

Entwurf und Analyse von Zeroth-Order resonanten Antennen mit neuartiger Speisetechnik für die Ultra-Hochfeld Magnetresonanztomografie

Christian Thiel,^{1*} Jan Taro Svejda,¹ Andreas Rennings¹ und Daniel Erni¹

¹ Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik (ATE), Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, NRW, Deutschland.

* christian.thiel.ate@uni-due.de, <http://www.ate.uni-due.de>.

Abstract: In the following Master's Thesis Zeroth-Order resonant antennas (ZORA) are used to induce the ^1H -nuclei for large area scans for human body examinations. A new feeding concept for the ZORA is presented which provides a much simpler realization of the antenna corresponding to a higher field symmetry and amplitude. Therefore, an implementation of these antennas for future measurement at 7T can be evaluated.

Zusammenfassung: In dieser Masterarbeit wurden Zeroth-Order resonante Antennen (ZORA) zur gezielten Anregung des ^1H -Kerns verwendet, um möglichst großflächige Bereiche des menschlichen Körpers untersuchen zu können. Es wurde gezeigt, dass eine Vereinfachung des Einspeisekonzeptes dieser Antennen mit einer simultanen Erhöhung der Feldsymmetrie und –amplitude möglich ist und eine Anwendung innerhalb eines 7T Tomografen für in vivo Messungen angestrebt werden kann.

Einleitung und Motivation

Die Magnetresonanztomografie (MRT) ist als nichtinvasives Bildgebungsverfahren eine besonders schonende Diagnosemethodik. Mit der Entwicklung von 7T Tomografen im human medizinischen Bereich, ist es aufgrund der höheren statischen Flussdichte B_0 möglich, ein verbessertes Signal zu Rausch Verhältnis (*eng. Signal-to-Noise-Ratio – SNR*) zu generieren und folglich höhere Kontraste in der Bildgebung zu realisieren. Die dafür benötigten Empfangs- und Sendespulen in der Nähe des untersuchten Patienten müssen für die Larmorfrequenz f_L , spezifischer Protonenkerne ausgelegt werden, um den Spin der Protonen eine ausreichende Energiemenge zuzuführen.

In der vorliegenden Arbeit lag der Fokus auf der Entwicklung eines neuen Einspeisekonzeptes der Zeroth-Order resonanten Antennen (ZORA), zur Anregung des ^1H -Kerns, um möglichst großflächige Bereiche des menschlichen Körpers untersuchen zu können. Es wurde gezeigt, dass eine Vereinfachung des Einspeisekonzeptes dieser Antennenvariante bei 7T realisiert und sowohl die, für die Auswertung relevante Feldverteilung, als auch deren Amplitude bei gleicher Erwärmung des

menschlichen Gewebes (Spezifische Absorptionsrate - SAR) gewährleistet werden kann. Dies wurde anhand des in dem Fachgebiet der Allgemeinen und Theoretischen Elektrotechnik (ATE) vorhandenen bestätigt.

Grundlagen und Vorgehensweise

Das Fundament zur Ausführung der nachfolgenden Ergebnisse boten die Literaturen (Rennings *et.al* 2009, Caloz and Itoh 2006) und im besonderen Maße die Resultate aus (Svejda 2013). Die dort verwendeten Antennen nutzen die spezielle Eigenschaft der Metamaterial-Leitung (MTM-Leitung) (Caloz and Itoh 2006), mit denen es möglich ist, maßgeschneiderte Materialparameter (ϵ_r , μ_r) anhand von Einheitszellen (*eng. unit cells*) zu entwickeln. Das Ersatzschaltbild einer verlustlosen Einheitszelle auf MTM-Basis sei in Fig.1 präsentiert.

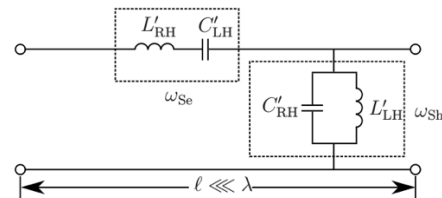


Fig.1: Ersatzschaltbild einer verlustlosen Einheitszelle mit Metamaterial-Leitungscharakteristik und eingezeichnetem Serien- und Parallel- bzw. Shunt-schwingkreis mit den zugehörigen Resonanzkreisfrequenzen ω_{Se} und ω_{Sh} (Caloz and Itoh 2006).

