

# Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, Institut für Distributions- und Handelslogistik (IDH) des VVL e. V.

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16951 N/1**

***Entwicklung eines Verfahrens zur Detektion von Effizienzmängeln bei UHF-Transpondern  
mittels Analyse der spektralen Antwortcharakteristik***

(Bewilligungszeitraum: 01.02.2011 - 31.07.2012)

der AiF-Forschungsvereinigung

Verkehrsbetriebswirtschaft

Dortmund, 31.10.2012

Ort, Datum

Dipl.-Logist. Sebastian Lanfer

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes bestand in der Entwicklung eines Verfahrens zur Detektion von Effizienzmängeln bei UHF-Transpondern mittels Analyse der spektralen Antwortcharakteristik im Nahfeld.

Hierzu wurde die Basis des Projektes bestimmt. In einem ersten Schritt wurden die zu betrachtenden Anwendungsfelder der UHF-RFID-Technologie definiert und die dort üblicherweise eingesetzten RFID-Transponder ermittelt. Diese Basis bildete die Grundlage für die Definition der relevanten Effizienzparameter sowie die Ermittlung geeigneter Testverfahren zur Erreichung des Projektziels. In diesem Zusammenhang wurde Wert auf die Verwendung normierter Testverfahren gelegt, um die Versuchsreihen reproduzierbar zu gestalten.

Grundlage für die folgenden Versuchsreihen war die softwaretechnische Simulation der elektromagnetischen Eigenschaften der ausgewählten RFID-Transponder. Die definierten Testverfahren wurden anschließend im Fernfeld unter günstigen und moderaten Bedingungen angewendet. Um einen Vergleich zwischen Fern- und Nahfeld durchführen zu können, wurden die Testverfahren anschließend analog im Nahfeld angewandt.

Auf Basis der Versuche wurde im Anschluss durch statistische Auswertung der Ergebnisse ein Übertragungsalgorithmus entwickelt und verifiziert. Der entwickelte Algorithmus umfasst dabei die Aufnahme der rückgestreuten Leistung im Nahfeld und die Berücksichtigung der Antennengewinnfaktoren im Nahfeld sowie für den späteren Einsatz im Fernfeld, die prinzipiell auftretende Freiraumdämpfung, einen weiteren Korrekturfaktor für die Entfernung sowie Korrekturfaktoren für den verwendeten Transponder und den Applikationsuntergrund.

Der entwickelte Algorithmus bietet eine simple und kostengünstige Möglichkeit, die Leistung im Fernfeld vorherzusagen, Effizienzmängel bereits vor der Applikation zu erkennen und ggf. Transponder auszusortieren. Über bereits bestehende Formeln lassen sich zudem Rückschlüsse auf die zu erwartende Lesereichweite ziehen. Aufgrund verschiedener Restriktionen ist die Genauigkeit hierbei allerdings unter Umständen begrenzt. Dies trifft insbesondere auf die zur Verwendung des Algorithmus' notwendigen Basismessungen zur Bestimmung der Korrekturfaktoren zu. Aufgrund der nicht öffentlich zugänglichen Daten der Transponder ist es allerdings nicht möglich, einen alternativen Weg zu beschreiten. Des Weiteren ist es fraglich, ob der Transponder stets optimal zur Antenne ausgerichtet ist. Eine gewisse Ungenauigkeit ist somit stets gegeben und kaum berechenbar. Diese Ungenauigkeit trifft allerdings auch auf andere am Markt verfügbare Verfahren zu.

**„Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht“**

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis .....	IV
Formelverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
1 Einleitung und Problemstellung .....	1
2 Gegenüberstellung der Ergebnisse zu den Zielen des Antrags .....	2
3 Ermittlung der Effizienzparameter, Bestimmung der Einsatzbedingungen sowie Transponderauswahl (Arbeitspaket 1) .....	4
3.1 Ermittlung der Anwendungsfelder .....	4
3.2 Identifikation gängiger UHF-Transponder.....	6
3.3 Definition der Effizienzparameter .....	7
3.4 Definition von Testverfahren .....	8
4 Softwaretechnische Simulation (Arbeitspaket 2) .....	11
4.1 Simulationsumgebung.....	11
4.2 Vorgehensweise zur Modellierung.....	11
4.3 Simulationsparameter .....	12
4.3.1 Umgebungsparameter .....	12
4.3.2 Transponderparameter .....	12
4.4 Ergebnisse.....	12
5 Laborversuche im Fernfeld unter günstigen Bedingungen (Arbeitspaket 3) .....	13
5.1 Versuchsaufbau .....	13
5.2 Ergebnisse.....	15
5.2.1 Threshold-Sweep.....	15
5.2.2 Backscatter-Analyse .....	17
6 Laborversuche im Fernfeld unter moderaten Bedingungen (Arbeitspaket 4) .....	18
6.1 Versuchsaufbau .....	18
6.2 Ergebnisse.....	19
6.2.1 Threshold-Sweep.....	20
6.2.2 Backscatter-Analyse .....	21
6.2.3 Lesereichweite.....	23
6.2.3.1.1 Transpondertyp 1 .....	23

6.2.3.1.2	Transpondertyp 2 .....	24
6.2.3.1.3	Transpondertyp 3 .....	24
6.2.3.1.4	Transpondertyp 4 .....	24
6.2.3.1.5	Transpondertyp 5 .....	25
6.2.3.1.6	Transpondertyp 6 .....	25
6.2.4	Pulklesefähigkeit.....	25
7	Laborversuche im Nahfeld (Arbeitspaket 5).....	26
7.1	Versuchsaufbau .....	26
7.2	Ergebnisse.....	28
7.2.1	Günstige Bedingungen .....	29
7.2.1.1	Threshold-Sweep.....	29
7.2.1.2	Backscatter-Analyse .....	30
7.2.2	Moderate Bedingungen.....	31
7.2.2.1	Threshold-Sweep.....	31
7.2.2.2	Backscatter-Analyse .....	32
8	Entwicklung eines Übertragungsalgorithmus (Arbeitspaket 6).....	33
8.1	Statistische Auswertung .....	33
8.2	Definition des Algorithmus' .....	34
9	Verifizierung des Übertragungsalgorithmus (Arbeitspaket 7).....	35
9.1	Vorgehensweise .....	35
9.2	Ergebnisse.....	35
10	Zusammenfassung und Fazit .....	37
11	Veröffentlichungen und Vorträge .....	38
11.1	Veröffentlichungen.....	38
11.2	Vorträge.....	38
12	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der Ergebnisse für KMU .....	39
	Literaturverzeichnis.....	40

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der Anbringungsorte .....	5
Abbildung 2:	Versuchsaufbau Transponderleistung nach ISO/IEC TR 18047-6 [20].....	9
Abbildung 3:	Beispielgraph Threshold-Sweep .....	10
Abbildung 4:	Beispielgraph Backscatter-Analyse.....	10
Abbildung 5:	Übersicht der Simulationsergebnisse zur Antwortcharakteristik.....	13
Abbildung 6:	Versuchsaufbau Fernfeld (Sicht von links).....	14
Abbildung 7:	Versuchsaufbau Fernfeld (Sicht von oben).....	14
Abbildung 8:	Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter günstigen Bedingungen; Kategorisierung nach Transpondertypen.....	15
Abbildung 9:	Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter günstigen Bedingungen; Kategorisierung nach Applikationen .....	16
Abbildung 10:	Rückgestrahlte Leistung nach Transpondertypen bei 27dBm Ausgangsleistung; günstige Bedingungen .....	17
Abbildung 11:	Rückgestrahlte Leistung nach Applikationen bei 27 dbm Ausgangsleistung; günstige Bedingungen .....	18
Abbildung 12:	Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter moderaten Bedingungen; Kategorisierung nach Transpondertypen.....	20
Abbildung 13:	Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter moderaten Bedingungen; Kategorisierung nach Applikationen .....	21
Abbildung 14:	Rückgestrahlte Leistung nach Transpondertypen bei 27dBm Ausgangsleistung; moderate Bedingungen .....	22
Abbildung 15:	Rückgestrahlte Leistung nach Applikationen bei 27dBm Ausgangsleistung; moderate Bedingungen .....	23
Abbildung 16:	Versuchsaufbau Nahfeld (Sicht von vorne) .....	27
Abbildung 17:	Versuchsaufbau Fernfeld (Sicht von oben).....	28
Abbildung 18:	Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter günstigen Bedingungen im Nahfeld.....	29
Abbildung 19:	Rückgestrahlte Leistung nach Transpondertypen bei 27dBm Ausgangsleistung; günstige Bedingungen; Nahfeld .....	30
Abbildung 20:	Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter moderaten Bedingungen im Nahfeld .....	31
Abbildung 21:	Rückgestrahlte Leistung nach Transpondertypen bei 27dBm Ausgangsleistung; moderate Bedingungen; Nahfeld .....	32

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 1 .....	2
Tabelle 2:	Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 2 .....	2
Tabelle 3:	Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 3 .....	2
Tabelle 4:	Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 4 .....	3
Tabelle 5:	Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 5 .....	3
Tabelle 6:	Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 6 .....	3
Tabelle 7:	Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 7 .....	3
Tabelle 8:	Produktauswahl anhand des Anwendungsbereichs .....	4
Tabelle 9:	Auswahl gängiger UHF-RFID-Transponder .....	6
Tabelle 10:	Simulationsparameter des Transponders .....	12
Tabelle 11:	Leistungsschwache Transponder im Fernfeld unter günstigen Bedingungen .....	16
Tabelle 12:	Leistungsschwache Transponder im Fernfeld unter moderaten Bedingungen .....	21
Tabelle 13:	Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 1 .....	24
Tabelle 14:	Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 2 .....	24
Tabelle 15:	Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 3 .....	24
Tabelle 16:	Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 4 .....	25
Tabelle 17:	Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 5 .....	25
Tabelle 18:	Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 6 .....	25
Tabelle 19:	Beispiel Ergebnis Pulklesefähigkeit; Transpondertyp 6; großvolumige Dichtung in Kartonage; 2 x 5 Kartonagen; 18 dbm Ausgangsleistung .....	26
Tabelle 20:	Spezifikationen der Nahfeld-Antenne Kathrein ULORA[25] .....	27
Tabelle 21:	Leistungsschwache Transponder im Nahfeld unter günstigen Bedingungen .....	29
Tabelle 22:	Leistungsschwache Transponder im Nahfeld unter moderaten Bedingungen .....	31
Tabelle 23:	Transponder- und applikationsabhängige Korrekturfaktoren .....	34
Tabelle 24:	Angepasste transponder- und applikationsabhängige Korrekturfaktoren .....	36
Tabelle 25:	Technische und wirtschaftliche Erfolgsaussichten .....	39

## Formelverzeichnis

Formel 1:	Entwickelter Übertragungsalgorithmus zur Berechnung der rückgestreuten Leistung im Fernfeld.....	35
Formel 2:	Korrigierter Übertragungsalgorithmus zur Berechnung der rückgestreuten Leistung im Fernfeld.....	36

## Abkürzungsverzeichnis

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke"
CRR	Centre for Retail Research
dB	Dezibel
dBm	Dezibel Milliwatt
IC	Integrated Circuit (Integrierter Schaltkreis)
IDH	Institut für Distributions- und Handelslogistik
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MHz	Megahertz
mW	Milliwatt
pF	Picofarad
RFID	Radio Frequency Identification
UHF	Ultrahochfrequenz
VVL	Verein zur Förderung innovativer Verfahren in der Logistik



## 1 Einleitung und Problemstellung

Die Basis des bestimmungsgemäßen und fehlerfreien Einsatzes einer RFID-Anwendung sind einwandfrei und fehlerfrei funktionierende RFID-Hardwarekomponenten sowie deren Abstimmung auf die jeweilige Einsatzsituation. Neben dem RFID-Reader und der entsprechenden Antenne bestimmen insbesondere die Transponder die Leistung des RFID-Gesamtsystems. Üblicherweise werden die Transponder im Rahmen einer Vorauswahl zur RFID-Implementierung selektiert und in Labor- sowie Praxistests unter günstigen bzw. realitätsnahen Einsatzbedingungen geprüft. Die erwartete Robustheit, die Frequenz bzw. der Frequenzbereich und die Leseperformance gelten als die bestimmenden Leistungsmerkmale von RFID-Transpondern.

Eine solche Vorauswahl ist zwar wichtig, im realen Betrieb und dabei vor allem unter Vollast ist damit allerdings nicht abgesichert, wie sich das System verhält. Unternehmen, die sich für die Einführung dieser Technologie entschieden haben, sind nicht bereit, weniger als 100 % Leistung von der jeweiligen Applikation zu akzeptieren. Vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMU) mit begrenztem finanziellen Spielraum sind bei der Implementierung einer RFID-Applikation darauf angewiesen, dass der im Vorfeld ermittelte technische und wirtschaftliche Vorteil auch tatsächlich eintritt, da Fehlschläge im Extremfall zur Einstellung der Geschäftstätigkeit führen können.

An dieser Stelle setzt das hier durchgeführte Projekt an. Grundlegende Aufgabe des Projektes ist es, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem leistungsschwache UHF-Transponder erkannt und vor der Applikation beim Endkunden ausgeschleust werden können. Der Fokus liegt somit auf praxisnahen Untersuchungen passiver UHF-Transponder, da diese fertigungsbedingt häufig Schwankungen in ihrer Leistungscharakteristik aufweisen. Diese Leistungsschwankungen wurden im Rahmen des AiF/IGF-Projektes „Qualitätsnachweis für Transponder in RFID-Systemen“ (IGF-Nr. 15933 N) in umfangreichen Messungen bestätigt.

Da die Transponderverifizierung im Nahfeld mittels induktiver Kopplung durchgeführt wird, ist eine Erkennung bestehender Effizienzschwächen mithilfe eines simplen Auslesemechanismus nicht möglich. Es lassen sich keine Rückschlüsse ziehen, welche Lesereichweiten im Fernfeld zu erzielen sind bzw. bis zu welcher Lesereichweite noch ein sicheres Auslesen der Daten im Rahmen der RFID-Applikation möglich ist. Dies kann zurzeit lediglich in der Form geprüft werden, dass Transponder losgelöst von der Anwendung in einer separaten Testumgebung untersucht werden oder nach der Applikation auf das Packgut oder die Ladeinheit zur Kontrolle ausgelesen werden. Die Verfahren sind allerdings nicht geeignet, die Qualitätssicherung von Transpondern bei Endkunden im laufenden Betrieb zu gewährleisten. Hierzu ist es notwendig, dass das Testsystem in den Materialfluss integriert ist. Der Nachteil der verfügbaren Testsysteme aus diesem Bereich ist, dass die Untersuchung erst nach Anbringung des Transponders am Identifikationsobjekt stattfindet. Dies hat zur Folge, dass der Materialfluss bei einem leistungsschwachen Transponder unterbrochen werden muss. Des Weiteren muss ein neuer Transponder manuell appliziert werden bzw. das Identifikationsobjekt nach der manuellen Entfernung des schwachen Transponders wieder in den Materialfluss vor dem Etikettendrucker eingeschleust werden. Es ist offensichtlich, dass die ursprünglich beabsichtigten Verbesserungspotentiale nicht oder nur unvollständig realisiert werden können.

Das IGF-Vorhaben 16951 N/1 der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e. V. (GVB) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der

Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## 2 Gegenüberstellung der Ergebnisse zu den Zielen des Antrags

**Tabelle 1: Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 1**

Inhalt	AP1 Ermittlung der Effizienzparameter, Bestimmung der Einsatzbedingungen sowie Transponderauswahl
Ziele	Ziel des Arbeitspaketes war die Ermittlung der Grundlagen für die späteren Versuche. Es sollten insbesondere die Effizienzparameter festgelegt werden, die Anwendungsfelder der UHF-Technologie ermittelt und die gängigsten UHF-Transponder in diesen Anwendungsfeldern identifiziert werden.
Ergebnisse	Die Ziele des Arbeitspakets wurden vollständig erreicht.

**Tabelle 2: Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 2**

Inhalt	AP2 Softwaretechnische Ermittlung der Abstrahlcharakteristik, der Richtcharakteristik, sowie des Resonanzfrequenzspektrums durch 3D-Echtzeit-Simulation
Ziele	In Arbeitspaket 2 sollten die theoretisch ermittelbaren Leistungsparameter der Transponder bestimmt werden (Abstrahlcharakteristik, Richtcharakteristik und Resonanzfrequenzspektrum)
Ergebnisse	Aufgrund der fehlenden Kooperation der Transponderhersteller konnten nicht sämtliche benötigte Parameter realitätsnah simuliert werden. Dennoch konnten die Simulationen genutzt werden, um einen ersten Eindruck der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Transpondertypen zu erlangen. Es wurden die Richtcharakteristik sowie das Resonanzfrequenzspektrum bestimmt.

**Tabelle 3: Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 3**

Inhalt	AP3 Laborversuche zur Effizienzmessung von UHF-Transpondern (Fernfeld) in der Absorberkammer des LogIDLab®
Ziele	Inhalt dieses Arbeitspaketes war die Durchführung umfangreicher Versuche im LogIDLab® des IDH zur Definition des Fingerabdrucks eines jeden getesteten Transponders, der die elektromagnetischen Eigenschaften des Transponders unter günstigen Bedingungen beinhaltet.
Ergebnisse	Die Ziele des Arbeitspakets wurden vollständig erreicht.

**Tabelle 4: Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 4**

Inhalt	AP4 Laborversuche zur Effizienzmessung von UHF-Transpondern (Fernfeld) in moderater Umgebung
Ziele	Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Definition von Fingerabdrücken der getesteten Transponder, die die elektromagnetischen Eigenschaften eines jeden Transponders beinhaltet. In Variation zu AP3 wurden die Versuchsreihen in moderater Umgebung durchgeführt.
Ergebnisse	Die zuvor genannten Ziele wurden vollständig erreicht.

**Tabelle 5: Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 5**

Inhalt	AP5 Laborversuche zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik, der Richtcharakteristik sowie des Resonanzfrequenzspektrums (Nahfeld)
Ziele	Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Ergänzung der Fingerabdrücke um die Effizienz im Nahfeld. Hierzu sollten umfangreiche Nahfeldmessungen durchgeführt werden.
Ergebnisse	Die im Antrag genannten Ziele wurden vollständig erreicht.

**Tabelle 6: Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 6**

Inhalt	AP6 Entwicklung des Übertragungsalgorithmus' durch statistische Auswertung der Testergebnisse
Ziele	Das Ziel dieses Arbeitspakets war statistische Auswertung der in den Versuchsreihen erzielten Ergebnisse und die hierauf aufbauende Entwicklung eines Übertragungsalgorithmus', der es Anwendern ermöglicht, die Leistung eines Transponders im Fernfeld aus Messergebnissen, die im Nahfeld gewonnen wurden, vorherzusagen.
Ergebnisse	Die zuvor genannten Ziele wurden vollständig erreicht.

**Tabelle 7: Ziel-Ergebnis-Gegenüberstellung für das Arbeitspaket 7**

Inhalt	AP7 Verifizierung des Übertragungsalgorithmus durch stichprobenartige Vergleichsmessungen (Nahfeld – Fernfeld) sowie Durchführung praxisnaher Versuche
Ziele	Das Ziel des Arbeitspakets 7 war die Verifizierung des ermittelten Algorithmus und gegebenenfalls die Anpassung/Verbesserung auf Grundlage der durchgeführten stichprobenartigen Versuche mit dem Ergebnis eines nutzbaren Algorithmus'.
Ergebnisse	Der Algorithmus wurde im Laborbereich des IDH umfangreich verifiziert. Die in diesem Rahmen festgestellten Schwächen des Algorithmus' in Bezug auf Ungenauigkeiten bei Reichweiten jenseits der 50 cm wurden durch eine Anpassung des Algorithmus' beseitigt. Aufgrund des umfangreichen Optimierungsaufwandes konnten die vorgesehenen Evaluierungen bei zwei KMU aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden.

### 3 Ermittlung der Effizienzparameter, Bestimmung der Einsatzbedingungen sowie Transponderauswahl (Arbeitspaket 1)

In Arbeitspaket 1 wurden die Grundlagen für die weiteren Arbeitsschritte des Projektes definiert. Auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche wurden zunächst typische Anwendungsfelder der UHF-RFID-Technologie identifiziert. Hierauf aufbauend wurden die in diesem Zusammenhang gängigsten UHF-Transponder bestimmt. Um die Leistung der Transponder bestimmen zu können, wurden des Weiteren Effizienzparameter festgelegt, die für die Anwendungsfälle relevant sind. In einem letzten Arbeitsschritt wurden Testverfahren definiert, anhand derer die Effizienzparameter untersucht werden sollten.

