

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

Seminarausarbeitung Projektseminar Beschleunigertechnik von Rainer Stellnberger,

Julian Buschbaum, Benjamin Northe

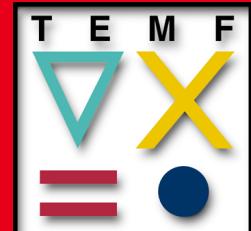
Betreuer: Jens Schweickhardt, M.Sc.

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 werden. 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</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Theorie . . . . .	1
1.2	Magnetic Alloy Ringkerne . . . . .	1
1.3	Aufgabenstellung . . . . .	2
1.4	Herangehensweise . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Messaufbau</b>	<b>5</b>
2.1	Testbox . . . . .	5
2.1.1	Anfangsmessung . . . . .	6
2.1.2	Modifikation der Ringkernhalterung . . . . .	7
2.1.3	Entwurf der Kurzschlusschienen . . . . .	8
2.2	Messdurchführung . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Simulation</b>	<b>11</b>
3.1	Motivation . . . . .	11
3.2	Modellierung . . . . .	11
3.2.1	Bestehendes Testbox- und Ringkernmodell . . . . .	11
3.2.2	Kurzschlüsse . . . . .	12
3.2.3	Realitätsgentreue Anpassungen . . . . .	13
3.2.3.1	Ringkern . . . . .	14
3.2.4	Erweiterung des Modells . . . . .	15
3.3	Durchführung . . . . .	16
3.3.1	Einstellungen in CST und Wahl des Numerischen Lösers . . . . .	16
3.3.2	Variation der Kurzschlussparameter . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Gegenüberstellung und Ergebnisse</b>	<b>19</b>
4.1	Gegenüberstellung der Simulations und Messergebnisse . . . . .	19
4.2	Auswertung der Kurzschlussanordnungen . . . . .	21
4.2.1	Anzahl der Kurzschlüsse . . . . .	21
4.2.2	Breite der Kurzschlüsse . . . . .	23
4.2.3	Länge der Kurzschlüsse . . . . .	25
4.2.4	Dicke der Kurzschlüsse . . . . .	26
4.3	Einfluss im Leerlauf befindlicher Schienen auf die Ringkernimpedanz . . . . .	33
4.4	Feldbilder . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>37</b>
5.1	Fazit . . . . .	37
5.2	Ausblick . . . . .	37
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>39</b>
A.1	Gegenüberstellung der Simulations- und Messergebnisse . . . . .	39

---

A.2	Gegenüberstellung der CST-Feldbilder der Kurzschlussanordnungen . . . . .	43
A.3	Ergebnisse der Anordnungsvariation . . . . .	45
A.4	Übertragung der Messung in die Kavität . . . . .	46

# Abbildungsverzeichnis

1	Für Messungen verwendeter MA-Ringkern mit Abmessungsbezeichnung. . . . .	2
2	Abmessungen der Testbox, alle Längenangaben in Millimeter. . . . .	5
3	Geöffnete Testbox mit Holzkonstruktion als Halterung für den MA-Ringkern. . . . .	6
4	Kurzschlüsse um den Ringkern mittels Drähten, deren Enden mit Lüsterklemmen verbunden sind. . . . .	6
5	Halterung aus einem Polygon, welches auf ein Holzkreuz aufgesetzt wurde mit sichtbarem Anschlag. . . . .	7
6	Eingebrachter Ringkern auf der Halterung bestehend aus einem Polygon, welches auf ein Holzkreuz aufgesetzt wird. . . . .	7
7	Kurzschlusschiene mit einer Länge in z-Richtung von 160 mm ,einer Breite in x-Richtung von 30 mm und einer Blechdicke von 1 mm. . . . .	8
8	Alle für Messungen angefertigte Kurzschlusschienen. . . . .	9
9	Messstand mit Netzwerk-Analysator, welcher mit der geschlossenen Testbox verbunden ist.	10
10	Modell der Testbox in CST . . . . .	11
11	Modell der Einkopplungsstange mit elektrischer Isolation . . . . .	12
12	Gesamtdarstellung der Modellierung von Testbox und Ringkern nach Denys Bast [Bast, 2017]	12
13	Modellierung eines Kurzschluss (a) als Torus, (b) als Schiene und (c) in gefertigter Ausführung. .	13
14	Anpassung des Simulationsmodells an den realen Aufbau (a) Bügel über Einkopplung, (b) Kupferzylinder an der Rückwand und (c) die hölzerne Halterung des Ringkerns. . . . .	14
15	Ringkernmodell mit innerem Eisenring . . . . .	14
16	RLC-Ersatzschaltbild für die Testbox Modellierung mit Eingebrachtem Ringkern als Last. .	15
17	Erweiterung der Testbox um die Holzkreuzhalterung und den Polygonzug zur Befestigung der Kurzschlüsse . . . . .	16
18	Gegenüberstellung der Simulation der Box mit Halterung aus Kreuz und Polygon zur entsprechenden Messung. . . . .	19
19	Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz ohne Kurzschlüsse	20
20	Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz für einen Kurzschluss. . . . .	20
21	Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz für eine Anzahl von sieben Kurzschläßen . . . . .	21
22	Unterschiedliche Anzahlen an montierten Kurzschläßen an verschiedenen Positionen. . . .	28
23	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz über der Frequenz für verschiedene Anzahlen an Kurzschläßen . . . . .	29
24	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz mit verschiedenen Anzahlen an Kurzschläßen bei 5, 10 und 20 MHz. . . . .	29
25	Jeweils ein montierter Kurzschluss mit verschiedenen Breiten. . . . .	29
26	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Breiten der Kurzschlüsse. . . .	30
27	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz bei 5, 10 und 20 MHz. Links: 1KS, rechts: 2KS. .	30
28	Jeweils ein montierter Kurzschluss mit verschiedenen Längen. . . . .	31
29	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Längen der Kurzschlüsse. . . .	31
30	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz bei 5, 10 und 20 MHz. Links: 1KS, rechts: 2KS. .	32
31	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Dicken der Kurzschlüsse. . . .	32

32	Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz über der Frequenz für verschiedene Anzahlen an offenen Kupferschienen. . . . .	33
33	Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns ohne Kurzschluss und mit einem Kurzschluss. . . . .	34
34	Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns mit einem Kurzschluss und mit acht Kurzschlüssen. . . . .	35
35	Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns mit einem Kurzschluss der Breite 50 mm und mit zwei Kurzschlüssen der Breite 20 mm. .	35
36	Gegenüberstellung der Testbox ohne Ringkern. . . . .	39
37	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern ohne Kurzschlüsse. . . . .	39
38	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und einem Kurzschluss. . . . .	40
39	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und zwei Kurzschlüssen. . . . .	40
40	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und drei Kurzschlüssen. . . . .	40
41	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und vier Kurzschlüssen. . . . .	41
42	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und fünf Kurzschlüssen. . . . .	41
43	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und sechs Kurzschlüssen. . . . .	41
44	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und sieben Kurzschlüssen. . . . .	42
45	Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und acht Kurzschlüssen. . . . .	42
46	Feldbild des Ringkerns ohne Kurzschlüsse. . . . .	43
47	Gegenüberstellung des Ringkerns mit jeweils einem Kurzschluss verschiedener Breiten und der Länge von 160 mm. . . . .	43
48	Gegenüberstellung des Ringkerns mit jeweils zwei Kurzschlüssen verschiedener Breiten und der Länge von 160 mm. . . . .	44
49	Gegenüberstellung des Ringkerns mit drei bis acht Kurzschlüssen der Breite 30 mm und der Länge 160 mm. . . . .	44
50	Gegenüberstellung der Feldbilder für die Variation der Anordnung von Kurzschläßen um den Ringkern. . . . .	45
51	Simulationsergebnisse für die Variation der Anordnung von Kurzschläßen um den Ringkern.	46
52	Messaufbau für die Messung an der Kavität . . . . .	46
53	Absolutwert der Impedanz gemessen über das Gap in der Kavität Mit geschlossenem Kurzschluss und offenem Kurzschluss. . . . .	47

# Abkürzungsverzeichnis

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



# 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
$\mu_r$	Komplexe, dissipative Permeabilitätskonstante
$N$	Anzahl der Ringkerne
$d$	Ringkerndicke
$r_i$	Innendurchmesser eines Ringkerns
$r_o$	Außendurchmesser eines Ringkerns
$\varepsilon_r$	Komplexe, dissipative Dielektrizitätskonstante
$Z_{ges}$	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

Beim GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH werden in der Gruppe Ring-RF Systems unter anderem Barrier Bucket Systeme entwickelt. Diese können zur Manipulation 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 Magnetic Alloy Ringkerne

Für die Kavitäten an der GSI wurden M-889-02 MA-Ringkerne der Firma Magnetec verwendet [Halász, 2012]. 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]. Das Material weist eine sehr hohe Permeabilität in einer Reichweite von 1000 bis 200000 auf. Durch den inneren Ring sind einige Bohrungen durchgeführt, an denen der Kern innerhalb einer Kavität montiert werden kann.

Die genauen Abmessungen des Ringkerns sind in Tabelle 1 angegeben.



Abbildung 1: Für Messungen verwendeter MA-Ringkern mit Abmessungsbezeichnung.

Größe	Wert in Millimeter
Außendurchmesser $D_a$	500
Innendurchmesser $D_i$	260
Breite des Ringkerns	25
Breite des Edelstahlrings	26
Dicke des Edelstahlrings $D_{Eisen}$	15

Tabelle 1: Abmessungen des verwendeten MA-Ringkerns.

### 1.3 Aufgabenstellung

Die Impedanz der Ringkerne wirkt sich auf den Teilchenstrahl im Beschleuniger aus. Diese Auswirkung soll möglichst reduziert werden, wenn die Kavität den Teilchenstrahl nicht manipulieren.

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.

### 1.4 Herangehensweise

Die Analyse des Kurzschließens der MA-Ringkerne wurden nach dem Verfahren einer Kreuzvalidierung erarbeitet. Dazu wurden abwechselnd Messungen und Simulationen durchgeführt, die Ergebnisse aufeinander abgestimmt und für das weitere Vorgehen zu Grunde gelegt.

In einem ersten Schritt wurden dazu Messungen an einer Testbox (siehe Kapitel 2) durchgeführt, um erste Erkenntnisse über das Verhalten der Ringkernimpedanz im kurzgeschlossenen Zustand zu erlangen.

Aus diesen Erkenntnissen wurden erste Parameter für die Kurzschlüsse abgeleitet, die einen Einfluss auf die Ringkernimpedanz haben können:

- die Form
- die Anzahl
- die geometrischen Abmessungen
- die Anordnung um den Ringkern

Dabei zeigte sich auch, dass für die Reproduzierbarkeit der Messungen Modifikationen an der vorhandenen Testbox erfolgen müssen. Diese werden in Kapitel 2.1 näher ausgeführt. Einige Einflussparameter, wie etwa die Anordnung der Kurzschlüsse um den Ringkern, wurden nicht weiter untersucht. Die Anordnung und deren beobachteter Einfluss scheinen aufgrund der Symmetrie der Ringkerne zum Strahlrohr in einer Kavität nicht relevant. Ergebnisse einer ersten Simulation sind hierfür im Anhang A.3 dargestellt.

Mit den verschiedenen Parametern wurden in einem zweiten Schritt Simulationen mit der Software CST für numerische Feldberechnungen aufgesetzt, die die ersten Messergebnisse überprüfen und weitere Erkenntnisse für den weiteren Arbeitsprozess liefern sollten. Aus diesen wurden dann Variationen für die Kurzschlüsse erarbeitet, die die genannten Parameter validierbar machen (siehe dazu Abschnitt 2.1.3). Außerdem wurden die Modifikationen ausgearbeitet, die die Messungen reproduzierbar machen.

Die modifizierte Testbox und die ausgearbeiteten Kurzschlüsse wurden in einem weiteren Durchgang vermessen. Daraufhin wurde die Simulation besser an die realen Umstände, wie Geometrie, Materialparameter und dergleichen angepasst (Kapitel 3), um in einem letzten Schritt die gesammelten Ergebnisse plausibel auszuwerten. Hieraus wurden schließlich Gesichtspunkte für ein gutes Kurzschließen der Ringkerne abgeleitet.

Die erläuterten Arbeitsschritte, technische Details der Mess- und Simulationsumgebung sowie die Ergebnisse der Kreuzvalidierung werden in den folgenden Kapiteln jeweils näher ausgeführt.



## 2 Messaufbau

### 2.1 Testbox

Der für Messungen verwendete Testaufbau wurde aus einem vorangegangenen Projekt an der GSI übernommen [Harzheim u. a., 2016]. Mit dem Testaufbau soll eine reproduzierbare Vermessung des Einflusses der MA-Ringkerne auf die Impedanz einer Einkopplung erreicht werden. 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 2 zu entnehmen.

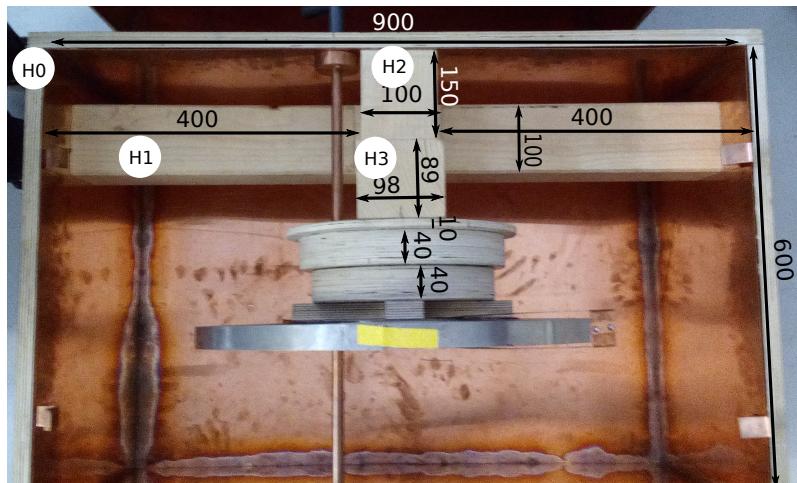


Abbildung 2: Abmessungen der Testbox, alle Längenangaben in Millimeter.

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 ausgekleidet. Der Überzug schirmt die Messungen in der Testbox von äußeren 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 3 zeigt das Innere der Testbox mit eingehängtem Ringkern.



Abbildung 3: 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. Die Enden in den Lüsterklemmen wurden zur guten Kontaktierung abgeschliffen. Diese Kupferdrähte lassen sich problemlos durch die Bohrungen an der Innenseite des Ringkerns (siehe Abbildung 4) führen. Das fixiert die Position, lässt aber dennoch Spielraum um die Länge zu verändern.



Abbildung 4: Kurzschlüsse um den Ringkern 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 5 und 6 modifiziert.

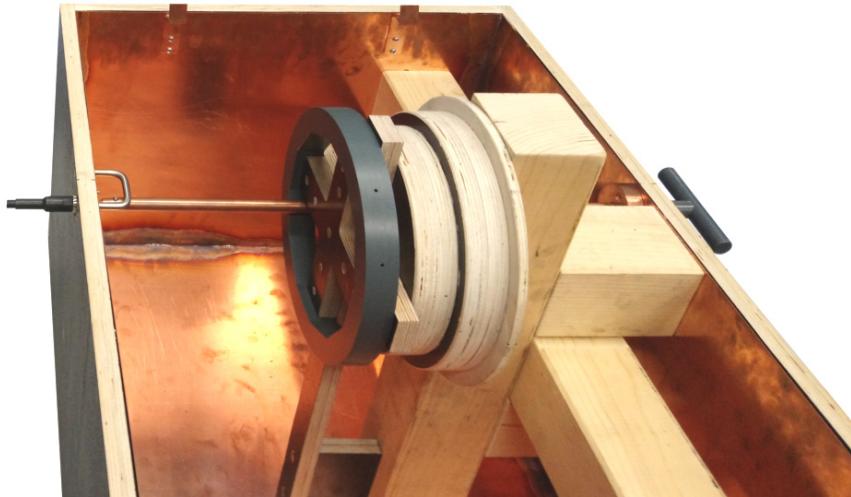


Abbildung 5: Halterung aus einem Polygon, welches auf ein Holzkreuz aufgesetzt wurde mit sichtbarem Anschlag.

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 6 zeigt den Polygonzug mit montiertem Ringkern.

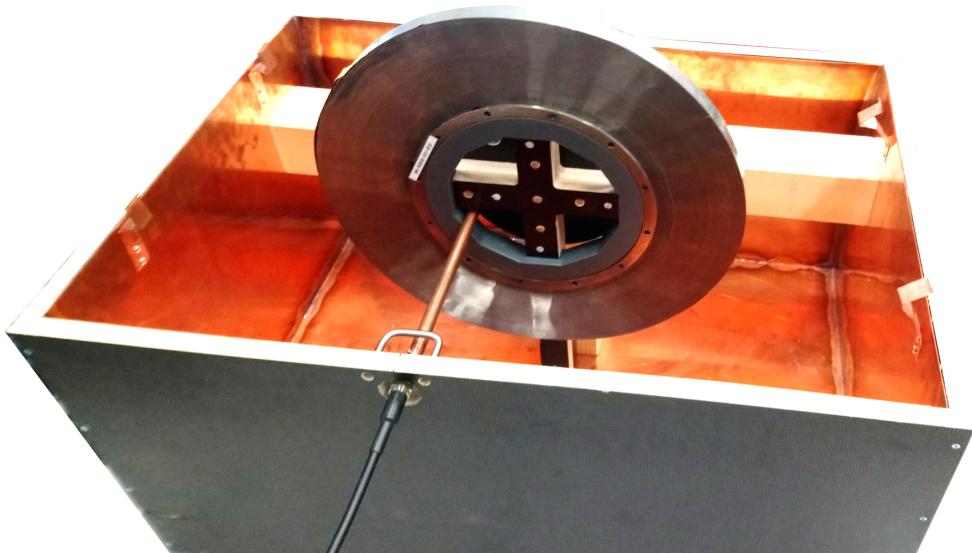


Abbildung 6: Eingebrachter Ringkern auf der Halterung bestehend aus einem Polygon, welches auf ein Holzkreuz aufgesetzt wird.

