

Einführung in die RFID-Technologie

Matthias Lampe, Christian Flörkemeier
Institut für Pervasive Computing, ETH Zürich

Stephan Haller
SAP Research, Karlsruhe, SAP AG

Kurzfassung. Die öffentliche Thematisierung der RFID-Technik und die Standardisierungsbemühungen des Auto-ID Centers haben dazu geführt, dass den Potentialen der Technologie zur Verbesserung betriebswirtschaftlicher Prozesse zunehmende Bedeutung geschenkt wird. Dabei steht die Vermeidung von Medienbrüchen, d.h. das Überwinden der Lücke zwischen der realen Welt und der digitalen Welt, im Vordergrund. Der vorliegende Beitrag gibt eine Einführung in die RFID-Technik und beschreibt dabei die Komponenten eines RFID-Systems wie Lesegerät und RFID-Transponder. Zum Verständnis der Funktionsweise eines RFID-Systems wird genauer auf die zugrundeliegenden Technologien und darauf aufbauend auf wichtige Auswahlkriterien für RFID-Systeme eingegangen. Abschließend liefert der Beitrag eine Übersicht über relevante RFID-Standards.

1 Einleitung

Während die Radiofrequenz-Identifikation (RFID) in der Vergangenheit vor allem zur Tieridentifikation, in Wegfahrsperrern und zur Zugangskontrolle u.a. bei Ski-Anlagen eingesetzt wurde, erweitert sich das Anwendungsfeld nun zunehmend. Die öffentliche Thematisierung der RFID-Transpondertechnik durch das Auto-ID Center und der geplante Einsatz in der Lieferkette von Handelsunternehmen (wie beispielsweise Wal-Mart und Metro) oder in den Logistikprozessen des amerikanischen Verteidigungsministeriums haben dazu geführt, dass den Potentialen der Technologie zur Verbesserung betriebswirtschaftlicher Prozesse zunehmende Bedeutung geschenkt wird.

Insbesondere die Vermeidung von Medienbrüchen steht hier im Vordergrund, da die kontaktlose, automatische Identifikation durch die RFID-Transpondertechnik es erlaubt, die Lücke zwischen der realen Welt der physischen Objekte und Produkte einerseits und der digitalen Welt in Form von Warenwirtschaftssystemen und SCM-Lösungen andererseits zu verkleinern. Die Folge sind u.a. niedrigere Fehlerquoten, höhere Prozesseffizienz, gesteigerte Produktqualität sowie Kosteneinsparungen durch schnellere und bessere Informationsverarbeitung. Darüber hinaus bildet RFID die Grundlage für zahlreiche weitere Anwendungen, die

über reine Identifikation hinausgehen, wie z.B. lückenlose Kühlkettenüberwachung mittels Sensorik oder Echtzeitlokalisierung von Objekten in Produktions- oder Logistikprozessen.

Die RFID-Technologie ist eine automatische Identifikationstechnologie, bei der eine Information, typischerweise eine Seriennummer, auf einem RFID-Transponder gespeichert wird, der einen Mikrochip besitzt und als elektronischer Datenspeicher dient. Die Seriennummer kann mittels drahtloser Kommunikation, typischerweise über eine Distanz von einigen Metern, von einem Lesegerät ausgelesen werden. Die Stärken von RFID, speziell gegenüber dem Barcode, liegen in der vollautomatischen, gleichzeitigen Erkennung mehrerer RFID-Transponder, wobei keine Sichtverbindung zwischen Lesegerät und RFID-Transponder nötig ist. Dies erlaubt es, RFID-Transponder in Objekte einzubetten, ohne dass sie äußerlich sichtbar sind, um beispielsweise den Einsatz unter extremen Bedingungen wie Schmutz oder Hitze zu ermöglichen. Gegenüber Barcode-Scannern ist auch eine höhere Lesereichweite möglich; außerdem können Informationen auf einem RFID-Transponder mit Datenspeicher während des Einsatzes verändert werden, was bei einem Barcode nicht möglich ist.

Das Ziel dieses Beitrages ist es, einen Überblick über die RFID-Technik zu liefern. Dabei soll die Funktionsweise der verschiedenen RFID-Systeme aufgezeigt werden, wobei der Fokus vor allem auf den Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Systeme liegt.

2 Komponenten eines RFID-Systems

Ein typisches RFID-System besteht aus den folgenden drei Komponenten: Rechner, Lesegerät mit Kopplungseinheit (Spule bzw. Antenne) und RFID-Transponder (siehe Abbildung 1).

Das Lesegerät ist über eine serielle Schnittstelle oder Netzwerkverbindung mit dem Rechner, z.B. einem PC, verbunden und dient je nach RFID-System als reines Lesegerät bzw. im erweiterten Sinne als Schreib-/Lesegerät. Die Applikation auf dem Rechner schickt Kommandos und Daten an das Lesegerät und erhält wiederum Antwortdaten vom Lesegerät zurück. Beispiele für Kommandos sind das Auslesen der Identifikationsnummern aller RFID-Transponder im Lesebereich, oder das Beschreiben eines RFID-Transponders mit Daten. Die Kommandos werden dann vom Lesegerät kodiert und auf ein magnetisches bzw. elektromagnetisches Wechselfeld moduliert, das zusätzlich zu den Daten die RFID-Transponder mit Energie versorgt¹. Alle RFID-Transponder, die sich im Feld des Lesegeräts befinden, empfangen die vom Lesegerät ausgesandten Befehle und Daten und schicken ihre jeweiligen Antwortdaten an das Lesegerät zurück.

¹ Dies gilt nur für passive RFID-Transponder, aktive RFID-Transponder besitzen eine eigene Energieversorgung (vgl. Abschnitt 3.1).

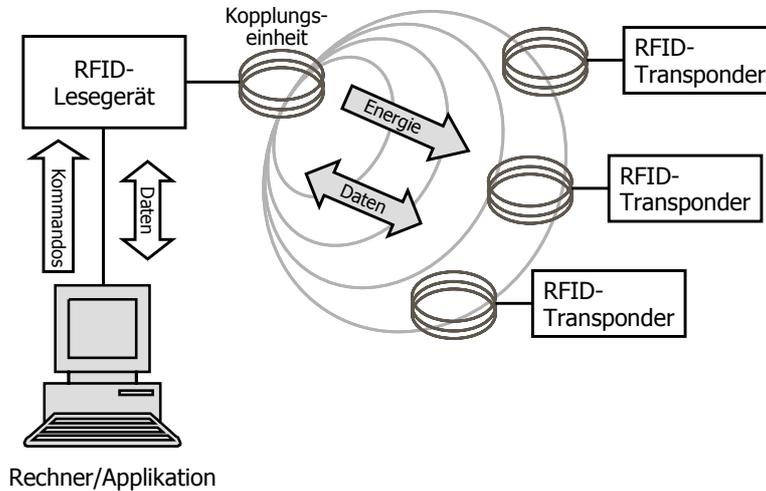


Abb. 1. Komponenten eines RFID-Systems

Ein RFID-Transponder besteht typischerweise aus einem Mikrochip und einer Kopplungseinheit und ist der eigentliche Informationsträger. Man unterscheidet je nach Technologie zwischen RFID-Transpondern, die eine Spule oder eine Antenne als Kopplungseinheit haben. Bei den RFID-Transpondern gibt es eine Vielzahl von Bauformen, die sowohl von der verwendeten Technologie als auch vom Einsatzgebiet des RFID-Transponders abhängen. Abbildung 2 zeigt eine Auswahl verschiedenster Bauformen.