Die Markierungen repräsentieren die für diesen Leitungstyp charakteristischen Schwingkreise im Serien- bzw. im Shuntpfad mit den Resonanzkreisfrequenzen ω_{Se} und ω_{Sh} . Die Schaltungselemente L' und C' bezeichnen die Induktivität bzw. die Kapazität pro spezifischer Länge l der vorliegenden Zelle. Es wird dabei zwischen dem Fall unterschieden, ob eine herkömmliche Leitung vorliegt, in denen eine Serieninduktivität und eine Shuntkapazität als Ersatzschaltungselemente dienen (Right-Handed-Leitung – RH) oder umgekehrt (Left-Handed-Leitung – LH). Letztere Leitungsform ist praktisch nahezu nicht realisierbar, da parasitäre RH-Elemente mit diesem Leitungstyp einhergehen. Aufgrund dieses Zusammen-

schlusses beider Leitungen werden diese als Composite-Right/Left-Handed-Leitungen (CRLH-Leitung) bezeichnet.

Werden weiterhin die Serien- und Shuntresonanz auf die selbe Frequenz eingestellt, ergibt sich die Besonderheit der abgestimmten Leitung (balanced line), welche jeweils eine Resonanz nullter Ordnung (*eng. Zeroth-Order-Resonance*) aufweisen können. Dessen charakteristische Eigenschaft ist es, bei dieser Resonanzkreisfrequenz $\omega_{Se} = \omega_{Sh} = \omega_0$, eine unendliche Wellenlänge λ aufzuweisen, wie nachfolgendes Dispersionsdiagramm in Fig.2 zeigt.

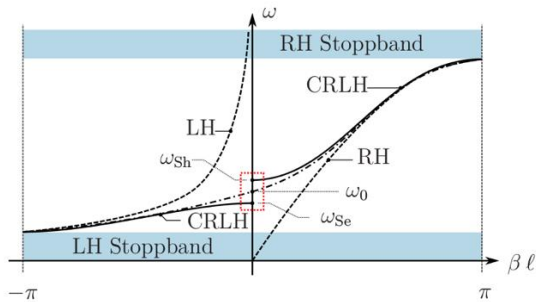


Fig.2: Darstellung der Zeroth-Order Resonanz ω_0 anhand eines Dispersionsdiagramms. Der eingezeichnete Bereich markiert die unendlich hohe Wellenlänge λ bzw. die unendlich kleine elektrische Länge βl . Die Strom- und Feldverteilung entlang einer Struktur bei solcher Resonanz, ist im Ideal homogen verteilt (Caloz and Itoh 2006).

Der markierte Bereich repräsentiert die unendlich lange Wellenlänge, welche simultan mit einer Wellenausbreitung $\beta = 0$ korrespondiert. Dadurch wird es theoretisch möglich Resonatoren zu realisieren, welche idealerweise über die gesamte Antennenengeometrie eine konstante Strom- und Feldverteilung aufweisen.

Die simulierten und messtechnisch untersuchten Zeroth-Order resonanten Antennen (ZORA), sind anhand dieser grundlegenden Prinzipien entwickelt worden und die verwendeten Einheitszellen für die Erstellung der Antennenengeometrie in Fig.3 dargestellt.

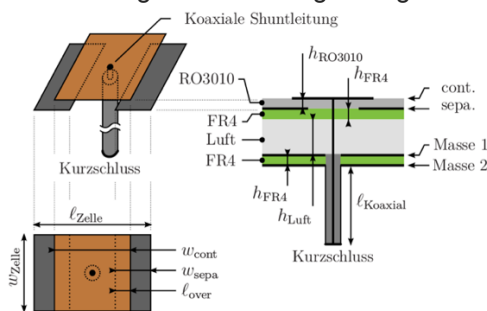


Fig.3: Aufbau der Einheitszelle für die Zeroth-Order resonanten Antennen (ZORA). Als Setup wurden 8 Zellen verwendet, welche auf die Larmorfrequenz der Protonenspins bei 298 MHz abgestimmt sind.