### 2.1.3 Entwurf der Kurzschlusschienen

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

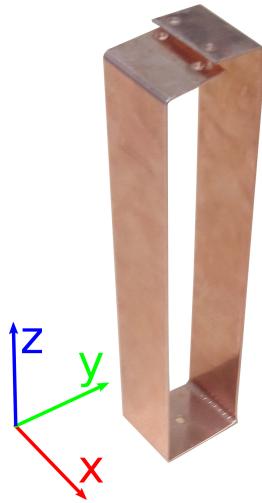


Abbildung 7: Kurzschlusschiene mit einer Länge in z-Richtung von 160 mm, einer Breite in x-Richtung von 30 mm und einer Blechdicke von 1 mm.

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, für die Befestigung der Schiene am Polygonzug. 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:

- Länge 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 8 zu sehen.



Abbildung 8: Alle für Messungen angefertigte Kurzschlusschienen.

Insgesamt wurden folgende Kurzschlüsse angefertigt:

- 8x 160 mm Länge in z-Richtung, 30 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 200 mm Länge in z-Richtung, 30 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 250 mm Länge in z-Richtung, 30 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 160 mm Länge in z-Richtung, 20 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 160 mm Länge in z-Richtung, 50 mm Breite in x-Richtung und 1 mm Blechdicke
- 2x 160 mm Länge 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 vermieden, die durch Lageänderung des Kabels nach der ursprünglichen Kalibrierung entstehen können. Bei der Kalibration selbst ist es wichtig, das verwendete Kalibrationskit und in diesem Fall den Parameter  $S_{11}$  am NA auszuwählen, aus dem für die Visualisierung der Parameter  $Z_{refl}$  errechnet wird. Abbildung 9 bildet den Aufbau ab.

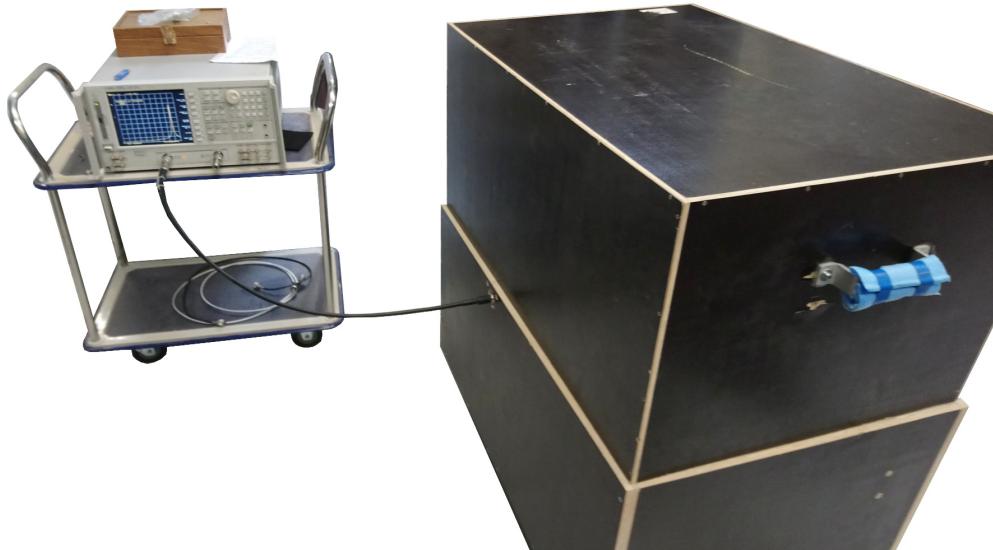


Abbildung 9: Messstand mit Netzwerk-Analysator, welcher mit der geschlossenen Testbox verbunden ist.

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, wurde die Testanordnung zunächst mit der Simulationssoftware CST simuliert.

Die Simulationen dienten als Vorbereitung, um die Messungen gezielt durchführen zu können. Zuletzt wurden die Simulationsergebnisse dann 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 10 dargestellt.

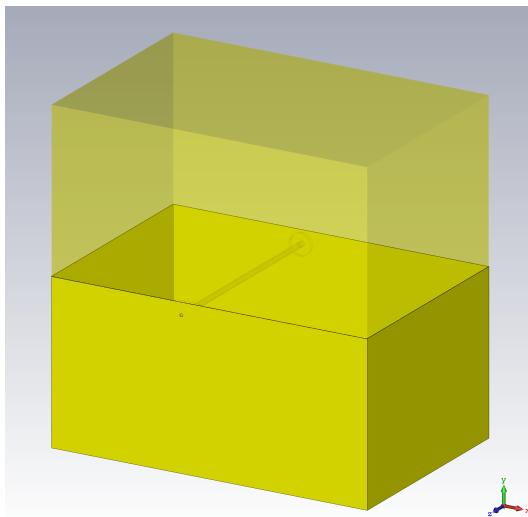


Abbildung 10: Modell der Testbox in CST

In Abbildung 11 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.

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

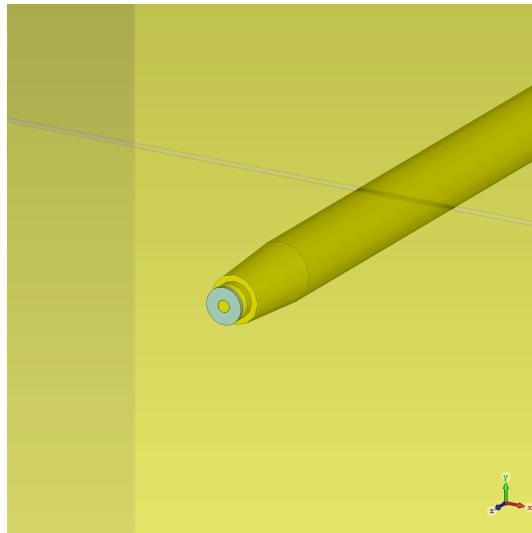


Abbildung 11: Modell der Einkopplungsstange mit elektrischer Isolation

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

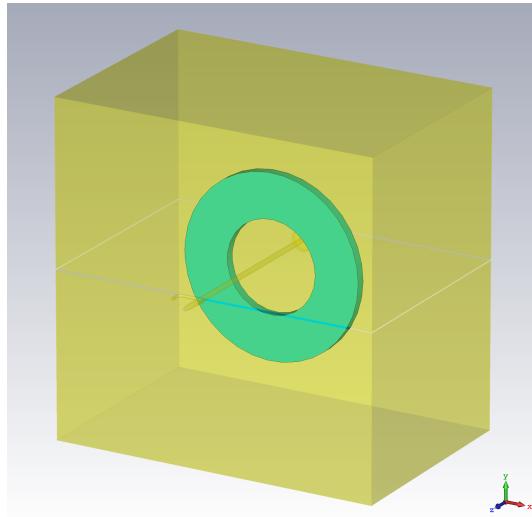


Abbildung 12: Gesamtdarstellung der Modellierung von Testbox und Ringkern nach Denys Bast [Bast, 2017]

### 3.2.2 Kurzschlüsse

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

Die erste Version stellt ein einfacher, ellipsenförmiger Torus dar, wie er in Abbildung 13(a) abgebildet ist. Als Material für die Simulation wird Kupfer aus der Datenbank von CST verwendet.

Die in Kapitel 2.1 erwähnten Ausführungen der Kurzschlüsse für die bessere Reproduzierbarkeit der Messungen, sind wie beschrieben in CST nachgebildet. Abbildung 13(b) zeigt die Umformung des einfachen

Torus zu einem schienenförmigen Kurzschluss. Die finale Version, die für die Messungen benutzt wird, ist in Abbildung 13(c) zu sehen. Die einfache Kupferschiene ist geometrisch an die verwendeten Kurzschlüsse angepasst und um die Verbindungsschrauben erweitert.

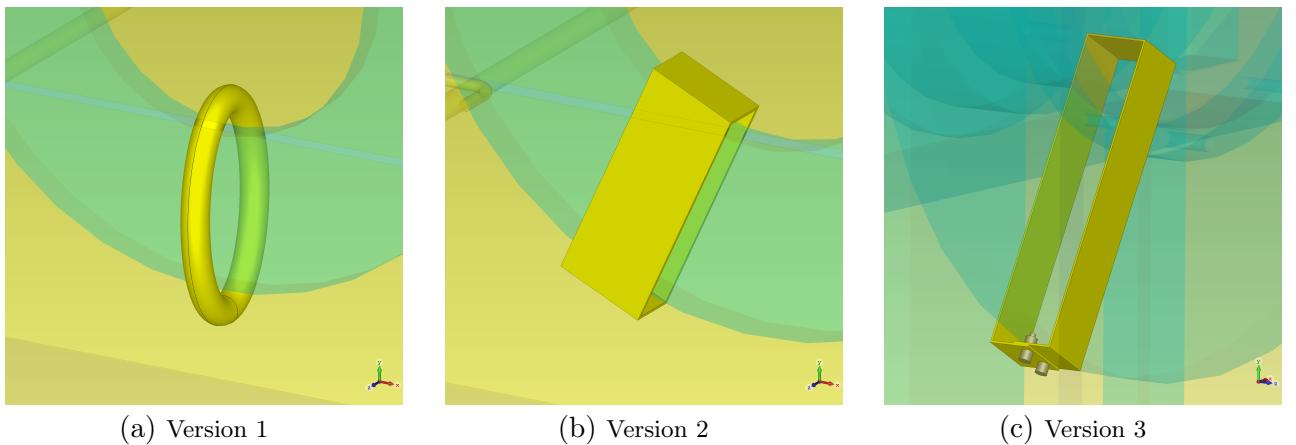


Abbildung 13: Modellierung eines Kurzschlusses (a) als Torus, (b) als Schiene und (c) in gefertigter Ausführung.

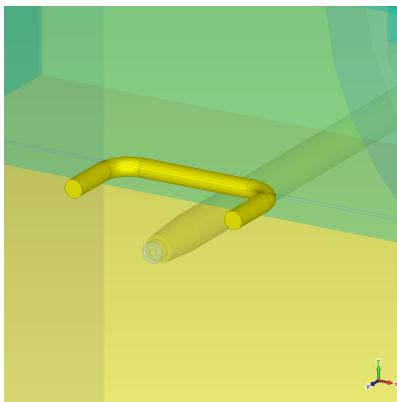
Um eine Parameteranalyse durchzuführen und die Simulationsergebnisse mit den Messungen gegenüberzustellen, ist die finale Version in den verschiedenen Ausführungen, wie sie aus Kapitel 2.1.3 hervorgehen, nachgebildet.

### 3.2.3 Realitätsgerechte Anpassungen

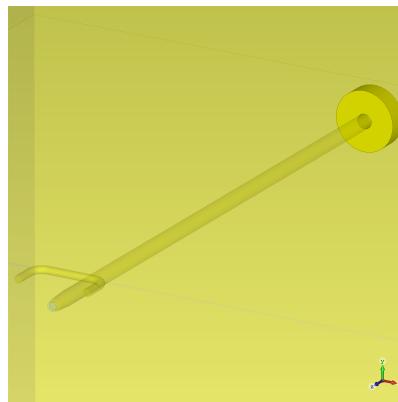
Das bestehende Modell der Testbox und des Ringkerns wurde im Laufe der Arbeit weiter ausgearbeitet, um die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messungen zu erhöhen. Die nachfolgenden Komponenten wurden in das CST-Modell übernommen, da aufgrund ihrer di-/elektrischen Eigenschaften ein Einfluss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

Wie aus den Bildern der Testbox in Kapitel 2 hervorgeht, befindet sich oberhalb der Einkopplungsstange auf der Anschlussseite ein metallischer Bügel. Er ist möglichst exakt in CST nachgebildet (siehe Abb. 14(a)). Am Ende der Einkopplungsstange an der Rückwand ist eine zylinderförmige, kupferne Halterung für die Stange montiert, sie ist nach Abbildung 14(b) modelliert.

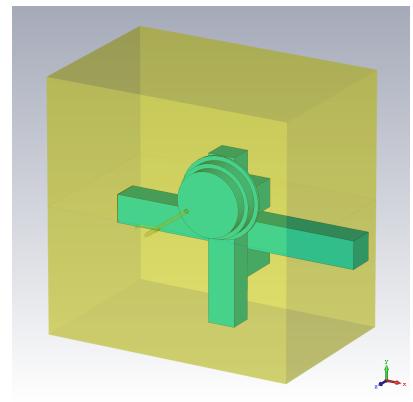
Zuletzt wurde für diese Arbeit auch die Holzkonstruktion in CST übernommen, die als Halterung für die Ringkerne in der Testbox dient (siehe Abb. 14(c)). Dabei wurden die Holzkreise mit einem dissipativen  $\underline{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon'_r(\omega) - i\epsilon''_r(\omega)$  modelliert. Anfänglich wurde das in CST vorhandene dissipative Holzmaterial verwendet. Da die Simulation aber weiterhin eine Abweichung zur Messung lieferte, wurde das Material nach und nach weiter angepasst (siehe Kapitel 4.1). Die Werte der frequenzabhängigen  $\epsilon'_r$  und  $\epsilon''_r$  sind als Wertetabelle für das Material hinterlegt.



(a) Bügel



(b) Zylinder



(c) Holzkonstruktion

Abbildung 14: Anpassung des Simulationsmodells an den realen Aufbau (a) Bügel über Einkopplung, (b) Kupferzylinder 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 Edelstahl, der zur Montage dient. Der Ringkern mit Halterung wurde daher wie Abbildung 15 dargestellt, modelliert und in CST eingefügt. Zunächst wurde der gesamte Ringkern mit dissipativen Materialparametern versehen. Durch eine Nachfrage bei der Firma Magnetec konnte in Erfahrung gebracht werden, dass die Halterung als unmagnetisch ( $\mu_r = 1$ ) angesehen werden kann. Genauere Simulationsergebnisse können deshalb durch Abändern des Ringkernhalterungsmaterials erhalten werden. Hierbei ist zu beachten, dass auch der Innenradius  $r_i$  für die Berechnung von  $\mu$  in diesem Schritt berücksichtigt werden muss. Eine genauere Betrachtung der unterschiedlichen Simulationen ist in Kapitel 4.1 ersichtlich.

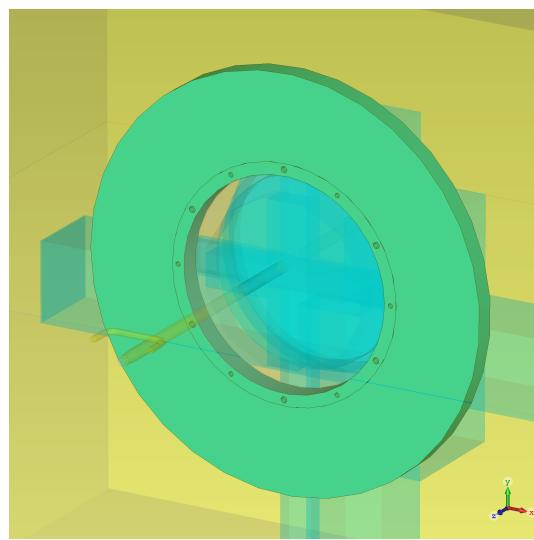


Abbildung 15: Ringkernmodell mit innerem Eisenring

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 16 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

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

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

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

Werden für  $\underline{Z}_{ges}$  die erfassten Impedanzwerte aus der Messung eingesetzt, kann die Ringkernimpedanz dieser Messung bestimmt werden. Diese kann nach [Klingbeil, 2008] 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  $\underline{\mu} = \mu' - j\mu''$  des Ringkerns wird in [Bast, 2017] angeführt, wie sich mittels der Ersatzschaltung  $\mu'$  und  $\mu''$  berechnen lassen:

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

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

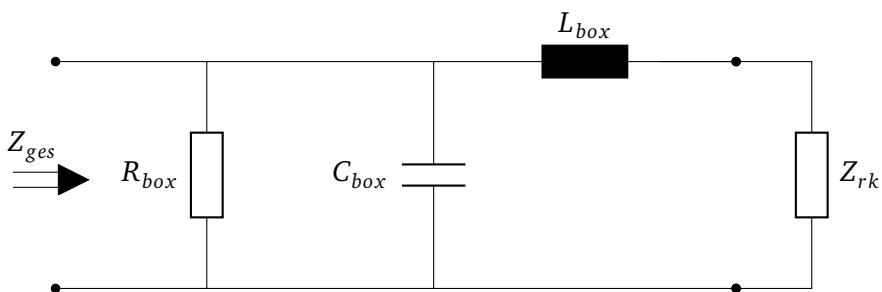


Abbildung 16: RLC-Ersatzschaltbild für die Testbox Modellierung mit Eingebrachtem Ringkern als Last.