Abb. 2. RFID-Transponder in verschiedenen Bauformen (Quellen: Infineon, TI, Symbol, Alien)

Stark verbreitet sind zum einen die sogenannten „Smart Labels“, bei denen die Spule mit RFID-Chip auf einer Klebefolie aufgebracht ist, und zum anderen die kontaktlosen Chipkarten. In anderen Bauformen ist der RFID-Transponder in

Kunststoffe oder andere Materialien eingebracht. Eine solche Spezialverpackung macht die RFID-Transponder resistent gegenüber Schmutz oder Säuren und erlaubt den Einsatz unter hohen Temperaturen und anderen widrigen Umweltbedingungen, wie sie häufig im industriellen Umfeld anzutreffen sind. Für Zugangskontrollen oder Wegfahrsperren werden RFID-Transponder oft in Schlüsselanhänger oder Uhren integriert. Bei der Tieridentifikation werden RFID-Transponder in kleinen Glasröhrchen eingesetzt, die den Tieren unter die Haut injiziert werden.



Abb. 3. Bauformen von Lesegeräten mit Kopplungseinheiten (Quellen: Symbol, Alien, Infineon)

Bei den Lesegeräten macht hauptsächlich die Größe und Form der Kopplungseinheit die Bauform aus (siehe Abbildung 3). Bei mobilen Lesegeräten ist das eigentliche Lesegerät und die Kopplungseinheit mit dem Rechner in einem gemeinsamen Gehäuse integriert, um das mobile Auslesen von RFID-Transpondern zu ermöglichen. Lesegeräte mit Flachantennen in typischen Größen von DIN A3/A4 werden z.B. in Bibliotheken bei der Buchausleihe und -rückgabe eingesetzt. Bei einem „Gate“ sind Lesegerät und Kopplungseinheit räumlich getrennt. Die Anordnung von zwei Kopplungseinheiten bei einem Gate ermöglicht einen größeren Lesebereich zwischen den beiden Einheiten. Anwendung finden Gates in der Warensicherung und in der Lieferkettenüberwachung, z.B. beim Wareneingang und -ausgang. Anwendungen, die viele RFID-Transponder erkennen müssen, die sich ungeordnet auf engem Raum befinden, werden oft durch Tunnelleser realisiert, wie z.B. in der Materialflussverfolgung oder bei der Paketsortierung. Bei einem Tunnelleser sind mehrere Kopplungseinheiten in einem Tunnel angebracht, der nach außen abgeschirmt ist, so dass innerhalb des Tunnels größere Feldstärken möglich sind als bei einem nicht abgeschirmten System und deshalb auch bessere Leseraten erzielt werden.

3 Funktionsweise

Die Funktionsweise eines RFID-Systems lässt sich durch grundlegende technische Eigenschaften wie Energieversorgung und Speicherstruktur der RFID-

Transponder, Sendefrequenz des Lesegeräts, Kopplung und Datentransfer zwischen Lesegerät und RFID-Transponder und eingesetztem Vielfachzugriffsverfahren beschreiben und klassifizieren. Im Folgenden wird auf diese Aspekte genauer eingegangen; für eine umfassende Darstellung sei der Leser jedoch auf das RFID-Handbuch von Klaus Finkenzeller [Fin02] verwiesen.

3.1 Energieversorgung

RFID-Transponder benötigen Energie zum einen, um ihren Mikrochip zu betreiben, und zum anderen, um Daten zum Lesegerät zu senden. Dabei unterscheidet man die folgenden drei Arten von RFID-Transpondern:

- *Passive* RFID-Transponder benutzen die Energie des Feldes, das vom Lesegerät erzeugt wird, sowohl für das Betreiben des Mikrochips als auch zum Senden der Daten.
- *Semi-aktive* RFID-Transponder haben eine interne Batterie, mit der sie ihren Mikrochip versorgen. Sie benutzen aber zum Senden der Daten die Energie des Feldes des Lesegeräts.
- *Aktive* RFID-Transponder haben eine interne Batterie, die sie für beide Zwecke benutzen.

3.2 Sendefrequenz und Kopplung

Die Sendefrequenzen der meisten RFID-Systeme liegen in den lizenzfreien ISM-Bändern (Industrial-Scientific-Medical), die für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen weltweit freigehalten sind. Hinzu kommt der Frequenzbereich unterhalb 135 kHz und um 900 MHz. Damit fallen die typischen Sendefrequenzen eines RFID-Systems in die folgenden vier Bereiche (siehe Abbildung 4):

- 100-135 kHz (Niederfrequenz, LF)
- 13,56 MHz (Hochfrequenz, HF)
- 868 MHz (Europa) / 915 MHz (USA) / 950-956 MHz (Japan, geplant) (Ultra-hochfrequenz, UHF)
- 2,45 GHz und 5,8 GHz (Mikrowelle, MW)

