

# Untersuchungen zur Impedanzreduktion an MA-Kavitäten durch Kurzschließen von Ringkernen

Seminarausarbeitung Projektseminar Beschleunigertechnik von Rainer Stellnberger,

**Julian Buschbaum, Benjamin Lars Northe**

Betreuer: Jens Schweickhardt, M.Sc.

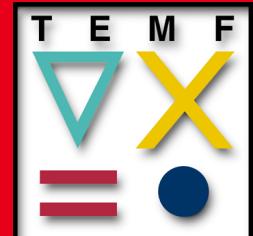
Fachgebiet Beschleunigertechnik

|

Prof. Dr.-Ing. Harald Klingbeil



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT





# Zusammenfassung

Die Shuntimpedanz von breitbandigen Kavitätensystemen kann je nach Beschleunigungszyklus einen hohen Einfluss auf den Teilchenstrahl haben und diesem Energie entziehen. Im Rahmen des Projektseminars wurde untersucht, inwieweit sich die effektive Impedanz von Kavitäten reduzieren lässt, indem eine oder mehrere zusätzliche Kurzschlusswindungen um die in den Kavitäten verbauten Ringkerne geschlossen wird. Dabei wurden verschiedene geometrische Parameter mittels Messungen und CST-Simulationen getestet und verglichen, mit dem Ziel, eine möglichst effektive Reduktion der Impedanz zu erreichen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Theorie . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	1
1.3 Magnetic Alloy Ringkerne . . . . .	2
<b>2 Messaufbau</b>	<b>3</b>
2.1 Testbox . . . . .	3
2.1.1 Anfangsmessung . . . . .	4
2.1.2 Modifikation der Ringkernhalterung . . . . .	5
2.1.3 Entwurf der Kurzschlusschienen . . . . .	6
2.2 Messdurchführung . . . . .	8
<b>3 Simulation</b>	<b>9</b>
3.1 Motivation . . . . .	9
3.2 Modellierung . . . . .	9
3.2.1 Bestehendes Testbox- und Ringkernmodell . . . . .	9
3.2.2 Kurzschlüsse . . . . .	10
3.2.3 Realitätsgetreue Anpassungen . . . . .	11
3.2.3.1 Ringkern . . . . .	12
3.2.4 Erweiterung des Modells . . . . .	13
3.3 Durchführung . . . . .	14
3.3.1 Einstellungen in CST und Wahl des Numerischen Lösers . . . . .	14
3.3.2 Variation der Kurzschlussparameter . . . . .	14
<b>4 Gegenüberstellung und Ergebnisse</b>	<b>17</b>
4.1 Gegenüberstellung der Simulations und Messergebnisse . . . . .	17
4.2 Auswertung der Kurzschlussanordnungen . . . . .	19
4.2.1 Anzahl der Kurzschlüsse . . . . .	20
4.2.2 Breite der Kurzschlüsse . . . . .	22
4.2.3 Länge der Kurzschlüsse . . . . .	24
4.2.4 Dicke der Kurzschlüsse . . . . .	26
4.3 Einfluss im Leerlauf befindlicher Schienen auf die Ringkernimpedanz . . . . .	28
4.4 Feldbilder . . . . .	28
<b>5 Fazit und Ausblick</b>	<b>31</b>
5.1 Fazit . . . . .	31
<b>A Anhang</b>	<b>33</b>
A.1 Gegenüberstellung aller Simulationen und Messergebnisse . . . . .	33
A.2 Gegenüberstellung aller Feldbilder der Kurzschlussanordnungen aus der CST Simulation .	37



# Abbildungsverzeichnis

1	Abmessungen der Testbox, alle Längenangaben in Millimeter . . . . .	3
2	Geöffnete Testbox mit Holzkonstruktion als Halterung für den MA-Ringkern. . . . .	4
3	Kurzschlüsse um den Ringkern mittels Drähten, deren Enden mit Lüsterklemmen verbunden sind. . . . .	4
4	Halterung aus einem Polygon, welches auf ein Holzkreuz aufgesetzt wurde mit sichtbarem Anschlag. . . . .	5
5	Eingebrachter Ringkern auf der Halterung bestehend aus einem Polygon, welches auf ein Holzkreuz aufgesetzt wird. . . . .	5
6	Kurzschlusschiene mit einer Höhe in z-Richtung von 160 mm ,einer Breite in x-Richtung von 30 mm und einer Blechdicke von 1 mm. . . . .	6
7	Alle für Messungen angefertigte Kurzschlusschienen. . . . .	7
8	Messstand mit Netzwerk-Analysator, welcher mit der geschlossenen Testbox verbunden ist.	8
9	Modell der Testbox in CST . . . . .	9
10	Modell der Einkopplungsstange mit elektrischer Isolation . . . . .	10
11	Gesamtdarstellung der Modellierung von Testbox und Ringkern nach Denys Bast [Bast, 2017]	10
12	Modellierung eines Kurzschluss (a) als Torus, (b) als Schiene und (c) in gefertigter Ausführung. . . . .	11
13	Anpassung des Simulationsmodells an den realen Aufbau (a) Bügel über Einkopplung, (b) Kupferzyylinder an der Rückwand und (c) die hölzerne Halterung des Ringkerns. . . . .	12
14	Ringkernmodell mit innerem Eisenring . . . . .	12
15	RLC-Ersatzschaltbild für die Testbox Modellierung mit Eingebrachtem Ringkern als Last. .	13
16	Erweiterung der Testbox um die Holzkreuzhalterung und den Polygonzug zur Befestigung der Kurzschlüsse . . . . .	14
17	Gegenüberstellung der Simulation der Box mit Halterung aus Kreuz und Polygon zur entsprechenden Messung. . . . .	17
18	Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz ohne Kurzschlüsse	18
19	Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz für einen Kurzschluss. . . . .	18
20	Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz für eine Anzahl von sieben Kurzschläßen . . . . .	19
21	Unterschiedliche Anzahlen an montierten Kurzschläßen an verschiedenen Positionen. .	20
22	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz über der Frequenz für verschiedene Anzahlen an Kurzschläßen . . . . .	21
23	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz mit verschiedenen Anzahlen an Kurzschläßen bei 5, 10 und 20 MHz. . . . .	21
24	Jeweils ein montierter Kurzschluss mit verschiedenen Breiten. . . . .	22
25	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Breiten der Kurzschlüsse. . .	23
26	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz bei 5, 10 und 20 MHz. Links: 1KS, rechts: 2KS.	24
27	Jeweils ein montierter Kurzschluss mit verschiedenen Längen. . . . .	24
28	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Längen der Kurzschlüsse. . .	25
29	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz bei 5, 10 und 20 MHz. Links: 1KS, rechts: 2KS.	26
30	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Dicken der Kurzschlüsse. . .	27

31	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz über der Frequenz für verschiedene Anzahlen an offenen Kupferschienen. . . . .	28
32	Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns ohne Kurzschluss und mit einem Kurzschluss. . . . .	29
33	Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns mit einem Kurzschluss und mit acht Kurzschlüssen. . . . .	30
34	Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns mit einem Kurzschluss der Breite 50 mm und mit zwei Kurzschlüssen der Breite 20 mm. . .	30
35	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung ohne Ringkern. . . .	33
36	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern ohne Kurzschlüsse. . . . .	33
37	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit einem Kurzschluss. . . . .	34
38	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit zwei Kurzschlüssen. . . . .	34
39	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit drei Kurzschlüssen. . . . .	34
40	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit vier Kurzschlüssen. . . . .	35
41	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit fünf Kurzschlüssen. . . . .	35
42	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit sechs Kurzschlüssen. . . . .	35
43	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit sieben Kurzschlüssen. . . . .	36
44	Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit acht Kurzschlüssen. . . . .	36
45	Feldbild des Ringkerns ohne Kurzschlüsse aus der CST Simulation. . . . .	37
46	Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit jeweils einem Kurzschluss verschiedener Breiten aus der CST Simulation. . . . .	37
47	Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit jeweils zwei Kurzschlüssen verschiedener Breiten aus der CST Simulation. . . . .	38
48	Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit drei und vier Kurzschlüssen aus der CST Simulation. . . . .	38
49	Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit fünf und sechs Kurzschlüssen aus der CST Simulation. . . . .	39
50	Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit sieben und acht Kurzschlüssen aus der CST Simulation. . . . .	39

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
MA	magnetic alloy
RK	Ringkern
GSI	Gesellschaft für Schwerionenforschung
KS	Kurzschluss
BNC	Bayonet Neill Concelman: Für Oszilloskope verwendeter Koaxialstecker
CST	Computer Simulation Technology
PE	Polyethylen
RLC	Netzwerk aus Widerstand, Induktivität und Kapazität



# Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung und Einheit
$\omega$	Kreisfrequenz
$Z_{rk}$	Impedanz des MA-Ringkerns
$L_{rk}$	Induktivität des MA-Ringkerns
$R_{rk}$	Wirkwiderstand des MA-Ringkerns
$\underline{\mu}_r$	Komplexe, dissipative Permeabilitätskonstante
$\mu'$	
$\mu''$	
$N$	Anzahl der Ringkerne
$d$	Ringkerndicke
$r_i$	Innendurchmesser eines Ringkerns
$r_o$	Außendurchmesser eines Ringkerns
$\underline{\varepsilon}_r$	Komplexe, dissipative Dielektrizitätskonstante
$\underline{Z}_{ges}$	Gemessene Impedanz an der Testbox
$R_{box}$	Wirkwiderstand des RLC-Modells der Testbox
$L_{box}$	Induktivität des RLC-Modells der Testbox
$C_{box}$	Kapazität des RLC-Modells der Testbox
$a_{max}$	Maximale relative Abweichung eines Messparameters
$a_{percent}$	Maximale relative Abweichung eines Messparameters(Prozent)



# 1 Einleitung

## 1.1 Theorie

Bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung(GSI) werden in der Gruppe Ring-RF Systems unter anderem Barrier Bucket Systeme entwickelt. Diese können zur Modifikation der longitudinalen Strahldynamik, wie etwa zum Zusammenführen oder Verdichten eines oder mehrerer Strahl-Bunches verwendet werden. Das Grundprinzip der Barrier Bucket Systeme besteht darin, Teilchen zwischen zwei Potentialbarrieren zu begrenzen. Diese Potentialbarrieren können verschiedene Formen aufweisen, häufig werden einzelne Sinus-Pulse verwendet [Harzheim u. a., 2016] [Lee u. Ng, 1997]. Durch Änderung der Barrieren, wie etwa der Variation des Abstandes zwischen einzelnen Barrieren, können somit die Teilchen verdichtet oder verteilt werden. Die Barrier Bucket Systeme verwenden unter anderem magnetische Ringkerne als Last. Vorteil ist, dass mit diesem Aufbau ein Abstimmen der Resonanzfrequenz möglich ist (siehe Kapitel 4 in [Klingbeil u. a., 2015] bzw. Kapitel 2 in [Bast, 2017]).

Die MA(magnetic alloy)-Ringkerne weisen dabei eine charakteristische Impedanz auf, welche nicht einer idealen Spule entspricht, sondern vielmehr ein dissipatives Verhalten zeigt. Eine genauere Herleitung kann in [Klingbeil u. a., 2015] gefunden werden und liefert folgenden Zusammenhang.

$$Z_{rk} = R_{rk} + j\omega L_{rk} \quad (1)$$

$$L_{rk} = \frac{Nd\mu'}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (2)$$

$$R_{rk} = \omega L_{rk} \frac{\mu''}{\mu'} \quad (3)$$

## 1.2 Aufgabenstellung

Die Impedanz der Ringkerne wirkt sich auf den Teilchenstrahl im Beschleuniger aus. Diese Auswirkung soll möglichst reduziert werden, wenn keine Beschleunigung vorliegen soll.

Die Aufgabe des Projektseminars besteht deshalb darin, zu analysieren, in wie weit das Kurzschließen der MA-Ringkerne innerhalb der Kavität die Impedanz dieser verringern kann. Dazu sind mehrere Parameter der Kurzschlüsse, sowie deren Anzahl zu untersuchen.

Damit die Ergebnisse auch mit anderen Parametern untersucht werden können, wird der gesamte Aufbau samt der Halterung für den Ringkern, sowie der Kurzschlüsse, ausgehend von dem bereits bestehenden Modell aus der Bachelorarbeit von Denys Bast [Bast, 2017], in CST modelliert.

Abschließend werden sowohl die Simulationsergebnisse, als auch die Messergebnisse unter Änderung der Parameter gegenübergestellt. Dadurch kann eine präferierte Anordnung zum Kurzschließen der MA-Ringkerne bestimmt werden. Diese Schritte werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

---

### **1.3 Magnetic Alloy Ringkerne**

---

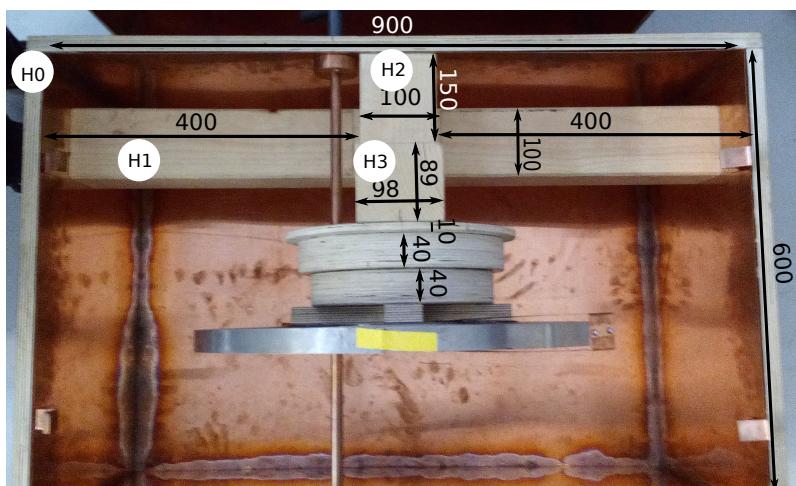
Die MA-Ringkerne bestehen aus zwei Teilen. Aus einem inneren Edelstahlring, der als Halterung dient und als nicht magnetisch anzusehen ist, sowie aus einem äußeren Teil, welcher das magnetische Material darstellt. Das magnetische Material ist in diesem Fall Nanoperm [MAGNETEC, 2018]. Durch den inneren Ring sind einige Bohrungen durchgeführt, an denen der Kern innerhalb einer Kavität montiert werden kann.

## 2 Messaufbau

### 2.1 Testbox

Der für Messungen verwendete Testaufbau wurde aus einem vorangegangenen Projekt an der GSI übernommen [Harzheim u. a., 2016]. Ziel des Testaufbaus ist es, eine reproduzierbare Vermessung des Einflusses der MA-Ringkerne auf die Impedanz einer Einkopplung zu erreichen. Dadurch soll eine Abschätzung des Einflusses auf die Strahlimpedanz in der Kavität, sowie die Impedanz, welche der **Verstärker** am Eingang der Kavität sieht, ermöglicht werden. Im Rahmen der Bachelorarbeit von Denys Bast am Fachgebiet Beschleunigertechnik [Bast, 2017] wurde für diese Testbox ein Simulationsmodell erstellt. Dieses wird in Abschnitt 3 behandelt.

Die Abmessungen der Testbox sind Abbildung 1 zu entnehmen.



**Abbildung 1:** Abmessungen der Testbox, alle Längenangaben in Millimeter.

Mit:

$$H_0 = 600 \text{ mm}$$

$$H_1 = 350 \text{ mm}$$

$$H_2 = 445 \text{ mm}$$

$$H_3 = 595 \text{ mm}$$

Die Testbox selbst besteht aus einem auf Rollen gelagerten Holzrahmen. Dieser ist von innen komplett mit Kupferblech der Dicke 1 mm überzogen. Der Überzug schirmt die Messungen in der Testbox von äußereren Einflüssen ab. Außerdem wird damit für alle Messungen eine identische Umgebung geschaffen, womit diese am Ende vergleichbar bleiben. Um später Ringkerne einbringen zu können, befindet sich eine Konstruktion aus Holz in der Box, welche als Halterung dient. Diese besteht aus einem Quer- und einem senkrechten Balken, an dem die eigentliche Halterung angeschraubt werden kann. Diese Halterung ist rund und entspricht mit 260 mm dem Innendurchmesser der Ringkerne. Diese können dadurch passgenau eingehängt werden. Etwas versetzt zur Mitte der Halterung ist durch ein Loch das Einkopplungsrohr geführt, welches mit einem Netzwerk-Analysator verbunden werden kann, um die Feldimpedanz zu messen. Abbildung 2 zeigt das Innere der Testbox mit eingehängtem Ringkern.



**Abbildung 2:** Geöffnete Testbox mit Holzkonstruktion als Halterung für den MA-Ringkern.

### 2.1.1 Anfangsmessung

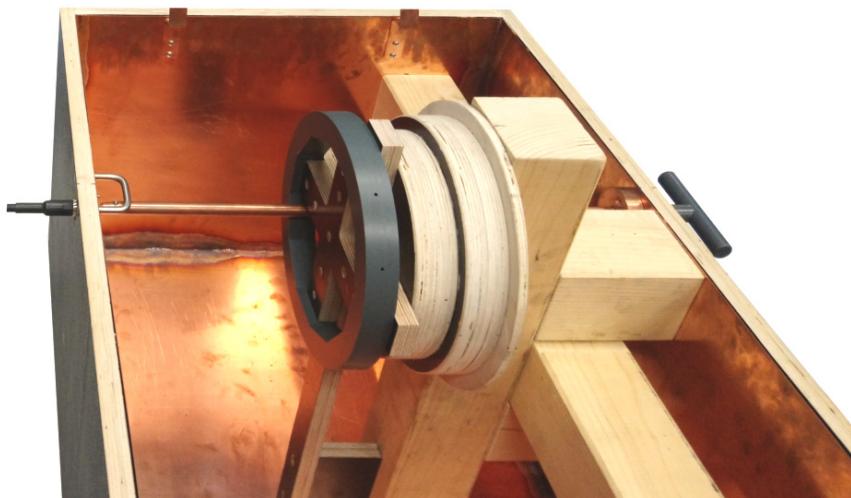
Um eine grobe Tendenz und ein Gefühl für den Messaufbau zu erreichen wurden zunächst einige Messungen an der unmodifizierten Testbox ausgeführt. Für die ersten Kurzschlussversuche wurden im Test einfache Kupferdrähte mit Lüsterklemmen verwendet. Die Kupferdrähte sind isoliert, sodass diese keinen Kontakt zum Ringkern herstellen. Lediglich die Enden in den Klemmen wurden für zum Erreichen einer besseren Verbindung abgeschliffen. Diese Kupferdrähte lassen sich problemlos durch die Bohrungen an der Innenseite des Ringkerns (siehe Abbildung 3) führen. Das fixiert die Position, lässt aber dennoch Spielraum um die Länge zu verändern.