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 bessere 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 in CST geometrisch genau nachgebildet (siehe Abb. 17). Für das Holzkreuz wurden die selben Materialparameter verwendet, die für die Holzkreise hinterlegt sind, da es sich auch hierbei um Pressspanholz handelt.

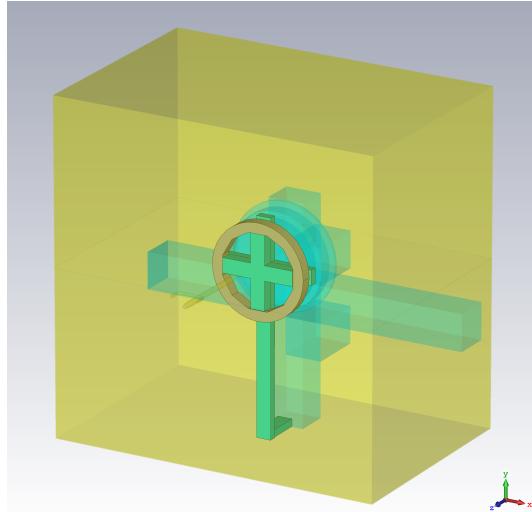


Abbildung 17: Erweiterung der Testbox um die Holzkreuzhalterung und den Polygonzug zur Befestigung der Kurzschlüsse

### 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.

Die Modelle wurden mit dem Frequency Domain Solver von CST simuliert, der die Maxwell-Gleichungen im Frequenzbereich numerisch behandelt. Dieser wurde gewählt, 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 ist von 0.01 MHz bis 100 MHz gewählt. Die Ringkerne werden in diesem Frequenzbereich betrieben und er ist für den Impedanzverlauf der Testbox relevant, da 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 22 ist dabei die Variation in der Anzahl der Kurzschlüsse dargestellt, die um den Ringkern angebracht sind. Abbildung 25 zeigt die Simulation der verschiedenen Breiten und in Abbildung 28 sind die verschiedenen Kurzschlusslängen 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 die Testbox ohne Ringkern, jedoch mit fertigem Halterungsaufbau gegenübergestellt. Abbildung 18 zeigt diese Gegenüberstellung.

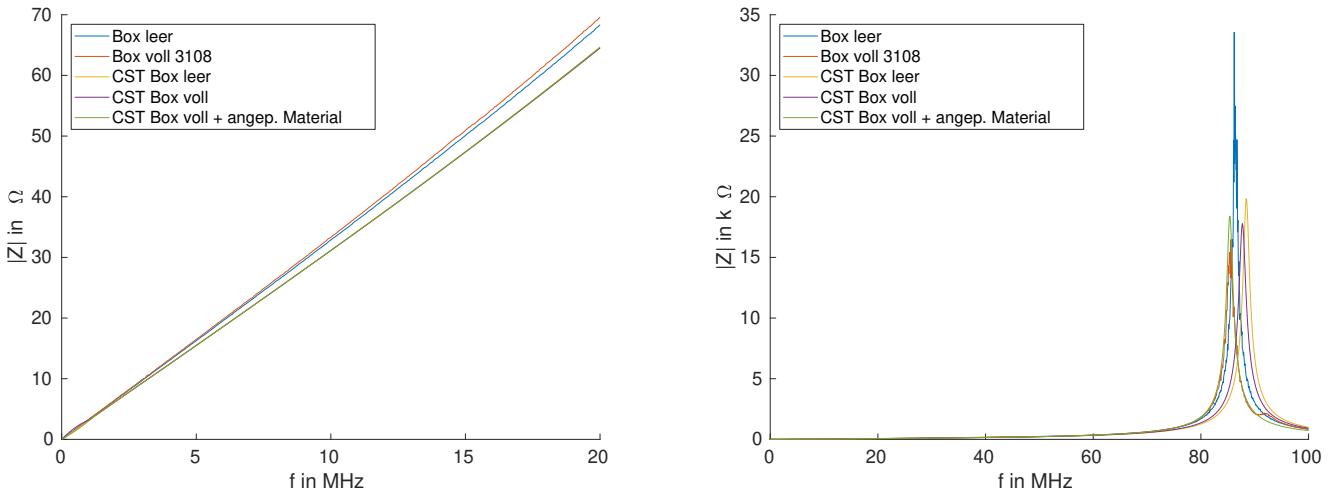


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Simulation der Box mit Halterung aus Kreuz und Polygon zur entsprechenden Messung.

Mit Hilfe von Abbildung 18 können zunächst Messung und Simulation auf Plausibilität überprüft werden. Die Resonanzfrequenz  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  eines LC-Schwingkreise sinkt mit steigendem  $\epsilon_r$ , da hierdurch die Kapazität erhöht wird. Je mehr Einbauten der Testbox hinzugefügt werden, desto größer kann  $\epsilon_r$  einer Ersatzkapazität angesehen werden, wodurch die Resonanz zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben wird. Außerdem zeigt die Abbildung, wie die Simulation durch die Veränderung von  $\epsilon_r$  der Holzkonstruktion mit der Messung besser in Übereinstimmung gebracht werden konnte. Es wurde hierbei vornehmlich  $\epsilon'_r$  variiert. Dieser Vorgehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass das verwendete Material in der Testbox mit den für die Simulation hinterlegten Werten übereinstimmt.

Als nächstes ist 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 15 gezeigt. Auch hierbei wird wieder die gemessene Impedanz an der Einkopplung direkt mit der Impedanz aus der Simulation gegenübergestellt. Diese Auswertung ist in Abbildung 19 zu sehen.

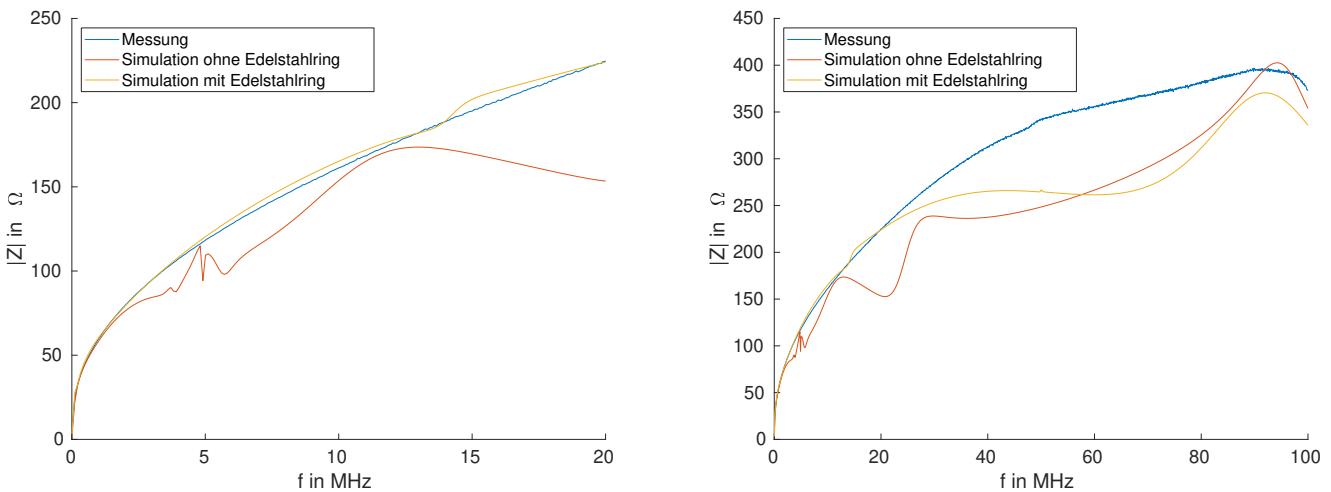


Abbildung 19: Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz ohne Kurzschlüsse

Für die erste Simulation wurde sowohl der Ringkern als auch die Halterung dissipativ modelliert. In den CST-Einstellungen wurde das Adaptive Mesh Refinement ausgeschaltet und eine fixe Meshgröße von rund  $3 \cdot 10^6$  Meshzellen verwendet. Die Simulation zeigt eine gewisse Welligkeit und nach wie vor eine Abweichung zur Messung. Diese Abweichung konnte bis 20 MHz minimiert werden indem die Ringkernhaltung durch Edelstahl mit  $\mu_r = 1$  modelliert. Dieses Vorgehen wurde jedoch nicht für die weiteren Kurzschluss-Simulationen angewendet (siehe 3.2.3.1).

Auch die Kurzschlussmessungen wurden mit der Simulation gegenübergestellt. Zunächst wird die Anordnung mit nur einem Kurzschluss betrachtet. Insbesondere im Bereich bis 50 MHz ist eine hohe Übereinstimmung zu sehen. Lediglich im höheren Frequenzbereich, nahe der Resonanz, weichen Messung und Simulation voneinander ab. Abbildung 20 zeigt die Gegenüberstellung.

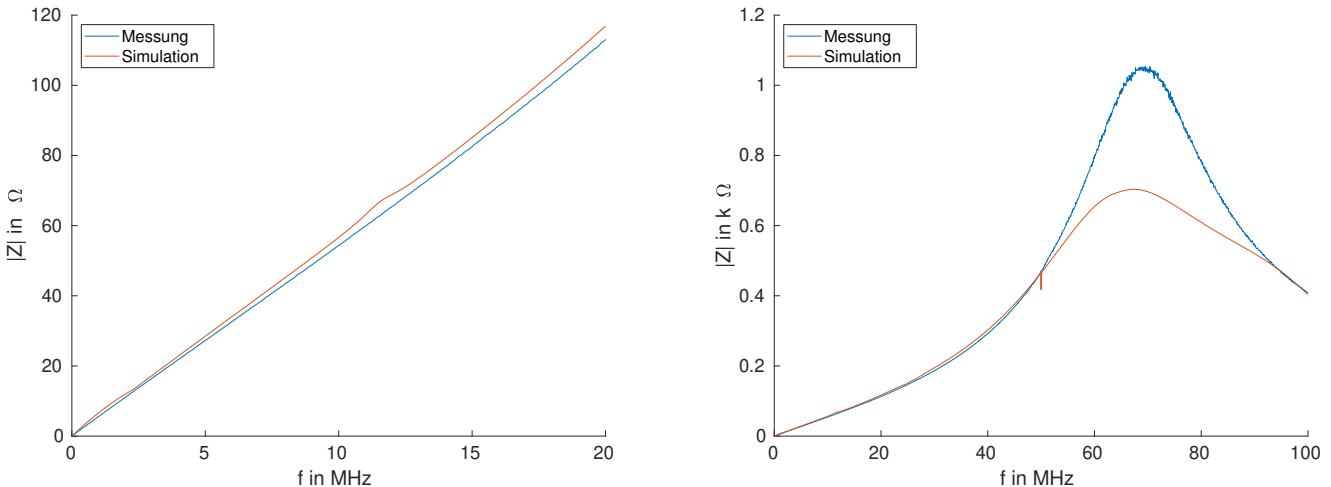


Abbildung 20: Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz für einen Kurzschluss.

Die Simulation der weiteren Kurzschlüssanordnungen zeigt, dass je mehr Kurzschlüsse simuliert werden, die Abweichung zur Messung steigt. Abbildung 21 zeigt diesen Effekt beispielhaft für eine Anzahl von sieben Kurzschläßen.

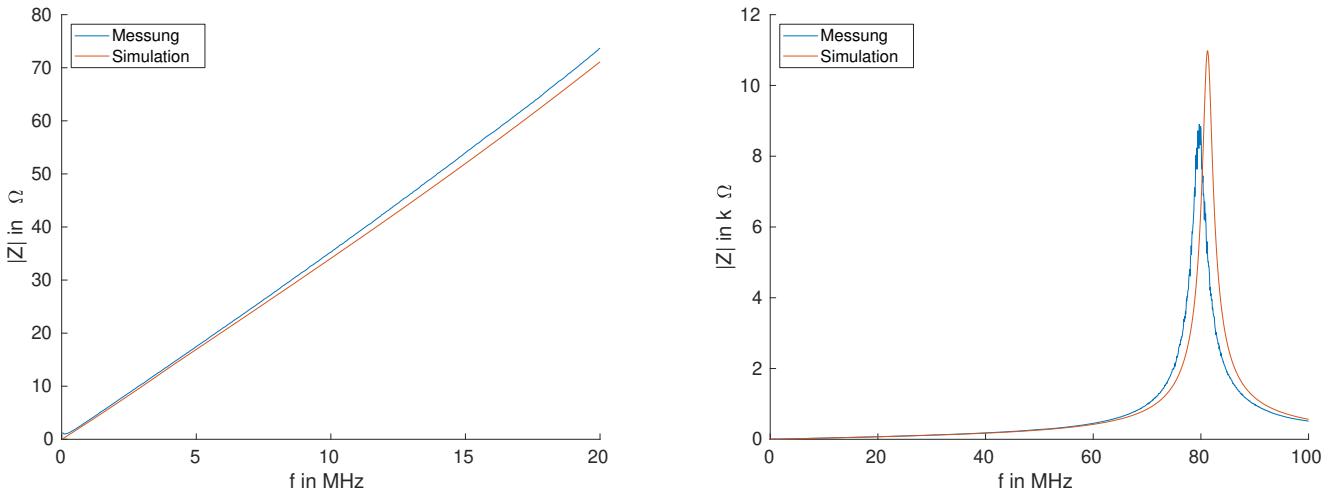


Abbildung 21: Gegenüberstellung der gemessenen, mit der simulierten Ringkernimpedanz für eine Anzahl von sieben Kurzschläßen

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 Kurzschlüssanordnungen in Simulation und Messung sind in Anhang A.1 abgebildet.

## 4.2 Auswertung der Kurzschlüssanordnungen

Nachdem die Messungen, sowie die Simulationen gegeneinander abgeglichen sind, kann die Auswertung der Kurzschlussversuche begonnen werden. Dazu wird nur die reine Ringkernimpedanz betrachtet und nach der Beschreibung in Kapitel 3 berechnet. 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, wie viel Anteil der Ringkernimpedanz durch das Hinzufügen der Kurzschlüsse noch verbleibt. Dazu werden die in Unterkapitel 2.1.3 angeführten Variationsparameter gegenübergestellt.

Für die Auswertung werden die Impedanzmesswerte in Relation zur Impedanz der Testbox ohne Kurzschlüsse gesetzt. Die prozentuale Abweichung kann dann wie folgt berechnet und für verschiedene Variationen verglichen werden.

$$a_{prozentual}(f) = \frac{Z_{rk}(f) - Z_{var}(f)}{Z_{rk}(f)} \cdot 100 = \left( 1 - \frac{Z_{var}(f)}{Z_{rk}(f)} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

In der folgenden Ausführung wird für  $Z_{var}$  die Impedanz des zu betrachtenden Parameters eingesetzt.  $Z_{rk}$  bezeichnet die Impedanz des Ringkerns ohne Kurzschlüsse.

### 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 22 zeigt die Positionen der montierten Kurzschlüsse.

Die achte Kurzschlusschiene, welche in Grafik 22 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 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 ein bis sieben Kurzschlüsse betrachtet. Die resultierende Ringkernimpedanz für die einzelnen Kurzschlussanordnungen ist in Abbildung 23 über der Frequenz aufgetragen.

Es fällt auf, dass der größte Unterschied zwischen dem Ringkern ohne Kurzschluss und einem Kurzschluss besteht. Das bedeutet, dass die Montage weiterer Kurzschlüsse mit zunehmender Anzahl weniger effektiv ist. Dies wird durch die folgenden Betrachtung verdeutlicht, bei der die Impedanz an festen Frequenzen ausgewertet und über der Anzahl an Kurzschlägen aufgetragen wird. Dies geschieht 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 24 aufgetragen.

Wird die Impedanz mit Kurzschlägen in Relation zur Ringkernimpedanz gesetzt, kann der Effekt der Kurzschlüsse wie beschrieben dargestellt werden. Für einen Kurzschluss ergibt sich bei 20 MHz somit eine prozentuale Verringerung von

$$\frac{175.1145 \Omega - 38.4525 \Omega}{175.1145 \Omega} \cdot 100 = 78.042\%. \quad (11)$$

Für zwei Kurzschlüsse errechnet nach Formel 10 sich eine prozentuale Abweichung von 90.08 %, was gegenüber einem Kurzschluss eine weitere Verringerung um 12.038 % bedeutet. Diese weitere Verringerung fällt damit deutlich geringer aus, als es bereits durch einen Kurzschluss der Fall ist. Auch der Vergleich von einem zu sieben Kurzschlägen, die eine Verringerung der Ringkernimpedanz von 98.09 % hervorrufen, fällt mit weiteren 20.048 % vergleichsweise gering aus.

#### 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 25 abgebildet.

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 26 zu sehen.

Auch hier wird wieder ein genaueres Augenmerk auf den relevanten Frequenzbereich unterhalb von 20 MHz gelegt. Dazu wird die Impedanz wieder bei den Frequenzen 5, 10 und 20 MHz dargestellt und die verschiedenen Breiten gegenübergestellt. Dies ist in Abbildung 27 gezeigt.

