netze von „CM“ auf Topologie-Elemente abzubilden. **Unten:** Die Netze „A“ und „B“ beziehen sich in diesem Fall zur gleichen seismischen Masse. Dadurch sind die Geometrien der Sub-Topologie-Elemente äquivalent. In diesem Fall ist es notwendig, das „vertikale“ Sub-Topologie-Element zu „verstecken“, sodass es für interne Berechnungen zur Verfügung steht, aber in den Ergebnissen nicht auftaucht.

7 Methode zur Analyse bewegungsabhängiger elektrostatischer Effekte bei lateraler Auslenkung

Für eine präzise Simulation des mechanischen Verhaltens eines MEMS-Elements existieren verschiedene Methoden, die z. B. in Kapitel 3 teilweise skizziert wurden. Eine effiziente Methode für die Analyse bewegungsabhängiger, d. h. positionsabhängiger parasitärer Kapazitäten, steht jedoch bisher noch nicht zur Verfügung. Im Folgenden werden diese parasitären Kapazitäten, wie in Abschnitt 2.2.3 eingeführt, als *dynamische parasitäre* Kapazitäten bezeichnet. Diese dynamischen elektrostatischen Effekte kann man bisher nur in einer 3D-Multi-Domänen-FEM Simulation präzise berechnen, z. B. mit ANSYS [36]. Solch eine Simulation ist zum Einen sehr aufwändig und zum Anderen betrachtet sie in der Regel keine Verdrahtungen (vgl. die in Kapitel 3 beschriebenen Entwurfsprozesse oder beispielsweise [73]). Diese sind aber die Hauptursache für dynamische parasitäre Kapazitäten.

Weitere Multi-Domänen-Simulations-Ansätze auf Basis reduzierter Modelle oder auf Basis von Kompaktmodellen [38, 73] liefern eine effiziente System-Simulation, können aber dynamische parasitäre Effekte, die durch die Kopplung mit Verdrahtungen entstehen (vgl. Kapitel 3), ebenfalls nicht abbilden.

Um diese Lücke im Entwurfsprozess zu schließen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neue Methode zur Analyse dynamischer parasitärer Effekte auf Chip-Geometrie-Ebene entwickelt [74, 75]. Diese bildet das dynamische Verhalten durch eine Sequenz von (quasi-statischen) Elektrostatik-Analysen ab. Dabei repräsentiert eine einzelne Elektrostatik-Analyse innerhalb der Sequenz einen Auslenkungs-Zustand der MEMS-Strukturen. Diese Auslenkungs-Zustände kann der neu entwickelte, sogenannten *Auslenkungs-Algorithmus* anhand der Chip-Geometrie und Daten aus der Simulation des mechanischen Verhaltens berechnen. Mit diesem Ansatz lassen sich die schon bestehende effiziente Mechanik-Simulation mit der effizienten, auf Field-Solver basierenden Elektrostatik-Analyse des gesamten Chips (Abschnitt 5), kombinieren. Dadurch lassen sich erstmalig auch die dynamischen parasitären Kapazitäten, die aufgrund von Verdrahtungen unterhalb der beweglichen Strukturen entstehen, simu-

lativ erfassen (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Die grundlegende Idee der Methode zur quasi-elektrostatischen Analyse wird in dem Abschnitt 7.1 dargestellt. In Abschnitt 7.2 folgt die ausführliche Beschreibung des Auslenkungs-Algorithmus. Die neu entwickelte Methode zur quasi-elektrostatischen Analyse wird in Abschnitt 7.3 an einem realen MEMS-Sensor demonstriert und in Abschnitt 7.4 verifiziert. In Abb. 7.1 ist ein schematischer Überblick über die neue Methode gegeben und dargestellt, wie sich diese in die bestehende Elektrostatik-Analyse aus Kapitel 5 einbettet.

7.1 Grundlegende Idee und Einordnung in den Extraktions-Fluss

Mit den bestehenden Methoden kann man die dynamischen parasitären Kapazitäten, die Verdrahtungs-Strukturen unterhalb der beweglichen Strukturen verursachen, nicht analysieren. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte quasi-elektrostatische Analyse auf Basis der gesamten Chip-Geometrie kann diese Lücke im Entwurfsprozess schließen. Diese neue Methode sieht vor, die bestehende, sehr schnelle Simulation des mechanischen Verhaltens auf Basis eines Balkenmodells des Sensors (vgl. Kapitel 3) mit der in Kapitel 5 beschriebenen Methode zur Analyse parasitärer Kapazitäten, zu kombinieren. Die neue Extraktions-Methode bettet sich somit als Parallelpfad in die bereits entwickelte Methode ein, wie es in Abb. 7.1 graphisch veranschaulicht ist.

Aus der balkenmodellbasierten Simulation des mechanischen Verhaltens kann man die FEM-Knoten mit ihren Koordinaten, Verschiebungs-Vektoren und Nachbarschaftsbeziehungen exportieren. In Abb. 7.2 ist solch ein Balken-Modell eines Drehrahmensensors in Ruhelage und im ausgelenkten Zustand dargestellt.

Wie in Kapitel 5 beschrieben, erfolgt die Elektrostatik-Analyse auf Basis der Polygon-Repräsentation der Chip-Geometrie des MEMS-Elements. Mit der 2,5D-Prozess-Simulation aus Abschnitt 5.2 wird ein vereinfachtes 3D-Modell des MEMS-Elements aus der Polygon-Repräsentation berechnet (vgl. Abb. 7.1, links). Dieses Modell enthält u. a. die Einflüsse der Ätz-Prozesse und Technologie inhärente *Topographie-Stufen*. Die Prozess-Simulation modelliert die Topographie-Stufen durch Zerlegung der ursprünglichen Layer in die sogenannten *Topographie-Layer* (Abb. 7.3 und Abschnitt 5.2).

Die Kombination der Daten aus der Simulation des mechanischen Verhaltens und der 2,5D-Prozess-Simulation erfolgt im Auslenkungs-Algorithmus. Dieser berechnet anhand der gegebenen FE-Knoten, ihrer Verschiebung und Nachbarschaftsbeziehungen, eine Sequenz von ausgelenkten Zuständen der Chip-Geometrie. Hierbei ist zu

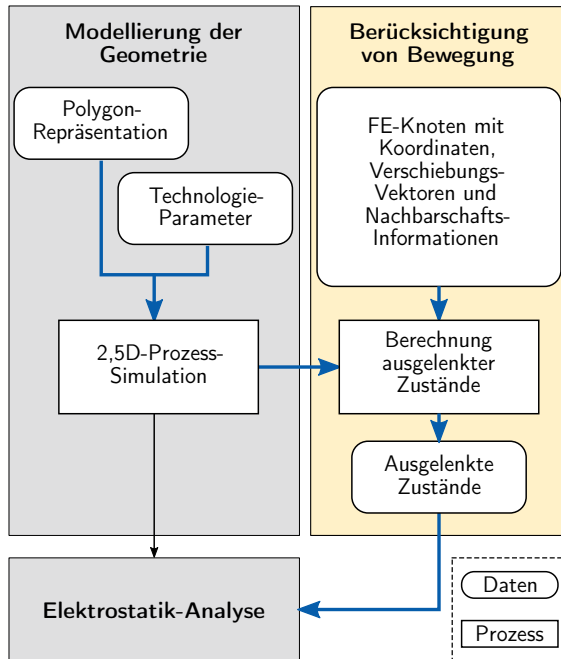


Abbildung 7.1: Einbettung der quasi-statischen Analyse dynamischer parasitärer Kapazitäten in MEMS-Sensoren in die bereits entwickelten Methoden.

beachten, dass der Auslenkungs-Algorithmus auf Basis des Modells der 2,5D-Prozess-Simulation arbeitet und nicht auf Basis der ursprünglichen Chip-Geometrie. Dies liegt daran, dass sich nur in der Ruhelage, also anhand der ursprünglichen Chip-Geometrie, die Prozess-Einflüsse korrekt abbilden lassen. Der Auslenkungs-Algorithmus stellt dadurch insbesondere sicher, dass auch die Topographie-Stufen korrekt in der ausgelenkten Chip-Geometrie abgebildet sind, da diese einer der Hauptursachen für dynamische parasitäre Kapazitäten darstellen (2.2.3).

Für jeden ausgelenkten Zustand der Chip-Geometrie wird eine Elektrostatik-Analyse im klassischen Sinne, wie in Kapitel 5 beschrieben, durchgeführt. Anhand dieser Sequenz von Elektrostatik-Analysen kann man die dynamischen parasitären Kapazitäten quasi-statisch analysieren und in der Chip-Geometrie schon während des Entwurfs minimieren.

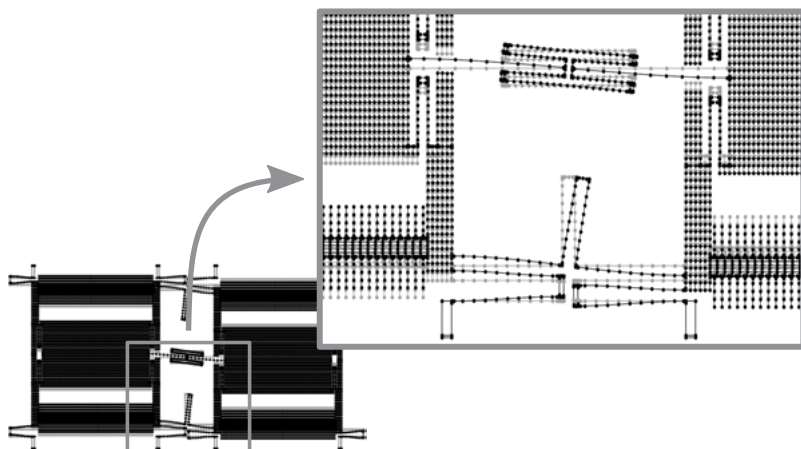


Abbildung 7.2: Balken-Modell eines einkanalen MEMS-Drehratensensors. Grau: Ruhelage, schwarz: ausgelenkter Zustand. Die Kanten zwischen den FE-Knoten (als Kreise dargestellt) repräsentieren die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Knoten.

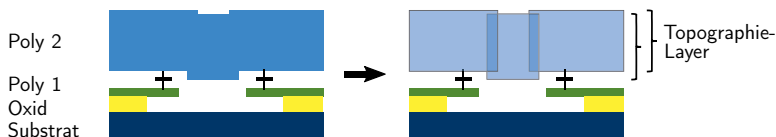


Abbildung 7.3: Beispiel für die Modellierung Technologie inhärenter Topographie-Stufen durch Topographie-Layer (vgl. Abschnitt 2.1 und 5.2).

7.2 Auslenkungs-Algorithmus

In diesem Kapitel wird eine neue Methode zur Analyse dynamischer parasitärer Kapazitäten in MEMS durch eine quasi-elektrostatische Analyse beschrieben. Für den im vorherigen Abschnitt 7.1 beschriebenen Ansatz ist eine Sequenz von ausgelenkten Zuständen der Chip-Geometrie notwendig. Diese ausgelenkten Zustände kann man mit dem im Folgenden beschriebenen *Auslenkungs-Algorithmus* berechnen.

Der Algorithmus kombiniert die exportierten Daten der FE-Knoten aus der Simulation des mechanischen Verhaltens mit der Geometrie des Modells der 2,5D-Prozess-Simulation (vgl. Abschnitt 7.1). Hierfür zerlegt er die Geometrie in disjunkte Kacheln. Dies geschieht in der Form, dass in jeder Kachel genau ein FE-Knoten liegt. Durch diese eindeutige Zuordnung der FE-Knoten zu den erzeugten Kacheln kann der

Algorithmus die Verschiebungs- und Nachbarschafts-Informationen der FE-Knoten verwenden, um die einzelnen Teilstücke der Geometrie eindeutig zu verschieben und innerhalb ihrer neuen Position auszurichten. Das Flussdiagramm in Abb. 7.4 zeigt die einzelnen Schritte des Auslenkungs-Algorithmus, die im Folgenden beschrieben und an einem einseitig eingespannten Balken (Abb. 7.5a) visualisiert werden.

