



Untersuchung der Störwirkung von LTE auf SRD Anwendungen bei 868 MHz

M. Welpot, S. Wunderlich, and I. Gaspard

Hochschule Darmstadt, Haardtring 100, 64295 Darmstadt, Hessen, Deutschland

Correspondence to: I. Gaspard (ingo.gaspard@h-da.de)

Received: 13 December 2013 – Accepted: 2 September 2014 – Published: 10 November 2014

Kurzfassung. Moderne Hausautomatisierungssysteme, Alarmanlagen oder auch Funk-Zugangssysteme in Haus und Automobil setzen auf frei nutzbare Frequenzen in ISM/SRD-Bändern. Die rasante Zunahme an privaten und kommerziell genutzten Applikationen im SRD-Band bei 868 MHz und der Ausbau der LTE-Mobilfunknetze im Frequenzbereich unterhalb von 1 GHz (“Digital Dividend”) wirft zunehmend die Frage nach der Funkverträglichkeit dieser Systeme untereinander auf. Während die SRD-Funkmodule auf eine geringe Sendeleistung von $\sim +14$ dBm beschränkt sind (Ralf and Thomas, 2009), beträgt die maximale LTE-Sendeleistung im Uplink nach (ETSI-Norm, 2011) $+23$ dBm. Zusammen mit der Einführung von LTE im Frequenzbereich unterhalb 1 GHz als DSL-Ersatz vor allem in ländlichen Gebieten, ergibt sich damit als mögliches Störzenario, dass durch die Aussendung des LTE-Endgerätes im Bereich von ca. 850 MHz die SRD-Funkverbindungen bei 868 MHz insbesondere dann gestört werden, wenn die Antennen beider Funksysteme räumlich nahe zueinander angeordnet sind und folglich nur eine geringe zusätzliche Entkopplung der Systeme bieten. In der vorliegenden Arbeit wird das LTE-Störpotential auf SRD-Empfänger praxisnah untersucht.

1 Grundlagen

Durch Frequenzzuweisungen sind die nutzbaren Frequenzbereiche für Funkanwendung definiert und somit voneinander getrennt. Die entsprechenden Normen und Standards der Funktechnologien erlauben dessen ungeachtet Nebenbandaussendungen, welche ein Störpotential für fremde, frequenznahe Systeme darstellen können. Selbiges gilt nach (ETSI-Norm, 2011) auch für LTE, folglich besteht ein LTE-Signal nicht nur aus einem Spektrum in dem zugewiesenen

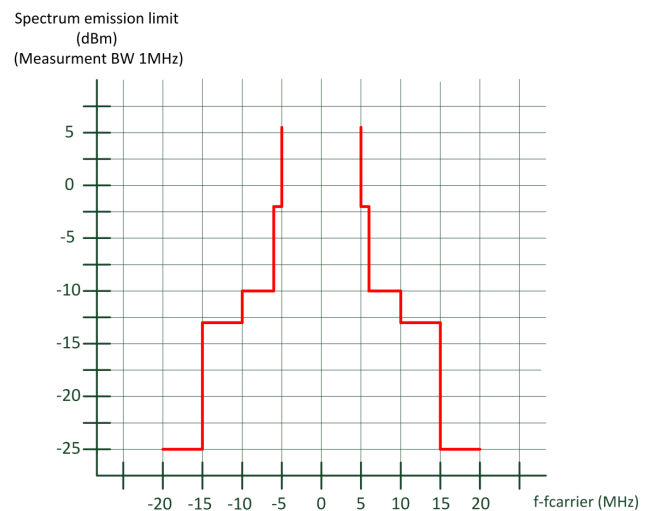


Abb. 1. “General UE Spectrum Emission Mask”.

Band, sondern auch aus spektralen Anteilen in Nebenbändern. Die maximal zulässigen Nebenbandaussendungen der untersuchten LTE-Konfiguration sind in Abb. 1 dargestellt.