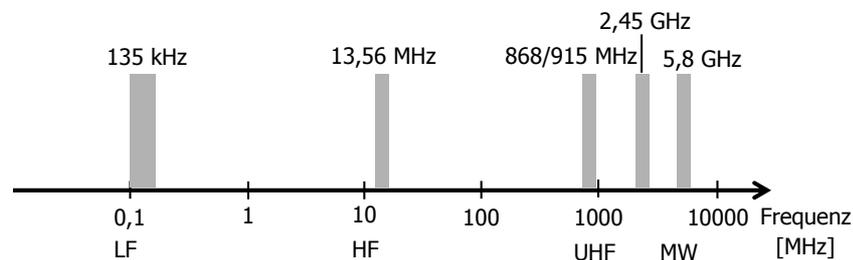


Abb. 4. RFID-Frequenzbänder

Die Funktionsweise von RFID-Systemen wird innerhalb der erlaubten Frequenzbänder durch Vorschriften weiter eingeschränkt. Für den weltweiten Einsatz eines RFID-Systems sind die folgenden Vorschriften relevant: Das Harmonisierungsdokument CEPT/ERC REC 70-03 [ERC02] des European Radiocommunications Office² mit den Normen EN 300 330, EN 300 220 und EN 300 440 des European Telecommunications Standards Institute³, für die USA die Zulassungsvorschrift „FCC Part 15“ [FCC01] der Federal Communications Commission⁴ (FCC) und für Deutschland die Verfügungen 61/200 [RTP00a] und 73/2000 [RTP00b] der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post⁵ (RegTP). Die Vorschriften geben maximal zulässige Sendeleistungen bzw. Feldstärken, erlaubte Seitenbänder, sowie standardisierte Messverfahren vor. Die Frequenzen im Bereich um 135 kHz und 13,56 MHz stehen weltweit für RFID-Systeme zur Verfügung. Bei den Frequenzen im UHF-Bereich ist dies nicht der Fall. Während in den USA eine Sendeleistung von vier Watt möglich ist, erlauben die europäischen Zulassungsbeschränkungen bisher nur eine Sendeleistung von einem halben Watt (in Japan ist dieses Frequenzband für RFID-Systeme nicht zugelassen). Allerdings gibt es Bestrebungen, innerhalb Europas die Bandbreite in diesem Frequenzband zu vergrößern und die Sendeleistung auf 2 W zu erhöhen bzw. dieses Frequenzband in Japan neu zu etablieren [Rfi03]. In Zukunft kann daher davon ausgegangen werden, dass das UHF-Frequenzband mit entsprechender Sendeleistung zumindest in den USA, Europa und Japan verfügbar sein wird.

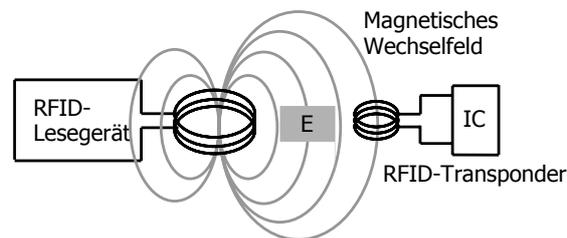


Abb. 5. Energieversorgung durch induktive Kopplung

Bei RFID-Systemen mit *Sendefrequenzen von 135 kHz und 13,56 MHz* findet die Energieübertragung mittels induktiver Kopplung durch ein Magnetfeld ähnlich wie bei einem Transformator statt. Der Kopplungsfaktor bei RFID-Systemen ist jedoch sehr viel kleiner als bei einem Transformator und liegt bei ca. 1 %. Die Spule des Lesegeräts erzeugt ein magnetisches Wechselfeld mit der Sendefrequenz, das eine Wechselspannung in der Spule des RFID-Transponders induziert (siehe Abbildung 5). Die Spannung wird im RFID-Transponder gleichgerichtet und dient dann bei passiven RFID-Transpondern zur Energieversorgung des Mikrochips. Auf dem Schaltkreis des RFID-Transponders befindet sich typischerweise

² www.ero.dk

³ www.etsi.org

⁴ www.fcc.gov

⁵ www.regtp.de

ein Schwingkreis, dessen Frequenz auf die Sendefrequenz des Lesegeräts eingestellt ist. Bei Resonanz wird dadurch die induzierte Spannung im Vergleich zu Frequenzen außerhalb des Resonanzbandes erheblich verstärkt, was zu einer erhöhten Lesereichweite führt.

Die induzierte Spannung im RFID-Transponder hängt unter anderem von der Anzahl der Windungen in der Spule des RFID-Transponders und der Sendefrequenz ab. Daraus ergibt sich, dass bei einer Sendefrequenz von 135 kHz sehr viel mehr Windungen benötigt werden, als bei 13,56 MHz, um bei gleicher Feldstärke auf die nötige Spannung im RFID-Transponder zu kommen. Bei 135 kHz-Transpondern liegt die Anzahl der Windungen typischerweise um die 1000, bei 13,56 MHz-Transpondern um die 10.

Der Verlauf des distanzbezogenen Abfalls der Feldstärke des magnetischen Feldes hängt von der Ausgangsleistung des Lesegeräts, der Sendefrequenz und auch vom Durchmesser der Spule des Lesegeräts ab. Die Feldstärke nimmt dabei innerhalb eines gewissen Bereiches, dem so genannten Nahfeld, proportional zur dritten Potenz der Entfernung ab, außerhalb des Nahfeldes, dem sogenannten Fernfeld, nur direkt proportional zur Entfernung. Die Ausdehnung des Nahfeldes lässt sich mathematisch ermitteln und ist umgekehrt proportional zur Sendefrequenz. Da die induktive Kopplung nur im Nahfeld funktioniert, stellt sie somit eine theoretische Grenze für die maximale Reichweite dar. Die typische Reichweite liegt in der Praxis jedoch immer deutlich unter dieser Grenze, da die induzierte Spannung im RFID-Transponder bei dieser Grenze zu niedrig ist, um den Mikrochip zu betreiben. Bei einem RFID-Transponder im Kreditkartenformat entspricht die maximale Reichweite eines Lesegeräts ungefähr dem Durchmesser der Spule des Lesegeräts.

Die Übertragung der Daten vom RFID-Transponder zum Lesegerät wird mittels Lastmodulation verwirklicht. Die Daten werden dabei als ein digitales Signal codiert, das einen Lastwiderstand ein- und ausschaltet. Die Veränderungen des Widerstandes ändern dabei die Gegeninduktivität des RFID-Transponders, die vom Lesegerät in Form kleiner Spannungsänderungen wahrgenommen wird. Diese so aufmodulierten Daten werden vom Lesegerät demoduliert, dekodiert und weiterverarbeitet.

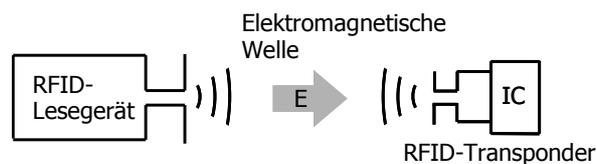


Abb. 6. Energieversorgung durch elektromagnetische Kopplung

Bei RFID-Systemen mit *Sendefrequenzen von 868 bzw. 915 MHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz* findet die Energieübertragung durch elektromagnetische Kopplung statt. Die Antenne des Lesegeräts erzeugt eine elektromagnetische Welle, die sich im Raum ausbreitet und in der Antenne des RFID-Transponders eine Wechsel-

spannung erzeugt (siehe Abbildung 6). Die Spannung wird im RFID-Transponder gleichgerichtet und dient dann bei passiven Systemen zur Energieversorgung des Mikrochips.

Die maximale Reichweite hängt u.a. von der Sendeleistung des Lesegeräts ab. Da die Energie im Fernfeld umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung von der Antenne abnimmt, sind der maximalen Reichweite jedoch Grenzen gesetzt. Die Sendeleistung ist durch Zulassungsvorschriften beschränkt und damit ergeben sich unter idealen Bedingungen für passive Systeme Reichweiten von 5–7 m, für semi-aktive Systeme bis zu 15 m und für aktive Systeme Reichweiten von bis zu 100 m.