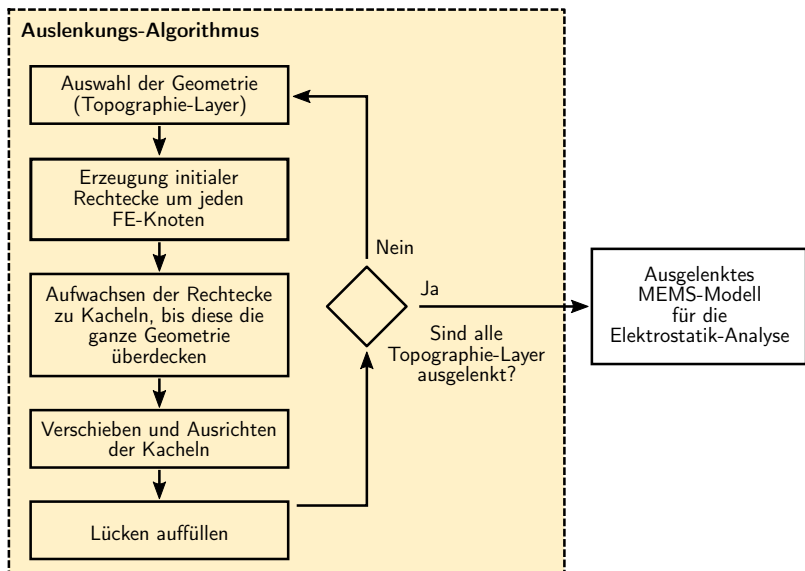


Abbildung 7.4: Flussdiagramm des Auslenkungs-Algorithmus’.

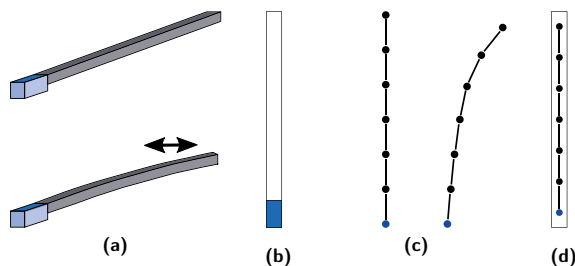


Abbildung 7.5: a) Oben: einseitig eingespannter 3D-Balken. Unten: ausgelenkter einseitig eingespannter 3D-Balken. b) Polygon-Repräsentation des einseitig eingespannten Balkens. c) Links: Knoten des FE-Balkens-Modells des Balkens in Ruhelage. Rechts: Ausgelenktes Balken-Modell. d) Platzierte und ausgerichtete FE-Knoten in der Polygon-Repräsentation des Balkens.

Als Eingabe benötigt der Auslenkungs-Algorithmus die Chip-Geometrie mit dem zugehörigen Modell der 2,5D-Prozess-Simulation und die FE-Knoten aus einer Simulation des mechanischen Verhaltens. Für die FE-Knoten müssen jeweils die Koordinaten und die Verschiebungs-Information, in Form eines Verschiebungs-Vektor und der Nachbarschaftsbeziehungen des Knotens, definiert sein. Des Weiteren müssen die FE-Knoten einem Layer in der Chip-Geometrie zugeordnet sein, damit der Auslenkungs-Algorithmus die entsprechenden Topographie-Layer aus dem Modell der 2,5D-Prozess-Simulation auswählen kann. Der Auslenkungs-Algorithmus führt in einer Schleife die folgenden Operationen für jeden Layer mit seinen zugehörigen Topographie-Layern aus, für den FE-Knoten definiert sind.

Nachdem der Algorithmus einen Topographie-Layer ausgewählt hat, platziert er die FE-Knoten anhand ihrer Koordinaten in der Polygon-Repräsentation des Topographie-Layers. Ein Topographie-Layer repräsentiert in der Regel nur ein Teil der Geometrie des zugrundeliegenden Layers. In der Mechanik-Simulation wird hingegen bisher keine Topographie miteinbezogen. Aus diesem Grund sind die FE-Knoten immer für einen gesamten Layer in der Chip-Geometrie definiert. Daraus folgt, dass fast immer FE-Knoten auch außerhalb der Geometrie des aktuell ausgewählten Topographie-Layers liegen. Diese sind für die Auslenkung des ausgewählten Topographie-Layers nicht relevant und können in dieser Iteration vom Algorithmus ignoriert werden.

Im nächsten Schritt muss der Auslenkungs-Algorithmus die Verschiebungs-Information der FE-Knoten auf die Polygon-Repräsentation des aktuellen Topographie-Layers übertragen. Damit diese Übertragung eindeutig ist, muss er disjunkten Teilstücken der Geometrie jeweils einen FE-Knoten zuordnen. Diese Zerlegung in sogenannte Kacheln muss die folgenden Kriterien erfüllen, damit keine Geometrie- oder Verschiebungs-Information verloren geht:

1. Jeder gültige FE-Knoten befindet sich genau innerhalb oder auf dem Rand einer Kachel.
2. Jede Kachel enthält genau einen gültigen FE-Knoten
3. Die Kacheln bilden eine disjunkte Überdeckung der Geometrie des ausgewählten Topographie-Layers

Solch eine Zerlegung der Geometrie in Kacheln berechnet der Algorithmus, indem er zunächst um jeden platzierten FE-Knoten ein initiales Rechteck erzeugt, das deutlich kleiner ist als die kleinste MEMS-Struktur (beispielsweise $100nm \cdot 100nm$). Nach Definition dürfen zwei FE-Knoten nicht die identischen Koordinaten haben. Daher ist sichergestellt, dass die initialen Rechtecke disjunkt sind, wenn deren halber Durchmesser kleiner als der halbe minimale Abstand zweier FE-Knoten ist.

Durch sukzessives Vergrößern der initialen Rechtecke erzeugt der Algorithmus eine Überdeckung der Geometrie des aktuell ausgewählten Topographie-Layers durch Kacheln (Abb. 7.6). Durch die sukzessive Vergrößerung der Kacheln lässt sich dabei sicherstellen, dass sich diese zum einen nicht überlappen und zum anderen nicht über die Geometrie des Topographie-Layers hinauswachsen.

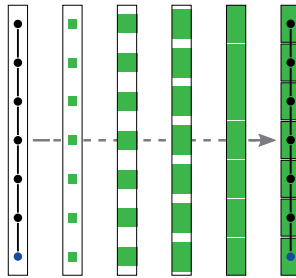


Abbildung 7.6: Sukzessives Aufwachsen der initialen Rechtecke um die FE-Knoten bis die so entstehenden Kacheln die gesamte Geometrie des Balkens überdecken.

Damit hat der Auslenkungs-Algorithmus die ausgewählte Geometrie in disjunkte Kacheln zerlegt und kann jeder Kachel einen eindeutigen FE-Knoten zuordnen. Jede Kachel „erbt“ nun die Verschiebe-Information ihres FE-Knotens. Der Algorithmus verschiebt daraufhin die einzelnen Kacheln anhand der jeweiligen Verschiebungs-Information, wie es in Abb. 7.7 am Beispiel eines einseitig eingespannten Balkens dargestellt ist.

Daraus resultiert eine sehr grobe Annäherung an die real ausgelenkte Struktur. Um diese Annäherung zu verbessern, richtet der Algorithmus die einzelnen Kacheln auf ihrer neuen Position bezüglich der Positionen der benachbarten Kacheln durch eine Rotation aus (Abb. 7.8). Der jeweilige Rotations-Winkel ergibt sich dabei aus der

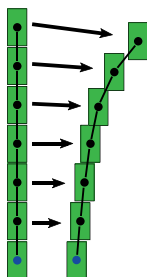


Abbildung 7.7: Verschiebung der einzelnen Kacheln anhand der Verschiebungs-Information des jeweiligen FE-Knotens.

ursprünglichen und verschobenen Position des zugehörigen FE-Knotens und seiner benachbarten Knoten.

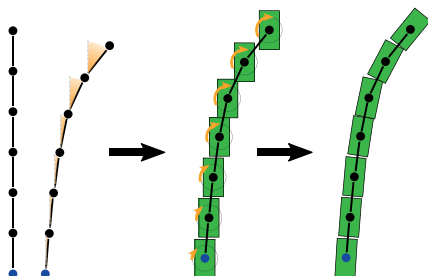


Abbildung 7.8: Ausrichtung der einzelnen Kacheln an ihrer neuen Position. Der jeweilige Rotations-Winkel ergibt sich dabei aus der ursprünglichen und verschobenen Position des zugehörigen FE-Knotens und seiner benachbarten Knoten. In einer komplexeren Struktur haben die FE-Knoten im Allgemeinen mehrere benachbarte Knoten, die untereinander in einem positiven und/oder negativen Winkel in Beziehung stehen. Der jeweilige Rotations-Winkel ergibt sich in solch einem Fall als der Durchschnitt aller Winkel.

Im letzten Schritt schließt der Auslenkungs-Algorithmus die minimalen Spalten zwischen den Kacheln, bevor er die Zerlegung und Verschiebung für den nächsten Topographie-Layer berechnet (Abb. 7.4).

Durch die separate Auslenkung der einzelnen Topographie-Layer lässt sich sicherstellen, dass die prozessinhärenten Topographie-Stufen im ausgelenkten 3D-Modell näherungsweise abgebildet werden (vgl. Kapitel 5 und Abschnitt 7.1). Dies wird in Abb. 7.9 schematisch an einem Beispiel demonstriert.

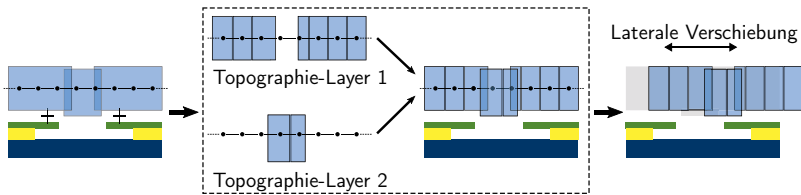


Abbildung 7.9: Demonstration des Auslenkungs-Algorithmus im Querschnitt durch den Schicht-Stapel mit hervorgehobenen Topographie-Layern des Poly 2 Layers. Der Auslenkungs-Algorithmus platziert die FE-Knoten in den zum Poly 2 zugehörigen Topographie-Layern. Diese verschiebt er anschließend anhand der gegebenen Verschiebungs-Information der FE-Knoten. Durch die laterale Verschiebung der einzelnen Kacheln bleiben die Topographie-Stufen bestehen und können so in der Elektrostatik-Analyse berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird gezeigt, dass man den oben beschriebene Auslenkungs-Algorithmus auch auf komplexere Geometrien anwenden kann. Dies wird an einem einkanalen MEMS-Drehratensensor gezeigt, wobei bei der Demonstration für eine einfachere Übersicht keine Topographie-Layer eingesetzt sind. In Abb. 7.10 ist die sukzessive Vergrößerung der initialen Rechtecke um die FE-Knoten auf einem Abschnitt des Sensors gezeigt. Abbildung 7.11 zeigt den gleichen Ausschnitt nach der Verschiebung der einzelnen Kacheln. Die ausgelenkte Struktur ist in Abb. 7.12a gezeigt und darunter in Abb. 7.12b der gleiche ausgelenkte Ausschnitt des MEMS Sensors unter einem Mikroskop.

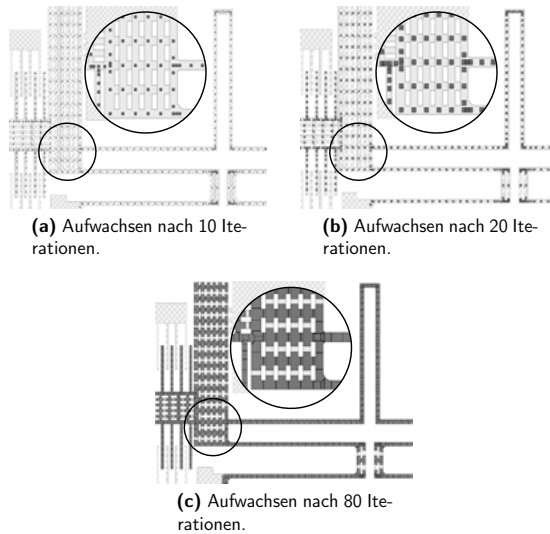


Abbildung 7.10: Aufwachsen der initialen Rechtecke um die FE-Knoten eines MEMS-Drehratensensors, bis diese die gesamte Geometrie überdecken.

