

Kurzfassung

Extrahierte Berechnungsmodelle aus Röntgen-Computertomographieaufnahmen bieten das Potential elektrische Untersuchungen an planaren Leitungsstrukturen im Multi-Gbit/s- und GHz-Bereich erheblich zu vereinfachen. Aufgrund der stetig steigenden Integrationsdichten auf Multi-Layer-Boards, Low Temperature Co-Fired Ceramic (LTCC) Substraten und Trägersubstraten für integrierte Schaltungen wird die Kontaktierung der Strukturen mit den Messeinrichtungen zunehmend erschwert, da aus Platz- und Kostengründen oftmals auf geeignete Messstellen zur Kontaktierung der zu prüfenden Strukturen verzichtet werden muss. Geeignete Anschlussstellen mit erforderlicher Bandbreite, um die Messungen mit herkömmlicher Messtechnik durchzuführen, fehlen so gänzlich.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren ermöglicht die Extraktion von Berechnungsmodellen, welche die zu untersuchenden Schaltungsstrukturen sehr gut nachbilden. Die hohe Genauigkeit der Nachbildung wird durch geometrische Vermessungen mit Röntgen-Computertomographieaufnahmen und zusätzlicher elektrischer Messungen zur Bestimmung der Materialparameter erzielt. Da die Berechnungsmodelle die zu untersuchenden Schaltungsstrukturen sehr gut nachbilden, können diese für computergestützte Untersuchungen der elektrischen Parameter herangezogen werden.

Die Übereinstimmung berechneter Ergebnisse auf Basis von extrahierten Berechnungsmodellen mit den realen elektrischen Eigenschaften der zu untersuchenden Teststrukturen sind direkt abhängig von der Genauigkeit ihrer Nachbildung. Stimmen Berechnungsmodell und reale Teststruktur sehr gut überein und beeinträchtigt die Berechnung nicht das Ergebnis, so ist theoretisch von einer sehr guten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten auszugehen. Da die Modelle auf geometrischen und elektrischen Messungen beruhen, die nur mit einer bestimmten Genauigkeit erfasst werden können, und von zusätzlichen

Unsicherheiten bei der Bestimmung der elektrischen Werte mit elektromagnetischer Feldberechnung auszugehen ist, weisen die extrahierten Modelle eine Unsicherheit auf, welche die elektrischen Eigenschaften des Modells zu denen der zu untersuchenden Struktur abweichen lässt.

In dieser Arbeit erfolgt eine qualitative und quantitative Analyse der Unsicherheit von extrahierten Berechnungsmodellen. Zusätzlich werden Faktoren benannt und genauer erörtert, die Einfluss auf die Unsicherheit der elektrischen Eigenschaften der Modelle nehmen. Abschließend wird ein Gleichungssatz gegeben, der eine Schätzung der Unsicherheit der charakteristischen Impedanz und Streuparameter von Streifenleitungsmodellen ermöglicht sowie eine Bestimmung der erforderlichen CT-Voxelauflösung für die Extraktion zulässt.

1 Einleitung

1.1 Elektrische Analysen an planaren Schaltungen und Multi-Layer-Boards

Produktionsvariationen und -fehler sind bei der Fertigung von planaren Schaltungsstrukturen auf Multi-Layer-Boards, Low Temperature Co-Fired Ceramic (LTCC) Substraten und Trägersubstraten für integrierte Schaltungen nicht auszuschließen, weshalb die elektrischen Eigenschaften der gefertigten Schaltungsstrukturen von den Produktionsvorgaben abweichen können. Die korrekte Funktion der gefertigten Schaltungen lässt sich daher nicht direkt gewährleisten und muss mithilfe zusätzlicher elektrischer Untersuchungen überprüft werden. Aufgrund der gestiegenen Integrationsdichten sind solche notwendige Untersuchungen zunehmend erschwert durchführbar, speziell bei der Untersuchung elektrischer Signale im Gbit/s- und GHz-Bereich. Insbesondere durch Bauteilgehäuse verdeckte oder im Innern der Boards vergrabene Messstellen können oftmals nicht direkt und mit notwendiger Bandbreite mit den Messeinrichtungen verbunden werden. In diesen Fällen ist dann meist der Einsatz von speziell gefertigten Messhilfsmitteln wie Testfixtures oder Testcoupons notwendig, um die Untersuchungen durchführen zu können.