Die Übertragung der Daten zum Lesegerät wird bei passiven Systemen durch die Variation des Rückstrahlquerschnittes erreicht. Wie bei LF- und HF-Systemen werden die Daten als ein digitales Signal codiert, das einen Widerstand parallel zur Antenne ein- und ausschaltet. Die Veränderungen des Widerstandes ändern dabei die Eigenschaften der reflektierten elektromagnetischen Welle und modulieren so die Daten auf die Welle auf. Die reflektierte Welle wird vom Lesegerät demoduliert und das daraus erhaltene Signal dekodiert.

3.3 Vielfachzugriffsverfahren

Viele Anwendungen fordern von RFID-Systemen, dass eine größere Anzahl von Objekten gleichzeitig erkannt wird, z.B. alle Waren auf einer Palette im Wareneingang. Verglichen mit RFID-Systemen, bei denen sich immer nur ein einziger RFID-Transponder im Lesebereich befindet, z.B. bei der Zugangskontrolle, bedingt dies ein komplexeres Kommunikationsverfahren.

Ein solches Verfahren, das es mehr als einem RFID-Transponder ermöglicht, gleichzeitig auf das Übertragungsmedium zuzugreifen, nennt man Vielfachzugriffsverfahren. In der Funktechnik sind Raummultiplex (SDMA), Zeitmultiplex (TDMA), Frequenzmultiplex (FDMA) und Codemultiplex (CDMA) als Vielfachzugriffsverfahren bekannt. Da RFID-Transponder nur über eine beschränkte Leistungsfähigkeit verfügen und möglichst günstig hergestellt werden sollen, wird dabei hauptsächlich TDMA, seltener auch FDMA (oder eine Kombination aus TDMA und FDMA) eingesetzt. Die technische Umsetzung eines Vielfachzugriffsverfahrens wird auch als Antikollisionsverfahren bezeichnet und lässt sich in zwei Klassen unterteilen [SWE02]: Deterministische und probabilistische Verfahren.

Bei den *deterministischen Verfahren* sucht das Lesegerät alle RFID-Transponder im Lesebereich anhand der eindeutigen Seriennummer der RFID-Transponder ab. Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist der Baumtraversierungsalgorithmus, bei dem der Binärbaum aller möglichen dual codierten Seriennummern in systematischer Weise durchlaufen wird. Bei jedem Anfrageschritt werden alle RFID-Transponder, deren Seriennummer in einem bestimmten Intervall liegen, aufgefordert, mit ihrer Seriennummer zu antworten. Kommt es zu einer Kollision, d.h. haben mehrere RFID-Transponder geantwortet, wird das Intervall halbiert. Dieser Schritt wird solange wiederholt, bis nur noch ein einziger

RFID-Transponder antwortet. Alle noch verbleibenden Intervalle werden dann auf dieselbe Art und Weise abgesucht. Deterministische Antikollisionsalgorithmen stellen also sicher, dass nach einer gewissen Zeit alle im Bereich des Lesegeräts befindlichen RFID-Transponder erkannt werden. Allgemein kann gesagt werden, dass das Baumtraversierungsverfahren auf hohe Datenübertragungsraten vom Lesegerät zum RFID-Transponder angewiesen ist, um hohe Erkennungsraten zu ermöglichen. Existierende Zulassungsvorschriften ermöglichen dies momentan nur im UHF-Band.

Bei den *probabilistischen Verfahren* antworten die RFID-Transponder zu einem zufällig gewählten Zeitpunkt. Es wird dabei hauptsächlich eine Variante des ALOHA-Algorithmus angewandt, bei dem das Lesegerät den RFID-Transpondern ein Zeitfenster zum Antworten zur Verfügung stellt. Beim Framed-Slotted-ALOHA-Algorithmus ist dieses Zeitfenster in eine vorgegebene Anzahl sogenannter Zeitslots unterteilt, aus denen jeder RFID-Transponder zufällig einen für seine Antwort auswählt. Zu einer Kollision kommt es, falls mehr als ein RFID-Transponder im selben Zeitslot antwortet. Dies kann von den RFID-Transpondern nicht verhindert werden, da sie nicht erkennen können, ob im selben Zeitslot ein anderer RFID-Transponder antwortet. Um nun bei mehreren Anfragerunden die Zahl der Kollisionen zu minimieren, können RFID-Transponder, die erfolgreich erkannt wurden, für die folgenden Runden stumm geschaltet werden. Bei der Wahl der Größe des Zeitfensters sollte die erwartete Anzahl RFID-Transponder mit in Betracht gezogen werden, da bei einem zu großen Zeitfenster viele Zeitslots ungenutzt bleiben [Vog02]. Ist das Zeitfenster jedoch zu klein gewählt, kommt es häufig zu Kollisionen und die Zahl der nötigen Anfragerunden, um alle RFID-Transponder zu erkennen, steigt stark an. Bei probabilistischen Antikollisionsalgorithmen ist generell nicht sichergestellt, dass nach einer gewissen Zeit alle im Bereich des Lesegeräts befindlichen RFID-Transponder erkannt werden.

4 Auswahlkriterien

Bei der Wahl eines geeigneten RFID-Systems für eine bestimmte Anwendung spielen die folgenden Kriterien eine wichtige Rolle: die Lesereichweite, die Datentransferrate, die Geschwindigkeit, mit der verschiedene RFID-Transponder im Ansprechbereich erkannt werden, die Störanfälligkeit für Rauschen und andere Fehlerquellen sowie die Kosten von RFID-Transpondern und Lesegeräten. Diese Auswahlkriterien hängen direkt von den grundlegenden, technischen Eigenschaften eines RFID-Systems, wie sie in Kapitel 3 beschrieben wurden, ab. Tabelle 1 fasst einige der Eigenschaften, gegliedert nach Frequenzbereichen, nochmals zusammen.