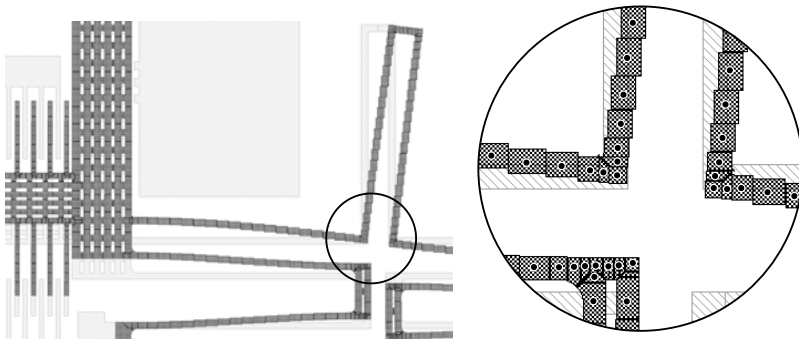
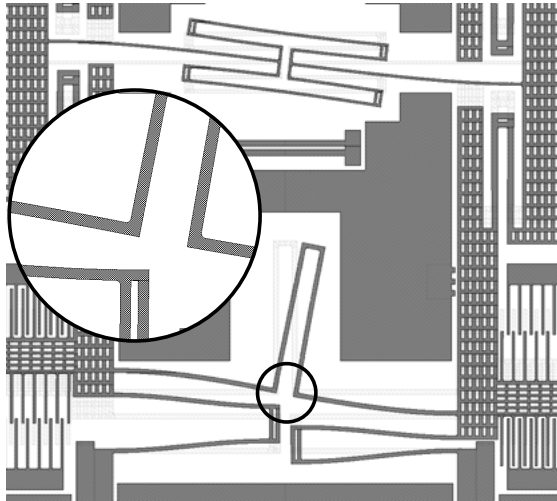
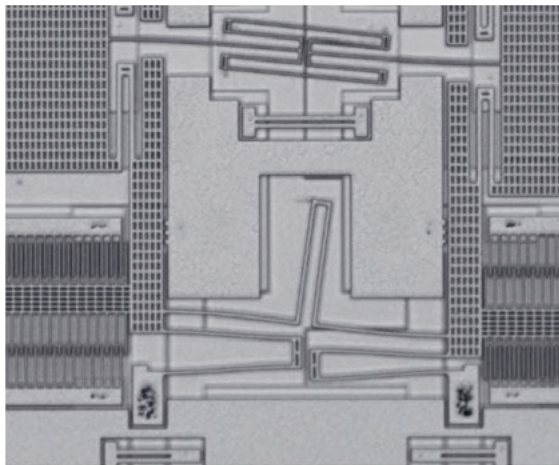


Abbildung 7.11: Verschobene Kacheln anhand der Verschiebe-Informationen der zugehörigen FE-Knoten.



(a) Final ausgelenktes Modell für die Elektrostatik-Analyse.



(b) Mikroskop-Aufnahme der gleichen Struktur im ausgelenkten Zustand [5].

Abbildung 7.12: Das final ausgelenkte Modell für die Elektrostatik-Analyse im Vergleich zu einer Mikroskop-Aufnahme der gleichen Struktur im ausgelenkten Zustand.

7.3 Demonstration

Die Methode zur quasi-elektrostatischen Analyse wird im Folgenden an einem komplexen dreiachsigen MEMS-Drehratensensor demonstriert (Abb. 7.13). Dazu wurde der beschriebene Algorithmus in Calibre von Mentor Graphics [43] implementiert. Die Demonstration zeigt, dass man die dynamischen parasitären Kapazitäten, die durch prozessinhärente Topographie-Stufen verursacht werden, mit der Methode zur quasi-elektrostatischen Analyse erfassen kann.

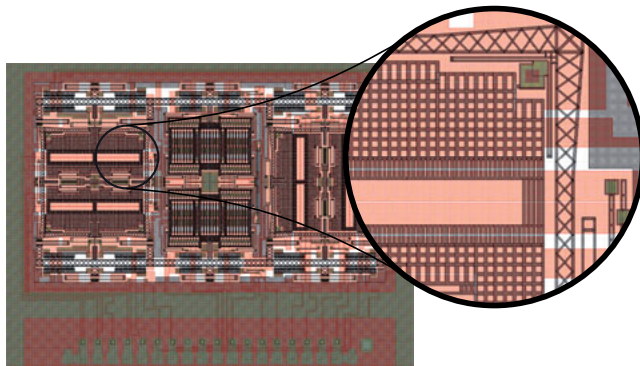


Abbildung 7.13: Dreiachsiger MEMS-Drehratensensor entwickelt von der Bosch Sensortec [76].

Für die Demonstration werden zwei Varianten des Sensors eingesetzt. Die erste Variante hat große Abstände zwischen den Strukturen auf dem Poly 1 Layer (Abb. 7.14a) und die zweite sehr kleine (vgl. Abb. 7.14b).

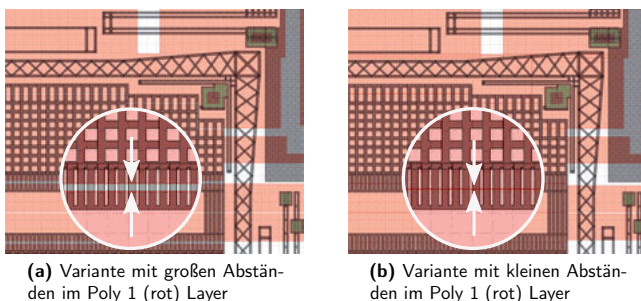


Abbildung 7.14: Varianten des Sensors für die Demonstration.

Nur in Variante eins sind daher unter den beweglichen Strukturen (Poly 2 Layer, grau) Topographie-Stufen zu erwarten, die bewegungsabhängige parasitäre Kapazitäten verursachen.

Für die quasi-Elektrostatik-Analyse wurde die Antriebs-Auslenkung (vgl. Abschnitt 2.2.2) in einer FE-Modal-Analyse simuliert. Aus der Kombination dieser FE-Daten und der Polygon-Repräsentation des Sensors berechnet der Auslenkungs-Algorithmus eine Sequenz von ausgelenkten Zuständen des Sensors (Abb. 7.15 und Abschnitt 7.2). Für die Demonstration wurden für beide Varianten 25 ausgelenkte Zustände zwischen $-6\ \mu\text{m}$ und $+6\ \mu\text{m}$ - in $0,5\ \mu\text{m}$ Schritten - berechnet.

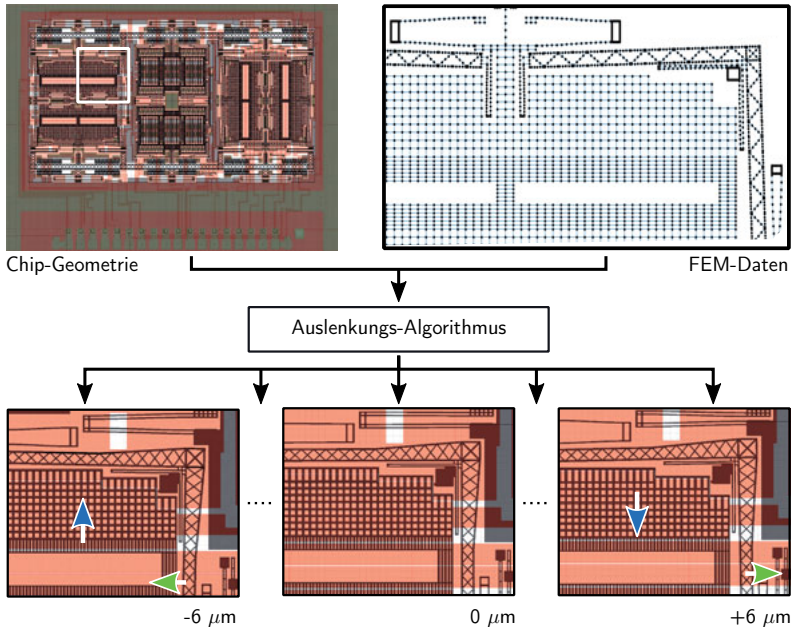


Abbildung 7.15: Demonstration des Auslenkungs-Algorithmus aus Abschnitt 7.2 an einem dreiachsigen Drehratensensor. Der Algorithmus berechnet aus der Chip-Geometrie und den FEM-Daten aus der Mechanik-Simulation eine Sequenz von ausgelenkten Zuständen der Chip-Geometrie. In der unten abgebildeten Sequenz symbolisieren die blau gefüllten Pfeile die größere Bewegungsrichtung der seismischen Masse und die grün gefüllten Pfeile die wesentlich kleinere Rotationsbewegung des *Umlenk-Rahmens*.

Die dynamischen parasitären Kapazitäten, die durch die Topographie-Stufen verur-

sacht werden, lassen sich durch Differenzbildung der Extraktions-Ergebnisse beider Varianten separieren. In Abb. 7.16 sind die separierten dynamischen parasitären Kapazitäten in prozentualer Abhängigkeit zur Kapazität in der Ruhelage abgebildet.

Wie erwartet, erzeugt die Topographie-Stufe eine dynamische parasitäre Kapazität, wenn sie aus der Ruhelage bewegt wird. Sobald sich die Topographie-Stufe vollständig über der benachbarten Verdrahtungs-Struktur befindet, wird die dynamische parasitäre Kapazität annähernd konstant.

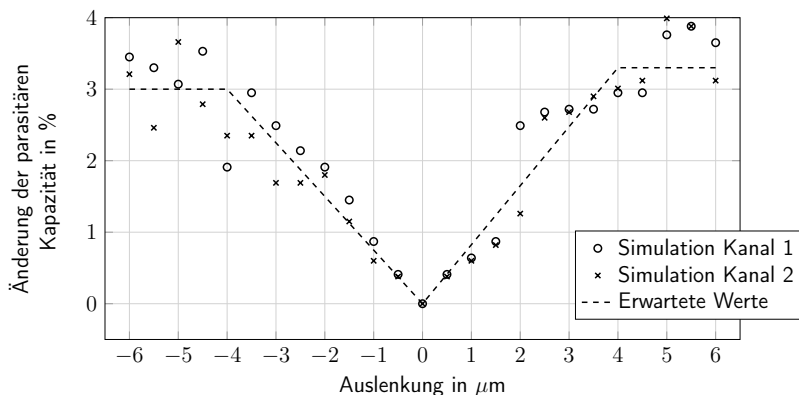


Abbildung 7.16: Die Abbildung zeigt die bewegungsabhängigen parasitären Kapazitäten zweier symmetrischer Kanäle einer Sensier-Achse, die durch Topographie-Stufen unter einer beweglichen Struktur verursacht werden. Aufgetragen ist die Veränderung der parasitären Kapazität bezüglich der Ruhelage in Prozent über der Auslenkung in μm .

7.4 Verifikation

In Abschnitt 6.4 wurde die Methode zur quasi-elektrostatischen Analyse von bewegungsabhängigen Kapazitäten an einem Drehratensensor demonstriert. Es wurde dargestellt, dass die extrahierten Werte den Erwartungen entsprechen. Es ist aber praktisch unmöglich, diese extrahierten Werte mit gemessenen Sensor-Daten zu verifizieren. Dies liegt daran, dass der zu messende Effekt in der gleichen Größenordnung liegt wie die Störeinflüsse aus den Fehlern der Simulation des mechanischen Verhaltens, der Herstellungs-Prozess-Schwankungen, der Messtechnik und der Approximationen im Modell der Elektrostatik-Analyse (vgl. Kapitel 5). Darüber hinaus lässt sich ein Drehratensensor nicht exakt so wie in einer Simulation auf einer definierten Mode (Schwingungsform) betreiben. Einkopplungen von anderen Moden (in der

Regel höhere Moden) und insbesondere die elektrischen Mitkopplungen (horizontal und vertikal), die das Schwingungsverhalten ändern, sind durch die Messtechnik unvermeidbar.