**Abbildung 3:** Kurzschlüsse um den Ringekern mittels Drähten, deren Enden mit Lüsterklemmen verbunden sind.

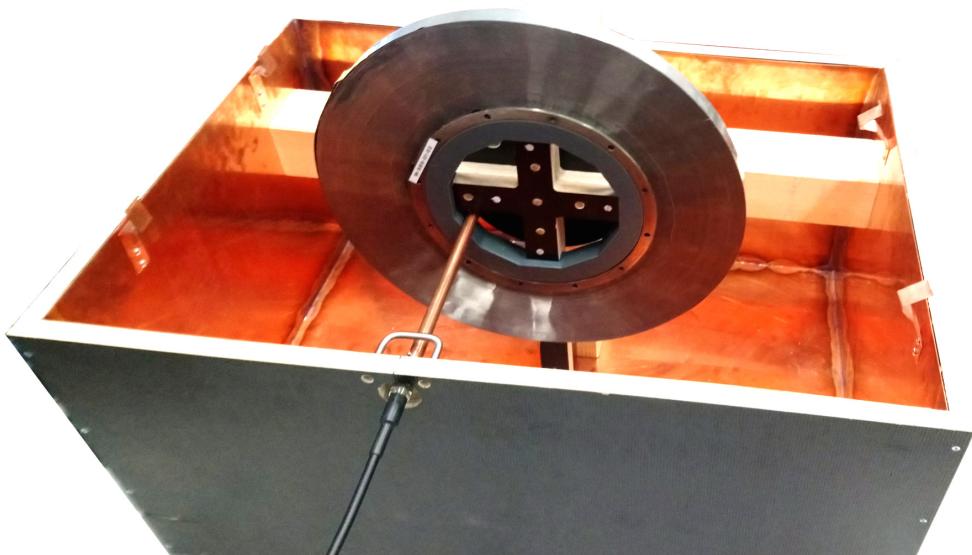
## 2.1.2 Modifikation der Ringkernhalterung

Damit reproduzierbare Messungen durchgeführt werden können, sind mehrere Anforderungen an den Aufbau der Testbox zu stellen. Zunächst muss die Möglichkeit bestehen, den MA-Ringkern in die Testbox einzubringen, sodass sich dieser bei jeder Messung an der gleichen Position befindet. Des weiteren ist eine Möglichkeit zu schaffen, bei der die Kurzschlüsse an festgelegten Stellen um den Ringkern zu führen sind, ohne dass diese den Kern dabei berühren. Um das zu erreichen wurde die Halterung wie in Abbildungen 4 und 5 modifiziert.



**Abbildung 4:** Halterung aus einem Polygon, welches auf ein Holzkreuz aufgesetzt wurde mit sichtbarem Anschlag.

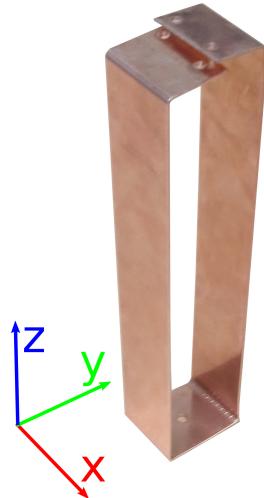
Auf der Innenseite des inneren Rings befindet sich ein Polygonzug. Durch diesen Polygonzug können Kurzschlussbügel reproduzierbar an festgelegten Positionen platziert werden. Dazu wurden an den Flächenmittelpunkten der inneren Polygonflächen Bohrungen mit einem M4 Gewinde versehen, an dem Kurzschlüsse montiert werden können. Abbildung 5 zeigt den Polygonzug mit montiertem Ringkern.



**Abbildung 5:** Eingebrachter Ringkern auf der Halterung bestehend aus einem Polygon, welches auf ein Holzkreuz aufgesetzt wird.

### 2.1.3 Entwurf der Kurzschlusschienen

Der Entwurf der Kurzschlusschienen gewährleistet, dass diese unabhängig von der Form stets an der erforderlichen Position mit der Verschraubung am Polygon angebracht werden können. Aus diesem Grund wurden die Schienen genau an die Geometrie des Polygonzugs angepasst. Abbildung 6 zeigt beispielhaft eine der gefertigten Kurzschlusschienen.



**Abbildung 6:** Kurzschlusschiene mit einer Höhe in z-Richtung von 160 mm, einer Breite in x-Richtung von 30 mm und einer Blechdicke von 1 mm.

Dazu wurden die Kurzschlüsse jeweils aus einem länglichen Stück Kupferblech gefertigt. Diese wurden so gebogen, dass die untere Breite (bei  $z=0$ ) in y-Richtung mit 30 mm genau der Breite des Polygonzugs entspricht. Mittig auf dieser Seite befindet sich ein Loch mit dem Durchmesser 4 mm durch das Blech. Durch dieses kann die Schiene mit dem Polygon verschraubt werden. Zum Schließen der Schienen auf der Außenseite befinden sich an beiden Enden des Kupferblechs jeweils zwei Löcher, welche nach dem Biegen mit Schrauben und Muttern verbunden werden können. Die übrigen Dimensionsgrößen der Schienen sind folglich variabel die Positionen.

Die getesteten Formen der Kurzschlüsse sind in mehrere Variationsparameter unterteilt:

- Höhe der Kurzschlüsse in z-Richtung
- Breite der Kurzschlüsse in x-Richtung
- Blechdicke der Kurzschlüsse

Für die Messung wurde eine ganze Reihe an Kurzschlusschienen angefertigt, damit für jede Form der Schienen unterschiedliche Anzahlen an Kurzschläßen gemessen werden können und mehrere Stufen für jeden Variationsparameter vorhanden sind. Ein Bild aller Kurzschlusschienen ist in Abbildung 7 zu sehen.



**Abbildung 7:** Alle für Messungen angefertigte Kurzschlusschienen.

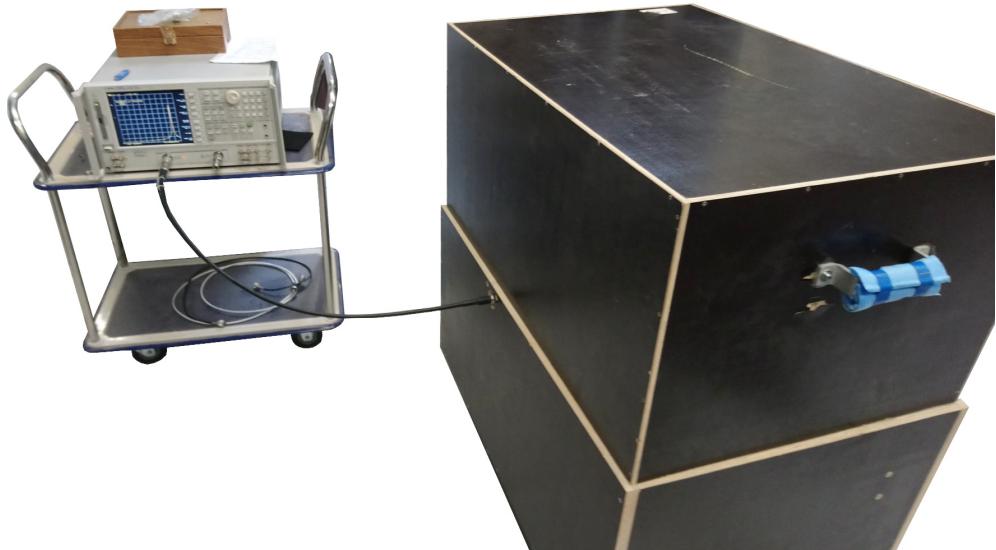
Insgesamt wurden folgende Kurzschlüsse angefertigt:

- 8x 160 mm Höhe in z-Richtung, 30 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 200 mm Höhe in z-Richtung, 30 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 250 mm Höhe in z-Richtung, 30 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 160 mm Höhe in z-Richtung, 20 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 160 mm Höhe in z-Richtung, 50 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 160 mm Höhe in z-Richtung, 30 mm Breite in x-Richtung und 2 mm Blechdicke

Augehend davon wurden insgesamt 18 verschiedene Messungen durchgeführt, wobei immer nur eine Form der Schienen gleichzeitig montiert wurde.

## 2.2 Messdurchführung

Die Messungen werden mit einem Agilent 8753ES [Agilent, 2000] Netzwerk-Analysator durchgeführt, der durch ein BNC-Kabels mit der Einkopplung verbunden wird. Um eine unverfälschte Messung zu gewährleisten wird ein verwindungsfestes Kabel genutzt. Somit werden Phasenfehler, welche durch Lageänderung des Kabels nach der ursprünglichen Kalibrierung entstehen können, vermieden. Bei der Kalibration selbst ist es sehr wichtig das verwendete Kalibrationskit und in diesem Fall den Parameter  $S_{11}$  am NA auszuwählen. Für die Visualisierung wurde der Parameter  $Z_{refl}$  eingestellt. Abbildung 8 bildet den Aufbau ab.



**Abbildung 8:** Messstand mit Netzwerk-Analysator, welcher mit der geschlossenen Testbox verbunden ist.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass immer Imaginärteil und Realteil der Impedanz getrennt aufgenommen werden, damit bei der späteren Simulation das RLC-Modell der Testbox überprüft werden kann. Für die Abschließende Auswertung des Effekts der Kurzschlüsse wird allerdings nur der Absolutwert der Impedanz für den Vergleich herangezogen. Der Netzwerk-Analysator nimmt den Frequenzbereich mit einer Auflösung von insgesamt 1601 Messpunkten auf. Der aufgenommene Messbereich erstreckt sich von 30 kHz bis 100 MHz. Daraus ergibt sich eine Messauflösung nach Gleichung 4.

$$\frac{100 \text{ MHz} - 0.03 \text{ MHz}}{1601} \approx 62.5 \text{ kHz} \quad (4)$$

# 3 Simulation

## 3.1 Motivation

Um die Einflüsse verschiedener Kurzschlussanordnungen und -ausführungen schon im Vorfeld abschätzen zu können und ein erstes Gefühl für den Einfluss der Kurzschlüsse zu bekommen, wurde die Testanordnung zunächst ausgiebig mit der Simulationssoftware CST simuliert.

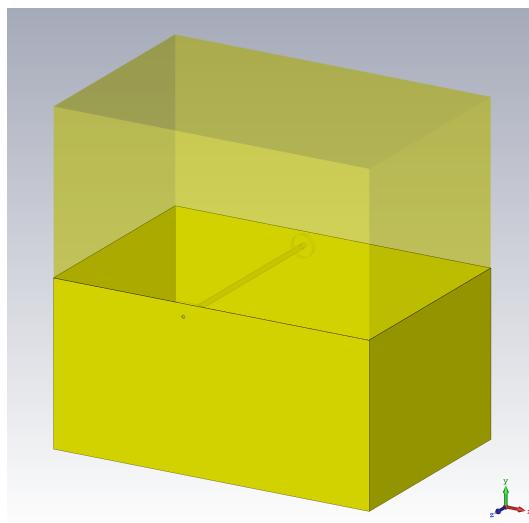
Die Simulationen dienten als Vorbereitung, um bei den Messungen präziser vorgehen zu können und gezielt Messungen durchzuführen. Zuletzt wurden die Simulationsergebnisse dann mit den Messergebnissen gegenübergestellt und verglichen, um deren Richtigkeit zu überprüfen.

## 3.2 Modellierung

### 3.2.1 Bestehendes Testbox- und Ringkernmodell

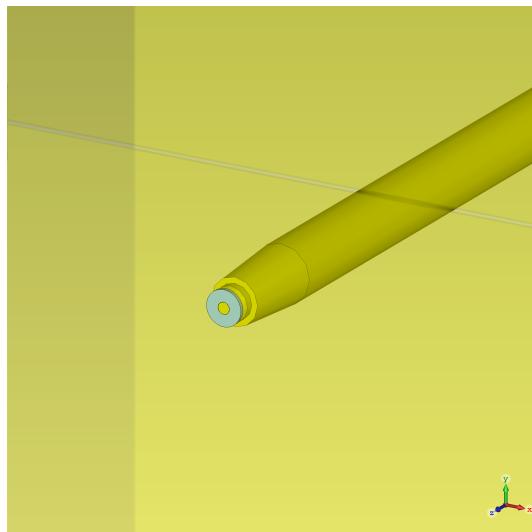
Als Grundlage für die Simulation der Testbox und des Ringkerns dient das Simulationsmodell von Testbox inklusive Ringkern aus der Bachelorarbeit von Denys Bast [Bast, 2017].

Die Außenwände der Testbox sind geometrisch sehr genau den Abmessungen des realen Teststandes entsprechend modelliert, als Material wird hierfür reines Kupfer verwendet, wie es in der Datenbank von CST zu finden ist. Die leere Box ist in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9:** Modell der Testbox in CST

In Abbildung 10 ist die Signaleinkopplung der Testbox zu sehen. Diese ist als Hohlzylinder aus Kupfer modelliert und geometrisch genau am realen Vorbild orientiert. Die Stange ist an der hinteren Wand elektrisch mit der Box verbunden und an der Vorderseite durch einen elektrisch nicht leitfähigen Ring aus Polyethylen (PE, CST Datenbank) von der Box isoliert. Hierdurch wird erreicht, dass die Stange als Hin- und die Boxaußenwände als Rückleiter für Signale dienen. Der Übergang zwischen Testbox, PE und Stange ist planar ausgeführt, um einen Signalport für die Simulation darzustellen.

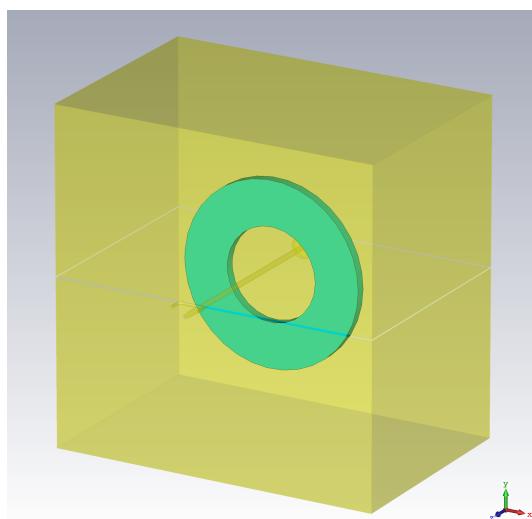


**Abbildung 10:** Modell der Einkopplungsstange mit elektrischer Isolation

Der Ringkern ist als einfacher Hohlzylinder mit den geometrischen Abmessungen des realen Vorbilds modelliert. Dem realen Aufbau entsprechend ist er zentral im Testboxmodell, allerdings freischwebend und ohne die hölzerne Halterung, modelliert.

Ein grundlegender Aspekt der Arbeit von Denys Bast [Bast, 2017] ist, die magnetische Permeabilität des Ringkernmaterials in der Simulation mit dem realen Material in Übereinstimmung zu bringen. Die dabei gewonnenen Daten wurden anfänglich übernommen.

Abbildung 11 bildet den modellierten Aufbau der Testbox mit Ringkern ab, wie er in [Bast, 2017] beschrieben wird.



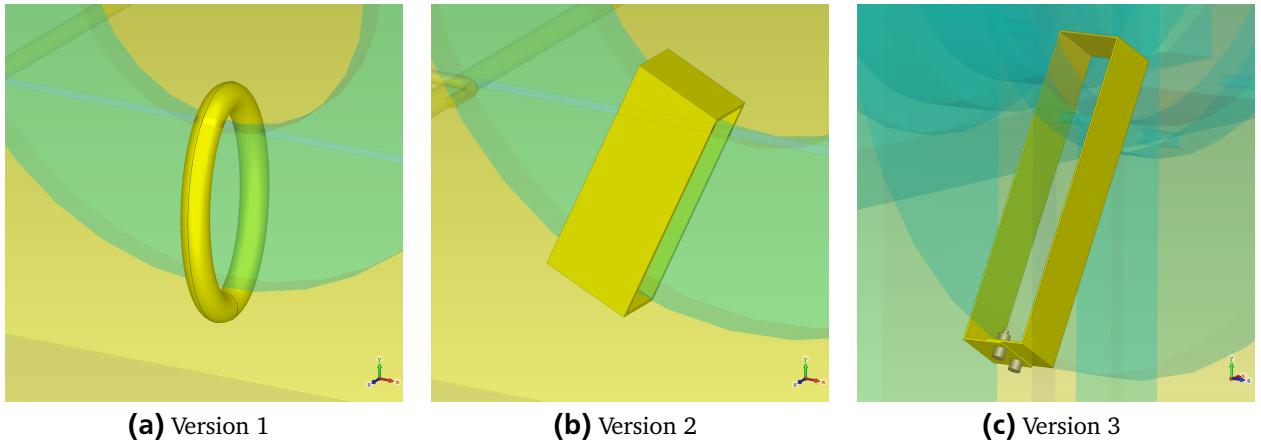
**Abbildung 11:** Gesamtdarstellung der Modellierung von Testbox und Ringkern nach Denys Bast [Bast, 2017]

### 3.2.2 Kurzschlüsse

Die für die Parameteranalyse dieser Arbeit benötigten Kurzschlüsse sind in CST in verschiedenen, komplexen Ausführungen modelliert.

Die erste Version stellt ein einfacher, ellipsenförmiger Torus dar, wie er in Abbildung 12(a) abgebildet ist. Als Material für die Simulation wird Kupfer aus der Datenbank von CST verwendet.

Die in Kapitel 2.1 beschriebenen Verbesserungen der Kurzschlüsse für eine erhöhte Reproduzierbarkeit der Messungen, sind so in CST modelliert. Abbildung 12(b) zeigt die Umformung des einfachen Torus zu einem schienenförmigen Kurzschluss. Die finale Version, die letztlich für die Messungen benutzt wurde, ist in Abbildung 12(c) zu sehen. Die einfache Kupferschiene ist geometrisch an die verwendeten Kurzschlüsse angepasst und um die Verbindungsschrauben erweitert.