In dem Fall der untersuchten 868 MHz SRD-Applikationen entsteht ein LTE-Störpotential nicht nur durch die Nebenbandaussendungen, sondern ebenfalls durch die zulässige LTE-Sendeleistung eines Endgerätes. Durch den Aufbau des SRD-Empfängers und die Nebenbandaussendungen von LTE können prinzipiell zwei Störeffekte durch den Sendebetrieb von LTE-Endgeräten in der Nähe von SRD-Empfängern erwartet werden. Zunächst können die LTE-Nebenbandaussendungen vereinfacht als zusätzliches Rauschen innerhalb der Empfangsbandbreite des SRD-Empfängers betrachtet werden. Bei konstanter SRD-Sendeleistung sinkt hierdurch der

Signal-zu-Rauschverhältnis (SNR) am SRD-Empfänger. In Folge ist ein Anstieg der Paketfehlerrate (PER) bei sonst unveränderten Parametern zu erwarten. Bei einem gegebenen minimal benötigten SNR für eine fehlerfreie Übertragung sinkt damit die Übertragungreichweite in Anwesenheit eines aktiven, störenden LTE-Endgerätes. Die wahrgenommene Störleistung des LTE-Signals an dem SRD-Empfänger steht in direktem Zusammenhang mit der Bandbreite des Eingangsfilters: mit zunehmender Bandbreite wächst auch die aufgenommene Rauschleistung an. Der zweite Effekt, der durch die Störung auftreten wird, ist eine Sättigung des SRD-Empfängers. Die gesamte Eingangsleistung des Nutzsignals in Kombination mit einer erhöhten LTE-Störleistung sorgt in diesem Fall für Intermodulationsprodukte, welche durch Nichtlinearitäten in den Empfängerkomponenten verursacht werden. Ebenso kommt es durch die hohe Eingangsleistung zu einer Verschiebung des Arbeitspunktes in den aktiven Verstärkerstufen des Empfängers. Dieser Sättigungseffekt wird auch als Blocking bezeichnet, da das Störsignal den Empfänger blockiert, auch bei ausreichend großem SNR (Nibler, 1998). Die Eingangsselektion des Eingangsfilters ist hierbei ausschlaggebend. Durch eine ausreichende Unterdrückung des LTE-Störsignals in dem SRD-Empfänger kann dementsprechend Blocking vermieden werden.

2 Konzeption und Realisierung der Messung

2.1 Konzept

In den folgenden Messungen sollen beide in den Grundlagen erläuterten Störfälle messtechnisch erfasst werden. Dazu wird die Auswirkung der LTE-Störung auf die Paketfehlerrate (PER) der SRD-Verbindung untersucht. Um ein Vergleichsmaß gegenüber der ungestörten SRD-Kommunikation zu schaffen, wird die Untersuchung in zwei Schritten erfolgen. In einer ersten Messung wird die ungestörte SRD-Paketfehlerrate in Abhängigkeit der empfangenen Nutzsignalleistung gemessen. In der zweiten Messung wird das LTE-Störsignal dem Nutzsinal überlagert und ebenfalls die Paketfehlerrate gemessen. Für unterschiedliche LTE-Szenarien werden hierbei verschiedene Parameter wie Störsignalleistung, LTE-Sendefrequenz und LTE-Bandbreite variiert.

2.2 Laboraufbau

Für die Messung der Paketfehlerrate wird zunächst eine SRD-Kommunikation, bestehend aus SRD-Sender und Empfänger, realisiert. Die Funkmodule wurden auf Leitungsverbindungen umgebaut und die Funkdämpfung über variable Dämpfungsglieder nachgebildet. Zur zusätzlichen Entkopplung der Umgebung wurde der SRD-Empfänger in einer HF-Schirmkammer untergebracht. Externe Störeinflüsse können hierdurch reduziert werden und gleichzeitig wird

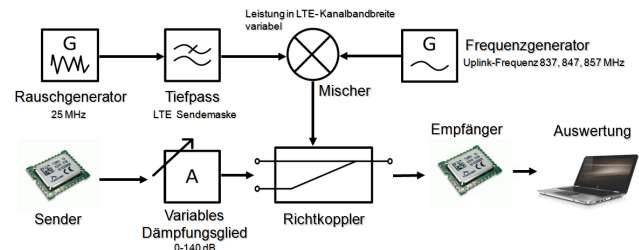


Abb. 2. Aufbau des Störfestigkeitstests.