Daher wird die Verifikation der Methode anhand eines Beschleunigungssensors durchgeführt. Dieser besteht vereinfacht aus einem zwei-Feder-Masse-System (Abb. 7.17b) und kann als Plattenkondensator mit verschiebbaren Platten betrachtet werden (Abb. 7.17c).

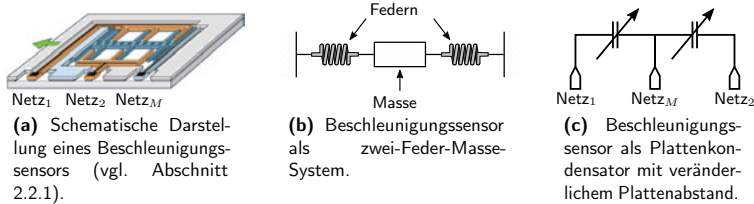


Abbildung 7.17: Stark vereinfachte Modelle eines Beschleunigungssensors. Links: geometrisch, Mitte: mechanisch. Rechts: elektrisch.

In Abb. 7.18 ist die Kapazität über der Auslenkung dargestellt. Auf der x-Achse ist die Auslenkung in Prozent zur maximalen Auslenkung und auf der y-Achse die Differenz der Kapazität zur Ruhelage in Prozent aufgetragen.

Als erste Näherung lässt sich ein Beschleunigungssensor als idealer Plattenkondensator annehmen (vgl. Abb. 7.17c). Damit kann man die Kapazität in Abhängigkeit zur Auslenkung mit der Formel für eine ideale Plattenkapazität [21] abschätzen (Abb. 7.18, gestrichelte Kurve). Für eine bessere Abschätzung in der Nähe der Ruhelage sind die Streufelder der Plattenkapazität mit einem konstanten Faktor einbezogen.

Für die quasi-elektrostatische Analyse wird anhand der FE-Daten aus der Simulation des mechanischen Verhaltens die Chip-Geometrie in mehreren Schritten ausgelenkt. Für jeden dieser ausgelenkten Zustände wurde eine vollständige Elektrostatik-Analyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Abb. 7.18 als Kreise gegeben.

Für die Messung wird die seismische Masse des Sensors durch Anlegen von Spannung auf einer Detektions-Elektrode ausgelenkt. Aufgrund der Trägheit der seismischen Masse kann man über die gleiche Elektrode zwischendurch die Kapazität zwischen der Detektions-Elektrode und der seismischen Masse messen. Da diese Messung eine elektrostatische Mitkopplung verursacht - d. h. die elektrostatische Anziehung lenkt die seismische Masse aus - kann man mit dieser Messung die Kapazität in der Ruhelage nicht exakt messen. Außerdem befindet sich bei einer Auslenkung von

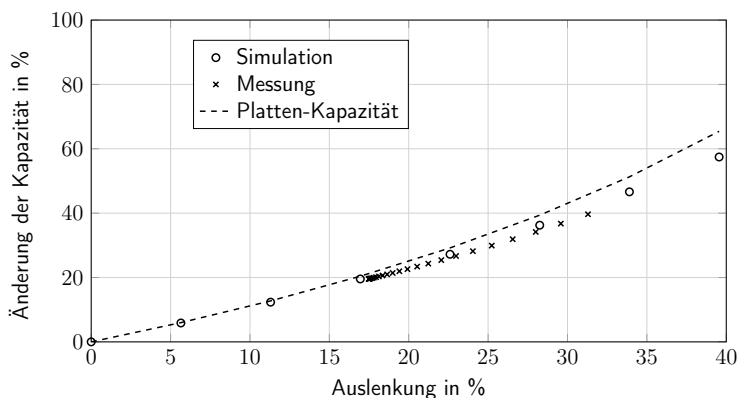


Abbildung 7.18: Die Abbildung zeigt den Vergleich zwischen simulierten, abgeschätzten und gemessenen Daten eines MEMS-Beschleunigungssensors.

einem Drittel im Bezug zur maximalen Auslenkung der sogenannte Schnapppunkt. Ab dieser Auslenkung ist die Rückstellkraft der Feder des Sensors kleiner als die elektrostatische Anziehung durch die angelegte Spannung. Der Sensor wird ab diesem Punkt in den Anschlag gezogen. Daher enden die gemessenen Daten in Abb. 7.18 (Werte sind als Kreuze aufgetragen) bei einer Auslenkung von ca. 30%. Wie in Abb. 7.18 zu sehen, weichen die simulierten Daten im definierten Bereich nur sehr gering von den gemessenen Daten ab.

Neben den extrahierten absoluten Kapazitäts-Werten sind die *relativen Abweichungen* zwischen den extrahierten Kapazitäten symmetrisch ausgelegter Netze deutlich wichtiger, wie beispielsweise bei paarweise angeordneten Detektions-Elektroden-Netzen. Die quasi-elektrostatische Analyse nutzt für die Extraktion der Kapazitäts-Werte das in Kapitel 5 beschriebene auf einer 2,5D-Prozess-Simulation und einem Field-Solver basierende Verfahren. Für diese Elektrostatik-Analyse ist durch den Field-Solver inhärent sichergestellt, dass er eine sehr hohe relative Genauigkeit bei der Extraktion der Kapazitätswerte erreicht. Diese Eigenschaft überträgt sich damit auf die quasi-elektrostatische Analyse, wodurch diese minimalen Veränderungen der dynamischen parasitären Kapazitäten detektieren kann. Dies wurde in der Demonstration in Abschnitt 7.3 nachgewiesen, wo der Einfluss einer Topographie-Stufe auf die Kapazität eines gesamten Netzes untersucht wurde.

7.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine neue Methode zur quasi-elektrostatischen Analyse von bewegungsabhängigen (parasitären) Kapazitäten beschrieben, an einem komplexen Drehratensensor demonstriert und anschließend an einem Beschleunigungssensor verifiziert.

Die Methode benötigt als Eingabe die Daten aus der bestehenden Simulation des mechanischen Verhaltens und die zugehörige Chip-Geometrie mit dem Modell der 2,5D-Prozess-Simulation aus Kapitel 5. Der Auslenkungs-Algorithmus (Abschnitt 7.2) berechnet auf Basis dieser Daten eine Sequenz von ausgelenkten Zuständen der Chip-Geometrie, für die anschließend jeweils eine Elektrostatik-Analyse durchgeführt wird.

Die Methode wurde an einem MEMS-Drehratensensor demonstriert. Liegen eine Chip-Geometrie und zugehörige FEM-Daten vor, so kann man die Methode auch auf jedes andere MEMS-Element übertragen.

8 Kombination der Methoden zur Analyse bewegungsabhängiger elektrostatischer Effekte bei lateraler Auslenkung mit der regelbasierten Strukturerkennung

Die quasi-elektrostatische Analyse (Kapitel 7) kann man, wie in Abb. 8.1 dargestellt, auch auf die erkannten Topologie-Elemente aus der regelbasierten Strukturerkennung (Kapitel 6) anwenden [75]. Dies ermöglicht die geometrische Zuordnung der dynamischen parasitären Kapazitäten in der Chip-Geometrie.

Für die Kombination der beiden Methoden muss im Auslenkungs-Algorithmus sichergestellt werden, dass auch sehr kleine Topologie-Elemente, in denen kein Knoten aus der Mechanik-Simulation liegt, korrekt verschoben werden. Dies lässt sich erreichen, indem der Auslenkungs-Algorithmus die Zerlegung der Geometrie in Kacheln am ursprünglichen Layer vornimmt und erst anschließend diese Zerlegung auf die Topologie-Elemente und Topographie-Layer überträgt.

Im folgenden Abschnitt 8.1 wird die neue Methode an einem Anwendungsfall aus dem MEMS-Entwurf demonstriert. Das Kapitel schließt mit einer zusammenfassenden Bewertung in Abschnitt 8.2.

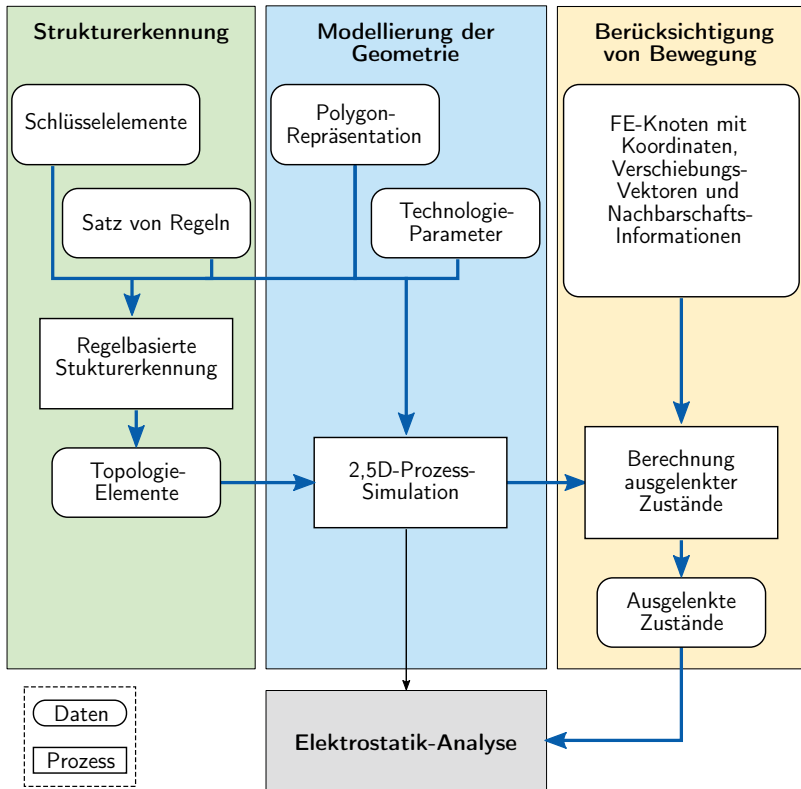


Abbildung 8.1: Die Methoden zur regelbasierten Strukturerkennung (Kapitel 6) und zur quasi-elektrostatischen Analyse (Kapitel 7) lassen sich, wie in dem Flussgraphen dargestellt, miteinander kombinieren. Dadurch wird die Lokalisierung der extrahierten dynamischen parasitären Kapazitäten auf Basis der erkannten Topologie-Elemente in der Chip-Geometrie ermöglicht.

8.1 Demonstration

Die Kombination der Analyse-Methoden wird an einem dreiaxigen MEMS-Drehraten-sensor demonstriert (Abb. 7.13), der auch schon in Abschnitt 6.4 für die Demonstration der quasi-elektrostatischen Analyse verwendet wurde.

Für die Demonstration wurde die Verdrahtung gezielt so geändert, dass bei einer Auslenkung eine Asymmetrie in den Ausgangs-Signalen zu erwarten ist. Durch diese Modifikation bewegt sich ein Teil der Fachwerk-Struktur des Sensors bei einer Auslenkung von $-6\mu\text{m}$ bis $+6\mu\text{m}$ über eine breite und über eine schmale Verdrahtungs-Struktur (Abb. 8.2).

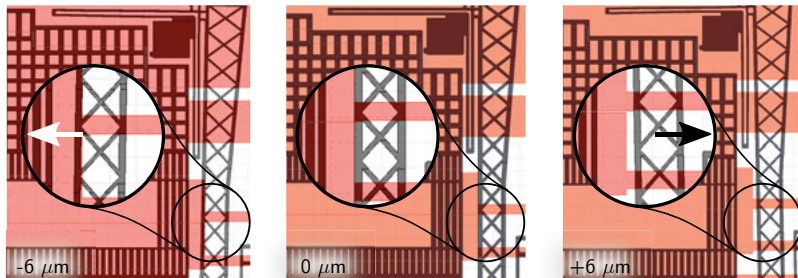


Abbildung 8.2: Die drei Abbildungen zeigen, wie sich die Fachwerk-Struktur (schwarz) über den Defekt in der Verdrahtungs-Struktur (rot) in Richtung der Pfeile bewegt. **Links:** Die Fachwerk-Struktur ist über der breiten Verdrahtung und verursacht dadurch eine hohe parasitäre Kapazität. **Mitte:** Der Sensor ist in seiner Ruhelage. Die Fachwerk-Struktur befindet sich genau neben dem Übergang von der breiten zu einer schmalen Verdrahtung. **Rechts:** Die Fachwerk-Struktur ist über der schmalen Verdrahtung, wodurch sie eine kleinere parasitäre Kapazität erzeugt.