#### 3.1 Ermittlung der Anwendungsfelder

Im Rahmen einer Literaturrecherche in nationalen und internationalen Fachzeitschriften sowie einer Internetrecherche wurden die folgenden gebräuchlichsten bzw. zukünftigen Anwendungsfelder der UHF-RFID-Technologie ermittelt:

- Diebstahlschutz im Einzelhandel (vgl. [1], [2], [3])
- Bestandsmanagement (vgl. [4], [5], [3])
- Behältermanagement (vgl. [6], [7], [8])
- Ersatzteilmanagement (vgl. [9], [10])

Die Anwendungsfelder bilden einen großen Teil der generellen Anwendungsmöglichkeiten der RFID-Technologie ab. Um diese weiter zu spezifizieren und in späteren Versuchsreihen exemplarisch überprüfen zu können, wurden zudem einzelne Produkte definiert, auf die die RFID-Transponder appliziert werden (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Produktauswahl anhand des Anwendungsbereichs

Produkt	Anwendungsbereich			
	Diebstahlschutz im Einzelhandel	Bestandsmanagement	Behältermanagement	Ersatzteilmanagement
neutraler Untergrund				
T-Shirt unverpackt <sup>1</sup>				
Batterien Typ AA <sup>1</sup>				
Schrauben (Verpackung aus Kartonage)				
Kunststoffbehälter mit Schrauben				
Großvolumige Dichtung in Kartonage				

<sup>1</sup> Auswahl analog zum Diebstahlbarometer des Centre for Retail Research (CRR)

Die Produkte sind als exemplarisch anzusehen, sollen allerdings eine möglichst realitätsnahe Übersicht geben. Das Verhalten von UHF-RFID-Transpondern auf ähnlichen Untergründen kann von

den entsprechenden exemplarischen Untergründen abgeleitet werden. Die Auswahl der Produkte erfolgte aufgrund von Angaben unterschiedlicher Quellen. Das globale Diebstahlbarometer des Centre for Retail Research (CRR) gibt eine Darstellung häufiger Ziele von Diebstählen im Einzelhandel (vgl. [11]). Nach Analyse des Diebstahlbarometers wurden zum einen ein Kleidungsstück (T-Shirt unverpackt) und zum anderen Batterien (Typ AA) ausgewählt. Beide Produkte zählen zu den häufig gestohlenen Artikeln. Im Industrieumfeld werden häufig kleinteilige metallische Gegenstände verwendet, die in Kartonagen oder Kunststoffbehältern verpackt sind. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes Schrauben in Kartonagen und Kunststoffbehältern untersucht. Ein weiterer Applikationsuntergrund wird von einer großvolumigen Dichtung in einer Kartonage gebildet. Bei Dichtungen handelt es sich um Verschleißteile, die im Rahmen eines Ersatzteilmanagements häufig ausgetauscht werden müssen. Es wurde zudem ein neutraler Untergrund definiert, der als Vergleichswert zu den anderen Untergründen gelten soll und aus Polystyrol besteht.

Es ist zu erwähnen, dass aufgrund der einfacheren Handhabung eine Vereinfachung der Applikationsobjekte „großvolumige Dichtung in Kartonage“ sowie „Kunststoffbehälter mit Schrauben“ durchgeführt wurde. Die Dichtung wurde durch Gummigranulat in einer Kartonage ersetzt, die Schrauben hingegen durch zusammengeknüllte Alufolie in einem Kunststoffbehälter. In den Versuchsreihen wird der metallische Inhalt somit simuliert. Die Unterschiede zur Verwendung tatsächlicher Schrauben sind allerdings als gering zu betrachten, da sich die Reflexionseigenschaften gleichen.

Neben den Produkten wurden zudem die Anbringungsorte der Transponder definiert. Es wurden stets die wahrscheinlichsten und laut Fachpresse und den Erfahrungen des IDH üblichen Anbringungsorte ausgewählt. Üblicherweise werden die Transponder in der Nähe oder an gleicher Stelle mit den bisher verwendeten Barcodes appliziert. Bei Textilien hingegen wird das Transponderinlay in das Pflegeetikett der Kleidung eingenäht. Die entsprechenden Orte sind auf den folgenden Abbildungen dargestellt. Durch Markierungen auf den Objekten wurde stets gewährleistet, dass sich der geometrische Transpondermittelpunkt an der gleichen Stelle befindet.

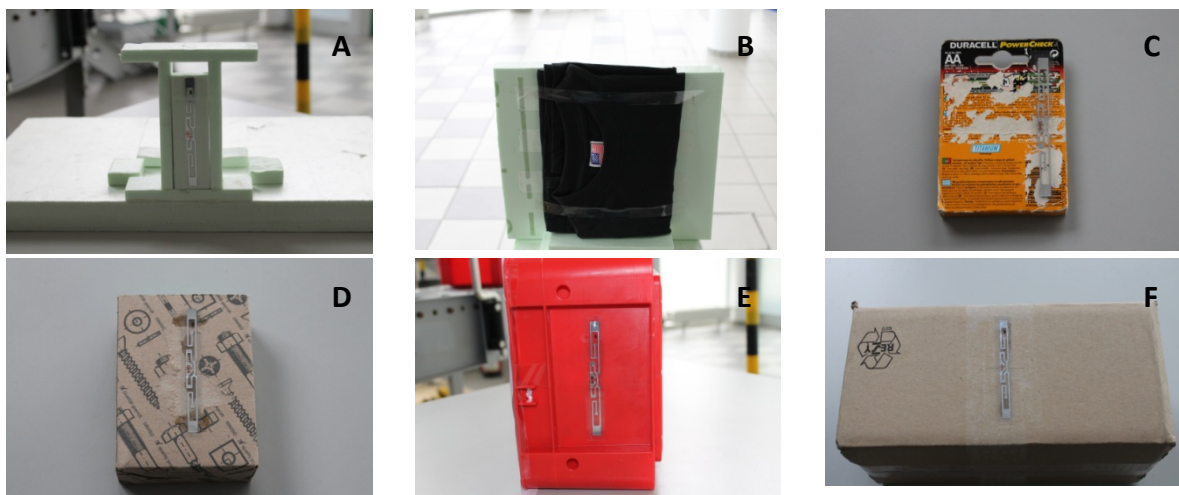








Abbildung 1: Darstellung der Anbringungsorte

- |   |                      |   |                                      |
|---|----------------------|---|--------------------------------------|
| A | neutraler Untergrund | D | Schrauben (Verpackung aus Kartonage) |
| B | T-Shirt unverpackt   | E | Kunststoffbehälter mit Schrauben     |
| C | Batterien Typ AA     | F | großvolumige Dichtung in Kartonage   |

### 3.2 Identifikation gängiger UHF-Transponder

Am Markt existiert eine Vielzahl von Transpondertypen, die sich u. a. in ihrer Bauform und ihrem Anwendungsbereich unterscheiden. Auf Basis der identifizierten Anwendungsfelder wurden im Anschluss die hier eingesetzten gängigen UHF-RFID-Inlays ermittelt. Es wurde in diesem Zusammenhang auf Literaturquellen sowie Expertengespräche innerhalb des PA zurückgegriffen, um die am meisten verbreiteten Transponder zu ermitteln. Auf Hinweise von Seiten der Hersteller wurde verzichtet, da hier ein gewisses Interesse zum Vertrieb sogenannter „slow mover“ unterstellt wird.

Tabelle 9: Auswahl gängiger UHF-RFID-Transponder

Antennenlayout	Anbieter	Bezeichnung	Chip
	Avery Dennison	AD-223	Impinj Monza 3
	UPM	Dogbone	NXP U-Code G2iL
	Alien	Squiggle	Alien Higgs-3
	Impinj	Thin Propeller	Impinj Monza 4
	Avery Dennison	AD-826	Impinj Monza 3
	UPM	Short Dipole	NXP U-Code G2iL

Aufgrund der Zielstellung, einen Algorithmus für die Implementierung in branchenüblichen Applikatoren, die vor allem bei den Endnutzern eingesetzt werden, zu entwickeln, wurde auf die Auswahl von In-Mould-Transpondern und speziellen On-Metal-Transpondern verzichtet. Diese Transpondertypen werden teilweise noch manuell appliziert. Für spätere Untersuchungen wäre die Berücksichtigung dieser Typen allerdings wünschenswert, da der monetäre Wert der Transponder deutlich über dem der Smart Labels angeordnet ist. Es wäre also zu überlegen, ob der Algorithmus auch bei der Einbringung des Transponders in die Umhüllung bei In-Mould- und On-Metal-Transpondern angewendet werden kann.

Bei der Auswahl der Transponder wurden sämtliche relevanten Werte dokumentiert. Es wurden lediglich sogenannte „wet inlays“ ausgewählt, da diese in großer Häufigkeit ihre Anwendung in Smart Label finden. „Wet inlays“ zeichnen sich dadurch aus, dass bereits produktionsseitig eine Seite des Transponders mit einer adhäsiven Fläche ausgestattet wurde. Des Weiteren wurde der verwendete Chipsatz dokumentiert.

Die Auswahl umfasst ausschließlich Universaltransponder, die in verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt werden können, da die Inlays während des Durchlaufs der gesamten Wertschöpfungskette vergleichbare Eigenschaften besitzen. Des Weiteren wurde darauf

geachtet, dass die Transponder günstig zu beschaffen sind, da die Kosten bei der Auswahl einen erheblichen Einfluss ausüben (vgl. [12]).

Die Transponderinlays wurden in Mengen von 1.000 Inlays pro Typ beschafft. Für die Versuchsreihen wurden aus diesen Inlays jeweils 30 Transponder zufällig ausgewählt. Dies entspricht der Vorgabe der ISO/IEC 18046-3 (vgl. [13]). Sämtliche Transponder wurden mittels eines handelsüblichen Handlesegerätes ausgelesen und mit einer eindeutigen Kennzeichnung beschrieben. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die ausgewählten Transponder grundlegend funktionsfähig sind. Dennoch wurde vor Versuchsbeginn keine Aussage über die spezifische Leistungsfähigkeit der Transponder getätigt, um im Rahmen der Versuchsreihen die Möglichkeit zu erhalten, ebenfalls leistungsschwache Transponder zu untersuchen.

Die ausgewählten Transponder werden im Verlauf der Ergebnisdarstellung dieser Veröffentlichung anonymisiert behandelt.

### **3.3 Definition der Effizienzparameter**

Zur Bestimmung der Effizienz eines RFID-Transponders muss zunächst definiert werden, in welchem Fall ein Transponder als ineffizient anzusehen ist.

Für die o. g. Anwendungsfelder wurden auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche (vgl. u. a. [14], [15], [16] und [17]) und einer ausführlichen Diskussion im Rahmen der ersten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses die im Folgenden dargestellten Effizienzparameter definiert:

- Lesereichweite
- Pulklesefähigkeit
- Abhängigkeit vom Applikationsuntergrund

Diese Aufzählung ist als nicht vollständig anzusehen, dennoch wurde im Rahmen des Projektbegleitenden Ausschusses zugestimmt, die Betrachtung zunächst auf diese Punkte zu konzentrieren, da diese üblicherweise im Fokus einer Diskussion über die RFID-Technologie stehen. Es wird darauf hingewiesen, dass sämtliche Parameter stark systemabhängig sind, d. h. sie sind nicht lediglich den Eigenschaften des Transponders zuzuordnen. Dennoch soll hier ein Versuch unternommen werden, die Parameter insbesondere readerunabhängig zu betrachten.

#### **Lesereichweite**

Die Lesereichweite stellt eine wesentliche Eigenschaft eines RFID-Transponders dar. Sie gibt an, bis zu welcher Distanz zwischen der Antenne des Lesegerätes und dem Transponder die Daten des Transponders sicher ausgelesen werden können (vgl. [18]). Da die Entscheidung für die UHF-Technologie im Allgemeinen aus Gründen der hohen Reichweiten getroffen wird, ist die Relevanz der Reichweite für die UHF-Technologie höher zu bewerten als für die anderen RFID-Technologien. Die Lesereichweite ist stark von den verwendeten RFID-Systemkomponenten abhängig. Dies trifft nicht nur auf die verwendeten Transponder zu, sondern in gleichem Maße auf die Empfindlichkeit des Readers.

#### **Pulklesefähigkeit**

In Bezug auf die Transpondereffizienz bei UHF-Transpondern ist zudem die Pulklesefähigkeit von Relevanz. Ein wichtiges Argument für die Einführung der UHF-Technologie ist die Möglichkeit des Auslesens einer Vielzahl von Transpondern innerhalb kurzer Zeit (vgl. [14]). Die Pulklesefähigkeit ist

von vielen Faktoren abhängig. Insbesondere das verwendete Lesegerät und dessen Algorithmus zum Umgang mit mehreren Transpondern im Lesefeld sind von Bedeutung bei der Beantwortung der Frage, ob ein Transponder unter anderen gelesen werden kann oder nicht.

### **Abhängigkeit vom Applikationsuntergrund**

UHF-Transponder verändern ihre Eigenschaften, wenn sie sich in der Umgebung anderer Materialien befinden (vgl. [14]). Die Auswirkungen dieser Materialien können sowohl positiver als auch negativer Natur sein. Dies hat zur Folge, dass Transponder im Allgemeinen verstimmt produziert werden, um in einem bestimmten Umfeld optimale Leistungen zu erbringen. Für die Vorhersage der Effizienz eines Transponders stellt sich hier demzufolge eine gewisse Herausforderung dar, da die Umgebung die Effizienz signifikant verändern kann.

### **3.4 Definition von Testverfahren**

Zur Messung der Leistungsfähigkeit von Transpondern existieren mehrere offizielle Richtlinienwerke und Normen, die bei der Definition von Testverfahren für die Versuchsreihen berücksichtigt wurden. Relevant für die Leistungsmessung von Transpondern ist insbesondere die ISO/IEC 18046-3 (vgl. [13]) mit dem Titel „Information technology – Radio frequency identification device performance test methods – Part 3: Test methods for tag performance“. Diese Norm beinhaltet vielfältige Testverfahren für die unterschiedlichen Transpondertypen. Für die in diesem Forschungsprojekt betrachteten UHF-Transponder (Transponder nach ISO/IEC 18000-6 [19]) werden Testverfahren zu folgenden Feldern definiert:

- „Identification magnetic field threshold
- Reading magnetic field threshold
- Writing magnetic field threshold
- Maximum operating magnetic field
- Survival magnetic field
- Load modulation
- Identification electromagnetic field threshold
- Reading electromagnetic field threshold
- Writing electromagnetic field threshold
- Sensitivity degradation
- Maximum operating electromagnetic field threshold
- Survival electromagnetic field
- Delta radar cross section
- Interference rejection
- Maximum identification fade rate
- Maximum write fade rate“

Im Rahmen dieser Norm wird für den generellen Versuchsaufbau auf die ebenfalls relevante Norm ISO/IEC TR 18047-6 verwiesen (Information technology – Radio frequency device conformance test methods – Part 6: Test methods for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz; vgl. [20]). Der Versuchsaufbau beinhaltet die Nutzung eines Lesegerätes sowie eines Spectrum Analyzers zur Ermittlung der Transpondereigenschaften (Versuchsaufbau siehe Abbildung 2). Aus Gründen der besseren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und der Verfügbarkeit einer kalibrierten Messeinrichtung wird der Versuchsaufbau abgeändert. Anstelle der zwei verwendeten Messsysteme



in ISO/IEC TR 18047-6 wird im Rahmen dieses Projekts das beschaffte Voyantic Messsystem verwendet und somit lediglich eine Antenne eingesetzt.

Aus diesem Grund werden die folgenden Testverfahren durch das eingesetzte Messsystem vorgegeben:

- Identification electromagnetic field threshold (ISO/IEC 18046-3 [13])
- Backscatter test (ISO/IEC TR 18047-6 [20])

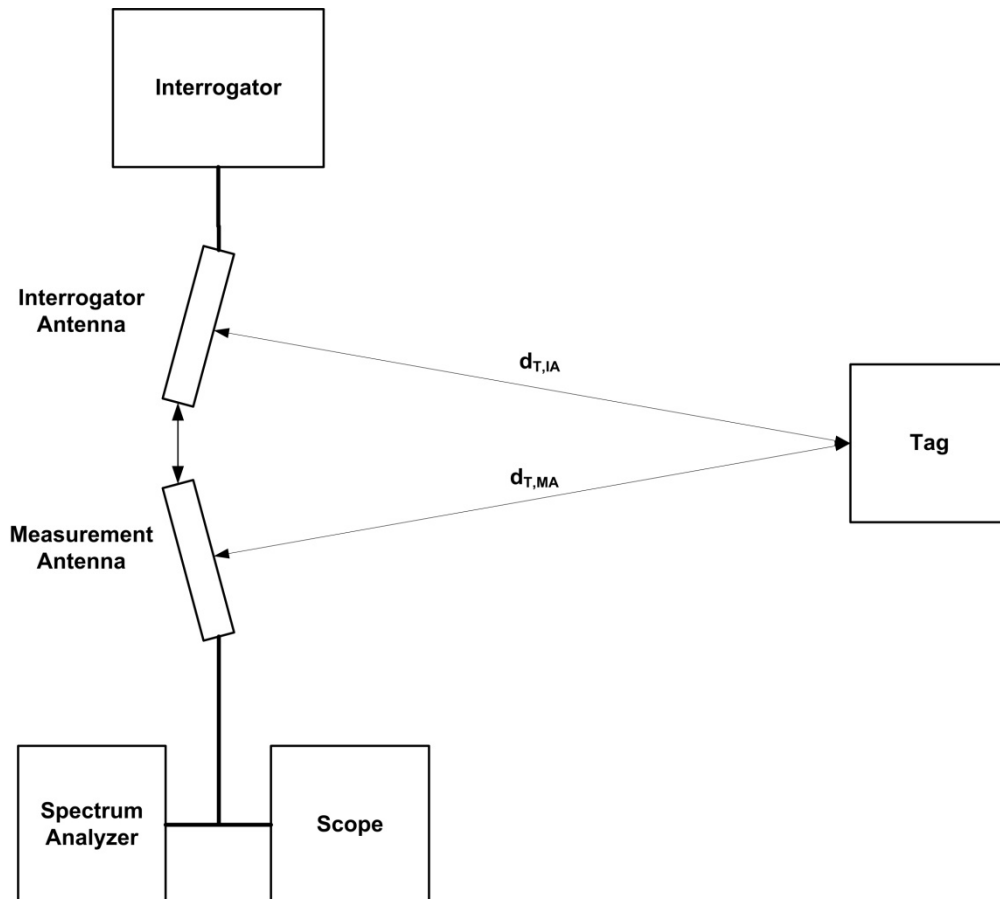


Abbildung 2: Versuchsaufbau Transponderleistung nach ISO/IEC TR 18047-6 [20]

Beide Verfahren sollen im Folgenden näher erläutert werden.

### Threshold-Sweep

Im Rahmen des Threshold-Sweeps wird die Ansprechempfindlichkeit eines RFID-Transponders überprüft. Hierzu wird der Transponder in einem zuvor definierten Frequenzbereich mit einer variablen Ausgangsleistung angesprochen und die Ausgangsleistung bestimmt, ab der der Transponder antwortet. Das Ergebnis dieser Analyse ist ein Graph, der darstellt, wie hoch die Ausgangsleistung sein muss, um einen Transponder bei einer bestimmten Frequenz zu erreichen (siehe Abbildung 3). Die Genauigkeit der Analyse ist über die Größe der Schritte innerhalb des Frequenzbereichs sowie über die Ausgangsleistung anpassbar.