Tabelle 1. RFID-Eigenschaften

	LF 0-135 kHz	HF 3-30 MHz	UHF 200 MHz-2 GHz	MW > 2 GHz
Art der Kopplung	Induktive Kopplung (arbeitet im Nahfeld)		Elektromagnetische Kopplung (arbeitet im Fernfeld)	
Typische Frequenz	134,2 kHz	13,56 MHz	868 MHz (EU) 915 MHz (USA)	2,45 GHz 5,8 GHz
Typische Lesereichweite	< 1,5 m	< 1,0 m	Passive Transponder: < 3 m (EU bei 0,4 W) ca. 3-5 m (EU bei 2 W, geplant) ca. 5-7 m (US bei 4 W)	
Negative Umgebungseinflüsse	<ul style="list-style-type: none"> • Abschirmung • leitfähige Materialien (z.B. Metall) 		<ul style="list-style-type: none"> • Abschirmung • Absorption, Reflexion, Brechung 	
Einflüsse der Transponder untereinander	Antennen-Verstimmung bei engliegenden Transpondern		Verzerrung der Funkmuster aufgrund von Antennenkopplung	

4.1 Lesereichweite

Die Lesereichweite ist eines der wichtigsten Auswahlkriterien für ein RFID-System. Betrachtet man die typische Lesereichweite, so werden RFID-Systeme in drei Klassen unterteilt: Systeme, die bis zu einer Reichweite von 1 cm arbeiten, werden als *Close-Coupling-Systeme* bezeichnet. Sie arbeiten mit induktiver Kopplung und werden hauptsächlich in sicherheitsrelevanten Anwendungen wie Zugangskontrollsystemen oder Bezahlssystemen eingesetzt. *Remote-Coupling-Systeme* arbeiten ebenfalls mit induktiver Kopplung, aber im Entfernungsbereich von bis zu einem Meter. Die Sendefrequenz liegt je nach Anwendung typischerweise bei 135 kHz oder 13,56 MHz. Systeme mit einer Reichweite von über einem Meter werden als *Long-Range-Systeme* bezeichnet. Sie arbeiten typischerweise mit Sendefrequenzen von 868/915 MHz oder 2,5 GHz. Verschiedene Hersteller bezeichnen jedoch auch RFID-Systeme mit einer Reichweite von bis zu einem Meter als Long-Range-Systeme. Generell hängt die erzielbare Lesereichweite von sehr vielen Faktoren ab, unter anderem von:

- der Sendefrequenz des Lesegeräts,
- dem Energieverbrauch des integrierten Schaltkreises (Mikrochip) des RFID-Transponders,
- der Verbindung zwischen Mikrochip und Antenne des RFID-Transponders,
- der Größe, Form und Qualität der Antenne des RFID-Transponders,
- der Orientierung der Antenne des RFID-Transponders zum Lesegerät,
- dem Design der Antenne des Lesegeräts,
- der Empfindlichkeit des Lesegeräts,
- der Sendeleistung des Lesegeräts,

- den zur Anwendung kommenden Zulassungsbestimmungen des Einsatzlandes,
- den Umgebungsbedingungen (in Gebäuden bzw. im Freien) und
- der Anfälligkeit gegenüber anderen Funk-Signalquellen.

Es ist daher schwierig, die Lesereichweite verschiedener RFID-Systeme zu vergleichen. Unter idealen Bedingungen, d.h. einer perfekten Ausrichtung von RFID-Transponder und Antenne des Lesegeräts, einer Sichtverbindung zwischen RFID-Transponder und Lesegerät, Vorschriften für Sendeleistungen der USA, wenig Rauschen, keiner Absorption oder Reflexion durch Objekte in der Nähe und einem Durchmesser der Antenne des RFID-Transponders von ca. 15 cm, kann ein RFID-System, das im UHF-Band operiert, eine Lesereichweite von 5 bis 7 m erreichen. Unter realen Bedingungen ist diese Reichweite nur selten zu erzielen. Für semi-aktive RFID-Systeme liegt die Lesereichweite bei bis zu 15 m, bei aktiven Systemen bis zu 100 m. LF- und HF-Systeme haben eine typische Lesereichweite von 1-1,5 m. Verglichen mit UHF-Systemen sind sie allerdings weniger fehleranfällig gegenüber Umwelteinflüssen.

4.2 Datenübertragungs- und Erkennungsrate

Hohe Datenübertragungsraten sind wichtig, falls eine große Datenmenge vom Speicher des RFID-Transponders in kürzester Zeit gelesen werden soll. Für LF- und HF-Systeme (ISO-Standards 15 693 und 14 223) liegt die Datenübertragungsrate bei ca. 5 kbit/s. Allerdings erlauben neuartige RFID-Systeme im HF-Bereich, die dem ISO-Standard 18 000 Part 3 Mode 2 entsprechen, Datenraten von über 100 kbit/s. UHF-Systeme des ISO-Standards 18000 Part 6 Mode A erreichen ca. 50 kbit/s. Die Datenübertragungsrate beeinflusst unter anderem auch, wie viele RFID-Transponder pro Sekunde erkannt werden können. Die Erkennungsrate hängt zusätzlich noch von der Wahl des Antikollisionsalgorithmus, der Länge der Seriennummern auf den RFID-Transpondern und den Abfertigungszeiten der Nachrichten ab. Typische Erkennungsraten liegen bei 10-30 RFID-Transpondern pro Sekunde für LF- und HF-Systeme und bei 100-500 RFID-Transpondern pro Sekunde für UHF-Systeme.

4.3 Störungsanfälligkeit

Da es sich bei RFID-Transpondern um kostengünstige elektronische Elemente handelt und die passiven Systemen ohne eigene Energieversorgung arbeiten, sind sie relativ anfällig für verschiedene Störungen wie Übertragungsfehler, Kollisionen bei nichtdeterministischen Antikollisionsalgorithmen, ungünstige Ausrichtung und Verstimmung der Transponder-Antennen sowie Flüssigkeiten und Metall in der Umgebung.

Übertragungsfehler manifestieren sich als Bit-Fehler verursacht, die auftreten, falls Daten, wie die Seriennummer des RFID-Transponders, über einen Frequenzkanal übertragen werden, auf dem starkes Rauschen herrscht. Damit das Lesegerät

Bit-Fehler in den Daten erkennen kann, übertragen RFID-Transponder zusätzlich zu den Daten eine Prüfsumme. Am häufigsten kommt dabei der Cyclic-Redundancy-Check (CRC) zum Einsatz. Die Wahrscheinlichkeit für Bit-Fehler ist in einer Umgebung mit starkem Rauschen offensichtlich größer als in rauschfreien Umgebungen. Im LF-Bereich wird normalerweise stärkeres Rauschen durch atypische Sender wie z.B. Schweißanlagen oder Motoren hervorgerufen. Im HF- und UHF-Bereich wird Rauschen hauptsächlich durch andere Datensender verursacht, die auf dem gleichen Frequenzkanal wie das RFID-System übertragen. Im 2,45 GHz- Band sind dies z.B. Bluetooth- und WLAN-Systeme.

Manche RFID-Systeme verwenden nichtdeterministische Antikollisionsalgorithmen basierend auf dem ALOHA-Prinzip (siehe Kapitel 3.3). Da sich bei diesen Algorithmen die RFID-Transponder zufällig einen Zeitpunkt zum Senden aussuchen, kann es zu fortgesetzten Störungen durch Kollisionen kommen und das Lesegerät kann dann die RFID-Transponder, die zur selben Zeit gesendet haben, nicht erkennen. Bei RFID-Systemen, die einen deterministischen Antikollisionsalgorithmus einsetzen, treten solche Probleme nicht auf.

