

Aufbau, Funktion und Test eines statischen Prüfstandes für UHF-RFID-Ohrmarken

Felix Adrion, Nora Hammer, Benjamin Rößler, Dagmar Jezierny, Anita Kapun, Eva Gallmann

Ultrahochfrequente Radiofrequenzidentifikationssysteme (UHF-RFID-Systeme) bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten zur Tiererkennung. In einem Verbundprojekt werden derzeit UHF-Transponderohrmarken und -Lesegeräte speziell für den Einsatz bei Rindern und Schweinen entwickelt. Zur Messung des Erkennungsbereiches und der Signalstärke verschiedener Transponder wurde ein automatisierter Prüfstand konstruiert. Ziel war es, mit diesem Prüfstand den Vergleich verschiedener Typen von UHF-Transponderohrmarken in unterschiedlichen Ausrichtungen zur Antenne des Lesegerätes zu ermöglichen. In diesem Beitrag werden der Aufbau und die Funktionsweise des Prüfstandes sowie Versuche zur Ermittlung der Wiederholbarkeit, des Einflusses zweier Versuchsparameter und der Eignung des Prüfstandes für den angestrebten Zweck dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Prüfstand alle gestellten Anforderungen erfüllt und eine Vorauswahl geeigneter Typen von UHF-Ohrmarken für die Praxisanwendung ermöglicht.

Schlüsselwörter

Elektronische Tierkennzeichnung, UHF-RFID, RSSI, Prüfstand, Transponder

Die elektronische Tierkennzeichnung hat in der modernen Nutztierhaltung einen festen Platz eingenommen. Die Anwendung reicht von der verpflichtenden Kennzeichnung von kleinen Wiederkäuern zur Sicherung der Rückverfolgbarkeit (SCHWALM und GEORG 2011) über die Nutzung der Erkennungsdaten von Milchkühen und Zuchtsauen für das betriebliche Management (RUIZ-GARCIA und LUNADEI 2011, TREVARTEN und MICHAEL 2008) bis zur komplexen Datenerfassung auf Versuchsbetrieben (BÜTFERING 2011). Ergänzend zu den standardmäßig eingesetzten Systemen nach ISO 11785, basierend auf Niedrigfrequenz-Radiofrequenzidentifikation (LF-RFID, 134,2 kHz), wird in den letzten Jahren vermehrt der Einsatz von RFID im Hochfrequenzbereich (HF-RFID, 13,56 MHz) (HESSEL und VAN DEN WEGHE 2013, LEONG et al. 2007, MASELYNE et al. 2014) und Ultrahochfrequenzbereich (UHF-RFID, 860960 MHz) (HOGEWERF et al. 2013, NG et al. 2005, STEKELER et al. 2011, UMSTATTER et al. 2014) in der Forschung getestet. Ein Grund hierfür ist, dass Antikollisionsverfahren bei LF-RFID aufgrund der niedrigen Datenübertragungsrate in diesem Frequenzbereich nur sehr eingeschränkt angewendet werden können. Antikollisionsverfahren verhindern Datenkollisionen, die auftreten, wenn sich mehrere Transponder gleichzeitig im Antennenfeld des Lesegerätes befinden. Weit verbreitet ist z. B. das Slotted-ALOHA-Verfahren, bei dem den Transpondern zufällig Zeitfenster zugeordnet werden, in denen sie ihre Daten an das Lesegerät senden (FINKENZELLER 2012, NAMBOODIRI et al. 2012). Die hierdurch ermöglichte quasi-simultane Erfassung von Transpondern ist beispielsweise zur Nutzung des RFID-Systems bei der Erfassung von Tiergruppen von Vorteil, da eine Vereinzelung der Tiere nicht mehr nötig ist. Im Vergleich zu LF-RFID kann bei HF-RFID durch eine höhere Datenübertragungsrate eine quasi-simultane Erfassung sinnvoll angewendet werden (BUROSE et al. 2010, HESSEL und VAN DEN

WEGHE 2013, KERN 2007). Allerdings liegt die Lesereichweite beider Systeme maximal bei ca. 1 bis 1,5 m. Im UHF-Bereich kann neben der Simultanerfassung von Transpondern auch eine wesentlich höhere Lesereichweite von mehr als 3 m mit passiven Transpondern erreicht werden (RUIZ-GARCIA und LUNADEI 2011). Hierdurch ergibt sich eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für UHF-Transponder in der Tierhaltung, wie beispielsweise die simultane Erfassung großer Tiergruppen, die Überwachung des Fressverhaltens oder die Lokalisierung zum Zweck der Aktivitätserfassung von Tieren in der Gruppe. Allerdings sind mit der höheren Betriebsfrequenz auch Nachteile wie die starke Absorption durch Wasser bzw. Körpergewebe sowie die Reflexion an elektrisch leitfähigen Oberflächen verbunden. Durch letztere entstehen wechselnde Interferenzmuster, die zu einer Inhomogenität des Antennenfeldes führen. Des Weiteren verursachen Materialien in der Nähe des Transponders aufgrund ihrer Permittivität (Durchlässigkeit für elektrische Felder) eine Änderung der Impedanz (Wechselstromwiderstand) der Transponderantenne und damit eine Verschiebung der Resonanzfrequenz des Transponders. In den meisten Fällen ist mit einer Absenkung der Resonanzfrequenz zu rechnen (RAO et al. 2005). All diese Faktoren beeinträchtigen die Lesereichweite und Erkennungssicherheit der UHF-Transponderohrmarken und machen eine Anpassung der Transponderantennen für den Einsatz an Tieren notwendig (EUROPEAN EPC COMPETENCE CENTER (EECC) 2011, FINKENZELLER 2012, KERN 2007, LORENZO et al. 2011, RAO et al. 2005).

Um UHF-Transponder hinsichtlich ihrer Lesereichweite, ihrer Sensitivität gegenüber der Anbringung an verschiedenen Materialien oder der Sendefrequenz und weiterer Eigenschaften zu beurteilen, werden genormte Messungen in Absorberkammern durchgeführt, die Störungsfreiheit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse garantieren. Ein bekannter Test dieser Art ist der „UHF Tag Performance Survey“, der jährlich vom European EPC Competence Center (EECC, Neuss, Deutschland) durchgeführt wird (EUROPEAN EPC COMPETENCE CENTER (EECC) 2011). Eine genaue Beschreibung des dort verwendeten Messaufbaus geben DERBEK et al. (2007). Nachteile dieses Verfahrens sind ein hoher messtechnischer Aufwand und die Untersuchung einzelner Parameter statt des gesamten RFID-Systems in seiner Anwendung. Im Gegensatz hierzu sind in Praxisversuchen mit dem Gesamtsystem die Ergebnisse allerdings oft nicht generalisierbar und aufgrund sich ändernder Umweltbedingungen nicht über einen längeren Zeitraum reproduzierbar. Aus diesen Gründen gehen einige Autoren einen Mittelweg und führen Tests von UHF-Systemen in modellhaften Laborversuchen durch, deren Aufbau einen Ausschnitt der Praxisanwendung darstellt und eine bessere Reproduzierbarkeit als Praxisversuche gewährleistet (JUNGK 2010, MAINETTI et al. 2013). JUNGK (2010) betont die unbedingt notwendige ausreichende Wiederholung von Messungen zur Absicherung der Ergebnisse gegen Umwelteinflüsse, die in einer Versuchsumgebung ohne umgebendes Absorbermaterial auftreten. KERN (2007) stellt ebenso einige Möglichkeiten für einfache Tests von Transpondern vor und weist auf die Gefahr hin, dass diese Ansätze nicht in jeder Hinsicht wissenschaftlichen Anforderungen genügen.

Problemstellung und Zielsetzung

In einem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Innovationsvorhaben werden derzeit UHF-Transponderohrmarken zur Kennzeichnung von Rindern und Schweinen sowie Lesegeräte für die Simultanerfassung und Ortung von UHF-Transpondern entwickelt (FORSCHUNGSINFORMATIONSSYSTEM AGRAR/ERNÄHRUNG 2012). Das vorrangige Ziel ist es, das RFID-System an die Anforderungen und Gegebenheiten in der Tierhaltung anzupassen bzw. für die Anbringung am Tier zu optimieren. Zur Auswahl geeigneter Antennendesigns und Ohrmarkenkonstruktionen

– besonders im Hinblick auf eine ausreichende Lesereichweite, eine geeignete Richtcharakteristik und die Lesbarkeit in der Nähe von Ohrgewebe – werden die Funktionsmuster von verschiedenen Transpondertypen vor der Anwendung am Tier in Prüfstandversuchen getestet. Für diese wurden zwei Prüfstände konstruiert, um die Transponder unter dynamischen und statischen Bedingungen zu testen. In den dynamischen Versuchen ist ein Vergleich der Transponder bei verschiedenen Geschwindigkeiten und in verschiedenen Ausrichtungen möglich, was die Anwendung des Systems bei Treibeversuchen modellhaft abbildet (HAMMER et al. 2015). Des Weiteren ist die Größe und Form des Erkennungsbereiches der Transponderohrmarken sowie deren Signalstärke in Abhängigkeit verschiedener Faktoren von Interesse. Diese Parameter können bei ruhendem Transponder (statisch) ermittelt werden.

In diesem Beitrag wird ein statischer Prüfstand vorgestellt, der die Messung des Erkennungsbereiches und der Signalstärke von UHF-Transponderohrmarken in Kombination mit verschiedenen Lesegeräten und deren Einstellungen ermöglicht. Ziel ist hierbei vorrangig der Vergleich von Ohrmarken mit verschiedenen Typen von UHF-Transpondern. Es soll eine Gesamtbeurteilung der Transpondertypen sowie die Betrachtung einzelner Ausrichtungen zur Antenne des Lesegerätes möglich sein. Für diese Messungen müssen die Transponderohrmarken in verschiedenen Ausrichtungen an definierten Rasterpunkten im Feld eines Lesegerätes positioniert werden (KERN 2007). Um diese zeitaufwendigen Versuche effizient durchführen zu können, wurde der Prüfstand weitgehend automatisiert. Da der Prüfstand nicht in einer störungsfreien Versuchsumgebung (Absorberkammer) arbeitet, kann ein Einfluss von veränderten Reflexions- und Absorptionscharakteristiken durch Änderungen in der Umgebung nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurden vor der eigentlichen Nutzung des Prüfstandes methodische Versuche durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Messungen, den Einfluss der Halterung für die Ohrmarken und den Einfluss der Reihenfolge der gemessenen Koordinaten zu ermitteln. Im Anschluss daran wurde ein Vergleich verschiedener Typen von UHF-Ohrmarken durchgeführt, der die eigentliche Anwendung des Prüfstandes testen sollte. Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktion des Prüfstandes erläutert sowie die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Abschließend wird die Eignung des Prüfstandes für die geplanten Messungen an UHF-Transponderohrmarken beurteilt.