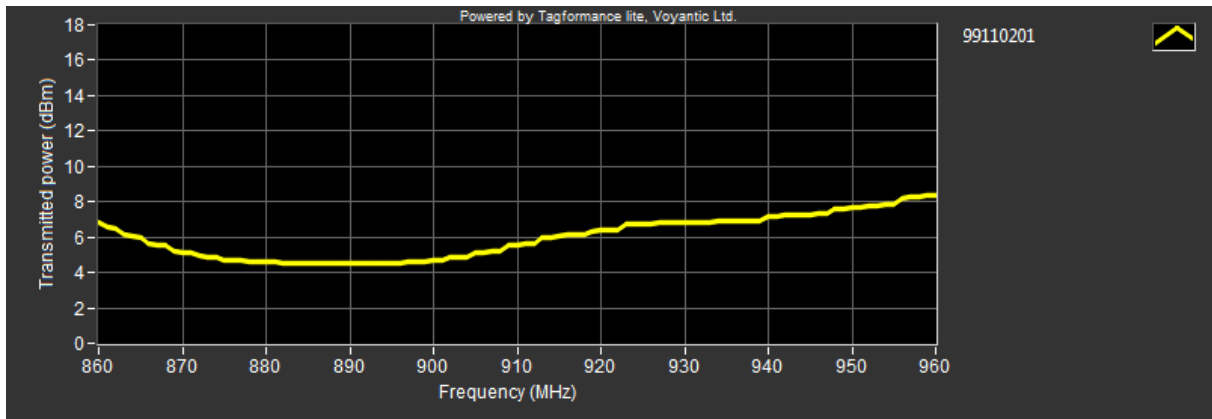


Abbildung 3: Beispielgraph Threshold-Sweep

### Rückstreueigenschaften

Die Analyse der Rückstreueigenschaften (Backscatter-Analyse) beinhaltet die Aufnahme des vom Transponder rückgestreuten Signals. Auch hier wird ein Query-Befehl an den Transponder gesendet. Es existieren hier zwei Möglichkeiten: Zum einen kann eine feste Frequenz festgelegt und die Ausgangsleistung innerhalb eines zur definierten Rahmens gesteigert werden, zum anderen ist es möglich, einen Frequenzbereich mit einer fest definierten Ausgangsleistung anzusprechen. Ergebnis der Backscatter-Analyse ist ein Graph, der die Antwortcharakteristik des Transponders bei definierten Ausgangsleistungen darstellt (siehe Abbildung 4).

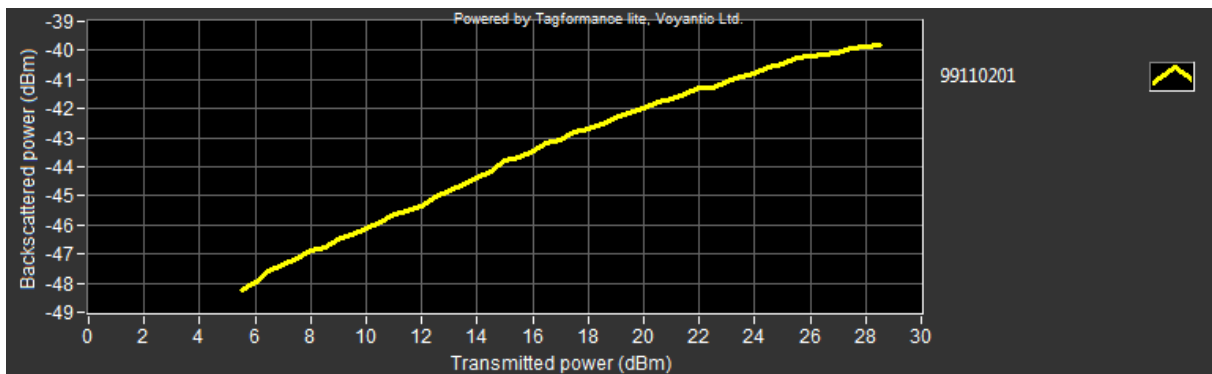


Abbildung 4: Beispielgraph Backscatter-Analyse

Da es sich bei diesen Testverfahren um Verfahren handelt, die der Ermittlung der elektromagnetischen Eigenschaften dienen, muss der Umfang der Versuchsreihen durch Verfahren ergänzt werden, die einen praktischen Nutzen aufweisen und die von den Endnutzern in der Praxis nachvollzogen werden können. Aus diesem Grund wurden die Versuchsreihen der VDI-Richtlinie 4472 Blatt 10 berücksichtigt (Anforderungen an Transpondersysteme zum Einsatz in der Supply Chain -Testverfahren zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Transpondersystemen (RFID) [21]). Die vorgenannte VDI-Richtlinie befindet sich seit 2008 im praktischen Einsatz und wird von sämtlichen Herstellern von RFID-Komponenten im deutschen Raum anerkannt. Sie gibt detaillierte Handlungsempfehlungen u. a. für die Ermittlung der Lesereichweite von RFID-Systemen und der Pulklesefähigkeit. Diese beiden Verfahren werden in die Versuchsauswahl des Projektes übernommen.

Somit wurden Testverfahren für die Ermittlung der elektromagnetischen Werte, die zur Berechnung des Algorithmus' benötigt werden, und für die eigentlichen Effizienzparameter definiert.

## **4 Softwaretechnische Simulation (Arbeitspaket 2)**

### **4.1 Simulationsumgebung**

Die Simulationen wurden in der im Rahmen des Projektes angeschafften Simulationssoftware „CST Studio Suite“ durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein Softwarepaket zur dreidimensionalen Simulation elektromagnetischer Felder. Im Speziellen wurden das „Microwave Studio“ und das „Design Studio“ eingesetzt. Das „Microwave Studio“ wurde zur grundsätzlichen Modellierung der Komponenten sowie zur Bestimmung der Materialien verwendet. Das „Design Studio“ diente zur Anpassung der Kapazitäten und Widerstände der eingesetzten RFID-ICs. Dem IDH stehen damit grundsätzlich zwei Simulationswege zur Verfügung: zum einen ein zeitbasiertes und zum anderen ein frequenzbasiertes Verfahren. Innerhalb des gewählten Frequenzbereiches von 800 MHz bis 1 GHz wird von CST die Nutzung des zeitbasierten Verfahrens empfohlen.

### **4.2 Vorgehensweise zur Modellierung**

Da es aufgrund fehlender Kooperation der Transponderhersteller nicht möglich war, technische Zeichnungen der Transponder zu erhalten, musste für die Modellierung ein Umweg gewählt werden. Daher wurden zunächst die Antennenlayouts der ausgewählten Transponderinlays mithilfe eines handelsüblichen Scanners eingescannt. Mithilfe von „AutoCAD“ wurden die eingescannten Modelle nachgezeichnet und für den Einsatz in der „CST Studio Suite“ optimiert. Die Optimierung beschränkte sich lediglich auf eine Glättung der Kanten der Antennenstruktur, um Schwächen des Scanvorgangs zu beseitigen. Im Anschluss an die Überarbeitung wurden die einzelnen Zeichnungen in die „CST Studio Suite“ importiert und im „Microwave Studio“ in den dreidimensionalen Raum überführt. Hierzu wurden der Antennenstruktur die jeweiligen Materialeigenschaften hinzugefügt und die Dicke des Materials festgelegt. Der nächste Schritt bestand in der Modellierung des Layers bzw. des Strukturuntergrundes. Die Materialien wurden anhand der Datenblätter der Transponderhersteller ermittelt. Daten, die von Seiten der Transponderhersteller nicht angegeben waren, wurden durch die Daten vergleichbarer Transponder ergänzt. Abgeschlossen wurde der Modellierungsvorgang mit der Integration eines Simulationsports. Dieser Port wurde anstelle des Transponderchips in das Modell eingefügt.

Die fehlende Kooperation der Transponderhersteller stellte in diesem Arbeitspaket das größte Problem dar, da es nahezu unmöglich war, die Transponder so zu modellieren, wie sie in der Realität produziert werden. Dies betrifft nicht nur die Abmessungen der Transponder, sondern insbesondere auch die verwendeten Materialien. Der Aufwand für die Modellierung war entsprechend hoch und hat die Zeit, die zunächst für die Simulation angedacht war, deutlich eingeschränkt. Es konnten somit lediglich die Richtcharakteristiken der Transponder sowie die Antwortcharakteristiken ermittelt werden.

## 4.3 Simulationsparameter

### 4.3.1 Umgebungsparameter

Die Umgebungsparameter umfassen in diesem Zusammenhang sämtliche Einstellmöglichkeiten der Simulationssoftware, die im Folgenden aufgeführt sind:

- Umgebungsmaterial
- Frequenzbereich
- Betrachtungsraum
- Genauigkeit

Das Umgebungsmaterial wurde im Rahmen der Simulationen realitätsnah als Luft definiert. Die Permittivität wurde entsprechend gewählt. Des Weiteren wurden sämtliche Simulationen in einem Frequenzbereich zwischen 0 und 1500 MHz durchlaufen. Die Genauigkeit wurde mit -50 db vorgeschrieben. Sämtliche weiteren Umgebungsparameter entsprachen den Standardeinstellungen der „CST Studio Suite“ für die Simulation von RFID-Komponenten.

### 4.3.2 Transponderparameter

Die Transponderparameter werden von denjenigen Eigenschaften gebildet, die von Seiten der Transponder- bzw. Chiphersteller vorgegeben sind. Hierbei handelt es sich zum einen um die Modelle der Transponder, aber auch um den Ort der Chipanbringung und die hiermit verbundenen elektromagnetischen Eigenschaften. Explizit sind hier die Impedanz und die Kapazität des Chips zu nennen, welche den Datenblättern der jeweiligen Transponder-ICs entnommen wurden. Die verwendeten Daten sind in der folgenden Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Simulationsparameter des Transponders

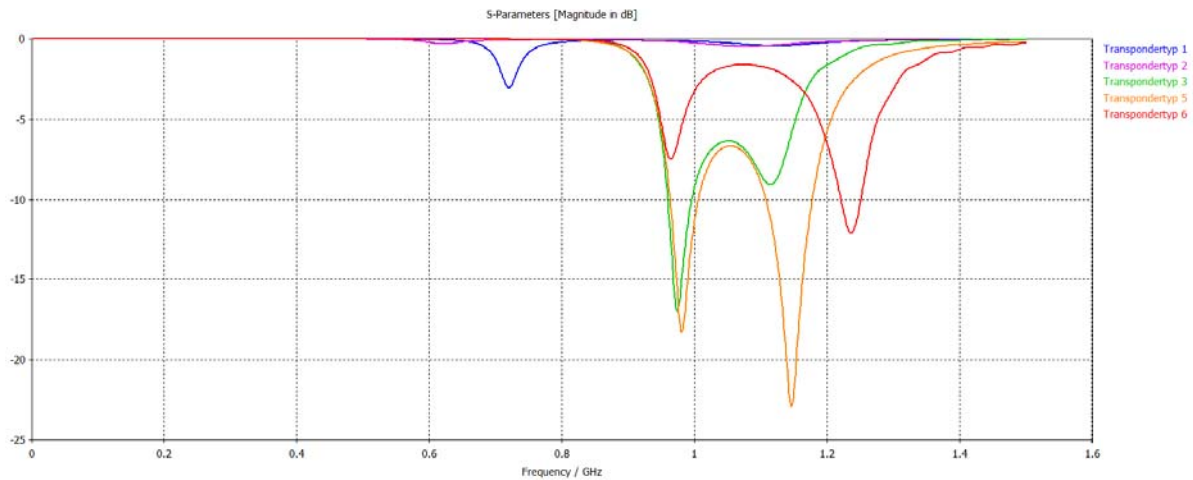
Transponder	Impedanz	Kapazität
Transpondertyp 1	5,5+74j [22]	2,48 pF [22]
Transpondertyp 2	25-237j [23]	0,77 pF [23]
Transpondertyp 3	32+228j [24]	0,775 pF [24]
Transpondertyp 4	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
Transpondertyp 5	25-237j [23]	0,77 pF [23]
Transpondertyp 6	32+228j [24]	0,775 pF [24]

Aufgrund der fehlenden Transponderparameter für den Transpondertyp 4 konnte dieser in den Simulationen nicht berücksichtigt werden.

## 4.4 Ergebnisse

Für die Simulationen wurde erwartet, dass sich für jeden Transponder ein eindeutiges Ansprechverhalten im Frequenzbereich zwischen 800 und 1.000 MHz ermitteln lässt. Die Ergebnisse weichen von dieser Annahme allerdings deutlich ab. Obwohl die Antennenstruktur des Herstellers bestmöglich übernommen wurde und die elektromagnetischen Daten der Chiphersteller verwendet wurden, befinden sich die Resonanzfrequenzen sämtlicher simulierter Transponder jenseits der erwarteten Grenzen (siehe Abbildung 5). Im engen Frequenzbereich um 868 MHz ist laut der Simulationsergebnisse lediglich wenig Leistung vorhanden. Es wird vermutet, dass der Einfluss der

parasitären Kapazitäten aufgrund des Bonding-Vorgangs zu diesem Effekt führt. Die detaillierten Auswirkungen des Bondings können im Rahmen dieses Projektes nicht dargestellt werden.



**Abbildung 5: Übersicht der Simulationsergebnisse zur Antwortcharakteristik**

Die Richtcharakteristiken der simulierten Transpondermodelle unterscheiden sich in ihrer Ausprägung lediglich durch ihren Antennengewinn in der Hauptachse. Der Grund für diese geringen Unterschiede liegt in der grundsätzlichen Konstruktion sämtlicher Transponder als Dipol.

Aufgrund der nicht erfolgten Kooperation mit den Transponderherstellern und der hiermit verbundenen Ungewissheit bzgl. der Richtigkeit der Simulationsergebnisse eignen sich die Ergebnisse nicht für die weitere Verwendung im Laufe des Projektes. Insbesondere im Rahmen der Algorithmus-Entwicklung, bei der es um äußerste Genauigkeit geht, sind nicht bekannte Fehlerparameter hinderlich.

## 5 Laborversuche im Fernfeld unter günstigen Bedingungen (Arbeitspaket 3)

### 5.1 Versuchsaufbau

Um die Leistung der Transponder im Fernfeld unter optimalen bzw. günstigen Umgebungsbedingungen zu untersuchen, wurde ein Versuchsaufbau in der Absorberkammer des Instituts für Distributions- und Handelslogistik (IDH) des VVL e.V. eingerichtet. Auf Basis der in Arbeitspaket 1 getroffenen Entscheidungen zu den Versuchsabläufen (s. Absatz 3.4 auf Seite 8) wurden sämtliche Transponder mithilfe des Voyantic Tagformance Lite Systems vermessen. Hierbei wurden die unter Abschnitt 3.1 ab Seite 4 vorgestellten Applikationsuntergründe variiert, so dass jeder einzelne Transponder mit jedem Applikationsuntergrund kombiniert wurde.

Das Voyantic Tagformance Lite Messsystem wurde entsprechend der Vorgaben des Herstellers installiert und konfiguriert. Der Abstand zwischen der verwendeten Antenne und dem jeweils getesteten Transponder-Inlay betrug stets 50 cm und die Ausrichtung entsprach einer optimalen Ausrichtung bezogen auf die Polarisierung der Antenne (linear vertikal). Die Transponder-Inlays wurden mithilfe eines rückstandslos entfernbaren Klebstoffes an dem jeweiligen Applikationsuntergrund befestigt, wobei der Applikationsort dem in der Praxis üblichen entspricht. Das Applikationsobjekt wurde auf einem Transpondertisch aus Polystyrol in Höhe der Antenne

platziert. Aufgrund der nahezu optimalen relativen Permittivität von Polystyrol ( $\epsilon_r=1,03$ ) hat der Transpondertisch einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisse der Versuchsreihen.

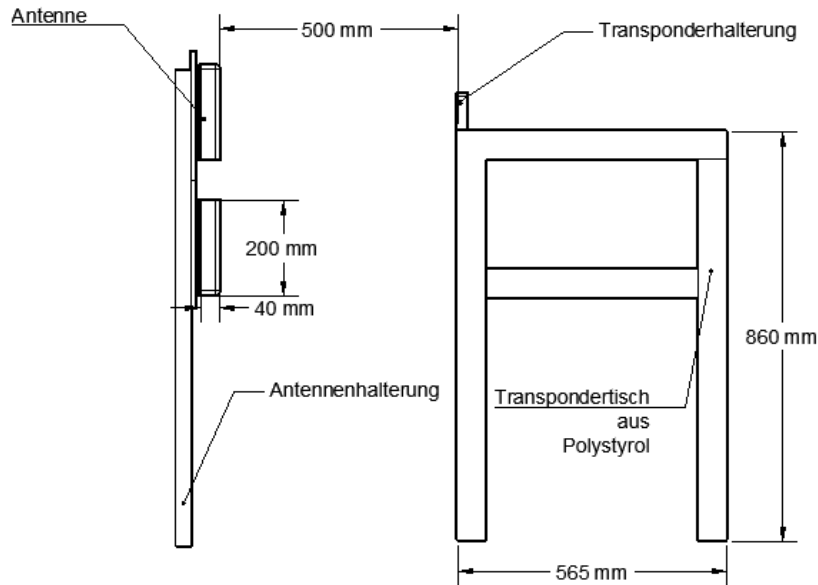


Abbildung 6: Versuchsaufbau Fernfeld (Sicht von links)

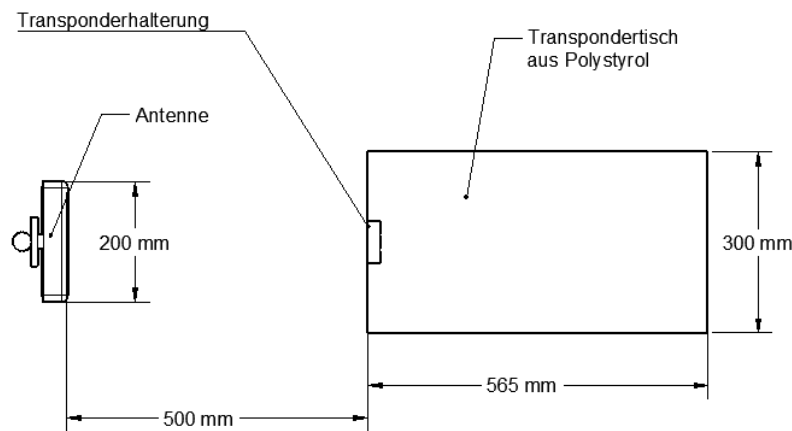


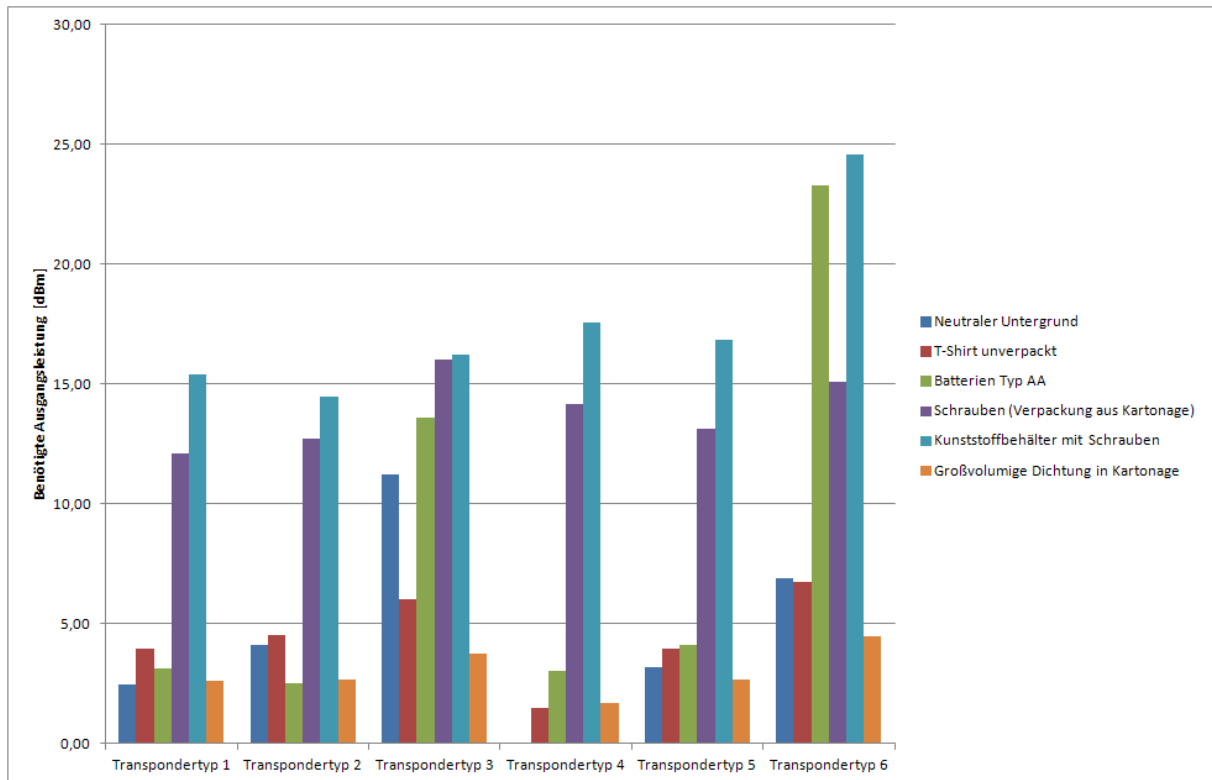
Abbildung 7: Versuchsaufbau Fernfeld (Sicht von oben)

Im Rahmen des Threshold-Sweeps wurde der Frequenzbereich zwischen 860 MHz und 960 MHz mithilfe des Query-Befehls in Schritten von 5 MHz abgetastet. Hierbei wurde die Ausgangsleistung in 0,1 dbm-Schritten verändert. Des Weiteren wurden die Rückstreuereigenschaften bei 868 MHz untersucht. Die Ausgangsleistung wurde in diesem Zusammenhang in Schritten von 0,5 dbm von 0 dbm auf 27 dbm erhöht.

