

Technical Report SFB637-B6-07-3 (2.11.2007)

Technische Grenzen des Einsatzes von UHF Identifikationssystemen (RFID) im Lebensmittelbereich

Reiner Jedermann und Walter Lang

1. Einleitung

Label zur Radio Frequency Identification kurz RFID werden zunehmend im Lebensmittelbereich eingesetzt. Große Ketten wie Walmart und Metro fordern von ihren Zulieferern Paletten oder Transportgebände mit RFID-Labeln oder -Tags zu kennzeichnen.

Um den Nutzen dieser Technologie zu erhöhen, ist es wünschenswert, neben einer eindeutigen Identifikationsnummer, Zusatzinformationen auf dem Tag zu speichern, wie Daten zur Transportgeschichte und Haltbarkeit des Produktes. Dieser Mehrwert trägt dazu bei, den Preisnachteil gegenüber dem Barcode auszugleichen.

1.1. Kombination mit Temperaturdaten

Lebensmittel als leichtverderbliche Güter werden insbesondere durch Temperaturabweichungen beeinflusst. Eine weitere Entwicklung ist es daher, die Identifikationstechnologie mit der Messung und Aufzeichnung der Temperaturgeschichte des Produktes zu verknüpfen.

Zur Kombination von RFID mit Sensoren bieten sich prinzipiell zwei Möglichkeiten:

- Bei Semi-passiven Tags ist der Sensor in den RFID-Tag integriert. Um auch in Abwesenheit eines Readers Temperaturdaten aufzeichnen zu können, wird der Sensor durch eine Batterie versorgt. Die (Temperatur-) Daten werden auf dem Tag gespeichert und können beim Entladen der Ware über die RFID Schnittstelle ausgelesen werden.
- Identifikation und sensorische Überwachung werden durch getrennte Hardware realisiert. Während des Transportes zeichnet das Fahrzeug Umgebungsparameter durch ein geeignetes Sensorsystem oder -netz auf. Beim Verladen der Ware werden die Daten auf den Tags aktualisiert. Parameter wie die durchschnittliche oder maximale Temperatur während des Transportes werden auf den Tag geschrieben.

1.2. Probleme des Einsatzes im Lebensmittelbereich

Das Auslesen des Tags geschieht über ein magnetisches oder elektromagnetisches Feld. Ein besonderes Problem beim Einsatz von RFID im Lebensmittelbereich ist die Dämpfung hochfrequenter elektromagnetischer Felder durch Feuchtigkeit. Dabei kann es sich um in der Ware enthaltenes Wasser oder die Luftfeuchtigkeit handeln.

Systeme zur automatischen Warenverfolgung erfordern es, sämtliche Umladevorgänge per RFID zu erfassen. Dies geschieht in der Regel an bewegter Ware, beispielsweise bei Durchfahrt eines Gabelstaplers durch ein Reader-Gate. Während der Durchfahrt befindet sich die Ware nur eine oder wenige Sekunden im Lesebereich des Readers. Es muss je nach Anwendung geprüft werden, ob sämtliche Daten innerhalb dieser Zeitspanne von den Tags gelesen werden können. Eine Verzögerung des Ladevorgangs würde in der Praxis kaum akzeptiert werden.

1.3. Einteilung aus Auswahl von RFID Systemen

RFID Systeme werden nach dem verwendeten Frequenzbereich eingeteilt. Hochfrequenz (HF) Tags nutzen das Band bei 13.56 MHz. Im Ultrahochfrequenzband (UHF) werden regional unterschiedliche Bereiche genutzt. Für Europa ist dies der Bereich von 865 MHz bis 868 MHz. In den USA steht ein wesentlich breiteres Frequenzband von 902 MHz bis 928 MHz zur Verfügung.

In der Regel handelt es sich bei RFID um batterie lose passive Systeme. Der RFID-Tag bezieht die für die Kommunikation notwendige Energie aus dem elektro-magnetischen Feld des Lesegerätes. Aktive Systeme können wesentlich höhere Reichweiten erzielen, kommen aber aufgrund des deutlichen höheren Preises und der benötigten Batterien für die Verfolgung von Stückgütern nicht in Frage.

1.4. Nah- und Fernfeld

Des Weiteren muss zwischen Kopplung im Nah- und Fernfeld unterschieden werden. Magnetische Kopplung im Nahfeldbereich zeigt nur eine geringe Empfindlichkeit gegenüber leitfähigen Materialien. Nachteilig ist jedoch die geringe Reichweite des magnetischen Feldes. Die Feldstärke fällt mit der dritten Potenz des Abstandes, die übertragene Energie mit der sechsten Potenz. Ab einer bestimmten Entfernung geht das magnetische Nahfeld in eine Welle über. Für Antennen, die deutlich kleiner sind als die Wellenlänge (λ), ergibt sich die Grenze des Nahfeldes (r_n) zu [Lec05]:

$$r_n = \lambda/2\pi$$

Für den HF Bereich bei 13.56 MHz mit einer Wellenlänge von 22m ergibt sich eine maximale Reichweite von 3.5 m.

Im UHF-Bereich liegen die Abmessungen der Antenne (D) und die Wellenlänge ($\lambda = 0.34$ m) in derselben Größenordnung. Die Grenze des Nahfeldes kann in diesem Fall entsprechend der folgenden Gleichung abgeschätzt werden [Nik07 und Lec05]:

$$r_n \sim 2D^2/\lambda$$

Für einen Antennendurchmesser von 0.3 m ergibt sich die maximale Ausbreitung des Nahfeldes zu 0.5 m. An den Rändern dieses Bereiches fällt die Feldstärke jedoch sehr stark ab.

Insbesondere vom Hersteller Impinj [Imp06] werden spezielle UHF-Tags und Reader angeboten, die das Nahfeld nutzen. Diese werden erfolgreich eingesetzt, um z.B. Pharmaprodukte in Boxen zu identifizieren. Da beim Beladen von Fahrzeugen oder Containern der Leseabstand größer als 50 cm ist, kommen Nahfeld-Effekte in diesen Applikationen nicht zum Tragen.

1.4.1. Anwendung zur Überwachung von Transportprozessen

Ein wesentliches Kriterium zur Auswahl von RFID Systemen zur Überwachung von Transportprozessen ist deren Fähigkeit zur gleichzeitigen Erkennung einer Vielzahl von Tags, der Pulkerfassung. Eine Überlagerung oder Kollision der Signale verschiedener Tags muss dabei durch geeignete Protokolle vermieden werden.

Das EPC Class 1 Generation 2 oder kurz Gen-2 Protokoll für den UHF-Bereich bietet derzeit die beste Lösung zur Kollisionsvermeidung. Weitere Vorteile des UHF Bereichs sind die insgesamt höhere Reichweite und die höhere Datenübertragungsrate. Die folgenden Untersuchungen beziehen sich daher auf passive UHF Gen-2 Tags im Fernfeldbereich.

1.5. Verfügbare Hardware

UHF RFID Reader werden von zahlreichen Herstellern angeboten. Die meisten derzeit angebotenen EPC Gen-2 Tags stellen jedoch lediglich 96 Bit Speicher für den Produktcode bereit. Bislang werden nur von NXP Chips mit 28 Byte zusätzlichen User Memory angeboten [NXP06]. Diese werden von verschiedenen Herstellern in Tags oder bedruckbare Etiketten integriert.

Semi-passive Labels zur Temperaturoaufzeichnung gibt es bisher nur im HF-Bereich. Hier sind insbesondere die Turbo-Tags [Tur06] von Sealed Air zu nennen, die den VarioSens Chip von KSW

Microtec verwenden. Diese können 700 Temperaturwerte mit einer Auflösung von je 10 Bit speichern. Insgesamt stehen 1 kByte EEPROM zur Verfügung.

Eine Ausnahme bildet der diskret aufgebaute A927 Temperatur Logger UHF Semi-Passive Tag von Caen RFID [A927]. Dieser misst die Temperatur in Intervall von 6 Sekunden. Die Daten können über ein UHF-RFID Interface ausgelesen werden. Eine Single-Chip Lösung ist derzeit nicht verfügbar.