eine reproduzierbare Messumgebung geschaffen. Das LTE-Störsignal wird mit Hilfe eines Richtkopplers dem Nutzsinal überlagert und dem SRD-Empfänger zugeführt. Eine große Herausforderung stellt hierbei die Erzeugung des LTE-Signals dar. Hierzu wird mit einem Generator ein Rauschsignal mit konstanter Rauschleistungsdichte über eine Bandbreite von 25 MHz erzeugt. Mit Hilfe eines Tiefpassfilters wird eine Rauschformung entsprechend der LTE-Sendemaske vorgenommen. Das geformte Rauschen wird anschließend mit Hilfe eines IQ-Modulators auf die entsprechende LTE-Sendefrequenz umgesetzt.

Unter der Annahme, dass die zulässige maximale Sendeleistung von +23 dBm innerhalb des LTE-Kanals gleichförmig verteilt ist, kann ein fester Bezug zwischen LTE-Kanalleistung und Nebenbandausendungen hergestellt werden. Die Differenz zwischen Leistung im LTE-Kanal und den zulässigen Nebenbandausendungen stellt das Filterentwurfskriterium dar. Für den Messaufbau wurden zwei Filter simuliert und gebaut. Das erste Filter entspricht einem 10 MHz breiten LTE-Signal (d.h. 50 Ressourcenblöcke) mit maximalen zulässigen Nebenbandausendungen (Worst-Case-Szenario), während das zweite Filter mit 400 kHz Bandbreite und verminderten Nebenbandausendungen einen realistischeren Nutzungsfall darstellt. Mit einer Bandbreite von 400 kHz entspricht dieses Filter einer Zuweisung von 2 Ressourcenblöcken.

2.3 Messungen

Der SRD-Sender außerhalb der Schirmkammer sendet während der Messung eine definierte Anzahl von Paketen an den SRD-Empfänger im Inneren der Schirmkammer. Am SRD-Empfänger wird die Anzahl korrekt empfangener Pakete gemessen und gespeichert. Durch die vermessene Sendeleistung des SRD-Senders und die vermessene Dämpfung über alle Komponenten sowie Leitungen ist die Nutzsignalleistung am SRD-Empfänger bekannt. Durch die Variation einer zusätzlichen Dämpfung zwischen beiden SRD-Funkmodulen lassen sich unterschiedliche Nutzsignalleistungen nachbilden.

Die am SRD-Empfänger anliegende LTE-Störleistung entspricht jeweils einem Wert der sich durch die maximal zulässige Sendeleistung nach Norm (+23 dBm) und dem

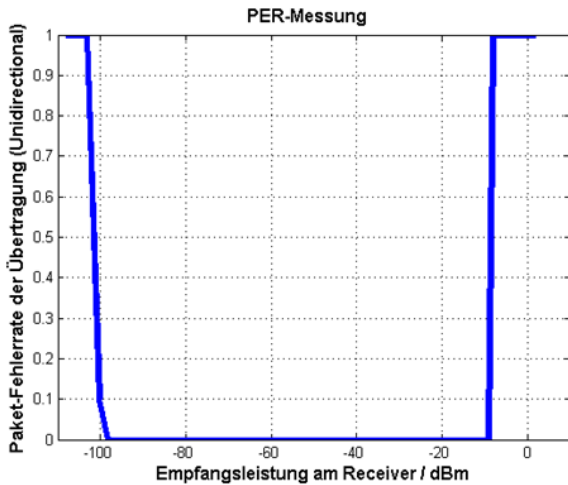


Abb. 3. Ungestörter SRD-Empfänger.

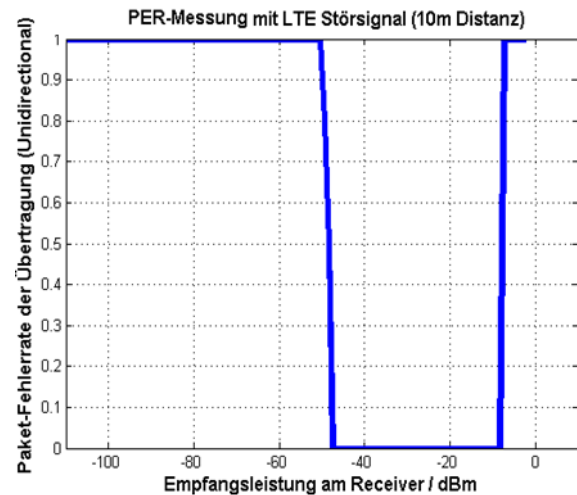


Abb. 4. Gestörter SRD-Empfänger.