Material und Methoden

Aufbau und Funktion des Prüfstandes

Hauptbestandteil des Prüfstandes sind zwei Linearantriebe, die den 350 cm x 350 cm großen waagerechten Arbeitsbereich in 34 cm Höhe über dem Boden aufspannen. Sie bilden die x- und y-Achse der Fläche, innerhalb derer jede Koordinate mit einem an der x-Achse befestigten Schlitten angefahren werden kann. Die y-Achse trägt hierbei die x-Achse und führt diese mittig (Abbildung 1). Eine 125 cm hohe Säule aus extrudiertem Polystyrol (XPS, Styrodur[®]) ist an dem Schlitten befestigt und dient als Halterung für die Transponderohrmarken. Dieses Material wurde aufgrund seines geringen Einflusses auf die elektromagnetische Strahlung des Lesegerätes gewählt (relative Permittivität $\epsilon_r = 1,03$) und wird auch in normierten Transpondertests eingesetzt (DERBEK et al. 2007, EUROPEAN EPC COMPETENCE CENTER (EECC) 2011, WEBSTER und EREN 2014). Die Ohrmarken können in austauschbaren Blöcken aus Polystyrolschaum einzeln an der Spitze der Säule in jeder beliebigen Ausrichtung zur Antenne des Lesegerätes positioniert werden. Sie befinden sich bei den Versuchen 165 cm über dem Boden. Die

Lesegerätantennen können ebenfalls je nach Bedarf in einem Versuch einzeln oder zu mehreren an frei wählbaren Punkten in verschiedenen Ausrichtungen um den Prüfstand herum platziert werden. Ebenso ist eine Positionierung der Antennen in größerer Entfernung vom Prüfstand möglich, sodass auch Transponder mit hoher Lesereichweite bei maximaler Sendeleistung des Lesegerätes vermessen werden können. Die Genauigkeit der Positionierung des Transponders relativ zum Lesegerät beträgt ca. 1 cm; dabei werden alle Fehlerquellen, wie speziell das Spiel der Parallelführung der x-Achse, die Anbringung der Transponder in der Halterung und die Ausrichtung der Lesegerätantennen (ADRION et al. 2014) einbezogen.

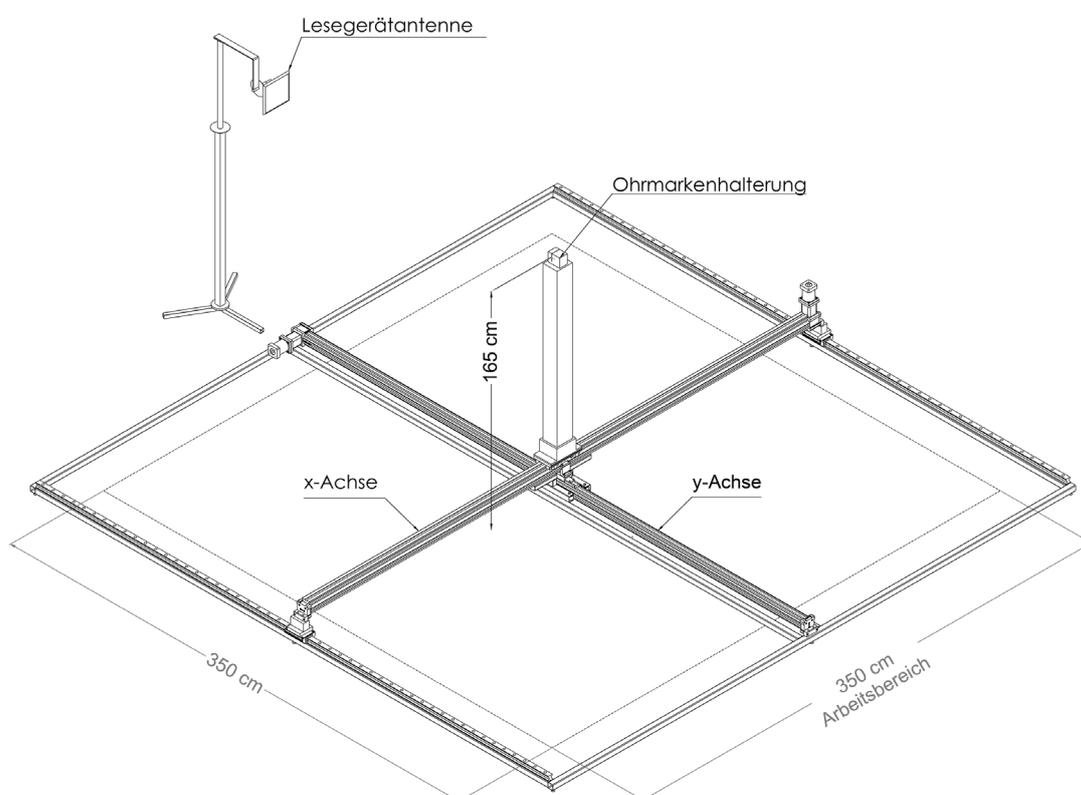


Abbildung 1: Modell des Prüfstandes

Die Servomotoren der Linearantriebe und das Lesegerät werden von einer zentralen Steuerung betrieben. Der Benutzer kann über eine LabVIEW[®]-Anwendung den Prüfstand konfigurieren und Versuche aufrufen, starten sowie automatisiert ablaufen lassen. Die Versuche werden vorab in einer zentralen Konfigurationssoftware (Phenobyte GmbH & Co. KG, Ludwigsburg) erstellt und in einer Versuchsdatenbank angelegt. Wichtige Parameter wie geprüfter Koordinatenbereich, Koordinatenraster, Transpondernummer, Transponderausrichtung, Lesegerätkonfiguration und Antennenausrichtung werden in diesem Arbeitsschritt erfasst. Sämtliche Lesungen eines Versuches werden zusammen mit den Koordinaten, an denen die Lesungen registriert wurden, in der Datenbank abgelegt (ADRION et al. 2014).

Ein einzelner Versuchsdurchgang beinhaltet die Messungen eines Transponders in einer Ausrichtung bei definierter Lesegerätkonfiguration und -position. Während eines Versuchsdurchganges wird das festgelegte Koordinatenraster automatisiert abgefahren. Dies kann entweder in zufälliger Reihenfolge oder geordnet in auf- oder absteigender Koordinatenfolge auf beiden Achsen erfolgen. An jeder Koordinate wird der Schlitten während eines Durchgangs angehalten, das Lesegerät nach einer kurzen Wartezeit (< 1000 ms) für eine definierte Dauer (100 bis 65000 ms) eingeschaltet und die in dieser Zeit stattfindenden Lesungen des Transponders registriert. Die Anzahl der Lesungen ist hauptsächlich abhängig von verschiedenen Einstellungen des Lesegerätes, wie z.B. dem Intervall nach dem das sogenannte „Inventoried Flag“ des Transponders im Anti-Kollisionsprozess zurückgesetzt wird. Aber auch die Energieversorgung des Transponders hat Einfluss auf die Anzahl der Lesungen pro Zeiteinheit. So sinkt an der Grenze des Erfassungsbereiches die Anzahl der Lesungen aufgrund der schlechteren Energieversorgung des Transponders (ADRIAN et al. 2014). Bei jeder Lesung misst das Lesegerät einen Indikator für die empfangene Leistung des Transpondersignals (Received Signal Strength Indicator, RSSI). Die Größe dieses Wertes ist lesegerätspezifisch, da das empfangene Signal mit einem gerätabhängigen Skalierungsfaktor multipliziert wird. Physikalisch ist der gemessene Wert im Wesentlichen abhängig von der Entfernung d zwischen Lesegerätantenne und Transponder. Des Weiteren beeinflussen die in die Lesegerätantenne eingespeiste Leistung P_r , die Antennengewinne G_r und G_t von Lesegerät bzw. Transponder, die Wellenlänge λ und der Reflexionsverlustfaktor L den gemessenen RSSI (Gleichung 1) (CHOI et al. 2009, FINKENZELLER 2012). Der RSSI wird im Folgenden dimensionslos als Leistungspegel in Dezibel Milliwatt (dBm) angegeben. Die Einheiten Milliwatt und Dezibel Milliwatt können mit Gleichung 2 umgerechnet werden. Neben den genannten Faktoren kann auch eine Umgebung mit Reflexionen den RSSI-Verlauf durch Änderung des sogenannten Pfadverlustexponenten beeinflussen. Bei einer idealen Freiraumausbreitung hat der Pfadverlustexponent den Wert 2 bei Betrachtung einer Wegstrecke bzw. 2^2 bei Berücksichtigung von Hin- und Rückweg des Signals zwischen Lesegerät und Transponder (Gleichung 1). Bei Wellenausbreitung im Inneren von Gebäuden kann der Wert unter anderem aufgrund von Mehrwegausbreitung hiervon abweichen (GOLDSMITH 2005). Die Ermittlung einer empirischen Funktion für den Verlauf des RSSI in einer Versuchsumgebung unter Bedingungen, die von der idealen Freiraumausbreitung abweichen, ermöglicht Gleichung 3. Hierbei entspricht die Konstante K den oben genannten Einflussfaktoren des RSSI und t dem quadrierten Pfadverlustexponenten (GOLDSMITH 2005). Der RSSI ist als Parameter für den Vergleich unterschiedlicher Transpondertypen und Versuchsvarianten gut geeignet, da ein hoher RSSI eine hohe Erfassungssicherheit und auch eine hohe Lesereichweite eines Transponders anzeigt (CATARINUCCI et al. 2012).

$$\text{RSSI [mW]} = P_r G_r^2 G_t^2 \lambda^4 L (4\pi d)^{-4} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{RSSI [dBm]} = 10 \log_{10}(\text{RSSI [mW]}) \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\text{RSSI [dBm]} = 10 \log_{10}(Kd^{-t}) \quad (\text{Gl. 3})$$