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 von rund **2.8 %**. Dies zeigt, dass die Breite der Kurzschlüsse eine geringere Auswirkung auf die resultierende Ringkernimpedanz hat, als die Anzahl der Kurzschlüssen. Besonders deutlich wird das im Vergleich zwischen einem Kurzschluss der Breite **50 mm** mit zwei Kurzschlüssen der Breite **20 mm** (siehe Anhang A.3). Trotz des geringeren Platzbedarfs, liefern die zwei schmalen Kurzschlüsse eine deutlich geringere Impedanz.

---

#### 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 28 gezeigt.

Die Länge der Kurzschlüsse wird nach dem bekannten Vorgehen analysiert. Zunächst wird die Ringkernimpedanz über der Frequenz nach Abbildung 29 aufgetragen.

Es fällt auf, dass der Effekt von längeren Kurzschlüssen besonders im unteren Frequenzbereich noch deutlich geringer ausfällt, als es bei der Breitenvariation der Fall ist. 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 30 zu sehen.

Der Extremfall ist hier die Variation bei 20 MHz und zwei Kurzschlüssen zwischen 160 mm und 250 mm Länge. Setzt man die Werte in Gleichung 10 ein, so erhält man eine Abweichung von rund 1.3 %.

#### 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 31 gezeigte Ergebnis.

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 Kurzschlüssen bei 20 MHz mit verschiedenen Dicken liefert nach Gleichung 10 einen prozentualen Wert von 0.286 %. Die Dicke des Blechs hat damit nahezu keinen Einfluss auf die Ringkernimpedanz.

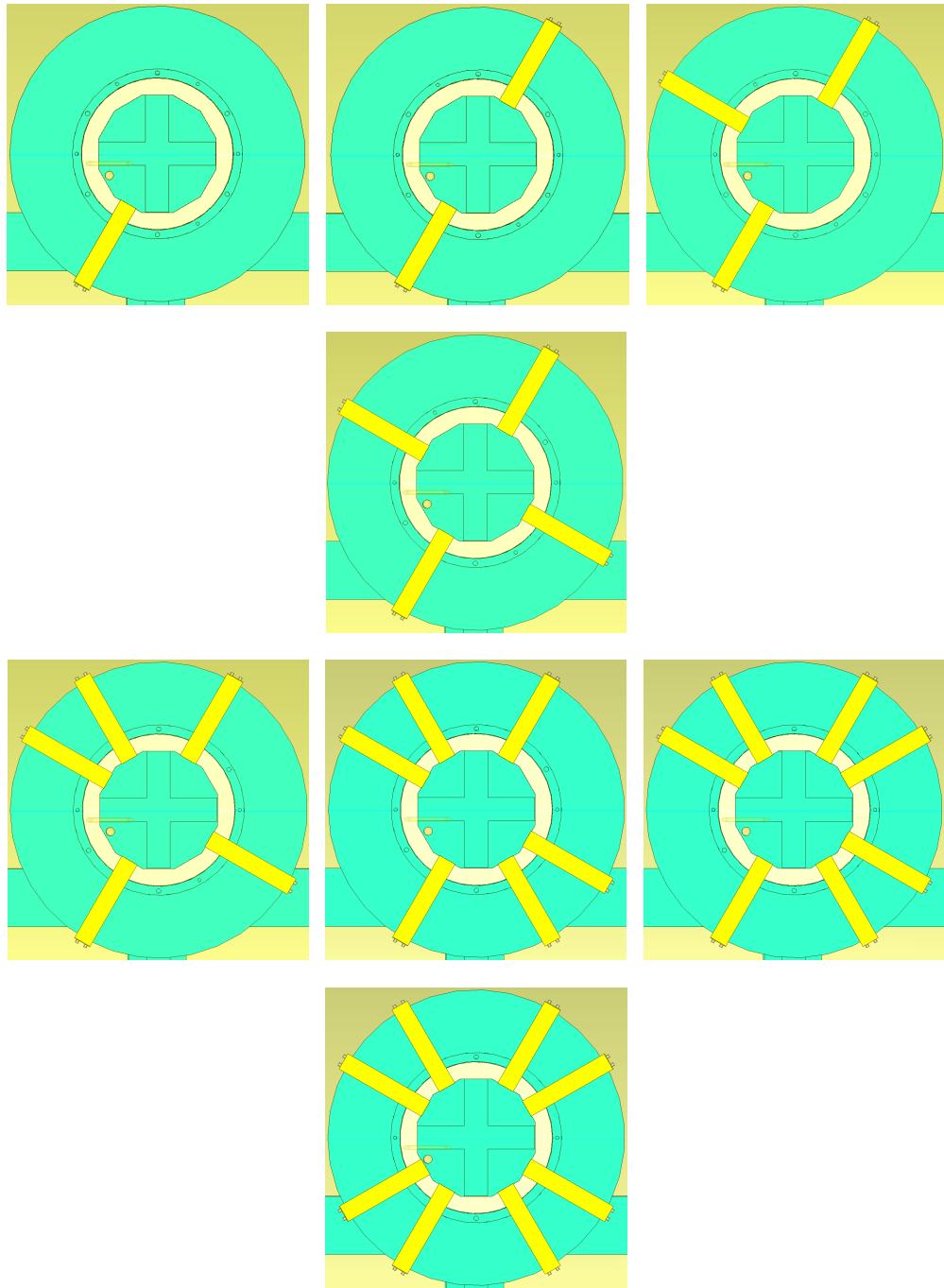


Abbildung 22: Unterschiedliche Anzahlen an montierten Kurzschlüssen an verschiedenen Positionen.

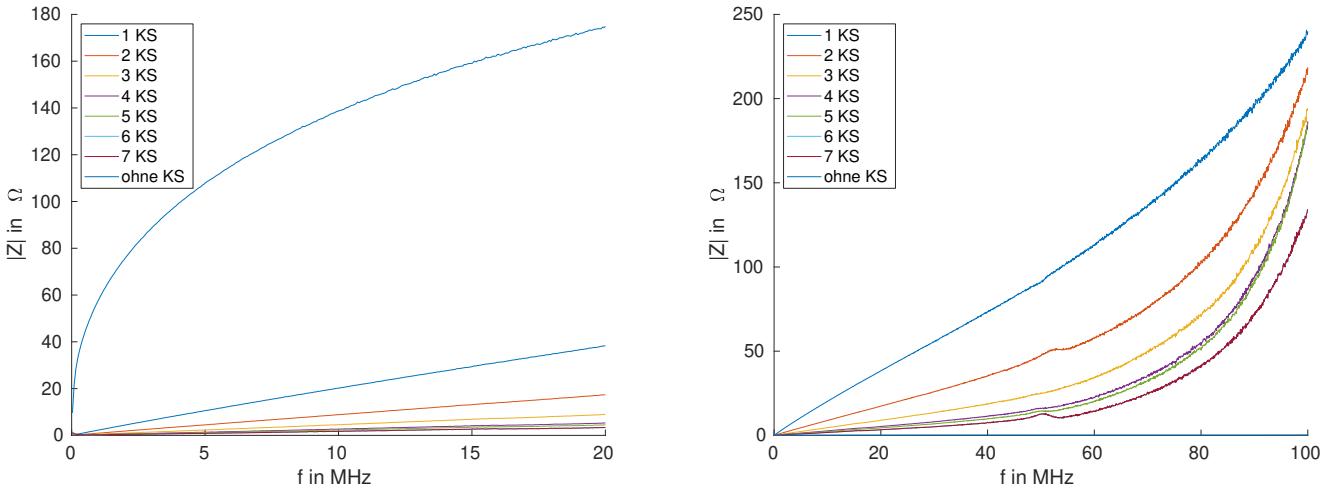


Abbildung 23: Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz über der Frequenz für verschiedene Anzahlen an Kurzschlüssen

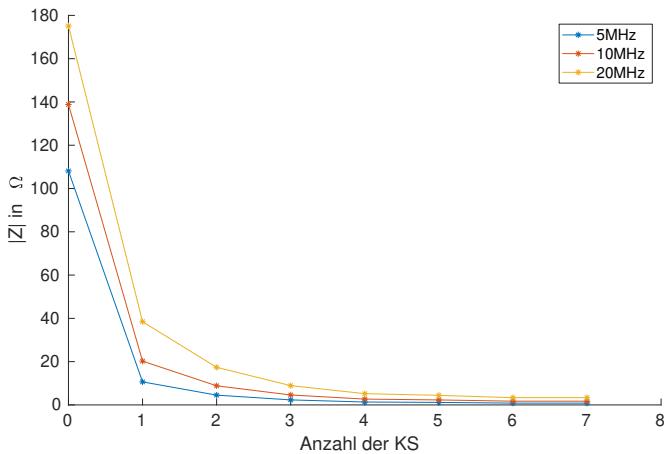


Abbildung 24: Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz mit verschiedenen Anzahlen an Kurzschlüssen bei 5, 10 und 20 MHz.

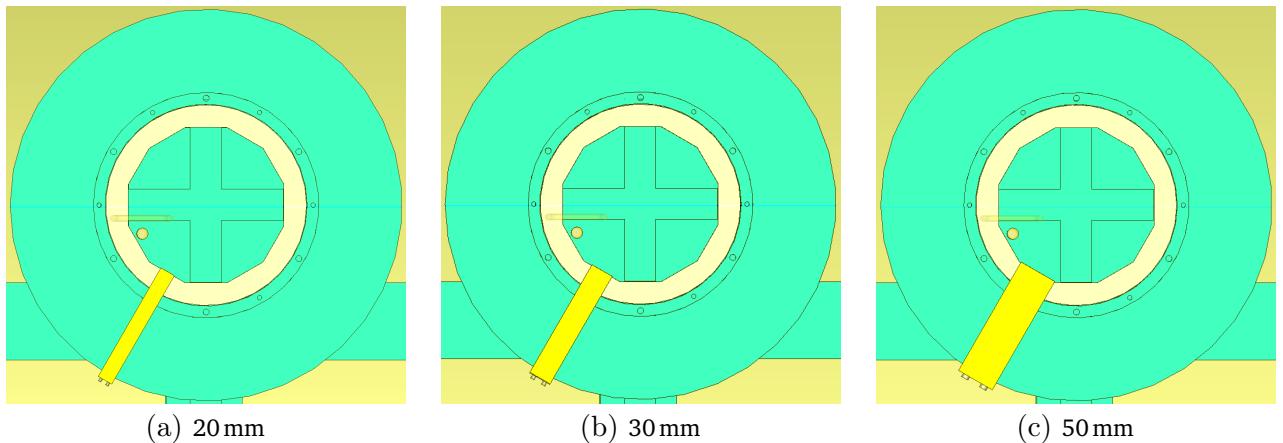


Abbildung 25: Jeweils ein montierter Kurzschluss mit verschiedenen Breiten.

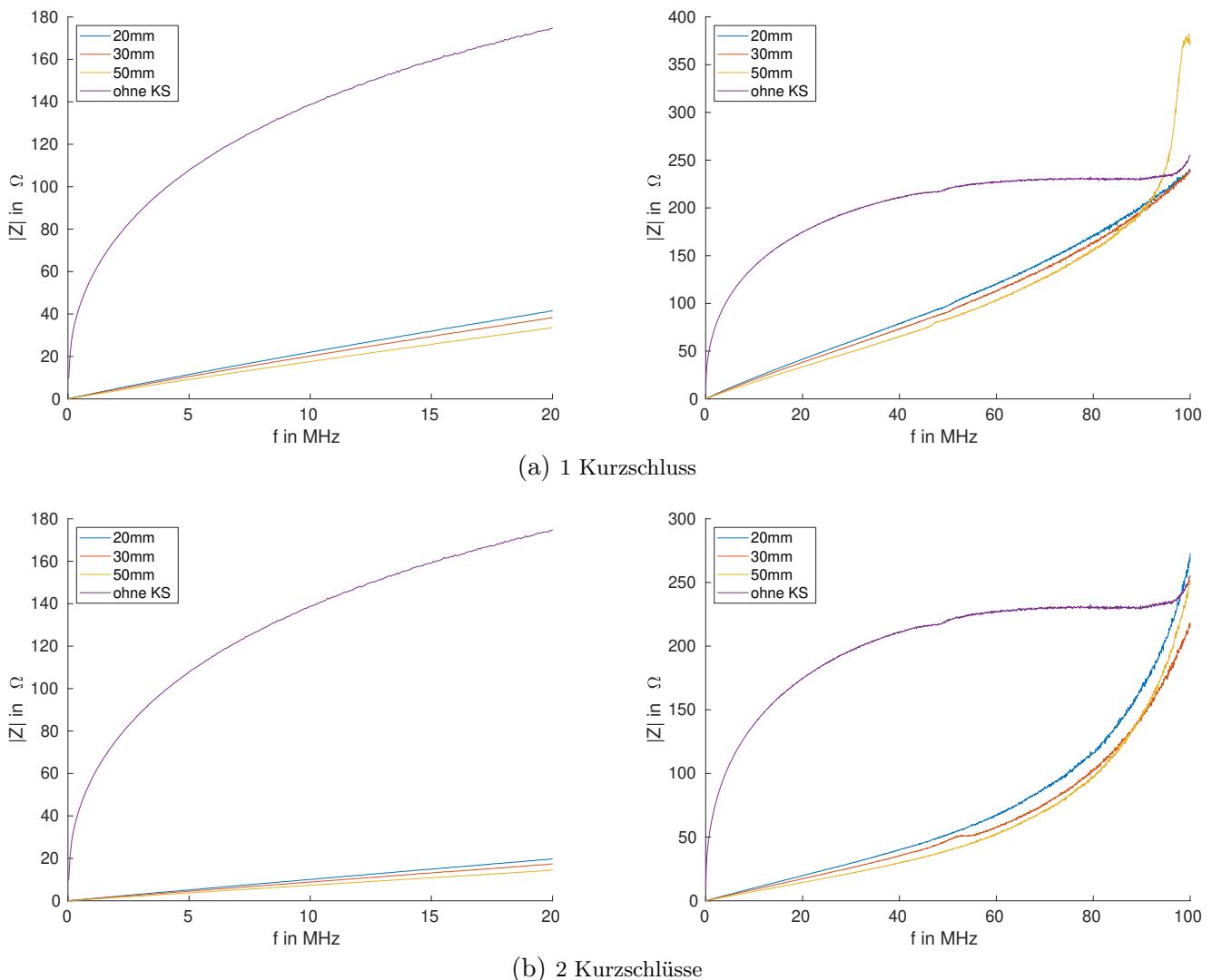


Abbildung 26: Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Breiten der Kurzschlüsse.

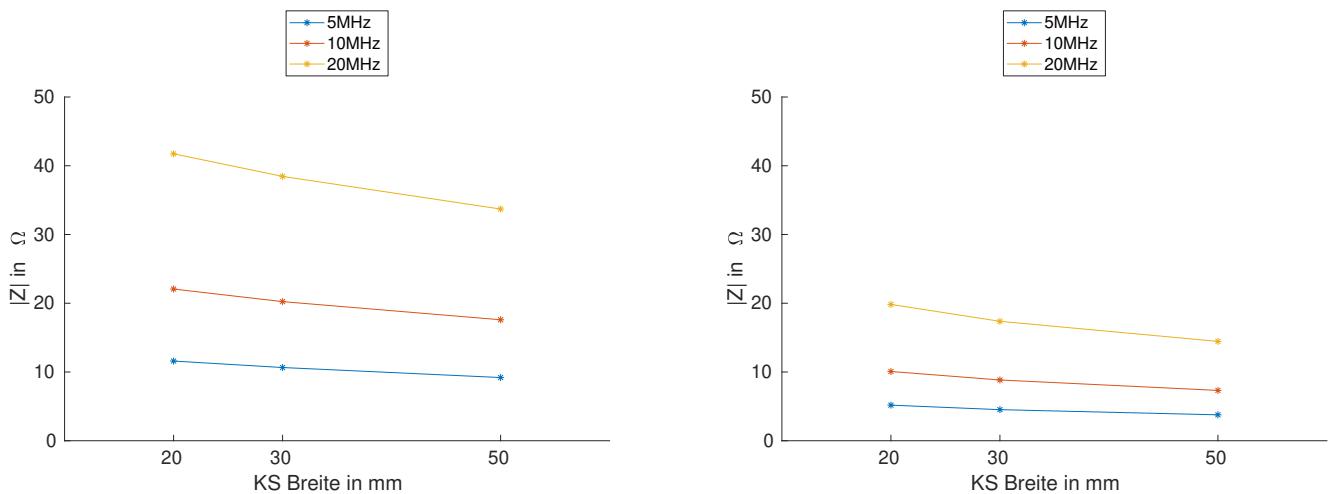


Abbildung 27: Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz bei 5, 10 und 20 MHz. Links: 1KS, rechts: 2KS.