Bei induktiv gekoppelten RFID-Systemen hängt die induzierte Spannung im RFID-Transponder von der Ausrichtung der Fläche der Spule des RFID-Transponders zum Magnetfeld, das vom Lesegerät erzeugt wird, ab. Bei einer senkrechten Ausrichtung ist die Spannung maximal, bei einer parallelen Ausrichtung wird dagegen keine Spannung induziert und der RFID-Transponder ist daher vom Lesegerät nicht zu erkennen. Das bedeutet, dass es bei einer zufälligen Ausrichtung der RFID-Transponder vorkommen kann, dass bestimmte RFID-Transponder nicht erkannt werden. Dieses Problem lässt sich durch mehrere Leserantennen, die verschiedene räumliche Ausrichtungen haben, lösen. Auch bei elektromagnetisch gekoppelten Systemen tritt dieses Problem auf, jedoch hat es hier eine andere Ursache. Da die ausgesendete elektromagnetische Welle polarisiert ist, wird die Spannung im RFID-Transponder maximal, sobald die RFID-Transponderantenne auf die Polarisationsrichtung der Leseantenne ausgerichtet ist. Ist sie nicht ausgerichtet, wird nur eine geringere Spannung im RFID-Transponder erzeugt. Dies kann im Extremfall dazu führen, dass er nicht vom Lesegerät erkannt wird. Dieses Problem wird durch zirkulär polarisierte Antennen des Lesegeräts oder durch mehrere Antennen, die verschiedene räumliche Ausrichtungen haben, gelöst, wobei dies in einer reduzierten Reichweite resultiert.

Bei passiven induktiv gekoppelten RFID-Systemen befindet sich auf dem Schaltkreis des RFID-Transponders normalerweise ein Schwingkreis, um die induzierte Spannung zu verstärken und damit die Lesereichweite zu erhöhen (siehe Kapitel 3.2). Dadurch sind diese RFID-Transponder jedoch empfänglich für bestimmte Verstimmungseffekte. Der Schwingkreis ist in diesem Fall nicht mehr auf die Sendefrequenz des Lesegeräts gestimmt, was die Lesereichweite stark reduzieren kann. Solche Effekte werden unter anderem durch eng aufeinander liegende RFID-Transponder, oder auch durch Metall und dielektrische Medien in der Umgebung, hervorgerufen.

Metalle in der Umgebung haben auch noch einen anderen negativen Effekt auf induktiv gekoppelte RFID-Transponder: Sie stören den magnetischen Fluss und schwächen damit die Energiekopplung zwischen Lesegerät und RFID-

Transponder, was eine weitere Verringerung der Lesereichweite zur Folge hat. Werden RFID-Transponder direkt auf eine Metalloberfläche aufgebracht, können sie meistens überhaupt nicht mehr gelesen werden. Unter bestimmten Bedingungen können metallische Objekte das Antennenfeld auch verzerren und damit die Lesereichweite in bestimmte Richtungen sogar erhöhen. Bei Anwendungen, die auf einen definierten Lesebereich vertrauen, kann es somit zu Erkennungen von RFID-Transpondern kommen, die sich eigentlich außerhalb des erwarteten Lesebereiches befinden.

Bei elektromagnetisch gekoppelten RFID-Systemen werden elektromagnetische Wellen, die vom Lesegerät ausgesandt werden, nicht nur von den RFID-Transpondern reflektiert, sondern auch von allen anderen Objekten in der Umgebung. Die reflektierten Wellen überlagern sich mit den vom Lesegerät ausgesandten Wellen und führen auf der einen Seite zu lokalen Dämpfungen bis hin zu Auslöschungen, auf der anderen Seite zu Verstärkungen. Die Reflexionen resultieren so in einem unberechenbaren Verhalten der elektromagnetischen Wellen und damit einer unvorhersagbaren Lesereichweite. Diese Effekte sind insbesondere in Umgebungen mit großen, metallischen Objekten zu erwarten.

Bei Flüssigkeiten oder organischen Materialien in der Umgebung kann es ferner zu Absorptionen des magnetischen oder elektromagnetischen Feldes kommen. Während im LF-Bereich Absorption keine Rolle spielt und im HF-Bereich nur eine geringe, kommt es im UHF- und MW-Bereich jedoch zu starken Absorptionen der elektromagnetischen Wellen und damit zu einer bedeutenden Verringerung der Lesereichweite, wenn das Signal organische oder wasserhaltige Materialien durchdringen muss.

4.4 Speicherstruktur

RFID-Transponder kann man anhand ihrer Speicherstruktur und ihres Datenzugriffs grob in die folgenden drei Kategorien einteilen:

- RFID-Transponder, die nur eine Identifikationsnummer besitzen. Das Beschreiben kann bei der Herstellung in der Fabrik bzw. später vor der ersten Benutzung geschehen. Da der Datenspeicher für die Identifikationsnummer nur einmalig beschrieben und dann beliebig oft ausgelesen wird, handelt es sich um einen WORM-Speicher (write-once-read-many-times).
- RFID-Transponder mit einer Identifikationsnummer und einem zusätzlichen Datenspeicher, der beschrieben und gelesen werden kann. Üblicherweise ist die Reichweite für Schreibzugriffe geringer als für Lesezugriffe, da hierfür mehr Energie benötigt wird.
- RFID-Transponder mit einer komplexen Speicherstruktur und Sicherheitsmerkmalen. Üblicherweise ist der Datenspeicher solcher RFID-Transponder in verschiedene Bereiche unterteilt, für die der Zugriff durch Schlüssel oder Challenge-Response-Verfahren geregelt werden kann.

Je nach Anwendungsanforderungen genügen RFID-Transponder, die nur eine Identifikationsnummer besitzen. Diese Identifikationsnummer dient dann als Refe-

renz auf weitere Daten in einer Datenbank oder einem Informationssystem. RFID-Transponder mit zusätzlichem Datenspeicher werden hauptsächlich dann eingesetzt, falls ein Zugriff auf eine Datenbank aus Zeit- oder Verbindungsgründen nicht möglich ist. In diesem Fall sind die Daten direkt im Speicher des RFID-Transponders abgelegt.