Die aufgezeigte MIM-Struktur (Metal-Insulator-Metal) besteht aus einer geschlitzten und metal-lisierten FR4 Platte als Masse, einer Luftschicht, einer nicht-metallisierten FR4 Platte und einer hoch permittiven Schicht aus RO3010, welche auf beiden Seiten metallisiert und nach den links in der Fig.3 einzusehenden Maßen, strukturiert wurde. Die Serieninduktivität (C'_{LH}) pro Zellenlänge wird durch den Plattenabstand der beiden Metallisierungen der RO3010 Schicht erreicht und die Shuntinduktivität (L'_{LH}) pro Zellenlänge mittels einer kurzgeschlossenen Koaxialleitung realisiert. Die Optimierung der Einheitszellen erfolgte mittels Eigenmode Simulationen, welche mit dem Finiten Elemente Solver Comsol Multi-physics (Comsol Inc. 2015) durchgeführt wurden, sodass eine Resonanz der Einheitszellen bei 298 MHz vorlag. Dies entspricht der Larmorfrequenz der 1H -Kerne bei 7T. Alle nachfolgenden Simulationsergebnisse wurden mit dem FDTD Solver EMPIRE XPU (Empire XPU 2015) generiert und die Felddaten auf die Wurzel der aufgenommenen Wirkleistung der Antennen normiert. Der verwendete Nahfeld-messplatz verfügt über ein 3-achsiges Positioniersystem mit einer Genauigkeit von 10µm in jeder Richtung.

Ergebnisse

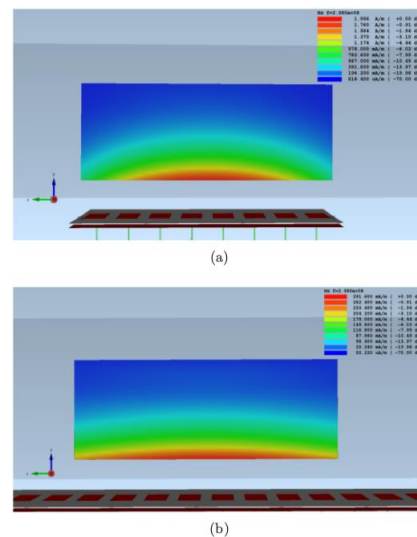


Fig.4: H-Feldverteilung der 8 (a) und 16 (b) Zellen ZORA. Bei gleichem Felddausschnitt (*eng. Field of View – FoV*) wies die 16 Zellen Variante die höchste Feldhomogenität auf.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Ansätze für die Realisierung der ZORAs verwendet. Zum einen wurde die geometrische Länge der Antenne sukzessive variiert und Prototypen mit 4, 6, 8 und 16 Einheitszellen untersucht und zum anderen zwischen Mittelpunkt- und Außenspeisung differenziert. Die Einheitszellen waren zu Beginn so ausgelegt,

dass sowohl der Serien-, als auch der Shunt-schwingkreis, die selbe Resonanzfrequenz aufwiesen. Dieser Fall entspricht einer frequenz-abgestimmten Leitung (*eng. frequency balan-ced line*). Als Parameter zur Effizienz-Abschätz-ung der unterschiedlichen Antennenengeome-trien, wurde das, für die Auslenkung der Pro-tons spins relevante B_1^+ -Feld als Mittelwert innerhalb eines BTSL-Phantoms in einem definierten Feldausschnitt (*eng. Field of View – FoV*) betrachtet. Die Antennenvariante mit 8 Einheitszellen und Außenpunktspeisung lieferte die höchste B_1^+ -Effizienz, die 16 Zellen Variante wies jedoch die homogenste H-Feldverteilung auf, welches in Fig.4 verdeutlicht wird. In Teilabbildung (b) wird sehr deutlich der Effekt der Zeroth-Order Resonanz gezeigt und für eine unendliche Antennengeometrie, eine perfekt homogene Feldverteilung vorliegen.

Für Anwendungen innerhalb eines MRTs sind Mehrkanalanordnungen der Antennen für eine möglichst homogene Feldverteilung innerhalb des Patienten von Nöten. Der zur Auswertung verwendete Simulationsaufbau sei in Fig.5 dargestellt.