Versuchsdurchführung

Eine Übersicht aller Versuche und untersuchten Parameter ist in Tabelle 1 dargestellt. In einem Vorversuch wurde zunächst die Position des Lesegerätes relativ zum Prüfstand variiert, um vor der Durchführung weiterer Versuche den Einfluss von Änderungen in der Versuchsumgebung bzw. in

diesem Fall den Einfluss der Strahlungsrichtung des Lesegerätes zu bestimmen. In allen weiteren Versuchen wurden – ohne die Lesegerätposition und die Umgebungsbedingungen zu verändern – die Wiederholbarkeit der Messungen, der Einfluss der Ohrmarkenhalterung aus Polystyrol und der Einfluss der Reihenfolge der Koordinaten auf die Ergebnisse untersucht. Anschließend wurde ein Versuch zum Vergleich von sechs Typen von Transponderohrmarken durchgeführt. Das Rastermaß wurde für alle hier beschriebenen Versuche auf 15 cm festgelegt. Nach JUNGK (2010) sollten Messpunkte bei der Analyse eines UHF-RFID Systems nicht weiter als eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sein. Dies entspricht 17,2 cm bei einer Arbeitsfrequenz von 868 MHz und wurde durch das gewählte Rastermaß erfüllt. Die Pausenzeit zwischen automatischer Positionierung des Transponders und Einschalten des Lesegerätes betrug 500 ms, die Lesedauer an jeder Koordinate 1000 ms. Um die Anzahl der Lesungen zu begrenzen, wurde zum Zurücksetzen des Transponders im Anti-Kollisionsprozess eine Zeit von 200 ms eingestellt, sodass pro Koordinate maximal fünf Lesungen erfolgen konnten. Die Standardposition des Lesegerätes war bei allen Versuchen mittig vor dem Prüfstand mit waagerechter Strahlungsrichtung (Abbildung 1). Die Mitte der Lesegerätantenne befand sich auf derselben Höhe wie die Mitte der Transponder (165 cm). In der Standardausrichtung entsprachen x- und y-Achse im Erkennungsfeld des Lesegerätes denen des Prüfstandes. Lediglich bei der Positionierung des Lesegerätes an der Seite des Prüfstandes, um 90° zur Standardausrichtung gedreht (Tabelle 1, „90° linksseitig am Prüfstand“), waren die beiden Achsen aus Sicht des Lesegerätes vertauscht. Die

Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Versuche

Untersuchter Parameter	Position der Lesegerätantenne relativ zum Prüfstand	Wiederholbarkeit der Ergebnisse	Ohrmarkenhalterung	Reihenfolge der Koordinaten	Typenvergleich Transponderohrmarken
Varianten	mittig (Standard)	-	Ohrmarke frei Ohrmarke komplett in Polystyrolschaum eingebettet	randomisiert	-
	85 cm nach links verschoben			in Reihen, y aufsteigend	
	90° linksseitig am Prüfstand			in Reihen, y abfallend	
				in Reihen, x aufsteigend in Reihen, x abfallend	
Transpondertyp (Anzahl der Exemplare)	A (1)	A (11)	A (6)	A (6)	A (6)
		B3-4 (14)	B3-4 (6)	B3-4 (6)	B3-4 (6)
		B4-4 (17)			B4-4 (6)
					C1 (3)
					C1-4 (3)
Transponderausrichtung zur Antenne des Lesegerätes	5	5	3	5	1
			5		2
					5
Koordinatenbereich [cm]	x: -165 bis 165 y: 40 bis 385	x: 0 y: 40 bis 385	x: 0 y: 40 bis 385	x: -165 bis 165 y: 40 bis 385	x: -165 bis 165 y: 40 bis 385
Versuchsblöcke	-	2	6	6	6
Anzahl Versuchsdurchgänge	3	84	48	60	90

Koordinaten wurden in Reihen, jeweils in positiver y-Richtung fahrend und bei positiven x-Werten beginnend (aus Sicht des Lesegerätes), abgefahren (Tabelle 1, „In Reihen, y aufsteigend“).

In allen Versuchen wurden die Ohrmarken in Schlitzten von Polystyrolschaumblocken in der gewünschten Ausrichtung fixiert (Abbildung 2 a) und c)). Die Nummerierung der Ausrichtungen stimmt mit denen von HAMMER et al. (2015) überein. Die Transponder bzw. Ohrmarken waren in allen Versuchen mit der Vorderseite zum Lesegerät angeordnet (Ausrichtung 5). Zum Test des Einflusses der Ohrmarkenhalterung aus Polystyrol waren die Transponder in einer „freien“ Variante nicht in einem Polystyrolblock fixiert, sondern lediglich mit dünnen Holzstäbchen auf einer Unterlage aus Polystyrolschaum an derselben Position befestigt (Abbildung 2 b)). Hierbei waren die Holzstäbchen am äußeren Rand der Ohrmarke positioniert, sodass eine Überlagerung mit dem Transponder ausgeschlossen werden konnte. Ziel dieser Anbringung war es, eine Referenzvariante zu bilden, bei der die Messungen nicht durch die Halterung beeinflusst waren. Bei diesem Versuch wurden die Transponder auch in seitlicher Ausrichtung getestet, um eine eventuell unterschiedliche Beeinflussung durch die Ohrmarkenhalterung in verschiedenen Ausrichtungen zu prüfen (Ausrichtung 3). Im Versuch zum Vergleich der verschiedenen Transpondertypen wurden die Transponder zusätzlich zu Ausrichtung 5 in Ausrichtung 1 (seitlich entgegengesetzt zu Ausrichtung 3) und in Ausrichtung 2 (von unten) getestet.

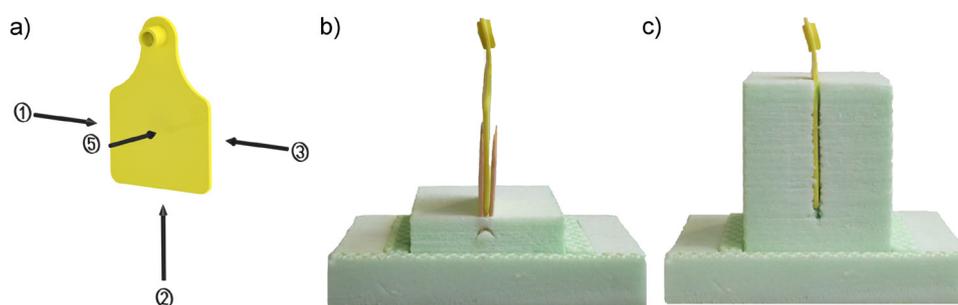


Abbildung 2: a) Ausrichtung der Ohrmarken zum Lesegerät (Hauptstrahlrichtung des Lesegerätes entspricht der Richtung der Pfeile); b) Ohrmarke in „freier“ Anbringung (Referenzvariante) in Ausrichtung 3; c) Ohrmarke in Polystyrolblock in Ausrichtung 3

In den Versuchen wurden Ohrmarken mit sechs verschiedenen Transpondertypen (A, ZT, B3-4, B4-4, C1, C1-4) verwendet (Tabelle 2). Alle Typen sind passiver Bauart, werden also ausschließlich vom Antennenfeld des Lesegerätes mit Energie versorgt. Transpondertyp ZT ist mit einem Chip vom Typ U-Code G2iL[®] (NXP Semiconductors Netherlands N.V.) ausgestattet, alle anderen Transpondertypen mit einem Chip vom Typ Monza 4[®] (Impinj Inc.). Die Transponder sind für den Betrieb bei 868 MHz ausgelegt. Typ A ist ein kommerziell erhältlicher passiver UHF-Etikettentransponder (UPM Web[®]), der für Anwendungen in der Logistik optimiert ist. Er besitzt eine hohe maximale Lesereichweite von ca. 5 bis 9 m (UPM RFID 2011). Zudem weist er aufgrund seiner gefalteten Dipolstruktur eine symmetrische Richtcharakteristik auf (DETLEFSEN und SIART 2009, UPM RFID 2011), was Vorteile für methodische Untersuchungen bietet. Für alle weiteren Versuche mit projekteigenen Transpondern ist dieser Transponder für die statistische Auswertung als Vergleichstyp vorgesehen, um eine gemeinsame Auswertung verschiedener Versuche trotz eventuell geänderter Bedingungen in der Versuchsumgebung zu ermöglichen. Typ ZT ist eine neuere Generation von Typ A, die in eine Ohrmarke

für Rinder integriert wurde. Die Typen B3-4, B4-4, C1 und C1-4 sind im Forschungsprojekt entwickelte Funktionsmuster, die in Ohrmarken für Rinder und Schweine eingesetzt werden können. Sie besitzen alle eine PIF-Antennenstruktur (Planar Inverted F-Shaped Antenna) (FUJIMOTO und MORISHITA 2013). Typ B3-4 und Typ B4-4 unterscheiden sich in der Länge des letzten Antennenabschnittes und somit in ihrer Resonanzfrequenz. Diese Variation findet zur Anpassung der Transponderantennen an die Frequenzverschiebung durch Eingießen in eine Kunststoffohrmarke und die Anbringung am Tier statt. Die Typen C1 und C1-4 unterscheiden sich nur im Basismaterial ihrer Antennen. Die Antennenstruktur aller sechs Transpondertypen besteht aus Aluminium. Detailliertere Angaben zu Gestaltung und Größe der projekteigenen Transponderantennen sind aus patentrechtlichen Gründen nicht möglich.

Tabelle 2: Übersicht der für die Ohrmarken verwendeten UHF-Transponder

Transpondertyp	Eigenschaften
A	<ul style="list-style-type: none"> - kommerziell erhältlich (UPM Web[®]) - gefaltete Dipol-Antennenstruktur - aufgeklebt auf Rinderohrmarke (FlexoPlus[®], Caisley International GmbH, Bocholt)
ZT	<ul style="list-style-type: none"> - kommerziell erhältlich (Smartrac Web[®]) - gefaltete Dipol-Antennenstruktur - eingebettet in einer luftgefüllten Tasche in Rinderohrmarke
B3-4, B4-4	<ul style="list-style-type: none"> - im Forschungsprojekt entwickelt - PIF-Antennenstruktur - Basisfolie: Polyimid (Kapton[®]) - Variation der Resonanzfrequenz (B4-4 > B3-4) - Größe für Rinderohrmarken ausgelegt - eingegossen in Rinderohrmarke (Primaflex[®], Caisley International GmbH, Bocholt)
C1, C1-4	<ul style="list-style-type: none"> - im Forschungsprojekt entwickelt - PIF-Antennenstruktur - Variation der Basisfolie: C1: selbstklebende Aluminiumfolie (gleichzeitig Antennenmaterial) C1-4: Polyimid (Kapton[®]) - Größe für Schweineohrmarken ausgelegt - eingegossen in Rinderohrmarke (Primaflex[®], Caisley International GmbH, Bocholt)

Als Lesegerät wurde ein Entwicklungsmuster (deister electronic GmbH, Barsinghausen) mit interner Antenne verwendet. Die Arbeitsfrequenz lag bei 865,7 MHz. Die effektiv abgestrahlte Leistung (Effective Radiated Power, ERP) betrug in allen Versuchen 1 W bzw. 30 dBm bei zirkularer Polarisation und einem Öffnungswinkel von 90°. Die Kommunikation zwischen Lesegerät und Transponder erfolgte nach den Spezifikationen von EPC Class 1 Generation 2 (GS1 EPCGLOBAL INC. 2013).