**Abbildung 12:** Modellierung eines Kurzschlusses (a) als Torus, (b) als Schiene und (c) in gefertigter Ausführung.

Um eine Parameteranalyse durchzuführen und die Simulationsergebnisse mit den Messungen gegenüberzustellen, ist die finale Version in den verschiedenen Ausführungen, wie sie aus Kapitel 2.1.3 hervorgehen, nachgebildet.

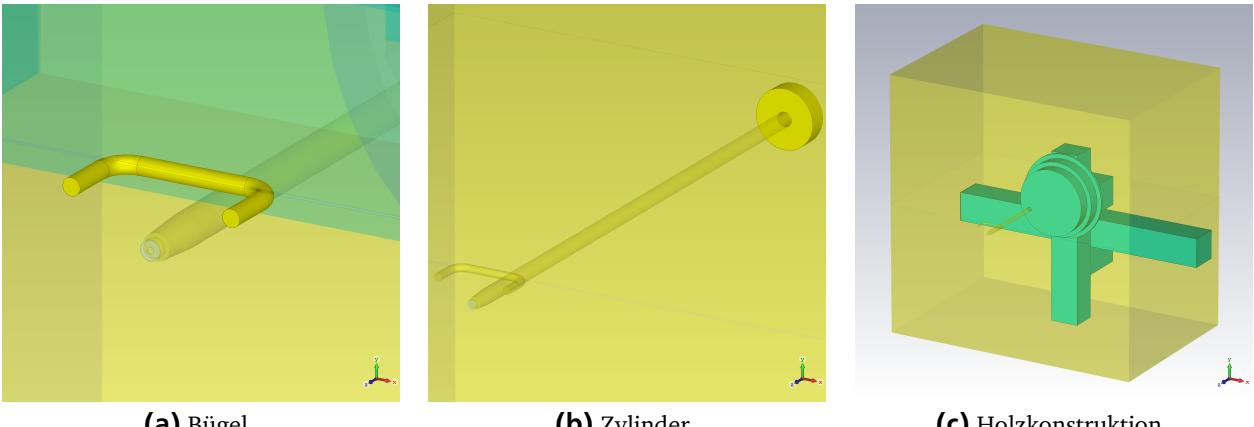
### 3.2.3 Realitätsgerechte Anpassungen

Das bestehende Modell wurde im Laufe der Arbeit weiter ausarbeitet, um die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messungen zu erhöhen. Die nachfolgenden Komponenten wurden in das CST-Modell übernommen, da aufgrund ihrer di-/elektrischen Eigenschaften ein Einfluss auf die Simulation zu erwarten ist.

↑ Verweis auf Simulationsergebnisse, wenn Kapitel vorhanden. ↑

Wie auf den Bildern der Testbox in Kapitel 2 hervorgeht, befindet sich oberhalb der Einkopplungsstange an der Anschlussseite ein metallischer Bügel. Er ist möglichst exakt in CST nachgebildet (siehe Abb. 13(a)). Am Ende der Einkopplungsstange an der Rückwand ist eine zylinderförmige, kupferne Halterung für die Stange montiert, sie ist nach Abbildung 13(b) modelliert.

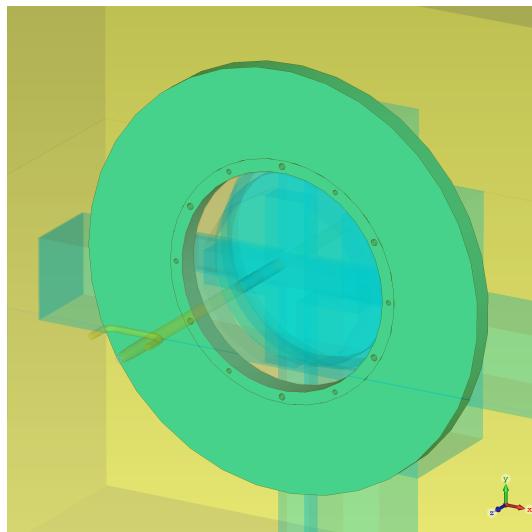
Zuletzt wurde für diese Arbeit auch die Holzkonstruktion in CST übernommen, die als Halterung für die Ringkerne in der Testbox dient (siehe Abb. 13(c)). Dabei wurden die Holzkreise mit einem dissipativen, durch Austesten und die Messung Anpassen bestimmten  $\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon'_r(\omega) - i\varepsilon''_r(\omega)$  modelliert, da es sich hierbei nicht um die Standardholzmodellierung von CST handelt, wie sie für die Holzbalken verwendet wird, sondern ein geschichtetes Pressspanholz verwendet wird.



**Abbildung 13:** Anpassung des Simulationsmodells an den realen Aufbau (a) Bügel über Einkopplung, (b) Kupferzyliner an der Rückwand und (c) die hölzerne Halterung des Ringkerns.

### 3.2.3.1 Ringkern

Die echten Ringkerne, wie sie bei der GSI benutzt werden, bestehen nicht nur aus dem MA-Material, sondern besitzen einen Innenkreis aus Eisen, der zur Montage dient. Da das Eisen andere magnetische Eigenschaften als das MA-Material besitzt, wurde dies in das Modell übernommen. Die neue Modellierung des Ringkerns mit innerem Eisenring ist in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14:** Ringkernmodell mit innerem Eisenring

Des Weiteren wurde für eine bessere Übereinstimmung von Simulation und Messung die magnetische Permeabilität des Ringkernmaterials den Messungen entsprechend aktualisiert. Die Anpassung der Materialparameter basiert auf der Arbeit von Denys Bast [Bast, 2017] und den theoretischen Grundlagen nach [Klingbeil, 2008].

Die Testbox und der Ringkern können in ein Ersatzschaltbild überführt und damit der Impedanzverlauf analysiert werden. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 15 dargestellt, dabei wurde die Vorlage aus [Bast, 2017] um einen Widerstand ergänzt, der die Verluste der Anordnung nachbildet und für eine Dämpfung der Impedanzamplitude in Resonanz verantwortlich ist. Damit soll das hochfrequente Verhalten der

Ersatzschaltung und der Messung besser in Übereinstimmung gebracht werden.

Die Werte für die elektrischen Komponenten der Ersatzschaltung betragen:

$$R_{box} = 16,46 \text{ k}\Omega$$

$$C_{box} = 6,55 \text{ pF}$$

$$L_{box} = 528,55 \text{ nH}$$

Die Impedanz dieser Anordnung bestimmt sich nach

$$\underline{Z}_{ges} = \frac{\underline{R}_{box} \cdot (\underline{Z}_{rk} + j\omega L_{box})}{\underline{R}_{box} + (\underline{Z}_{rk} + j\omega L_{box}) \cdot (1 + j\omega R_{box} C_{box})}. \quad (5)$$

Daraus lässt sich nun die Impedanz des Ringkerns  $Z_{rk}$  bestimmen

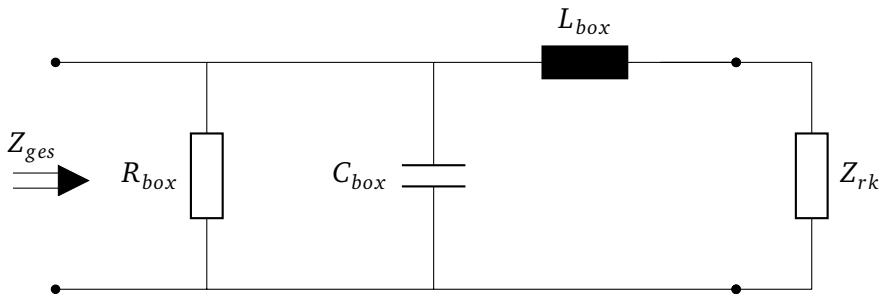
$$\underline{Z}_{rk} = \frac{\underline{Z}_{ges} \cdot (R_{box} + j\omega L_{box} - \omega^2 \cdot R_{box} L_{box} C_{box}) - j\omega R_{box} L_{box}}{R_{box} - \underline{Z}_{ges} \cdot (1 + j\omega R_{box} C_{box})}. \quad (6)$$

Wird für  $\underline{Z}_{ges}$  die Impedanz aus der Messung eingesetzt, kann die Ringkernimpedanz dieser Messung bestimmt werden.

Nach [Klingbeil, 2008] kann diese als Reihenschaltung eines Widerstands  $R_{rk}$  und einer Induktivität  $L_{rk}$  als  $\underline{Z}_{rk} = R_{rk} + j\omega L_{rk}$  betrachtet werden. Für das dissipative  $\underline{\mu}_r = \mu' - j\mu''$  des Ringkerns wird in [Bast, 2017] angeführt, wie sich mittels der Ersatzschaltung  $\mu'$  und  $\mu''$  berechnen lassen:

$$\mu' = \frac{L_{rk} \cdot 2\pi}{d \cdot \ln \frac{r_a}{r_i}} \quad (7)$$

$$\mu'' = \frac{R_{rk} \cdot \mu'}{\omega \cdot L_{rk}}. \quad (8)$$

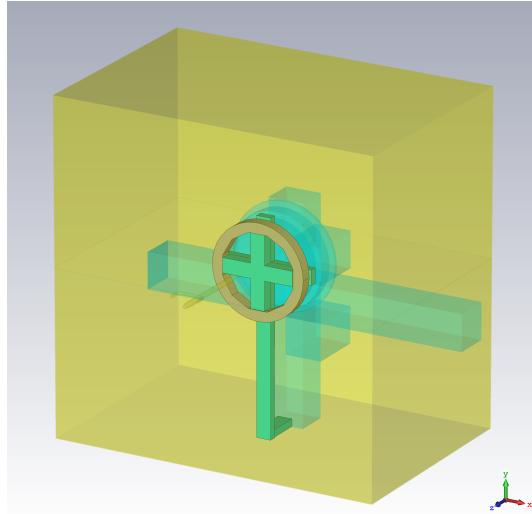


**Abbildung 15:** RLC-Ersatzschaltbild für die Testbox Modellierung mit Eingebrachtem Ringkern als Last.

Ausgehend vom angepassten, dissipativen  $\underline{\mu}_r$  kann nun die Simulation aktualisiert werden. Dazu werden die bestimmten Werte für  $\mu'$  und  $\mu''$  als Materialparameter in CST hinterlegt.

### 3.2.4 Erweiterung des Modells

Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, wurde die Testbox für die einfache Montage der Kurzschlüsse und die erhöhte Reproduzierbarkeit der Messungen modifiziert und um ein kreuzförmiges Gestell aus Holz, sowie einen nichtleitenden Ring mit einem Polygonzug als Innenkreis erweitert (Geometrie und Beschreibung siehe Kapitel 2). Diese Modifikationen sind mit CST geometrisch genau nachgebildet (siehe Abb. 16). Für das Holzkreuz wurden die selben Materialparameter verwendet, die für die Holzkreise hinterlegt sind, da es sich auch hierbei das Pressspanholz handelt.



**Abbildung 16:** Erweiterung der Testbox um die Holzkreuzhalterung und den Polygonzug zur Befestigung der Kurzschlüsse

### 3.3 Durchführung

#### 3.3.1 Einstellungen in CST und Wahl des Numerischen Lösers

Die Simulation in CST wurde weitgehend mit den Einstellungen und dem Löser durchgeführt, wie sie in [Bast, 2017] beschrieben werden. Einige wichtige Punkte werden an dieser Stelle kurz aufgegriffen, um ein Wiederholen der Simulationen zu ermöglichen.

Die Modelle wurden mit dem Frequency Domain Solver von CST simuliert, der die Maxwell Gleichungen im Frequenzbereich numerisch behandelt, da es sich bei der Testbox um ein resonantes Konstrukt handelt und es sich bei den betrachteten Messdaten (Impedanzverläufe) um elektrische Parameter im Frequenzbereich handelt.

Die räumliche Diskretisierung der Modelle erfolgt mit einer adaptiven Gitterverfeinerung von Tetraedern und Curved-Elements, die besonders für die Approximation gekrümmter Strukturen geeignet sind.

Der betrachtete Frequenzbereich der Simulation wurde 0.01 MHz bis 100 MHz gewählt, da der Frequenzbereich in dem die Ringkerne betrieben werden niedriger ist und dies der für den Impedanzverlauf der Testbox relevante Bereich ist, weil die Resonanz zwischen 80 MHz bis 90 MHz liegt.

Der numerische Löser ist mit einer Ordnung von 2 gewählt und die Genauigkeit für die Lösung der Gleichungssysteme auf  $10^{-4}$  eingestellt.

Im Anschluss an die numerische Berechnung der elektromagnetischen Felder im Frequenzbereich wird in einem Post-Processing-Schritt die Eingangsimpedanz des Modells aus dem Streuparameter  $S_{11}$  berechnet

$$Z = Z_0 \cdot \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}, \quad (9)$$

mit  $Z_0 = 50 \Omega$ .

#### 3.3.2 Variation der Kurzschlussparameter

Für die Gegenüberstellung und Vergleichbarkeit von Simulation und Messung werden die Kurzschlüsse mit den gleichen Variationen der zu untersuchenden Parameter (siehe Kapitel 2) und der Messung

entsprechenden Anordnung am Ringkern nachgebildet.

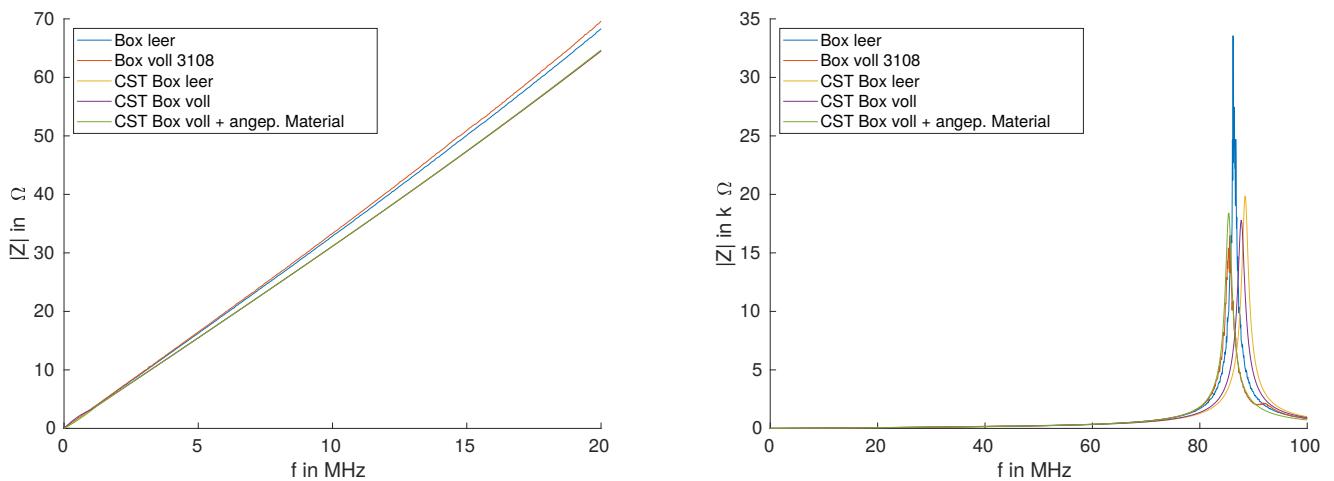
Die Bilder der verschiedenen Anordnungen und Kurzschlussausführungen sind in Kapitel 4 zu finden. In Abbildung 21 ist dabei die Variation in der Anzahl der Kurzschlüsse dargestellt, die um den Ringkern angebracht sind. Abbildung 24 zeigt die Simulation der verschiedenen Breiten und in Abbildung 27 sind die verschiedenen Ringkernlängen zu sehen. Für die Simulation und Messung der Breiten-, Längen- und Dickenvariation wurde immer die in den Abbildungen gezeigte Position für einen Kurzschluss gewählt, der zweite Kurzschluss wurde dem ersten gegenüber angebracht.



# 4 Gegenüberstellung und Ergebnisse

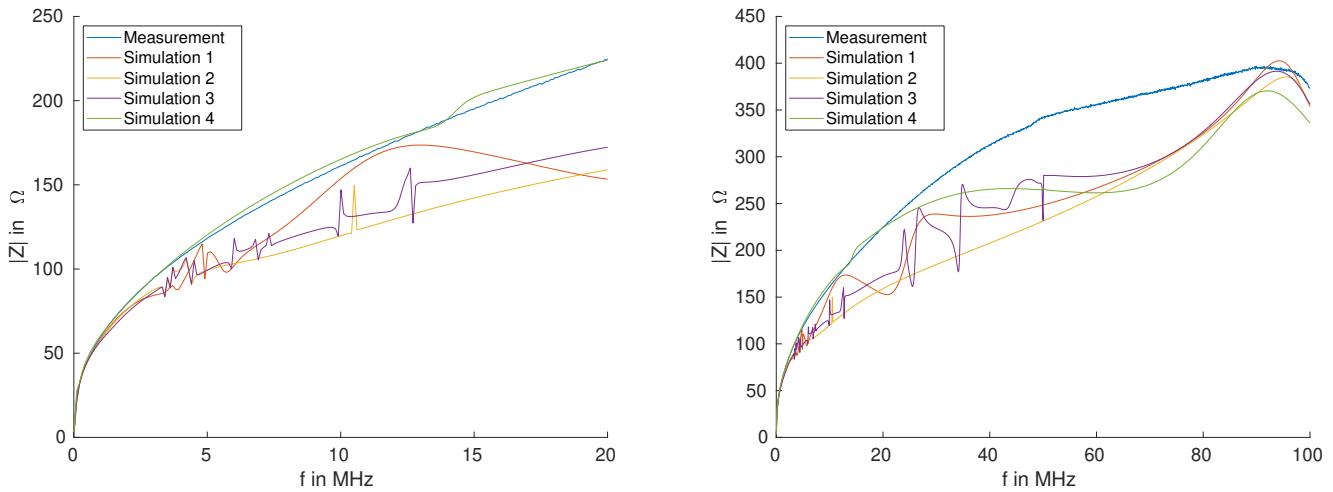
## 4.1 Gegenüberstellung der Simulations und Messergebnisse

Ausgehend von den beschriebenen Modellierungsschritten kann nun eine sichere Evaluierung der Kurzschlussanordnungen angesetzt werden. Dabei können die Messungen sowie das Simulationsmodell zur Kreuzvalidierung verwendet werden, sodass Mess- und Simulationsfehler weitestgehend auszuschließen sind. Dazu wurde das Simulationsmodell, nach den in Absatz 3 versehenen Anpassungen zunächst einmal zur Referenz mit den Messungen verglichen. Dazu wird zunächst die Testbox ohne Ringkern, jedoch mit fertigem Halterungsaufbau gegenübergestellt. Abbildung 17 zeigt diese Gegenüberstellung.