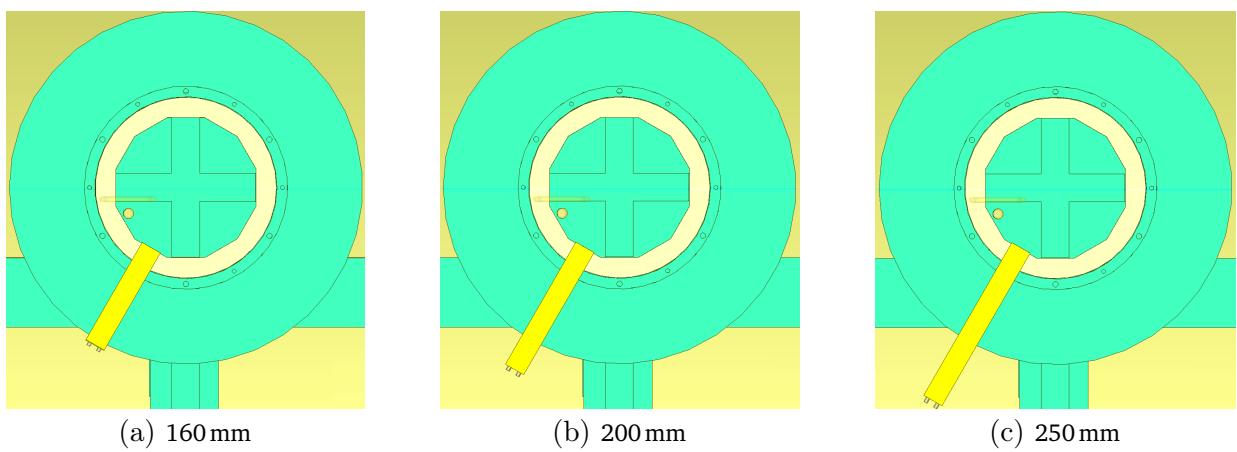


Abbildung 28: Jeweils ein montierter Kurzschluss mit verschiedenen Langen.

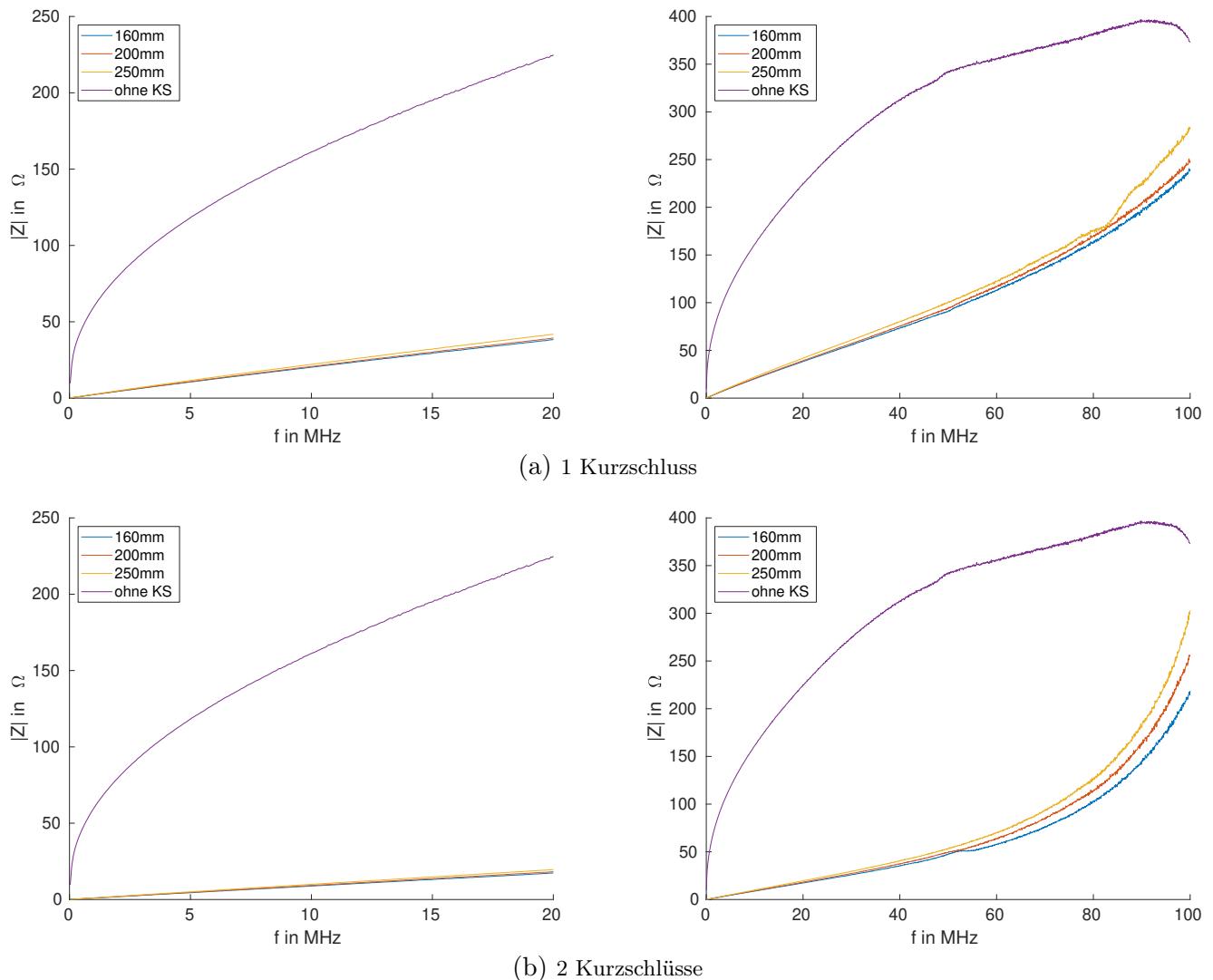


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Längen der Kurzschlüsse.

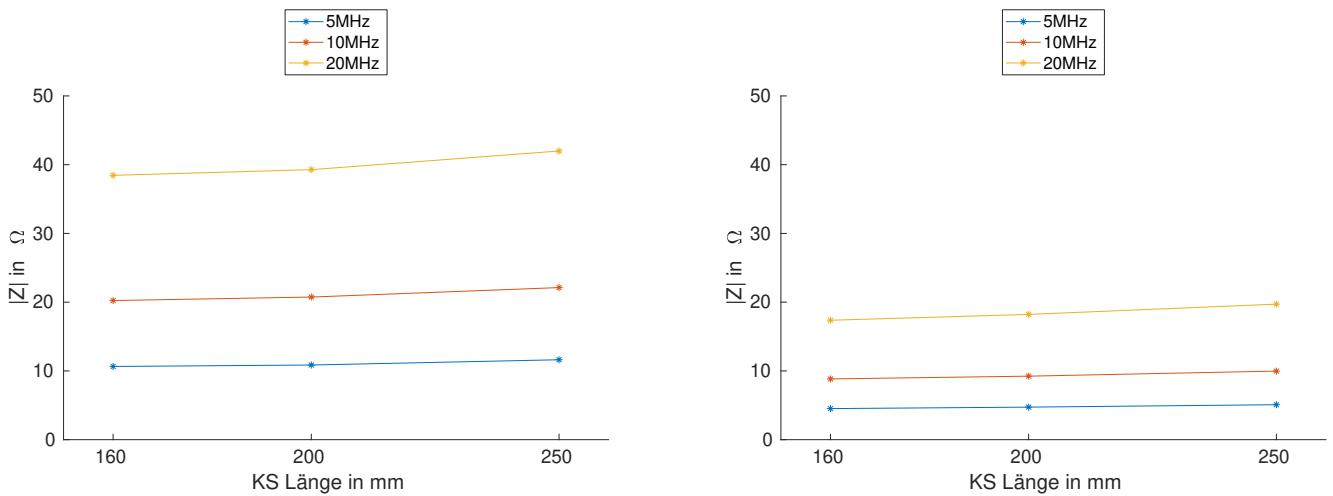


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz bei 5, 10 und 20 MHz. Links: 1KS, rechts: 2KS.

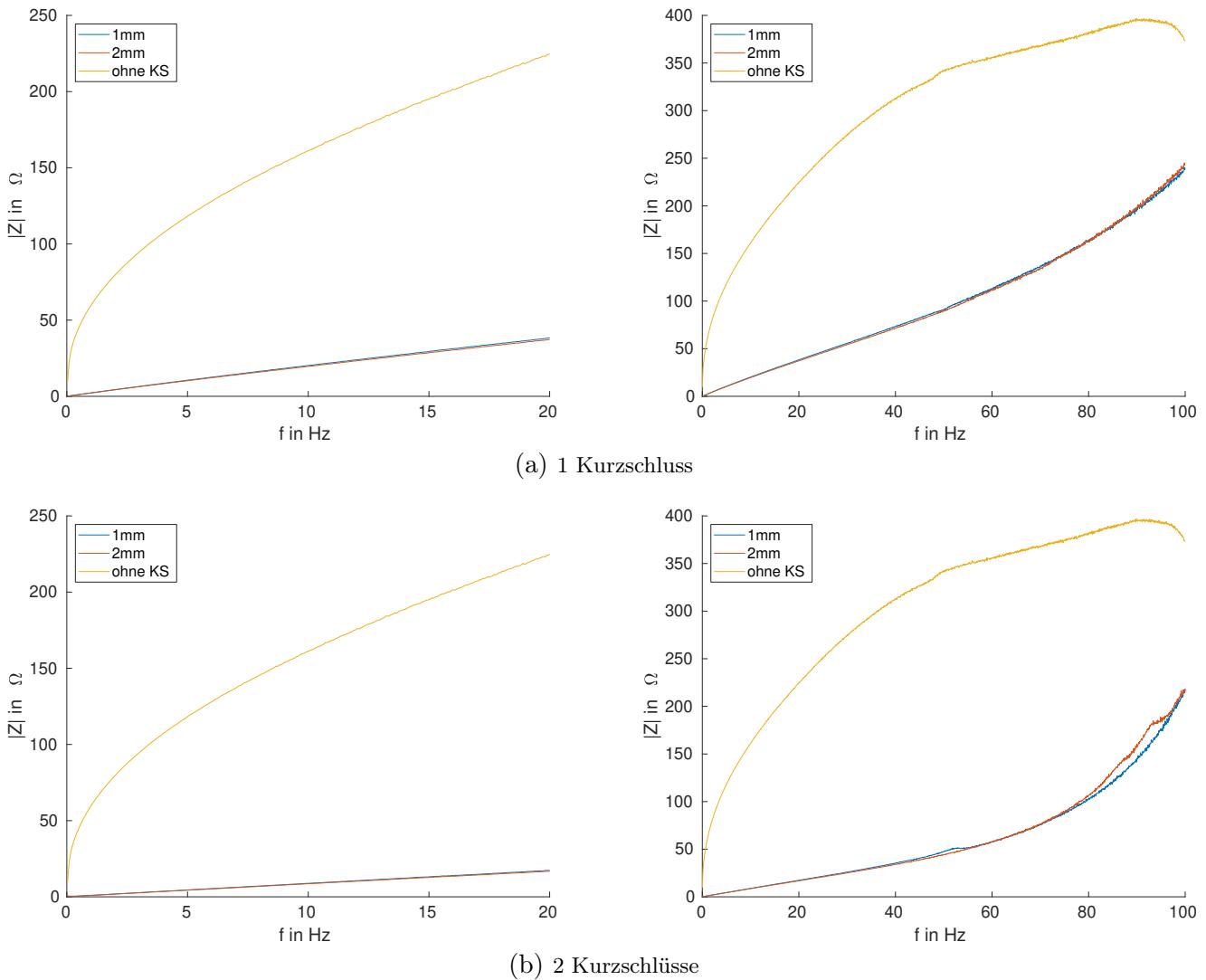


Abbildung 31: Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz für verschiedene Dicken der Kurzschlüsse.

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

Es sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass 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. Abbildung 32 zeigt das Verhalten der eingebrachten Schienen im Leerlauf.

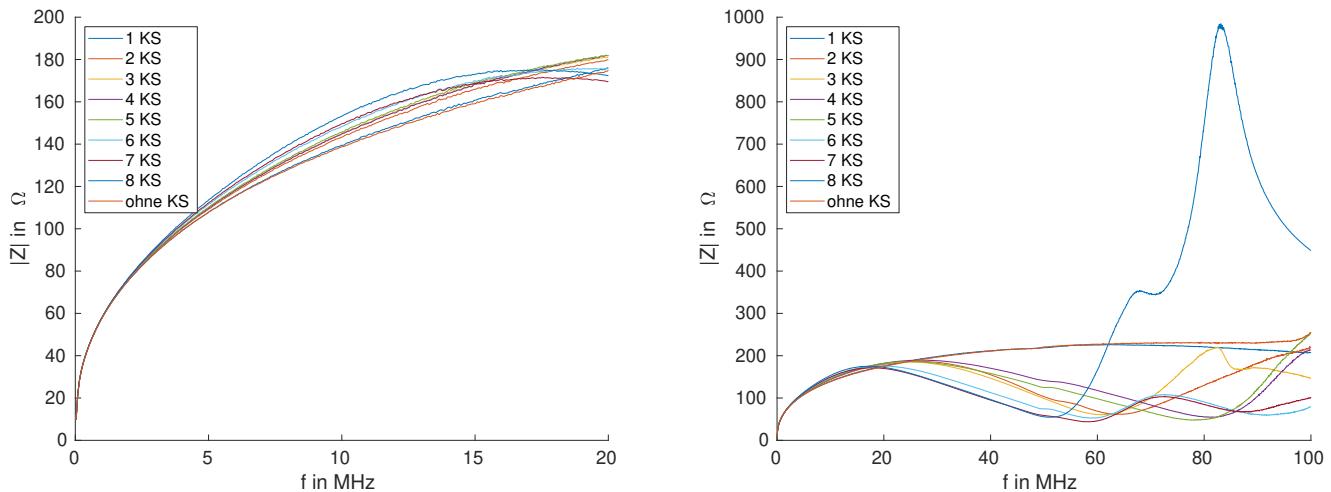


Abbildung 32: Gegenüberstellung der Ringkernimpedanz über der Frequenz für verschiedene Anzahlen an offenen Kupferschienen.

Es wird deutlich, dass die Schienen im Frequenzbereich unter 20 MHz kaum einen Einfluss haben. Der Extremfall bei 20 MHz liefert nach Gleichung 10 eine Änderung von rund 2.6% der Ringkernimpedanz für eine Anordnung mit zwei Kurzschlüssen gegenüber einer Anordnung ohne Kurzschlüsse. Somit ist davon auszugehen, dass die Kurzschlüsse den Betrieb nicht stören, sofern diese gut genug getrennt werden.

### 4.4 Feldbilder

Um eine weitgehendere 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 gegenübergestellt. Zunächst wird der Einfluss eines einzigen Kurzschlusses mit der Breite 30 mm, der Länge 160 mm sowie einer Blechdicke von 1 mm gegenüber dem reinen Ringkern ohne Kurzschlüsse nach Abbildung 33 betrachtet.

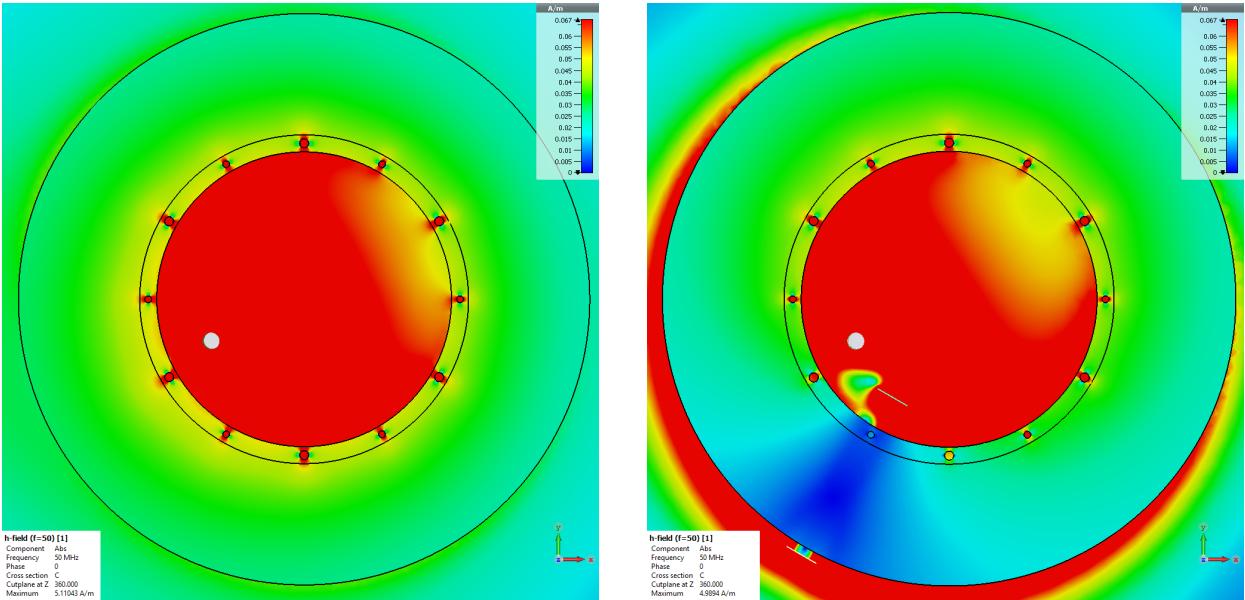


Abbildung 33: Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns ohne Kurzschluss und mit einem Kurzschluss.

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 34 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 35 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.