4.5 Transponderkosten

Die Gesamtkosten eines RFID-Transponders werden, neben den anteiligen Kosten für das Design des Mikrochips und weiterer Gemeinkosten, durch die folgenden Einzelkosten bestimmt:

- Herstellungskosten für den Mikrochip
- Herstellungskosten für die Spule bzw. Antenne des RFID-Transponders
- Kosten für das Zusammensetzen der Spule bzw. Antenne und des Mikrochips des RFID-Transponders
- Kosten für das Aufbringen des RFID-Transponders auf den Träger

Die Herstellungskosten für den Mikrochip des RFID-Transponders hängen von der Größe des Mikrochips, der Anzahl herzustellender Mikrochips und der Verarbeitungstechnologie ab. Da der Datenspeicher bei der Chipherstellung zu Buche schlägt, nehmen die Kosten mit steigender Komplexität der Speicherstruktur zu, insbesondere für Datenspeicher mit Sicherheitsmerkmalen. Da sich eine Spule mit wenigen Windungen drucktechnisch herstellen lässt, bei vielen Windungen aber gewickelt werden muss, sind die Herstellungskosten eines 135 kHz RFID-Transponders, der eine höhere Windungszahl benötigt, höher als die eines 13,56 MHz RFID-Transponders. Die Kosten für RFID-Transponder im Lowcost-Bereich (nur mit Seriennummer und einfacher Bauform) liegen derzeit bei ca. 20-50 Cent, für komplexere RFID-Transponder im Euro-Bereich. Der Preis, den ein Anwender für einen RFID-Transponder zu bezahlen hat, ist zusätzlich abhängig von der Anzahl der bestellten Transponder. Der für die nächste Jahren erwartete verstärkte Einsatz der RFID-Technologie wird dazu führen, dass dank Massenproduktion die RFID-Transponderpreise weiter fallen werden.

5 Standards für die Schnittstelle zwischen RFID-Transpondern und Lesegeräten

Die verschiedenen Normen, die die Schnittstelle zwischen RFID-Transpondern und Lesegeräten spezifizieren, beschreiben die grundlegende Funktion eines RFID-Systems und sollen garantieren, dass RFID-Transponder und Lesegeräte verschiedener Hersteller miteinander kommunizieren können. Dabei definieren die Normen sowohl die physikalische Schicht mit Trägerfrequenz, Codierung, Timing, Modulationsverfahren und Datenübertragungsraten als auch das Vielfachzugriffsverfahren und den Befehlsumfang. Die entsprechenden Standardisierungs-

bemühungen sind vor allem vom Joint Technical Committee 1 (JTC1) der International Standards Organisation (ISO) und der International Electrotechnical Commission (IEC), sowie in jüngster Zeit vom Auto-ID Center bzw. von der Nachfolgeorganisation EPCglobal unternommen worden.

Im HF-Frequenzband wurde Mitte 2001 vom ISO-Gremium ISO/IEC JTC SC17 („Contactless integrated circuit cards“) der ISO-Standard 15 693 veröffentlicht, der unter dem Titel „Identification cards – contactless integrated circuit(s) cards“ die Funktionsweise von kontaktlosen Chipkarten beschreibt (siehe Tabelle 2). Obwohl diese Norm eigentlich auf die Standardisierung von Chipkarten mit einer Reichweite bis zu einem Meter abzielt, die z.B. zur Zugangskontrolle verwendet werden können, bildet er die Basis vieler Smart-Label-Produkte (siehe Abbildung 2), da die Funktionsweise identisch ist. Die Energieversorgung der induktiv gekoppelten RFID-Transponder erfolgt dabei durch ein magnetisches Wechselfeld, das vom Lesegerät mit einer Sendefrequenz von 13,56 MHz erzeugt wird. Bei den Datenübertragungsraten kann zwischen einem „long-distance-mode“ und einem „fast-mode“ unterschieden werden. Der „fast-mode“ kann vor allem bei Lesegeräten mit verminderter Reichweite oder mit zusätzlicher Abschirmung, wie z.B. Tunnel-Lesern, zum Einsatz kommen.

Der Vorteil von RFID-Systemen, die auf dem ISO-Standard 15 693 basieren, liegt vor allem in der weltweiten Verfügbarkeit des Frequenzbandes. Allerdings erlaubt die im Verhältnis zum Trägersignal niedrige maximale Feldstärke der Modulationsseitenbänder nur eine relativ geringe Übertragungsrate zwischen Lesegerät und RFID-Transpondern (1,6 kbit/s bzw. 6,6 kbit/s im „long-distance-mode“) und eine eingeschränkte Reichweite (üblicherweise weniger als einen Meter). Die Reichweite eines RFID-Systems ist allerdings wie oben beschrieben von vielen Faktoren abhängig, so dass unter Umständen auch Reichweiten von über einem Meter möglich sind. Die geringe Datenübertragungsrate resultiert auch in einer relativ geringen Anzahl von RFID-Transpondern, die pro Zeiteinheit erkannt werden können (ca. 20 Transponder pro Sekunde).

Das für die Normung von Chipkarten verantwortliche ISO-Gremium SC17 hat im gleichen Jahr noch eine weitere Norm veröffentlicht (ISO 14 443), welche sich von ISO 15 693 vor allem durch eine höhere Datenübertragungsrate (106 kbit/s) und eine geringere Reichweite (weniger als 15 cm) unterscheidet. Wegen der relativ hohen Datenübertragungsrate werden RFID-Transponder dieser Norm vor allem bei Applikationen eingesetzt, wo größere Datenmengen zwischen Lesegerät und RFID-Transponder bzw. kontaktloser Chipkarte ausgetauscht werden müssen.

Neben dem hauptsächlich für die Normierung von Chipkarten zuständigen ISO-Gremium SC 17 ist für die weitere Normierung im RFID-Umfeld die Arbeitsgruppe 4 des ISO-Gremiums SC 31 verantwortlich. Dort werden zurzeit für die verschiedenen Frequenzbereiche LF, HF, UHF und MW weitere Normen für die Luftschnittstelle erstellt (siehe Tabelle 2). Dabei ist zu beachten, dass eine einzige Norm, wie z.B. ISO 18 000 Part 3, aus mehreren miteinander nicht-kompatiblen RFID-Protokollen, in diesem Fall Mode 1 und Mode 2, bestehen kann, die außer der Sendefrequenz wenig gemeinsam haben.

Tabelle 2. Übersicht über die verschiedenen Normen, die die Schnittstelle zwischen RFID-Transpondern und Lesegeräten spezifizieren

Fre- quenz	Gremium	Bezeich- nung	Name	Veröffent- lichung
LF	ISO	11 785	Radio-Frequency Identification of Animals – Technical Concepts	1996
LF	ISO	14 233	Radio-Frequency Identification of Animals – Advanced Transponders	2003
LF	ISO	18 000 Part 2 Type A/B	Parameters for Air Interface Communications below 135 kHz	2004
HF	ISO	15 693	Identification Cards – Vicinity Cards	2001
HF	ISO	14 443	Identification Cards – Proximity Cards	2001
HF	ISO	18 000 Part 3 Mode 1/2	Parameters for Air Interface Communications at 13.56 MHz	2004
HF	EPCglobal	Class 1	13.56 MHz ISM Band Class 1 Radio Frequency Identification Tag Interface Specification	2003
UHF	ISO	18 000 Part 6	Parameters for Air Interface Communications at 860 to 930 MHz	2004
UHF	EPCglobal	Class 0 (Gen. 1)	860 MHz-935 MHz Class 0 Radio Frequency Identification Tag Protocol Specification	2003
UHF	EPCglobal	Class 1 (Gen. 1)	860 MHz-960 MHz Class 1 Radio Frequency Identification Tag Radio Frequency & Logical Communication Interface Specification	2002
UHF	EPCglobal	Class 1 (Gen. 2)	UHF Class 1 Generation 2 Protocol	2004
MW	ISO	18 000 Part 4	Parameters for Air Interface Communications at 2.45 GHz	2004