Testfixtures fungieren als Adapter, die geeignete Anschlüsse zur Verbindung der Teststrukturen mit den Messeinrichtungen bieten. Durch ihre eigenen elektrischen Eigenschaften wird jedoch das Messergebnis beeinträchtigt, so dass meist aufwendige Verfahren zur Messwertkorrektur erforderlich sind. Eines dieser Verfahren ist das De-Embedding, bei dem die elektrischen Eigenschaften der Testfixtures zunächst einzeln durch eine zusätzliche Messung bestimmt und im Anschluss aus der gesamten Messung herausgerechnet werden. Weisen die Testfixtures planare Streifenleitungen als Anschlussstellen auf, besteht das Problem, dass diese nicht direkt mit den koaxialen Anschlüssen der Messgeräte verbunden werden können. Eine Bestimmung der elektrischen Eigenschaften der

Testfixtures ist dann meist nur unter hohem Aufwand möglich. Zur Vereinfachung werden dann oft auch ihre elektrischen Eigenschaften mithilfe von Simulationen abgeschätzt. Diese können allerdings aufgrund von Produktionsvariationen und -fehlern stark von den realen elektrischen Eigenschaften abweichen und somit das Messergebnis beeinträchtigen.

Eine weitere Technik zur Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von planaren Schaltungen ist der Einsatz von Testcoupons. Hier wird versucht die Teststruktur samt geeigneter Anschlussstellen nachzubilden. Aufgrund von Produktionsvariationen und -fehlern – wie beispielsweise bei Multi-Layer-Board-Substraten die Substrathöhe, der Harzgehalt und die Ausrichtung der Glasfasern oder bei elektrischen Leitungen die Breite, die Höhe und die Rauheit des metallischen Materials – muss von einer Abweichung des Messergebnisses ausgegangen werden. Das Messergebnis ist daher lediglich eine Näherung. Ebenso wie bei der Nutzung von Testfixtures müssen zusätzlich die Anschlussstellen aus dem Messergebnis korrigiert werden, wodurch der zusätzliche Aufwand für ein De-Embedding meist nicht erspart bleibt. Nur im Fall, dass die elektrischen Eigenschaften, wie Dämpfung und Phase der Anschlussstellen, das eigentliche Messergebnis nur geringfügig beeinflussen, kann unter Umständen auf ein De-Embedding verzichtet werden.

Probleme aufgrund unzugänglicher Messpunkte oder unrealisierbarer Kontaktierungen lassen sich bei der computergestützten Untersuchung auf Basis von extrahierten Berechnungsmodellen aus Röntgen-Computertomografien für elektrische Feldberechnungen inhärent ausschließen. Mittels geeigneter computergestützter Operationen können für die Untersuchung interessierende Bereiche schnell ausgewählt, gegebenenfalls von störenden Bereichen separiert und mit virtuellen Messpunkten versehen werden. Die benötigten elektrischen Größen lassen sich dann im Anschluss anhand einer elektromagnetischen Feldberechnung direkt bestimmen. Ein besonderer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es keine Testfixtures zum Anschluss der Untersuchungsobjekte und keine physikalischen Nachbildungen in Form von Testcoupons erfordert. Die Untersuchungsergebnisse unterliegen somit nicht zusätzlichen Produktionsvariationen oder -fehlern, die bei der Fertigung der Testfixtures oder Testcoupons entstehen. Lediglich die Qualität der extrahierten Modelle bestimmt die

Genauigkeit der elektrischen Ergebnisse. Je genauer die Berechnungsmodelle und Berechnungen sind, umso präziser lassen sich die elektrischen Eigenschaften der zu untersuchenden Teststrukturen prognostizieren.