Das Voyantic-Messsystem wurde außerhalb der Absorberkammer platziert. Sämtliche ermittelte Daten wurden in Excel-Dateien übertragen und anschließend statistisch ausgewertet.

## 5.2 Ergebnisse

### 5.2.1 Threshold-Sweep



**Abbildung 8: Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter günstigen Bedingungen; Kategorisierung nach Transpondertypen**

Die Versuchsreihen im Fernfeld unter günstigen Bedingungen haben zur weiteren Beschreibung der einzelnen untersuchten Transponder beigetragen. Auf Basis der Versuchsergebnisse lassen sich bereits aufgrund der zum Ansprechen der Transponder benötigten Ausgangsleistung leistungsschwache Transponder identifizieren. Für die Analyse der Ergebnisse wurde eine Toleranz von +1 dB in Bezug auf das arithmetische Mittel der Ausgangsleistung eines Transpondertyps definiert. Transponder, die mehr als 1 dB vom arithmetischen Mittel abweichen werden somit als ineffizient bezeichnet. Diese Transponder sind in Tabelle 11 dargestellt. Transponder, die am Messpunkt 865 MHz überhaupt nicht ansprechbar sind, wurden ebenfalls in die Liste der ineffizienten Transponder aufgenommen.

Insbesondere die folgenden Transponder können aufgrund der unter günstigen Bedingungen und bei Applikation auf mehreren Untergründen auftretenden Leistungsschwächen als bewiesenermaßen ineffizient bezeichnet werden:

Transpondertyp 3: Nr. 11, 12 und 24

Transpondertyp 5: Nr. 14 und 28

Transpondertyp 6: Nr. 17, 18 und 21

Des Weiteren lassen sich aufgrund der Versuchsergebnisse Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Transpondertypen zueinander darstellen (vgl. Abbildung 9) und der Einfluss der Applikationsuntergründe näher definieren (vgl. Abbildung 8).

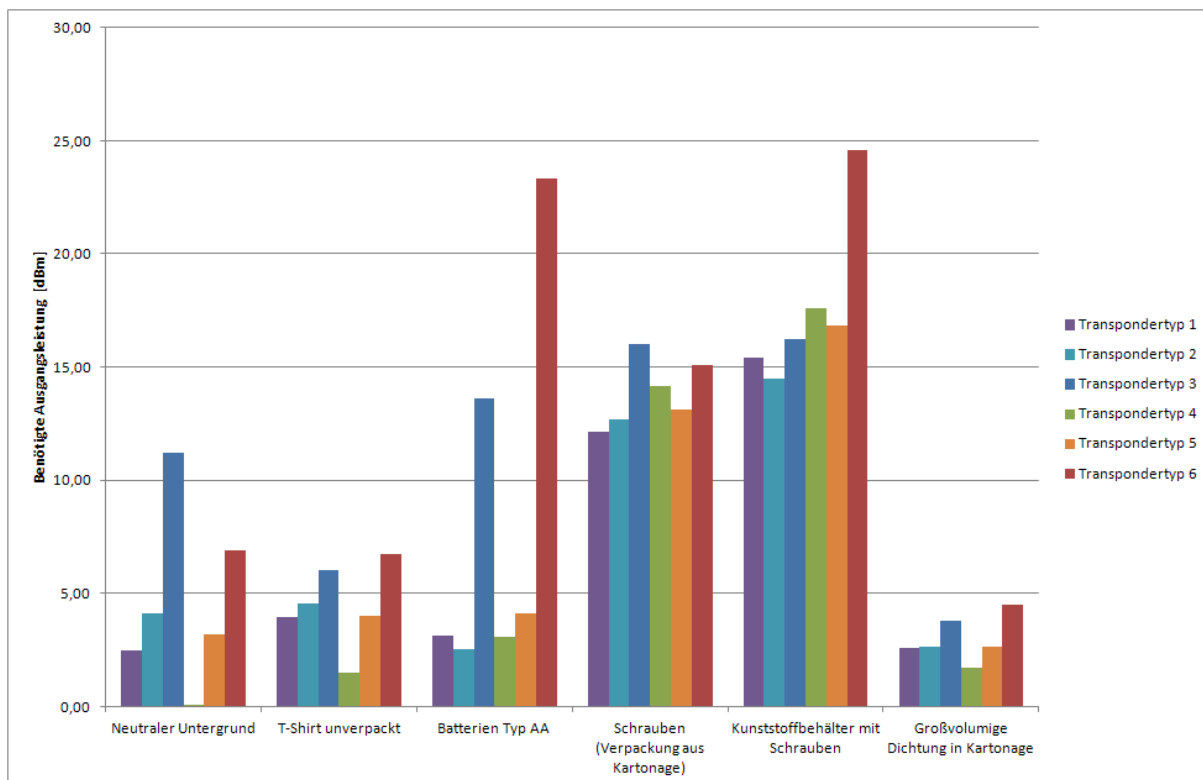


Abbildung 9: Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter günstigen Bedingungen; Kategorisierung nach Applikationen

Tabelle 11: Leistungsschwache Transponder im Fernfeld unter günstigen Bedingungen

	Neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Batterien Typ AA	Schrauben (Verpackung aus Kartonage)	Kunststoffbehälter mit Schrauben	Großvolumige Dichtung in Kartonage
Transpondertyp 1	-	-	21, 24	2, 3, 5, 10, 12, 13, 14, 15, 22	1, 3, 4, 6, 7, 9, 19	-
Transpondertyp 2	-	-	-	8, 11, 12, 14, 19	2, 5, 11, 27, 29, 30	-
Transpondertyp 3	11, 12	11, 12, 22, 24, 25	11	4, 10, 11, 19, 24, 25	5, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 20, 24	11, 12, 24, 25
Transpondertyp 4	-	-	14	2, 3, 6, 18, 27, 30	5, 16, 19, 21, 23	24
Transpondertyp 5	28	14	2, 7, 8, 10, 28	3, 14, 28, 29	3, 12, 14, 23, 24, 27, 28, 30	14
Transpondertyp 6	17, 18, 21	18, 21	11, 12, 16, 17, 18, 20, 28	1, 10, 11, 14, 18, 22	4, 7, 11, 12, 15, 17, 18, 25, 27	21



### 5.2.2 Backscatter-Analyse

Grundsätzlich zeigen sich die Schwächen der Transponder auch bei der Analyse der rückgestrahlten Leistung in einem ähnlichen Maß. Auf eine detaillierte Analyse der einzelnen Graphen soll, da in den vorangegangenen Kapiteln bereits auf die Schwächen einzelner Transponder eingegangen wurde, hier nicht weiter eingegangen werden. Die einzelnen Graphen finden sich allerdings zur Ansicht im Anhang des Endberichtes.

Im Folgenden sollen die Einflüsse der verschiedenen Applikationsuntergründe auf die jeweiligen Transpondertypen betrachtet werden. Diese Unterschiede in den Leistungen sind relevant, wenn die Applikationsuntergründe im Rahmen des Algorithmus' berücksichtigt werden sollen. Hierzu wurden aus den Versuchsergebnissen diejenigen Werte für eine Ausgangsleistung von 27 dbm extrahiert.

In Abbildung 10 sind die Unterschiede der einzelnen Applikationsuntergründe deutlich zu identifizieren. Es ist zu erkennen, dass die Leistung der Transponder sich je nach Applikationsuntergrund teilweise um mehr als 14 db unterscheidet. Dies bedeutet, dass einige Transpondertypen auf bestimmten ungünstigen Materialien bis zu 25-mal weniger Leistung zurückstrahlen als bei günstigen Materialien. Ein Beispiel für einen solchen Fall ist der untersuchte Transpondertyp 1. Wird dieser auf einer Kartonage appliziert, die Schrauben enthält, beträgt der mittlere rückgestrahlte Leistungswert ca. -43 dbm. Bei Applikation auf den Batterien des Typs AA hingegen beträgt die mittlere rückgestrahlte Leistung ca. -29 dbm. Dieser Unterschied ist durchaus als signifikant anzusehen.

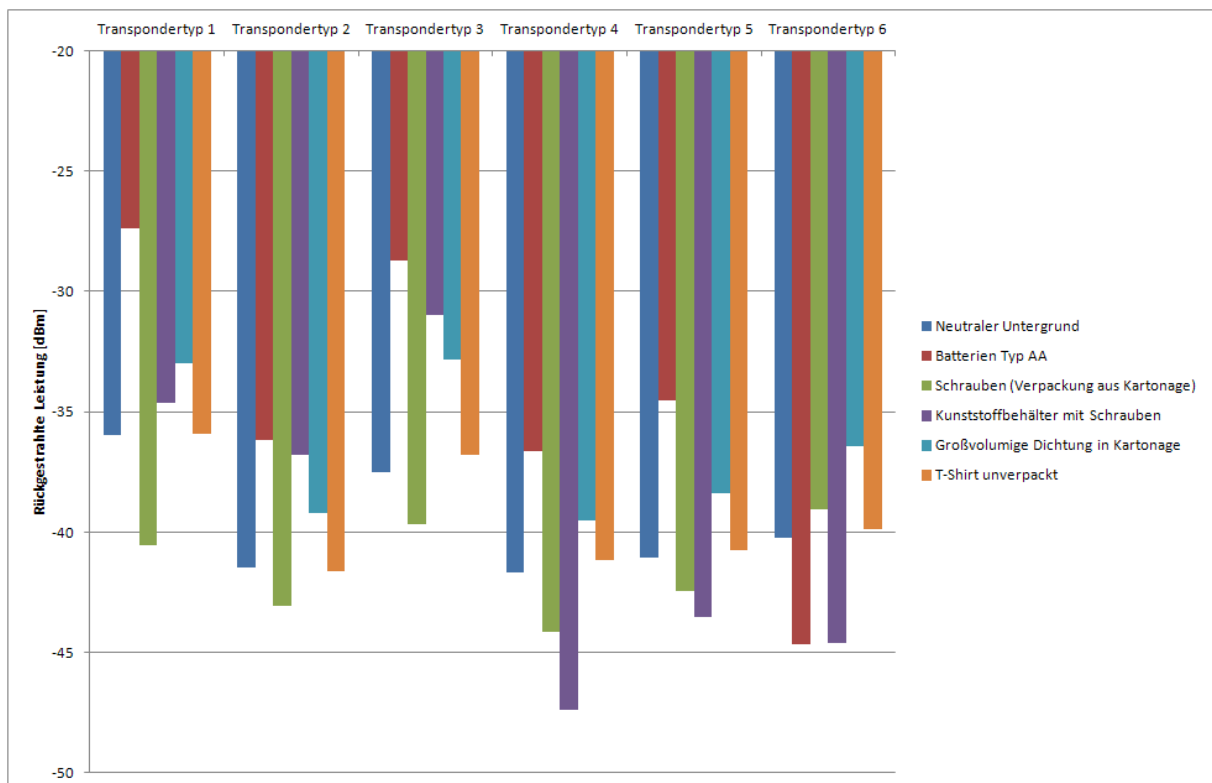


Abbildung 10: Rückgestrahlte Leistung nach Transpondertypen bei 27dBm Ausgangsleistung; günstige Bedingungen

Zudem ist erkennbar, dass einzelne Transpondertypen mit schwierigen Umgebungen besser kombinierbar sind als andere, deren Schwächen in Kombination mit solchen schwierigen Umgebungen klar identifizierbar sind. Auf der anderen Seite sind allerdings ebenfalls Ausreißer in den positiven Bereich erkennbar (vgl. Abbildung 11). So zeigt sich beispielsweise, dass der

untersuchte Transpondertyp 6 auf dem Applikationsuntergrund „Batterien Typ AA“ deutlich schlechter reagiert als beispielsweise die untersuchten Transponder des Typs 1. Die Differenz zwischen den Mittelwerten der rückgestrahlten Leistung beträgt in diesem Beispiel 18 db.

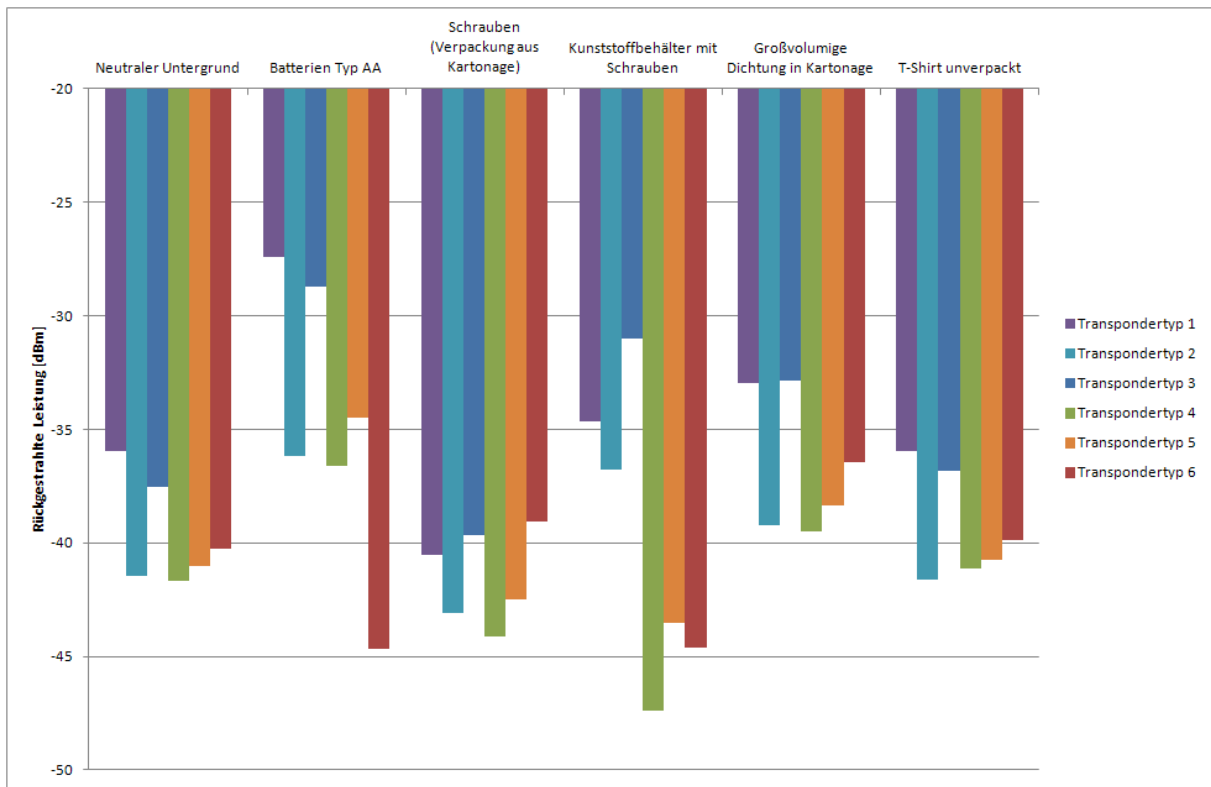


Abbildung 11: Rückgestrahlte Leistung nach Applikationen bei 27 dbm Ausgangsleistung; günstige Bedingungen

## 6 Laborversuche im Fernfeld unter moderaten Bedingungen (Arbeitspaket 4)

### 6.1 Versuchsaufbau

Zur Durchführung der in Arbeitspaket 4 geplanten Versuche im Fernfeld unter moderaten Bedingungen wurde der Versuchsaufbau aus Abschnitt 5.1 (Seite 13) in den Laborbereich des IDH übertragen. Dieser ist nicht gegen Einflüsse von außen abgeschirmt. Dennoch wurden mögliche Störquellen im Bereich der Messungen vermieden, d. h. es wurden sämtliche RFID-Lesegeräte im Laborbereich ausgeschaltet und der Bereich hinter dem Transponder freigeräumt.

Ergänzt wurden diese Versuche zur Aufnahme der elektromagnetischen Eigenschaften durch Versuchsreihen zur Ermittlung der Lesereichweite sowie zur Pulklesefähigkeit der Transponder.

Zur Durchführung der Lesereichweiten-Versuchsreihen wurde der Versuchsaufbau der VDI-Richtlinie 4472 Blatt 10 (vgl. [21]) im Laborbereich des IDH eingerichtet. Entsprechend der Richtlinie wurde der auf dem jeweiligen Applikationsobjekt angebrachte Transponder von außerhalb des Lesefeldes in Richtung der Antenne bewegt. Sobald eine konstante Erkennung des Transponders vorlag, wurde die Entfernung des Transponders zur Antenne vermerkt. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden die Versuche jeweils dreimal wiederholt.

Zur Durchführung der Versuche wurden aus der Gesamtheit der Transponder jeweils zehn Transponder eines Typs identifiziert, deren Leistung bei 868 MHz dem Durchschnitt entsprach. Die Lesereichweite wurde mit zwei unterschiedlichen Readern und drei Untergründen ermittelt. Im Rahmen der dritten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses wurde beschlossen, die Applikationsuntergründe „T-Shirt unverpackt“, „Kunststoffbehälter mit Schrauben“ sowie den neutralen Untergrund zu untersuchen. Von Seiten des PA wurden hierzu jeweils ein Reader der Firmen Sirit und Scemtec zur Verfügung gestellt. Als Ausgangsleistung sollte der in der Logistik gebräuchliche Wert von 500 mW (27 dbm) gewählt werden. Aufgrund der Einstellungsmöglichkeiten der Lesegeräte weichen die realen Ausgangsleistungen allerdings vom gewünschten Wert ab. Es wurde deshalb darauf geachtet, dass die Sendeleistungen zueinander vergleichbar sind. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Bestimmung der elektromagnetischen Eigenschaften wurde die Antenne des Voyantic-Messsystems verwendet. Die reale Sendeleistung unter Berücksichtigung des Antennengewinns von 8 dBi des Scemtec-Readers beträgt ca. 390 mW und die des Sirit-Readers ca. 400 mW. Für die Darstellung der Lesereichweitenergebnisse wurden die Reader anonymisiert.

Die Ermittlung der Pulklesefähigkeit wurde mithilfe des Voyantic Tagformance Lite Messsystems durchgeführt. Das Modul „Population Analysis“ bietet hierzu eine unkomplizierte Möglichkeit. Es wurden jeweils dieselben zehn Transponder eines Typs wie zur Ermittlung der Lesereichweite verwendet. Diese wurden auf den Untergründen „neutraler Untergrund“, „T-Shirt unverpackt“ sowie auf dem Untergrund „großvolumige Dichtung in Kartonage“ appliziert. Eine Anbringung auf den Applikationsuntergrund „Kunststoffbehälter mit Schrauben“ wurde vermieden, da bereits eine Erkennung der Transponder ohne Pulklesung nur komplikationsbehaftet möglich war und eine Voruntersuchung wenig Erfolg für die Pulkerfassung versprochen hat. Diese Maßnahme wurde vom PA beschlossen.