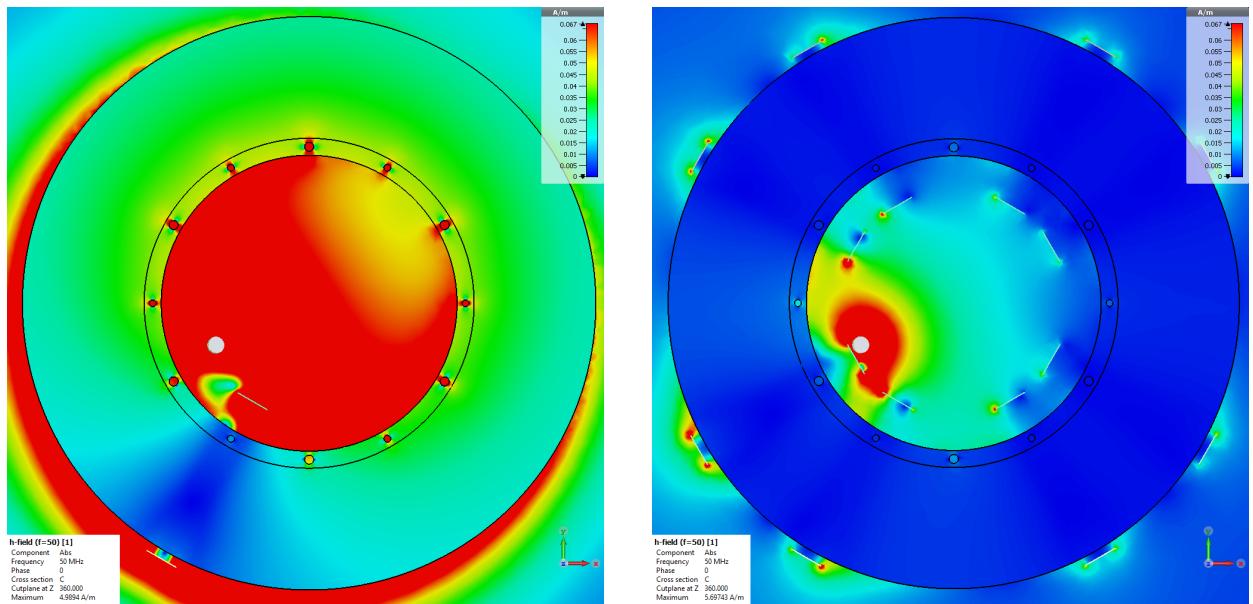


Abbildung 34: Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns mit einem Kurzschluss und mit acht Kurzschlüssen.

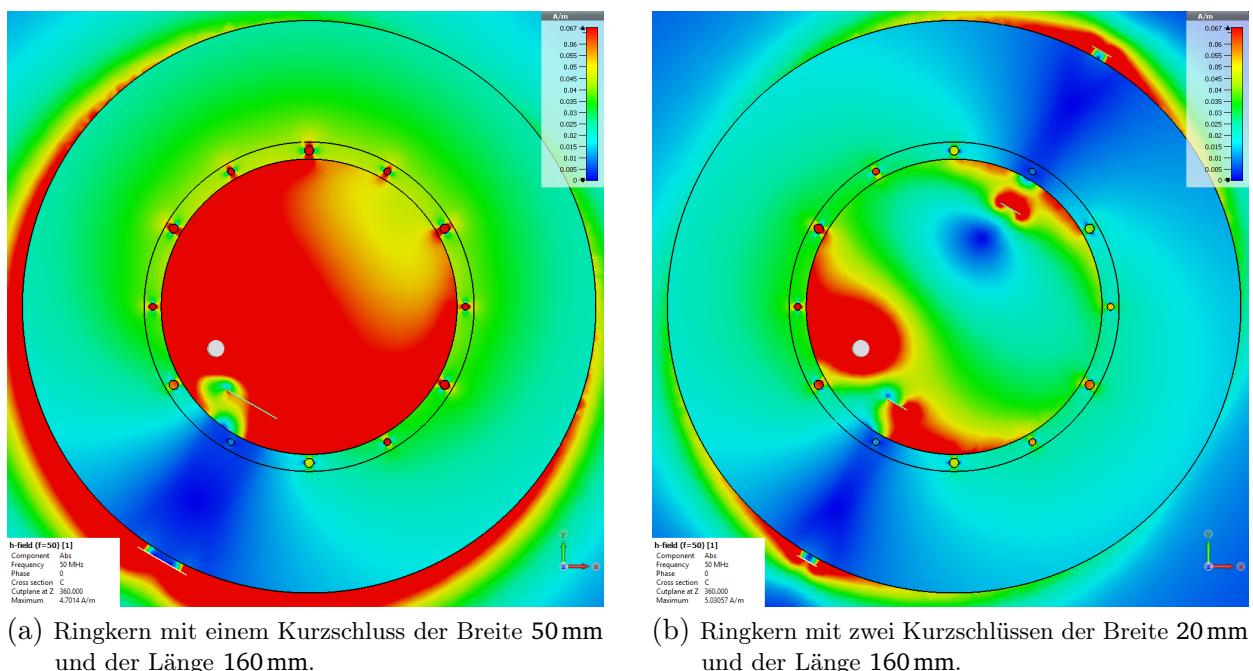


Abbildung 35: Gegenüberstellung der Feldverteilung des Magnetischen Feldes innerhalb des Ringkerns mit einem Kurzschluss der Breite 50 mm und mit zwei Kurzschlüssen der Breite 20 mm.



# 5 Fazit und Ausblick

## 5.1 Fazit

Diese Arbeit untersucht den Einfluss von Kurzschlüssen auf die Impedanz von Ringkernen, die in Kavitäten als Last eingesetzt werden. Damit dem Strahl durch die Ringkerne nur ein geringer Teil Energie entzogen wird, wenn die Kavität nicht beschleunigt, sollen die Kurzschlüsse die Ringkernimpedanz verringern. Es wurde eine Parameteranalyse durchgeführt, die ermittelt welche Parameter einen Einfluss auf die Impedanz haben und wie groß dieser ausfällt.

Zu diesem Zweck wurden Messungen an einer Testbox durchgeführt, die eine reproduzierbare Vermessung der Ringkerne gewährleistet. Außerdem wurden Simulationen der verwendeten Anordnung vorgenommen. Aus den Ergebnissen der Messungen und Simulationen wurden Anpassungen für die Testbox abgeleitet und Kurzschlüsse für reproduzierbare Messungen erstellt.

Für die Auswertung der Mess- und Simulationsergebnisse wurde die Simulation schließlich noch besser an die Realität angepasst und die Ergebnisse gegenübergestellt und evaluiert.

Die Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse der Simulation und Messung ergaben, dass bereits ein Kurzschluss die Ringkernimpedanz um ungefähr 80 % verringert. Wird der Ringkern mit sieben Schienen kurzgeschlossen, so werden mehr als 98 % der Ringkernimpedanz annulliert.

Es wurde außerdem festgestellt, dass die Länge, die Breite und die Dicke der verwendeten Kurzschlüsse ebenfalls einen Einfluss auf die Ringkernimpedanz ausüben. Die erreichte Verringerung fällt im Vergleich zu einer Variation der Anzahl der Kurzschlüsse wesentlich geringer aus.

Sollen im realen Betrieb die Ringkerne einer Kavität also kurzgeschlossen werden, so ist die Wahl der Kurzschlüsse vornehmlich vom vorhanden Platzangebot in der Kavität bestimmt.

Es ist also abzuwagen, ob mit nur einem Kurzschluss bereits genügend Impedanz reduziert werden kann oder ob noch weitere nötig sind. Die Breite und die Länge haben als Parameter nur einen kleinen Einfluss. Für die Anwendung empfiehlt es sich daher auf schmale, eng anliegende Kurzschlüsse zurückzugreifen.

## 5.2 Ausblick

Das Simulationsmodell bietet weitere Verbesserungsmöglichkeiten. Diese beziehen sich vorwiegend auf die verwendeten Materialparameter. In zukünftigen Arbeiten kann daher die Wertetabelle des dissipativen Holzmaterials (siehe Kapitel 4.1 und 3.2.3) mittels einer Kreuzvalidierung weiter angepasst werden. Zur Rechtfertigung dieses Schrittes können die Materialparameter der Testbox experimentell ermittelt werden. Einen weiteren Verbesserungsansatz bietet das Ringkernmodell. Hier kann für zukünftige Simulationen das Modell mit Edelstahlring verwendet und dessen Auswirkung auf das Kurzschlussverhalten analysiert werden (siehe Kapitel 4.1 und 3.2.3.1).

Für die Messung an der Kavität können ausgehend von den Überlegungen des Kapitels 5.1 Kurzschlüsse angefertigt und das Verhalten untersucht werden. Ein erstes Messergebnis an einem bereits vorhandenen Kavitätaufbau kann im Anhang A.4 gefunden werden. Darüber hinaus kann auch die Kavität selbst in CST modelliert werden.



# A Anhang

## A.1 Gegenüberstellung der Simulations- und Messergebnisse

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse von Simulation und Messung für die verschiedenen Parameter gegenübergestellt.

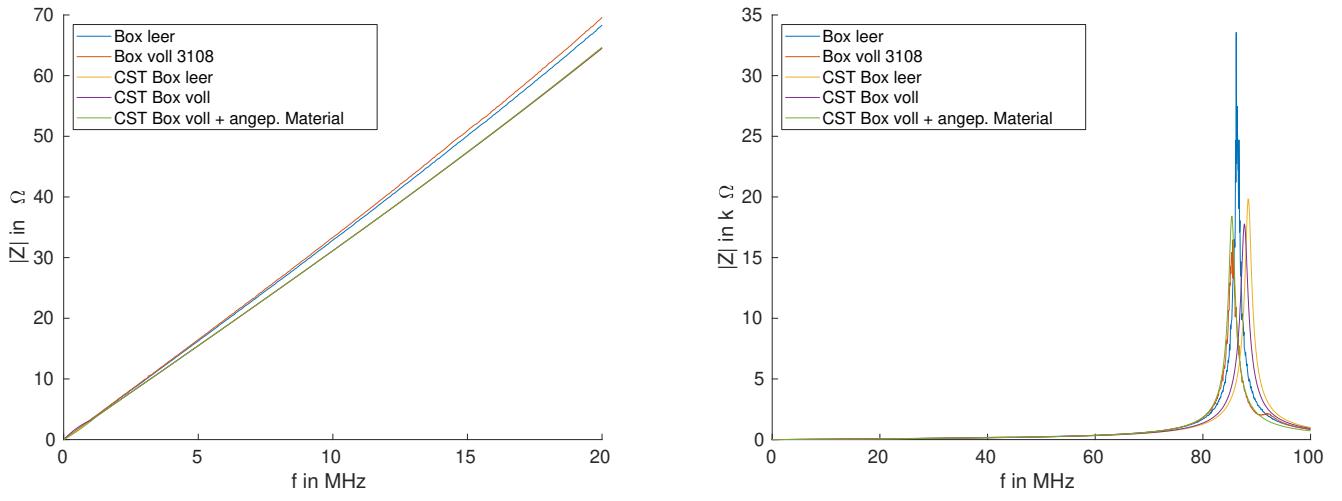


Abbildung 36: Gegenüberstellung der Testbox ohne Ringkern.

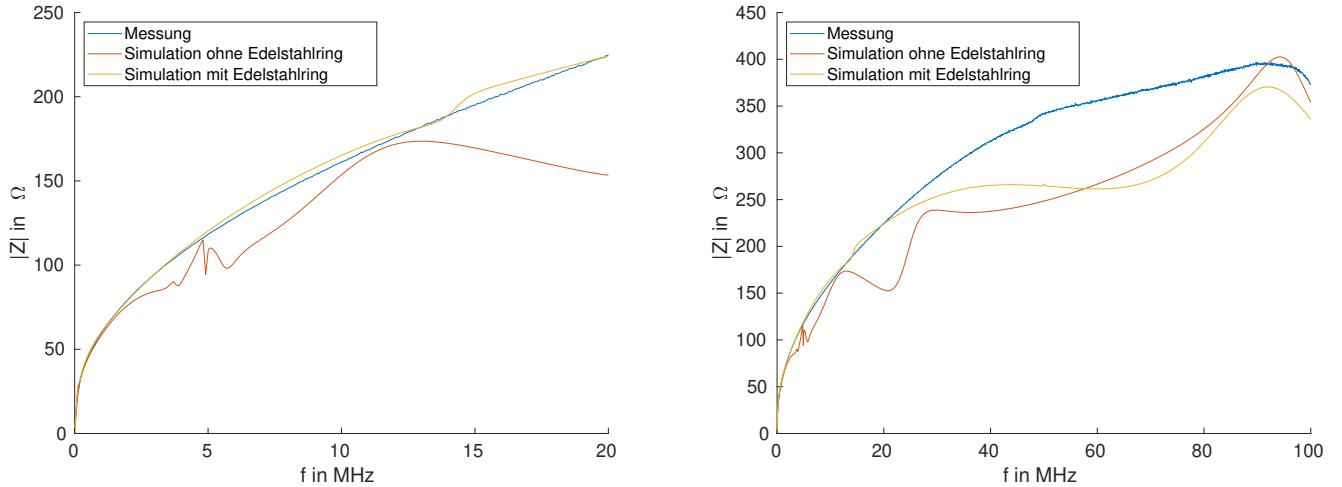


Abbildung 37: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern ohne Kurzschlüsse.

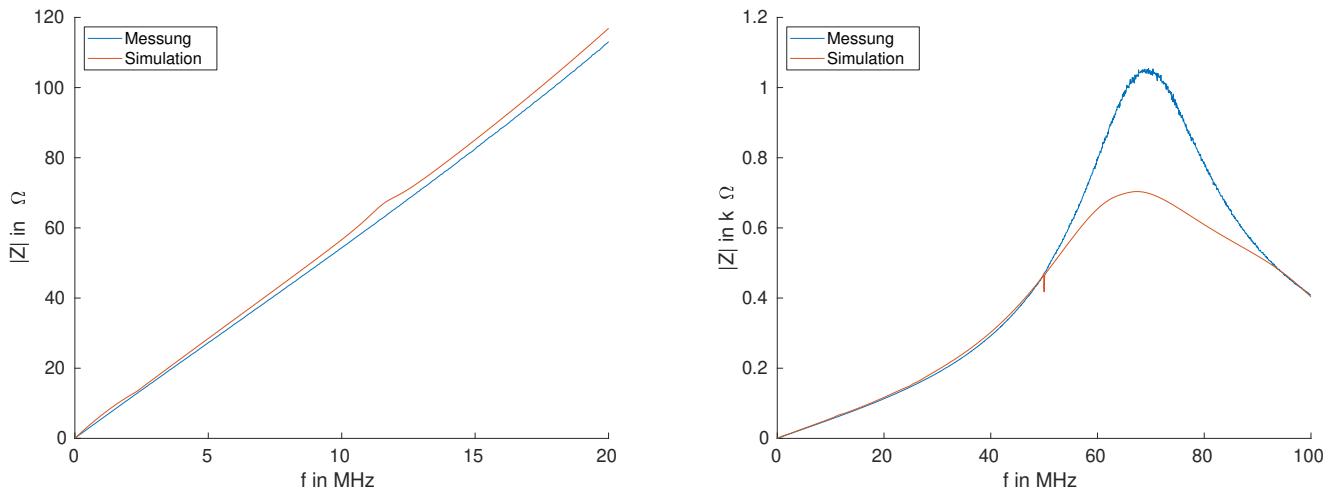


Abbildung 38: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und einem Kurzschluss.

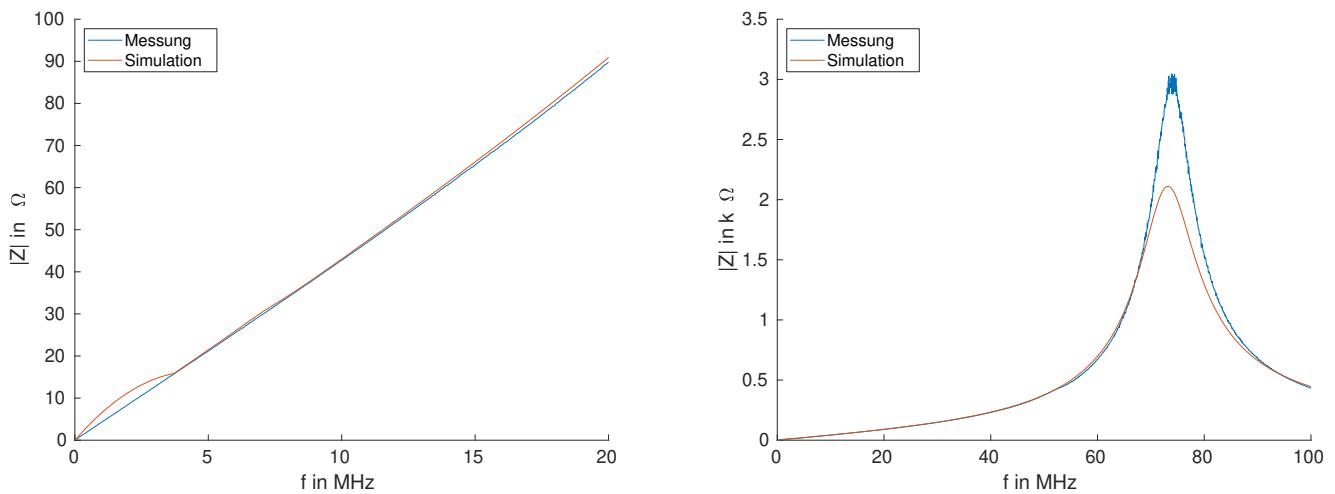


Abbildung 39: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und zwei Kurzschlüssen.