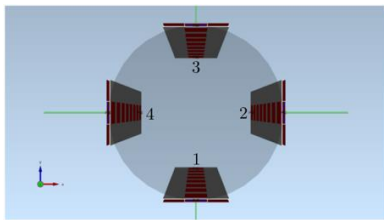


Fig.5: Mehrkanal Simulationsaufbau für die Untersuchung der B_1^+ -Effizienz der 4, 8 und 16 Zellen ZORA. Die Elemente wurden im Abstand von 3cm um ein zylindrisches BTSL-Phantom angeordnet.

Für die Untersuchung der B_1^+ -Effizienz wurden die 4, 8 und 16 Zellen ZORA miteinander verglichen und zwischen Mittelpunkt- und Außenpunktspeisung differenziert. Die Ergebnisse sind in Fig.6 verdeutlicht.

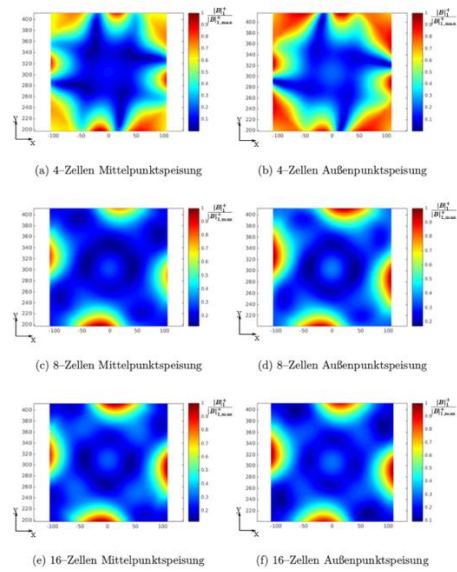


Fig.6: Vergleich der $|B_1^+|$ -Feldverteilung der 4, 8 und 16 Zellen ZORA mit Mittel- und Außenpunktspeisung. Es wird der Betrag des B_1^+ -Feldes normiert auf das maximale B_1^+ in der xy-Ebene dargestellt.

Es wird deutlich, dass für alle betrachteten Antennenvarianten eine höhere B_1^+ -Effizienz bei der Außenpunktspeisung vorliegt. Dieses Erkenntnis wird für den Prototypenbau der ZORAs verwendet. In allen präsentierten Fällen waren die Resonanzfrequenzen der Schwingkreise als $\omega_{Se} = \omega_{Sh}$ gewählt. Für die hiesigen Anwen-dungen wird jedoch nur der Serienstrom auf der Oberfläche der Antennen genutzt. Folglich lag die Untersuchung nah, welchen Einfluss eine Veränderung der Shuntresonanz ω_{Sh} auf die Feldverteilung bzw. auf die B_1^+ -Effizienz ausübt. Diese nicht abgestimmte Leitungsform wird im Weiteren als *unbalanced line* bezeichnet. In Fig.7 sind die Simulationsergebnisse einer Mehrkanalanordnung nach Fig.5 aufgeführt, welche die 6 Zellen und die 8 Zellen Variante der ZORA miteinander in Relation setzt.

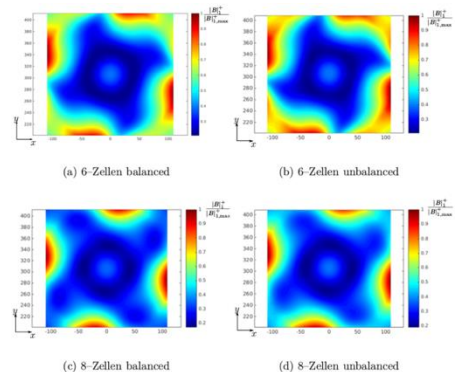


Fig.7: Vergleich der $|B_1^+|$ -Feldverteilung der 6 und 8 Zellen ZORA mit abgestimmter (balanced) und nicht abgestimmter (unbalanced) Leitung. Es wird der Betrag des B_1^+ -Feldes normiert auf das maximale B_1^+ in der xy-Ebene dargestellt.