## 6.2 Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse der elektromagnetischen Analyse entsprechen weitestgehend den Ergebnissen, die in günstiger Umgebung ermittelt wurden. Ein besonders deutlicher Unterschied, der in den Versuchen sichtbar wurde, bezieht sich auf den Frequenzbereich um 940 MHz. Da in diesem Band das GSM-Netz sendet, sind im Rahmen der Versuche zum Teil erhebliche Störeinflüsse sichtbar. Die Verlässlichkeit der Ergebnisse in diesem Frequenzbereich ist somit nicht gegeben.

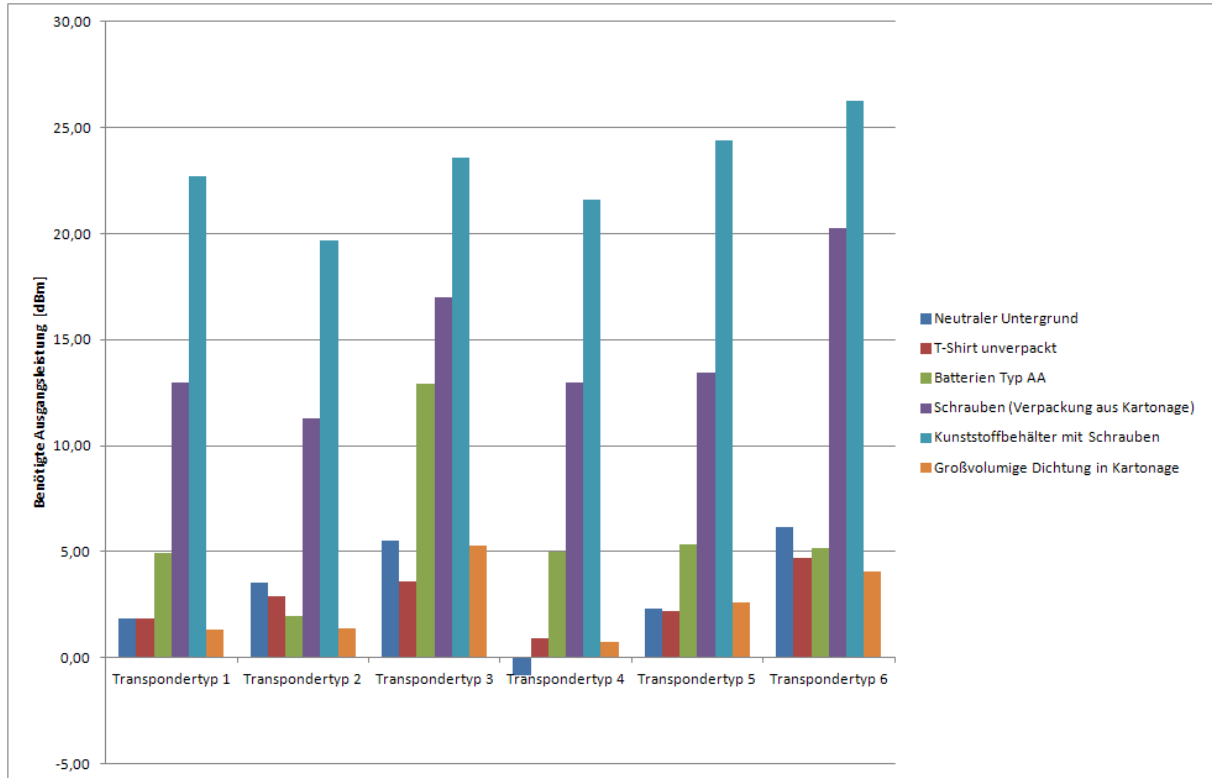
Es muss darauf hingewiesen werden, dass sich die Leistung der Transponder trotz größter Sorgfalt im Umgang mit diesen, teilweise signifikant verschlechtert hat. Einige der Transponder konnten zum Abschluss der Lesereichweitenversuchsreihen nicht mehr bzw. kaum noch ausgelesen werden. An den Transpondern konnten keine offensichtlichen Schäden festgestellt werden. Es handelt sich hierbei um die folgenden Transponder:

Transpondertyp 3 Transponder Nr. 7

Transpondertyp 3 Transponder Nr. 21

Diese Transponder wurden bei der weitergehenden Betrachtung nicht berücksichtigt. Für die entsprechenden Transponder-Inlay-Typen reduziert sich somit die Anzahl  $n$  um die jeweilige Anzahl der defekten Transponder.

### 6.2.1 Threshold-Sweep



**Abbildung 12: Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter moderaten Bedingungen; Kategorisierung nach Transpondertypen**

Die Ergebnisse der Versuchsreihen im Fernfeld unter moderaten Bedingungen bestätigen die Ergebnisse, die unter günstigen Bedingungen erzielt wurden. Insbesondere bei Betrachtung der leistungsschwachen Transponder sind viele Übereinstimmungen zu beobachten.

Die erzielten Ergebnisse bestätigen zudem die deutlich bessere Leistungsfähigkeit der Transpondertypen 4 und 1. Diese Transpondertypen weisen deutlich weniger schwache Transponder auf als beispielsweise die beiden Transpondertypen 3 und 6 (vgl. Tabelle 12).

Das Auftreten von Leistungsschwächen bei Applikation auf verschiedenen Untergründen beweist insbesondere die Ineffizienz der folgenden Transponder:

Transpondertyp 3: Nr. 11, 12 und 24

Transpondertyp 5: Nr. 14

Transpondertyp 6: Nr. 21

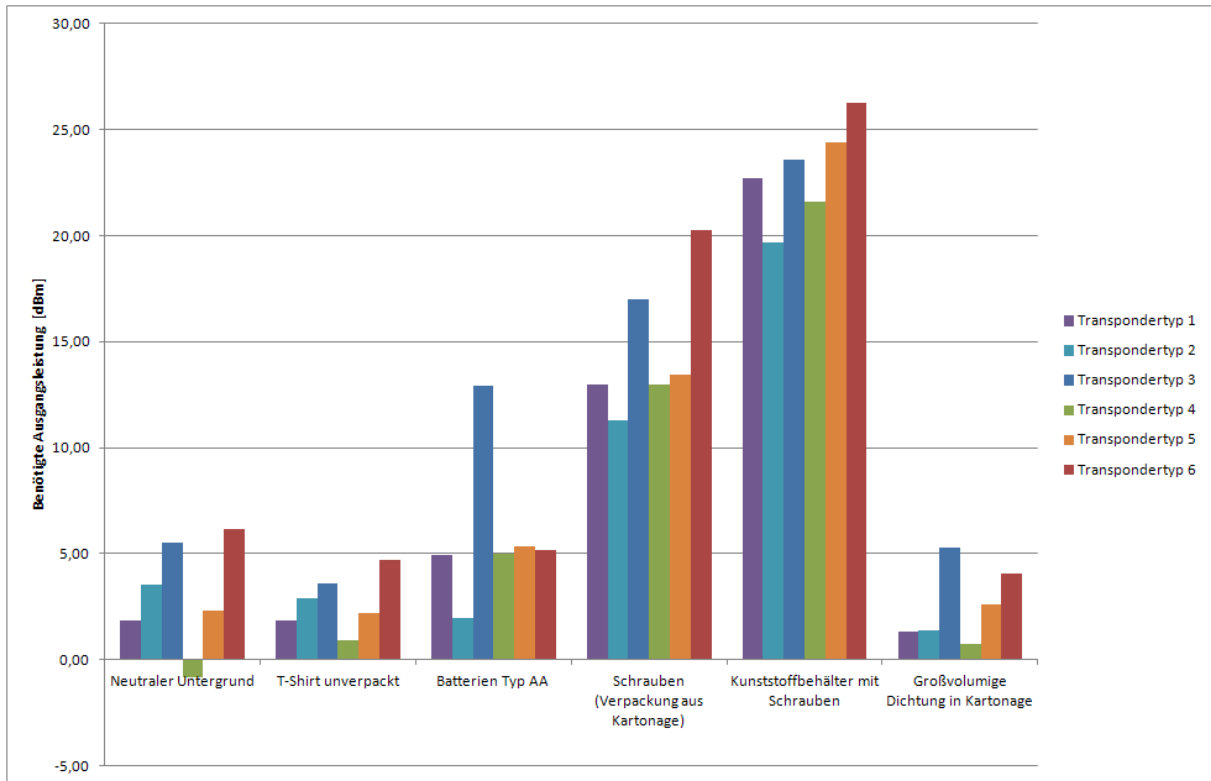


Abbildung 13: Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter moderaten Bedingungen; Kategorisierung nach Applikationen

Tabelle 12: Leistungsschwache Transponder im Fernfeld unter moderaten Bedingungen

	Neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Batterien Typ AA	Schrauben (Verpackung aus Kartonage)	Kunststoffbehälter mit Schrauben	Großvolumige Dichtung in Kartonage
Transpondertyp 1	22	-	-	3, 5, 6, 7, 8, 10, 11	4, 9, 10, 11, 15	-
Transpondertyp 2	18, 21	9	-	4, 7, 10, 11, 12	2, 7, 8, 11, 26	-
Transpondertyp 3	11, 12, 24	11, 12, 24, 25	11, 12	11, 12, 24	11, 12, 23, 24, 25	11, 12, 24
Transpondertyp 4	-	-	28	21, 23, 27, 29	3, 28	-
Transpondertyp 5	14, 27, 29, 30	14	12, 14, 15	5, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29, 30	14, 23	18, 20, 21, 22, 23, 27, 29, 30
Transpondertyp 6	17, 21	21	15, 21	4, 5, 7, 16, 21, 26	25, 28, 30	21

### 6.2.2 Backscatter-Analyse

Die bereits in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Eigenschaften der Transponder sind auch unter moderaten Bedingungen vorhanden und nachweisbar. Es treten in diesem Umfeld allerdings zum Teil deutlich stärkere Leistungsunterschiede auf als unter günstigen Bedingungen. Insbesondere die Leistungsfähigkeit sämtlicher Transponder in Kombination mit dem Applikationsuntergrund „Kunststoffbehälter mit Schrauben“ ist deutlich geringer als unter günstigen Bedingungen. Der Grund hierfür könnte in den zusätzlichen Reflexionen durch andere im Raum befindliche Strahlungsquellen zu suchen sein, die das elektromagnetische Feld des RFID-Messsystems überlagern.

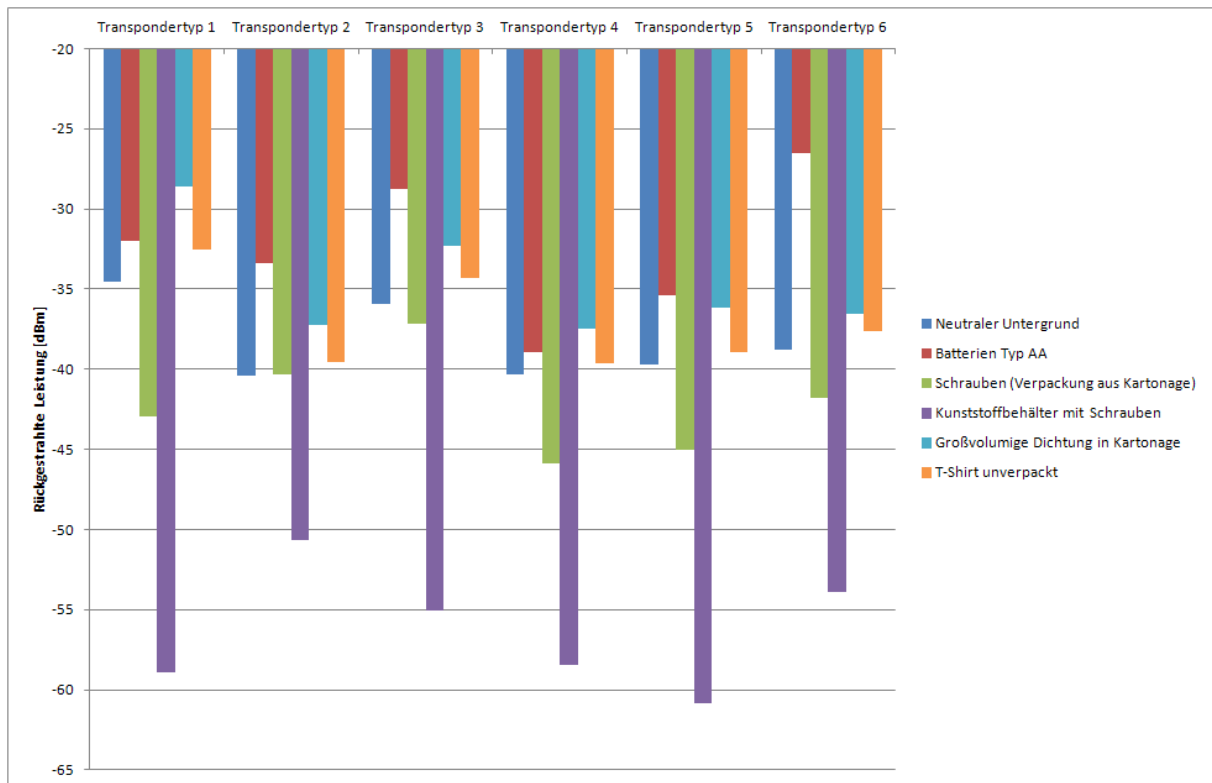


Abbildung 14: Rückgestrahlte Leistung nach Transpondertypen bei 27dBm Ausgangsleistung; moderate Bedingungen

Auch unter moderaten Bedingungen sind Unterschiede zwischen der Kombinationsfähigkeit einzelner Transponder mit bestimmten Applikationsuntergründen zu erkennen. Beispielsweise beträgt die mittlere rückgestrahlte Leistung des Transpondertyps 4, der auf dem Applikationsuntergrund „Batterien Typ AA“ angebracht wurde, -39 dbm. Der Unterschied zum untersuchten Transpondertyp 6, dessen mittlere rückgestrahlte Leistung -27 dbm beträgt, ergibt somit 12 db. Dies bedeutet, dass Transpondertyp 6 um den Faktor 16 leistungsfähiger ist als Transpondertyp 4.

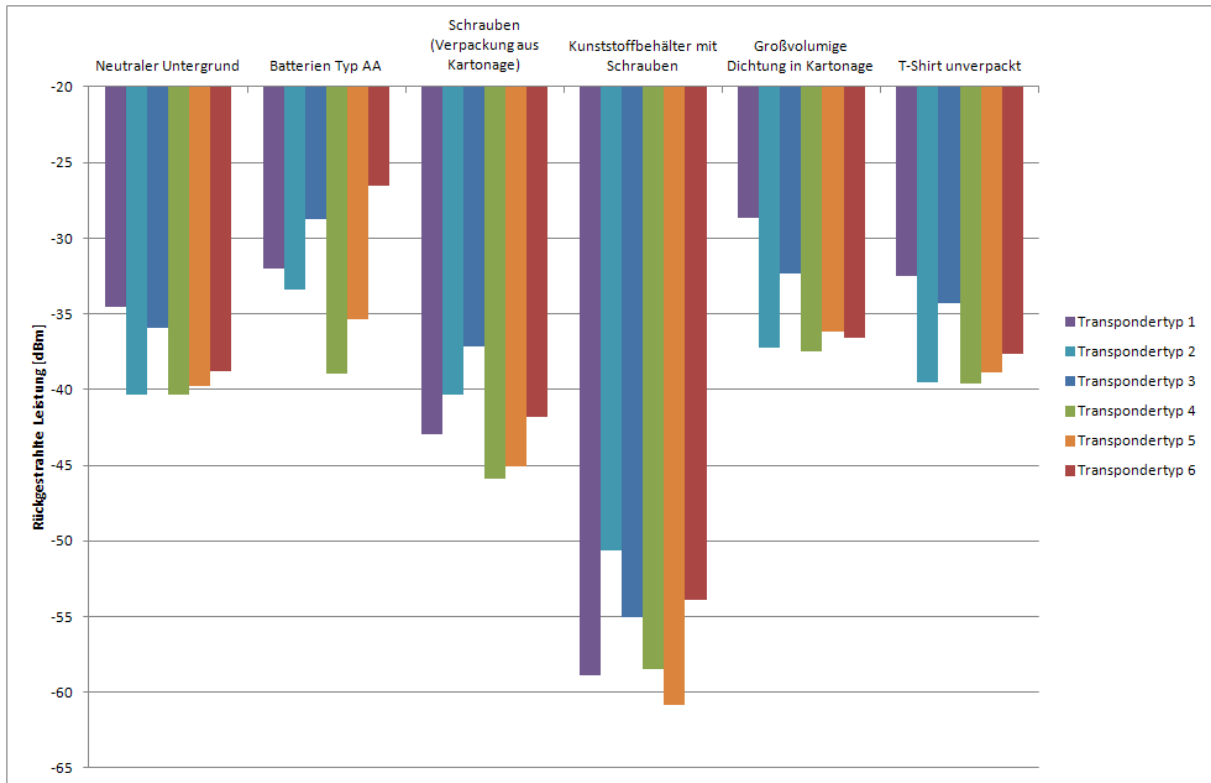


Abbildung 15: Rückgestrahlte Leistung nach Applikationen bei 27dBm Ausgangsleistung; moderate Bedingungen

### 6.2.3 Lesereichweite

Wie bereits angemerkt wurde, dienen die Versuche zur Lesereichweitenbestimmung der weitergehenden Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Nahfeld- und Fernfeldleistung. Um von der Nahfeldleistung direkt auf die Fernfeldleistung schließen zu können, ist es notwendig, dass eine gewisse Konsistenz der Daten vorliegt. Hiermit ist gemeint, dass die Transponder sowohl in den Nahfeldversuchen wie auch in den Fernfeld- und Lesereichweitenversuchen ähnliche Leistungen erbringen. Dies soll im Folgenden dargestellt werden.

#### 6.2.3.1.1 Transpondertyp 1

Bei der Analyse der Lesereichweitenergebnisse des Transpondertyps 1 ist erkennbar, dass eine eindeutige Rangfolgenstellung für die Leistung der untersuchten Transponder kaum möglich ist. Beispielsweise weist Transponder 6 bei Anbringung auf einem T-Shirt die beste Lesereichweite auf. Wird der Transponder auf dem neutralen Untergrund angebracht erreicht der Transponder im Mittel lediglich Rang 8.

**Tabelle 13: Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 1**

	Lesegerät 1						Lesegerät 2					
	mittlere Lesereichweite [m]			Rang			mittlere Lesereichweite [m]			Rang		
	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben
Transponder 2	1,70	1,70	0,33	4	7	2	2,53	2,23	0,22	3	9	1
Transponder 6	1,70	1,70	0,28	5	6	5	2,37	2,57	0,16	8	1	10
Transponder 7	1,63	1,67	0,21	6	9	8	2,67	2,27	0,20	2	8	4
Transponder 10	1,80	1,80	0,21	1	2	7	2,40	2,37	0,17	7	4	8
Transponder 12	1,80	1,67	0,30	1	9	3	2,50	2,23	0,21	4	9	3
Transponder 16	1,57	1,70	0,35	10	7	1	2,47	2,30	0,21	6	7	2
Transponder 20	1,60	1,77	0,19	9	3	10	2,50	2,30	0,19	4	5	5
Transponder 26	1,73	1,83	0,29	3	1	4	2,10	2,50	0,18	9	2	6
Transponder 27	1,63	1,73	0,24	6	4	6	2,00	2,47	0,17	10	3	9
Transponder 29	1,63	1,73	0,20	6	4	9	2,77	2,30	0,18	1	5	6

6.2.3.1.2 Transpondertyp 2

Auch bei den getesteten Transpondern des Transpondertyps 2 sind die Rangfolgen nur teilweise identisch. Bemerkenswert ist zudem, dass sich die Rangfolgen je nach verwendetem RFID-Lesegerät unterscheiden. Belegt Transponder 29 bei Verwendung des Lesegeräts 1 und der Applikation auf einem T-Shirt Platz 3 so belegt er bei Austausch des Lesegerätes lediglich Rang 7. Somit ist auch hier keine Vergleichbarkeit gegeben.