Versuchsplanung, Datenaufbereitung und statistische Auswertung

Für den Vorversuch zur Demonstration des Einflusses einer geänderten Lesegerätposition auf die Messungen wurde keine statistische Versuchsplanung erstellt. Hier wurden lediglich mit einem Transponderexemplar drei Lesegerätpositionen getestet. Bei allen weiteren Versuchen wurde der Versuchsplan so angelegt, dass eine Auswertung der Daten mit einem gemischten linearen Modell möglich war. Die Versuchsdurchgänge wurden in Blöcke eingeteilt, um eine eventuelle zeitliche Änderung der Umgebungsbedingungen berücksichtigen zu können. Im Versuch zur Wiederholbarkeit der Messungen entsprachen die Blöcke gleichzeitig den beiden durchgeführten Wiederholungen. In jedem komplett randomisierten Block eines Versuches wurde jedes Exemplar jedes beteiligten Trans-

pondertyps in jeder Variante getestet. Eine Übersicht über die Anzahl der einzelnen Versuchsdurchgänge und Exemplare in jedem Versuch zeigt Tabelle 1. Die Anzahl der Exemplare der Transponderohrmarken entsprach in den Versuchen den Wiederholungen des Transpondertyps, während die bis zu fünf einzelnen Lesungen eines Transponders pro Koordinate Messwiederholungen in Bezug auf den RSSI waren.

Bei der statistischen Auswertung der Versuche wurde der gemessene RSSI als abhängige Variable verwendet. In einem ersten Analyseschritt wurde für jede Koordinate, an der der jeweilige Transponder gelesen wurde, der Mittelwert des RSSI der bis zu fünf Lesungen (Messwiederholungen) berechnet. Allerdings sind diese Koordinatenmittelwerte räumlich korreliert. Für die statistische Auswertung wurde deshalb aus den Koordinatenmittelwerten des RSSI ein Gesamtmittelwert für jeden Versuchsdurchgang errechnet. Auf diese Weise stand eine statistisch unabhängige Größe zum Vergleich der Versuchsdurchgänge zur Verfügung. Für die Bildung der Gesamtmittelwerte wurden ausschließlich Messwerte des RSSI auf der Linie $x = 0$ verwendet, da nur auf dieser Linie die gewählte Ausrichtung des Transponders zur Antenne des Lesegerätes exakt eingehalten wird. Im restlichen Erkennungsfeld ist durch den seitlichen Versatz des Transponders an jeder Koordinate eine leicht veränderte Ausrichtung des Transponders zum Lesegerät gegeben, weshalb für den Erkennungsbereich eines Transponders im Ganzen nur eine grafische Auswertung sinnvoll ist. Ist nur der mittlere RSSI der Transponder in einer bestimmten Ausrichtung von Interesse, können die Messungen somit auf die Linie $x = 0$ beschränkt werden (Tabelle 1).

Für jeden Versuch wurde aus den Gesamtmittelwerten des RSSI ein gemischtes Modell mit dem Statistikpaket SAS 9.2 und der Prozedur MIXED berechnet. Die Modellerstellung wurde jeweils mit dem vollen Modell mit allen Zweifach- und Dreifachwechselwirkungen begonnen. Eine Übersicht der verwendeten festen Effekte und der aus eventuellem Entfernen nicht signifikanter Effekte bzw. Wechselwirkungen resultierenden Modelle zeigt Tabelle 3. Zufälliger Effekt war in jedem Modell das Transponderexemplar. So konnten in den Modellen eventuelle herstellungsbedingte Unterschiede zwischen den Exemplaren berücksichtigt werden. Die Normalverteilung der Messwerte war in allen Versuchen gegeben und wurde durch die grafische Analyse von Q-Q-Plots ermittelt. Da die Transpondertypen Unterschiede in der Streuung des RSSI zeigten und deshalb keine Varianzhomogenität erreicht werden konnte, wurde der Transpondertyp bei der Auswertung als Gruppierungsvariable festgelegt und eine eigene Varianzkomponente pro Transpondertyp geschätzt. Mittelwertvergleiche wurden mit t-Tests durchgeführt. Es erfolgte eine Bonferroni-Korrektur bei multiplen Vergleichen.

Tabelle 3: Übersicht der festen Effekte und finalen gemischten Modelle in der Versuchsauswertung

Versuch	Wiederholbarkeit der Ergebnisse	Ohrmarkenhalterung	Reihenfolge der Koordinaten	Typvergleich Transponderohrmarken
Feste Effekte im Ausgangsmodell	Transpondertyp (T), Wiederholung (W)	Block (B), Transpondertyp (T), Ausrichtung (A), Ohrmarkenhalterung (OH)	Block (B), Transpondertyp (T), Koordinatenabfolge (K)	Block (B), Transpondertyp (T), Ausrichtung (A)
Finales Modell	$RSSI = T + E + r$	$RSSI = B + T + A + OH + T \cdot A + T \cdot OH + A \cdot OH + E + r$	$RSSI = T + E + r$	$RSSI = B + T + A + T \cdot A + E + r$

E = Transponderexemplar
r = Restfehler

Der Versuch zur Ermittlung der Wiederholbarkeit wurde zusätzlich grafisch mit der Bland-Altman-Methode ausgewertet (BLAND und ALTMAN 1986). Bei dieser Form der Auswertung wird die Differenz zwischen zwei Wiederholungen derselben Messung am selben Messobjekt (Transponderohrmarke) über dem Mittelwert aus den beiden Wiederholungen aufgetragen. Der Mittelwert aller Differenzen (d) ist bei gegebener Wiederholbarkeit der Messung (nahe) Null und zeigt bei einer Abweichung von Null einen systematischen Fehler der Messungen an. Des Weiteren gilt bei Normalverteilung der Differenzen, dass 95 % der Werte im Bereich des 1,96-Fachen der Standardabweichung (s) der Differenzen liegen. Dies wird im Diagramm durch zwei Linien bei $d \pm 1,96 \cdot s$ veranschaulicht. So können die Grenzen der Übereinstimmung beider Wiederholungen und der sogenannte Wiederholbarkeitskoeffizient ($1,96 \cdot s$) ermittelt werden und geben einen Hinweis darauf, wie groß die Differenz zwischen zwei Versuchsvarianten mindestens sein muss, damit dieser Unterschied mit dem vorliegenden Messverfahren detektiert werden kann (BLAND und ALTMAN 1986).

Ergebnisse und Diskussion

Beispielhaftes Erkennungsfeld und RSSI-Verlauf

Als Beispiel für die mit dem vorgestellten Prüfstand erzielbaren Ergebnisse zeigt Abbildung 3 den RSSI einer Ohrmarke mit dem Transpondertyp B3-4 im gesamten Erkennungsbereich (Abbildung 3 a) und auf der Linie $x = 0$ (Abbildung 3 b)). Die Messungen stammen aus einem Durchgang des Versuches zum Test des Einflusses der Koordinatenreihenfolge. Deutlich erkennbar ist eine Abnahme des RSSI bis zu einer Entfernung von ca. 250 cm von der Lesegerätantenne in y -Richtung. In größerer Entfernung wurde der RSSI durch Reflexionen in der Versuchsumgebung und dabei entstehende Interferenzen deutlich beeinflusst. Schwankungen des RSSI und Leselücken sind in den äußeren Bereichen in beiden Darstellungen erkennbar. Allerdings war die Anpassung einer Regressionskurve nach

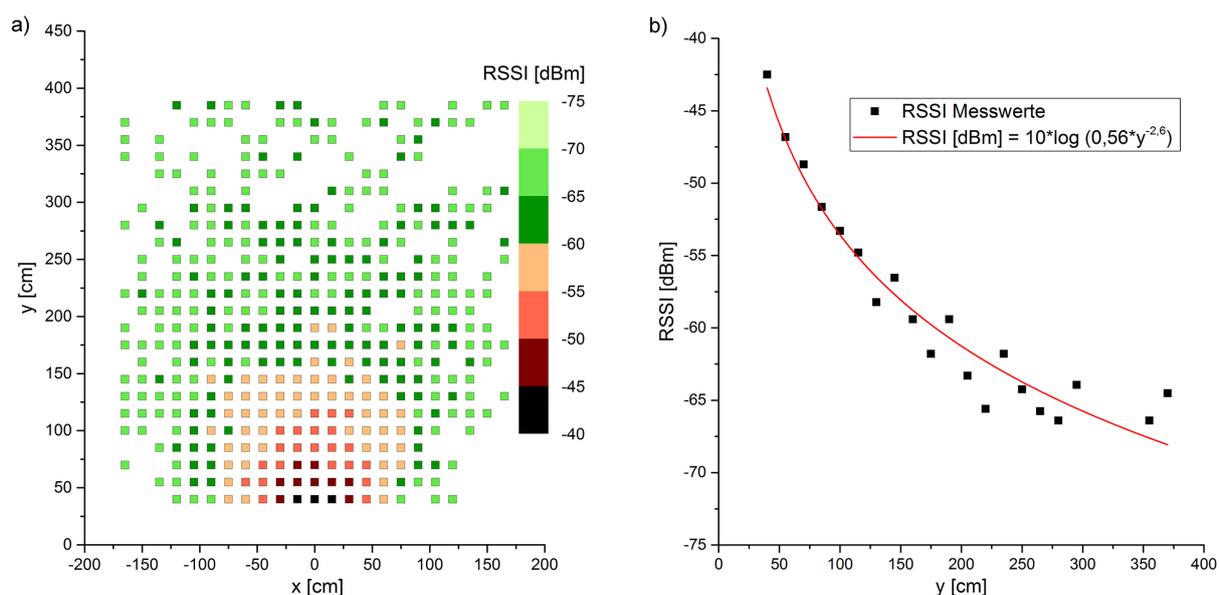


Abbildung 3: RSSI [dBm] im Erkennungsbereich einer Transponderohrmarke mit dem Transpondertyp B3-4, a) Erkennungsfeld (vergrößerte Darstellung der Punktmessungen), b) Messungen auf der Linie $x = 0$ mit Regressionskurve

Gleichung 3 an die Daten gut möglich (korrigiertes Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,95$). Der resultierende Pfadverlustexponent t lag mit 2,6 in einem für Mehrfachausbreitung in Innenräumen plausiblen Bereich (GOLDSMITH 2005). Die grundlegende Anforderung an den Prüfstand, die Messung des Erkennungsbereiches und der Signalstärke von UHF-Transponderohrmarken, konnte somit erfüllt werden.