**Abbildung 17:** Gegenüberstellung der Simulation der Box mit Halterung aus Kreuz und Polygon zur entsprechenden Messung.

Als nächstes in das Modell mit eingesetztem Ringkern zu evaluieren. Dazu wird der Ringkern für die Simulation auf der Position um den Trovidur Ring gelegt, um die reale Box genau abzubilden. Der Aufbau ist in Abbildung 14 gezeigt worden. Auch hierbei wird wieder die gemessene Impedanz an der Einkopplung direkt mit der Impedanz aus der Simulation gegenübergestellt. Diese Auswertung ist in Abbildung 18 zu sehen.

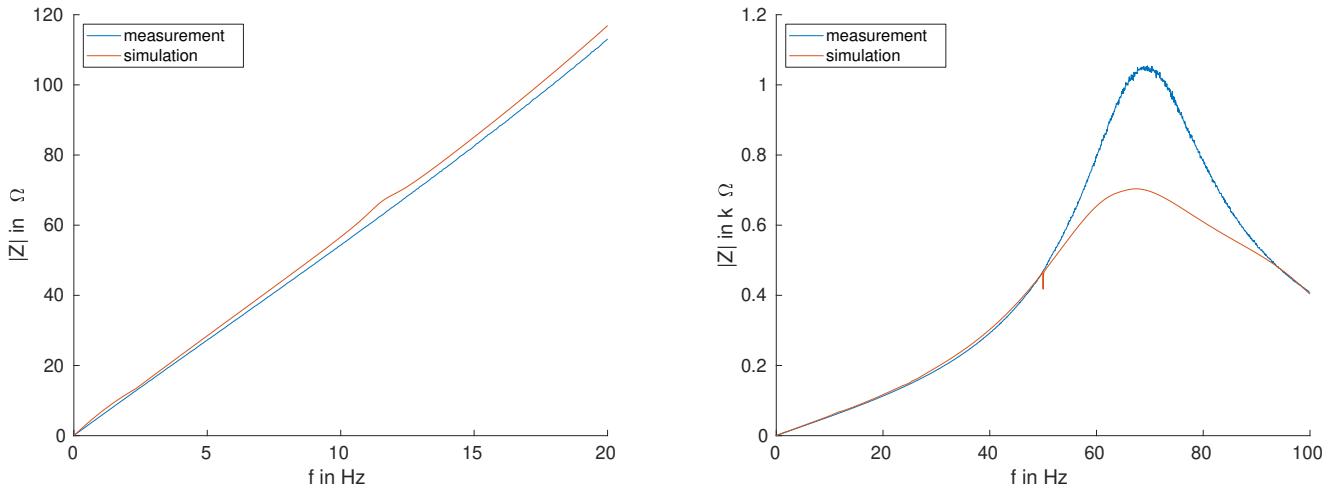


**Abbildung 18:** Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz ohne Kurzschlüsse

Die Simulation zeigt auch nach mehrfacher Wiederholung mit verschiedenen Einstellungen eine starke Welligkeit. Die Konvergenz gegen die gemessenen Werte ist in dieser Anordnung daher schwer zu bewerten.

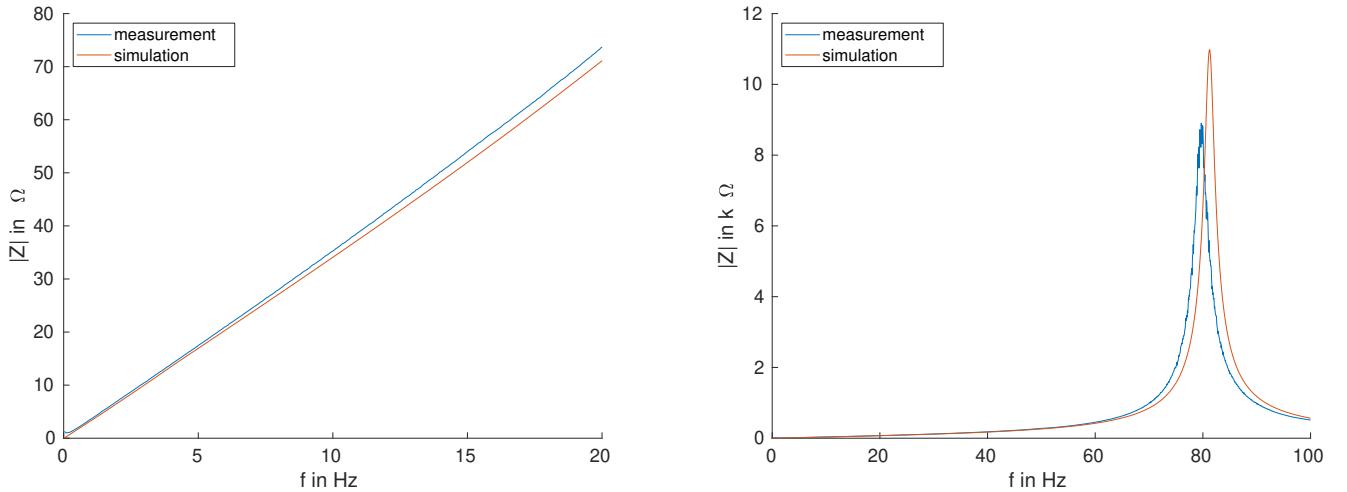
Etwas mehr ausarbeiten wenn mir was einfällt

Auch die Kurzschlussmessungen wurden mit der Simulation gegenübergestellt. Zunächst wird die Anordnung mit nur einem Kurzschluss in betrachtet. Insbesondere im Bereich bis 50MHz ist eine hohe Übereinstimmung zu sehen. Lediglich im höheren Frequenzbereich, nahe der Resonanz, weichen Messung und Simulation voneinander ab. Abbildung 19 zeigt die Gegenüberstellung.



**Abbildung 19:** Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz für einen Kurzschluss.

Die Simulation der weiteren Kurzschlüssanordnungen zeigt, dass die Simulation bei zunehmender Anzahl an Kurzschlüssen etwas stärker von der Messung abweicht, als bei wenigen Kurzschlüssen. Abbildung 20 zeigt diesen Effekt beispielhaft für eine Anzahl von sieben Kurzschlüssen.



**Abbildung 20:** Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz für eine Anzahl von sieben Kurzschlüssen

Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass die simulierten Kurzschlüsse idealere Materialeigenschaften, bessere Kontaktierung sowie eine höhere Formsicherheit aufweisen, als es das Kupfer und die Verschraubung in der Realität liefern können. Die Gegenüberstellung aller Kurzschlussanordnungen in Simulation und Messung sind in Anhang A.1 abgebildet.

## 4.2 Auswertung der Kurzschlussanordnungen

Nachdem die Messungen, sowie die Simulationen gegeneinander abgeglichen sind, kann die Auswertung der Kurzschlussversuche begonnen werden. Dazu wird nur die reine Ringkernimpedanz rückgerechnet. Analog zum in Abschnitt 3.2.3.1 beschriebenen vorgehen, wird auch hierzu die Impedanz  $Z_{rk}$  aus der gemessenen Impedanz  $Z_{ges}$  nach Gleichung 6 herausgerechnet. Somit lässt sich isoliert betrachten, welcher Anteil der Ringkernimpedanz nach dem zufügen der Kurzschlüsse noch als Rest verbleibt. Gegenübergestellt werden dazu die in Unterkapitel 2.1.3 angeführten Variationsparameter.

Die maximale reale Abweichung  $a_{max}$  wird für einen Variationsparameter nach Gleichung 10 berechnet.

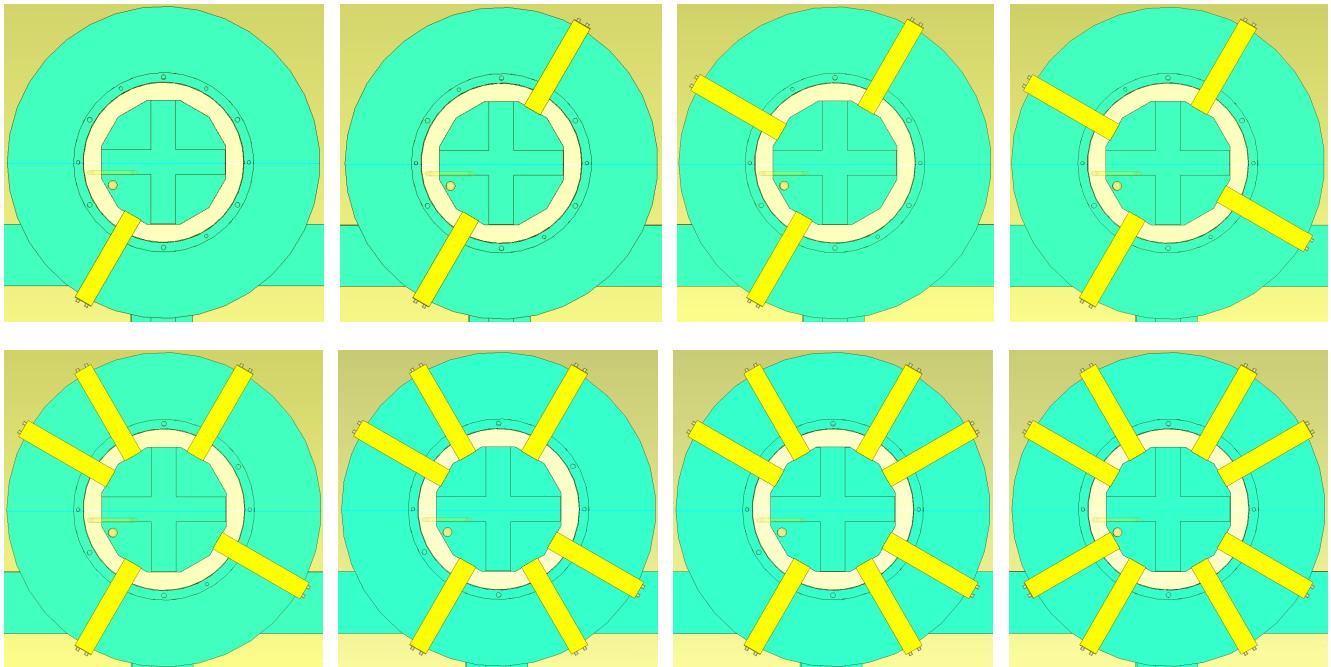
$$\frac{Z_{max}(f) - Z_{min}(f)}{Z_{rk}(f)} = a_{max}(f) \quad (10)$$

Dabei entspricht  $Z_{max}$  der höchsten gemessenen Impedanz unter Änderung des Variationsparameters und  $Z_{min}$  der niedrigsten.  $Z_{rk}$  bezeichnet die Impedanz des Rinkerns ohne Kurzschlüsse. Um die relative Abweichung  $a_{percent}$  in Prozent zu erhalten, wird die relative Abweichung  $a_{max}$  nach Gleichung 11 mit 100 multipliziert.

$$\frac{Z_{max}(f) - Z_{min}(f)}{Z_{rk}(f)} \cdot 100 = a_{percent}(f) \quad (11)$$

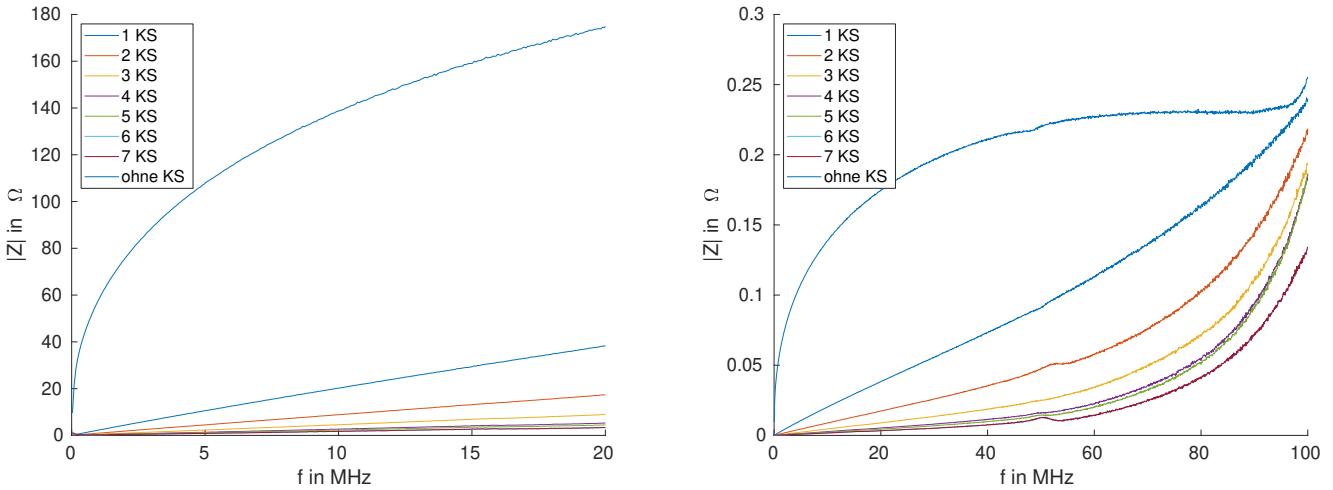
#### 4.2.1 Anzahl der Kurzschlüsse

Um den Einfluss verschiedener Anzahlen an Kurzschläßen zu analysieren werden ein bis acht identische Kurzschlüsse in der Testbox montiert. Abbildung 21 zeigt die Positionen der montierten Kurzschlüsse.



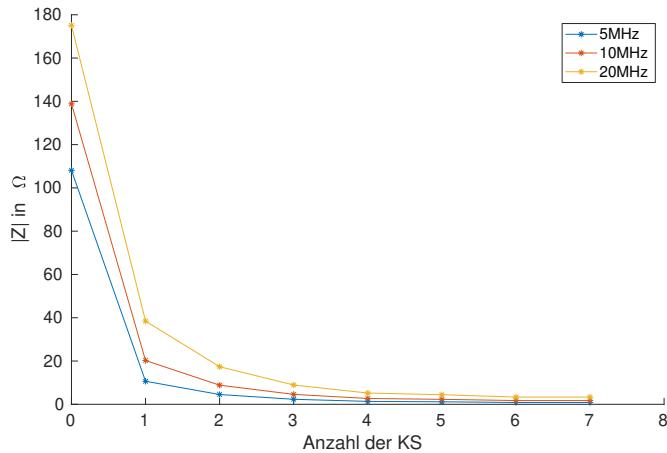
**Abbildung 21:** Unterschiedliche Anzahlen an montierten Kurzschläßen an verschiedenen Positionen.

Die achte Kurzschlusschiene, welche in Grafik 21 zu sehen ist, konnte bei der endgültigen Auswertung nicht berücksichtigt werden. Dieser Kurzschluss liegt sehr nah am Einkopplungsrohr, sodass ein direkter Kontakt dazu besteht. Fügt man einen Abstandshalter aus Schaumstoff zu, so wird das die Einkopplung etwas nach oben gebogen. Die Messung liefert daher verfälschte Ergebnisse, welche deutlich stärker von der Simulation abweichen, als bei anderen Messungen. Auch dieses Verhalten ist in Anhang A.1 abgebildet. Für die endgültige Auswertung wurden folglich nur 1-7 Kurzschlüsse betrachtet. Die resultierende Ringkernimpedanz für die einzelnen Kurzschlussanordnungen ist in Abbildung 22 über der Frequenz aufgetragen.



**Abbildung 22:** Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz über der Frequenz für verschiedene Anzahlen an Kurzschlüssen

Es fällt auf, dass der größte Sprung zwischen null und einem Kurzschluss liegt. Das bedeutet, dass die Montage weiterer Kurzschlüsse mit zunehmender Anzahl weniger effektiv ist. Um das zu verdeutlichen wird eine weitere Gegenüberstellung angesetzt, bei der eine bestimmte Frequenz fixiert wird, und die Ringkernimpedanz über der Anzahl an Kurzschlägen aufgetragen ist. Die fixierten Frequenzen liegen dabei bei 5, 10 und 20 MHz, da insbesondere der niedrigere Frequenzbereich für den Beschleunigerbetrieb von Relevanz ist [Frey u. a., 2015]. Die Gegenüberstellung ist in Abbildung 23 aufgetragen.



**Abbildung 23:** Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz mit verschiedenen Anzahlen an Kurzschlüssen bei 5, 10 und 20 MHz.