**Tabelle 14: Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 2**

	Lesegerät 1						Lesegerät 2					
	mittlere Lesereichweite [m]			Rang			mittlere Lesereichweite [m]			Rang		
	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben
Transponder 1	1,53	1,73	0,32	5	2	6	1,50	1,83	0,32	9	1	4
Transponder 2	1,40	1,73	0,33	9	1	5	1,77	1,80	0,33	6	2	3
Transponder 7	1,67	1,67	0,32	2	3	7	1,83	1,80	0,31	4	3	6
Transponder 14	1,63	1,60	0,31	3	5	9	1,83	1,77	0,32	4	4	5
Transponder 15	1,77	1,47	0,37	1	10	3	1,70	1,73	0,23	8	5	9
Transponder 19	1,43	1,50	0,39	7	9	1	1,27	1,37	0,35	10	10	1
Transponder 20	1,50	1,57	0,35	6	6	4	1,73	1,63	0,34	7	9	2
Transponder 22	1,37	1,53	0,28	10	7	10	1,93	1,67	0,30	3	7	7
Transponder 25	1,57	1,53	0,31	4	7	8	2,23	1,70	0,29	1	6	8
Transponder 29	1,43	1,67	0,38	7	3	2	2,03	1,67	X	2	7	-

6.2.3.1.3 Transpondertyp 3

Die untersuchten RFID-Transponder des Typs Transpondertyp 3 weisen eine recht breite Spannweite der Lesereichweiten auf. Im Falle der Applikation auf einem neutralen Untergrund liegen das Minimum der Mittelwerte aus drei Messungen bei 0,97 m und das Maximum bei 1,33 m. Die Spannweite beträgt somit 0,36 m. Es ist zudem erkennbar, dass die Leistungswerte eines Transponders bei Anbringung auf einen bestimmten Untergrund nicht unmittelbar auf einen anderen Untergrund übertragbar sind. Dies wird insbesondere bei Betrachtung der unterschiedlichen Rangfolgen ersichtlich. Beispielsweise weist Transponder 8 bei Anbringung auf einem neutralen Untergrund die beste Lesereichweite auf. Wird der Transponder auf einem unverpackten T-Shirt angebracht erreicht der Transponder im Mittel lediglich Rang 9.

**Tabelle 15: Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 3**

	Lesegerät 1						Lesegerät 2					
	mittlere Lesereichweite [m]			Rang			mittlere Lesereichweite [m]			Rang		
	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben
Transponder 2	1,10	1,67	0,18	6	7	8	1,63	2,20	0,18	4	1	2
Transponder 3	1,27	1,93	0,22	2	1	2	1,60	2,00	0,16	5	3	8
Transponder 7	X	X	X	-	-	-	1,97	X	0,16	1	-	7
Transponder 8	1,10	1,90	0,21	6	2	5	1,80	1,73	0,18	2	9	3
Transponder 17	1,17	1,83	0,22	4	3	1	1,70	1,80	0,17	3	7	5
Transponder 18	1,20	1,77	0,16	3	5	9	1,47	1,80	0,18	7	7	3
Transponder 19	1,33	1,83	0,22	1	3	2	1,50	2,17	0,19	6	2	1
Transponder 21	0,97	1,13	0,19	9	9	6	X	1,83	X	6	6	-
Transponder 28	1,10	1,63	0,19	6	8	6	1,23	2,00	0,15	9	3	9
Transponder 29	1,17	1,73	0,21	4	6	4	1,27	1,87	0,17	8	5	6

6.2.3.1.4 Transpondertyp 4

Ein ähnliches Bild zeichnet sich für die untersuchten Transponder des Typs Transpondertyp 4 ab. Auch hier sind die Rangfolgen der unterschiedlichen Applikationsuntergründe nicht vergleichbar.



Beispielhaft hierfür sei Transponder 8 genannt, der bei Anbringung auf einem neutralen Untergrund den zehnten Rang belegt, bei Applikation auf einem T-Shirt allerdings die beste Reichweite aufweist.

**Tabelle 16: Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 4**

	Lesegerät 1						Lesegerät 2					
	mittlere Lesereichweite [m]			Rang			mittlere Lesereichweite [m]			Rang		
	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben
Transponder 1	1,87	1,70	0,21	4	8	9	2,77	2,57	0,16	3	5	5
Transponder 5	1,83	1,83	0,22	8	2	7	2,47	2,20	0,16	6	10	6
Transponder 7	1,87	1,83	0,31	4	2	1	2,43	2,33	0,19	8	9	1
Transponder 8	1,87	1,73	0,26	4	6	3	2,33	2,77	0,18	10	1	2
Transponder 11	1,87	1,83	0,31	4	2	2	2,47	2,67	0,11	7	3	9
Transponder 14	1,70	1,70	0,21	9	8	8	2,83	2,57	0,17	1	5	4
Transponder 19	1,93	1,70	0,23	1	8	6	2,57	2,63	0,15	5	4	7
Transponder 20	1,93	1,80	0,25	1	5	4	2,37	2,77	0,18	9	1	3
Transponder 28	1,93	1,73	0,20	1	6	10	2,80	2,47	0,11	2	8	10
Transponder 30	1,67	1,90	0,25	10	1	4	2,77	2,57	0,12	3	5	8

6.2.3.1.5 Transpondertyp 5

Die Analyse der Lesereichweitenergebnisse des Transpondertyps 5 zeigt ebenfalls auf, dass die Rangfolgen nicht unmittelbar vergleichbar sind. Dennoch ist hier erkennbar, dass insbesondere sehr schwache Transponder (hier Transponder 14) bei Anbringung auf dem neutralen Untergrund sowie bei Anbringung auf einem T-Shirt den letzten Rang belegen. Dies trifft für beide verwendete Lesegeräte zu.

**Tabelle 17: Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 5**

	Lesegerät 1						Lesegerät 2					
	mittlere Lesereichweite [m]			Rang			mittlere Lesereichweite [m]			Rang		
	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben
Transponder 1	1,53	1,73	0,32	5	2	6	1,50	1,83	0,32	9	1	4
Transponder 2	1,40	1,73	0,33	9	1	5	1,77	1,80	0,33	6	2	3
Transponder 7	1,67	1,67	0,32	2	3	7	1,83	1,80	0,31	4	3	6
Transponder 14	1,63	1,60	0,31	3	5	9	1,83	1,77	0,32	4	4	5
Transponder 15	1,77	1,47	0,37	1	10	3	1,70	1,73	0,23	8	5	9
Transponder 19	1,43	1,50	0,39	7	9	1	1,27	1,37	0,35	10	10	1
Transponder 20	1,50	1,57	0,35	6	6	4	1,73	1,63	0,34	7	9	2
Transponder 22	1,37	1,53	0,28	10	7	10	1,93	1,67	0,30	3	7	7
Transponder 25	1,57	1,53	0,31	4	7	8	2,23	1,70	0,29	1	6	8
Transponder 29	1,43	1,67	0,38	7	3	2	2,03	1,67	X	2	7	-

6.2.3.1.6 Transpondertyp 6

Bei den Transpondern des Typs 6 ist die Verteilung der Ränge ebenfalls nicht einheitlich. So belegt Transponder 10 bei Verwendung eines neutralen Untergrundes Rang 2, bei Anbringung auf einem unverpackten T-Shirt allerdings lediglich Rang 10.

**Tabelle 18: Ergebnisse der Lesereichweitenversuche Transpondertyp 6**

	Lesegerät 1						Lesegerät 2					
	mittlere Lesereichweite [m]			Rang			mittlere Lesereichweite [m]			Rang		
	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben	neutraler Untergrund	T-Shirt unverpackt	Kunststoffbehälter mit Schrauben
Transponder 5	1,50	1,27	0,15	1	8	1	1,43	1,40	X	1	9	-
Transponder 9	1,43	1,63	0,06	2	1	7	1,13	1,50	0,07	3	5	9
Transponder 10	1,37	1,27	0,12	3	8	2	1,30	1,37	0,14	2	10	1
Transponder 12	1,37	1,40	0,08	3	6	6	0,80	1,53	0,10	6	4	5
Transponder 13	1,07	1,43	0,06	5	4	7	0,70	1,43	0,10	7	8	6
Transponder 16	1,03	1,53	0,09	7	2	3	0,63	1,47	0,08	9	7	8
Transponder 19	1,07	1,43	0,04	5	4	10	0,93	1,70	0,13	4	1	2
Transponder 25	1,03	1,50	0,08	7	3	5	0,57	1,57	0,09	10	3	7
Transponder 28	0,97	1,23	0,06	9	10	9	0,70	1,60	0,12	8	2	3
Transponder 30	0,90	1,33	0,09	10	7	3	0,90	1,50	0,11	5	5	4

6.2.4 Pulklesefähigkeit

Im Rahmen des Projektes wurden neben den Lesereichweitenversuchen Versuche zur Bestimmung der Pulklesefähigkeit durchgeführt. Hierzu wurden wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben, die Transponder, die bereits in den Lesereichweitenversuchen untersucht wurden, in variabler Kombination auf drei der in Kapitel 3.1 genannten Applikationsuntergründe angebracht. Hierbei handelt es sich um den neutralen Untergrund, das unverpackte T-Shirt sowie die Dichtung in der Kartonage.

Die Problematik, die sich bei der Auswertung der Versuchsergebnisse stellt ist die, dass die Ergebnisse im Rahmen der Algorithmus-Entwicklung nicht verwendbar sein werden. Die Rahmenbedingungen der Versuche sind zu eng gefasst für reale Anwendungsfälle und zugleich zu komplex für die Integration in einen einzelnen Algorithmus. Ein Beispiel hierfür ist in Tabelle 19 gegeben.

**Tabelle 19: Beispiel Ergebnis Pulklesefähigkeit; Transpondertyp 6; großvolumige Dichtung in Kartonage; 2 x 5 Kartonagen; 18 dbm Ausgangsleistung**

-38,159	-41,751
-40,699	-43,506
-52,988	-53,725
-	-
-54,578	-

Die Darstellung zeigt die rückgestrahlten Leistungen bei Anbringung der Transponder auf 2 x 5 Kartonagen mit enthaltener großvolumiger Dichtung. Obwohl der Applikationsuntergrund keine metallischen Gegenstände enthielt, scheinen Reflexionen für den Ausleseerfolg eines der Transponder in der hinteren Kartonagenreihe verantwortlich zu sein. Vergleicht man das hier erzielte Ergebnis mit den Versuchsreihen zur Lesereichweite sowie zu den elektromagnetischen Eigenschaften, die im Rahmen der Backscatter-Analyse aufgenommen wurden, so zeigt sich, dass der hier applizierte Transponder (Transpondertyp 6 Transponder 16) keine außergewöhnlich gute Leistung aufweist. Vergleichbare Reflexionen und somit nicht interpretierbare Ergebnisse liegen auch für die anderen untersuchten Kombinationen im Rahmen der Pulklesefähigkeitsuntersuchung vor. Ein Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit eines Transponders und der Pulklesefähigkeit ist somit nicht definitiv bestimmbar. Es wurde aus diesem Grund darauf verzichtet, die Pulklesefähigkeit in den Algorithmus zu implementieren. Diese Maßnahme wurde mit dem Projektbegleitenden Ausschuss abgestimmt.

## 7 Laborversuche im Nahfeld (Arbeitspaket 5)

### 7.1 Versuchsaufbau

Die Versuche zur Aufnahme der elektromagnetischen Eigenschaften der Transponder, die bereits im Fernfeld durchgeführt wurden, wurden analog im Nahfeld durchgeführt. Die Aufnahme der Daten erfolgte mithilfe des Voyantic Tagformance Lite Systems und einer Kathrein Ultra Low Range Antenne (Spezifikationen siehe untenstehende Tabelle). Wie auch im Fernfeld wurde zunächst ein Threshold-Sweep im Frequenzbereich 860 MHz bis 960 MHz durchgeführt, bevor eine Analyse der Rückstreuungseigenschaften bei 868 MHz angesetzt wurde.

Tabelle 20: Spezifikationen der Nahfeld-Antenne Kathrein ULORA[25]

Frequenzbereich	865-928 MHz
Antennengewinn	-30 dBi
Effective Isotropic Field Factor (EIFF)	15 dB
Reichweite	8 cm
Abmaße (B x H x T)	90 mm x 63 mm x 31 mm

Da dieser Versuchsaufbau den eigentlichen Testvorgang der Transponder im Applikator simuliert, wurde selbstverständlich auf die verschiedenen Applikationsuntergründe sowie eine Pulklesung verzichtet. Die Transponder wurden auf einen Abstandshalter aus Polystyrol, der an der Antenne angebracht wurde, befestigt (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17). Der Abstand zwischen Antenne und Transponder betrug bei diesen Versuchsreihen somit lediglich 10 mm und der Transponder befand sich abgesichert im Nahfeld des Lesegerätes. Die Befestigung des Abstandshalters aus Polystyrol-Vollmaterial auf der Antenne erfolgte mithilfe eines Klebstoffes, um ein Verrutschen des Abstandshalters und somit Fehler durch eine ungenaue Versuchsdurchführung zu vermeiden. Die Antenne wurde auf dem in den Versuchsreihen im Fernfeld genutzten Transpondertisch aufliegend befestigt.

Im Rahmen der Nahfeldversuche wurden Testreihen mit jeweils 30 Transpondern eines jeden ausgewählten Transpondertyps durchgeführt.

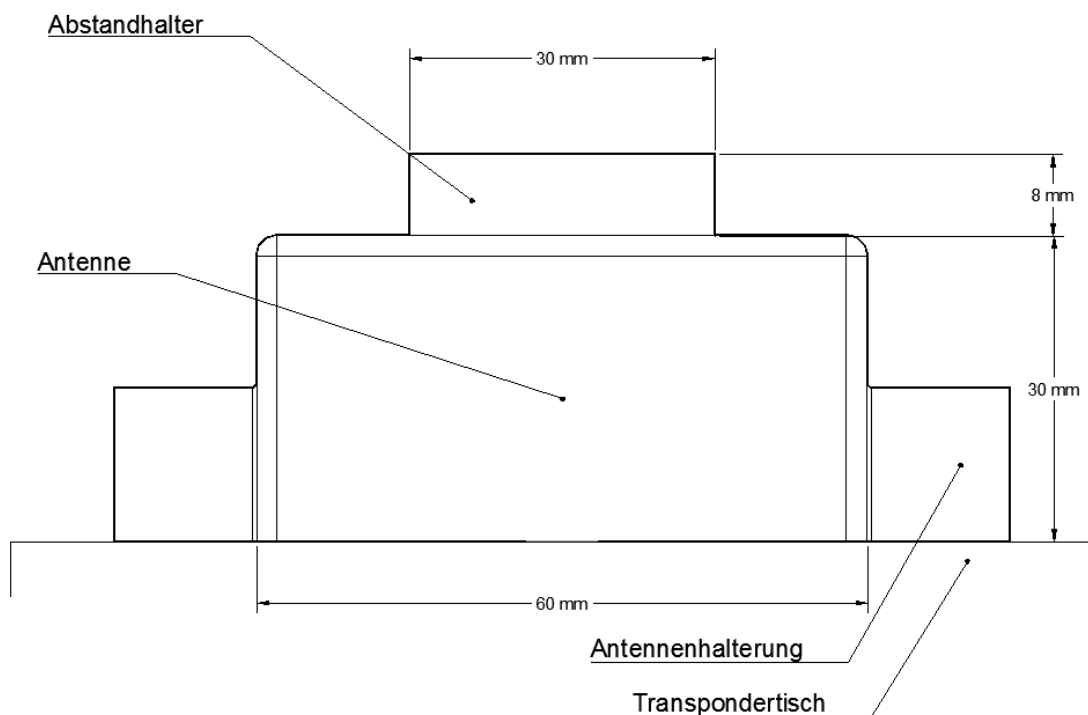


Abbildung 16: Versuchsaufbau Nahfeld (Sicht von vorne)

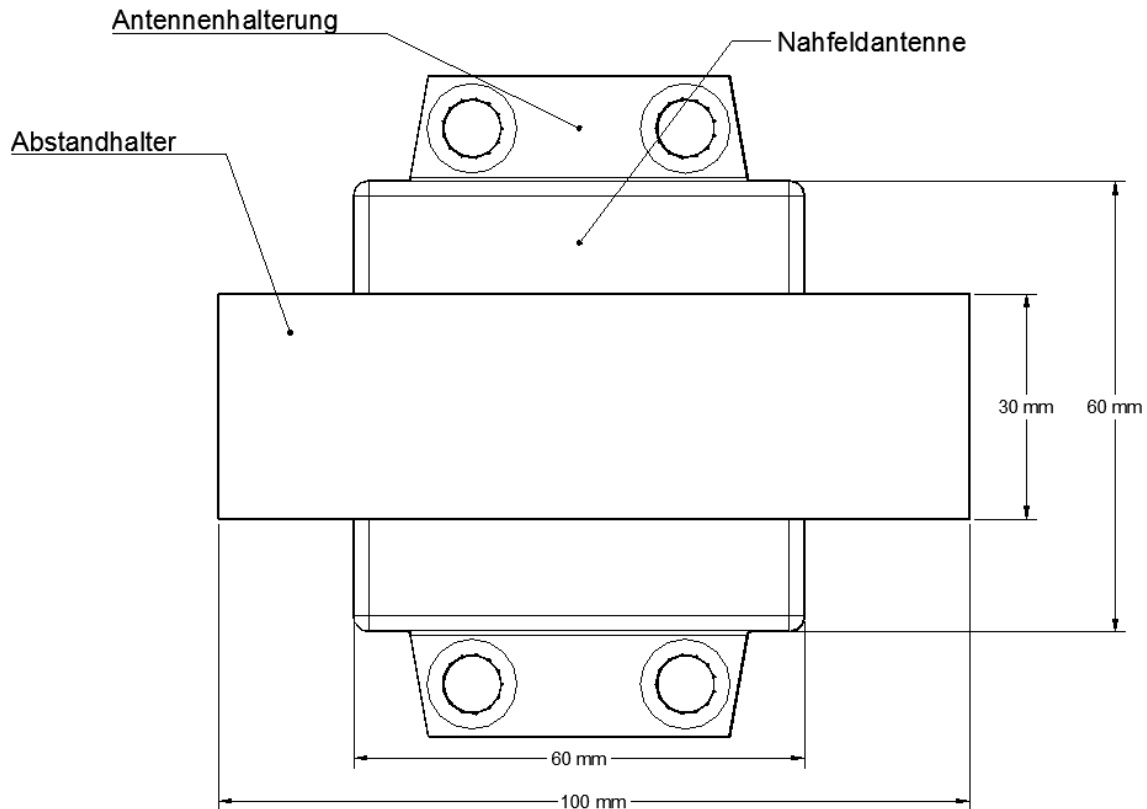


Abbildung 17: Versuchsaufbau Fernfeld (Sicht von oben)

Die Versuchsreihen wurden sowohl unter günstigen wie auch moderaten Bedingungen durchgeführt, um die Unterschiede der Messungen und die Einflüsse der Umgebung darzustellen. Der Versuchsaufbau unter günstigen Bedingungen wurde in der Absorberkammer eingerichtet, während die Versuche unter moderaten Bedingungen im Laborbereich des IDH durchgeführt wurden.