Freiraumausbreitungsmodell gemäß Gl. (1) ergibt. Somit lässt sich der räumliche Abstand zwischen LTE-Endgerät und SRD-Empfänger variabel nachbilden.

$$a_{/dB} = 10 \cdot \log_{10} \left[\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{G_T \cdot G_R} \right] \quad (1)$$

a = Freiraumdämpfung in dB; r = Distanz zwischen Sender u. Empfänger

λ = Wellenlänge; G_T = Antennengewinn der Sendeantenne

G_R = Antennengewinn der Empfangsantenne

Der Antennengewinn für SRD-Empfänger und LTE-Endgeräte ist gerätespezifisch und soll daher in der Messung keinen Einfluss auf die Untersuchung nehmen. Er wird in dem Messaufbau zu 1 beziehungsweise zu 0 dBi angenommen.

Durch die definierte Anzahl an gesendeten Paketen und der gespeicherten Anzahl korrekt empfangener Pakete lässt sich die Paketfehlerrate bestimmen. Die Messung der Paketfehlerrate wurde für alle zweckmäßigen Nutzsignalleistungen (~ 0 – 110 dBm) sowie jeweils einem räumlichen LTE-Endgerät Abstand von 1 bis 20 m durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Messung für alle Nutzsignalleistungen ohne LTE-Störung durchgeführt.

Gemessen wurde die Paketfehlerrate für zwei LTE-Bänder (852–862 MHz sowie 832–842 MHz). Ebenfalls wurden alle Messungen mit zwei verschiedenen LTE-Bandbreiten durchgeführt. Zu beachten ist, dass auch im Fall des schmalbandigeren Filters die Leistung des LTE-Signals $+23$ dBm beträgt, die Leistungsdichte ist demnach erhöht.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen anhand der gemessenen Paketfehlerrate die Leistungsfähigkeit der ungestörten und durch LTE gestörten SRD-Empfänger auf.

Aus Abb. 3 lässt sich die gemessene Paketfehlerrate für den ungestörten Empfänger als Funktion der Empfangsleistung entnehmen. Im Bereich niedriger Empfangsleistung ist ein Empfang für Leistungen kleiner -100 dBm nicht mehr möglich, die Paketfehlerrate steigt abrupt von 0 auf 1 aufgrund des zu geringen Signal zu Rauschverhältnisses. Auch im Bereich hoher Empfangsleistung ist ein Empfang ab Eingangsleistungen von ca. -10 dBm aufgrund von Sättigungseffekten nicht mehr möglich.

Durch eine mehrstufige Fehlerschutzcodierung kommt es zu einem "harten" Übergang zwischen fehlerfreier Übertragung und Ausfall des Empfangs bei Änderung der Empfängereingangsleistung im Bereich von weniger als 1 dB.

Abbildung 4 zeigt das identische Empfängermodul bei Störung durch ein LTE-Endgerätes. Die Störleistungsleistung entspricht hierbei einem Abstand von 10 m (Freiraum), einer Bandbreite von 10 MHz (50 Ressourcenblöcke) und einer Sendefrequenz von 857 MHz. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass gegenüber dem ungestörten Fall ein stärkeres Nutzsignal für eine Übertragung mit geringer Paketfehlerrate notwendig ist. Das LTE-Störsignal reduziert den Signal zu Rauschabstand der SRD-Kommunikation. Für eine Nutzsignalleistung von ca. -48 dBm und geringer weist das vorhandene Störsignal eine zu hohe Leistung auf, die Paketfehlerrate steigt. Der zuvor beschriebene Fehlerschutz sorgt für einen sprunghaften Anstieg des PER-Wertes. Die untere Grenze für auftretende Sättigungseffekte bei ungefähr -10 dBm bleibt durch das LTE-Störsignal nahezu unverändert, die Störleistung hierfür ist bei einem Abstand von 10 m zu gering.