Der Effekt der Kurzschlüsse wird mittels Gleichung 11 errechnet. Wird  $Z_{max}$  auf den Wert  $Z_{rk}(20 \text{ MHz})$  gesetzt, also den Fall ohne Kurzschlüsse und  $Z_{min}$  auf  $Z_{1KS}(20 \text{ MHz})$ , so ergibt sich eine prozentuale Verringerung der Impedanz nach Gleichung 12.

$$\frac{175.1145 \Omega - 38.4525 \Omega}{175.1145 \Omega} \cdot 100 = 78.042\% \quad (12)$$

Das heißt ein Kurzschluss verringert die Impedanz des Ringkerns bereits um 78.042 % verglichen mit der Impedanz ohne Kurzschluss. Wird hingegen  $Z_{max}$  auf  $Z_{1KS}(20\text{ MHz})$  und  $Z_{min}$  zu  $Z_{2KS}(20\text{ MHz})$  gesetzt, so ergibt sich nach Gleichung 13.

$$\frac{38.4525\Omega - 17.3717\Omega}{175.1145\Omega} \cdot 100 = 12.038\% \quad (13)$$

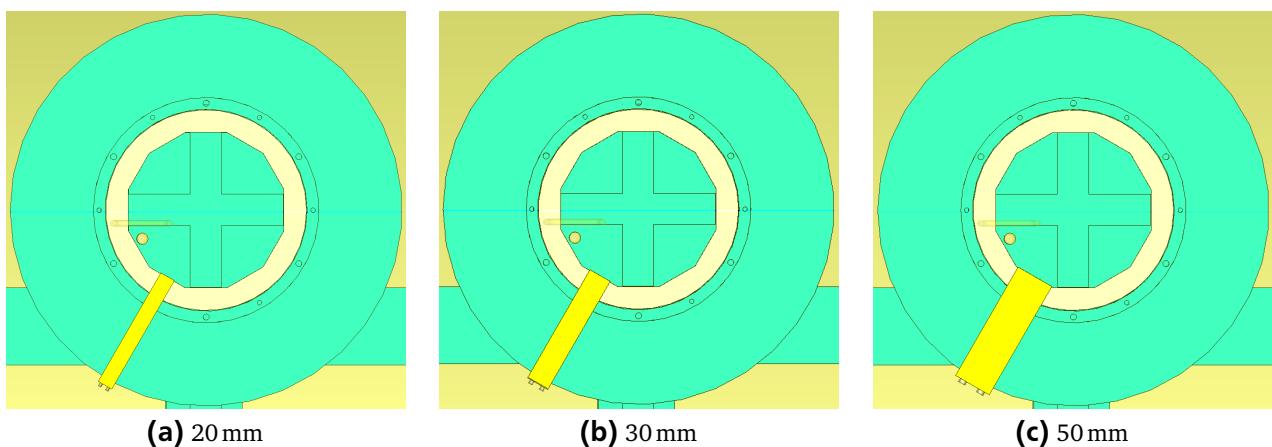
Die Verringerung der Impedanz fällt also deutlich geringer aus, als noch beim Unterschied von Null zu einem Kurzschluss. Auch der Vergleich von einem zu sieben Kurzschlüssen, also mit  $Z_{max}$  gleich  $Z_{1KS}(20\text{ MHz})$  und  $Z_{min}$  gleich  $Z_{7KS}(20\text{ MHz})$  fällt mit der Abweichung nach Gleichung 14

$$\frac{38.4525\Omega - 3.3453\Omega}{175.1145\Omega} \cdot 100 = 20.048\% \quad (14)$$

vergleichsweise geringer aus. Je nach Anforderung ist also zu überlegen, ob ein Kurzschluss bereits eine ausreichende Reduktion der Impedanz erzeugt. Das ist insbesondere beim Einbau in die Kavität von Relevanz, da eine Montage mehrerer Kurzschlüsse einen nicht unerheblichen Aufwand mit sich zieht.

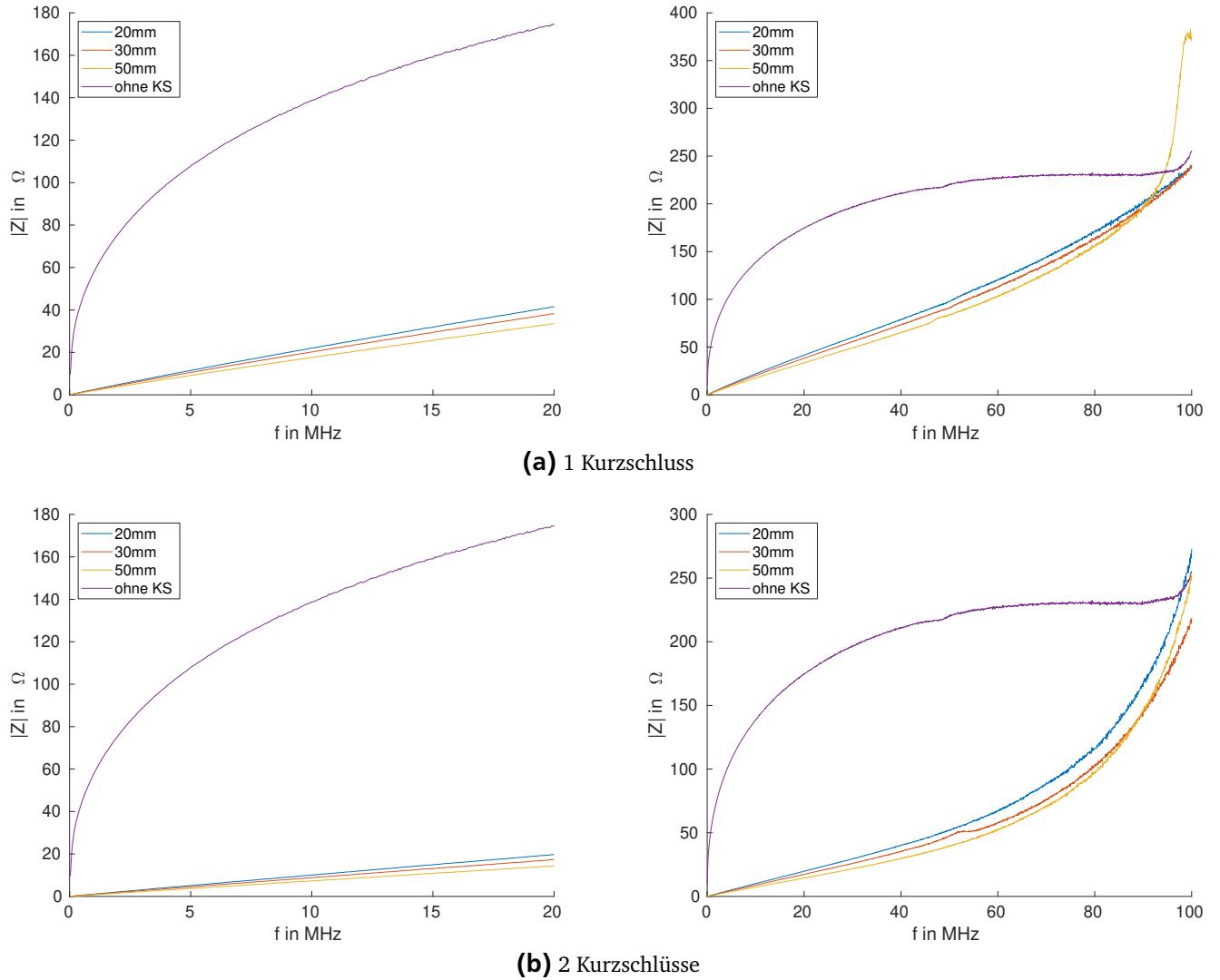
#### 4.2.2 Breite der Kurzschlüsse

Die Breite der Kurzschlüsse ist ein Parameter, welcher durch die Schienenartige Form der Kurzschlüsse leicht zu variieren ist, da diese nur aus einem Blech geschnitten werden. Die Montierten Kurzschlüsse verschiedener Breiten sind in Abbildung 24 abgebildet.



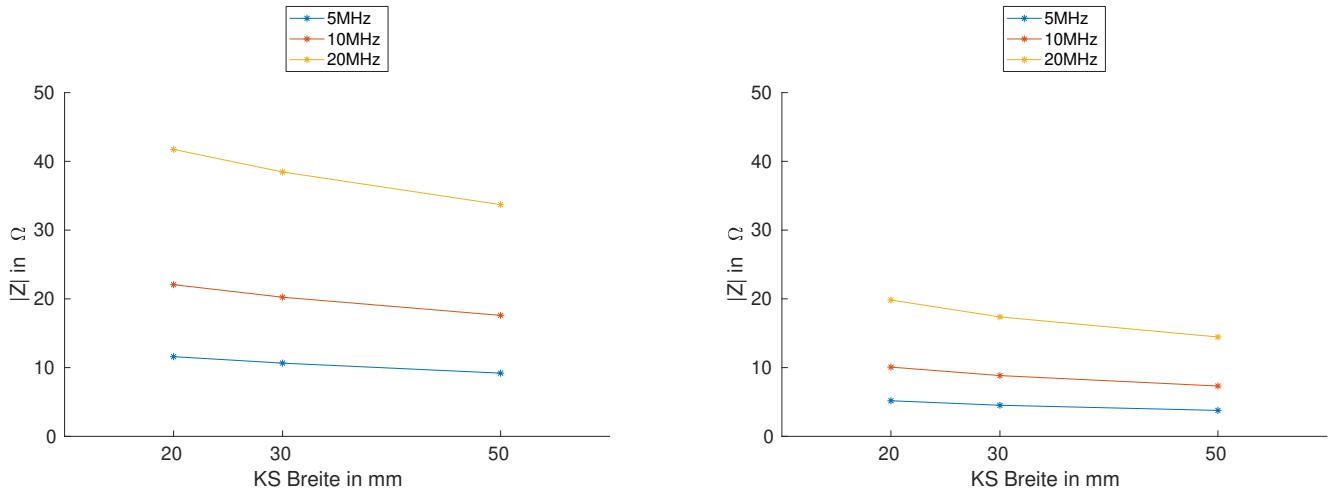
**Abbildung 24:** Jeweils ein montierter Kurzschluss mit verschiedenen Breiten.

Da eine höhere Anzahl an Kurzschlüssen eine verringerte Ringkernimpedanz als Ergebnis liefert, liegt die Vermutung nahe, dass auch breitere Kurzschlüsse die Ringkernimpedanz weiter verringern können. Die Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz  $Z_{rk}$  ist in Abbildung 25 zu sehen.



**Abbildung 25:** Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Breiten der Kurzschlüsse.

Auch hier wird wieder ein genaueres Augenmerk auf den relevanten Frequenzbereich unterhalb von 20 MHz gelegt. Dazu werden die Frequenzen von 5, 10 und 20 MHz geplottet und jeweils die verschiedenen Breiten gegenübergestellt. Abbildung 26 zeigt die genannte Gegenüberstellung.

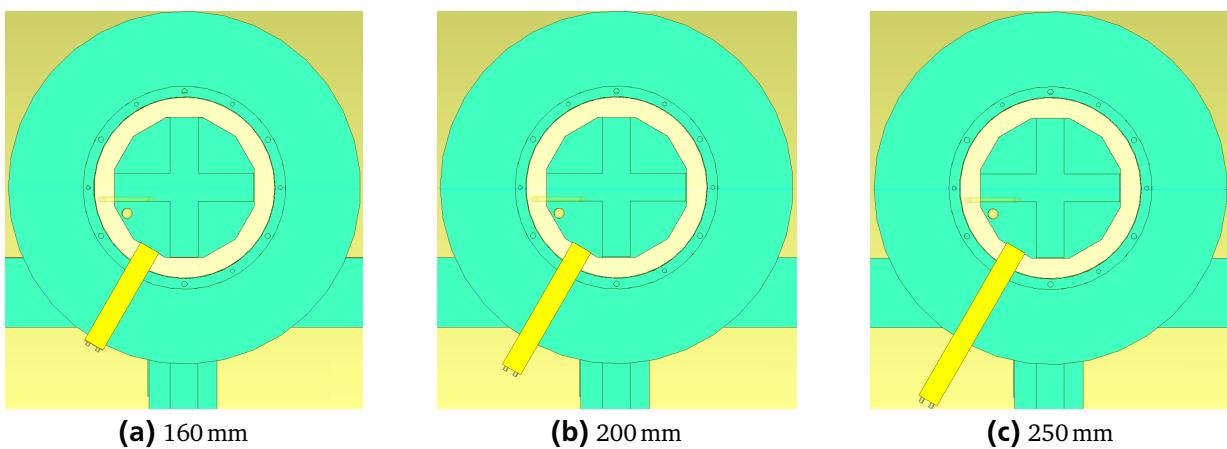


**Abbildung 26:** Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz bei 5, 10 und 20 MHz. Links: 1KS, rechts: 2KS.

Das Ergebnis zeigt, dass ein breiterer Kurzschluss das Ergebnis der resultierenden Ringkernimpedanz weiter verringert. Diese Variation liefert im Extremfall, also dem Unterschied von 20 mm zu 50 mm bei einer Anzahl von zwei Kurzschlüssen und einer Frequenz von 20 MHz, eine Verringerung der Ringkernimpedanz nach Gleichung 11 von rund 2.8 %. Das bedeutet, dass die Breite der Kurzschlüsse wesentlich weniger Auswirkungen auf die resultierende Ringkernimpedanz hat, wie die Anzahl an Kurzschlägen. Besonders deutlich wird das im Vergleich zwischen einem Kurzschluss der Breite 50 mm mit zwei schmalen Kurzschlägen der Breite 20 mm. Trotz des geringeren Platzbedarfs, liefern die zwei schmalen Kurzschlüsse eine deutlich geringere Impedanz. Sollte aus Platzgründen eine Montage breiterer Kurzschlüsse in der Kavität zu Problemen führen, so ist eine höhere Anzahl von schmäleren Kurzschlägen vorzuziehen.

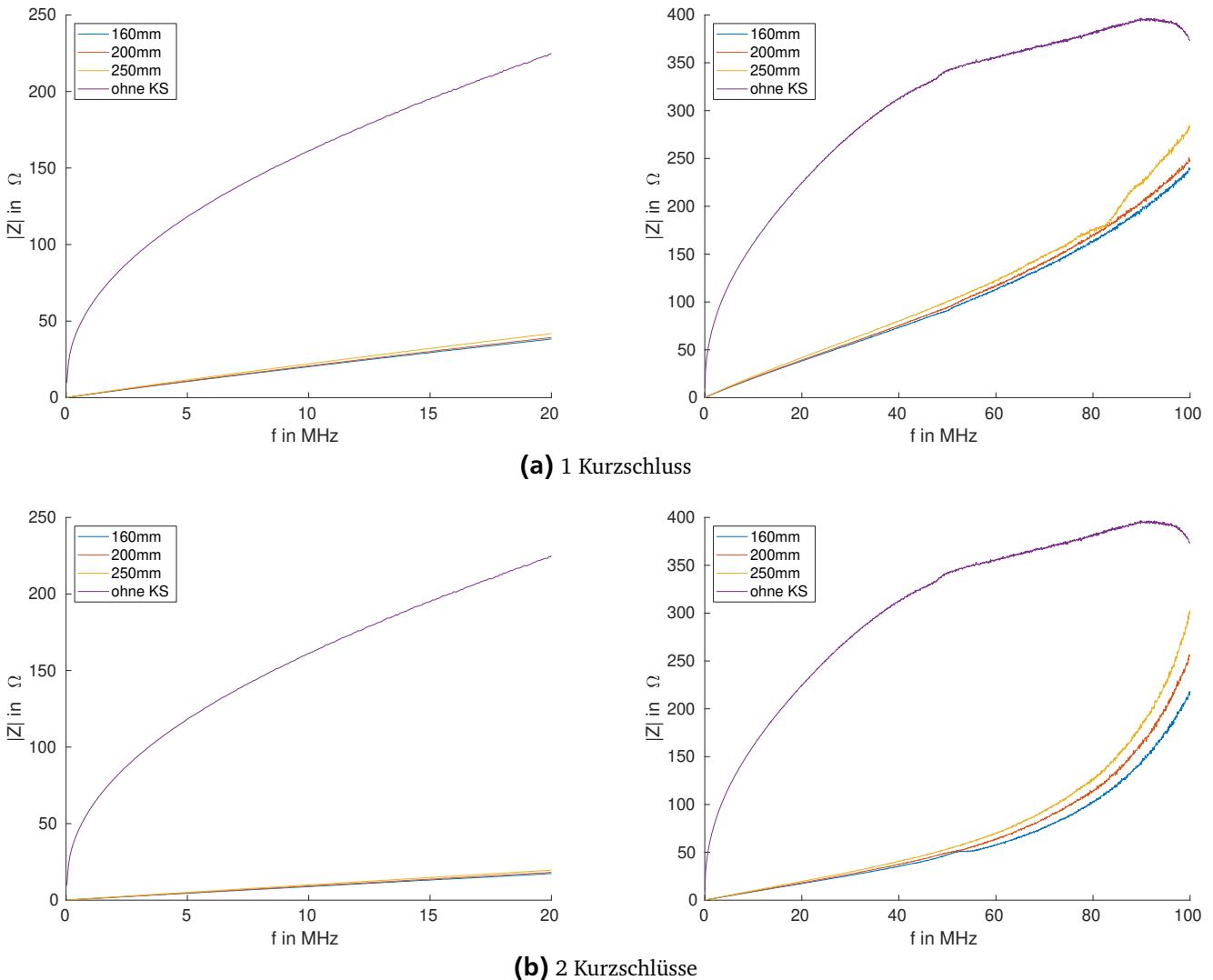
#### 4.2.3 Länge der Kurzschlüsse

Ähnlich wie die Breite ist auch die Länge der Kurzschlüsse problemlos zu variiieren. Hierbei ist allerdings darauf zu achten, dass die Kurzschlussbügel mit Erhöhung der Länge auch näher an den Rand der Testbox, beziehungsweise der Kavität heran ragen. Die getesteten verschiedenen Längen sind in Abbildung 27 gezeigt.