1.6. Ziele dieser Studie

Die Anwendung von RFID im Lebensmittelbereich stellt zusätzliche Anforderungen an das Identifikationssystem. Zum einen ist dies die höhere Datenmenge durch Zusatzdaten wie Temperaturinformationen. Zum anderen muss die Felddämpfung durch die in der Ware enthaltene Feuchtigkeit berücksichtigt werden. Ziel dieser Studie ist es eine messtechnische Abschätzung vorzunehmen, die zeigt in welchem Maße die Einsatzmöglichkeiten von UHF RFID im Lebensmittelbereich durch diese Faktoren eingeschränkt werden.

In Abschnitt 2 wird ermittelt mit welcher Zuverlässigkeit Tags in Inneren der Ware identifiziert und beschrieben werden können. Als Beispiel wurde ein Stapel mit 4 Mineralwasserkästen gewählt.

Im dritten Abschnitt wird die Dauer der Datenübertragung für die Protokolle zur Identifizierung sowie dem Lesen und Schreiben des Zusatzspeichers ermitteln.

Der Einfluss einer erhöhten Luftfeuchtigkeit, wie sie u.a. beim Transport von frischen Früchten auftritt wird im vierten Abschnitt durch Messungen in einer Klimakammer abgeschätzt.

2. Erforderliche Readerleistung für sichere Identifikations- und Schreibvorgänge

Der praktische Einsatz von RFID zur Warenverfolgung erfordert eine sichere Erkennung der Tags mit einer Erfassungsrate von nahezu 100%. Dieser Abschnitt soll klären, inwieweit dies auch unter den besonderen Randbedingungen von Lebensmitteln erreicht werden kann, wie der Dämpfung des Feldes durch Flüssigkeiten und dem Lesen und Schreiben von Zusatzdaten.

Die Sicherheit des Datenzugriffes hängt im Wesentlichen vom elektromagnetischen Kopplungsfaktor zwischen Reader und Tag ab. Die Kopplung wird von Abstand, räumlicher Ausrichtung des Tags und Materialien zwischen Reader und Tag beeinflusst.

Eine schlechtere Kopplung kann durch Erhöhung der Sendeleistung ausgeglichen werden. Im Folgenden wurde die Ansprechschwelle der Tags bei Anbringung an der Warenoberfläche und innerhalb von Transportgebinden experimentell bestimmt, d.h. der Sendeleistung ab der die Datenübertragung in annähernd 100% der Fälle erfolgreich ist. Die Ansprechschwellen für die Identifikation und das Schreiben von Daten wurden separat ermittelt.

2.1. Überblick über vorhandene Studien

Die vergleichende Arbeit von Roth [Rot07] listet 6 Untersuchungen zu Erkennungsraten auf. Diese Studien beschreiben Versuche zur Identifikation von an Transportboxen angebrachten UHF Tags. Drei der Arbeiten [Bun05, Cla06 und Weh06] betrachten auch den Einfluss von Wasser auf die Erkennungsrate. Von Clarke et.al. [Cla06] wurden die ausführlichsten Untersuchungen zur Lesbarkeit von mit Lebensmitteln gefüllten Kartons durchgeführt. Eine Palette wurde mit 48 Kartons mit jeweils 12 leeren Wasserflaschen bepackt. Tags auf der dem Reader zugewandten Seite konnten zu 100% gelesen werden, Tags im Inneren der Palette zu 97.0%. Bei gefüllten Wasserflaschen konnten nur 0.8% der inneren Tags gelesen werden. Für die Außenseite reduzierte sich die Leserate auf 67.0%. Bei einer Wiederholung des Versuchs mit Reis in Kunststoffdosen ergab eine Leserate von 99.7% außen und 60.5% innen.

Die genannten Studien beschränken sich aber auf die Identifikation der Tags, das Lesen und Schreiben des Zusatzspeichers wurde nicht betrachtet. Es wurden daher im Rahmen dieser Studie zusätzliche Messungen durchgeführt.

2.2. Versuchsaufbau

Um reproduzierbare Versuchsbedingungen zu erhalten, wurden als Ware 1 Liter Mineralwasser Kunststoffflaschen in Normkästen gewählt. Innerhalb eines Stapels aus 4 Kästen wurden 20 NXP EPC Gen-2 Tags mit 28 Byte Zusatzspeicher auf die unteren beiden Kästen verteilt (Bild 1). Je 4 Tags wurden hinter der ersten, zweiten und dritten Flaschenreihe jeweils an den Halsen angebracht. 6 Tags wurden an der Vorderseite der Kästen befestigt. Zwei weitere Tags befanden sich in der unteren Hälfte der Kästen zwischen der ersten und zweiten Flaschenreihe. Als Reader wurde das UHF-System LRU2000 von Feig Electronic verwendet. Die im Versuch verwendeten Materialien sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: In Versuch verwendete Geräte und Materialien

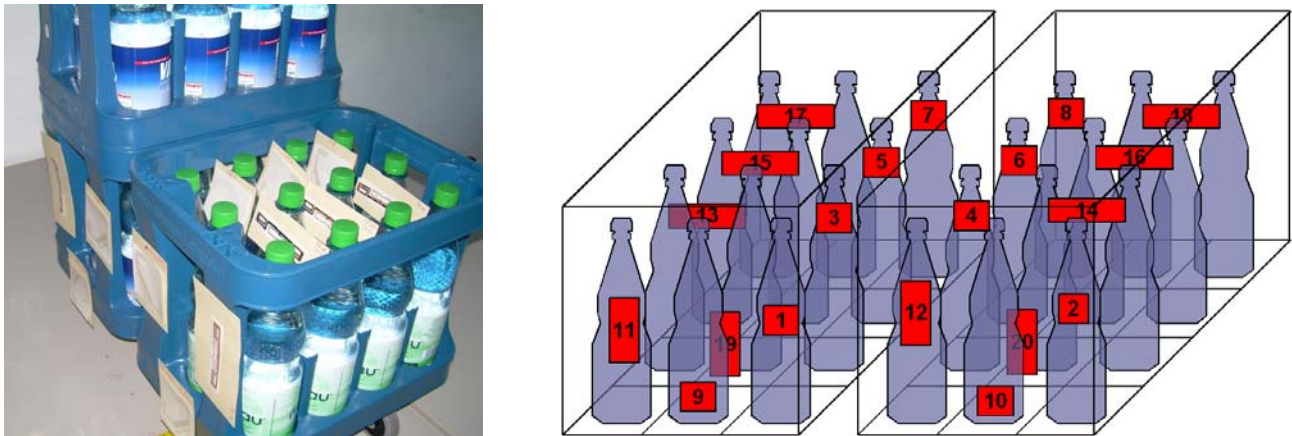
Gerät/ Material	Hersteller/ Vertrieb	Bezeichnung	Größe / Beschreibung
Reader	Feig Electronic	Obid ISC.LRU 2000	Long Range UHF Reader, Firmware Version 93 ID ISC.LRU2000
Antenne	Feig Electronic	ISC.ANTU 250/250	Gewinn 8.8 dBi, zirkular polarisiert
Tags	TagNology	NXP Ryparian Label und NXP Spyder Label	75mm * 75 mm bzw. 19mm * 98 mm EPC Gen-2, 244 Bit / 28 Byte UserMemory
Ware	Vilsa Brunnen	Getränkenormkasten ,Deutscher Mineralbrunnen'	12 Flaschen je 1 Liter in 30 cm * 40 cm * 31.5 cm Höhe, Volumenanteil Wasser 31.7%

2.2.1. Abstände und Position der Ware

Es wurden zwei Versuchsreihen mit einem Abstand zwischen Vorderkante der Kästen und der Reader Antenne von 50 cm und 1 Meter durchgeführt. Um eine Bewegung der Ware zu simulieren wurde die Ware parallel zur Antennenfläche um -15 cm, 0 cm und +15cm verschoben. Aus diesen drei Verschiebepositionen wurden jeweils 5mal je Leistungsstufe versucht die Tags zu identifizieren und zu beschreiben.

Mittels eines Inventory-Befehls wurde zunächst versucht den Produktcode (EPC) aller Tags mit einer Länge von 96 Bit entsprechend 12 Byte zu lesen. Für die identifizierten Tags wurde versucht einen zufälligen Wert in den 28 Byte großen Zusatzspeicher zu schreiben. Anschließend wurden die geschriebenen Werte wieder ausgelesen und verglichen.