In weiteren Untersuchungen dieser Arbeit stellte sich heraus, dass die unbalanced ZORA eine höhere B_1^+ -Effizienz bei gleicher Feldverteilung im Vergleich zur balanced ZORA aufwies. Die zuvor verwendete Koaxialleitung, welche zur Realisierung der Shuntinduktivität benötigt wurde, ist in dieser Abbildung entfernt worden und stellt folglich den extremsten Fall einer unbalanced Leitung dar.

Basierend auf den präsentierten Ergebnissen wurden zwei Prototypen einer 8 Zellen ZORA in der balanced bzw. unbalanced Variante und eine balanced 6 Zellen Variante als Referenz für die Messungen angefertigt. Damit eine Abstrahlung der Antennen bei einer Resonanzfrequenz von 298 MHz gewährleistet ist, müssen diese auf die Quellenimpedanz Z_0 angepasst werden. Dies geschieht anhand von Anpassnetzwerken, welche mit Kondensatoren und Induktivitäten verlustarm realisiert werden können. Eine schematische Darstellung eines Anpassnetzwerkes (APNe) für die verwendeten ZORAs mit zwei Einspeisepunkten, sei anhand der nachfolgenden Fig.8 für die Mittelpunktspeisung aufgezeigt.

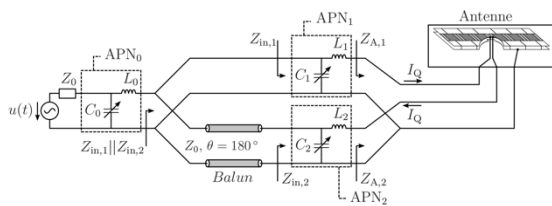


Fig.8: Anpassnetzwerk (APN) der balanced 8 Zellen ZORA mit Mittelpunktspeisung. Es werden insgesamt drei APN benötigt, um die Antenne auf die Impedanz der Quelle Z_0 anzupassen (Svejda 2013).

Auf das genaue Vorgehen der Anpassung soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Es werden jedoch sowohl für die Anpassung der Antennen mit Mittelpunkt-, als auch Außenpunktspeisung, drei APNe benötigt, um die Antenne auf die Quellimpedanz Z_0 anzupassen. Damit eine Phasendrehung des Quellstromes I_Q von 180° realisierbar ist, wird ferner eine Balun-Umwege-Leitung benötigt. Eine Vereinfachung dieses Konzeptes konnte ebenfalls im Verlauf dieser Arbeit realisiert werden. Indem eine Seite der Einspeisung kurzgeschlossen wurde, kann die Balun-Umwege-Leitung entfallen und mit einem resultierenden Einspeisepunkt können die drei APNe auf nur ein APN reduziert werden. Fig.9 zeigt die schematische Darstellung des neuen Einspeise- und Anpassungskonzeptes für die 6 Zellen ZORA.

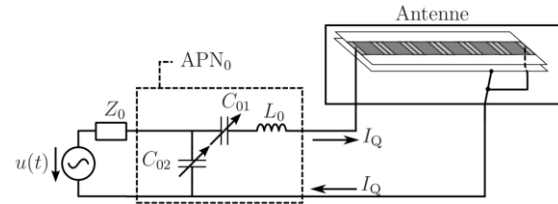


Fig.9: Anpassnetzwerk (APN) der unbalanced 6 Zellen ZORA mit Außenpunktspeisung. Es wird insgesamt nur noch ein APN benötigt, um die Antenne auf die Impedanz der Quelle Z_0 anzupassen.

Dieses Prinzip kann sowohl für die 6 Zellen, als auch für die 8 Zellen ZORA angewendet werden.

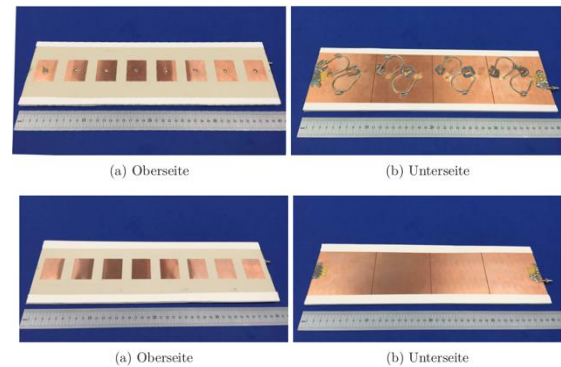


Fig.10: Prototyp der balanced und unbalanced 8 Zellen ZORA mit Außenpunktspeisung.