Einfluss der Lesegerätposition

Der Einfluss der Versuchsumgebung auf die Messungen zeigte sich deutlich bei Veränderung der Lesegerätposition relativ zum Prüfstand. Der Verlauf des RSSI auf der Linie $x = 0$ änderte sich mit der Lesegerätposition (Abbildung 4). Ein etwas gleichmäßigerer Verlauf wurde an der Position seitlich des Prüfstandes erreicht. Besonders starke Abweichungen zwischen den Varianten traten vor allem ab einer Entfernung von 200 cm vom Lesegerät auf. Dies deutet darauf hin, dass das gesendete Signal des Lesegerätes bzw. das reflektierte Signal des Transponders bei zunehmender Entfernung von Transponderohrmarke und Lesegerät über unterschiedliche Wege der Mehrfachausbreitung (Reflexionen) empfangen wurden. Um diese immer gleich zu halten und somit reproduzierbare Ergebnisse zu ermöglichen, ist eine gleichbleibende Position der Lesegerätantenne folglich unbedingt notwendig. Des Weiteren verdeutlicht dieser Versuch, dass Änderungen in der Versuchsumgebung ebenso die Messungen verändern können (GOLDSMITH 2005). Innerhalb eines Versuches können auftretende systematische Änderungen durch die Bildung von zeitlichen Blöcken berücksichtigt werden. Wie bereits im Kapitel Material und Methoden erwähnt, ist es zum Vergleich verschiedener Versuche jedoch notwendig, einen Transpondertyp als statistische Referenz bzw. Vergleichsbasis in alle Versuche zu integrieren.

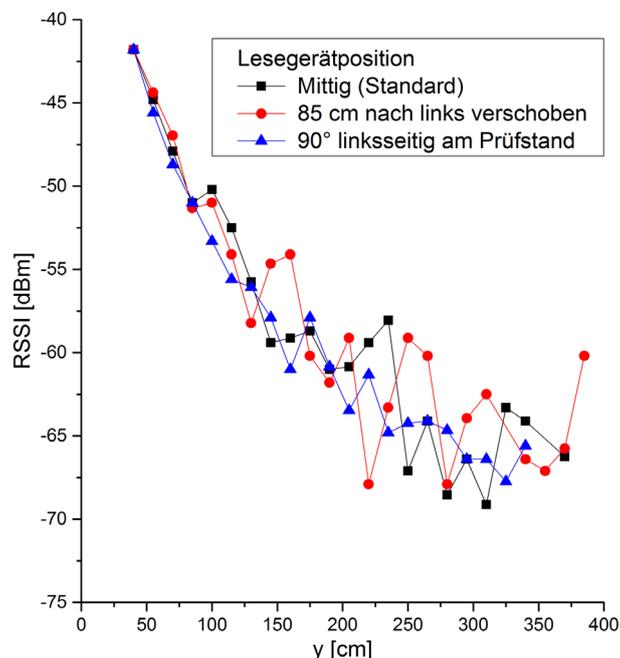


Abbildung 4: RSSI [dBm] einer Transponderohrmarke des Transpondertyps A auf der Linie $x = 0$ bei veränderter Position der Lesegerätantenne zum Prüfstand

Bei den im Folgenden dargestellten gemischten Modellen traten einige Ergebnisse übereinstimmend auf. Zunächst war der Blockeffekt nie signifikant, was auf geringe Änderungen der Bedingungen während der Versuche hindeutet. Des Weiteren waren in jedem Modell der Transpondertyp und, sofern diese variiert wurde, die Ausrichtung der Ohrmarken sowie deren Wechselwirkung mit dem Transpondertyp signifikant. Auf diese Effekte wird im Zuge der Beschreibung der Ergebnisse des Typenvergleichs von Transponderohrmarken eingegangen. In den folgenden Versuchen werden nur die für die jeweilige Versuchsfragestellung entscheidenden Effekte diskutiert.

Wiederholbarkeit

Bei der Bildung des gemischten Modells für diesen Versuch war der Einfluss der Wiederholung auf die Ergebnisse nicht signifikant (Tabelle 4).

Tabelle 4: Typ-III-Test der festen Effekte für das gemischte Modell des Versuches zur Ermittlung der Wiederholbarkeit

Effekt	Zähler Freiheitsgrade	Nenner Freiheitsgrade	F-Statistik	P
Transpondertyp (T)	2	38,8	694,04	< 0,0001

Die Mittelwertdifferenz zwischen Wiederholung 1 und Wiederholung 2 betrug für die Gesamtmittelwerte des RSSI lediglich 0,03 dBm. In der Bland-Altman-Analyse entspricht dieser Wert dem Mittelwert der Differenzen beider Wiederholungen (Abbildung 5). Der Wiederholbarkeitskoeffizient lag bei 0,18 dBm. Lediglich eine Differenz wies einen höheren Betrag auf (0,42 dBm). An den einzelnen Koordinaten lagen die Unterschiede zwischen den zwei Wiederholungen im Mittel über alle Transpondertypen und Exemplare bei 0,19 dBm mit einer Standardabweichung von 0,24 dBm. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass durch die Mittelwertbildung aus (in den meisten Fällen) fünf Einzelmessungen an jeder Koordinate die Streuung dieser Mittelwerte um den Faktor geringer

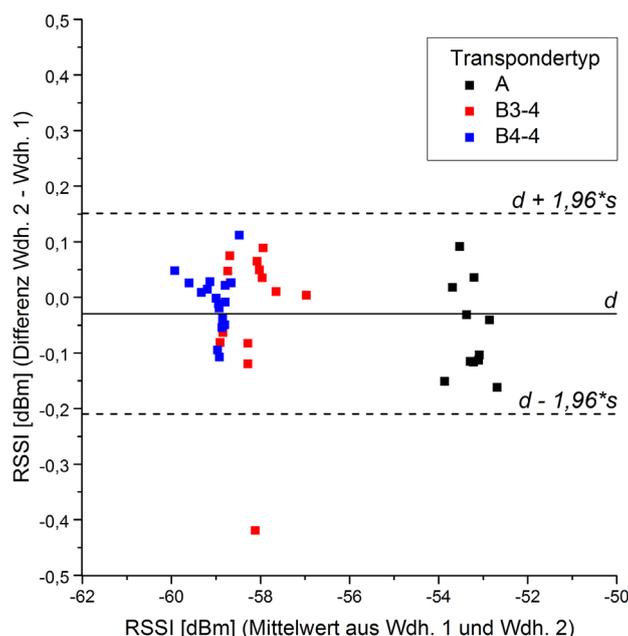


Abbildung 5: Bland-Altman-Diagramm des Versuches zur Ermittlung der Wiederholbarkeit; d = Mittelwert, s = Standardabweichung der Differenzen zwischen Wiederholung 2 und 1

ist als die der Einzelmessungen. Die Streuung der Einzelmessungen liegt somit bei ca. 0,42 dBm. Der Hersteller des Lesegerätes gibt für betriebsinterne Prüfungen der Geräte eine Genauigkeit von ca. 1,0 dBm als Richtwert an (MAASS 2015). Die hier dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Messgenauigkeit des verwendeten Lesegerätes deutlich besser war, da die Messwerte zusätzlich weitere Ungenauigkeiten des Versuchsaufbaus beinhalten. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass mit dem gewählten Versuchsaufbau und dem verwendeten Lesegerät eine gute Wiederholbarkeit der Messungen am Prüfstand gegeben ist. Im Hinblick auf die angewandte Methodik ist jedoch der geringe Umfang an getesteten Typen von Transponderohrmarken kritisch zu betrachten. Es ist nicht auszuschließen, dass die Wiederholbarkeit der Ergebnisse bei Transpondertypen mit sehr niedriger Signalstärke (< 70 dBm) schlechter ist als bei den hier getesteten, da sich die Messwerte in diesem Fall nahe der unteren Grenze des Messbereiches des Lesegerätes befinden (MAASS 2015). Aus diesem Grund sollte die Wiederholbarkeit beim Test solcher Transponder erneut bestimmt werden. Dies ist ebenso erforderlich, wenn ein anderes Lesegerät für die Messungen verwendet wird.

Einfluss der Ohrmarkenhalterung

Im gemischten Modell des Versuches zur Bestimmung des Einflusses der Ohrmarkenhalterung waren neben den signifikanten Effekten Transpondertyp, Transponderausrichtung und deren Wechselwirkung auch der Effekt der Ohrmarkenhalterung und die Wechselwirkung von Transpondertyp und Ohrmarkenhalterung sowie die Wechselwirkung von Ohrmarkenhalterung und Transponderausrichtung signifikant (Tabelle 5). Eine genauere Betrachtung des Einflusses der Ohrmarkenhalterung auf die Ohrmarken mit den beiden Transpondertypen A und B3-4 zeigte, dass nur bei Typ A ein signifikanter Einfluss der Halterung auf den gemessenen RSSI vorlag (Abbildung 6). Der Mittelwert aller Messungen der Ohrmarken mit Transpondertyp A mit Ohrmarkenhalterung aus Polystyrolschaum war 0,6 dBm höher als der Mittelwert ohne Ohrmarkenhalterung. Bei Typ B3-4 waren die Mittelwerte identisch. Die Wechselwirkung von Ohrmarkenhalterung und Ausrichtung der Ohrmarken zeigte einen signifikanten Unterschied von 0,5 dBm zwischen Referenzvariante und Polystyrolhalterung in Ausrichtung 5. In Ausrichtung 3 gab es hingegen keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Varianten. Eine Ursache für den unterschiedlichen Einfluss der Ohrmarkenhalterung auf die Signalstärke der beiden Transpondertypen konnte nicht gefunden werden. Es muss allerdings betont

Tabelle 5: Typ-III-Test der festen Effekte für das gemischte Modell des Versuches zur Ermittlung des Einflusses der Ohrmarkenhalterung

Effekt	Zähler Freiheitsgrade	Nenner Freiheitsgrade	F-Statistik	P
Block (B)	5	4,34	2,66	0,1708
Transpondertyp (T)	1	5	203,95	< 0,0001
Ausrichtung (A)	1	18,8	707,58	< 0,0001
Ohrmarkenhalterung (OH)	1	18,8	8,47	0,0090
T · A	1	18,8	562,06	< 0,0001
T · OH	1	18,8	9,57	0,0060
A · OH	1	17,8	11,31	0,0035

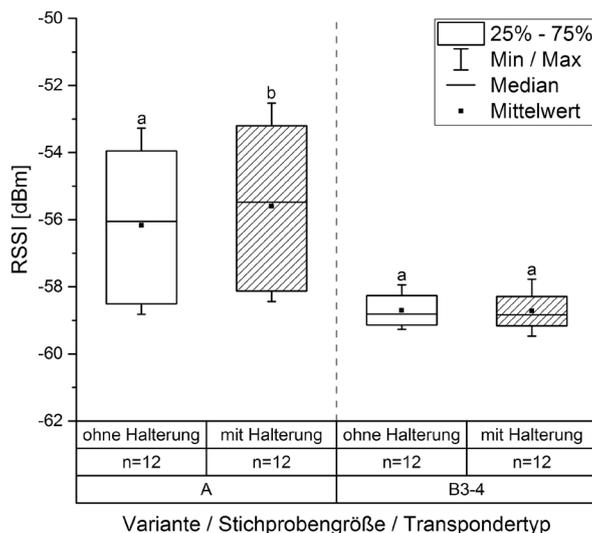


Abbildung 6: RSSI [dBm] der Ohrmarken mit Transpondertyp A und B3-4 mit und ohne Halterung aus Polystyrolschaum; n = Stichprobengröße; a, b: unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Transpondertyps zeigen signifikante Unterschiede an (P < 0,05)

werden, dass die Differenz für Transpondertyp A im Verhältnis zum Mittelwert sehr niedrig ist (ca. 1 % des Mittelwertes). Trotzdem werden im Folgenden mögliche Ursachen diskutiert.