Bild 1: Platzierung der Tags



2.2.2. Sendeleistung

Während des Versuchs wurde die Sendeleistung von 100 mW bis 1300 mW in Stufen von 100 mW variiert. In Europa ist im UHF Band eine maximale effektive Strahlungsleistung von 2 Watt ERP (effective radio power) zulässig, bezogen auf eine $\lambda/2$ Dipolantenne. Um die im Versuch abgestrahlte Leistung zu ermitteln müssen zusätzlich Kabelverluste, der Antennengewinn, ein Korrekturfaktor für zirkulare Polarisierung und ein Umrechnungsfaktor von Dipolantennen auf Isotropstrahler berücksichtigt werden. Aus Addition der Werte in Tabelle 2 ergibt sich, dass 1 Watt Readerleistung einer abgestrahlten Leistung von 2 Watt ERP entspricht.

Tabelle 2: Umrechnung von Reader in abgestrahlte Leistung

Ausgangsleistung des Readers	1000 mW
Umrechnung mW in dBm	30,0 dBm
Kabelverlust 2m	-0,6 dBm
Antennengewinn laut Datenblatt	8,8 dBm
Korrektur für zirkulare Polarisierung	-3,0 dBm
Umrechnung auf Isotropenstrahler	-2,1 dBm
Summe = effektive Strahlungsleistung ERP	33,1 dBm
Umrechnung dBm in mW	2037 mW

2.3. Ergebnisse

Die Häufigkeit erfolgreicher Identifikations- und Schreibvorgänge wurden je Tag gezählt und in Gruppen entsprechend des Abstandes des Tags zur Vorderseite der Kiste zusammengefasst. Die drei Verschiebepositionen wurden in zwei Varianten ausgewertet: Zunächst wurde der Mittelwert der Erkennungsraten der drei Positionen errechnet. In der zweiten Variante wurde der jeweils beste Wert eines Tags übernommen, d.h. sobald er in einer der drei Positionen identifiziert oder geschrieben wurde, galt er als erkennbar bzw. schreibbar. Bild 2 und 3 zeigen die Ergebnisse für einen Leseabstand von 50cm und 1 Meter. Aufgetragen sind die ermittelten Identifikations- und Schreibraten in den beiden Varianten in Abhängigkeit von der Leistung des Lesegerätes.

Bild 2: Ermittelte Identifikations- und Schreibraten für einen Abstand von 50 cm

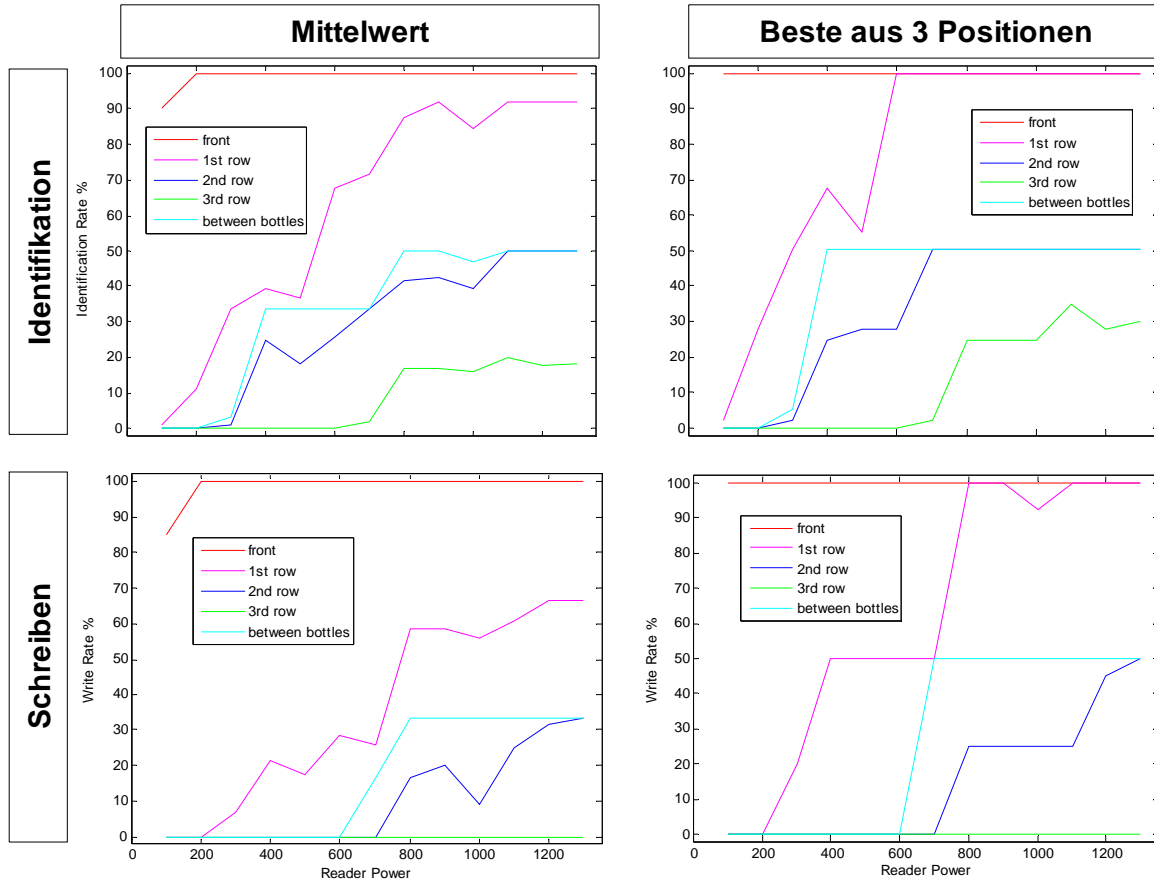
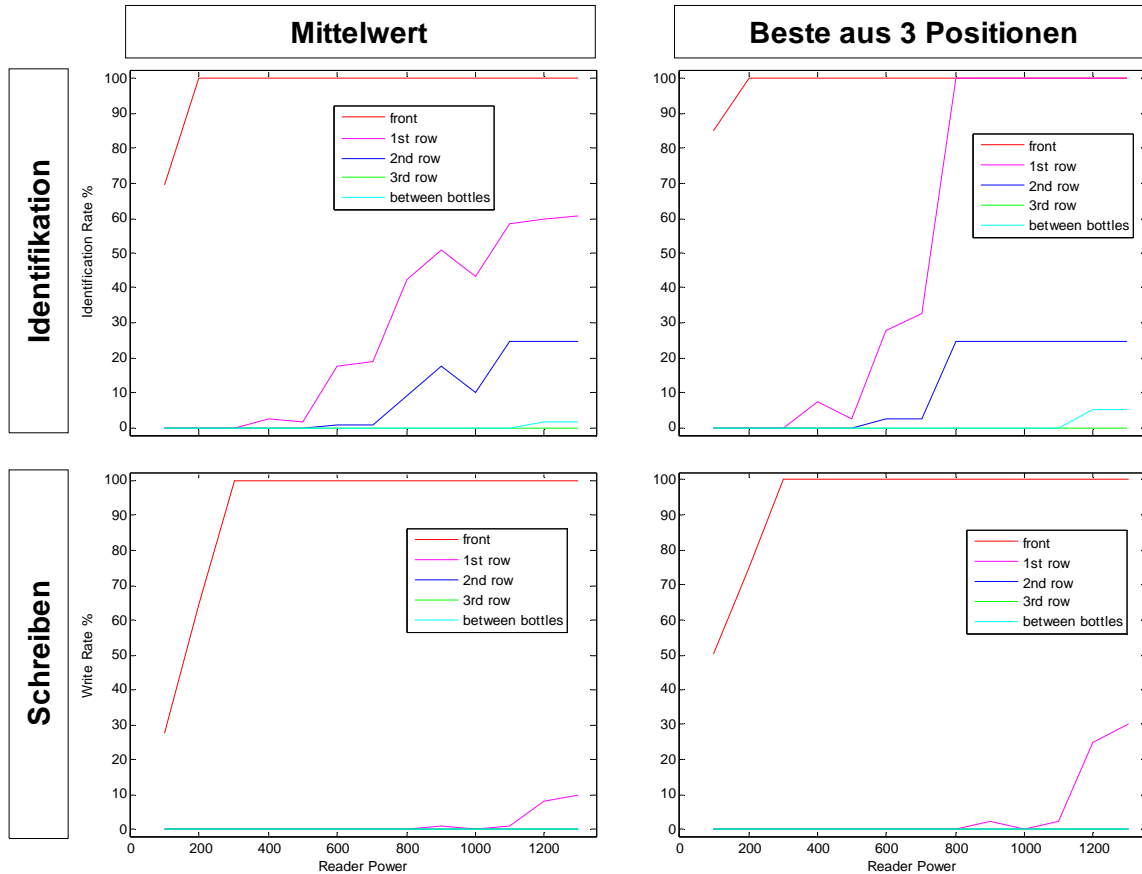