Ein Vergleich der finalen Aufbauten der Prototypen der 8 Zellen Variante sei in der nachfolgenden Fig.10 aufgezeigt. Bei der unbalanced 8 Zellen Variante im unteren Bereich der Fig.10 ist der geringe Komplexitätsgrad des Aufbaus deutlich zu erkennen.

Beide Antennen wurden im Fachgebiet der Allgemeinen und Theoretischen Elektrotechnik (ATE) im Laufe dieser Arbeit angefertigt und anschließend am vorhandenen Nahfeldmessplatz vermessen. Ferner wurde die Feldsymmetrie aller realisierten Prototypen mit Außenpunktspeisung verglichen und in Fig.11 gezeigt.

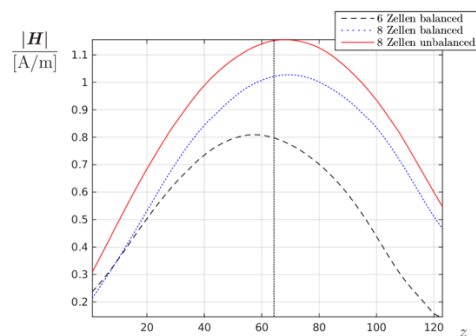


Fig.11: Feldsymmetrievergleich am Nahfeldmessplatz der 6 und 8 Zellen ZORA. Die vertikale Markierung repräsentiert den Mittelpunkt des verwendeten FoV.

Thiel *et al.*, Entwurf und Analyse von Zeroth-Order resonanten Antennen mit neuartiger Speisetechnik für die Ultra-Hochfeld Magnetresonanztomografie.

Von allen verwendeten Antennen, weist die unbalanced 8 Zellen ZORA die höchste H-Feld-symmetrie und –amplitude auf.

Zur abschließenden Verifikation der Antennen, wurden alle drei Prototypen innerhalb eines 7T Tomografen am Standort des Erwin L. Hahn Instituts, am Standort Essen, vermessen (Hahn Institute 2015). Es wurde ein eigens erstelltes BTSL-Phantom der ATE verwendet, welches aus einer Mischung aus Wasser, Alkohol und Salz bestand und ein Aufbau nach Fig.12 genutzt.

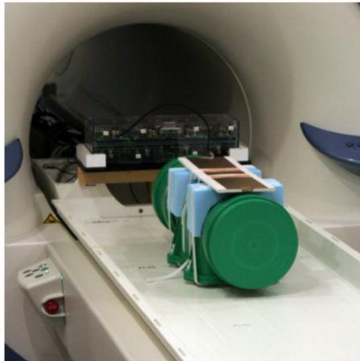


Fig.12: Messaufbau der unbalanced 8 Zellen ZORA mit BTSL-Phantom innerhalb des 7T Tomografen am Erwin L. Hahn Institut.

Gezeigt wird die unbalanced 8 Zellen ZORA, dessen Aufbau jedoch auch für die balanced 6 bzw. 8 Zellen ZORA Anwendung fand. Auch in diesem Fall wurden die Felddaten ermittelt und die Symmetrie der Felder innerhalb des gleichen FoV wie bei der Nahfeldmessplatz-Messung ausgewertet.

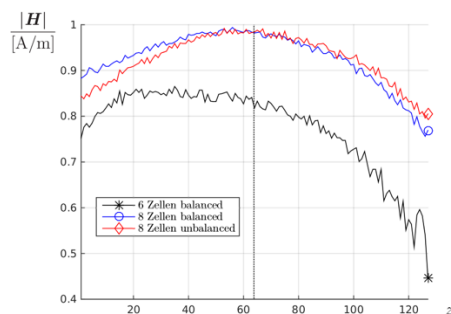


Fig.13: Feldsymmetrievergleich innerhalb des 7T Tomografen der 6 und 8 Zellen ZORA. Die vertikale Markierung repräsentiert den Mittelpunkt des verwendeten FoV.