Um diesen sehr kleinen Effekt in der Demonstration gut sichtbar zu machen, wird der Bereich um die modifizierte Verdrahtung gezielt in ein Topologie-Element separiert. Dies geschieht mit der in Kapitel 6 beschriebenen Strukturerkennung.

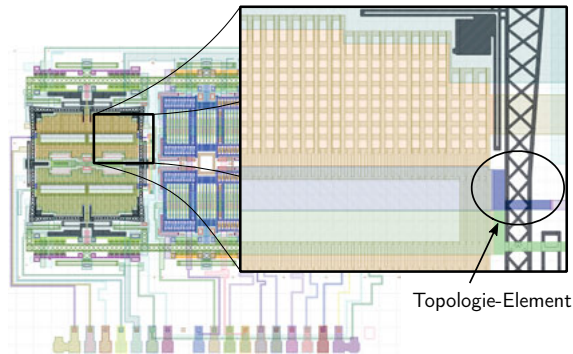


Abbildung 8.3: Geometrie der Topologie-Elemente des verwendeten Drehraten-sensors nach der regelbasierten Strukturerkennung. Für eine gezielte Analyse des eingefügten Defekts wird ein Topologie-Element abgeleitet, das die entsprechende Stelle repräsentiert.

Der Verlauf der extrahierten Kapazitäten zwischen den symmetrisch angeordneten Topologie-Elementen und der sich darüber bewegenden Fachwerk-Strukturen ist in Abb. 8.4 durch schwarze Kreise markiert. Die gestrichelte Linie stellt den erwarteten Verlauf bei einer Plattenkapazität näherungsweise dar. Die extrahierten Werte entsprechen damit in etwa dem erwarteten Verlauf.

Angefangen bei einer „negativen“ Auslenkung (Abb. 8.2, links) wird die höchste Kapazität erwartet, da sich die Fachwerk-Strukturen über den breiten Verdrahtungs-Strukturen befinden. In der Ruhelage (Abb. 8.2, Mitte) befinden sich die Fachwerk-Strukturen genau neben den breiten Verdrahtungs-Strukturen und über den schmalen Verdrahtungs-Strukturen. Bei höherer „positiver“ Auslenkung (Abb. 8.2, rechts) nimmt der Anteil der Streufelder zwischen den breiten Verdrahtungs-Strukturen und den Fachwerks-Strukturen kontinuierlich ab. Bei einer Auslenkung von ca. $0,5\mu\text{m}$ bleibt die Kapazität dann fast konstant. Bei höherer Auslenkung nehmen die Streufelder weiter ab und die Kapazität zwischen den Fachwerks-Strukturen und den schmalen Verdrahtungs-Strukturen konvergiert wie erwartet gegen die Plattenkapazität zwischen den Strukturen.

In Abb. 8.4 ist durch die grauen Kreuze zusätzlich der Verlauf der Kapazitäten zwischen den beiden gesamten Netzen gegeben, welche die Topologie-Elemente bzw. die Verdrahtungs-Strukturen enthalten. Der Unterschied der Kapazitäten bei positiver und negativer Auslenkung deuten den Defekt an, den die gezielte Analyse anhand der Topologie-Elemente aufzeigen kann. Der Verlauf der Kapazität zwischen den Netzen zeigt aber auch, dass weitere Defekte existieren müssen, da ansonsten die Kapazität bei negativer Auslenkung etwas höher hätte sein müssen.

Rot umrahmt sind in Abb. 8.4 Ausreißer-Werte um die Ruhelage, die bei der Ex-

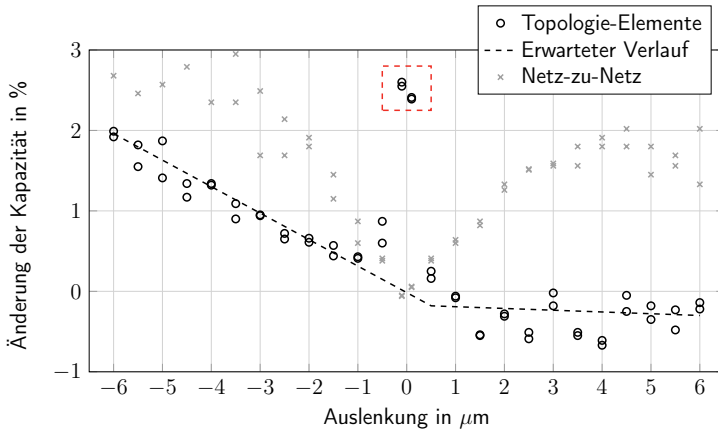


Abbildung 8.4: Die schwarzen Kreise repräsentieren die dynamischen parasitären Kapazitäten zwischen den Topologie-Elementen und den Verdrahtungs-Strukturen (vgl. Abb. 8.2 und 8.3) auf zwei symmetrischen Kanälen des MEMS-Sensors aus Abb. 7.13. Rot umrahmt sind Ausreißer-Werte der Extraktion. Die grauen Kreuze zeigen den Verlauf der Kapazität zwischen den beiden gesamten Netzen, die die Topologie-Elemente bzw. die Verdrahtungs-Strukturen enthalten. Alle Werte sind in Prozent zur Kapazität zwischen diesen Netzen in der Ruhelage des Sensors angegeben.

traktion mit den Topologie-Elementen auftreten. Diese werden durch numerische Ungenauigkeiten beim Übergang von (teilweise) Manhattan- zu (ausschließlich) nicht-Manhattan-Strukturen in der Umgebung der Ruhelage durch den Field-Solver verursacht. Für eine netzwerkbasierte Simulation eignen sich die extrahierten Werte daher im Allgemeinen nicht. Haupteinsatzgebiet dieser neuen Methode ist daher vor allem die gezielte Analyse und Lokalisierung von Defekten in der Verdrahtung. Für diesen Anwendungsfall spielen die absolut extrahierten Kapazitäten eine untergeordnete Rolle. Viel wichtiger ist eine sehr kleine *relative Abweichung* zwischen den extrahierten Kapazitäten geometrisch gleicher oder ähnlicher Strukturen. Dies ist durch den Einsatz der in Kapitel 5 beschriebenen Methode durch den verwendeten Field-Solver gewährleistet.

8.2 Zusammenfassende Bewertung

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass man die regelbasierte Strukturerkennung aus Kapitel 6 mit der Analyse dynamischer parasitärer Kapazitäten aus Kapitel 7 kombinieren kann. Dies ermöglicht erstmalig, dynamische parasitäre Kapazitäten gezielt in der Chip-Geometrie anhand von erkannten Topologie-Elementen zu lokalisieren.

Die Demonstration an einem MEMS-Drehratensensor verdeutlichte, dass sich mit dieser Methode selbst kleinste asymmetrische dynamische parasitäre Kapazitäten in den Verdrahtungs-Strukturen isoliert betrachten und analysieren lassen. Diese würden in einer klassischen Extraktion durch andere Effekte überdeckt und damit nicht lokalisierbar sein.

Wie in der Demonstration veranschaulicht, eignet sich diese neue Methode sehr gut zur gezielten Analyse und Lokalisierung von Defekten in der Chip-Geometrie, die dynamische parasitäre Kapazitäten verursachen.

9 Gesamtzusammenfassung und weiterführende Aufgaben

In der Regel werden hochoptimierte MEMS-Elemente immer noch in einem polygonbasierten Entwurfsprozess entwickelt, aus dem nur eine reine 2D-Polygon-Beschreibung der MEMS-Strukturen resultiert.

Für die Auslegung eines MEMS-Systems, bestehend aus einem MEMS-Element und einer Auswerteschaltung, ist es notwendig, insbesondere die elektrostatischen Eigenschaften des MEMS-Elements schon während des Entwurfs genau zu analysieren. Nur so kann verhindert werden, dass später auftretende parasitäre elektrostatische Effekte - beispielsweise durch Rauschen oder Signalverschiebungen - das Verhalten des Systems stören. Je genauer man die elektrostatischen Eigenschaften des MEMS-Elements schon während des Entwurfs charakterisieren kann, desto besser lassen sich das MEMS-Element und die Auswerteschaltung aufeinander abstimmen und damit das Gesamtsystem höher optimieren.

Bisher eingesetzte Analyse-Methoden auf Grundlage analytischer Näherungen erfüllen nicht mehr die Anforderungen an die absolute und relative Genauigkeit für die elektrostatische Auslegung und Optimierung heutiger hochoptimierter MEMS-Systeme.

Auf Basis der Polygon-Repräsentation (Chip-Geometrie) eines MEMS-Elements wurde daher in dieser Arbeit eine effiziente **2,5D-Prozess-Simulation** entwickelt, die ein Modell für eine genaue **3D-Field-Solver-basierte Elektrostatik-Analyse** liefert (Abb. 9.1, Mitte). Durch die entwickelte Prozess-Simulation ist es möglich, 3D-Field-Solver, die im Elektronik-Entwurf zum Standard gehören, auch für eine genaue Elektrostatik-Analyse von MEMS-Elementen einzusetzen. Die 2,5D-Prozess-Simulation wurde in dieser Arbeit in Kombination mit dem Field-Solver Calibre xAct3D von Mentor Graphics [68] an einem MEMS-Drehratensensor demonstriert und an charakterisierten Teststrukturen verifiziert.

Im polygonbasierten Entwurf werden die MEMS-Strukturen sowie die gesamte umgebende Chip-Geometrie in der Regel ausschließlich durch Polygone beschrieben. Dies führt dazu, dass sich die Polygone in einer Elektrostatik-Analyse nur den in der Chip-Geometrie durch Textmarkierungen definierten Netzen zuordnen lassen.

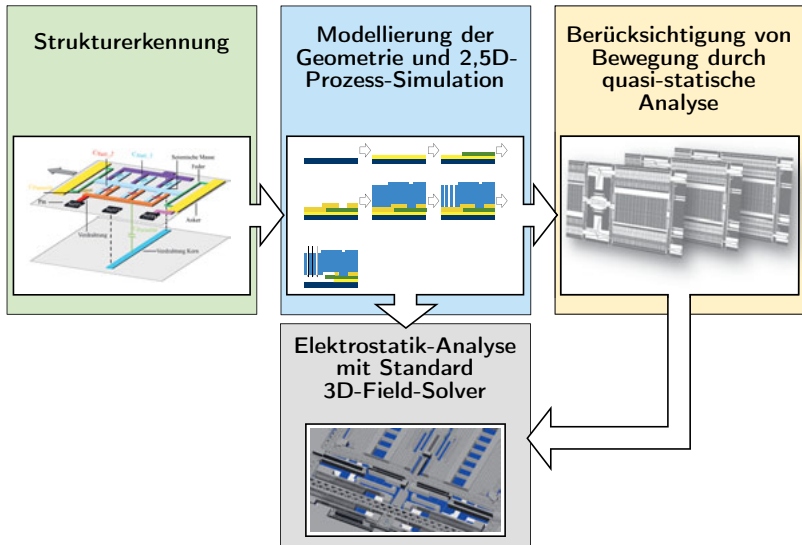


Abbildung 9.1: Überblick über die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methoden (farbig hinterlegt) für die Elektrostatik-Analyse für MEMS.

Das heißt insbesondere, dass man die extrahierten Kapazitäten keinen Komponenten zuordnen und damit nicht in der Geometrie lokalisieren kann.