Bild 3: Ermittelte Identifikations- und Schreibraten für einen Abstand von 1 Meter



Tags an der Vorderseite der Kisten konnten sowohl in 50 cm Abstand als auch in 1 Meter Abstand aus allen Verschiebepositionen ab einer Readerleistung von 200 mW entsprechend einer effektiven Strahlungsleistung von 400 mW sicher identifiziert und geschrieben werden. Lediglich für das Schreiben in 1 Meter Abstand erhöht sich die erforderliche Readerleistung auf 300 mW.

Zur sicheren Identifikation von Tags aus Reihe 1 ist es notwendig die Readerleistung auf 600 mW bei 50 cm und 800 mW bei 1 Meter Abstand zu erhöhen und mehrere Leseversuche aus verschiedenen Positionen durchzuführen. Für Tags in den dahinter liegenden Reihen wurden nur Raten von maximal 50% ermittelt. Ein annähernd sicheres Beschreiben der Tags der ersten Reihe war nur im Abstand von 50 cm ab einer Readerleistung von 800 mW möglich. Auch bei mehrfachen Schreibversuchen aus verschiedenen Positionen muss mit vereinzelt Datenverlusten gerechnet werden.

2.4. Gegenseitige Abschirmung der Tags

Die schlechte Lesbarkeit der Tags in den hinteren Reihen beruht zum Teil auf einer gegenseitigen Abschirmung der Tags. Um die Größe dieses Effektes abzuschätzen wurde in einem Kontrollversuch die erste Reihe der Tags entfernt. Die Identifikationsrate der Tags in Reihe 2 stieg hierdurch von 30% auf 50% bei maximaler Readerleistung. Trotz der Verbesserung der Erkennungsrate ist eine sichere Identifizierung von Tags, die sich hinter der zweiten Reihe, bzw. mehr als 15 cm von der Vorderseite der Kisten entfernt befinden nicht möglich.

2.5. Zusammenfassung

Die Identifikation und das Beschreiben von Tags an der Außenseite der Ware haben sich in den Versuchen als unproblematisch herausgestellt. Bei den verwendeten Normkästen lag der Abstand zwischen Tags an der Vorderseite und Flasche bei mindestens 2.5 cm. In der Studie von Clarke [Cla06] waren die Tags und Flaschen nur durch eine Pappschicht getrennt. Dies ist neben Unterschieden im geometrischen Aufbau vermutlich der Hauptgrund für die deutlich schlechtere Identifikationsrate in den Versuchen von Clarke. Hinzu kommt noch ein höherer Wasseranteil von 42.5 % Volumen gegenüber 31.7% in unseren Versuchen.

Eine Identifikation oder gar das Beschreiben von Tags im Inneren der Ware ist nur sehr eingeschränkt möglich. Nur im Bereich den Flaschenhälsen mit viel freiem Luftvolumen zwischen erster und zweiter Reihe konnte eine akzeptable Identifikationsrate erzielt werden. Bei einem Abstand von 1m wurde dabei eine Readerleistung von 80% des gesetzlich zulässigen Wertes von 2 Watt ERP benötigt.

Es kann daher nur empfohlen werden, Tags so anzubringen dass zumindest jeweils einer je Stückgut an der Außenseite eines Stapels oder Palette liegt. Ein Lesen der Tags durch die Ware oder gar die Erfassung des Inhalts eines Containers mit Lebensmittel ohne die Ware zu bewegen ist nahezu ausgeschlossen.

3. Messung der Übertragungszeiten

Neben der Zuverlässigkeit der Identifikation ist die für die Übertragung der Daten benötigte Zeit ein weiterer kritischer Faktor bei der Auslegung eines Warenverfolgungssystems. Für die Identifikation bei Gate-Durchfahrt stehen nur wenige Sekunden zur Verfügung.

3.1. Datenraten im Gen-2 Protokoll

In der Spezifikation des Gen-2 Protokolls sind unterschiedliche Datenraten definiert, es ist daher schwer allgemeine Aussagen zu treffen. Die Datenrate richtet sich nach der zur Verfügung stehenden Bandbreite. Dabei sind die Anzahl der Reader in der Versuchsumgebung und regionale Unterschiede zu berücksichtigen. Da der in Europa freigegebene Frequenzbereich mit 2 MHz eine deutlich geringere Bandbreite hat als in den USA mit 20 MHz, muss in Europa von geringeren Datenraten ausgegangen werden. Die in der Spezifikation [EPC05] angegebene maximale Datenrate von 640 kBit/s wird in der Praxis kaum erreicht.

3.1.1. Kommunikation Interrogator → Tag

Bei der Kommunikation zwischen den auch als Interrogator bezeichneten Reader und dem Tag werden unterschiedlich lange Signale für ein 0-Bit und ein 1-Bit verwendet. Die Dauer des 0-Bits wird als Tari bezeichnet. Zulässige Werte sind 6.25 μs , 12.5 μs und 25 μs . Das 1-Bit hat in der Regel eine Dauer von 1.5 Tari. Die durchschnittliche Übertragungsrate ist daher um den Faktor 1.25 kleiner als der invertierte Tari Wert (Tabelle 3)

Tabelle 3: Datenrate der Kommunikation Interrogator → Tag

Tari	1/Tari	Durchschnittliche Datenrate
6,25 μS	160 kHz	128 kBit/s
12,50 μS	80 kHz	64 kBit/s
25,00 μS	40 kHz	32 kBit/s

3.1.2. Kommunikation Tag → Interrogator

Die Datenrate der Antwort des Tags wird vom Reader festgelegt. Gen-2 konforme Tags müssen daher sämtliche definierte Übertragungsraten unterstützen. Über entsprechende Teilungsfaktoren lassen sich Werte zwischen 40 kBit/s und 640 kBit/s einstellen. Da vier verschiedene Datencodierungen zur Verfügung stehen, kann die effektive Datenrate um den Faktor 1, 2, 4 oder 8 geringer sein [EPC05].

3.2. Versuchsdurchführung

Um eine Abschätzung für die in der Praxis benötigte Zeit für den Zugriff auf die Daten des Tags zu treffen, wurde der Zeitbedarf der entsprechenden Übertragungs-Protokolle zunächst experimentell ermittelt. Die Signale wurden mit einem Tektronix WCA280A Portable Wireless Communication Analyzer aufgezeichnet. Anschließend wurden die Signale mit dem in der Gen-2 Spezifikation definierten Kommandos verglichen. Da viele Signale eine eindeutige Bitlänge haben, konnte aufgrund der Signaldauer eine Zuordnung getroffen werden. In Zweifelsfällen wurde das Bitmuster mit Hilfe des Communication Analyzers betrachtet, um den Typ eines Kommandos festzustellen.