Die Verschiebung der Resonanzfrequenz des Transpondertyps A durch die umgebende Halterung kann aus zwei Gründen nahezu ausgeschlossen werden. Erstens ist solch ein starker Einfluss des Polystyrolschaums aufgrund seiner niedrigen Permittivität nicht plausibel (WEBSTER und EREN 2014). Zweitens wäre in diesem Fall auch eine ähnliche Beeinflussung des Transpondertyps B3-4 zu erwarten, da beide Transpondertypen auf den Einsatz an Materialien mit hoher Permittivität abgestimmt sind (RAO et al. 2005, UPM RFID 2011). Aus demselben Grund ist auch ein negativer Einfluss der Holzstäbchen bei der „freien“ Anbringung der Ohrmarken auszuschließen. Eine unterschiedliche Beeinflussung beider Transpondertypen durch minimal unterschiedliche Ausrichtung und Position der Ohrmarken bei der „freien“ Fixierungsvariante ist theoretisch denkbar. Sollte dies zutreffen, würde der Effekt jedoch bei konstanter Verwendung der Halterungen aus Polystyrol nicht mehr auftreten. Auch in Bezug auf den unterschiedlichen Einfluss der Transponderhalterung in Ausrichtung 5 und 3 ist dieser Effekt die wahrscheinlichste Ursache, entfällt bei alleiniger Nutzung der Polystyrolblöcke aber ebenso. Die Verwendung von nur zwei unterschiedlichen Transpondertypen für den vorliegenden Test ist als unkritisch zu bewerten, da die getroffenen Schlussfolgerungen genauso für jegliche anderen UHF-Transpondertypen gelten.

Zusammenfassend lässt sich somit schlussfolgern, dass eine Verwendung der Ohrmarkenhalterung aus Polystyrolschaum die Messungen an diesem Prüfstand nur geringfügig beeinflusst. Des Weiteren ist die Nutzung dieses Materials aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit von Position und Ausrichtung der Ohrmarken einer Fixierung durch Holzstäbchen vorzuziehen. Sowohl in den hier beschriebenen Tests der Ohrmarken ohne weitere elektromagnetische Beeinflussung als auch beispielsweise bei Versuchen zur Bestimmung des Einflusses von Ohrgehörte auf die Transponder kann der Polystyrolschaum somit als Material für die Halterungen der Ohrmarken und der Gewebematerialien verwendet werden.

Einfluss der Reihenfolge der Koordinaten

Ein Einfluss der Reihenfolge der Koordinaten auf die Versuchsergebnisse konnte nicht festgestellt werden. Der entsprechende Effekt im gemischten Modell war nicht signifikant (Tabelle 6). Nur der Transpondertyp hatte einen signifikanten Effekt auf die Ergebnisse. Die Übereinstimmung der Messwerte bei allen fünf Varianten der Reihenfolge kann mit dem Abschalten des Feldes des Lesegerätes zwischen den Messungen an zwei Koordinaten erklärt werden. Sendet das Lesegerät dauerhaft, so zeigt sich bei passiven UHF-Transpondern der Effekt, dass der Transponder bei einer Bewegung aus dem Feld heraus eine größere Lesereichweite erzielt als bei der Bewegung in das Lesefeld hinein (Hysterese). Dies ist dadurch zu erklären, dass die nötige Energiemenge für die Aktivierung des Transponderchips höher ist als die Abschaltsschwelle. Wird das Lesegerät zwischen zwei Koordinaten abgeschaltet, verschwindet dieser Effekt, da der Transponder Energie nicht dauerhaft speichern kann (DERBEK et al. 2007, KNOP 2014). Die Verwendung von nur zwei unterschiedlichen Transpondertypen für den vorliegenden Test ist als unkritisch zu bewerten, da der beschriebene Effekt für jeden UHF-Transponder mit handelsüblichem Chip gilt. Indem die Koordinaten bei allen weiteren Versuchen geordnet abgefahren werden, kann Zeit eingespart werden, da die Fahrwege im Vergleich zu einer randomisierten Koordinatenabfolge kürzer sind.

Tabelle 6: Typ-III-Test der festen Effekte für das gemischte Modell des Versuches zur Ermittlung des Einflusses der Reihenfolge der Koordinaten

Effekt	Zähler Freiheitsgrade	Nenner Freiheitsgrade	F-Statistik	P
Transpondertyp (T)	1	10	487,02	< 0,0001

Vergleich verschiedener Typen von UHF-Transponderohrmarken

In diesem Versuch wurde die Anwendung des Prüfstandes zum Vergleich von Ohrmarken mit verschiedenen Transpondertypen in unterschiedlichen Ausrichtungen getestet. Im gemischten Modell zeigten sich in der Auswertung signifikante Einflüsse von Transpondertyp, Ausrichtung zum Lesegerät und deren Wechselwirkung (Tabelle 7). Die genauere Betrachtung der Unterschiede zwischen den Transpondertypen mit Mittelwertvergleichen ergab eine Einteilung der Typen in drei Gruppen (Abbildung 7). Den höchsten durchschnittlichen RSSI erreichten die Ohrmarken mit den Typen A und ZT. Zwischen diesen beiden Typen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Dies spricht dafür, dass der Einbau des Transpondertyps Web[®] in eine luftgefüllte Tasche in der Ohrmarke (ZT) im Hinblick auf die Signalstärke keinen Unterschied zum Aufkleben auf die Ohrmarke

Tabelle 7: Typ-III-Test der festen Effekte für das gemischte Modell des Versuches zum Vergleich verschiedener Typen von UHF-Transponderohrmarken

Effekt	Zähler Freiheitsgrade	Nenner Freiheitsgrade	F-Statistik	P
Block (B)	5	18,7	0,32	0,8976
Transpondertyp (T)	5	17,7	407,06	< 0,0001
Ausrichtung (A)	2	35	159,09	< 0,0001
T · A	10	18,2	128,43	< 0,0001

(A) verursacht. Ebenso ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Typen B3-4 und B4-4. Diese beiden Transpondertypen sind hinsichtlich Größe und Aufbau identisch und unterscheiden sich nur durch eine minimale Anpassung, durch die der Typ B4-4 eine etwas höhere Resonanzfrequenz aufweist als der Typ B3-4. Dieser Unterschied zeigte keinen Einfluss auf die Messungen an den Ohrmarken mit diesen beiden Typen. Es muss in Praxisversuchen ermittelt werden, ob die Transponder bei der Anwendung am Tier eine unterschiedliche Leistung zeigen. Die dritte Gruppe in diesem Versuch bilden die Ohrmarken mit den Transpondertypen C1 und C1-4. Der durchschnittliche RSSI lag bei diesen beiden Typen nochmals deutlich niedriger. Der Unterschied dieser für Schweineohrmarken konstruierten Transponder zu den übrigen Transpondern in Rinderohrmarkengröße lässt sich mit ihrer kleineren Antennenfläche erklären, da sie ansonsten in der Gestaltung den Transpondertypen B3-4 und B4-4 ähnlich sind. Je größer ein UHF-Transponder ist, desto höher ist in der Regel auch seine Reichweite (CATARINUCCI et al. 2012). Auffallend ist weiterhin eine geringere Streuung der Messungen bei Typ C1-4 im Vergleich zu Typ C1. Dies erklärt sich vermutlich mit der besseren Verarbeitung dieser Ohrmarken. Aufgrund der verwendeten Basisfolie aus Polyimid ließ sich Typ C1-4 gleichmäßiger in die Ohrmarke eingießen als die reine Aluminiumantenne des Transpondertyps C1. Möglicherweise führte dies zu einer geringeren Streuung zwischen den Exemplaren dieses Typs, was auch Vorteile bei einer Praxisanwendung brächte.

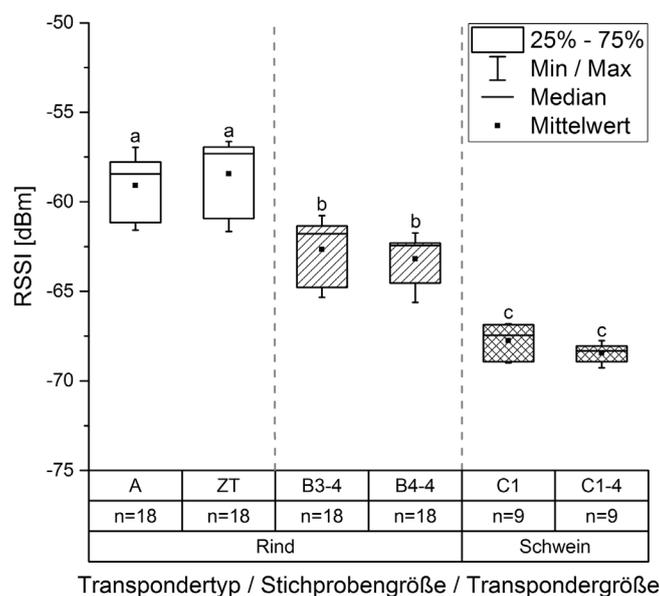


Abbildung 7: RSSI [dBm] der getesteten Ohrmarkentypen; n: Stichprobengröße; a, b: unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede an ($P < 0,05$)

Abbildung 8 zeigt im Rahmen des Entwicklungsprozesses erstellte Simulationen der Richtcharakteristiken der Ohrmarken mit den drei grundlegenden Transpondertypen aus den oben erläuterten Gruppen (deister electronic GmbH, Barsinghausen). In Rot sind die Ausrichtungen dargestellt, in denen der jeweilige Transpondertyp in Kombination mit der Kunststoffohrmarke eine hohe Signalstärke und Reichweite aufweist. Grüne und blaue Bereiche deuten hingegen auf eine schlechtere Leistung hin. Für jeden Transpondertyp wurde ein Mittelwertvergleich zur Bestimmung von Unterschieden der drei getesteten Ausrichtungen zum Lesegerät durchgeführt (Tabelle 8). Bis auf eine Ausnahme