Die Elektrostatik-Analyse wurde daher in dieser Arbeit um eine **regelbasierte Strukturerkennung** erweitert (Abb. 9.1, links). Anhand von allgemeinen, vordefinierten Regeln fasst diese die Polygon-Strukturen zu Elementen wie Federn, Elektroden oder seismischen Massen zusammen. Nach der Elektrostatik-Analyse werden den erkannten Elementen die extrahierten Werte zugeordnet. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse der parasitären Kapazitäten, auf deren Basis man dann gezielte Optimierungen, wie beispielsweise die Anpassung von Verdrahtungs-Strukturen, hinsichtlich der nun bekannten Effekte durchführen kann.

Neben den elektrostatischen parasitären Effekten in der Ruhelage können in MEMS-Elementen aufgrund der beweglichen Strukturen auch positionsabhängige parasitäre Kapazitäten entstehen.

Bisher wurden parasitäre Kapazitäten im Entwurf nur anhand von Flächen-Betrachtungen oder durch manuell aufgebaute Teil-FEM-Modelle abgeschätzt. Um diese Lücke im polygonbasierten Entwurfsprozess zu schließen, wurde in dieser

Arbeit eine neue Methode zur **quasi-statischen Analyse** bewegungsabhängiger parasitärer Kapazitäten entwickelt (Abb. 9.1, rechts). Durch Kombination der FEM-Daten aus dem Entwurf der mechanischen Strukturen und der Chip-Geometrie ermöglicht es diese Methode erstmalig, auch in komplexen MEMS-Drehratensensoren die bewegungsabhängigen parasitären Kapazitäten netzbasiert auf der gesamten Chip-Geometrie zu analysieren.

Die beiden genannten Methoden, Strukturerkennung und quasi-statischen Analyse, lassen sich zudem kombinieren, wodurch die bewegungsabhängigen parasitären Kapazitäten besser in der Chip-Geometrie lokalisierbar sind.

Die beiden entwickelten Methoden ermöglichen die präzise Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte für in einem polygonbasierten Entwurfsprozess entworfene MEMS-Elemente. Dadurch ist es möglich, den Einfluss der elektrostatischen parasitären Effekte durch gezielte Anpassungen in der Chip-Geometrie zu minimieren. Außerdem erlaubt die hochgenaue, auf 3D-Field-Solvern basierende Elektrostatik-Analyse mit der Extraktion einer reduzierten RC-Netzliste schon im Entwurf eine bessere Abstimmung des Gesamtsystems, bestehend aus einem MEMS-Element und einer Auswerteschaltung. Dies verkürzt die Entwicklungszeit und reduziert die Entwicklungskosten.

Mit den entwickelten Methoden zur 2,5D-Prozess-Simulation, Lokalisierung und quasi-statischen Analyse, stehen zuverlässige Verfahren für die Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte im MEMS-Entwurf zur Verfügung. Diese schließen die oben aufgezeigte Lücke im Entwurfsprozess und bringen den polygonbasierten MEMS-Entwurf einen Schritt näher zu einer vollständigen MEMS-Entwicklungsumgebung.

Die entwickelten Methoden für die Elektrostatik-Analyse können die Grundlage bilden für weiterführende Optimierungs- und Struktursynthese-Verfahren im MEMS-Entwurf. Ein Beispiel für eine solche Erweiterung ist eine automatisierte, randbedingungsgeführte Verdrahtung von MEMS-Strukturen.

Glossar

3D-Field-Solver Ein Field-Solver löst i. d. R. die Integralform der Maxwell-Gleichungen auf der Oberfläche einer 3D-Beschreibung der Struktur (z. B. Chip-Geometrie) mit einer Rand-Element-Methode (engl. boundary element method - BEM). 7

Ableiten der Topologie-Elemente und Regeln Die Ableitung von Topologie-Elementen und Regeln bezeichnet den Vorgang, bei dem eine generische Architekturbeschreibung mittels Topologie-Elementen und zugehörigen Regeln in eine ausführbare Form für eine MEMS-Element spezifische Architektur überführt wird. 77

Ätz-Maske Die Ätz-Maske enthält die Geometrien aller Öffnungen in einer Schicht, durch die das Ätzgas beim Gas-Phasen-Ätzen in die darunterliegende Schicht eindringen kann. 58

Architektur Die Architektur beschreibt charakteristische Eigenschaften eines MEMS, die unabhängig von seiner Geometrie sind. Die Architektur basiert u. a. auf dem Funktionsprinzip eines *MEMS-Typs*, welches über Generationen von MEMS gleich ist, aber durch andere Geometrien realisiert wird. 73

Atomares Element Atomare Elemente sind die kleinsten zur Verfügung stehenden Elemente, aus denen man alle mechanisch beweglichen Strukturen eines MEMS-Elements für eine FE-Analyse modellieren kann. Typische atomare Elemente sind Balken, Platten und Ankerpunkte. 27, 142

Auslenkungs-Algorithmus Der Auslenkungs-Algorithmus kann auf Basis von Daten aus der Simulation des mechanischen Verhaltens eines MEMS eine ausgelenkte Chip-Geometrie berechnen. Diese wird benötigt für die quasi-elektrostatische Analyse *dynamischer parasitärer* Kapazitäten. Der Algorithmus ist in Abschnitt 7.2 ausführlich beschrieben. 115, 118

Bipartiter Graph Ein Graph $G = (V, E)$ heißt bipartit, wenn sich die Menge seiner Knoten V in zwei disjunkte Teilmengen V_1 und V_2 aufteilen lässt, sodass weder Knoten aus V_1 , noch Knoten aus V_2 untereinander benachbart sind [77]. 76

Bondpad Ein Bondpad definiert eine äußere elektrische Schnittstelle eines Chips. Die Bondpads können mit sehr dünnen Drähten kontaktiert werden, wodurch man zwei Chips elektrisch miteinander verbinden kann. Bei MEMS-Systemen wird insbesondere das MEMS-Element über Bonddrähte an die zugehörige Auswerteschaltung angebunden. 143

Chip-Geometrie Die Chip-Geometrie ist eine polygonbasierte Repräsentation des gesamten MEMS-Elements. Sie beinhaltet insbesondere die Sensorkerne mit ihren *Kernbereichen* und die Strukturen in der *Peripherie*. Die finale Chip-Geometrie wird auch als Layout des MEMS-Elements bezeichnet. 30

Dynamische parasitäre Kapazität Diese *parasitäre Kapazität* hängt von der Bewegung, d. h. der Position der mechanischen Strukturen ab. Sie entstehen i. d. R. zwischen den mechanisch beweglichen und den darunter verlaufenden Verdrahtungs-Strukturen. Außerdem können sie auch durch *Topographie-Stufen* verursacht werden. 22, 115, 141

Elektrostatik-Analyse Die Elektrostatik-Analyse berechnet für eine gegebene Struktur ihre elektrostatischen Eigenschaften. Diese beinhalten die Kapazitäten (C) zwischen Strukturen auf unterschiedlichen Potentialen und Widerstände (R) zwischen definierten Punkten. Die extrahierten Kapazitäten und Widerstände kann man in eine *RC-Netzliste* exportieren und für weitere netzwerkbasierte Simulationen und Analysen nutzen. 6, 144

Gas-Phasen-Ätzung Bei diesem Ätzverfahren setzt man die Siliziumwafer einem selektiv ätzenden Ätzgas in der Gasphase aus. Dadurch kann beispielsweise das unter Silizium vergrabene Oxid in einem MEMS-Element in einer Umgebung der Öffnungen in der obersten Silizium-Schicht entfernt werden. 14

Grundkomponente Eine Grundkomponente repräsentiert eine typische, häufig mehrfach eingesetzte Struktur in einem MEMS-Element, wie beispielsweise Federn oder Kamm-Strukturen. Die Grundkomponenten sind wiederum aus *atomaren Elementen* zusammengesetzt. 36

Kantenverlust Bei dem reaktiven Ionentieftätzen kommt es zu einer Anätzung und damit zu einer Verschiebung der Kanten der Strukturen bezüglich der gezeichneten Strukturen in der Chip-Geometrie. Diese Verschiebung der Kanten wird als Kantenverlust bezeichnet. 54, 142

Kantenverlust-Funktion Der *Kantenverlust* ist abhängig von der Größe der zu ätzenden Öffnung. Die Kantenverlust-Funktion bildet dieses Verhältnis zwischen Kantenverlust und Größe der zu ätzenden Öffnung näherungsweise ab. 55

Kernbereich Der Kernbereich ist der Bereich in der Chip-Geometrie, der die beweglichen Strukturen enthält (Abb. 9.2). Der restliche Bereich wird als Peripherie bezeichnet. 142–144

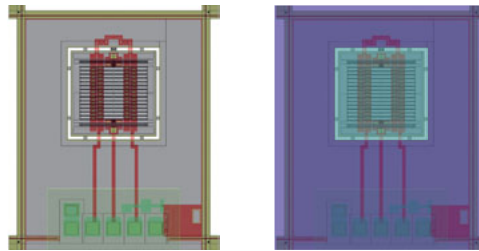


Abbildung 9.2: Links: Chip-Geometrie eines MEMS-Beschleunigungssensor. Rechts: Markierung des Kernbereichs (türkis) und der Peripherie (lila).

MEMS Ein mikroelektromechanisches System (MEMS) besteht i. d. R. aus einem mikromechanischen Element, dem MEMS-Element, und einer zugehörigen mikroelektronischen Auswerteschaltung, dem ASIC-Element. Eine Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise gibt Abschnitt 1.1. 1

MEMS-Typ Der MEMS-Typ beschreibt eine Klasse von MEMS, wie beispielsweise kapazitive Beschleunigungssensoren oder kapazitive Drehratensensoren. 74, 141

Netz Ein Netz beschreibt in einem MEMS alle Strukturen, die elektrisch miteinander verbunden sind. Die Namen der Netze werden i. d. R. durch die Bondpads definiert, die die Schnittstelle zur Auswerteschaltung sind. 6, 143, 144

Netz-Typ Die Netz-Typen sind eine Kategorisierung der Netze anhand ihrer Funktion in einem MEMS-Element. Beispielsweise sind in einem kapazitiven Beschleunigungssensor die Netze, die die Detektions-Elektroden enthalten, dem Netz-Typ „C1“ zugeordnet. 82

Parasitäre Kapazität Parasitäre Kapazitäten sind ungewollte Kapazitäten, die beispielsweise zwischen Leiterbahnen entstehen und das Ausgangs-Signal stören oder das Verhalten eines MEMS beeinflussen können. 5, 20, 142

Peripherie Siehe *Kernbereich*. 142

RC-Netzliste Eine RC-Netzliste ist eine abstrakte knotenbasierte Darstellung der elektrostatischen Eigenschaften einer Schaltung bzw. eines MEMS-Elements. Sie enthält neben den Widerständen (R) auch die Koppelkapazitäten (C) zwischen den *Netzen*. 6, 142

Reaktives Ionentiefätzen Das reaktive Ionentiefätzen (engl. Deep Reactive Ion Etching - DRIE) ist ein Verfahren, das es ermöglicht, sehr tiefe und schmale Gräben in Silizium zu ätzen. Weiterführende Literatur: u. a. [1, 15, 16, 10, 11]. 13

Relative Abweichung Die relative Abweichung bei der *Elektrostatik-Analyse* beschreibt die Abweichung der Extraktions-Ergebnisse von geometrisch gleichen Strukturen. Insbesondere ist dies bei symmetrisch angeordneten Strukturen bzw. Netzen relevant, wie beispielsweise die Detektions-Elektroden-Netze von Beschleunigungssensoren. 7, 130, 136

Schlüsselement Die Schlüsselemente werden für die regelbasierte Strukturerkennung (Kap. 6) benötigt und definieren hierfür eine initiale Zerlegung der Chip-Geometrie. 75

Sensorkern Ein Sensorkern beschreibt eine eigenständige mechanische Struktur, die sich dazu eignet, z. B. eine auf diese Struktur wirkende Kraft aufgrund einer Beschleunigung des Sensors zu detektieren. Ein Sensorkern liegt immer innerhalb des *Kernbereichs* eines MEMS-Elements. 83