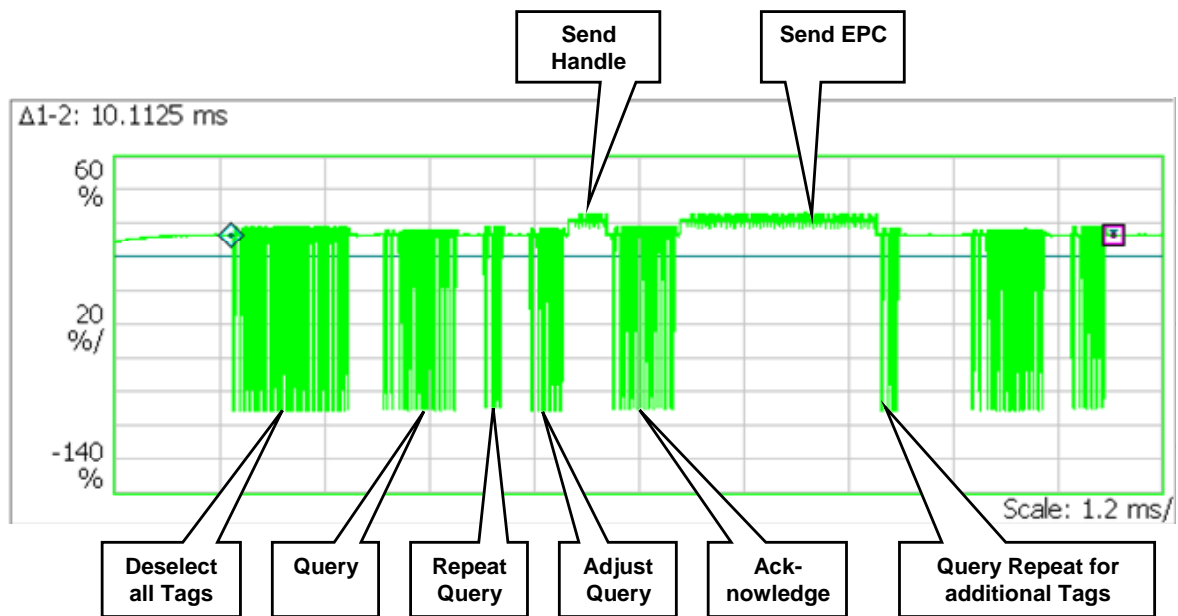
Die Summe der Reaktionszeiten des Tags und des Readers wurden durch einen Vergleich der tatsächlich gemessenen Protokoll-Gesamtdauer und des theoretischen Wertes der Gen-2 Spezifikation ermittelt. Bei der Messung wurden, soweit nicht anders angegeben, die Werkseinstellungen des Feig Readers von Tari = 25 μs und einer Modulationsrate der Antwort von 64 kBaud verwendet.

3.3. Inventory

Bei einem Inventory wird der Elektronische Produktcode (EPC) aller Tags in Reichweite des Readers erfasst. Um Kollisionen möglicher gleichzeitiger Antworten verschiedener Tags zu vermeiden wird ein Slotted Aloha [Dob06] Verfahren verwendet. Der Reader stellt mit einem *Query* Kommando eine Anzahl *Q* Timeslots bereit, von denen jeder Tag zufällig einen auswählt, um zu antworten. Der *Query-Repeat* Befehl zeigt den Beginn des nächsten Timeslots an. Je nachdem ob keiner, einer oder mehrere Tags innerhalb eines Timeslots antworten, kann bei Bedarf die Anzahl der Timeslots durch einen *Query-Adjust* korrigiert werden. Die Kriterien zur Anpassung dieses *Q*-Wertes sind in der Firmware des Readers festgelegt. Bild 4 zeigt den Ablauf eines Inventories, wenn sich nur ein Tag im Lesefeld befindet.

Die Identifikation eines einzelnen Tags kann im besten Fall, wie in Bild 4, innerhalb von 10 ms ablaufen. Durch zu schwache oder verzerrte Antworten von Tags am Rande des Lesebereiches kann der Ablauf der *Q*-Anpassung jedoch erheblich gestört werden. Der Reader hält ein nicht eindeutiges Signal für eine Überlagerung zweier Tags. Um diese vermeidliche Kollision aufzulösen stellt er weitere Timeslots bereit. Dieser Effekt konnte häufig bei dem verwendeten Feig Reader beobachtet werden. Auch bei einer kleineren Anzahl von Tags konnte die Gesamtdauer des Inventories auf über 1.2 Sekunden, entsprechend 1000 Timeslots steigen.

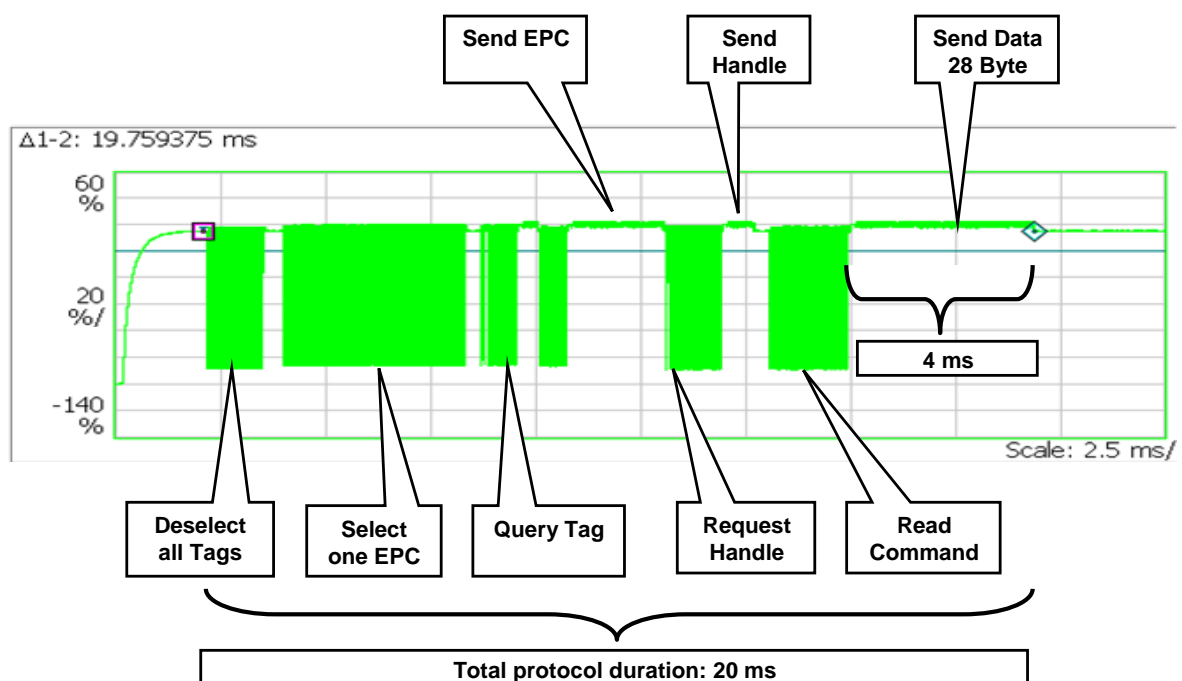
Bild 4: Zeitlicher Ablauf eines Inventories



3.4. Lesen des Zusatzspeichers

Anders als beim Inventory ergeben sich beim Lesen des Zusatzspeichers einzelner Tags eindeutige Protokolllängen. Insbesondere wenn größeren Datenmengen, wie beispielsweise Temperaturaufzeichnungen transferiert werden sollen, kann die maximale Zugriffszeit bei Gate-Durchfahrt überschritten werden. Die Kommando Sequenz zum Lesen des Zusatzspeichers wurde daher einer genaueren Analyse unterzogen. Die Übertragung geschieht in Worten je 16 Bit. Bild 5 zeigt den Ablauf beim Lesen des 14 Worte großen Zusatzspeichers der NXP Tags.

Bild 5: Zeitlicher Ablauf beim Lesen des Zusatzspeichers



Es wurde insgesamt eine Dauer von 19.75 ms für das Protokoll zum Lesen von 14 Worten gemessen. Der Tag muss zunächst selektiert und ein Handle angefordert werden, bevor der eigentliche *Read* Befehl gesendet wird. Die eigentliche Übertragung der Speicherwerte nahm dabei nur 4 ms in Anspruch. Tabelle 4 gibt die Bitlängen einzelner Befehle und die hieraus berechnete Gesamtdauer des Protokolls an. Gegenüber der theoretischen Gesamtdauer des Protokolls ergibt sich eine Differenz von 1,85 ms als Reaktionszeit T_R des Readers und des Tags.