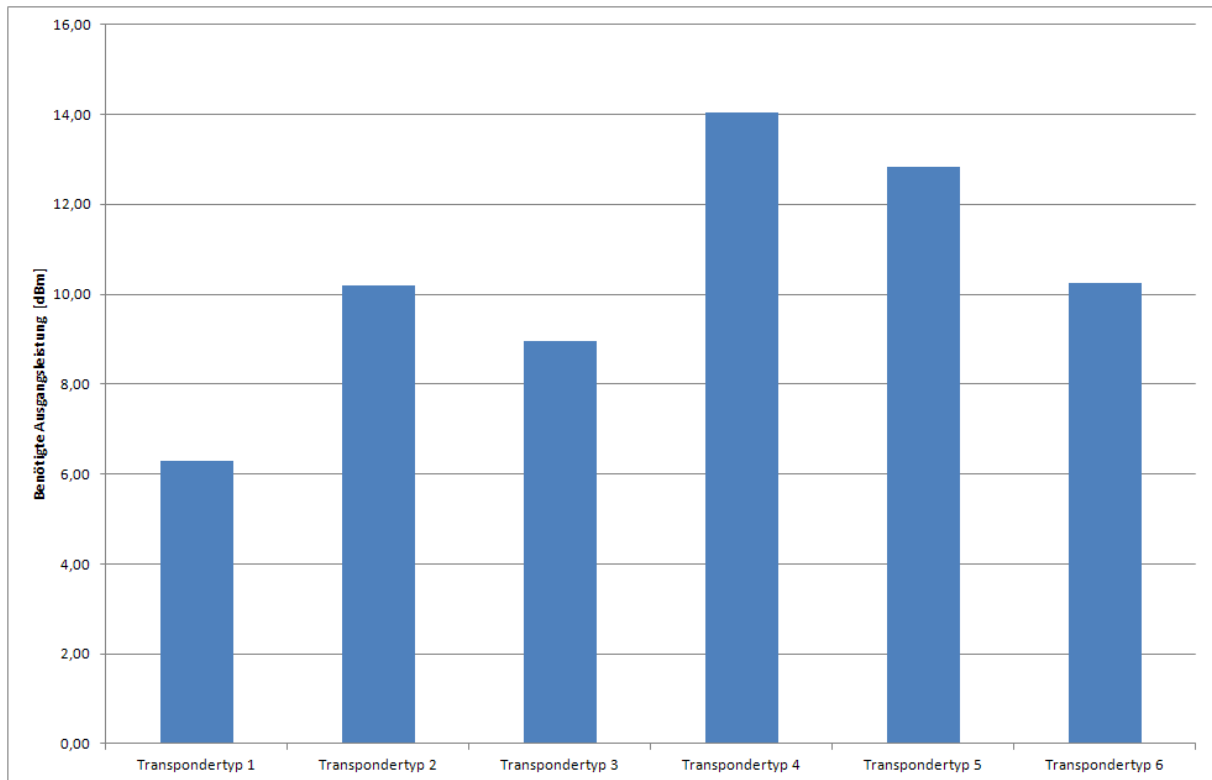
Analog zu den Versuchen im Fernfeld wurde im Rahmen eines Threshold-Sweeps zunächst die Ansprechempfindlichkeit der Transponder im Frequenzbereich zwischen 860 MHz und 960 MHz untersucht. Anschließend wurde die rückgestrahlte Leistung bei einer Ausgangsleistung von bis zu 27 dbm und einer statischen Frequenz von 868 MHz untersucht.

## 7.2 Ergebnisse

Entsprechend den Erwartungen war der Unterschied in der Leistungsfähigkeit der Transponder zum Großteil auch im Nahfeld zu erkennen. Transponder-Inlays, die in den vorangegangenen Versuchen im Fernfeld lediglich eine schlechte Leistungsfähigkeit aufgewiesen haben, zeigten diese Schwäche auch im Nahfeld. Für die Transponder, die sich in ihrer Leistung im Bereich des arithmetischen Mittels befinden, trifft diese Aussage nicht in jedem Fall zu. Transponder, die im Fernfeld leistungsfähiger waren als andere Transponder, waren hingegen im Nahfeld im Vergleich weniger leistungsfähig. Anhand der folgenden exemplarischen Rangliste kann dieser Unterschied dargestellt werden. Diese Unterschiede zwischen Nahfeld und Fernfeld gestalten die Algorithmus-Entwicklung komplizierter und ungenauer. Der grundlegende Unterschied zwischen den einzelnen Transponder-Inlay-Typen ist allerdings ebenso deutlich wie im Fernfeld.

## 7.2.1 Günstige Bedingungen

### 7.2.1.1 Threshold-Sweep



**Abbildung 18: Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter günstigen Bedingungen im Nahfeld**

Auch im Nahfeld unter günstigen Bedingungen sind leistungsschwache Transponder erkennbar (siehe Tabelle 21). Die Unterschiede in den Leistungen und insbesondere die mittleren Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder weichen allerdings nicht in gleichem Maße voneinander ab wie im Fernfeld.

Dennoch ist ersichtlich, dass die als leistungsschwach gekennzeichneten Transponder aus den Fernfeldversuchen auch im Nahfeld Schwächen aufweisen. Als Beispiel seien hier insbesondere die Transponder 11, 12 und 24 des Transpondertyps 3 genannt.

**Tabelle 21: Leistungsschwache Transponder im Nahfeld unter günstigen Bedingungen**

	Neutraler Untergrund
<b>Transpondertyp 1</b>	6
<b>Transpondertyp 2</b>	2, 7, 15, 19, 20, 22, 25
<b>Transpondertyp 3</b>	1, 7, 11, 12, 21, 24, 25, 28
<b>Transpondertyp 4</b>	2, 25, 30
<b>Transpondertyp 5</b>	2, 6, 10, 12, 14, 22, 26
<b>Transpondertyp 6</b>	2, 7, 11, 16, 17, 21, 25, 30

### 7.2.1.2 Backscatter-Analyse

Die transponderbezogenen Unterschiede der rückgestrahlten Leistungen bei 27 dbm und einer Frequenz von 868 MHz sind im Nahfeld unter optimalen Bedingungen deutlich erkennbar. Der untersuchte Transpondertyp 4 ist im Mittel beispielsweise um den Faktor 25 schwächer als Transpondertyp 3. Auch Transpondertyp 1 weist im Nahfeld unter optimalen Bedingungen ein positives Leistungsbild auf.

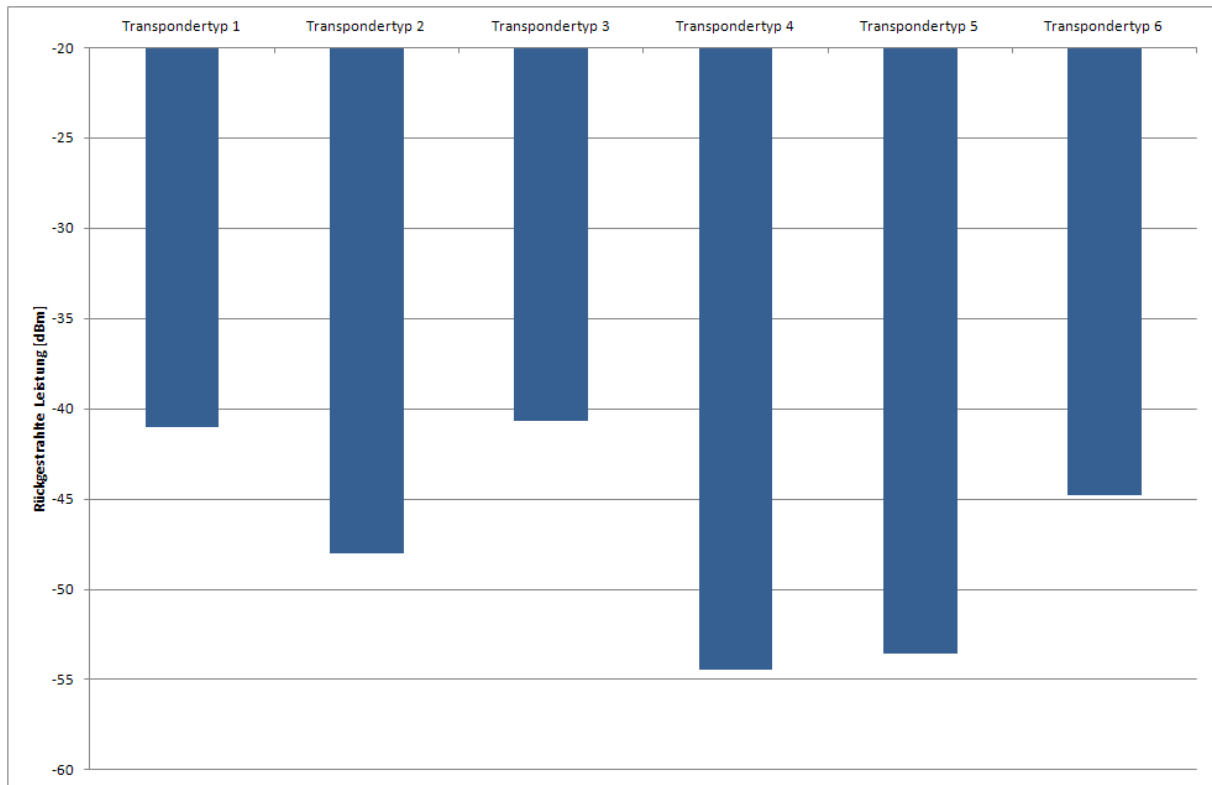
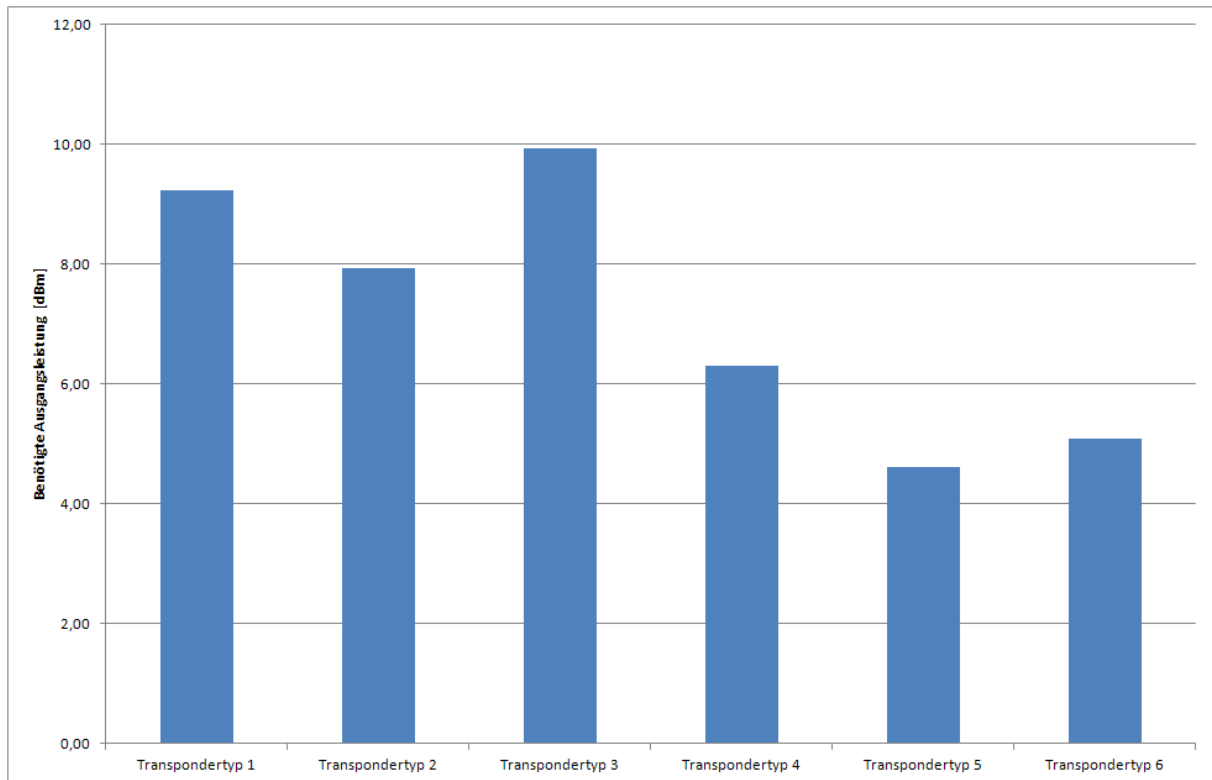


Abbildung 19: Rückgestrahlte Leistung nach Transpondertypen bei 27dBm Ausgangsleistung; günstige Bedingungen; Nahfeld

## 7.2.2 Moderate Bedingungen

### 7.2.2.1 Threshold-Sweep



**Abbildung 20: Benötigte Ausgangsleistungen zum Ansprechen der Transponder (Mittelwerte) bei 865 MHz unter moderaten Bedingungen im Nahfeld**

Die zuvor getätigten Aussagen über die Schwächen einzelner Transponder im Nahfeld unter günstigen Bedingungen treffen auch für die Untersuchungen unter moderaten Bedingungen zu. Auffällig ist allerdings, dass eine geringere Anzahl an Transponder als leistungsschwach anzusehen ist. Die besonders leistungsschwachen Transponder 11,12 und 24 des Typs 3 sind auch hier als schwach identifiziert worden.

**Tabelle 22: Leistungsschwache Transponder im Nahfeld unter moderaten Bedingungen**

	Neutraler Untergrund
<b>Transpondertyp 1</b>	-
<b>Transpondertyp 2</b>	4
<b>Transpondertyp 3</b>	6, 11, 12, 15, 24, 25
<b>Transpondertyp 4</b>	10, 18, 20
<b>Transpondertyp 5</b>	12, 13, 14
<b>Transpondertyp 6</b>	1, 5, 6, 7, 8, 9

### 7.2.2.2 Backscatter-Analyse

Abbildung 21 zeigt die Unterschiede der untersuchten Transpondertypen im Rahmen der Backscatter-Analyse unter moderaten Bedingungen im Nahfeld. So ist bspw. auf den ersten Blick ersichtlich, dass Transpondertyp 6 bei 27 dBm Ausgangsleistung und einer Frequenz von 868 MHz deutlich mehr Energie zurückstrahlt als bspw. Transpondertyp 2. Die Differenz zwischen diesen Typen beträgt 8 dB. Somit ist Transpondertyp 6 im Nahfeld um den Faktor 6,4 leistungsstärker als Transpondertyp 2. Immerhin um den Faktor 2 ist Transpondertyp 6 effizienter als Transpondertyp 3.

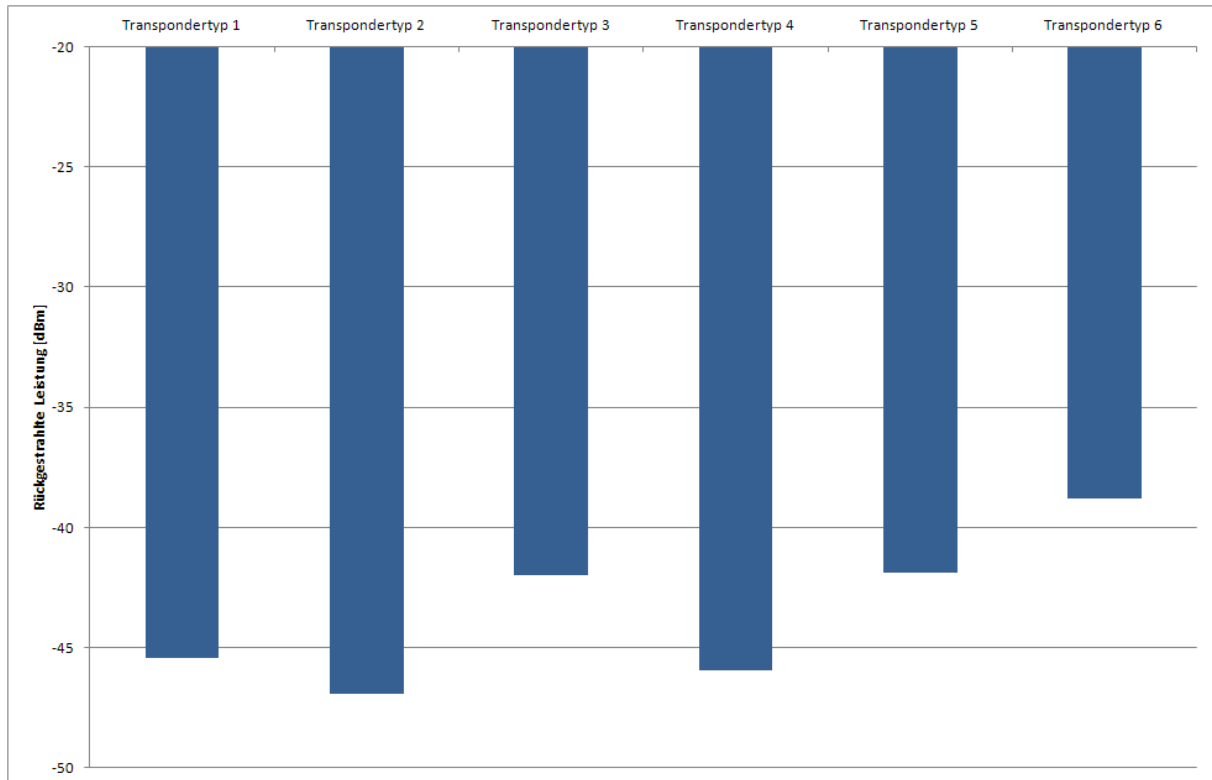


Abbildung 21: Rückgestrahlte Leistung nach Transpondertypen bei 27dBm Ausgangsleistung; moderate Bedingungen; Nahfeld



## 8 Entwicklung eines Übertragungsalgorithmus (Arbeitspaket 6)

### 8.1 Statistische Auswertung

Zu Beginn der Algorithmus-Entwicklung wurde zunächst mit einer Analyse bestehender Zusammenhänge der elektromagnetischen Wellentheorie begonnen, um die physikalischen Grundeigenschaften der Transpondertechnologie berücksichtigen zu können. Hierauf aufbauend wurden erste Überlegungen bzgl. der Bestimmung der rückgestrahlten Leistung im Fernfeld auf Basis eines Messergebnisses im Nahfeld angestellt, die anschließend anhand der durchgeführten Versuche überprüft wurden.

Wichtig war in diesem Zusammenhang vor allem die Berücksichtigung der Variablen:

- Reader-Leistung im Nahfeld
- Gewinn der Reader-Antenne im Nahfeld
- Reader-Leistung im Fernfeld
- Gewinn der Reader-Antenne im Fernfeld
- Parameter des Transponders

Insbesondere die Berücksichtigung der Transponderparameter gestaltet sich kompliziert, da die – aufgrund der physikalischen Zusammenhänge – relevanten Daten leider nicht für jeden Transponder frei verfügbar sind. Eben dieser Punkt wird in einer späteren Anwendung schwierig zu realisieren sein, da der Anwender bei einem Wechsel auf einen anderen Transpondertyp stets umfangreiche Kenntnisse über die Eigenschaften des Transponders erlangen muss.

In einem nächsten Schritt wurden die Rangfolgen der einzelnen Transponder betrachtet, da bei theoretischer Berücksichtigung der Thematik, ein Transponder mit sehr guter Leistung bezogen auf die Lesereichweite, ebenfalls sehr gute Leistungswerte in den Messungen des Nah- und Fernfeldes aufweisen muss. Dies trifft auf die durchgeführten Versuche nur bedingt zu. In einigen Fällen sind überhaupt keine Übereinstimmungen in der Rangfolge zu erkennen. Wesentlich ist allerdings, dass extrem schwache Transponder (bspw. Transpondertyp 3 Transponder 11 und 12) im Nahfeld und auch im Fernfeld schlecht oder garnicht auszulesen sind. Eine Bestimmung solcher Transponder mit schlechter Leistung ist somit möglich.

Von absoluter Relevanz ist allerdings die Differenz der Nahfeld- und Fernfeldmessergebnisse, die im Rahmen des Algorithmus relativiert werden muss. Aus diesem Grund wurde ein Hauptaugenmerk auf die Analyse der Differenzen zwischen eben jenen Werten gelegt. Hierzu wurden zunächst die Fernfeldergebnisse bei Verwendung eines neutralen Untergrundes unter moderaten Bedingungen von den Nahfeldergebnissen unter optimalen Bedingungen abgezogen. Da die Antennen in einem späteren Algorithmus variabel gehalten werden sollen, wurden bereits zu diesem Zeitpunkt die Antennengewinne der verwendeten Versuchsentennen heraus gerechnet. Anschließend wurden die Mittelwerte der einzelnen Transpondertypen ermittelt und als Grundlage für die zu schließende Differenz der Ergebnisse definiert. Zur Bildung der arithmetischen Mittelwerte wurden die Werte der logarithmischen Skala zunächst in mW transformiert. Anschließend wurde das arithmetische Mittel gebildet und eine Rücktransformierung durchgeführt.

Analog wurde die Differenzermittlung für die unterschiedlichen Untergründe unter moderaten Bedingungen durchgeführt. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Basis aus praktischen Gründen als realistischer anzusehen ist.

Ein großer Teil der statischen Auswertung wurde bereits in den Abschnitten 5 bis 7 enthalten. Dies betrifft insbesondere die Berechnung der arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen sowie die Identifikation von Transpondern, die um mehr als 20 % vom arithmetischen Mittel abweichen.