Sub-Topologie-Element Ein Sub-Topologie-Element muss definiert sein, wenn ein *Netz* mehrere unterschiedliche Instanzen eines *Topologie-Elements* enthält. 87

Topographie-Layer Ein Topographie-Layer enthält einen Teil der Geometrien des zugehörigen Layers, dem eine Z-Koordinate im Schichtstapel zugeordnet ist. Das heißt, für jede *Topographie-Stufe* im Schichtstapel hat ein Layer einen zugehörigen Topographie-Layer. 63, 116

Topographie-Stufe Durch Aufeinanderstapeln der selektiv definierten Schichten kommt es zu Niveauunterschieden innerhalb einer Schicht. Diese Stufen werden als Topographie-Stufen bezeichnet. 14, 59, 116, 142, 144

Topologie-Element Ein Topologie-Element ist ein durch die regelbasierte Strukturerkennung erkanntes Element in der Chip-Geometrie. 74, 144

Umlenk-Rahmen Ein Umlenk-Rahmen ist ein Design-Element, das es in der Ebene ermöglicht, eine Bewegung in x-Richtung in eine Bewegung in y-Richtung zu übersetzen. Dadurch kann man mit einer Antriebs-Struktur zwei seismische Massen in orthogonale Richtungen bewegen, wodurch sich Drehungen um die beiden korrespondierenden Raumachsen detektieren lassen. 127

Literaturverzeichnis

- [1] J. Marek, B. Hoefflinger und U. Gomez. „MEMS - Micro-Electromechanical Sensors for the Internet of Everything“. In: *CHIPS 2020 VOL. 2*. Hrsg. von B. Höfflinger. DOI: 10.1007/978-3-319-22093-2_15. Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 221–229. ISBN: 978-3-319-22093-2. URL: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-22093-2_15 (besucht am 03.01.2018) (siehe S. 1, 12, 144).
- [2] Robert Bosch GmbH, *Automotive Electronics*. 20. Nov. 2017 (siehe S. 1, 2, 7, 19, 33, 34, 48, 74, 100, 112).
- [3] D. W. Monk. „DLP® Projection Technology“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 2859–2871. ISBN: 978-3-319-14346-0. DOI: 10.1007/978-3-319-14346-0_129. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-14346-0_129 (siehe S. 2).
- [4] Bosch Sensortec, *BML050*. 10. März 2018. URL: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bml050 (siehe S. 2).
- [5] S. Kehrberg. „Simulation und Charakterisierung der Nichtidealitäten mikro-mechanischer Drehratesensoren“. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2015. URL: https://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/uni_biblio/frontdoor.php?source_opus=21045&la=de (siehe S. 6, 66, 125).
- [6] Coventor *SEMulator3D*. URL: <https://www.coventor.com/semi-conductor-solutions/semulator3d/> (besucht am 03.09.2018) (siehe S. 6, 52, 66).
- [7] C. Clee. *The Best of Both Worlds - A No-Compromise Approach to Advanced Node Parasitic Extraction*. White paper. Mentor Graphics, a SIEMENS business, 2017 (siehe S. 7).
- [8] *IHS – MEMS Market Tracker – Q3 2015*. Okt. 2015 (siehe S. 10).
- [9] J. Marek und U. Gómez. „MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) for Automotive and Consumer Electronics“. In: *Chips 2020*. Hrsg. von B. Hoefflinger. DOI: 10.1007/978-3-642-23096-7_14. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 293–314. ISBN: 978-3-642-23096-7. URL: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-23096-7_14 (besucht am 03.01.2018) (siehe S. 10, 11).

- [10] T. M. Adams und R. A. Layton. „Creating structures—Micromachining“. In: *Introductory MEMS: Fabrication and Applications*. Boston, MA: Springer US, 2010, S. 95–130. ISBN: 978-0-387-09511-0. DOI: 10.1007/978-0-387-09511-0_4. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-09511-0_4 (siehe S. 11, 12, 144).
- [11] P. J. French und P. M. Sarro. „Micromachining Technology“. In: *MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*. Hrsg. von J. G. Korvink und O. Paul. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 805–851. ISBN: 978-3-540-33655-6. DOI: 10.1007/978-3-540-33655-6_15. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-33655-6_15 (siehe S. 11, 12, 144).
- [12] *Skript zur Vorlesung Layoutentwurf integrierter Schaltkreise am Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik (Hochschule Reutlingen)*. Dez. 2018 (siehe S. 12).
- [13] T. M. Adams und R. A. Layton. „The substrate and adding material to it“. In: *Introductory MEMS: Fabrication and Applications*. Boston, MA: Springer US, 2010, S. 17–63. ISBN: 978-0-387-09511-0. DOI: 10.1007/978-0-387-09511-0_2. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-09511-0_2 (siehe S. 12).
- [14] M. Glück. „Verfahren der MEMS Fertigung“. In: *MEMS in der Mikrosystemtechnik: Aufbau, Wirkprinzipien, Herstellung und Praxiseinsatz mikroelektromechanischer Schaltungen und Sensorsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005, S. 65–91. ISBN: 978-3-663-10778-1. DOI: 10.1007/978-3-663-10778-1_3. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-663-10778-1_3 (siehe S. 12, 13).
- [15] F. Laermer und A. Schilp. „Method of anisotropically etching silicon“. 5501893. März 1996 (siehe S. 12, 14, 54, 144).
- [16] F. Laermer und A. Urban. „Milestones in deep reactive ion etching“. In: Bd. 2. IEEE, 2005, S. 1118–1121. ISBN: 978-0-7803-8994-6. DOI: 10.1109/SENSOR.2005.1497272. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1497272/> (besucht am 04.01.2018) (siehe S. 12, 14, 144).
- [17] T. M. Adams und R. A. Layton. „Creating and transferring patterns—Photolithography“. In: *Introductory MEMS: Fabrication and Applications*. Boston, MA: Springer US, 2010, S. 65–94. ISBN: 978-0-387-09511-0. DOI: 10.1007/978-0-387-09511-0_3. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-09511-0_3 (siehe S. 12, 13).
- [18] Z. Li, B. Liu und W. Wang. „MEMS Processing and Fabrication Techniques and Technology—Silicon-Based Micromachining“. en. In: *Microsystems and Nanotechnology*. Hrsg. von Z. Zhou, Z. Wang und L. Lin. DOI: 10.1007/978-3-642-18293-8_9. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 287–352. ISBN: 978-3-642-18293-8. URL: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-18293-8_9 (besucht am 03.01.2018) (siehe S. 14, 15).

- [19] V. Kempe. *Inertial MEMS: Principles and Practice*. Cambridge University Press, 2011. DOI: 10.1017/CB09780511933899 (siehe S. 16).
- [20] F. Laermer. „Mechanical Microsensors“. In: *MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*. Hrsg. von J. G. Korvink und O. Paul. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 523–566. ISBN: 978-3-540-33655-6. DOI: 10.1007/978-3-540-33655-6_10. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-33655-6_10 (siehe S. 17, 18).
- [21] W. Demtröder. „Elektrostatik“. In: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 1–44. ISBN: 978-3-540-68219-6. DOI: 10.1007/978-3-540-68219-6_1. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-68219-6_1 (siehe S. 17, 33, 129).
- [22] C. Spura. „EULER-BERNOULLI-Balkentheorie (schubstarrer Balken)“. In: *Technische Mechanik 2. Elastostatik: Nach fest kommt ab*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 169–222. ISBN: 978-3-658-19979-1. DOI: 10.1007/978-3-658-19979-1_9. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-19979-1_9 (siehe S. 27).
- [23] C. Spura. „TIMOSHENKO-Balkentheorie (schubweicher Balken)“. In: *Technische Mechanik 2. Elastostatik: Nach fest kommt ab*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 223–266. ISBN: 978-3-658-19979-1. DOI: 10.1007/978-3-658-19979-1_10. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-19979-1_10 (siehe S. 27).
- [24] B. Klein. „Elementkatalog für elastostatische Probleme“. In: *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 95–179. ISBN: 978-3-658-06054-1. DOI: 10.1007/978-3-658-06054-1_7. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-06054-1_7 (siehe S. 28).
- [25] S. IP, *ANSYS mechanical APDL theory reference, ANSYS Help View, vol. 15*. 2013 (siehe S. 28).
- [26] M. Dorwarth, S. Kehrberg, R. Maul u. a. „Nonlinear Model Order Reduction for high Q MEMS gyroscopes“. In: *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD14)*. Feb. 2014, S. 1–4. DOI: 10.1109/SSD.2014.6808820 (siehe S. 28).
- [27] M. Putnik, S. Cardanobile, S. Kehrberg u. a. „A static approach for the frequency shift of parasitic excitations in MEMS gyroscopes with geometric nonlinear drive mode“. In: *2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. März 2017, S. 144–147. DOI: 10.1109/ISISS.2017.7935651 (siehe S. 28).
- [28] M. Putnik, M. Sniegucki, S. Cardanobile u. a. „Incorporating geometrical nonlinearities in reduced order models for MEMS gyroscopes“. In: *2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. März 2017, S. 43–46. DOI: 10.1109/ISISS.2017.7935656 (siehe S. 28).

- [29] M. Putnik, S. Cardanobile, C. Höppner und J. Mehner. „Stiffening of higher modes in doubly-clamped beam resonators depending on ground state amplitude“. In: *2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. Apr. 2016, S. 1–4. DOI: 10.1109/EuroSimE.2016.7463301 (siehe S. 28).
- [30] G. Lorenz. „Netzwerksimulation mikromechanischer System“. Diss. Shaker Verlag, Aachen: Fachbereich für Physik und Elektrotechnik der Universität Bremen, 1999. URL: http://www.shaker.de/Online-Gesamtkatalog-Download/2018.02.21-10.17.22-194.39.218.10-rad7FCFE.tmp/3-8265-6837-0_INH.PDF (siehe S. 28, 29, 39).
- [31] G. Lorenz und R. Neul. „Network-Type Modeling of Micromachined Sensor Systems“. In: *Proc. Technical proceedings of MSM98*. 1998, S. 233–238 (siehe S. 28).
- [32] H. Toshiyoshi, T. Konishi, K. Machida und K. Masu. „A mixed-design technique for integrated MEMS using a circuit simulator with HDL“. In: *Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2013*. Juni 2013, S. 17–22 (siehe S. 28).
- [33] D. Teegarden, G. Lorenz und R. Neuf. „How to model and simulate microgyroscope systems“. In: *IEEE Spectrum* 35.7 (Juli 1998), S. 66–75. ISSN: 0018-9235. DOI: 10.1109/6.694362 (siehe S. 28).
- [34] G. Schröpfer, G. Lorenz, A. Krust u. a. „MEMS System-Level Modeling and Simulation in Smart Systems“. In: *Smart Systems Integration and Simulation*. Hrsg. von N. Bombieri, M. Poncino und G. Pravadelli. Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 145–168. ISBN: 978-3-319-27392-1. DOI: 10.1007/978-3-319-27392-1_6. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-27392-1_6 (siehe S. 28, 30, 38, 43).
- [35] T. Nährung und Prof.Dr.-Ing. habil. A. Reibiger. „Entwicklung von Verhaltensmodellen für mikromechanische Komponenten“. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik, 14. Feb. 2000 (siehe S. 28).
- [36] ANSYS. URL: <http://www.ansys.com/> (besucht am 27. 10. 2017) (siehe S. 29, 115).
- [37] N. Lobontiu. „Micromechanical Systems: Modal Analysis“. In: *Dynamics of Microelectromechanical Systems*. Bd. 17. Boston, MA: Springer US, 2007, S. 139–228. ISBN: 978-0-387-68195-5. DOI: 10.1007/978-0-387-68195-5\textunderscore2 (siehe S. 29).
- [38] D. Gugel. „Ordnungsreduktion in der Mikrosystemtechnik“. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 15. Juni 2008. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-201001091> (siehe S. 30, 115).