Tabelle 4: Berechnung der Protokoldauer: Lesen von 28 Bytes

Interrogator --> Tag		
Modulation	40 kBaud	PIE
Tari_0		25,00 μ S
Tari_Average		31,25 μ S
Preamble	~ 6 Tari_0	150,00 μ S
FrameSync	~ 4 Tari_0	100,00 μ S

Tag --> Interrogator		
Modulation	64 kBaud	FM0
Symbol Duration		15,63 μ S
Preamble		93,75 μ S

Command	Bit	Duration
Query	22	837,50 μ S
Ack	18	662,50 μ S
Select_All_in_A	45	1506,25 μ S
Select_EPC	141	4506,25 μ S
Request_RN	40	1350,00 μ S
Read	58	1912,50 μ S

Answers	Bit	Duration
Handle	16	343,75 μ S
EPC	128	2093,75 μ S
New Handle	32	593,75 μ S
Read 14 Words	257	4109,38 μ S

Total Protocol length					
Theoretical Value	17916 μ S	Measured Value	19759,00 μ S	Difference	1843,38 μ S

Zur Berechnung der Protokoldauer T_P für verschiedene Tari-Werte, Symboldauer T_S der Antwort des Tags und Anzahl N der Worte wurde anhand der Bitzahl der einzelnen Kommandos die folgende Näherung aufgestellt:

$$T_P = 431 \cdot \text{Tari} + (233 + 16 \cdot N) \cdot T_S + T_R$$

Zum Lesen von 4 Worten mit einem Tari von 6.25 ms und einer Symboldauer von 12.5 ms (entsprechend 80 kBaud) und der konstanten Reaktionszeit T_R von 1.85 ms ergab sich eine Vorhersage von 8.25 ms. Die Abweichung gegenüber dem tatsächlich gemessenen Wert von 8.38 ms lag bei 1.4 %.

Derzeit stehen noch keine Gen-2 Tags mit größerem Speicher oder der Möglichkeit Temperaturdaten aufzuzeichnen zur Verfügung. Es ist aber davon auszugehen, dass der Transfer der Daten bei zukünftigen Speichertags in Blöcken organisiert sein wird. Der Tag muss dabei nur einmal selektiert werden, lediglich der *Read* Befehl muss entsprechend der Anzahl der Blöcke wiederholt werden. Für die Protokoldauer zum Lesen von K Blöcken je 16 Worte ergibt sich folgende Vorhersage:

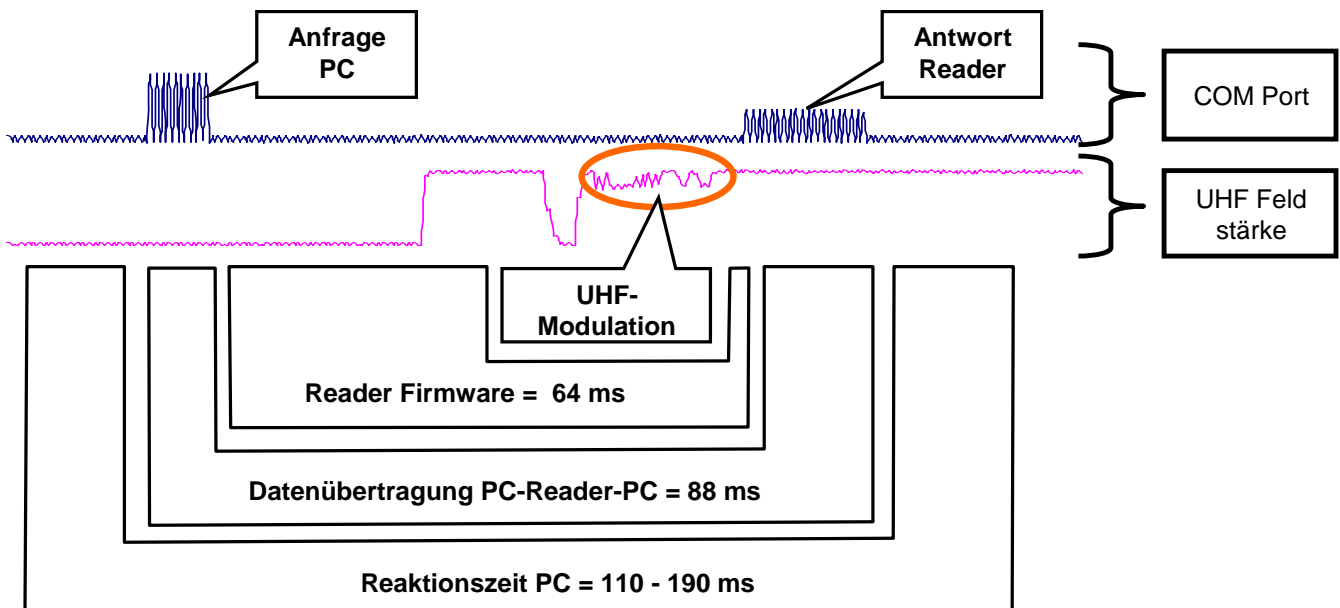
$$T_P = (354.5 + 76.5 \cdot K) \cdot \text{Tari} + (194 + 295 \cdot K) \cdot T_S + T_R$$

Um beispielsweise 1 kByte Daten entsprechend $32 \cdot 16$ Worten oder 700 Temperaturwerte in einer Auflösung von 10 Bit zu übertragen werden bei der langsameren Werkseinstellung 222 ms benötigt. Die Identifikation von 4 Tags (ca. 500 ms) und das Auslesen ihrer Temperaturprotokolle würden 1.4 Sekunden dauern. Bei einer optimistischeren Annahme der Übertragungsgeschwindigkeit ($T_{\text{Tari}} = 12.5$ ms, $T_S = 6.25$ ms entsprechend 160 kBaud) und der Dauer des Inventoryvorgangs (300 ms) würde sich die Zeit auf 0,7 Sekunden reduzieren.

3.5. Verzögerung durch weitere Faktoren

Bis die Daten zur Auswertung bereit stehen, muss mit zusätzlichen Verzögerungen gerechnet werden. Vor Beginn des Protokolls aktiviert der Reader das Feld für etwa 15 ms ohne Modulation. Die Firmware des Readers benötigt zusätzlich Zeit um die Anfrage des PCs zu decodieren und nach einem freien UHF-Kanal zu suchen. Die Dauer der Datenübertragung zum PC, beispielsweise über eine serielle RS232 Verbindung muss ebenfalls noch hinzugerechnet werden. Um eine Abschätzung zu treffen wurden neben dem Pegel des UHF-Feldes die Signale des seriellen COM-Ports mit einem Oszilloscope aufgezeichnet (Bild 6). Gegenüber der Dauer von 20 ms der UHF-Modulation entsprechend des Protokolls zum Lesen von 14 Worten, ergab sich eine deutliche längere Reaktionszeit des PCs von 110 ms bis 190 ms.

Bild 6: Lesen des Zusatzspeichers (14 Worte) und Übertragung zum PC



3.6. Datenverarbeitung im Reader

Um die Zeitspanne, in der sich die Tags bzw. die Palette im Lesebereich des Readers befinden, möglichst effektiv zu nutzen, sollten die Daten im Reader gesammelt und vorverarbeitet werden. Die Übertragung zum PC kann geschehen, nachdem die Palette das Lesefeld verlassen hat. Unter anderem können Inventory und das Lesen des Zusatzspeichers zusammengeführt werden. Eine erneute Selektion des Tags wie in Bild 5 ist dabei nicht nötig.