Auch in diesem Fall wies die unbalanced 8 Zellen ZORA im Vergleich zur balanced 6 bzw. 8 Zellen ZORA die höchste Feldsymmetrie und Feldamplitude auf.

Diskussion

Von den untersuchten 4, 6, 8 und 16 Zellen ZORAs sind nur die 6 und 8 Zellen Variante für praktische Anwendungen in einem 7T Tomografen geeignet. Die zu geringe B_1^+ -Effizienz der 4 und 16 Zellen Variante lässt nur unzu-

reichende Ergebnisse in der Bildgebung zu. Die zusätzlich zu große Dimensionierung der 16 Zellen ZORA führt zu großen Signaldämpfung entlang der Struktur, sodass zu viel Leistung benötigt wird, um ausreichende Feldamplituden zu generieren. Die 8 Zellen Variante kann als balanced und als unbalanced ZORA realisiert werden und bietet eine, bezogen auf die geometrische Struktur-länge, relativ homogene Feldverteilung und eine höhere B_1^+ -Effizienz als die gleiche Bauform mit Mittelpunktspesung. Aufgrund der simpleren Realisierung der unbalanced ZORA, mit simultan höherer Effizienz und Feldsymmetrie, ist diese als die zu präferierende Antennenbauform zu klassifizieren.

Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Arbeit war eine Mehrkanalmessung der unbalanced 8 Zellen ZORA geplant, konnte aufgrund nicht rechtzeitig bereitgestellter Antennenmaterialien jedoch nicht durchgeführt werden. Die hohe Effizienz der Zeroth-Order Resonanz und die homogene Strom- und Feldverteilung dieser Antennenvariante könnte für zukünftige Messungen in einem 7T Tomografen Anwendung finden und als 4 bzw. 8 Kanalanordnung für in vivo Messungen platziert werden. Ein weiterer Vorteil der ZORA ist die vielseitige Gestaltung der Geometrie. Diese können so schmal dimensioniert werden, dass die Breite der Substrate (FR4, RO3010) der Breite der Einheitszelle entspricht, ohne nennenswerte Einbußen in der B_1^+ -Effizienz zu verbuchen (Rennings *et al.*). Damit ließen sich viele Antennen um ein BTSL-Phantom oder einen Menschen positionieren, um eine größtmögliche Zirkularität des B_1^+ -Feldes zu generieren. Zurzeit werden am Erwin L. Hahn Institut Anwendungen mit 32 Kanälen erprobt, welche die erwähnten Antennenanordnungen realisieren könnten, um Patienten mit maximaler Genauigkeit zu untersuchen. Die Anwendung der ZORA könnte in dieser Thematik als eine Alternative zu den bislang verwendeten Antennen angesehen werden.

Literatur

1. Rennings A, Mosig J, Bahr A, Caloz C, Ladd M.E, Erni D. 2009, A CRLH metamaterial based RF coil element for magnetic resonance imaging at 7 Tesla. 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 57:3231-3234.
2. Caloz C, Itoh T. 2006. Electromagnetic Metamaterials. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc. 352 p.

3. Comsol Multiphysics [Internet]. 2015. Göttingen, Niedersachsen: Comsol Inc.; [cited 2015 Sep 8]. Available from: <http://www.comsol.de/>
4. Empire XPU [Internet]. 2008. Kamp-Lintfort, NRW: Empire XPU; [cited 2015 Sep 8]. Available from: <http://www.empire.de/>
5. Svejda J.T. 2013. Entwicklung von Hochfrequenz-Resonatoren für die Ultra-Hochfeld MRT basierend auf CRLH-Metaleitungen unter besonderer Berücksichtigung der B1-Effizienz. Masterarbeit. Universität Duisburg-Essen, Duis-burg.
6. Erwin L. Hahn Institute [Internet]. 2015. Essen, NRW: Erwin L. Hahn Institute for Magnetic Resonance Imaging.; [cited 2015 Sep 8]. Available from: <http://www.hahn-institute.de/>
7. Rennings A, Svejda J.T, Solbach K, Erni D. 2013, A CRLH-metamaterial based zeroth-order resonant RF-coil: First multi-channel results at 7 Tesla. *Magnetic Resonance in Physics, Biology and Medicine (MAGMA)*. 26:183-185.