Faktoren, welche die Qualität von extrahierten Berechnungsmodellen aus Röntgen-Computertomographieaufnahmen verschlechtern, können dem Aufnahmeprozess mit einem Computertomographen, der Modellextraktion, der Messung und Modellierung von zusätzlichen Materialeigenschaften und der elektromagnetischen Feldberechnung zugeordnet werden. Sie beeinflussen die geometrische Genauigkeit, die Detailgenauigkeit und die Modellierung der elektrischen Materialeigenschaften der modellierten Strukturen. Artefakte, die im Aufnahmeprozess, Extraktionsprozess oder bei der diskreten EM-Feldberechnung entstehen, vermindern zusätzlich die Modellqualität. Gemeinsam verschlechtern diese Störfaktoren die Unsicherheit, mit der eine elektrische Größe anhand eines extrahierten CT-CAD-Modells bestimmt werden kann. Diese sollte insbesondere für elektrische Untersuchungen ausreichend klein sein, um aussagekräftige und brauchbare Ergebnisse zu erhalten.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Extraktion von Modellen aus Röntgen-Computertomographieaufnahmen, die weiterhin als extrahierte CT-CAD-Modelle bezeichnet werden, beschrieben. Die Modelle dienen der Erzeugung von Berechnungsmodellen für elektromagnetische Feldberechnungen, um die elektrischen Parameter der extrahierten Strukturen zu ermitteln. Zur Untersuchung der Genauigkeit der CT-CAD-Modelle erfolgt eine qualitative und quantitative Analyse der Unsicherheit ihrer elektrischen Parameter, wie die charakteristische Impedanz und Streuparameter, von extrahierten Streifenleitungsstrukturen. Die Betrachtung und Angabe der einzelnen Unsicherheiten erfolgt unter Berücksichtigung des Leitfadens „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ des internationalen Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) [1] beziehungsweise in der deutschen Fassung DIN V ENV 13005 „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ [2]. Zur Analyse werden Auswirkungen aufgrund der parasitären Eigenschaften des Röntgenaufnahmesystems, der Rekonstruktion von CT-Aufnahmen, der Extraktion der Modellgeometrien, die Genauigkeit der Modellierung von Materialeigenschaften und die Unsicherheit der Berechnung von

elektrischen Größen betrachtet. Die Ergebnisse dienen der Entwicklung eines Gleichungssatz zur Schätzung der Unsicherheit der charakteristischen Impedanz und Streuparameter von extrahierten CT-CAD-Modellen und eröffnen die Möglichkeit, die erforderliche CT-Voxelauflösung für die Extraktion zu bestimmen.

1.2 Extraktion elektrischer Modelle von Leitungsstrukturen im Gbit/s- und GHz-Bereich auf Basis der Röntgen-Computertomographie

Das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren zur Extraktion von Leitungsstrukturen auf Basis der Röntgen-Computertomographie wurde erstmals in [3] und Erweiterungen in [4–11] veröffentlicht. Eine grafische Veranschaulichung des Verfahrens gibt Abbildung 1.1. Grundprinzip des Verfahrens ist die Extraktion von CT-CAD-Modellen aus Röntgen-Computertomographien, die der Erstellung von Berechnungsmodellen für elektromagnetische Feldberechnungen dienen. Die Modelle bestehen aus einer Modellgeometrie und einem Datensatz mit elektrischen Materialparametern. Die Materialparameter beschreiben die erforderlichen elektromagnetischen Eigenschaften der Modellgeometrie für die Feldberechnung. Zur Erzeugung der Modellgeometrie wird ein drei-dimensionales Abbild, der sogenannte CT-Voxeldatensatz, von der Geometrie des Testobjekts mittels der Röntgen-Computertomographie erstellt. Der CT-Voxeldatensatz liefert die Eingangsdaten für die Objekterkennung mit geeigneten Bildverarbeitungsalgorithmen. Die Ergebnisse beschreiben die Modellgeometrie in Form von Punktwolken, Polygonen, Flächenvektoren oder geometrische Grundprimitive und können von der nachfolgenden CAD-Geometrieerzeugung direkt in entsprechende CAD-Objekte umgesetzt werden. Die CAD-Objekte bilden die Leitungsstrukturen im Allgemeinen mithilfe von Polygonzügen, grundprimitive Elemente – wie Quader, Zylinder oder Kugeln – ab. Ein Beispiel ist in Abbildung 1.2 gegeben, die aus einer Röntgen-Computertomographie, Abbildung 1.2 (a), ein CT-extrahiertes BGA-Gehäuse (englisch Ball Grid Array Package)