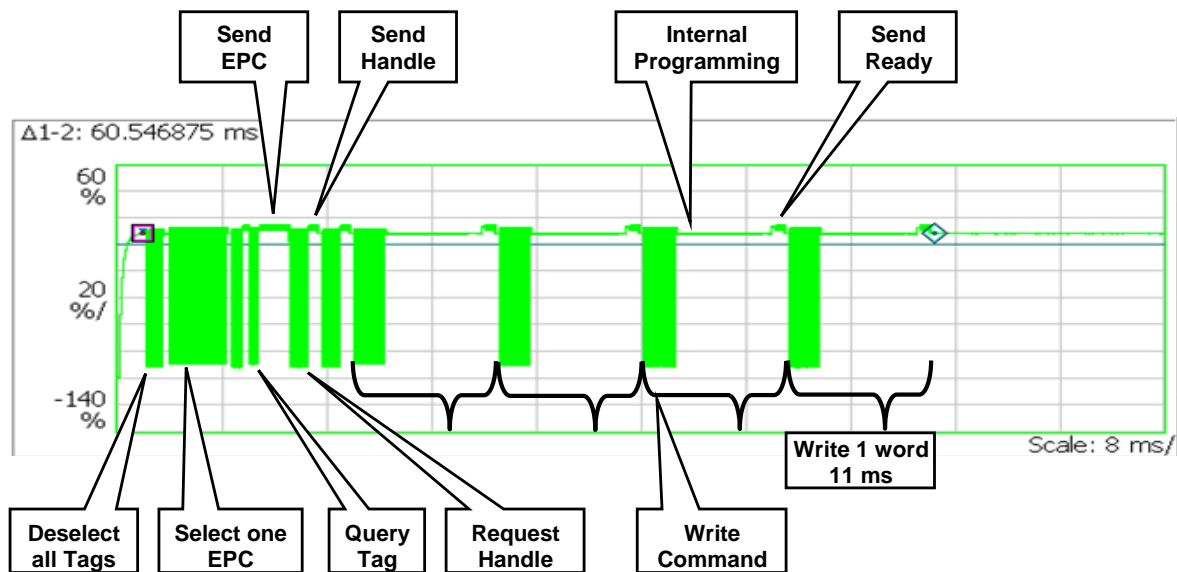
Der Feig Reader bietet einen entsprechenden Buffered Read Mode. Die Zusatzspeicher sämtlicher neu in das Lesefeld eintretenden Tags wird ausgelesen. Da jedoch keine Beschreibung der internen Abläufe während des Buffered Read Mode vorliegt, wurde keine Analyse durchgeführt.

Ein Beschreiben der Tags ist in diesem Mode nicht möglich. Um beispielsweise die eine IP-Adresse des Readers, der den Tag zuletzt gelesen hat bzw. der Adresse des gegenwärtigen Standortes oder Transportmittels ohne Zeitverlust auf den Tag zu schreiben, ist eine Anpassung der Firmware nötig.

3.7. Schreiben des Zusatzspeichers

Beim Beschreiben des Zusatzspeichers überträgt der Feig Reader nur ein Wort je Kommando. Die Möglichkeit mit einem Block-Write mehrere Worte gleichzeitig zu übertragen wird nicht genutzt. Pro Wort benötigt der Tag eine Programmierzeit von 7.8 ms, anschließend wird ein Ready Signal gesendet. Die Übertragung und Programmierung eines Wortes dauert 11 ms. Das gesamte in Bild 7 dargestellte Protokoll benötigt 60.5 ms zur Selektion des Tags und zum Schreiben von 4 Worten.

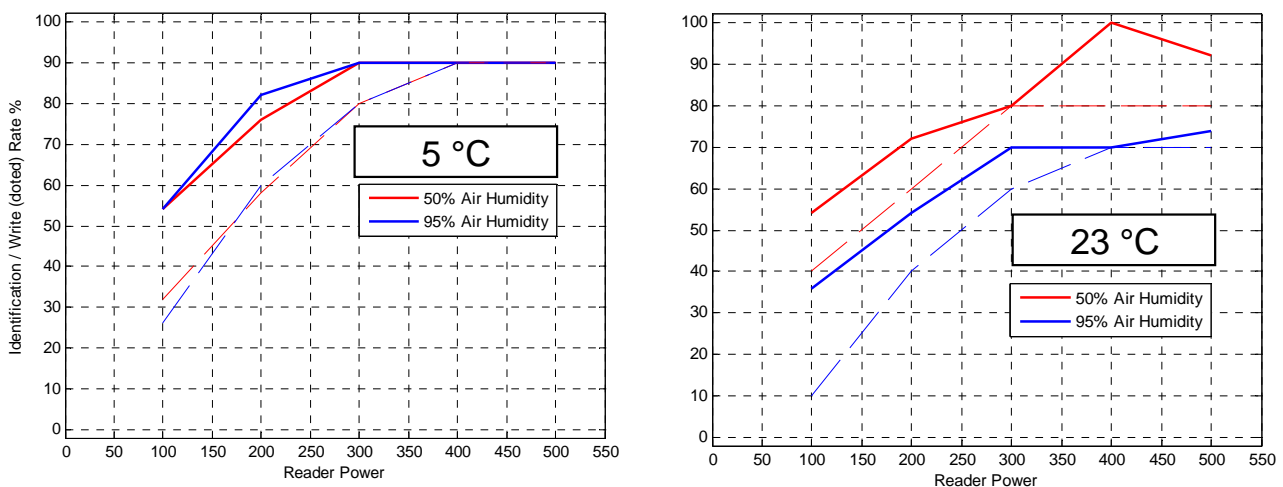
Bild 7: Zeitlicher Ablauf beim Beschreiben des Zusatzspeichers



4. Messung des Einflusses der Luftfeuchtigkeit

Eine weitere Störgröße stellt die beim Transport und der Lagerung von frischen Lebensmitteln typischerweise auftretende hohe Luftfeuchtigkeit dar. Um die Größe dieses Effektes abzuschätzen, wurden Versuche in einer Klimakammer bei 50% und 95% relativer Luftfeuchte und Temperaturen von 5 °C und 23 °C durchgeführt. Aufgrund der Abmessungen der Kammer war nur ein Leseabstand von maximal 45 cm möglich. Um die Identifikationsrate an der Grenze des Lesebereiches zu ermitteln wurde daher eine kleinere Antenne (11.8 cm * 1.9 cm) mit einem geringeren Wirkungsgrad verwendet. Im Test wurden 10 Tags in drei verschiedenen Ausführungen verwendet (4 * NXP Ryparian, 3 * NXP Spyder und 3 * Sokymat Inline UHF Gen-2). Bild 8 zeigt die Raten für Identifikation (durchgezogen) und Schreiben (gestrichelt) als Funktion der Sendeleistung des Readers getrennt nach Wert der Luftfeuchtigkeit bei einer Temperatur von 5°C und 23 °C.

Bild 8: Einfluss der Luftfeuchte auf die Erkennungsrate bei 5°C und 23 °C



Bei 5°C ist nur ein geringer Einfluss der Luftfeuchte auf die Erkennungsrate festzustellen. Bei 23 °C sind die Raten für eine relative Luftfeuchtigkeit von 95% (blaue Kurven) deutlich schlechter als bei einer Feuchtigkeit von 50% (rote Kurven). Es wird die 1.5-fache bis doppelte Readerleistung benötigt um eine vergleichbare Erkennungsrate zu erzielen.

Der Unterschied zwischen den Diagrammen für 5 °C und 23 °C lässt sich erklären, wenn man anstelle der relativen die absolute Luftfeuchtigkeit betrachtet. Bei 23 °C kann die Luft 3mal soviel Wasser aufnehmen wie bei 5 °C. Der einer relative Luftfeuchte von 95% entsprechende Absolutwert ist mit 19.5 g/m^3 ebenfalls 3mal so hoch wie bei 5°C (6.5 g/m^3) [Och07].

5. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Untersuchung von Einflüssen auf die Les- und Schreibbarkeit von RFID Tags unter den Randbedingungen der Überwachung von Lebensmitteltransporten haben sich zwei Hauptprobleme herausgestellt:

- Ein sicherer Zugriff auf die Daten ist nur möglich, wenn der Tag an der Außenseite der Ware angebracht ist. Mit höheren Readerleistungen kann auf Tags an einigen Positionen im Inneren der Ware zugegriffen werden, allerdings nur bei geringem Abstand zur Außenseite und nur wenn sich wenig Flüssigkeit in der Nähe des Tags befindet.
- Ein weiteres Problem stellt die begrenzte Datenmenge dar, die während der Zeitspanne einer Gate-Durchfahrt übertragen werden kann. Die Beispielrechnungen zu diesem Kommunikationsflaschenhals in Abschnitt 3.4 zeigen, dass nur von maximal 4 Tags ein vollständiges Temperaturprotokoll ausgelesen werden kann.

Frisches Obst und Gemüse wird zwar bei hohen Luftfeuchten (>80%) transportiert, um Gewichtsverluste durch Austrocknung zu vermeiden [Tis05], bei den für Kühltransporte typischen Temperaturen von weniger als 15 °C hat die Luftfeuchte jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Erkennungsrate.