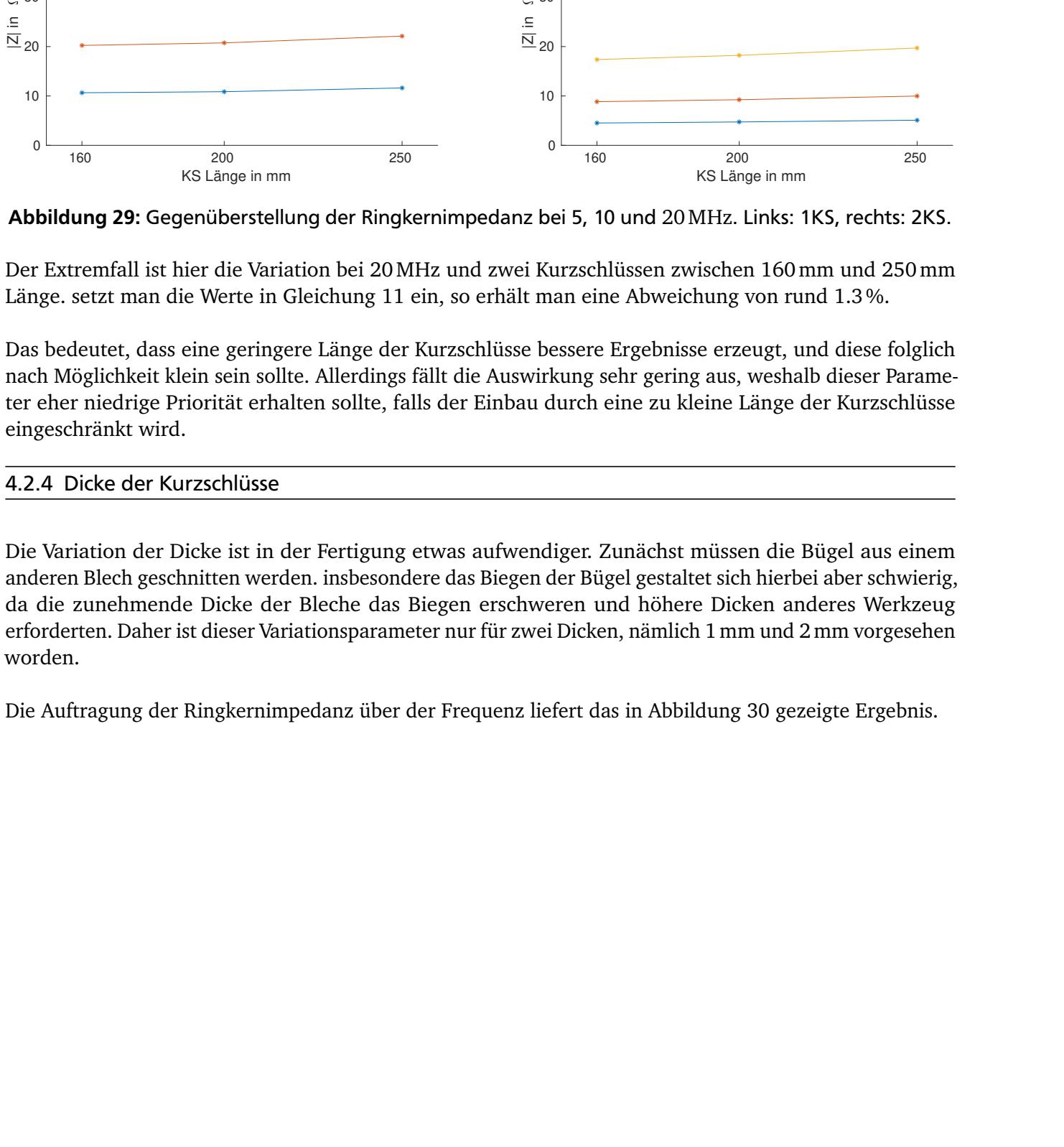
**Abbildung 27:** Jeweils ein montierter Kurzschluss mit verschiedenen Längen.

Die Länge der Kurzschlüsse wird nach dem bekannten vorgehen analysiert. Zunächst wird die Ringkernimpedanz über der Frequenz nach Abbildung 28 aufgetragen.



**Abbildung 28:** Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Längen der Kurzschlüsse.

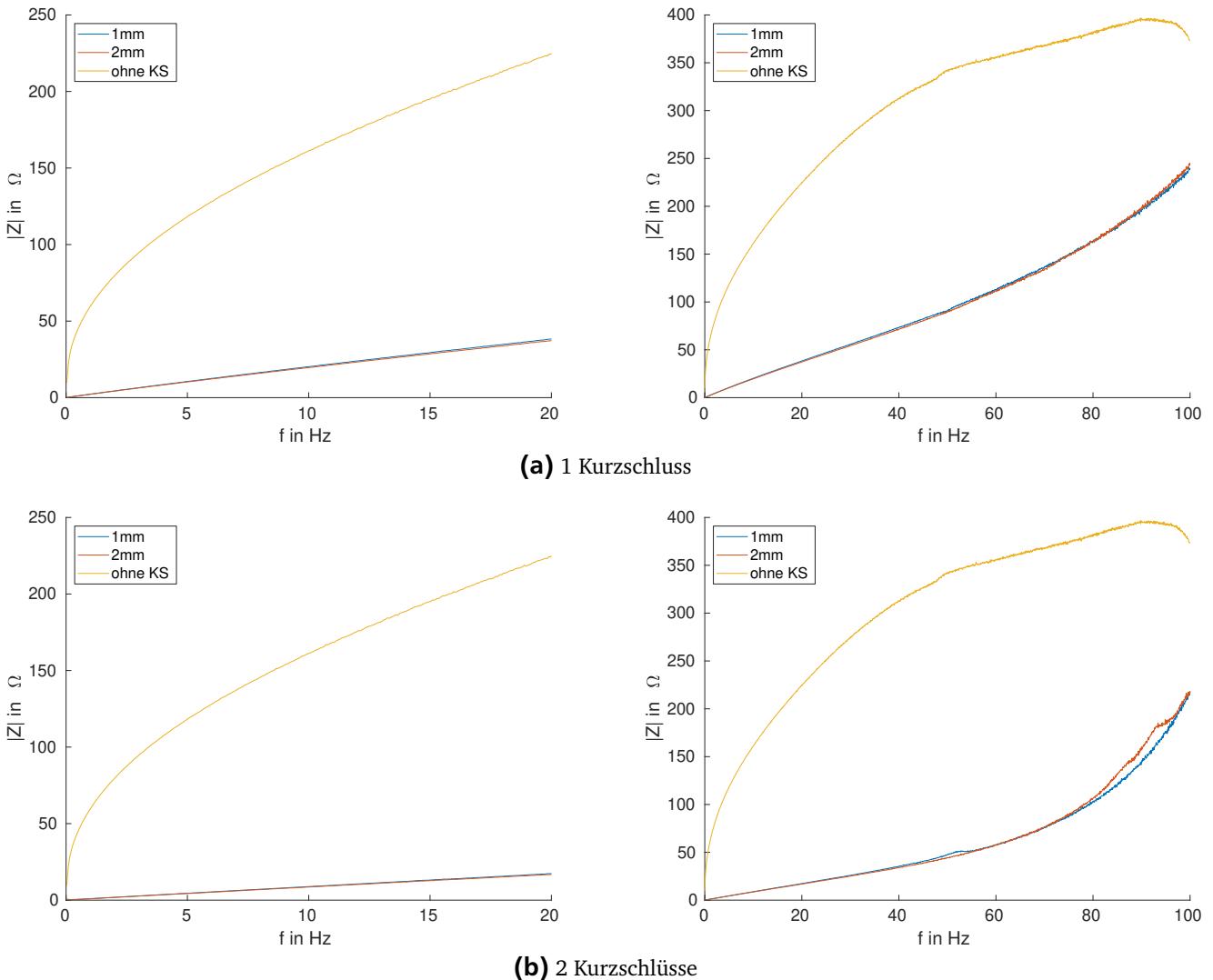
Es fällt auf, dass der Effekt von längeren Kurzschlägen besonders im unteren Frequenzbereich noch deutlich geringer ausfällt, als bei der Breitenvariation. Um das genauer Quantifizieren zu können werden auch hier für Frequenzen von 5, 10 und 20 MHz die Ringkernimpedanz über der Länge der Kurzschlüsse aufgetragen. Das Ergebnis ist in Abbildung 29 zu sehen.



#### 4.2.4 Dicke der Kurzschlüsse

Die Variation der Dicke ist in der Fertigung etwas aufwendiger. Zunächst müssen die Bügel aus einem anderen Blech geschnitten werden. insbesondere das Biegen der Bügel gestaltet sich hierbei aber schwierig, da die zunehmende Dicke der Bleche das Biegen erschweren und höhere Dicken anderes Werkzeug erforderten. Daher ist dieser Variationsparameter nur für zwei Dicken, nämlich 1 mm und 2 mm vorgesehen worden.

Die Auftragung der Ringkernimpedanz über der Frequenz liefert das in Abbildung 30 gezeigte Ergebnis.



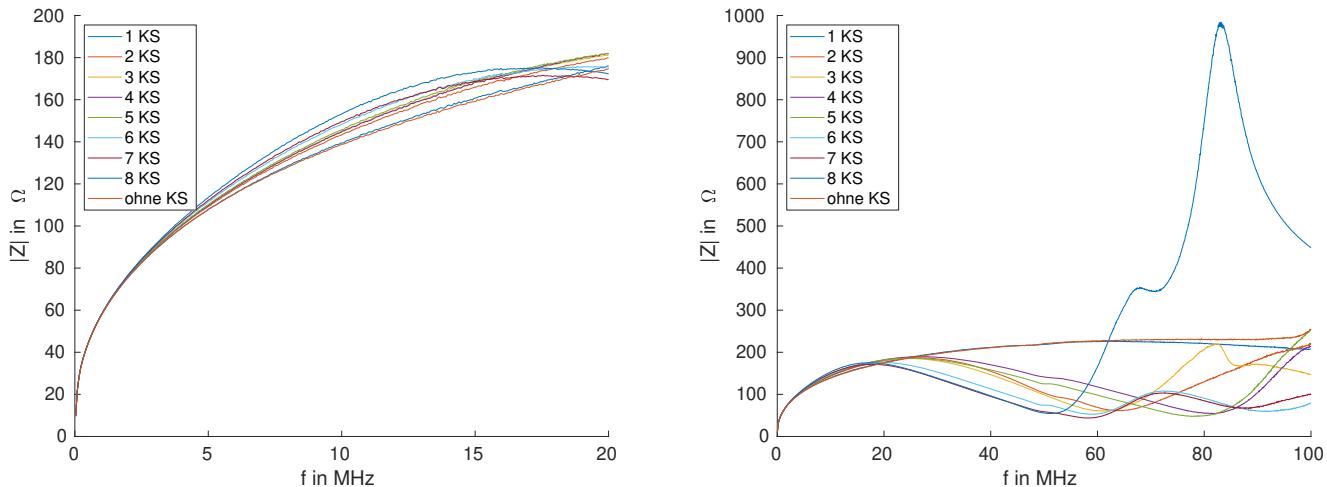
**Abbildung 30:** Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Dicken der Kurzschlüsse.

Da nur zwei Stufen für die Dicke gemessen wurden, wird in diesem Fall auf eine Grafik für die einzelnen Frequenzpunkte verzichtet. Die Berechnung der Abweichung für den Vergleich von zwei Kurzschläßen bei 20 MHz mit verschiedenen Dicken liefert nach Gleichung 11 einen prozentualen Wert von 0.286 %.

Das bedeutet, dass die Dicke des Blechs nahezu keinen Einfluss hat.

### 4.3 Einfluss im Leerlauf befindlicher Schienen auf die Ringkernimpedanz

Es sollte nicht außer acht gelassen werden, vorab montierte Kurzschlusschienen in der Testbox oder der Kavität im laufenden Betrieb nicht einfach wieder entfernt werden können. Es stellt sich die Frage, ob diese auch eine Auswirkung auf die Ringkernimpedanz haben, wenn sie nicht kurzgeschlossen sind. Im folgenden Abschnitt soll daher analysiert werden, ob auch Schienen, welche sich im Leerlauf befinden, einen Einfluss auf die Impedanz haben können. Abbildung 31 zeigt das Verhalten der eingebrachten Schienen im Leerlauf.

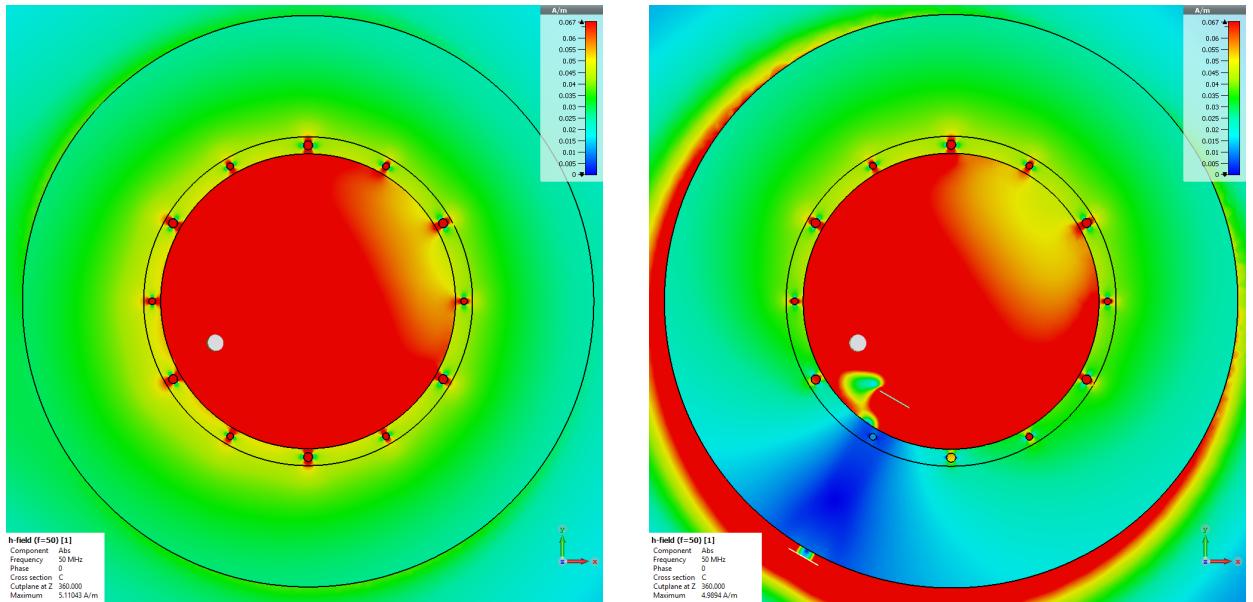


**Abbildung 31:** Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz über der Frequenz für verschiedene Anzahlen an offenen Kupferschienen.

Es wird deutlich, dass die Schienen im Frequenzbereich unter 20 MHz kaum einen Einfluss haben. Der Extremfall bei 20 MHz liefert nach Gleichung 11 eine Änderung der Ringkernimpedanz für eine Anordnung mit zwei Kurzschlüssen gegenüber einer Anordnung ohne Kurzschlüsse von rund 2.6 %. Somit ist davon auszugehen, dass die Kurzschlüsse den Betrieb nicht stören, sofern diese gut genug getrennt werden.

### 4.4 Feldbilder

Um eine weitergehende Analyse der Auswirkung von Kurzschlüssen zu führen, können aus CST Feldbilder ausgelesen werden. Diese zeigen, in wie weit das magnetische Feld durch die Kurzschlüsse aus dem inneren des MA-Ringkerns verdrängt wird. Dazu werden einige Kurzschlussanordnungen gegenüber gestellt. Zunächst wird der Einfluss eines einzigen Kurzschlusses mit der Breite 30 mm, der Höhe 160 mm sowie einer Blechdicke von 1 mm gegenüber dem reinen Ringkern ohne Kurzschlüsse nach Abbildung 32 betrachtet.

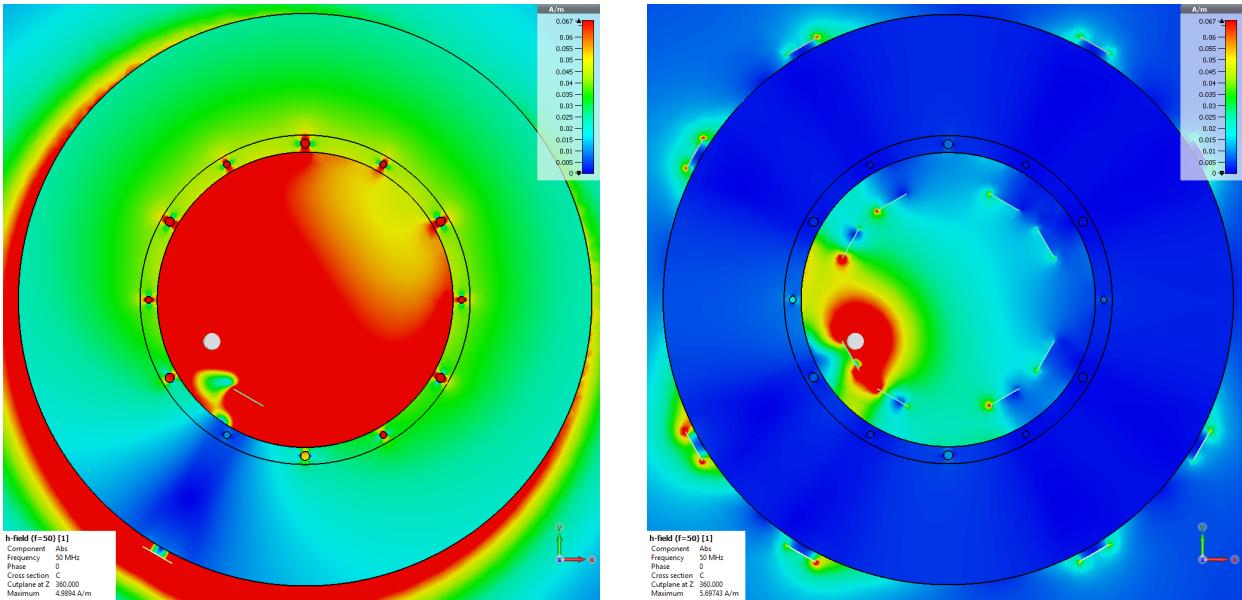


**Abbildung 32:** Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns ohne Kurzschluss und mit einem Kurzschluss.

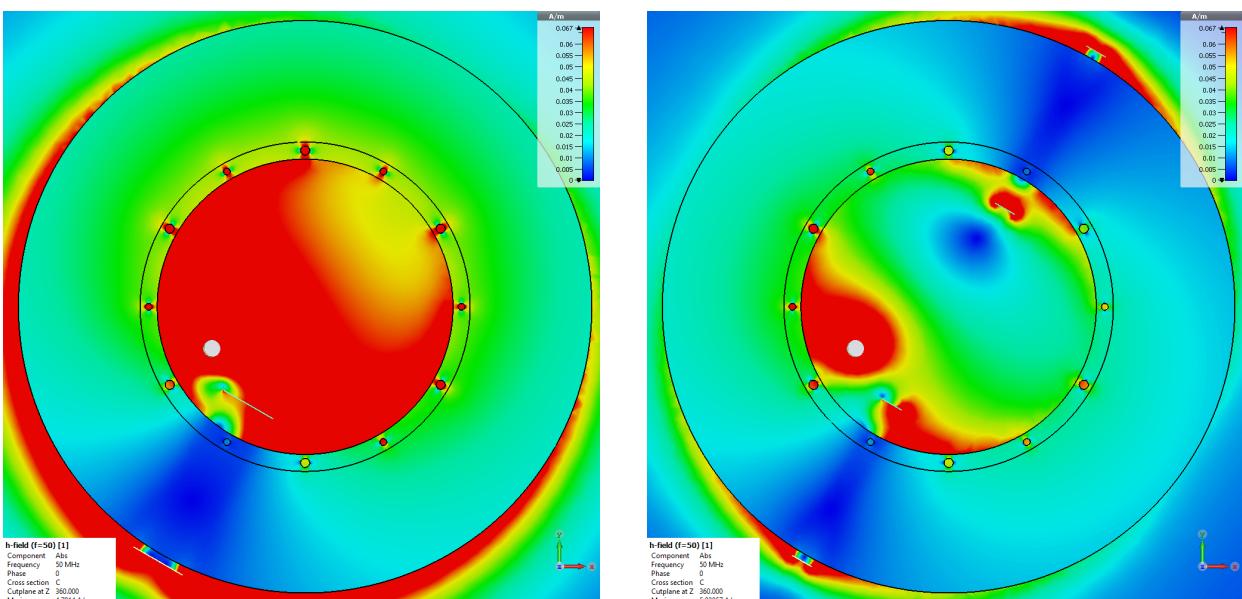
Bereits ein Kurzschluss verdängt schon einen großen Teil des magnetischen Feldes. Dieser Effekt ist in dem Bereich des Ringkerns, welcher von der Kurzschlusschiene überdeckt ist, oder in der Nähe liegt deutlich stärker als in anderen Ringkernregionen. Dieser Effekt ist auch bei einer höheren Anzahl an Kurzschläßen sichtbar. Abbildung 33 zeigt den Vergleich von einem Kurzschluss zur maximalen Anzahl von acht Kurzschläßen.