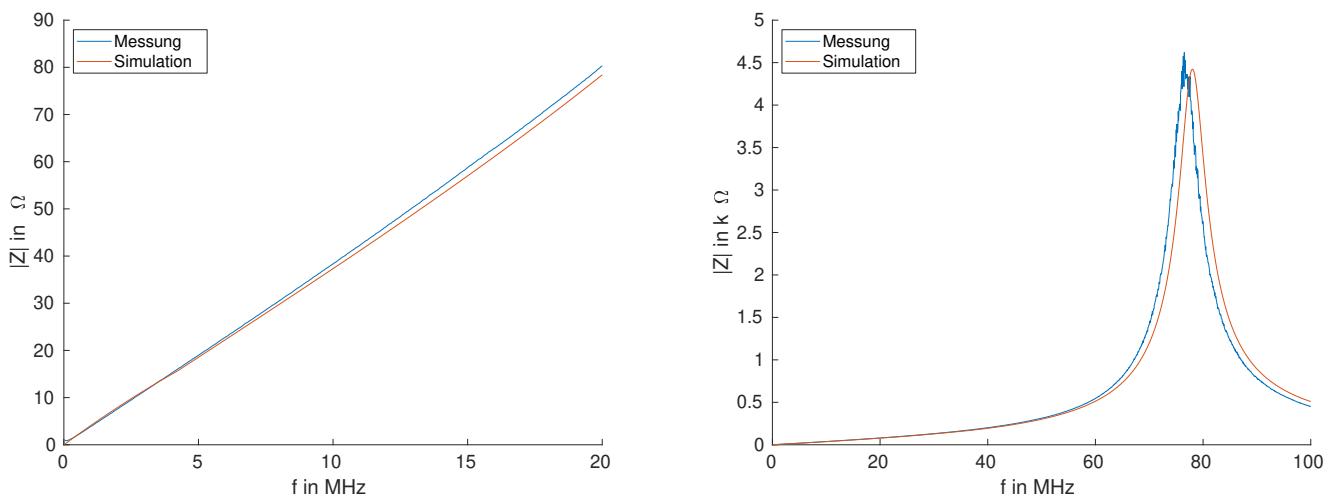


Abbildung 40: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und drei Kurzschlüssen.

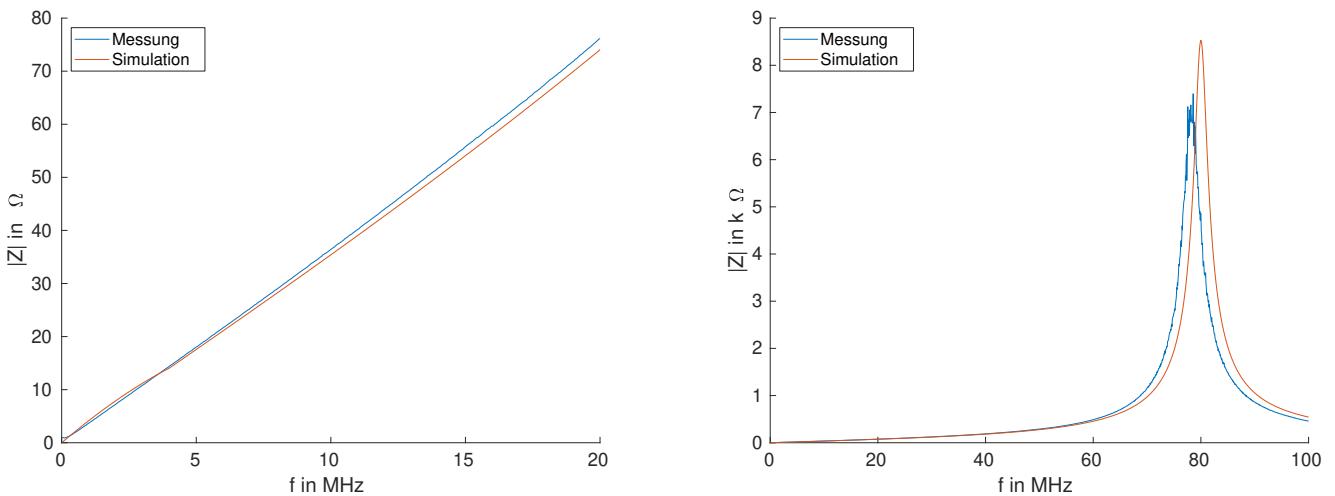


Abbildung 41: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und vier Kurzschlüssen.

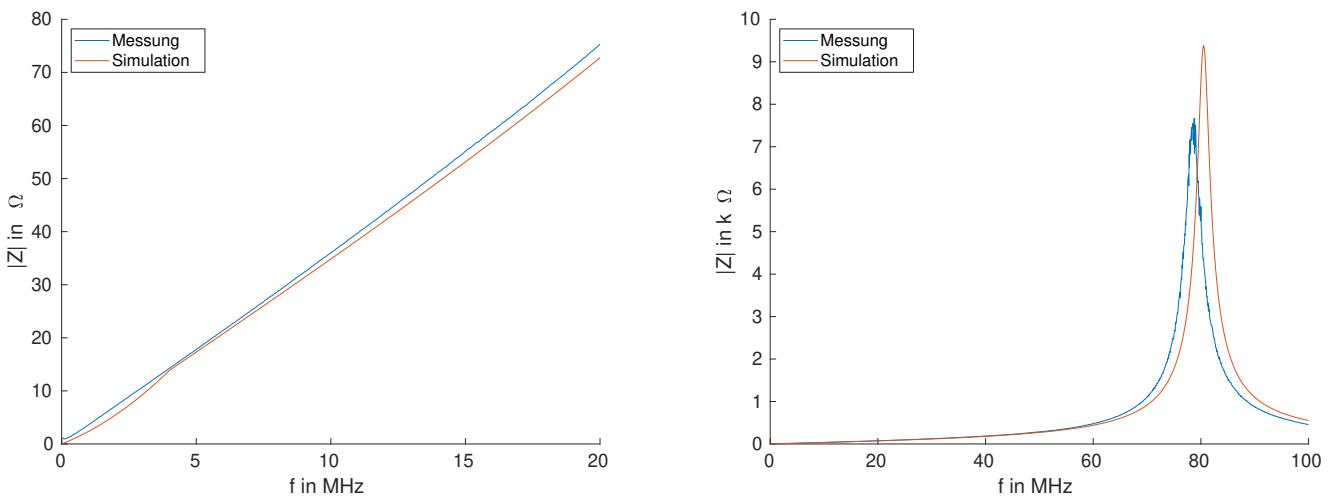


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und fünf Kurzschlüssen.

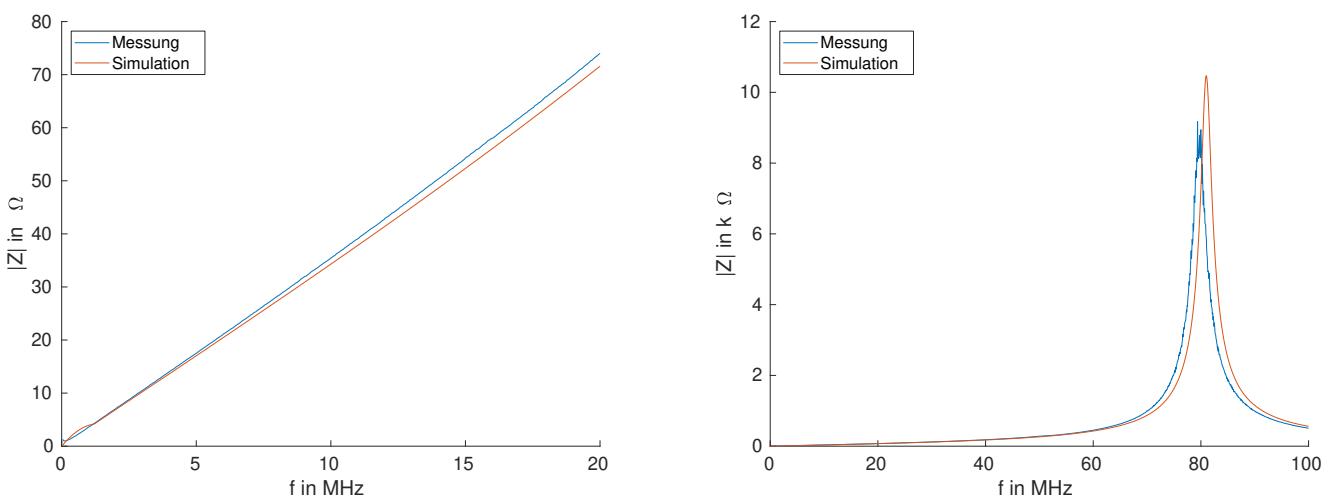


Abbildung 43: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und sechs Kurzschlüssen.

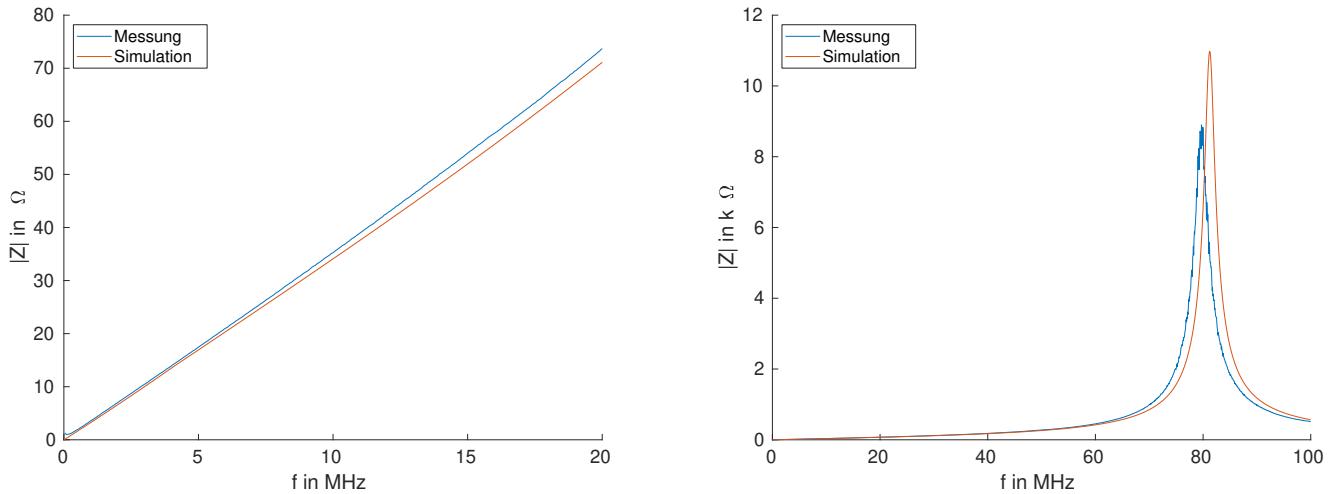


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und sieben Kurzschlüssen.

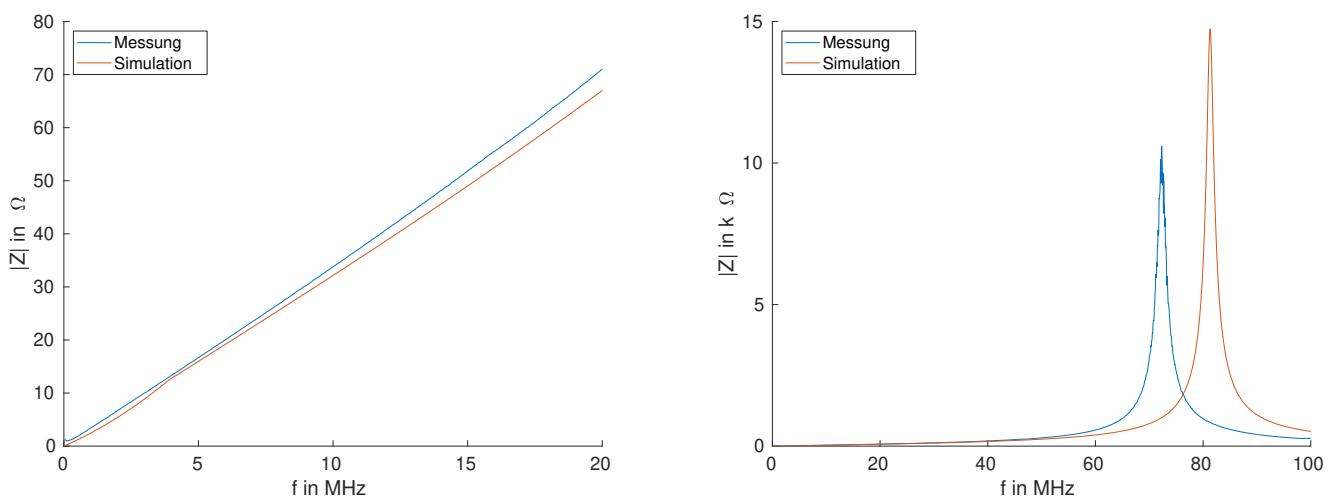


Abbildung 45: Gegenüberstellung der Anordnung mit Ringkern und acht Kurzschlüssen.

## A.2 Gegenüberstellung der CST-Feldbilder der Kurzschlussanordnungen

In diesem Abschnitt sind die Feldbilder abgebildet, die den Simulationsergebnissen aus CST entnommen wurden.

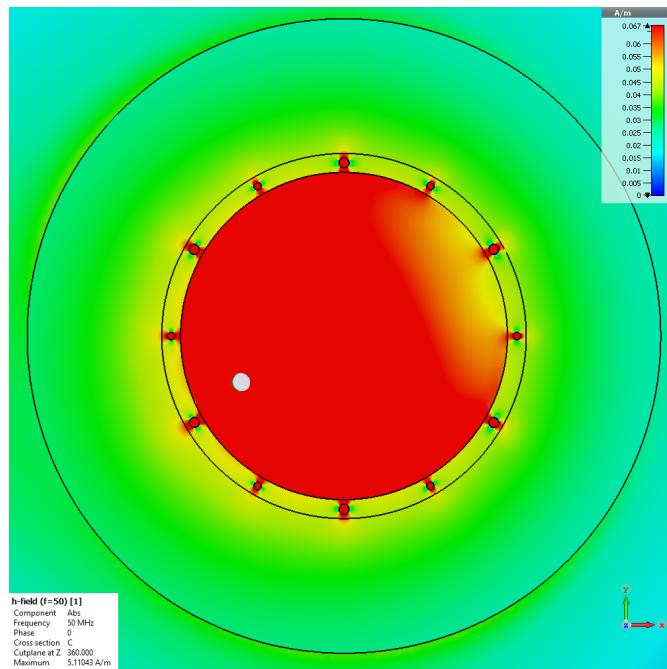


Abbildung 46: Feldbild des Ringkerns ohne Kurzschlüsse.

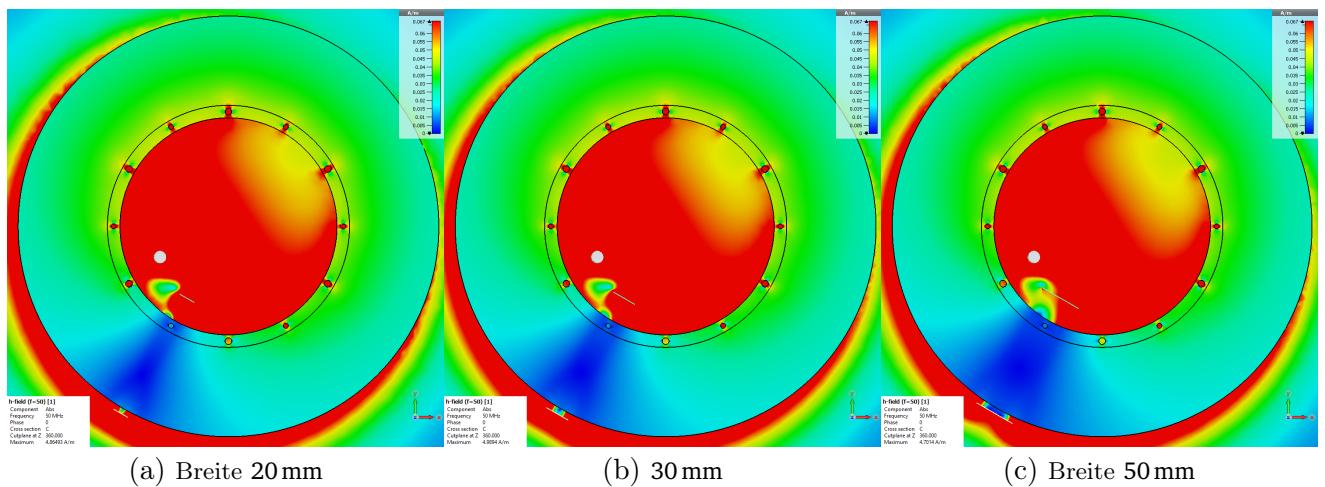


Abbildung 47: Gegenüberstellung des Ringkerns mit jeweils einem Kurzschluss verschiedener Breiten und der Länge von 160 mm.