Das Beschreiben des Zusatzspeichers erforderte eine geringfügig höhere Sendeleistung, war insgesamt aber eher unproblematisch.

Die zum Teil sehr lange Dauer des Inventory-Vorgangs von über einer Sekunde war jedoch unbefriedigend. Es sollte geprüft werden, inwieweit durch ein Firmwareupdate oder durch Reader anderer Hersteller eine Verbesserung erzielt werden kann.

5.1. Zukünftige Lösungen zur Kombination von RFID und Temperaturdaten

Aufgrund des beschriebenen Kommunikationsflaschenhalses können herkömmliche RFID Datenlogger nur eingeschränkt zur automatisierten Temperaturüberwachung von Frachtstücken eingesetzt werden. Verschiedene neue Lösungen werden es zukünftig ermöglichen diesen Flaschenhals zu überwinden. Dabei ist zwischen zwei Ansätzen zu unterscheiden:

Der erste Ansatz beruht auf der Idee, die Temperaturdaten schon auf dem Tag selbst auszuwerten. Durch entsprechende Modelle kann die Auswirkung von Temperaturabweichungen auf die Haltbarkeit des Produktes durch einen Mikrocontroller errechnet werden [Jed07]. Dieser intelligente RFID würde beim Entladen nur die berechnete Resthaltbarkeit übertragen. Derzeit steht noch kein UHF-RFID Sensortag mit entsprechenden Programmiermöglichkeiten zur Verfügung. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass ein Mikrocontroller die notwendigen Berechnungen mit der Energie einer Folienbatterie ausführen kann [Jed07].

Die Grundidee des zweiten Ansatzes ist es, die Identifikation und die Temperaturüberwachung durch getrennte Hardware durchzuführen. Die Messung der Umgebungsparameter geschieht durch ein im Fahrzeug oder Container angebrachtes drahtloses Sensornetz. Eine in das Transportmittel integrierte Recheneinheit ermittelt den durch Temperaturabweichungen verursachten Qualitätsverlust.

Pro Warenstück ist nur ein Standard RFID Tag erforderlich. Beim Entladen der Ware wird der errechnete Wert für die Resthaltbarkeit in den Zusatzspeicher des Tags geschrieben. Um später weitere Informationen zum Transport anfordern zu können, wird zusätzlich noch eine IP-Adresse, unter der das Transportmittel erreicht werden kann, auf dem Tag hinterlegt. Die Machbarkeit dieses Konzeptes des intelligenten Containers [Int06] wurde bereits an einem Prototyp erfolgreich demonstriert [Geh06].

Da bei diesem Konzept nur wenige Zusatzdaten auf dem Tag benötigt werden, stellt die Zeitdauer der benötigten Gen-2 Protokolle kein Problem dar. Die drei 16-Bit Worte für Resthaltbarkeit und IP-Adresse können in 11 ms je Wort geschrieben werden. Problematisch ist jedoch die Kommunikation zwischen Reader und Recheneinheit des Transportmittels, bei der Zeitverzögerungen von mehr als 100 ms je Tag zwischen Identifikation und Schreiben auftreten können. Um diese zu vermeiden, sollte ein kombinierter Identifikations- und Schreib-Modus in den Reader integriert werden.

Die Kombination von RFID und Temperatur-Monitoring bietet neue Möglichkeiten für eine verbesserte Überwachung von Lebensmitteltransporten, die Umsetzung der beschriebenen Konzepte erfordert jedoch noch weitere Entwicklungsarbeit.

6. Literatur

- [A927] Temperature Logger UHF Semi-Passive Tag Datasheet, Available at http://www.caen.it/rfid/data_sheet.php?fam=tags&mod=A927
- [Bun05] Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit: Berichtsband: „Einsatzmöglichkeiten der Transpondertechnologie in konsumgüterorientierten Unternehmen des Mittelstands; unter besonderer Berücksichtigung des Einzelhandels“ aus Titel 686 66 „Förderung der Innovationsfähigkeit von KMU und des Technologietransfers“ AZ VIII A 6 – 887 199. Köln und Berlin, 2005.
- [Cla06] Clarke, Robert H. ; Twede, Diana ; Tazelaar, Jeffrey R. ; Boyer, Kenneth K.: Radio frequency identification (RFID) performance: the effect of tag orientation and package contents. In: Packaging technology & science . - Chichester : Wiley, . -Vol 19(1) 2006, 1, pp 45-54
- [Dob06] Dobkin, D.M., Kurtz, D.J.: Overview of EPCglobal Class 1 Generation 2 and Comparison with 1st Generation EPCglobal Standards. March 2006 - RFID Solutions Online. Available at: http://www.wj.com/documents/Articles_PDF/Overview_of_EPCglobal_Class_1_Generation_2_and_Previous_EPCglobal_Standards_1_FINAL.pdf
- [EPC05] EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols -- Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz -- Version 1.0.9, EPCglobal Inc, 2005
- [Geh06] Gehrke, J. D.; Behrens, C.; Jedermann, R.; Morales-Kluge, E.: The intelligent Container - Toward Autonomous Logistic Processes. In: KI 2006 Demo Presentations. Universität Bremen, Bremen, 2006, pp. 15-18
- [Imp06] Impinj: Gen 2 — The Definitive, Myth-Busting, Item-Level Solution, RFID World White Paper, September 2006. Available at <http://www.rfid-world.com/whitepaper/202401549>
- [Int06] Der intelligente Container. Homepage des Projektes. www.intelligentcontainer.com
- [Jed07b] Jedermann, R.; Edmond, J.P.; Lang, W.: Shelf life prediction by intelligent RFID. In: International Conference on Dynamics in Logistics. 2007
- [Nik07] Nikitin, P.V. Rao, K.V.S. Lazar, S.: An Overview of Near Field UHF RFID. RFID, 2007. IEEE International Conference on, Grapevine, Texas, USA, 2007, pp. 167-174 (doi: 10.1109/RFID.2007.346165)
- [NXP06] NXP Semiconductors. SL3 ICS 10. UCODE EPC G2 Data Sheet, 2006. Available at www.nxp.com/acrobat_download/other/identification/SFS129430.pdf
- [Lec05] Lecklider, T.: “The world of the near field”, Evaluation Engineering, October 2005, available at http://www.evaluationengineering.com/archive/articles/1005/1005the_world.asp

- [Och07] Ochs, S.: Berechnung von Taupunkt und relativer Feuchte. Available at <http://www.wetterochs.de/wetter/feuchte.html#f1>
- [Rot07] Roth, T.: Entwicklung und Erprobung standardisierter und optimierter Testabläufe zum Einsatz von UHF-RFID-Systemen in der Lagerlogistik. Diplomarbeit, Universität Bremen, BIBA, 2007
- [Tis05] Transport-Information-Service (TIS) des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) <http://www.tis-gdv.de/tis/ware/inhaltx.htm>
- [Tur06] TurboTag Product Homepage www.turbo-tag.com
- [Weh06] Wehking, K.H.: Wie zuverlässig sind die Identifikationsvorgänge? RFID – Versuche zur Lesezuverlässigkeit bei unterschiedlichen Füllstoffen. Erschienen in der Schriftenreihe Wirtschaft & Logistik: Wissenschaft und Praxis im Dialog; Steuerung von Logistiksystemen – auf dem Weg zur Selbststeuerung, Deutscher Verkehrs Verlag GmbH, Hamburg, 2006.

Kontaktadresse

Dipl. Ing. Reiner Jedermann, Universität Bremen, FB1
Microsystems Center Bremen
Otto-Hahn-Allee, NW1, D-28359 Bremen, GERMANY
rjedermann@imsas.uni-bremen.de
Tel 0421/218-4908, Fax 0421/218-4774

Copyright

Dieser Bericht kann kostenlos von der Internetseite des Projektes www.intelligentcontainer.com und anderen Seiten der Universität Bremen geladen werden. Weitergabe, Druck, Vervielfältigung und Übersetzung des Textes nur mit Zustimmung des Autors.

Danksagungen

Diese Arbeit wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 637 "Selbststeuerung logistischer Prozesse" unterstützt. Für Teile der Versuche wurde das Labor des Bremer Research Cluster for Dynamics in Logistics genutzt.