als CT-CAD-Modell, Abbildung 1.2 (b), zeigt. Das Modell bildet die Bonddrähte des Gehäuses als 3D Polygonzüge ab, die Mikrostreifenleitungen und Vias des Gehäuses werden als extrudierte Flächen ihrer Umrisse abgebildet. Je nach erforderlicher Modellgetreue können die Mikrostreifenleitungen und Vias auch durch grundprimitive Elemente wie Kugeln, Quader und Zylinder modelliert werden. Die in Abbildung 1.2 (b) gezeigten Löt-kugeln (englisch Solder Balls) sind beispielsweise durch Kugeln modelliert. Ein Vorteil bei der Modellierung aus grundprimitiven Elementen ist ein geringerer Speicherbedarf für die Modelle und Rechengitter zur EM-Feldberechnung. Letzterer Aspekt hat ebenfalls eine verkürzte Rechenzeit zur Folge. Nachteilig ist jedoch, dass das Modell aufgrund der Vereinfachung einer Verkürzung [12] unterliegt.

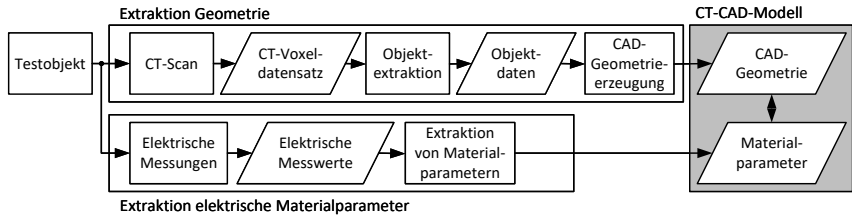


Abbildung 1.1: Veranschaulichung des Prinzips zur Extraktion von CT-CAD-Modellen für EM-Feldberechnungen.

Zur Durchführung der EM-Feldberechnung werden die elektromagnetischen Eigenschaften der Materialien, aus denen die Strukturen des Testobjekts bestehen, benötigt und den CAD-Objekten als Materialparameterdatensatz angefügt. Mit dem Ziel einer möglichst genauen Modellierung werden die Materialparameter vorzugsweise aus einer elektrischen Messung am Testobjekt ermittelt, siehe Abbildung 1.1. Beispielsweise wird die Leitfähigkeit der Leitungsstrukturen anhand von zusätzlicher Messungen an Teststrukturen auf dem Testobjekt mit einem Milli-Ohm-Meter [8] ermittelt oder die Permittivität von dielektrischen Materialien aus Messungen mit einem Vektornetzwerkanalysator oder mittels der Zeitbereichsreflektometrie bestimmt [13, 14]. Eine ausführliche Beschreibung zur Ermittlung der Materialparameter erfolgt in Kapitel 3.

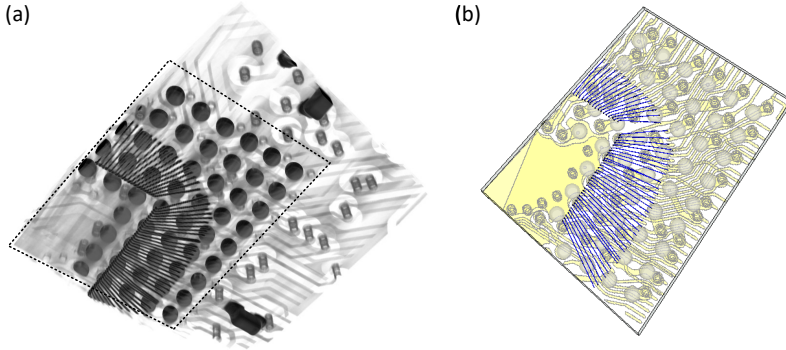


Abbildung 1.2: Beispiel zu einem extrahierten CT-CAD-Modell von einem BGA-Gehäuse: (a) CT-Aufnahme mit eingezeichnetem Bereich des extrahierten BGA-Gehäuses und (b) extrahiertes CT-CAD-Modell des BGA-Gehäuses. Abbildungen (a) und (b) basieren auf [3, 5–8].

1.3 Modelle und Realität

Der Modellbegriff ist im Allgemeinen ein weit umfassender Begriff, der je nach Anwendungsfall und Nutzergruppe eine unterschiedliche Bedeutung hat. Anwendungsfälle sind beispielsweise für Lehrzwecke [15], bei denen komplexe Sachverhalte mit vereinfachten Modellen veranschaulicht werden, zur Erkenntnisgewinnung von ungeklärten komplexen Sachverhalten in der Biologie [16], der Physik [17], wie mit Atommodellen oder Modellen von Gestirnen, zur Darstellung komplexer logischer Zusammenhänge in der Mathematik oder Informatik – zum Beispiel durch Petri-Netzen, Flussdiagrammen und UML-Modellen. In den Ingenieurwissenschaften werden Modelle insbesondere zur Entwicklung neuer Produkte genutzt. Alle Anwendungsfälle haben gemein, dass ein komplexes reales Problem mithilfe eines Modells zur besseren Fassbarkeit und Veranschaulichung beschrieben werden kann.