ISO 18 000 Part 3 Mode 1 ist mit der zuvor vorgestellten Norm ISO 15 693 kompatibel. Mode 2 erlaubt durch ein anderes Modulationsverfahren und ein Vielfachzugriffsverfahren, bei dem die RFID-Transponder auf bis zu acht verschiedenen Frequenzkanälen antworten, eine deutlich höhere Datenübertragungsrate. Dieser „High-Performance-Mode“ ist daher besonders geeignet für Anwendungen, bei denen in kurzer Zeit eine große Anzahl von RFID-Transpondern erkannt bzw. ausgelesen werden muss.

Obwohl beim Auto-ID Center bzw. der Nachfolgeorganisation EPCglobal der Fokus auf der Entwicklung von Standards für das UHF-Frequenzband liegt, gibt es dort ebenfalls eine Norm im HF-Bereich. Die Class 1 HF-Norm unterscheidet sich – zumindest auf der physikalischen Schicht – allerdings nur geringfügig von ISO 15 693 bzw. ISO 18 000 Part 3 Mode 1.

Im UHF-Bereich gibt es eine ganze Reihe verschiedener Normen (siehe Tabelle 2), die nicht miteinander kompatibel sind. EPCglobal plant allerdings langfristig

die beiden Protokolle erster Generation durch das Protokoll der zweiten Generation abzulösen [EPC04]. Außerdem wird von Seiten EPCglobals darüber nachgedacht, das UHF Class 1 Protokoll der zweiten Generation als weiteren Mode in die ISO-Norm 18 000 Part 6 einzubringen [EPC04].

Die verschiedenen UHF-Protokolle unterscheiden sich in der physikalischen Schicht, im verwendeten Vielfachzugriffsverfahren, sowie im Befehlsumfang, der unterstützt wird. Ein direkter Leistungsvergleich hinsichtlich Reichweite und Störungsempfindlichkeit, aber auch Kosten von RFID-Transpondern und Lesegeräten, ist nur schwer möglich, da diese Eigenschaften auch von standardunabhängigen Faktoren, wie z.B. der Leistungsaufnahme des Mikrochips, den verwendeten Fertigungsprozessen, bzw. vom Antennen- und Lesegerätedesign beeinflusst werden.

Neben den Standardisierungsbemühungen im HF- und UHF-Bereich gibt es unter ISO 18 000 auch Normen für den LF- und MW-Frequenzbereich (siehe Tabelle 2). Der LF-Teil entspricht dabei im Wesentlichen der früheren Norm ISO 11 785 und deren Weiterentwicklung ISO 14 233.

Bei der Datenorganisation auf den RFID-Transpondern kann man grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Ansätzen unterscheiden. In sämtlichen Teilen der ISO-Norm 18 000 wird der einzelne RFID-Transponder durch eine eindeutige Identifikationsnummer gekennzeichnet, die bereits während des Herstellungsprozesses auf den Mikrochip des RFID-Transponders geschrieben wird. Informationen über das mit dem RFID-Transponder gekennzeichnete Produkt können vom Anwender im Speicher des RFID-Transponders abgelegt werden, wobei die Größe des Speichers variabel ist und lediglich ein Maximalwert spezifiziert ist (z.B. 8 kB für ISO 18 000 Part 6 Mode A). Die RFID-Transponder, die einer der Spezifikationen des Auto-ID Centers bzw. der Nachfolgeorganisation EPCglobal entsprechen, enthalten lediglich eine eindeutige Identifikationsnummer, den „Electronic Product Code“ (EPC), jedoch keinen zusätzlichen Speicher. Im EPC selbst sind Informationen zu dem Produkt, an dem der RFID-Transponder befestigt ist, kodiert, wie z.B. Herstellercode, Produkttyp und Seriennummer [EPC03].

Darüber hinaus gibt es neben den Normen für die Luftschnittstelle auch solche, die die Kommunikation zwischen Lesegerät und IT-Infrastruktur betreffen. 2003 wurde unter der Bezeichnung ISO 19 789 damit begonnen, ein solches „Application Program Interface“ zu entwickeln. Basierend auf der amerikanischen Norm ANSI NCITS 256:2001 wurde hierzu ein bereits bestehender, vollständiger Vorschlag eingereicht [Wal04]. Im Rahmen von EPCglobal wird zurzeit ebenfalls an einem „Reader Protocol“ gearbeitet, das den standardisierten Zugriff auf die Lesegeräte erlauben soll.

Literatur

[EPC03] EPCglobal (2003) EPC Tag Data Standards 1.1 Rev.1.24. www.epcglobalinc.org/standards_technology/EPCTagDataSpecification11rev124.pdf

- [EPC04] EPCglobal (2004) Review of Hardware Action Group's UHF Generation 2 Protocol Working Group Activities
- [ERC02] European Radiocommunications Committee (2002) ERC recommendation 70-03 relating to the use of short range devices, www.ero.dk/documentation/docs/docfiles.asp?docid=1622
- [FCC01] Federal Communications Commission (2001) Part 15 – Radio Frequency Devices. Code of Federal Regulations, Title 47, Vol 1, Chapter 1: 667ff, www.ero.dk/documentation/docs/docfiles.asp?docid=1622
- [Fin02] Finkenzeller K (2002) RFID-Handbuch – Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag, München, Wien
- [Rfi03] RFID Journal (2003) Japan Opens Up UHF for RFID Use. June 30, 2003, www.rfidjournal.com/article/view/477
- [RTP00a] Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) (2000) Verfügungen 61/2000: Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Benutzung durch die Allgemeinheit für induktive Funkanlagen des nichtöffentlichen mobilen Landfunks, Amtsblatt 12
- [RTP00b] Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) (2000) Verfügungen 73/2000: Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Benutzung durch die Allgemeinheit für Funkanlagen geringer Leistung des nichtöffentlichen mobilen Landfunks in ISM Frequenzbereichen, Amtsblatt 18
- [SWE02] Sarma SE, Weis SA, Engels DW (2002) RFID Systems and Security and Privacy Implications. In: Cryptographic Hardware and Embedded Systems, Springer Verlag, Lecture Notes in Computer Science, Vol 2523, pp 454-469
- [Vog02] Vogt H (2002) Multiple Object Identification with Passive RFID Tags. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 2002
- [Wal04] Walk E (2004) Aktuelle Situation der RFID Standards für die Logistik. Jahrbuch ident 2004, ident Verlag und Service