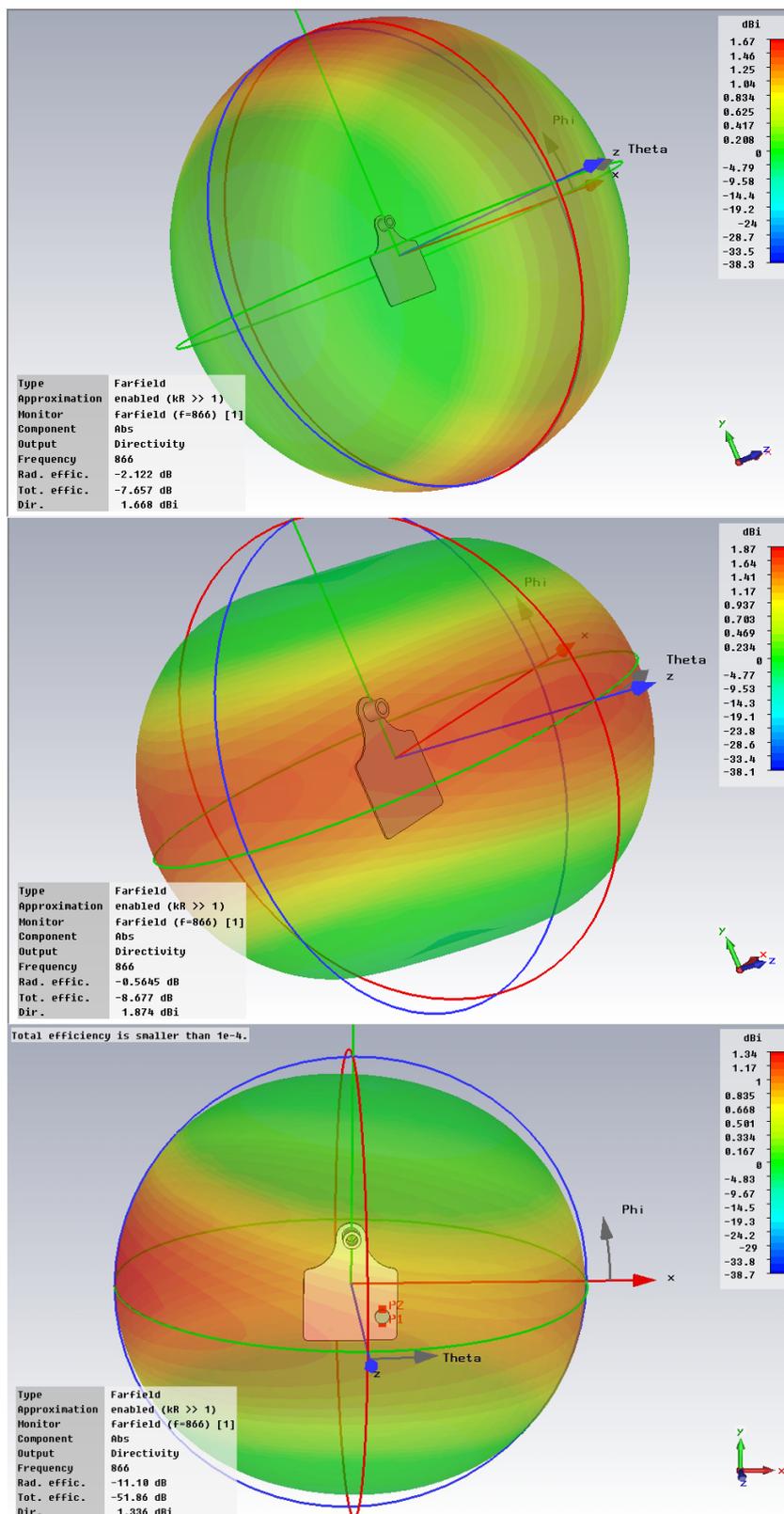


Abbildung 8: Simulierte Richtcharakteristiken der Ohrmarken mit drei grundlegenden Transpondertypen (von oben nach unten: Typ A und ZT; Typ B3-4 und B4-4; Typ C1 und C1-4) (Simulationen und Abbildungen: deister electronic GmbH, CST Microwave Studio)

konnte durch die Messungen am statischen Prüfstand bei jedem Transpondertyp die Ausrichtung mit der jeweils höchsten und niedrigsten Signalstärke in Übereinstimmung mit den Simulationen ermittelt werden. Nur bei Typ ZT war Ausrichtung 5 besser als Ausrichtung 2, was sich nicht mit der Simulation erklären lässt. Ausrichtung 2 sollte nach der Simulation hier eine etwas höhere Signalstärke erreichen. Möglicherweise wurde dieser Unterschied durch den Einfluss der Lufttasche in der Ohrmarke verursacht, die in den Simulationen nicht berücksichtigt worden war. Bei den Typen B3-4 und B4-4 wurden Ausrichtung 1 und Ausrichtung 5 sowohl in der Simulation als auch im Versuch gleichwertig als beste Ausrichtung ermittelt. Bei den Typen C1 und C1-4 wurden zwar am Prüfstand keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen diesen beiden Ausrichtungen festgestellt, jedoch zeigten die Messwerte analog zur Simulation eine leicht höhere Signalstärke in Ausrichtung 1. In den Messungen stimmte die Ausrichtung mit der niedrigsten Signalstärke bei allen Transpondertypen mit der simulierten Richtcharakteristik überein. Bei den Typen A und ZT war dies Ausrichtung 1, bei allen anderen Ausrichtung 2.

Tabelle 8: RSSI [dBm] der Ohrmarken nach Transpondertyp und Ausrichtung zur Antenne des Lesegerätes am Prüfstand, n: Stichprobengröße; a, b: unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede an ($P < 0,05$)

Transpondertyp	Ausrichtung 1	Ausrichtung 2	Ausrichtung 5	n
A	-61,3 ^c	-57,7 ^a	-58,3 ^b	6
ZT	-61,1 ^b	-57,4 ^a	-56,8 ^a	6
B3-4	-61,8 ^a	-65,0 ^b	-61,3 ^a	6
B4-4	-62,3 ^a	-64,9 ^b	-62,3 ^a	6
C1	-66,9 ^a	-69,0 ^b	-67,5 ^a	3
C1-4	-67,9 ^a	-69,1 ^b	-68,2 ^a	3

Der Versuch zum Vergleich verschiedener Typen von UHF-Transponderohrmarken ergab, dass sowohl ein Vergleich zwischen Ohrmarken mit verschiedenen Transpondertypen als auch der Vergleich von einzelnen Ausrichtungen innerhalb der Typen und zwischen den Typen möglich ist. Eine Beurteilung der Transpondertypen am Prüfstand vor dem Test am Tier ist hilfreich, um eine Vorauswahl zu treffen und Ergebnisse der Praxistests zu interpretieren (HAMMER et al. 2013). Die Messung der Signalstärke und der Reichweite in einzelnen Ausrichtungen wird auch von anderen Autoren als wichtig angesehen. CATARINUCCI et al. (2012) und JUNGK (2010) betonen, dass ein Transponder für einen vielseitigen Einsatz und eine sichere Erkennung möglichst in allen Ausrichtungen eine gleichmäßige Lesbarkeit aufweisen sollte. Diese Anforderung erfüllte keiner der hier getesteten Transpondertypen. Dies ist dadurch begründet, dass Restriktionen hinsichtlich Form und Größe der Transponder in der geplanten Anwendung häufig zu Antennenstrukturen mit einer deutlichen Sensitivität in Bezug auf ihre Orientierung zum Lesegerät führen. Meist werden für UHF-Transponder gefaltete Dipolantennen oder Loop-Antennen verwendet, die beide stark gerichtet sind (DERBEK et al. 2007, NG et al. 2005). Allerdings hat dies auch Vorteile, da die Reichweite der gerichteten Transponder in ihrer Hauptstrahlrichtung größer ist als dies bei einer gleichförmigen Richtcharakteristik bei gleicher Transpondergröße der Fall wäre. Da nicht alle Richtcharakteristiken symmetrisch sind, sollten ergänzend zu den drei hier getesteten Ausrichtungen mindestens noch die drei jeweils entgegengesetzten Ausrichtungen in zukünftige Vergleiche von Transponderohrmarken aufgenommen werden, um beim Vergleich der Typen die gesamte Richtcharakteristik zu berücksichtigen.

Schlussfolgerungen

Ziel der Untersuchungen war die Feststellung der Eignung des vorgestellten Prüfstandes zum Vergleich verschiedener Typen von UHF-Transponderohrmarken sowohl im Gesamten als auch in einzelnen Ausrichtungen. Die grundlegende Anforderung an den Prüfstand, die Messung des Erkennungsbereiches und der Signalstärke von UHF-Transponderohrmarken, konnte erfüllt werden. Die durchgeführten methodischen Versuche erwiesen eine gute Wiederholbarkeit der Messungen bei konstanter Position des Lesegerätes. Die Ohrmarkenhalterung aus Polystyrolschaum hatte keinen relevanten Einfluss auf die RSSI-Messungen. Auch die Reihenfolge der Koordinaten, an denen Messungen erfolgten, beeinflusste die Messergebnisse nicht. Die Möglichkeit, mit dem Prüfstand Transpondertypen hinsichtlich ihres RSSI in unterschiedlichen Ausrichtungen zu vergleichen, wurde durch den abschließenden Vergleich von UHF-Ohrmarken mit verschiedenen Typen nachgewiesen. Ein Abgleich der simulierten Richtcharakteristiken der getesteten Transpondertypen mit den Messergebnissen ergab bei den verschiedenen Ausrichtungen der Transpondertypen eine sehr gute Übereinstimmung. Zusammenfassend konnten somit alle gestellten Anforderungen an den Prüfstand erfüllt werden. Es muss jedoch betont werden, dass mit dieser Methode keine absoluten Messungen von Transponder- bzw. Ohrmarkeneigenschaften möglich sind und die Messergebnisse durch Änderungen in der Versuchsumgebung beeinflusst werden können. Dem muss durch eine geeignete statistische Versuchsplanung Rechnung getragen werden. Auch gelten die getroffenen Schlussfolgerungen in Bezug auf die Wiederholbarkeit der Ergebnisse nur für das verwendete Lesegerät. Bei einem anderen Gerät müssen die relevanten Parameter erneut ermittelt werden. Ebenso muss die Wiederholbarkeit beim Test von Transpondertypen mit sehr niedrigem RSSI gesondert überprüft werden.