In dieser Arbeit wird die Definition des Modellbegriffs nach Weisberg, Morrison, Tversky und Frigg [12, 17–19] berücksichtigt, welche Modelle in physische Modelle, mathematische Modelle und Berechnungsmodelle eingruppiert. Mit dem Hintergrund die extrahierten Modelle für eine EM-Feldberechnung zu nutzen, sind in dieser Arbeit mathematische Modelle

und Berechnungsmodelle von besonderem Interesse. Mathematische Modelle werden in Form von algebraischen Gleichungen angegeben. Berechnungsmodelle werden meist aus einer Kombination an Gleichungen und Algorithmen beschrieben. Zu dieser Gruppe gehören auch Modelle, die für Berechnungen anhand der Finite-Elemente-Methode (FEM) [20–22], Finite-Differenz-Zeitbereichs-Methode (FDTD) [23, 24] oder Momentenmethode (MoM) [22, 25] genutzt werden. Bei diesen Methoden wird im Allgemeinen eine Geometrie, die mit Blick auf diese Arbeit als extrahiertes CT-CAD-Modell vorliegt, in kleine Teilgebiete zerlegt, die ein Rechengitter darstellen. Diesem Gitter werden weitere Informationen zugeordnet, wie Koordinate, Grenzbedingungen und Materialparameter, um aufwändige Differentialgleichungen beziehungsweise Randwertprobleme numerisch zu lösen. Für die EM-Feldberechnung sind dies die Maxwellschen-Gleichungen [20, 22, 24]. Eine ausführlichere Beschreibung über die EM-Feldberechnung mittels der FEM und FDTD erfolgt in Kapitel 2.4 und in Kapitel 3.6.

Je nach Bedarf und vorliegender Information unterliegen Modelle meist einer Verkürzung. Bei dieser enthält ein Modell gegenüber einem vollständigen Modell nicht alle Attribute, um die realen Eigenschaften des Zielsystems abzubilden. Die Verkürzung nimmt Einfluss auf die Genauigkeit der gesuchten Ergebnisse und ist je nach Anwendungsfall entsprechend festzulegen [12, 17]. Für Streifenleitungen [26–28] werden beispielsweise unterschiedlich komplexe Modellformen herangezogen, um Netzwerke mit gerechtfertigtem Aufwand zu berechnen. Im einfachsten Fall, wie der Gleichstromfall oder für sehr geringe Frequenzen, wird die Leitung als rein ohmscher Widerstand modelliert; siehe Abbildung 1.3 (a). Sind in Spannungsversorgungsnetzwerken ferner Störungen durch Schaltregler zu berücksichtigen, wird bis zu Frequenzen von einigen Megahertz ein Modell herangezogen das zusätzlich die Leitungsinduktivität mit berücksichtigt. In diesem Fall wird die Impedanz der Leitung gemäß Abbildung 1.3 (b) modelliert.

Werden Streifenleitungen zur Übertragung von hochratigen digitalen Signalen verwendet, so ist aufgrund von Reflexionen auch der Kapazitäts- und Ableitungsbelag von Interesse. In diesem Fall wird die Streifenleitung anhand eines Modells gemäß Abbildung 1.3 (c) modelliert. Je nach

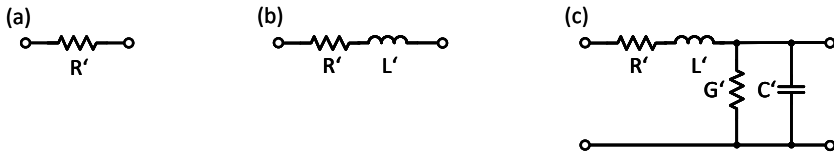


Abbildung 1.3: Modellierung einer Mikrostreifenleitung für unterschiedliche Anwendungsfälle: (a) für den Gleichstromfall, (b) für niederfrequente Anwendungen und für Filteranwendungen in Spannungsversorgungsnetzwerken und (c) für Hochfrequenzanwendungen und digitale Schaltungen im Gbit/s-Bereich.