Die Analyse der statistischen Auswertungen hat ergeben, dass die Vorhersage der Fernfeldleistung für den Applikationsuntergrund „Kunststoffbehälter mit Schrauben“ nicht bzw. nur mit einer sehr hohen Ungenauigkeit möglich sein wird, da die Differenzen eine hohe Spannweite aufweisen. Aus diesem Grund wurde dieser Untergrund nicht weiter berücksichtigt.

## 8.2 Definition des Algorithmus‘

Auf Basis der statistischen Auswertung wurde zunächst ein weiterer Schritt integriert und die entfernungsabhängige Freiraumdämpfung berücksichtigt. Somit existiert nach Berücksichtigung der Freiraumdämpfung lediglich ein transponderabhängiger Faktor, der noch zu definieren ist. Hierzu werden erneut die Differenzen zwischen den bereinigten Nahfeld- und Fernfeldmessergebnissen zur rückgestrahlten Leistung untersucht. Die Mittelwerte der Differenzen der Messergebnisse bei Verwendung des neutralen Untergrundes bilden diese transponderabhängigen Faktoren  $k_T$ . Da diese transponderabhängigen Verfahren lediglich den optimalen aber unrealistischen Fall eines neutralen Untergrundes repräsentieren, wurde ein weiterer Schritt zur Ermittlung der Veränderungen der Messwerte bei Applikation des Transponders auf die unterschiedlichen Untergründe durchgeführt. Ergebnis dieses Schritts waren insgesamt 24 transponder- und untergrundabhängige Korrekturfaktoren  $k_A$ . Die Korrekturfaktoren umfassen die elektromagnetischen Eigenschaften eines jeden Transpondertyps, d. h. bspw. den Rückstreukoeffizienten und den Modulationsfaktor.

Tabelle 23: Transponder- und applikationsabhängige Korrekturfaktoren

	$k_T$	$k_A$			
		Dichtung	T-Shirt	Batterie	Schrauben Kartonage
Transpondertyp 1	14,71	-5,93	-2,05	-2,26	10,14
Transpondertyp 2	19,01	-3,13	-0,80	-6,83	0,93
Transpondertyp 3	19,51	-3,58	-1,61	-7,04	3,44
Transpondertyp 4	21,31	-4,20	-2,06	-2,39	4,53
Transpondertyp 5	23,45	-3,59	-0,85	-4,14	6,02
Transpondertyp 6	25,56	-2,20	-1,12	-11,64	3,96

Die zuvor bereits berücksichtigten Antennengewinne, die Freiraumdämpfung sowie die Korrekturfaktoren wurden im Anschluss in einen Algorithmus implementiert:

**Formel 1: Entwickelter Übertragungsalgorithmus zur Berechnung der rückgestreuten Leistung im Fernfeld**

$$BS_{fern} = BS_{nah} - 2 \cdot G_{nah} + 2 \cdot G_{fern} - 2 \cdot L - k_T - k_A$$

$BS_{fern}$  = Prognostizierter Wert der rückgestrahlten Leistung im Fernfeld [dBm]

$BS_{nah}$  = Ermittelte rückgestrahlte Leistung im Nahfeld [dBm]

$G_{nah}$  = Antennengewinn der verwendeten Nahfeldantenne [dBi]

$G_{fern}$  = Antennengewinn der zu verwendenden Antenne im Fernfeld [dBi]

$$L = \text{Freiraumdämpfung } L = 10 \cdot \log\left(\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda}\right)^2\right)$$

$r$  = Entfernung zwischen Antennen und Transponder im Fernfeld [m]

$\lambda$  = Wellenlänge bei 868 MHz = 0,34 m

$k_T$  = Korrekturfaktor des verwendeten Transponders

$k_A$  = Korrekturfaktor für den verwendeten Applikationsuntergrund

## 9 Verifizierung des Übertragungsalgorithmus (Arbeitspaket 7)

### 9.1 Vorgehensweise

Der Algorithmus wurde im Labor des IDH umfangreich verifiziert. Es wurden neben den kalibrierten Einstellungen des Voyantic Tagformance Lite Systems im Abstand von 50 cm diverse weitere Versuchsreihen durchgeführt, die einen größeren Abstand zwischen Transponder und Readerantenne aufweisen. Auf diesem Wege sollte nachgewiesen werden, ob der Faktor Distanz im Algorithmus ausreichend berücksichtigt wurde. Es wurden Messungen in einem Abstand von 100 cm, 150 cm und 300 cm durchgeführt. Um den Aufwand für diese Versuche zu begrenzen, wurden lediglich diejenigen Transponder-Inlays untersucht, die auch für die Lesereichweitenversuche sowie die Überprüfung der Pulklesefähigkeit verwendet wurden.

Zudem wurden diese Versuche durch eine Versuchsreihe mit einem handelsüblichen Reader ergänzt. Der FEIG-Reader (Spezifikationen siehe untenstehende Tabelle) wurde an die Antennen des Voyantic-Systems angeschlossen und es wurde in einem Abstand von 4 m die rückgestrahlte Leistung der Transponder ermittelt. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Ausgangsleistungen gewählt.

### 9.2 Ergebnisse

Bei den Versuchen wurde offenbart, dass der Algorithmus bei Entfernungen zwischen Transponder und Antenne, die größer als 50 cm sind, die Fernfeldleistung zu ungenau berechnet. Anhand der Differenzen zwischen den prognostizierten und tatsächlich gemessenen rückgestrahlten Leistungswerten ist erkennbar, dass neben der berücksichtigten Freiraumdämpfung ein weiterer entfernungsabhängiger Faktor existieren muss. Auf Basis der Ergebnisse wurde dieser Faktor als  $k_r = 10 \cdot \log(r/0,43)$  definiert. Die Definition dieses Faktors hatte eine erneute Überarbeitung der transponder- und untergrundabhängigen Korrekturfaktoren  $k_T$  und  $k_A$  zur Folge (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24: Angepasste transponder- und applikationsabhängige Korrekturfaktoren

	$k_T$	$k_A$			
		Dichtung	T-Shirt	Batterie	Schrauben Kartonage
Transpondertyp 1	15,36	-5,93	-2,05	-2,26	10,14
Transpondertyp 2	19,66	-3,13	-0,80	-6,83	0,93
Transpondertyp 3	20,16	-3,58	-1,61	-7,04	3,44
Transpondertyp 4	20,62	-2,86	-0,72	-1,05	5,88
Transpondertyp 5	24,11	-3,59	-0,85	-4,14	6,02
Transpondertyp 6	26,22	-2,20	-1,12	-11,64	3,96

In den Algorithmus wird der neu definierte entfernungsabhängige Korrekturfaktor wie folgt integriert:

**Formel 2: Korrigierter Übertragungsalgorithmus zur Berechnung der rückgestreuten Leistung im Fernfeld**

$$BS_{fern} = BS_{nah} - 2 \cdot G_{nah} + 2 \cdot G_{fern} - 2 \cdot L - k_T - k_A - k_r$$

$BS_{fern}$  = Prognostizierter Wert der rückgestrahlten Leistung im Fernfeld [dBm]

$BS_{nah}$  = Ermittelte rückgestrahlte Leistung im Nahfeld [dBm]

$G_{nah}$  = Antennengewinn der verwendeten Nahfeldantenne [dBi]

$G_{fern}$  = Antennengewinn der zu verwendenden Antenne im Fernfeld [dBi]

$$L = \text{Freiraumdämpfung } L = 10 \cdot \log\left(\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda}\right)^2\right)$$

$r$  = Entfernung zwischen Antennen und Transponder im Fernfeld [m]

$\lambda$  = Wellenlänge bei 868 MHz = 0,34 m

$k_T$  = Korrekturfaktor des verwendeten Transponders

$k_A$  = Korrekturfaktor für den verwendeten Applikationsuntergrund

$k_r$  = Korrekturfaktor für die Entfernung zwischen Transponder und Antenne

Erneute Versuche zur Verifizierung des angepassten Algorithmus ergaben eine Genauigkeit von 0,5 db bei einer Entfernung von 50 cm zwischen Antenne und Transponder. Bei einer Entfernung von 300 cm zwischen Antenne und Transponder beträgt die Genauigkeit noch ca. 1 bis 2 db.

## 10 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel des Projektes bestand in der Entwicklung eines Verfahrens zur Detektion von Effizienzmängeln bei UHF-Transpondern mittels Analyse der spektralen Antwortcharakteristik im Nahfeld.

Hierzu wurde zunächst die Basis des Projektes bestimmt. In einem ersten Schritt wurden die zu betrachtenden Anwendungsfelder der UHF-RFID-Technologie definiert (Kapitel 3.1) und die dort üblicherweise eingesetzten RFID-Transponder ermittelt (Kapitel 3.2). Diese Basis bildete die Grundlage für die Definition der relevanten Effizienzparameter (Kapitel 3.3) sowie die Ermittlung geeigneter Testverfahren (Kapitel 3.4) zur Erreichung des Projektziels. In diesem Zusammenhang wurde Wert auf die Verwendung normierter Testverfahren gelegt, um die Versuchsreihen reproduzierbar zu gestalten.

Grundlage für die folgenden Versuchsreihen war die softwaretechnische Simulation der elektromagnetischen Eigenschaften der ausgewählten RFID-Transponder (Kapitel 4). Die definierten Testverfahren wurden anschließend im Fernfeld unter günstigen (Kapitel 5) und moderaten (Kapitel 6) Bedingungen angewendet. Um einen Vergleich zwischen Fern- und Nahfeld durchführen zu können, wurden die Testverfahren anschließend analog im Nahfeld angewandt (Kapitel 7).

Auf Basis der Versuche wurde im Anschluss durch statistische Auswertung der Ergebnisse ein Übertragungsalgorithmus entwickelt (Kapitel 8) und verifiziert (Kapitel 9). Der entwickelte Algorithmus umfasst dabei die Aufnahme der rückgestreuten Leistung im Nahfeld und die Berücksichtigung der Antennengewinnfaktoren im Nahfeld sowie für den späteren Einsatz im Fernfeld, die prinzipiell auftretende Freiraumdämpfung, einen weiteren Korrekturfaktor für die Entfernung sowie Korrekturfaktoren für den verwendeten Transponder und den Applikationsuntergrund.

Der entwickelte Algorithmus bietet somit eine simple und kostengünstige Möglichkeit, die Leistung im Fernfeld vorherzusagen, Effizienzmängel bereits vor der Applikation zu erkennen und ggf. Transponder auszusortieren. Über bereits bestehende Formeln lassen sich zudem Rückschlüsse auf die zu erwartende Lesereichweite ziehen. Aufgrund verschiedener Restriktionen ist die Genauigkeit hierbei allerdings unter Umständen begrenzt. Dies trifft insbesondere auf die zur Verwendung des Algorithmus' notwendigen Basismessungen zur Bestimmung der Korrekturfaktoren zu. Aufgrund der nicht öffentlich zugänglichen Daten der Transponder ist es allerdings nicht möglich, einen alternativen Weg zu beschreiten. Des Weiteren ist es fraglich, ob der Transponder stets optimal zur Antenne ausgerichtet ist. Eine gewisse Ungenauigkeit ist somit stets gegeben und kaum berechenbar. Diese Ungenauigkeit trifft allerdings auch auf andere am Markt verfügbare Verfahren zu.

Aus diesen Gründen ist es unerlässlich, einen Toleranzbereich zu schaffen, der diese Unsicherheiten im realen Betrieb ausgleicht. Im Anwendungsfall würde dies bedeuten, dass der zu nutzende Transponder stets für den schlechtesten Fall ausgelegt wird. Die Folge dieser Methodik ist zwar, dass der Transponder für optimale Begebenheiten überdimensioniert ist, allerdings lässt er sich stets sicher auslesen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Ziel des Projektes trotz der physikalischen Restriktionen vollumfänglich erreicht werden konnte.

## **11 Veröffentlichungen und Vorträge**

### **11.1 Veröffentlichungen**

Lanfer, S.; Loges J.: Qualitätssicherung für RFID-Transponder

Packreport 4/2011, S. 94-97, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main

Jansen, R.; Lanfer, S.: Effizienzschwächen von UHF-Transpondern

Ident Jahrbuch 2012, S. 118-121, Ident Verlag, Dortmund

Lanfer, S.:

UHF-RFID im operativen Lagerwesen – Einsatzmöglichkeiten und Herausforderungen

AUTO-ID Logistik & Produktion 02/2012 in Staplerworld Juli 2012, TechTex-Verlag, Budenheim

Lanfer, S.:

Detektion von Effizienzmängeln bei UHF-Transpondern

AIM Newsletter September 2012

### **11.2 Vorträge**

Lanfer, S.:

Folgen auftretender Effizienzmängel bei RFID-Transpondern

CeMAT 2011, Forum „Auto-ID in der Verpackungslogistik“, Hannover, 02.05.2011

## 12 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der Ergebnisse für KMU

Tabelle 25: Technische und wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Nutzer	Erfolgsaussichten		Zeithorizont, bis die Wirkung einsetzt
	Technisch	Wirtschaftlich	
<b>Hersteller von RFID-Testgeräten</b>	Hoch	Hoch	1 bis 2 Jahre
<b>Hersteller von RFID-Komponenten, insbesondere Transponder</b>	Hoch	Mittel	1 bis 3 Jahre
<b>Hersteller von Etikettendruckern / -Applikatoren</b>	Hoch	Hoch	1 bis 4 Jahre
<b>Endkunden</b>	Mittel	Hoch	1 bis 4 Jahre

Den Hauptnutzen aus den Projektergebnissen ziehen Hersteller von RFID-Testgeräten für Endkunden. Diese können innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes den Algorithmus in ihre Testsysteme integrieren und kurzfristig auf dem Markt anbieten. Aufgrund der bereits in Kapitel 10 dargestellten Restriktionen sind zunächst allerdings Weiterentwicklungen des Algorithmus' in Bezug auf die Readerabhängigkeit nötig. Hersteller von RFID-Komponenten, insbesondere von Transpondern, können die Projektergebnisse ebenfalls kurzfristig einsetzen. Diese werden die Projektergebnisse technisch schnell umsetzen können, wirtschaftlich wird sich dieser Einsatz jedoch nicht sofort und in gleicher Höhe rechnen wie bei den Herstellern der Testsysteme. Käufer von Transpondern werden erst mit Verzögerung darauf reagieren, dass die von Ihnen erworbenen Transponder durch das Testverfahren leistungsfähiger bzw. -angepasster gefertigt sind und dieses – wenn überhaupt –erst verzögert honorieren.

Für Hersteller von Etikettendruckern bzw. -applikatoren wird sich der wirtschaftlich-technische Erfolg bereits nach kurzer Zeit einstellen. Sobald Testsysteme durch die Hersteller verfügbar sind, werden diese in die Etikettendrucker integriert. Da für Etikettendrucker bereits ein Markt existiert und der Bedarf für eine Transponderverifikation mit steigendem Einsatz von RFID-Systemen ebenfalls ansteigt, wird sich hier der Erfolg schnell einstellen. Letztendlich kann auch der Endkunde auf die mit den Projektergebnissen ausgestatteten Systeme zurückgreifen und dementsprechend schnell von den Ergebnissen profitieren.

Es ist allerdings offensichtlich, dass die Projektergebnisse in Konkurrenz zu anderen in der Zwischenzeit entwickelten Systemen stehen und sich mit diesen messen lassen müssen. Die während der Projektlaufzeit entwickelten Systeme zur In-Line-Verifikation von Transpondern verfolgen ähnliche Ziele wie das abgeschlossene Projekt, verwenden hierzu allerdings eine andere für einige Anwendungsfälle durchaus praktikable Vorgehensweise. Dennoch bieten die Projektergebnisse erstmals eine mathematische Möglichkeit zur Vorhersage der Fernfeldleistung mittels der Analyse von Messergebnissen im Nahfeld.

## Literaturverzeichnis

- [1] Jansen, R., Grzib, M.: *RFID-basierte Waresicherung*. In: ident , S. 54-55, Ausgabe: 02/2011
- [2] operational services GmbH & Co. KG: *RFID Fashion made in Westfalen*. In: ident , S. 36-37, Ausgabe: 07/2010
- [3] Avery Dennison Central Europe GmbH: *Waresicherung und Bestandsmanagement*. In: ident , S. 34-35, Ausgabe: 01/2010
- [4] Kandel, D.: *RFID en vogue*. In: RFID im Blick , S. 38, Ausgabe: 03/2011
- [5] Kandel, D.: *S.Oliver schließt Pilottest ab*. In: RFID im Blick , S. 38-39, Ausgabe: 02/2011
- [6] *Finish tools supplier Würth updates ist RFID system*. In: RFID im Blick , S. 10, Ausgabe: 07/08/2010
- [7] Ihm, E., Vogeler, S.: *RFID-gestütztes Motorladungsträgermanagement*. In: RFID im Blick , S. 42-43, Ausgabe: 02/2010
- [8] inotec Barcode Security GmbH: *RFID Lösungen für das Behältermanagement*. In: ident , S. 32, Ausgabe: 01/2011
- [9] Wessel, R.: *Iveco to Expand RFID System for Managing Replacement Parts*. Internet: <http://www.rfidjournal.com/article/view/7352/1> , Abruf: 14. September 2012
- [10] O'Connor, M. C.: *Volkswagen de Mexico Employing RFID to Improve Parts Distribution*. Internet: <http://www.rfidjournal.com/article/view/4908> , Abruf: 14. September 2012
- [11] Centre for Retail Research: *Das globale Diebstahlbarometer 2011*. Internet: <http://www.checkpointsystems.de/images/cont/news/diebstahlbarometer-5.pdf> , Abruf: 16. Oktober 2012
- [12] Bartneck, N. et al.: *Prozesse optimieren mit RFID und Auto-ID*. Erlangen, Publicis Corporate Publishing, 2008
- [13] *ISO/IEC 18046-3:2007: Information technology – Radio frequency identification device performance test methods – Part 3: Test methods for tag performance*. Berlin: Beuth Verlag.
- [14] Gillert, F., Hansen, W.: *RFID für die Optimierung von Geschäftsprozessen*. München Wien, Carl Hanser Verlag, 2007
- [15] Kern, C.: *Anwendung von RFID-Systemen*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006
- [16] Gilberg, J.: *Electronic Commerce: Technische Ausgestaltung und wirtschaftliche Beurteilung des überbetrieblichen RFID-Einsatzes*. (Bd. 39). (NorbertNorbert et al., Hrsg. ) Lohmar Köln, Josef Eul Verlag, 2009
- [17] Finkenzeller, K.: *RFID Handbuch*. München Wien, Carl Hanser Verlag, 2006



- [18] ten Hompel, M., Heidenblut, V.: *Taschenlexikon Logistik*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011
- [19] *ISO/IEC 18000-6:2010-12: Information technology - Radio frequency identification for item management - Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz*. Berlin: Beuth-Verlag.
- [20] *ISO/IEC TR 18047-6:2011: Information technology -- Radio frequency identification device conformance test methods -- Part 6: Test methods for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz*. Berlin: Beuth Verlag.
- [21] Verein Deutscher Ingenieure (2008). *VDI 4472 Blatt 10: Anforderungen an Transpondersysteme zum Einsatz in der Supply Chain - Testverfahren zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Transpondersystemen (RFID)*. Berlin: Beuth Verlag.
- [22] Impinj, Inc.: *Monza 3 Datasheet*. Internet:  
[http://www.impinj.com/Documents/Tag\\_Chips/Monza\\_3\\_Tag\\_Chip\\_Datasheet/](http://www.impinj.com/Documents/Tag_Chips/Monza_3_Tag_Chip_Datasheet/), Abruf: 13. April 2011
- [23] Impinj, Inc.: *Monza 4 RFID Tag Chips Datasheet*. Internet:  
[http://www.impinj.com/Documents/Tag\\_Chips/Monza\\_4\\_Tag\\_Chip\\_Datasheet/](http://www.impinj.com/Documents/Tag_Chips/Monza_4_Tag_Chip_Datasheet/), Abruf: 13. April 2011
- [24] NXP Semiconductors: *SL3S1203\_1213*. Internet:  
[http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/SL3S1203\\_1213.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SL3S1203_1213.pdf), Abruf: 11. September 2012
- [25] KATHREIN-Werke KG (2011). *RFID UHF Antennas Low Range and Ultra Low Range - Application Notes*. Rosenheim.