Die Beobachtung liefert auch eine Erklärung, warum zwei schmale Kurzschlüsse eine stärkere Verringerung der Ringkernimpedanz nach sich ziehen, als ein breiter Kurzschluss. Da das Feld besonders im Umkreis des Kurzschlusses geringer ist, führt eine weitere Verteilung der Kurzschlüsse zu geringeren Feldstärken im gesamten Ring. Dieser Effekt ist in Abbildung 34 zu sehen.

Wird vorausgesetzt, dass die Ringkernmedanz direkt mit dem mittleren Feld zusammenhängt, so dient dies als eine plausible Erklärung für bisher beobachtete Effekte. Die Komplette Ansicht der Feldverteilung für alle Kurzschlussanordnungen ist in Anhang A.2 gegeben.



**Abbildung 33:** Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns mit einem Kurzschluss und mit acht Kurzschlüssen.



**Abbildung 34:** Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns mit einem Kurzschluss der Breite 50mm und mit zwei Kurzschlüssen der Breite 20mm.

# 5 Fazit und Ausblick

## 5.1 Fazit

---

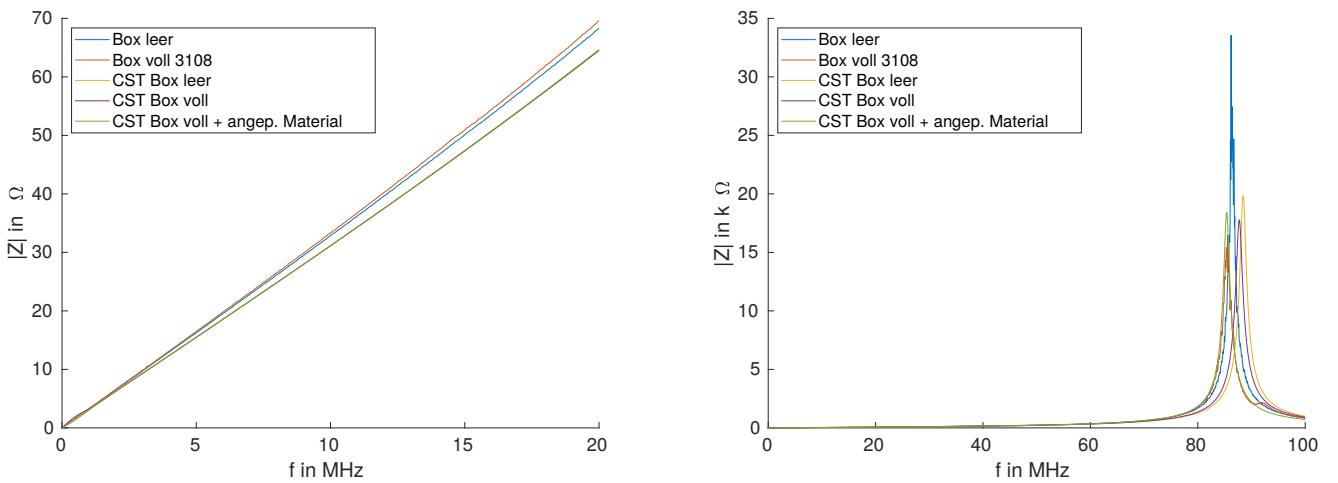
- Testbox vermessen
- Testbox modifiziert um reproduzierbar zu messen
- Messung durchgeführt, reproduzierbar
- Simulation angepasst, dass diese in geringer Abweichung für weitere Variationen genutzt werden kann
- Ergebnisse quantifiziert, evaluiert



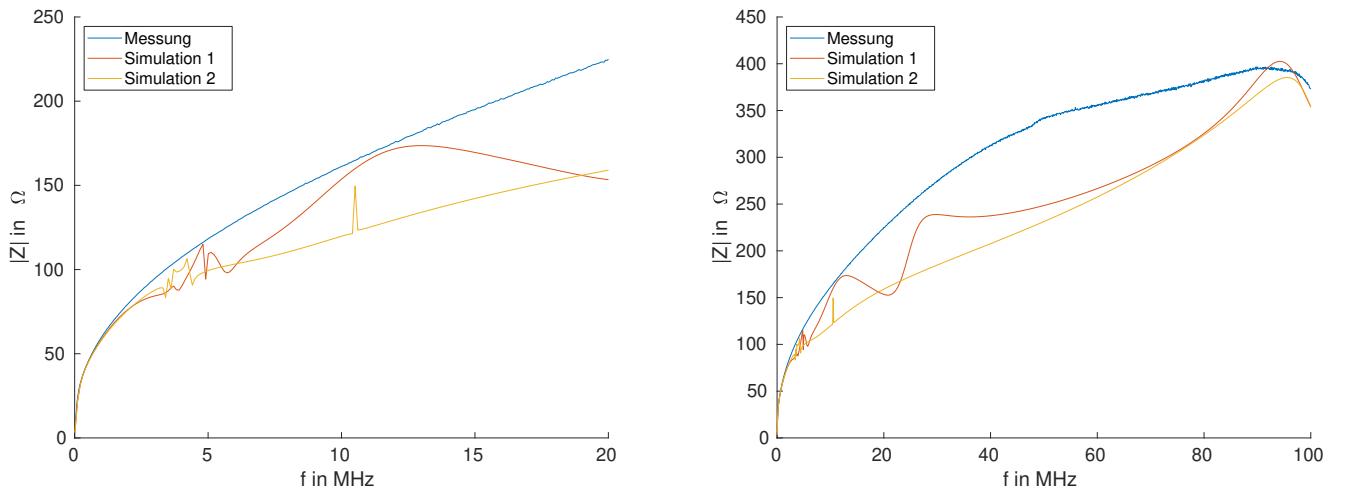
# A Anhang

## A.1 Gegenüberstellung aller Simulationen und Messergebnisse

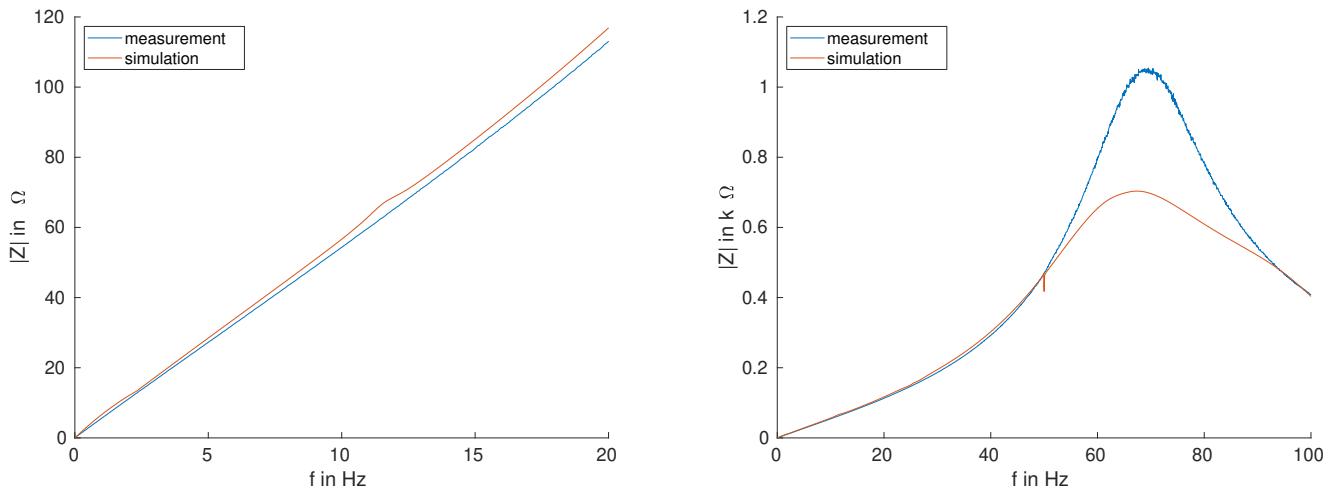
Im folgenden Abschnitt sind die Gegenüberstellungen der Messungen und Simulationen für alle variablen Parameter zu sehen.



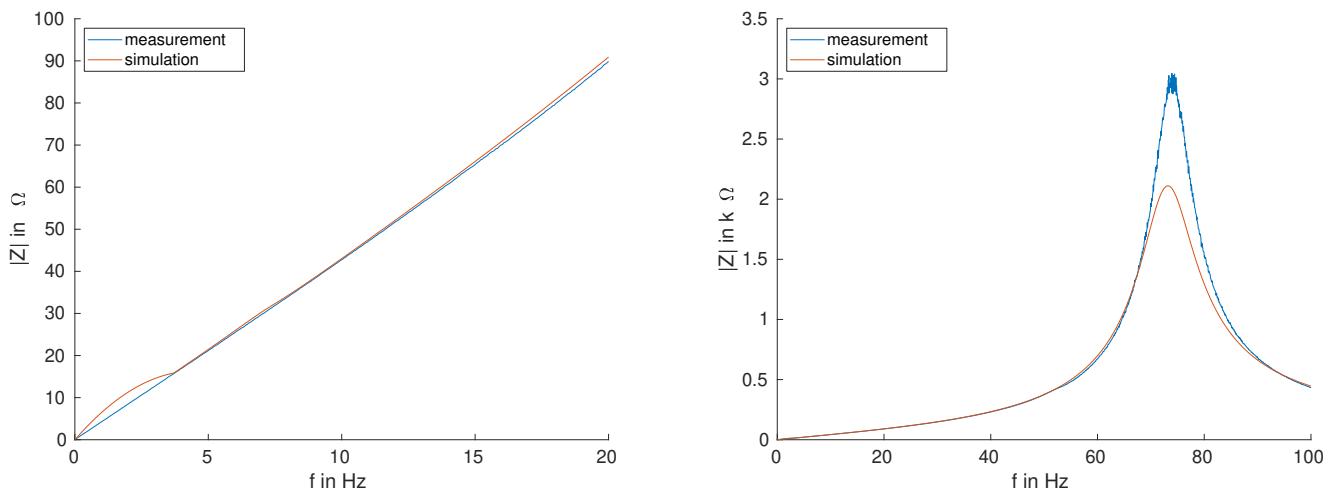
**Abbildung 35:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung ohne Ringkern.



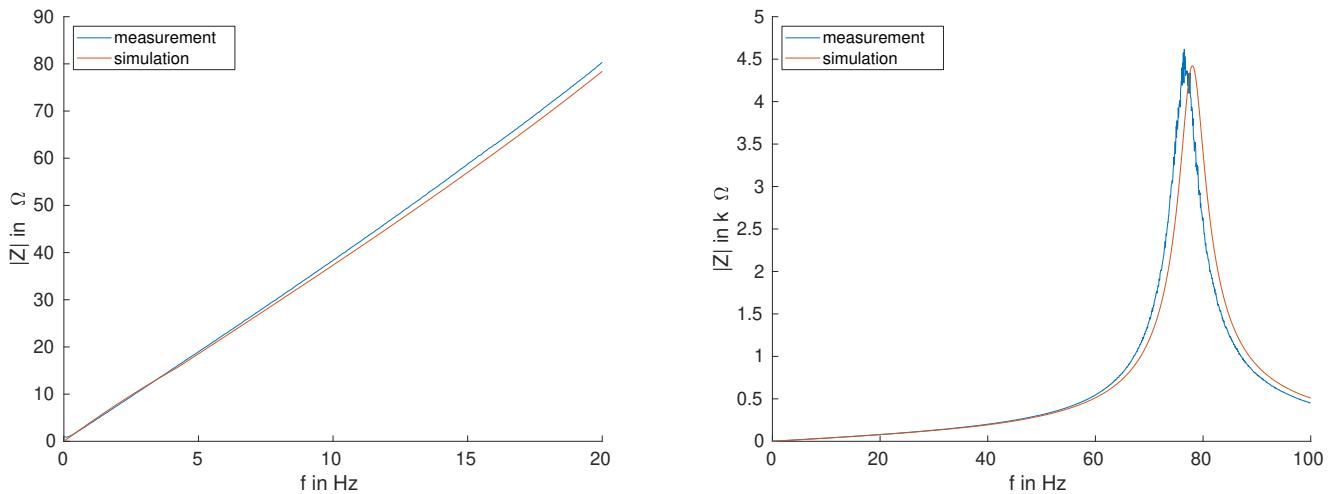
**Abbildung 36:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern ohne Kurzschlüsse.



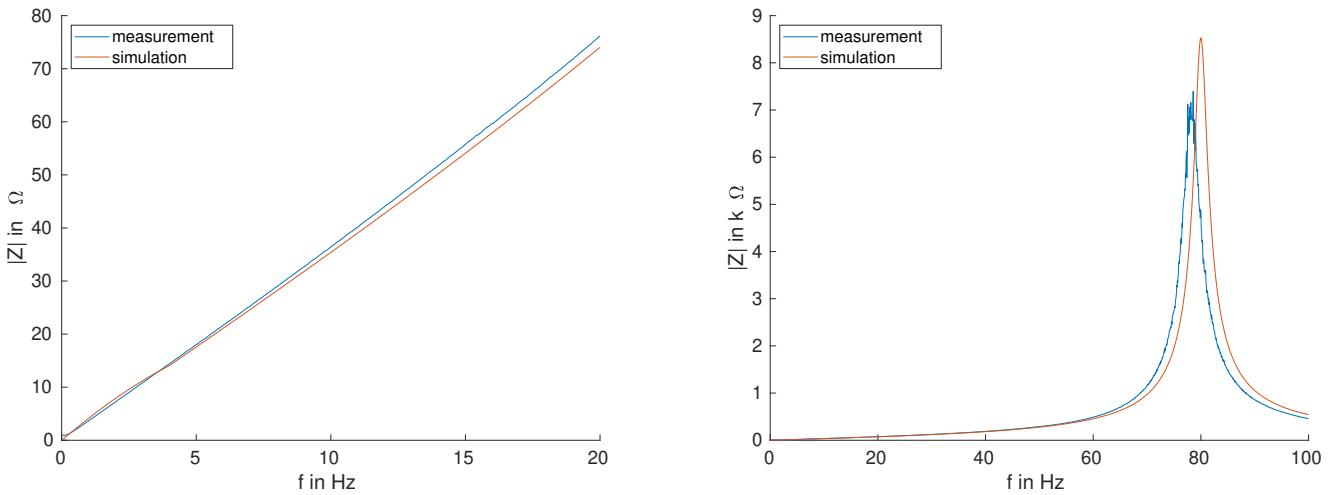
**Abbildung 37:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit einem Kurzschluss.



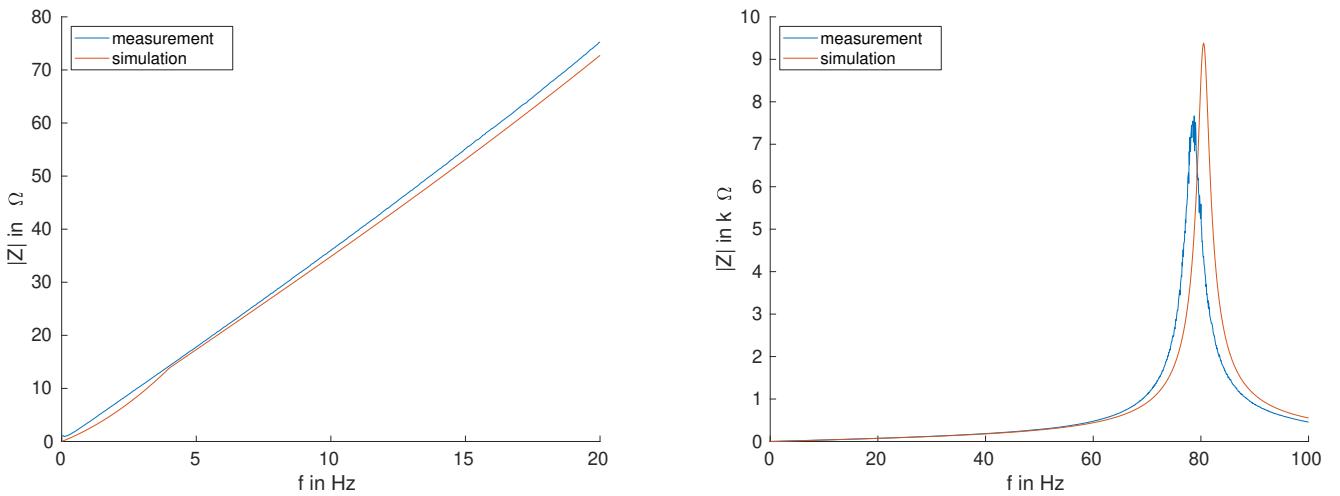
**Abbildung 38:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit zwei Kurzschlüssen.