Komplexität des Modells und benötigter Genauigkeit wird die charakteristische Impedanz einer Streifenleitung unterschiedlich bestimmt. Im einfachsten Fall werden Näherungen gemäß [28] zur Bestimmung genutzt oder für eine genauere Betrachtung die Parameter mittels einer quasi-statischen Feldsimulation [29] bis hin zu einer 3D FEM Feldsimulation [22] bestimmt.¹ Bei letzterer werden weitere wichtige Details inhärent mitberücksichtigt, wie die exakte Leitungsgeometrie, Abstrahlung etc. Sind weiterhin Materialverluste von Interesse, so kann das Modell weiter der Realität angeglichen werden, zum Beispiel durch eine Berücksichtigung der Oberflächenrauheit.

1.4 Genauigkeit der Simulationsmodelle

Mit dem Ziel ein reales System zu modellieren, um dessen elektrischen Eigenschaften, wie die charakteristische Impedanz oder S-Parameter per EM-Feldberechnung zu ermitteln, ist zu berücksichtigen, dass ein Modell die Eigenschaften eines Zielsystems lediglich abbildet. Je nach Modellierungsaufwand und daraus resultierende Verkürzung des Modells bildet dieses die zu untersuchenden Parameter nur mit unterschiedlicher Qualität ab [31–35]. Eine Übersicht der erforderlichen Schritte zur Berechnung der elektrischen Werte auf Basis einer CT-CAD-Modellextraktion und EM-Feldberechnung zeigt Abbildung 1.4.

¹Siehe hierzu auch die ausführlichen Beschreibungen in [30].

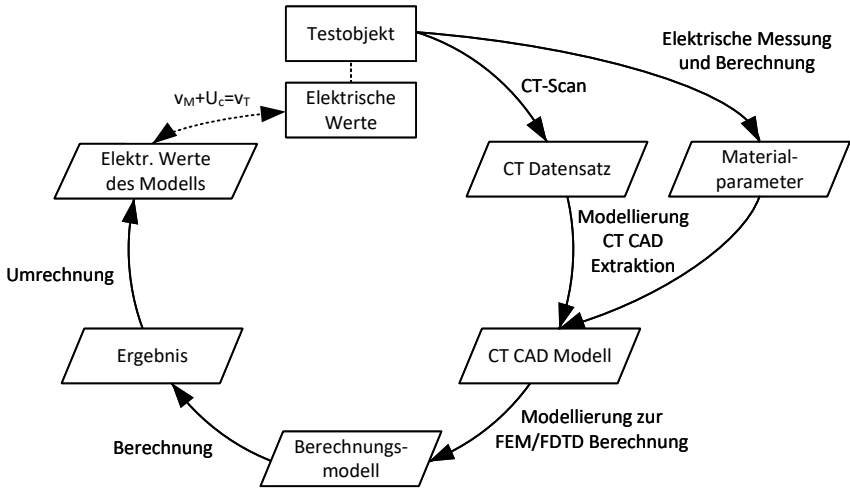


Abbildung 1.4: Schritte zur Berechnung elektrischer Parameter von Testobjekten auf Basis einer CT-CAD-Modellextraktion und EM-Feldberechnung.

Zu Berücksichtigen ist, dass jeder erforderliche Schritt einen Einfluss auf die Unsicherheit des Ergebnisses nimmt. Ursachen liegen in der Unsicherheit der einzelnen Teilergebnisse, aufgrund der Röntgen-Computertomographie, Ermittlung der elektrischen Materialparameter, Erstellung des Berechnungsmodells und EM-Feldberechnung selbst sowie einer möglichen Umrechnung der berechneten Feldwerte in die gewünschten elektrischen Werte.

Unsicherheiten aufgrund der Röntgen-Computertomographie sind beispielsweise die Größe des Brennflecks, der Brennfleckdrift, nicht korrigierbare Artefakte, eine räumliche Diskretisierung durch den Röntgendeckter, Temperatureinflüsse etc. [36–41]. Die Materialparameter besitzen ebenfalls eine Unsicherheit aufgrund elektrischer Messungen und erforderlicher numerischer Berechnungen zu ihrer Ermittlung [10, 13, 42]. Die