- [39] J. Mehner. „Modal-Superposition-Based Nonlinear Model Order Reduction for MEMS Gyroscopes“. In: *System-Level Modeling of MEMS*. Hrsg. von T. Bechtold, G. Schrag und L. Feng. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013, S. 291–309. ISBN: 9783527647132. DOI: 10.1002/9783527647132.ch12 (siehe S. 30).
- [40] J.E. Mehner, L.D. Gabbay und S.D. Senturia. „Computer-aided generation of nonlinear reduced-order dynamic macromodels. II. Stress-stiffened case“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 9.2 (Juni 2000), S. 270–278. ISSN: 1057-1757. DOI: 10.1109/84.846708 (siehe S. 30).
- [41] A. Pashev, I. Uzunov, D. Gaydazhiev, D. Pukneva und E. Manolov. „Methodology for development of LVS and LPE rule sets adapted for MEMS processes“. In: *Proceedings of the 19th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2012*. Warsaw, Poland, Mai 2012, S. 370–375. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6226223/> (siehe S. 32, 35).
- [42] Cadence Assura. URL: https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/digital-design-and-signoff/silicon-signoff/assura-physical-verification.html (besucht am 22.12.2017) (siehe S. 32, 96).
- [43] Mentor Graphics Calibre. URL: https://www.mentor.com/products/ic_nanometer_design/verification-signoff/physical-verification/ (besucht am 22.12.2017) (siehe S. 32, 56, 66, 96, 126).
- [44] M. Baumann. „Parasitäre Kapazitäten von MEMS-Strukturen in aktuellen OMM-Prozessen“. Diplom Arbeit. Hochschule Ravensburg-Weingarten, Fachbereich Physikalische Technik, 2006 (siehe S. 33).
- [45] ÖgP MEMS2015. 22. Feb. 2018. URL: <https://www.edacentrum.de/mems2015/> (siehe S. 33).
- [46] G. Schröpfer, G. Lorenz, S. Rouvillois und S. Breit. „Novel 3D modeling methods for virtual fabrication and EDA compatible design of MEMS via parametric libraries“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 20.6 (2010), S. 064003. URL: <http://stacks.iop.org/0960-1317/20/i=6/a=064003> (siehe S. 38).
- [47] Coventor MEMS+. URL: <http://www.coventor.com/> (besucht am 08.03.2017) (siehe S. 38, 39, 43).
- [48] C. Zhang, Z. Jiang, D. Lu und T. Ren. „3D MEMS Design Method via SolidWorks“. In: *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Jan. 2006, S. 747–751. DOI: 10.1109/NEMS.2006.334887 (siehe S. 38).
- [49] X. Zhao, Y. Tan, G. Lu und X. Li. „IP library-based general and visualized MEMS device simulation and verification tool“. In: *2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Jan. 2010, S. 207–210. DOI: 10.1109/NEMS.2010.5592193 (siehe S. 38).

- [50] *IntelliSense IntelliSuite*. URL: <http://www.intellisense.com/product.aspx> (besucht am 09.07.2017) (siehe S. 39, 43).
- [51] W. Xiaoyu, Y. Linghui und X. Song. „Research on micro-electro-mechanical system computer aided design“. In: *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic Mechanical Engineering and Information Technology*. Bd. 3. Aug. 2011, S. 1556–1559. DOI: 10.1109/EMEIT.2011.6023393 (siehe S. 39).
- [52] *XFAB Open Platform Technologies for Inertial Sensors*. URL: <https://www.xfab.com/en/mems0/technology-innovation/open-platform-processes/inertial-sensors/> (besucht am 09.07.2017) (siehe S. 39).
- [53] J.V. Clark, D. Bindel, W. Kao u. a. „Addressing the needs of complex MEMS design“. In: IEEE, 2002, S. 204–209. ISBN: 978-0-7803-7185-9. DOI: 10.1109/MEMSYS.2002.984240. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/984240/> (besucht am 22.01.2018) (siehe S. 40).
- [54] N.R. Swart. „A design flow for micromachined electromechanical systems“. In: *IEEE Design & Test of Computers* 16.4 (Okt. 1999), S. 39–47. ISSN: 0740-7475. DOI: 10.1109/54.808207. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/808207/> (besucht am 22.01.2018) (siehe S. 40).
- [55] T. Mukherjee, Y. Zhou und G.K. Fedder. „Automated optimal synthesis of microaccelerometers“. In: IEEE, 1999, S. 326–331. ISBN: 978-0-7803-5194-3. DOI: 10.1109/MEMSYS.1999.746848. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/746848/> (besucht am 22.01.2018) (siehe S. 40).
- [56] T. Mukherjee und G.K. Fedder. „Design methodology for mixed-domain systems-on-a-chip [MEMS design]“. In: IEEE Comput. Soc, 1998, S. 96–101. ISBN: 978-0-8186-8448-7. DOI: 10.1109/IWV.1998.667129. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/667129/> (besucht am 22.01.2018) (siehe S. 40).
- [57] M. Meiners, R. Sommer und H. Graeb. „Schematic driven MEMS design“. In: *2012 International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. Sep. 2012, S. 117–120. DOI: 10.1109/SMACD.2012.6339431 (siehe S. 40).
- [58] J. Klaus, R. Paris und R. Sommer. „Systematic MEMS ASIC design flow using the example of an acceleration sensor“. In: *2016 13th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. Juni 2016, S. 1–4. DOI: 10.1109/SMACD.2016.7520730 (siehe S. 40).
- [59] J. Klaus, E. Schäfer, R. Paris, A. Frank und R. Sommer. „A contribution towards model-based design of application-specific MEMS“. en. In: *Integration, the VLSI Journal* 58 (Juni 2017), S. 454–462. ISSN: 01679260. DOI: 10.1016/j.vlsi.2017.03.014. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016792601730192X> (besucht am 25.08.2017) (siehe S. 40).

- [60] B. Baidya und T. Mukherjee. „Layout verification for mixed-domain integrated MEMS“. In: *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* 24.4 (Apr. 2005), S. 563–577. ISSN: 0278-0070. DOI: 10.1109/TCAD.2005.844100. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1411934/> (besucht am 22.01.2018) (siehe S. 40).
- [61] B. Baidya, S.K. Gupta und T. Mukherjee. „An extraction-based verification methodology for MEMS“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 11.1 (Feb. 2002), S. 2–11. ISSN: 10577157. DOI: 10.1109/84.982857. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/982857/> (besucht am 22.01.2018) (siehe S. 40).
- [62] S.K. Gupta, B. Baidya und T. Mukherjee. „Mems component extraction“. In: *Proceedings of the International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems*. San Juan, Puerto Rico, USA, 1999, S. 143–146. URL: <http://nsti.org/publications/MSM/99/pdf/M2205.pdf> (siehe S. 40).
- [63] S. Bellam und S.K. Gupta. „An Efficient Geometric Algorithm For Extracting Structural Elements to Facilitate Automated MEMS Extraction“. In: *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 3 (2003), S. 155–165 (siehe S. 40).
- [64] B. Baidya und T. Mukherjee. „Layout verification by extraction for micro total analysis systems“. In: *Technical Proceedings of the 2003 Nanotechnology Conference and Trade Show*. Bd. 1. 2003, S. 262–265. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/1cb2/68555813d9a357e366-37140e87833543597d.pdf> (siehe S. 40).
- [65] *Cadence PCell*. URL: https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en_US/documents/services/cadence-vcad-pcell-ds.pdf (besucht am 25.06.2017) (siehe S. 43).
- [66] *Coventor CoventorWare*. URL: <http://www.coventor.com/mems-solutions/products/coventorware/> (besucht am 09.07.2017) (siehe S. 44).
- [67] *Cadence QRC*. URL: https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/digital-design-and-signoff/silicon-signoff/quantus-qrc-extraction-solution.html (besucht am 09.07.2017) (siehe S. 44).
- [68] *Mentor Graphics Calibre xAct3D*. URL: https://www.mentor.com/products/ic_nanometer_design/verification-signoff/circuit-verification/calibre-xact-3d (besucht am 09.07.2017) (siehe S. 44, 53, 138).
- [69] M. Kamon und R. Iverson. „High accuracy parasitic extraction,“ in: *Electronic Design Automation For Integrated Circuits Handbook*. Hrsg. von L. Lavagno, L. Scheffer und G. Martin. Boca Raton: CRC Press, 2006. Kap. 26, S. 1–22. ISBN: 9780849330964 (siehe S. 51).

- [70] A. Hald, H. Marquardt, P. Herzogenrath, J. Scheible, J. Lienig und J. Seelhorst. „Full Custom MEMS Design: 2.5D Fabrication-Process Simulation for 3D Field-Solver-Based Circuit Extraction“. In: *IEEE Sensors Journal* 19.14 (Juli 2019), S. 5710–5717. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2906060 (siehe S. 52).
- [71] G. Gattere, F. Rizzini, L. Corso, A. Alessandri, F. Tripodi und I. Gelmi. „Experimental investigation of MEMS DRIE etching dimensional loss“. In: *2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. März 2018, S. 1–4. DOI: 10.1109/ISS.2018.8358123 (siehe S. 56).
- [72] A. Hald, J. Seelhorst, M. Reimann, J. Scheible und J. Lienig. „A novel polygon-based circuit extraction algorithm for full custom designed MEMS sensors“. In: *2016 13th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. Juni 2016, S. 1–4. DOI: 10.1109/SMACD.2016.7520719 (siehe S. 71, 83).
- [73] H. Toshiyoshi, T. Konishi, K. Machida und K. Masu. „A mixed-design technique for integrated MEMS using a circuit simulator with HDL“. In: *Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2013*. Juni 2013, S. 17–22 (siehe S. 115).
- [74] A. Hald, J. Seelhorst, P. Herzogenrath, J. Scheible und J. Lienig. „A new method for the analysis of movement dependent parasitics in full custom designed MEMS sensors“. In: *2017 14th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. Juni 2017, S. 1–4. DOI: 10.1109/SMACD.2017.7981568 (siehe S. 115).
- [75] A. Hald, P. Herzogenrath, J. Scheible, J. Lienig, J. Seelhorst und P. Brandl. „Full custom MEMS design: A new method for the analysis of motion-dependent parasitics“. In: *Integration* 63 (2018), S. 362–372. ISSN: 0167-9260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2018.02.004>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167926017306223> (siehe S. 115, 132).
- [76] *Bosch Sensortec*. 23. Nov. 2017. URL: <https://www.bosch-sensortec.com> (siehe S. 126).
- [77] V. Turau und C. Weyer. *Algorithmische Graphentheorie*. De Gruyter Studium. De Gruyter, 2015. ISBN: 9783110417272. URL: <https://books.google.de/books?id=JUw5jgEACAAJ> (siehe S. 141).



Werden Sie Autor im VDI Verlag!

Publizieren Sie in „Fortschritt- Berichte VDI“

Veröffentlichen Sie die Ergebnisse Ihrer interdisziplinären technikorientierten Spitzenforschung in der renommierten Schriftenreihe **Fortschritt-Berichte VDI**. Ihre Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte sind hier bestens platziert:

- **Kompetente Beratung und editorische Betreuung**
- **Vergabe einer ISBN-Nr.**
- **Verbreitung der Publikation im Buchhandel**
- **Wissenschaftliches Ansehen der Reihe Fortschritt-Berichte VDI**
- **Veröffentlichung mit Nähe zum VDI**
- **Zitierfähigkeit durch Aufnahme in einschlägige Bibliographien**
- **Präsenz in Fach-, Uni- und Landesbibliotheken**
- **Schnelle, einfache und kostengünstige Abwicklung**

PROFITIEREN SIE VON UNSEREM RENOMMEE!

www.vdi-nachrichten.com/autorwerden

vdI verlag

Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
 - 2 Fertigungstechnik
 - 3 Verfahrenstechnik
 - 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
 - 6 Energietechnik
 - 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
 - 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
 - 10 Informatik/Kommunikation
 - 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
 - 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
 - 15 Umwelttechnik
 - 16 Technik und Wirtschaft
 - 17 Biotechnik/Medizintechnik
 - 18 Mechanik/Bruchmechanik
 - 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
 - 21 Elektrotechnik
 - 22 Mensch-Maschine-Systeme
 - 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-347320-5