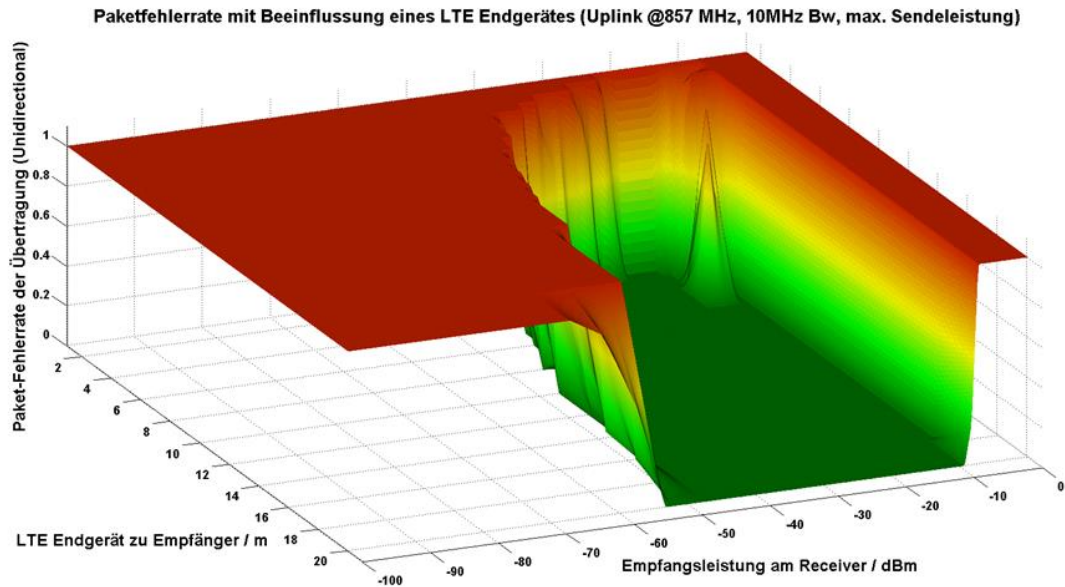


Abb. 5. Gestörter SRD-Empfänger als 3-D-Darstellung.

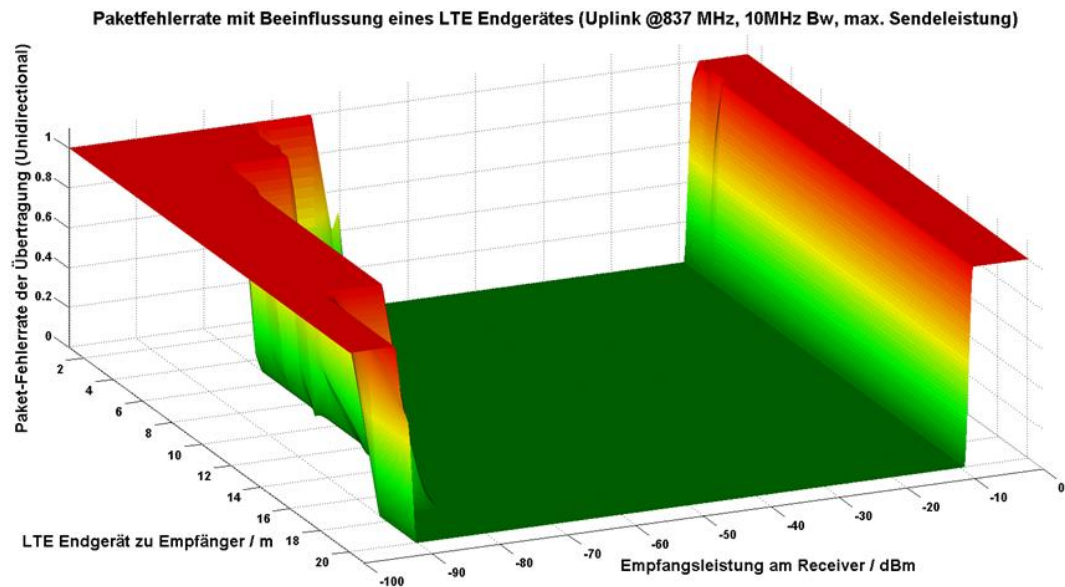


Abb. 6. Gestörter SRD-Empfänger (erhöhter Frequenzabstand).