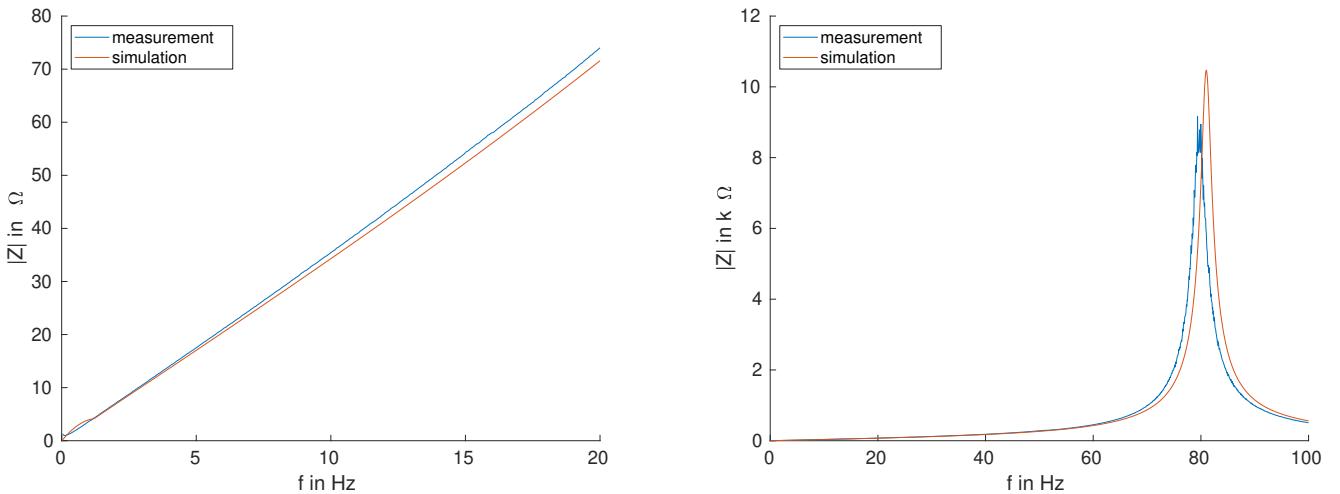
**Abbildung 39:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit drei Kurzschlüssen.



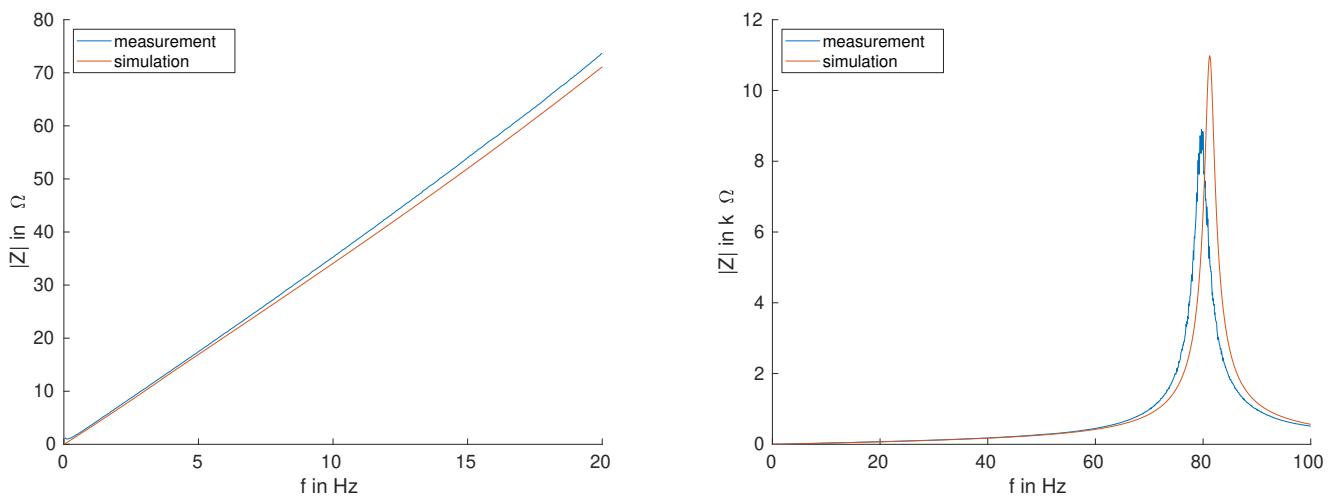
**Abbildung 40:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit vier Kurzschlüssen.



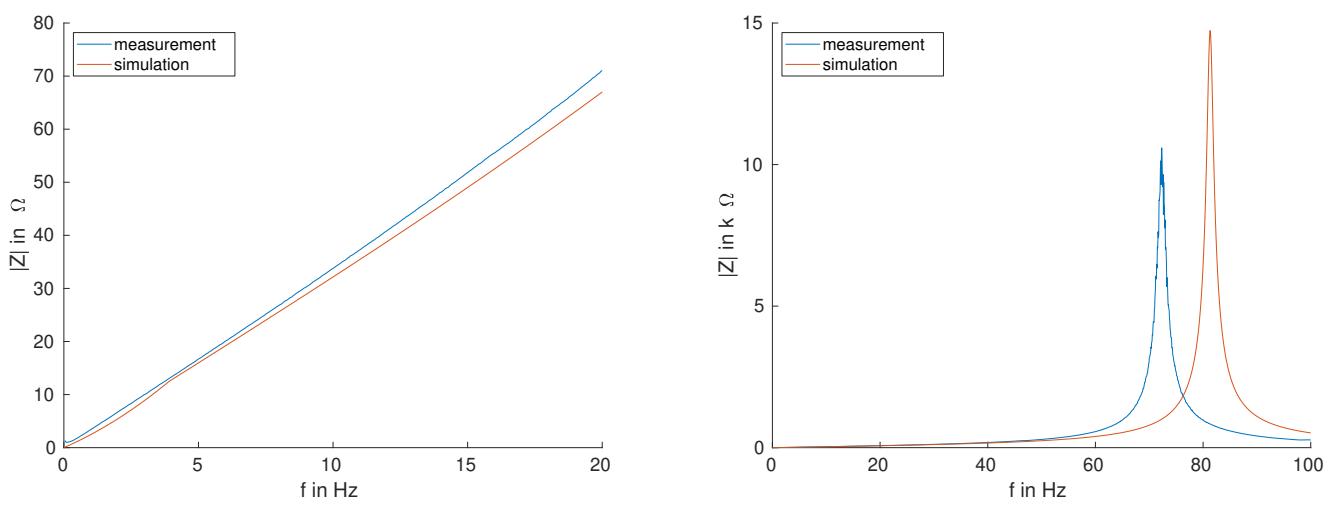
**Abbildung 41:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit fünf Kurzschlüssen.



**Abbildung 42:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit sechs Kurzschlüssen.

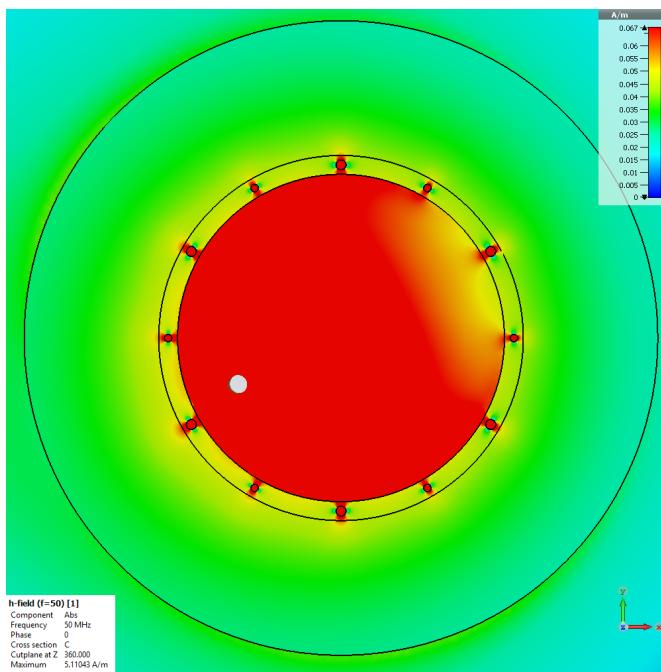


**Abbildung 43:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit sieben Kurzschlüssen.

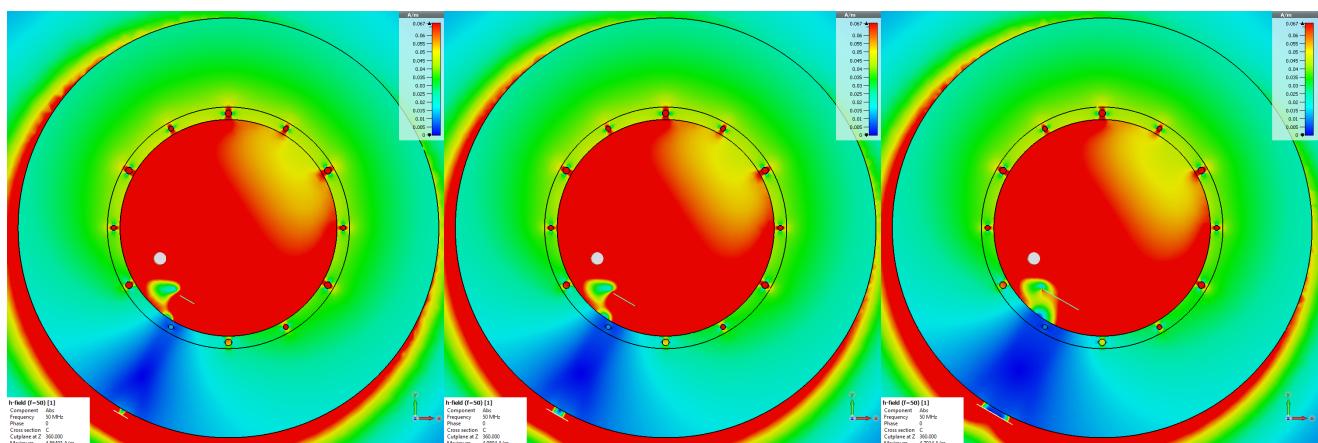


**Abbildung 44:** Gegenüberstellung der Simulation und Messung für eine Anordnung mit Ringkern mit acht Kurzschlüssen.

## A.2 Gegenüberstellung aller Feldbilder der Kurzschlussanordnungen aus der CST Simulation

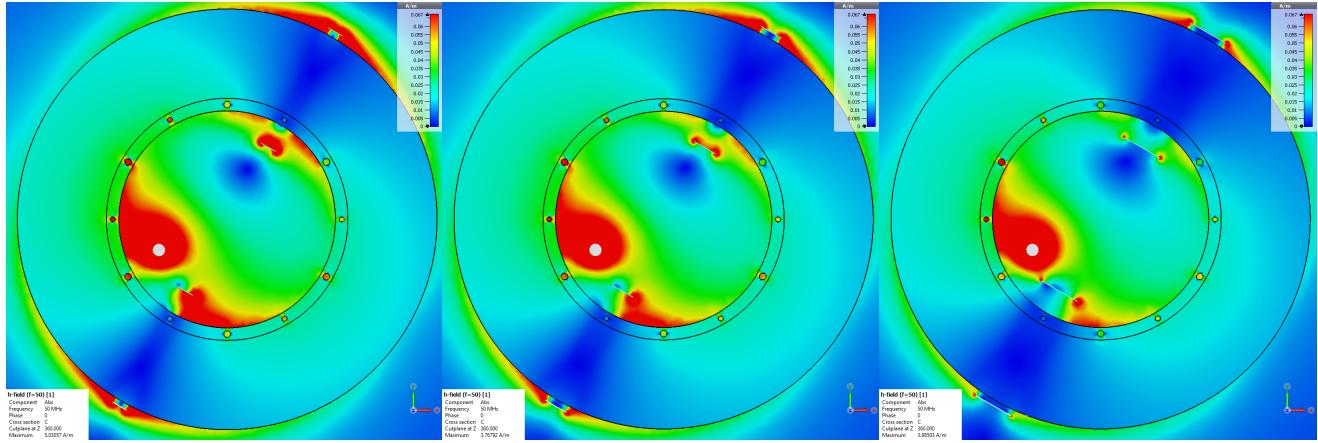


**Abbildung 45:** Feldbild des Ringkerns ohne Kurzschlüsse aus der CST Simulation.



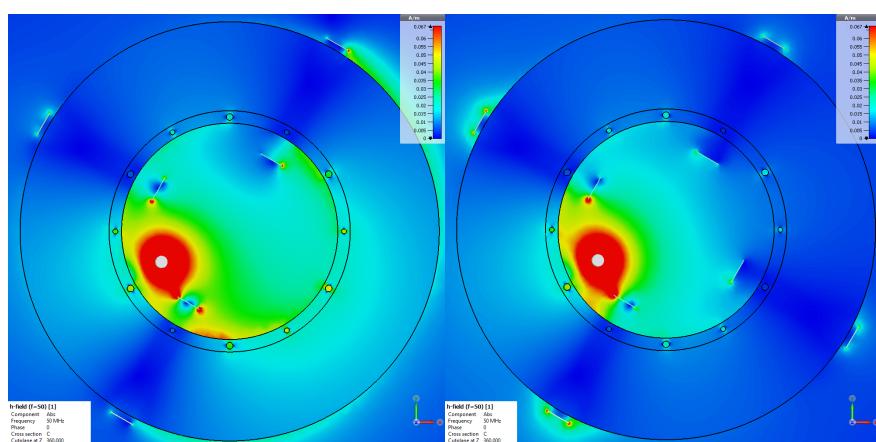
**(a)** 1 Kurzschluss der Breite 20 mm und **(b)** 1 Kurzschluss der Breite 30 mm und **(c)** 1 Kurzschluss der Breite 50 mm und der Höhe 160 mm.

**Abbildung 46:** Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit jeweils einem Kurzschluss verschiedener Breiten aus der CST Simulation.



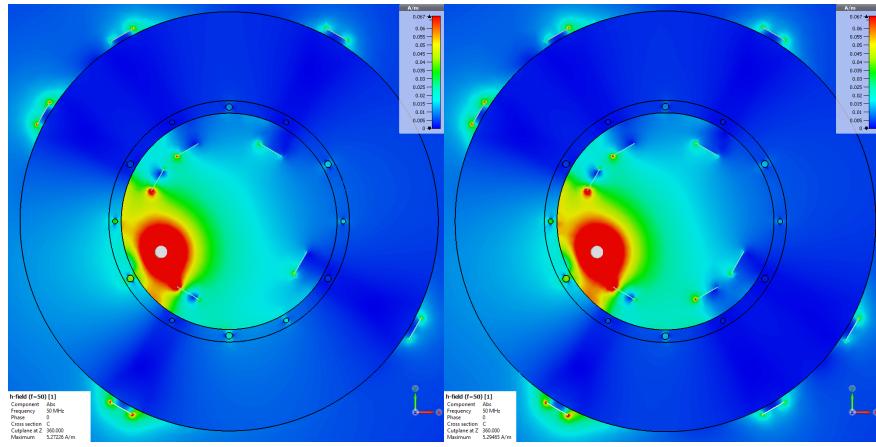
(a) 2 Kurzschlüsse der Breite 20 mm und (b) 2 Kurzschlüsse der Breite 30 mm und (c) 2 Kurzschlüsse der Breite 50 mm und der Höhe 160 mm.

**Abbildung 47:** Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit jeweils zwei Kurzschläüssen verschiedener Breiten aus der CST Simulation.

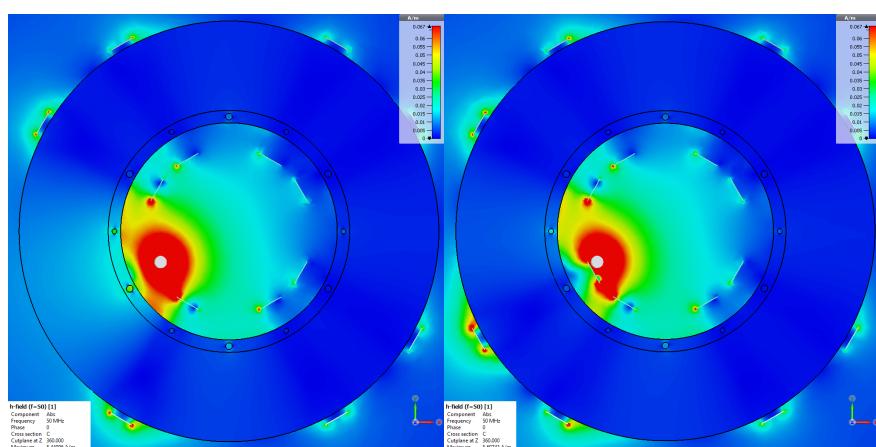


(a) 3 Kurzschluss der Breite 30 mm und (b) 4 Kurzschluss der Breite 30 mm und der Höhe 160 mm.

**Abbildung 48:** Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit drei und vier Kurzschläussen aus der CST Simulation.



**Abbildung 49:** Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit fünf und sechs Kurzschlüssen aus der CST Simulation.



**Abbildung 50:** Gegenüberstellung der Feldbilder des Ringkerns mit sieben und acht Kurzschlüssen aus der CST Simulation.



# Literaturverzeichnis

[Agilent 2000] AGILENT: *8753ES Network Analyzer*. Agilent Technologies, Juli 2000

[Bast 2017] BAST, Denys: *Modellierung und Feldsimulation eines Messaufbaus für hochpermeable Ringkernproben*. 2017

[Frey u. a. 2015] FREY, Michael ; RICHTER, Helmut ; NINGEL, Klaus-Peter ; ZIPFEL, Bernhard ; THIELMANN, Christof ; KLINGBEIL, Harald ; FLEISCHMANN, Gerhard ; HARTEL, Uta ; BALSS, Robert ; GROSS, Kerstin u. a.: Status of the Ring RF Systems for FAIR. (2015)

[Harzheim u. a. 2016] HARZHEIM, Jens ; FREY, Michael ; KLINGBEIL, Harald ; KÖNIGSTEIN, Robert ; DOMONT-YANKULOVA, Dilyana: Modeling and Simulation of Broadband RF Cavities in PSpice. (2016)

[Klingbeil 2008] KLINGBEIL, Harald: Grundlagen zu Beschleunigungskavitäten. (2008)

[Klingbeil u. a. 2015] KLINGBEIL, Harald ; LAIER, Ulrich ; LENS, Dieter: *Theoretical Foundations of Synchrotron and Storage Ring RF Systems*. 2015

[Lee u. Ng 1997] LEE, SY ; NG, KY: Particle dynamics in storage rings with barrier rf systems. In: *Physical Review E* 55 (1997), Nr. 5, S. 5992

[MAGNETEC 2018] MAGNETEC: *Material Properties of NANOPERM™*. <https://www.magnetec.de/en/nanopermr-products/technical-data-nanopermr/>. Version: April 2018