Im nächsten Schritt sollen vergleichende Untersuchungen verschiedener speziell auf den Einsatz bei Rindern und Schweinen optimierter Funktionsmuster von UHF-Transponderohrmarken an diesem Prüfstand durchgeführt werden. Des Weiteren soll der Einfluss von Ohrgewebe und Gewebeimitaten in der Nähe der Ohrmarken auf die Signalstärke und das Erkennungsfeld gemessen werden. Außerdem sind Versuche geplant, die eine Eingrenzung des Lesebereiches bei verschiedenen Positionen und Ausrichtungen der Lesegerätantenne zum Ziel haben. Hierdurch sollen vor der Anwendung im Stall wesentliche Parameter für eine Überwachung von Stallzonen, wie z. B. Fress- oder Ruhebereich, für das Gesundheitsmonitoring von Tieren ermittelt werden. Abschließend soll die Machbarkeit eines Systems zur Lokalisation von UHF-Transponderohrmarken untersucht werden. Auch eine zusätzliche Nutzung des vorgestellten Prüfstandes für die Vermessung von Erkennungsfeldern von LF- und HF-Transpondern ist sehr gut möglich, da der Prüfstand übliche Lesereichweiten dieser Systeme abdeckt und in diesen Frequenzbereichen Umgebungseinflüsse einfacher als im UHF-Bereich minimiert werden können.

Literatur

- Adrion, F.; Hammer, N.; Rößler, B.; Jezierny, D.; Gallmann, E. (2014): An automated static test bench for UHF-RFID ear tags. In: International Conference of Agricultural Engineering 2014, European Society of Agricultural Engineers (EurAgEng), July 6–10, Zurich
- Bland, J. M.; Altman, D. G. (1986): Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet* 327(8476), pp. 307–310; DOI: 10.1016/S0140-6736(86)90837-8
- Burose, F.; Anliker, T.; Herd, D.; Jungbluth, T.; Zähler, M. (2010): Lesbarkeit von elektronischen Ohrmarken in stationären Antennensystemen. *Landtechnik* 65(6), S. 446–449; DOI: 10.15150/lt.2010.545

- Bütfering, L. (2011): Elektronische Tieridentifizierung in der Schweinehaltung. Erfahrungen aus dem Landwirtschaftszentrum Haus Düsse. In: Elektronische Tieridentifizierung in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, KTBL Schrift 490, KTBL, Darmstadt, S. 86–92
- Catarinucci, L.; Colella, R.; Tarricone, L. (2012): Design, development, and performance evaluation of a compact and long-range passive UHF RFID tag. *Microwave and Optical Technology Letters* 54(5), pp. 1335–39; DOI: 10.1002/mop.26777
- Choi, J. S.; Lee, H.; Elmasri, R.; Engels, D. W. (2009): Localization Systems Using Passive UHF RFID. In: NCM '09, the 5th International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management, IEEE, 25.–27.08.2009, Seoul, pp. 1727–1732
- Derbek, V.; Steger, C.; Weiss, R.; Preishuber-Pflügl, J.; Pistauer, M. (2007): A UHF RFID measurement and evaluation test system. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 124(11), pp. 384–390; DOI: 10.1007/s00502-007-0482-z
- Detlefsen, J.; Siart, U. (2009): Grundlagen der Hochfrequenztechnik. München, Oldenbourg, 3. Aufl.
- European EPC Competence Center (EECC) (2011): The UHF Tag Performance Survey. Neuss, Germany
- Finkenzeller, K. (2012): RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. München, Carl Hanser Verlag, 6. Aufl.
- Forschungsinformationssystem Agrar/Ernährung (2012): Verbundprojekt: Elektronische Tierkennzeichnungssysteme auf Basis ultrahochfrequenter Radio-Frequenz-Identifikation – Teilprojekt 1. http://www.fisaonline.de/index.php?lang=dt&act=projects&view=details&p_id=6131, Zugriff am 9.1.2015
- Fujimoto, K.; Morishita, H. (2013): Modern Small Antennas. Cambridge, Cambridge University Press
- Goldsmith, A. (2005): Wireless communications. Cambridge, New York, Cambridge University Press
- GS1 EPCglobal Inc. (2013): EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID. Specification for RFID Air Interface Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 2.0.0 Ratified, Brussels, Belgium. http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/uhf2_2_0_0_standard_20131101.pdf, Zugriff am 31.1.2015
- Hammer, N.; Adrion, F.; Gallmann, E.; Jungbluth, T. (2013): Untersuchungen zur Lesbarkeit von UHF-Transponderohrmarken auf einem Prüfstand und in der Praxis. In: 11. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, KTBL, 24.–26.09.2013, Vechta, S. 348–333
- Hammer, N.; Adrion, F.; Jezierny, D.; Gallmann, E.; Jungbluth, T. (2015): Methodology of a dynamic test bench to test ultra-high-frequency transponder ear tags in motion. *Computers and Electronics in Agriculture* 113, pp. 81–92; DOI: 10.1016/j.compag.2015.02.003
- Hessel, E. F.; Van den Weghe, H. F. A. (2013): Simultaneous monitoring of feeding behaviour by means of high frequent RFID in group housed fattening pigs. In: 6th European Conference on Precision Livestock Farming, KU Leuven, September 10–12, Leuven, Belgium, pp. 812–818
- Hogewerf, P. H.; Dirx, N.; Verheijen, R.; Ipema, B. (2013): The use of Ultra High Frequency tags for fattening pig identification. In: 6th European Conference on Precision Livestock Farming, KU Leuven, September 10–12, Leuven, Belgium, pp. 440–448
- Jungk, A. (2010): Kennzahlbasierte Bestimmung der Leistungsfähigkeit von RFID-Komponenten an Flurförderzeugen. Dissertation (PhD), Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Garbsen
- Kern, C. J. (2007): Anwendung von RFID-Systemen. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 2. Aufl.
- Knop, W. (2014): Hysterese der Lesereichweite von RFID-Transpondern. Schriftliche Mitteilung. Hochschule Hannover, Fakultät I – Elektro- und Informationstechnik, Hannover
- Leong, K. S.; Ng, M. L.; Cole, P. H. (2007): Investigation on the deployment of HF and UHF RFID tag in livestock identification. In: 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE Antennas and Propagation Society, June 10–15, 2007, Honolulu, pp. 2773–2776
- Lorenzo, J.; Girbau, D.; Lázaro, A.; Villarino, R. (2011): Read range reduction in UHF RFID due to antenna detuning and gain penalty. *Microwave and Optical Technology Letters* 53(1), pp. 144–148; DOI: 10.1002/mop.25625

- Maaß, N. (2015): Messgenauigkeit des RSSI bei Lesegeräten der Firma deister electronic GmbH. Schriftliche Mitteilung. deister electronic GmbH, Barsinghausen
- Mainetti, L.; Mele, F.; Patrono, L.; Simone, F.; Stefanizzi, M. L.; Vergallo, R. (2013): An RFID-Based Tracing and Tracking System for the Fresh Vegetables Supply Chain. *International Journal of Antennas and Propagation* 2013(2), pp. 1–15; DOI: 10.1155/2013/531364
- Maselyne, J.; Saeys, W.; De Ketelaere, B.; Mertens, K.; Vangeyte, J.; Hessel, E. F.; Millet, S.; van Nuffel, A. (2014): Validation of a High Frequency Radio Frequency Identification (HF RFID) system for registering feeding patterns of growing-finishing pigs. *Computers and Electronics in Agriculture* 102, pp. 10–18; DOI: 10.1016/j.compag.2013.12.015
- Namoodiri, V.; DeSilva, M.; Deegala, K.; Ramamoorthy, S. (2012): An extensive study of slotted Aloha-based RFID anti-collision protocols. *Computer Communications* 35(16), pp. 1955–1966; DOI: 10.1016/j.comcom.2012.05.015
- Ng, M. L.; Leong, K. S.; Hall, D. M.; Cole, P. H. (2005): A Small Passive UHF RFID Tag for Livestock Identification. In: *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, IEEE, 08.–12.08.2005, Beijing, pp. 67–70
- Rao, K. V. S.; Nikitin, P. V.; Lam, S. F. (2005): Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 53(12), pp. 3870–3876; DOI: 10.1109/TAP.2005.859919
- Ruiz-Garcia, L.; Lunadei, L. (2011): The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture* 79(1), pp. 42–50; DOI: 10.1016/j.compag.2011.08.010
- Schwalm, A.; Georg, H. (2011): Elektronische Tierkennzeichnung – ISO-Standards und aktuelle Situation in Deutschland. *Landbauforschung – vTi Agriculture and Forestry Research* 61(4), S. 283–288
- Stekeler, T.; Herd, D.; Rößler, B.; Jungbluth, T. (2011): Einsatz eines UHF-Transponders zur Simultanerfassung von Mastschweinen. *Landtechnik* 66(2), S. 132–135; DOI: 10.15150/lt.2011.367
- Trevarthen, A.; Michael, K. (2008): The RFID-Enabled Dairy Farm: Towards Total Farm Management. In: *International Conference on Mobile Business*, IEEE Computer Society, 07.–08.07.2008, Barcelona, pp. 241–250
- Umstatter, C.; Bhatti, S. A.; Michie, C.; Thomson, S. (2014): Overview of Ultra-High Frequency technology in livestock farming and stakeholder opinions. In: *International Conference of Agricultural Engineering 2014*, European Society of Agricultural Engineers (EurAgEng), July 6–10, Zurich
- UPM RFID (2011): UPM Web. Datasheet. <http://www.rfidtags.com/documents/product/Web-M4-RFID-Tag-Datasheet.pdf>, Zugriff am 31.1.2015
- Webster, J. G.; Eren, H. (2014): *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*. Two-volume set. Boca Raton, CRC Press, 2nd ed.

Autoren

M. Sc. Felix Adrion und **M. Sc. Nora Hammer** sind wissenschaftliche Mitarbeiter, **M. Sc. Benjamin Rößler** und **Dr. Dagmar Jezierny** waren technische Mitarbeiter, **M. Sc. Anita Kapun** ist technische Mitarbeiterin und **apl. Prof. Dr. Eva Gallmann** ist akademische Oberrätin am Fachgebiet Verfahrenstechnik der Tierhaltungssysteme (Leiter: Prof. Dr. Thomas Jungbluth) des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim, 70593 Stuttgart. E-Mail: felix.adrion@uni-hohenheim.de

Förderhinweis

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung, FKZ 28154T0910.

Danksagung

Unser Dank gilt Herrn Prof. Dr. Hans-Peter Piepho (Universität Hohenheim) für die Beratung bei der statistischen Auswertung. Des Weiteren danken die Autoren den Projektpartnern deister electronic GmbH, agrident GmbH, Caisley International GmbH und Phenobyte GmbH & Co. KG und ihren Mitarbeitern, sowie Herrn Dr. Werner Knop (Hochschule Hannover) für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Erstellung des Manuskripts.