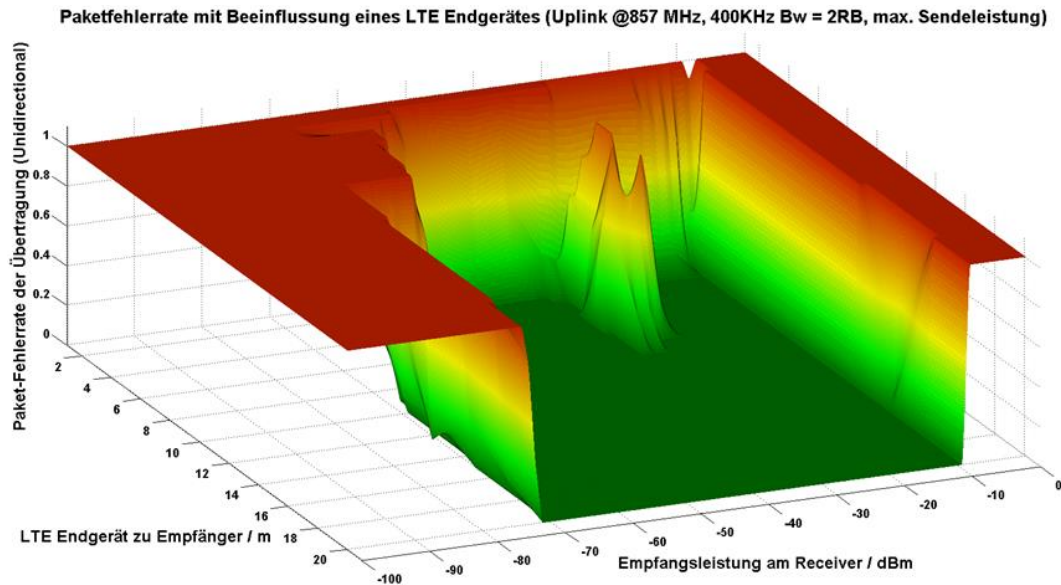


Abb. 7. Gestörter SRD-Empfänger (Störsignal mit verminderter Bandbreite).

In Abb. 5 lassen sich die Ergebnisse für eine komplette Messreihe entnehmen. Die Paketfehlerrate wurde für eine variable Störleistung und variable Nutzsignalleistung gemessen. Die LTE-Konfiguration entspricht hierbei der vorangegangenen Abb. 4. Dem 3-D-Plot lässt sich entnehmen, dass die Paketfehlerrate durch das vorhandene LTE-Signal gegenüber der ungestörten Kommunikation (Abb. 1) erhöht ist. Ein starkes Nutzsignal im Bereich -10 bis -55 dBm (20 m Abstand) beziehungsweise -10 bis -40 dBm (6 m Abstand) ist für die fehlerfreie Übertragung notwendig. Im Umkehrschluss kann aus Abb. 5 entnommen werden, dass die erforderliche Nutzsignalleistung für eine niedrige Paketfehlerrate mit abnehmenden LTE-Abstand steigt. Bei einem Abstand von 1,5 m des LTE-Endgerätes ist eine Übertragung nicht möglich. Bei niedrigem Abstand zwischen SRD-Empfänger und LTE-Endgerät (1 bis 5 m) lassen sich zusätzlich Sättigungseffekte im Receiver durch hohe Eingangsleistung feststellen.

In einem weiteren Störszenario wurde die LTE-Sendefrequenz variiert. Sie entspricht damit einem anderen Mobilfunkbetreiber (837 MHz). Der Frequenzabstand zwischen LTE-Endgerät und SRD-Empfänger ist hierdurch erhöht. Die entsprechend gemessene Paketfehlerrate ist Abb. 6 zu entnehmen. Die Darstellung zeigt, dass das Störpotential in diesem Fall gegenüber Abb. 5 geringer ausfällt. Die Störung des SRD-Systems ist durch den erhöhten Frequenzabstand wie erwartet vermindert. Die endliche Bandbreite des SRD-Eingangsfilters sorgt bei erhöhtem Frequenzabstand für eine zusätzliche Entkopplung der Systeme.