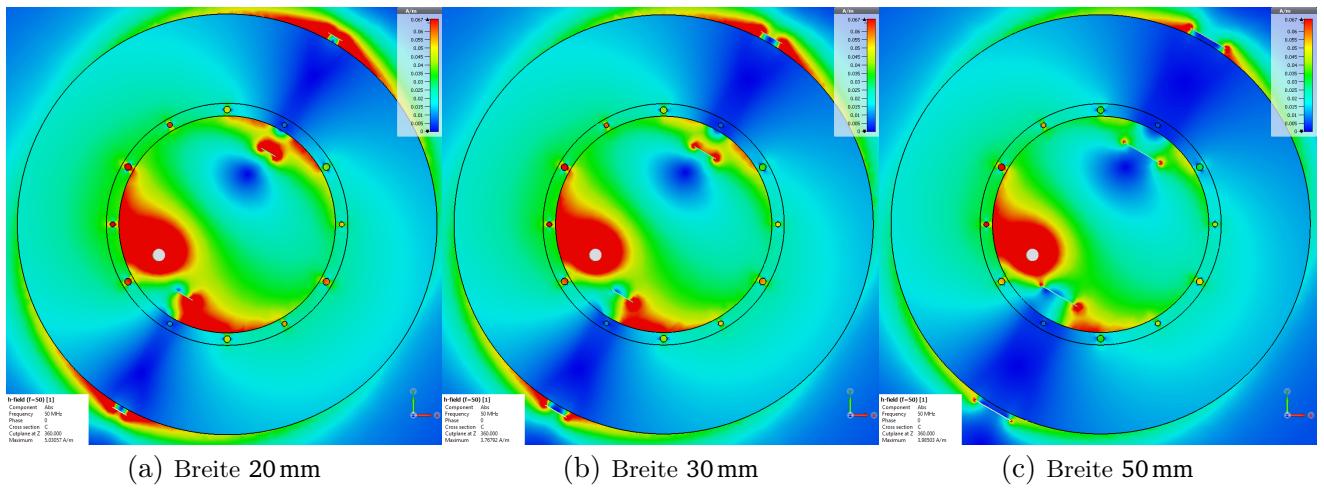


Abbildung 48: Gegenüberstellung des Ringkerns mit jeweils zwei Kurzschlüssen verschiedener Breiten und der Länge von 160 mm.

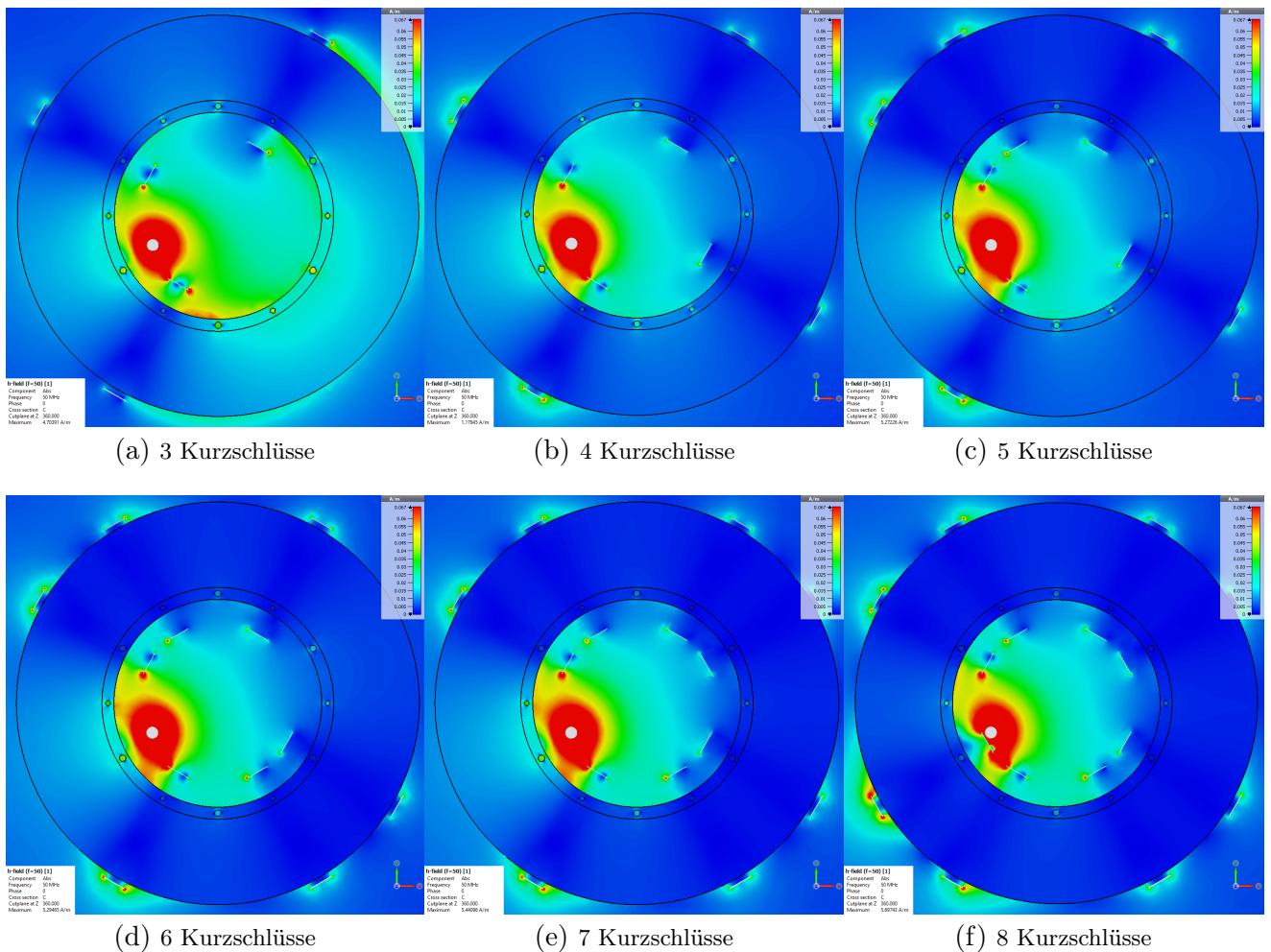


Abbildung 49: Gegenüberstellung des Ringkerns mit drei bis acht Kurzschlüssen der Breite 30 mm und der Länge 160 mm.

### A.3 Ergebnisse der Anordnungsvariation

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Variation der Anordnung dargestellt, die im Verlauf der Arbeit nicht weiter ausgearbeitet wurden. Der Einfluss erscheint für den späteren Einsatz nicht relevant. Aus Abbildung 50 geht die Feldverdrängung im Ringkern hervor, die durch die Kurzschlüsse verursacht wird. Es ist zu sehen, dass ein breiter Kurzschluss weniger Feld verdrängt als zwei schmalere. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Simulation wieder, die in Abbildung 51 dargestellt ist.

Der Einfluss der Anordnung spielt generell mit der verwendeten und simulierten Testbox eine größere Rolle als dies in einer Kavität der Fall sein sollte. Dies wird in den Abbildungen 50 und 51 deutlich, da hier die Anordnung von zwei gegenüberliegenden Kurzschlässen eine bessere Verringerung der Ringkernimpedanz liefert, als wenn die Kurzschlüsse nebeneinander angeordnet werden. Dies ist dem im Bezug auf den Ringkern nicht zentral gelagerten Einkopplungsrohr zugrunde zu legen, in einer Kavität befindet sich das Strahlrohr zentrisch bezogen auf den Ringkern.

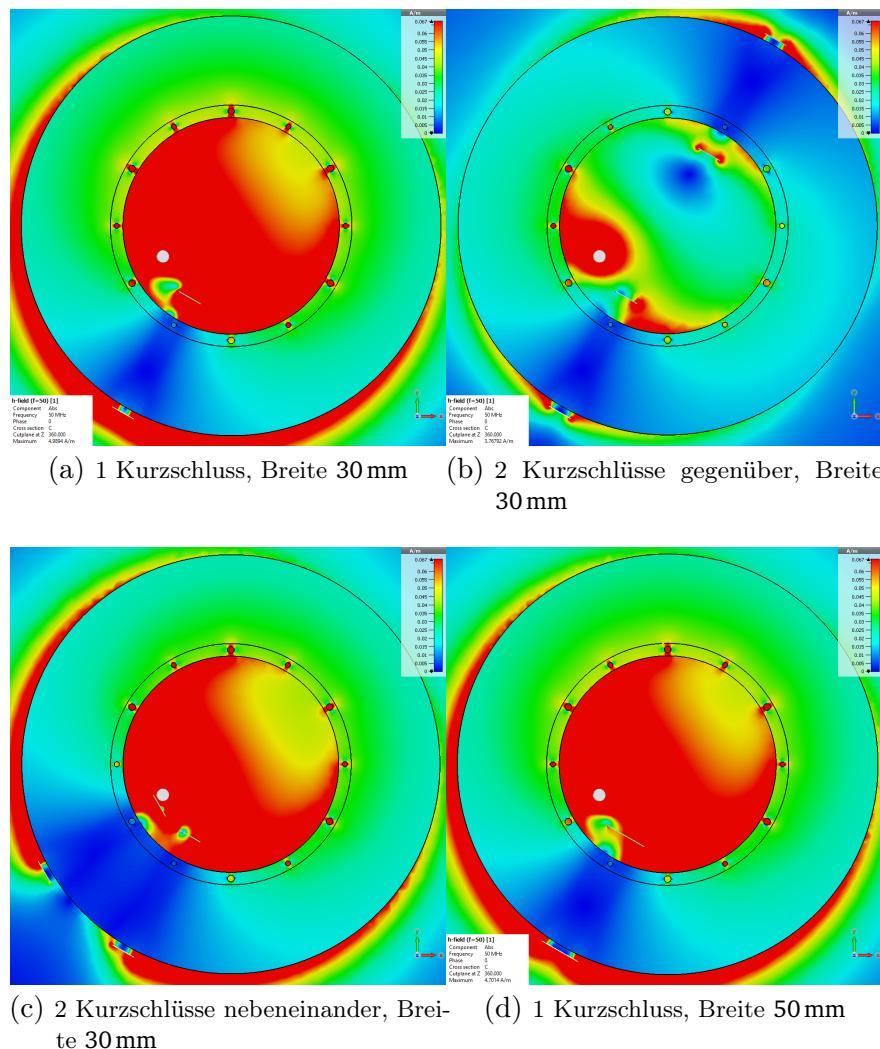


Abbildung 50: Gegenüberstellung der Feldbilder für die Variation der Anordnung von Kurzschlässen um den Ringkern.

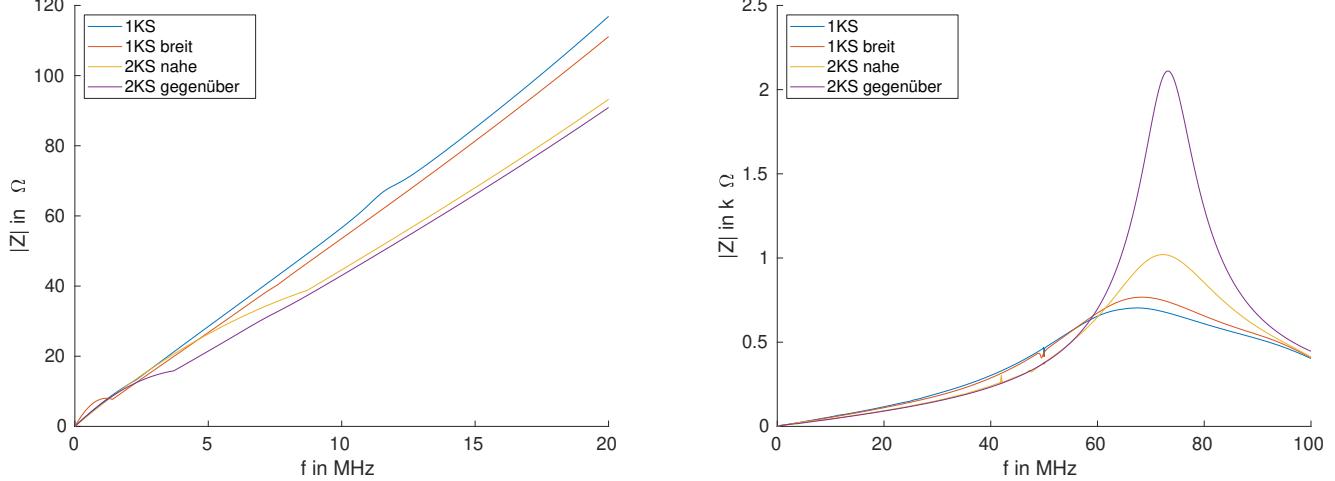


Abbildung 51: Simulationsergebnisse für die Variation der Anordnung von Kurzschlüssen um den Ringkern.

#### A.4 Übertragung der Messung in die Kavität

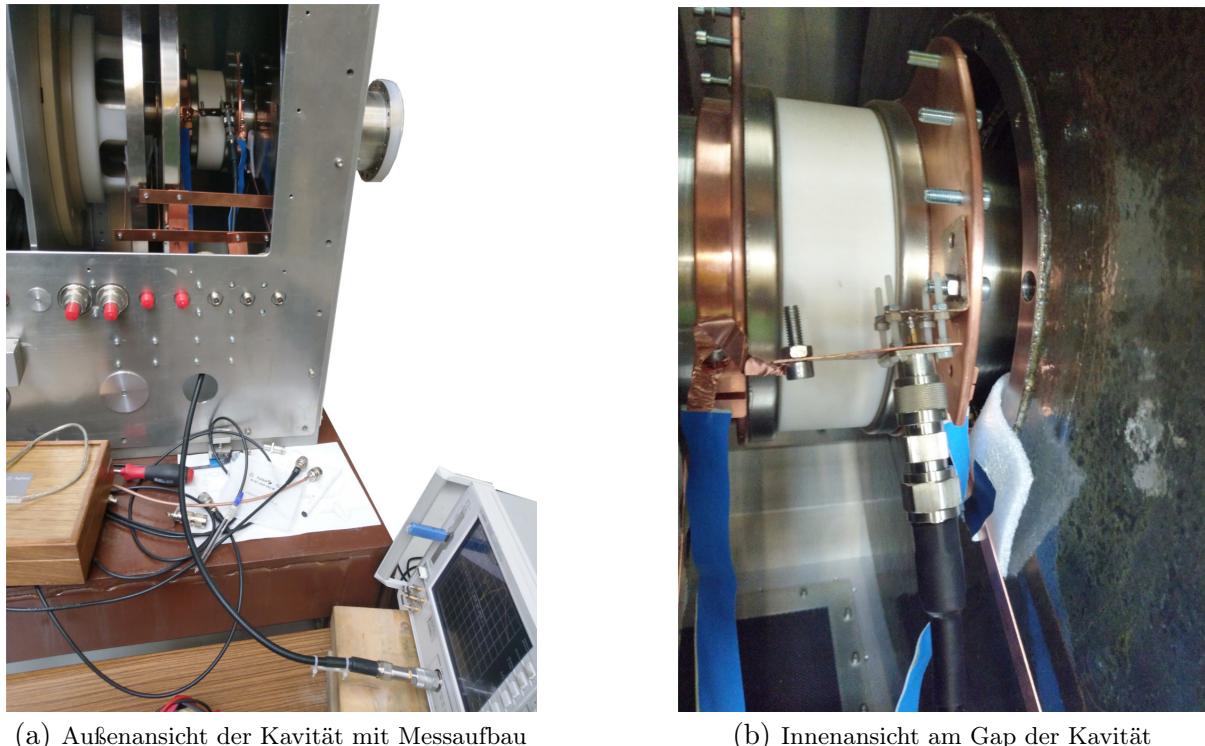


Abbildung 52: Messaufbau für die Messung an der Kavität

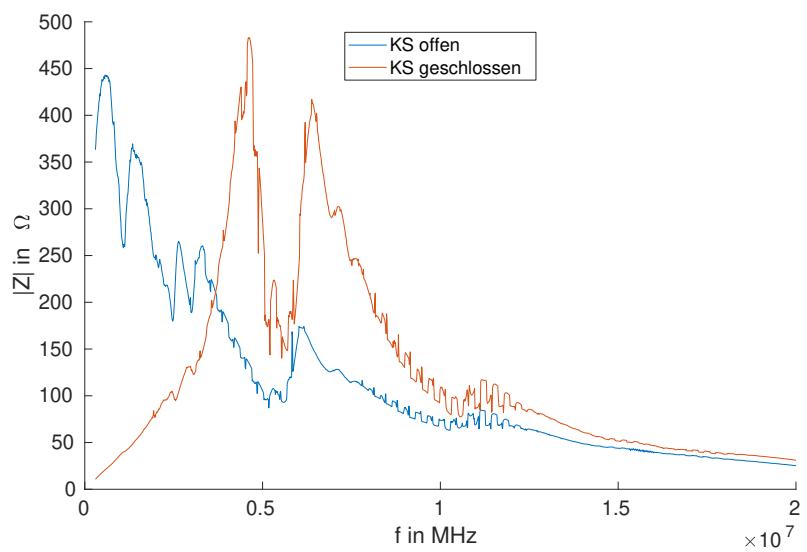


Abbildung 53: Absolutwert der Impedanz gemessen über das Gap in der Kavität Mit geschlossenem Kurzschluss und offenem Kurzschluss.



# 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)

[Halász 2012] Halász, Z.: Product specification for inductive components M-889-02. Version 3. Industriestrasse 7 D-63505 Langenselbold: MAGNETEC GmbH, Mai 2012

[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