Die Abb. 7 stellt die Ergebnisse der Messung mit einem 400 kHz breitem LTE-Spektrum, entsprechend einer Zuweisung von 2 Ressourcenblöcken, dar. Die LTE-Sendefrequenz

beträgt in diesem Fall erneut 857 MHz. Die Abbildung zeigt eine Paketfehlerrate die trotz veränderter Spektrumsmaske näherungsweise dem Ergebnis aus dem Worst-Case-Szenario (Abb. 5) entspricht. Schlussfolgern lässt sich, dass die Sendeleistung des LTE-Endgerätes den größten Anteil für das Störpotential ausmacht, unabhängig davon, ob diese schmalbandig oder breitbandig auf wenige bzw. viele Ressourcenblöcke verteilt wird. Die spektrale Verteilung der Störleistung hat also nur geringen Einfluss auf die SRD-Kommunikation. Die unwesentliche Verbesserung der Paketfehlerrate gegenüber dem Worst-Case 10 MHz LTE-Szenario entsteht durch die reduzierten Nebenbandaussendungen des zweiten, schmalbandigen Filters.

4 Zusammenfassung

Zusammengefasst lassen die vorliegenden Ergebnisse folgende Schlüsse zu:

- Eine Beeinflussung von SRD-Funkverbindung bei 868 MHz durch LTE-Signale ist vorhanden. Die Beeinflussung der SRD-Dienste durch LTE ist als stark zu bewerten. Auch bei einer hohen Nutzsignalleistung ist die Paketfehlerrate gegenüber der ungestörten SRD-Kommunikation merklich erhöht. Bei hoher Störleistung kommt es zu einem kompletten Abbruch der SRD-Funkverbindung.
- Durch verschiedene LTE-Szenarien konnte nachgewiesen werden, dass die Störsignalleistung im LTE-Kanal ausschlaggebend für die SRD-Paketfehlerrate ist. Die spektrale Leistungsverteilung durch unterschiedliche

Bandbreitenzuweisungen ist unwesentlich für den Störeinfluss.

- Ein starkes Nutzsignal (d.h. niedriger Abstand zwischen SRD-Sender und SRD-Empfänger) sorgt bedingt durch Sättigungseffekte für eine erhöhte Paketfehler-rate und gegebenenfalls für den Abbruch der SRD-Funkverbindung.
- Generell weisen die untersuchten SRD-Empfänger eine geringe Eingangsselektion auf. Einfache, breitbandige Eingangsfilter sperren die LTE-Störsignale nur ungenügend. In einer weiteren Untersuchung konnte der grundlegende Einfluss der Empfangsfilter-Bandbreite in Zusammenhang mit LTE als Störquelle messtechnisch ermittelt werden.

Acknowledgements. Dieses Projekt (HA-Projekt-Nr.: 344/12-34) wird im Rahmen von Hessen Modellprojekte aus Mitteln der LOEWE-Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz, Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben gefördert (Projektantrag, 2012).

Edited by: W. Mathis

Reviewed by: Y. Wang and one anonymous referee

Literatur

- ETSI-Norm TS 136 101 V10.4.0, ETSI – European Telecommunications Standards Institute, LTE: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) – User Equipment (UE) radio transmission and reception, November, 2011.
- Nibler, F.: Hochfrequenzschaltungstechnik: Funktionen und Anwendung von Halbleitern und Leitungen in Hochfrequenzschaltungen, Expert Verlag, 1998.
- Projektantrag Universelles und modulares funkbasiertes System für die intelligente Gebäudetechnik (Smart Home), April 2012.
- Gessler, R. and Krause, T.: Wireless-Netzwerke für den Nahbereich: eingebettete Funksysteme: Vergleich von standardisierten und proprietären Verfahren, Springer-Verlag, 2009.